



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Vorgespannter Aramidbeton

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

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch

unter der Mitarbeit von

Dipl.-Ing. Dr.techn. Sinan Korjenic
und

Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Deix

E206

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Florian Kloibhofer

0627637

Mitterpabneukirchen 24
4363 Pabneukirchen

Wien, am 25.10.2012

eigenhändige Unterschrift

A handwritten signature in blue ink that reads 'Kloibhofer Florian'.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Sommer 2012 als Diplomarbeit an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien und wurde am dortigen Institut für Hochbau und Technologie erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch für die Möglichkeit an dem Faserverbundkunststoff Aramid in Verwendung von ultra hochfesten Beton zu forschen. Für die Anregung zu dieser Arbeit, die wertvollen Ratschläge und die stetige Bereitschaft zu wissenschaftlichen Diskussionen, gilt der Dank Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Sinan Korjenic, die für das Gelingen dieser Arbeit von großer Bedeutung waren.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Assistenten und Kollegen bedanken, die mir bei den Probenvorbereitungen im Labor stets mit Rat und Tat beiseite standen. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Deix für die großzügige Mithilfe bei den Laborversuchen, für die Auswertung der Versuchsergebnisse und dessen Tür für meine Fragen stets offen stand.

Vor allem danke ich meinem privaten Personenkreis, dass sie immer an mich geglaubt haben und mich insbesondere moralisch, während der Ausarbeitung der Diplomarbeit unterstützt haben. Hervorheben möchte ich dabei meine Familie die mich in jeglichen Situation bestmöglich unterstützt. Erwähnen möchte ich dabei meine Eltern, die mir für das Studium immer die notwendigen Mitteln zu Verfügung stellten.

Wien, im August 2012

Florian Kloibhofer

Kurzfassung:

Das Institut für Hochbau und Technologie an der TU Wien forscht schon seit Jahren an dem Faserverbundkunststoff Aramid. Im Rahmen dieses Versuchsprogrammes wurden im Labor Plattenbalken aus ultra hochfesten Beton erstellt und diese im sofortigem Verbund vorgespannt. Als Vorspannmaterial werden in kunststoffgetränkte Aramidbündel verwendet. Bei der Versuchsdurchführung werden die Plattenbalken bis zum Versagen auf Biegung belastet.

Für die Qualitätsprüfung des Betons werden neben den Frischbetonprüfungen noch Druckversuche und Biegezugversuche durchgeführt. Bei der Frischbetonprüfung wird die Fließfähigkeit, die Frischbetondichte und der Luftgehalt bestimmt.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit $f_{c,cube}$ erfolgt an vier 100x100x100 mm Würfeln. Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit f_{cf} werden Probekörper mit den Abmessungen 40x40x160 mm gefertigt und an einer Prüfanlage getestet.

Zur Bestimmung der Verbundeigenschaften von Aramid mit Beton werden neben den Plattenbalken auch noch Betonquader mit einbetonierten Aramidstäben erstellt. Die Faserverbundkunststoffbewehrung ist über eine definierte Länge mit dem ultra hochfesten Beton verbunden, um mit Auszugsversuchen die Verbundspannung prüfen zu können. Dabei werden jeweils zwei Betonquader mit einem Aramidstab im unteren Bereich miteinander zusammengeschlossen und mit Hilfe eines Stahlgelenkes an der Oberseite so auf Biegung belastet, dass das Aramid auf Zug beansprucht wird. Das Prinzip dieses Prüfverfahrens ist, einen Probekörper durch einfache Biegung bis zum vollständigen Verbundversagen der Bewehrung zu beaufschlagen. Während der Belastung wird an beiden Enden der Bewehrung der Schlupf gemessen.

Die gefertigten Plattenbalken sind 1000 mm lang und 70 mm hoch. Die Breite der Platte ist 60 mm und der Steg ist 30 mm breit. Das Vorspannmaterial hat einen Durchmesser von 5,5 mm und liegt 25 mm unterhalb der Schwerachse. Es werden vier Plattenbalken erstellt, wobei einer mit 12 KN, 9 KN, 5,5 KN und einer ohne Vorspannung belastet wird. Bei der Versuchsdurchführung werden die Proben mit einem 4-Punkt-Biegeversuch beansprucht. Die Last wird bis zum Bruch der Proben gesteigert, wobei speziell auf die Erstrissbildung und auf das Endbruchverhalten geachtet wird.

Die mittlere Betondruckfestigkeit $f_{c,cube}$ beträgt 168,2 N/mm². Bei den Biegeversuchen ergibt sich die mittlere Biegezugfestigkeit f_{cf} von 10,67 N/mm². Bei den Verbundversuchen zeichnet sich Aramid hauptsächlich durch den Haftverbund aus, wobei beim Versagen wegen der hohen Zugfestigkeit immer die Verbundspannung relevant ist. Bei der Bestimmung der Festigkeit am Plattenbalken ist vor dem Verbundversagen immer ein Querkraftversagen bei den Kräfteinleitungspunkten eingetreten.

Abstract:

The Institute for Engineering and Technology at the Vienna University of Technology explore for years into the fibre-reinforced polymers aramid. As a part of this test programmes we created in the laboratory T-beams of ultra high performance concrete. The beams were immediately prestressed with composite. Aramid is the reinforcement material into the beams. In the experiments the beams will be loaded to failure.

Fresh concrete tests, compression tests and bending tests are parts of the concrete quality inspection. The fresh concrete test include the flowability, the concrete density and the air content. The determining of the compressive strength are made at four 100x100x100 mm cubes. The bending tests were done on blocks with the dimension 40x40x160 mm on a testing facility.

Furthermore the aramid composite properties were determined from concrete blocks with concreted aramidrods. The fibre-reinforced polymers aramid is connected to the ultra-high strength concrete by a defined length. The composite test was made with pullout tests. The twice high performance concrete blocks are connected at the bottom with an aramidrod, at the top side of the blocks are a steel joint. If the blocks are loaded by a bend, the steel joint caused a tension into the fibre-reinforced polymers. During the test the way transducer measure the slippage.

The T-beams are 1000 mm long and 70 mm high. The plate of the beam is 60 mm and the bottom of the T-beam is 30 mm wide. The prestressing material is made of aramid with a diameter of 5,5 mm. The prestressing material is situated 25 mm below the axle. Four prestressed beams are created, one with 12 KN, 9 KN, 5,5 KN and the last without prestressed. At the check the beams are destroyed by a 4-point-bendtest. The first peak and the final fracture behavior are important for the evaluation of the test results.

168,2 N/mm² is the middle of the cube compressive strength $f_{c,cube}$. The middle of the bend-test result f_{cf} is at 10,67 N/mm². The main point of the bond tests from aramid into ultra high performance concrete is the adhesive bond. The bond of the surface is not so strong as the tension, because aramid has in direction of the longitudinal axis an very strong tensile strength. By the tests of the T-beams are the shear failure authoritative for the strength, because the beams are broken on the place were the force get into the beams. Shear cracks are responsible for this breaks.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Kenntnisse	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Beton	4
2.2.1	Geschichte	4
2.2.2	Ausgangsstoffe	5
2.2.3	Herstellung	9
2.3	Ultra High Performance Concrete (UHPC)	11
2.3.1	Allgemeines	11
2.3.2	Mischungsanteile	11
2.3.3	Gesteinskörnung	12
2.3.4	Wassergehalt	14
2.3.5	Zement	15
2.3.6	Quarzmehl	16
2.3.7	Mikrosilika	17
2.3.8	Fließmittel	19
2.3.9	Fasern	19
2.3.10	Weitere Zusatzmittel	21
2.3.11	Mischtechnik	23
2.3.12	Einbringen, Verdichten, Nachbehandeln	24
2.3.13	Materialeigenschaften	25
2.4	Aramid	29
2.4.1	Grundlagen	29
2.4.2	Ausgangsstoffe	29
2.4.3	Arten	30
2.4.4	Herstellung	30
2.4.5	Anwendung	31
2.4.6	Materialeigenschaften	32
2.5	Glasfaser	33
2.5.1	Grundlagen	33
2.5.2	Ausgangsstoffe, Arten	33
2.5.3	Herstellung	34
2.5.4	Materialeigenschaften	35
2.6	FVK Bewehrung	38
2.6.1	Allgemein	38
2.6.2	Geschichte	38
2.6.3	Funktionsweise	38
2.6.4	Arten von Faserverbundkunststoffen	39
2.6.5	Kunstharzmatrix	41
2.6.6	Herstellung	43

2.6.7	Materialeigenschaften FVK	44
2.6.8	Brandverhalten	46
2.6.9	Biegeverhalten	46
2.6.10	Querkraftverhalten	46
2.6.11	Verbundverhalten	47
2.7	Vorspannung	48
2.7.1	Grundlagen der Vorspannung	48
2.7.2	Ausführungsarten der Vorspannung	48
3	Herstellung des Probekörpers	53
3.1	Beschreibung der Einzelteile	53
3.1.1	Vorbereitung der Schalung	53
3.1.2	Einkleben der Aramidstangen	55
3.1.3	Prüfraumen	56
3.1.4	Kraftmessdose	56
3.1.5	Druckzylinder	56
3.1.6	Beton	56
3.2	Herstellung der einzelnen Plattenbalken	58
4	Prüfung der Proben	60
4.1	Prüfung von Frischbeton	60
4.1.1	Selbstfließversuch	60
4.1.2	Frischbetonrohddichte	60
4.1.3	Luftgehalt	60
4.2	Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit	62
4.3	Bestimmung der Biegezugfestigkeit	67
4.4	Bestimmung der Verbundfestigkeit	73
4.4.1	Verbundversuch	73
4.4.2	Versuchsvorbereitung	73
4.4.3	Versuchsergebnisse	75
4.5	Bestimmung der Festigkeit am vorgespannten Plattenbalken	85
4.5.1	Zielsetzung	85
4.5.2	Querschnittswerte des Plattenbalken	85
4.5.3	Prüfaufbau	85
4.5.4	Berechnungen	89
4.5.5	Erstrissbildung	92
4.5.6	Bruchverhalten	97
5	Zusammenfassung und Erkenntnisse	103

1 Einleitung

Bei der folgenden Diplomarbeit wird das Verhalten von Aramid als Bewehrung in ultra hochfesten Beton erforscht. Das Institut für Hochbau und Technologie an der TU Wien forscht schon seit Jahren an dem Faserverbundkunststoff Aramid, jedoch sind noch keine Erfahrungen beim Biegeverhalten von vorgespannten Aramid-Fasern als Bewehrung in ultra hochfesten Beton gemacht worden. Als Voraussetzung dieser Diplomarbeit wurden Auszugsversuche von Aramid in UHPC vorgenommen um entsprechende Einbindelängen im Beton zu untersuchen. Der Einsatz von UHPC bei vorgespannten, gebündelten Aramid-Fasern erklärt sich, aus dem im Verhältnis zu Stahl, geringen E- Modul. Eine große Dehnung des Vorspannmaterials bewirkt bei einer Biegebeanspruchung eines Balken eine geringe Betondruckzonenhöhe (siehe Abbildung 1).

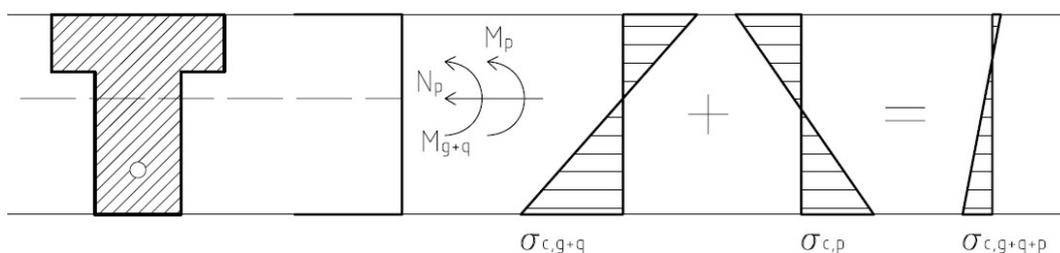


Abbildung 1: Spannungsverteilung exzentrische Vorspannung

Um ein frühzeitiges Versagen der Druckzone zu verhindern wird ein ultra hochfester Beton mit hoher Druckfestigkeit verwendet. Um die Breite der Druckzone zu vergrößern werden zur Sicherheit die Versuche an Plattenbalken durchgeführt. Wegen der hohen Verbundfestigkeit von UHPC ergeben sich kurze Übertragungslängen bei der Einleitung der Vorspannkräfte in den Betonquerschnitt.

Die Versuche werden an einem schlanken 1 m langen, 7 cm hohen und 6 cm breiten Plattenbalken durchgeführt. Die Platte selbst hat eine Dicke von 2 cm (siehe Abbildung 52).

Der Hauptteil der Diplomarbeit liegt in der Untersuchung der Plattenbalken auf Biegung. Durch einen 4-Punkt-Biegeversuch werden die UHPC Balken mit den Verbundkunststoffbündel aus Aramid-Fasern geprüft. Das Faserbündel besitzt einen Durchmesser von 5,5 mm.

Neben den Biegeversuchen werden noch Verbundfestigkeitsprüfungen von einem, über eine definierte Länge eingespannten, Stab in einem Betonprisma durchgeführt. Der Zugstab besteht dabei aus Faserverbundkunststoff aus Aramid-Fasern mit einem Durchmesser von 5,5 mm. Die zwei Betonprismen, in denen jeweils der Zugstab befestigt ist, bestehen aus dem gleichen Material welches, bei den vorgespannten Biegeversuchen verwendet wird. In Abbildung 2 ist eine Skizze vom Versuchsaufbau des Verbundversuches dargestellt. Der letzte Teil der Versuche beinhaltet die Prüfung der vorhandenen Betongüte auf Biegezug-, und Druckfestigkeit. Im

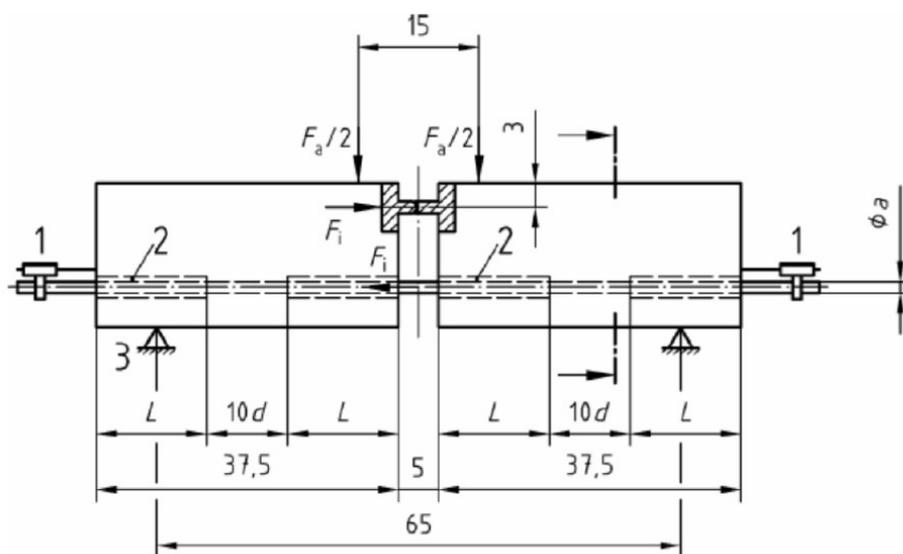


Abbildung 2: Längsschnitt einer Probe für Verbundversuche [3]

Zuge des ersten Betoniervorgangs für die vorgespannten Plattenbalken sind ferner die Betonprismen für die Verbundfestigkeitsprüfung, Prismen für das Biegezugverhalten und die Würfel für die Druckversuche erstellt worden. Die Druckfestigkeit von Beton wird in Österreich im Allgemeinen an Würfeln geprüft. Die dabei ermittelte Druckfestigkeit wird als Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ bezeichnet. Die Biegezugfestigkeit f_{cf} wird an Hand eines 3-Punkt-Biegeversuches an Prismen mit den Abmessungen von 4x4x16 cm festgestellt.

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Allgemeines

Der erste Teil der Diplomarbeit widmet sich den Grundlagen der verwendeten Werkstoffe und Anwendungen. Sie dienen als tieferes Verständnis der Materie und bilden dadurch die Basis für die im weiteren Teil der Arbeit dokumentierten Versuche.

Die Werkstoffwissenschaft ist ein Teil der Materialwissenschaft und befasst sich mit Werkstoffen die in Maschinen, Anlagen und Apparate verwendet werden. Die gewonnen Erkenntnisse aus dieser Wissenschaft ermöglichen eine Weiterentwicklung der Werkstoffe entsprechend der chemischen und physikalischen Eigenschaften. Ein wesentlicher Teil in der Werkstoffwissenschaft ist die Werkstoffprüfung, die zu Zahlen und Vergleichswerte führt. Dabei kann ein Werkstoff hinsichtlich Belastbarkeit, Reinheit und Fehlerfreiheit überprüft werden. Basierend auf normierten Werkstoffkennwerten und Prüfergebnissen werden weitere Vorgehensweisen erarbeitet, um gezieltere Werkstoffbeschaffenheiten zu erforschen. Die Werkstoffprüfung teilt sich in zwei Hauptbereiche ein. Die zerstörende und die zerstörungsfreie Prüfung. Um Ergebnisse unterschiedlicher Prüfanstalten miteinander Vergleichen zu können gibt es Richtlinien und Verordnungen, in denen vom Versuchsaufbau bis zur Durchführung der Prüfung alle Schritte niedergeschrieben und genormt sind. Werden diese genormten Verordnungen eingehalten, können die Vergleichswerte als vergleichbare Versuchsergebnisse wahrgenommen werden.

2.2 Beton

Beton ist nicht gleich Beton. Die Eigenschaften des Beton lassen sich durch die Variationen der Mischungen an die jeweiligen Anforderungen anpassen. Im Grundrezept werden verschiedene Materialien, die in der Natur vorkommen, vermischt. Der Zement ist eine Kombination aus Kalkstein und Ton, der mit Wasser und Gesteinskörner vermischt wird, wodurch ein hartes Gestein entsteht. Durch die Zugabe von Wasser entsteht der sogenannte Zementleim, der die Zuschlagstoffe miteinander verbindet. Unterschiedliche Rezepturen ergeben unterschiedliche Betonarten. Wie schwer oder leicht, wärmedämmend oder druckfest ein Beton sein muss, hängt immer von den geforderten Eigenschaften ab. Der Feuerschutz, Schallschutz, Wärmeschutz, Brandschutz und die Tragfähigkeit können durch die Variation der Bestandteile verändert werden.

Beton ist vielseitig und wirtschaftlich, er lässt sich in Schalungen gießen und kann jede beliebige Form annehmen. Neben dem Ort- bzw. Transportbeton ist die Vielfalt durch Fertigbetonbauteile enorm gestiegen. Wegen den strengeren Qualitätskontrollen bei Betonfertigteilen werden Bauzeit und Baukosten gesenkt. Egal ob Betonziegelsteine, vor Ort betonierte Bauteile oder Betonfertigteile, Beton kann jedem Anspruch gerecht werden.

2.2.1 Geschichte

Beton scheint für die meisten Menschen ein moderner Begriff zu sein. Jedoch die Kenntnisse um das Wissen über die frühzeitlichen Bindemitteln, einer Mischung aus Kalk, Ziegelmehl und Puzzolanerde, reicht sehr weit zurück. Dieses Bindemittel benutzten Handwerker (in der heutigen Türkei) bereits vor 14.000 Jahren um Steine zu mauern. Ungefähr im 3. Jahrhundert gelangten diese Kenntnisse über Griechenland nach Italien. In der Römerzeit wurde der Beton unter der Bezeichnung „*opus caementitium*“ verwendet. Bei der Herstellung des künstlichen Gemisches wurden Kies und Sand mit einem kalkhaltigen Bindemittel und Wasser zu einem Werkstoff zusammengefügt. Als Ausgangsstoffe für das Bindemittel wurden gebrannter Kalkstein und Ton verwendet. Damals wurde der Beton entweder zwischen Holzschalungen oder zwischen den Außenschalen aus Mauersteinen eingesetzt (siehe Abbildung 3). Der Kern dieser Mauerarten besteht aus dem *opus caementitium*, dieser übernimmt die tragende Funktion der Mauer. Die eindrucksvollsten Bauwerke aus *opus caementitium* sind die Aquädukte und das Pantheon in Rom. Bei der Kuppel im Pantheon, die einen Durchmesser von 43 m hat, wurde mit einem leichten Zuschlagsstoff im Beton gearbeitet.

Im Mittelalter geriet der römische Baustoff weitgehend in Vergessenheit. Das Wissen um die richtige Mischung des *opus caementitium* ging nahezu verloren. In dieser Zeit wurden für Profanbauten der Mörtel aus einem Gemisch von Lehm, Sand, Kalk und Gips hergestellt. In der Mitte des 18. Jahrhunderts wurde dann mit der Entwicklung des Beton in der Neuzeit begonnen. Bei der Suche nach einem wasserbeständigen Mörtel wurden Versuche mit einem Gemisch aus gebrannten Kalk

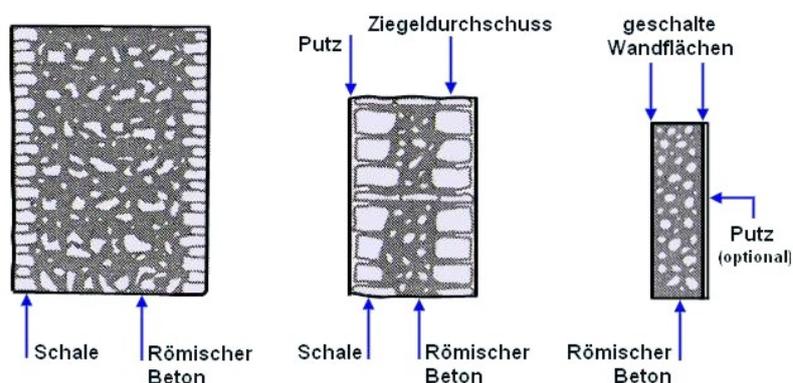


Abbildung 3: Mauerbeispiele aus opus caementitium

und Tonen durchgeführt. Die Erfindung der Mischung von Portlandzement und von hydraulischen Bindemittel, zu Beginn des 19. Jahrhunderts, war der Beginn der modernen Betontechnologie.

Eine weitere große Erfindung war der Stahlbeton. Erstmals wurden Mitte des 19. Jahrhunderts in Frankreich Bauteile mit Stahleinlagen verstärkt. Joseph Lambot baute ein Ruderboot aus eisenverstärkten Zementmörtel und Joseph Monier bewehrte seine Pflanzenkübel mit einem Eisengeflecht. Beide wollten das leicht verrottende Holz durch widerstandsfähigeres Material ersetzen.

Im 20. Jahrhundert haben sich die technologischen Grundlagen der Stahlbetonbauweise, die Herstellungsverfahren und die Anwendungsgebiete kontinuierlich weiterentwickelt. Deshalb wird Beton als Baustoff des 20. Jahrhunderts bezeichnet. [11]

2.2.2 Ausgangsstoffe

Grundsätzlich werden die Ausgangsstoffe folgendermaßen unterschieden: [2]

- Zement
- Gesteinskörnung
- Wasser
- Zusatzstoffe
- Zusatzmittel

Die Grundanforderungen an die Ausgangsstoffe sind einerseits die Eignung für die Verwendung im Beton und andererseits dürfen sie zu keiner Verursachung von Korrosion beitragen (Chloridfreiheit). Weiters dürfen die Stoffe keine nachhaltige Beeinflussung der Dauerhaftigkeit des Betons aufweisen.

- Zement [2]
Die Zement- Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement werden in der ÖNORM EN 197-1 geregelt.
Der Zement wird in 5 Hauptgruppen eingeteilt:
 - CEM I: Portlandkompositzemente
 - CEM II: Portlandkompositzemente mit Zumahlstoffe
 - * Portlandhüttenzement
 - * Portlandflugaschenzement
 - * Portlandkompositzement
 - CEM III: Hochofenzement
 - CEM IV: Puzzolanzement
 - CEM V: Kompositzement

Zumahlstoffe werden dem Zement zur Steuerung seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften beigemischt. Die Zugabe und die Homogenisierung zum Zement erfolgt im Werk. Zusatzstoffe werden bei der Frischbetonherstellung im Gegensatz zu den Zumahlstoffen gesondert beigegeben. Die Unterscheidung der genormten Zemente erfolgt nach den Anteilen an Portlandzementklinker und der mengenmäßigen Zugabe von Hütten sand. Hütten sand ist großteils ein Abfallprodukt bei der Stahlproduktion und wird aus der Hochofenschlacke gemahlen. Bei der Druckfestigkeit des Zements wird zwischen 32,5, 42,5 und 52,5 N/mm² unterschieden. Die Normfestigkeit wird nach 28 Tagen gemessen. Die Festigkeiten werden noch zwischen einer normalen (N) und einer raschen (R rapide) Entwicklung der Anfangsfestigkeiten unterschieden. Die Zuordnung N oder R erfolgt über die Festigkeit nach 2 (oder 7) Tagen. Die Auswahlkriterien für Zemente sind unter anderen Ausführungszeitpunkt (Sommer-Winter), Ausschalfristen, Nachbehandlungsmethoden, Bauteilabmessungen und Umgebungstemperaturen. Bei heißen Temperaturen wird Zement mit geringer Wärmeentwicklung der Zusatzstoffe verwendet. Zement mit rascher Festigkeitsentwicklung wird bei kurzer Ausschalfrist und bei kurzer Nachbehandlung verwendet.

- Gesteinskörnung [2]
Die Gesteinskörnungen für Beton werden unter anderen in der ÖNORM EN 12620, Gesteinskörnungen für Beton beschrieben. Die verwendeten Gesteine können entweder aus natürlichen, künstlichen oder recycelten Vorkommen sein.
Natürliche Gesteine sind ausschließlich aus mineralischen Vorkommen mit anschließender mechanischer Aufbereitung. Künstliche Gesteinskörnungen sind auch aus mineralischem Ursprung, die jedoch unter Einfluss von thermischen oder sonstigen Prozessen industriell hergestellt werden. Bei Recycling

oder RC-Beton wird ein Naturstein oder ein auf natürliche Weise entstandener Kies durch eine recycelte Gesteinskörnung, d.h. aufbereitetem Bauschutt, ersetzt.

Die Dichte sowie der Wasseranspruch wird von der Kornzusammensetzung des Betonzuschlags bestimmt. Die Kornzusammensetzung der Gesteinskörner wird in Sieblinien dargestellt, die den jeweiligen Anteil in Gewichtsprozent zeigen. Für einen häufig verwendeten Beton ist es strebenswert, eine gute Verarbeitung des Frischbetons zu ermöglichen. Für diesen ist eine Sieblinie, im günstigen Bereich zwischen den Linien A und B zu wählen (siehe Abbildung 5). Mit sehr un stetigen Sieblinien ist eine sehr dichte Zusammensetzung des Beton möglich und daher eine große Dichte erzielbar. Es soll ein möglichst großes Größtkorn (GK) verwendet werden, um den Wasseranspruch sowie den daraus resultierenden Zementanteil verringern zu können. Faktoren wie Bauteilabmessungen und die Bewehrungsdichte schränken die Größe des GK ein. Als Größtkorn üblich sind GK 8, GK 16, GK 32 oder GK 63. Die Zuschlagstoffe bis zu einer Größe von 0,125 mm bilden mit dem Zement zusammen den Mehlkorngelbalt und steuern somit die Verarbeitbarkeit.

Die Dichte des Beton wird zum größten Teil von der Kornrohichte des Zuschlages bestimmt. Bei der Dichte des Beton kann folglich unterschieden werden:

– Leichtbeton

Bei Leichtbeton werden Zuschläge mit einer geringen Rohichte verwendet, die als Leichtzuschläge bezeichnet werden. Laut österreichische Betonnorm wird Leichtbeton als ein Beton bezeichnet, dessen Raumgewicht zwischen 800 und 2000 kg/m³ liegt. Als natürliche Zuschläge finden z.B. Bims, Lavasand und Lavakies und als künstliche Zuschläge z.B. Hüttensand, Blähton und Blähschiefer eine Anwendung. Die Leichtzuschläge unterscheiden sich zu einem Normalzuschlag hauptsächlich in der geringeren Kornrohichte zufolge der Porosität, geringeren Korndruck-, und Kornzugfestigkeit sowie im erhöhten Wasserbedarf bei der Herstellung des Beton. Die Vorteile des Leichtbeton liegen in der guten Wärmedämmung und in der flexiblen Bearbeitbarkeit.

– Normalbeton

Beton mit einer Rohichte über 2000 kg/m³, höchstens aber 2600 kg/m³ wird als Normalbeton bezeichnet. Verwendete Zuschläge aus natürliche Materialien sind z.B. Schotter, Kies, Sand. Diese stammen entweder aus natürlichen Ablagerungen oder aus Steinbrüchen. Künstliche Zuschlagstoffe, wie z.B. Hochofenschlake oder recycelter Betonbruch, kommen entweder wegen wirtschaftlichen oder technischen Aspekt in Anwendung.

– Schwerbeton

Bei Schwerbeton eingesetzte Zuschläge werden als Schwerzuschläge bezeichnet. Schwerbeton hat eine Rohichte über 2600 kg/m³ und be-

stehen hauptsächlich aus natürlichem Gestein wie z.B. Schwerspat, Hämatit oder Limonit. Selten sind auch künstliche Zuschlagsstoffe aus Schrott oder Schwermetallschlack im Einsatz. Dieser Beton wird unter anderem als Strahlenschutz, Ballastgewicht bei Widerlagern oder für Gründungssohlen unter dem Grundwasserbereich eingesetzt.

- ① Grobkörnung ③ Grob- bis Mittelkörnung ⑤ Feinkörnung
 ② Ausfallkörnung ④ Mittel- bis Feinkörnung

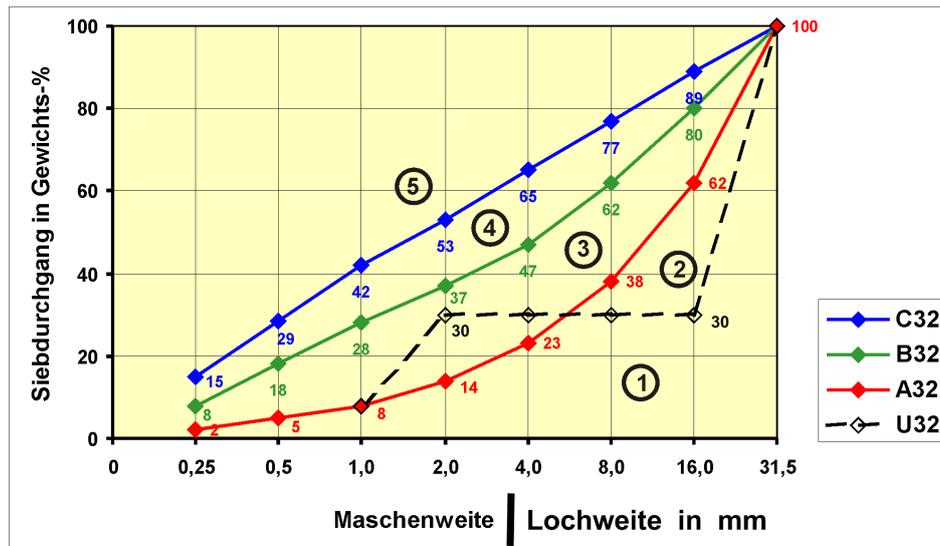


Abbildung 4: Sieblinie mit Größtkorn 32 mm

- Wasser [2]
 Als Zugabewasser bezeichnet man das Wasser, welches bei der Mischung von Beton zusätzlich eingebracht werden muss. Die Menge setzt sich aus dem benötigten Wasser, abzüglich der Menge die mit den Zuschlagsstoffen in die Mischung gelangt, zusammen. Das Zugabewasser wird einerseits benötigt, um den Beton verarbeitbar zu machen und andererseits zum chemischen und physikalischen Binden während dem Abbindeprozess. Bei zu wenig Wasser kann kein vollständiges chemisches Abbinden des Beton erfolgen und bei Wasserüberschuss wird zu viel Wasser in den Poren eingelagert.
- Zusatzstoffe [2]
 Es gibt zwei verschiedene Arten an Zusatzstoffen:
 - Typ I: Inaktive Zusatzstoff
 - * Gesteinsmehl
 - * Farbpigmente
 - Typ II: hydraulisch wirksame Zusatzstoffe

- * Flugasche
- * Hüttensandmehl
- * Microsilica

Gesteinsmehl wird zur Erhöhung des Mehlkorngeltes eingesetzt. Farbpigmente kommen beim Einfärben von Beton zur Anwendung. Die Zusatzstoffe vom Typ II werden für den wirksamen W/B-Wert und dem anrechenbaren Bindemittelgehalt berücksichtigt. Bei dem anrechenbaren Bindemittelgehalt wird der Zement und der Zusatzstoff mit dem k-Wert-Ansatz anteilmäßig zusammenaddiert. Die Flugasche ist ein Verbrennungsrückstand von Kohlenstaub in Kraftwerken. Hüttensand entsteht als Abfallprodukt bei der Eisenerzeugung im Hochofen. Microsilica ist ein feinkörniger Stoff, der bei der Herstellung von Siliciumlegierungen und Silicium entsteht. Je nach Zementart ist eine Zugabemenge von Zusatzstoffen von Typ II nur in einem begrenzten Ausmaß erlaubt.

- Zusatzmittel [2]
 - Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM)
Diese sind die am häufigsten verwendeten Zusatzmittel. Sie dienen zur Herstellung von Beton in fließfähiger Konsistenz.
 - Luftporenbildner (LP)
LP erzeugen im Beton eine Menge an kleinen Luftporen. In diesen Poren kann sich das, in den Kapillarporen, befindende Wasser beim Gefrieren ausdehnen. Die tatsächliche Menge der Luftporen ergibt sich aus der Kombination von einer Vielzahl an Faktoren wie Zementart, Sieblinie, Temperatur, Mischdauer, Verwendung anderer Zusatzmittel...
 - Verzögerer (VZ)
VZ verzögern die Anfangserhärtung des Frischbeton und verlängern daher die Verarbeitungszeit.
 - Stabilisatoren (ST)
ST verändern die chemischen Eigenschaften des Beton. Sie können den Abbindevorgang stoppen und ihn wieder starten.
 - Erstarrungsbeschleuniger (EB)
EB verkürzen die Abbindezeit und bewirkt eine schnellere Wärmeentwicklung. Sie sorgen für ein schnelles Erstarren und ermöglichen ein rasches Ausschalen.

Bei dem gleichzeitigen Einsatz von mehreren Zusatzmitteln muss immer eine Eignungsprüfung nachgewiesen werden.

2.2.3 Herstellung

Der Beton kann nach drei Herstellungsverfahren unterschieden werden: [2]

- **Baustellenbeton**
Baustellenbeton wird wie der Name schon sagt, in einem eigenen Werk, auf der Baustelle gemischt. Die verwendeten Ausgangsstoffe werden separat zur Baustelle gebracht und dort mit dem Anmachwasser vermengt. Diese Anwendung wird speziell bei Baustellen mit einem enormen Betonverbrauch oder bei Bauten mit langen Anfahrtswegen eingesetzt.
- **Transportbeton**
Transportbeton wird auch Fertigbeton genannt, da er schon fertig auf die Baustelle gebracht wird und nur noch eingebracht werden muss. Der Beton wird in stationären Betonmischwerken hergestellt und anschließend mit Betonmischfahrzeugen auf die Baustelle gebracht.
- **Ortbeton**
Mit Ortbeton wird Beton bezeichnet, der auf der Baustelle als Frischbeton verarbeitet wird und dort meist in der Schalung abbindet. Ortbeton wird entweder als Transportbeton auf die Baustelle geliefert oder dort als Baustellenbeton verarbeitet.
- **Betonfertigteile**
Betonfertigteile sind in einem Werk hergestellte Elemente, die nach dem Abbinden auf die Baustelle transportiert werden. Diese erfüllen höhere Qualitätsansprüche und tragen zu einem schnelleren Baufortschritt bei.

2.3 Ultra High Performance Concrete (UHPC)

2.3.1 Allgemeines

Der in den 90-er Jahren vom Labor „*Bouygues*“ in Frankreich entdeckter und patentierter Beton, befindet sich nach wie vor in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Mit ultra high performance concrete (UHPC) wird ein Beton mit einer Würfeldruckfestigkeit von über 115 N/mm^2 bezeichnet. Die ultrahochfesten Betone, die in der Praxis verwendet werden, haben üblicherweise eine Druckfestigkeit von $150\text{--}250 \text{ N/mm}^2$. Unter Laborbedingungen kann solch ein Beton eine Druckfestigkeit von bis zu 800 N/mm^2 erreichen. Diese „*High-End-Produkte*“ liegen aber von der Baupraxis noch sehr weit entfernt. [16]

In Europa wurden die ersten namhaften Bauprojekte mit UHPC ab 2005 realisiert. Die Gärtnerplatzbrücke ist eine Fuß- und Radwegbrücke in Kassel aus UHPC. Die Brücke hat eine max. Spannweite von 36 m, wobei der Obergurt aus vorgespannten UHPC und der Untergurt aus einem Stahlrohr besteht. Aufgrund der guten Dauerhaftigkeit von UHPC ist speziell die Fahrbahnplatte, die am meisten der Witterung ausgesetzt ist, aus diesem Material ausgeführt worden. Enorme Verbesserung im Vergleich zu Normalbeton liegen auf Grund der Dichte des Betons, im Widerstand gegen Chloriden, Sulfaten und anderen angreifenden Stoffen, vor. Die Fahrbahnplatte ist quer zur Längsachse gespannt und hat lediglich eine Dicke von 8 cm. [22]

Durch die verwendete feine Korngrößenverteilung wird ein homogener Mix erzeugt, der eine maximale Dichte des Betons bewirkt. Mit einem Größtkorn von 1 mm und einem Anteil von Microsilika wird die Dichte und die Festigkeit verstärkt, da die Zwischenräume zwischen Zementleim und Zuschlagsstoffen mit den Feinstanteilen ausgefüllt werden (siehe Abbildung 5).

Um die Zugfestigkeit und die Duktilität des UHPC verbessern zu können, besteht die Möglichkeit einer Beigabe von Stahlfasern. Im Allgemeinen verfügen die Stahlfasern eine glatte Oberfläche mit einem Durchmesser von ca. $180 \mu\text{m}$ und haben eine Länge von 3-12 mm. Weiters werden Versuche mit andern Faserarten durchgeführt, um die Dauerhaftigkeit und das Nachbruchverhalten des Materials zu verbessern. [16]

2.3.2 Mischungsanteile

Ein ultrahochfester Beton wird durch das Mischen von sehr feinen Zuschlagsstoffen, Zement, Mikrosilika, Verflüssiger und Wasser erreicht. Um die Duktilität verbessern zu können, werden noch Fasern unter den Beton gemischt. Um die geforderten Eigenschaften des UHPC erreichen zu können, müssen beim Dosieren die Ausgangsstoffe genau kombiniert werden. Jede geringe Abweichung beim Bemesen und beim Beigeben wirkt sich auf die Festbetoneigenschaften aus. In Abbildung 6 ist die Zusammensetzung von verschiedenen Betonarten angeführt. Der Anteil an Feinstoffen ist bei hochfesten Beton wesentlich größer als bei Normalbeton. Mit einem kleineren Größtkorn als bei Normalbeton ist die Betonmatrix wesentlich ho-

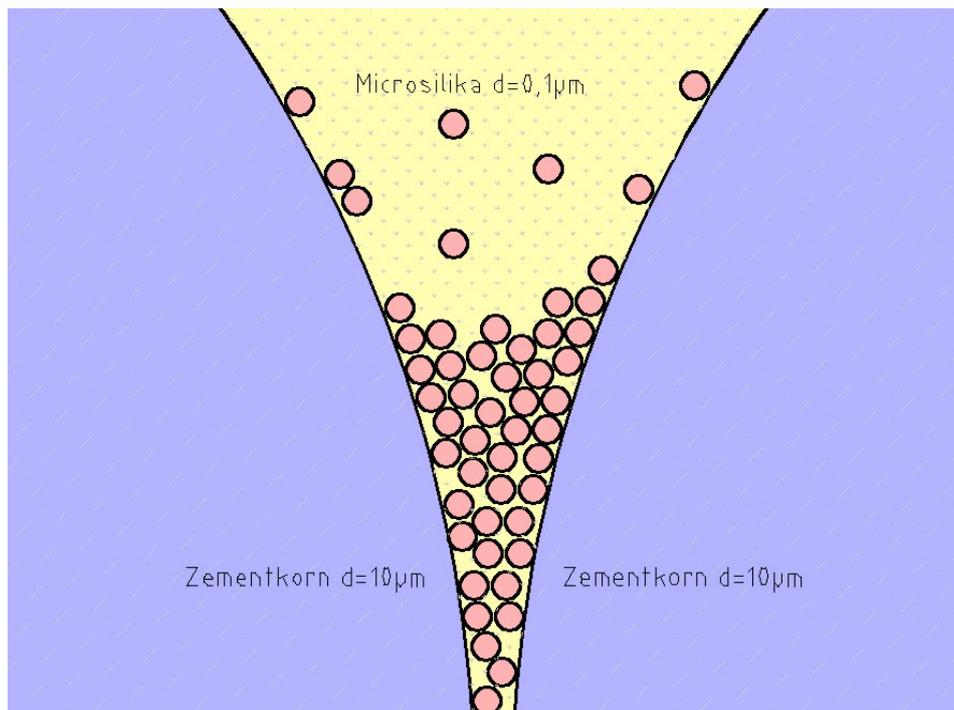


Abbildung 5: Mikrosilika zwischen Zementkorn [16]

mogener und durch den hohen Anteil an Feinstoffen entmischen sich die Zuschlagsstoffe nicht. Neben dem Zement werden dem UHPC Mikrosilika und Gesteinsmehl als weitere Zusatzstoffe beigemischt. [16]

2.3.3 Gesteinskörnung

Die Eigenschaften und die Zusammensetzung von Gesteinskörnungen spielen bei UHPC eine wesentliche Rolle. Der schwächste Bestandteil in der Matrix Beton ist für die maximale Festigkeit und für das Versagen verantwortlich. Hochfeste Betone weisen eine Zementmatrix mit einer hohen Festigkeit auf, daher sind Gesteinskörnungen ebenso mit einer möglichst hohen Festigkeit einzusetzen. Für günstige mechanische Eigenschaften werden Gesteinskörnungen mit einem möglichst hohen E-Modul verwendet. Ein hoher E-Modul bei den verwendeten Gesteinskörnungen bewirkt einen hohen E-Modul beim Beton. Daraus resultiert eine geringe Verformung infolge Kriechen, Schwinden und bei Temperatureinwirkungen. Für einen geringen Wasserzementwert sollen Körner mit geringen Wasseranspruch eingesetzt werden. Solche Körner haben eine runde gedrungene Form und besitzen eine glatte Oberfläche. Üblicherweise kommen für ultrahochfeste Betone Quarzsande im Bereich von $150\ \mu\text{m}$ bis $1\ \text{mm}$ zum Einsatz. Hinsichtlich der Gewährleistung einer guten Verarbeitbarkeit des Frischbetons, ist ein Rundkorn der kantigen Kornform vorzuziehen. Bei der Auswahl des Zuschlages muss darauf geachtet werden, dass alle geforderten Korngrößen in entsprechender Menge abgedeckt werden. Die Kornverteilung muss

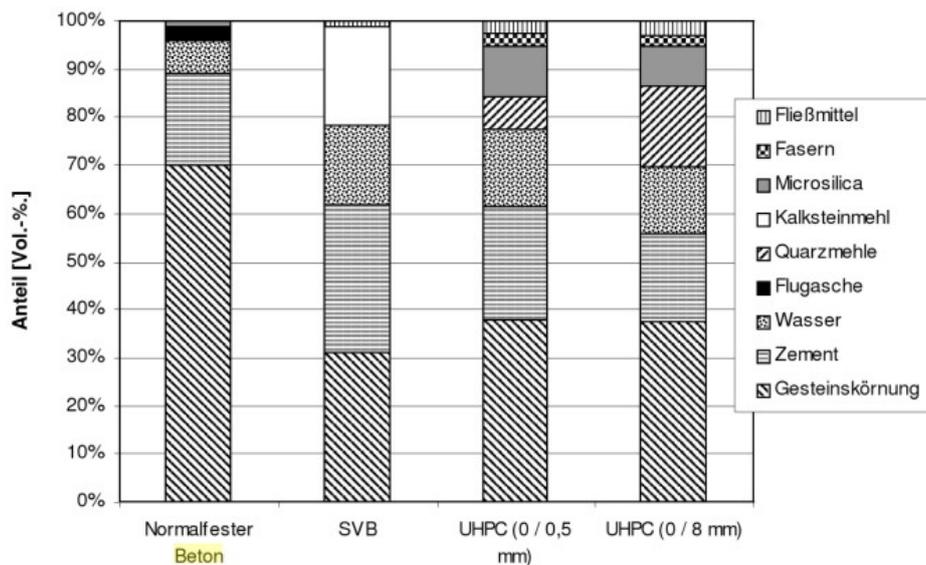


Abbildung 6: Vergleich der Zusammensetzung zwischen Normal-, Ultra-Hochleistungs- und Selbstverdichtender Beton [15]

genau auf die verwendeten Materialien angepasst werden. Die Fullerparabel gibt eine Annäherung für eine dichte Kornklassenverteilung an, jedoch wird bei UHPC eine noch genauere Optimierung der Kugelpackungen angestrebt. Dies geschieht mit rechnerunterstützten Simulationsprogrammen und dadurch wird eine optimale Sieblinie für einen UHPC erstellt. Ultrahochfeste Betone bestehen im Schnitt zu 40 Vol.-% aus Feinstoffen. Gesteine werden ab einer Mindestgröße von $125 \mu\text{m}$ verwendet, darunter werden die Feinstanteile von Gesteinsmehl, Microsilica und von Füllern gebildet [16]. Zusammenfassend erweisen sich folgende Punkte bei der Wahl von den Zuschlagsstoffen als wichtig:

- hohe mechanische Eigenschaft
- wirtschaftliche Verfügbarkeit
- Oberflächenbeschaffenheit
- Kornform
- Wasseranspruch
- Sieblinie
- chemische Verträglichkeit mit dem Zementstein

Die besonders leichte Verarbeitbarkeit von UHPC und selbstverdichtendem Beton (self compacting concrete SCC) beruht einerseits auf den wesentlich höheren Feinanteilgehalt als bei Normalbeton und andererseits auf der Verwendung von Fließmittel. Das Fließmittel erlaubt trotz der hohen Feinanteile den Einsatz eines geringen Wasserzementwert.

2.3.4 Wassergehalt

Der Wassergehalt für einen gut verarbeitbaren UHPC hängt im wesentlichen von der Packungsdichte des Korngemisches und andererseits von der Wirksamkeit des Fließmittels ab. Um den Anteil an physikalisch gebundenem Wasser zu minimieren, wird eine gute Packungsdichte angestrebt. Das Überschusswasser lagert sich in Kapillarporen ab und vermindert die Druckfestigkeit des Betons. Ein gewisser Anteil wird bei Normalbeton für die Bildung von Gelporen benötigt, diese Aufgabe wird jedoch bei UHPC großteils von Fließmitteln übernommen. Bei entsprechend günstigen Kornzusammensetzungen werden die Hohlräume zwischen den größeren Körnern von feineren Anteilen ausgefüllt, sodass die verbleibenden Hohlräume minimiert werden. Dadurch ist ein geringerer Wasseranteil notwendig, der die restlichen Hohlräume auffüllt. Nicht nur die Kornzusammensetzung ist für den Wasserbedarf ausschlaggebend, auch die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Kornform spielen eine maßgebende Rolle. Oberflächenraue Partikel brauchen einen höheren Wassergehalt als glatte Körner, um die vollständige Benetzung des Korns zu gewährleisten. Ungünstig geformte, sowie kantige Körner beeinflussen die Packungsdichte und dadurch den Wasserbedarf negativ. Grundsätzlich gibt es den Zusammenhang zwischen der Porosität des Betons und seiner Dauerhaftigkeit sowie der Festigkeit. Je mehr physikalisch gebundenes Wasser in Kapillarporen vorhanden ist, desto schlechter wirkt sich das auf die davor genannten Eigenschaften aus.

Die daraus resultierende Menge an Anmachwasser ergibt sich aus dem Anteil für die Hydratation und der physikalischen Bindung benötigten Wasser abzüglich der Menge die mit dem Zuschlag beigemischt wird. Die Wassermenge soll so abgestimmt werden, dass möglichst kein überschüssiges Wasser in Kapillarporen zurückbleibt und trotzdem für die Gelporen und den Hydratationsprozess genügend vorhanden ist. [16]

Das Massenverhältnis von Wasser zu Zement im Beton wird als W/Z- Wert angegeben und ist einer der wichtigsten Kennwert des Frisch-, sowie des Festbetons. Für die vollständige chemische Umwandlung des Zements in Zementstein wird in etwa eine Wassermenge von 25% vom Zementanteil benötigt. Ein UHPC wird mit einem W/Z- Wert von ca. 0,2-0,25 hergestellt. Bei diesem Wert ist es nicht mehr möglich, dass der Zement vollständig hydratisiert, jedoch haben Versuche gezeigt, dass bei einer teilweisen Hydratation unhydratisierter Zementklinker im Inneren des Beton zur Festigkeitssteigerung beiträgt [16]. Je dünner die Klebstoffdicke des Zement ist, umso fester werden die Körner miteinander verbunden und eine feste Verklebung des Zement erfolgt bereits bei einer teilweisen Hydratation. Dieser Sachverhalt wird bei der Betontechnologie von UHPC ausgenutzt und funktioniert unter Laborbedingungen bis zu einem W/Z-Wert von 0,15. Vergleicht man nun die Festigkeitseigenschaften abhängig vom Wasserzementwert, so ist zu erkennen, dass bei niedrigeren W/Z-Wert die Festigkeit im Zementstein deutlich größer als die Festigkeit des Beton ist. Umgekehrt ist zu erkennen, dass bei einem hohen W/Z-Wert die Festigkeit des Beton durch die aufnehmbaren Spannungen des Zement begrenzt ist. [16]

In der Betontechnologie von UHPC wird auch der Wasserbindemittelwert (W/B-Wert) angegeben. Der Unterschied zum W/Z-Wert liegt darin, dass bei dem W/B-Wert alle hydraulisch wirkenden Bindemittel und Zuschlagsstoffe berücksichtigt werden. Die Festigkeit des Beton steigt wie bei dem W/Z-Wert mit einem niedrigen W/B-Wert. [16]

2.3.5 Zement

Zement ist der wichtigste Bestandteil im Beton. Die hydraulische Erhärtung, durch Zugabe von Wasser, ermöglicht eine dauerhafte Verbindung zwischen den Bestandteilen. Im Prinzip muss der Zement für einen UHPC einen geringen Wasseranspruch, eine gute Verträglichkeit mit dem Fließmittel und schließlich ein nicht zu schnelles Erstarrungsverhalten aufweisen. Das fein gemahlene hydraulische Bindemittel besteht aus organischen nichtmetallischen Stoffen. Bei den Rohstoffen des Zements handelt es sich um ein Gemisch aus Kalkstein (CaCO_3), Sand (SiO_2), Tonerde und Mergel (Al_2O_3) und um eisenoxidisches Mineral (Fe_2O_3). Vorwiegend ist für die hydraulische Erhärtung das Calciumsilikat verantwortlich. Für die Herstellung von UHPC werden hauptsächlich Portlandzemente eingesetzt. Portlandzemente haben einen geringen Anteil an Tricalciumaluminat (C_3A) und einen hohen Sulfatwiderstand. Der geringe Anteil an Sulfatträgern bewirkt einen geringen Wasseranspruch. Der Hydratationsprozess gliedert sich in drei Abschnitte. [13]

Der erste Abschnitt beginnt kurz nach dem Kontakt mit Wasser. Bei diesem bildet das (C_3A) auf der Oberfläche der Zementpartikel ein lockeres Gefüge aus Ettringit. Dieser Prozess führt jedoch keine Festigkeitssteigerung herbei. Das gebildete Gefüge an der Oberfläche bindet in seinen Hohlräumen einen Teil des Anmachwassers und bewirkt somit einen größeren Wasserbedarf. Als weitere Reaktion bildet sich kurz nach dem Mischen vom Kalk im Zement mit Wasser Calciumhydroxid. Diese Reaktion erzeugt ein stark basisches Milieu, welches später bei einem Einsatz von Stahlbewehrung als Schutz der Armierung dient. Die zweite Phase tritt in etwa 4 Stunden nach dem Mischvorgang ein. In dieser Phase beginnt die hydraulische Erhärtung. Die beim Brennen im Drehrohrofen entstehenden Calciumsilicate bestehen hauptsächlich aus Tricalciumsilikat (C_3S) und aus Dicalciumsilikat (C_2S) sowie aus einem geringeren Anteil aus Tricalciumaluminat (C_3A) und aus Calciumaluminatferrit (C_4AF). Die Calciumsilicate bilden bei der Erhärtung die ineinander langfasrigen verschlungenen Calciumsilicathydrate. Diese entstehen durch die Hydratation von (C_3S) und von (C_2S) und führen zu der Festigkeitssteigerung. In der letzten Phase nach ca. 12 Stunden werden die noch übrigen Mikroporen durch feinkristallines Calciumsilicat und Calciumaluminathydrat aufgefüllt. Für ultrahochfeste Betone empfiehlt sich ein höherer Anteil an (C_2S) und (C_3S) sowie eine Reduzierung des (C_3A) Gehaltes. Dieses bewirkt eine geringe Wärmeentwicklung, gute Verarbeitbarkeit, geringen Wasserbedarf und eine gute Nacherhärtung. Für diese Anwendungen empfiehlt sich ein Portland- oder Hüttenzement. In der Tabelle 2.3.5 sind die wichtigsten gebrannten Bestandteile des Zements, die für die Aushärtung des Zements in Kombination mit Wasser zuständig sind, angeführt. [16]

Tabelle 1: Die wichtigsten PZ-Klinkerphasen, Eigenschaften und Massenanteile [16]

Bestandteile	chemische Formel	Bezeichnung	Eigenschaft	Massenanteil im Klinker in %
C ₃ S	3 CaO SiO ₂	Tricalciumsilicat	schnelle Erhärtung, hohe Hydratationswärme, hohe Festigkeit	45 – 80
C ₂ S	2 CaO SiO ₂	Dicalciumsilicat	langsame, stetige Erhärtung, niedrige Hydratationswärme, hohe Festigkeit	0 – 32
C ₃ A	3 CaO Al ₂ O ₃	Tricalciumaluminat	schnelle Reaktion mit H ₂ O, hohe Hydratationswärme, geringe Festigkeit, anfällig gegen Sulfatwasser	7 - 15 max. 3 % bei HS - Zement
C ₄ AF	4 CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	Tetracalciumaluminatferrit	langsame und geringe Erhärtung, widerstandsfähig gegen Sulfatwasser	4 - 14

Hinsichtlich der Mahlfeinheit sind sehr fein gemahlene Zemente bei der Verwendung von UHPC nicht geeignet. Fein gemahlene Zemente besitzen eine hohe spezifische Oberfläche und benötigen daher bei der Erhärtung einen großen Wasseranteil. Die benötigte Menge zur Herstellung von UHPC ergibt sich, wenn das optimale Verhältnis zum Quarzmehl und zu Mikrosilicat berücksichtigt wird. Entwicklungen zeigen, dass bei einem konstanten Verhältnis von Wasser zu Feinstoffen ein gewisser Anteil an Zement ohne Festigkeitseinbußen durch Quarzmehl ersetzt werden kann. [13]

2.3.6 Quarzmehl

Das Quarzmehl wird dem UHPC üblicherweise in der ähnlichen Feinheit wie Zement beigemischt. Durch die steuerbare Partikelgröße durch den Mahlgrad kann der Quarzsand jedoch als Füller für fehlende Kornklassen eingesetzt werden. Die Kornfraktion kann dabei zwischen der Feinheit des Mikrosilicates und der Gesteinskörnung liegen. Für eine optimale Packungsdichte muss die Partikelgröße der an-

deren verwendeten Ausgangsmaterialien bekannt sein. Nach diesen kann anschließend die Feinheit des Quarzmehls bestimmt werden. Üblicherweise reagiert dieser Zuschlagsstoff unter normalen Bedingungen nicht mit den anderen Bestandteilen, es sei denn einer der folgenden Punkte trifft zu: [14]

- Kalkvorkommen in der Mischung
- Umwandlung unter erhöhter Temperatur
- Löslichkeit des Quarzes bei frischen Bruchflächen

Bei einer Temperatur von 573°C erfolgt im Quarz eine Phasenumwandlung, die sich als Dehnungszunahme auswirkt. Daher kann es bei einer Brandbeaufschlagung zu Abplatzung von Betonteilen kommen. Statt dem Quarzmehl können noch andere Arten als Gesteinsmehl wie z.B. aus Basalt oder Kalk verwendet werden. [14]

2.3.7 Mikrosilika

Ein weiterer wichtiger Bestandteil in einem UHPC ist der Silikastaub, der in Form von Mikrosilika beigemischt wird. Metallisches Silicium wird aus Quarz mit Hilfe von Kohlenstoff aufgeschmolzen. Der Silikastaub entsteht dabei bei 1700°C , während der Kondensation aus dem Filterstaub als Nebenprodukt. Siliciumoxid (SiO) reagiert dabei im Rauchgas mit Sauerstoff und kondensiert dabei zu Siliciumdioxid (SiO_2). Die Reaktion geht derart rasch voran, dass eine Ausrichtung des (SiO_2) in ein geordnetes Gitter nicht möglich ist. Es entsteht eine formlose Struktur, wobei sich die Mikrosilikapartikel in fast perfekten Kugelformen mit einem mittleren Durchmesser von $0,5\ \mu\text{m}$ bilden. Wegen der extremen Feinheit der Partikel kann die Bestimmung der Korngrößenverteilung lediglich äußerst schwierig mit einem Mikroskop erfolgen. Die Eigenschaften des Silikastaubes hängen dabei im Allgemeinen von den Ausgangsmaterialien, der Herstellungstemperatur und der Abkühlgeschwindigkeit ab. Im Handel ist das Mikrosilika entweder in einer gelösten Form in einer Suspension oder pulverförmig erhältlich. [13]

Die Silikastäube erhöhen aufgrund ihrer Feinheit die Packungsdichte im Gefüge des Betons. Mikrosilika haben im Vergleich zum Zement eine um ca. das 100-fache kleinere mittlere Teilchengröße. Diese Feinstanteile können fast alle Hohlräume zwischen den Zementkörnern und Sandkörnern ausfüllen, somit erhöhen diese enorm die Packungsdichte der Matrix (siehe Abbildung 5). Dieses Ereignis verursacht bei der dichten Lagerung der Partikel einen geringeren Wasseranspruch sowie eine erhöhte Festigkeit im Beton. Weiters werden auch die Entmischungs-, sowie die Fließigenschaften mit den Feinanteilen im Frischbeton verbessert. [13]

Die chemischen Eigenschaften der Mikrosilika sind vorwiegend von den Ausgangsstoffen, der Produktionsart und dem Produktionsablauf abhängig. Mit Hilfe der amorphen Bestandteile im Staub wird zum größten Teil eine puzzolanische Reaktion ausgelöst. Hierbei geschieht eine chemische Reaktion zwischen dem gelöschten Kalk aus der Hydratation des Zementklinkers während der Betonerhärtung, und dem Siliciumdioxid, als Hauptbestandteil in dem Mikrosilika, zu Calciumsilikathydrat.

Neben der puzzolanischen Reaktion ist die Kontaktflächenreaktion mit der großen zur Verfügung stehenden Oberfläche, auf Grund der Feinheit, von wichtiger Bedeutung. [13]

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von Zement und Mikrosilika [16]

Bestandteil	(SiO ₂) [M.- %]	(Al ₂ O ₃) [M.- %]	(Fe ₂ O ₃) [M.- %]	(CaO) [M.- %]
Zement	18-24	4-8	1-5	61-69
Mikrosilika	80-99	0,5-3,0	0,1-0,5	0,7-2,5

Tabelle 3: Chemische Eigenschaften von Zement und Mikrosilika [16]

Kennwert	mittler Partikelgröße [μm]	Reindichte [kg/dm ³]	spezif. Oberfläche [m ² /g]
Zement	10-20	3,1-3,13	0,3-0,6
Mikrosilika	0,1-0,3	2,22-2,4	16-35

Ein nächster Vorteil bei dem Einsatz von Mikrosilika ist die Reduzierung der Kapillarporen. Der Silikastaub trägt nicht nur auf Grund der Füllereffekte für die Dauerhaftigkeit, sondern auch wegen der puzzolanischen Reaktion bei.

Ein bekannter Schwachpunkt bei Beton ist die Kontaktzone zwischen den Zuschlägen und dem Zement als Bindemittel. Einerseits ist die Packungsdichte in den Randzonen der Zuschläge schlechter und andererseits sind die Zuschlagsstoffe immer von einem dünnen Wasserfilm umgeben, welcher den W/Z-Wert in diesem Bereich wesentlich erhöht. Dieser erhöhte W/Z-Wert bringt eine erhöhte Anzahl an Kapillarporen mit sich, welche die Festigkeiten im Beton verringern. Es wurde nachgewiesen, dass schon ein geringer Anteil an Silikastaub den Anteil an Kapillarporen enorm reduziert und zugunsten der Dauerhaftigkeit und der Festigkeit der mittlere Porendurchmesser um Größenordnungen verringert wird. Ebenso bilden die in einem geringen Anteil vorhandenen Tricalciumaluminat im Zementklinker mit den Ettringiten sogenannte Abstandhalter am Zement, die eine kompakte Bindung zu den Zuschlagsstoffen verhindern. Durch die dichte Packung des feinen Silikastaubes mit dem Zement und den restlichen Zuschlägen werden die schwachen Übergangszonen gut ausgefüllt. Somit entsteht ein homogener Übergang zwischen den Zementstein und den Zuschlägen und der Beton erhält einen wesentlich festeren Zustand.

Der Silikastaub verhindert zudem eine Bildung von langkettigen Calciumhydroxid, da sich das Silika mit einem großen Teil des Kalkes zu Calciumsilicathydrat-Phasen bindet und zur Festigkeit beiträgt. [13]

2.3.8 Fließmittel

Bei Ultra high performance concrete werden Fließmittel zur Verringerung des W/Z-Wertes und für die leichtere Bearbeitbarkeit beigemischt. Es wird entweder bei dem Einsatz von Fließmitteln eine bessere Verarbeitbarkeit des Frischbetons, oder bei gleichbleibender Konsistenz ein geringerer W/Z-Wert für eine bessere Qualität erreicht. Aus Sicht der Chemie gehören alle Fließmitteln den Tensiden an, dabei setzen sie die Oberflächenspannung des Anmachwassers herab und ermöglichen das feine Vermengen des Zements mit den Zuschlagsstoffen. Durch die Erfindung der Kombination von Fließmittel im Beton, war es möglich hochfeste Betone herzustellen. Um bei dem Einsatz von Fließmitteln nicht zuviel Wasser in den Beton beizumengen haben diese meist einen hohen FM- Wirkstoffgehalt von 30-40 M%. [13] Die Wirkung eines Fließmittels geht einerseits auf die Herabsetzung der Oberflächenspannung und andererseits auf eine elektrostatische Wirkung zur Abstoßung zwischen den einzelnen Zementpartikeln zurück. Wasser, mit einer geringeren Oberflächenspannung, ist es kaum mehr möglich Kapillarporen auszubilden und des weiteren wird dadurch die Packungsdichte zwischen den Zementkörnern und dem Zuschlag vergünstigt. Früher waren Fließmittel auf Basis von Melaminharz oder aus dem Grundstoff Ligninsulfonat im Einsatz. Melaminharz legt sich im Prinzip nur als Schmiermittel über die Zementpartikel, erhöht daher nur die Gleitfähigkeit der Mischung. Ligninsulfonat entsteht als Nebenprodukt bei der Zellstoffherstellung, wirkt zwar schon bei geringer Menge stark verflüssigend, hat aber den nachteiligen Effekt als zusätzlicher Erstarrungsverzögerer. Produkte der neuen Generation, wie z.B. Produkte auf Naphtalinbasis oder modifizierten Polycarboxylether, bewirken mit einer negativen Aufladung des Zements eine gegenseitige Abstoßung der einzelnen Partikeln. Nachdem der Hydrationsprozess begonnen hat, verbinden sich die Calciumsilicathydrate vom Zement gegenseitig und die Abstoßung durch die negative Ladung wird aufgehoben. Für die Herstellung eines UHPC wird daher mit einem gezielten Einsatz von Fließmitteln ein geringer W/Z-Wert sowie eine bessere Vermischung des Zementes herbeigeführt, die für eine bessere Dauerhaftigkeit und Festigkeit im Beton sorgen. [13]

2.3.9 Fasern

Um einem UHPC noch bessere Eigenschaften zu gewähren werden dem Beton oft Fasern beigemischt, wobei Fasern nicht zu den fixen Bestandteilen in einem UHPC zählen. Die Schwachstelle bei einem Normalbeton liegt im Haftverbund zwischen dem Zement und den Zuschlagsstoffen, bei UHPC wird die Komposition der Bindemittel und der Zuschlagsstoffe so gewählt, dass die Schwachstelle nicht mehr im Verbund sondern im Zuschlagsstoff selber liegt. Durch die Bestandteile im Beton, die in den Abschnitten davor beschrieben wurden, ist es möglich, Betone mit speziellen Materialeigenschaften zu erzeugen, das sich jedoch auch maßgebend auf die Zugfestigkeit auswirkt. Die Duktilität nimmt mit zunehmender Festigkeit sehr stark ab, um eine versagensankündigende Rissbildung zu ermöglichen, werden dem

UHPC die auf Zug belastbaren Fasern beigemischt. [13]

In diesem Abschnitt werde ich mich hauptsächlich auf Stahlfasern beschränken, da weitere Faserarten unter Punkt 2.6.4 näher erklärt sind. Stahl ist auf Grund seiner Materialeigenschaft und dem alkalischen Milieu im Beton eine gute Unterstützung als Zuelement im Verbund. Grundsätzlich kann bei den Fasern nach der Materialart, der Oberfläche und der Geometrie unterschieden werden. Es gibt eine große Anzahl an Methoden um Stahlfasern herzustellen. Eine gewisse Duktilität bzw. Sprödigkeit der Faser ist von Notwendigkeit, um bei der Rissbildung eine Bruchenergie in Anspruch zu nehmen und ist von der Herstellungsart abhängig. Beton ohne Bewehrung führt zu einer geringen Bruchenergie und weist ein lineares Bruchverhalten auf. Abbildung 7 zeigt einerseits das Rissbild eines unbewehrten und andererseits einen faserbewehrten Betonquerschnitt.



Abbildung 7: Rissverteilung durch Fasern im Beton [16]

Die Wirkung einer Faser ist im Wesentlichen von der Geometrie abhängig. Bei der Geometrie ist unter anderem das Verhältnis zwischen Länge und Dicke und andererseits die allgemeine Form maßgebend. Um eine dementsprechende Verarbeitung des Betons mit den Fasern zu gewährleisten, dürfen sie nicht zu lange ausgeführt werden. Der Faserdurchmesser soll in etwa der Größenordnung der Mikrorisse entsprechen. Die Duktilität der Faser im Verbund ist abhängig von der Verankerungslänge sowie von der Länge der verwendeten Faser. Der Faserdurchmesser bewegt sich abhängig von der Größe des Zuschlages zwischen 0,15 und 0,2 mm. Dabei führt ein L/D Verhältnis von etwa 60 zu einem guten Nachbruchverhalten und kann gut in den Beton eingemischt werden. Ein großes Problem bei Normalbeton ist das Einmischen der Fasern, da die durchschnittliche Korngröße im Vergleich zu einem UHPC um vieles höher ist. Dabei bilden sich oft Faserbündel und eine gleichmäßige Verteilung der Fasern über dem Betonquerschnitt kann nicht mehr gewährleistet werden. Die Länge beträgt ca. 12-15 mm. [13]

Der Fasergehalt in UHPC liegt zwischen 1,5 und 3,5 Vol.%, wobei ein hoher Anteil wegen der hohen Stoffkosten wahrscheinlich unwirtschaftlich ist. [14] Ein steigender Faseranteil im Beton führt zu einer Verschlechterung der Verarbeitung sowie zu einem höheren Porengehalt, was sich negativ in der Festigkeit widerspiegelt. Das Nachbruchverhalten verbessert sich bereits bei einem Anteil von 1,5 Vol.% Fasern, wobei für eine Steigerung des Biegeverhaltens ca. 3,5 Vol.% zugeführt werden müssen. Schlussendlich muss ein Kompromiss zwischen der Verarbeitungseigenschaft sowie der Wirtschaftlichkeit mit der Biegefestigkeit und dem Nachbruchverhalten

geschlossen werden.

Neue Entwicklungen zeigen, dass eine Kombination von verschiedenen Fasertypen eine Verbesserung des Nachbruchverhaltens mit sich führt. Wobei lange Fasern mit Endhaken die Duktilität bei breiten Rissen verbessern und kurze Fasern die Zugfestigkeit steigern sowie gegen die Mikrorissbildung wirken. [13]

Mit Hilfe des Zements erfolgt die Haftung der Bestandteile im Beton untereinander chemisch, wobei die Stahlfasern hauptsächlich durch eine mechanische Wirkung im Verband gehalten werden. Durch Zugabe von speziellen adhäsiven Wirkstoffen kann ein geringer chemischer Verbund hergestellt werden. Chemisch gebundene Fasern, egal ob aus Stahl oder aus Polymer, erlauben nur einen geringen Schlupf und weisen daher eine geringe Duktilität auf. Ein wesentlicher Bestandteil für die Haftung und der Duktilität ist die Reibwirkung zwischen den Stahlfasern und der Betonmatrix, die wesentlich von den feinen Betonkomponenten an der Faser abhängig ist. Durch eine besonders geformte Fasergeometrie ist auch eine Verzahnung in der Matrix möglich die dabei die Haftung der Komponenten verstärkt.

Das Versagen der Faser kann zwei Ursachen haben: Einerseits kann der Haftverbund zwischen Faser und Betonmatrix gelöst werden und andererseits ist es möglich, dass ein Versagen durch Reißen entsteht. Folgende Faktoren sind für ein Versagen ausschlaggebend:

- l/d Verhältnis
- geometrische Form der Faser
- Zugfestigkeit von Stahl
- Haftverbund zwischen Faser und Matrix

Der Verbund zwischen den Fasern und der Betonmatrix ist nicht nur von der Faserform sondern auch von den Zuschlagsstoffen sowie vom Zement abhängig. Gleiche Fasern weisen bei unterschiedlicher Betonzusammensetzung verschiedenes Verhalten auf. Um die Zugfestigkeit vom verwendeten Material auszunutzen zu können, muss über die halbe Einleitungslänge die Faserzugspannung eingeleitet werden können. Bei dem Erreichen der Zugfestigkeit beginnt Stahl zu fließen und schlussendlich kommt es zum Bruch. Die Einleitungslänge lässt sich durch eine Profilierung in der Faser wesentlich verkürzen. Aufgrund der willkommenen Duktilität soll die Zugfestigkeit höher als die Verbundfestigkeit sein, um ein mögliches Versagen durch Ausziehen der Faser aus der Matrix frühzeitig erkennen zu können. Neben der Duktilität wird auch die Dauerhaftigkeit durch die kleineren Rissweiten wesentlich verbessert. [13]

2.3.10 Weitere Zusatzmittel

Betonzusatzmittel sind Stoffe die dem Beton in geringer Menge hinzugefügt werden um die Eigenschaft zu verändern. Bei UHPC kommen hauptsächlich die Zusatzmittel von der ersten Spalte zum Einsatz, wobei das Fließmittel wegen ihrer Wichtigkeit

schon als eigener Punkt angeführt wurde.

Tabelle 4: Arten an Zusatzmitteln[16]

Fließmittel	Dichtungsmittel
Luftporenbildner	Einpresshilfe
Verzögerer	Beschleuniger
Stabilisierer	

- **Luftporenbildner**
Luftporenbildner werden vorwiegend bei Betonen mit einer hohen Frost- Tauwechsel Beanspruchung eingesetzt. Die Wirkung besteht darin, dass der Porenbildner eine große Anzahl an Luftporen im Beton erzeugt in den sich Kapillarwasser beim Gefrieren ausdehnen kann. Beim Gefrieren dehnt sich das Wasser aus und der vom Frost erzeugte Druck kann sich in den Luftporen abbauen. Ebenso können die Poren, den von Tausalzen erzeugten Kristallisationsdruck aufnehmen. Eine Überdimensionierung des Luftporengehaltes führt zu einer Minderung der Betondruckfestigkeit sowie zu einer schlechteren Pumpeigenschaft. Weiters wirken sich die Luftporenbildner negativ bezüglich dem Kriechen und den chemischen Angriffen aus. Bei einer Kombination anderer Zusatzmittel, um mögliche Nachteile wieder auszubessern, muss stets auf die Verträglichkeit geachtet werden. [5]
- **Verzögerer**
Verzögerer verlängern die Dauer der Verarbeitbarkeit. Die Verzögerung hängt einerseits vom Verzögerer selbst und weiters vom verwendeten Zement ab. Solche Zusatzmittel bestehen vorwiegend aus Phosphaten und Oxycarbonsäuren und deren Salzen. Sie verzögern eine gewisse Zeit den Beginn der Hydratation mit dem nicht Inlösengehen der Zementklinker in der ersten Phase. Auch die Temperatureinwirkung ist für den Beginn des Abbindeprozesses maßgebend. Es wird zwischen Verzögerer unterschieden die den Beginn des Abbindeprozesses, das Ende des Abbindens oder beide Zeitpunkte verzögern. Sie werden beispielsweise bei langen Wartezeiten von Transportbeton, nachträgliche Verformung während dem Betoniervorgang oder bei der Vermeidung von Arbeitsfugen eingesetzt. Vorwiegend kommen diese bei massigen Bauteilen in Einsatz. [5]
- **Stabilisierer**
Stabilisierer können aus organischer oder anorganischer Basis sein. Am gebräuchlichsten sind die anorganischen z.B. aus Kieselsäure. Ihre Hauptaufgabe besteht darin, schwere Kornfraktion im Verband zu halten. Die Stabilisierer haben im Vergleich zu Zement eine große Oberfläche und binden daher physikalisch das freie Wasser, was zu einer dichten Packung der Partikel führt.

Organische Stabilisierer sind von Grund auf nicht alkalibeständig, nur durch eine spezielle Entwicklung von Mehrfachzuckerbindung sind diese resistent, kommen jedoch wegen der Unwirtschaftlichkeit nicht in den Einsatz. [9]

- **Dichtungsmittel**
Dichtungsmittel werden dem Beton in geringen Mengen zugegeben. Diese besitzen die Eigenschaft, dass ein wasserabweisendes Milieu entsteht und somit eine kapillare Wasseraufnahmen im Beton verhindert wird. Betonteile die zusätzlich vom Wasser, sei es durch aufsteigende Feuchte oder durch Schlagregen, geschützt werden sollen, kann dieses Zusatzmittel zugegeben werden. [9]
- **Einpresshilfe**
Einpresshilfe bewirkt durch Bildung von Wasserstoff während der offenen Phase ein Quellen. Dadurch wird das natürliche Schrumpfen kompensiert und in der Regel eine leichte Volumszunahme erzeugt. Das Quellen erzeugt lediglich einen schwachen Druck und es ist keine Sprengwirkung zu erwarten. Eine Einpresshilfe ist ein pulverförmiges Mittel und kommt bei der Herstellung von Einpressmörtel für Spannbeton zum Einsatz. Bei der Verwendung dieses Zusatzmittels wird die Fließeigenschaft verbessert wobei ein geringerer Wasseranteil von Bedeutung ist. [9]
- **Beschleuniger**
Beschleuniger werden auch noch als Erhärtungbeschleuniger oder Erstarrungsbeschleuniger bezeichnet. Eine Überdosierung von Beschleunigern oder von Verzögerern kann auch ein Umschlagen hervorrufen. Erhärtungsbeschleuniger beschleunigen die Anfangsfestigkeit mit oder ohne Einfluss auf die Erstarrungszeit. Diese Zusatzmittel fördern in hohem Maße die Frühfestigkeiten des Betons, ohne die Endfestigkeiten negativ zu beeinflussen. Sie bewirken ein schnelles Abbinden und verursachen eine rasche Wärmeentwicklung. Erstarrungsbeschleuniger verringern die Zeit von der Mischung bis zum Erstarrungsbeginn. Die Zusatzmittel finden hauptsächlich beim Betonieren mit kurzen Ausschulfristen, in Gewässern, bei tiefen Temperaturen oder bei Spritzbeton ihre Anwendung. [9]

2.3.11 Mischtechnik

Beim Mischvorgang von UHPC muss wegen der besonderen Eigenschaften speziell auf die Mischtechnik, Mischzeit und auf die Mischreihenfolge geachtet werden. Die Gründe für die hohe Beachtung sind einerseits die große zu benetzende Oberfläche mit dem geringen W/Z-Wert und andererseits die Zugabe von Fasern. Weiters ist noch bei selbstverdichtenden UHPC auf die gute Entlüftung durch eine fließfähige Konsistenz zu achten. In der Literatur gibt es noch wenig genaue Aufzeichnungen über die Mischverhältnisse von UHPC, daher werden nachfolgend die wenigen Angaben zusammengefasst und kommentiert.

Grundsätzlich können für die Herstellung von UHPC bis zu einer Druckfestigkeit von ca. 250 N/mm^2 handelsübliche Teller-, oder Trogmischer verwendet werden. Zusätzliche Wirbler sorgen für eine gute Homogenität und eine weiche, fließfähige Konsistenz des Mischgutes. Je nach Kombination und Eigenschaft des Mischgutes kann ein übermäßiges Mischen zu einem frühen Ansteifen oder zu einem starken Verflüssigen in der Mischanlage führen. Außerdem steigt bei UHPC durch das intensive Mischen die Mischtemperatur stark an. Entscheidend für die Frischbetoneigenschaften ist die Mischreihenfolge und die einzelnen Abschnitte zwischen den Einfüllzeiten. [13]

Normalerweise werden zuerst alle trockenen Bestandteile in die Trommel gegeben. Danach werden diese eine gewisse Zeit vermischt, bis eine gleichmäßige Farbe des trockenen Mischgutes zu erkennen ist. Nach dem Homogenisieren der trockenen Anteile, kommen die flüssigen Bestandteile in bestimmter Menge in die Mischtrommel. Üblicherweise werden das Wasser und die Betonzusatzmittel nach den trockenen Anteilen in die Mischtrommel gegeben. Die Zugabe der flüssigen Bestandteile erfolgt während dem Mischen über einen gewissen Zeitabschnitt. Bei der Verwendung von Fasern werden diese erst nach der Wirkung des Fließmittels im Mischgut in die Trommel gegeben. Nur so kann eine gleichmäßige Verteilung und Benetzung der Fasern erreicht werden. Schlussendlich werden die gesamten Inhaltsstoffe für eine weitere Homogenisierung nochmals einige Minuten vermischt. Weiters wurden auch Versuche durchgeführt, bei denen zuerst ein gewisser Anteil vom Fließmittel zu dem Mikrosilika gegeben wurde, um von Anfang an eine Agglomeration zu verhindern. [14] Die meisten UHPC werden jedoch mit dem vorherigen Homogenisieren der trockenen Anteile hergestellt.

Neben den normalen Mischanlagen kann noch mit einem Vakuummischer UHPC hergestellt werden. Dieser Mischer saugt die vorhandene Luft in der Anlage ab und gewährleistet einen Unterdruck in der Trommel. Durch den Unterdruck werden die Luftporen vom Mischgut ausgetrieben, deswegen kann ein Beton mit einem noch deutlich niedrigeren Luftporengehalt erzeugt werden. Jedoch führt ein zu großes Teilvakuum bei entsprechender Mischtemperatur zu einem frühzeitigen Verdunsten des Anmachwassers, das sich wiederum negativ auf den W/Z-Wert auswirkt. Bei Transportbeton muss der Erstarrungszeitpunkt mit Hilfe von Zusatzmittel an den Verarbeitungszeitpunkt angepasst werden. Da bei UHPC als Transportbeton noch keine entsprechenden Normen und Erfahrungen vorhanden sind, wird zusätzlich für jede Betonart eine Prüfung durchgeführt. [13]

2.3.12 Einbringen, Verdichten, Nachbehandeln

UHPC lässt sich üblicherweise genau so wie Normalbeton in die Schalung einbringen. Die Einbringung kann mit Hilfe eines Kübel oder mit einer Pumpe erfolgen. Meist kann der Beton bei der Einbringung eine Fallhöhe von 0,5 m ohne negative Einflüsse überstehen. Bei einer möglichen Entmischung können mit Hilfe von Stabilisatoren Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Wird UHPC in einem Fertigteilwerk eingesetzt so kommt meist ein Schalungsrüttler

zum Einsatz. Bei Ortbeton kommen Innenrüttler (Flaschenrüttler) in Verwendung, diese müssen jedoch bei UHPC eine höhere Verdichtungsenergie aufbringen. Dies resultiert aus dem schwierigen Entlüften durch die zähe Konsistenz. Eine bessere Verdichtung wird durch engere Eintauchstellen des Rüttlers ermöglicht. [13]

Wegen der genauen Dosierung von einem UHPC muss speziell bei Transportbeton auf mögliche externe Wasserquellen geachtet werden. So darf z.B. in den Pumpen oder in den Transportmischern kein Restwasser von der Reinigung mehr vorhanden sein.

Bei der Nachbehandlung von Beton werden die Eigenschaften des Betons verbessert. Es kann zwischen der Nachbehandlung im Wasserbad und unter Temperatureinwirkung unterschieden werden. Dabei ist das Abbinden des Betons unter Druck auch noch eine Möglichkeit, um bessere Betoneigenschaften zu erzielen. Bei der thermischen Nachbehandlung kommt es zu einer besseren Reaktion der Hydrationsprodukte und zu einer Aktivierung der puzzolanischen Reaktion des Mikrosilikas. Durch die Erwärmung wird auch das freie Wasser aus dem Beton ausgetrieben, wodurch eine bessere Dauerhaftigkeit im Beton erreicht wird. Durch unter Druck setzen des Betons, während des Abbindens werden ebenfalls das freie Wasser sowie Luftporen aus dem Beton getrieben, dass zu einer größeren Dichte und somit zu einer Festigkeitssteigerung führt. Kleine Öffnungen in der Schalung lassen das Wasser unter dem Druck aus dem Beton austreten, jedoch dürfen mit dem Wasser keine Feinanteile mitgespült werden. Dies lässt sich durch die Größe der Öffnungen steuern und ist durch eine visuelle Kontrolle der Spülung erkennbar. Der aufgebrauchte Druck erzeugt beim Abbinden des Betons Druckspannungen und führt zu einer späteren Selbstheilung der entstandenen Schwindrisse. [13]

Die meisten Arten an Nachbehandlungen sind nur im Labor möglich, daher sind auch nur dort Druckfestigkeiten von UHPC bis zu 800 N/mm^2 möglich. Bei Betonarbeiten auf der Baustelle beginnen die Nachbehandlungsarbeiten bereits während oder kurz nach dem Befüllen der Schalung. Der Zeitpunkt und die notwendigen Maßnahmen sind von den Umgebungseinwirkungen abhängig und werden im Rahmen einer Erstprüfung festgestellt. Auf dem UHPC bildet sich nach dem Verdichten auf Grund des niedrigen W/Z-Wert kein Wasserfilm. Um auftretende Risse zu vermeiden wird auf eine ständige Befeuchtung der Oberfläche geachtet. Abdecken der Oberfläche oder ein ständiges Befeuchten mit einem Nachbehandlungsmittel wirkt gegen eine Rissbildung an der Oberfläche. [13]

2.3.13 Materialeigenschaften

Im kommenden Kapitel wird der Zusammenhang zwischen der Betonrezeptur und den daraus folgenden Eigenschaften beschrieben. Bei UHPC werden im Gegensatz zu einem Normalbeton neben den Zusatzstoffen auch viele Zusatzmittel verwendet. Die exakte Dosierung der Betonrezepturen und der genaue Mischablauf machen das Thema so komplex. Aus der Kombination dieser Faktoren wird es möglich, diese komplexen Werkstoffe zu erzeugen. Eine geringe Abweichung von der Dosierung oder von der Mischdauer ruft eine andere Eigenschaft im Beton hervor. Folglich

wird auf einige Eigenschaften näher eingegangen.

- **Homogenität**
Normalbeton bzw. hochfester Beton wird als heterogenes Material bezeichnet. Durch die folgenden Faktoren kann UHPC als homogener Baustoff betrachtet werden. Geometrisch gesehen sind die Korngrößen im Gegensatz zu Normalbeton bei ultra hochfestem Beton um ca. 20 % kleiner. Die groben Zuschläge werden, um eine bessere Packungsdichte zu erreichen, durch feine Sande ersetzt. Ebenso werden durch die Feinheit der Zuschlagsstoffe die Schwächezonen zwischen dem Bindemittel und dem Zuschlag verringert. Weiters sind die Festigkeiten der verwendeten Zuschlagsstoffe wesentlich höher als bei Normalbeton, dadurch nähert sich der E-Modul des Zuschlagsstoffes dem des hydratisierten Zements an. Nebenbei ist auch der Temperaturkoeffizient des Quarzes und des Zements annähernd gleich. [13]
- **Rohdichte und Luftgehalt**
Die Rohdichte und der Luftgehalt sind voneinander abhängig. Für die Erreichung einer hohen Rohdichte ist eine große Packungsdichte notwendig. Mit steigendem Luftgehalt steigt auch die Porosität des Materials. Durch eine Optimierung der Größen des Korngemisches kann eine dichte Lagerung und dadurch ein geringer Luftgehalt im Material erzielt werden. Bei einem entsprechenden W/Z-Wert werden die vorhandenen Luftporen mit Wasser gefüllt und die maximale Dichte erreicht. Bei höherem Wert wird zusätzliches Wasser in Poren eingelagert und zusätzliches Volumen entsteht. [13]
- **Schwinden und Kriechen**
Ultra hochfeste Betone weisen bedingt durch ihre Zusammensetzung ein hohes Maß an Schwindverformungen auf. Schwinden tritt durch eine Veränderung des Wasserhaushaltes im Beton ein. Schwindverformungen sind Volumsveränderungen und können in vier Arten gegliedert werden. Kapillares Schwinden oder plastisches Schwinden sind die ersten Verformungen und treten bei der Verdunstung von Wasser im weichen Zustand ein. Als Trocknungsschwinden wird die Verdunstung des Wassers im erhärteten Zustand bezeichnet. Bei dem autogenen Schwinden findet eine Nachhydratation statt. Als letztes gibt es das Carbonatisierungsschwinden, welches durch die Abgabe von Wasser zu einer Volumsreduktion führt.
Das Carbonatisierungsschwinden ist auf Grund der geringen Carbonatisierungstiefe bei UHPC vernachlässigbar klein, auch plastisches Schwinden kann durch Zusatzmitteln stark verringert werden. Bei dem Trocknungsschwinden wird eine Ausgleichsfeuchtigkeit zwischen Umgebung und dem Beton angestrebt. Dadurch tritt an der Oberfläche und im Inneren des Beton eine verschiedene Feuchtigkeit auf, dass zu Schwindspannungen führt. Diese Spannungen nehmen vom Rand zum Inneren des Bauteils ab und treten sehr langsam auf, wobei ein Teil dieser Spannungen durch Kriechverformungen wieder abgebaut werden. Übersteigen die Schwindspannungen die aufnehm-

baren Zugspannungen so treten Risse auf. Die Schwindverformungen können einerseits durch Wärmebehandlungen oder andererseits durch den Einsatz von Fasern verkleinert werden. Die Kunststofffasern binden Wasser und geben es später für eine Nachhydratation wieder ab. Bei UHPC ist der Anteil an autogenen Schwinden, wegen dem hohen Zementanteil und dem geringen Wassergehalt, deutlich größer als bei Normalbeton.

Das Kriechen des Betons wird im wesentlichen durch die Kriechzahl beschrieben. Untersuchungen zeigen, dass die Kriechzahl bei UHPC wesentlich kleiner als bei Normalbeton ist, und Trocknungskriechen vernachlässigbar ist. Mangelnde Kapillarporen und das dichte Gefüge im UHPC führen zu einem langsamen Entwickeln der Kriechverformungen. [18] Langzeituntersuchungen konnten auf Grund der relativ neuen Entwicklungen des UHPC noch nicht durchgeführt werden, dadurch ist der komplexe Vorgang des Kriechens noch nicht restlos geklärt.

- Druckfestigkeit

Ultrahochfeste Betone haben eine Druckfestigkeit über 150 N/mm^2 bei einer Betonstauchung zwischen 4 und 5 %. Durch die hohe Festigkeit nimmt die Duktilität des Beton stark ab. Es führt zu einem Spröbruch. Aus Sicherheitsgründen darf bei der Bemessung nur ein Bruchteil, der maximal aufnehmbaren Druckfestigkeit, angesetzt werden. Zusätzlich zu der Druckfestigkeit werden die zulässigen Stauchungen im Beton begrenzt. Die Höhe der Druckfestigkeit im Beton ergibt sich aus einer Anzahl vieler Faktoren: [13]

- Betonrezeptur

Die Festigkeit des Zuschlages, Zementeigenschaften, die Verwendung bestimmter Zusatzmittel und Zusatzstoffen und der W/Z-Wert tragen den größten Teil an der Druckfestigkeit bei.

- Packungsdichte

Die geometrische Größenverteilung der Bestandteile wird so abgestimmt, dass sich die einzelnen Kornfraktionen in ihrer Positionierung im Gefüge nicht behindern.

- Verbund

Die Verwendung von Mikrosilika und Zement ermöglichen einen guten Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein. Die schwächste Stelle im Beton liegt bei UHPC in den Zuschlagsstoffen und nicht wie bei Normalbeton in den Verbundzonen.

- Homogenisierung

Durch die Verwendung von feineren Zuschlagskörnern wird eine homogenere Matrix erzeugt und die Anzahl an Fehlstellen minimiert.

- W/Z Wert

Durch die Verringerung des Wasseranteiles wird die Anzahl der Kapillarporen bei der Hydratation und dadurch Schwachstellen im Gefüge verringert.

- Nachbehandlung
Durch entsprechende Nachbehandlung wird, die Bildung von festigkeitssteigernden Phasen angeregt und eingeschlossene Wasser-, und Luftporen ausgepresst.
- Biegezugfestigkeit
Die Biegezugfestigkeit wird einerseits im Zustand I durch die erhöhte Zugfestigkeit von UHPC und andererseits im Zustand II maßgebend durch die Zugfestigkeit der Fasern im Beton bestimmt. Die Beigabe der Fasern bewirkt das stark verbesserte Nachbruchverhalten. Wie in Kapitel 2.3.9 beschrieben, sind eine Anzahl an Faktoren bei Fasern in der Matrix maßgebend.
- Elastizitätsmodul
Der Elastizitätsmodul beschreibt das elastische Verhalten des Stoffes. Bei Beton ist der E-Modul vom verwendeten Zementstein und von der Art des Zuschlages abhängig. Bei UHPC ergibt sich der Elastizitätsmodul aus dem E-Modul der Zuschlagsstoffe, da bei den Zuschlägen die Steifigkeit und damit der E-Modul geringer als bei dem Verbund zwischen Zuschlag und Zementstein ist. Bei ultrahochfesten Beton ist der E-Modul über 75000 N/mm^2 , bei Normalbeton ist dieser im Bereich von ca. 25000 bis 45000 N/mm^2 .
- Durchlässigkeit, Wasserabsorption, Chemische Angriffe
Die genannten Faktoren sind zum größten Teil von der Porengeometrie, von dem Porensystem und dessen Dichte sowie deren Verbindungen im Material abhängig. UHPC wird fast allen Anforderungen ohne aufwendige Oberflächenbehandlungen gerecht. Kapillarporen, Gelporen und Mikrorisse sind, auf Grund des Einsatzes von Mikrosilika und einem niedrigen W/Z-Wert, kaum mehr vorhanden. Der chemisch lösliche Angriff wird einerseits durch die starke Bindung des Calciumhydroxides in den CSH-Phasen und andererseits der volumsvergrößernde treibende Angriff durch den Einsatz von Zement mit geringen Anteil an C_3A verhindert.
- Chloridionen- Diffusion
Beispielsweise wurde bei einem frei bewitterten UHPC nach drei Jahren eine Carbonatisierungstiefe von $1,5 \text{ mm}$ festgestellt. Dies ermöglicht eine geringere Bewehrungsüberdeckung als bei Normalbeton. Der Grund dafür liegt einerseits bei den hohen Calciumhydroxidkonzentrationen an der Oberfläche und andererseits bei der niedrigen CO_2 Durchlässigkeit. Dies resultiert aus der geringen Anzahl an Kapillarporen im UHPC. Mikrorisse ermöglichen jedoch einen Ionenstrom, der zu einem wesentlichen Grund zur Korrosion der Bewehrung im Beton beiträgt. Der Ionenstrom ist bei ungerissenen UHPC um ca. den Faktor 60 geringer als jener bei Normalbeton. [16]

2.4 Aramid

2.4.1 Grundlagen

Aramid gibt es bereits seit 1965 und wurde unter dem Namen Kevlar von Stephanie Louise Kwolek bei DuPont bis zur Marktreife gebracht. Aramidfasern sind Industriefasern und zeichnen sich durch die hohe Festigkeit, Bruchdehnung, gutes Schwingungsverhalten und ein sehr gutes Brandverhalten aus. Ein weiterer Faserhersteller ist Twaron und Technora von Teijin.

2.4.2 Ausgangsstoffe

Aramid hat eine goldgelbe Färbung und besteht aus aromatischen Polyamiden. Die Steifigkeit und die Festigkeit ergeben sich aus den kovalenten Bindungen der linearen organischen Polymeren. Die Moleküle untereinander sind durch Wasserstoffbrückenbindungen verbunden. Die ringförmigen Bindungen in den langen Ketten ergeben die hohe Steifigkeit. Die regelmäßige Anordnung der Phenyl- Ringe und der Amidgruppen mit den Wasserstoffbrückenbindungen verleiht den Ketten hohe Festigkeit und bewirkt gleichzeitig eine hohe Packungsdichte. Die Orientierung der kristallinen Überstruktur und der Fibrillen, die sich aus diesen aufbauen, schwankt nach neueren Modellvorstellungen mehr oder weniger um die Faserachse. Kevlar und Twaron sind sehr ähnliche Fasern, beide basieren auf Polyphenylterephthalamid. Diese sind sehr lange und steife Moleküle und lassen sich beim Verspinnen in der Verstreckungsrichtung orientieren. Die räumliche Anordnung des Polyphenylterephthalamid nimmt die Zugspannung in Richtung der Faserachse auf. Die Wasserstoffbrückenbindung ist annähernd normal zur Längsachse und stabilisiert das Gefüge gegen die gegenseitigen Verschiebungen (siehe Abbildung 8). [6]

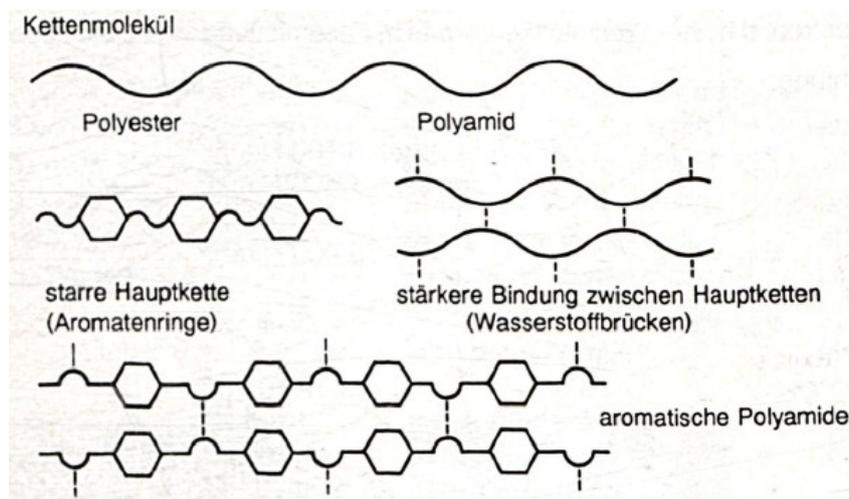


Abbildung 8: Aufbau von Ar(omatischen Poly)-amiden [6]

2.4.3 Arten

Es wird grundsätzlich zwischen Meta-Aramid (Teijinconex, Nomex) und Para-Aramid (Twaron, Kevlar) unterschieden (siehe Abbildung 9). Para-Aamide heißen mit vollständigem Namen auch Poly (p-phenyleneterephthalamide) und werden zum Teil mit der Abkürzung PPTA bezeichnet. Der Unterschied liegt in der Lage des Zweitsubstituent im Verhältnis zum Erstsubstituent an der Wasserstoffbrückenbindung. Im Bauwesen wird auf Grund der hohen Zugfestigkeit meist das Para-Aramid eingesetzt. Meta-Aramid wird speziell für den Brandschutz verwendet. [6]

- Meta-Aramid (Teijinconex und Nomex)
 - permanenter Flammschutz
 - hohe Lebensdauer
 - geringe Dichte
 - chemische Beständigkeit
- Para-Aramid (Twaron und Kevlar)
 - flammhemmend
 - hohe Zugfestigkeit
 - abriebfest

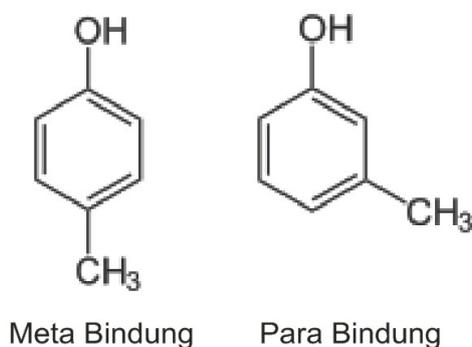


Abbildung 9: Unterschied einer Meta-, und Para-Bindung

2.4.4 Herstellung

Die Herstellung von Aramidfasern wird mit einer Lösung vorgenommen, da sich bei einer Schmelzung die Fasern vorher thermisch zersetzen würden. Die Schmelztemperatur ist demnach höher als die Temperatur für eine thermische Zersetzung. Für eine gleichmäßige Faserherstellung sowie für eine optimale Orientierung der Faser ist eine hohe Konzentration an Polymeren in der Spinnlösung von Vorteil. Als

Lösungsmittel wird hauptsächlich konzentrierte Schwefelsäure verwendet. Das Direktspinnen aus einer Polymerlösung hat sich jedoch nicht als praktikabel erwiesen, des weiteren wurden Versuche für die Faserherstellung auf Basis einer Polymerisation geführt. Bei dieser Polymerisation wird auch Schwefelsäure als Lösungsmittel eingesetzt. In Abbildung 10 ist ein Produktionsablauf von Aramid dargestellt. Bei diesem wird die Lösung wiedergewonnen und neuerlich der Polymerisation zurückgeführt. Als Ausgangsstoff bei der Aramiderzeugung wird Dicarbonsäurehalogenid verwendet. Die Ausgangsstoffe werden auch Alkanoylhalogenide genannt und gehören der Gruppe Carbonsäuren an. Das Aramid bildet sich durch eine Reaktion in der Lösung. Die Verspinnung der langkettigen Bindungen erfolgt mit der klassischen Nassspinnmethode. Bei diesem Prozess werden die gebildeten Monomeren in ein weiteres Lösungsgemisch eingedüst. Durch das Vermischen mit der weiteren Lösung fällt das Polymer aus und es werden die Filamente gebildet. Die Filamente werden nach weiteren Verarbeitungsschritten zu einem Garn verdreht. In einem nächsten Schritt werden die Garne nochmals erhitzt und verstreckt, dass zu einem erhöhten E-Modul bei gleicher Festigkeit und geringerer Dehnung führt. [6]

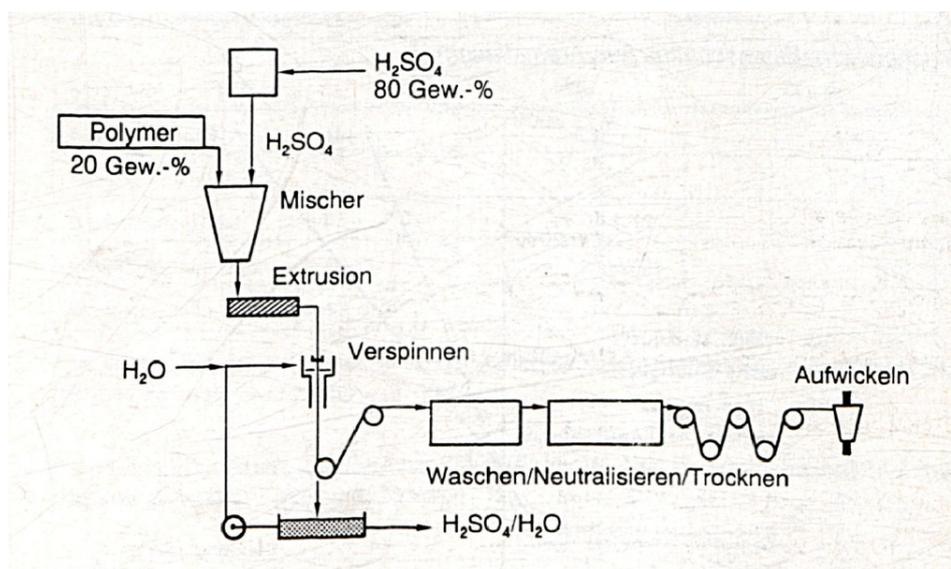


Abbildung 10: Produktionsablauf von Aramidfasern [6]

2.4.5 Anwendung

Die ursprüngliche und auch die bekannteste Verwendung von Aramidfasern liegt im Sicherheitswesen. Durch die geringe Dichte und die hohe Festigkeit werden aus dem Material ballistische Sicherheitsanzüge, Helme und Schnittschutzhandschuhe gefertigt. Oft werden die Aramidfasern auch als Asbestersatz oder als Verstärkungsmaterial eingesetzt, wie z.B. bei Bremsbelägen, bei Glasfaserkabel und bei Dichtungen. Auf Grund der nicht elektrischen Leitfähigkeit werden auch Bestandteile von Transformatoren, Isolatoren und weiter Teile in der Elektronik aus Aramid gefertigt.

Auch bei Sportgeräten findet das leichte Material immer mehr Beliebtheit. Durch die hohe Zug und Reißfestigkeit kommen die Fasern beim Flugzeugbau, Bootssport und auf der Rennbahn zum Einsatz. [3]

Schlussendlich wird Aramid, wie auch bei den Versuchen für meine Diplomarbeit, im Bauwesen eingesetzt. Einerseits werden Aramidgewebe oft bei Membrankonstruktionen als Grundmaterial verwendet, wobei für die UV-Beständigkeit andere Beschichtungen dienen. Andererseits wird Aramid auch für Faserverbundkunststoffe verwendet. Bei FVK können viele beliebige Formen mit diversen Verfahren hergestellt werden. Die Oberfläche der Zuelemente kann genoppt oder mit Sand bestreut werden. Für das Bauwesen wurden die Aparaee-Zugglieder von den Firmen Sigre und Teijin Aramid entwickelt. [20] Für die später dokumentierten Versuche werden FVK-Stäbe der Firma Sireg aus einem Pultrusionsverfahren verwendet.

2.4.6 Materialeigenschaften

Aramidfasern lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: [4] Durch die starke Orientierung der Fasern in eine Richtung ist das Material anisotrop. Die genauen Eigenschaften und Festigkeitsdaten sind in Tabelle 7 dokumentiert.

- Low-Modules-Fasern (LM)
LM-Fasern besitzen einen geringeren E-Modul und daher eine höhere Arbeitsaufnahme und Schlagzähigkeit. Ihr Hauptanwendungsgebiet liegt im Sicherheitswesen bei Panzerungen.
- High-Modules-Fasern (HM)
HM-Fasern werden für Stoß-, und verschleißfeste Bauteile verwendet.

Aramidfasern haben unter allen Fasern die größte Duktilität, das zwar einerseits in den ballistischen Anwendungen Begünstigungen findet, andererseits bei bautechnischen Bearbeitungen der Fasern Probleme mit sich bringt. Eine weitere Beeinträchtigung ist die Feuchteaufnahme der Fasern, welche im FVK einen erheblichen Nachteil zwischen den Fasern und der Matrix bedeutet.

2.5 Glasfaser

Der tatsächliche Ort der Erfindung des Glases ist noch unbekannt. Die Römer waren jedoch die ersten, die es als Fensterfüllungen verwendet haben. Der bedeutendste Sitz der Glasherstellung im römischen Reich lag in Venedig.

Glasfasern und ihren chemischen Aufbau entdeckten die Chinesen bereits 200-220 n.Chr. Die industrielle Fertigung dieser Faser begann aber erst in den 1910er. Wird Glas zu dünnen Fäden ausgezogen, so verliert es seine Sprödigkeit, die Fäden werden schmiegsamer, oder mehr technisch ausgedrückt, es werden die zulässigen Mindestbiegeradien mit kleinerem Durchmesser immer kleiner. Darüber hinaus tritt gegenüber normalem Glas ein erheblicher Festigkeitszuwachs ein. So erreichen Glasfasern von 3-25 μm Durchmesser Festigkeiten zwischen 3,1 und 4,6 GPa. [7]

2.5.1 Grundlagen

Die Verwertung von Glasfasern als Verstärkung von Polymermatrizen begann um 1912, jedoch wurden größere Mengen für industrielle Zwecke erst um 1950 produziert, als das Grenzflächenproblem durch geeignete Beschichtungen gelöst worden war. [1]

2.5.2 Ausgangsstoffe, Arten

Im wesentlichen werden Glasfasern in 6 Gruppen eingeteilt.

- E-Glas
- R/S-Glas
- M-Glas
- C-Glas
- D-Glas
- Q-Glas

E steht für elektrisch, da diese Fasern ursprünglich für den elektrischen Einsatz entwickelt wurden. R und S für Fasern mit hoher Festigkeit. R kommt vom französischen *Résistance* und S steht für *Strength*. Glas mit einem hohen E-Modul wird mit M bezeichnet. C steht für die Bezeichnung einer guten chemischen Beständigkeit. Mit dem Kürzel D bezeichnet man Glasfasern mit guten dielektrischen Eigenschaften. Quarzglas mit 100% Kieselsäure(SiO_2) gehört zu dieser Kategorie. Statt dem C kann auch als Synonym das Kürzel A verwendet werden. A steht für *Acid*, also für säurebeständiges Glas. Die Quarzglasfaser Q-Glas besteht als einzige Glasfaser nur aus einer Komponente. Alle anderen Glasfasern bestehen aus mehreren Komponenten, meist Oxide wie Natriumoxid(Na_2O), Kaliumoxid(K_2O), Magnesiumoxid(MgO), Bleioxid(PbO), Bortrioxid(B_2O_3) oder Aluminiumoxid(Al_2O_3).

(B_2O_3) und (Al_2O_3) gehören genauso wie (SiO_2) zu die glasbildenden Komponenten, auch Netzwerkbildner genannt. Die anderen angeführten Oxiden sind Netzwerkwandler, die spalten die Si-O-Si Verbindungen auf und lagern die Metallionen in die Lücken der Hohlräume ein. Je nach Art und Menge der Einlagerungen werden die Eigenschaften des Glases verändert. So bewirkt z.B. (B_2O_3) eine bessere Bewitterungsbeständigkeit und (Al_2O_3) eine bessere Chemikalienbeständigkeit. Tabelle 5 zeigt die chemische Zusammensetzung der für Verbundwerkstoffe wichtigsten Glasfasern. [7]

Tabelle 5: Prozentuelle chemische Zusammensetzung von verschiedenen Glasfasern. E-elektrisch, A-, C-chemisch resistent, R-, S-hochfest, D-dielektrisch [7]

Bestandteile (Angaben in Gewichts- %)	Polyvalen- tes Glas	Säurebe- ständiges Glas		Laugenbe- ständiges Glas		Hochfestes Glas		Glas mit guten dielektrischen Eigenschaften	
		Typ E	Typ A	Typ C		Typ R	Typ S	Typ D	Quarz
(SiO_2)	53-54	70-72	60-65	65-70	62-75	60	62-65	73-74	100
(Al_2O_3)	14-15,5	0-2,5	2-6		0-6	25	20-25	0	
(CaO)	total	5-9	14	4-8		6	-	0,5-0,6	
(MgO)	20-24	1-4	1-3			9	10-15		
(B_2O_3)	6,5-9	0-0,5	2-7		0-6		0-1,2	22-23	
(F)	0-0,7	-							
(Na_2O)	1	12-15	8-10	14-20	13-21		0-1,1	1,3	
(ZrO_2)	1				7-17				
(K_2O)	1	1		0-3				1,5	
(Fe_2O_3)	1	0	0		0-5				
(TiO_2)	1	-		6-12	0-4				
(ZnO)					1-10				
(CaF_2)					0-2				

Glasfasern sind die gängigsten Fasern zur Verstärkung von Kunststoffen, dabei dominieren die E-Glasfasern. Sie sind mit Abstand die billigsten Verstärkungsfasern.

2.5.3 Herstellung

Die Eigenschaften von Glasfasern sind einerseits von den chemischen Ausgangsmaterialien und andererseits von der Herstellungsmethode abhängig. Textile Glasfäden und Glasfasern mit Durchmessern von 5 bis 13 μm werden hauptsächlich nach dem Düsenziehverfahren hergestellt. Der Herstellungsprozess beginnt mit dem Schmelzen und Säubern des Rohmaterials in mehreren hintereinander geschalteten Ofenkammern. Am Ende der letzten Ofenkammer beginnt das Ausziehen der Fäden. Die aus der Glasschmelze (1400-1600 °C) gezogenen Einzelfäden werden in der Regel zu Faserbündel (Rovings) zusammengefasst. Solche Rovings können aus mehreren

tausend Einzelfäden bestehen.

Aus einer Spinndüse wird das bei ca. 1250 °C heiße, aus den Bohrungen austretende flüssige Glas mit hoher Geschwindigkeit mechanisch abgezogen. Düsenbohrungen haben je nach gewünschten Fadendurchmesser einen Durchmesser von 1-2 mm. Das flüssige Glas kühlt ab und durchläuft, bis es fest wird, einen Bereich zunehmender Festigkeit, in dem es zu sehr dünnen Querschnitten ausgezogen wird. Das Abziehen der Fäden erfolgt durch einen sich schnell drehenden Spulenkopf. Vor dem Aufwickeln der Fäden werden diese mit Mineralöl geschichtet und zugleich zu einem Roving gebündelt. Sie werden dadurch glatter und der Roving wird besser zusammengehalten, wodurch seine Weiterverarbeitung z.B. zum Gewebe erleichtert wird. [7]

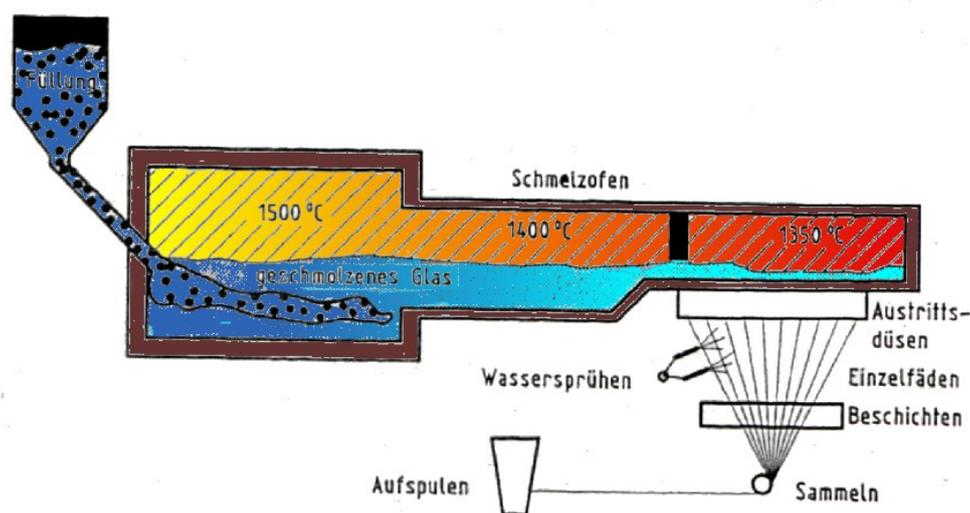


Abbildung 11: Herstellung der Glasfasern [7]

2.5.4 Materialeigenschaften

In Tabelle 6 sind die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Glasfasertypen zusammengefasst. Der große Nachteil der Glasfasern ist deren geringer E-Modul. Überall wo Steifigkeit gefragt ist, sind Glasfasern in Verbundwerkstoffen, gegenüber den anderen Faserwerkstoffen unterlegen. Neben dem geringen E-Modul besitzen sie jedoch eine hohe Zugfestigkeit und daraus eine große elastische Bruchdehnung. Außer Glasfasern des Typs M haben eine beträchtlich höhere Festigkeit und ein höheres E-Modul. Jedoch sind diese sehr teuer und werden fast ausschließlich für militärische Zwecke eingesetzt.

Der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeit und den E-Modul ist bei Glasfasern enorm. Demnach können aber Glasfasern vom Typ E und R/ S ohne Festigkeitsverlust auch über längere Zeiträume bis auf 200 und 250 °C erwärmt werden. Über 250 °C fällt jedoch die Festigkeit steil ab. Der Einfluss der Temperatur auf Festig-

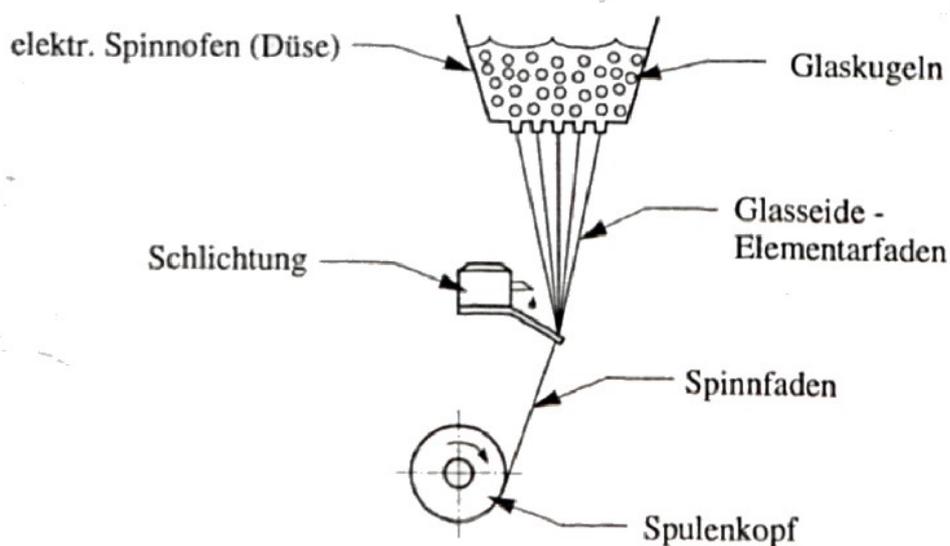


Abbildung 12: Düsenziehverfahren zur Herstellung der Glasfasern [1]

Tabelle 6: Typische Eigenschaften von verschiedenen Glasfasern. E- elektrisch, R/ S hochfest, M- steif, C- chemisch resistent [7]

Kennwert	Einheit	Glasfaser			
		Typ E	Typ R/ S	Typ M	Typ C
Zugfestigkeit	[GPa]	3,5	4,7	7	3,1
E- Modul	[GPa]	73	88	125	71
Bruchdehnung	[%]	4,5	5,0	5,5	3,5
spez. Zugfestigkeit	[GPa x cm ³ /g]	1,38	1,8	2,8	1,3
spez. E- Modul	[GPa x cm ³ /g]	28,8	34	50,3	29
Faserdurchmesser	[μ m]	3-13	10	10	
Dichte	[g/cm ³]	2,55	2,49		2,45
therm. Ausdehnungskoeffizient	[10 ⁻⁶ /K]	5-6	4		7,2
Schmelzpunkt	[°C]	840	1000		

keit und E-Modul hat im wesentlichen zwei Gründe: [7]

- Die hohe Temperatur kommt einer thermischen Entschlichtung gleich. Das bewirkt eine geringere Wasseraufnahme und wiederum einen hydrolytischen Abbau.
- Bei starker Erhitzung nähert sich die Struktur und die Eigenschaften denen des Kompaktglases an, d.h. die Festigkeit nimmt ab.

Bei der Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und bei der thermischen Beständigkeit weisen die M- und R/S-Fasern gegenüber den E-Fasern einen enormen Unterschied auf. Die stärksten Fasern sind jene des Typs-M, sie haben neben dem höchsten E-Modul mit 125 GPa auch noch mit 7 GPa die größte Zugfestigkeit. Um Fasern vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen, müssen sie mit Sorgfalt behandelt werden. Dies passiert z.B. durch Lagerung bei tiefen Temperaturen oder in einer Vakuumverpackung.

Für die Verarbeitung von Glasfasern sind geeignete Schichten erforderlich. Die Aufgaben der Schichten sind einerseits Schutz vor Korrosion, Abrieb und Feuchte und andererseits Verbesserung der Haftfähigkeit zur Hartmatrix.

2.6 FVK Bewehrung

2.6.1 Allgemein

Eine Bewehrung oder eine Armierung ist eine Verstärkung eines Objektes durch ein anderes Material. Dabei wird das schwache Hauptmaterial von einem stärkeren Material unterstützt. Die Bewehrung hat eine größere Druck-, oder Zugfestigkeit beziehungsweise kann bei einer bestimmten Einwirkung einen größeren Widerstand leisten.

2.6.2 Geschichte

Die Erfindung der Bewehrung, in Form von einer Verstärkung im Beton, geht auf den Franzosen Joseph Monier zurück, nach ihm wurde das Bewehrungsseisen auch als Moniereisen benannt. Dieser Herr ärgerte sich über die kaputten Blumentröge aus Beton, die durch das Wurzelwerk zerstört wurden. Als Lösung umwickelte er diese mit Eisenmatten und betonierte sie ein. Bewehrungsstahl ist auch unter dem Namen Schlaffeisen oder Armierungseisen bekannt. [11]

Mitte des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Geschoßdecken mit Drahtseilen bewehrt. Es wurde ein Patent von dem Engländer William Boutand Wilkinson angemeldet, bei dem die Bewehrung unter der Schwerlinie im Querschnitt anzuordnen ist. Später ist die Bewehrung am Auflager und über Stützen nach oben in den Querschnitt gezogen worden, um die Armierung immer in der Zugzone zu haben.

Anfangs wurden keine speziellen Betonstähle als Bewehrung verwendet, sondern Flacheisen, Stäbe oder Profile mit glatter Oberfläche. Bei dem glatten Stahl erfolgte die Aktivierung der Tragfähigkeit weniger über den Verbund zwischen dem Stahl und dem Beton, sondern über die Verankerung am Ende der Bewehrung. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts kamen die heutigen Rippentorstähle zum Einsatz. Sie werden im Werk auf der Walzstraße vorgefertigt und anschließend kalt verfestigt um die geforderten Werkstoffkennwerte zu erreichen.

Ergänzend zur klassischen Bewehrung übernimmt mehr und mehr die Fasertechnik die Bewehrungsaufgabe. Es wird zwischen Stahlfasern, Kunststofffasern und Glasfasern unterschieden. Faserverbundkunststoffe sind in einer Matrix eingelegte Faserbündel und können als schlaffe Bewehrung oder als Vorspannung den Bewehrungsstahl im Beton ersetzen.

2.6.3 Funktionsweise

Die Funktionsweise eines Faserverbundwerkstoffes wirkt erst wenn drei Systeme aufeinander abgestimmt sind.

1. Der E-Modul der Faser in Längsrichtung muss größer als der der Matrix sein.
2. Die Bruchdehnung der Faser muss kleiner als die der Matrix sein.
3. Die Bruchfestigkeit der Faser muss größer als die der Matrix sein.

Quer zur Faser tritt das Verhältnis nicht ein, da die meisten Werkstoffe ein anisotropes Verhalten vorweisen.

2.6.4 Arten von Faserverbundkunststoffen

Bewehrungen aus Faserverbundkunststoffen können aus verschiedenen Materialien bestehen. Ein Faserverbundkunststoff ist im Allgemeinen eine Mischstruktur aus zwei Komponenten. Durch die Verbindung dieser Komponenten erhält der Werkstoff hochwertigere Eigenschaften, als jede Komponente für sich alleine. Fasern sind grundsätzlich kreisförmige, stabförmige Elemente die ein großes Verhältnis Länge / Dicke aufweisen. Je dünner die Fasern sind, desto höher ist die Zugfestigkeit, weil der Einfluss an Fehlstellen sinkt. Der Faserdurchmesser variiert zwischen 5 und 50 μm . Die Fasern bestehen zuerst aus Einzelfäden (Filamente) und werden in einem weiteren Produktionsvorgang zu einem Faserbündel (Roving) zusammengefasst. Grundsätzlich kann zwischen Glas-, Carbon-, Aramid... Fasern unterschieden werden. [12]

- Glasfasern

Eine Glasfaser ist eine aus Glas bestehende Faser und gehört zu der Gruppe der Mineralfasern. Ihr Hauptanwendungsgebiet liegt in der Kunststoffverstärkung. Bei der Herstellung werden dünne Fäden aus einer Glasschmelze gezogen. Die Düsen aus denen die Fasern gezogen werden haben einen Durchmesser von 2 mm. Nachdem die heißen Fäden einen zähflüssigen Zustand erreicht haben, werden sie gestreckt und auf die gewünschte Dicke gebracht. Schlussendlich stellt sich ein Durchmesser von 10 bis 25 μm ein. Im letzten Schritt werden sie entweder zu einem Faden oder zu einem Roving verbunden. Die Beschichtung hält die einzelnen Fäden zusammen und schützt diese vor chemischer Einwirkung. Die amorphe Struktur des Materials verleiht der Glasfaser ein isotropes Verhalten. Glasfasern sind bei hohen Temperaturen beständig und dienen als Isolatoren und verringern, bei einer langen Temperatureinwirkung, keine mechanischen Eigenschaften. [4]

Nähere Informationen über Aramid sind im Kapitel 2.5 zu finden.

- Stahlfasern

Stahlfasern werden in allen möglichen Formen und Längen angeboten. Um eine bessere Verankerung zu gewährleisten werden die Fasern am Ende profiliert. Durch die Materialeigenschaften verhalten sich die Fasern in alle Richtungen gleich. Nähere Informationen über Stahlfasern sind im Kapitel 2.3.9 Fasern im Beton zu finden.

- Carbonfasern [4]

Carbonfasern werden auch Kohlenstofffasern genannt. Sie bestehen aus einem kohlenstoffhaltigen Ausgangsprodukt. Kohlenstofffasern werden entweder durch eine Verkokung von Polyacrylnitril (PAN) oder von Steinfenteer oder Erdölpech (Pitch) produziert. Das Teer und das Erdölpech zählt zu den

Kohlenwasserstoffgemischen. Sie werden auch in isotrope und anisotrope Fasern unterschieden. Die ersten haben eine geringe Festigkeit und spielen im FVK eine geringe Rolle. Die anisotropen Produkte besitzen eine hohe Festigkeit bei einer geringen Bruchdehnung. Durch das PAN-Verfahren entstehen die High Tenacity Fasern (HT). (HM) High Modulus Fasern werden in der Regel durch den (Pitch)-Prozess erzeugt. Aufgrund der fehlenden Bindung quer zur Faser ist die Zugfestigkeit und der E-Modul in Querrichtung wesentlich geringer. Durch einen zusätzlichen Wärmeprozess bei einer Temperatur von 3000 °C können HT- Fasern in HM-Kohlenstofffasern umgewandelt werden. Eine Kohlenstofffaser hat einen Durchmesser von 5-8 μm . Üblicherweise werden 1000 bis 24000 Einzelfasern zu einem Bündel zusammengefasst. Im Bauwesen werden die CFK-Fasern hauptsächlich zu Litzen, Lamellen oder Matten im Pultrusionsverfahren weiterverarbeitet. Die Litzen und Drähte werden großteils bei der Vorspannung eingesetzt, die Lamellen und Matten finden als Verstärkungselemente ihre Anwendung. [4]

- Basaltfasern

Seit kurzem gibt es auch Basaltfasern, sie gehören zu der Gruppe der Mineralfasern Sie werden wie Glasfasern aus einer Schmelze bei 1400 °C hergestellt. Die Zusammensetzung der Schmelze bestimmt die Eigenschaft der Faser. Die Fasern sind durch die grünlich- braune Färbung markant. Durch die amorphe Struktur besitzen diese in Querrichtung dieselbe Eigenschaft wie in Faser Längsrichtung. Die physikalischen Eigenschaften und ihre Anwendung sind bei der Glasfaser sehr ähnlich. Ihr Hauptanwendungsgebiet liegt bei Hitzeschutzmaterialien. [4]

- Aramidfasern

Aramidfasern bestehen aus langkettigen synthetischen Polyamiden und zählen zu den organischen Kunststoffen. Man differenziert zwischen zwei Modifikationen, die sich insbesondere durch ihren unterschiedlichen Elastizitätsmodul unterscheiden.

- „Low Modulus“ (LM): Zugfestigkeit 2800 N/mm² und E-Modul 60000 N/mm²
- „High Modulus“ (HM): Zugfestigkeit 2900 N/mm² und E-Modul 130000 N/mm²

Nähere Informationen über Aramid sind im Kapitel 2.4 zu finden. [4]

- Keramikfasern

Keramikfasern kommen bei hohen Temperaturbeanspruchungen zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um ein nicht-metallisches anorganisches Material von der Gruppe der Mineralfasern. Keramikfasern werden im Gegensatz zu den amorphen Glasfasern durch eine Pyrolyse aus einer polymeren Vorstufe erzeugt. Die Struktur und die Zusätze der Keramikfasern sorgen dafür, dass ei-

ne, im Vergleich zur normalen Keramik, hohe Dehnbarkeit und Zugfestigkeit entsteht. Sie werden hauptsächlich für Wärmeisolatoren eingesetzt.

- Naturfasern

Eine Vielzahl an Naturfaserarten können bei Faserverbundwerkstoffen eingesetzt werden. Zu den heimischen Fasern gehören die Hanf-, Holz- und Flachsfasern. Des Weiteren gibt es noch Kenaf-, Ramie-, Jute- oder Sisalfasern. Da sich die Naturfasern deutlich von den vorher genannten Fasern unterscheiden, ist das Herstellungsverfahren von FVK mit Naturfasern den Eigenheiten dieser anzupassen. Wegen der begrenzten thermischen Stabilität und der starken Wechselwirkung mit Wasser sind andere Herstellungsmethoden anzuwenden. Zu den Kombinationsmethoden für die Verarbeitung von Naturfasern mit thermoplastischen und auch duroplastischen Kunststoffen zählen das Formpressen, Spritzgießen und das Extrusionsverfahren.

Naturfasern haben andererseits Vorteile die das Material interessant machen. Einerseits haben Naturfasern eine geringere Dichte, was bei einem hohen Faseranteil eine hohe Gewichtsersparnis mitbringt. Weiters haben Naturfaserverbundkunststoffe (NFVK) im Gegensatz zu Glasfaser eine deutlich geringere Splitterneigung. Naturfasern sind CO² neutral, brauchen bei der Herstellung im Verhältnis zu den anderen wenig Energie und sind wegen des reichen Rohstoffvorkommens relativ preisstabil. Das Haupteinsatzgebiet von NFVK liegt in der Automobilbranche für diverse Verkleidungen.

2.6.5 Kunstharzmatrix

Eine Bewehrung aus Faserverbundkunststoff besteht aus kontinuierlichen Verstärkungsfasern, die in einer Kunstharzmatrix eingelegt sind. Wobei 40-70 Vol.% aus Verstärkungsfasern und der restliche Anteil aus Harz besteht. Das Kunstharz hat einen deutlich niedrigeren E-Modul als die Fasern und entzieht sich daher großteils der Abtragung der Kräfte. Die Verstärkungsfasern haben eine maßgebliche Ausdehnung in Längsrichtung, daher hängt die Eigenschaft in Querrichtung maßgebend vom verwendeten Kunstharz ab. Die Matrix übernimmt den Widerstand infolge chemischer, physikalischer und mechanischer Beanspruchung. Grundsätzlich unterscheidet man bei faserverstärkten Kunststoffen thermoplastische und duroplastische Matrix.

- Thermoplastische Matrix

Faserverstärkte Kunststoffe mit einer thermoplastischen Matrix lassen sich im Nachhinein verschweißen und umformen, jedoch werden diese bei erhöhter Temperatureinwirkung weich. Üblicherweise lassen sich alle Thermoplasten als Matrix bei faserverstärkten Kunststoffen einsetzen. Die häufigst verwendeten sind Polyetheretherketon (PEEK), Polyphenylensulfid (PPS) und Polysulfon (PSU). [4]

Tabelle 7: Eigenschaften verschiedener Fasertypen [6]

Fasertyp	E-Modul N/mm ² ·10 ³	Zug- festigkeit N/mm ² ·10 ³	Bruch- dehnung ‰	Dichte g/cm ³	Durch- messer μm
E-Glasfaser	73	2,4	3	2,6	5-24
R-Glasfaser	86	3,5	4,1	2,53	5-24
Stahlfaser	206	0,3-0,7	180-260	7,8	-
HT- Carbonfaser	230	5	1,6	1,8	6
HM- Carbonfaser	700	2	0,5	1,8	6
Basaltfaser	160	3	2,3	2,7	-
HM-Aramidfaser	130	3	2,1	1,45	-
LM-Aramidfaser	86	2,8	4,3	1,44	-
Aluminium- oxidkeramik	150-370	1,7-2,9	0,6-1,1	2,7-4,1	10
Silicium- carbidkeramik	170-420	2,6-3,4	0,6-0,9	2,5-3,1	8-15

- Duroplastische Matrix

Faserverstärkte Kunststoffe mit einer duroplastischen Matrix lassen sich im Nachhinein nicht mehr umformen, weisen jedoch einen hohen Temperatureinsatzbereich auf. Diese Systeme härten bei hohen Temperaturen aus und weisen hohe Festigkeiten auf. Die häufigst verwendeten Duroplaste sind Epoxidharz (EP), ungesättigtes Polyesterharz (UP), Vinylesterharz (VE) und Phenol-Formaldehydharz (PF). [4]

Die Anforderungen an die besonderen Eigenschaften werden durch Zugabe von verschiedenen Füll- und Zusatzstoffen gesteuert. Es werden dadurch Feuchteaufnahme, Schwindverhalten, Alterungsbeständigkeit, Medienbeständigkeit, elekt-Eigenschaften u.v.m. angepasst.

Vorwiegend wird für Verbundkunststoffe eine Matrix aus Duroplasten, speziell die Gruppe der Reaktionsharze, verwendet. Diese flüssigen oder verflüssigbaren Harze werden mit einem Reaktionsmittel vermischt und härten durch Polymerisation oder Polyaddition aus. Um die Zugfestigkeit der Fasern ausnützen zu können müssen die verwendeten Harze eine höhere Bruchdehnung als die Fasern aufweisen. Im Bereich der FVK-Bewehrung sind ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze), Vinyl-

esterharze (VE-Harze) und Epoxidharze (EP-Harze) am weitesten verbreitet (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Eigenschaften verschiedener Harze [12]

Harz	E-Modul N/mm ²	Zugfestig- keit N/mm ²	Bruch- dehnung ‰	Dichte g/cm ³	Quer- dehnzahl [-]	Wärme- dehnzahl 10 ⁻⁶ /K	Glasübergangs- temperatur °C
UP-Harz	2100- 4400	34,5-103,5	10-42	1,3	0,2- 0,33	60-150	93- 150
VE-Harz	3000- 3800	73-95	10-61	1,1	0,2- 0,33	45-90	50- 260
EP-Harz	2600- 4100	3,8-176	18-130	1,2-1,3	0,38- 0,40	20	70- 300

Ihre Hauptaufgabe besteht neben dem Widerstand vor Einwirkungen in der Ableitung und Verteilung der einwirkenden Kräfte in die Fasern und die Formgebung und die Lage der Fasern im Bauteil.

2.6.6 Herstellung

Die Fasern werden möglichst in gleicher Richtung ausgerichtet, mit der Matrix umgeben und möglichst dicht miteinander verklebt. Für eine gleichmäßige Abtragung der Kräfte müssen die Bereiche zwischen den Fasern vollständig mit Harz verfüllt sein. Die gängigste Art bei der Herstellung von Faserverbund- Bewehrungsstäben ist das Strangziehverfahren (Pultrusion). Das Pultrusionsverfahren ist ein kontinuierlicher Prozess, bei dem Fasern mit einem Harz imprägniert und zu einem gewünschten Querschnitt geformt werden. Es kann zwischen einem offenen und einem geschlossenen Verfahren unterschieden werden. Bei dem offenen Verfahren werden zuerst die Fasern nebeneinander durch das Harzbad geführt und anschließend durch mehrere Vorformstationen immer genauer an das gewünschte Profil angepasst. Bei dem geschlossenen Verfahren werden die Fasern zuerst in die Form gebracht und zuletzt unter hohen Druck mit Harz miteinander verklebt. Bei dem geschlossenen System können FVK mit einem höheren Faseranteil erzeugt werden. Nach der Formgebung erfolgt bei beiden Verfahren eine unter Wärmezufuhr kontinuierliche Härtung. Nach dem Härtungsprozess erfolgt die Ablängung mit einer schienengeführten Säge. Abbildung 13 zeigt ein Beispiel eines Strangziehverfahrens. Bei vielen geformten Profilen werden als Verstärkung zusätzlich Querfasern

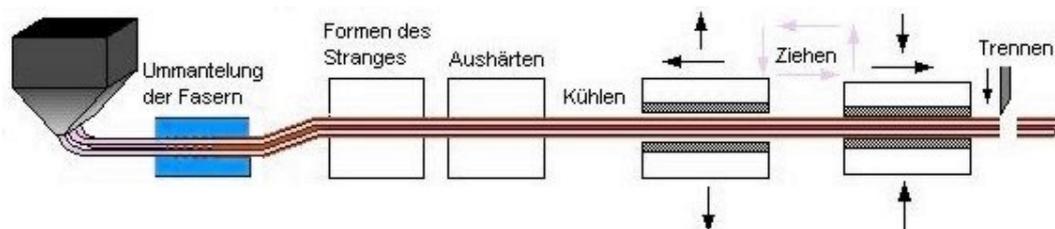


Abbildung 13: Das Strangziehverfahren (Pultrusion) [19]

oder Gewebe mitverarbeitet. Als weiteres besteht die Möglichkeit vor der Härtung der Fasern eine Oberflächenbehandlung vorzunehmen. Bei dem Einsatz als Bewehrung erzeugt eine raue bzw. profilierte Oberfläche eine bessere Verbundwirkung mit dem Beton. Die Oberfläche kann vor der Härtung entweder mit Sand bestreut oder mit weiteren Fasern rippenartig umwickelt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die eingefräste Profilierung oder das Aufrauen der fertigen Oberfläche.

2.6.7 Materialeigenschaften FVK

Faserverbundkunststoffe werden in etwa von 40-70 Vol.% Fasern und der restliche Anteil von Kunstharzmatrix gebildet. Da die Fasern im Verbund nach der Längsrichtung des Faserverbundstabes orientiert sind, werden hauptsächlich die Zugkräfte durch die Fasern abgetragen. Für Druckbeanspruchungen sind FVK nicht geeignet, da ein vorheriges ausknicken im Verband zu erwarten ist. Ebenso, wegen der Orientierung der Fasern, hängt in Querrichtung die Tragfähigkeit maßgebend von dem verwendeten Kleber ab. Die Materialeigenschaften der Kunststoffmatrix sind in Kapitel 2.6.5 genauer beschrieben. Aufgrund der niedrigen Festigkeit der Matrix verhält sich der FVK genau so wie die Fasern bis zum Bruch linear elastisch. Die Zugfestigkeit nimmt mit zunehmendem Stabdurchmesser ab, da bei dickeren Querschnitten ein unterschiedlicher Aushärtungsgrad aufscheint und wegen der geringen Schubtragfähigkeit des Klebers. In Abbildung 14 sind die E-Module von den verschiedenen FVK und von Stahl dargestellt.

Der E-Modul bei CFK liegt im Bereich von 400000 N/mm^2 . Wegen der unwirtschaftlichen Herstellung und aus Kostengründen werden jedoch CFK Fasern mit einem E-Modul unter dem von Stahl angeboten. Bewehrungsstahl hat einen Elastizitätsmodul von etwa 200000 N/mm^2 , der von Aramidfaserkunststoff und Glasfaserkunststoff liegt in etwa nur bei der Hälfte des Wertes von Baustahl. In der folgenden Tabelle 9 sind die wichtigsten Materialeigenschaften von FVK angegeben. Untersuchungen an Faserverbundkunststoffen zeigen eine um 80-90% geringere Druckfestigkeit als Zugfestigkeit. Das beruht auf dem schlechten Verhalten bei Querzug- und Schubbeanspruchung. Für Bauteile mit hohen Feuerwiderstandsklassen sind FVK nicht geeignet. Wenn diese trotzdem eingesetzt werden, dann nur mit vorheriger Schutzbehandlung. Verbundkunststoffe haben eine niedrige Glasübergangstemperatur, daher tritt teilweise schon ab ca. 100 C° eine Entfestigung in der Kunststoffmatrix auf. Obwohl die Festigkeit der Fasern bei diesen Temperaturen

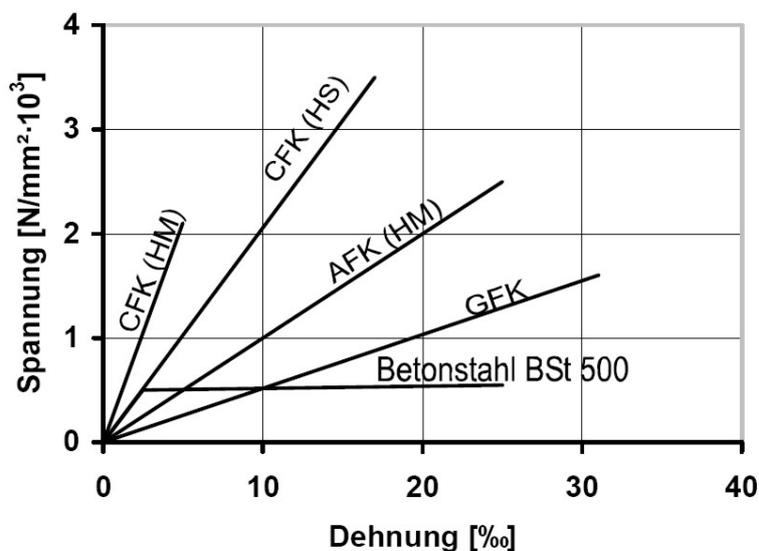


Abbildung 14: Vergleich von Spannungs-Dehnungslinien verschiedener FVK und Stahl [12]

noch nicht gefährdet ist tritt ein schlechter Verbund dazwischen ein. [12]

Bei Ermüdungsverhalten sind Faserverbundkunststoffe im Gegensatz zu Stahl sehr gutmütig. Für die Dauerhaftigkeit von FVK sind Feuchtigkeitseinwirkung, UV-Strahlung, Frost-Tau-Wechsel, Umgebungsbedingungen und alkalisches oder saures Milieu wichtige Punkte, die nicht vernachlässigt werden dürfen. Da es noch keine alten Bauwerke und somit Langzeiterfahrungen mit FVK gibt, soll die Widerstandsseite vom Material dementsprechend verkleinert werden. [12]

Tabelle 9: Eigenschaften verschiedener FVK [12]

FVK	E-Modul $\text{N/mm}^2 \cdot 10^3$	Zugfestig- keit $\text{N/mm}^2 \cdot 10^3$	Bruch- dehnung %	Dichte g/cm^3	Quer- dehnzahl [-]	Wärme- dehnzahl axial / radial $10^{-6}/\text{K}$
GFK	35-60	0,5-1,6	12-31	1,25-2,1	0,3	6-10 / 21-23
AFK	41-125	1,0-2,5	19-44	1,25-1,4	0,34	-6- -2 / 60-80
CFK	120-580	0,6-3,5	5-17	1,5-1,6	0,21	-9-0 / 74-104

2.6.8 Brandverhalten

Auf Grund der niedrigen Glasübergangstemperaturen von den verwendeten Kunststoffen in der Matrix sind bei der Verwendung von Faserverbundkunststoffen in feuerfestem Beton spezielle Maßnahmen zu setzen. Obwohl die Fasern den Temperaturanstieg weitgehend unbeschädigt überstehen, weisen die Verbundkunststoffe schon ab 70 °C eine Entfestigung auf. Die Steifigkeit sowie die Festigkeit wird, durch die Abnahme der Verbundsteifigkeit der Faserverbundkunststoff-Bewehrung, vermindert. Bevor es zu einem vollständigen Versagen kommt nimmt der Schlupf, wegen dem Steifigkeitsverlust in der Matrix, zwischen der Matrix und den Fasern enorm zu. Wird an den Verankerungsenden eine konstruktive Verankerung durchgeführt, ist ein Bauteilversagen durch den vollständigen Schlupf verhindert.

2.6.9 Biegeverhalten

Wegen den großen Zugfestigkeiten von FVK ist der Einsatz von FVK-Bewehrungen bei biegebeanspruchten Bauteilen eine sehr gute Alternative zur Stahlbewehrung. Aufgrund des niedrigeren E-Modul im Vergleich zu Stahl fallen die Dehnungen in der Bewehrung größer aus und damit auch die Rotation im Querschnitt. Dies führt zu einer Verringerung der Betondruckzonenhöhe. Um ein frühzeitiges Versagen des Betons zu verhindern, soll bei einer FVK-Bewehrung ein Beton mit erhöhter Druckfestigkeit oder eine größere Betondruckzonenbreite gewählt werden. Bei einer Vorspannung mit FVK sind die Vergrößerung der Betondruckspannungen oder der Betondruckzonen, von einer noch wichtigeren Bedeutung. Bei den später beschriebenen Versuchen in Kapitel 3 werden diese Maßnahmen speziell berücksichtigt. Für eine Druckbewehrung sind FVK jedoch nicht geeignet, da die Gefahr des Ausknickens der Fasern besteht. Wegen dem linear-elastischen Verhalten der Fasern, bis zum Versagen, ist die vollständige Tragfähigkeit beim Bruch der ersten Faser, erreicht. [3]

2.6.10 Querkraftverhalten

Die Querkraftabtragung in einem Balken wird an Hand eines idealisierten Fachwerkmodells dargestellt, wobei die Bewehrung auf der Unterseite den Zuggurt und der Beton an der Oberseite den Druckgurt bilden. Die Ober-, und Untergurte werden durch die schubsteifen Querkraftbewehrungen und den Betondruckstreben miteinander verbunden.

Eine FVK-Zugbewehrung als Längsbewehrung an der Unterseite des querkraftbeanspruchten Balken ist bei der Berücksichtigung des kleineren E-Modul gleich, wie bei einer Stahlbewehrung zu bemessen. Zum Abschluss wichtige Punkte für die Querkraftbemessung. [3]

- Wird das Verhältnis der Steifigkeiten von Stahl und FVK berücksichtigt, können die selben Bemessungsregeln angewandt werden.

- Ist der Schubmodul bei der Querkraftbeanspruchung maßgebend, muss dieser mit dem Verhältnis zum Schubmodul von Stahl angepasst werden.

Das Verhalten des Betons ist in spe nicht von der Bewehrungsart abhängig, dadurch können die druckbeanspruchten Betonstreben wie mit einer Stahlbewehrung bemessen werden. Eine FVK-Querkraftbewehrung wird wegen dem fehlenden Fließverhalten und dem elastischen Verhalten bis zum Bruch anders berücksichtigt. [3]

Wegen den komplexen Zusammenhängen der Querkraftbewehrung mit den daraus resultierenden Kräften in den Druckstreben wurden sämtliche Versuche durchgeführt [12]. Als Ergebnis sind deutliche Unterschiede in den Fachwerksmodellen der FVK-Bewehrung und im Stahlbetonbau erkennbar. Einerseits durch das linear-elastische Verhalten der FVK-Bewehrung und andererseits durch die größeren Dehnungen der FVK. Wegen der großen Dehnung in den Zuggliedern kommt es zu einer Rissbildung in den Druckgurten.

Eine Lösung besteht in der Angabe von bauteilabhängigen Dehnungsobergrenzen und von abgeminderten Spannungen.

2.6.11 Verbundverhalten

Grundsätzlich wird zwischen Haft-, Scher- und Reibungsverbund unterschieden. Der Haftverbund wird schon bei geringen Verschiebungen der Bewehrung gebrochen und kann für eine sichere Verbundtragwirkung nicht herangezogen werden. Dieser beruht auf Adhäsion und Kapillarkräften zwischen Bewehrung und Beton. Der Scherverbund stellt den wirksamsten Verbund her und wird über die Verzahnung der Bewehrung im Beton übertragen. Die Wirkung der Verzahnung ist von der Oberflächenbehandlung der FVK abhängig. Entscheidend für den Scherverbund ist das Verhalten des Betons in der Nähe der Verzahnungen. Bricht die schubbeanspruchte Zone in der Betonverzahnung, tritt ein Gleiten der Bewehrung aus dem Beton ein. Der Reibungsverbund ist eine Kombination zwischen der Verschiebung der Bewehrung und dem Querdruck. Der Reibungsverbund wird erst durch eine geringe Relativverschiebung aktiviert. Ausschlaggebend für das Maß des Reibungsverbund ist wiederum die Rauigkeit und die Querpressung.

Bei einer Stahlbewehrung wird die Verbundfestigkeit immer von den Betoneigenschaften begrenzt, bei FVK sind für das Verbundverhalten noch weitere Eigenschaften maßgebend.

- Abscherung der Oberflächenprofilierung vom FVK (schlagartiges Versagen)
- Abrieb der Oberflächenprofilierung (langsames Versagen)
- Auszug aus dem Bewehrungskanal auf Grund der geringen Quersteifigkeit.
- Verbundbruch zwischen den Fasern und der Matrix

Infolge der verschiedenen Versagensmechanismen gibt es bei FVK- Bewehrungen keine Zusammenhänge zwischen den Betoneigenschaften und dem Verbundverhalten. [3]

2.7 Vorspannung

2.7.1 Grundlagen der Vorspannung

Der Grundgedanke der Vorspannung besteht darin, dass den äußeren Beanspruchungen innere Einwirkungen entgegen wirken. Die Spannungen werden so überlagert, damit in den schwachen Zonen geringe Kräfte auftreten. Dabei wird der Bauteil mit einem Spannglied unter Druck gesetzt, das sich danach bei einer Belastung die Kraft in der Zugzone minimiert. Da der Beton nur eine geringe Zugspannung aufnehmen kann (ca. 10% der Druckspannung), aber hohe Druckspannungen verträgt, ist die Vorspannung bei Betontragwerken ein wirtschaftliches Pendant zur schlaffen Bewehrung.

Durch den Einsatz von Vorspannungen wird hauptsächlich die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion verbessert. Das unter Druck setzen der Zugzone bewirkt, dass Risse weitestgehend vermieden werden und dadurch die Gefahr von Korrosion bei Stahleinlagen verringert wird. Neben der Rissbreitenbeschränkung führt eine Vorspannung zu geringeren Verformungen und es können daher auch längere oder schlankere Bauteile geformt werden. Weiters ist durch das Einbringen von Kräften durch die Spannglieder und durch eine spezielle Lage dieser, eine Vorverformung möglich. Vorverformungen wirken einerseits den Verformungen aus den Lasten entgegen und andererseits wird die Druckzone mit dem kriechwirksamen Bereich entlastet. [11]

Durch die Wahl der Spanngliedlage besteht die Möglichkeit neben der Normalkraft noch ein Moment und eine Querkraft als innere Last einzuleiten. Liegt das Spannglied genau in der Schwerachse des Bauteils wird durch die Vorspannung lediglich eine Normalkraft eingeleitet. Der Balken erfährt eine Stauchung jedoch wegen dem fehlenden Moment keine Krümmung. Bei einer geraden Spanngliedführung außerhalb der Schwerachse wird dem Balken eine Normalkraft und ein konstantes Moment eingeleitet. Dies führt zu einer Stauchung und zu einer Verkrümmung im Bauteil. Bei einer geknickten oder gekrümmten Spanngliedlage erhält der Balken Schnittgrößen in Form von Normalkraft, Querkraft und veränderlichem Moment. Aus diesen inneren Schnittgrößen resultiert eine Stauchung und eine Vorverkrümmung.

Bei der Berechnung der Spannung bei vorgespannten Systemen werden die jeweiligen Spannungszustände getrennt voneinander berechnet und schlussendlich zu einem Gesamtspannungszustand überlagert (siehe Abbildung 15).

2.7.2 Ausführungsarten der Vorspannung

- Vorspannung mit sofortigen Verbund

Bei dem Vorspannen mit sofortigen Verbund werden die Spanndrähte vor dem Betonieren gegen ein Widerlager vorgespannt. In der Regel ist die Spanngliedführung gerade, im Sonderfall kann durch eine Umlenkung ein anderer Verlauf gewählt werden. Nach dem Erhärten des Betons sind die Drähte mit dem Beton kraftschlüssig verbunden, sodass bei dem Einleiten der Last kei-

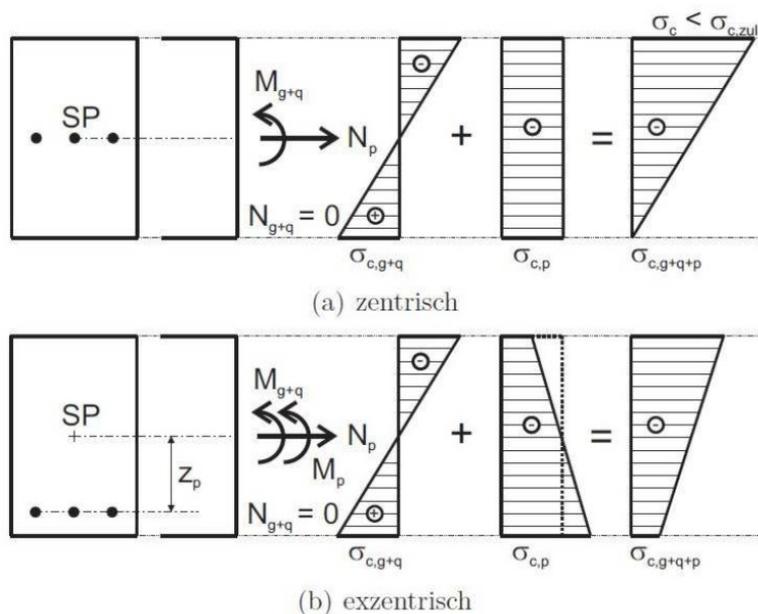


Abbildung 15: Spannungsverteilung (a) zentrische (b) exzentrische Vorspannung [10]

ne Verschiebung zwischen dem Vorspannmateriale und dem Beton stattfindet. Das Einleiten der Last erfolgt nach dem Erhärten des Betons, indem die Vorspannung vom Widerlager gelöst wird. Diese Art der Vorspannung ist wegen der erforderlichen Vorspanneinrichtungen beschränkt. Ihr Hauptanwendungsgebiet liegt im Fertigteilewerk bei Serienfertigungen. Bei den Vorspannversuchen für die Diplomarbeit wird auch eine Vorspannung mit sofortigem Verbund gewählt. Als Widerlager kommt ein Metallrahmen zum Einsatz, gegen den die Aramidfasern gespannt werden. Nähere Informationen sind im Kapitel 3 dokumentiert. [11]

- Vorspannung mit nachträglichem Verbund
Die Anwendungsbreite bei der Vorspannung mit nachträglichem Verbund ist wesentlich größer als bei der Vorspannung mit sofortigen Verbund. Dies beruht auf der Möglichkeit einer unabhängigen Form und Gestalt der Litzenführung und daher auch der Konstruktion. Dabei werden die Spannlitzen in einem Hüllrohr aus Bandstahl oder Kunststoff längsbeweglich angebracht. Die Hüllrohre können dabei beliebig in der Schalung verlegt und mitbetoniert werden. Nach dem Erhärten des Betone in der Schalung werden die Litzen in den Hüllrohren, gegen die am Ende mitbetonierten Anker, gespannt. Nach dem hydraulischen Vorspannen wird der profilierte Spannkanaal mit einer speziellen Zementsuspension oder einem Einpressmörtel verpresst. Dabei erfolgt eine Verbundwirkung zwischen den Litzen, dem Hüllrohr und dem Beton. [11]

- **Interne Vorspannung ohne Verbund**
Bei der internen Vorspannung ohne Verbund wird auf das Auspressen der Hüllrohre verzichtet. Die Hüllrohre können bei dieser Vorspannungsart wiederum beliebig in der Schalung angebracht werden. Bei der Vorspannung stützen sich die Spannglieder gegen die am Ende liegenden Anker ab. Die interne Vorspannung ohne Verbund ermöglicht eine geringe Bauteildicke, da geringere Durchmesser der Spannkäule verwendet werden können. Der Korrosionsschutz von Stahlspannlitzen wird dabei durch ein Korrosionsschutzfett und einem Kunststoffmantel erreicht. Ein Vorteil der Vorspannung ohne Verbund ist auch die Möglichkeit einer Auswechslung defekter Spannlitzen. Dabei werden die Verankerungskeile an den Ankern entnommen und die defekten Spanndrähte aus den Hüllrohren gezogen. Beim Einbau werden die Neuen in die Spannkäule eingebracht und mit den Verankerungskeilen gegen die Anker gespannt. [11]
- **Externe Vorspannung**
Die externe Vorspannung liegt hauptsächlich außerhalb des Betonquerschnittes. Nur bei der Endverankerung und bei den Umlenkelementen sind die Spannelemente mit dem Betonkörper verbunden. Die Umlenkung der Spannelemente erfolgt konzentriert an den bestmöglichen statischen Punkten. Die Spannglieder verlaufen zwischen den Umlenkpunkten geradlinig daher ist keine kontinuierliche gekrümmte Spanngliederführung möglich. Oft wird die externe Vorspannung in Kombination mit einer Vorspannung im Verbund ausgeführt. Die Vorteile der externen Vorspannung liegen bei den geringen Betonquerschnittsabmessungen, Austauschbarkeit der Spannglieder und in der Möglichkeit des Nachspanns. [11]

Interne Vorspannung mit sofortigen Verbund

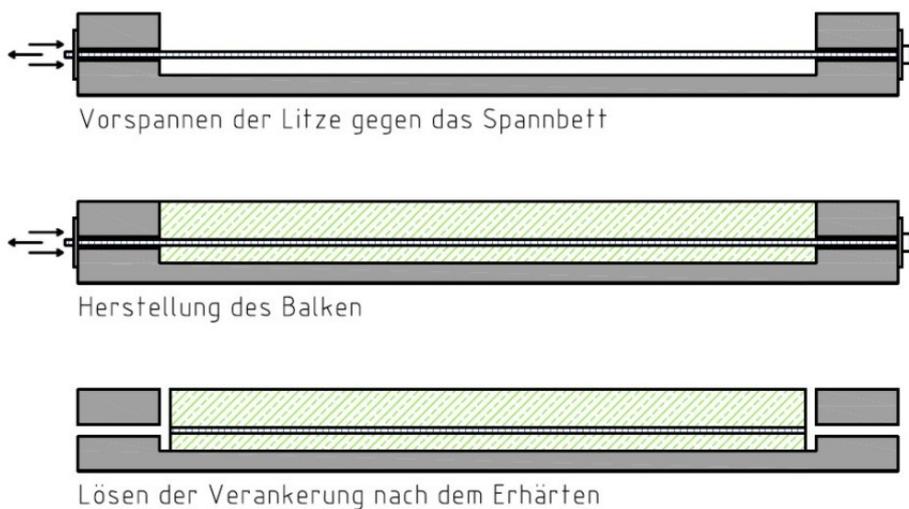


Abbildung 16: Vorspannung mit sofortigem Verbund [11]

Interne Vorspannung mit nachträglichem Verbund

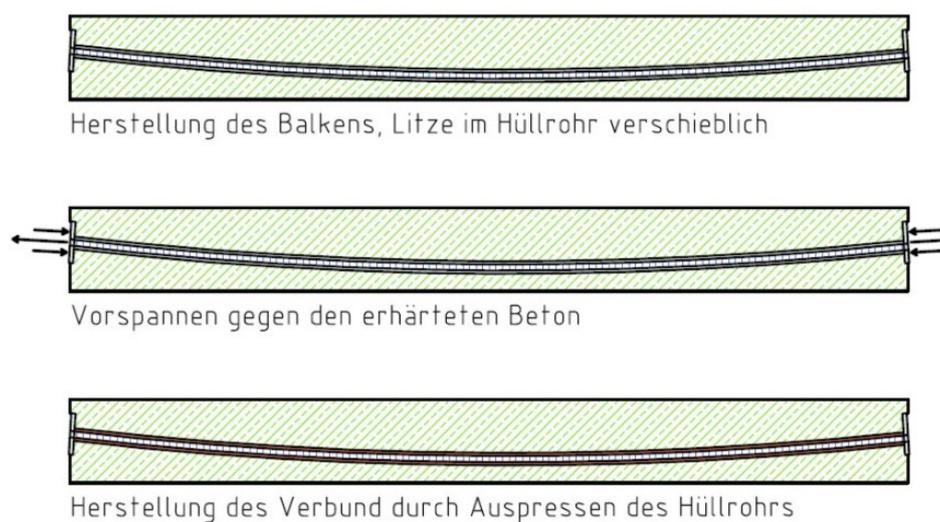


Abbildung 17: Vorspannung mit nachträglichem Verbund [11]

Interne Vorspannung ohne Verbund

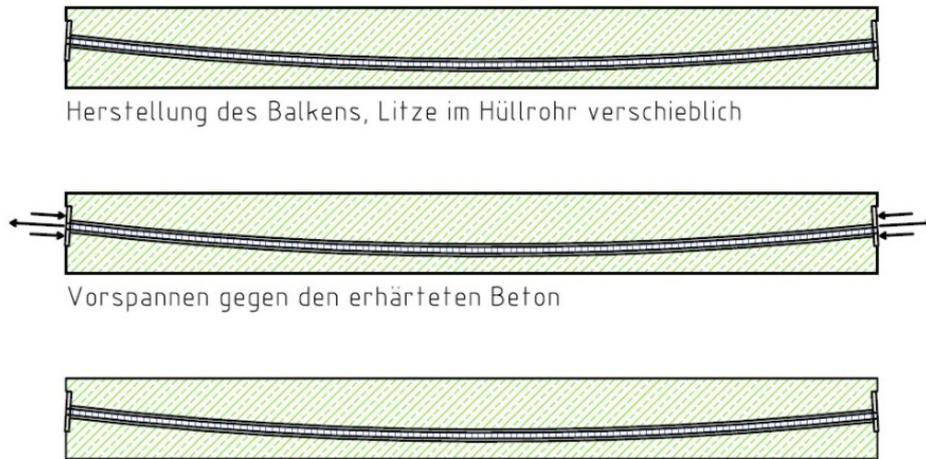


Abbildung 18: Interne Vorspannung ohne Verbund [11]

Externe Vorspannung



Abbildung 19: Externe Vorspannung [11]

3 Herstellung des Probekörpers

Die in dem Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen werden in den folgenden Punkten durch praktische Versuche ergänzt. Die Versuche werden an der TU-Wien im Labor Aspanggründe, Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien durchgeführt. Primär wird das Verhalten von vorgespannten, gebündelten Aramid-Fasern in vier Plattenbalken aus UHPC geprüft. Ein Plattenbalken ist mit einem schlaffen Aramidstab bewehrt, die anderen sind mit einer unterschiedlichen Vorspannkraft belastet. Um weitere Kenntnisse über das Verbundverhalten zwischen dem Aramid und von UHPC zu erhalten, werden Ausziehversuche an drei Balken durchgeführt. Für die Prüfung der Betoneigenschaften werden neun unbewehrte Prismen auf das Biegezugverhalten getestet und bei vier Würfeln die mittlere Druckfestigkeit ermittelt. Die Prüfungen werden Anhand der Normenreihe ÖNorm EN 10080 Prüfung von Festbeton durchgeführt.



Abbildung 20: Fertige Plattenbalken

3.1 Beschreibung der Einzelteile

In den folgenden Punkten werden die Einzelteile, die für die Herstellung der Plattenbalken relevant sind, beschrieben.

3.1.1 Vorbereitung der Schalung

Der fertige Plattenbalken hat eine Länge von 1000 mm. Die weiteren Querschnittsabmessungen sind in Abbildung 52 angegeben. Abbildung 21 zeigt die leere Scha-

lung nach dem Ausschalen eines Plattenbalken. Mitunter werden auch die Schalungselemente für die drei Verbundversuche vorbereitet. Eine genaue Beschreibung der Versuchsvorbereitung für die Verbundversuche ist in der Diplomarbeit „Stahlbewehrung und Aramidbewehrung als Betonarmierung im Vergleich“ angegeben. [3]

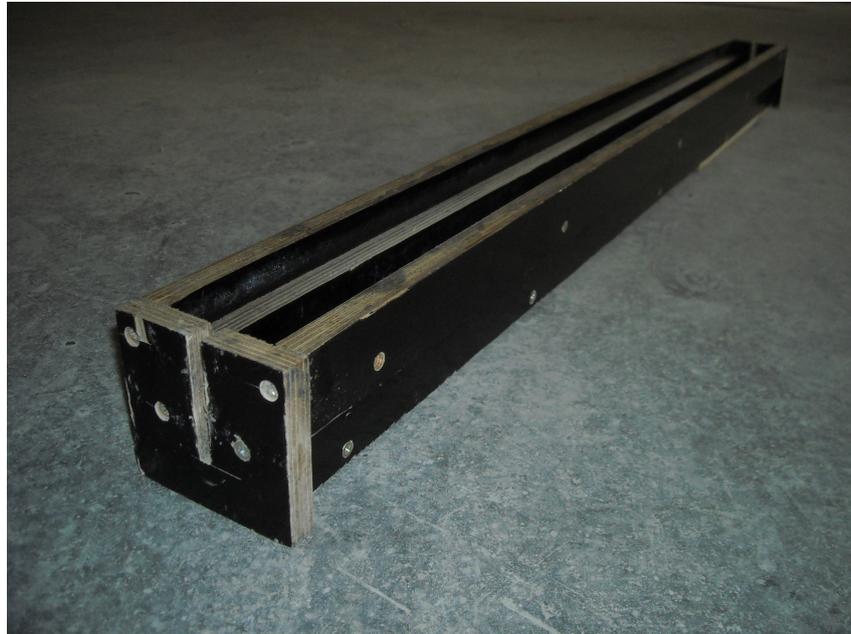


Abbildung 21: Schalung für den Plattenbalken



Abbildung 22: In Gewindestangen eingeklebte Aramidstangen

Für die Würfel und Prismen werden bereits vorhandene Schalungselemente verwendet.

3.1.2 Einkleben der Aramidstangen

Die Aramidstangen werden auf eine Länge von 1660 mm abgelängt. An beiden Enden der gebündelten Aramid-Fasern wird jeweils eine Gewindestange angeklebt (siehe Abbildung 22). Der Verbund zwischen dem Kleber, Aramid und Gewinde erfolgt über die gesamte Länge des Gewindes. Als Klebstoff wird Hilti HIT-MM PLUS verwendet. Hilti HIT-MM PLUS Injektionstechnik ist ein zwei Kompo-



Abbildung 23: Prüfrahmens mit eingebauter Schalung

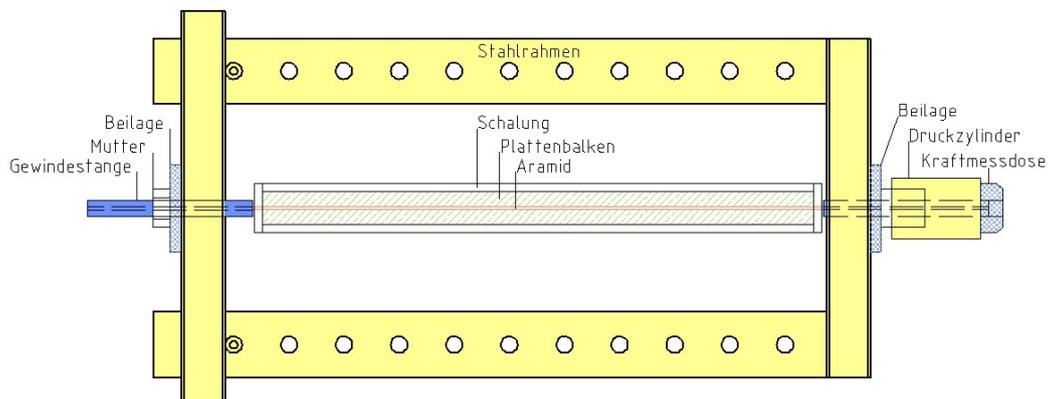


Abbildung 24: Skizze des Prüfrahmens mit eingebauter Schalung

nenten Universalmörtel für alle gängigen Anwendungen und Untergründe im mittleren Lastbereich. [23]

3.1.3 Prüfrahmen

Um die Aramidfasern vorspannen zu können, wird der Aramidstab zuerst mit Hilfe einer hydraulischen Presse gegen einen Prüfrahmen gespannt. Abbildung 24 und Abbildung 23 zeigen den Aufbau des Prüfrahmens.

3.1.4 Kraftmessdose

Für die Aufzeichnung der Kraft, mit der die Vorspannung belastet wird, kommt eine Druckmessdose zum Einsatz. In diese Kraftmessdose wird die Gewindestange eingeschraubt und gegen den Prüfrahmen gespannt. Das Produkt in Abbildung 25 ist ein Typ U10M von der Firma HBM. Das Gerät kann statische und dynamische Druck- und Zugkräfte bis zu 125 kN aufzeichnen. [3]



Abbildung 25: Kraftmessdose [3]

3.1.5 Druckzylinder

Um den Aramidstab vorspannen zu können, kommt ein hydraulischer Zylinder zum Einsatz. Der Zylinder ist zwischen der Kraftmessdose und dem Prüfrahmen positioniert. Durch eine Handpumpe wird der Druckzylinder belastet und die Vorspannkraft erzeugt.

3.1.6 Beton

Laut Mischungsberechnung für UHPC werden die Inhaltsstoffe im Betonlabor vorbereitet und danach im Mischer zu einem ultrahochfesten Beton vermischt (siehe

Mischungsberechnung für UHPC							
durchgeführt von:	DI Johannes Kimbauer						
Ort:	Labor 1030, Adolf-Blamauergasse 1-3						
Datum:	19.03.2012						
Zweck:	Verbund-UHPC mit Vorspannung						
◊ Grau hinterlegte Felder müssen eingetragen werden ◊							
Anforderungen							
W/Z-Wert	W/B-Wert	0,211	0,26	Fließmittel [M.% v. Z]	4,00		
Sand trocken [dm³/m³]	330,00			Fließmittel [M% v. F]	2,30		
Luftgehalt (angenommen) [V.%]	5,00			w/Fv	0,423		
Entschäumer [kg/m³]	1,50			Relativdichte rechnerisch	0,831		
Matrix							
	Bezeichnung	Anteile [M. 1]	Anteile [V. 1]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm³]	Stoffraum [dm³]	
Fließmittel	FM 209	4,00	3,67	28,06	1,09	25,75	30,00 Feststoff [M.%]
Wasser inkl. FM-Anteil flüssig	Wasser	26,00	26,00	182,41	1,00	182,41	
FM Festanteil		1,20	0,87	8,42	1,38	6,10	
Zement	CEM I 42,5 N	100,00	32,26	701,57	3,10	226,31	
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	23,00	10,00	161,36	2,30	70,16	
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	51,00	19,25	357,80	2,65	135,02	
Zusatzstoff 3	nv	0,00	0,00	0,00	2,65	0,00	
Entschäumer	DCC-Entlüfter	nb	nb	nb	1,06	nb	
		201,20	88,37	1411,56	2,28	620,00	
Zuschläge							
	Bezeichnung	Anteil [%]	trocken-M [kg]	Rohdichte tr [kg/dm³]	Stoffraum tr [dm³]	Wassergehalt [M. %]	Feucht-M. [kg/m³]
Sand 1	ME 0,1-0,5	100	874,5	2,65	330	0	874,50
Sand 2	nv	0	0	2,65	0	0	0,00
Sand 3	nv	0	0	2,8	0	0	0,00
***		100	874,50	2,65	330,00	0,00	874,50
Fasern							
	Bezeichnung	Anteil [M.%]	Zugabe [kg/m³]	Rohdichte [kg/dm³]	Stoffraum [dm³]		
Faser 1	nv	0,00	0,00	7,85	0,00		
Faser 2	nv	0,00	0,00	0,91	0,00		
Faser 3	nv	0,00	0,00	7,85	0,00		
		0,00	0,00	0,00	0,00		
Stoffraum							
	Anteil [V. %]	Anteil [M. %]	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm³]	Stoffraum [dm³]		
Luft	5,00	0,00	0,00	0,00	50,00		
Matrix	62,00	61,75	1411,56	2,28	620,00		
Zuschläge	33,00	38,25	874,50	2,65	330,00		
Fasern	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Frischbetonrohddichte			2286,06	4,927	1000,00		
Wassergabe gesamt [l/m³]:			162,76				
Mischung							
	Volumen der Mischung	35,64 dm³			V Kontrolle		
	Bezeichnung	Einwaage			35640		
Wasser	Wasser	5800,9 g			5800,93		
Zement	CEM I 42,5 N	25004,0 g			8065,81		
Zusatzstoff 1	Elkem 940 U	5750,9 g			2500,40		
Zusatzstoff 2	Quarzmehl 10000	12752,0 g			4812,09		
Zusatzstoff 3	nv	0,0 g			0,00		
Fließmittel	FM 209	1000,2 g			917,58		
Entschäumer	DCC-Entlüfter	50,4 ml			0,00		
Sand 1	ME 0,1-0,5	31167,2 g			11761,20		
Sand 2	nv	0,0 g			0,00		
Sand 3	nv	0,0 g			0,00		
Faser 1	nv	0,0 g			0,00		
Faser 2	nv	0,00 g			0,00		
Faser 3	nv	0,0 g			0,00		
Mischreihenfolge und Dauer							
Mischertyp:	Erich R 08						
Mischart:	Gleichstrommischen						
Wirblertyp:	Stiftenwirbler			Mischbehälter		Wirbler	
Mischreihenfolge:	[s]	[min]			[U/min]	[m/s]	
1) Cem, MS, QM, QS, Fasern	60,0	01:00	Stufe 1		1250	7,9	
2) Wasser+FM+DCC	30,0	00:30			1250	7,9	
3) Mischen	120,0	02:00			1250	7,9	
4) Mischpause	0,0	00:00			0	0,0	
5) Mischen	0,0	00:00			0	0,0	
6) FM einfüllen	0,0	00:00			0	0,0	
7) Nachmischen	180,0	03:00			300	1,9	
8) Enlüften (60 mbar)	0,0	00:00			0	0,0	
Summe	390,0	06:30					
Frischbetonprüfung Datum:	19.03.2012			Festbetonprüfung Datum:			
Ausbreitmaß: SFM	30,5 cm			Biegezug:			
Rohdichte:	2263 kg/m³			Druck:			
Luftgehalt:	3,7 %			Rohdichte:			
Mischungstemperatur:	28 °C						
Nachbehandlung:	Abdecken mit PE Folien						

Abbildung 26: Mischungsberechnung für UHPC

Abbildung 26). Die Befüllung der Schalung erfolgt mittels einer Rinne. Um die Verdunstung an der Oberfläche zu verhindern, wird die Oberseite der Schalung mit einer PE-Folie abgedeckt.

3.2 Herstellung der einzelnen Plattenbalken

Da der fertige Plattenbalken (siehe Abbildung 20) nicht in einem Arbeitsgang hergestellt werden kann, gibt es vor dem Betonieren verschiedene Produktionsabläufe. Zuerst werden die gebündelten Aramidfasern für das Vorspannen in Gewindestangen eingeklebt, danach die Schalung für den Plattenbalken vorbereitet. Anschließend wird der Aramidstab in die Schalung eingebracht und vorgespannt. Schlussendlich erfolgt die Ausfüllung der Schalung mit Beton. Nach einer Woche Wartezeit, wird die Vorspannkraft auf den Plattenbalken übertragen und der Probekörper aus der Schalung genommen (siehe Abbildung 27). Nach dem Übertragen der Vorspannkraft wirken Schnittgrößen auf den Plattenbalken (siehe Abbildung 28). Zum Schluss werden die überstehenden Aramidstangen mit den Gewinden vom Plattenbalken abgetrennt.

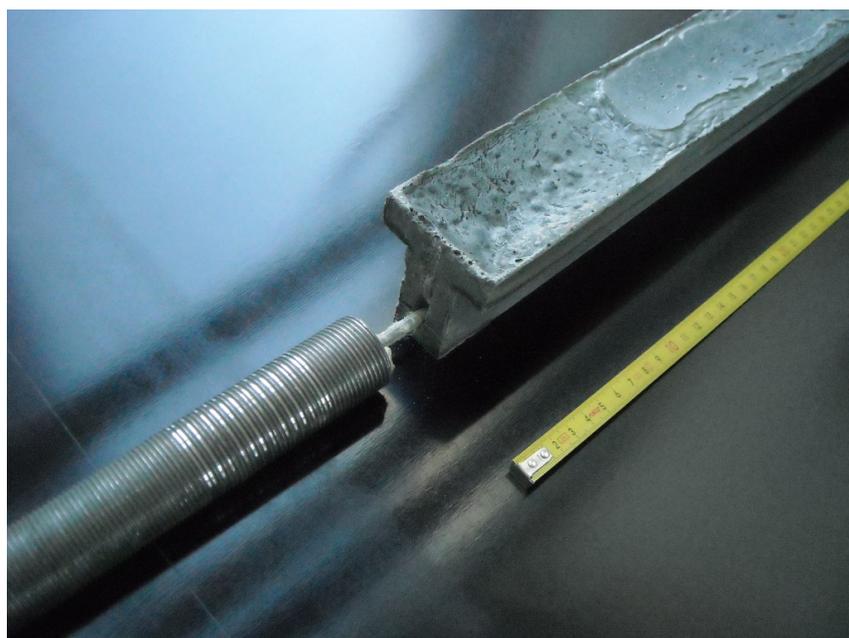


Abbildung 27: Plattenbalken mit Gewinde zum Vorspannen

Tabelle 10 zeigt die Zeitpunkte des Betonierens und die dazugehörigen Vorspannkraft in den Plattenbalken.

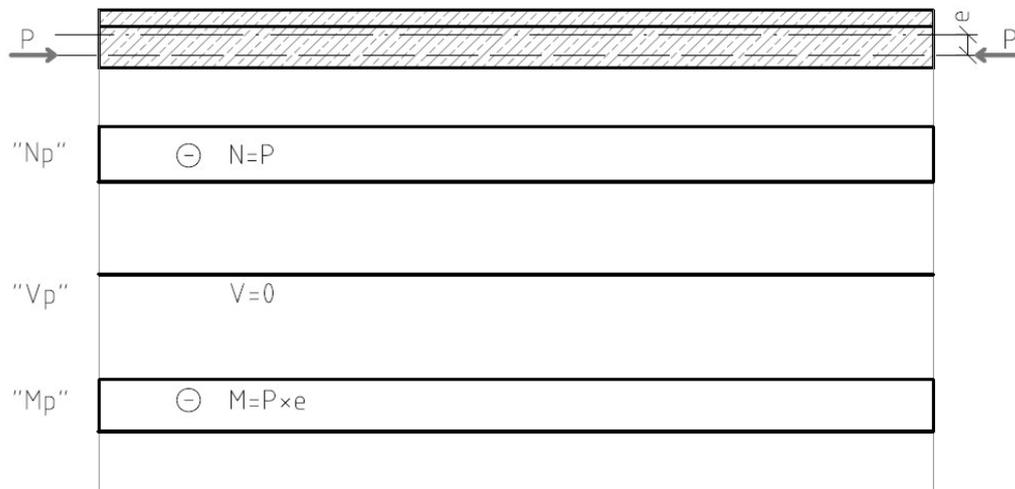


Abbildung 28: Schnittgrößenverteilung der Vorspannkraft

Tabelle 10: Vorspannkraft und Herstellungszeitpunkt der Plattenbalken

	Herstellungs- datum	Vorspannkraft [KN]	Vorspannkraft nach 2 h [KN]	Vorspannkraft nach 4 h [KN]	Vorspannkraft nach 15 h [KN]
I	19.03.2012	12	12	-	-
II	26.03.2012	5,1	5,1	5,05	4,5
III	16.04.2012	9,5	9,4	8,3	9
IV	23.04.2012	0	0	0	0

4 Prüfung der Proben

4.1 Prüfung von Frischbeton

Vor dem Einbau des Betons in die Schalung wird eine Frischbetonprüfung durchgeführt. Es wird das Ausbreitmaß, die Frischbetonrohichte und der Luftgehalt gemessen.

4.1.1 Selbstfließversuch

Das Setzfließmaß wird zur Bewertung der Fließfähigkeit und der Ausbreitgeschwindigkeit von selbstverdichtenden Beton angewendet. Als Setzfließmaß wird der Mittelwert zwischen aus den größten Ausbreitdurchmesser und dem rechwinkelig dazu gemessenen Ausbreitdurchmesser bestimmt. Die Durchführung des Selbstfließversuches wird auf einer von Unebenheiten freien horizontalen und feuchten Platte durchgeführt. Ein auf der Ober- und Unterseite offener Kegelstumpf dient als Behälter für die Versuchsdurchführung. Der Kegelstumpf wird auf die Platte gestellt und ohne zu rütteln, in einem Durchgang ausgefüllt. Überschüssiger Beton wird abgezogen und von der Platte entfernt. Danach wird der Kegel vertikal angehoben und der Beton kann sich ungehindert ausbreiten. Nach Stabilisierung des Betonflusses werden die Durchmesser abgelesen und das Setzfließmaß bestimmt (siehe Tabelle 11). [29]

4.1.2 Frischbetonrohichte

Bei der Ermittlung der Frischbetonrohichte wird Beton in einem dichten Behälter gefüllt, verdichtet und abgewogen. Das Volumen und die Masse des Behälters werden vor dem Befüllen bestimmt. Unmittelbar nach dem Einbringen des Betons in die Form wird der Beton verdichtet. Bei dem Verdichten kommt ein Rütteltisch zur Anwendung. Nach dem Rütteln wird die Oberfläche geglättet und mit dem Rand des Behälters bündig abgezogen. Bevor nun der Behälter mit seinem Inhalt gewogen wird, werden der Rand und die Außenseiten des Behälters gereinigt. Das Ergebnis der Frischbetonrohichtebestimmung ergibt sich aus der Massendifferenz zwischen den vollen und leeren Behältern geteilt durch das Volumen (siehe Tabelle 11). [27]

4.1.3 Luftgehalt

Für die Bestimmung des Luftgehaltes gibt es zwei Methoden: [28]

- Bei der Wassersäulenmethode wird über der verdichteten Betonprobe eine Wassersäule mit festgelegter Höhe angebracht. Die Wassersäule wird von oben mit einem festgelegten Luftdruck beaufschlagt. Die Verringerung des Luftvolumens in der Probe wird durch die Abnahme der Höhe der Wassersäule gemessen. Die Höhe der Wassersäule steht im Verhältnis zum Luftgehalt im Prüfbeton.

- Bei dem Druckausgleichsverfahren wird in einer dicht verschlossener Kammer ein festgelegtes Luftvolumen mit bekanntem Druck mit dem unbekanntem Luftvolumen in der Frischbetonprobe ausgeglichen.

Bei der Ermittlung des Luftgehalt in der Probe wird der Beton mit möglichst wenig Luft in den Behälter gefüllt. Nach dem Verdichten wird der Beton bündig mit dem oberen Rand des Behälters abgestrichen und geglättet. Danach wird das Verschlussaggregat aufgesetzt und befestigt. Auf diesem befindet sich die Luftkammer, in der zuerst ein entsprechender Luftdruck bis zur Nullpunktanzeige aufgebaut wird. Wenn dieser Druck konstant bleibt, wird das Hauptdruckventil geöffnet und die Luft kann sich gleichmäßig in den Poren verteilen. An einem Manometer kann der konstante Druck abgelesen werden. Der Anzeigewert entspricht dem prozentuellen Luftgehalt im Frischbeton. Der Luftgehalt des Frischbetons ergibt sich unter Berücksichtigung eines vom Betonzuschlag abhängigen Korrekturfaktors (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Ergebnisse der Frischbetonprüfung

Prüfdatum:	19.03.2012	
Ausbreitmaß: SFM	30,5	[cm]
Rohdichte:	2263	[kg/m ³]
Luftgehalt:	3,7	[%]
Mischtemperatur:	28	[°C]

4.2 Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit

Bei den Würfeldruckversuchen werden Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm bis zum Erreichen ihrer Druckfestigkeit belastet. Im Zuge der Herstellung der Proben wurden vier normierte Schalungen mit dem Beton gefüllt und für die Druckversuche vorbereitet. Die Versuche werden frühestens 28 Tage nach dem Betoniervorgang durchgeführt. Die Versuchsserie dient zur Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit $f_{c,cube}$ des verwendeten Betons.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit wird anhand der ÖNORM EN 12390 Prüfung von Festbeton durchgeführt. Die genauen Abmessungen der Würfeln sind in der Tabelle 13 angegeben.

Tabelle 12: Würfelgeometrie und Masse

Probe		Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4
Länge	[mm]	99,9	100,0	99,9	100,2
Breite	[mm]	100,2	100,2	100,7	99,6
Höhe	[mm]	99,9	100,0	100,0	100,0
Masse	[g]	2300,6	2302,0	2311,3	2304,1

Die Ermittlung des genauen Volumen der einzelnen Probekörper erfolgt durch die Berechnung aus den gemessenen Ist-Maßen. Die Masse wird durch ein auswiegen bestimmt. Die Rohdichte wird aus der ermittelten Masse des Probekörpers und nach seinem Volumen nach Gleichung 1 berechnet. [26]

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

- ρ ... die Rohdichte des Probekörpers [kg/m³]
 m ... die bestimmte Masse des Probekörpers [kg]
 V ... das Volumen [m³]

Die Prüfmaschine zur Bestimmung der Druckfestigkeit besteht aus zwei ebenen Stahlplatten, wobei die obere Platte zum Ausgleich von Imperfektionen gelenkig gelagert ist (siehe Abbildung 29 und 30).

Die Proben werden während der Prüfung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 3 MPa/s belastet. Die Kraftsteuerung erfolgt mit Hilfe einer Kraftmessdose in der Prüfanlage. Die Prüfmaschine (siehe Abbildung 30) ermittelt die Höchstlast beim Bruch. Die Druckfestigkeit ergibt sich nach Gleichung 2. [24]

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

- f_c ... die Druckfestigkeit [MPa] bzw. [N/mm²]
 F ... die Höchstlast beim Bruch [N]
 A_c ... die Fläche des Probenquerschnittes auf den die Druckbeanspruchung wirkt [mm²]

Tabelle 13: Ergebnisse der Druckversuche

Probe		Würfel 1	Würfel 2	Würfel 3	Würfel 4	
V	Volumen	[dm ³]	1,000	1,002	1,006	0,998
ρ	Rohdichte	[kg/dm ³]	2,301	2,297	2,298	2,309
ρ_m	Mittelwert	[kg/dm ³]		2,301		
F	Bruchlast	[KN]	1721,9	1686,6	1657,2	1672,7
A_c	Querschnittsfläche	[mm ²]	10010	10020	10060	9980
f_c	Druckfestigkeit	[N/mm ²]	172,0	168,3	164,7	167,6
x_m	Mittelwert	[N/mm ²]		168,2		

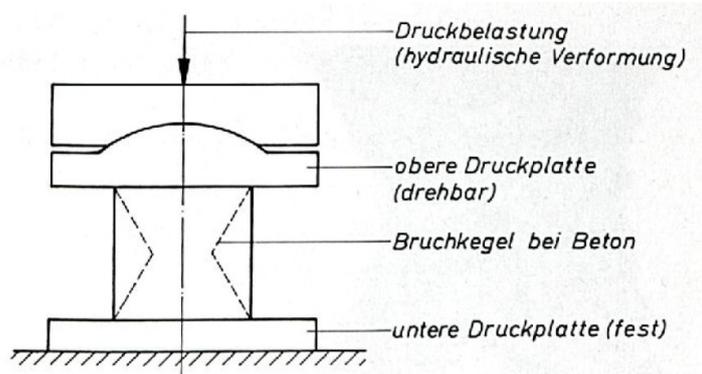


Abbildung 29: Druckversuch an einem Betonwürfel [8]

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

- x_m ... Der Mittelwert oder das arithmetische Mittel [N/mm²]
 n ... Anzahl der Proben
 x_i ... Druckfestigkeit der einzelnen Proben [N/mm²]

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \quad (4)$$

- σ_x^2 ... Die Streuung oder Varianz [N/mm²]

Für die Einordnung in Festigkeitsklassen wird mit den Ergebnissen der 5%-Fraktil Wert errechnet. Für die Ermittlung des Mittelwertes wird Gleichung 3 verwendet. [17]

Die Streuung oder Varianz (Gleichung 4) ist ein Maß für die mittlere Abweichung vom Mittelwert, sie kann auch als Trägheitsmoment der Fläche unter der Dichtefunktion (Abbildung 32) gedeutet werden. [17]



Abbildung 30: Toni Technik Prüfmaschine für die Ermittlung der Druckfestigkeiten



Abbildung 31: Bruchbild eines zerstörten Betonwürfels

Die Standardabweichung ist die Wurzel aus der Varianz, die die gleiche Dimension wie der Mittelwert hat. Die Fraktile oder der Quantilwert ist ein Wert, der mit einer Wahrscheinlichkeit unterschritten oder gerade erreicht wird (siehe Gleichung 5).

$$x_p = x_m - k \sigma_x \quad (5)$$

x_p ... p%-Fraktilwert [N/mm²]
 k ... Fraktilefaktor
 σ_x ... Standardabweichung

Bei der Gaußschen Normalverteilung erhält man Tabelle 14 für den Fraktilefaktor k in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung eines Wertes. [17]

Tabelle 14: Fraktilefaktoren [17]

p%	50	20	10	5	2,5	1,25	1	0,5	0,1
k	0	0,842	1,282	1,645	1,960	2,210	2,326	2,576	3,090

Die aus den Prüfergebnissen errechnete mittlere Abweichung der Streuung ist mit einem Wert von 2,598 MPa sehr gering (siehe Tabelle 15). Dies bestätigt eine gute Homogenität des Betons.

Tabelle 15: Ergebnisse der Würfeldruckprüfungen

x_m	Mittelwert	[N/mm ²]	168,2
σ_x^2	Varianz	[N/mm ²]	6,748
σ_x	Standardabweichung	[N/mm ²]	2,598
k	Fraktilefaktor (5%)	[-]	1,645
x_p	5% Fraktilewert	[N/mm ²]	163,9

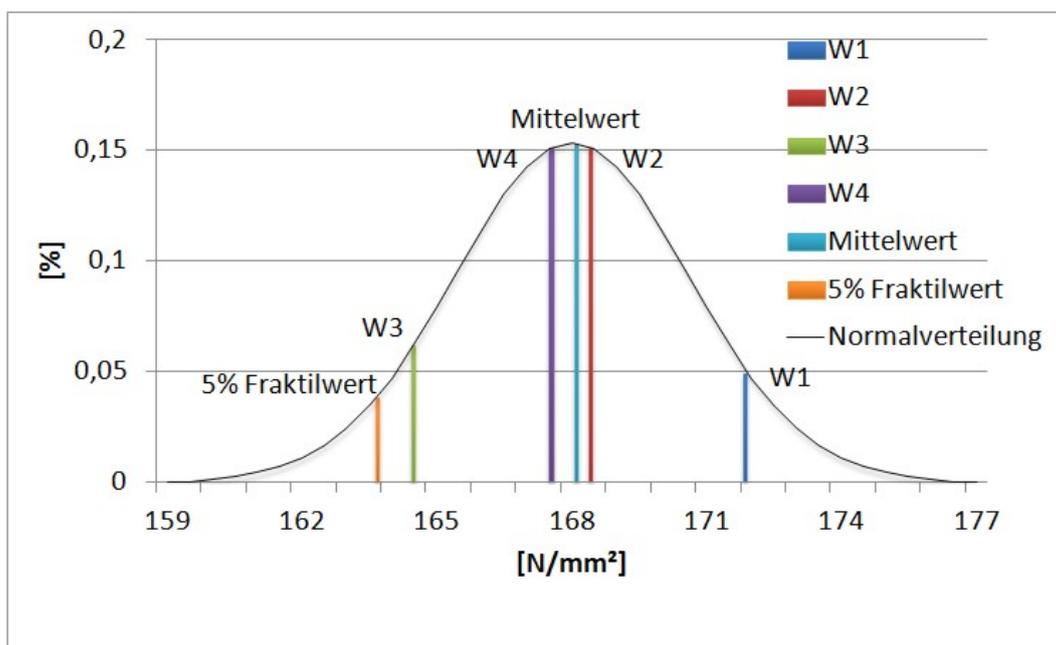


Abbildung 32: Verteilung der Betondruckfestigkeit

4.3 Bestimmung der Biegezugfestigkeit

Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit werden Probekörper mit den Abmessungen 40x40x160 mm gefertigt. Im Zuge der Herstellung des ersten Plattenbalken werden nebenbei neun normierte Schalungen für die Biegezugversuche mit Beton befüllt. Die Versuche werden 3 Monate nach dem Betoniervorgang durchgeführt. Diese prismatischen Probekörper werden einem Biegemoment durch eine Laststeigerung ausgesetzt. Die aufgenommene Höchstlast wird aufgezeichnet, um daraus die Biegezugfestigkeit zu errechnen. Diese Versuchsserie dient zur Feststellung der aufnehmbaren Spannungen bei einer Biegebeanspruchung. Die Durchführung der Versuche wird anhand der ÖNORM EN 12390 Prüfung von Festbeton vorgenommen.

Die erforderliche Belastungsgeschwindigkeit für die Durchführung der Prüfung ist nach Gleichung 6 zu berechnen: [25]

$$R = \frac{2 \times s \times d_1 \times d_2^2}{3 \times l} \quad (6)$$

R	...	die erforderliche Belastungsrate [N/s]
s	...	die Spannungszunahme [MPa/s], [N/mm ² /s]
d_1 und d_2	...	die Seitenmaße des Probekörpers [mm]
l	...	der Abstand zwischen den Auflagerrollen [mm]

Die Versuche werden auf einer elektromechanischen Prüfmaschine mit einem Kugelumlaufspindelantrieb, Typ Zwick 250, durchgeführt.

Die Prüfbalken werden auf dreh- und kippbaren Auflagerrollen aufgelegt. Der Prüfkörper ist mit der Längsachse rechtwinklig zur Längsachse der Rollen genau in der Mitte der Prüfmaschine eingebaut. Der Abstand der Rollen beträgt 100 mm. Die Balken werden in der Mitte ebenfalls mit einer dreh- und kippbaren Belastungsrolle belastet. Die Last wird erst dann aufgebracht, wenn alle Lastaufbringungs- und Auflagerrollen gleichmäßig am Probekörper aufliegen. Die Belastung wird stoßfrei auf den Probekörper aufgebracht und stetig mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeit bis zum Erreichen der Bruchlast erhöht. Die neun Probekörper werden in drei Versuchsserien unterteilt, wobei jeweils eine Serie beim Betonieren in einem Schalungsrahmen war.

Die Biegezugfestigkeit ist nach Gleichung 7 zu berechnen: [25]

$$f_{cf} = \frac{2 \times F \times l}{3 \times d_1 \times d_2^2} \quad (7)$$

f_{cf}	...	die Biegezugfestigkeit [MPa], [N/mm ²]
F	...	die Höchstlast [N]
l	...	der Abstand zwischen den Auflagerrollen [mm]
d_1 und d_2	...	die Seitenmaße des Probekörpers [mm]

Nach der Prüfung der Biegezugfestigkeit wird an den Bruchhälften zusätzlich die Druckfestigkeit bestimmt. Die Druckversuche werden, wie im Kapitel 4.2 dokumentiert, durchgeführt. Dabei werden die 40x40 mm Quader auf die Prüfmaschine (siehe Abbildung 30) gelegt und bis zum Bruch belastet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 aufgelistet. Die maximal aufnehmbare Druckspannung ergibt sich mit der Formel 2.



Abbildung 33: Materialprüfgerät Zwick 250 der TU-Wien

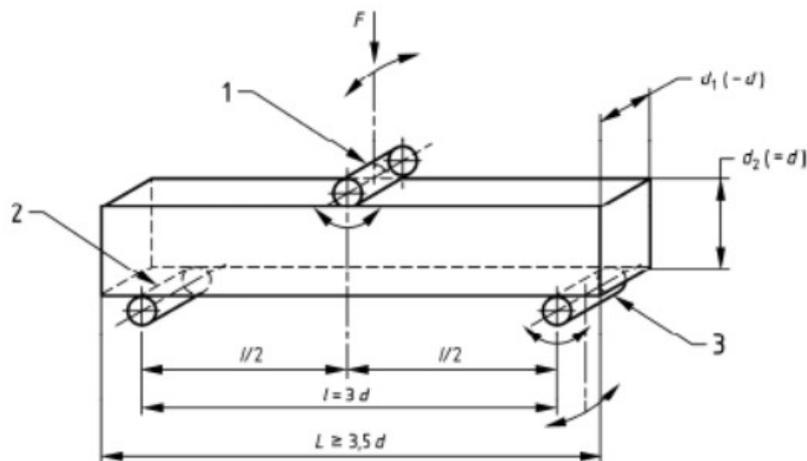


Abbildung 34: Anordnung der Lastaufbringung auf dem Probekörper (3-Punkt-Biegeversuch) [25]

Legende:

- 1... Belastungsrolle (dreh- und kippbar) 3... Auflagerrolle (dreh- und kippbar)
 2... Auflagerrolle

Für die Einordnung in Festigkeitsklassen wird bei der Biegezugspannung und bei der Druckfestigkeit der 5%-Fraktilewert errechnet. Für die Ermittlung des Mittelwertes wird Gleichung 3 herangezogen. Zur Berechnung der Streuung und des Fraktilewertes werden Gleichung 4 und Gleichung 5 verwendet. Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen die Ergebnisse der Berechnungen. Die Proben sind am 11.06.2012 mit einem mittigen Lastangriff laut EN 12390-5 Anhang A geprüft worden.

Vergleicht man nun die Mittelwerte der Würfeldruckfestigkeit und die Ergebnisse der Prismen-Druckfestigkeit, kann man erkennen, dass die Werte bei den Prismen deutlich niedriger sind. Auffallend ist auch, dass die Standardabweichung bei den Würfeln um ca. 80% kleiner als jene bei den Prismen ist. Diese große Standardabweichung folgt aus der großen Streuung der Druckfestigkeiten, dass auf eine vorzeitige Rissbildung der Proben bei den Biegeversuchen schließen lässt. Werden jene Werte die für die Berechnung, wegen der zu großen Abweichung nicht berücksichtigt, miteinbezogen, liegt eine noch viel größere Varianz vor. Mit diesen Werten liegt der 5% Fraktilefaktor weit unter 100 N/mm^2 .

Der große Unterschied zwischen der Würfel-, und Prismendruckfestigkeit lässt sich einerseits auf die Größe der Proben bei der Prüfung und andererseits auf die Rissbildung bei der vorhergehenden Biegebelastung der Prismen zurückführen.

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen bei den Prismen ergeben eine geringe Standardabweichung. Der Mittelwert liegt bei $10,67 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 16: Auswertung der 40x40x160 mm Prismen Versuche

Probe	Bruchlast bei Biegung	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit	Druckfestigkeit
	[N]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Serie 1:				
Probe 1	4324,00	10,13	166,84	118,56
Probe 2	4668,20	10,94	126,89	151,76
Probe 3	4397,50	10,31	129,26	136,72
Mittelwert Serie 1	4463,23	10,46		138,34
Serie 2:				
Probe 1	3797,00	8,90	162,98	139,38
Probe 2	4951,50	11,61	101,2 *)	135,09
Probe 3	4603,70	10,79	155,94	132,24
Mittelwert Serie 1	4450,73	10,43		145,12
Serie 3:				
Probe 1	5177,30	12,13	128,6	70 *)
Probe 2	3840,00	9,00	132,8	130,4
Probe 3	5227,50	12,25	118,5	132,5
Mittelwert Serie 3	4748,27	11,13		128,53

*) aufgrund zu großer Abweichung ausgeschieden

Tabelle 17: Ergebnisse der Prismen-Biegezugfestigkeit

x_m	Mittelwert	[N/mm ²]	10,67
σ_x^2	Varianz	[N/mm ²]	1,494
σ_x	Standardabweichung	[N/mm ²]	1,22
k	Fraktilefaktor (5%)	[-]	1,645
x_p	5% Fraktilewert	[N/mm ²]	8,66

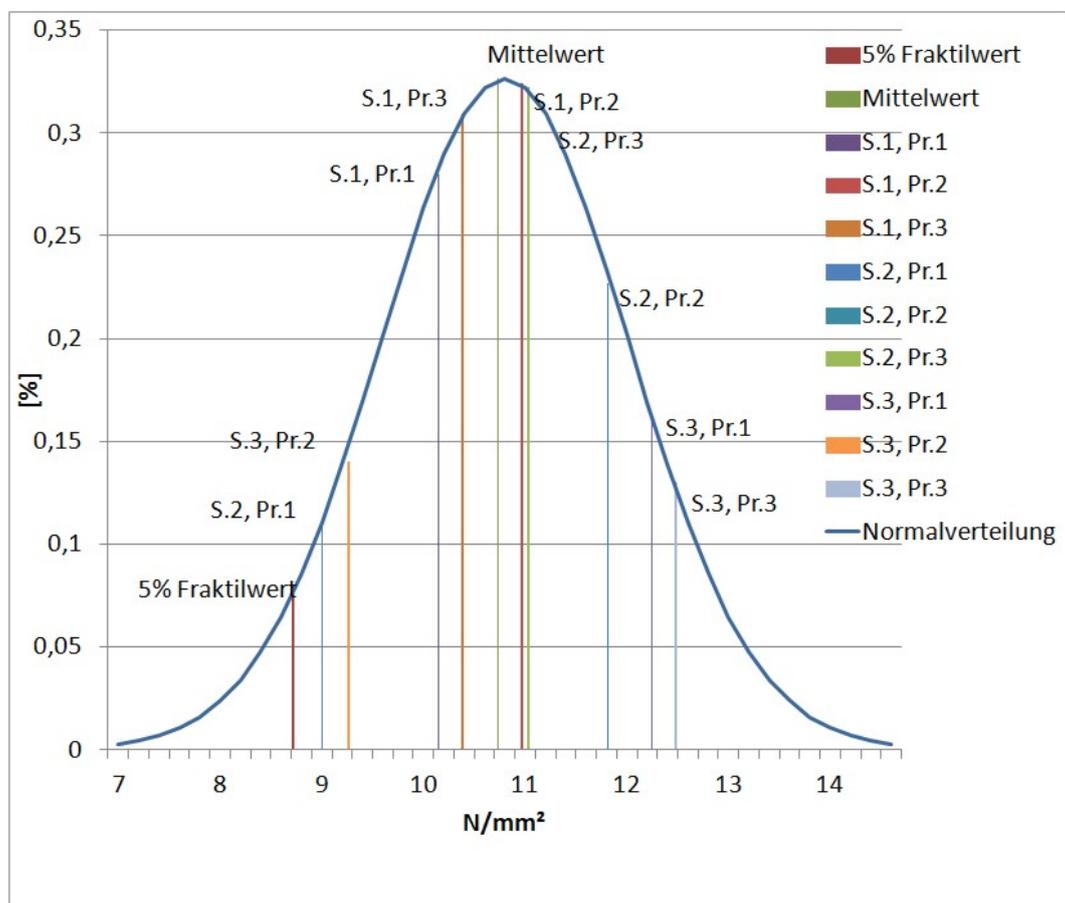


Abbildung 35: Ergebnis der Prismen-Biegezugfestigkeit

Tabelle 18: Ergebnisse der Prismen-Druckfestigkeit

x_m	Mittelwert	[N/mm ²]	137,7
σ_x^2	Varianz	[N/mm ²]	198,25
σ_x	Standardabweichung	[N/mm ²]	14,08
k	Fraktilefaktor (5%)	[-]	1,645
x_p	5% Fraktilewert	[N/mm ²]	114,56

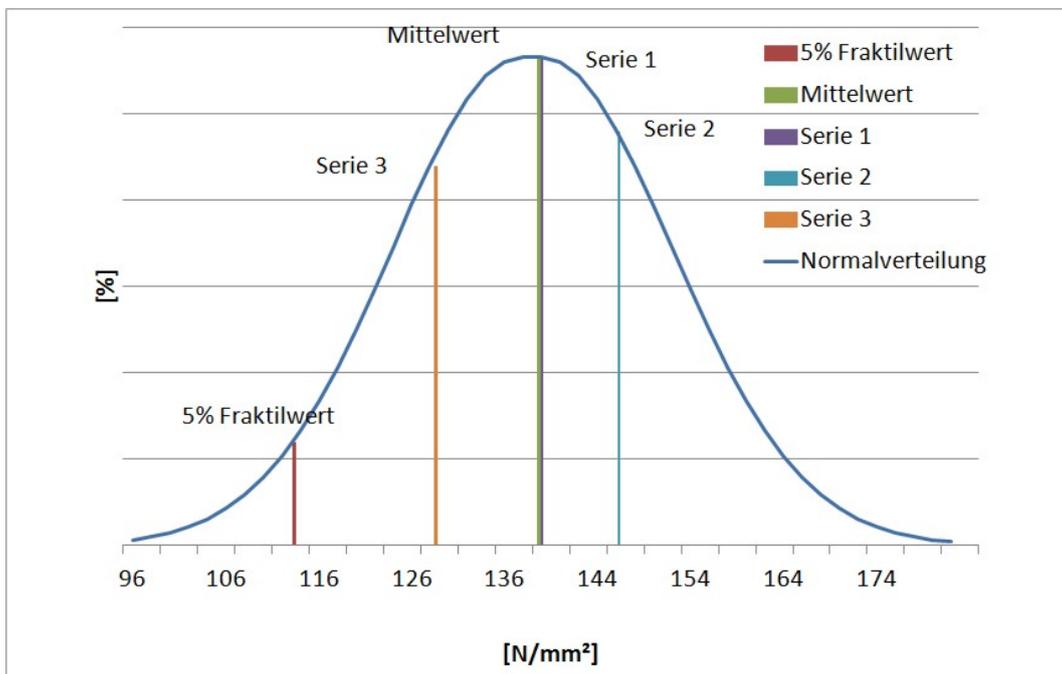


Abbildung 36: Ergebnis der Prismen-Druckfestigkeit

4.4 Bestimmung der Verbundfestigkeit

4.4.1 Verbundversuch

Beim Verbundversuch wird, ein in einem Betonkörper eingefügter Stab, entlang einer definierten Verbundlänge durch eine Zugkraft beaufschlagt. Da keine Standards für die Prüfung des Verbundes mit Aramid und GFK- bewehrten Stäben vorliegen, werden Versuche in Anlehnung an ÖNORM EN 10080 [30] durchgeführt. Das Prinzip dieses Prüfverfahrens ist einen Probekörper durch einfache Biegung zu beaufschlagen bis zum vollständigen Verbundversagen der Bewehrung in einem Halbbalken oder bis zum Versagen der Bewehrung selbst. Während der Belastung wird der Schlupf an beiden Enden der Bewehrung gemessen. Der für den Versuch verwendete Balken besteht aus zwei quaderförmigen bewehrten Betonblöcken die unten durch die Bewehrung, dessen Verbund zu prüfen ist, und oben durch ein Stahlgelenk miteinander verbunden sind. Die Maße der Blöcke und der Gelenke werden durch den Durchmesser des zu prüfenden Bewehrungsstahles bestimmt [30].

Durch die Biegebeanspruchung kommt es zu einer Zugbeanspruchung des im Beton auf eine Länge von $10d$ eingebetteten Bewehrungsstabes und damit zu einer Beanspruchung auf Verbund (siehe Abbildung 37). Aufgrund der relativ kurzen Verbundlängen wird von einer konstanten Verbundspannung ausgegangen.

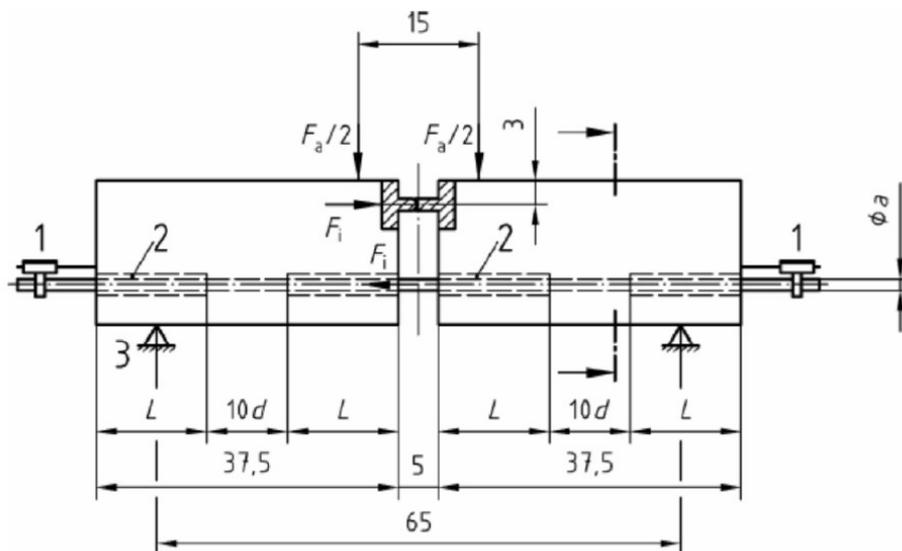


Abbildung 37: Längsschnitt einer Probe für Verbundversuche [3]

4.4.2 Versuchsvorbereitung

Insgesamt werden für die Verbundfestigkeitsprüfung 2×9 Probenhälften vorbereitet. Dabei sind jeweils drei Proben aus 5,5 mm Aramidbewehrung, drei aus 8 mm

Glasfaserbewehrung und zu Vergleichszwecken drei Proben aus 6 mm Betonstahlbewehrung. Die Ergebnisse dienen auch als Vergleichswerte zu den Versuchsreihen von Stahl- und Aramidbewehrung im Vergleich [3]. Es wird ultra hochfester Beton verwendet (siehe Abbildung 26).

Die Bewehrungskörbe sind aus kaltverfestigtem Betonstahl Bst 550 mit einem Durchmesser von 8 mm zusammengestellt. Abbildung 38 zeigt den Schalungskörper samt der Bewehrung.

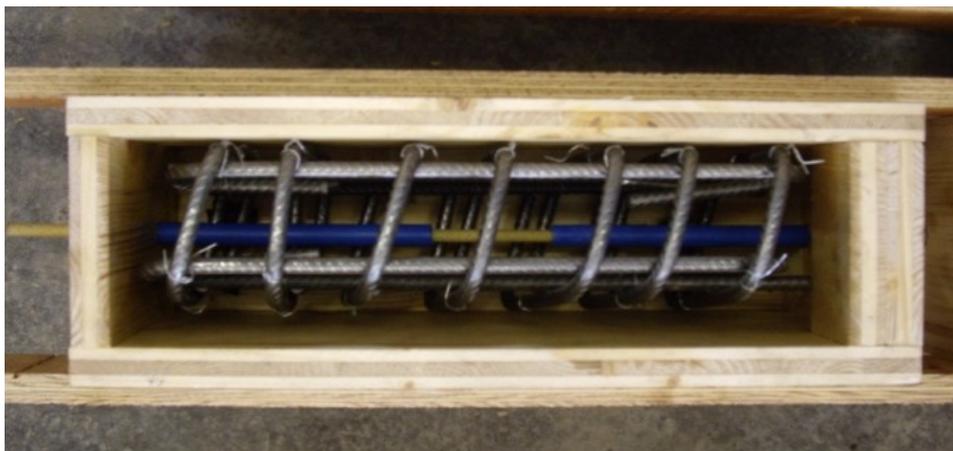


Abbildung 38: Fertiggestellte Schalungskörper zum Betonieren mit freier Verbundlänge [3]

Die Verdichtung des Betons erfolgt mittels eines Plattenrüttlers. Die fertigen Proben werden zugedeckt und für mind. eine Woche im Schalungskörper belassen, danach ausgeschalt und für weitere Wochen an der Luft gelagert.

Bei der Prüfung wird eine elektromechanische Prüfmaschine mit einem Kugelumlaufspindelantrieb, Typ Zwick 250 verwendet (siehe Abbildung 33). Des Weiteren sind für die Ermittlung des Schlupfs der Bewehrungsstäbe gegenüber dem Beton zwei Wegaufnehmer an den Enden der herausragenden Stäbe befestigt. Die beiden Schlupfwege werden mittels dem Messdatenerfassungssystem Quantum X, erfasst und über die Zeit gespeichert. Die Belastung und damit die Zugkraft in den Stäben werden kontinuierlich bis zum Versagen des Verbundes erhöht. Abbildung 39 zeigt den Versuchsaufbau mit einer eingebauten Probe.

Entsprechend der Geometrie und der Belastungsanordnung beträgt die horizontale Druck- und Zugkraft F_i

$$F_i = 1,25 \times F_a \quad (8)$$

F_i ... horizontale Kraft [N]

F_a ... vertikale Kraft [N]

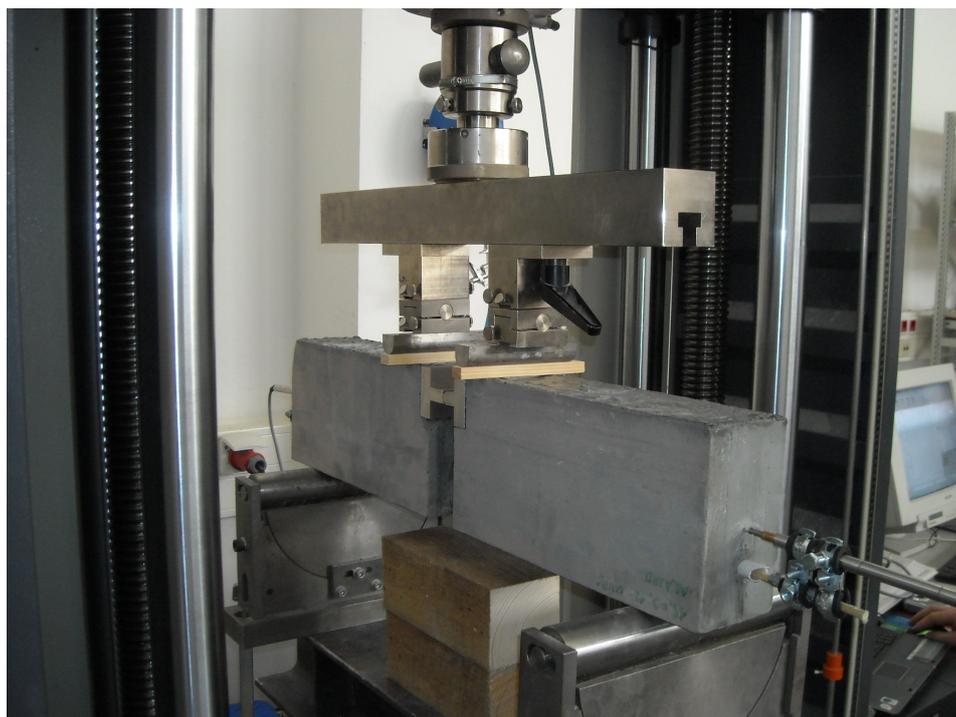


Abbildung 39: Eingebaute Probe für den Verbundversuch

wobei F_a die senkrechte Last darstellt, die auf beide Probenhälften verteilt wird. Die Zugspannung im Stab ergibt sich, wenn man die Kraft F_a auf die Querschnittsfläche bezieht und die Verbundspannung in dem die Kraft auf die Verbundfläche A_v bezieht.

$$A_v = 10 \times ds^2 \times \pi \quad (9)$$

A_v ... Verbundfläche [mm^2]
 ds ... Bewehrungsdurchmesser [mm]

4.4.3 Versuchsergebnisse

In den folgenden Abbildungen 40 und 51 sind die gemessenen Zusammenhänge zwischen der Zugkraft und dem Schlupf für die Aramid-, GFK- und Betonstahlstäbe dargestellt.

Das Versagen bei den Verbundversuchen erfolgte in allen Fällen durch Lösen des Verbundes zwischen den Stäben und dem Beton sowie anschließendem Durchrutschen an einer Probenhälfte. D.h. zu einem Zugversagen eines Stabes kam es nicht.

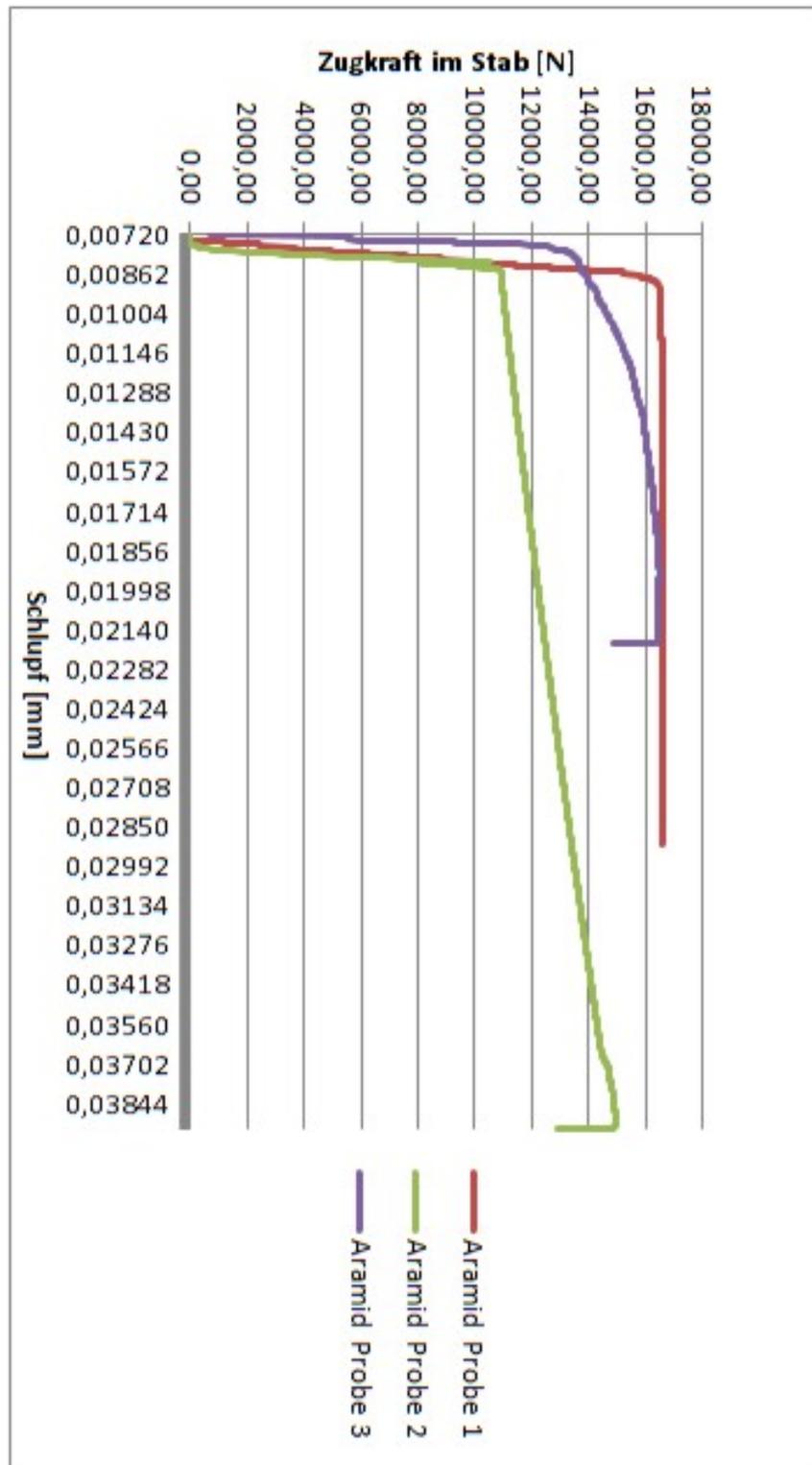


Abbildung 40: Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung

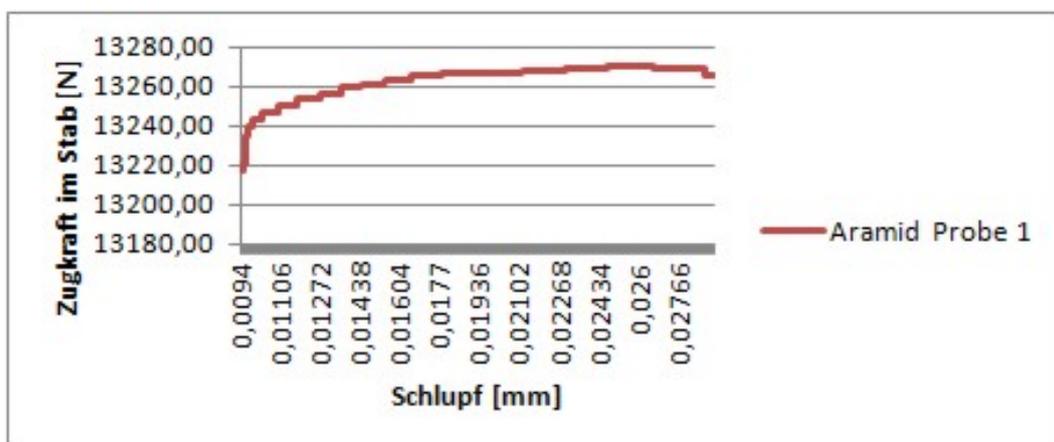


Abbildung 41: Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung Probe 1

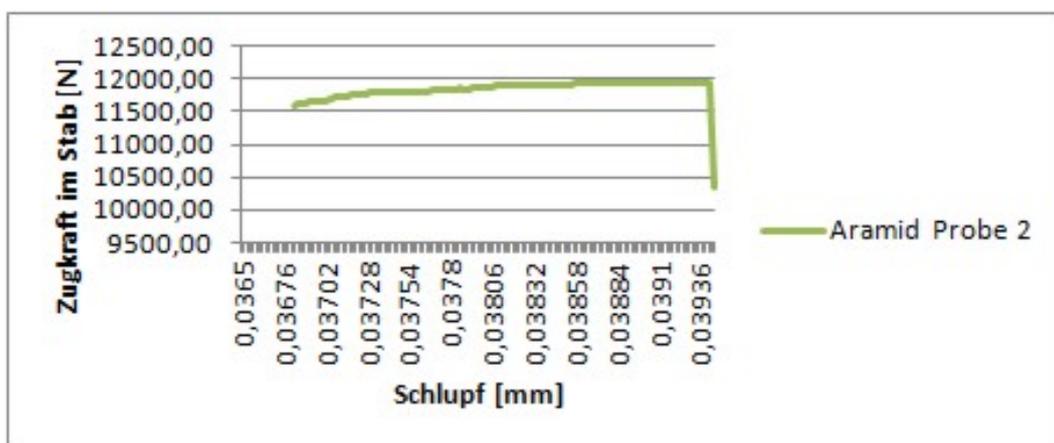


Abbildung 42: Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung Probe 2

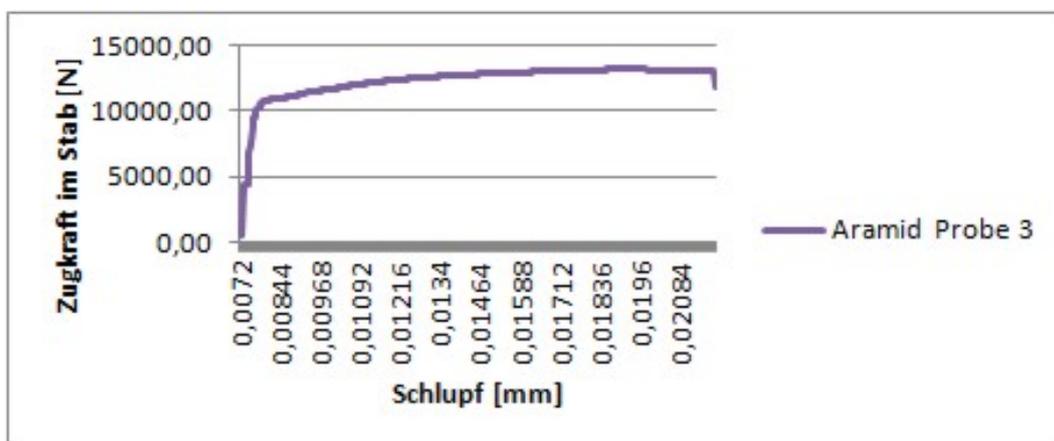


Abbildung 43: Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung Probe 3

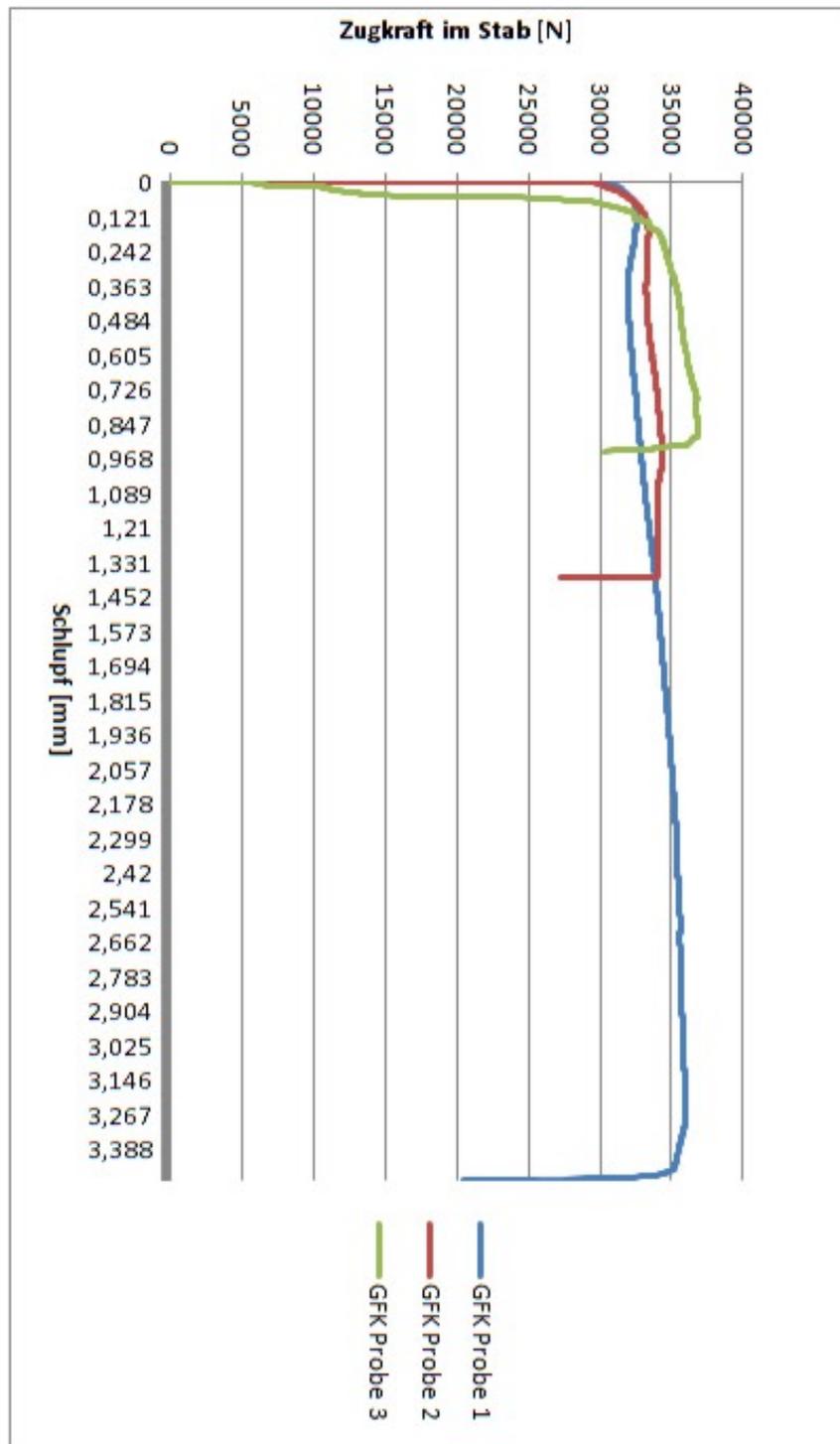


Abbildung 44: Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung

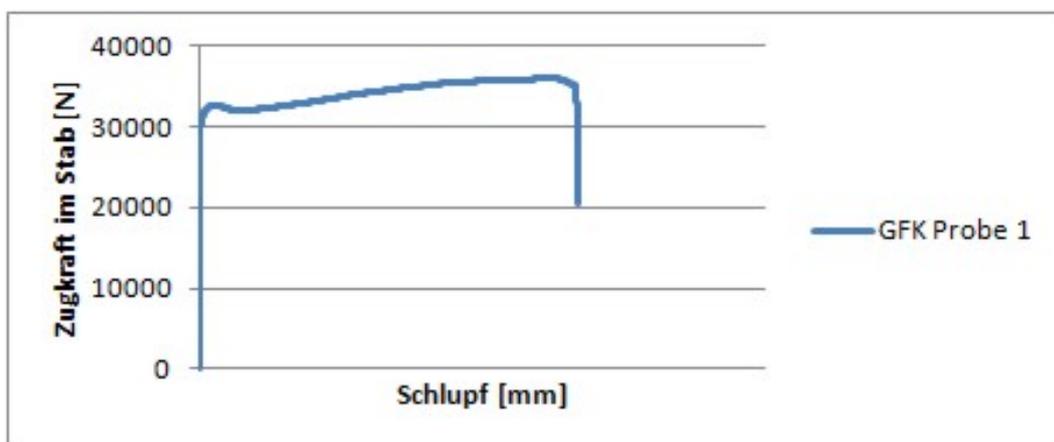


Abbildung 45: Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung Probe 1

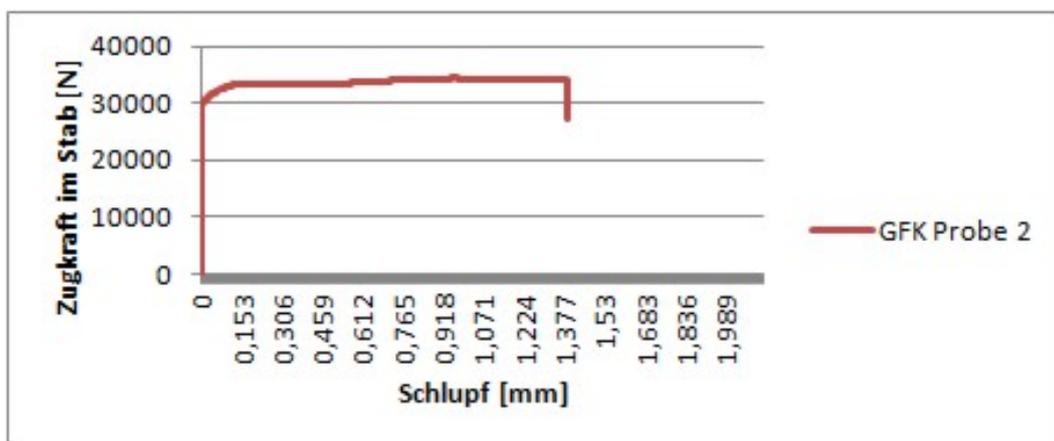


Abbildung 46: Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung Probe 2

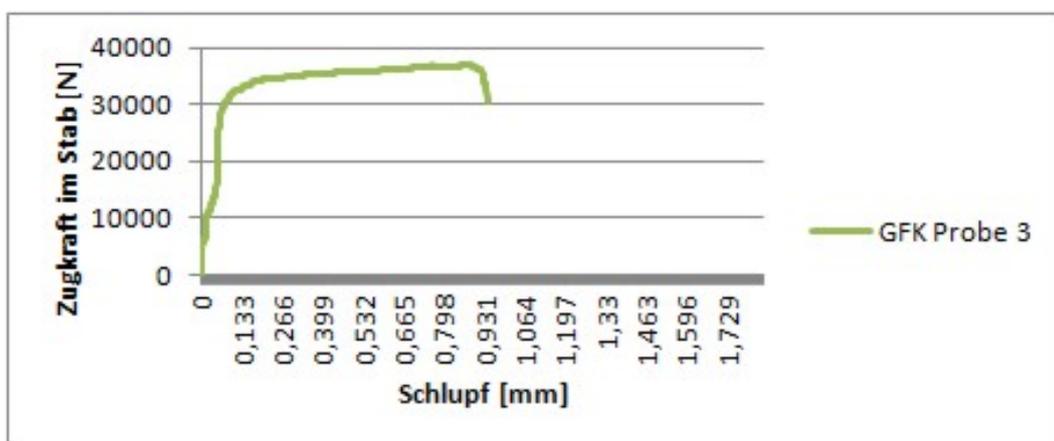


Abbildung 47: Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung Probe 3

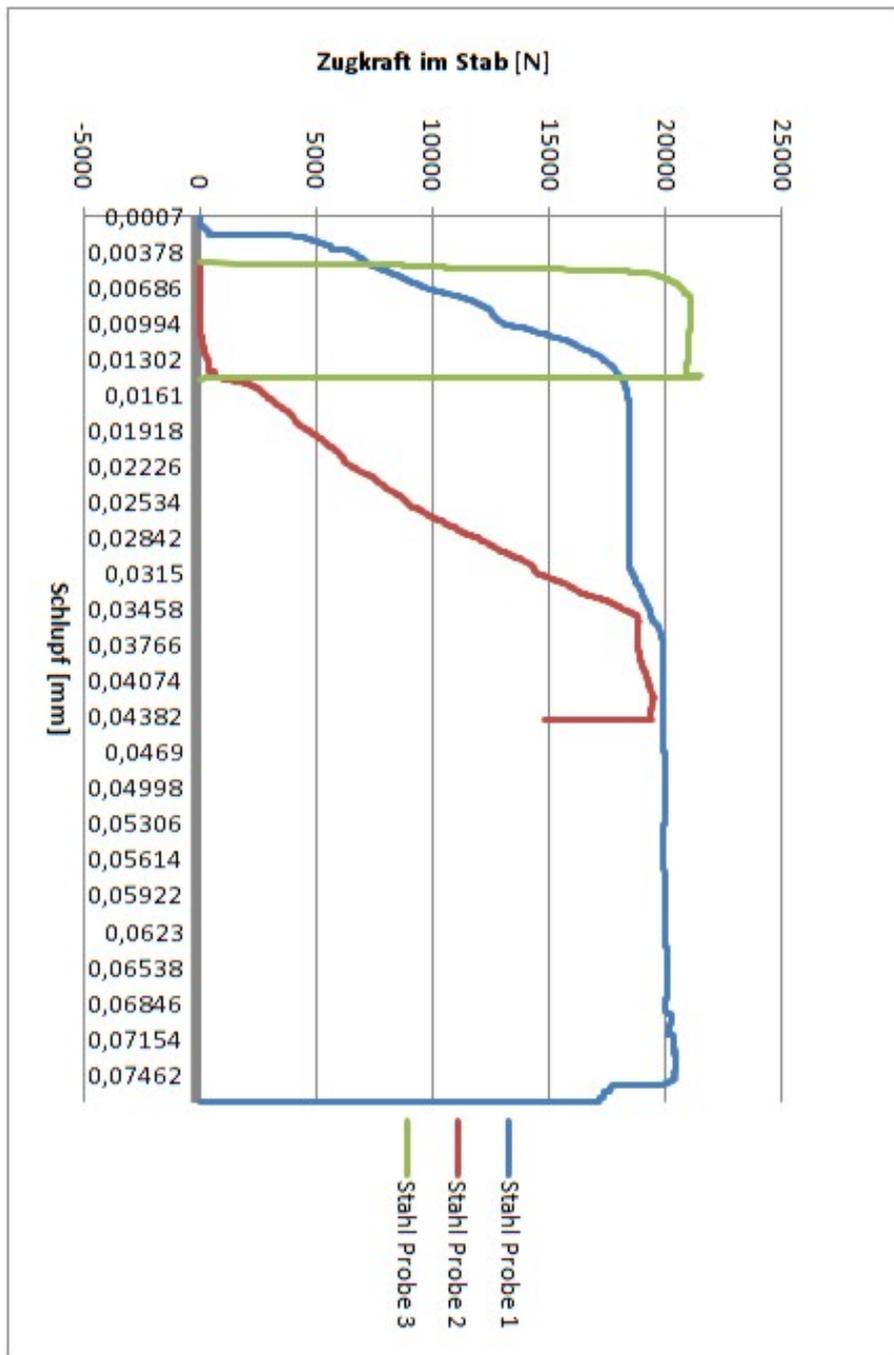


Abbildung 48: Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung

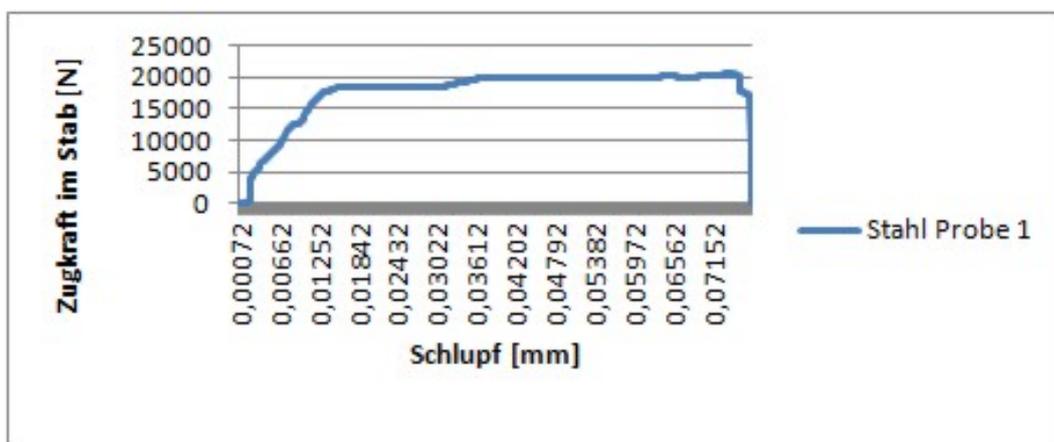


Abbildung 49: Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung Probe 1

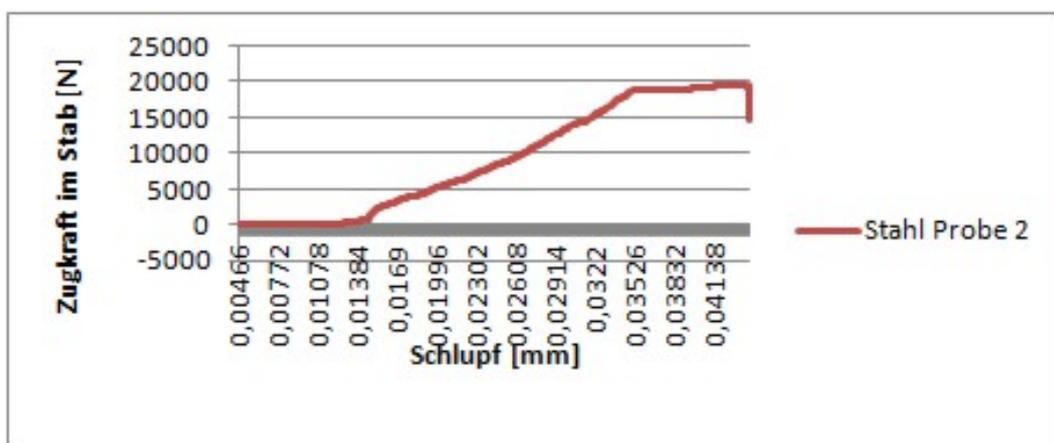


Abbildung 50: Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung Probe 2

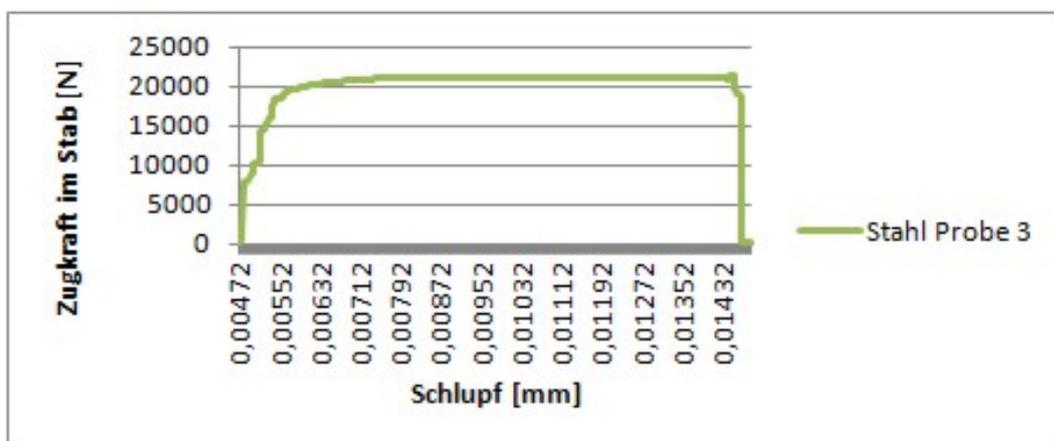


Abbildung 51: Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung Probe 3

Tabelle 19: Ergebnisse der Verbundversuche

<i>Probe</i>	<i>max. Vertikal- last (F_a)</i>	<i>Schlupf gesamt</i>	<i>max. Zugkraft im Stab (F_i)</i>	<i>Durchmesser des Stab (d_s)</i>	<i>Verbundlänge</i>	<i>Verbund- spannung</i>	<i>Zugspannung</i>
	[N]	[mm]	[N]	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Stahl 1	15881	-0,397	19851,25	6	60	17,55	702
Stahl 2	15741	-0,054	19676,25	6	60	17,40	696
Stahl 3	17260	-0,019	21575,00	6	60	19,08	763
mittel	16294		20367,50	6		18,01	720
Aramid 1	10616	0,024	13270,00	5,5	60	12,80	559
Aramid 2	9563	-0,008	11953,75	5,5	60	11,53	503
Aramid 3	10547	-0,073	13183,75	5,5	60	12,72	555
mittel	10242		12802,50	5,5		12,35	539
GFK1	35994	3,367	44992,50	8	80	22,38	895
GFK2	34360	0,960	42950,00	8	80	21,36	854
GFK3	36868	2,407	46085,00	8	80	22,92	917
mittel	35741		44675,83	8		22,22	889

Tabelle 20: Ermittlung der erforderlichen Verbundlängen

Probe	Durchmesser (d_s)	nominelle Zugfestigkeit	max. nominel- le Zugkraft	gemessene Verbundfestig- keit	erforderliche Länge
	[mm]	[N/mm ²]	[kN]	[N/mm ²]	[mm]
Stahl	6	550	15,51	18,01	46
Aramid	5,5	1400	33,26	12,35	156
GFK	8	1000	50,27	22,22	90,0

Die Aramidstäbe weisen mit 12,35 N/mm² die geringste Verbundfestigkeit auf, da diese mit der Besandung die wenigste Profilierung besitzen. Der Schlupf bei diesen Versuchen liegt im hundertstel Millimeter Bereich. Bei dem Vergleich der einzelnen Kurven ist annähernd bis zum Versagen des Verbundes ein Ansteigen der Zugkraft zu erkennen. Dies lässt auf einen Scherverbund rückschließen. Haftverbund ist nur an der Probe 3 zu erkennen, der bis etwa 30% der Bruchlast vorliegt.

Bei den GFK-Stäben kann bei zwei Proben ein Anteil von ca. 85% dem Haftverbund und der Rest dem Scherverbund zugeordnet werden. Bei der dritten Probe ist schon nach ca. 17% der Haftverbund überwunden. Bei all diesen Versagen ist die relativ glatte Staboberfläche mit einer eingefrästen Profilierung verantwortlich. Die Verbundfestigkeit ist mit 22,2 N/mm² im Vergleich zu den anderen Bewehrungsmaterialien am höchsten ausgefallen. Dieses Maximum tritt bei einem Schlupf von 0,9-3,4 mm auf. Nach dem Übergang zwischen dem Haft und Scherverbund kann bei allen drei Versuchen die Last noch gesteigert werden.

Bei den profilierten Stahlstäben fällt die Verbundfestigkeit mit 18,01 N/mm² im Mittelbereich aus. Der Schlupf liegt genauso wie bei der Aramidbewehrung im hundertstel Millimeter Bereich. Das Maximum wird bei einem Schlupfwert von 0,075 mm gemessen. Wegen der sofortigen Verschiebung der Bewehrung ist der Haftverbund bei diesem Material kaum vorhanden. Es erfolgt ein sofortiger Übergang zum Scherverbund, für den die Verankerung der Rippen verantwortlich ist.

Der Vergleich zwischen der Verbundfestigkeit und der Zugfestigkeit der einzelnen Stäbe ist für die Ausnutzbarkeit und damit auch wirtschaftlich gesehen von großer Bedeutung. Ausgedrückt wird dies durch die theoretisch erforderliche Verbundlänge bei der vollen nominellen Zugkraft. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der maximalen nominellen Zugkraft der einzelnen Materialien dividiert durch die Ver-

bundfestigkeit und dem Umfang. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse dieser Berechnung zusammengestellt. Hierbei weist der Betonstahl aufgrund der geringen nominellen Zugkraft mit 46 mm bis zur Streckgrenze die kleinste Verankerungslänge und den damit günstigsten Wert auf. Für den GFK-Stab errechnet sich bei einer Zugfestigkeit von 1.000 MPa eine Verbundlänge von 90 mm, was einen niedrigen Wert darstellt. Dieser Wert begründet sich aus der guten Verbundspannung zwischen dem GFK-Stab und dem UHPC. Um die volle Festigkeit der Aramidstäbe von 1.400 MPa ausnutzen zu können, wäre eine Verbundlänge von 156 mm notwendig. Der geringsten Verbundfestigkeit steht die höchste Zugfestigkeit gegenüber. Sinnvoll ist es daher bei dem Material Aramid mehrere Stäbe mit kleineren Durchmessern anzuwenden, da diese im Verhältnis eine größere Verbundfläche aufweisen. Neben den geprüften 5,5 mm dicken Aramidstäben, wurden im Vorhinein 7,5 mm dicke Stäbe in Verwendung von Normalbeton getestet. Bei diesen lag die Verbundfestigkeit bei $14,2 \text{ N/mm}^2$ um 2 N/mm^2 über der bei UHPC.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Verbundfestigkeit bei der Verwendung von Aramid am geringsten ist. Jedoch ist die nominelle Zugfestigkeit von Aramid um ein Wesentliches größer, als jene der anderen Stäbe. Um die Verbundfestigkeit und die Zugfestigkeit bei Aramid auf einen gleichen Wert zu bringen, ist eine große Verbundlänge oder ein geringer Stabdurchmesser vonnöten. Die GFK-Stäbe werden fast bis zu ihrer Zugfestigkeit belastet. Sie werden daher in dem verwendeten Verbundlängen-Durchmesser Verhältnis optimal ausgenützt. Bei Stahl ist wegen dem bilinearen Werkstoffverhalten die nominelle Zugfestigkeit geringer als die vorhandene Festigkeit. Daher ist die nominelle Zugkraft geringer als die maximale aufgebrachte Kraft auf den Stahlstab. GFK und Aramidstäbe brauchen wegen der hohen Festigkeit gegenüber von Stahl wesentlich größere Verankerungslängen. Das Schlupfverhalten kennzeichnet sich bei Aramid durch den Haftverbund und bei den anderen Materialien hauptsächlich durch den Scherverbund aus.

4.5 Bestimmung der Festigkeit am vorgespannten Plattenbalken

4.5.1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch werden die vorgespannten Plattenbalken bis auf ihr Versagen auf Biegung belastet. Dabei wird der Übergang zwischen dem Zustand I und Zustand II sowie das Bruchverhalten genauer untersucht.

Der Übergang von Zustand I auf Zustand II tritt bei der ersten Rissbildung ein. Bis zum Erreichen des ersten Risses ist die Biegezugfestigkeit des ultra hochfesten Betons maßgebend. Die Biegezugfestigkeit des Betons wurde vorab bei Prismen festgestellt (siehe Kapitel 4.3). Der Mittelwert dieser Prüfungen liegt bei $10,67 \text{ N/mm}^2$, der 5% Fraktilwert bei $8,66 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle 17). Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Zustand II bei einer Biegezugspannung von ca. 10 N/mm^2 eintreten wird.

Nachdem die ersten Risse vorhanden sind, tritt Zustand II in Kraft. Die Vorhersage wann es zu einem Totalversagen des Plattenbalkens kommt ist komplexer. Die Auszugsversuche bzw. die Verbundversuche zeigen, dass bei entsprechenden Querschnitt des Faserverbundkunststoffes der Haftverbund gegenüber der Zugfestigkeit maßgebend ist. Bei den Versuchen kommt es daher nicht zu einem Bruch des Aramidbündels. Kommt es bei der Biegebeanspruchung zu einem Überschreiten der Verbundfestigkeit wird der Haftverbund gelöst und der Bewehrungsstab rutscht aus dem Träger. Die durchschnittliche Verbundfestigkeit liegt bei Aramid bei $12,35 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle 19).

Neben dem Verbundversagen kann jedoch auch die Betondruckzone versagen. Wegen der großen Bruchdehnung des Faserverbundkunststoffes kann es zu einer geringen Höhe der Betondruckzone kommen, die bei entsprechender Druckbelastung versagen würde.

Eine weitere Versagensart ist das Brechen der Probekörper auf Schub. Bei einem Querkraftversagen von Plattenbalken sind die geringen Stegdicken für den Bruch maßgebend.

4.5.2 Querschnittswerte des Plattenbalken

In Abbildung (Abbildung 52) sind die detaillierten Querschnittsabmessungen angegeben.

4.5.3 Prüfaufbau

Die Untersuchung der Proben wurde am 05.Juni 2012 an der TU-Wien im Labor durchgeführt. Alle vier Plattenbalken haben das Mindestalter von 4 Wochen erreicht. Die Balken werden auf der Prüfanlage der Firma Zwick untersucht (siehe Abbildung 33). Die Anlage misst bei der Prüfung Zeit, Kraft und Weg. Der Prüfapparat ist kraftgesteuert wobei die Belastungsgeschwindigkeit bei der Messung 50 N/s beträgt.

	Abkürzung	Betrag	Einheit
Fläche	A	2700	[mm ²]
Gesamthöhe	h	70	[mm]
Schwerpunkt	y_s	40,3	[mm]
Trägheitsmoment	I_x	1152482	[mm ⁴]
Widerstandsmoment o	W_o	38756	[mm ³]
Widerstandsmoment u	W_u	28624	[mm ³]
Aramidvorspannung			
Durchmesser	d_n	5,5	[mm]
Querschnitt	A_a	2376	[mm ²]
Ausmitte von Schwerachse	e	25	[mm]

Tabelle 21: Querschnittswerte

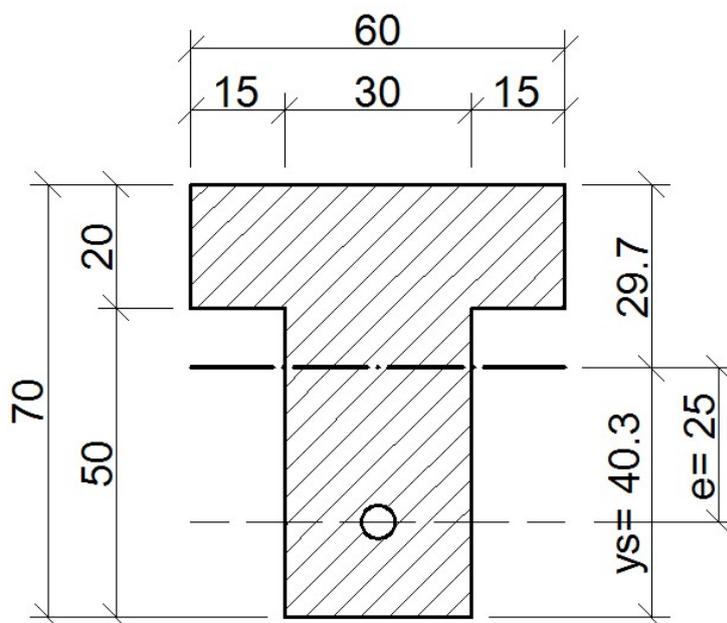


Abbildung 52: Querschnitt des vorgespannten Plattenbalkens in [mm]

Zusätzlich zu den Messapparaten der Prüfanlage werden Wegaufnehmer an die Proben hinzugefügt. Die Schleifer der Wegaufnehmer werden an beiden Seiten in der Mitte des Plattenbalkens angebracht, dadurch wird eine gelegentliche Anfangsverdrehung der Balken aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Wegaufnehmer werden in Kombination mit der Zeit in einem externen Programm gesichert. Mithilfe der Belastungsgeschwindigkeit wird nach den Prüfungen auf die Kraft umgerechnet. Durch die zwei voneinander unabhängigen Messergebnissen werden Messfehler sichtbar und korrigiert. Abbildung 53 zeigt die Positionierung der zusätzlichen

Wegaufnehmer.

Vor der Durchführung der Prüfung werden die Anfangsüberhöhung der vorgespannten Balken gemessen (siehe Tabelle 22). Die Krümmungen werden an beiden Seiten der Platte gemessen, um auch Verdrehungen berücksichtigen zu können.

Tabelle 22: Anfangsüberhöhung der Plattenbalken

Probe	Herstellungsdatum	Vorspannkraft [KN]	Krümmung [mm]
Versuch 1	19.03.2012	12	2 - 2
Versuch 2	02.04.2012	5,5	0 - 1,5
Versuch 3	16.04.2012	9	0 - 1,5
Versuch 4	23.04.2012	0	0

Abbildung 54 zeigt eine Skizze des Prüfaufbaus, die Schnittgrößenverlauf von der Belastung q des Einfeldträgers bzw. Summe Belastung q und Vorspannung p . Der Plattenbalken liegt bei der Prüfung auf zwei, in zwei Richtungen drehbaren, Auflager auf. Der Abstand zwischen den Auflagerstützen beträgt 900 mm. Die Stützen sind mit einem Stahlträger auf die Standplatte der Prüfanlage montiert. Der obere Teil der Presse besteht aus einem beweglichen, druckverteilenden Balken, auf dem die Druckstempel im Abstand von 300 mm positioniert sind (siehe Abbildung 55). Die Druckstempel werden mit einem Kugelumlaufspindeltrieb bewegt und dadurch bei einem Widerstand auf den Balken eine Kraft erzeugt.



Abbildung 53: Positionierung der Wegaufnehmer

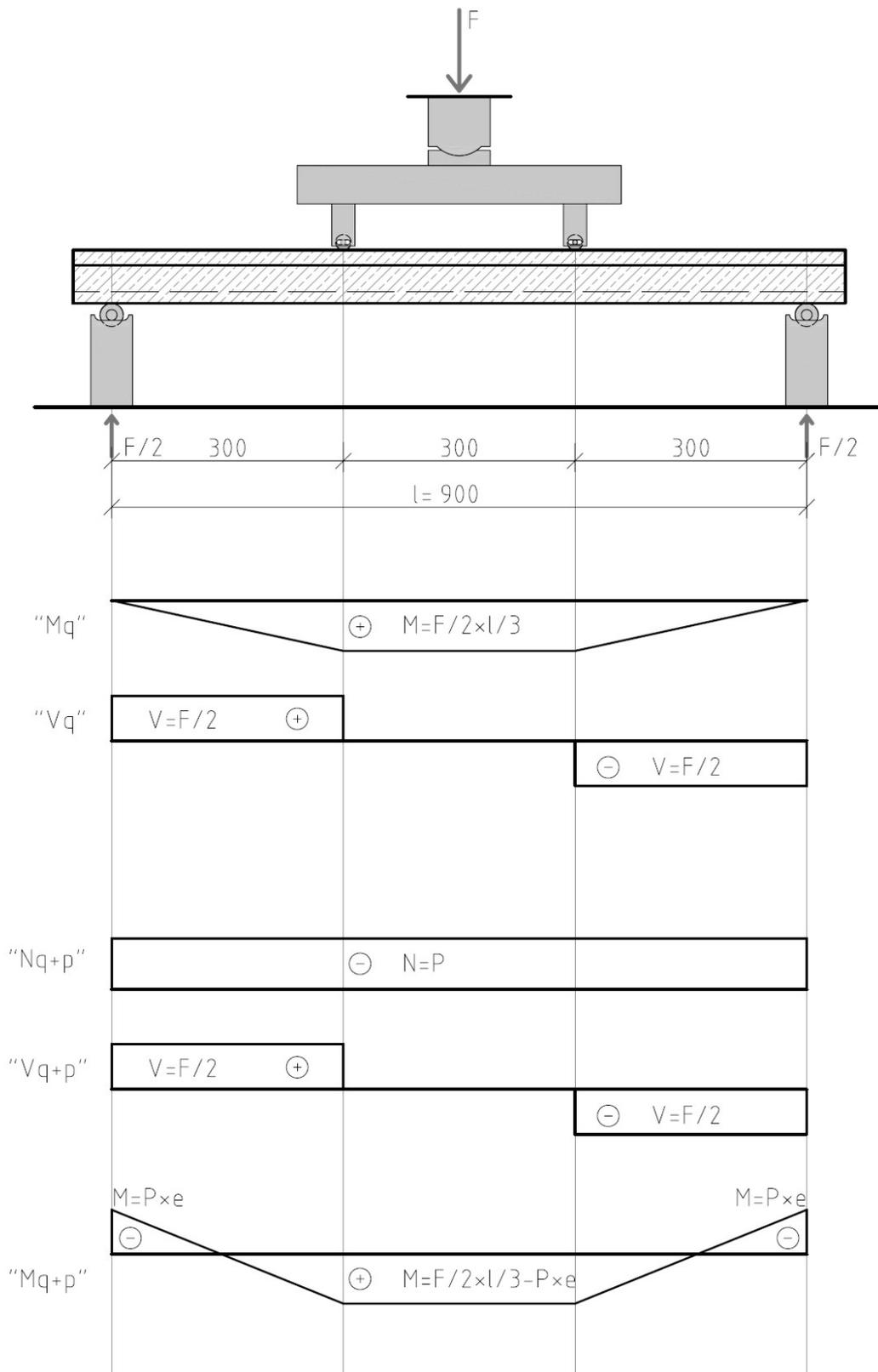


Abbildung 54: Versuchsaufbau und Schnittgrößenverteilung

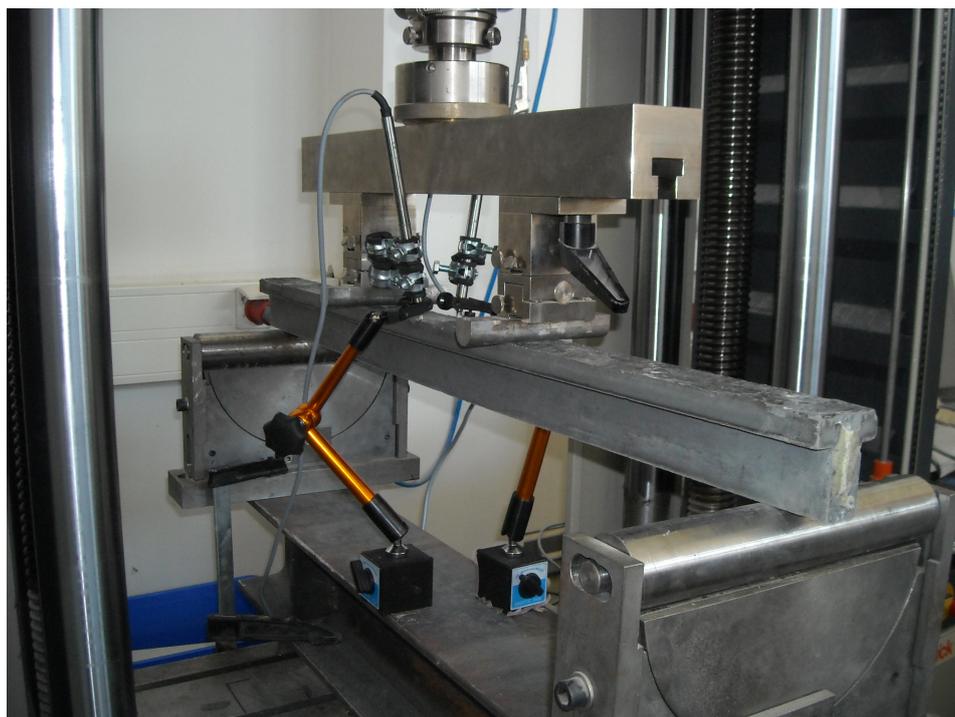


Abbildung 55: Gesamter Prüfaufbau

4.5.4 Berechnungen

Aufgrund von zwei unabhängigen Messungen werden zwei Berechnungen durchgeführt. Die Aufzeichnungswerte der Wegaufnehmer (Weg und Zeit) ergeben in Kombination mit der Belastungsgeschwindigkeit die dazugehörigen Kräfte. Von den Kräften wird auf das Moment und auf die Spannungen im Querschnitt umgerechnet.

Die Vorspannung erzeugt ein negatives Biegemoment und eine Druckkraft auf den Plattenbalken (siehe Abbildung 28). Durch die Belastung des Plattenbalkens (4 Punkt Biegeversuch) wird ein positives Moment und eine Querkraft erzeugt. Die Überlagerung der Schnittkräfte ergibt, abgesehen von dem Eigengewicht des Balkens, ein konstantes Moment in der Mitte des Trägers, konstante Querkraft vom Druckstempel bis zum Auflager und eine durchgehend gleichmäßige Drucknormalkraft (siehe Abbildung 54).

Die Berechnungsergebnisse von den Messungen der Wegaufnehmer sind in Abbildung 56 dokumentiert. Die Ergebnisse der Prüfmaschine sind in Abbildung 57 dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass trotz Umrechnung von den Messungen der Wegaufnehmer durch die Belastungsgeschwindigkeit relativ geringe Abweichungen zu den Ergebnissen von der Prüfanlage festzustellen sind. Das beweist eine geringe Messungenauigkeit ohne Messfehler.

Messung Wegaufnehmer

Vorspannung						
Vorspannkraft	$\sigma_{p,Druck}$	$\sigma_{p,u}$ Biegung	$\sigma_{p,o}$ Biegung	$\sigma_{p,u}$ gesamt	$\sigma_{p,o}$ gesamt	
[N]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0	0,00	0,00	0,00	0	0	
5500	-2,04	-4,77	3,46	-6,81	1,43	
9000	-3,33	-7,80	5,67	-11,14	2,33	
12000	-4,44	-10,41	7,56	-14,85	3,11	

Belastungswerte ohne Vorspannkraft						
Vorspannkraft	Belastung bei Erstrissbildung	Weg bei Erstrissbildung	Mq bei Erstrissbildung	$\sigma_{q,u}$ Erstrissbildung	$\sigma_{q,o}$ Erstrissbildung	
[N]	[N]	[mm]	[Nmm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
0	2109,45	0,60	316417,6	10,98	-7,97	
5500	2536,34	0,54	380451,0	13,20	-9,58	
9000	3924,98	1,08	588746,7	20,42	-14,83	
12000	4306,88	1,62	646031,8	22,41	-16,27	
12000	6874,21	2,74	773348,7	26,83	-19,48	

Belastung mit Vorspannkraft			
Vorspannkraft		$\sigma_{q+p,u}$ Erstrissbildung	$\sigma_{q+p,o}$ Erstrissbildung
[N]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
0		10,98	-7,97
5500		6,39	-8,16
9000		9,28	-12,49
12000		7,56	-13,16
12000		11,97	-16,37

Belastungswerte ohne Vorspannkraft						
Vorspannkraft	Belastung bei Bruch	Weg bei Bruch	Mq Bruch	$\sigma_{q,u}$ Bruch	$\sigma_{q,o}$ Bruch	
[N]	[N]	[mm]	[Nmm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
0	4992,70	21,370	748905	25,98	-18,86	
5500	5525,56	18,036	828834	28,75	-20,87	
9000	6796,23	13,743	1019435	35,36	-25,67	
12000	5388,60	3,883	808290	28,04	-20,36	
12000	12974,62	17,739	1459645	50,63	-36,76	

Belastung mit Vorspannkraft				
Vorspannkraft		Mq Bruch	$\sigma_{q+p,u}$ Bruch	$\sigma_{q+p,o}$ Bruch
[N]		Nmm	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0		748905,06	25,98	-18,86
5500		691334,25	21,94	-19,45
9000		794434,64	24,22	-23,34
12000		508289,60	13,19	-17,25
12000		1159645,05	35,78	-33,65

Abbildung 56: Berechnung; Messung Wegaufnehmer

Messung Prüfmaschine Zwick

Vorspannkraft					
Vorspannkraft	$\sigma_{p,Druck}$	$\sigma_{p,u}$ Biegung	$\sigma_{p,o}$ Biegung	$\sigma_{p,u}$ gesamt	$\sigma_{p,o}$ gesamt
[N]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0	0,00	0,00	0,00	0	0
5500	-2,04	-4,77	3,46	-6,81	1,43
9000	-3,33	-7,80	5,67	-11,14	2,33
12000	-4,44	-10,41	7,56	-14,85	3,11

Belastungswerte bis Erstriss ohne Vorspannkraft					
Vorspannkraft	Belastung bei Erstrissbildung	Weg bei Erstrissbildung	Mq bei Erstrissbildung	$\sigma_{q,u}$ Erstrissbildung	$\sigma_{q,o}$ Erstrissbildung
[N]	[N]	[mm]	[Nmm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0	2181,34	2,13	327201,0	11,35	-8,24
5500	2575,67	2,78	386350,5	13,40	-9,73
9000	3930,72	2,55	589608,0	20,45	-14,85
12000	4348,34	3,08	652251,0	22,63	-16,43
12000	6893,54	4,26	775523,3	26,90	-19,53

Belastung bis Erstriss mit Vorspannkraft		
Vorspannkraft	$\sigma_{q+p,u}$ Erstrissbildung	$\sigma_{q+p,o}$ Erstrissbildung
[N]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0	11,35	-8,24
5500	6,59	-8,30
9000	9,31	-12,52
12000	7,77	-13,32
12000	12,05	-16,42

Belastungswerte ohne Vorspannkraft					
Vorspannkraft	Belastung bei Bruch	Weg bei Bruch	Mq Bruch	$\sigma_{q,u}$ Bruch	$\sigma_{q,o}$ Bruch
[N]	[N]	[mm]	[Nmm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0	4161,93	20,64	624290	21,66	-15,72
5500	5056,34	19,90	758451	26,31	-19,10
9000	6357,62	13,57	953643	33,08	-24,02
12000	5266,05	5,07	789908	27,40	-19,89
12000	12713,40	17,20	1430258	49,61	-36,02

Belastung mit Vorspannkraft				
Vorspannkraft	Mq Bruch	$\sigma_{q+p,u}$ Bruch	$\sigma_{q+p,o}$ Bruch	
[N]	Nmm	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
0	624289,5	21,66	-15,72	
5500	620951,0	19,50	-17,68	
9000	728643,0	21,94	-21,68	
12000	489907,5	12,55	-16,78	
12000	1130257,5	34,76	-32,91	

Abbildung 57: Berechnung; Messung Prüfmaschine

4.5.5 Erstrissbildung

Insgesamt sind fünf Proben getestet worden, da bei Probe IV mit 12 KN Vorspannung frühzeitig ein Versagen außerhalb des max. Moments aufgetreten ist. Dadurch ist der Plattenbalken ein weiteres Mal mit einer verringerten Stützweite von 750 mm bis zum Bruch belastet worden.

Der Mittelwert der Erstrissspannung liegt bei der Messung mit der Prüfmaschine bei $\sigma_{q+p,u} = 9,4 \text{ N/mm}^2$ bzw. bei der Messung mit den Wegaufnehmer bei $\sigma_{q+p,u} = 9,2 \text{ N/mm}^2$. Der Vergleich mit den Biegezugfestigkeitsprüfungen der Prismen zeigt, dass die ermittelten Mittelwerte über dem 5% Fraktilewert der Biegezugfestigkeit der Prismen liegen.

Die Übergang in Zustand II tritt daher wie erwartet im angenommen Spannungsbereich ein. Bei der Probe IV; Versuch 2 wird die erste Rissbildung trotz Vorbelastung ermittelt, da bei der Vorbelastung die Bildung des Erstrisses außerhalb des max. Momentenbereiches war. Folgende Abbildungen 59 bis 65 zeigen den Verlauf bis zur Bildung des Erstrisses.

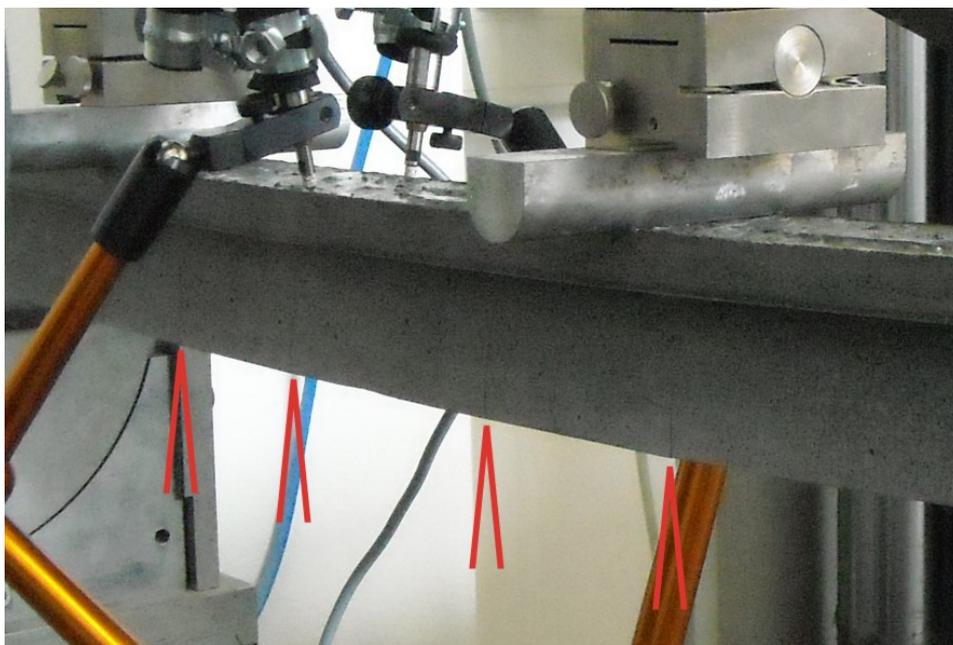


Abbildung 58: Erstrissbildung bei einem Plattenbalken

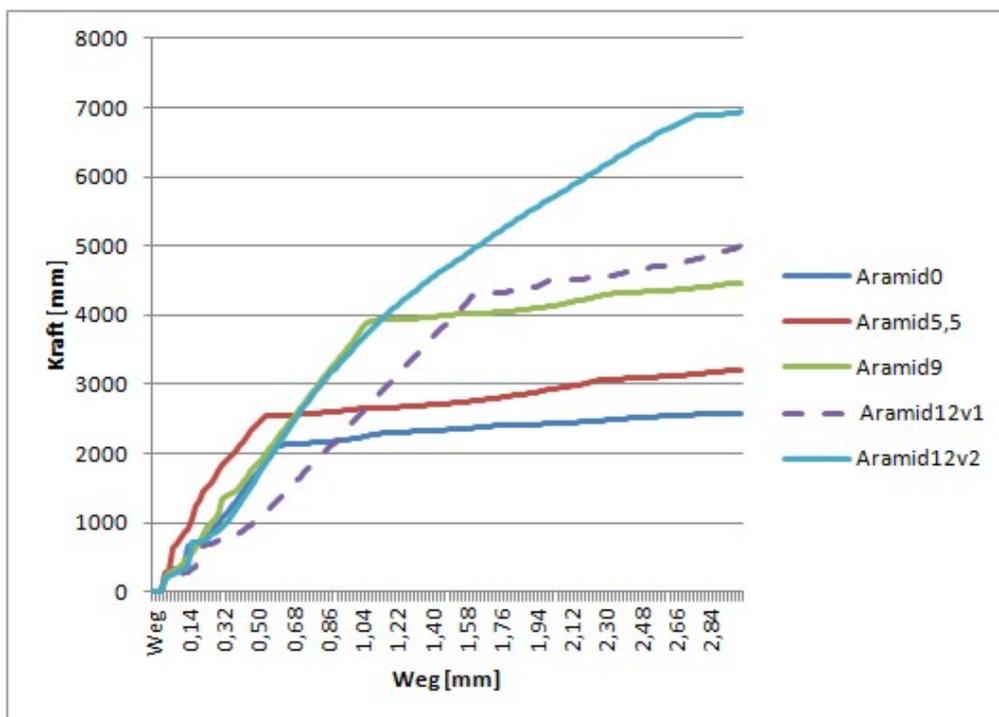


Abbildung 59: Kraft-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Wegaufnehmer

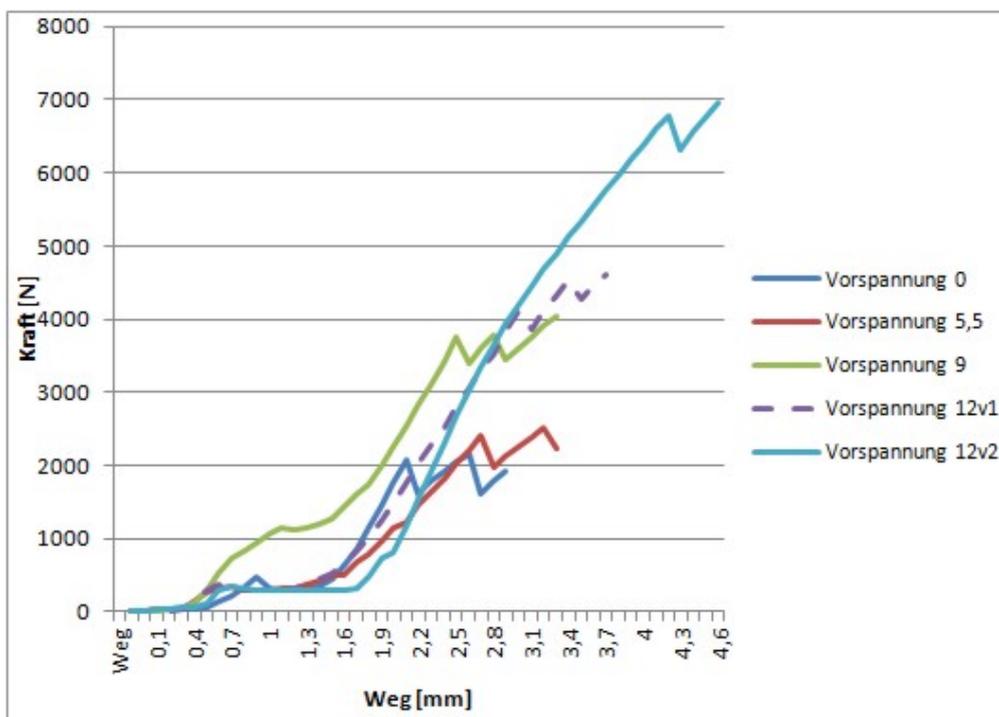


Abbildung 60: Kraft-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Prüfmaschine

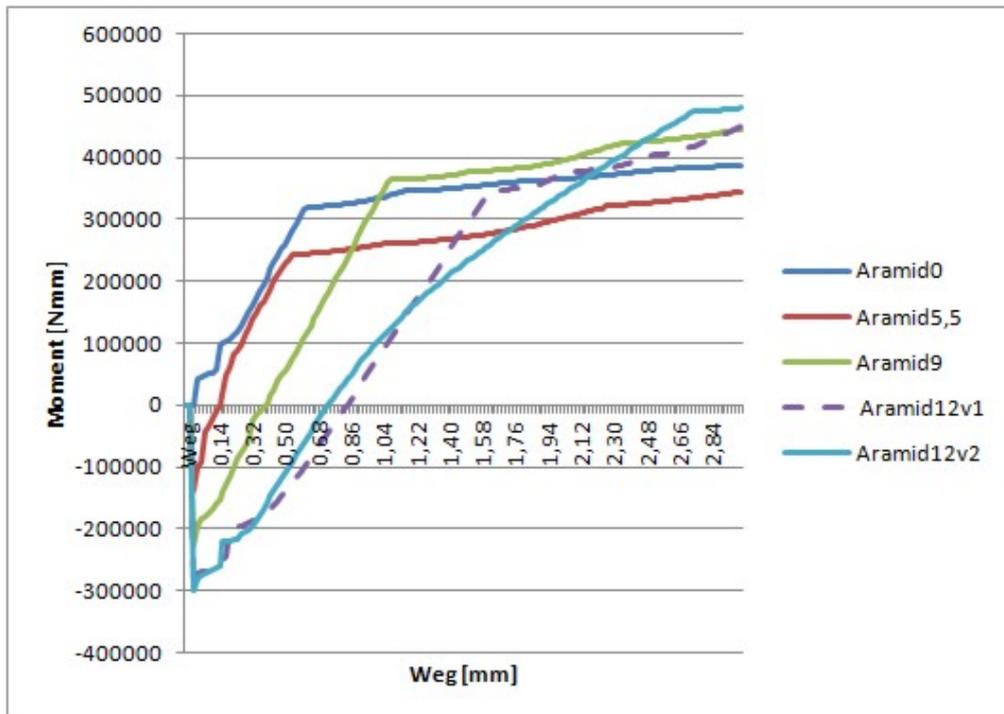


Abbildung 61: Moment-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Wegaufnehmer

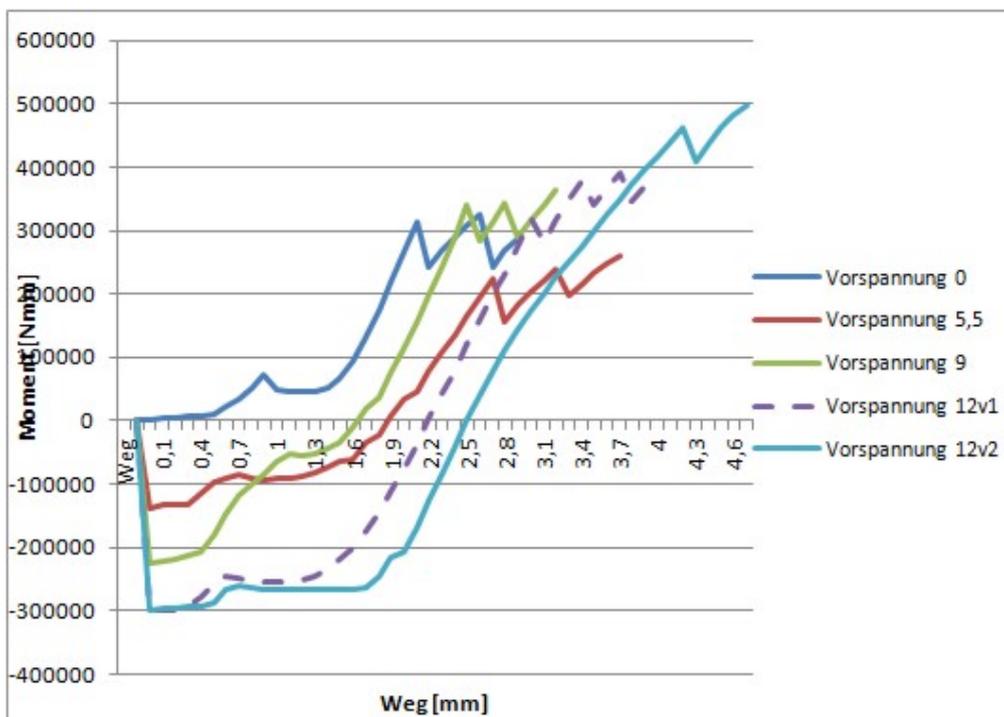


Abbildung 62: Moment-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Prüfmaschine

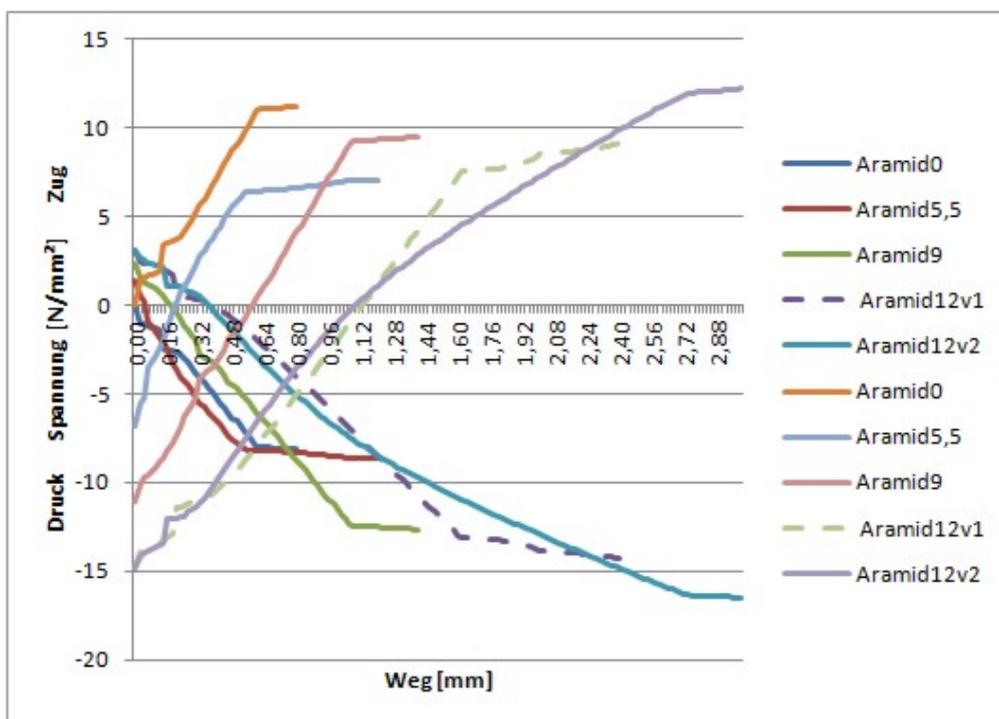


Abbildung 63: Spannung-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Wegaufnehmer

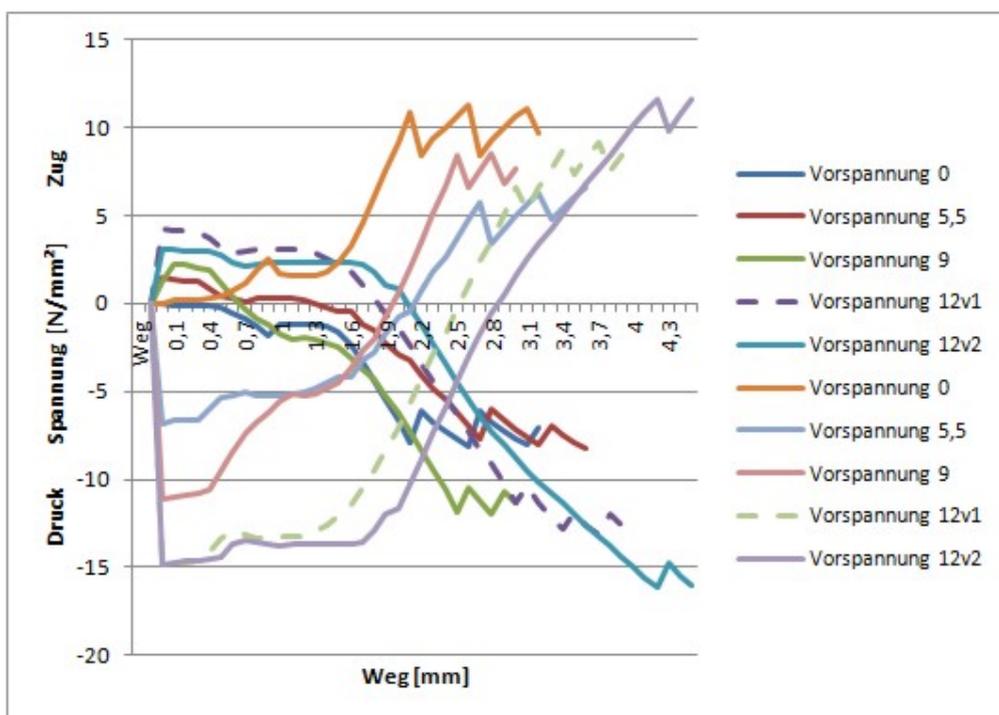


Abbildung 64: Spannung-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Prüfmaschine

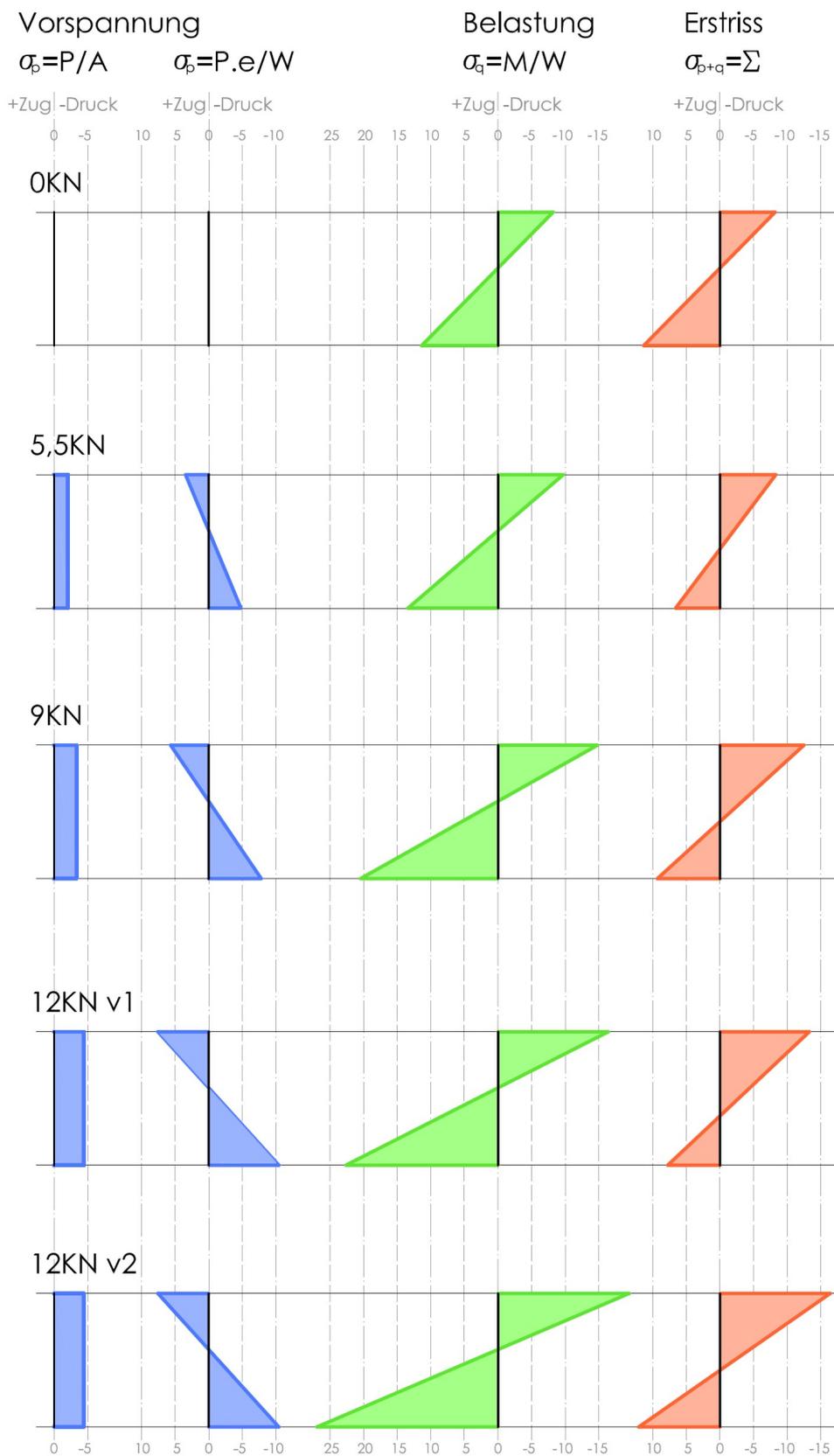


Abbildung 65: Spannungslinien bei der Erstrissbildung

4.5.6 Bruchverhalten

Bei vier der fünf getesteten Proben ist der Bruch des Balkens unterhalb des Kräfteinleitungspunktes eingetreten. Probe IV; Versuch 1 versagt zwischen Kräfteinleitungspunkt und Auflager, im Bereich wo das Moment geringeren Wert annimmt. Der zum Versagen führende Riss entwickelte sich aus einem an der Unterseite liegenden Biegeriss. Ausgehend von dieser Schwächung entwickelt sich ein flach liegender Schubriss. Da keine Schubbewehrung vorhanden ist, weitet sich der Riss bei geringer Laststeigerung stark auf. Die Querkraftaufnahme erfolgt nur noch durch die Druckzone im Gurt und durch die Dübelwirkung der Bewehrung. Wegen der geringen Tragfähigkeit des FVK-Bewehrung quer zur Faser wird der Dübelwirkung nur ein geringer Teil der Querkraft zugeordnet, ebenso nur einen geringen Teil übernimmt auf Grund der großen Schubrissbreite die Rissverzahnung. Bei weiterer Laststeigerung wandert der Schubriss schnell mit flacher Neigung in Richtung Lasteinleitungsstelle, verkleinert dabei die Druckzone und bewirkt ein schlagartiges Versagen.

Abbildung 66 zeigt einen von einem Biegeriss ausgehenden Schubriss. In Abbildung 67 ist der flach abfallende Riss bis zum Einleitungspunkt ersichtlich. Folgende Abbildungen 69 bis 75 zeigen den Verlauf bis zum Bruch der Proben.

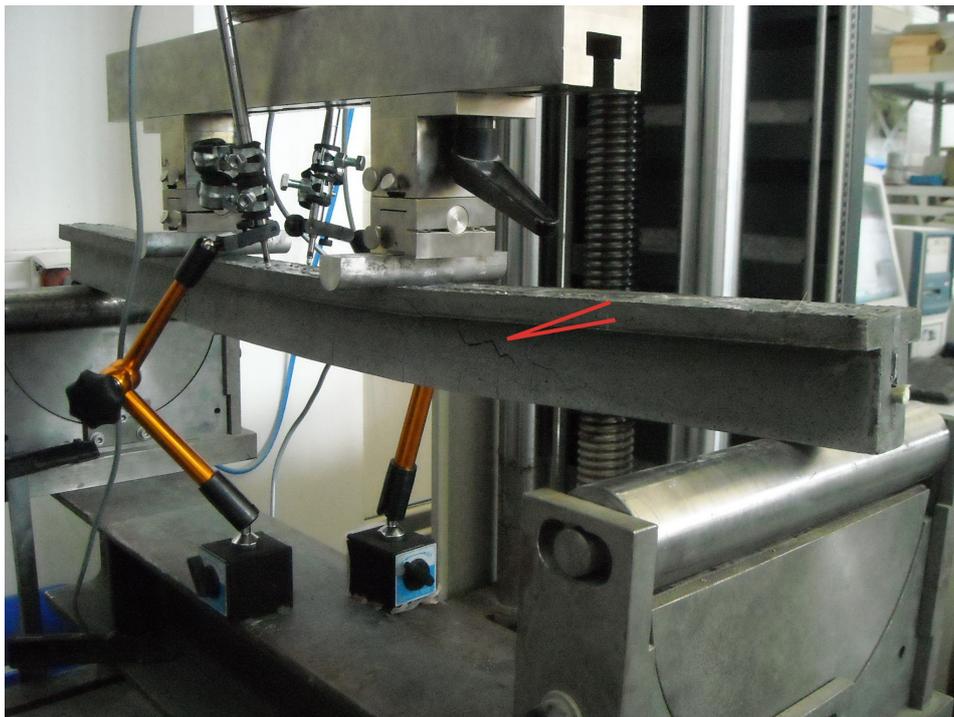


Abbildung 66: Schubriss vor dem Bruch eines Plattenbalkens



Abbildung 67: Schubbruch eines Plattenbalkens

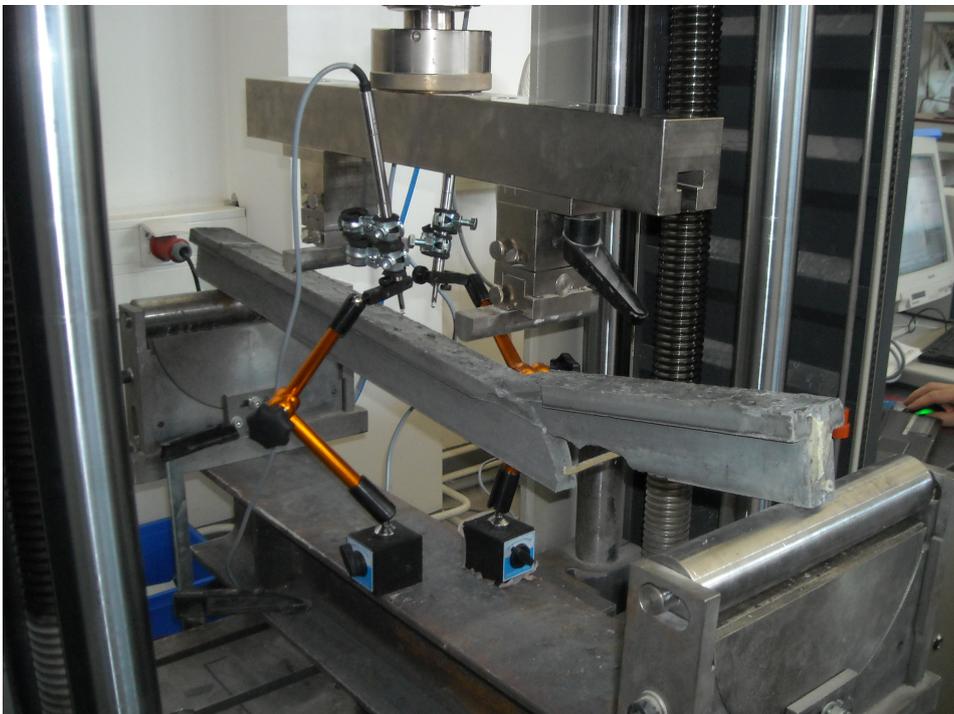


Abbildung 68: Bruchzustand eines Plattenbalkens

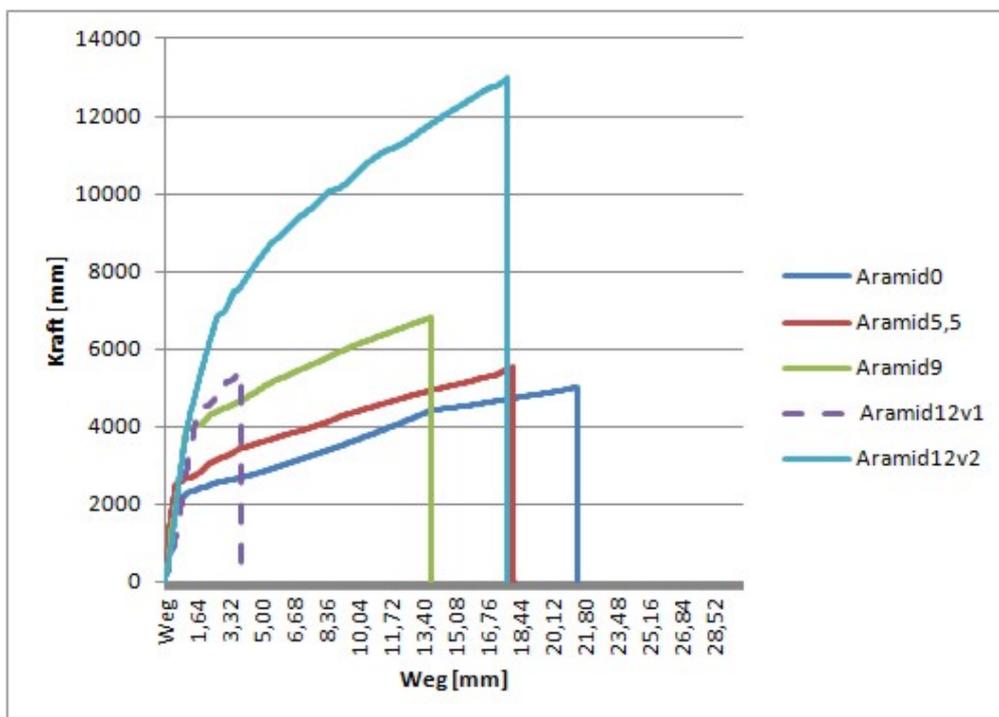


Abbildung 69: Kraft-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Wegaufnehmer

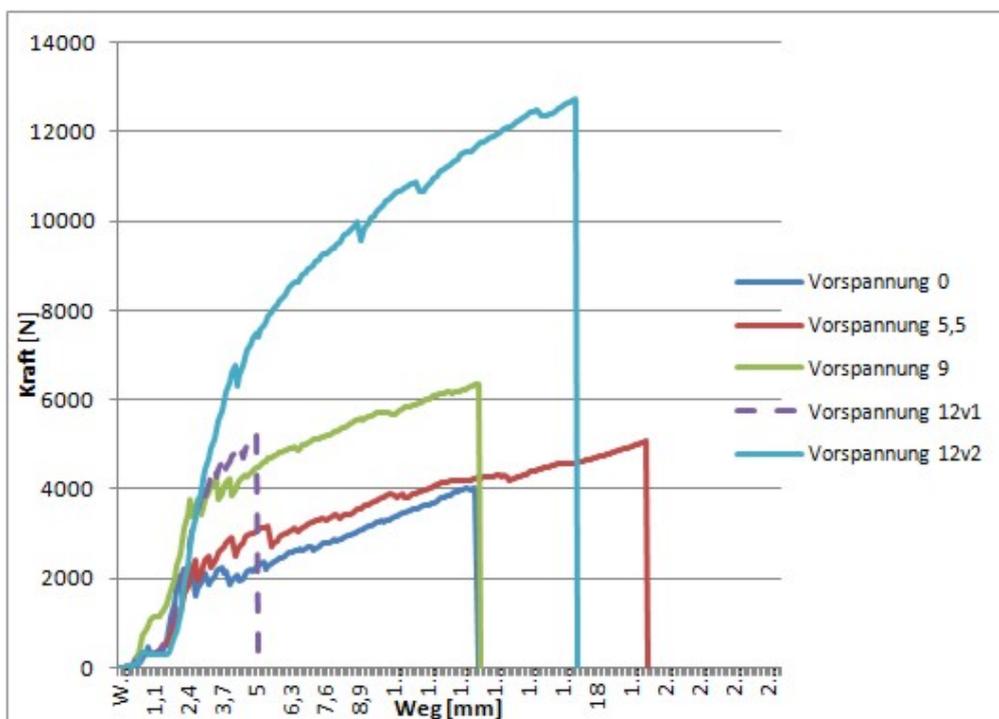


Abbildung 70: Kraft-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Prüfmaschine

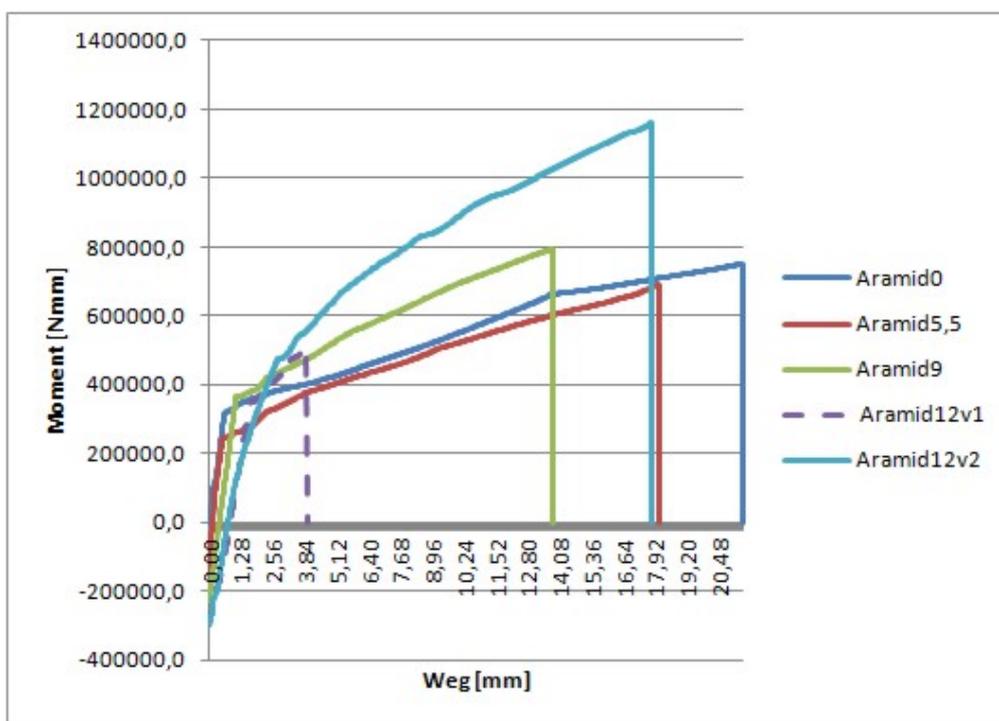


Abbildung 71: Moment-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Wegaufnehmer

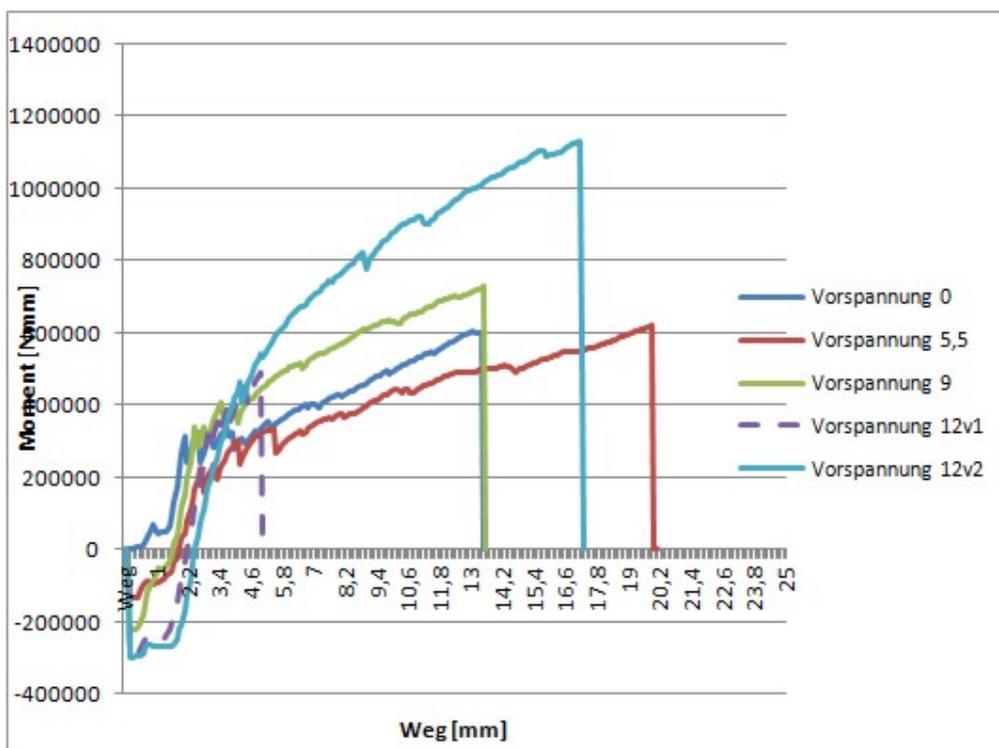


Abbildung 72: Moment-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Prüfmaschine

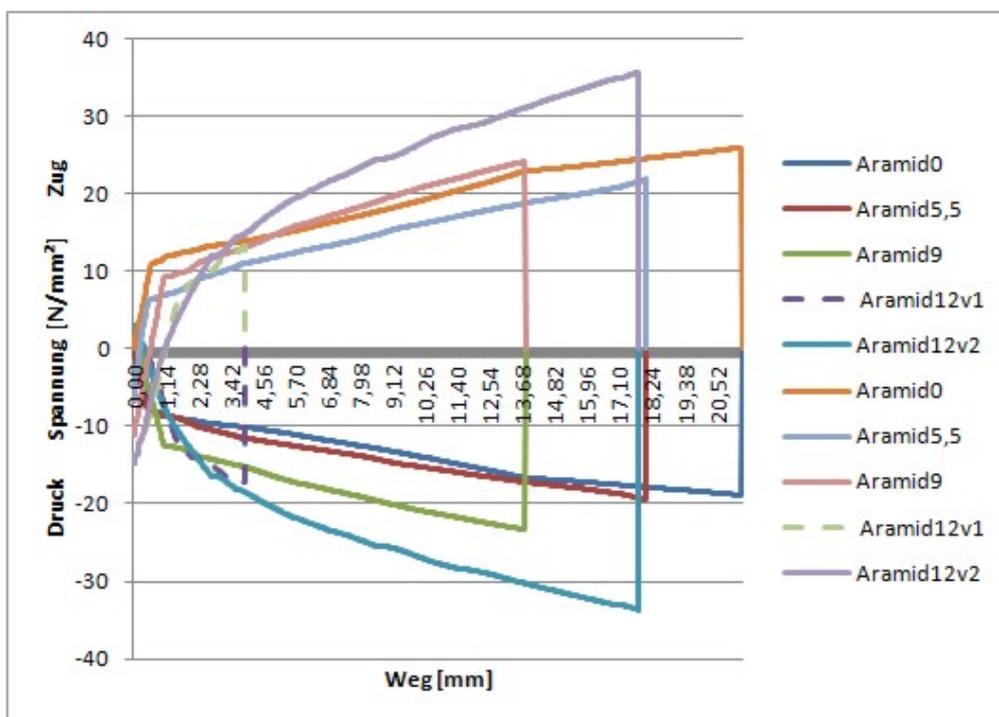


Abbildung 73: Spannung-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Wegaufnehmer

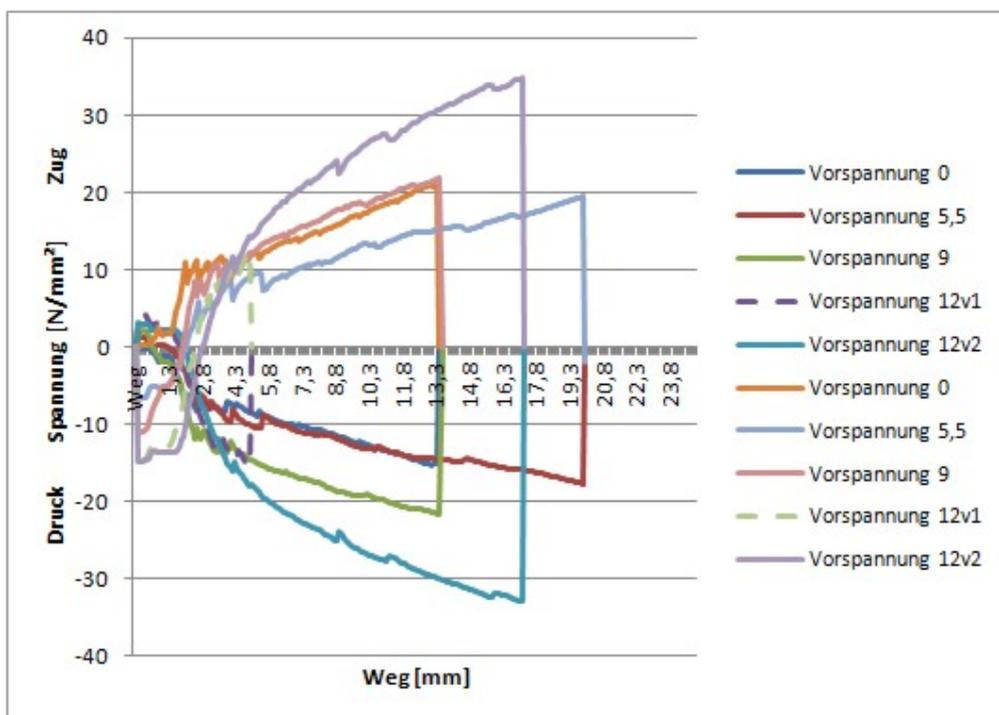


Abbildung 74: Spannung-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Prüfmaschine

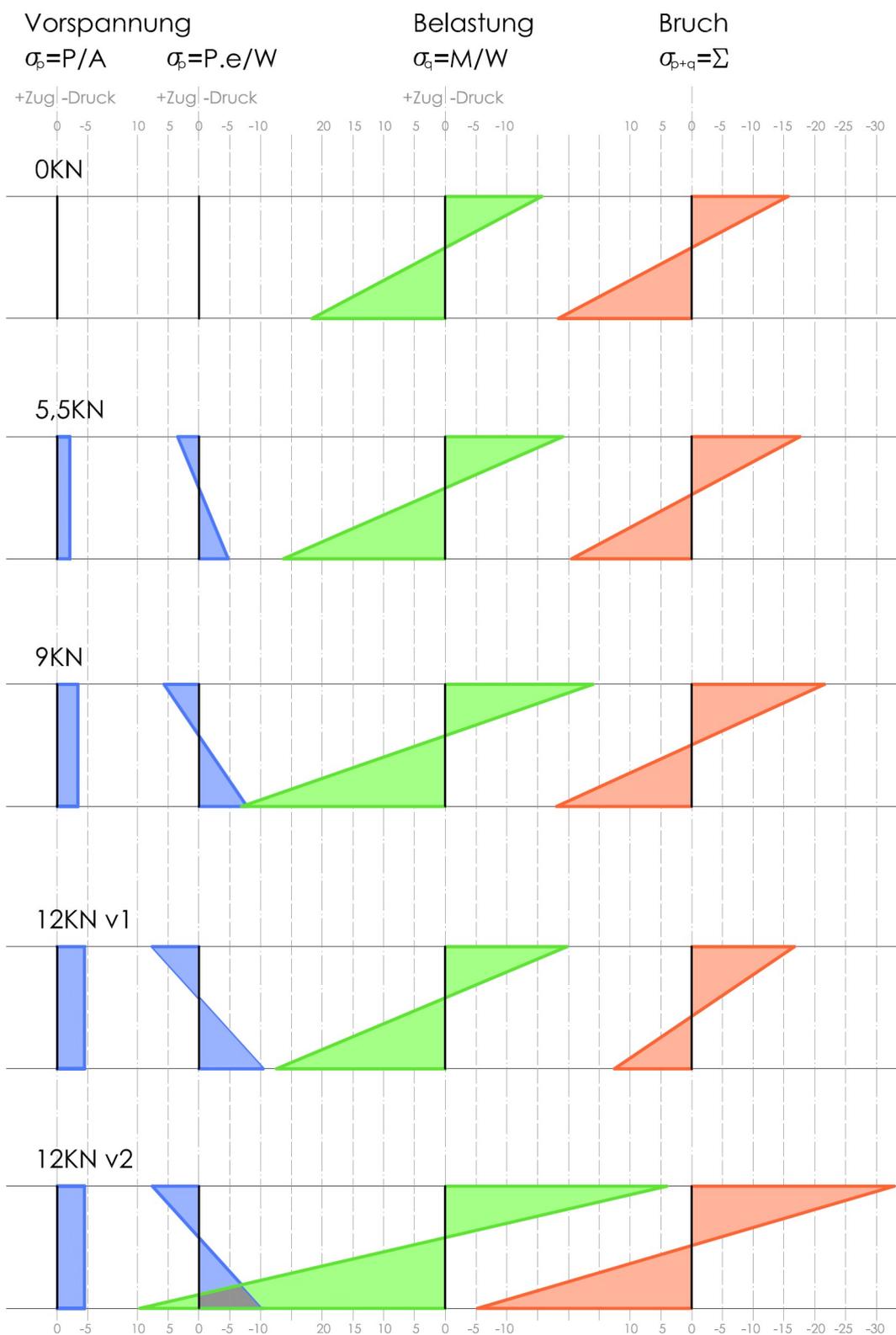


Abbildung 75: Spannungslinien beim Bruchversagen

5 Zusammenfassung und Erkenntnisse

Die Verwendung von Faserverbundkunststoffen als Ersatz von Stahlbewehrung stellt im Bauwesen eine interessante Möglichkeit dar. Speziell in Bereichen, wo die Nachteile von Stahl nicht erträglich sind, finden Bewehrungen aus Faserverbundkunststoffen ihren Vorteil. Dies trifft z.B. bei der geringeren Zugfestigkeit des Stahls, bei Ermüdungsverhalten oder bei Anwendungen in nicht magnetischen Bereichen zu.

Erst seit den 1980-er Jahren wird mit dem Einsatz von Fasern in Beton experimentiert. In anderen Bereichen, z.B. in der Kunststoffindustrie gehören Fasern als Verstärkungsmaterial schon zur Regelmäßigkeit. Aus diesem Bereich entwickelte sich auch der Bewehrungsstab aus den gebündelten Fasern. Dabei werden die gerichteten Fasern in Harz getränkt und bilden mit der Kunststoffmatrix einen Bewehrungsstab. Die Fasern können dabei aus dem Material Glas, Carbon, Basalt oder Armaid hergestellt werden. Aramidfasern sind 1965 unter dem Namen Kevlar auf den Markt gebracht worden. Das Material besteht aus aromatischen Polyamiden die durch Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind. Die Aramidfasern lassen sich in zwei Gruppen einteilen, deren Unterschied im Elastizitätsmodul liegt. Sie zeichnen sich speziell durch die hohe Bruchdehnung, Festigkeit und gutes Brandverhalten aus.

Bei den Versuchen finden die Bewehrungen aus Aramid in Probekörpern aus ultra hochfesten Beton ihre Anwendung. Ultra hochfester Beton hat eine Druckfestigkeit über 115 N/mm^2 . Die Verwendung von Zuschlagsstoffen mit hoher Festigkeit, Zement mit einem geringen Wasseranspruch und Mikrosilika führen zu diesem Beton mit erhöhter Druckfestigkeit. Nebenbei sind noch viele weitere Punkte wie z.B. Dosierung, Mischtechnik und Nachbehandlung für UHPC von wichtiger Bedeutung.

Bei den Versuchen wird einerseits die Qualität des Betons und andererseits das Verbundverhalten in Auszug- und Vorspannversuchen untersucht. Die Frischbetonqualität wird anhand vom Fließmaß, Rohdichte und Luftgehalt bestimmt. Bei der Festbetonprüfung wird die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit von den Probekörpern ermittelt. Die Verbundlängen werden an Hand von Auszugsversuchen festgelegt. Dabei werden die Bewehrungsstäbe über eine definierte Länge in Betonprismen einbetoniert und durch eine Biegebeanspruchung über ein Gelenk auf Zug belastet. Bei diesen Proben wird das Auszugsverhalten der Bewehrung aus den Probenhälften beobachtet und in einem Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Dadurch können Aussagen über das Verbundverhalten der einzelnen Dicken und Materialien getroffen werden. Bei den Vorspannversuchen werden die vorgespannten Plattenbalken bis zum Bruch auf Biegung belastet. Dabei wird auf die Erstrissbildung und auf das Endbruchverhalten genauer eingegangen. Bei der Prüfung der Proben erfolgen zwei unabhängige Messungen, um etwaige Messfehler aufdecken zu können. Mit den Messergebnissen werden Spannungs-Weg-Diagramme erstellt und die Erstrissbildung mit den Ergebnissen der Biegezugfestigkeitsprüfungen der Prismen

verglichen. Beim endgültigen Bruch tritt ein Schubversagen ein, da der Querkraftwiderstand des Plattenbalkens zu gering ist.

Wegen dem Querkraftversagen des Plattenbalkens, konnten beim Bruch auf die Verbundspannung und auf die Zugspannung im Vorspannmaterial nur geringe Aussagen getroffen werden. Eine Möglichkeit um bei solchen Versuchen einen Bruch im Vorspannmaterial zu erzeugen, wäre die Verwendung von dünneren Spannlitzen oder bei gleich bleiben des Querschnittes der Bewehrung kann auch ein Betonquerschnitt mit höherem Querkraftwiderstand eingesetzt werden.

Prinzipiell stellen Faserverbundkunststoffe ein Pendant zur Stahlbewehrung, bzw. zu Spannlitzen aus Stahl dar. Die geringen Erfahrungen und die hohen Kosten von Aramid bringen noch so manche Zweifel mit sich. Früher oder später, wenn die Zweifel durch mehrere Versuchsobjekte aus Faserverbundkunststoff-Bewehrung abgelegt sind und durch die Herstellungsmethode Aramid günstiger als Stahl ist, wird der Faserverbundkunststoff eine erstzunehmende Ergänzung zum Stahl.

Literatur

- [1] Bergmann H. W., (1992) *Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile* Springer Verlag
- [2] Betonakademie (2011) *Betontechnologie 1 (BT1)*; Güterverband Transport und Österreichische Bautechnik Veranstaltungs GmbH
- [3] Binowski D. (2012) *Stahlbewehrung und Aramidbewehrung als Betonarmierung im Vergleich*; Diplomarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Uni Wien
- [4] Burtscher S. L. (2008) *Faserverbundwerkstoffe, Betonbau 3 Vorlesung*; Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau Technische Uni Wien
- [5] Deutscher Beton - Verein E. V. *Beton - Handbuch*
- [6] Ehrenstein G. W. (1992) *Faserverbund- Kunststoffe, Werkstoffe, -Verarbeitung- Eigenschaften*; Carl Hanser Verlag
- [7] Flemming M., Ziegmann G., Roth S. (1995) *Faserverbundbauweisen, Fasern und Matrix* Springer Verlag
- [8] Hiese W., Knoblauch H. (1988) *Baustoffprüfung, Versuche, Erläuterung, Beispiele*; Werner Verlag
- [9] Kampen R (2005) *Betonzusätze Zusatzmittel und Zusatzstoffe*; Verein Deutscher Zementwerke; Zement-Merkblatt Beton-technik
- [10] Kromoser B. (2011) *Brückenbau mit dünnwandigen Fertigteilen, Großversuch zur Herstellung und zum Torsionswirkungsverhalten*; Diplomarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Uni Wien
- [11] Kollgerger J. (2009) *Skriptum zur Vorlesung, Betonbau 1, 3 Auflage*; Institut für Tragkonstruktionen - Betonbau Technische Uni Wien
- [12] Niewels aus Schwerte J. (2008) *Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung*; Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
- [13] Rümmelin A. T. (2005) *Entwicklung; Bemessung; Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Betonen*; Diplomarbeit, Fakultät Bauingenieurwesen, Fachhochschule Stuttgart

- [14] Schachinger A. I. (2007) *Maßnahmen zur Herstellung von rissefreien Bauteilen aus ultrahochfestem Beton mit hoher Duktilität*; Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München
- [15] Schmidt M., Fehlinger E. (2007) *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*; Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau Institut für Konstruktiver Ingenieurbau, Universität Kassel
- [16] Schneider U. (2003) *Herstellung und Eigenschaften von Ultra-Hochleistungsbetonen, Heft 8*; Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Technische Universität Wien
- [17] Schuster F. (2010) *Mathematik 2; für Bauingenieurwesen*; Institut für diskrete Mathematik und Geometrie, Technische Uni Wien
- [18] Tue N., Ma J., Orgass M. (2006) *Kriechen von Ultrahochfesten Beton (UHFB)* Bautechnik, Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau, 83 Jahrgang, Februar 2006, Heft 2, Ernst & Sohn
- [19] <http://mb-s1.upb.de/E-MechLAB/Verbundwerkstoff-Mechanik/Produkt/Herstellung/Pultrusion/> (Abgerufen am 07.Mai 2012)
- [20] <http://www.sireg.it/en/geotechnics/products/grouting-pipes/> (Abgerufen am 09.Mai 2012)
- [21] <http://www.hbm.com/de/menu/produkte/aufnehmer-sensoren/kraft/u10-u10m-u10s/> (Abgerufen am 30.Mai 2012)
- [22] <http://www.gaertnerplatzbruecke.de/> (Abgerufen am 20.Mai 2012)
- [23] <http://www.hilti.de/holde/> (Abgerufen am 07.August 2012)
- [24] ÖNORM EN 12390-3:2012.04.01 *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*
- [25] ÖNORM EN 12390-3:2012.04.01 *Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern*
- [26] ÖNORM EN 12390-3:2012.04.01 *Prüfung von Festbeton - Teil 7: Dichte von Festbeton*
- [27] ÖNORM EN 12390-3:2012.04.01 *Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte*

- [28] ÖNORM EN 12390-3:2012.04.01 *Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren*
- [29] ÖNORM EN 12350-5:2009.07.15 *Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton - Setzfließversuch*
- [30] ÖNORM EN 10080:2005.09.01 *Stahl für die Bewehrung von Beton - Schweißgeeigneter Betonstahl - Allgemeines*

Tabellenverzeichnis

1	Die wichtigsten PZ-Klinkerphasen, Eigenschaften und Massenanteile [16]	16
2	Physikalische Eigenschaften von Zement und Mikrosilika [16]	18
3	Chemische Eigenschaften von Zement und Mikrosilika [16]	18
4	Arten an Zusatzmitteln[16]	22
5	Prozentuelle chemische Zusammensetzung von verschiedenen Glasfasern. E-elektrisch, A-, C-chemisch resistent, R-, S-hochfest, D-dielektrisch [7]	34
6	Typische Eigenschaften von verschiedenen Glasfasern. E- elektrisch, R/ S hochfest, M- steif, C- chemisch resistent [7]	36
7	Eigenschaften verschiedener Fasertypen [6]	42
8	Eigenschaften verschiedener Harze [12]	43
9	Eigenschaften verschiedener FVK [12]	45
10	Vorspannkraft und Herstellungszeitpunkt der Plattenbalken	59
11	Ergebnisse der Frischbetonprüfung	61
12	Würfelgeometrie und Masse	62
13	Ergebnisse der Druckversuche	63
14	Fraktilenfaktoren [17]	65
15	Ergebnisse der Würfeldruckprüfungen	66
16	Auswertung der 40x40x160 mm Prismen Versuche	70
17	Ergebnisse der Prismen-Biegezugfestigkeit	70
18	Ergebnisse der Prismen-Druckfestigkeit	71
19	Ergebnisse der Verbundversuche	82
20	Ermittlung der erforderlichen Verbundlängen	83
21	Querschnittswerte	86
22	Anfangsüberhöhung der Plattenbalken	87

Abbildungsverzeichnis

1	Spannungsverteilung exzentrische Vorspannung	1
2	Längsschnitt einer Probe für Verbundversuche [3]	2
3	Mauerbeispiele aus opus caementitium	5
4	Sieblinie mit Größtkorn 32 mm	8
5	Microsilika zwischen Zementkorn [16]	12
6	Vergleich der Zusammensetzung zwischen Normal-, Ultra- Hochleistungs- und Selbstverdichtender Beton [15]	13
7	Rissverteilung durch Fasern im Beton [16]	20
8	Aufbau von Ar-(omatischen Poly)-amiden [6]	29
9	Unterschied einer Meta-, und Para-Bindung	30
10	Produktionsablauf von Aramidfasern [6]	31
11	Herstellung der Glasfasern [7]	35
12	Düsenziehverfahren zur Herstellung der Glasfasern [1]	36
13	Das Strangziehverfahren (Pultrusion) [19]	44
14	Vergleich von Spannungs-Dehnungslinien verschiedener FVK und Stahl [12]	45
15	Spannungsverteilung (a) zentrische (b) exzentrische Vorspannung [10]	49
16	Vorspannung mit sofortigem Verbund [11]	51
17	Vorspannung mit nachträglichem Verbund [11]	51
18	Interne Vorspannung ohne Verbund [11]	52
19	Externe Vorspannung [11]	52
20	Fertige Plattenbalken	53
21	Schalung für den Plattenbalken	54
22	In Gewindestangen eingeklebte Aramidstangen	54
23	Prüfrahmen mit eingebauter Schalung	55
24	Skizze des Prüfrahmens mit eingebauter Schalung	55
25	Kraftmessdose [3]	56
26	Mischungsberechnung für UHPC	57
27	Plattenbalken mit Gewinde zum Vorspannen	58
28	Schnittgrößenverteilung der Vorspannkraft	59
29	Druckversuch an einem Betonwürfel [8]	63
30	Toni Technik Prüfmaschine für die Ermittlung der Druckfestigkeiten	64
31	Bruchbild eines zerstörten Betonwürfels	65
32	Verteilung der Betondruckfestigkeit	66
33	Materialprüfgerät Zwick 250 der TU-Wien	68
34	Anordnung der Lastaufbringung auf dem Probekörper (3-Punkt-Biegeversuch) [25]	69
35	Ergebnis der Prismen-Biegezugfestigkeit	71
36	Ergebnis der Prismen-Druckfestigkeit	72
37	Längsschnitt einer Probe für Verbundversuche [3]	73

38	Fertiggestellte Schalungskörper zum Betonieren mit freier Verbundlänge [3]	74
39	Eingebaute Probe für den Verbundversuch	75
40	Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung	76
41	Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung Probe 1	77
42	Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung Probe 2	77
43	Zugkraft- Schlupfdiagramm Aramidbewehrung Probe 3	77
44	Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung	78
45	Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung Probe 1	79
46	Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung Probe 2	79
47	Zugkraft-Schlupfdiagramm GFK-Bewehrung Probe 3	79
48	Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung	80
49	Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung Probe 1	81
50	Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung Probe 2	81
51	Zugkraft-Schlupfdiagramm Stahlbewehrung Probe 3	81
52	Querschnitt des vorgespannten Plattenbalkens in [mm]	86
53	Positionierung der Wegaufnehmer	87
54	Versuchsaufbau und Schnittgrößenverteilung	88
55	Gesamter Prüfaufbau	89
56	Berechnung; Messung Wegaufnehmer	90
57	Berechnung; Messung Prüfmaschine	91
58	Erstrissbildung bei einem Plattenbalken	92
59	Kraft-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Wegaufnehmer	93
60	Kraft-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Prüfmaschine	93
61	Moment-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Wegaufnehmer	94
62	Moment-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Prüfmaschine	94
63	Spannung-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Wegaufnehmer	95
64	Spannung-Weg-Diagramm bis zur Erstrissbildung; Prüfmaschine	95
65	Spannungslinien bei der Erstrissbildung	96
66	Schubriss vor dem Bruch eines Plattenbalkens	97
67	Schubbruch eines Plattenbalkens	98
68	Bruchzustand eines Plattenbalkens	98
69	Kraft-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Wegaufnehmer	99
70	Kraft-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Prüfmaschine	99
71	Moment-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Wegaufnehmer	100
72	Moment-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Prüfmaschine	100
73	Spannung-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Wegaufnehmer	101
74	Spannung-Weg-Diagramm bis zum Bruch; Prüfmaschine	101
75	Spannungslinien beim Bruchversagen	102