

Bernhard Wietek

Stahlfaserbeton

Bernhard Wietek

# Stahlfaserbeton

Grundlagen und Praxisanwendung

PRAXIS



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

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

Prof. Dipl.-Ing. Bernhard Wietek ist an der HTL Innsbruck tätig.

Email: [wietek@a-bau.co.at](mailto:wietek@a-bau.co.at)  
Internet: [www.a-bau.co.at](http://www.a-bau.co.at)

1. Auflage 2008

Alle Rechte vorbehalten  
© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008

Lektorat: Dipl.-Ing. Ralf Harms | Sabine Koch

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.viewegteubner.de](http://www.viewegteubner.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg  
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach  
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.  
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0592-8

# Vorwort

Im Bereich des konstruktiven Ingenieurbauwesens wird in den letzten Jahren immer mehr der Ruf nach Beton mit Stahlfasern laut.

Sieht man sich die Literatur für den Stahlfaserbeton durch, so muss man feststellen, dass sich die Einteilung für die Berechnung nicht nach den Teilmaterialien richtet, sondern als ein neuer Baustoff gewertet wird, der zu untersuchen ist und nach dieser Untersuchung dann eingeteilt wird. Dies steht im Gegensatz zu allen Bemessungsverfahren im Bauwesen, bei denen die Dimension des Bauteiles das Ergebnis der Bemessung ist. So wird im Stahlbau und auch im Holzbau das Widerstandsmoment ausschlaggebend für die Gestalt des Bauteiles. Beim Stahlbeton ist das Ergebnis der Bemessungsberechnung der erforderliche Stahlquerschnitt, der in den Betonträger einzubauen ist.

Folgt man diesem Gedankengang der üblichen Berechnungen für eine Bemessung, so sollte eigentlich bei der Bemessung des Stahlfaserbetons die Dosierung der Stahlfasern im Beton das Ergebnis sein. Ausgehend von der statischen Beanspruchung sollte im Ergebnis der Bemessung also erkennbar werden, wie viel Stahlfasern im Beton einzumischen sind, um diese Beanspruchung auch zu halten.

Diesen Forderungen entsprechend hat der Autor nun konsequent den Weg der Kontinuumsmechanik beschritten, um für den Verbundbaustoff Stahlfaserbeton eine Bemessung zu erarbeiten, die letztendlich die erforderliche Dosierung mit Stahlfasern zum Ergebnis hat. Dabei wird auf die bekannten Grundlagen der Mechanik von Coulomb und Mohr für Feststoffe zurückgegriffen. Es kann damit bei konsequenter Betrachtung der einzelnen vorkommenden Zustände im Querschnitt das geforderte Ziel erreicht werden.

Grundlage dieser Bemessungen sind zwei neue Materialkennwerte für die Stahlfasern, die mit Versuchen für jede Faserart einzeln zu bestimmen ist. Es kann somit ähnlich wie beim Stahlbeton mit den beiden Materialien Beton und Stahlfaser die Tragfähigkeit eines Querschnittes nachgewiesen werden, wobei als Ergebnis die Dosierung (kg Stahlfaser je  $\text{m}^3$  Beton) im Querschnitt ist.

Die Möglichkeit, bei der Bemessung des Stahlfaserbetons ein ähnliches Ergebnis wie bei anderen Baustoffen zu erhalten und damit den Verbundbaustoff in seiner Zusammensetzung in der Bemessung zu bestimmen, ist eigentlich die Forderung von den meisten Ingenieuren. Mit den aufgezeigten Weg der Berechnung des Verbundbaustoffes Stahlfaserbeton wird nun dieser Weg auch beschritten.

Der Autor dieses vorliegenden Buches glaubt an den Fortschritt der Technik und hat dies in etlichen Anwendungen von neuen Systemen erfolgreich bewiesen. Es soll auch der Stahlfaserbeton nicht daran gehindert werden, den ihm zukommenden Platz in der technischen Welt zu erringen.

## Dank des Autors

Nicht versäumen möchte ich, mich bei jenen zu bedanken, die so viel Vertrauen in mich setzten und mich auf dieses neue Fachgebiet ansetzten, um eine ingenieurmäßige Lösung zu erarbeiten. Begonnen hat es, daß die Fa. Swietelsky - HTB mich als Bauingenieur und Geotechniker zu einem Informationgespräch für Stahlfaserbeton einlud und Kurt Neuschmid und sein Mitarbeiter Danillo Silvestri meinen Rat für den Einsatz für Spritzbeton erbat. Bei dieser Diskussion war auch Markus Schadde von ArcelorMittal anwesend. Es kam dabei heraus, daß eine Bemessung für den Verbundbaustoff Stahlfaserbeton ähnlich der des Stahlbetons nicht bekannt ist. Der Wunsch nach einer solchen Bemessung wurde geäußert und für die Praxis als sehr notwendig erachtet.

Dies war der Anstoß, dass ich anfang, mich mit einem Versuch der Ausarbeitung für die Bemessung von Stahlfaserbeton zu beschäftigen. Ich wurde dabei von den drei Herren jederzeit unterstützt, wobei sie mir alle erdenklichen Unterlagen zur Verfügung stellten und somit viele Ideen einbrachten. Nachdem dann nach einigen Monaten das Grundkonzept der Bemessung feststand, hat die Fa. ArcelorMittal mit Herrn Rene Pepin sich bereit erklärt, entsprechend meinen Vorgaben, Stahlfaserbeton mit unterschiedlicher Dosierung herzustellen und zu untersuchen. Dies betraf zwei Stahlfasern, die oft gebraucht werden. Die entsprechenden Versuche wurden dann bei der FH Aachen durchgeführt.

Für einen ersten praktischen Einsatz hat sich Hofrat Friedrich Heidenberger mit seinen Mitarbeitern Erich Klocker und Richard Tschugg des Landes Tirol bereit erklärt, erstmals an einer Hangsicherung den Stahlfaserspritzbeton anzuwenden. Es war ein recht erfolgreicher Einsatz, der alle Beteiligten ermunterte in dieser Richtung weiter zu arbeiten.

Es wurden daraufhin alle Stahlfaserhersteller des Verbandes der deutschen Stahlfaserhersteller angeschrieben und gebeten, für ihre Stahlfasern, ebenfalls Versuche durchzuführen um die entsprechenden Kennwerte zu ermitteln. Leider hat nur eine Firma nämlich Fa. KrampeHarex sich bereit erklärt solche Versuche durchzuführen, jedoch wurde diese Zusage später wieder aufgehoben.

Als das Manuskript bereits einen erheblichen Umfang aufwies, hat der Verlag Vieweg+Teubner durch seinen Lektor Ralf Harms sein positives Interesse gezeigt, dieses als Fachbuch zu drucken, wobei einige Ergänzungen insbesondere Daten und Kennwerte von Stahlfasern erwünscht wurden.

Nun, da das Buch nun zumindest für einen ersten Druck fertig ist, möchte ich mich bei allen erwähnten Personen herzlich für die Unterstützung und das Vertrauen bedanken.

Ein besonderes Anliegen ist es mir auch, mich bei meiner lieben Frau Jutta zu bedanken, die immer wieder viel Verständnis für die Einsätze von mir in der Freizeit zeigt und auch darauf achtet, dass ich mich nicht übernehme.

Bernhard Wietek

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Geschichtliches . . . . .	1
1.1.1	Vorwort aus Vitruv - De Architectura 27 v. Chr. . . . .	1
1.1.2	Seit wann gibt es Beton? . . . . .	2
1.1.3	Seit wann gibt es Stahlbeton? . . . . .	3
1.1.4	Seit wann gibt es Stahlfaserbeton? . . . . .	3
1.2	Umweltverträglichkeit . . . . .	4
1.3	Korrosion der Stahlfasern . . . . .	5
1.4	Normen und Richtlinien . . . . .	6
1.4.1	Normen . . . . .	6
1.4.2	Richtlinien . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Zeichendefinition</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Baustoff</b>	<b>11</b>
3.1	Beton . . . . .	11
3.1.1	Betonarten . . . . .	11
3.1.2	Betonklassen . . . . .	12
3.2	Zement . . . . .	13
3.3	Gesteinskörnungen (Zuschlag) . . . . .	15
3.4	Wasser . . . . .	17
3.5	Betonzusätze . . . . .	17
3.5.1	Betonzusatzstoffe . . . . .	17
3.5.2	Betonzusatzmittel . . . . .	17
3.6	Betoneigenschaften . . . . .	18
3.6.1	Betonarten . . . . .	18
3.6.2	Einwirkungen auf den Beton . . . . .	19
3.6.3	Konsistenz . . . . .	21
3.6.4	Kurzbezeichnungen . . . . .	21
3.7	Stahlfasern . . . . .	22
3.7.1	Hakenform . . . . .	24
3.7.2	Wellenform . . . . .	24
3.7.3	Gestauchte Form . . . . .	24
3.7.4	Zugfestigkeit . . . . .	25
3.8	Bewehrungsstahl . . . . .	25
3.9	Spannstahl . . . . .	26

<b>4</b>	<b>Verarbeitung</b>	<b>29</b>
4.1	Übliche Betonsorten . . . . .	29
4.2	Zusatzstoffe für Pumpbeton . . . . .	29
4.3	Übliche Dosierungen . . . . .	29
4.4	Zugabe der Stahlfasern . . . . .	30
4.5	Mischvorgang . . . . .	30
4.6	Igelbildung . . . . .	31
4.7	Einbauen von Stahlfaserbeton . . . . .	32
4.8	Besonderheiten für Stahlfaserspritzbeton . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Materialkennwerte</b>	<b>37</b>
5.1	Betoneigenschaften . . . . .	37
5.2	Stahlfasern . . . . .	41
5.3	Verbundwirkung der Stahlfaser . . . . .	42
5.3.1	Ausgangssituation . . . . .	42
5.3.2	Versuchsanordnung . . . . .	43
5.3.2.1	Einfacher Biegebalken . . . . .	43
5.3.2.2	Einfacher Biegebalken mit Kerbe . . . . .	44
5.3.2.3	Standardbiegebalken . . . . .	47
5.3.3	Versuchsablauf . . . . .	48
5.3.4	Auswertung der Messdaten . . . . .	50
5.3.5	Ergebnisse der Versuchsreihen . . . . .	56
5.3.6	Ermittlung der Faserkennwerte . . . . .	57
5.3.7	Materialkennwerte Stahlfaserbeton . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Bemessung</b>	<b>63</b>
6.1	Bemessungsverfahren . . . . .	63
6.1.1	Gebrauchslastverfahren . . . . .	64
6.1.2	Traglastverfahren . . . . .	64
6.1.3	Bemessung mit Teilsicherheitsfaktoren . . . . .	65
6.2	Zuverlässigkeitskonzepte . . . . .	66
6.2.1	Deterministisches Zuverlässigkeitsprinzip . . . . .	66
6.2.2	Probabilistische Zuverlässigkeitsprinzip . . . . .	67
6.2.3	Semiprobabilistische Zuverlässigkeitsprinzip . . . . .	67
6.2.3.1	Nachweis der Tragsicherheit . . . . .	67
6.2.3.2	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit . . . . .	68
<b>7</b>	<b>Bemessungstheorie</b>	<b>69</b>
7.1	Biegung . . . . .	69
7.1.1	Zustand 1 . . . . .	69
7.1.2	Zustand 1-2 . . . . .	70
7.1.3	Zustand 2 . . . . .	72
7.2	Biegung mit Längskraft . . . . .	74
7.2.1	Kleine Ausmitte . . . . .	74

7.2.2	Mittlere Ausmitte . . . . .	75
7.2.3	Große Ausmitte . . . . .	77
7.3	Druckstäbe . . . . .	78
7.4	Querkraft . . . . .	80
<b>8</b>	<b>Bemessungsanwendung</b>	<b>83</b>
8.1	Allgemeines . . . . .	83
8.2	Biegung . . . . .	84
8.2.1	Platten und Decken . . . . .	84
8.2.2	Träger . . . . .	89
8.3	Biegung mit Längskraft . . . . .	93
8.3.1	Kellerwände . . . . .	93
8.3.2	Wandscheibe mit Biegung . . . . .	95
8.3.3	Stütze mit Biegung . . . . .	97
8.4	Druckstäbe . . . . .	101
8.5	Querkraft . . . . .	103
8.5.1	Querkraft bei Träger . . . . .	103
8.5.2	Durchstanzen eines Auflagers . . . . .	105
<b>9</b>	<b>Beilagen</b>	<b>109</b>
9.1	Mohr - Coulomb Beziehungen . . . . .	109
9.1.1	Eindimensionale Beanspruchung . . . . .	109
9.1.2	Dreidimensionale Beanspruchung . . . . .	114
9.2	Materialkennwerte . . . . .	123
9.2.1	Faser FE 65/35 von ArcelorMittal . . . . .	125
9.2.2	Faser HE 55/35 von ArcelorMittal . . . . .	131
9.3	Bemessungsdiagramme für Platten . . . . .	137
9.3.1	Fasern von Arcelor-Mittal . . . . .	138
9.3.2	Fasern von Krampe-Harex . . . . .	144
<b>10</b>	<b>Berechnung mit Tabellenkalkulation</b>	<b>145</b>
10.1	Biegebemessung . . . . .	147
10.1.1	Dateneingabe . . . . .	147
10.1.2	Berechnung in Einzelschritten . . . . .	149
10.1.3	Berechnungsergebnis . . . . .	158
10.2	Biegung mit Druckkraft . . . . .	161
10.2.1	Dateneingabe . . . . .	161
10.2.2	Berechnung in Einzelschritten . . . . .	163
10.2.3	Berechnungsergebnis . . . . .	166
10.3	Knicken . . . . .	168
10.3.1	Dateneingabe . . . . .	168
10.3.2	Berechnung in Einzelschritten . . . . .	171
10.3.3	Berechnungsergebnis . . . . .	173
10.4	Schubbemessung . . . . .	175

10.4.1 Dateneingabe . . . . .	175
10.4.2 Berechnung in Einzelschritten . . . . .	178
10.4.3 Berechnungsergebnis . . . . .	179
<b>Anhang</b>	<b>181</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>191</b>
<b>Sachverzeichnis</b>	<b>193</b>

# 1 Einleitung

Beschäftigt man sich mit einem Baustoff und setzt ihn in der Praxis bei einem Bauwerk ein, so ist es interessant und auch notwendig zu wissen, wie der Baustoff entstanden ist, wie er sich im Umfeld verhält und auch wie er von der Fachwelt bewertet wird und somit auch eine allgemeine Anerkennung findet. In den folgenden Passagen sollen diese allgemein nützlichen Wissensteile angesprochen werden.

## 1.1 Geschichtliches

Meist wird in diesem Bereich dem Leser mit Jahreszahlen und Erfindern die erste Lust am Weiterlesen vermiest, hier soll auf eine andere Art dieses Kapitel abgehandelt werden, das möglicherweise so manchen auch zum Nachdenken bringt.

Einleitend soll hier ein über 2.000 Jahre altes Vorwort wiederholt werden, das an Aktualität nichts verloren hat, sondern eher noch mehr in der heutigen Zeit gilt:

### 1.1.1 Vorwort aus Vitruv - De Architectura 27 v. Chr.

VITRUV<sup>1</sup> (Marcus Vitruvius Pollio)

Römischer Architekturtheoretiker des 1. Jahrhunderts vor Christi, Verfasser des auf eigenen Erfahrungen als Baumeister (Tempel in Fanum – Fano) und auf intensiven Studium griechischer Quellen beruhenden zehnbändigen Werks (Marcus Vitruvius Pollio)

*Berühte Sportler, die Olympia, an den Pythen, Istmien und Nemeen Siege errungen hatten, haben die Vorfahren der Griechen mit so hohen, ehrenvollen Auszeichnungen bedacht, dass sie nicht nur in der Festversammlung mit Siegespalme und Siegeskranz stehend Ruhm ernten, sondern auch, wenn sie siegreich in ihre Stadt zurückkehren, im Triumphzug auf einem Viergespann in ihre Heimatstadt und zu ihrem Vaterhaus gefahren werden und in den Genuss eines von der Bürgerschaft beschlossenen lebenslangen Ehrensoldes kommen.*

*Wenn ich dies also bedachte, muss ich mich wundern, warum die gleichen ehrenvollen Auszeichnungen und sogar noch größere nicht auch den Schriftstellern zuteil geworden sind, die aller Welt für alle Ewigkeit unendliche, gute Dienste leisteten. Es wäre nämlich würdiger gewesen, diese Einrichtung zu treffen, weil die Sportler durch Training ihre eigenen Körper stählen, die Schriftsteller aber nicht nur ihren eigenen Geist, sondern das allgemeine Geistesleben bereichern, da sie durch ihre Bücher Lehren bereithalten, damit man durch sie Kenntnisse erwirbt und den Geist schärft.*

---

<sup>1</sup>Vitruv. Zehn Bücher über Architektur. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Dr. Curt Fensterbusch. Primus Verlag, Darmstadt

*Was nützen nämlich **Milon aus Kreton**, weil er unbesiegbar geblieben ist, oder die übrigen, die auf demselben Gebiet Sieger waren, den Menschen? Nur zu ihren Lebzeiten genossen sie unter ihren eigenen Mitbürgern Wertschätzung. Die auf das tägliche Leben bezüglichen Lehren des **Pythagoras** aber auch des **Demokrit**, des **Platon**, des **Aristoteles** und der übrigen Philosophen, die mit unermüdlichem Fleiß gepflegt, bringen nicht nur ihren Mitbürgern, sondern auch der ganzen Menschheit frische und lieblich duftende Früchte hervor. Diejenigen, die sich von frühester Jugend an aus diesen Schriften mit einem Übermaß gelehrten Wissens erfüllen, haben die besten, klugen Gedanken und werden in ihren Gemeinden zu den Schöpfern menschlich-sittlichen Verhaltens, der Rechtsgleichheit, der Gesetze, ohne die kein Staat sicher bestehen kann. Da also von den weisen Schriftstellern den Menschen sowohl im privaten wie im öffentlichen Leben so bedeutungsvolle Gaben geschenkt sind, muss man ihnen nach meiner Meinung nicht nur Palmen und Kränze verleihen, es müssten ihnen sogar Triumphe beschlossen werden, und sie müssten für würdig befunden werden, dass man ihnen einen Platz unter den Göttern anweise.*

Wie sich die Zeiten doch nicht ändern! Nehmen wir heute jeden beliebigen Supersportler her und vergleichen ihn mit **Mitterhofer** oder auch **Madersperger** – was, Sie kennen diese Herren nicht?

**Mitterhofer** (1822–1893): Erfinder der Schreibmaschine; starb verarmt - was würden wir heute ohne Schreibmaschine somit als Vorgänger der heutigen Computer machen?

**Madersperger** (1786–1850); Erfinder der Nähmaschine; starb verarmt - was wären unsere Kleider ohne Nähmaschine?

Diese Abschweifung soll etwas zum Nachdenken anregen und die Dinge in unserer raschlebigen Zeit doch etwas zurechtrücken. In der Öffentlichkeit wird nicht immer das Wesentliche erkannt. Wir sind aufgerufen, dazu ein wenig für einen Ausgleich beizutragen.

Nun aber wieder zurück zu unserem Thema:

Das Bauwesen ist seit dem ersten Bauwerk eine Fachrichtung im menschlichen Handeln, das seit jeher immer schon allwissende Pfuscher hatte, die Schäden produzierten und so sich selbst ihr Denkmal setzten. Diejenigen, die jedoch Wissen ansammelten und dieses gut einsetzten, schlossen sich zu Gemeinschaften<sup>2</sup> zusammen und gaben das Wissen innerhalb dieser weiter. Dieses Fachwissen wurde großteils geheim gehalten, erst mit der Aufklärung und der Einführung von technischen Universitäten wurde das technische Wissen öffentlich. Erst ab diesem Zeitpunkt<sup>3</sup> können wir in öffentlichen Bibliotheken das Wissen abrufen. Davor sind nur wenige und auch unsichere Literaturstellen bekannt.

### 1.1.2 Seit wann gibt es Beton?

Unter Beton versteht man natürliche Gesteinsteile, die mittels eines Bindemittels (heute Zement) zusammengehalten werden. Mit dieser Definition muss man Mutter Natur die Anerkennung geben, dass der erste Beton von der Natur ohne menschlichen Einfluss hergestellt wurde.

---

<sup>2</sup>Entstehung der Zünfte

<sup>3</sup>ab beginnendem 19. Jahrhundert

Konglomerat und Breccie sind in der Natur vorkommende Sedimentgesteine, die aus älteren Gesteinsbrocken und einem Bindemittel entstanden sind. Es bedurfte nur der Naturbeobachtung, um einen ähnlichen Baustoff wie diese Felsformationen herzustellen. Es wurde also aus zwei Komponenten<sup>4</sup> ein neuer Baustoff gewonnen, der mit Wasser langsam in einer Form erhärtete und somit zu einem felsähnlichem Gebilde wie Konglomerat oder Breccie wurde. Vorteilhaft war dabei die Freiheit der Formgebung, was auch heute noch sehr gerne genutzt wird.

Im Altertum gab es mehr oder weniger erfolgreiche Versuche der Herstellung von Betonbauten, die jedoch keinen nachhaltigen Fortschritt zeigten und somit fast in Vergessenheit gerieten. So waren in Ländern wie Indien, im Zweistromland<sup>5</sup> sowie in China einige Bauwerke mit betonähnlichen Baustoffen ohne große Nachahmung erprobt worden. Die Erfolge waren nicht berauschend, so wurden diese Systeme bei nachkommenden Kulturen wie Ägyptern und Griechen nicht mehr übernommen. Erst wieder die Römer [20] versuchten es mit Beton, wobei sie als Bindemittel bereits eine zementähnliche Substanz verwendeten.

Erst mit der Herstellung von Zement<sup>6</sup> bekam der Beton eine reproduzierbare Festigkeit, die in den folgenden Jahren und Jahrzehnten immer mehr verfeinert wurde. Besonders die klaren definierten Korngemische und die Zementarten mit deren Mahlfeinheit ermöglichen heute eine genaue Herstellung von Beton mit sehr gut vorhersehbaren Eigenschaften.

### 1.1.3 Seit wann gibt es Stahlbeton?

Es wurden seit jeher gebrechliche Gebilde wie Töpfe und Fässer mit Eisenringen umfasst. Da der Grundbaustoff keine bis wenig Zugfestigkeit aufwies, wie dies bei gebranntem Ton sowie auch bei Beton der Fall ist, musste dieser Mangel an Werkstoffeigenschaft in Form von Zuglaschen aus Metall (vorwiegend Eisen) beseitigt werden. Diese wurden meist nachträglich am Krug bzw. Fass angebracht. Auch bei den üblichen Bauwerken wurden Zugkräfte von Eisenstangen und Eisenlaschen übernommen, um so die beim Erdbeben entstehenden Lastzustände zu beherrschen.

1845 stellte Monier die ersten Blumentöpfe und Gartenbänke mit im Beton integrierten Eiseneinlagen her. Man bezeichnete dies als Beton mit Moniereisen oder auch Eisenbeton. Die Entwicklung ging rasch weiter und bald danach wurden auch die entsprechenden Berechnungsmethoden von Koenen<sup>7</sup> bekannt. In den nachfolgenden Jahrzehnten wurde der Stahlbeton immer mehr eingesetzt.

Den nächsten innovativen Schritt machte Freyssinet 1928, der einen Stahlstab im Beton vorspannte und somit den Spannbeton erfand. Dieses Verfahren wurde seither verfeinert und wird im Bauwesen speziell im Brückenbau und Tragwerksbau sowie bei Erd- und Felsankern sehr oft eingesetzt.

### 1.1.4 Seit wann gibt es Stahlfaserbeton?

Fasern zur Verbesserung der Eigenschaften von Beton und Mörtel wurden schon seit jeher eingesetzt. Meistens waren es Pflanzenfasern oder Tierhaare, die jedoch den Nachteil haben, dass

---

<sup>4</sup>Schotter und Bindemittel

<sup>5</sup>Babylon

<sup>6</sup>Portlandzement ab 1824

<sup>7</sup>empirisches Bemessungsverfahren 1867

sie sich zersetzen oder faulen können und daher nicht ausreichend lange beständig sind.

In den Jahren 1950 bis 1960 gab es erste Versuche mit kurzen Stahldrähten, die später allmählich geformt wurden und so ab 1970 als Stahlfasern auf den Markt kamen. Da es keine vergleichbare Bemessungsmethode wie für den Stahlbeton gab, wurde der Stahlfaserbeton nur für untergeordnete Anwendungen zugelassen. Eine Anwendung für Biegeträger oder Platten und Decken wurde in den diversen Richtlinien ausdrücklich abgelehnt.

Mit der nun vorliegenden Bemessung für Stahlfaserbeton steht einer Anwendung dieses Baustoffes für tragende Bauteile wie Stützen, Decken und Platten nichts mehr im Wege. Auch eine Kombination mit dem Stahl- und Spannbeton ist möglich. Es eröffnet sich somit eine reiche Palette an Anwendungsmöglichkeiten, die in der Praxis noch einzusetzen sind.

### 1.2 Umweltverträglichkeit

Beton ist ein natürlicher, umweltfreundlicher Baustoff, der aus natürlich vorkommenden Stoffen geschaffen wird. Er besteht aus Sanden und Kiesen mit einem definierten Mischungsverhältnis und einem Bindemittel aus gebranntem Ton und Kalk.

Das Erstarren und Erhärten des Bindemittels beruht auf der Bildung wasserhaltiger Verbindungen, die bei der Reaktion zwischen den Zementbestandteilen und dem Anmachwasser entstehen. Im Allgemeinen reagiert der Zement in einem verhältnismäßig wasserarmen, plastischen Gemisch mit Wasserzementwerten zwischen etwa 0,3 und 0,6.

Der Abbindevorgang ist ein sehr komplexer chemischer Vorgang in dessen Verlauf der pH-Wert der Porenlösung vergleichsweise hohe Werte annimmt. Dieser hohe pH-Wert in Beton (etwa 13–14) ist in erster Linie bedingt durch das Ca(OH)<sub>2</sub>, das während des Abbindeprozesses gebildet wird. An der frischen Betonoberfläche wird fließendes Grundwasser dadurch beeinflusst. Es wird daher in vielen Fällen verlangt, das Grundwasser wieder zu einem etwa neutralem pH-Wert zurückzuführen.

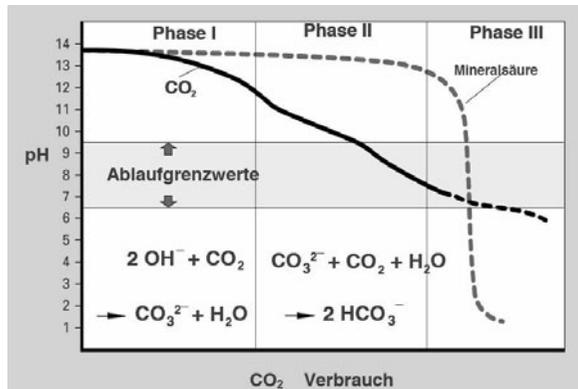


Abbildung 1.1: Neutralisierung von basischem Wasser infolge Betonabbindevorgang

Dies wird üblicherweise mit einer Neutralisierungsanlage durchgeführt, bei der in das basische

Wasser CO<sub>2</sub> eingeblasen wird, bis sich ein etwa neutraler Zustand einstellt.

Da Beton ein poröses Material ist, diffundiert gasförmiges CO<sub>2</sub> unter normalen Umweltbedingungen in sein Inneres, wo es mit vorhandenem Ca(OH)<sub>2</sub> reagiert und dabei CaCO<sub>3</sub> (und H<sub>2</sub>O) bildet. Dieser Carbonatisierungsprozess stellt keine akute Bedrohung für den abge bundenen Zement dar, senkt aber den pH-Wert im Beton.

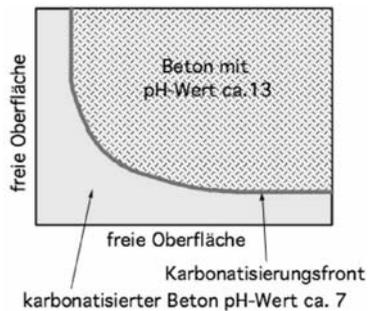


Abbildung 1.2: Carbonatisierung von Beton

Der nun an der Oberfläche entstandene carbonatisierte Beton hat einen pH-Wert von ca. 7 und ist somit vollkommen neutral gegenüber der Umwelt. Nachteilig dabei ist, dass in diesem Bereich der Schutz der Stahleinlagen nicht mehr gegeben ist. Es können die Stahleinlagen in diesem Bereich korrodieren. Daher ist es für den Korrosionsschutz wichtig, dass diese Carbonatisierungsfront nicht tiefer als die Überdeckung der Bewehrung reicht.

Im abge bundenen und somit erhärteten Zustand ist der Beton vollkommen umweltfreundlich und unterliegt keinen Veränderungen mehr. Lediglich die Belastung kann sich bei Überschreiten von gegebenen Grenzwerten nachteilig auswirken. Daher sind auch alle Bauteile zu bemessen, um eine Überbelastung zu vermeiden.

Nach dem Gebrauch des Betonteiles besteht die Möglichkeit, den Beton zu zerkleinern und dann wieder zu verwenden. Durch diese Recyclingmaßnahme ist ein mannigfaltiger neuer Einsatz möglich, und es gibt somit auch mit alten ausrangierten Betonteilen keine Umweltschädigung.

## 1.3 Korrosion der Stahlfasern

Generell schützt der Beton durch seinen basischen Zustand die Bewehrung vor Korrosion. Nur im Bereich der Carbonatisierung ist der pH-Wert unter 9, und es kann dabei eine Korrosion der eingebauten Stahlteile vorkommen. Es sind drei Bedingungen, die zusammentreffen müssen, damit Stahl im Beton korrodiert.

- der pH-Wert des Betons muss niedriger als 9 sein
- es muss Sauerstoff zur Verfügung stehen

- es muss Wasser vorhanden sein

Ist eine der drei Bedingungen nicht gegeben, kann Stahl nicht korrodieren. Dies ist die Grundlage der Korrosionsvermeidung. Somit ergeben sich folgende Methoden der Korrosionsvermeidung:

- Oberfläche verschließen, damit kein Wasser an den Stahl kommt (Lacke etc.)
- Beton unter Wasser setzen, damit kein Sauerstoff an den Stahl kommt (z.B. Grundwasser ist sauerstoffarm etc.)
- elektr. Polarisation festsetzen (Kathodischer Korrosionsschutz)

Falls diese Methoden nicht möglich sind, kann es zu Korrosion der Stahlteile im karbonatisierten Bereich kommen. Mit dieser Korrosion speziell bei Stahlfasern hat sich Schädde [16] ausführlich beschäftigt und kommt zu folgenden Erkenntnissen:

In ungerissenem Stahlfaserbeton konnten bisher maximal bis zu einer Tiefe von etwa 4 mm leicht korrodierte Fasern festgestellt werden. Der große Vorteil liegt darin, dass die Korrosion nur derart geringe Kräfte auslöst, dass keinerlei Abplatzungen an der Betonoberfläche hervorgerufen werden können. In der Praxis ist nicht mit schädigender Korrosion von Stahlfasern in ungerissenem Beton zu rechnen. Dies gilt selbst bei hohen Chloridgehalten im Beton bei entsprechender Exposition. Zur Vermeidung der Korrosion innerhalb eines Bauteiles ist zusätzlich zu der exakten Einhaltung der normgemäßen Herstellung sehr viel Wert auf eine gute Nachbehandlung des Frischbetons zu legen, damit eine Steigerung des Carbonatisierungswiderstandes und eine Reduzierung der Chloriddiffusion erreicht wird.

## 1.4 Normen und Richtlinien

### 1.4.1 Normen

#### **Deutschland:**

DIN 1045 Tragwerke aus Stahlbeton; Teile 1–4; DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton)

#### **Österreich:**

ÖNORM B 4700 Stahlbetontragwerke; EUROCODE-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung

ÖNORM B 4701 Betontragwerke; EUROCODE-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung

ÖNORM B 4708 Faserbeton; Bemessung und konstruktive Durchbildung

## **1.4.2 Richtlinien**

### **Deutschland:**

DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) Richtlinie Stahlfaserbeton, Berlin 2005

DBV (Deutscher Betonverein e.V.) Merkblatt Stahlfaserbeton, 2001

VDS (Verband deutscher Stahlfaserhersteller) – diverse Bauregeln

### **Österreich:**

ÖVBB (Österr. Vereinigung für Beton und Bautechnik) Richtlinie Faserbeton, Wien 2007

## 2 Zeichendefinition

Nachfolgende Definitionen sind möglichst an die internationalen Gebräuche angelehnt, jedoch werden zusätzliche Buchstaben und Zeichen hier eingesetzt, um die Berechnungen eindeutig zu machen.

### Kräfte und Momente sowie Faserrichtungen mit Großbuchstaben

$F_1, F_2, F_3, F_4 \dots$  Richtung der Fasern im Halbraum

$D \dots$  Druckkraft [N]

$Z \dots$  Zugkraft [N]

$M \dots$  Moment [Nmm]

$F_z \dots$  Einzel-Faserzugkraft [N]

### Spannungen mit griechischen Kleinbuchstaben

$\sigma_d \dots$  Druckspannung [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_z \dots$  Zugspannung [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_f \dots$  Faserzugspannung im Beton [N/mm<sup>2</sup>]

### Längen mit Kleinbuchstaben

$d \dots$  Durchmesser der einzelnen Stahlfaser [mm]

$l \dots$  Länge der einzelnen Stahlfaser [mm]

$h \dots$  Höhe des Querschnittes [mm]

$x \dots$  Höhe des Druckquerschnittes [mm]

$y \dots$  Höhe des Zugquerschnittes [mm]

$z \dots$  Hebelsarm zwischen Zug- und Druckkraft [mm]

$r \dots$  Risstiefe im Querschnitt [mm]

### Flächen in Großbuchstaben bzw. Kleinbuchstaben

$A_F \dots$  Querschnittsfläche einer Faser [mm<sup>2</sup>]

$O_H \dots$  Oberfläche der Halbkugel [mm<sup>2</sup>]

$O_\alpha \dots$  Oberfläche der Kugelkappe mit Winkel  $\alpha$  [mm<sup>2</sup>]

$a \dots$  Kappenfläche im Halbraum [mm<sup>2</sup>]

$b \dots$  mittlere Ringfläche im Halbraum [mm<sup>2</sup>]

$c \dots$  untere Ringfläche im Halbraum [mm<sup>2</sup>]

### Materialspannungen mit indizierten Kleinbuchstaben

$f_{cd} \dots$  Bemessungswert der Betondruckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{ck} \dots$  charakteristische Betondruckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{ck,cube} \dots$  Würfeldruckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

$f_{ctk} \dots$	charakteristische Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm} \dots$	mittlere Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{yd} \dots$	Bemessungswert der Stahlstreckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{yk} \dots$	charakteristische Stahlstreckgrenze (Zugfestigkeit) [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{fk} \dots$	spezifische Faserzugspannung [N/mm <sup>2</sup> ]

#### **Winkel mit griechischen Kleinbuchstaben**

$\alpha \dots$	Raumwinkel der aktiven Stahlfasern
$\alpha_1 \dots$	Raumwinkel der aktiven Stahlfasern nur im Zustand 1
$\alpha_2 \dots$	Raumwinkel der aktiven Stahlfasern im Zustand 2

#### **Faktoren mit indizierten Kleinbuchstaben**

$D_f \dots$	Dosierung der Fasern im Beton [kg/m <sup>3</sup> ]
$d_f \dots$	Faktor der Faserdichte [Fasern/mm <sup>3</sup> ]
$m_{f,o} \dots$	Faktor des Einflusses der Faseroberfläche
$m_{f,f} \dots$	Faktor des Einflusses der Faserform
$m_f \dots$	Faktor des Gesamteinflusses der Fasern

#### **Verhältnisse bzw. Sicherheiten mit griechischen Kleinbuchstaben**

$\gamma_c \dots$	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
$\gamma_s \dots$	Teilsicherheitsbeiwert für Stahl
$\eta_f \dots$	Ausnutzungsgrad der Stahlfaserspannung

# 3 Baustoff

Der Verbundbaustoff Stahlfaserbeton ist die jüngste Kombination zwischen Beton und Stahl im konstruktiven Ingenieurbau. Nachdem Stahlbeton und Spannbeton in der Praxis sehr stark angewendet werden, steht dem Stahlfaserbeton auch eine anwendungsreiche Zukunft bevor.

In diesem Kapitel werden nun die grundlegenden Eigenschaften der Einzelteile des Stahlfaserbetons erläutert. Es wird dabei besonders auf die notwendigen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bestandteilen Wert gelegt.

## 3.1 Beton

Der heute im Bauwesen eingesetzte Beton besteht aus Zement, Zuschlägen (Gesteinskörnungen) und Wasser sowie oftmals auch Betonzusätzen.

Unmittelbar bei der Herstellung besitzt der Beton nach dem Mischvorgang als Frischbeton eine plastische bis flüssige Eigenschaft, die sich erst nach der Erhärtungszeit in eine feste Substanz, dem Beton, verändert. Nach der Erhärtungszeit spricht man von Festbeton.

### 3.1.1 Betonarten

Entsprechend der Zusammensetzung, dem Erhärtungsgrad, den besonderen Eigenschaften etc. wird der Beton in unterschiedliche Betonarten eingeteilt:

- Rohdichte
  - Leichtbeton bis 2,0 [to/m<sup>3</sup>]
  - Normalbeton 2,0 bis 2,6 [to/m<sup>3</sup>]
  - Schwerbeton über 2,6 [to/m<sup>3</sup>]
- Erhärtungszustand: Frischbeton ; junger Beton ; Festbeton
- Konsistenz: steifer Beton ; plastischer Beton ; weicher Beton ; fließfähiger Beton ; selbstverdichtender Beton
- Eigenschaften: Hochfester Beton ; wasserundurchlässiger Beton ; Frostwiderstand ; Frost-Tausalz widerstand ; chemische Angriffe ; Verschleißwiderstand ; Strahlenschutzbeton ; Sichtbeton ; Massenbeton ; Drainagebeton
- Zusammensetzung: Sandbeton ; Kies-Sandbeton ; Splittbeton
- Ort der Herstellung: Baustellenbeton ; werkgemischter Beton ; transportgemischter Beton ; Ortbeton ; Fertigteilbeton ; Unterwasserbeton

- Gefüge: geschlossenes Gefüge ; haufwerkporiger Beton ; Einkornbeton ; Porenbeton ; Luftporenbeton
- Bewehrung: unbewehrter Beton ; bewehrter Beton ; Stahlbeton ; Spannbeton ; Stahlfaserbeton
- Förderung: Stampfbeton ; Rüttelbeton ; Pumpbeton ; Walzenbeton ; Spritzbeton ; Schleuderbeton ; Vakuumbeton

### 3.1.2 Betonklassen

In den Normen ist es üblich, den Beton nach seiner Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) in Klassen einzuteilen. Diese Festigkeitsklasse bildet auch eine Grundlage für die statische Bemessung eines Querschnittes. Bei der Kurzbezeichnung bedeutet der Buchstabe C die englische Bezeichnung concrete (Beton), die erste Zahl ist die Zylinderdruckfestigkeit bei einer Probenhöhe von 300 mm und einem Probendurchmesser von 150 mm; die zweite Zahl ist die Würfelfestigkeit bei einem Würfel mit der Kantenlänge von 150 mm.

<b>Festigkeitsklasse</b>	$f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
<b>C 20/25</b>	20	25
<b>C 25/30</b>	25	30
<b>C 30/37</b>	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

Tabelle 3.1: Betonfestigkeitsklassen

Die in obiger Tabelle fett gedruckten Klassen sind die in der Praxis üblichen Festigkeitsklassen für Stahlfaserbeton.

Die Festigkeitsklassen reichen noch höher hinauf, jedoch für die Anwendung beim Stahlfaserbeton und auch bei den in der Praxis üblichen Betonen werden diese nur sehr selten verwendet, sodass hier darauf verzichtet wurde. Ebenfalls sind die Festigkeitsklassen für Leichtbeton hier nicht angegeben, da damit derzeit noch kein Stahlfaserbeton hergestellt werden kann.