

Lehrstuhl für Massivbau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

(für „studium generale“: Stahlbeton – Bauart des Jahrhunderts)

Die Geschichte des Stahl- und Spannbetonbaus

Die Entwicklung des Bauingenieurwesens kann in [1] nachgelesen werden, die speziell für den Stahlbetonbau in [2] und [3]. Die wichtigsten Namen, Ereignisse und Daten zur Geschichte des Stahlbetonbaus (früher Eisenbetonbau) und Spannbetonbaus sind folgende:

- 1824 Der Bauunternehmer Josef **Aspdin** entwickelt in England den sogenannten Portlandzement.
- 1855 Erstes deutsches Portlandzementwerk bei Stettin.
- In der Mitte des vorigen Jahrhunderts ist die Möglichkeit zur Verstärkung von Werkstücken aus Beton durch Stahleinlagen allgemein bekannt.
- 1855 **Lambot** (Frankreich) nimmt ein Patent für die Herstellung von Booten aus Stahlbeton. Sein erstes Boot aus bewehrtem Mörtel, genannt „ferriciment“, baute **Lambot** bereits vor der Erteilung des Patents. Es ist noch heute im Heimatmuseum von Brignoles in Südfrankreich zu besichtigen.
- 1849 stellt der Gärtner **Monier** seine Blumenkübel aus Zementmörtel her, in die er später zur Verstärkung ein Gerippe aus Stahldrähten einbettet.
- 1867 bekommt **Monier** sein erstes Patent für Betonkübel mit Stahleinlagen. In den folgenden Jahren erwirbt er weitere Patente für Röhren, Platten, Brücken (1873) und widmet sich mit Ausdauer und Erfolg ihrer Anwendung. Seine Konstruktionen auf rein empirischer Grundlage ermittelt, zeigen, daß ihr Erfinder noch keine klare Vorstellung von der statischen Wirkung der Stahleinlagen im Beton hat. Eine 1875 von ihm errichtete Brücke kann heute noch besichtigt werden [4].
- 1877 Veröffentlichung von **Hyatt** (USA) über Versuche mit Eisenbetonkonstruktionen. **Hyatt** erkannte schon klar die Verbundwirkung: Bewehrung wurde nur auf der Zugseite eingelegt. Er baute in London ein Haus aus Stahlbeton und machte darin einen Brandversuch. Das Haus steht heute noch.
- 1878 Neue grundlegende Patente **Monier's**, die die Grundlage für die Einführung des Stahlbetons in anderen Ländern abgeben.

Im folgenden wird nun ein Abriß der Entwicklung des Stahl- und Spannbetonbaus in Deutschland gegeben:

- 1884 kauften die Firmen Freytag und Heidschuch in Neustadt a. d. H. und Martenstein und Josséaux in Offenbach a. M. von Monier das deutsche Patent für Süddeutschland und sichern sich das Vorkaufsrecht für das übrige Deutschland.
- 1886 treten die beiden Firmen das Vorkaufsrecht an den Ingenieur G. A. **Wayss** ab. Dieser gründet in Berlin eine Unternehmung für Beton- und Monierbauten. Er führt in größerem Maßstab Versuche an Monier-Konstruktionen durch, indem er durch Probelastungen zeigt, daß die Anordnung von Stahlstäben im Beton einen wirtschaftlichen Wert hat. Das Ergebnis der Versuche veröffentlicht er

- 1887 in einer Broschüre „Das System Monier, Eisengerippe mit Zementumhüllung“. Reg. Baumeister Matthias Koenen, der von der preußischen Regierung zu diesen Versuchen entsandt wird, gibt aufgrund der Versuche in der gleichen Broschüre ein empirisches Berechnungsverfahren für einige Monierkonstruktionen an. Dieses zeigt, daß er die statische Wirkungsweise der Stahleinlagen klar erkannte. Damit liegt eine technisch richtige Grundlage für die Berechnung der Stahleinlagen vor und die neue Bauweise findet mehr und mehr Anwendung. Die weitere wissenschaftliche Erforschung des Stahlbetons erfolgt hauptsächlich in Deutschland. Die erste große Anwendung erfolgte nach [5] 1888 am Berliner Reichstag.
- 1888 Döhring, Berlin, meldet ein Patent an, welches zur Risseminimierung gespannte Drahteinlagen in Platten, Latten und Bälkchen vorsieht.
- 1898 wird der „Deutsche Beton-Verein“ gegründet (durch **Hüser** und vor allem Eugen **Dyckerhoff**), eine Vereinigung der allmählich entstehenden Eisenbetonindustrie zur Förderung des Betonbaus.
- 1900 Um die Jahrhundertwende und darüber hinaus ist der Stahlbetonbau noch durch das Nebeneinander von verschiedenen Systemen gekennzeichnet. In den darauf folgenden Jahren setzt sich immer mehr der wissenschaftliche Grundsatz durch, den Baustoff im Ganzen gemäß seinen Eigenschaften und der Kräfteverteilung einzusetzen.
- Mörsch** baut die von **Koenen** begonnene Theorie weiter aus und untermauert sie durch zahlreiche Versuche, die anfangs im Auftrag der Fa. **Wayss** und **Freytag**, der er angehört, später auf der breiteren Basis des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton, an der Materialprüfanstalt der TH Stuttgart unter der Leitung von **Bach** und **Graf** durchgeführt werden. Die von **Mörsch** entwickelte Theorie bildet die Grundlage unserer heutigen Stahlbetontheorie.
- Weitere sehr tatkräftige Entwicklungsarbeit leisten **Emperger**, **Salinger**, **Melan** und **Visentini** in Österreich.
- 1904 bringt der Deutsche Beton-Verein zusammen mit dem Verband Deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine die „Vorläufigen Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauten“ heraus und trägt damit erheblich zur Verwendung des Stahlbetons im Hochbau bei.
- 1906 **Labes** fordert für die Deutsche Reichsbahn eine 1,3- bis 2,5fache Sicherheit gegen auftretende Risse, da er glaubte, daß der Rostschutz sonst nicht mehr gewährleistet sei. Die Folge wären unwirtschaftlich dicke Stahlbetonabmessungen gewesen. Um diese Entwicklung zu vermeiden, machte **Koenen** im Jahre 1907 den Vorschlag, die Bewehrung vorzuspannen. In den folgenden Jahren wurden daraufhin in der Materialprüfungsanstalt Stuttgart Versuche an vorgespannten Balken durchgeführt, über die **Bach** 1910 berichtet hat. Damit hat man zwar nachgewiesen, daß die Reißgefahr durch die Vorspannung bewältigt werden kann. **Koenen** und **Mörsch** erkannten jedoch schon 1912, daß durch das Schwinden und Kriechen des Betons die damals geringe Vorspannung mit einer Stahlspannung von 60 N/mm² fast völlig verloren ging.
- 1907 entwickelt sich aus einem Ausschuß des Deutschen Beton-Vereins der „**Deutsche Ausschuß für Eisenbeton**“ (später **Deutscher Ausschuß für Stahlbeton**), der die weitere Erforschung der Stahlbetonbauweise mit Geldern des Staates, der Vereine und der Industrie durchführt. Seine Arbeiten und Versuchsergebnisse veröffentlicht er in besonderen Heften, von denen bisher mehr als 400 erschienen sind.

- 1916 gibt dieser Ausschuß die „Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton“ (später DIN 1045) heraus.
- Außer den bereits erwähnten Forschern und Institutionen haben in Deutschland die Baufirmen Beton- und Monierbau, Dyckerhof und Widmann, Wayss und Freytag sowie Züblin durch Forschung und Entwicklung neuer Konstruktionen wesentlich zum Ausbau der Stahl- und Spannbetonbauweise beigetragen. Diese Firmen haben Spitzenleistungen im Brückenbau, Hallenbau usw. hervorgebracht.
- Ende der dreißiger Jahren erfolgte die Umbenennung von Eisenbeton in Stahlbeton, weil alles schmiedbare Eisen die Bezeichnung „Stahl“ erhielt. Folgerichtig erfolgte 1943 die Umbenennung der seit 1905 bestehenden Fachzeitschrift „Beton und Eisen“ in „Beton- und Stahlbetonbau“.
- 1928 **Freyssinet** (Frankreich) wendet zuerst die Vorspannung nur zum Beseitigen der Dehnung von Zugbändern an. Er erfaßt aber rasch ihre viel größere Bedeutung. Freyssinet beschäftigt sich beharrlich mit dem Kriechen des Betons und dem daraus resultierenden Abbau der Spannkraft. Er erkennt, daß man die dauerhafte Wirkung der Vorspannung nur durch Verwendung von hochfestem Stahl und Beton sicherstellen kann und meldet mehrere Patente an. Freyssinet wendet die Vorspannung nicht nur für Bauwerke an, sondern auch für Maste, Pfähle und die Rahmen schwerer Maschinen.
- 1934 meldet **Dischinger**, Berlin, ein Patent an für nach Art eines Hängewerks geführte Spannglieder, die außerhalb des Betonquerschnitts, jedoch innerhalb der Bauhöhe des Tragwerkes liegen (Spannbeton ohne Verbund). Die Kriech- und Schwindverluste sollen durch Nachspannen ausgeglichen werden. Er hat damit als erster die Bedeutung schräg geführter Spannglieder für die Aufnahme der Querkraft erkannt.
- 1943–1953 wurden in Deutschland die ersten Richtlinien für Spannbeton ausgearbeitet. Die Methode, die Spannglieder innerhalb des Betonquerschnitts in Hüllrohren zu führen, um sie gegen die erhärtete Konstruktion anspannen zu können und den Verbund anschließend durch Injizieren herzustellen, setzt sich immer mehr durch und bildet die Grundlage für die Ausführung von weitgespannten Bauwerken.

Eine Übersicht über die Entwicklung der deutschen Normen zeigt Bild 1, das [6] entnommen und um die Vorschriften der ehemaligen DDR erweitert wurde.

Literatur zur Geschichte des Stahl- und Spannbetonbaus

- [1] Straub, Hans: *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*. 3. Aufl., Basel: Birkhäuser Verlag, 1975
- [2] Peters, Tom F.: *Time is Money. Die Entwicklung des modernen Bauwesens*. Stuttgart: Julius Hoffmann, 1981
- [3] N. N.: *Wegbereiter der Bautechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990
- [4] Stiglat, K.: *Die existiert noch: Die erste bekannte Eisenbetonbrücke – 120 Jahre alt* Beton- und Stahlbetonbau 91 (1996) Heft 1, Seite 21 – 22
- [5] Stiller, M.: *1888 – Erste Stahlbetondecke in Deutschland* Beton- und Stahlbetonbau 92 (1997) Heft 6, Seite 155
- [6] Litzner, H.-U.: *Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2 - Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227* in: Betonkalender 1990, Teil I, Seite 645 (1995, T. I, S. 519)

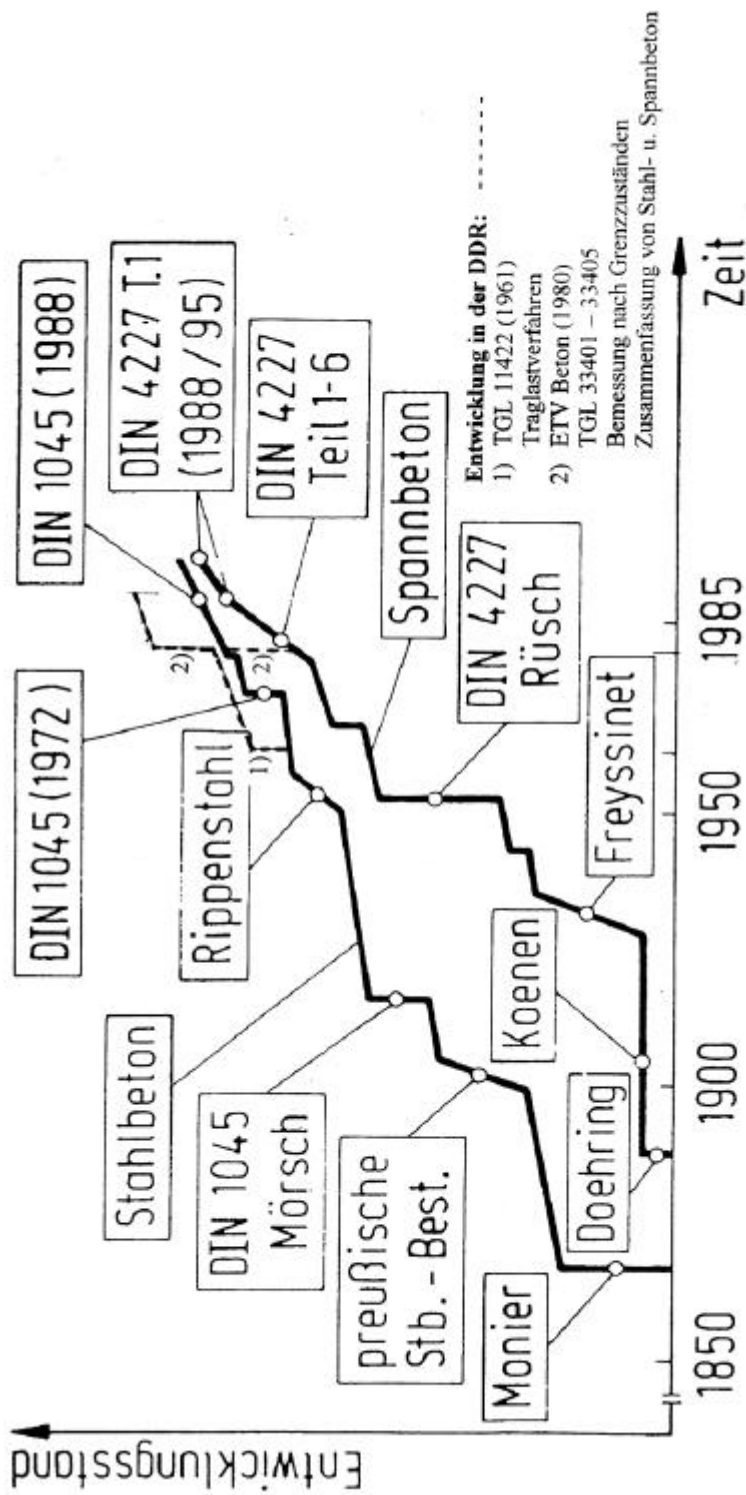


Bild 1. Entwicklungsstufen bei den deutschen Stahlbeton- und Spannbetonnormen

Bild 1: Entwicklung der deutschen Normen (entnommen aus [6])

Stahlbeton – Bauart des Jahrhunderts

1 Bestandteile des Betons

Beton ist ein künstliches Gestein, das aus den Zuschlagstoffen (Sand, Kies und/oder Splitt), Wasser und Zement besteht. Zum Erreichen besonderer Eigenschaften können noch Zusatzmittel zugegeben werden, die einer besonderen Zulassung bedürfen. Die Erfordernis und Wirkungsweise des Zements, der auch Bindemittel genannt wird, kann man sich an Hand von Bild 2 verdeutlichen.

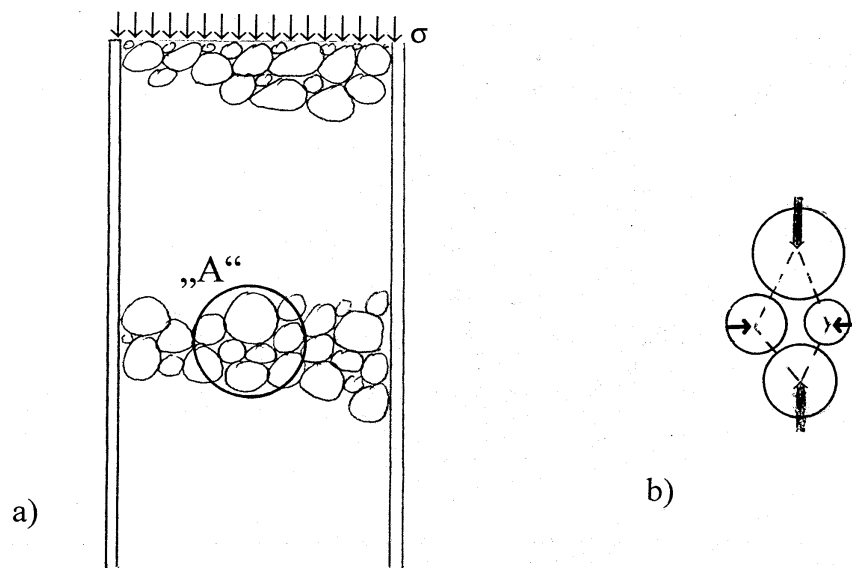


Bild 2: Druckübertragung durch ein Korngerüst. a) Gesamtstruktur, b) Detail „A“

2 Eigenschaften des Betons

Beton hat eine hohe Druckfestigkeit, aber wie auch jeder natürliche Stein nur eine geringe Zugfestigkeit. Er ist also in erster Linie zur Übertragung von Druckkräften einzusetzen. Wo Zugbeanspruchungen auftreten, wie z. B. bei Biegeträgern, muß ein zugfestes Material als Bewehrung eingelegt werden, was unter den derzeitigen wirtschaftlichen Bedingungen in erster Linie Stahl ist. Am Einsatz von Glas- und Kohlefasern wird gearbeitet, für Sonderfälle sind sie schon wirtschaftlich. Das Zusammenwirken von Beton und Stahl wird durch die annähernd gleiche Wärmeausdehnung begünstigt. Außerdem bietet der Beton den Korrosionsschutz für den Stahl, wenn die Betondeckung ausreichend groß ist.

3 Zusammenwirken zwischen Stahl und Beton

Das Zusammenwirken von Stahl und Beton erfordert, daß beide Baustoffe unter Belastung gleiche Verformungen erleiden. Dazu ist es nötig, daß zwischen beiden Baustoffen an den Berührungsflächen Kräfte übertragen werden können, die die erforderliche gleiche Verformung erzwingen. Bild 3 deutet diesen Zusammenhang an. Die Kraftübertragung über die Stahloberfläche wird erreicht durch den Haftverbund zwischen Stahl und Beton, durch den Reibungswiderstand nach dem Versagen des Haftverbundes und (bei den modernen Rippenstäbe in erster Linie) durch den Scherwiderstand der Betonkonsolen zwischen den Rippen der Bewehrungsstäbe.

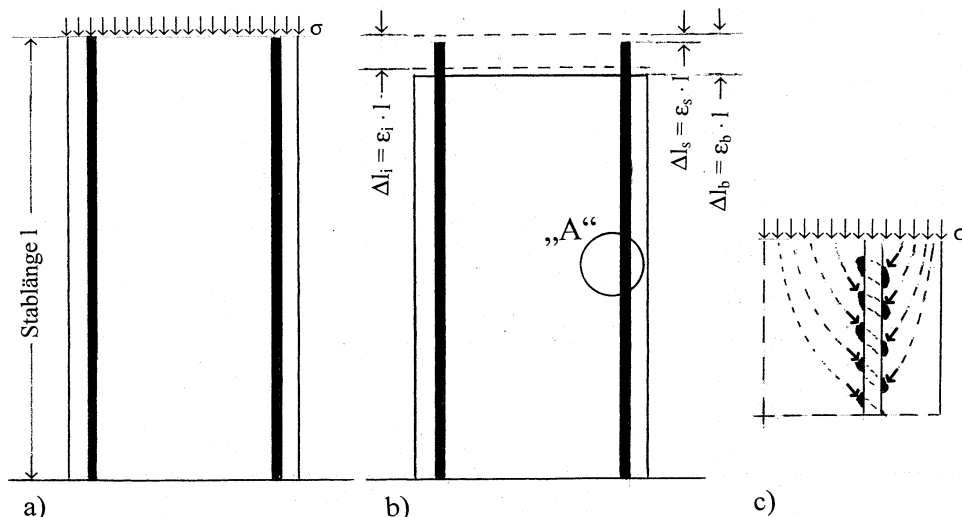


Bild 3: Erläuterung zur Verbundwirkung zwischen Stahl und Beton

- a) belasteter Stahlbetonstab
- b) Verformungen von Stahl und Beton mit und ohne Verbund
- c) Detail: Durch Haftung und Profilierung zusätzlich eingetragene Druckkräfte erzwingen im Stahl gleiche Verformung wie im umgebenden Beton

4 Vorspannung

Die Rißbildung im Beton kann auch durch noch so große Bewehrungsmengen nicht ausgeschaltet werden. Eine *Rißvermeidung* ist durch Bewehrung nicht möglich, nur eine *Rißbreitenbeschränkung*. Durch eine richtige Konstruktion kann erreicht werden, daß die Risse weder in ästhetischer Hinsicht noch für die Dauerhaftigkeit der Konstruktion schädlich sind.

Ein anderer Weg die Rißgefahr einzuschränken, ist die Vorspannung. Dabei wird in die Zonen, die bei der Belastung auf Zug beansprucht werden, eine Druckkraft eingetragene, die erst durch die Belastung aufgehoben werden muß, bevor der Beton auf Zug beansprucht werden kann. Dadurch wurden dem Stahlbeton weitere Einsatzbereiche erschlossen.

5 Verformungen – Wichte des Betons

Jede Beanspruchung führt zu Verformungen, wie aus der grundlegenden Gleichung hervorgeht:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon = \sigma / E.$$

Der Elastizitätsmodul E ist baustoffabhängig und entspricht der Federkonstanten einer Feder. Beim Beton wird der E -Modul entscheidend durch die Zuschlagstoffe beeinflusst. Die haben auch einen großen Einfluß auf die Wichte des Betons. Sie muß bei der Wichte g des Zements von etwa 16 kN/m^3 geringer bleiben als das schwerste Gestein (Gneis mit 30 kN/m^3) und schwerer als das leichteste Gestein (Bims mit $g = 8 \text{ kN/m}^3$ oder Blähton mit $g = 15 \text{ kN/m}^3$).

6 Innere Tragwirkung

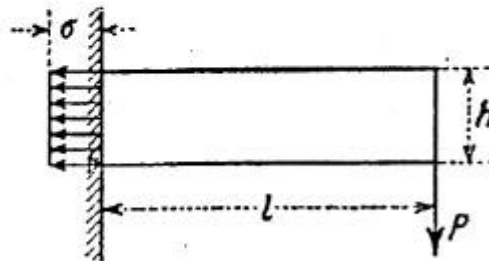
Der Erste, der sich theoretisch mit der Tragwirkung eines Biegebalkens auseinander setzte, war **Galileo Galilei**. Bild 4a zeigt das von ihm betrachtete Beispiel, Bild 4b den angenommenen inneren Spannungszustand, der die Verformungen nicht beachtet und daher zu einem völlig falschen Ergebnis führt. Unabhängig von diesem fehlerhaften Ansatz gebührt Galilei Hochachtung für diesen ersten Versuch, äußere und innere Schnittgrößen ins Gleichgewicht zu setzen. Die erste Anwendung eines solchen Gleichgewichts auf eine

praktische Aufgabe erfolgte aber erst reichlich 100 Jahre später bei der Sanierung der durch Risse geschädigten Kuppel der Peterskirche in Rom (1743, s. a. [1] Seite 146–155).



a)

Abb. 22. *Eingespannter, am freien Ende belasteter Balken.*
Aus: GALILEI, *Discorsi e dimostrazioni matematiche*, Leiden 1638.



b)

Abb. 21. *Biegung nach GALILEI.*

Bild 4: aus [1] Seite 96 u. 97

Der wirkliche Spannungsverlauf in einem ideal-elastischen Balken aus druck- und zugfestem Material im Bereich eines konstanten Moments ist im Bild 5 dargestellt.

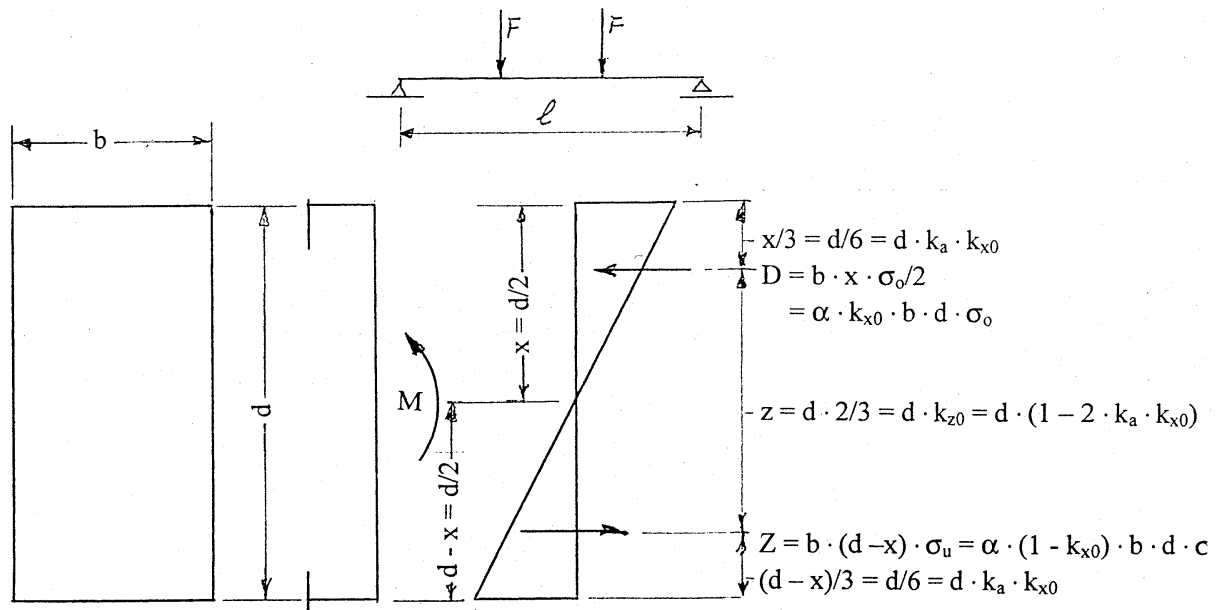


Bild 5: Innere Schnittgrößen bei linearer Spannungsverteilung über den Querschnitt

Für den Verbundbaustoff Stahlbeton wird sich aber nach der Rißbildung in der Betonzugzone ein Spannungszustand einstellen, wie er in Bild 6 dargestellt ist. Die Biegedruckkraft wird durch den Beton übertragen, die Biegezugkraft allein durch die zugfesteste Bewehrung, weil der Beton in der Zugzone durch die Rißbildung ausgefallen ist. Aus den Bedingungen, daß die inneren Schnittgrößen gleich den äußeren sein müssen, lassen sich an den Bildern 5 und 6 Bemessungsgleichungen ableiten.

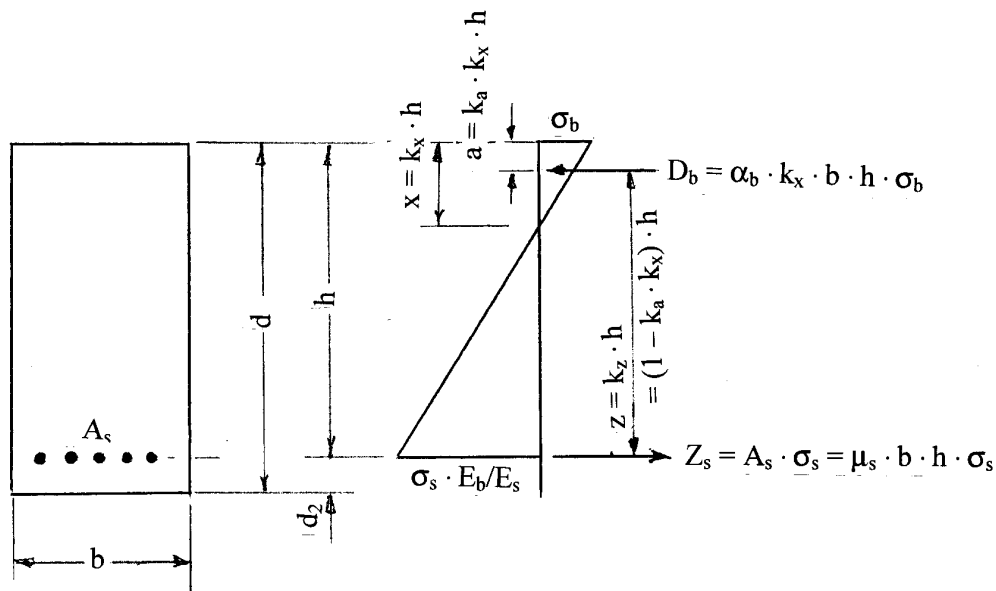


Bild 6: Innere Schnittgrößen bei versagender Zugzone

7 Formbarkeit

Ein Vorteil des Betons und Stahlbetons ist seine Formbarkeit. Er läßt sich an alle erforderlichen Formen anpassen, als Beispiele seien Brücken oder Schalenträgerwerke genannt. Das stellt aber hohe Anforderungen an den Schalungsbau, auf den dann ein erheblicher Anteil der Herstellungskosten entfällt. Um das zu vermeiden, gab es von Anfang an die Parallelentwicklung zum Bauen mit Fertigteilen, wodurch eine bei entsprechender Stückzahl wirtschaftlichere Herstellung, jedoch mit eingeschränkter Gestaltungsfähigkeit ermöglicht

wurde. Auch die Kombination ist denkbar, z. B. der Einsatz von Fertigteilen für die Decken bei Herstellung der Stützen und Wände aus Ortbeton (in der Schalung).

Eine wichtige Aufgabe in der Zukunft wird es sein, den Beton wiederverwendbar zu machen, nicht nur in dem Sinne, daß Betonabbruch als Zuschlagstoff oder Straßenschotter eingesetzt wird, sondern zunehmend so, daß Bauteile (Fertigteile) wiedergewonnen und wieder eingesetzt werden können. Hier steht die Entwicklung aber erst am Anfang.

8 Wirtschaftlichkeit

Die Übertragung einer Druckkraft durch Beton ist billiger als durch Stahl, bei einer Zugkraft ist es umgekehrt. Um ein plötzliches Versagen auszuschalten, muß aber auch in Betondruckgliedern immer ein Mindestmaß an Bewehrung enthalten sein, sonst handelt es sich um Betonkonstruktionen, für die höhere Sicherheitsbeiwerte erforderlich sind.

Ein weiterer Vorteil des Stahlbetons ist, daß er feuerbeständig und nicht brennbar ist. Das erschließt ihm neben seiner hohen Anpassungsfähigkeit an die vielfältigsten Formen viele weitere Anwendungsgebiete.

9 Beispiele in Bildern

Mit Folien und Dias werden Beispiele des Hoch- und Brückenbaus und Versuche vorgestellt.