

## 2 Berechnungen im Stahlbetonbau

### 2.1 Entwicklung des Beton- und Stahlbetonbaus

Die Ursprünge des Betonbaus können bereits bei den Römern angesiedelt werden, die mit dem Baustoff Beton, damals Opus Caementitium genannt, Bauwerke errichteten, die auch heute noch beeindruckend sind. Mit dem fast völlig erhaltenen Pantheon in Rom und der riesigen Spannweite der Kuppel von 43 m erreichten die damaligen Baumeister wahrhaft Weltniveau. Wenngleich einfache Überlegungen zum Abtrag der Kräfte existierten, so wurde doch meist den traditionellen Regeln entsprechend gebaut. Insofern fand der eigentlich nicht ganz optimale Halbkreisbogen, bei Brücken meist mit seitlich aufgesetztem Mauerwerk und Erd- oder Steinhinterfüllung, breite Anwendung. Mit dem Schwinden der Macht des römischen Imperiums ging auch das Wissen um den Baustoff Beton zum großen Teil verloren und wurde erst ab 1700 langsam wiederentdeckt und benutzt.

Der Franzose JOSEPH MONIER (1823 - 1906) gilt sicherlich als einer der Begründer der Bauweise Stahlbeton, früher noch als Eisenbeton bezeichnet. War die Anwendung zu Beginn auf drahtbewehrte Blumenkübel beschränkt, so wurde 1875 die erste Stahlbetonbrücke bei Chazelet in Frankreich errichtet.

In Deutschland wurden erste Überlegungen zur Berechnung von Stahlbetonquerschnitten von M. KOENEN (1849 - 1924) durchgeführt und mit Versuchen bestätigt. Weitere wichtige Erkenntnisse lieferten die Arbeiten und ausgeführten Brückentragwerke von FRANCOIS HENNEBIQUE. Die von EMIL MÖRSCH durchgeführten Überlegungen zur Elastizitätstheorie, die Beschreibung des Tragverhaltens mittels einfacher Fachwerke und der daraus folgenden Bewehrungsanordnung haben nichts von ihrer Aktualität verloren. Wichtige Akzente, vor allem im Brückenbau, setzte ROBERT MAILLART mit seinen schlanken und aufgelösten Tragwerken.

Bereits frühzeitig erfolgten Versuche zum Vorspannen von Beton, wobei durch die anfänglich noch unbekanntem Schwind- und Kriechvorgänge die Vorspannung nach gewisser Zeit auf nahezu Null abgefallen war. Erst die Weiterentwicklung der Baustoffe, insbesondere die Entwicklung eines höher festen Spannstahls, verhalf der Spannbetonbauweise zum Durchbruch. Der Name FREYSSINET und sein 1928 erworbenes Patent zur Vorspannung von Beton markieren den Beginn dieser Epoche.

Anfänglich bedingt durch Materialknappheit erfolgte eine stete Weiterentwicklung der Baustoffe, sowohl beim Beton als auch beim Stahl in Richtung immer höherer Festigkeiten und verbesserter Duktilität. Aktuelle Entwicklungen decken inzwischen einen riesigen Anwendungsbereich ab. Faserzusätze, selbstverdichtender Beton, aufgeklebte

Lamellen aus Glas- und Carbonfasern oder hochfester und ultrahochfester Beton sind nur einige der gegenwärtigen Trends in der Baustoff-Forschung und -Entwicklung.

## **2.2 Entwicklung von Rechenverfahren im Stahlbetonbau**

Unabhängig von praktischen Anforderungen entwickelte LEONHARD EULER 1744 die mathematische Beschreibung der Verformung „elastischer Linien“, Balken mit konstanter Biegesteifigkeit und nicht limitierter Tragfähigkeit. Ein praxisbezogener Schritt für die Berechnung von beliebigen Tragwerken erfolgte mit dem Lehrsatz zum Prinzip von der Formänderungsenergie durch CASTIGLIANO (1879), so dass das Kraftgrößenverfahren kurze Zeit später entwickelt werden konnte. Das Drehwinkelverfahren oder das allgemeinere Weggrößenverfahren wurde erst 1926/27 unter anderem von OSTENFELD und MANN beschrieben.

In den 1950er Jahren erfolgte die Entwicklung des Übertragungs- oder auch Reduktionsverfahrens, welches besonders für stabförmige Bauteile wie Durchlaufträger, nicht jedoch für verzweigte Strukturen wie mehrstöckige Rahmen geeignet war. Durch die gute Schematisierung und durch vergleichsweise kleine resultierende Gleichungssysteme konnten jedoch bereits damals verfügbare Computer effektiv zur statischen Berechnung einfacher Balkensysteme eingesetzt werden.

Vor allem die immer leistungsfähigere EDV verhalf der Finiten-Elemente-Methode in den darauf folgenden Jahren zum Durchbruch. In unzähligen Veröffentlichungen ist eine nahezu unüberschaubare Anzahl an verschiedenen Elementen entstanden, wobei die Anwendung keineswegs nur auf statische Berechnungen beschränkt bleibt, sondern eher anders herum die Nutzung im Bauwesen nur eine kleine Nische einnimmt.

Zur Ermittlung der Schnittgrößen von Stahlbetontragwerken standen damit bereits zu Beginn dieser Bauweise linear-elastische Verfahren zur Verfügung, die auch per Handrechnung durchführbar waren. Die anschließende Bemessung eines Stahlbetonquerschnitts wurde frühzeitig unter der korrekten Annahme durchgeführt, dass die Zugkräfte alleine von der Bewehrung aufgenommen werden müssen. Zur Vereinfachung wurde die Spannungs-Dehnungs-Linie für den Beton anfangs noch linear angenommen. Die Querschnittsformen waren zumeist auf einfache Rechteck- oder Kreisquerschnitte beschränkt. Erst unter Verwendung der EDV und programmgerecht formulierter Algorithmen gelang in den 1960er Jahren die Berechnung mit nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Linien für beliebige Querschnitte. Durch eine ständige Weiterentwicklung kann die benutzte Spannungsintegration inzwischen als abgeschlossen gelten. Probleme bereiten aber nach wie vor eine einfache und dennoch zutreffende Formulierung der

versteifenden Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone, die genauere Berücksichtigung des Kriechens oder Be- und Entlastungsvorgänge mit bleibenden Dehnungen.

Der Berechnung der Verformungen von Stahlbetontragwerken unter Berücksichtigung der Risse im Beton kam anfangs relativ wenig Bedeutung zu. Auf Grund der geringen zulässigen Spannungen und der zugehörigen kleinen Dehnungen waren vorhandene Verformungen relativ klein und der Nachweis der Durchbiegung nicht erforderlich, solange der Nachweis für die maximale Belastung erbracht war.

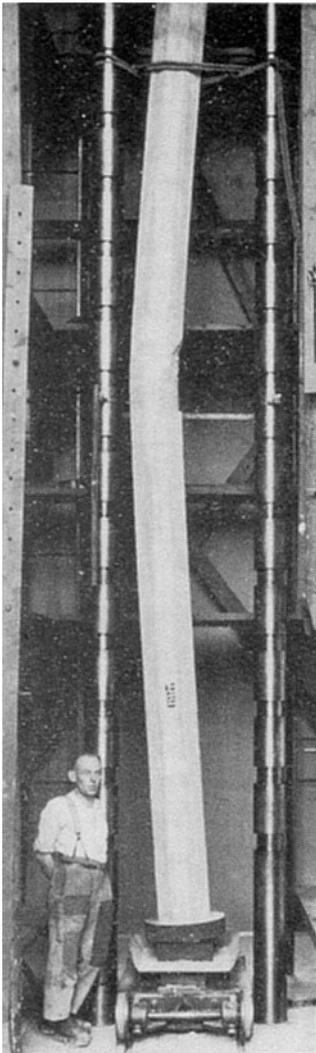


Bild 2.1 Experiment zur Ermittlung der Stütztragfähigkeit (1940)

Erst mit der Verwendung schlanker Druckglieder bestand die Notwendigkeit, das Verformungsverhalten genauer vorherzusagen. Zwar wurde bereits 1887 festgestellt, dass die Eulersche Knicklast nur dann gültig ist, wenn eine gewisse Betonspannung nicht überschritten wird, jedoch erst mehrere Jahrzehnte später wurden von BAUMANN (1934) und HABEL (1939) wichtige Arbeiten zur Bestimmung von Stütztraglasten durchgeführt. Die Berechnung der Verformungen erfolgte dabei durch die Integration der Querschnittsverkrümmungen und konnte durch die fehlende Computer-Unterstützung nur sehr vereinfacht vorgenommen werden.

Seit der Nutzung der ersten leistungsfähigen EDV-Anlagen setzte eine stete Entwicklung zu immer besseren Rechenalgorithmen für Balkentragwerke ein. Die Integration der Verkrümmungen zur Ermittlung der Verformung konnte mit einer höheren Anzahl an Stützstellen immer genauer durchgeführt werden.

Parallel zur Entwicklung der Rechnung mit Balkenelementen wurden 2D- später 3D-Finite-Elemente entworfen. Bereits 1967 wurde von NGO und SCORDELIS ein Stahlbetonbalken als Scheibentragwerk idealisiert. Zwar wurde noch ein insgesamt linear-elastisches Materialverhalten für den Beton zu Grunde gelegt, das Aufreißen des Betons in der Zugzone konnte jedoch durch eine Trennung der Elemente bei Überschreiten einer zulässigen Spannung modelliert werden.

### 2.3 Nichtlineare Berechnungen mittels der Finiten Elemente Methode

Mit dem Aufkommen immer leistungsfähigerer Rechner wurden verstärkt Finite Elemente für den Beton bzw. für den Verbundwerkstoff Stahlbeton entwickelt. Der Einsatz ist auch heute noch vorzugsweise auf den Forschungsbereich beschränkt und dient vor allem der Ermittlung von genaueren 2D- oder 3D-Spannungsverteilungen. Weiterentwicklungen berücksichtigen Be- und Entlastungsvorgänge mit bleibenden Verformungen oder zeitabhängige Einflüsse wie Schwinden, Kriechen, Korrosion der Bewehrung oder die Veränderung der Betonfestigkeit unter verschiedenen Umwelteinflüssen.

Trotz der immer besseren Formulierung des Materialverhaltens für ein einzelnes Finites Element bleibt festzustellen, dass auch heute eine wirklich zuverlässige und schnelle nichtlineare Berechnung von üblichen Stahlbetonbauteilen mit Scheiben- oder Volumenelementen nicht verfügbar ist. Gründe dafür liegen vorzugsweise in der Berücksichtigung einer Vielzahl von eher nebensächlichen Einflüssen, die das Ergebnis der Nachrechnung eines Experiments nicht verbessern, jedoch den Iterationsprozess erheblich stören. Eine Aufteilung der Belastung in mehrere Hundert Lastschritte und Rechenzeiten von einigen Stunden bis hin zu Tagen sind ohne weiteres üblich. Zur Stabilisierung des Iterationsprozesses werden neben den genannten kleinen Lastschritten oder einer Dämpfung der Schrittweite vielfältige Rechenbehelfe eingesetzt. Eine Berechnung mit zusätzlicher Massenmatrix (dynamische Berechnung) verbessert die Konvergenz, fordert aber auch längere Rechenzeiten. Weitere Strategien sind eine bei Bedarf eingeschaltete neue Vernetzung des Stahlbetonkörpers oder eine gewisse Mittelung der Ergebnisse über benachbarte Elemente.

Problematisch können sich einzelne Finite Elemente auswirken, die während einer Iteration die Versagenskriterien überschreiten, was bei einem Biegebalken auf der Zugseite relativ häufig der Fall sein wird. Die Steifigkeit fällt auf Null ab oder verringert sich sehr stark, so dass die resultierende Steifigkeitsmatrix schlecht konditioniert ist und evtl. Schwierigkeiten bei der Lösung auftreten. Im nächsten Iterationsschritt fallen die

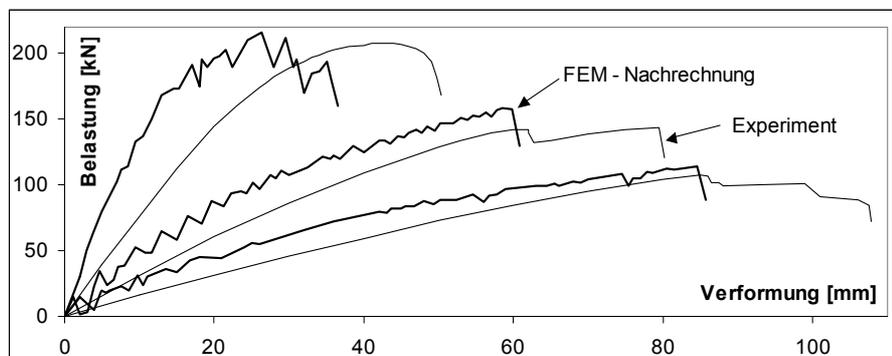


Bild 2.2 Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse für den 3-Punkt-Biegeversuch aus Kapitel 5.3 (glasfaserbewehrter Balken)

Kräfte in den angrenzenden Elementen stark ab, wobei sich insgesamt eine Spannungsumlagerung bei gleichzeitig plötzlicher Zunahme der Verformungen ergibt. Erkennbar sind derartige Probleme meist an Zacken in der Last-Verformungskurve, die beim realen Experiment jedoch eher selten vorhanden sind (Bild 2.2).

Einen sehr guten Überblick über die aktuellen Forschungsergebnisse und Trends bei der Modellierung von Stahlbetontragwerken mittels der Finiten Element Methode wird in „Computational Modelling of Concrete Structures“ [1] gegeben. Bemerkenswert ist der dort aufgeführte Artikel von GHAVAMIAN und CAROL [2] zu durchgeführten vergleichenden Studien mit insgesamt 13 verschiedenen Finite-Element-Programmen bzw. deren implementierten Betonmodellen. Insgesamt vier Versuche wurden nachgerechnet. Neben drei Experimenten am reinen Betonkörper (Zug, Zug/Querkraft, Querkraft) stand ebenfalls ein 3-Punkt-Biegeversuch eines 5 m langen Balkens auf dem Programm. In Bild 2.3 sind die Ergebnisse der Nachrechnung dargestellt, einmal mit und einmal ohne modellierte Verbügelung.

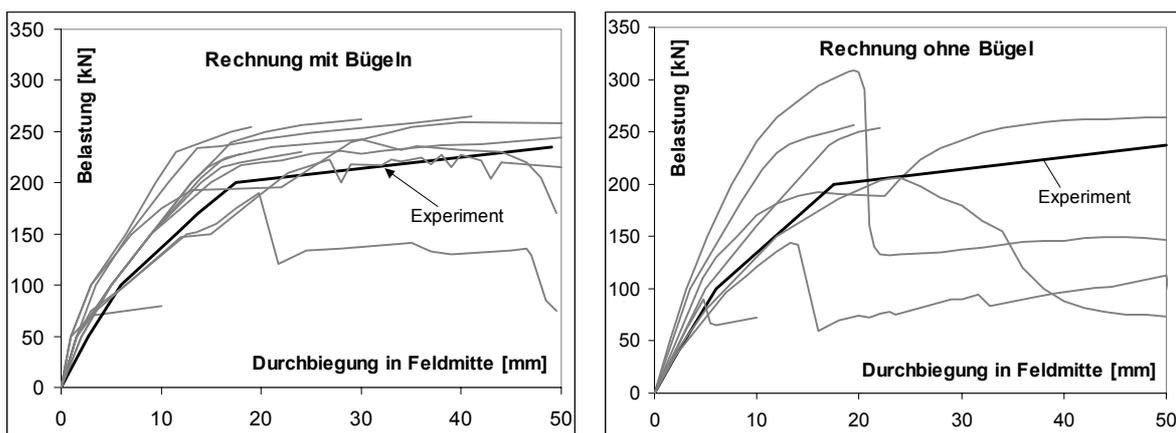


Bild 2.3 Last-Verformungs-Kurven für einen 3-Punkt-Biegeversuch, Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit Nachrechnungen verschiedener FE-Programme

Vor allem die Nachrechnung ohne Bügel zeigt extreme Ergebnisse, wobei das Einsetzen des Fließens der Bewehrung oder die maximale Versuchslast kaum von einem Programm vorhergesagt werden kann. Übliche Platten im Hochbau ohne Bügelbewehrung könnten also mit den in der Vergleichsstudie benutzten Programmen nicht ohne weiteres berechnet werden. Trotzdem wird die Übereinstimmung der Nachrechnung mit den Versuchsergebnissen von den Autoren des Artikels als noch akzeptabel bewertet. Etwas besser schaut die Nachrechnung mit modellierter Bügelbewehrung aus, wobei das Biegemoment beim Einsetzen des Fließens der Bewehrung meist zu hoch berechnet wird. Eine Überschätzung der Mitwirkung der gerissenen Betonzugzone könnte die Ursache dafür sein. Andererseits könnten zu niedrige Werte für die Betonzugfestigkeit nahezu unlösbare Probleme im Iterationsprozess ergeben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass vor allem bei der Berechnung von relativ schlanken Balkentragwerken unter Nutzung von 2D- oder 3D-Finiten-Elementen ein sehr schlechtes Kosten/Nutzen-Verhältnis erreicht wird. Die Tragfähigkeit und auch die Verformung des Tragwerks werden maßgebend vom Spannungszustand entlang des Balkens beeinflusst, also Spannungen senkrecht zur Querschnittsebene, die in Biegemoment und Normalkraft resultieren. Alle weiteren Spannungskomponenten haben nur sehr geringe Auswirkungen auf die Last-Verformungs-Kurve und könnten daher vernachlässigt werden. Aus diesen Gründen bleibt die Finite-Elemente-Methode wohl vorerst auf die wissenschaftliche Anwendung beschränkt und wird nur bei komplizierten Geometrien bei Teilen von Stahlbetontragwerken zum praktischen Einsatz kommen.

## **2.4 Nichtlineare Berechnungen mit Balkenelementen**

Anders als bei der aufwändigen Formulierung mittels 2D- oder 3D-Elementen wird bei der Rechnung mit Balkenelementen von vornherein die Vereinfachung auf einen 1D-Spannungszustand in Richtung der Balkenachse in Kauf genommen. Zwar können dadurch Effekte wie Querkraft-Gleitung, Lasteinleitungsbereiche oder Querschnittssprünge nur näherungsweise und nur durch zusätzliche Überlegungen erfasst werden, die Rechnung vereinfacht sich jedoch erheblich durch Vernachlässigung der anderen Spannungskomponenten. Insofern wurden die ersten realitätsnahen Verformungsberechnungen von Stahlbetontragwerken mit Balkenelementen durchgeführt.

Eine sehr leistungsfähige Methode zur nichtlinearen Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen ist das in den 50er Jahren entwickelte Übertragungsverfahren. Mit einer zuvor berechneten Momenten-Verkrümmungs-Beziehung ist es möglich, die jeweils richtigen Verkrümmungen und tangentialen Biegesteifigkeiten bei der Stabberechnung zu benutzen. Damit lässt sich nicht nur der Übergang ungerissen / gerissen gut abbilden, auch die Berechnung mit Fließen der Bewehrung ist ohne Einfügen plastischer Gelenke sowie ohne Lastinkremente in nur einem Lastschritt möglich.

Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass nur Durchlaufträger oder Stützen mit vertretbarem Aufwand berechnet werden können. Sollen allgemeine ebene Rahmenstrukturen mit dem Übertragungsverfahren berechnet werden, müsste die Zerlegung des Tragwerks in einen Hauptstrang sowie in Verzweigungspunkte mit Nebensträngen erfolgen. Ist die Programmierung für ein einzeln durchlaufendes Balkensystem noch leicht durchführbar, so lassen sich verzweigte Strukturen nur schwer in allgemeiner Weise erfassen.

Die Finite-Elemente-Methode unter Verwendung von Balkenelementen oder das Weggrößenverfahren sind hingegen sehr gut geeignet, größere, beliebig zusammenhängende Strukturen zu berechnen. Beide Verfahren leiten sich aus unterschiedlichen Ansätzen her, wobei das letztendlich entstehende, lineare Gleichungssystem identisch ist. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass durch die benutzten Ansatzfunktionen nur stetige Verläufe der Zustandsgrößen abgebildet werden können, durch das nichtlineare Verhalten des Stahlbetons jedoch unstetige Verläufe auftreten. Sollen diese Unstetigkeiten genauer erfasst werden, ist eine feinere Elementierung nötig, die das entstehende Gleichungssystem allerdings vergrößert.

Zur Untersuchung der Schnittgrößenumlagerungen in Stahlbetonrahmen nutzt VATER (1999) [3] eine derartige Vorgehensweise. Vor der eigentlichen Rahmenberechnung werden M-k-Linien ermittelt, die durch einen nur wenige Abschnitte umfassenden Polygonzug angenähert werden. Entsprechend der aktuellen Biegemomentenverteilung und der daraus resultierenden tangentialen Biegesteifigkeiten wird die Elementierung des Tragwerks nach jedem Iterationsschritt neu festgelegt, so dass jedes Balkenelement mit einer konstanten Biegesteifigkeit und Vorverkrümmung berechnet werden kann.

Von OŽBOLT und MAYER wird 1997 das Programm NELIN vorgestellt [4], welches vor allem für die nichtlineare Berechnung von Rahmentragwerken aus Stahlbeton unter Kriech- und Schwindeinflüssen konzipiert wurde. Die Grundlage des Programms bildet die Methode der Finiten Elemente unter Nutzung der klassischen Balkentheorie. Die Integration der Spannungen über den Querschnitt erfolgt mittels Lamellen, um gezielt Schwinden und Kriechen in Abhängigkeit von der Zeit und von der Lastgeschichte zu berücksichtigen. Die Güte der Ergebnisse hängt jedoch von der Diskretisierung des Tragwerks durch den Nutzer ab, da keine adaptive Anpassung bei Änderungen der Biegesteifigkeit durchgeführt wird. Das Programm NELIN wurde später für 3dimensionale Stabtragwerke erweitert (NELIN 3, [5]), wobei die lamellenweise Spannungsintegration auf Grund von Geschwindigkeitsnachteilen nicht mehr genutzt werden konnte. Stattdessen wird auf die Integration polygonal umrandeter Querschnitte zurückgegriffen, wie sie von BUSJAEGER und QUAST in [6] beschrieben wird.

In Heft 373 des DAfStb erläutert OLSEN [7] die bereits 1982 durchgeführten Untersuchungen bezüglich der Verwendung des Übertragungs- und des Weggrößenverfahrens bei Stabtragwerken aus Stahlbeton, wobei sich die Kombination bei Nutzung von Tangentensteifigkeiten als sehr vorteilhaft für die Rechengeschwindigkeit und Stabilität herausstellt. Die Modellierung eines Rahmentragwerks erfolgt derart, dass nur an jedem Verzweigungspunkt der Balkenstruktur sowie bei jeder Änderung des Querschnitts ein Knoten definiert wird. Bei der Berechnung des Tragwerks wird zunächst jeder Stab im

Volleinspannungszustand mit dem Übertragungsverfahren nichtlinear berechnet, so dass unter Nutzung der Eins-Zustände die lokale Steifigkeitsmatrix ermittelt werden kann. Nach Lösung der globalen Steifigkeitsmatrix ergeben sich die Knotenverformungen. Diese wiederum sind Ausgangspunkt für die nächste Iteration, bis die Veränderungen im Vergleich zum letzten Iterationsschritt unterhalb einer Abbruchschranke liegen. Die Ermittlung von Moment-Verkrümmungs-Linien bzw. davon abgeleiteter Steifigkeiten erfolgte sehr vereinfacht und war nicht Gegenstand der Untersuchung.

SCHMITT [8] zeigte 1994 die praktische Anwendbarkeit dieses Verfahrens zur nichtlinearen Berechnung von ebenen Rahmentragwerken. In einem ersten Schritt wird die Normalkraftverteilung im Rahmensystem mittels einer einfachen linear-elastischen Rechnung bestimmt, die für die weitere Rechnung als konstant angenommen wird. Damit kann anschließend für jeden Stab entsprechend der vorhandenen Normalkraft eine Moment-Verkrümmungs-Linie ermittelt werden. Die weitere Rechnung erfolgt entsprechend des Verfahrens nach OLSEN inklusive der Berücksichtigung von Theorie 2. Ordnung. Mit dem von Schmitt erstellten Programm PBMS (Programmgesteuertes Berechnen im Massivbau von Stabtragwerken) wurden Untersuchungen vor allem für den Gebrauchszustand von Stahlbetontragwerken durchgeführt.

## 2.5 Eigenes Rechenverfahren

Das entwickelte Rechenverfahren basiert auf einer Kombination aus Übertragungsverfahren, der Finiten-Elemente-Methode bzw. dem Weggrößenverfahren sowie jeweils aktuellen Berechnungen der Querschnittsdehnungen und stellt damit eine Weiterentwicklung des auch von OLSEN und SCHMITT benutzten Verfahrens dar. Die Vorteile beim Übertragungsverfahren sind eine an die aktuellen Steifigkeitsverhältnisse angepasste Stabteilung sowie eine gute Stabilität im Iterationsprozess. Durch das Weggrößenverfahren können weiterhin einzelne Balkenzüge zu größeren Strukturen zusammengesetzt werden.

Unterschiede zu bestehenden Rechenverfahren ergeben sich vor allem durch die Berücksichtigung der Achsendehnung bei Biegebeanspruchung sowie durch die Rechnung nach Theorie 3. Ordnung, um auch große Verformungen erfassen zu können. Das Verhalten eines Stahlbetonquerschnitts bei Wirkung einer Normalkraft und eines Biegemoments kann damit gut beschrieben werden. Zur Verbesserung der Ergebnisse bei Querkraftbeanspruchung von gedrunenen Balken wurde ein einfacher Zusammenhang implementiert, der eine Abminderung der Schubsteifigkeit in Abhängigkeit von der vorhandenen Biegesteifigkeit vorsieht.

Ein weiterer, sehr wichtiger Punkt des eigenen Verfahrens ist der Verzicht auf vorweg berechnete, normalkraftabhängige M-k-Linien. Stattdessen werden die tangentialen Steifigkeiten mittels einer Querschnittsberechnung entsprechend den jeweils aktuell wirkenden Schnittgrößen für einen Stababschnitt ermittelt. Dadurch kann sich die wirkende Normalkraft während einer Rechnung ändern, was zum Beispiel beim Schwinden in dehnbehinderten Systemen der Fall ist. Auch die Berücksichtigung anderer, zeitabhängiger Effekte, wie das Kriechen oder die Abnahme der Betonzugfestigkeit bei Dauerbelastung, ist durch die Modifizierung der Querschnittseigenschaften sehr leicht möglich und erfordert keinen weiteren Rechenaufwand.

Eine Verwendung von zuvor berechneten M-k-Linien wäre zwar denkbar. Um jedoch für sich verändernde Normalkräfte die Biege- und Dehnsteifigkeiten zutreffend ermitteln zu können, müssten zu Beginn eine Vielzahl von Moment-Verkrümmungs-Linien für die unterschiedlichen Normalkräfte berechnet werden. In der anschließenden nichtlinearen Rechnung würde dann eine Interpolation zwischen diesen Linien stattfinden, wobei zur Erzielung einer befriedigenden Genauigkeit sehr viele M-k-Linien berechnet werden müssten. Eine derartige Vorgehensweise wurde anfänglich getestet, jedoch auf Grund eines schlechteren Konvergenzverhaltens sowie eines recht hohen Rechenaufwands wieder verworfen.

Außerdem wäre diese Methode zwar für ebene Rahmentragwerke noch anwendbar, für den 3D-Fall mit zweiachsiger Biegung ist sie jedoch nicht mehr geeignet. Einfacher und schneller in der Umsetzung ist in diesem Fall die benutzte Berechnung des Dehnungszustandes zu den aktuell wirkenden Schnittgrößen mit Ermittlung der zugehörigen tangentialen Steifigkeiten. Weiterhin lässt sich die Dehnungsberechnung sehr gut optimieren und bereits für den 2D-Fall mit einer hohen Geschwindigkeit durchführen, da sich die Werte von Normalkraft und Biegemoment von einem Stababschnitt zum nächsten Abschnitt nur leicht verändern.

Auf die Berechnung von Massivbauquerschnitten mit nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Linien wird in Kapitel 3 näher eingegangen. Einzelheiten zu den verwendeten Gleichungen beim Übertragungsverfahren und beim Weggrößenverfahren werden in Kapitel 4 dargestellt, ebenso wie Strategien zur iterativen Ermittlung der Lösung.

## **2.6 Programme INCA2 und Stab2D-NL**

Die Programme INCA2 sowie Stab2D-NL wurden im Rahmen der Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsbereich Massivbau der TUHH entwickelt. Neben den hier vorgestellten Rechenalgorithmen wurde auch eine grafische Benutzeroberfläche

entworfen, die eine einfache Eingabe von Systemen und vor allem die schnelle Kontrolle der Rechenergebnisse ermöglicht. Dadurch soll erreicht werden, dass die Nutzung der Programme für die nichtlineare Berechnung von Stahlbetontragwerken nicht nur auf eigene Untersuchungen beschränkt bleibt, sondern auch Eingang in Lehre und Forschung der TU Hamburg-Harburg sowie anderer Universitäten findet. Zu diesem Zweck wurde auf der Homepage des Arbeitsbereichs Massivbau eine Downloadmöglichkeit [9] für die Programme INCA2 und Stab2D-NL eingerichtet.

## 2.7 Literaturverweise

- [1] *Bićanić, N., de Borst, R., Mang, H. und Meschke, G.* (Ed.): Computational Modelling of Concrete Structures. Proc. of the EURO-C Conference 2003, St. Johann im Pongau, 17-20 March 2003. Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo: A. A., Balkema Publishers, 2003.
- [2] *Ghavamian, S. und Carol, I.*: Benchmarking of concrete cracking constitutive laws: MECA project. [1], S. 179-187.
- [3] *Vater, C.*: Rechnerisch-theoretische Untersuchungen zur Schnittgrößenumlagerung in verschieblichen und unverschieblichen Stahlbetonrahmen. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1999.
- [4] *Ožbolt, J., Mayer, U.*: Nichtlineare Berechnung von Stabtragwerken aus Stahl- und Spannbeton unter Berücksichtigung von Zeiteinflüssen. Bauingenieur, Heft 11/1997.
- [5] *Ožbolt, J., Mayer, U., Moschner, T., Lieb, H.*: Nichtlineare Berechnung von dreidimensionalen Stab- und Seiltragwerken - Theorie und Anwendung. Springer-VDI-Verlag, November 2003, Download unter [www.technikwissen.de/library/pdf/Nichtlineare\\_3D\\_Berechnung\\_Theorie\\_und\\_Anwendung\\_01.pdf](http://www.technikwissen.de/library/pdf/Nichtlineare_3D_Berechnung_Theorie_und_Anwendung_01.pdf).
- [6] *Busjaeger, D., Quast, U.*: Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft. DAfStb, Heft 415.
- [7] *Olsen, P. C.*: Das Übertragungs- und das Weggrößenverfahren für ebene Stahlbetontragwerke unter Verwendung von Tangentensteifigkeiten. Heft 373 des DAfStb, Ernst und Sohn, Berlin 1986.
- [8] *Schmitt, H.*: Die unmittelbare Berücksichtigung von Gebrauchsanforderungen bei der Biegebemessung bewehrter Betonbauteile. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1999.
- [9] *Pfeiffer, U.*: INCA2 und Stab2D-NL, Programme zur nichtlinearen Berechnung von Stahlbetontragwerken, Download unter [www.mb.tu-harburg.de](http://www.mb.tu-harburg.de).