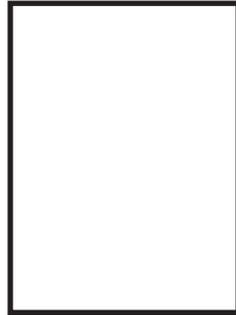
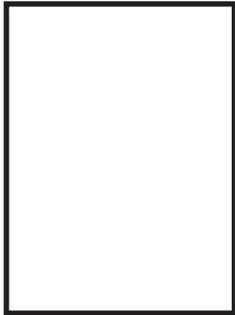


# ATENA – ein Werkzeug für wirklichkeitsnahe Berechnungen von Stahlbetonstrukturen



Dr.-Ing. Vladimír Červenka  
cervenka@cervenka.cz

Dr.-Ing. Radomír Pukl  
radomir.pukl@cervenka.cz

Červenka Consulting  
Předvoje 22  
162 00 Prag 6  
Tschechische Republik  
Tel.: +42-0220-610 - 018; Fax: +42-0220-612 - 227

Programm ATENA ist ein leistungsfähiges Werkzeug für die nichtlineare Simulation von Stahlbetonstrukturen. Es ermöglicht eine detaillierte Untersuchung des Strukturverhaltens unter Belastung und Bestimmung seiner Gebrauchstauglichkeit, Tragfähigkeit und Versagensmechanismen. Dabei ist in ATENA ein konsistentes Berechnungsverfahren gewährleistet. Die nichtlinearen Materialmodelle und numerischen Methoden, die in ATENA implementiert sind, werden beschrieben. Ausgewählte Anwendungsbeispiele werden präsentiert, die die Bezeichnung von ATENA als „virtuelles Testlabor“ dokumentieren.

## 1 Einleitung

Die nichtlineare Rechnerimulation ist eine moderne Methode zur Untersuchung des Verhaltens von Baustrukturen unter verschiedenen Einwirkungen. In der Praxis trifft man oft schwierige Probleme an, die nicht mit den üblichen technischen Hilfsmitteln wie Normen oder Handbücher zu lösen sind. Die Rechnerimulation ermöglicht eine realistische Bestimmung der Versagensmechanismen der Struktur und die Berechnung der Strukturtragfähigkeit in allen Gebrauchs- und Grenzzuständen [9].

**Die nichtlineare Rechnerimulation bietet eine Vielfalt wichtiger Informationen über Tragverhalten von Konstruktionen in allen Lastbereichen. Vor allem ermöglicht die Höchstlast und den Versagensart zu bestimmen und vorhersagen.**

Die Struktur kann dann bei der Bemessung so gestaltet werden, dass das Versagen und die dadurch entstandenen Schaden verhindert werden. In ggf. Schadensfällen kann man durch die Simulation mögliche Versagensursachen aufklären. Weitere Anwendungsbereiche der nichtlinearen Rechnerimulation sind Forschung und Entwicklung z. B. die Begleitung von Laborversuchen, die man

durch die Simulation besser planen und auswerten kann. Die nichtlineare Rechnerimulation wird oft auch als „virtuelles Testen“ von Strukturen bezeichnet.

## 2 Software ATENA

Für die wirklichkeitsnahe Rechnerimulation von Stahlbetontragwerke wurde das Programm ATENA [2, 4] entwickelt, das auf der nichtlinearen Methode der finiten Elemente basiert. Es wird bei der Analyse von Tragwerken, Plattenstrukturen, Brückenbauten, Tunneln, Talsperren, Verbundstrukturen, für die Beurteilung von Verstärkungen, Befestigungselementen, konstruktiven Details, Strukturen von Faserbeton oder Holz usw. angewendet (Bild 1 bis 3).

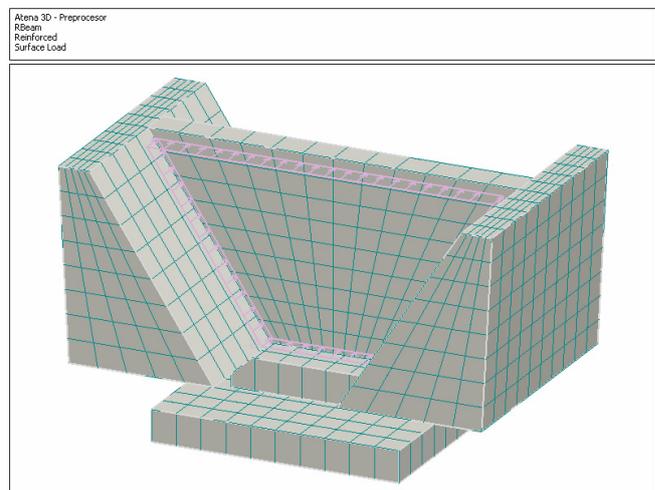


Bild 1 Modell einer Wildbachsperre

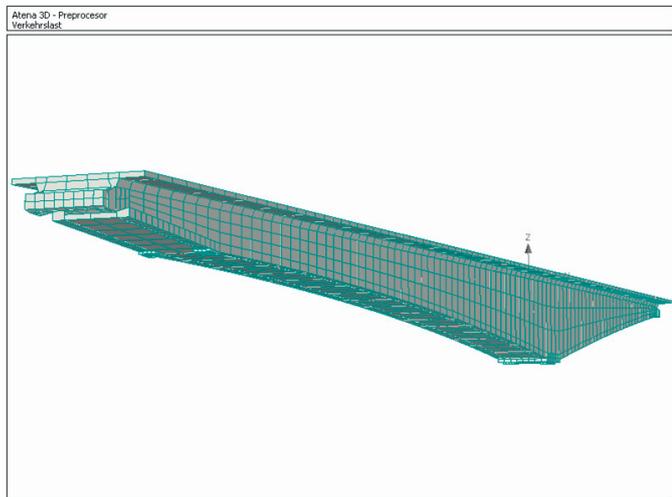


Bild 2 Vorgespanntes Tragfeld aus einer Autobahnbrücke

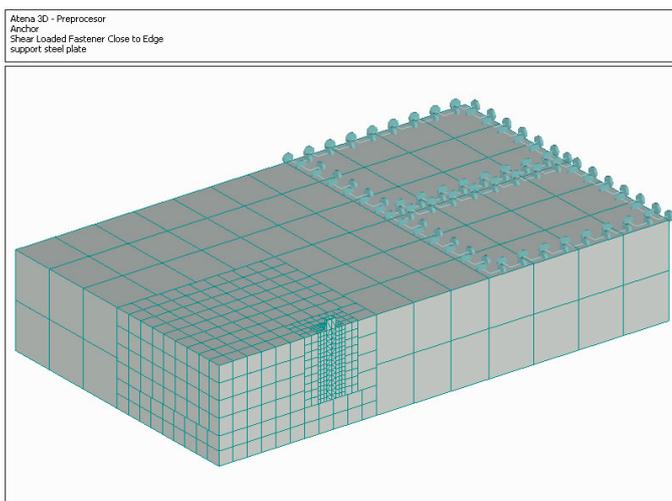


Bild 3 Mehrfachbefestigung unter Querlast

Das Programm ATENA besteht aus einem Berechnungskern, der für die nichtlineare numerische Analyse des Strukturmodells sorgt, und einer anwenderfreundlichen Schnittstelle, die eine effektive Kommunikation zwischen Programmkern und Benutzer gewährleistet.

### 3 ATENA Berechnungskern

In dem Berechnungskern werden besonders die Technologie der finiten Elemente, nichtlineare Lösungsverfahren und die nichtlinearen Materialmodelle behandelt (Bild 4).

#### 3.1 Finite Elemente

In ATENA sind isoparametrische finite Elemente angewendet, alternativ mit linearem oder quadratischem Ansatz. Für das Materialvolumen sind es prismatische Elemente, drei- oder vierkantige Pyramiden, bzw. quadratische oder dreieckige Elemente in zweidimensionalen Modellen. Für eine effektive Modellierung von Platten und Scheiben stehen besonders geschichtete Elemente zur Verfügung.

Bewehrungsstäbe sind als Stabelemente ohne Biegesteifigkeit modelliert. Die Bewehrung kann durch ein Verbundgesetz mit dem umgebenden Beton verbunden

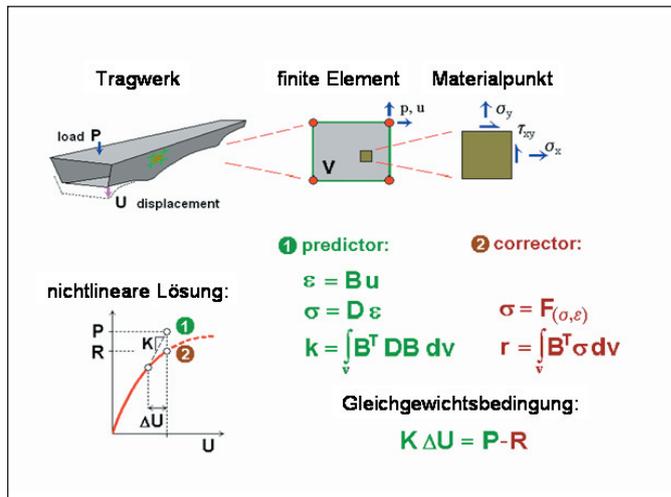


Bild 4 Die nichtlineare Methode der finiten Elemente

werden. Externe Vorspannkabel kann man als freiliegende Bewehrung mit Ankern und Zwischenknoten (Deviatoren) eingeben. Alle diese Bewehrungsarten können vorgespannt werden. Alternativ kann man die Bewehrung verschmiert durch eine Bewehrungszahl in verschiedenen Richtungen definieren.

Teile des Modells kann man durch Kontaktelemente mit definierten Eigenschaften verbinden, das Gesamtmodell kann zur Umgebung durch besondere Federelemente mit eingebauter Kontaktfunktion befestigt werden.

#### 3.2 Nichtlineare Materialmodelle

Die nichtlinearen Materialmodelle in ATENA basieren auf der orthotropischen Schadenstheorie und der beton-spezifischen Plastizitätstheorie. Für Beton im Zug wird die nichtlineare Bruchmechanik verwendet. An dem Bruchenergetischen Verfahren [8] gestützt, sind die Risse als verschmierte Schädigung (Dehnungen) modelliert. Das ermöglicht die Methoden der Kontinuumsmechanik auch für das geschädigte Material anzuwenden. Für eine objektive Analyse, die vom Finite Elementen Netz unabhängig ist, ist so genannte Rissbandmethode nach [1] angesetzt. Das Materialgesetz weist eine Entfestigung nach Erreichen der Höchstzugspannung auf. Der abfallende Ast ist mit einer exponentiellen Funktion nach Hordijk [7] beschrieben (Bild 5).

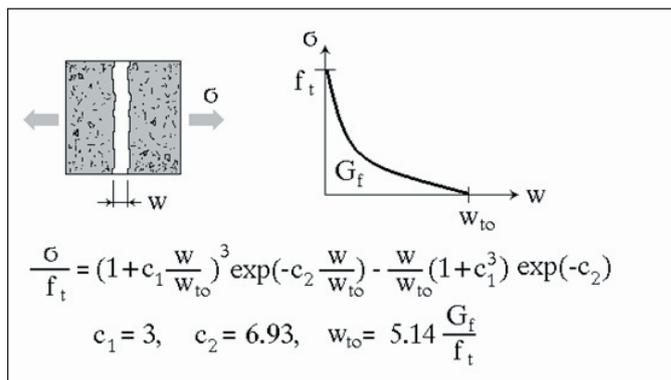


Bild 5 Hordijksche Funktion für Beton im Zug

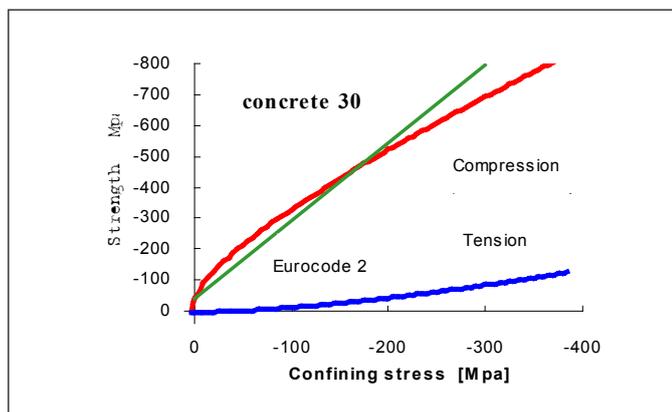


Bild 6 Umschnürungseffekt für Beton unter mehrachsigen Druck

Das Betonverhalten im Druckbereich wird mit Hilfe der Plastizitätstheorie nach *Menétrey* und *Willam* [10] mit einer nicht assoziierten Fließregel und Entfestigung dargestellt. Das Materialvolumen kann sich unter plastischen Verformungen ändern. Durch den Materialparameter  $\beta$  kann diese Volumenänderung angesteuert werden.

Ein weiterer wichtiger Effekt ist die so genannte Umschnürung – die Betondruckfestigkeit ist vom dreidimensionalen Spannungszustand abhängig. Durch seitliche Druckspannungen kann die Betonfestigkeit wesentlich aufsteigen (Bild 6). Die in ATENA angewendeten Materialmodelle können diese Einflüsse realistisch abbilden (siehe z. B. [3]).

Die Hauptmaterialmodelle in ATENA wurden für die Modellierung von normalem Beton entwickelt und optimiert. Mit geeigneten Materialparametern kann man diese Modelle auch für die Berechnung von Mauerwerk oder besonderen Betonarten anwenden. Für Faserbetone, die ein wesentlich unterschiedliches Zugverhalten mit hoher Duktilität aufweisen, stehen speziell entwickelte Materialmodelle zur Verfügung, ebenso für Gestein oder Metalle, die an den Plastizitätstheorien nach *Drucker-Prager* und *von Mises* basieren.

Die zeitabhängigen Materialmodelle können für die Berechnung von Betonerhärtung angewendet werden, die temperaturabhängigen Modelle für die Berechnung von Brandbelastungen und Resttragfähigkeit einer Struktur nach Brandeinwirkung. Für die meisten Materialmodelle gibt es auch eine Variante mit benutzerdefinierten Funktionen.

Besondere Materialmodelle stehen für die Bewehrung zur Verfügung. Bei der Stabbewehrung als auch bei der verschmierten Bewehrung kann man zwischen einem elastischem, elastik-plastischem und versteifendem Materialgesetz wählen. Es steht ebenfalls ein Auswahl verschiedener Verbundgesetze (z. B. nach CEB-fib Model Code 1990) zur Verfügung.

### 3.3 Nichtlineare Lösungsverfahren

Die nichtlineare Lösung des Strukturverhaltens unter Belastung wird stufenweise in Lastschritten durchgeführt. In jedem Lastschritt wird das Gleichgewicht iterativ erreicht. Dabei werden die unausgewogenen Restkräfte minimiert

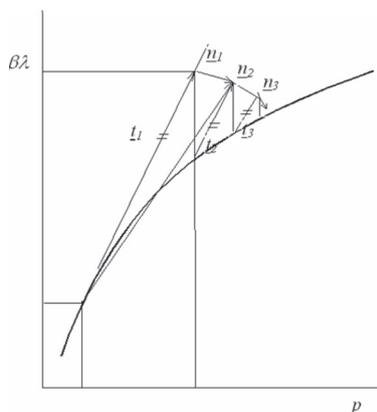


Bild 7 Schema der Bogenlänge Methode

und durch ein energetisches Kriterium nach eingetragener Toleranz kontrolliert. Für die iterative Berechnung steht in ATENA alternativ ein *Newton-Raphson* Verfahren oder die Bogenlänge Methode (Bild 7) zur Verfügung.

Eine Beschleunigung des Iterationsprozesses kann durch die Line Search Methode erzielt werden. Die Funktionsparameter der einzelnen Lösungsmethoden können in der Eingabe den eigenen Anforderungen entsprechend eingestellt werden.

Die Newton-Raphson Methode ist besonders gut zum Erreichen bestimmter Lastniveaus geeignet. Das Nachbruchverhalten kann mit dieser Methode durch eine weggesteuerte Belastung (vorgegebene Verformungen) abgebildet werden. Bei Belastung der Struktur durch Kräfte ist für die Analyse von Höchstlast und Nachbruchverhalten die Bogenlänge Methode anzuwenden.

## 4 Grafische Benutzeroberfläche

Die interaktive grafische Benutzeroberfläche ist besonders für praktische Anwendungen wichtig. Sie unterstützt eine optimale Dateneingabe zum Strukturmodell und gibt nach der Auswertung einen Überblick über die Ergebnisse. Die ATENA Benutzeroberfläche berücksichtigt alle Besonderheiten des Stahlbetons – z. B. diskrete Bewehrung oder Risse.

### 4.1 Dateneingabe

Die Form des Strukturmodells ist einfach in einer CAD-artigen Arbeitsumgebung einzugeben (Bild 8). Die Elementierung erfolgt automatisch mit vorgegebenen Parametern, die Elementart und Elementgröße gebietsweise bestimmen. In den einzelnen Bereichen der Struktur kann die Elementgröße unabhängig definiert werden.

Diskrete Bewehrungsstäbe können bei der grafischen Eingabe geometrisch genau definiert werden. Die Form der Stäbe ist beliebig aus geraden und gekrümmten Teilen zusammengesetzt, unabhängig von der finite Elementen Ver-netzung.

Nichtlineare Materialmodelle für Beton haben viele Eingabeparameter. Die Eingabe dieser Parameter wird in ATENA sehr gut unterstützt. Man kann die einzelnen Werte automatisch aus der eingegebenen Würfeldruck-

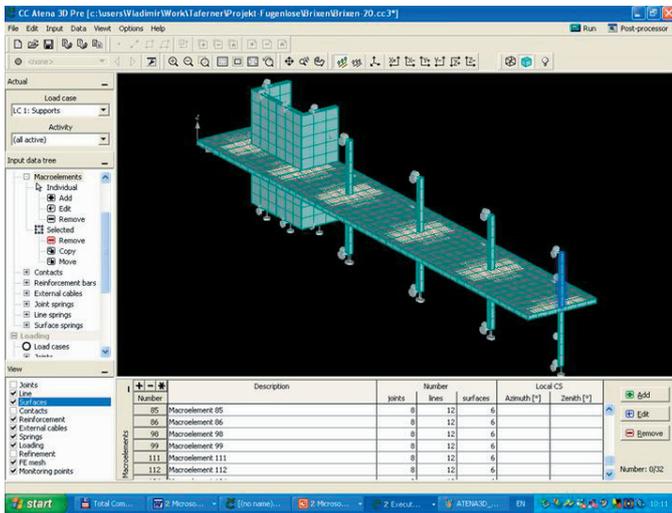


Bild 8 CAD-artige Arbeitsumgebung für Modelleingabe

festigkeit generieren und nachher anpassen. Die Generierung erfolgt nach bewährten Formeln nach CEB, RILEM usw. Alternativ können passende Materialwerte direkt aus einem Katalog nach Betongüte ausgewählt werden, wobei zwischen charakteristischen Werten, Bemessungs- und Mittelwerten entsprechend Eurocode gewählt werden kann.

Die charakteristischen Werte sind nach Norm bei dem Material garantiert, es repräsentiert einen 5%-Quantil. Solche Werte sind für eine Normberechnung im Gebrauchszustand geeignet. Die Bemessungswerte werden durch Teilsicherheitsfaktore vermindert und sind für die Normberechnung der Tragfähigkeit anzusetzen. Mit den Mittelwerten sollte man rechnen, wenn die Ergebnisse mit dem realen Strukturverhalten (z.B. bei Experimenten oder Feldmessungen) zu vergleichen sind. Eine Bemessung aufgrund der Ergebnisse aus Berechnungen mit den Mittelwerten kann mit Hilfe der globalen Sicherheitsfaktoren durchgeführt werden.

## 4.2 Echtzeitgrafik

Ein besonders wichtiger Bestandteil der ATENA Benutzeroberfläche ist ein Modul für Echtzeitgrafik, der die

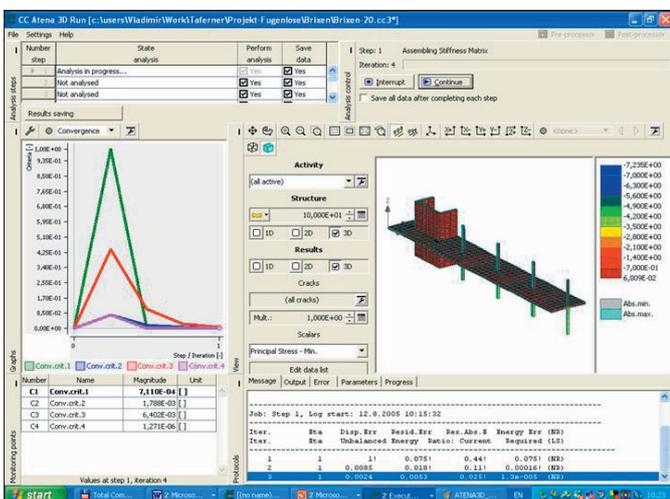


Bild 9 Echtzeitgrafik

wichtigsten Daten aus der Analyse schon während der Berechnung automatisch zeigt (Bild 9).

Die Echtzeitgrafik zeigt die wichtigsten Ergebnisse schon bei der Berechnung, während der nichtlinearen Analyse des Strukturmodells.

Dadurch kann man die FE Berechnung effektiv steuern und alle ggf. auftretende Probleme rechtzeitig erkennen und beseitigen.

## 4.3 Nachbearbeitung

Bei der Auswertung der Ergebnisse können neben den FE üblichen farbigen Darstellungen der Resultate auch Rissbilder mit einzelnen diskreten Rissen dargestellt werden (schwarze Linien in Bild 10). Eine Information über Rissbreite und Restspannung ist direkt in der Grafik verfügbar. An den tragwerkartigen Strukturen kann der Verlauf der internen Kräfte Biegemomenten, Normal- und Querkkräfte dargestellt werden. Durch Wahl der wichtigsten Modelparame-ter kann man einfach ein Last-Verformungsdiagramm des Strukturverhaltens während des Belastungsprozesses in grafischer Form zeigen.

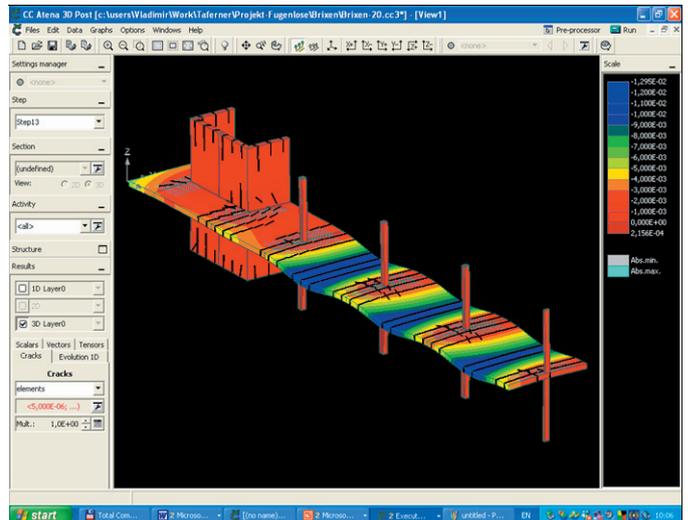


Bild 10 Detaillierte grafische Auswertung der Ergebnisse

## 5 Anwendungsbeispiel

Ein typisches Beispiel für die praktische Anwendung des Programms ATENA zeigt eine Rechnersimulation von Schubversuchen an Fertigteilplatten.

Bei Entwurf, Herstellung und Anwendung von Fertigbauteilen können durch Optimierung wesentliche Ersparungen erreichen werden, weil die Produktion der gleichen oder ähnlichen Bauteile in großen Mengen erfolgt. Die Eigenschaften der Fertigteile sind meistens durch aufwendige und teure Zerstörungsversuche festgestellt und überprüft. Bei Optimierung der Erzeugnisse selbst als auch der Bemessungstabellen und -unterlagen kann die nichtlineare numerische Analyse ebenfalls mitwirken.

In einer numerischen Studie zu dem Entwicklung und Optimierung von neuen Formen der Spannbeton-Fertigdeckenplatten wurden in Zusammenarbeit mit dem Hersteller, einem PREFA Betrieb in der Tschechischen Republik, die Form und Anzahl der Hohlräume, Typ und

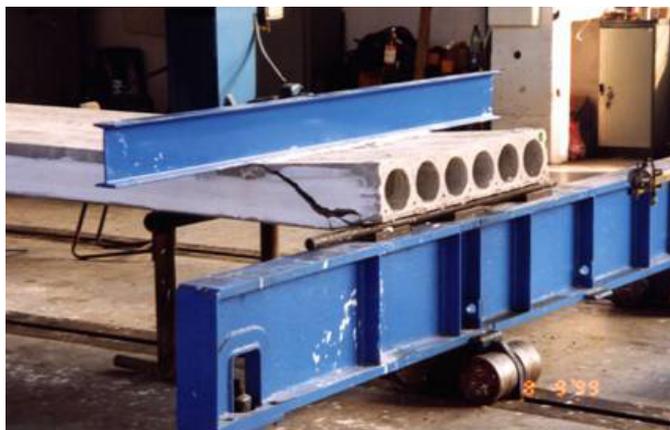


Bild 11 Spannbeton-Fertigdeckenplatte im Schubversuch



Bild 12 Typisches Versagensbild einer Fertigteilplatte

Menge der Vorspannglieder, Vorspannkraft, notwendige Dicke der Betondeckung als auch die Reifzeit des Betons zum Zeitpunkt der Vorspannung erforscht. Aus den Rechenergebnissen wurden optimale Parameter für die neue Produktion festgelegt.

Aus Herstellungsgründen enthalten die Spannbeton-Fertigdeckenplatten keine Schubbewehrung. Um die Gefahr eines unerwarteten spröden Schubversagens der Spannbeton-Fertigdecke zu minimieren, ist es notwendig, die Schubtragfähigkeit der Deckenplatten zu bestätigen. Dies geschieht normalerweise durch umfangreiche Versuchsprogramme (Bild 11 und 12), die man lediglich erst nach dem Anlauf der Produktion durchführen kann. Mit Hilfe der numerischen Analyse war es möglich, die Schubtragfähigkeit der Deckenplatten schon im Vorfeld zu bestimmen.

Dafür wurden die Schubversuche mit einem finiten Elementen Modell einer symmetrischen Hälfte der Deckenplatte simuliert. Das FE Netz mit etwa 8000 volumetrischen prismatischen Elementen ist im Bild 13 dargestellt.

Nach der Vorspannung wurde das Modell stufenweise mit einer Schubkraft ähnlich wie im Experiment bis zum Bruch belastet. Die Deckenplatte versagte durch Verbundverlust der Vorspannglieder mit konsequenter Öffnung eines Schubrisses nahe der Stütze. Das berechnete Versagensbild (Bild 14) lässt sich mit einem typischen Versa-

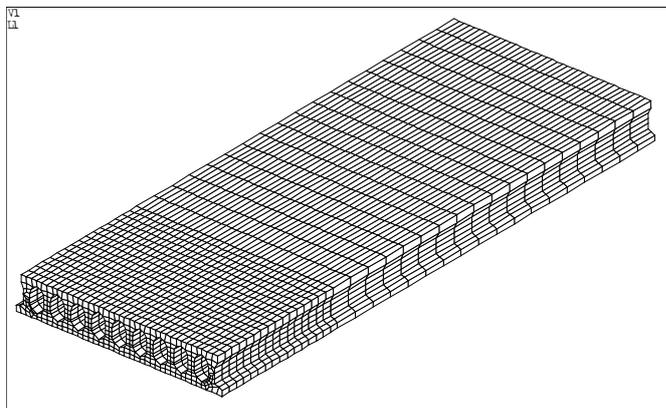


Bild 13 Finite Elemente Modell einer symmetrischen Hälfte der Deckenplatte

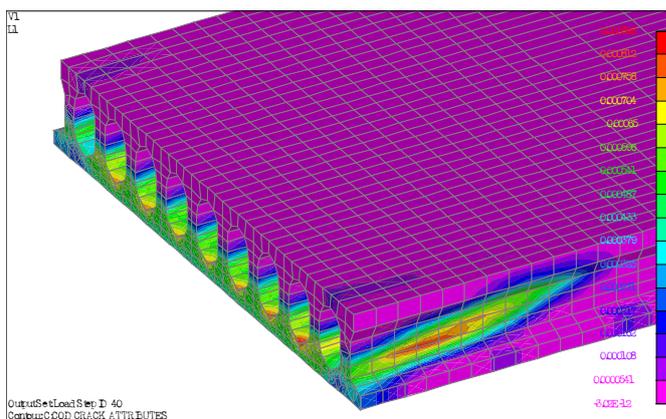


Bild 14 Schubversagen in der numerischen Analyse

gensbild aus einem realen Schubversuch (Bilder 11 und 12) gut vergleichen.

Die berechneten maximalen Schublasten für verschiedene Plattenkonfigurationen (Plattenstärke, Anzahl der Hohlräume, Vorspannung) wurden durch einen globalen Sicherheitsfaktor reduziert und die resultierenden Schubkräfte für die Ausarbeitung der Bemessungstabellen angewendet.

## 6 Fazit

Das Programmpaket ATENA ist ein wertvolles Werkzeug, der eine Untersuchung des Strukturmodells durch die nichtlineare Rechnerimulation mit Hilfe der Methode der finiten Elemente ermöglicht. Die eingebauten realistischen Materialmodelle gewährleisten ein wirklichkeitsnahes Verhalten des Modells. Mit ATENA können Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Bauwerks bestimmt und die zu erwartenden Versagensmechanismen zuverlässig vorhergesagt werden [11].

**Das Model verhält sich im Rechner wie die reale Struktur in Wirklichkeit. Deshalb ist ATENA als „virtuelles Testlabor“ bezeichnet.**

ATENA eignet sich besonders gut für Anwendung in Forschung und Entwicklung, wo Laborversuche zur Einführung neuartiger Technologien und Methoden unterstützt werden können. Es wird deshalb in zahlreichen inter-

nationalen Projekten mit Erfolg eingesetzt. Das Programm ATENA ist auch bei der Bemessung und beim Entwurf von Konstruktionen sehr gut anwendbar (siehe [5], [6]), da die integrierte Benutzeroberfläche eine einfache Bearbeitung der Aufgaben ermöglicht und den Anwender bei der nicht-linearen Analyse von Stahlbetonstrukturen unterstützt.

In der Lehre kann man die Struktureigenschaften und Strukturverhalten unter verschiedensten Bedingungen untersuchen, aufklären und illustrativ dokumentieren.

Durch die optimalen Programmeigenschaften und Einstellungsmöglichkeiten verhält sich das Strukturmodell im Rechner der realen Struktur dem wirklichen Experiment sehr ähnlich. Deshalb ist die Bezeichnung des Programms ATENA als „virtuelles Testlabor“ tatsächlich berechtigt.

#### Literatur

- [1] Bažant, Z.P. und Oh, B.H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Materials and Structures*, 16 (1983), S. 155–177.
- [2] Červenka Consulting Webseiten, <http://www.cervenka.cz>, 2007.
- [3] Červenka, J. und Červenka, V.: Three Dimensional Combined Fracture-Plastic Material Model for Concrete. In: 5th U.S. National Congress on Computational Mechanics, Boulder, Colorado, USA, 1999.
- [4] Červenka, V., Simulating a Response. *Concrete Engineering International* 4, (2000), No. 4, S. 45–49.
- [5] Červenka, V.: Computer simulation of failure of concrete structures for practice. In: The first fib Congress, Osaka, Japan, Session 13, S. 289–304, 2002.
- [6] Červenka, V. und Bergmeister, K.: Nichtlineare Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen. *Beton- und Stahlbetonbau* 94 (1999), Heft 10, S. 413–419.
- [7] Hordijk, D.A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, ISBN 90/9004519-8, 1991.
- [8] Hillerborg, A., Modéer, M. und Peterson, P.E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement Concrete Research* 6 (1976), S. 773-782,
- [9] Margoldová, J., Červenka, V., Pukl, R. und Klein, D.: Angewandte Sprödbrechberechnung. *Bauingenieur* 74 (1999), No. 3, S. A22–29.
- [10] Menétrey, P. und Willam, K.J.: Triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal* 92 (1995) No. 3, S. 311–318.
- [11] Pukl, R., Červenka, V., Strauss, A., Bergmeister, K. and Novák, D.: An advanced engineering software for probabilistic-based assessment of concrete structures using nonlinear fracture mechanics. In: ICASP 9, San Francisco, USA. Millpress Rotterdam, The Netherlands, S. 1165–1171, 2003.