

Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG
Herausgeber: Eisenbibliothek
Band: 80 (2008)

Artikel: Tunnelbau mit dem Computer : die Finite-Elemente-Methode in der Geotechnik
Autor: Kaiser, Walter
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-378445>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

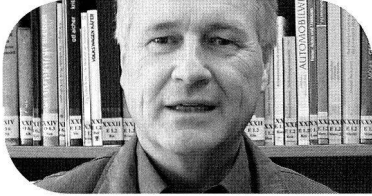
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



Tunnelbau mit dem Computer – Die Finite-Elemente-Methode in der Geotechnik

Prof. Dr. phil. Walter Kaiser

Geboren 1946 in Esslingen am Neckar, studierte 1966–1972 an der Universität Stuttgart Physik, Chemie, Geschichte der Naturwissenschaft und Technik sowie Philosophie. 1975 wurde er in Stuttgart zum Dr. phil. promoviert. 1976–1986 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter und Hochschulassistent am Fachbereich Mathematik der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz. 1984 habilitierte er sich dort für das Fach «Geschichte der Naturwissenschaften». 1985/86 absolvierte er einen Forschungsaufenthalt am «Office for History of Science and Technology» an der University of California, Berkeley. 1986/87 arbeitete er als Oberkonservator am Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim. 1987 wurde er zum Professor für «Geschichte der Technik» an der RWTH Aachen ernannt. Seit 2002 ist er Vorsitzender des Bereichs Technikgeschichte beim Verein Deutscher Ingenieure (VDI) sowie stellvertretender Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats der Gesellschaft für Unternehmensgeschichte (GUG).

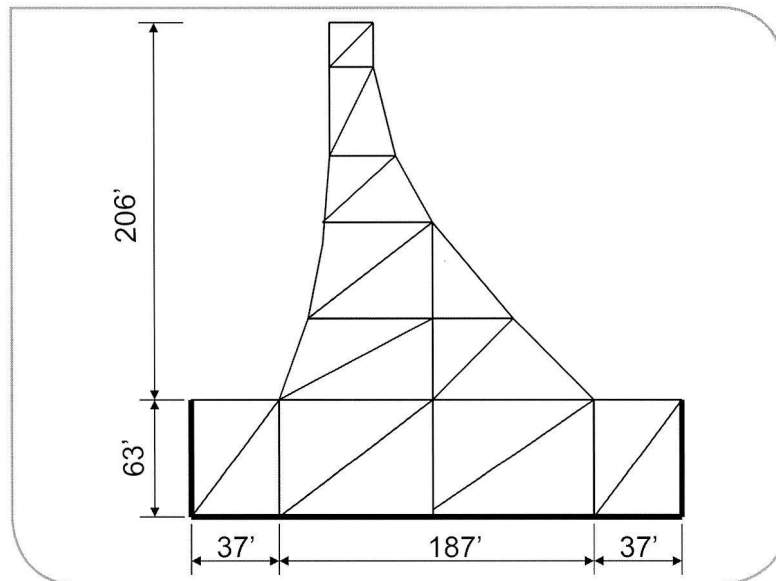


Bild 1: Finite-Elemente-Gitternetz für die statische Untersuchung einer Gewichtsstauwand. (Grafik: Ray W. Clough 1960)¹

eingebettet, die bis in grosse Entfernungen mit dem eigentlichen Tunnelbauwerk in Wechselwirkung steht. Finite-Elemente-Analysen gehen heute im Tunnelbau nicht global vor, sondern durch klare Definition von Problemen. Sie zielen oft auf Verhalten und Funktion einzelner abgrenzbarer Systemkomponenten, ausserdem greifen sie vielfach zum Instrument der Retroanalyse.

Seit Anfang der 1970er Jahre wurde die Finite-Elemente-Methode im Tunnel- und Kavernenbau verwendet. Rasch wurden zur Entwicklung einer gewissen ingenieurwissenschaftlichen Forschungsroutine an Hochschulen und anderen wissenschaftlichen Institutionen spezialisierte Programmsysteme geschaffen. Vielfach durch Ausgründungen aus den Hochschulen entstanden Unternehmen, die diese Software auf kommerzieller Ebene weiterentwickelten, insbesondere mit Blick auf intuitive Bedienung. Allerdings bot die suggestive Wirkung der graphischen Benutzeroberfläche moderner Finite-Elemente-Software auch Anlass zu Kritik, wie überhaupt die Anwendung der Finite-Elemente-Methode in der Geotechnik und im Tunnelbau keinesfalls nur Konsens und auch keine reine Erfolgsgeschichte war. Mehr als in anderen Technikbereichen ist beim Tunnel das Artefakt in eine komplexe, stark variierende geologische Umgebung

Since the early 1970s the finite element method has been used in tunnel and cavern construction. Specialized program systems were developed to ensure precise research routines in engineering at universities and other scientific institutions. Spin-offs from the university often resulted in firms which advanced this software for commercial purposes, particularly with a view to intuitive operation. However, the suggestive properties of the graphic user interface of the modern finite element software were often criticized, when in fact the use of the finite element method in geotechnics and in tunnel construction itself was not always looked on positively and did not always have a successful track record. More so than in other technologies, in tunnels the artefact is embedded in a complex, highly variegated geological environment, which interacts with the actual tunnel construction even at great distances. Finite element analyses do not approach tunnel construction globally today, but are rather used for the definition of problems. They often aim at the behaviour and function of individual delimitable system components and they frequently resort to the instrument of retroanalysis.

Finite-Elemente-Methode (FEM) – die Pioniere

Da die analytische (formelmässige) Berechnung ingenieurwissenschaftlicher Probleme, etwa durch die Lösung von Differentialgleichungssystemen, vielfach nicht gelingt, muss man zu näherungsweise vorgehenden numerischen Verfahren greifen. Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist der Übergang zur integralen Beschreibung und die Aufteilung von Flächen oder von Raumgebieten durch Gitternetze beziehungsweise durch kleine, regelmässige Flächen- oder Raumstücke von endlicher Grösse. Diese finiten Elemente sind an den Knotenpunkten miteinander verknüpft. Die Annahme der FEM in der Statik ist, dass sich die kontinuierlich verlaufenden Verschiebungen innerhalb eines Elements durch Interpolation aus den Verschiebungen eines Knotenpunkts berechnen lassen. Zu diesem Zweck werden für jedes Element Interpolationsfunktionen (etwa in Gestalt von Polynomansätzen) gewählt, mit denen sich die Verschiebungen an den Knotenpunkten näherungsweise berechnen lassen. Aus den Verzerrungen, also aus den in jedem Knotenpunkt unterschiedlichen Verschiebungen, lassen sich die Spannungen ableiten. Die Lösung der dadurch entstehenden, mit der Verfeinerung der Netze immer umfangreicheren Gleichungssysteme gelingt nur noch mit Hilfe leistungsfähiger Digitalrechner und einer graphischen Ausgabe der Ergebnisse.

Grundlegende Untersuchungen und Monographien zur FEM stammen von Ray W. Clough, Klaus-Jürgen Bathe², Edward L. Wilson³, Chandrakant S. Desai, John F. Abel⁴ und Richard H. Gallagher⁵ aus den USA und Olgierd C. Zienkiewicz⁶ aus Grossbritannien. Für die Bundesrepublik sollte der in Athen und München zum Bauingenieur ausgebildete John Argyris besondere Bedeutung bekommen. 1959 wurde er vom Imperial College in London an die damalige Technische Hochschule Stuttgart berufen.

Besonders einflussreich bei der Entwicklung der Finite-Elemente-Methode im Bauingenieurwesen war zunächst Ray W. Clough an der UC, Berkeley. In den frühen 1960er Jahren versuchte er zusammen mit seinen Schülern mit Hilfe der Finiten Elemente näherungsweise Verschiebungen und Spannungen in grossen Betonstrukturen zu berechnen, zum Beispiel in Schwergewichtsstaumauern (Bild 1).

Schon um 1960 entwickelten Ray W. Clough und Edward L. Wilson für Zwecke statischer Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode ein Computerprogramm, das auf den Grossrechnern IBM 701 und IBM 704 lief. Grundlegende Eingabegrössen waren die Lage und die Nummerierung der Knoten in den Dreiecksnetzen, in welche die statischen Strukturen zerlegt worden waren. Hinzu kamen die Gleichgewichtsbedingungen für die Knoten. Wenig später konnte nichtlineares Materialverhalten berücksichtigt werden.⁷ Ein berühmter Testfall war die Retroanalyse des von einem Riss bedrohten Norfork-Damms in Arkansas. Im Rahmen des

Norfork Dam Project konnten Ray W. Clough, Edward L. Wilson und Ian King zeigen, dass die Staumauer gewisse Selbstheilungskräfte besitzt und sich der bedrohlich erscheinende Riss unter dem Einfluss des wachsenden hydrostatischen Drucks beim Füllen des Stausees schliesst.⁸

Frühe FEM in Geotechnik und Tunnelbau

Mit dem beim Norfork Dam Project benutzten Finite-Elemente-Programm war es prinzipiell möglich, auch für unterirdische Beton- und Felsstrukturen Berechnungen anzustellen, zum Beispiel zur schnellen Ermittlung von Spannungskonzentrationen in solchen Strukturen. Gefördert durch das California State Department of Resources konnten Clough und Jerome Raphael 1962 daran gehen, den Finite-Elemente-Ansatz auf diese neue Klasse von statischen Problemen zu übertragen.⁹ Ein konkretes Problem war dabei die Berechnung der Spannungen im umgebenden Fels der Kraftwerkskaverne des Oroville Dam.¹⁰

Mit der Untersuchung einer Kraftwerkskaverne war auch der Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Tunnelbau der Weg gebahnt. Grundsätzlich muss die Berechnung der Standsicherheit von Tunnelbauten im Fels berücksichtigen, dass es sich um räumliche Spannungszustände handelt, dass der Fels elastisches wie viskoplastisches Verhalten (Kriechen) zeigt und zugleich stark anisotrop ist, seine Eigenschaften also räumlich extrem variieren können.¹¹ Ausserdem müssen Sicherungen und die Auskleidung erfasst werden können. Analytische Berechnungen solcher komplexer Geometrien und Materialien sind – wie gesagt – in der Regel nicht möglich; an sich aussagefähige Modellversuche scheitern am übergrossen Aufwand. Seit Anfang der 1970er Jahre wurden deshalb auch für Tunnel numerische Berechnungsverfahren entwickelt, insbesondere auf der Basis der Finite-Elemente-Methode. Typische frühe Anwendungen waren Tunnel, bei denen die unsymmetrische Belastung des Bauwerks schon allein von der Trasse bestimmt wird, etwa durch einen Vortrieb nahe an einem Abhang. Gyan N. Pande in Swansea stellte 1979 ein solches Projekt vor.¹²

Die FE-Analyse von Tunneln war aber von Anfang an nicht nur ein angelsächsisches Unternehmen.¹³ Im deutschsprachigen Raum wurden ebenfalls wichtige Beiträge zur Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Grundbau¹⁴ und auch speziell zur FE-Analyse von Tunnel- und Kavernenbauten geleistet. Sie stammen namentlich von Manfred Baudendistel (Universität Karlsruhe), Hellfried Malina (Universität Karlsruhe), dem Lehrbuchautor Leopold Müller-Salzburg (Universitäten Karlsruhe und Salzburg).¹⁵ Überhaupt war Karlsruhe aufgrund der Aktivitäten von Hans Leussink, später Bundesminister für Bildung und Wissenschaft, ein Zentrum der Geotechnik geworden: Walter Wittke

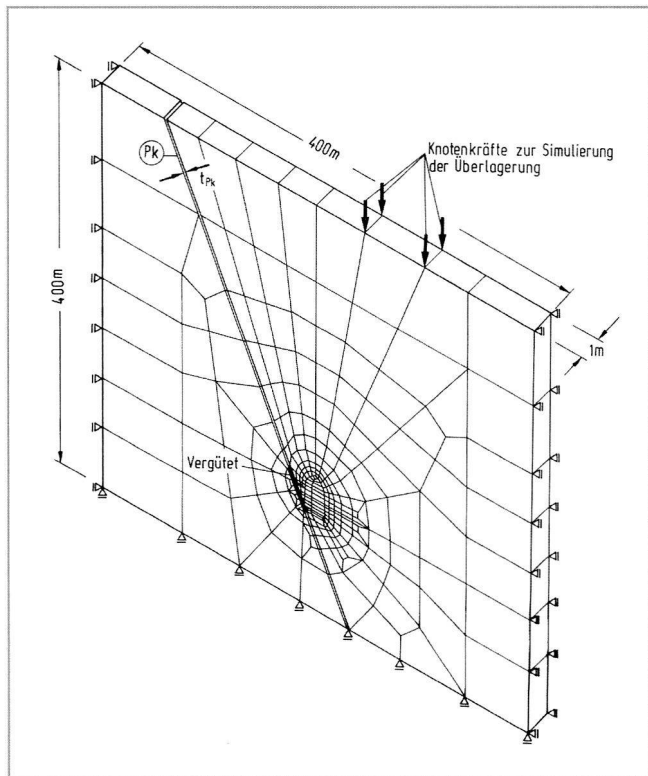


Bild 2: Elementnetz um Hohlraum und Kluft, Maschinenkaverne Wehr. [Grafik: Wittke et al. 1972–1974]¹⁹

leitete vor seiner Berufung nach Aachen eine entsprechende Arbeitsgruppe in Karlsruhe; sein Mitarbeiter Walter Rodatz ging später an die TU Braunschweig. Wei Wu erhielt seinen Dr. Ing. an der Universität Karlsruhe, heute leitet er das Institut für Geotechnik an der Universität für Bodenkultur Wien. Zu den Akteuren aus dem deutschsprachigen Raum gehört, zumindest mit seiner Ausbildung an der ETH Zürich, der spätere Unternehmer Giovanni Lombardi aus Minusio im Tessin, der von der TH Darmstadt stammende Bauingenieur Rainer Wanning (heute TU Braunschweig) sowie Gunter Swoboda (Universität Innsbruck).

Seit Anfang der 1970er Jahre haben Walter Wittke und seine Mitarbeiter an der Universität Karlsruhe und an der RWTH Aachen an konkreten FE-Anwendungen, die auf den Tunnelbau zugeschnitten waren, gearbeitet. Zusammen mit Manfred Wallner und Walter Rodatz befasste sich Wittke bereits 1972, also noch als Privatdozent an der Universität Karlsruhe, mit der dreidimensionalen Finite-Elemente-Berechnung der «Standsicherheit von Hohlräumen, Böschungen und Gründungen in anisotropem, klüftigem Gebirge».¹⁶

Sein eigentliches Forum erhielt Walter Wittke mit der Berufung zum Professor für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau an der RWTH Aachen

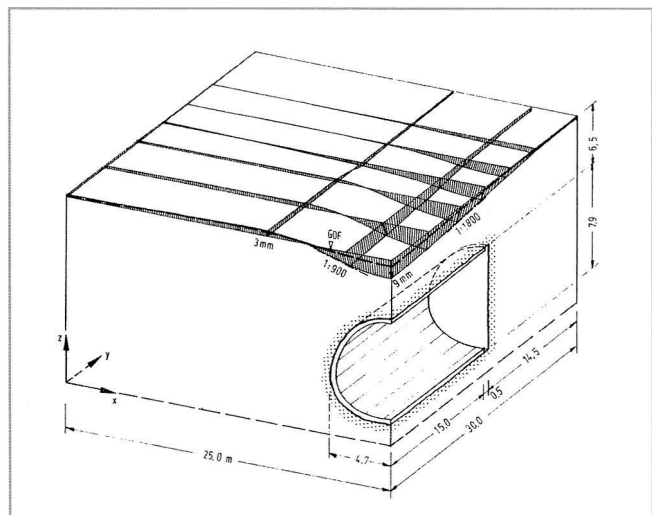
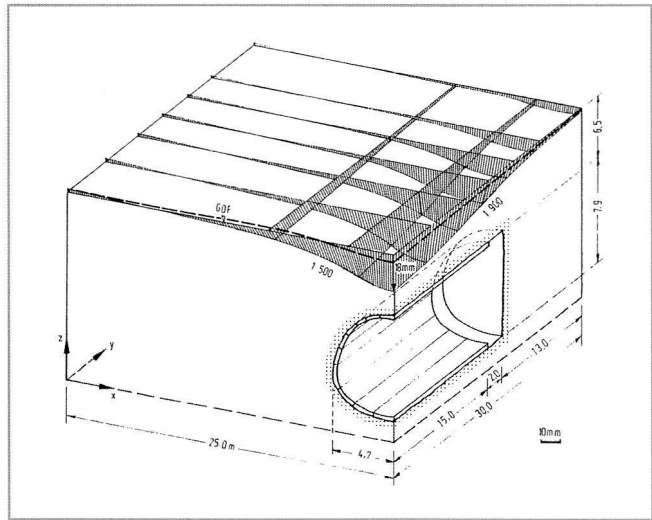


Bild 3a, Bild 3b: Setzungen der Geländeoberfläche, Stephan Sempich, 1980; a) ohne Verstärkung nach Ausbruch, b) mit Verstärkung. [Grafik: Sempich]²¹

1974. Zusammen mit Peter Rissler publizierte Walter Wittke 1976 über die Bemessung der Auskleidung von Hohlräumen in quellendem Gebirge unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode, wobei unter anderem der Stuttgarter Wagenburg-Tunnel analysiert wurde.¹⁷ Ein frühes felsmechanisches Projekt, in dem die Finite-Elemente-Methode für Standsicherheitsberechnungen herangezogen wurde, war die zusammen mit Peter Rissler und E. Pfisterer durchgeführte Untersuchung der Maschinenkaverne Wehr in der ersten Hälfte der 1970er Jahre. Das Kavernenkraftwerk Wehr ist ein Teil des Hotzenwaldwerks, eines Pumpspeicherwerks der Schluchsee AG im Südschwarzwald. Es besitzt eine Fallhöhe von 600 Meter und die typische eindrucksvolle installierte Leistung von 1160 Megawatt. Hier wurde zum

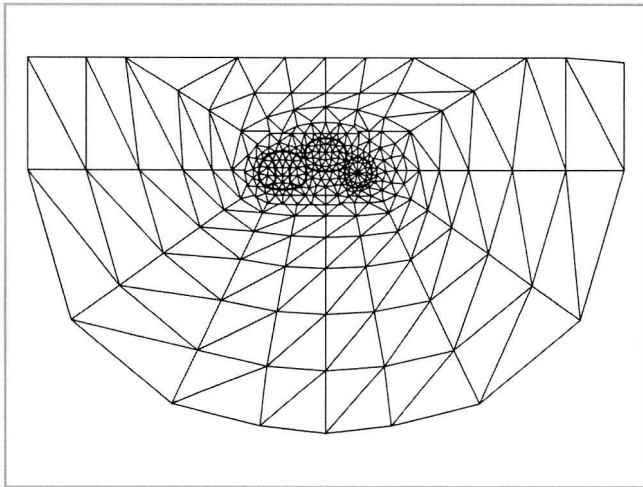


Bild 4: FE-Berechnung beim U-Bahn-Bau in München, 1979.
(Grafik: Swoboda)²⁶

Beispiel für den felsmechanisch kritischen Fall, dass eine vorhandene Parallelkluft steil auf die oberwasserseitige Kavernenwand einfällt, eine Standsicherheitsberechnung mit der FE-Methode durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse wurde zur Sicherung des zwischen Parallelkluft und der oberwasserseitigen Kavernenwand liegenden Gebirgskeils die Kluft immerhin mit 76 Tonnen Zement verfüllt, ausserdem wurden 82 Vorspannanker mit Längen zwischen 13 und 30 Metern aus der Kaverne durch Keil und Kluft in den ungestörten Fels geführt (Bild 2).¹⁸

Wittkes Aachener Doktoranden Stephan Semprich und Berndt Pierau berechneten in ihren Dissertationen dreidimensional Spannungen und Verformungen im Bereich der Ortsbrust von Tunnelbauwerken im Fels und leiteten daraus Daten für die Tunnelbemessung ab (Bild 3a,b).²⁰

Um 1980 waren weltweit bereits eine beachtliche Zahl von Tunnel- und Kavernenbauten durch FE-Analysen begleitet worden. Beispiele sind die U-Bahnen in Budapest²², Frankfurt am Main²³ und München²⁴, wobei hier vor allen Dingen auch die vielfach angewandte Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT) mit der Finite-Elemente-Methode «aufgeladen» wurde (Bild 4).²⁵

Die Neue Österreichische Tunnelbauweise (NÖT), heute fast nur noch mit New Austrian Tunneling Method (NATM) bezeichnet, stammt aus den 1960er Jahren und beinhaltet als zentralen Verfahrensschritt die Auskleidung mit relativ dünnem Spritzbeton unmittelbar nach dem Ausbruch, wodurch aber der umgebende Fels sofort in die tragende Struktur integriert wird. Auch der (bis zur Fertigstellung des Gotthard-Basistunnels) längste Tunnel der Welt, der fast 54 Kilometer lange und 1988 eröffnete Seikan-Tunnel, wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode untersucht. Nachdem 1971 die Entscheidung gefallen war und der Bau des

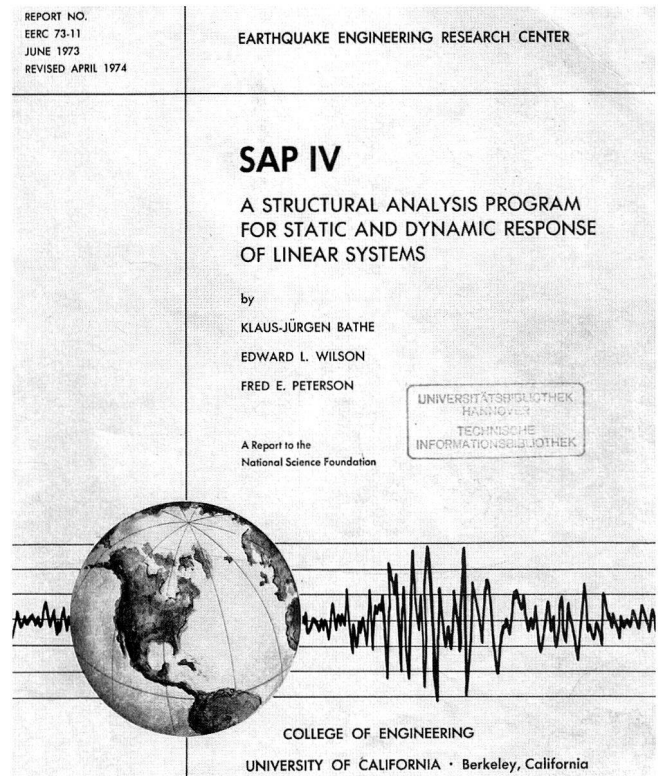


Bild 5: SAP IV, frühe FE-Software für Geotechnik, Berkeley 1973.
(Bild: Bathe)³⁰

Haupttunnels begonnen wurde, mussten angesichts der komplizierten geologischen Bedingungen intensive ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen angestellt werden.²⁷ Eine charakteristische Aufgabe, die hier in den 1970er Jahren angegangen wurde, war die Simulation des zeitlich veränderlichen Wasserdrucks im umgebenden Boden, der sich beim Vortrieb des Tunnels entwickelt.²⁸ Der Seikan-Tunnel verbindet ja die Hauptinseln Honshu und Hokkaido, wobei etwa 23 Kilometer unter der Tsugaru Street verlaufen. In der Tat drohte immer wieder wegen Wassereintrüben die Aufgabe des Baus.

FEM-Software für die Geotechnik

Zu den typischen historischen Prozessen im Umkreis der Einführung von CAD und FEM gehört, dass zur Entwicklung einer gewissen ingenieurwissenschaftlichen Forschungsroutine noch an Hochschulen und anderen wissenschaftlichen Institutionen erste Programmpakete entwickelt wurden. Ausgangspunkt dieser Entwicklung war die UC Berkeley. Zum Pionier der Programmentwicklung wurde insbesondere das Mitte der 1970er Jahre freizügig in Source-Form verbreitete Finite-Elemente-Softwarepaket SAP IV (von Structural Analysis Program) (Bild 5).²⁹

SAP IV wurde auf der Basis von Fortran IV geschrieben und an der UC Berkeley auf einer CDC 6400 der Control Data Corporation installiert.³¹ In einzelnen Programmteilen auf SAP IV aufbauend, entwickelten Walter Wittke und seine Mitarbeiter mit FEST 02 und FEST 03 eigene «Programmsysteme» für den Felsbau. FEST 03 verwandte ebenfalls die Programmiersprache FORTRAN IV und war Ende der 1970er Jahre auf IBM-Grossrechnern der damaligen Kernforschungsanlage (heute Forschungszentrum) Jülich installiert, zunächst auf zwei gekoppelten IBM System 370/168, dann auf der schnelleren Anlage IBM 3033.³² Mit dem Flussdiagramm des Programmsystems FEST 03 deutete sich bereits die Grundstruktur dieser Software an: Aufbau des Finite-Elemente-Netzes, das heisst das in der Regel auf CAD basierende Preprocessing von Geometrie und Netz, Lösung des Gleichungssystems als Kern der Finite-Elemente-Software und Ausgabe der Verformungen und Spannungen, also das in seiner Graphikfähigkeit dem Preprocessing entsprechende Postprocessing.

Ein vergleichbares Softwarepaket, das wie FEST stark auf den Tunnelbau zugeschnitten war, war STAUB (Statische Analyse von Untertagebauten) bzw. Rheo STAUB aus dem Umfeld von Kalman Kovári an der ETH Zürich (Bild 6).³³

Ausserhalb der ETH Zürich wurde es unter anderem vom EDV-Dienstleister FIDES in Zürich verwendet.³⁵ Signifikant ist, dass diese Finite-Elemente-Programme für den Sektor Grundbau und Bodenmechanik vielfach auf kostspieligen amerikanischen Grossrechnern wie den leistungsfähigeren Maschinen der IBM-Systeme 360 und 370 installiert waren, vor allem aber auf den mit dem Namen Seymour Cray verbunden Rechnern der Control Data Corporation wie CDC 6400, CDC 6500 und CDC 6600.³⁶ Ausserdem wurden solche «wissenschaftliche» Finite-Elemente-Programme für den Tunnel- und Grundbau nur von einem kleinen Anwenderkreis genutzt. Unabdingbar war eine Spezialisierung und Kommerzialisierung.

Tatsächlich gründeten sich in einem zweiten Schritt – zum Teil als Spin-offs von den Hochschulinstituten – Software-Unternehmen, die Programmsysteme für den Grundbau sowie Boden- und Felsmechanik erstellten. Hierher gehört zum Beispiel der 1972 in München gegründete EDV-Dienstleister FIDES, der Finite-Elemente-Software u.a. für Tunnelbauten anbietet, inklusive graphisch interaktiver Pre- und Postprozessoren mit SOFiSTiK-Rechenkernen. SOFiSTiK seinerseits entstand 1987 als klassischer Spin-off der von Heinrich Werner an der TU München aufgebauten Arbeitsgruppe für «Elektronisches Rechnen im konstruktiven Ingenieurbau».³⁷ Ein bedeutendes Programmpaket mit der Bezeichnung Plaxis stammt aus den Niederlanden. Plaxis war eine Ausgründung der Technischen Universität Delft; das Unternehmen ging 1980 aus Forschungsaktivitäten von Pieter Vermeer und Mitarbeitern hervor und entwickelt 2D-

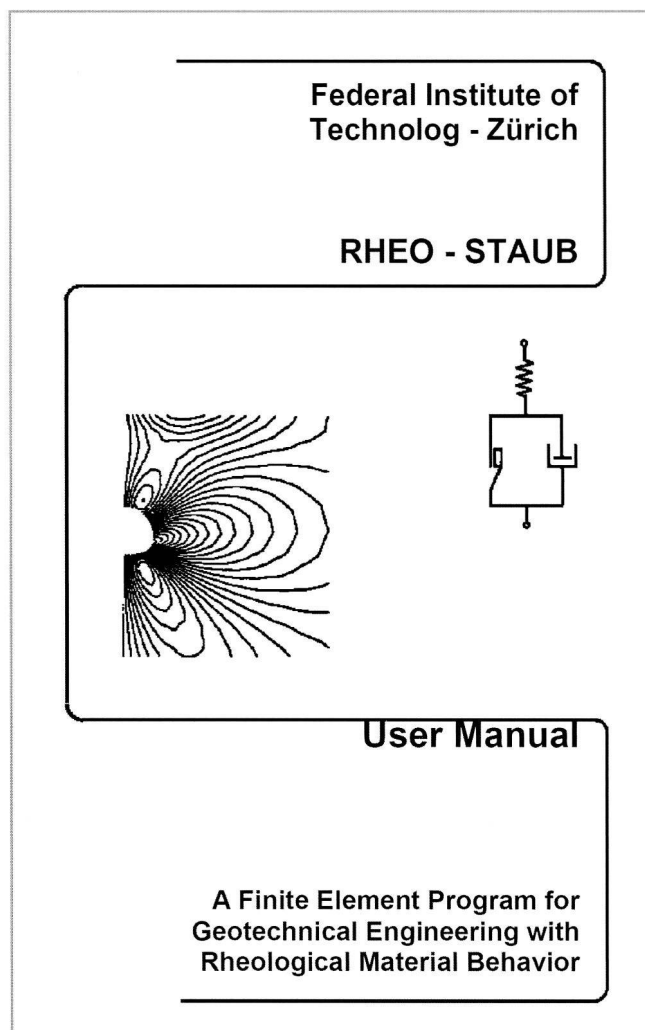


Bild 6: Software Rheo-STAUB, Institut für Geotechnik, ETH Zürich. (Grafik: Fritz)³⁴

und 3D-Finite-Elemente-Programme, die auf die Lösung geotechnischer Probleme zugeschnitten sind.

Insgesamt sind heute eine grosse Zahl spezialisierter Firmen auf dem Gebiet der geotechnischen Software aktiv.³⁸ Zu nennen ist hier die Itasca Consulting Group Inc., die unter anderem die Programme FLAC, UDEC, 3DEC, PFC anbietet. Die Itasca Consulting Group Inc. wurde 1981 von Mitarbeitern des Department of Civil and Mineral Engineering at the University of Minnesota gegründet. Die Firma Rocscience Inc., eine Ausgründung der University of Toronto, stellt mit Examine, Dips und Phases besonders intuitiv zu bedienende Programme her.

Ein schweizerisches Software-Unternehmen in diesem Genre ist die seit 1982 aktive Zace Services in Lausanne. Sie ist kein echter Spin-off, trotzdem waren die Forschungserfahrung der Gründer und der enge Austausch mit der EPFL

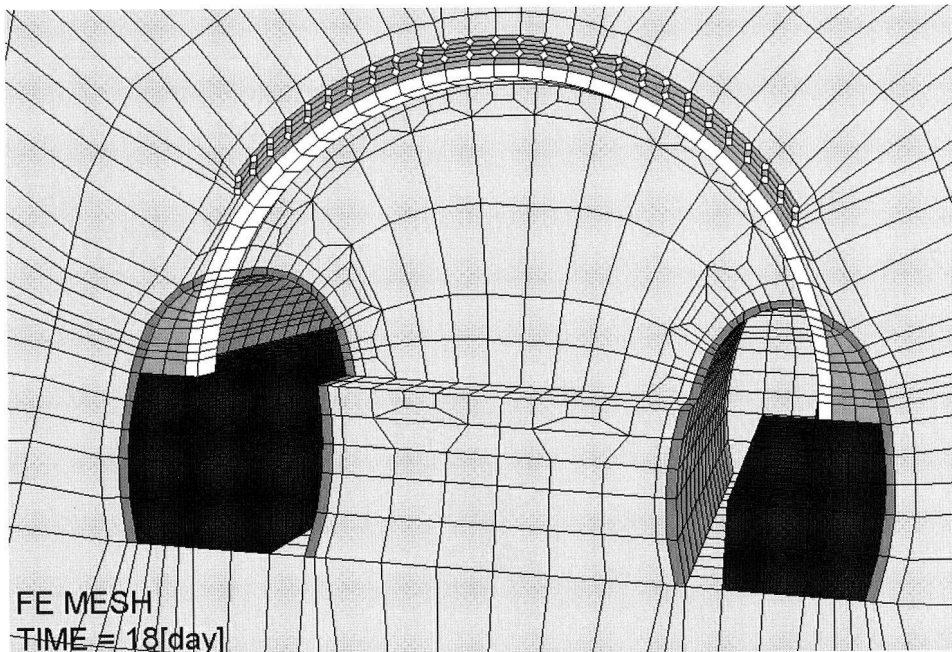


Bild 7: Z_soil.PC von Zace Services (Lausanne); Simulation von Ulmenstollen, Kalottenvortrieb, Strossenabbau und Teilausbau.³⁹

(École Polytechnique Fédérale de Lausanne) entscheidend. Zentrales Produkt ist seit 1985 das Programm Z_Soil®. PC, ein einheitliches Softwarepaket für Boden- und Felsmechanik und Baustatik (Bild 7).

Neben den zum Teil auf den Tunnelbau fokussierten geotechnischen Finite-Elemente-Programmen gab es – zeitlich oft sogar vorausgehend – allgemeine Finite-Elemente-Programmsysteme. Eines der ersten war das 1965 im Umfeld von John Argyris in Stuttgart entwickelte ASKA (Automatic System for Kinematic Analysis). Hierher gehört insbesondere die von John Swanson entwickelte und seit 1970 kommerziell vertriebene Finite-Elemente-Software ANSYS (von Analysis System).⁴⁰ Sie lässt sich wiederum über das Paket ANSYS Structural für Anwendungen in der Geotechnik qualifizieren.⁴¹

Dabei spielte in den kommerziellen Programmpaketen seit den 1990er Jahren, also zeitgleich mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger Workstations und grafikfähiger Bildschirme, die Erstellung feinsten, problemorientierter Netze samt der ausgefeilten graphischen Darstellung und die entsprechende Ausgabe und Visualisierungstechnik eine überragende Rolle. Heute ist die Entwicklung der Finite-Elemente-Software, insbesondere der Pre- und Postprozessoren, so weit fortgeschritten, dass sie eine intuitive, oft sogar äusserst suggestive Benutzungsoberfläche bietet.

Kontroversen im Tunnelbau

Die Firmen nutzen natürlich die Funktionalität dieser Software in Demonstrationen geschickt aus, wobei gerade

die suggestive Wirkung der Bedienungs Oberfläche auch Anlass zu Kritik bietet. Entgegen der seitherigen Darstellung war die Anwendung der FEM in der Geotechnik und im Tunnelbau keinesfalls nur Konsens und auch keine reine Erfolgsgeschichte. Gerd Gudehus in Karlsruhe äusserte sich schon 1975 im Zusammenhang mit einer von ihm veranstalteten internationalen Tagung über numerische Methoden in der Fels- und Bodenmechanik durchaus kritisch. Er sprach davon, dass sich nach der ersten Euphorie Ernüchterung breitmake, dass sich die «Zahl der begeisterten Anhänger der FEM und die der enttäuschten Häretiker die Waage halte». Er erhoffte sich von den numerischen Methoden ein wirtschaftlicheres Bauen, warnte jedoch vor einer Überschätzung der FEM und verwies auf die anhaltende Bedeutung von Messungen im Feld und im Labor.⁴² Richard H. Gallagher diskutierte in seinem Vortrag das notorische Problem der «Accuracy in Data Input and in Stress Calculations».⁴³ Aber auch die Erwartungshaltung hinsichtlich ökonomischer Vorteile wurde keinesfalls überall geteilt.⁴⁴

Vor allem blieb das Risiko von Tunnaleinstürzen unvermindert hoch. Ein berühmt-berüchtigtes Beispiel ist der Einsturz der unter dem Flughafen liegenden Heathrow Express (HEX) Station Tunnels im Oktober 1994. Zwischen den beiden Parallel-Landebahnen öffnete sich ein riesiger Krater, in dem ein Bürogebäude und ein Parkplatz verschwanden. Menschen kamen zwar wie durch ein Wunder nicht zu Schaden, der Sachschaden wurde aber immerhin auf 150 Millionen britische Pfund (beziehungsweise 250 Millionen US-Dollar) beziffert. Ausserdem verzögerte

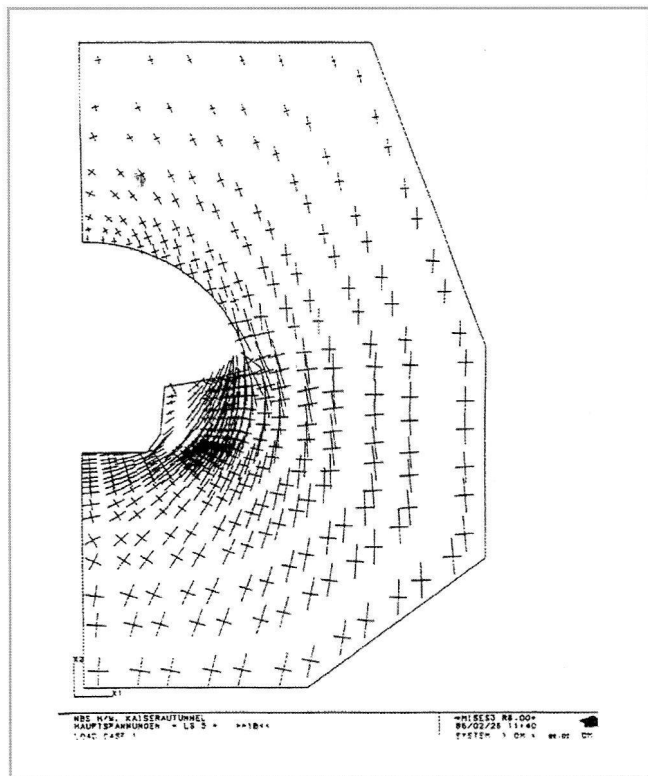


Bild 8: Kaiserau-Tunnel; hier numerische Retroanalyse des Verbrauchs durch die Lahmeyer International (Prüfingenieure). (Grafik: Wu/Rooney)⁴⁷

sich das Projekt um sechs Monate. Anders als bei einer Reihe von Einstürzen von Tunnels, die nach NATM gebaut wurden, hatten die Tunnels jedoch nicht an der Ortsbrust versagt. Trotzdem löste der Vorfall vor allem heftige Diskussionen über die generelle Sicherheit der NATM aus, sie war ja ursprünglich für Tunnelbauten in Fels entwickelt worden.⁴⁵ Wegen der Komplexität der NATM und der geologischen Bedingungen in London – gefürchtet ist der dortige «Londoner Ton» – kam eine begleitende Studie zu dem Ergebnis, dass die FEM unter solchen Bedingungen nicht unmittelbar zur Konstruktion und Auslegung von NATM-Tunnels herangezogen werden kann.⁴⁶

Eine geeignete Fallstudie für eine differenziertere Analyse der Rolle der FEM ist der Einsturz des Kaiserau-Tunnels südlich von Kassel in der Bauphase im August 1985. Der Kaiserau-Tunnel gehört zu der Mitte der 1980er Jahre neu gebauten ICE-Trasse Hannover-Würzburg. Der Einsturz im Kaiserau-Tunnel war keine gewaltige Katastrophe, vor allem kamen Menschen nicht zu Schaden. Der Tunnel war lediglich auf einer Länge von 22 Metern verschüttet, an der Oberfläche des Geländes entstand ein Krater, der Baufortschritt verzögerte sich um ein halbes Jahr, der Sachschaden wurde schliesslich – in Preisen von 1985 – mit 6,5 Millionen

DM (3,2 Millionen Euro) geschätzt. Der Fall Kaiserau-Tunnel ist aber insofern bemerkenswert, als er wegen juristischer Auseinandersetzungen ausserordentlich gut dokumentiert ist. Demnach hätten vorangegangene FE-Analysen Risiken in den Details der gewählten Vortriebsmethode beim Eintreten ungünstiger geologischer Bedingungen erkennen lassen können. Die Risiken wurden jedoch vom Konsortium der Bauunternehmen nicht in Betracht gezogen. Im Kern war die Modellbildung der Bauunternehmen wegen Nichtberücksichtigung eines ad hoc eingeführten Schlitzes in der Strosse inadäquat, sodass beim Übergang vom Ausbruch der Kalotte zum Ausbruch der Strosse und wegen unerwartet schlechter Bodenverhältnisse die Berechnung nicht mehr gültig war (Bild 8).

Letzteres schien die Ursachenermittlung seitens der Prüfengeieure Lahmeyer International zu bestätigen. Sie beruhte erneut wesentlich auf FE-Untersuchungen, nun allerdings im Sinne einer «Numerical Back-Analysis», einer Retroanalyse.⁴⁸

Zudem gibt es kritische Stimmen zum Thema Sicherheit der Software.⁴⁹ Über das durchaus vorhandene – oder immer wieder angemahnte – allgemeine Bewusstsein von den Grenzen der FEM hinausgehend, werden bis heute heftige Kontroversen um die Verwendung der FEM im Tunnelbau ausgetragen. Wei Wu und Peter Owen Rooney diskutierten 2001 auf der von Dimitrios Kolymbas in Innsbruck organisierten «Euro Summerschool on Tunnelling Mechanics» die Rolle der numerischen Methoden bei der Konstruktion von Tunnels und stellten sich die grundsätzliche Frage: «Numerical method, quo vadis?»⁵⁰ In der Tat war es eines der Ziele der Summerschool, das Rationale der Finite-Elemente-Methode im Tunnelbau herauszuschälen. Mit einer realitätsnahen Modellbildung und der sauberen Definition von Anfangswerten und Randbedingungen sollte die Methode aus der ingenieurwissenschaftlichen Black Box herausgeholt werden.

Alan Muir Wood räumte in der Harding Lecture der British Tunnelling Society 2004 zwar ein, dass numerische Simulationen ausserordentlich nützlich bei der Exploration der Stabilität von Tunnels und der Strömungsverhältnisse im Grundwasser seien. Beim konkreten Auffahren von Tunnels seien komplexe numerische Modelle aber kaum zu rechtfertigen, nicht zuletzt wegen der inhärenten Unsicherheit, der Variabilität und dem Schätzungscharakter der eingesetzten Anfangsdaten (input data). So sei kaum zu erwarten, dass der vor Ort eingebrachte Beton in einer Tunnelsohle isotrop sei oder einer vorgegebenen Geometrie folge. Die Eigenschaften des Felses können zum Beispiel innerhalb sehr kleiner Distanzen so stark variieren, dass höhere lokale Spannungen im Fels und in der Tunnelauskleidung die Folge seien. Mit Blick auf Qualität und Alter des Betons interessiere sich der Tunnelbauer in der Praxis für

Hauptspannungen und Dehnungen und nicht für farbenprächige Simulationen.⁵¹ Vielfach mischen sich diese Kontroversen um die FEM allerdings mit den Auseinandersetzungen um Prioritäten, Wissenschaftlichkeit und Reichweite der NATM und nehmen dabei polemische und persönliche Züge an.⁵²

Versucht man den sachlichen Kern herauszupräparieren, so ragt die FEM-Kontroverse im Tunnelbau deshalb besonders aus den übrigen Technikbereichen heraus, weil es die FEM gewöhnlich eher mit isolierten technischen Artefakten zu tun hat, und zwar von Gebäuden über Flugzeuge bis hin zu elektrischen Maschinen. Sie stehen zwar auch in Wechselwirkung mit ihrer Umwelt, statisch mit dem Untergrund, aerodynamisch mit der umgebenden Luftströmung und elektrodynamisch mit den umgebenden Feldern. Diese Artefakte haben aber immer ein starkes oder sogar dominierendes Eigenleben. Demgegenüber überragen die schieren Dimensionen der Tunnels praktisch alle anderen technischen Artefakte. Ausserdem ist beim Tunnel das Artefakt vorzugsweise eingebettet in eine komplexe, stark variierende geologische Umgebung, die bis in beträchtliche Entfernungen mit dem eigentlichen Tunnelbauwerk geologisch und hydrogeologisch in Wechselwirkung steht und die Sicherheit des Bauwerks bestimmt, insbesondere in der Bauphase.

FEM als ingenieurwissenschaftliches Instrument

Trotzdem ist eine vorsichtige, selbstkritisch unterlegte Nutzung der FEM im Tunnelbau heute unverzichtbar. Sie ist sicher einmal ein theoretisches ingenieurwissenschaftliches Instrument, mit dem – der Praxis vorausgehend – zum Beispiel neue Methoden im Tunnelbau analysiert werden können. So liefert die FEM, etwa auf der Basis von «Plaxis 3D Tunnel», ein Werkzeug, um Alternativen zu NATM zu untersuchen, zum Beispiel die seit etwa 1990 von Pietro Lunardi in Mailand propagierte Methode ADECO-RS.⁵³ Nach der NATM wird sequentiell Kalottenausbruch, Ausbruch der Strosse und dann Sohlenausbruch vorgenommen; der Ortsbrust vorseilend wird nur als Sondermassnahme eine Verstärkung vorgesehen. Nach dem rasch aufgebrachten, relativ dünnen Spritzbeton wird die endgültige Auskleidung erst vergleichsweise spät eingebaut. ADECO-RS unterscheidet sich von der NATM insofern, als sie Vollausbuch vornimmt, generell eine Ortsbrustverstärkung vorsieht und unmittelbar nach dem Ausbruch die endgültige Auskleidung vornimmt.

Um den Tunnelvortrieb und die verschiedenen mechanischen Verfahren zu modellieren, etwa auch den Schildvortrieb, wurde zum Beispiel die universelle Finite-Elemente-Software ANSYS⁵⁴ herangezogen, aber auch FLAC3D⁵⁵ von Itasca (Bild 9).

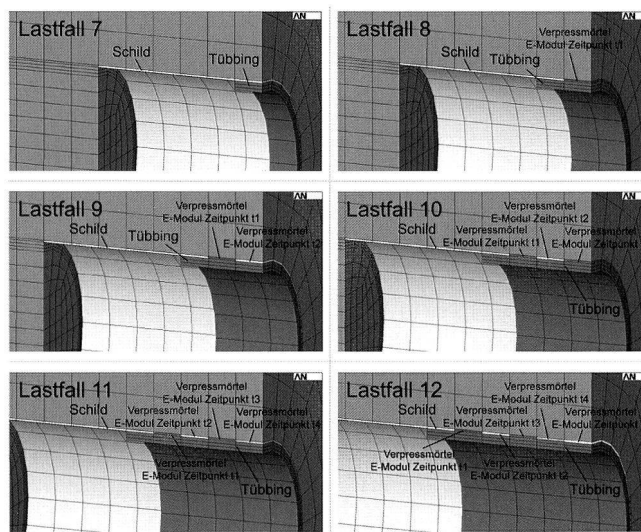


Bild 9: Finite-Elemente-Methode als ingenieurwissenschaftliches Forschungswerkzeug; numerische Simulation eines Schildvortriebs mit ANSYS. (Grafik: Stahlmann)⁵⁶

Entsprechend der heute relevanten selektiven Nutzung werden innerhalb des Teilsystems Tunnelbohrmaschine (TBM) auch die mechanisch extrem beanspruchten Bohrköpfe numerisch modelliert.

FEM in der Praxis des Tunnelbaus – Grossprojekte

Zur heute eher problemorientierten, selektiven und empirisch abgesicherten Nutzung der FEM sollen nun einige praktische Beispiele gegeben werden, es sollen also einige realisierte Grossprojekte angesprochen werden: Ein herausragendes Tunnelbauwerk um 1990 war der Channel Tunnel (bzw. Eurotunnel) unter dem Ärmelkanal. Ähnlich wie bei der Neuen Eisenbahn-Alpentransversalen (NEAT) reichte die politische Diskussion dreissig Jahre zurück. Schon für eines der Zugangsbauwerke, das gemäss NATM erstellt wurde und gleichzeitig als Montageraum für die riesigen Tunnelbohrmaschinen (TBM) vorgesehen war, wurden umfangreiche FE-Berechnungen durchgeführt.⁵⁷ Insgesamt wurden von französischer und englischer Seite elf Tunnelbohrmaschinen eingesetzt. In diesem Zusammenhang wurde bereits 1987 von der englischen M G Bennett & Associates Ltd. eine FE-Modellierung des Tunnelvortriebs mit Hilfe der TBM vorgenommen, und zwar auf der Basis von ANSYS-Software und über ständigen Austausch von AutoCAD-Zeichnungen mit den TBM-Konstrukteuren von Robbins in Seattle, USA.⁵⁸

Intensiv eingesetzt wurden numerische Verfahren bei Planung und Bau des Channel Tunnel Rail Links, einer

108 km langen Schnellfahrstrecke, die London mit dem Channel Tunnel verbindet. Das Projekt gilt wegen des Einsatzes modernster Maschinen und wegen der kurzen Bauzeit als Vorzeigeprojekt des Tunnelbaus.⁵⁹ Unter anderen war als Bauunternehmen Hochtief beauftragt. Aufgefahren wurden die Tunnels zum Teil mit Herrenknecht Slurry Shield TBM (Schild-Tunnelbohrmaschinen mit Nassförderung) oder Erddruckschildmaschinen von Wirth, zum Teil in Sprengvortrieb und NATM. Bei der Planung der Tunnels fanden die Finite-Elemente-Software DIANA (von Displacement ANALyzer) und der zugehörige Pre-Post-Processor FEMGV der in Delft angesiedelten TNO DIANA BV⁶⁰ breite Verwendung. Ausführendes IT-Unternehmen war die Wilde FEA Ltd., ein Teil der Wilde Engineering Group und seit 1980 unabhängiger Dienstleister im Bereich industrieller Finite Element Analysis (FEA). Schon bei den nach NATM gebauten

Teilen des Channel Tunnel hatte man die Auskleidung mit Spritzbeton numerisch berechnet. Bei der Planung des CTRL 1999 war der FE-Spezialist Wilde FEA in der Lage, die verschiedenen Schritte der dort ebenfalls teilweise angewandten NATM im Rechner zu simulieren und die Spannungsverhältnisse im umgebenden Fels und die Dimensionierung und Stabilisierung mit Spritzbeton bildhaft graphisch darzustellen [Bild 10].⁶¹

Eine Domäne der FEM ist aber nicht nur der Bau im Fels, sondern der Bau im eigentlichen Gebirge. Eines der grossen österreichischen Projekte der vergangenen Jahre war der Strenger-Tunnel im Zuge der S 16 Arlberg Schnellstrasse, fertiggestellt im Juni 2006. Gebaut wurde der rund 6 km lange Tunnel in Arbeitsgemeinschaft von der Alpine Bau GmbH, geplant von der ILF, Consulting Engineers Lässer-Feizlmayr, in Innsbruck. Wegen der komplizierten

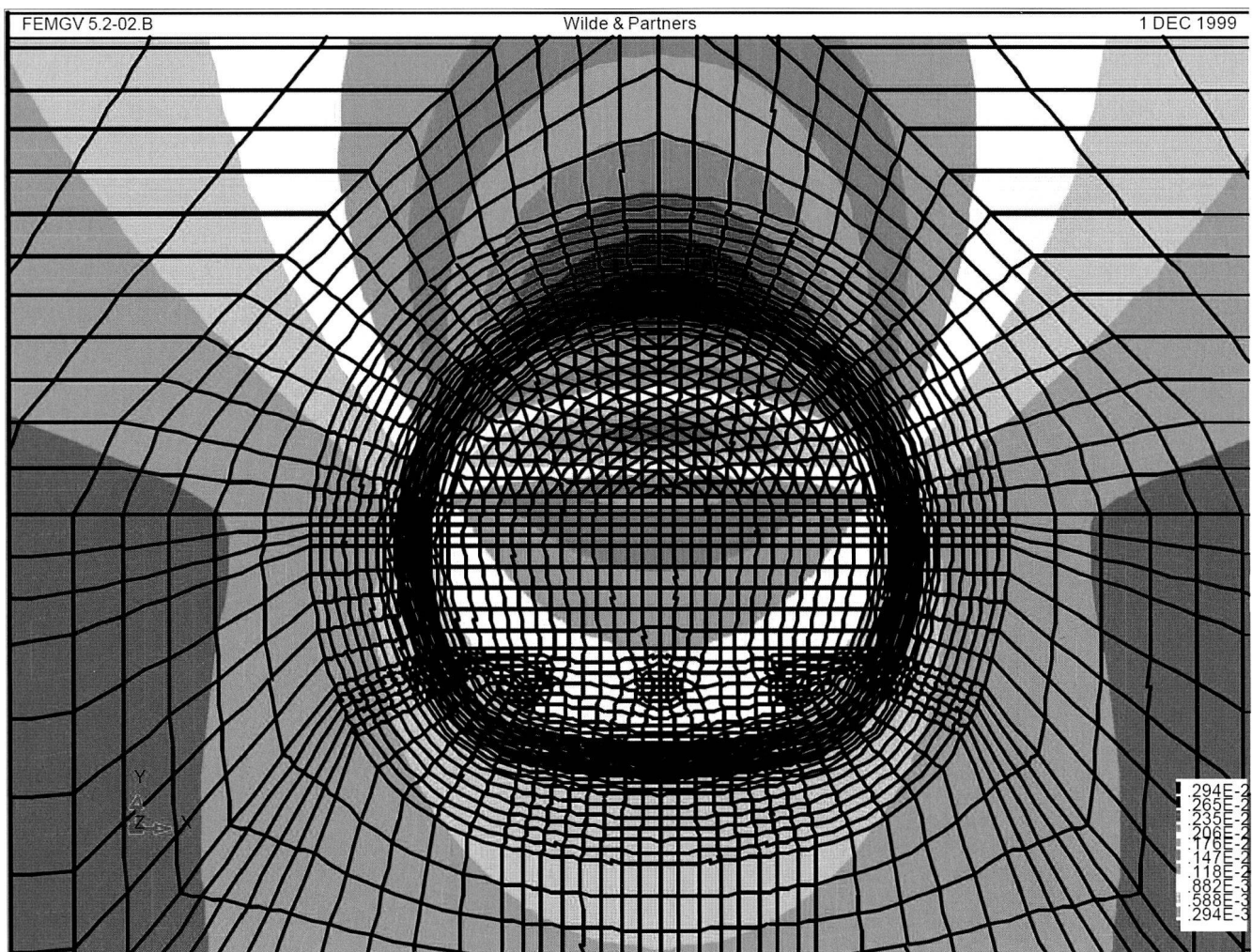


Bild 10: CTRL; Vortrieb eines Tunnels und Spannungsdeformationen der Ortsbrust, Wilde FEA, 1999.⁶²

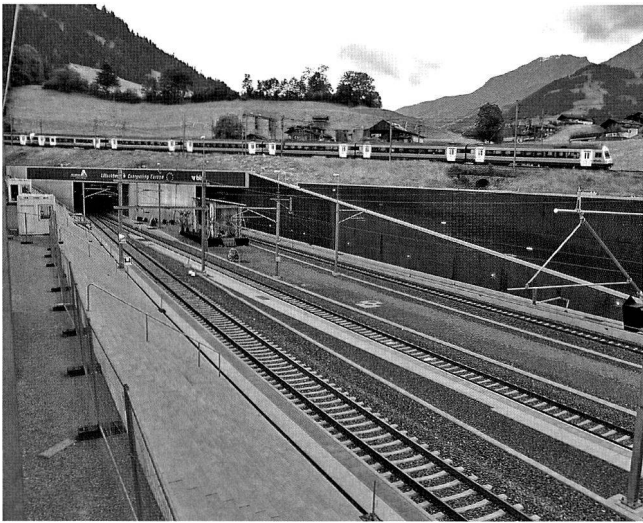


Bild 11: Nordportal des Lötschberg-Basistunnels in Frutigen, Unterquerung der BLS-Bergstrecke. (Foto: AlpTransit Gotthard AG)⁷⁰

geologischen Verhältnisse im Eingangsbereich West führte die ILF zur Festlegung des Vortriebs- und Ausbaukonzepts umfangreiche numerische Untersuchungen durch, und zwar unter Nutzung des Rechenprogramms Roclab von Rocscience. Danach mussten in punkto Dimensionierung vor allem Gegenmassnahmen gegen die errechneten extrem starken Spannungsdeformationen beim Kalottenausbruch (einschliesslich einer starken Hebung der Kalottensohle) sowie gegen ein Versagen der Anker ergriffen werden.⁶³

Der Lötschberg-Basistunnel

Mit der Neuen Eisenbahn-Alpentransversale NEAT und ihren zentralen Elementen, nämlich Lötschberg- und Gotthard-Basistunnel, sollen abschliessend schweizerische Grossprojekte genauer betrachtet werden. Der 34,6 km lange Lötschberg-Basistunnel, gebaut seit Juli 1999 und im Jahr 2006 mit Testfahrten eingeweiht, erlebte in Planungs- und Ausführungsphase ebenfalls vielfache Untersuchungen mit der Finite-Elemente-Methode.⁶⁴ Der Tunnel wurde ursprünglich mit zwei parallelen eingleisigen Eisenbahntunnels sowie einem Fensterstollen konzipiert, aus Sicherheitsgründen sollten die Röhren im Abstand von 333 Metern mit Querschlägen verbunden werden. Realisiert war bei der Eröffnung 2007 lediglich eine voll ausgebaute Doppelröhre von rund 14 km. Bauherr war die BLS AlpTransit AG in Thun. Wie üblich war der Bau in verschiedene Lose eingeteilt, wobei etwa das Baulos Steg–Raron von der Ed. Züblin AG in Arbeitsgemeinschaft ausgeführt wurde. Die Vortriebe erfolgten zu 20 Prozent mit TBM und zu 80 Prozent im konventionellen Sprengvortrieb.

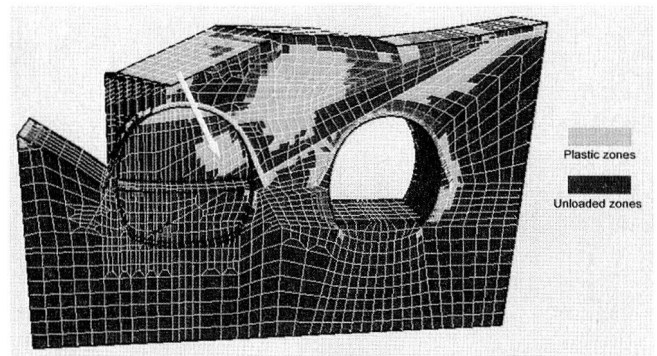
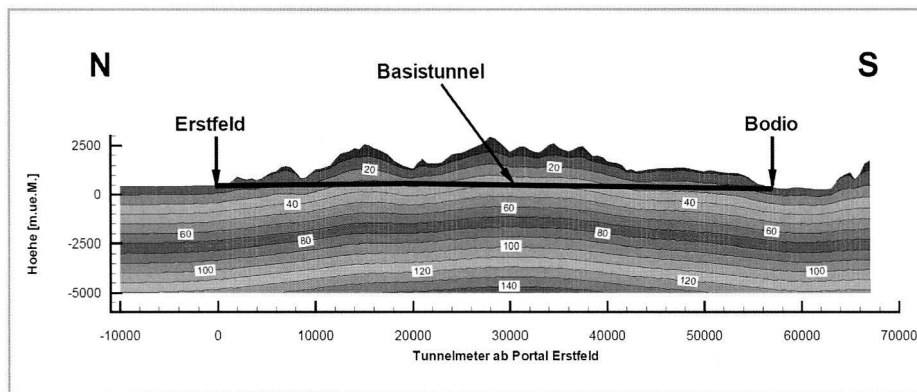


Bild 12: Dreidimensionale FE-Modellierung der Umgebung des Nordportals des Lötschberg-Basistunnels, lokal plastische Zonen in der Ortsbrust des Osttunnels, Emch + Berger AG, Bern. (Grafik: Straumann/Roggli/Ziegler)⁷¹

Wichtige theoretische Studien⁶⁵ wurden 1995 von der Ingenieurgemeinschaft Westschweiz (IGWS) in Brig durchgeführt, insbesondere von der Schneller Ritz und Partner AG in Brig.⁶⁶ Für die Evaluierung und Lokalisierung von Zonen mit dem Risiko von Niederbrüchen bzw. Felsablosungen wandte die IGWS⁶⁷ in der Anfangsphase folgendes Verfahren an: Mit Hilfe eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells, das auf der Topographischen Karte der Schweiz mit 200-m-Höhenlinien basierte, wurden zunächst die natürlichen Spannungsverhältnisse im Gebirge untersucht. Dann wurden die Ergebnisse der numerischen Modellierung mit Hydrofraktur-Experimenten an Bohrlöchern verglichen. Letztere erlauben das Messen lokaler Spannungen im Fels. Die Retroanalyse von Felsablosungen im existierenden Lötschbergtunnel und Vergleiche mit anderen Tunneln mit Felsablosungsproblemen, wie etwa dem Montblanc-Tunnel, führten schliesslich zu einer Einteilung in unterschiedliche Risikozonen.

Die beim TBM-Vortrieb in Steg tatsächlich aufgetretenen Probleme mit Felsablosungen blieben wegen des Schildes der TBM ohne Folgen für Menschen und Material. Sie konnten mit hochwertigen Standardverfahren gemeistert werden, ohne dass etwa zu faserverstärktem Spritzbeton und anderen Massnahmen gegriffen werden musste. Allerdings beauftragte die BLS AlpTransit AG nach den spannungsbedingten Felsablosungen im Baulos Steg die EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) sowie Peter K. Kaiser (Laurentian University, Sudbury Ontario, Canada) mit ergänzenden Studien. Dabei wurden in situ Messungen der horizontalen Spannungen und Labortests an Bohrkernen durchgeführt, ausserdem wurden Vortrieb und Ortsbrust in einem dreidimensionalen FE-Modell erfasst. In



dieses Modell gingen der natürliche Spannungszustand des Gebirges, die aktuellen theoretischen Vorstellungen zum Verhalten von brüchigem Gestein, der Temperaturanstieg sowie sämtliche Beobachtungen ein, die bis dahin im Lötschberg-Basistunnel gemacht worden waren. Damit standen für den weiteren Vortrieb des Lötschberg-Basistunnels und für zukünftige Tunnelbauprojekte Vorhersagen maximaler lokaler Versagenstiefen zur Verfügung, die gleichzeitig in guter Übereinstimmung mit den im Lötschberg-Basistunnel gemessenen Werten standen.⁶⁸

Ein besonders schwieriges Problem bot das Nordportal in Frutigen. Hier unterquert der Lötschberg-Basistunnel mit seinen beiden Einspurröhren die bestehende Transitachse der BLS-Bergstrecke in einem schiefen Winkel von rund 45 Grad.⁶⁹ Die Überdeckung war hier in umgekehrter Richtung problematisch, nämlich nur fünf Meter. Senkungen waren deshalb nicht zu tolerieren. Die Bauaufgabe war also insofern schwierig, als eine komplexe Geologie, die schiefe Bausituation und der laufende Bahnbetrieb der BLS zu bewältigen waren (Bild 11 und 12).

Mit Hilfe der FEM konnten allerdings drohende Verformungen der Ortsbrust, die Reaktion des Felspfeylers zwischen den beiden Tunnelröhren und die Ausbildung plastischer Zonen bestimmt werden. Ausgehend von dieser grundlegenden FE-Modellierung konnte ein Ausführungskonzept erstellt und der Bauablauf in allen Einzelheiten simuliert werden. Diese grundlegende Planung wurde von den Berner Unternehmen Emch + Berger sowie Kellerhals + Haefeli durchgeführt.

Der Gotthard-Basistunnel

Das eigentliche Jahrhundertwerk der NEAT ist jedoch der Gotthard-Basistunnel. In Einklang mit den bisherigen Ausführungen, nachdem die relevante aktuelle Nutzung der FEM nicht global ausgerichtet ist, sondern abgegrenzte, wohldefinierte Probleme zum Inhalt hat und zudem eine enge Rückkopplung mit empirischen Befunden sucht, sollen

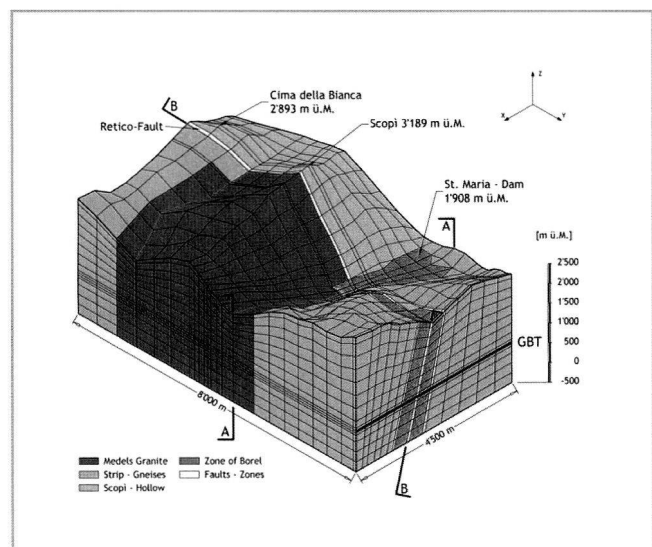


Bild 14: FE-Analyse von Stausee Sontga Maria und Gotthard-Basis-tunnel durch die Lombardi SA. (Grafik: Lombardi)⁷⁸

konkrete Beispiele im Zusammenhang mit dem Gotthard-Basistunnel am Ende stehen: die Piora-Mulde, das Staudamm-Problem, eine Retroanalyse aufgrund einer durchfahrenen Störzone sowie die Simulation einer Gripper-TBM.

Zunächst zur problematischen Geologie der Piora-Mulde: Die Piora-Zone wird, neben anderen Gesteinsformationen wie dem Aar-Gotthard-Massiv, vom zukünftigen Gotthard-Basistunnel durchquert. Die Befürchtung war, dass wasserführende «zuckerkörnige» Dolomite bis auf Tunnelniveau herunterreichen. Fährt man solche stark wasserführende Zonen unvorbereitet an, muss mit grossen Schäden an Personen und Material gerechnet werden. Wegen ihrer starken Kaltwasserzirkulation kündigen sich jedoch solche Zonen – wie beim Bau des Simplon-Basistunnels geschehen – in Form einer deutlichen Abkühlung des sie umgebenden Gesteins an. Mit geothermischen Methoden lassen sich also die Störungszonen vorauserkunden.⁷⁴

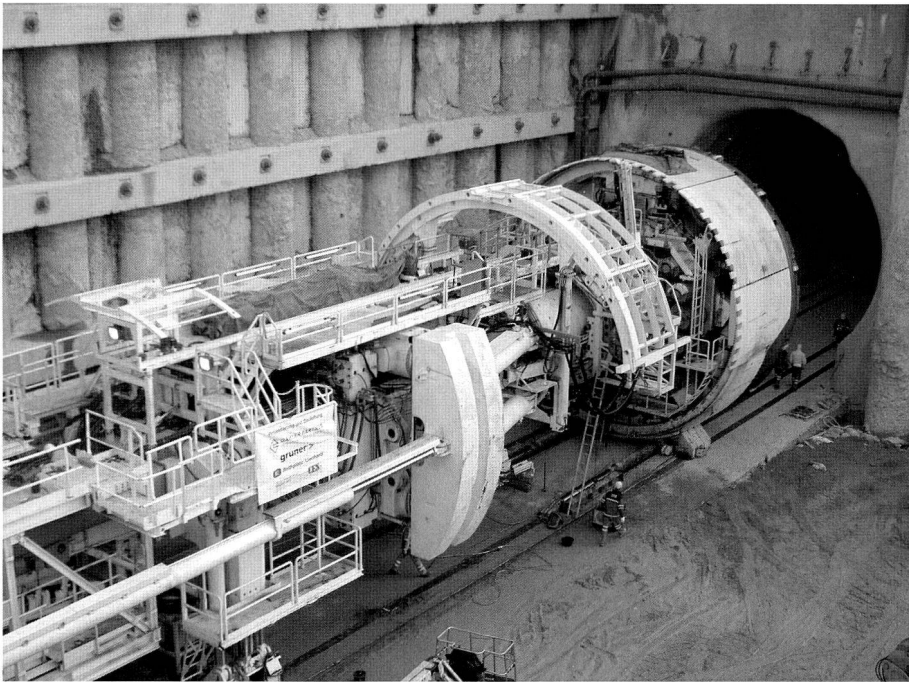


Bild 15: Tunnelbohrmaschine wird zur Startröhre vorgeschoben, Erstfeld, 29. November 2007. (Foto: AlpTransit Gotthard AG)

Umfangreiche im Piora-Sondiersystem durchgeführte Temperaturmessungen haben den Abkühlungseffekt zwar deutlich gezeigt. Zur genaueren hydraulisch-thermischen Untersuchung des beobachteten Phänomens wurde auch mit dem am Institut für Geophysik der ETH Zürich entwickelten Programm FRACTure ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell der Piora-Zone erstellt. Das Modell umfasste mit einer Ausdehnung von rund 75 x 15 x 50 km den gesamten Gotthard-Basistunnel, es besass eine Feinheit von nahezu 200 000 Elementen. Dabei wurden Einflüsse von Topographie, fliessenden Gebirgswässern, Klimaschwankungen, Hebungen und Erosion berücksichtigt. Mit dieser numerischen Simulation konnte die Ausprägung der Piora-Zone in der Tat besser verstanden werden und zum Beispiel die Südgrenze der Zone innerhalb von 100 m geortet werden (Bild 13).

Allerdings haben die Erkundungsbohrungen aus dem Piora-Sondiersystem die Befürchtung weitgehend zerstreut, dass der zuckerkörnige Dolomit auf Tunnelniveau wassergesättigt ist und als «schwimmendes Gebirge» vorliegt. Nach wie vor gilt die Piora-Mulde jedoch als komplexer geologischer Bereich, der noch zu überwinden ist. In jedem Fall können die FE-gestützten geothermischen Methoden zur Dimensionierung der Be- und Entlüftung des Tunnels eingesetzt werden.⁷⁴

Eine ernsthafte FEM-Anwendung am Gotthard, die bereits massive Konsequenzen hat, galt der Frage, ob die Talsperren entlang der Neuen Eisenbahn-Alpentransversalen durch Senkungen zufolge des Tunnelbaus gefährdet

werden. Man war hier hoch sensibilisiert durch die unerwartete Fernwirkung (1,5 km) des Rawyl-Erkundungsstollens auf die 1957 in Betrieb genommene Barrage de Zeuzier, eine Bogenstaumauer bei Sion. 1978 hatte die Dammkrone plötzlich markante Verschiebungen gezeigt, ausserdem wurden schwere und sanierungsbedürftige Schäden im Damm festgestellt. Zudem war synchron zu den Bewegungen des Damms vermehrt Wasser in den Rawyl-Erkundungsstollen eingeströmt.⁷⁵ Vor allem beim Gotthard-Basistunnel schien deshalb eine sorgfältige Untersuchung angezeigt, befinden sich doch in seiner unmittelbaren Nähe eine Reihe von Stauseen, insbesondere Lai da Sontga Maria, Lai da Nalps und Lai da Curnera.

Die Engineeringfirma Giovanni Lombardi aus Minusio hat sich – zum Teil gestützt auf FE-Analysen – intensiv mit der möglichen Wechselwirkung von Staudamm, geologischen Formationen und Tunnel auseinandergesetzt und vorsichtige Risikoabschätzungen gemacht.⁷⁶ Zum Minimalprogramm einer Risikoabwehr gehören demnach Vorauserkundungen während des Tunnelvortriebes, Festlegung von Interventionsgrenzen, die beim Überschreiten eine Abdichtung des Tunnels verlangen, sowie ein enges Monitoring der Staudämme (Bild 14).⁷⁷

Trotz günstiger geologischer Prognosen für das Baulos Bodio wurden mit dem Vortrieb des Gotthard-Basistunnels eine ganze Reihe von Störzonen angefahren, die Niederbrüche auslösten und eine Gefährdung des weiteren TBM-Vortriebs befürchten liessen.⁷⁹ Eine solche Störzone mit Niederbrüchen wurde – gemessen ab Südportal Bodio – bei

Tunnelmeter 2500 m bis 2700 Meter erreicht (in der Literatur als Störzone «Tm 2705» bezeichnet). Etwa bei Tunnelmeter 13400 bis 14400 traf der TBM-Vortrieb auf zwei weitere nicht prognostizierte nachbrüchige Störzonen (in der Literatur als «Störzonenbereich ab Tm 13460» bezeichnet), die Niederbrüche, Verformungen der Ausbruchsicherung und in der Weströhre zu einem Verklemmen der TBM bei Tm 13692 zur Folge hatten. Ähnlich wie bei der Störzone «Tm 2.705» konnte die Sicherheit der Innenschale für den Störzonenbereich ab Tm 13460 nur mit einem bewehrten, mindestens 25 cm starken Innengewölbe und einer unbewehrten Sohle wiederhergestellt werden.

Zur Abschätzung der möglichen Belastungen auf die Innenschale infolge «druckhaftem Gebirgsverhalten» wurde eine Rückrechnung anhand eines Finite-Differenzen-Modells unter Berücksichtigung der beobachteten Verformungen und der ergriffenen Sicherungsmassnahmen durchgeführt. In das Modell gingen die seitlich des Tunnels liegende Störzone ein, die aufgrund der Schieferung des Gneises anisotropen Felseigenschaften sowie die gegenseitige Beeinflussung der beiden Tunnelröhren. Als empirischer Ausgangspunkt für die im Modell einzusetzenden felsmechanischen Kennwerte dienten die Resultate von triaxialen Druckversuchen. Diese wurden von der ETH Zürich an Kernproben durchgeführt, welche durch Kernbohrungen während des TBM-Stillstandes gewonnen wurden. Das Modell wurde dann auf der Basis der beobachteten Verformungen kalibriert, also eine typische Rückkopplung von empirischen Befunden in den theoretischen Ansatz durchgeführt. Unvermeidlich waren auch Nachprofilierungsarbeiten im Gesamtumfang von 900 Metern.

Eine der eindrucksvollen Systemkomponenten im maschinellen Tunnelbau beim Gotthard-Basistunnel sind die Tunnelbohrmaschinen. Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig und die Herrenknecht AG führten 2006 numerische Simulation eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM durch. Als zahlenmässige Basis dienten die geometrischen Abmessungen sowie die Material- und Untergrundkennwerte aus dem Einsatzbereich der Herrenberg Gripper-TBM am Südlos Bodio. Für die numerischen Berechnungen wurde das Finite-Differenzen-Programm FLAC3D von Itasca verwendet. Damit konnte der komplette Bauablauf einer Gripper-TBM abgebildet werden.⁸⁰ Das Ergebnis stellte insofern eine Absicherung des Tunnelvortriebs her, als die Belastung des Gebirges durch den Verspanndruck der Gripper lokal begrenzt sein sollte und wegen der frühzeitigen Umlagerung der Gebirgsspannungen die Spritzbetonschale nur sehr gering beansprucht werden sollte.

Schlussbemerkungen

Mit Blick auf die Verwendung nahe oder in der Praxis ist es der Befund des vorliegenden Aufsatzes, dass die FEM im Tunnelbau heute nicht global vorgeht, sondern immer in einer gewissen Selbstbeschränkung. Sie grenzt Probleme ein und versucht sie sauber zu definieren. Sie zielt oft auf Verhalten und Funktion einzelner abgrenzbarer Systemkomponenten, allerdings ohne Beschränkung der Dimensionen. Ausserdem greift sie vielfach zum Instrument der Retroanalyse. Kein Zweifel kann natürlich darüber bestehen, dass auch für die ingenieurwissenschaftliche Theoriebildung im Tunnelbau die Empirie die letzte und entscheidende Instanz darstellt. Und kaum ein anderer Aspekt demonstriert dies wiederum augenfälliger als die gigantischen Tunnelbohrmaschinen, die im Gotthard im Einsatz sind (Bild 15).

- ¹ Ray W. Clough, Edward L. Wilson, Early Finite Element Research at Berkeley, presented at the Fifth U.S. National Conference on Computational Mechanics, Aug. 4–6, 1999; vgl. http://www.ce.memphis.edu/7111/pdf_notes/class_notes/fe-history.pdf, S. 6.
- ² Klaus-Jürgen Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1982.
- ³ Klaus-Jürgen Bathe, Edward L. Wilson, Numerical Methods in finite element analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1976.
- ⁴ Chandrakant S. Desai, John F. Abel, Introduction to the finite element method, Van Nostrand, New York 1972.
- ⁵ Richard H. Gallagher, Finite-Element-Analysis, Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1976.
- ⁶ Olgiert C. Zienkiewicz, The finite element method, McGraw-Hill, London 1977.
- ⁷ Clough, Wilson [wie Anm. 6], S. 6 f.
- ⁸ Clough, Wilson [wie Anm. 6], S. 8 f.
- ⁹ Clough, Wilson [wie Anm. 6], S. 15.
- ¹⁰ Ray W. Clough, Jerome M. Raphael, Computed Rock Stresses Around an Underground Powerhouse, American Society of Civil Engineers (ASCE), Structural Engineering Conference, San Francisco, 1963. So zitiert in Clough, Wilson [wie Anm. 6], S. 29.
- ¹¹ Walter Wittke, Felsmechanik. Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984, S. 251.
- ¹² Gyan N. Pande, Numerical modelling of rocks. Possibilities and problems, in: Walter Wittke (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics Aachen 1979, Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 4, A. A. Balkema, Rotterdam 1980, S. 1341–1356.
- ¹³ Giancarlo Gioda, and Gunter Swoboda, Developments and applications of the numerical analysis of tunnels in continuous media, in: International journal for numerical and analytical methods in geomechanics (Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.), Vol. 23, 1999, S. 1393–1405.
- ¹⁴ Ulrich Smolczyk et al., Die Anwendung der Methode der Finiten-Elemente in der Grundbaupraxis: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie; Projekt Rechnerunterstütztes Entwickeln und Konstruieren, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Univ. Stuttgart, im Verlag der Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe 1974.
- ¹⁵ Leopold Müller-Salzburg, Der Felsbau. Dritter Band: Tunnelbau, Enke, Stuttgart 1978, S. 164, 260; Hellfried Malina, The numerical Determination of stresses and deformations in rock taking account discontinuities, in: Rock Mechanics, Vol. 2, 1970, S. 1–16; Manfred Baudendistel, Hellfried Malina, Leopold Müller-Salzburg, Einfluss von Diskontinuitäten auf die Spannungen und Deformationen in der Umgebung einer Tunnelröhre, in: Rock Mechanics, Vol. 2, 1970, S. 17–40.
- ¹⁶ Walter Wittke, Manfred Wallner und Walter Rodatz, Räumliche Berechnung der Standsicherheit von Hohlräumen, Böschungen und Gründungen in anisotropem, klüftigem Gebirge nach der Methode der finiten-Elemente, in: Strasse Brücke Tunnel, 24, 1972, S. 200–209.
- ¹⁷ Walter Wittke and Peter Rissler, Dimensioning of the Lining of Underground Openings in Swelling Rock Applying the Finite Element Method, in: Walter Wittke (Ed.), Publications of the Institute for Foundation Engineering, Soil Mechanics, Rock mechanics and Water Way Construction (Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau), RWTH Aachen, Vol. 2, 1976, S. 7–48.
- ¹⁸ Wittke [wie Anm. 11], S. 995–1002.
- ¹⁹ Wittke [wie Anm. 11], S. 995–1002.
- ²⁰ Stephan Semprich, Berechnung der Spannungen und Verformungen im Bereich der Ortsbrust von Tunnelbauwerken im Fels, Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 8, 1980; Berndt Pierau, Tunnelbemessung unter Berücksichtigung der räumlichen Spannungs-Verformungszustände an der Ortsbrust, Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 9, 1981.
- ²¹ Semprich [wie Anm. 20], S. 168 f.
- ²² M. Müller, Numerical design method for tunnel structures of the Budapest underground railways, in: Walter Wittke (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics Aachen 1979, Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 2, A. A. Balkema, Rotterdam 1979, S. 571–580.
- ²³ Leopold Müller-Salzburg, Der Felsbau. Dritter Band: Tunnelbau, Enke, Stuttgart 1978, S. 186.
- ²⁴ Gunter Swoboda, Finite element analysis of the new Austrian tunneling method (NATM), in: Walter Wittke (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics, Aachen 1979, Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 2, A.A. Balkema, Rotterdam 1979, S. 581–586.
- ²⁵ Swoboda [wie Anm. 24]; Rainer Wanninger, New Austrian tunneling method and finite elements, in: Walter Wittke (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics Aachen 1979, Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 2, A. A. Balkema, Rotterdam 1979, S. 587–597.
- ²⁶ Swoboda [wie Anm. 24], S. 585.
- ²⁷ Iguchi Yasuo, Estimation of Temperature in Seikan Tunnel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B, Vol. 51, No. 471, 1985, S. 3786–3789.
- ²⁸ T. Adachi, Y. Mochida, T. Tamura, Tunneling in fully-saturated soft sedimentary rocks, in: Walter Wittke (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics Aachen 1979, Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 2, A.A. Balkema, Rotterdam 1979, S. 599–610; Katsushi Miura, Design and construction of mountain tunnels in Japan, in: Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, Issues 2–3, April–June 2003, S. 115–126.
- ²⁹ Klaus-Jürgen Bathe, Edward L. Wilson, Fred E. Peterson, Walter Wunderlich, SAP IV – Beschreibung und Benutzerhandbuch. Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Nr. 75–14, 1975.
- ³⁰ Klaus-Jürgen Bathe, Edward L. Wilson, Fred E. Peterson, SAP IV, A structural analysis program for static and dynamic response of linear systems. A report to the National Science Foundation, College of Engineering, University of California, Berkeley, June 1973, revised April 1974, Titelblatt.
- ³¹ Bathe, Wilson, Peterson [wie Anm. 30], S. 40 f.
- ³² Wittke [wie Anm. 11], S. 312–317; vgl. auch Walter Wittke, Manfred Wallner und Walter Rodatz, Räumliche Berechnung der Standsicherheit von Hohlräumen, Böschungen und Gründungen in anisotropem, klüftigem Gebirge nach der Methode der finiten

- Elemente, in: Strasse – Brücke – Tunnel, Jg. 24, 1972, S. 200–209.
- ³³ Peter Fritz, Numerische Erfassung Rheologischer Probleme in der Felsmechanik, Institut für Strassen-, Eisenbahn- und Felsbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 47, zugleich Ingenieurwiss. Diss. ETH Zürich, April 1981.
- ³⁴ Peter Fritz, RHEO – STAUB, User Manual, A Finite Element Program for Geotechnical Engineering with Rheological Material Behavior; Institut für Geotechnik, Institute for Geotechnical Engineering, ETH Zürich, vgl. <http://www.igt.ethz.ch/>, Stand Oktober 2000.
- ³⁵ Smolczyk et al. [wie Anm. 14], S. 137.
- ³⁶ Smolczyk et al. [wie Anm. 14], S. 121–161.
- ³⁷ Heinrich Werner, Klaus Axhausen, Casimir Katz, Techniques in user oriented finite element programs for geomechanical design practice, in: Walter Wittke (Ed.), Numerical Methods in Geomechanics Aachen 1979, Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 1, A.A.Balkema, Rotterdam 1979, S. 103–111.
- ³⁸ Vgl. <http://user.tninet.se/~gha838e/links.htm>
- ³⁹ Vgl. <http://www.zace.com/ZSOILshow.pps>.
- ⁴⁰ ANSYS wurde von John Swanson entwickelt; er gründete daraufhin die Firma Swanson Analysis Systems Inc./SASI, heute Ansys Inc.
- ⁴¹ Teja Vittinghoff, Bernd Plassmann, Jürgen Schmitt, Programmentwicklungen im ANSYS-Open-System für Anwendungen in der Geotechnik, Tagungsband des 15. CAD-FEM User's Meeting, 15.–17. Oktober 1997, Fulda, Herausgeber: CAD-FEM Grafing b. München, 1997, Teil 1–30, S. 1–17.
- ⁴² Gerd Gudehus (Ed.), Finite Elements in Geomechanics, Wiley, London, New York, Sydney, Toronto 1977, Vorwort.
- ⁴³ Richard H. Gallagher, Accuracy in Data Input and in Stress Calculations, in: Gerd Gudehus (Ed.), Finite Elements in Geomechanics, Wiley, London, New York, Sydney, Toronto 1977, S. 513–528.
- ⁴⁴ Hermann Schad, Computing costs for FEM analysis of foundation engineering problems and possible ways of increasing efficiency, International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol 9, 1985, S. 261–275.
- ⁴⁵ M. Karaku & Robert J. Fowell, An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM), KAYAMEK_2004–VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu / ROCKMEK_2004–VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas, Türkiye; vgl. <http://web.inonu.edu.tr/~mkarakus/pdf/Insight%20into%20the%20New%20Austrian%20Tunneling%20Method.pdf>
- ⁴⁶ Ganesh R. Dasari, C. G. Rawlings, Malcolm D. Bolton, Numerical modelling of a NATM tunnel construction in London clay, in: Proceedings, International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London, 1996, Edited by R. J. Mair, R. N. Taylor, A. A. Balkema, Rotterdam 1996, S. 491–496.
- ⁴⁷ Wei Wu and Peter Owen Rooney, The role of numerical analysis in tunnel design, in Dimitrios Kolymbas (Ed.), Tunneling Mechanics, Eurosummerschool, Innsbruck 2001, zugleich Advances in Geotechnical Engineering and Tunneling, Vol. 5, S. 87–168, hier Seite 157.
- ⁴⁸ Wu, Rooney [wie Anm. 47].
- ⁴⁹ Vgl. <http://www.scoss.org.uk/publications/report/report16/display.asp?CID=41>.
- ⁵⁰ Wu, Rooney [wie Anm. 47].
- ⁵¹ Alan Muir Wood, Ahead of the face, The 2004 Harding Lecture, British Tunneling Society At The Institution of Civil Engineers; vgl. http://www.tunnelonline.info/Journals/Tunnels/Tunnels_and_Tunnelling/July_2007/attachments/04%20Harding%20Lecture_AMWood.pdf
- ⁵² Kalman Kovári, Erroneous Concepts behind NATM, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Lecture given at the Rabcewicz-Geomechanical Colloquium in Salzburg, October 14, 1993, vgl. <http://www.igt.ethz.ch/resources/publications/26/papers/6/93-10.pdf>; Kalman Kovári, Rezension von: Dimitrios Kolymbas, Geotechnik – Tunnelbau und Tunnelmechanik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1998, und Alan Muir Wood, Tunneling Management by design, E. & F. N. Spon, London and New York 2000; vgl. http://www.uibk.ac.at/geotechnik/publ/kovari_d.pdf. Vgl. auch Gerd Gudehus, Karlsruhe, gegen Kalman Kovári Rezension des Buchs «Geotechnik – Tunnelbau und Tunnelmechanik» von Dimitrios Kolymbas, vgl. http://www.uibk.ac.at/geotechnik/publ/gu2kovari_deutsch.pdf
- ⁵³ Thomas Marcher, Franz Starjakob, Helmut Lutz, Martin Sotek, Comparison of Excavation Methods – ADECO-RS versus NATM, in: Felsbau, Rock and Soil Engineering, Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau, 22. Jg., Heft 4, 2004, Seite 38–46.
- ⁵⁴ Vgl. <http://www.igb.tu-bs.de/veroeff/cadfem03.pdf>. Jürgen Schmitt, Maik Fritsch, Christian Kuhn, Joachim Stahlmann, Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Einfluss der stofflichen Modellierung auf die numerische Simulation eines Schildvortriebs, 21st CAD-FEM Users' Meeting 2003 November 12–14, 2003; International Congress on FEM Technology, Potsdam.
- ⁵⁵ Thomas Kasper, Finite Elemente Simulation maschineller Tunnelvortriebe in wassergesättigtem Lockergestein, Ingenieurwiss. Diss. Ruhr-Universität Bochum 2004, S. 7–9.
- ⁵⁶ Stahlmann [wie Anm. 54].
- ⁵⁷ Rudolf Pöttler, Kling Consult GmbH, Krumbach, Technical Note on practical applications. Three-Dimensional Modelling of Junctions at the Channel Tunnel Project, in: International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics, Vol. 16, 1992, S. 683–695.
- ⁵⁸ Vgl. <http://www.bennett-mg.co.uk/pdf/ChannelTunnel.pdf>.
- ⁵⁹ Vgl. http://www.tunnels-online.info/Journals/Tunnels/Tunnels_and_Tunnelling/July_2007/attachments/04%20Harding%20Lecture_AMWood.pdf
- ⁶⁰ Vgl. <http://www.tnodiana.com>
- ⁶¹ Vgl. http://www.wildefea.co.uk/download/case/12/wildefea007_tunnel.pdf.
- ⁶² Vgl. http://www.wildefea.co.uk/download/case/12/wildefea007_tunnel.pdf; Figure 5.
- ⁶³ Max John, Daniel Spöndlin und Bruno Mattle, Lösung schwieriger Planungsaufgaben für den Strenger Tunnel, Felsbau, Rock and Soil Engineering, Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau, Jg. 22, Heft 1, 2004, S. 18–24; vgl. http://www.ilf.com/fileadmin/user_upload/publikationen/23_Lösung_schwieriger_Planungsaufgaben_f_r_den_Strenger_Tunnel_01.pdf.
- ⁶⁴ Ulrich Straumann, Christof Roggli, Hans-Jakob Ziegler, Lötschberg Base Tunnel – Passing under the BLS Mountain Railway Line at Frutigen, in: Felsbau, Rock and Soil Engineering, Fachzeitschrift für Ingenieurgeologie, Geomechanik und Tunnelbau, 22. Jg., 2004, Heft 4, S.31–36.

- ⁶⁵ François Vuilleumier, Markus Aeschbach, The Lötschberg Base Tunnel – Lessons Learned From The Construction Of The Tunnel; 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, Seminário Internacional South American Tunnelling; vgl. <http://www.ita-aites.org/cms/fileadmin/filemounts/general/pdf/ItaAssociation/ProductAndPublication/ConfPapersExCo/78.PDF>.
- ⁶⁶ Markus Aeschbach (Schneller Ritz und Partner), Lötschberg Basistunnel, The Lötschberg Base Tunnel – Connecting Europe, Fachtagung Alpintransit Schweiz, Juni 2002; vgl. <http://www.srp.ch/de/referenzen/publikationen/referate/0252-03-004-MA.pdf>.
- ⁶⁷ Fabrice Rojat, Vincent Labiouse, François Descoedres, Peter K. Kaiser, Lötschberg base tunnel: brittle failure phenomena encountered during excavation of the Steg lateral adit; ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003, vgl. <http://www.saimm.co.za/events/0309isrm/downloads/0973-Rojat.pdf>, S. 973–976.
- ⁶⁸ Schneller Ritz & Partner AG, The Lötschberg Base Tunnel – Connecting Europe, Fachtagung Alpintransit Schweiz, vgl. <http://www.srp.ch/de/referenzen/publikationen/referate/0252-03-004-MA.pdf>; Fabrice Rojat et al. (wie Anm. 67), S. 973–976.
- ⁶⁹ Straumann, Roggli, Ziegler (wie Anm. 64), S. 31–36.
- ⁷⁰ Vgl. http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Alptransit_LBT_Frutigen_north_portal.jpg.
- ⁷¹ Straumann, Roggli, Ziegler (wie Anm. 64), hier S. 36, Bild 9.
- ⁷² Andreas Busslinger, Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel, Diss. ETH Nr. 12715, Zürich, 1998; Andreas Busslinger, Thomas Kohl und Ladislaus Rybach, Geothermische Prognose im Tunnelbau; http://www.geothermie.de/geothermie_ch/nr30/geothermische_prognosen_im_tunne.htm; Andreas Busslinger, Thomas Kohl und Ladislaus Rybach, Geothermische Prognose im Tunnelbau, Bulletin Geothermie CH, Nr. 30, Juni 2001, S. 5–8.
- ⁷³ Busslinger, 1998 (wie Anm. 72), S. 22.
- ⁷⁴ Andreas Busslinger, Thomas Kohl, Ladislaus Rybach, Institute of Geophysics, ETH Zurich, Numerical procedure to investigate geothermal conditions and processes in complex 3D Alpine settings, GOCAD ENSG Conference, 3D Modeling of Natural Objects: A Challenge for the 2000's, 4–5 June 1998; vgl. http://www.gtr.ethz.ch/FormerMember_WWW/Busslinger/nancy.html.
- ⁷⁵ Giovanni Lombardi, Case Histories of Concrete Dams [Structural Cracks], Structural Safety Assessment of Dams, CISM International Centre for Mechanical Sciences Udine, Italy, CISM – Udine 14th December 2004, Lombardo Engineering, Ref: 102.1–R–166 / 5.48, vgl. <http://www.lombardi.ch/publications/pdfviewer.php?ID=95>; 19 Seiten.
- ⁷⁶ Lombardi (wie Anm. 75); Roger Bremen, Oberflächensetzungen als Folge von Tunnelbauten in grosser Tiefe, Stand der heutigen Erkenntnisse; AlpTransit Schweiz, Luzern, 22–23 Juni 2005; Lombardi AG, Ref.: 102.1–R–170 B / 12.47; vgl. <http://www.lombardi.ch/publications/pdfviewer.php?ID=228>, 13 Seiten.
- ⁷⁷ Die Schneider Ingenieure AG erhielt vom Bundesamt für Wasser und Geologie den Auftrag zur erweiterten Überwachung der drei grossen Talsperren Sta. Maria, Nalps und Curnera der Kraftwerke Vorderrhein AG im Bündner Oberland.
- ⁷⁸ Lombardi (wie Anm. 75).
- ⁷⁹ Alessandro Ferrari, Davide Fabbri, Markus Sidler, Bewältigung von unerwarteten Störzonen beim TBM-Vortrieb im Gotthard-Basistunnel Baulos Bodio; BBT 2007 – Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken, Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck, Tagungsbeitrag 1. März 2007, Lombardi AG, Dokument u/Z: 102.2–R–180, Minusio, März 2007; vgl. <http://www.lombardi.ch/publications/pdfviewer.php?ID=427>.
- ⁸⁰ Jürgen Schmitt, Joachim Stahlmann, Jörg Gattermann, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig; Martin Herrenknecht, Ulrich Rehm, Herrenknecht AG, Schwanau-Allmannsweiler; Numerische Simulation eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM; vgl. <http://www.igb.tu-bs.de/veroeff/tae06.pdf>.