

Berücksichtigung des Kriechverhaltens bei einem hohen Auslastungsgrad des jungen Spritzbetons durch druckhaftes Gebirge in tiefliegenden Tunnels am Beispiel des Tauern-Tunnels

CONSIDERATION OF THE CREEP BEHAVIOR WITH A HIGH DEGREE OF UTILIZATION OF THE YOUNG SHOTCRETE DUE TO SWELLING GROUND FOR TUNNEL CONSTRUCTION AT GREAT DEPTHS - THE EXAMPLE OF THE TAUERN TUNNEL

Generaldir. Dipl.-Ing. Hans Pöchlhacker, Allgemeine Baugesellschaft A. PORR AG, Wien
Ing. Hans Jakoubek, Wien

Ohne die Erkenntnisse von Prof. Rabciewicz über die Verbundwirkung zwischen den verschiedenen Stützmaßnahmen und dem Gebirge hätte die Ausbildung von Schlitzten im Spritzbetongewölbe der druckhaften Strecken des Tauerntunnels niemand gewagt. Das auf Meßergebnisse gestützte Wissen um den Kräftefluß zwischen Ankerschwanz und Hohlraumrand sowie das Erkennen der rheologischen Eigenschaften des jungen Spritzbetons führte zwangsläufig zu der für damalige Begriffe sehr kühnen Bauweise. Die seither verbesserte Absicherung dieser Erkenntnisse durch Meß- und Rechenverfahren lassen die Weiterentwicklung der Bauverfahren für tiefliegende Tunnels, wie z. B. für den geplanten Brenner-Basistunnel, nach den Prinzipien der NÖT erkennen.

Without Prof. Rabciewicz's findings about the interaction of the various support measures and the rock mass, nobody would have dared to leave gaps in the shotcrete lining along the swelling ground sections of the Tauern Tunnel. Based on the knowledge about the flow of forces between the far end of the anchor and the excavation line derived from measuring results and about the rheological properties of the young shotcrete, it was only natural to apply this construction method - an extremely daring approach at that time. The more extensive knowledge we have nowadays, which is supported by measuring and computing methods, points to the development of methods for tunnel construction at great depths, e.g. the planned Brenner Base Tunnel, according to the principles of the New Austrian Tunneling Method.

Wenn man im Jahr 1990 auf den Tauerntunnel zurückgreift, der schon in den Jahren 1971 bis 1974 gebaut wurde, bedarf es einer gewissen Erklärung.

Der Grund liegt darin, daß tiefliegende Tunnels in den letzten 1 1/2 Jahrzehnten nicht allzu zahlreich gebaut wurden. Der zeitlich an den Tauern-tunnel anschließende Arlbergtunnel ist mit diesem organisatorisch so verzahnt und geologisch so ähnlich gewesen, daß er im Zusammenhang mit ihm zu betrachten ist. In jüngster Zeit war nur der Bau des Karawankentunnels ein Beispiel für einen Basistunnel mit hoher Überlagerung.

Dafür hat es eine sehr interessante Entwicklung

beim Bau verschiedener Tunnels im Rahmen der Hochleistungsstrecken der Deutschen Bundesbahn gegeben, in der Regel eher seicht liegende, mit durchaus z. T. geotechnisch sehr großen Schwierigkeiten, aber mit den typischen tiefliegenden Tunnels nicht vergleichbar. Daher wurde im Rahmen dieser Bauvorhaben ein Kompromiß zwischen den Prinzipien der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise und der deutschen Denkrichtung geschlossen. Der Bauherr stützte sich nicht nur auf das für die NÖT typische Prinzip der empirischen Bemessung, sondern versuchte, in Anlehnung an Genehmigungsverfahren, wie sie typisch für andere Bausparten sind, möglichst umfangreiche Vorbemessungen vorzunehm-

men. Zwangsläufig wurde dadurch die Bedeutung des Ankers beim Aufbau des Ausbauwiderstandes in sprödem und grobbankigem Buntsandstein anfänglich weniger betont und der Betonauskleidung, sei es in Form des Spritzbetongewölbes oder als endgültige Innenschale, ein größerer Anteil zugeordnet.

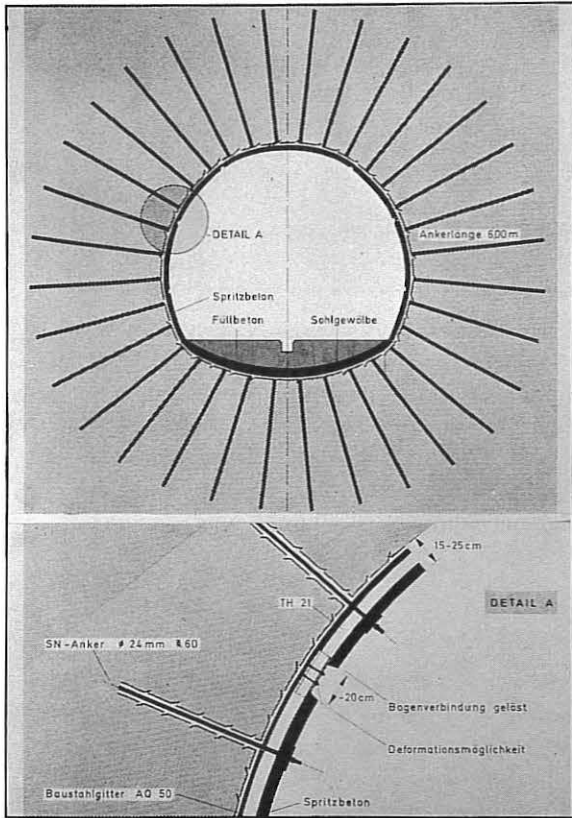


Bild 1: Verteilung der Deformationsfugen der Spritzbetonschale

Im Hinblick darauf, daß der stürmischen Entwicklung des Verkehrswesens durch die Einrichtung des europäischen Binnenmarktes und in jüngster Zeit durch die politische Entwicklung im Osten Rechnung getragen werden muß, wird es unter besonderer Berücksichtigung der Umweltsituation zu tiefliegenden Bahntunnelbauten kommen, wie z. B. beim Brenner oder beim Semmering. Nichts wäre verhängnisvoller für die zukünftige Entwicklung der NÖT, als wenn hier der Stellenwert der Ausbaumittel bei den geänderten geotechnischen Verhältnissen nicht richtig erfaßt werden würde. Ich möchte daher versuchen, die Rolle des Spritzbetons als eines der Stützmittel in deren Verbund aus der Sicht des Praktikers herauszuarbeiten und darauf hinzuweisen, daß der Geotechniker und der Betontechnologe dabei sehr eng zusammenarbeiten müssen.

Der erste, der dies ganz klar erkannt hatte, war

Prof. Rabcewicz, der die Größe hatte, die in der Planung für den Tauertunnel festgelegten Stützmaßnahmen und die Einschätzung des Gebirgsverhaltens total umzustellen, als die Natur dies erzwang. Daß sein spektakulärster Vorschlag, nach Auftreten enormer Gebirgsdrücke und entsprechender Verformungen das Spritzgewölbe durch achsparallele Fugen vorübergehend in Teilabschnitte aufzulösen, von den ausführenden Ingenieuren aufgegriffen und in die Tat umgesetzt werden konnte, war nur seiner Kompetenz und Überzeugungskraft zu verdanken. Sein aus viel Erfahrung und wenig Berechnung resultierendes Verständnis der Verbundwirkung zwischen den verschiedenen Stützmitteln in der zeitlichen Reihenfolge der verschiedenen Ausbruchsstadien war die Voraussetzung für diese in Wahrheit gar nicht so kühne Bauweise.

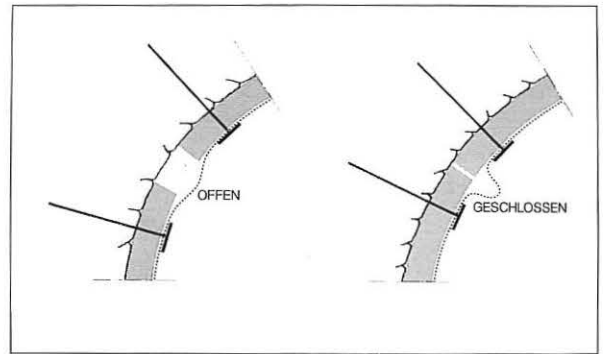


Bild 2: Schlitze im Spritzbeton

Mit der Denkweise, die viele Theoretiker auch heute noch besitzen und die auf dem Berechnungsmodell der gelochten Scheibe und der Darstellung des Ausbauwiderstandes als Innendruck in einem Rohr basiert, kam und kommt es zu falschen Berechnungen und als Folge dieser auch zur falschen Wahl der Stützmittel.

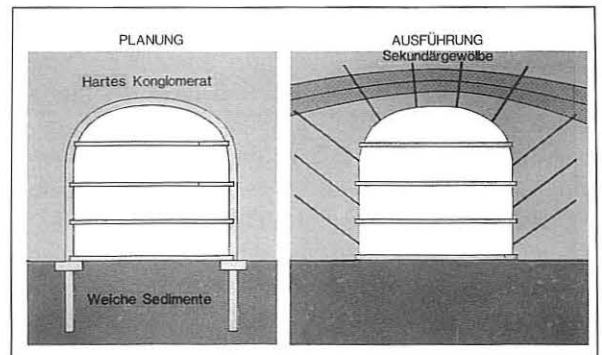


Bild 3: Garagenkaverne - Ausführungsvarianten

Als historisches Beispiel möge der erste Vor-

schlag über den Ausbau der Mönchsberg-Parkgaragen in Salzburg dienen, wo vermeintlich große Kräfte mit teuren Pfählen im Ulmenbereich abgeleitet werden sollten, obwohl in Wahrheit durch Ausbildung eines Traggewölbes über dem Hohlraum der Ulmenbereich fast spannungsfrei blieb. Dies erkannte Prof. Rabcewicz, der anstelle der aufwendigen Pfahlgründung eine elegante und preiswerte Ankerlösung vorschlug, die auch mit großem Erfolg ausgeführt wurde.

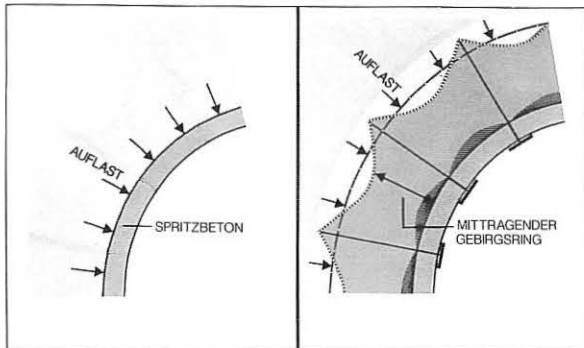


Bild 4: Lastangriff mit oder ohne Verbundwirkung

Die bisher üblichen Berechnungsmodelle, sei es nach der Bettungsmodultheorie, der Kontinuums- theorie oder der Ausbauwiderstandstheorie, versagen daher bei der quantitativen Abschätzung des Ausbauwiderstandes bei tiefliegenden Tunnels. Es kommt zu einer falschen Zuordnung des Anteils am Gesamtausbauwiderstand bei den einzelnen Stützmitteln in den verschiedenen Ausbruchphasen und damit u. a. auch zu einer nicht ganz richtigen Beurteilung der Spritzbetonbeanspruchung, vom ersten Kopfschutz bis zum Ringschluß des Spritzbetongewölbes nach Erreichen des Vollausbruchs. Die geringen Spannungen in den ersten Phasen werden vornehmlich auf die rheologischen Eigenschaften des jungen Spritzbetons zurückgeführt. Dies ist zwar grundsätzlich richtig; es wird jedoch der Anteil der Stützmittel Gebirge, Anker und Bogen am Ausbauwiderstand in diesen frühen Stadien weit unterschätzt, und damit auch die Tatsache, daß sie ein Schutzgewölbe über den Spritzbeton bilden und diesen entlasten.

In der Schriftenreihe "Straßenforschung" des Bundesministeriums für Bauten und Technik Nr. 124 und 133 haben die Professoren Feder und Seiber 1980 diesem Mangel Rechnung getragen. Diese Arbeiten blieben aber bisher wenig beachtet, da passende Tunnels in der Zeit seither nicht gebaut wurden.

Rabcewicz war hier schon Anfang der siebziger Jahre völlig problembewußt, wobei ich nochmals

darauf hinweisen möchte, daß diese Betrachtungen nur für tiefliegende Tunnels und hohen Gebirgsdruck, also für Fälle gilt, in denen hohe Verformungen zugelassen werden müssen. (Sogar der an sich spröde Buntsandstein könnte unter hohem Druck plastischer werden; offene Klüfte werden geschlossen.) Rabcewicz schwärmte von einem Ausbau, den er mit dem Begriff "Einkaufnetz" umschrieb, d. h. ihm hätte genügt, zwischen den Ankerköpfen eine Regelankerung zugfester Elemente sowohl in Tunnellängsrichtung als auch quer zu ihr netzartig anzuordnen, zwischen denen ein elastisches, hoch dehnbares Maschennetz als Kopfschutz genügt hätte.

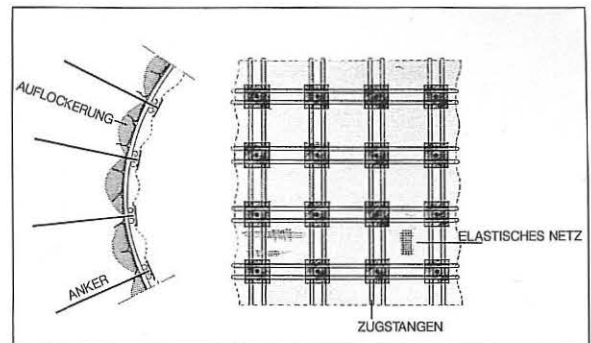


Bild 5: Ausbau ohne Spritzbeton

Dieses reine Gedankenmodell käme zwar zunächst ohne Spritzbeton aus, und es gelänge sicher, durch Verformungen den notwendigen Spannungsabbau sicherzustellen, ohne daß der Tunnel kollabiert. Nicht verhindert würde allerdings eine Entfestigung des Gebirges am Hohlraumrand zwischen den Ankerköpfen, und dies kann nach dem heutigen Stand der Technik am besten mit einer Spritzbetonschale erreicht werden, die in dieser frühen Phase allerdings primär als Kopfschutz und Oberflächenversiegelung dient und nur wenig zum Ausbauwiderstand beiträgt.

Die NÖT stellt hier eine erfolgreiche Gratwanderung dar, bei der soviel Verformung zugelassen wird, daß ein ausreichender Spannungsabbau möglich ist, die Verformungen andererseits aber so beschränkt werden, daß keine zu große Entfestigung eintritt. Sie nützt die Erkenntnis, daß beim Aufbau des Ausbauwiderstandes vom ersten Eingriff des Mineurs bis nach dem Ringschluß die verschiedenen Stützmittel einen zeitlich veränderlichen Anteil am Ausbau haben. Die Kunst besteht nur darin, zum richtigen Zeitpunkt das richtige Stützmittel einzubauen.

So wie z. B. im Brückenbau ist auch beim Bau tiefgelegener Tunnels in den erforderlichen Zwi-

schenbau-, sprich Montagestadien, eine völlig andere, meist viel kritischere Beanspruchung der Konstruktion gegeben als im Endstadium. Der Zusammenschluß zweier Brückenhälften und der Ringschluß im Tunnel sind durchaus vergleichbar. Die meisten Berechnungen gehen aber nur vom Endstadium aus und weisen daher dem Gebirge und dem Anker im Anfangsstadium eine zu geringe Bedeutung zu.

Rabcewicz ging so weit, zu behaupten, daß nach Fertigstellung des Innengewölbes alle anderen Stützmittel außer Funktion gesetzt werden könnten, bzw. daß sie nach Abschluß der Druckumlagerung ihre Funktion tatsächlich verlieren. Da er damit vor allem die Anker als reine Montagehilfen sah, beteiligte er sich auch nie an den endlosen Debatten anderer Experten, die auch für reine Vortriebsankerungen ewigen Korrosionsschutz verlangten.

Diese Erkenntnis ist typisch für Verhältnisse wie sie im Tauernstunnel angetroffen wurden: plastisches Gebirge mit sehr gleichmäßiger Druckverteilung. Bei extrem ungleichmäßiger Druckverteilung, z. B. im Bereich lokaler Störungen, können natürlich auch Injektionen und Anker als dauerhaft wirkende Stützmittel zusätzlich zum Innengewölbe notwendig werden.

STADIIUM	STÜTZMITTEL	GEBIRGE	ANKER	BOGEN	SPRITZBETON	INNENGEWÖLBE
I		●	■	▲		
II		■	●	■	▲	
III		▲	■	●	■	▲
IV			▲	■	●	■
V				▲	■	●

Bild 6: Tragmatrix

Aus dem Diagramm wird klar, daß die Schlitzte im Spritzbeton beim Tauernstunnel völlig gefahrlos angebracht werden konnten, weil dieser im ersten Stadium nur wenig tragen mußte. Die Zerstörung des Spritzbetons durch die notwendigen hohen Verformungen konnte durch die Anordnung der Schlitzte hintangehalten werden. Seine Aufgabe, nämlich das Zusammenhalten der aufgelockerten Zonen zwischen den Ankerköpfen, konnte er nun erfüllen.

Stadium I:

Die erste Lage des Spritzbetons ist hier vor allem

Kopfschutz. Es sind noch keine Schlitzte notwendig, weil keine schädlichen Beanspruchungen auftreten.

Stadium II:

Die ersten Schlitzte sind sinnvoll. Die Verformungen im Kämpferbereich werden größer. Der Anteil des Spritzbetongewölbes am Ausbauwiderstand ist aber noch gering.

Stadium III:

Die letzten Schlitzte am Ulm werden ausgebildet. Die oberen Schlitzte sind bereits kleiner oder fast geschlossen. Der Spritzbeton übernimmt sukzessive die Lasten.

Stadium IV:

Es kann mit dem Schließen der Schlitzte begonnen werden. Die komplette Wiederherstellung des Spritzbetongewölbes nach dem Sohlschluß ist aber vom Verformungsverlauf abhängig (evt. vorher Nachankerungen).

Stadium V:

Das Innengewölbe tritt voll in Funktion und bildet mit dem Spritzbetongewölbe eine steife Trageinheit.

Bei tiefliegenden Tunnels sollte daher der Spritzbeton im Verlauf der verschiedenen Phasen, also abhängig von Ort und Zeitpunkt seiner Applikation, verschiedene Aufgaben übernehmen und daher auch verschiedene Eigenschaften haben.

Die Berücksichtigung des Kriechverhaltens bei einem hohen Auslastungsgrad des jungen Spritzbetons durch druckhaftes Gebirge in tiefliegenden Tunnels muß daher im Licht des bisher Gesagten gesehen werden.

In diesem Zusammenhang möchte ich auf die hervorragende Arbeit des Arbeitskreises "Spritzbeton" hinweisen, in der ja folgerichtig drei Kategorien Spritzbeton unterschieden werden:

SpB I: ohne konstruktive Aufgaben

SpB II: mit vorübergehend konstruktiven Aufgaben

SpB III: mit dauernd konstruktiven Aufgaben

Untersuchungen haben gezeigt, daß für das Verhalten des jungen Spritzbetons der Auslastungsgrad sehr entscheidend ist. Bis 40 % tritt lineares Kriechen auf; bei sehr frühen kleinen Beschädigungen kann der Spritzbeton sogar noch "heilen". Beträgt der Auslastungsgrad aber mehr als 80 %, dann kommt es zu stark progressivem Kriechen mit Gefügestörungen.

1972 im Tauerntunnel wußten wir das nicht so exakt, aber grundsätzlich sehr wohl. Die Anordnung der Schlitzte hatte bei dem dort unvermeidlich hohen Auslastungsgrad nicht nur das Ziel, Zerstörungen, sondern auch zu starkes Kriechen zu vermeiden, um die Endfestigkeit nicht zu stark herabzusetzen.

Die richtige Einschätzung der notwendigen, aber auch hinreichenden Eigenschaften des jungen Spritzbetons hatte beim Tauerntunnel, in Abstimmung mit Prof. Rabcewicz, die Konsequenz, daß auf die in der Ausschreibung geforderte hohe Spritzbetonendfestigkeit im Kalottenbereich zugunsten einer höheren Anfangsfestigkeit verzichtet wurde. Wir träumten damals alle von einem Spritzbeton auf Kunststoffbasis mit relativ geringer Festigkeit und hohem Verformungsvermögen. Die Firma Hinteregger griff diesen Gedanken auf und forschte sehr viel in dieser Richtung. Mangels geeigneter Anwendungsfälle ist dieser Gedanke meines Wissens nicht baureif entwickelt worden. Im Hinblick auf die kommenden Aufgaben, wie z. B. beim Bau des Brenner Basistunnels, sollten aber durchaus in dieser Richtung wieder Überlegungen angestellt werden. Der Einsatz von Kunststoffasern im Spritzbeton weist in diese Richtung.

Gerade bei tiefliegenden Tunnels brauchen wir also verschiedene Arten von Spritzbeton. Die erste Qualität im Kalotten- und Kämpferbereich soll sich durch ihre Verformbarkeit auszeichnen und nicht unbedingt durch eine rasche Festigkeitssteigerung. Der Spritzbeton am Ulm und allfällige nachträgliche Ergänzungen, auch in der Kalotte, sollen rasch eine hohe Festigkeit erreichen. Besondere rheologische Eigenschaften sind nicht nur nicht notwendig, sondern sogar unerwünscht. Es wird also, wie schon beim Tauerntunnel und beim Arlbergtunnel, den "Vortriebsspritzbeton" geben und in ausreichendem Abstand folgend den "Auskleidungsspritzbeton". Der erstere wird immer tolerierbare Fehlherstellung aufweisen. Der zweite kann industriell mit kontrollierter Qualität von einem eigenen Gerüst aus im Vollprofil hergestellt werden. Zwei Fälle sind dabei grundsätzlich zu unterscheiden:

- ist der Spritzbeton auch endgültiger Ausbau, dann ist diese Auskleidungsfunktion statisch wichtig (einschaliger Ausbau);
- ist ein Innengewölbe vorgesehen und Gleichgewicht erreicht, dann degeneriert diese Auskleidung zu einer Ausgleichsschicht zwischen statisch wirksamem Spritzbeton und Isolierfolie (zweischaliger Ausbau).

Es bestehen also keine Bedenken, künftig Basistunnel auch bei extremen Verhältnissen mit der NÖT zügig und wirtschaftlich zu bauen. Es wäre aber sehr beruhigend, wenn vorher realistische Berechnungsmodelle unter Beachtung der aufgezeigten Ausbaustadien entwickelt werden. Der Schlüssel dafür ist die richtige Einschätzung des Überganges der Tragleistung von einem Element auf das andere unter Berücksichtigung des Verformungsverhaltens der verschiedenen Ausbauelemente:

Für tiefliegende Tunnel typisches GEBIRGE	fast ideal plastisch	VERFORMUNGEN SPANNUNGEN
ANKER	elastisch bis plastisch	
BOGEN und SPRITZBETON 1	elastisch (rheologisch)	
SPRITZBETON 2	steif	
INNENGEWÖLBE	sehr steif	

Bild 7: Verformungsverhalten der Stützmittel

Das bisher Gesagte soll anhand des Fenner-Pacher-Diagramms anschaulich werden:

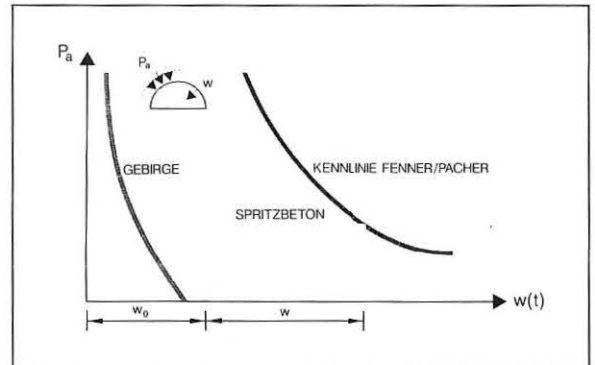


Bild 8: Fenner/Pacher-Kennlinie ohne Verbundwirkung

Auf keinen Fall darf in Zukunft bei der Berechnung vom gelochten zweidimensionalen Kontinuum mit einem bestimmten Druck am Lochrand ausgegangen werden. Entweder man überläßt die ersten Ausbaustadien, sprich Montagestadien, den Praktikern und verzichtet auf die rechnerische Erfassung, oder man simuliert besser als bisher die verschiedenen Übergangsstadien.

Ich möchte in diesem Zusammenhang aus dem Vortrag der Herren ROKAHR und LUX mit dem Thema "Einfluß des rheologischen Verhaltens des

Spritzbetons auf den Ausbauwiderstand", gehalten beim 34. Salzburger Geomechanik-Kolloquium 1985, zitieren:

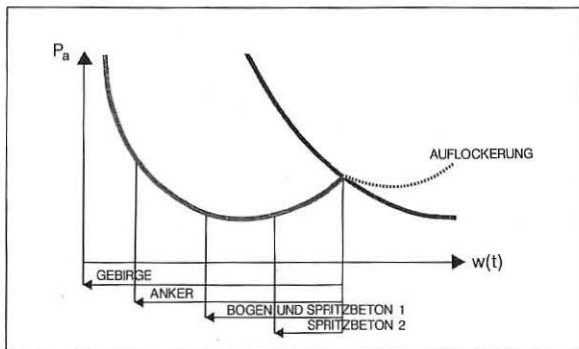


Bild 9: Fenner/Pacher-Kennlinie mit Verbundwirkung

"Veröffentlichte und eigene Erfahrungen aus der statischen Planung derartiger Bauwerke zeigen, daß vor allem bei tiefliegenden Tunnels im Fels trotz erfolgreicher Bauausführung nach der NÖT noch einige offene Fragen im Hinblick auf das Ver-

ständnis für die das Tragverhalten des Verbundsystems Gebirge - Ausbau bestimmenden Mechanismen bestehen. Diese Mechanismen werden zwar intuitiv bzw. über baubegleitende Messungen richtig erfaßt, ihre Umsetzung in statische Modelle ist jedoch weitgehend als noch unbefriedigend anzusehen. Dieses von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung her zu erarbeitende Verständnis ist aber Voraussetzung für die Entwicklung von allgemein anerkannten, vereinfachten Berechnungsansätzen, die dann der Tragwerksplanung zugrunde gelegt werden können."

Die Aussage dieser hervorragenden Arbeit ist also heute noch gültig. Die kompetenten Fachleute sind eingeladen, Berechnungsverfahren zu entwickeln, die quantitativ das ergeben, was die Praktiker seit Rabcewicz rein empirisch wissen. Dabei wird die wichtige Rolle der verschiedenen Spritzbetonarten als Teil des Ausbauverbundsystems endgültig bewiesen werden. Von diesem System lebt die NÖT, ohne deren Anwendung die großen und schwierigen Basistunnel der Zukunft weder wirtschaftlich noch mit ausreichender Sicherheit ausgebrochen werden können.

Vom Beitrag: Vavrovsky G., Schubert P.:

"Beobachtung des Kriechverhaltens von jungem Spritzbeton am Beispiel eines Messquerschittes im Langener Tunnel" ist keine schriftliche Fassung eingelangt. Einige Wortmeldungen zum Vortrag finden sich in den Diskussionsbeiträgen.