

Spritzbeton als Tunnelauskleidung

Autor(en): **Sala, Alex / Teichert, Pietro**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 24

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74821>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Spritzbeton als Tunnelauskleidung (Baulose 61 und 63)

Von Alex Sala, Zürich, und Pietro Teichert, Avegno

Der 15,4 km lange Furka-Basistunnel ist der längste Schmalspur-Eisenbahntunnel der Welt. Die Verbindung zwischen Oberwald und Realp (Vgl. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 24, 1982) dürfte auch der erste grössere Eisenbahntunnel sein, der *auf die ganze Länge nur mit Spritzbeton und Ankern* ausgekleidet worden ist. Der Furka-Basistunnel ist die *bislang grösste Spritzbetonbaustelle der Schweiz*; allein in den Baulosen 61 und 63 ist mehr Spritzbeton eingebaut worden als je anderswo in unserem Lande, nämlich 50 330 Kubikmeter Trockengemisch. Die besonderen Arbeitsumstände sowie die aussergewöhnliche Länge des Tunnels haben Probleme aufgeworfen, bei deren Lösung bemerkenswerte Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen wurden, die für künftige ähnliche Bauvorhaben nützlich sein können. Davon soll in diesem Aufsatz die Rede sein.

Ausbaukonzept

Jeder in einem Gebirge künstlich geschaffene Hohlraum stört im Fels den natürlichen Spannungszustand. Durch Umlagerung der Spannungen entstehen im Gebirge und am Ausbruchrand Deformationen, die im Extremfall zum Einsturz des Bauwerks führen können. Je nach den Felsverhältnissen dauert dieser Umlagerungs- und Verformungsvorgang Tage bis Jahre. Dessen Ausmass hängt vorwiegend von der Felsbeschaffenheit, der Überlagerung sowie der Profilform des Hohlraumes ab, aber auch von der Lage von Klüften und Schichtflächen.

Das ursprüngliche Projekt des Furka-Basistunnels sah ein felsmechanisch ungünstiges Hufeisenprofil und auf grossen Tunnelabschnitten keine Auskleidung vor. Entsprechend knapp wurde deshalb der Ausbruchquerschnitt festgelegt. Zwischen dem Lichtraumprofil der Bahn und dem Ausbruchrand plante man an der engsten Stelle im Kämpferbereich lediglich 16 Zentimeter Zwischenraum ein. Diese minimale Profilform weisen heute 12 585 Meter oder 82 Prozent der gesamten Tunnelänge auf. Das Profil der restlichen Strecke ist elliptisch oder kreisförmig.

Die steilgestellten, über grössere Strecken beinahe tunnelparallel verlaufenden Felschichten der Paragneise *knick-*

ten trotz temporären Felsicherungsmassnahmen in den Hohlraum aus und verengten den ohnehin knappen Querschnitt zusätzlich. Die *Granite* im mittleren Tunnelbereich, die an sich grosse Festigkeiten aufweisen, zeigten infolge der hohen Überlagerung *Bergschlag-Erscheinungen*. An den Tunnelwänden löste sich der Fels schalenförmig ab; die abgeschälten, teilweise bis zwei Meter hohen Granitplatten gefährdeten den Baubetrieb. Aus diesen Gründen wurde die *vollständige* Auskleidung des Furka-Basistunnels notwendig.

Die *häufig wechselnde Felsbeschaffenheit*, die *knappen Tunnelquerschnitte* sowie das *gedrängte Bauprogramm verlangten ein anpassungsfähiges, zweckmässiges und wirtschaftliches Auskleidungssystem*, das zudem einen jahrzehntelang sicheren Bahnbetrieb gewährleisten musste. Man entschied sich für den Ausbau (Auskleidung) mit Spritzbeton (Bild 1), weil sich geschalteter Ort beton dafür aus folgenden Gründen nicht eignete:

- Wegen des knappen Ausbruchquerschnittes und der nachträglichen Verformungen wären umfangreiche Nachprofilierungen notwendig gewesen, um die arbeitstechnisch bedingte Mindeststärke einer geschalteten Betonauskleidung zu gewährleisten.
- Für die Profilübergänge - etwa an den Enden der Doppelspurstrecken - wären komplizierte Schalungen notwendig gewesen.
- Das Abspriessen und Verstellen der Schalungen hätte den Verkehr auf dem einspurigen Baugleis stark behindert. In bestimmten Tunnelabschnitten hätte das Ortbetongewölbe sogar erst nach dem Durchschlag eingebaut werden können, was die Bauarbeiten verzögert und die Kosten erhöht hätte.
- Den geschalteten Beton einwandfrei zu fundieren wäre ungewöhnlich schwierig gewesen, da 3825 Meter der Tunneldrainage am Widerlagerfuss bereits fertiggestellt waren.

Diese Überlegungen führten dazu, den Tunnel ausschliesslich mit (stellenweise durch Armierungsnetze verstärktem) Spritzbeton und Ankern auszukleiden, wofür auch die folgenden Gründe sprachen:

- Die korrosionsbeständigen Felsanker bringen die teilweise noch jahrelang aktiven Gebirgsverformungen zum Stillstand und stabilisieren somit den

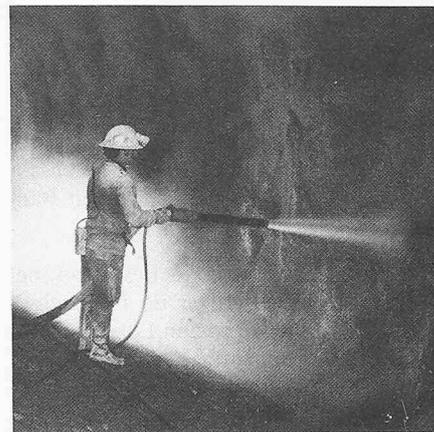


Bild 1. Düsenführer beim Auftrag von Spritzbeton am Parament

Hohlraum endgültig. Im gesamten Tunnelausbau wurden mit *Epoxid-Harz vollverklebte Anker* verwendet. Je nach Gebirgsverhältnissen bestehen die Ankerstangen aus glasfaserverstärkten Kunststoffrohren (GFK) oder aus Stahlrohren.

- Die Spritzbetonverkleidung verfestigt die Felsoberfläche, dient als Verwitterungsschutz und bei genügender Stärke auch als vollwirksamer Tragring. Die stützende Wirkung des Spritzbetons beruht auf seiner Haftung am Fels und darauf, dass er Spalten, Klüfte und gewisse Unebenheiten des Ausbruchrandes kompakt ausfüllt. Dies verhindert, dass sich gelöste Platten und Blöcke gegeneinander verschieben oder nachbrechen. Spritzbeton gleicht auch die kleineren Unregelmässigkeiten der Felsoberfläche aus und ergibt dank dessen eine günstigere Form des ausgebauten Querschnittes.
- Die *stellenweise doppelte Netzarmierung* erhöht die Tragfähigkeit der Spritzbetonverkleidung und verteilt zugleich die Ankerkräfte besser.

Die *Nachteile des geschalteten Betons sind die Vorteile des Spritzbetons*: Spritzbeton benötigt keine Schalung. Seine Stärke richtet sich nur nach felsmechanischen Bedürfnissen und konstruktiven Gesichtspunkten, wogegen bei der herkömmlichen Betonauskleidung ein Mindestabstand zwischen Schalung und Fels erforderlich ist, um den Beton fachgerecht einbringen zu können.

Spritzbeton muss das Überprofil in der Regel nicht ausfüllen, wodurch sich wesentliche Materialeinsparungen erzielen lassen.

Spritzbeton kann nötigenfalls nur auf Teilflächen und in variabler Stärke aufgetragen werden. Dies war besonders vorteilhaft, weil rund 45 Prozent des Tunnels nur am Parament ausgekleidet werden mussten; auf weiteren 55 Pro-

zent der Tunnellänge war es zur Stabilisierung des Hohlraums nötig, die gesamte Felsoberfläche über dem Schotterbett zu verkleiden.

Die Spritzbetonarbeiten behindern bei zweckmässiger Belüftung und geschickter Installationswahl den übrigen Baubetrieb kaum.

Obschon Spritzbeton je Festkubikmeter etwa zweimal teurer ist als geschalteter Beton, konnten in den Losen 61 und 63 durch Einsparungen an Ausbruch, Schalung, Material und Zeit gegenüber dem Ausbau mit Betongewölben ungefähr neun Millionen Franken gespart werden.

Allein für das Betongewölbe wären etwa 40 000 Festkubikmeter Beton zusätzlich einzubringen gewesen – bei einer mittleren Transportdistanz von 5200 Meter. Der Einbau eines geschalteten Betongewölbes hätte überdies die Bauzeit um schätzungsweise acht bis zehn Monate verlängert.

Überall dort, wo kein Unterstützungseinbau notwendig war, wurde Spritzbeton zusammen mit Felsankern im Brustbereich als erste Felssicherung verwendet, vor allem in den Losen 61 und 63. Dort allein sind 13 450 Kubikmeter Trockengemisch zur Vortriebsicherung verarbeitet worden. Für diesen Verwendungszweck ist der Spritzbeton besonders vorteilhaft, weil er den Fels unmittelbar hinter dem Vortrieb vollständig versiegelt und damit den Steinfall verhindert. Die Vortriebsmannschaft arbeitet im Schutz einer ersten Spritzbetonsicherung. Zudem verfestigt der Spritzbetonauftrag zusammen mit den Felsankern das Gebirge um den Hohlraum. Diese Stabilisierungsmassnahmen im Vortriebsbereich bilden bei der einschaligen Bauweise bereits einen bleibenden Bestandteil der endgültigen Auskleidung.

Weil er keiner Schalung bedarf und nicht auf der Tunnelsohle abgestützt werden muss, ist Spritzbeton schliesslich auch zur Verkleidung der meisten Strecken mit Stahleinbau gebraucht worden. Wegen der hier vorwiegend sehr knappen Profiltoleranzen kam dabei zustatten, dass man den Spritzbeton an den kritischen Punkten verhältnismässig dünn auftragen konnte.

Dass sich Spritzbeton der Auftragsfläche anpasst und nur gerade so dick als nötig aufgetragen wird, war auch in jenen Tunnelabschnitten von grossem Vorteil, die im Gewölbebereich nicht konsolidiert, sondern nur abgedichtet werden mussten, um die bekannten Schäden an Fahrdrabt und Geleise durch Vernänsungen und Tropfstellen zu vermeiden.

Ausbautypen

Massgebend für die Wahl der einzelnen Ausbautypen waren die *Felsverhältnisse*, die *Auflockerung*, die *Beanspruchungen der provisorischen ersten Felssicherung* sowie die aus dem Vortrieb bekannten Schwierigkeiten. Die flexible Spritzbeton-Bauweise erlaubte, die Ausbaumassnahmen bestmöglich den tatsächlichen Gebirgsbeanspruchungen anzupassen. So wurden beispielsweise in grossen Abschnitten des Hufeisenprofils nur die wegen vorwiegend parallel zur Tunnelachse streichender und steilgestellter Platten geschwächten Widerlagerbereiche, nicht aber das Gewölbe ausgekleidet.

Die Bestimmung der nötigen Ausbaumassnahmen sollte so einfach wie möglich sein. Deshalb hat man 16 standardisierte Ausbautypen festgelegt. Jeder Ausbautyp sah eine höchstzulässige Spritzbetonmenge vor. Der tatsächliche Trockengemischverbrauch wurde wöchentlich kontrolliert, so dass die Bauherrschaft ständig verfolgen konnte, ob sich der Aufwand im gesteckten Kostenrahmen bewegte.

Die normalen Ausbautypen für das Hufeisenprofil reichten vom minimalen Ausbautyp 1 mit lediglich 0,8 Kubikmeter Trockengemisch je Tunnelmeter bis zum maximalen Ausbautyp 4 mit höchstens 5,6 Kubikmeter Trockengemisch, 16 Quadratmeter Armierungsnetz und sechs Anker je Tunnelmeter (Bilder 2 und 3). Ausserdem gab es acht Zwischenlösungen mit unterschiedlichen Mengen von Spritzbeton, Netzen und Ankern. Für das Kreis- und das elliptische Profil im Los 63 galten die Ausbautypen 5 und 6 (Bilder 4 und 5).

Die Zuordnung der Ausbautypen erfolgte an Ort und Stelle in oft tagelangen Begehungen durch die Verantwortlichen gemeinsam mit der Unternehmung und der Bauherrschaft. Dabei galt der Grundsatz «soviel wie nötig, sowenig wie möglich»; oberstes Gebot war jedoch, den Tunnel für die Dauer möglichst betriebsicher auszubauen. Die Ausbauart wurde immer für je eine Tunnelseite festgelegt. Deshalb gibt es wegen der meist schräg verlaufenden Schichtung oft Tunnelstrecken, die rechts und links verschieden ausgekleidet sind. In besonders kritischen Tunnelpartien wurden unmittelbar nach dem Ausbruch Messquerschnitte mit Extensometern zur Konvergenzmessung eingerichtet. Die Messergebnisse erlaubten, die für den betreffenden Tunnelabschnitt geeigneten Sondermassnahmen (etwa zusätzliche Anker oder grössere Spritzbetonstärke) und deren rechtzeitige Ausführung festzulegen.

Der auf 749 Tunnelmeter versetzte Stahleinbau war dauerhaft vor Korrosion und weiteren Deformationen zu schützen. Dabei mussten die in diesen Abschnitten meist äusserst knappen Profilverhältnisse mitberücksichtigt werden. Um die höchstzulässige Ausbaustärke zu ermitteln, verwendete man das neuartige, von der Amberg Ingenieurbüro AG entwickelte elektronische Profil-Messgerät, das schon während der Aufnahme den Felsverlauf aufzeichnet. Alsdann konnte man den geeigneten Spezialausbau berechnen und festlegen. In einzelnen Fällen musste der vorhandene Stahleinbau teilweise oder ganz entfernt werden.

In den Losen 61 und 63 ergaben sich folgende *Ausbautypen-Anteile*:

Ausbautyp 1:	4921 Tunnelmeter	47%
Ausbautyp 2:	1561 Tunnelmeter	15%
Ausbautyp 3:	1259 Tunnelmeter	12%
Ausbautyp 4:	204 Tunnelmeter	2%
Ausbautyp 5:	514 Tunnelmeter	5%
Ausbautyp 6:	36 Tunnelmeter	1%
Spezialausbau:	1912 Tunnelmeter	18%

Der längste Tunnelabschnitt mit gleichbleibendem Ausbautyp misst 301 Tunnelmeter, der kürzeste zwei Tunnelmeter. Auf die 10 407 Meter lange Tunnelstrecke vom Portal Oberwald bis zur Grenze zwischen den Losen 63 und 62 entfallen nicht weniger als 502 *Ausbautypen-Wechsel*.

An den beiden Enden der nachträglich ausgebrochenen Doppelspurstrecke im Los 61, wo die grösste Querschnittsfläche bei einer Spannweite von immerhin 13 Meter 86 Quadratmeter beträgt, wurden besondere Felssicherungs- und Ausbaumassnahmen mit Systemanordnungen angeordnet. Auch hier erlaubte der flexible Spritzbetonausbau eine bestmögliche Anpassung der Verkleidungsstärke an die stetig wechselnden Profilform. Sogar der stark belastete Pfeiler von nur zwei Meter Stärke beidseits der Doppelspurstrecke konnte mit einer 25 Zentimeter starken Spritzbetonverkleidung rechtzeitig gesichert werden, so dass – nebst Ankerung und Armierungsnetzen – zusätzliche Sicherungsmassnahmen entfielen.

Die *Portalbereiche* waren nach Möglichkeit *frostsicher* auszukleiden. Dabei musste man die ungünstigen Gegebenheiten dieser Tunnelstrecken berücksichtigen, nämlich den Stahleinbau und den sehr knappen Profilquerschnitt. Das Hauptaugenmerk galt der *Abdichtung* des Tunnels. Durch ein geschicktes Anordnen der Vorabdichtungskanäle, der «Drains», – vor allem im Firstbereich – sowie durch deren einwandfreie Ableitung in die Haupt- oder Nebendrainage musste man verhindern, dass sich stehendes Wasser ansammelte. Dieses ist am gefährlichsten, da es beim

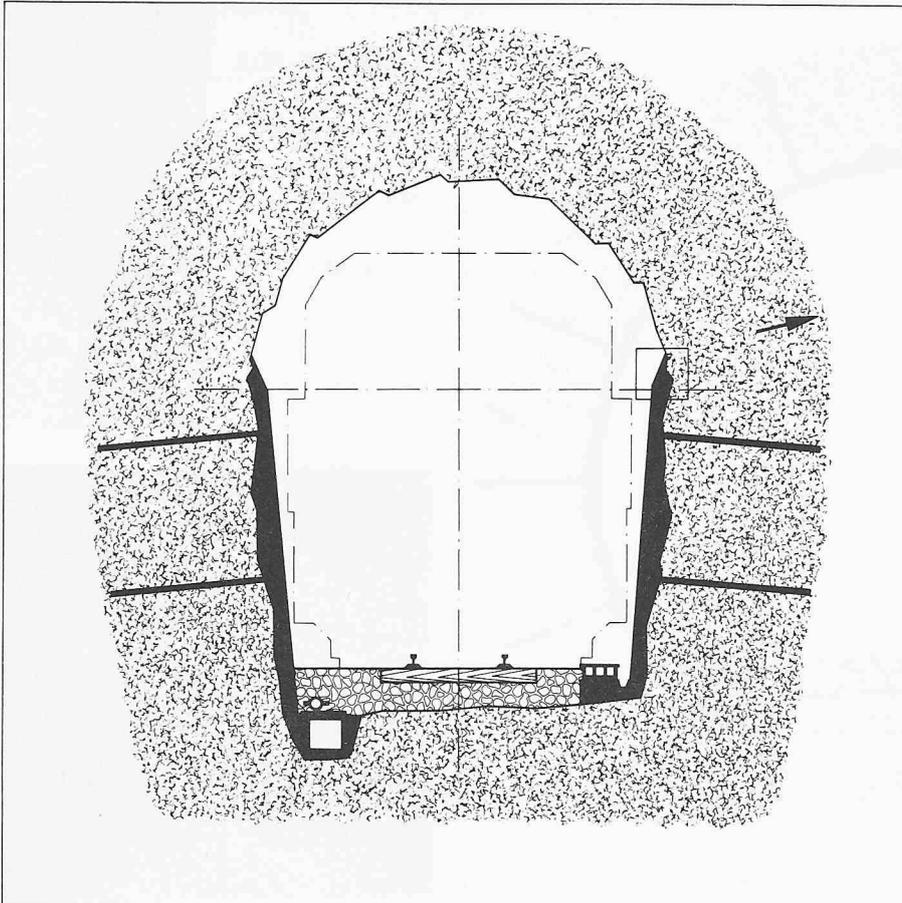


Bild 2. Ausbautyp 2

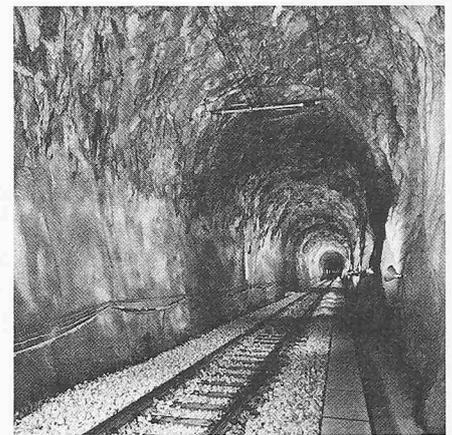
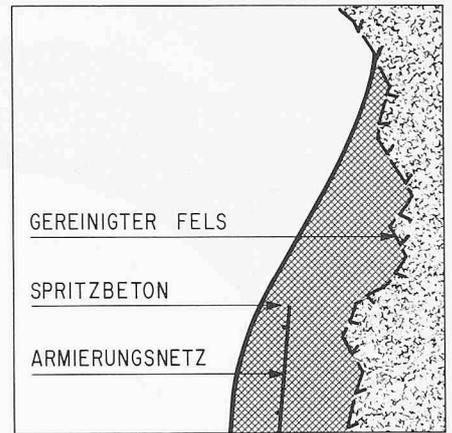
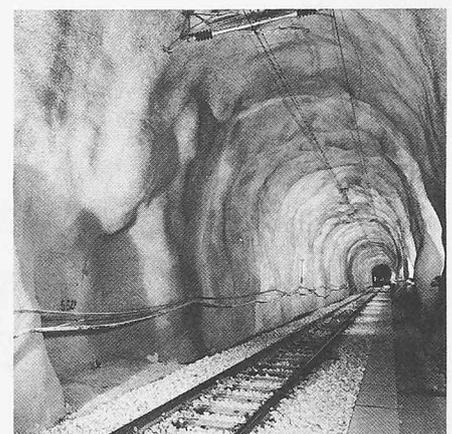
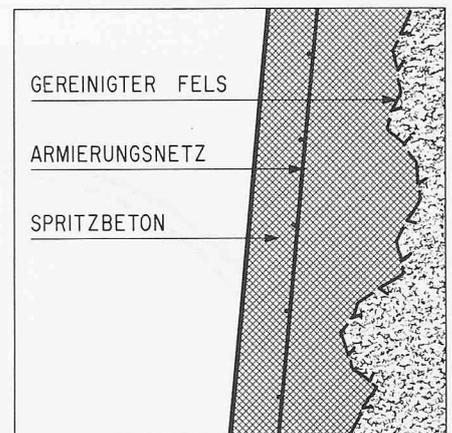
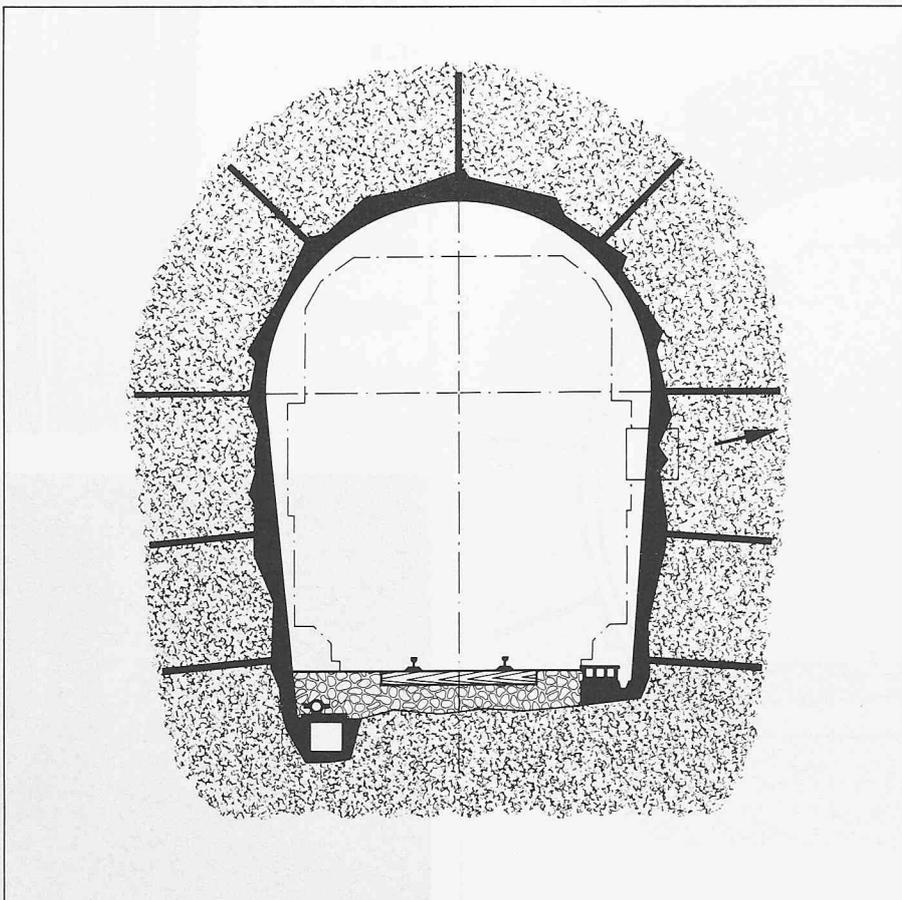


Bild 3. Ausbautyp 4



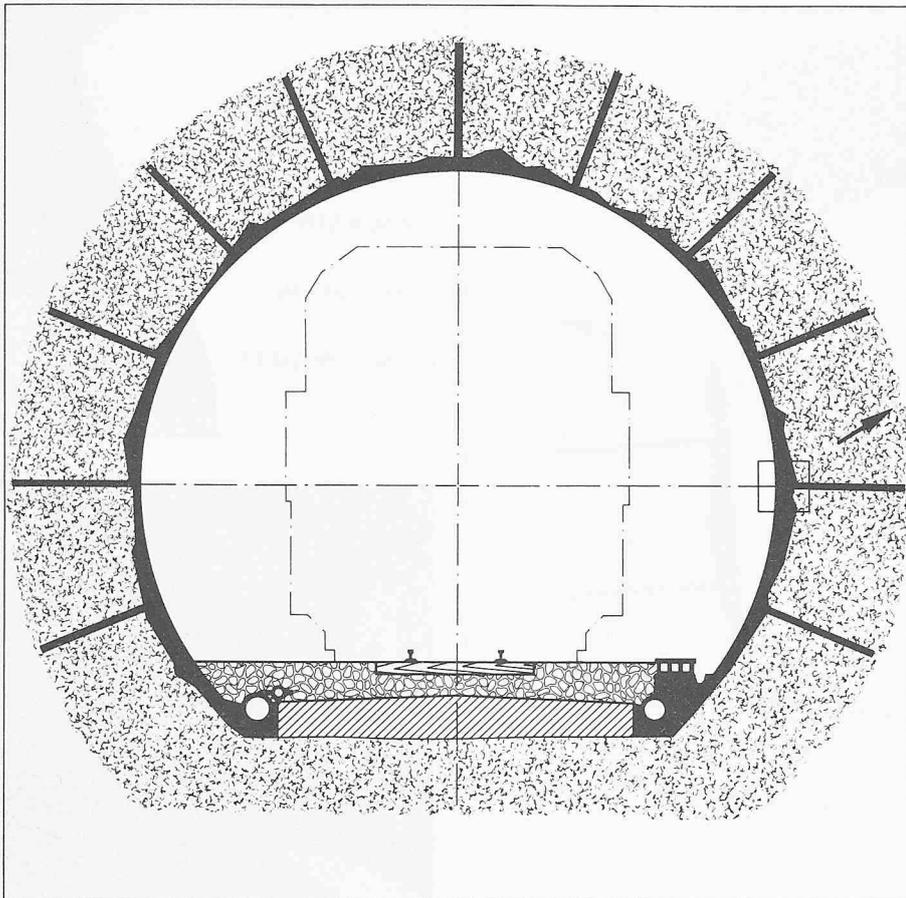


Bild 4. Ausbautyp 6

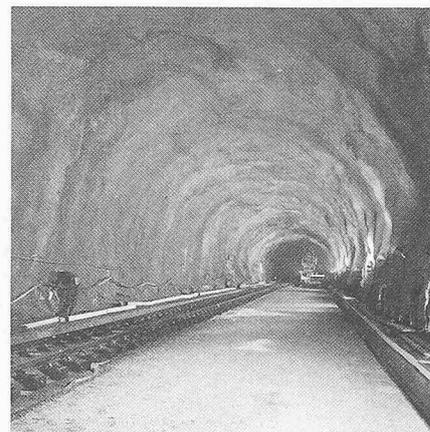
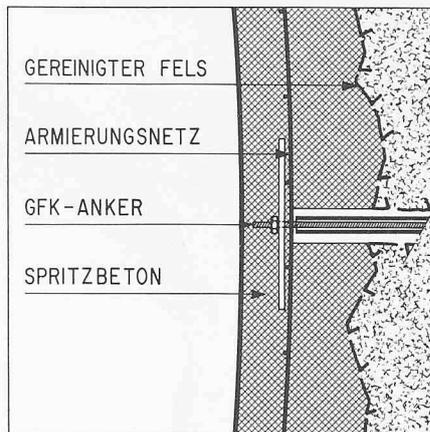
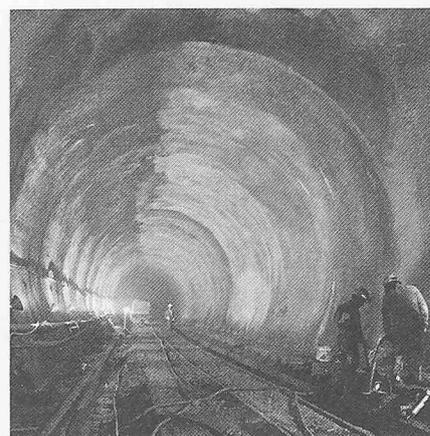
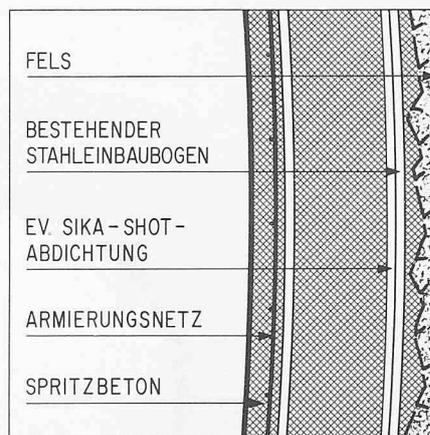
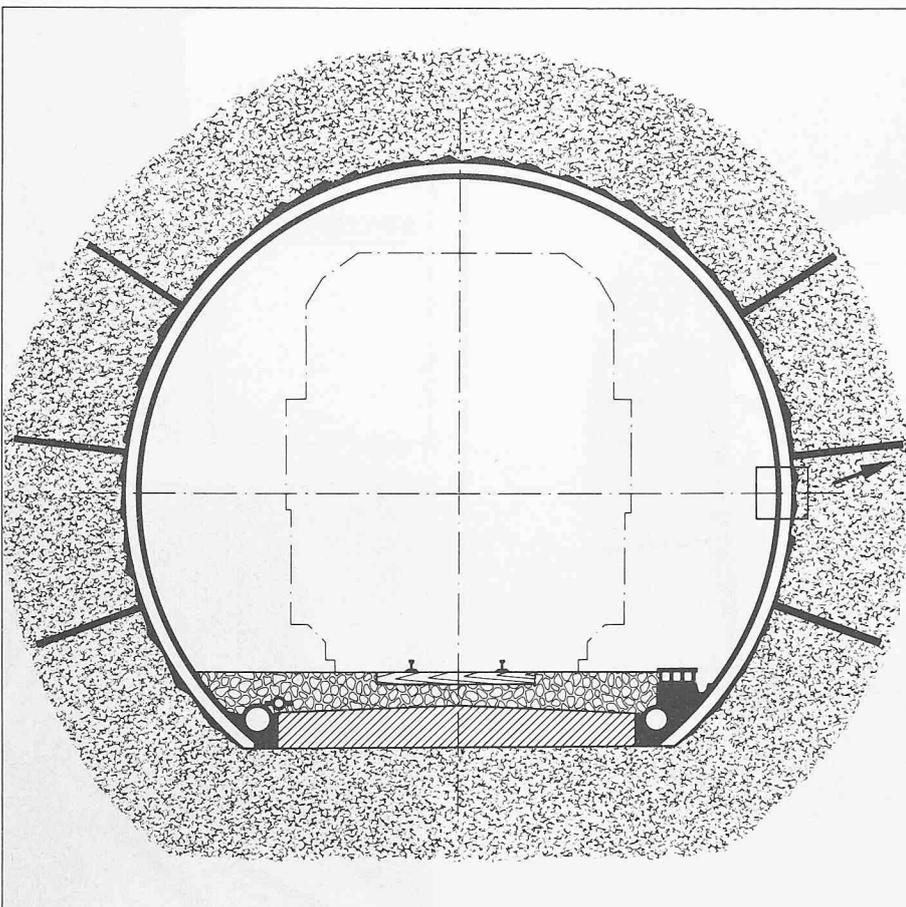


Bild 5. Spezialausbau



Gefrieren auch sehr starke Verkleidungen zu sprengen vermag. Um dem vorzubeugen, legte man in alle Drains einen *Kunststoffstreifen aus geschlossensporigem PVC-Schaum* ein. Durch Verformung übernimmt dieser die Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren.

Über den Drains wurde der Spritzbeton mit einem 50 Zentimeter breiten Streifen Armierungsnetz verstärkt.

Die verwirklichte Massnahme hat im Winter 1981/82 ihre erste Bewährungsprobe bestanden, und zwar unter besonders widrigen Voraussetzungen. Von Oberwald her wurde nämlich ständig kalte Aussenluft für die Ventilation in den Tunnel gesogen. Hingegen wird beim künftigen Bahnbetrieb die Auskühlung der Portalstrecken durch Tore verhindert, die sich in den Zugspausen automatisch schliessen.

Ausführung

Der ständig ändernde Ausbau sowie das Bauprogramm erforderten viel Anpassungsfähigkeit, um die anderen Arbeiten und den Bauverkehr so wenig wie möglich zu behindern. Das ergab trotz der Flexibilität des Spritzbetonverfahrens zahlreiche organisatorische Probleme.

Der *Ausbau* selbst gliederte sich in die folgenden *Arbeitsgänge* (Bild 6):

- Profilkontrolle und nötigenfalls «Profilierung» (Absprengen einragender Felsvorsprünge),
- Vordichtung,
- Auftrag des Spritzbetons zum Ausgleich der Klüfte und Spalten im Fels,
- Verlegen der Netzarmierung,
- Bohren der Ankerlöcher, Versetzen und Ausinjizieren der Felsanker,
- Auftrag des Spritzbetons zur Überdeckung von Netz und Ankern.

Ausserdem musste man *vor dem Ausbaubeginn* auf der einen Tunnelseite die *Rigole* (Drainagegraben) und auf der anderen Seite einen *Laufstreifen* für die fahrbaren Arbeitsgerüste erstellen. Zusätzliche Erschwerungen ergaben sich schliesslich daraus, dass sich zeitweise zwischen Portal Oberwald und der Losgrenze drei verschiedene Spritzbetonbaustellen befanden.

Im Furka-Basistunnel ist *an sechs Wochentagen in drei Schichten zu acht Stunden* gearbeitet worden. Für den Ausbau mit Spritzbeton und Ankern standen in der Regel die beiden Schichten von 06.00 bis 14.00 Uhr und von 14.00 bis 22.00 Uhr zur Verfügung. Die

Nachtschicht von 22.00 bis 06.00 Uhr diente meist dazu, das Rückprallgut zu beseitigen.

Die aussergewöhnliche Länge des Tunnels und die Vielzahl der Baustellen erforderten von allen Ausführenden ein hohes Mass an gegenseitiger Rücksicht bei der Synchronisation der Arbeitsgänge. Am meisten wurde geleistet, wenn die einzelnen Arbeitsstellen zeitlich und räumlich soweit auseinanderlagen, dass dazwischen genügend Pufferraum war.

Zusätzliche Schwierigkeiten bereitete es, dass alle Baustellen vom gleichen Gleisstrang und von denselben Versorgungsleitungen für Druckluft, Wasser und elektrische Energie abhingen. Die überlangen Nachschub- und Entsorgungswege wirkten sich auf den Ausbau des Tunnels viel nachteiliger aus als auf dessen Vortrieb.

Vor dem Ausbau musste man das Profil des Tunnelquerschnitts mit Lasern und, wo nötig, mit dem bereits erwähnten Profil-Messgerät prüfen. Alsdann mussten streckenweise in das Lichtraumprofil einragende Felsvorsprünge abgesprengt werden (Profilierung). Da man sich bewusst war, dass die Wirksamkeit der Spritzbeton-Auskleidung wesentlich von der Haftung am Fels abhängt, hat man dessen Säuberung mit Druckwasser besondere Beachtung geschenkt. Der Verbund zwischen Spritzbeton und Fels ist an Bohrkernen geprüft worden.

Nach der Reinigung wurden die mit Spritzbeton zu beschichtenden Felsflächen vorgedichtet, indem man alle Wasseraustritte, die das fachgerechte Aufbringen und Erhärten des Spritzbetons hätten beeinträchtigen können, entweder verdrängte oder fasste und ableitete. Anfangs verwendete man dafür die herkömmlichen Drains, das heisst mit schnellbindendem Mörtel von Hand angemauerte längshalbierte Rohre aus Kunststoff und Eternit (Bild 7). In den Baulosen 61 und 63 des Furka-Basistunnels benützte man sogenannte *Drainagerinnen aus drahtarmierter Plastikfolie* der Firma Aliva AG und pulverförmigen Schnellbinder der Firma Meynadier & Cie AG. Später, als die vorzdichtenden Felsflächen ein Ausmass erreicht hatten, das mit dem Handverfahren nicht mehr innerhalb nützlicher Frist zu bewältigen gewesen wäre, hat man grösstenteils maschinell vorgedichtet. Bei diesem Verfahren trägt man den schnellbindenden Mörtel zur Befestigung der Drains nicht mehr von Hand auf, sondern mit einer kleinen Gunitmaschine. Eine Hilfskraft hält dabei die Drains mit langstieligen Gabeln in der gewünschten Lage fest. Als Spritzgut dient eine vorgefertigte Mischung aus feinem Sand und einem

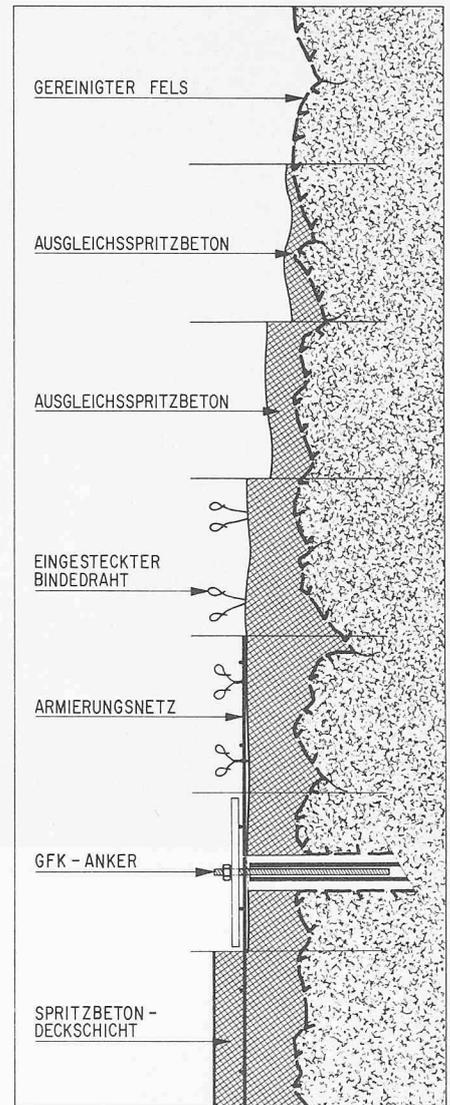


Bild 6. Schematischer Aufbau der Spritzbetonauskleidung

Bild 7. Von Hand angemauerte Drains

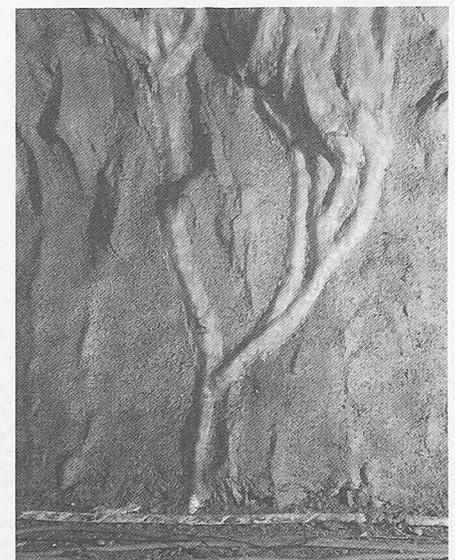




Bild 8. Stahldrahtnetze als Armierung der Spritzbetonauskleidung

Bild 9. Spritzbetonmaschine, Beschickungsförderband und Bunkerzug mit Trockengemisch



schnellerhärtenden Bindemittel. Im Furka-Tunnel ist das Produkt «Sika-Shot» der Firma Sika AG verwendet worden. Seine Druckfestigkeit beträgt nach einer Stunde 12 N/mm^2 und nach 28 Tagen etwa 45 N/mm^2 .

Bei der Vordichtung hat man vor allem darauf geachtet, Wasseraustritte im Scheitelbereich abzuleiten, um Vernässungen des Fahrdrabtes und des Gleises zu vermeiden. Die Widerlagerbereiche hat man hingegen nur abgedichtet, wenn es das fachgerechte Aufbringen des Spritzbetons erforderte.

Im Zuge der Vortriebssicherung versetzte Expansionsanker wurden vor dem Auftrag des Spritzbetons dauerhaft gegen Korrosion geschützt, indem man ihre Bohrlöcher mit Epoxid-Harz injizierte. Bei den Ausbautypen 2 bis 6 wurde das Armierungsnetz (Stahldrahtnetz) auf den Ausgleichspritzbeton verlegt. Zu seiner Befestigung dienten Armierungsbindedrähte, die in der zuvor aufgetragenen Spritzbetonschicht steckten (Bilder 6 und 8).

Die Bohrlöcher für die Systemanker bohrte man durch das bereits verlegte Armierungsnetz hindurch, und zwar genau dort, wo Anker und Armierung am besten zusammenwirken. Nachdem die Anker versetzt und mit Epoxid-Harz ausgepresst waren, trug man die zur einwandfreien Überdeckung der Armierung und der Ankerköpfe nötige Spritzbetonstärke auf.

Je nach Ausbautyp beträgt die mittlere *Fertigstärke* des Spritzbetons zwischen drei und 16 Zentimeter.

Im Los 61 ist der Tunnel vom Portal einwärts fortschreitend bis zum Kreuzungspunkt ausgebaut worden. Mit zusätzlichen Spritzbeton-Arbeitsgruppen hat man den Paralleltunnel der Doppelspur-Strecke im Los 61 ausgekleidet. Im Los 63 war bis zum Durchschlag des Tunnels ein Vorgehen in Etappen nötig. Dort kleidete man zuerst den kreisförmigen, mit einem doppelspurigen Baugleis versehenen Tunnelabschnitt aus. Dabei stellte man abwechselnd je eine Tunnelseite fertig, derweil auf dem Gegengleis ungehindert die Vortriebszüge verkehrten. Das Kreisprofil war also nicht nur in felsmechanischer Hinsicht sehr günstig, sondern auch für die Durchführung der Auskleidungsarbeiten besonders vorteilhaft. Von der Einmündung des Fensters Bedretto bei Tunnelmeter 6863 bis zum Tunnelmeter 8601 im Los 63 ist der Tunnel hufeisenförmig oder elliptisch profiliert. Diese 1738 Meter lange Strecke ist nach dem Durchschlag ausgekleidet worden.

Für die Auskleidungsarbeiten in den Losen 61 und 63 waren zeitweise bis zu zwölf Ankerspezialisten sowie fünf Spritzbetongruppen zu vier Mann mit je einer Spritzbetonmaschine tätig (Bild 9).

Herstellung des Spritzbetons

Die folgenden Ausführungen betreffen nur die Spritzbetonarbeiten in den Baulosen 61 und 63, die von Oberwald beziehungsweise vom Kreuzungspunkt (mit dem Fenster Bedretto) her ausgebaut worden sind. Es handelt sich um 10 407 Meter des Haupttunnels und 889 Meter des Doppelspurtunnels der Kreuzungsstelle im Los 61.

Für den Ausbau in den Tunnel-Losen 61 und 63 sind gesamthaft 36 880 Kubikmeter Spritzbeton-Trockengemisch verarbeitet worden. Davon hat man 21 480 Kubikmeter beim Portal Oberwald hergestellt. Die restlichen 15 400 Kubikmeter sind an zwei anderen Orten gemischt worden, und zwar 10 420 Kubikmeter am Eingang des Baufensters Bedretto und 4980 Kubikmeter zur Verkürzung der Transportstrecke in einer Nische bei Tunnelmeter 7400 (Bild 10).

Das *Spritzbeton-Trockengemisch* ist aus vier verschiedenen *Zuschlagstoff-Sorten* aufbereitet worden: in Oberwald ausschliesslich mit dem Kiessand U, im Tunnel nacheinander mit den Gemisch-Sorten B, L und F, in Bedretto nur mit dem Zuschlagstoff F (Bild 11).

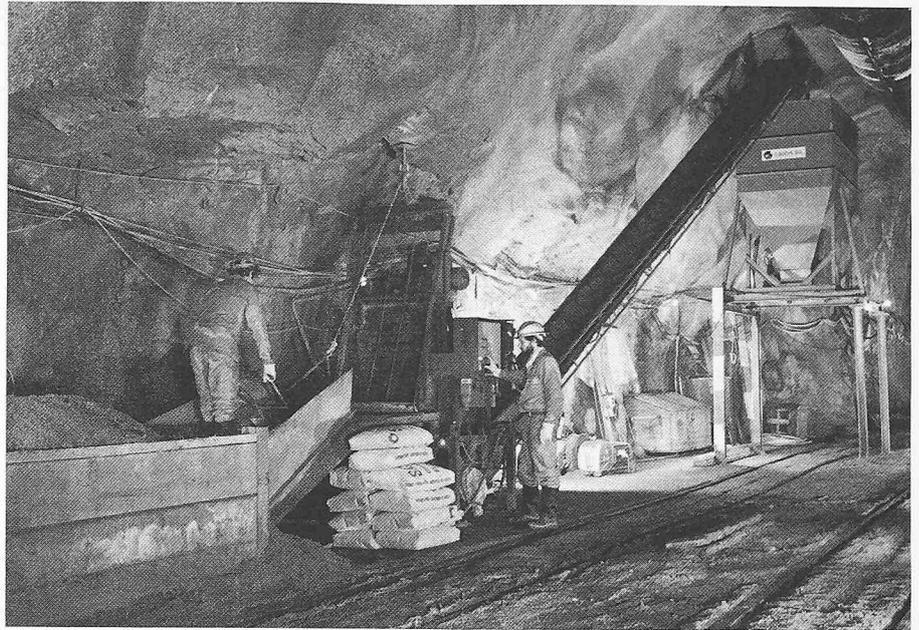


Bild 10. Trockengemisch-Aufbereitung bei Tunnelmeter 7400

Sowohl die Kornzusammensetzung wie die petrographische Beschaffenheit der in Oberwald verwendeten *Zuschlagstoffe vom Typ U* befriedigten durchwegs. Es handelte sich vorwiegend um *feldspat- und quarzreichen Gneiss- und Granit-Kiessand*, der in *Ulrichen* aus der *Rhône* gewonnen wird. Die Kornform ist grösstenteils kubisch, der Brechkornanteil beträgt durchschnittlich 70 Prozent. Schwieriger war es, für die Arbeiten im Los 63 ebenso gut geeignete Zuschlagstoffe zu finden. Weil die nacheinander eine Zeitlang verwendeten Gemisch-Sorten B und L unzulässig hohe Glimmeranteile aufwiesen, hat man den grössten Teil des im Tunnel und am Fensterportal in Bedretto aufbereiteten Spritzbeton-Trockengemisches mit dem Zuschlagstoff vom Typ F hergestellt, der durch den *Gottard-Strassentunnel* aus dem Kanton Uri bezogen wurde. Es ist Kiessand, der an der *Reussmündung in Flüelen* aus dem *Urnersee* gebaggert wird, hauptsächlich aus *Gneiss, Granit* und *Kalk-*

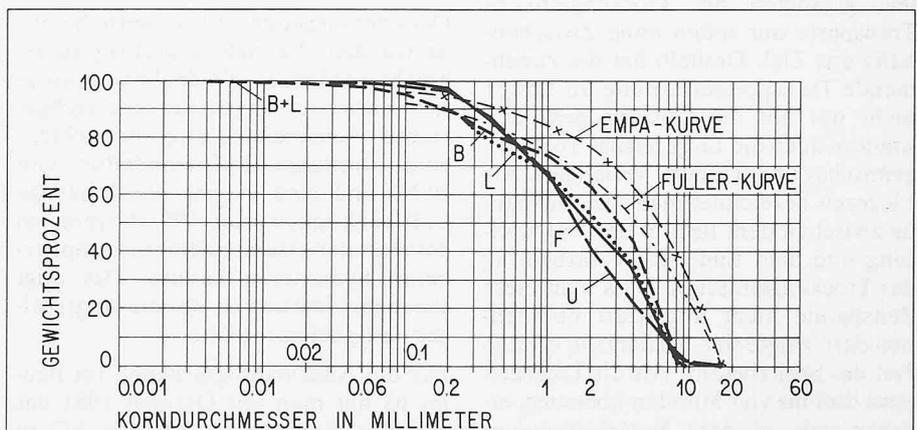
sandstein besteht und bei hälltigem Brechkornanteil eine vorwiegend kubische Kornform aufweist.

Als *Bindemittel* diente grösstenteils normaler *Portland-Zement*. Nur für eine kurze Tunnelstrecke des Losen 61, in der aggressives Bergwasser austritt, musste sulfatbeständiger Zement verwendet werden.

Das Trockengemisch hat man überall mit Zwangsmischern aus 1000 Liter erdfeuchten Zuschlagstoffen der Körnung 0-8 Millimeter und 350 Kilogramm Zement hergestellt, was in jedem Falle wenigstens 1250 Liter Trockengemisch ergab. Das Verhältnis zwischen Trockengemischvolumen und Kiessandkubatur (der sogenannte *Ergiebigkeitsfaktor*) betrug also 1,25.

Für den Transport des Trockengemisches von der Aufbereitungsanlage bis zur Spritzbetonmaschine sind fast immer Häßglunds-Bunkerzüge eingesetzt worden. Je nach Beschickungsvorrich-

Bild 11. Siebkurven der vier verwendeten Kiessand-Sorten



tung der Spritzbetonmaschine entladen sie entweder in Gleisrichtung oder, über ein quergestelltes kurzes Förderband, seitlich vom Gleis. Ein Transportzug umfasste zwischen fünf und zehn Kubikmeter Trockengemisch.

Es waren bis zu fünf Spritzbetonmaschinen im Einsatz, und zwar vier vom Typ Meyco GM 57 und eine Meyco GM 090. Die Maschinen standen entweder auf einem über der Rigole neben dem Gleis errichteten Podest oder waren auf Rollwagen montiert. Der erste Fall war im Los 61 die Regel. Hier wurde das von den Transportwagen seitlich gekippte Trockengemisch mit einem Schrapper über ein kurzes Förderband in den Einfülltrichter der Spritzbetonmaschine befördert. In gleicher Weise wurden auch die zusammen mit einem Förderband auf Stollenwagen montierten Spritzbetonmaschinen versorgt (Bild 9). Diese Vorrichtung hat sich sehr gut bewährt. Sie ist leistungsfähig und robust.

Ein Hägglunds-Bunkerzug mit acht Kubikmeter Trockengemisch ist in zehn Minuten entladen. Um diese Trockengemischmenge zu verarbeiten, braucht die Spritzbetonmaschine bei ununterbrochenem Betrieb etwa 100 Minuten. Es wäre also theoretisch möglich gewesen, in einer Acht-Stunden-Schicht ungefähr 40 Kubikmeter Trockengemisch zu verarbeiten. In Wirklichkeit sind je Schicht höchstens 34 Kubikmeter, im Durchschnitt aber nur 19 Kubikmeter geschafft worden. Daran waren in erster Linie die langen Transportwege auf einem einzigen Geleise schuld, aber auch unvermeidliche Betriebsunterbrüche für das Verschieben des Arbeitsgerüsts oder die Reinigung der Maschinen.

Im Los 61 musste das Trockengemisch bis zu 6100 Meter weit auf dem nur mit wenigen Ausweichstellen versehenen, einspurigen Gleis befördert werden. Weil längs der Wegstrecke meist noch etliche andere Arbeitsstellen lagen, die beispielsweise der Profilierung, dem Rigolenbau oder der Felsankerung dienten, gelangten die Trockengemisch-Transporte nur selten ohne Zwischenhalte ans Ziel. Deshalb hat die zunehmende Transportentfernung im Los 61 nicht nur auf die Leistung gedrückt, sondern auch die Liegezeit des Trockengemisches über Gebühr verlängert. Als Liegezeit bezeichnet man die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Aufbereitung und dem Ende der Verarbeitung des Trockengemisches. Dass man diese Zeitspanne nicht ungestraft überdehnen darf, zeigte sich bei der Druckfestigkeit des Spritzbetons. Als die Liegezeit etwa drei bis vier Stunden überstieg, ergaben sich spürbare Festigkeitseinbus-

sen. Aus diesem Grunde wurde die Trockengemisch-Aufbereitungsanlage bei Tunnelmeter 7400 eingerichtet (Bild 10). Dadurch verkürzten sich die Transportdistanzen im Los 63 zeitweise auf höchstens 3007 Meter.

Der zum Ausbau des Furka-Basistunnels verwendete Spritzbeton musste von bester Qualität sein, vor allem dicht und fest. Deshalb hat man nach Möglichkeit danach getrachtet, seine Gesamtstärke aus nur etwa zwei Zentimeter dünnen Schichten aufzubauen. Um den einwandfreien Verbund zu gewährleisten, war in jeder Arbeitsgruppe ein Mann eigens damit beauftragt, jede Spritzbetonschicht mit einem scharfen Wasserstrahl vor der nächsten Beschichtung zu reinigen und zu nassen. Dass sich dieser Aufwand ebenso gelohnt hat wie der schichtenweise Auftrag selbst, beweist die vorzügliche Festigkeit, vor allem aber die hohe Dichtigkeit des Spritzbetons. Um dessen Endfestigkeit nicht zu beeinträchtigen, hat man nur sehr wenig Schnellbinder verwendet. Der Gesamtverbrauch beläuft sich auf 201 850 Kilogramm für die 36 880 Kubikmeter Spritzbeton-Trockengemisch, die für den Ausbau des Tunnels insgesamt gebraucht worden sind. Bezogen auf den mittleren Zementgehalt von 1000 Liter Trockengemisch (280 Kilogramm) sind dies durchschnittlich 1,95 Gewichtsprozent. Gänzlich konnte auf Abbindebeschleuniger nicht verzichtet werden, weil zahlreiche Klüfte auszuspritzen waren. Der Schnellbinder gestattet nämlich, je Arbeitsgang eine grössere Spritzbetonstärke aufzutragen und dadurch Zeit zu sparen. Im weiteren war der Abbindebeschleuniger auch zur Vordichtung nötig. Diffuse Vernässungen von Felsflächen sind mit einer schnellbindenden Spritzbetonschicht bis auf gut lokalisierbare Wasseraustrittsstellen eingeeengt worden. Man hat ausschliesslich den pulverförmigen Schnellbinder «Barra-Gunit 2» der Firma Meynadier & Cie AG verwendet. Die Beigabe zum Trockengemisch erfolgte von Hand im Einfülltrichter der Spritzbetonmaschine.

Der überwiegende Teil des Spritzbetons ist vor dem Tunneldurchschlag aufgebracht worden, als die denkbar günstigsten Voraussetzungen für eine fachgerechte Nachbehandlung herrschten: eine konstante Lufttemperatur von 20 °C und eine ebenso gleichmässige Luftfeuchtigkeit von 100 Prozent, so dass fast der gesamte Zement im Spritzbeton hydratieren konnte. Das zeigt sich sehr deutlich in dessen langfristiger Festigkeitszunahme.

Für die Auskleidungsarbeiten im Baulos 63 hat man seit Oktober 1981 das von der Firma Henkel & Cie AG in

Pratteln vertriebene Zusatzmittel «Silipon» verwendet. Dieser sogenannte «Staubverminderer» wird dem Trockengemisch schon bei dessen Aufbereitung beigelegt. Er verringert den Spritzstaub beträchtlich. Gleichzeitig vermindert Silipon die Rückprallmenge um etwa ein Viertel. Überdies haben vergleichende Untersuchungen gezeigt, dass die Eigenschaften des Spritzbetons nicht nachteilig beeinflusst werden.

Eigenschaften des Spritzbetons

Noch nie zuvor ist in der Schweiz auf einer einzigen Baustelle soviel Spritzbeton verarbeitet worden wie in den zusammen 10 407 Meter langen Baulosen 61 und 63 des Furka-Basistunnels. Es dürfte auch noch nie ein so tief liegender Verkehrstunnel nur einschalig mit einer reinen Spritzbetonverkleidung versehen worden sein. Der gleichmässige hohen Qualität des Spritzbetons kam daher grosse Bedeutung zu. Herstellung und Gebrauch des Spritzbetons erfolgten zudem unter vielfältigen Umständen und in mannigfacher Form. Deshalb verlangte die Bauherrschaft eine durchgehende Qualitätskontrolle. Sie ist genützt worden, um die Eigenschaften des Spritzbetons systematisch zu untersuchen, und zwar ausschliesslich anhand von Bohrkernen (Durchmesser 50 Millimeter). Im durchschnittlichen Abstand von 69 Tunnelmetern sind an 163 verschiedenen Stellen insgesamt 1673 Probekörper aus dem fertigen Spritzbeton herausgebohrt worden. Im Mittel entfällt ein Bohrkern auf 22 Kubikmeter Trockengemisch des zur Auskleidung verwendeten Spritzbetons.

Im Zuge der Auskleidungsarbeiten hat man in den Baulosen 61 und 63 von September 1979 bis Mai 1981 elf Bohrkern-Serien zu je zehn Entnahmestellen gewonnen. Um die Festigkeitsentwicklung im Laufe der Zeit untersuchen zu können, sind an denselben Entnahmestellen im August 1981 ein zweites Mal Probekörper herausgebohrt worden. Zur Prüfung des Verbundes zwischen Spritzbeton und Fels entnahm man zusätzliche Bohrkern, und zwar je nach Felsbeschaffenheit auf der ganzen Länge vom Portal Oberwald bis zum Tunnelmeter 10 036 verteilt.

Für jede Entnahmestelle ist die Druckfestigkeit ermittelt worden. Abwechslungsweise hat man ausserdem die Spaltzugfestigkeit, die Wasserdurchlässigkeit sowie die Haftung am Fels geprüft. Schliesslich ist auch untersucht worden, wie sich die Liegezeit des Trockengemisches und das Alter des Spritzbetons auf diese Eigenschaften auswirken.

Organisatorische Umstände und konstruktive Erfordernisse, beispielsweise die zeitliche Staffelung im Auftragen der einzelnen Spritzbetonschichten, des Netzverlegens und des Ankerbohrens, führten dazu, dass sich die Fertigstellung der ganzen Spritzbetonstärke mitunter über Wochen erstreckte. Als massgebender Stichtag für die Festlegung des Probenalters wurde daher das Mittel zwischen dem Herstellungsdatum der ersten Schicht und jenem der letzten Schicht gewählt. Das Betonlabor der Amberg Ingenieurbüro AG in Sargans hat die reine Zugfestigkeit sowie die Haftfestigkeit des Spritzbetons am Fels geprüft, die LPM AG in Beinwil am See alle andern Eigenschaften des Spritzbetons, nämlich die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und die Permeabilität.

Die zahlreichen Bohrkern-Prüfungen haben zusammen mit weiteren Experimenten eine Fülle von Erkenntnissen gezeitigt. Aus Platzmangel können sie hier nur in groben Zügen erläutert werden. Den für alle Beteiligten wohl wichtigsten Befund hat das LPM-Labor in seinem Schlussbericht so umschrieben: «Die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit wie auch die Wasserdichtigkeit aller untersuchten Betons sind in ihrer Homogenität und Streuung gesamthaft als gut zu bezeichnen.»

In Bild 12 sind die wichtigsten Untersuchungsergebnisse dargestellt. Bei ihrer Beurteilung ist zu bedenken, dass sie sich auf Spritzbeton beziehen, dessen Trockengemisch aus vier verschiedenen Zuschlagstoff-Sorten bestand, an drei Orten aufbereitet und über unterschiedlich lange Wege zum Verwendungsort befördert wurde. Im weiteren sei daran erinnert, dass sich das Trockengemisch aus 1000 Liter oder 1450 Kilogramm erdfeuchtem Kiessand 0-8 Millimeter und 350 Kilogramm normalem Portland-Zement zusammensetzte. Bei durchschnittlich 25 Prozent Rückprall und einem Verdichtungsfaktor von etwa 1,35 enthält ein Festkubikmeter Spritzbeton rund 450 Kilogramm Zement.

Die Qualitätskontrollen im Furka-Basistunnel haben bestätigt, dass sich eine zu lange Liegezeit nachteilig auf die Spritzbetoneigenschaften auswirkt. Je nach der Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe kann schon ein drei bis vier Stunden altes Gemisch empfindliche Festigkeitseinbussen verursachen, die auch das zunehmende Alter nicht mehr wettzumachen vermag (Bild 12, Serien 2 und 6 des Loses 61 sowie Serie 5 des Loses 63). Bei normalen Liegezeiten hingegen verbessert sich die Druckfestigkeit im Laufe der Zeit deutlich, ebenso die Spaltzugfestigkeit und die Wasserdichtigkeit. Voraussetzung

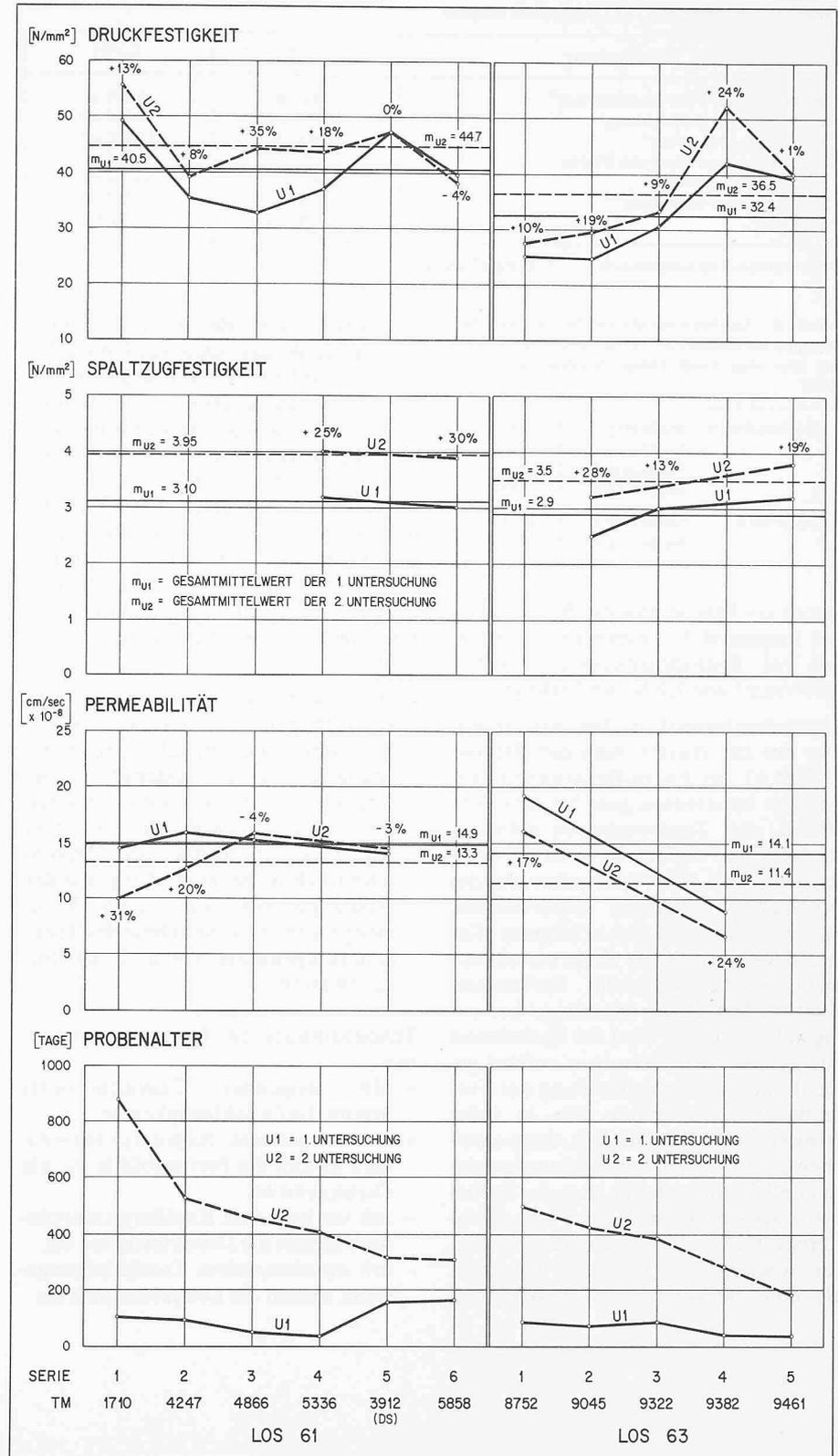


Bild 12. Wichtigste Ergebnisse der Qualitätsprüfungen

dafür ist allerdings, dass man die nötige Feuchthaltung gewährleistet (Bild 12, Serien 1 bis 4 beider Lose).

Im weiteren hat sich gezeigt, wie wichtig die gewissenhafte Prüfung der Zuschlagstoffe ist. Dazu gehört neben der selbstverständlichen Bestimmung der Siebkurve auch die petrographische Untersuchung. Die verhältnismässig niedrigen Druckfestigkeiten der Serien 1 bis 3 des Bauloses 63 (Bild 12) sind nur auf

ungünstige Kornform und mangelnde Festigkeit der verwendeten Kiessand-Sorten zurückzuführen!

Die an 65 Probekörpern ermittelte reine Zugfestigkeit betrug durchschnittlich 1,9 N/mm². Für die Haftung des Spritzbetons am Fels wurde ein Mittelwert von 1,3 N/mm² gemessen. Dabei hat man allerdings festgestellt, dass die Zugfestigkeit des Felsmaterials vielfach geringer war als die Haftung des Spritz-

Tabelle 1. Bis Mitte Mai 1982 ausgeführte Arbeiten

Arbeitsgattung	Los 61	Los 63
Spritzbeton zur Vortriebssicherung*	7 410 m ³	6 040 m ³
Spritzbeton zur Auskleidung*	22 990 m ³	13 890 m ³
Spritzbeton gesamthaft*	30 400 m ³	19 930 m ³
Vordichtung von Hand mit Drains	15 060 m	1 260 m
Vordichtung maschinell	17 850 m ²	30 260 m ²
Stahldrahtnetz-Armierung**	38 360 m ²	12 780 m ²
Felsanker	17 300 Stk	5 760 Stk

* verarbeitetes Trockengemisch ** verlegte Netztafeln

Tabelle 2. Laufmeterkosten für die einzelnen Ausbautypen für Spritzbeton, Armierungsnetze und Anker, aber ohne Vordichtung (Preisbasis Dezember 1972)

Hufeisen-Profil:	Ausbautyp 1	Fr. 256.-
	Ausbautyp 2	Fr. 1010.-
	Ausbautyp 3	Fr. 1350.-
	Ausbautyp 4	Fr. 2540.-
Kreis-Profil:	Ausbautyp 5	Fr. 2461.-
	Ausbautyp 6	Fr. 3484.-

betons am Fels, so dass der Bruch bei 18 von insgesamt 39 Proben im Felsmaterial bei Beanspruchungen zwischen 0,4 N/mm² und 1,9 N/mm² erfolgte.

Zusammenfassend ist hervorzuheben, dass der zur Auskleidung der Baulose 61 und 63 des Furka-Basistunnels verwendete Spritzbeton gute bis sehr gute Druck- und Zugfestigkeiten aufweist. Das gleiche Prädikat verdient die Wasserdichtigkeit. Der Schlussbericht des Prüf-Labors vermerkt ausdrücklich, dass auch unter Berücksichtigung aller Einzelwerte in keiner Zone ein als undicht zu bezeichnender Spritzbeton vorliegt. Mit dieser durchwegs hervorragenden Qualität wird der Spritzbeton den hohen Anforderungen vollauf gerecht, die für die Auskleidung des Furka-Basistunnels gelten. Die in jeder Hinsicht aussergewöhnlich umfangreichen Prüfungen haben dies nachgewiesen und damit bestätigt, dass der Spritzbeton als Auskleidung des Furka-Basistunnels nicht nur wirtschaftlich günstiger, sondern auch qualitativ besser ist als eine herkömmliche Auskleidung

mit geschaltem Beton. Gleichzeitig konnte dank der Qualitätskontrollen eine Vielzahl neuer und überaus nützlicher Erkenntnisse über die Herstellung und zweckmässige Anwendung von Spritzbeton gewonnen werden. Die erarbeiteten Material-Kennwerte und ihre teilweise überraschenden Korrelationen sollen durch zusätzliche Untersuchungen von Bauwerksproben aus dem Tunnel in späterer Zeit ergänzt werden. Einstweilen erlaubt die Auswertung der Zusammenhänge folgende **Schlüsse**:

- Die Spaltzugfestigkeit beträgt etwa zehn Prozent der Druckfestigkeit. Mit zunehmendem Alter steigt die Spaltzugfestigkeit gegenüber der Druckfestigkeit überproportional an.
- Das Trockenraumgewicht hängt von der Gesamtporosität ab. Durchschnittlich ist bei einer Zunahme der Gesamtporosität von einem Volumenprozent eine Abnahme des Trockenraumgewichtes von 0,025 kg/dm³ zu erwarten.

Tendenzmässig ist folgendes erkennbar:

- Mit steigender Gesamtporosität nimmt die Druckfestigkeit ab,
- mit steigendem Kapillarporenvolumen nimmt die Permeabilität zu, die Dichtigkeit ab,
- mit wachsendem Kapillarporenvolumen nimmt die Druckfestigkeit ab,
- mit zunehmendem Trockenraumgewicht nimmt die Druckfestigkeit zu.

Leistungen und Kosten

Die besonderen Arbeitsumstände im Furka-Basistunnel ergaben stark schwankende Leistungen. Einen ersten Anhaltspunkt gibt die Zusammenstellung der bis Mitte Mai 1982 ausgeführten Arbeiten (Tabelle 1).

Unter normalen Arbeitsbedingungen verarbeitete eine Spritzbetongruppe je Acht-Stunden-Schicht durchschnittlich 19 Kubikmeter Spritzbeton-Trockengemisch, bei Spitzen von 34 Kubikmetern. Die mittleren Schichtleistungen einer Ankergruppe betragen 50 Ankerlöcher von drei Meter Länge. Im Durchschnitt erforderten Verankerung, Betonspritzen (ohne Entfernung des Rückpralles) und Armierung den folgenden Arbeitsaufwand:

Ausbautyp 1	2,4 Mannstunden
Ausbautyp 2	9,2 Mannstunden
Ausbautyp 3	12,5 Mannstunden
Ausbautyp 4	24,0 Mannstunden
Ausbautyp 5	22,7 Mannstunden
Ausbautyp 6	32,0 Mannstunden

Die häufig wechselnden Ausbautypen mit ihren verschiedenen Spritzbetonstärken und Ankerzahlen erforderten eine einfache und verlässliche Abrechnungsweise. Der Spritzbeton wurde je Kubikmeter verarbeiteten Trockengemisches verrechnet. Als Masseinheit galt das Volumen einer Mischung, das in gewissen Zeitabständen durch Ergiebigkeitsproben bestimmt wurde. Für jeden Ausbautyp war die höchstzulässige Trockengemischmenge je Tunnelmeter vom Projektverfasser vorgeschrieben. Die Felsanker wurden je Stück, die Drains je Laufmeter und die maschinelle Vordichtung sowie die Armierung je Quadratmeter abgerechnet (Tabelle 2).

Adressen der Verfasser: A. Sala, Amberg Ingenieurbüro AG, Ausstellungsstr. 88, Postfach 3141, 8031 Zürich; P. Teichert, E. Laich SA, 6671 Avegno.