

Spritzbeton als Auskleidung von Kavernen im Fels

Autor(en): **Teichert, P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 50

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73803>

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 Auskleidung von Kavernen im Fels

Von P. Teichert, Avegno

Einleitung

Das als bekannt vorausgesetzte Spritzbetonverfahren ist aus dem modernen Untertagebau nicht mehr wegzudenken. Nicht nur beim klassischen Sprengvortrieb, sondern auch bei den neuesten Tunnel-Baumethoden, etwa beim Fräsvortrieb oder bei der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise bildet der Spritzbeton eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz leistungsfähiger Baumaschinen und damit für den raschen und wirtschaftlichen Arbeitsfortschritt.

Spritzbeton wird heute als Sicherung beim Vortrieb und zur Auskleidung von Stollen und Tunneln weltweit verwendet. Zum endgültigen Ausbau unterirdischer Kavernen dient hingegen zumeist noch immer geschaltes Beton, obwohl auf diesem Gebiet des Hohlraumbaus der Spritzbeton nahezu gleich vorteilhaft ist wie bei kleineren Profilquerschnitten. Überdies ermöglicht fachgerecht hergestellter Spritzbeton gegenüber dem herkömmlichen Schalbeton aus den folgenden Gründen beträchtliche Einsparungen an Zeit und Geld: Entbehrlichkeit der Schalung und der schalungsbedingten Mehrstärken, durchgehend dichte und fugenlose Struktur; dank innigem Verbund mit dem Fels kein Bedarf an Injektionen; Profilwahl ohne Rücksicht auf die Schalung und das Betoniersystem; ungebundene Formgebung und Vielfalt der Möglichkeiten zur Anpassung an konstruktive und ausführungstechnische Erfordernisse.

Der Bau von grossräumigen Kavernen in Fels nimmt zweifellos zu. Ausschlaggebend dafür sind gewichtige Faktoren: Unterirdische Hohlräume beanspruchen keinen Boden, sie sind sicher, geschützt und verhältnismässig billig, unsichtbar und energiesparend. Neben die klassischen Objekte wie militärische Anlagen und Kraftwerk-Zentralen treten allmählich weitere: Lagerräume für Energieträger, Wasser, Nahrungsmittel und Abfälle, Zivilschutzkavernen, Garagen und Weinkeller. Von der Eignung unterirdischer Hohlräume für Bäder und Kirchen sprechen zwei Beispiele am Schluss dieses Aufsatzes. Zuvor soll jedoch allgemein von der Verwendung von Spritzbeton zur endgültigen Auskleidung von Kavernen in Fels die Rede sein.

Gegebenheiten und Voraussetzungen

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf Kavernen in Fels ohne echten Gebirgsdruck, die einer Stützung und Konsolidierung oder Abdichtung bedürfen und sich in standfestem bis nachbrüchigem Fels befinden. Voraussetzung ist, dass der Hohlraum eine Standfestigkeit aufweist, die das fachgerechte Aufbringen des Spritzbetons gestattet. Nicht in Betracht fallen jene Fälle, wo der Spritzbeton, wie etwa bei der provisorischen Felsicherung, nur eine zeitlich begrenzte Aufgabe übernimmt und deshalb zum Teil andersartigen Anforderungen genügen muss als beim definitiven Ausbau. Es sei angenommen, dass von der Spritzbeton-Auskleidung höchste Qualität und Beständigkeit sowie ein ästhetisch befriedigendes Aussehen verlangt werden und dass die dazu nötigen ausführungstechnischen Voraussetzungen gegeben sind.

Nach Beschaffenheit des Gesteins und Stärke des Bergwasserandranges seien drei Fälle unterschieden (Bild 3):

- A nachbrüchiger Fels ohne Wasserzufluss
- B standfester Fels mit Wasserzufluss
- C nachbrüchiger Fels mit Wasserzufluss.

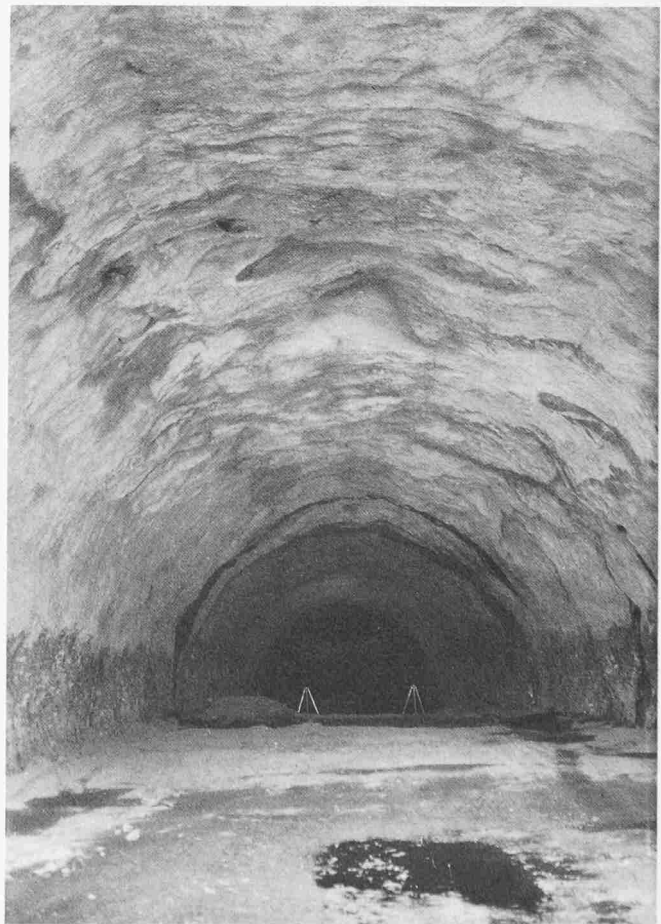
Im Fall A dient der Spritzbeton zur Stützung und Konsoli-

dierung, im Fall B zur Abdichtung, im Fall C beidem. In den Fällen B und C kann der Spritzbeton in Kombination mit besonderen Dichtungsmassnahmen (Drains, Isolationen) verwendet werden.

Spritzbeton zur Stützung und Konsolidierung

Die verfestigende Wirkung des Spritzbetons beruht auf seiner innigen Haftung am Fels und auf der Ausfüllung von Klüften, Spalten und Einbuchtungen. Der Verschluss der Felsvertiefungen verhindert, dass sich einzelne Blöcke und Platten gegeneinander bewegen können. Der Spritzbeton bewirkt also dasselbe wie der Mörtel im Mauerwerk: Er verbindet und verkittet die einzelnen Kluftkörper mit den angrenzenden Gesteinsmassen und befestigt damit den Verband. Die Haft- und Scherfestigkeit des Spritzbetons vergütet die Felsoberfläche, indem sie die Gesteinshomogenität verbessert und die Oberflächenstruktur auebnet. Dadurch verringern sich die Kerbspannungen in den Vertiefungen der Felsoberfläche und die Angriffsmöglichkeiten zerstörender Einflüsse, auch wird die Auflockerung verhindert (Fall A in Bild 3). Schon eine verhältnismässig dünne, nur wenige Zentimeter dicke Spritzbetonschicht erhöht die Standfestigkeit nachbrüchigen Felses beträchtlich (Bild 1). Unter günstigen Voraussetzungen, namentlich bei geometrisch regelmässig ausgebrochenen Profilen, kann sogar ein tragendes Gewölbe entstehen.

Bild 1. Lagerkaverne in Kalkstein, Gewölbe mit einer dünnen Spritzbetonschicht konsolidiert



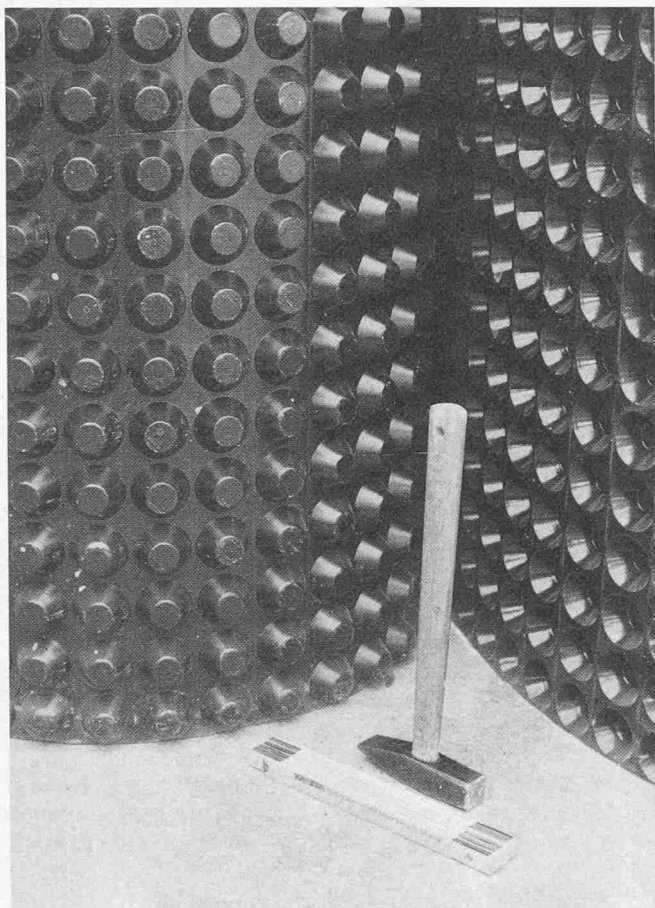


Bild 2. Drainage-Folie aus strukturiertem Hart-PVC

Bei gewissen Gesteinsarten, bei grosser Mächtigkeit der den Hohlraum umgebenden Auflockerungszone oder im Bereich lokaler Mürbezonen kann der Verbund zwischen Fels und Spritzbeton ungenügend sein. Um den dann auftretenden Zugbeanspruchungen standzuhalten, wird der Spritzbeton mit einem Armierungsnetz verstärkt und nach Bedarf durch Anker mit dem Bereich gesunden Felses verbunden. Dadurch gewährleistet man das monolithische Zusammenwirken von Fels und Spritzbeton und ermöglicht die Übertragung von Schubkräften.

Die flächenhafte Verkleidung der Felsoberfläche mit Spritzbeton versiegelt das Gestein und schützt es vor der Verwitterung. Gleichzeitig verschliesst sie teilweise auch die Sickerwege des dem Hohlraum zufließenden Bergwassers, so dass bindige Kluftfüllungen nicht mehr ausgewaschen und zusätzliche Entfestigungen des Felsgefüges vermieden werden. Andererseits kann dadurch ein Wasserstau mit hydrostatischem Druck auf den Spritzbeton entstehen. Dieser Gefahr ist entweder bei den Belastungsannahmen Rechnung zu tragen oder durch Abflussvorkehrungen für das Bergwasser vorzubeugen.

Spritzbeton als Abdichtung

Meistens wird bei der Auskleidung einer Kaverne auch grosser Wert auf die Abdichtung gelegt. Dieser Anforderung kommt der Abdichtungseffekt einer Spritzbetonauskleidung entgegen. Guter Spritzbeton erreicht sehr hohe Dichtigkeitswerte. Mit einem Durchlässigkeitskoeffizienten nach Darcy von $k_w = 10 \times 10^{-8}$ cm/sec ist ein sorgfältig ausgeführter Spritzbeton praktisch wasserdicht, allerdings nur so lange er nicht reisst. Deshalb ist den Ursachen der Rissebildung nachzugehen; neben Bewegungen des Untergrundes sind es

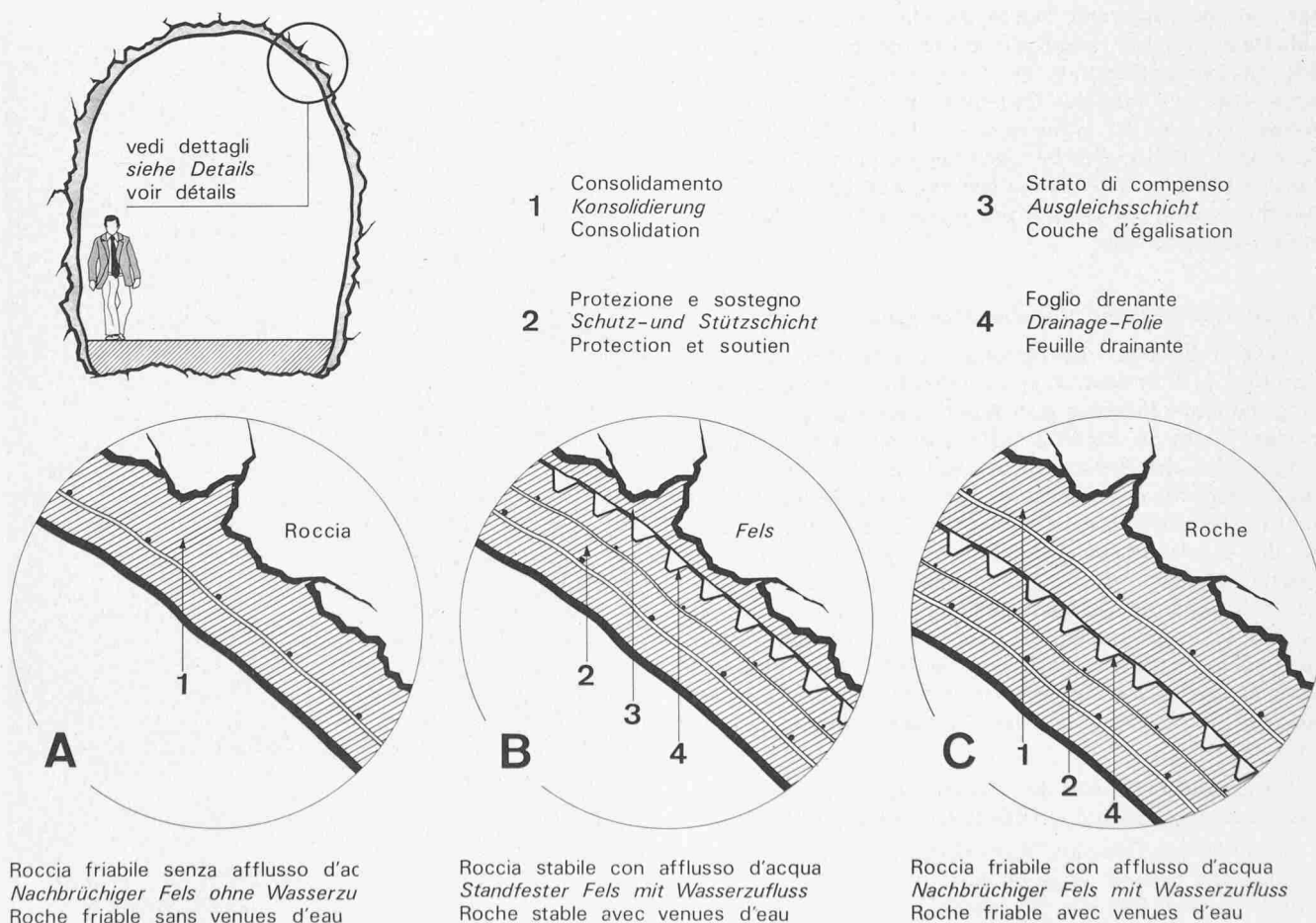
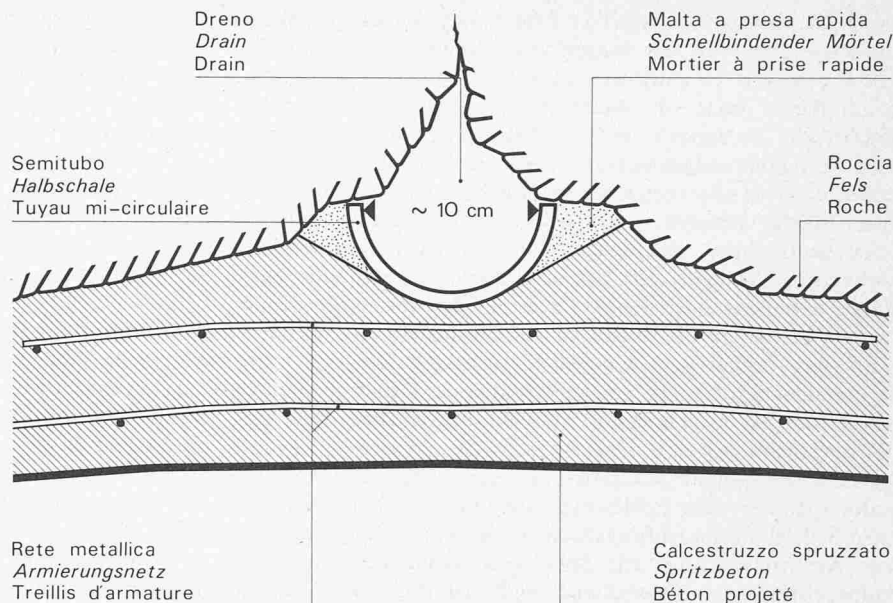


Bild 3. Möglichkeiten zur Anwendung von Spritzbeton für die Auskleidung von Kavernen

Bild 4. Querschnitt durch einen Drain zur Fassung und Ableitung von Bergwasser



vor allem das Schwinden und die Temperaturschwankungen. Die Armierung zur Aufnahme der Schwind- und Temperaturspannungen ist derart zu bemessen, dass sich die nie gänzlich vermeidbaren Risse fein verteilen und die Dichtigkeit nicht wesentlich beeinträchtigen. Dem Schwinden des Spritzbetons, der im Verhältnis zur Masse eine ungewöhnlich grosse Oberfläche aufweist, lässt sich durch einen zweckmässigen Schichtenaufbau und durch eine geeignete Nachbehandlung schon bei der Herstellung entgegenwirken.

Spritzbeton in Kombination mit Isolationen

Manchmal gewährleistet der Spritzbeton allein die Trockenlegung des Hohlraumes nicht genügend. Dann gilt es, hierfür besondere Massnahmen zu treffen. Zu diesem Zweck eignen sich besondere wasserdichte Schichten, sog. Isolationen. Man unterscheidet verdrängende Isolationen und Drainage-Folien. Jene sind in der Regel Kunststoff-Folien, aufgeklebte Gewebestoffe sowie aufgespritzte Bitumschichten, welche die Austrittswege des Bergwassers versperren und es zwingen, sich andere Abflussmöglichkeiten zu suchen. Allerdings entsteht dann hinter der Isolation meist ein zumindest lokaler Wasserstau, dessen Druck durch angemessene Stützung der Isolation ausgeglichen werden muss. Die Drainage-Folie aus profiliertem Kunststoff (Bild 2) hingegen schafft durch zweckmässige Oberflächenstruktur zwischen sich selbst und der zu dichtenden Fläche einen Hohlraum, durch den das Bergwasser entspannt abfließt und über eine Sammelleitung längs des Folienrandes in die Hauptdrainage gelangt.

Die Wahl zwischen diesen beiden Alternativen – verdrängende Isolation oder Drainage-Folie – hängt unter anderem von der Ergiebigkeit, der Lage und den periodischen Schwankungen der Wasserzuflüsse ab. Beide Isolationsarten erfordern eine Schutz- und Stützkonstruktion zur Aufnahme der Belastung durch den hydrostatischen Druck, der bei Ausfall der Abflussmöglichkeiten auch bei der Drainage-Folie auftreten kann. Als Schutz- und Stüttschicht eignet sich in beiden Fällen Spritzbeton, selbstverständlich auch für die Ausgleichsschicht, mit der in der Regel die Felsoberfläche zu egalieren ist, bevor die Isolation verlegt oder aufgetragen werden kann.

Für die zuvor erwähnten Fälle B und C bietet die Verwendung einer Isolation die in Bild 3 dargestellten Mög-

lichkeiten. Dabei kann die Drainage-Folie durch eine verdrängende Isolation ersetzt werden.

Ausführung

Wenn eine Felsoberfläche mit Spritzbeton zu beschichten ist, sei es zur Konsolidierung oder zur Schaffung einer Unterlage für die Isolation, so ist zunächst die Vorbereitung und nötigenfalls die Vordichtung der Auftragsfläche wichtig. Zur Vorbereitung gehört das Räumen und Reinigen der Felsoberfläche, indem man lockere Felsteile und alle Verunreinigungen beseitigt, welche die innige Haftung zwischen Gestein und Spritzbeton beeinträchtigen könnten. Dabei trachtet man danach, Vorsprünge und Felsspitzen abzutragen, um die grössten Unebenheiten zu beheben. Das vereinfacht die Armierungsarbeit und erspart Spritzbeton. Anschliessend wird die Oberfläche in der Regel mit Druckluft und Wasser gründlich gewaschen. Normalerweise bezweckt man damit auch, die Auftragsfläche – ob Fels oder eine zuvor aufgetragene Spritzbetonschicht – gründlich mit Wasser zu sättigen, damit ihre Poren dem frischen Spritzbeton kein Hydratationswasser entziehen, weil sonst Festigkeit und Haftung leiden könnten. Nicht in Frage kommt diese Massnahme selbstverständlich bei Gesteinen, die sich unter der Einwirkung von Feuchtigkeit rasch verändern, etwa auflösen oder quellen.

Vordichtung

Unter Vordichtung versteht man die Trockenlegung der Auftragsfläche des Spritzbetons. Sie ist nötig, weil qualitativ hochwertiger Spritzbeton nur dann fachgerecht aufgebracht werden und einwandfrei erhärten kann, wenn er bis zu einer angemessenen Festigkeit nicht durch Wasserdruck beansprucht wird.

Die Vordichtung besteht im Fassen und Ableiten der sichtbaren Bergwasseraustritte. Um die oft diffusen Vernässungen ausgedehnter Flächen einzuengen und auf gut lokalisierbare Wasseraustrittsstellen zu konzentrieren, beschichtet man den Fels meist zuerst mit einer wenige Zentimeter dicken Lage feinkörnigen Spritzmörtels («Gunit»). Für das anschliessende Fassen und Ableiten bieten sich zwei Möglichkeiten: das Einsetzen von Entwässerungsrohren und das Verlegen von Wasserableitungen. Die Entwässerungsrohre

bestehen aus etwa zollstarken Rohr- oder Schlauchstücken, die man direkt an der Wasseraustrittsstelle etwa senkrecht zur Profilebene so anmauert, dass das Wasser in den Hohlraum fliesst, ohne die Auftragsfläche des Spritzbetons zu überrieseln. Ist danach der Spritzbeton in genügender Stärke und Festigkeit aufgebracht, werden die Entwässerungsröhre entfernt sowie die verbleibenden Löcher mit schnellbindendem Mörtel verstopft und nötigenfalls mit einer weiteren Spritzbetonschicht überdeckt. Diese Vordichtungsmethode weist zwei Nachteile auf: Die stachelartig aus der Auftragsfläche herausragenden Rohrstücke und das daraus fließende Wasser behindern die folgenden Arbeitsgänge und ausserdem wird das Bergwasser schliesslich verdrängt, so dass sich hinter dem Spritzbeton ein hydrostatischer Druck aufbauen kann. Das ist beim anderen Vordichtungsverfahren, bei den Wasserableitungen mit Drains, nicht der Fall, weil sie das gefasste Bergwasser entspannt ableiten. Sie bestehen aus halben Röhren oder Schläuchen, die man mit schnellbindendem Mörtel an die Auftragsfläche so anmauert, dass sich von der Austrittsstelle bis zur Sohle eine Drainageleitung von halbkreisförmigem Querschnitt ergibt (Bild 4). Die Drains, die man möglichst längs Spalten und Klüften bis zur Sohle drainage verlegt, werden anschliessend mit Spritzbeton überdeckt. Sie bleiben also auch nach der Fertigstellung der Kavernenauskleidung noch wirksam. Die Drains müssen so verlaufen, dass das Wasser stetig abfliessen kann. Ihr Querschnitt ist so gross zu wählen, dass Ablagerungen von Schwebstoffen des Bergwassers nicht zu Versinterungen und Verstopfungen führen können. Allerdings ist dies bei Bergwässern mit starker Mineralfracht langfristig nicht ganz zu vermeiden.

Drains als Bestandteil der Abdichtung mit Spritzbeton

Verzichtet man wegen der Geringfügigkeit der Wasserzuflüsse eines Hohlraumes auf eine besondere Isolation, so hat der Spritzbeton allein die Abdichtung zu gewährleisten. In diesem Falle dienen die Drains zur Ableitung von Bergwassereintritten nicht mehr nur der Vordichtung, sondern wirken zusammen mit dem Spritzbeton als Abdichtung. Dann ist die dauernde Funktionstüchtigkeit der Drains wichtig. Ist diese wegen der Gefahr der Versinterung unsicher und bestehen keine Möglichkeiten zur Spülung und Reinigung, so ist einer Drainverstopfung mit anderen Massnahmen vorzuzukommen, beispielsweise mit einem möglichst dichten Spritzbeton sowie durch die konstruktive Verstärkung des Spritzbetons

längs dem Drainverlauf. Vor allem müssen die Drains alle möglichen Austrittswege des Bergwassers erfassen, auch die nur periodisch benützten und solche, die möglicherweise erst nach der Verkleidung des Felses mit Spritzbeton auftreten. Dabei handelt es sich zumeist um Feuchtigkeit, die anfänglich in so geringer Menge oder über grosse Flächen so fein verteilt hervortritt, dass sie an der Oberfläche sogleich verdunstet und deshalb gar nicht als Vernässung auffällt. Der Spritzbeton verschliesst nun die bisherigen Sickerwege dieser Bergfeuchtigkeit, das Wasser staut sich allmählich je nach der Gesteinszerklüftung bis weit ins Berginnere hinein und drückt auf den Spritzbeton. Sind die wassergefüllten Spalten überdies miteinander verbunden, so können sich aus unscheinbaren Feuchtstellen im Lauf der Zeit grosse Wassermengen bilden, die irgendwann und -wo durch eine Undichtigkeit oder einen Riss im Spritzbeton in den Hohlraum gelangen. So kann aus der im Rohbau vollkommen trocken scheinenden Kaverne paradoxerweise gerade durch den zur Abdichtung aufgetragenen Spritzbeton eine Tropfsteinhöhle werden.

Dieser Gefahr ist schon bei der Vordichtung zu begegnen. Am zweckmässigsten verkleidet man nach der Reinigung die Felsoberfläche mit einer Schicht Spritzbeton, wobei man vor allem die Einbuchtungen, Spalten und Klüfte zu füllen trachtet. Die anschliessend in der Verkleidung sichtbaren Bergwasseraustritte werden mit Drains gefasst und abgeleitet. Danach überdeckt man die solchermassen vorgedichtete Felsfläche erneut mit einer durchgehenden Spritzbetonschicht, die möglichst lange beobachtet wird. Neu auftretende Undichtigkeiten sind fortlaufend mit zusätzlichen Drains abzuleiten (oder in zuvor erstellte Drains einzuführen). Sofern die Beobachtungszeit ausreicht, können praktisch alle möglichen Bergwasseraustritte erfasst und dräniert werden. Erst danach trägt man die endgültige Spritzbetonverkleidung auf.

Isolation

Eine verdrängende Isolation (Kunststoff-Folie, aufgeklebte Gewebbahn, aufgespritzte Bitumenschicht) benötigt meist eine mehr oder weniger ausgeglichene Unterlagsschicht mit bestimmten minimalen Ausrundungsradien an Einbuchtungen und Vorsprüngen. Eine Drainage-Folie aus strukturiertem Kunststoff hingegen kann auch einer recht unregelmässigen Felsoberfläche angepasst werden. Sie braucht daher nicht unbedingt eine Ausgleichsschicht. Allerdings muss die Struktur der Felsoberfläche die zweckmässige Befestigung der Drainage-Folie erlauben und keine so starken Einragungen

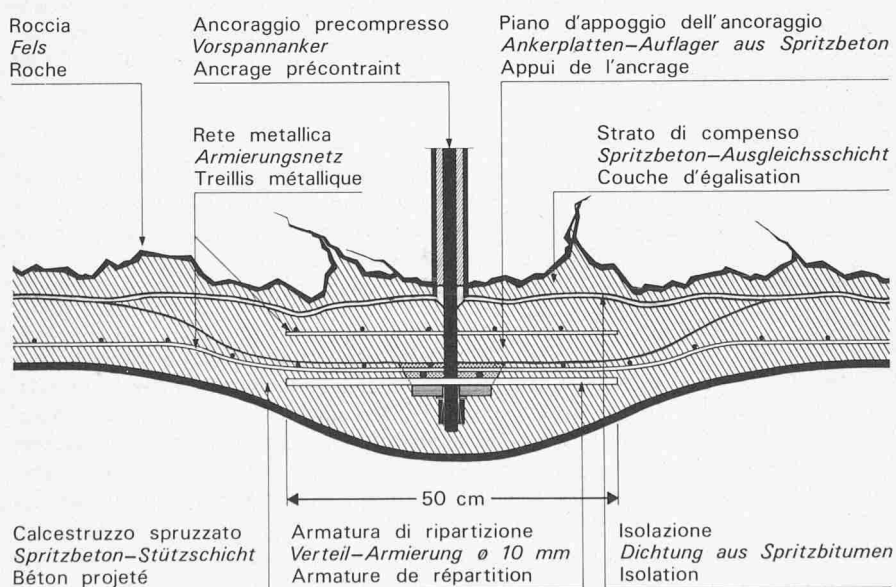


Bild 5. Verdrängende Isolation aus Spritzbitumen mit Schutz- und Stützschrift aus Spritzbeton, Konstruktion im Bereich eines Ankerkopfes

aufweisen, dass sich sogenannte Taschen bilden. Das durch die Folie drainierte Wasser sollte nirgends stehen bleiben, sondern überall an deren unteren Rand gelangen, wo es in einer Sammelleitung der Sohlendrainage zugeführt wird. Diese Sammelleitung, ähnlich beschaffen wie die Drains der Vordichtung, sollte einen ausreichenden Querschnitt und kein Gegengefälle aufweisen. Sowohl die verdrängende Isolation als auch die Drainage-Folie erfordern eine Stützschiicht, die gleichzeitig dem Schutz vor Beschädigungen dient. Sie muss dem möglicherweise auftretenden Wasserdruck widerstehen. Sind die geologischen Gegebenheiten sowie die Querschnittsform des Hohlraumes oder die Felsoberfläche ungünstig, kann es nötig sein, die Stützschiicht durch Anker mit dem Fels zu verbinden. Dann ist der Konstruktion des Ankerbereiches besondere Sorgfalt zu widmen (Bild 5).

Es ist zu beachten, dass Drainage-Folie und verdrängende Isolation Druckkräfte übertragen können. Die dem Schutz und der Stützung der Folie dienende Spritzbetonschiicht ist als getrennte Konstruktion zu bemessen, die zumindest ihr Eigengewicht tragen muss. Kann sich hinter der Drainage-Folie ein Wasserdruck aufbauen, muss selbstverständlich auch dieser berücksichtigt werden. Er tritt auf, wenn das drainierte Wasser nicht abfließt, etwa weil die Sammelleitung oder deren Mündung versintert oder zufriert. Diese Gefahr ist bei Kavernen zu berücksichtigen, die im Frostbereich liegen.

Spritzbeton

Der Spritzbeton hat bei den vorliegenden Betrachtungen hohen Anforderungen zu genügen. Als Mindestwerte sollten erreicht werden:

Druckfestigkeit: $\beta_d^{28} = 350 \text{ kg/cm}^2$
 Zugfestigkeit: $\beta_z^{28} = 15 \text{ kg/cm}^2$
 Durchlässigkeitskoeffizient (nach Darcy): $k_w = 20 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$

Diese Eigenschaften sind nur zu erzielen, wenn man allen Phasen der Spritzbetonherstellung hohe Sorgfalt widmet. Die Festigkeiten sowie die Dichtigkeit des Spritzbetons hängen nicht nur von der Wahl zweckmässiger Zuschlagstoffe und von der richtigen Zementdosierung ab; sehr wichtig sind auch der Aufbau, die Gesamtstärke und die Armierung sowie die Nachbehandlung des Spritzbetons. Auf die Bedeutung einer sachgemässen Vordichtung ist bereits hingewiesen worden. Es ist zu bedenken, dass die Verwendung von Schnellbindern die Qualität des Spritzbetons beeinträchtigen kann.

Spritzbeton zeichnet dank dem schichtenweisen Auftrag die Form der verkleideten Felsfläche in groben Zügen nach (Bild 6). Dies kann je nach Bestimmung der Kaverne ein wertvolles gestalterisches Element sein, etwa bei unterirdischen Bädern, Weinkellern oder Gaststätten. Zur optischen Aufhellung führt man die letzte Spritzbetonschiicht vielfach mit weissem Spezialzement statt mit dem üblichen Portland-Zement aus. Verwendet man zusätzlich noch Weisskalk, erhöht sich die Atmungsfähigkeit (Hygroskopizität) des Spritzbetons stark, was der Bildung von Kondenswasser entgegenwirkt. Eine helle Spritzbetonoberfläche ergibt nicht nur eine bessere Lichtausbeute; sie vermindert auch wesentlich die verfahrenstechnischen Schwankungen im Grauton («Wolkung»), die auf grossen Flächen nicht gänzlich zu vermeiden sind. Mit Spritzbeton lassen sich künstliche Formen erzielen. So kann man beispielsweise ebene und geradlinige Wände aus Mauerwerk oder Beton derart mit Spritzbeton beschichten, dass sie die unregelmässige Struktur und damit das Aussehen einer verkleideten Felspartie erhalten. Die letzte Spritzbetonschiicht kann auch mit feinkörnigen Zuschlagstoffen ausgeführt und abgerieben oder geglättet werden.



Bild 6. Stütz- und Schutzschicht aus Spritzbeton; man beachte die in groben Zügen nachgezeichnete Struktur der Felsoberfläche

Konstruktive Einzelheiten

Das Spritzbeton-Trockengemisch setzt sich gewöhnlich aus runden Zuschlagstoffen der Korngrösse 0–10 mm oder 0–15 mm und aus 300–350 kg Zement je 1000 Liter Kiessand zusammen. Um die Dichtigkeit zu erhöhen, kann es nützlich sein, eine bestimmte Menge Mehlkorn hinzuzufügen. Für die Dimensionierung des Spritzbetons und für diejenige der Armierung und allfälliger Felsanker sind verschiedene, zum Teil voneinander abhängige Faktoren massgebend, nämlich die Beschaffenheit des Felses, die Abmessungen des Hohlraumes, die Lage im Bereich des Querschnittes (Gewölbe oder Widerlager), die Art der Belastung, die verlangte Sicherheit sowie die Ausführungsart. Beim unmittelbar am Gestein haftenden Spritzbeton kommt es sehr stark auf die Struktur und Zerklüftung der Felsoberfläche an. Unter durchschnittlichen Verhältnissen sind zur Konsolidierung und Stützung zwischen 10 und 20 cm mittlerer Fertigstärke nötig. Das sind je m^2 Auftragsfläche zwischen 0,2 und $0,4 \text{ m}^3$ Trockengemisch, weil für die Verkleidung von Fels mit Spritzbeton diese Regel gilt: Bei 25% Trockengemischverlust durch den Rückprall und bei einem Verdichtungsfaktor von 1,35 benötigt man für eine bestimmte Fertigstärke die doppelte Stärke Trockengemisch. Die Ausgleichsschiicht zur Aufnahme der Drainage-Folie kommt gewöhnlich mit etwa 5 cm mittlerer Fertigstärke aus, wohingegen die verdrängenden Isolationen zu ihrer fachgerechten Montage eine ebenmässige Unterlage und damit eine grössere Durchschnittsstärke der ausgleichenden Spritzbetonschiicht erfordern. Die Stärke der Stütz- und Schutzschicht ergibt sich aus der statischen Berechnung. Sie beträgt je nach Tragsystem und Wirtschaftlichkeit zwischen 10 und 20 cm. Spritzbeton kostet zumeist je Fest-m^3 mehr als der geschalte Ort beton. Sobald die erforderliche Auskleidungsstärke ein bestimmtes Mass überschreitet, kann Spritzbeton unwirtschaftlich werden.

Für die Drains verwendet man gewöhnlich Halbschalen aus Eternit oder Kunststoff mit einem lichten Durchmesser von wenigstens 80 mm. Die Sammelleitung am unteren Rand der Drainage-Folie besteht aus den gleichen halben Rohren, weist aber einen grösseren Durchmesser auf, meist wenigstens 120 mm. Die verdrängende Isolation (Folien, Gewebe, Bitumen) ist zwischen 2 und 10 mm dick, die Stärke der Drainage-Folie liegt bei 1–2 mm, der durch sie geschaffene Hohlraum misst 20–25 mm.

Zur Armierung des Spritzbetons benützt man Netze aus verschweisstem Stahldraht mit Maschenweiten von wenig-

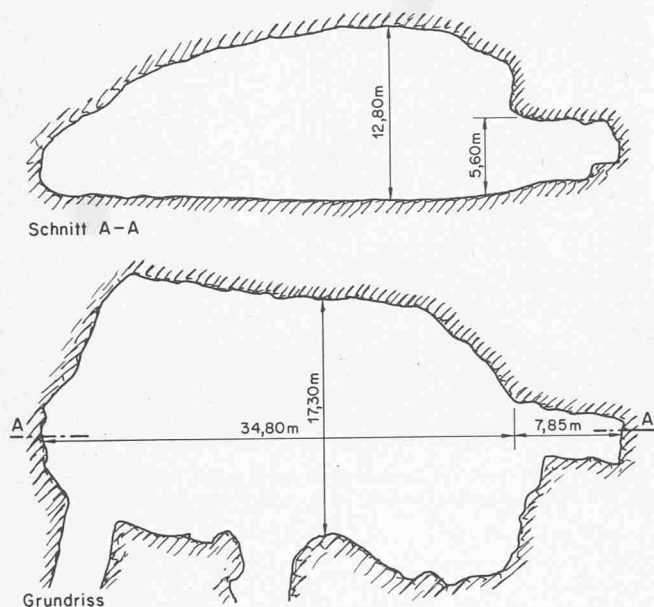


Bild 7. Ausgesprengte Kaverne für die Felskirche St. Michael in Raron VS, Grundriss und Schnitt

stens 100 mm und Drahtdurchmessern von 4 mm und mehr. Als Anker dienen je nach Hohlraumquerschnitt und Belastung verschiedenartige Systeme. Üblich sind Verankerungslängen bis zu etwa 15 m und Bruchlasten bis zu 120 t. Wichtig ist der ständige Korrosionsschutz der Anker.

Die Felskirche St. Michael in Raron VS

Die Katholische Pfarrgemeinde von Raron im Oberwallis hatte im Laufe der sechziger Jahre über den Bau einer neuen Kirche zu entscheiden. Sie sollte das alte Gotteshaus aus dem Jahre 1517 ergänzen, das malerisch auf einer aus der Ebene emporragenden Felskuppe, dem sogenannten Burghügel steht (und ausser wertvollen Fresken auch das Grab

Rainer Maria Rilkes beherbergt). Neben der räumlichen Enge war es vor allem die mühsame Zugänglichkeit der alten Kirche, die den Anstoss zum Neubau gab. Es setzte sich schliesslich die Idee durch, als neuen Sakralbau eine Kaverne im Fels einzurichten, und zwar unter der alten Dorfkirche. Von der steil abfallenden Westflanke des Burghügels trieb man zwei parallele, etwa 14 m lange Stollen vor. An ihrem Ende sprengte man die in Bild 7 dargestellte Kaverne aus. Sie weist eine abgewinkelte Oberfläche von rund 1600 m² auf und befindet sich bei einer Ueberdeckung von mindestens 11 m in ruhig gelagertem Malmkalk. Der Fels war verhältnismässig standfest, die Wasserzuflüsse beschränkten sich auf wenige Tropfstellen längs Klüften im Fels. Nur während der Schneeschmelze oder anhaltender Niederschläge traten zusätzliche Vernässungen auf. Als Auskleidung war also eine Kombination aus Konsolidierung und Abdichtung erforderlich (Fall C von Bild 3). Ausgeführt worden ist eine Konsolidierung aus Spritzbeton sowie eine Isolation aus kalt aufgespritztem Bitumen, die von einer Spritzbeton-Stützschiicht in Verbindung mit Felsankern gehalten und geschützt wird.

Nach der Reinigung und Vordichtung der Felsoberfläche glich man die grössten Unebenheiten mit durchschnittlich 2 cm Spritzbeton aus. Anschliessend wurden im Gewölbebereich 70 Vorspannanker VSL 16-600 von 6 m Länge im Abstand von 1,80 m versetzt sowie in Kämpferhöhe eine bis zwei zusätzliche Reihen Perfo-Anker (Durchmesser 20 mm, Länge 3 m, 71 Stück). Es folgte der Auftrag der Isolation, die einen besonderen Anschluss an die Kabelhülsen der Vorspannanker erforderte. Ueberdies war es bei diesen Ankern nötig, vor der Vorspannung ein zweckmässiges Auflager für die Ankerplatte zu schaffen, um ein Ausquetschen der Isolation zu verhindern (Bild 5). Wegen der unebenen, stark buckligen Oberfläche kam ein bahnenförmiges Abdichtungsmaterial nicht in Frage. Deshalb wurde eine insgesamt dreilagige Haut aus elastifiziertem Bitumen mit einer Zwischenlage aus reinem synthetischem Kautschuk aufgespritzt. Das Material wurde als Dispersion aufgebracht und gleichzeitig mit einem Fällmittel versprüht. Es entstand je Spritzauftrag ein etwa 2 Millimeter dicker Film, der sofort koagulierte. Trotz der guten mechanischen Eigenschaften des Films und

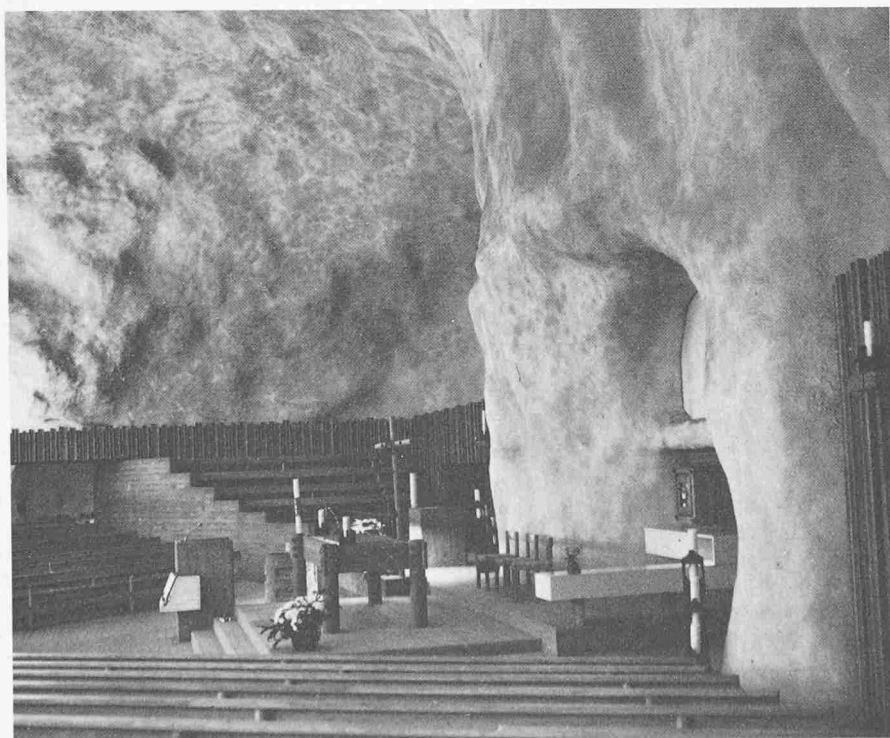
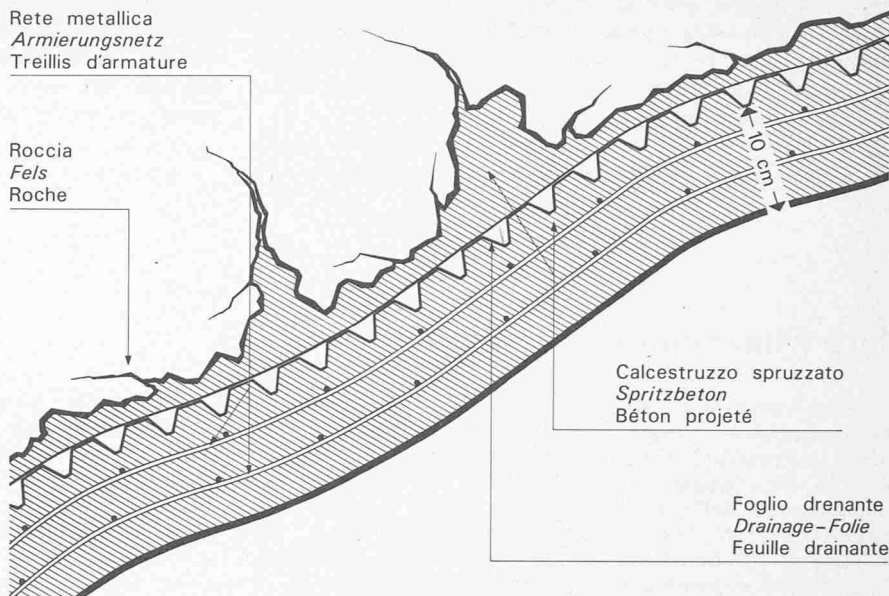


Bild 8. Felskirche St. Michael in Raron, Blick auf den Altarbereich

Bild 9. Private Schwimhalle in Zermatt, Aufbau der Auskleidung



der einfachen Verarbeitung ergaben sich Schwierigkeiten, weil im Bereiche von Spritzschatten poröse Partien nicht zu vermeiden waren. Mehrere Wochen nach der Fertigstellung traten vereinzelte Undichtigkeiten der Isolation auf, die noch nicht gänzlich behoben werden konnten. Nach dem Vorspannen der Anker wurde die Isolation mit einer 10 cm starken Stütz- und Schutzschicht aus Spritzbeton versehen. Zu deren Armierung verwendete man ein Stahldrahtnetz 100/100/3/3 mm, das im Gewölbebereich über eine Verteilarmierung durch die Vorspannanker fixiert wurde.

Die letzte Schicht des Spritzbetons wurde mit Weisskalk und weissem Zement aufgehell. Besonderen Wert legte der Architekt darauf, die natürliche Struktur der Felsoberfläche beizubehalten und die stellenweise ausgeprägte Zerklüftung nicht durch übermässiges Ausfüllen der Spalten und Einbuchtungen zu verwischen. Die Kirche ist am 28. September 1974 eingeweiht worden.

Eine private Schwimhalle in Zermatt VS

In Verbindung mit dem unterirdischen Zugang zu zwei Wohnhäusern in Zermatt hat der private Bauherr in einer Felskaverne ein Schwimmbad samt Nebeneinrichtungen erstellt. Die im Grundriss L-förmige Höhle befindet sich etwa 20 m unter der Erdoberfläche und ist über einen rund 170 m langen Stollen und von oben mit einem Aufzug zugänglich. Die Kaverne weist eine Bodenfläche von 200 m² auf. Davon entfällt ungefähr ein Drittel auf das Schwimmbecken von etwa 100 m³ Inhalt, der Rest auf die Sanitäreinrichtungen, auf Sauna, Liegeplatz usw.

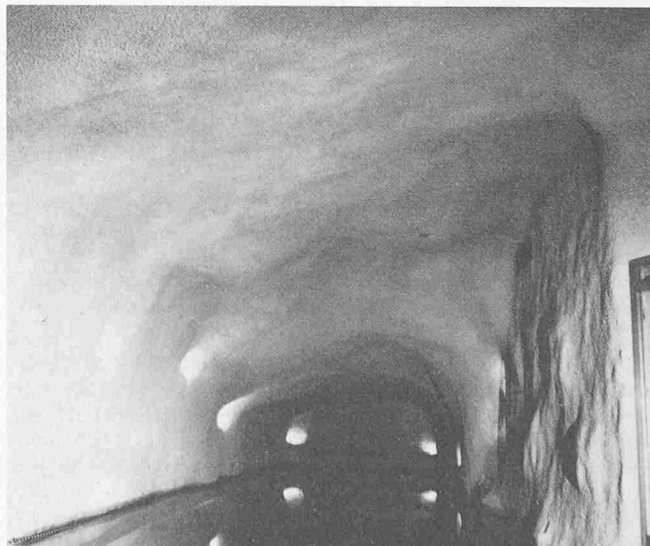
Mit Ausnahme des angrenzenden Liftschachtfusses war die gesamte, 460 m² messende Gewölbe- und Hohlraumfläche des Hohlraumes gegen das periodisch beträchtliche Tropfwasser abzudichten. Wegen der Standfestigkeit des Felses (Amphibolit, teils massig, teils verschiefert) genügte eine zweckmässige Abdichtung (Fall B von Bild 3). Dafür wurde eine Drainage-Folie mit einer Stütz- und Schutzschicht aus Spritzbeton gewählt.

Nach der Ableitung der grössten Wasserzuflüsse mit Drains wurde der Fels mit einer durchschnittlich 9 cm dicken

Spritzbetonschicht verkleidet. Sie diente zur Ausfüllung des Überprofils und als Unterlage der anschliessend verlegten Drainage-Folie. Letztere besteht aus weichmacherfreiem Hart-PVC von etwa 1 mm Stärke, dessen Oberfläche kegelförmige Noppen aufweist (Bild 2). Das von der Drainage-Folie abgeleitete Wasser wird von einer längs des unteren Randes verlaufenden Ringleitung von 120 mm Durchmesser gesammelt und zusammen mit dem Wasser aus den Drains der Vordichtung in die Hauptdrainage geleitet. Als Stütze und Schutz der Isolation dient eine 10 cm starke, mit Stahldrahtnetz 100/100/4/4 mm armierte Spritzbetonschicht. Sie geht im Bereich des Schwimmbeckens nahtlos in dessen Verkleidung über, weil auch das ganze Becken mit Spritzbeton ausgekleidet ist.

Im Gewölbebereich enthält der Spritzbeton zur Aufhellung und Verbesserung der Hygroskopizität Weisskalk und Weisszement. Um die Atmungs-fähigkeit zu erhöhen und den Schall zu dämmen, hat man die letzte Spritzbetonschicht im

Bild 10. Blick in die Schwimhalle



Gewölbe besonders rauh ausgeführt. Die ausgeprägt schwammartige Oberflächenstruktur vermindert den Nachhall beträchtlich; ausserdem bindet die grössere relative Oberfläche mehr Feuchtigkeit.

Im benetzten Teil des Bassins ist der ebenfalls weisse Spritzbeton sauber geglättet worden. Sowohl im Gewölbe als

auch im Bassin hat man danach getrachtet, die Unebenheiten der Felsoberfläche in groben Zügen beizubehalten. Die Auskleidung der 1978 fertiggestellten Schwimmhalle hat sich bisher einwandfrei bewährt.

Adresse des Verfassers: *Pietro Teichert*, E. Laich SA, 6671 Avegno TI

Sind Mikrowellen harmlos?

An lebenden Zellen soll jetzt verstärkt untersucht werden, ob elektromagnetische Strahlen im Millimeterwellen-Bereich, sogenannte Mikrowellen, biologische Systeme beeinflussen können. Während der nächsten zwei Jahre fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) dieses von *Ludwig Genzel*, *Max-Planck-Institut für Festkörperforschung* (MPIF), *Stuttgart*, und *Wolfgang Pohl*, *Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung* (GSF), *Frankfurt*, gemeinsam vorgeschlagene Projekt.

Anhaltspunkte für unbekannte Wirkungen

Erste Experimente in der Bundesrepublik wurden bereits gemeinsam von *Fritz Keilmann* (MPIF) und *Werner Grundler* (GSF) unternommen. Dabei zeigten sich konkrete Anhaltspunkte für nichtthermische Effekte an Hefezellen bei der Bestrahlung mit Mikrowellen. «Es kommt nun darauf an, solche Versuche mit verbesserten Mitteln auszuführen, um auch die letzten Zweifel auszuräumen», erklärt Genzel.

Unabhängig voneinander fanden ein kanadischer und sowjetische Wissenschaftler zuerst solche Zusammenhänge: Bei einer von der *Akademie der Wissenschaften der UdSSR* veranstalteten Sitzung berichteten Anfang des Jahres 1973 russische Forscher, dass Mikrowellen zwischen fünf und acht Millimeter Wellenlänge das Wachstum von einzelligen Lebewesen wie Bakterien oder Viren, aber auch von Fliegenlarven oder Hühner-Embryonen beeinflussen können. Mikrowellen sind aber nicht nur schädigend: Bestrahlte Mäuse zum Beispiel überlebten eine sonst für ihre Knochenmarkstammzellen tödliche Dosis an Röntgenstrahlen.

Kurzfassungen der im Moskauer *Lebedew-Physik-Institut* gehaltenen Vorträge wurden ungefähr ein Jahr später veröffentlicht. Prof. Genzel: «Seither ist nie wieder etwas erschienen. Auch auf Fragen erfährt man nichts; wir wissen deshalb nicht, was in der Sowjetunion auf diesem Gebiet geschieht». Wissenschaftler der westlichen Welt reagierten daher mit «äusserster Skepsis». Zwar haben inzwischen verschiedene Forschergruppen weitere Experimente unternommen und scheinen die Ergebnisse, so Genzel, «im Prinzip bestätigt zu haben». Doch seien die untersuchten biologischen Systeme «viel zu kompliziert», als dass man schon jetzt eindeutige Zusammenhänge erkennen könne, zumal laut Genzel «nicht einmal feststeht, ob die dabei verwendeten physikalischen Messmethoden auch zuverlässig genug sind.»

Geschäft mit der Angst

Um so heftiger wucherte das Geschäft mit der Angst. Vor allem in den USA wurden die allgegenwärtigen Gefahren einer «elektronischen Umweltverschmutzung» beschworen, die angeblich von den besonders in der Nachrichtentechnik verwendeten Zentimeter- und Millimeterwellen ausgehen. Prof. Genzel: «Die Gefahren, die von thermischen Effekten der Mikrowellen ausgehen können, sind seit langem bekannt. Dass auch nichtthermische Wirkungen der Mikrowellen gefährlich sein könnten, ist reine Spekulation. Bisher gibt es dafür keine wissenschaftlich gesicherten Beweise.»

Die thermische Wirkung von Mikrowellen nutzen auch in der Bundesrepublik immer mehr Haushalte: Mikrowellenherde können in Minutenschnelle tiefgefrorene Speisen auftauen und erhitzen. Manche Hersteller solcher Geräte zeigen diese Wirkung der Mikrowellen besonders eindrucksvoll – mit drei verschiedenen Gläsern: Das erste ist leer, das zweite mit Wasser gefüllt, ebenso wie das dritte: Darin schwimmt ein Goldfisch. Doch ist dieses Glas von einer dünnen Aluminiumfolie umgeben.

Schon nach wenigen Minuten liefern die Mikrowellen ein verblüffendes Ergebnis: Das erste, leere Glas ist unverändert. Die Mikrowellen haben seinen Werkstoff unbehindert durchdrungen, ähnliches geschieht auch mit Papier, Kunststoff oder Keramik. Im zweiten Glas hingegen kocht das Wasser. Es «verschluckt» (absorbiert) nämlich die elektromagnetische Strahlung und erhitzt sich dadurch – genau so wie feuchtigkeitshaltige Lebensmittel. Im dritten Glas schwimmt unterdessen der Fisch weiterhin munter im kühlen Nass: Die dünne Metallfolie hat die Mikrowellen total reflektiert und dadurch das Wasser abgeschrimmt.

Extreme Messmethoden

Vor allem dieser thermische Effekt macht den Wissenschaftlern zu schaffen, wenn sie die möglichen «nichtthermischen Wirkungen» der Mikrowellen erforschen wollen. Denn die untersuchten Zellkulturen leben meistens im Wasser, zum Beispiel in Nährstofflösungen oder enthalten in ihren Zellen Wasser. «Eine nur 0,3 Millimeter dünne Wasserschicht verschluckt den Millimeterwellenstrahl zu 90 Prozent» bestätigt Fritz Keilmann. «Andererseits durchdringen Mikrowellen sogar zentimeterdicke Schichten aus wasserfreiem Zellmaterial, beispielsweise getrocknete DNA, nahezu unbehindert. Wir müssen also extrem empfindliche Messmethoden entwickeln.»

Anstösse, dieses Forschungsgebiet aufzugreifen, lieferten theoretische Überlegungen von *Herbert Fröhlich*, *Liverpool*. Wegen ihrer Erfahrungen mit Mikrowellen bzw. mit der verwandten *Infrarot-Spektroskopie* und der notwendigen modernen Ausrüstung für diese schwierigen Messprobleme erscheinen die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung besonders geeignet, solche nichtthermischen Wirkungen von Mikrowellen auch in der Bundesrepublik zu erforschen. So untersuchen die Stuttgarter Wissenschaftler zum Beispiel seit langem die Wirkungen von Schwingungen in winzigen Festkörperkristallen. «Im Vergleich dazu sind Biomoleküle nicht nur viel grösser, sondern auch wesentlich komplizierter gebaut und deshalb sind mögliche Wirkungen von Schwingungen in solchen Gebilden für uns als Festkörperphysiker besonders interessant», meint Genzel. «Die Max-Planck-Gesellschaft gibt uns die Freiheit, solche neuen, aufregenden Forschungsarbeiten aufzugreifen, die auf Dauer weder von Physikern noch von Biologen allein gelöst werden können.»

Zum ersten Mal wollen die Wissenschaftler bei dem jetzt von der DFG unterstützten Projekt den Teil der Mikrowellen messen, der möglicherweise von den Zellen oder ihren Bestandteilen absorbiert wird. Dies ist wahrscheinlich nur ein verschwindend geringer Betrag, vielleicht nur ein Hunderttausendstel der eingestrahlten Mikrowellen-Energie. «Das hat bisher noch niemand gemessen», sagt Keilmann. «Vielleicht kommen wir damit den Ursachen auf die Spur, die zu den beobachteten biologischen Effekten passen.»

Zehn Generationen

Bei der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung in Neuherberg bei München wird *Werner Grundler* Kulturen von Hefezellen mit Mikrowellen unterschiedlicher Wellenlänge bestrahlen: Zum einen soll das Wachstum der verschiedenen Zellkolonien beobachtet und zum anderen – erstmals – auch das Verhalten der einzelnen Zellen über zehn Generationen untersucht werden.

Die Ergebnisse dieses vorläufig auf zwei Jahre begrenzten Projekts sind ungewiss. «Je mehr diese Untersuchungen von der physikalischen Seite her vor allem hinsichtlich der Messverfahren