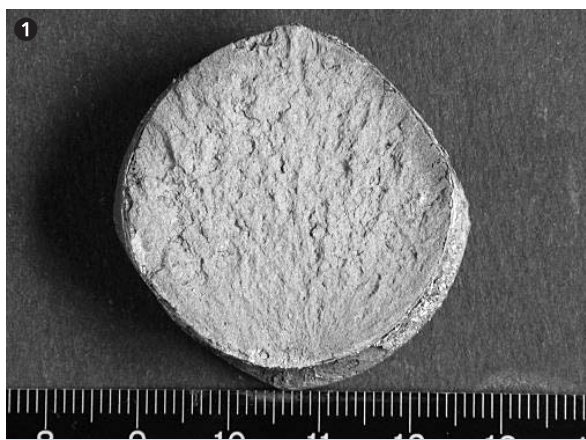


Ueli von Matt

Quelle: Tagungsheft der fib-CH, Copyright by SIA for fib-CH, ISBN-Nr. 3-908483-30-1



Sprödbbruch eines 1977 eingebauten Stabankers \varnothing 36 mm. Der Bruch erfolgte plötzlich im Jahr 1998 ohne äussere Einwirkung bei einer Spannung von etwa $0,55 f_{tk}$. Er ging von einer kleinen Korrosionsnarbe aus. Ein klarer Beleg dafür, dass das Konzept von Opferstahl (sacrificial steel) bei Spannstählen sinnlos ist.

Brittle rupture of a prestressed ribbed bar anchor (\varnothing 36 mm) installed in 1977. Rupture happened suddenly in 1998 at a tension of $0.55 f_{tk}$ and without apparent exterior influence. The rupture started at a small corrosion notch. The example is a clear proof that sacrificial steel is of no use for prestressing steel.

Einleitung

In der Schweiz sind permanent verankerte Bauwerke weit verbreitet. Die Gründe dafür liegen in der Topografie des Landes. In den Alpen stehen zahlreiche Wasserkraftwerke. Viele Verkehrswege verlaufen durch enge Gebirgstäler. Die dicht besiedelten Gebiete liegen im hügeligen Alpenvorland.

Zahlreiche Verankerungen sind ab 1950 bis Mitte der 70er-Jahre erstellt worden. In der Hochkonjunktur nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Wasserkraftwerke gebaut, mit dem Bau der Nationalstrassen begonnen und die Verkehrswege in den Siedlungsgebieten ausgebaut. Damals entwickelte sich die Ankertechnik rasant, wobei die Dauerhaftigkeit der Bauwerke und damit auch der Anker kein dominantes Thema war. Gefragt waren rasche Effizienz und niedrige Kosten. Der Begriff «Nachhaltigkeit» existierte noch gar nicht!

Aufgeschreckt durch einige Schadenfälle, die glücklicherweise keine Menschenleben forderten, sind sich die Baubehörden Mitte der 80er-Jahre bewusst geworden, dass sie über zahlreiche verankerte Bauwerke verfügten, über deren Dauerhaftigkeit keine Aussage möglich war. Viele von ihnen beschlossen, künftig keine permanenten Anker mehr einzusetzen, selbst wenn dies erhebliche Mehrkosten zur Folge hatte.

Korrosion von Spannstählen

In dieser für die Ankertechnik bedrohlichen Situation entschlossen sich einige von dieser Technik faszinierte Fachleute, zusammen mit innovativen Ankerfirmen einen Korrosionsschutz für permanente Anker zu entwickeln, der wirklich dauerhaft und auch langfristig überprüfbar ist. Die Untersuchung der eingetretenen Schadenfälle führte zur Erkenntnis, dass Spannstähle neben der anodischen (abtragenden) Korrosion auch durch kathodische Korrosion gefährdet sind, nämlich durch wasserstoffinduzierte Versprödung, die zu Spannungsrissskorrosion führt (Bilder 1 und 2). Diese kann verursacht werden durch Streuströme, aber auch durch Makroelementbildung zwischen Bauwerksbewehrung und Ankerstahl und sogar durch Mikroelementbildung an einer Schwachstelle des Korrosionsschutzes. In jedem Fall sind elektrolytische Prozesse für die Zerstörung von Spannstählen verantwortlich. Solche Prozesse bedingen bekanntlich die Anwesenheit von Feuchtigkeit.

Neues Korrosionsschutzkonzept

Aus diesen Erkenntnissen entstand die Idee, den Korrosionsschutz so zu konzipieren, dass gar kein Wasserzutritt zum Ankerstahl mehr möglich ist. Wählt man für die Abdichtung des Anker-

Introduction

Permanently anchored structures are very common in Switzerland due to the country's topography. Since there are very few truly flat regions, a large part of all constructions are in the foothills or the mountains. Roads, railway lines, hydroelectric power stations, and buildings are numerous in the Alps.

Between the 1950s and the mid-1970s anchorages were installed in great numbers. Their number grew with the number of new roads, railways and power stations under construction during the postwar boom. Anchoring technology developed rapidly in these years, but the durability of anchors was not a major concern at the time. More emphasis was put on a speedy construction, on efficiency and on low costs.

Several ruptures of permanent anchors brought the issues of durability and surveyability of permanent anchors to the consciousness of the building authorities in the mid-1980s. Luckily enough, no people have been injured by these damages. Still, many regional and national authorities decided not to use permanent anchors any longer for safety reasons – even if this signified considerable additional construction costs.

Corrosion of prestressing steel

Now that the whole technology of permanent anchoring was put at risk, a group of experts got together in order to develop a corrosion protection system which guarantees durability of permanent anchors. In addition, the protection system was to allow for long-term surveillance of its efficiency. The study of the damages that had occurred revealed that prestressing steel was damaged not only by anodic but also by cathodic corrosion. In the second case, induced by hydrogen,

stahles von Baugrund und Bauwerk dauerhafte, elektrisch isolierende Materialien, können am Ankerstahl keine elektrolytischen Prozesse mehr ablaufen, das heisst, sowohl anodische wie kathodische Korrosion wird verhindert. Ein so konzipierter Korrosionsschutz bietet überdies den unschätzbaren Vorteil, dass seine Wirksamkeit sehr einfach am fertig eingebauten und gespannten Anker mit einer Messung des elektrischen Widerstandes zwischen Ankerstahl und Baugrund resp. Bauwerk auch langfristig überprüft werden kann.

Die Umsetzung dieser bestechenden Idee in die Baupraxis war nicht einfach. Anker werden ja oft bei misslichen Witterungsbedingungen (Regen, Kälte, Hitze) auf schlammigen Baustellen eingebaut. Zudem müssen die isolierenden Materialien, besonders im Ankerkopfbereich, hohen Pressungen, gewissen Deformationen und unterschiedlichen Witterungseinflüssen standhalten.

Eine wichtige Frage war: Wie gross muss der elektrische Widerstand sein, um eine Korrosionsgefährdung ausschliessen zu können? Auf Grund von Berechnungen und statistischen Überlegungen kamen Korrosionsspezialisten zum Schluss, dass der Widerstand etwa 100 000 Ohm ($0,1 \text{ M}\Omega$) betragen sollte. Auf die Plausibilität dieses Wertes, der immer wieder zur Diskussion gestellt wird, wird unten noch eingegangen.

Die ersten elektrisch isolierten Anker

Im Jahr 1992 ist es erstmals gelungen, eine Verankerung mit vollständig von Baugrund und Bauwerk elektrisch isolierten Ankern auszuführen (Bild 3). Von 100 Felsankern mit einer Festsetzkraft von 1965 kN wiesen über 90% im gespannten Zustand einen elektrischen Widerstand $R_I \geq 0,1 \text{ M}\Omega$ auf. Die meisten Anker hatten sehr viel grössere Widerstände, nämlich 100 bis über 200 $\text{M}\Omega$. Bei den neun Ankern mit ungenügenden Werten waren die Kunst-

prestressing steel became brittle, what led to tension-crack corrosion (figures 1 and 2). Such damage can either be caused by stray currents or by the forming of macroelements between the steel bars of the structure and the tendon or even by the forming of microelements at damaged spots of the protective sheath. In all these cases electrolytic processes are responsible for the destruction of the steel. It is well known that it takes humidity for such processes to take place.

A new concept for corrosion protection

These findings generated the concept of a corrosion protection system that would bar the access of water to the tendon. All electrolytic processes, both anodic and cathodic corrosion, would be impeded by the complete insulation of the tendon from the soil. Furthermore, by choosing electrically isolating materials for the sheathing, such a protection offers the huge advantage that its effectiveness can easily be measured by the electric resistance between the tendon and the soil or the structure.

Putting this concept into practice turned out not to be easy, as anchors are often put in place on muddy construction sites during bad weather conditions such as rain, heat or cold. What matters more difficult still was that the insulating materials needed to withstand high pressures, deformations and drastic changes of temperature. Hence, the crucial question to answer was: What electrical resistance is required to rule out any risk of corrosion? After calculations and thorough examination of statistical data, experts came to the conclusion that $100,000 \Omega$ ($0.1 \text{ M}\Omega$) would suffice. The plausibility of this value – which is often under attack – will be discussed below.

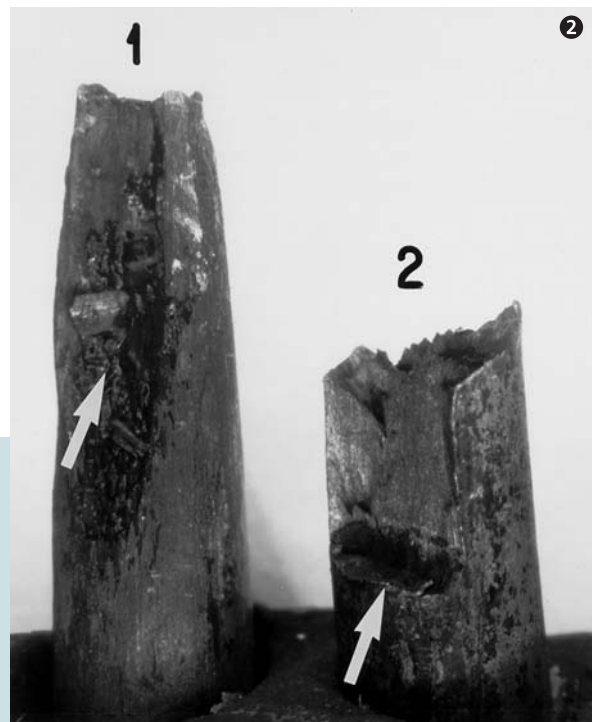
The first electrically isolated anchors

Anchoring with completely electrically isolated anchors was suc-

cessful for the first time in 1992 (figure 3). More than 90% out of 100 rock anchors with a lock-off load of 1965 kN showed an electric resistance $R_I \geq 0.1 \text{ M}\Omega$ after lock-off. Most anchors even showed much higher values, namely 100 up to over 200 $\text{M}\Omega$. On the remaining nine anchors which showed insufficient values the plastic sheaths had been damaged during transport, installation or testing. Damages due to testing, however, occurred only if the anchors sustained permanent displacement of more than 20 mm due to insufficient load capacity.

The experiences made by the execution of this anchorage led to the following conclusions:

- *The complete electric isolation of anchors is technically feasible, which means that overall corro-*



Sprödbrüche von Drähten eines 1978 eingebauten Litzenankers. Der Bruch erfolgte 1990 auf einem Spannungsniveau von $0,50 f_{tk}$ bei einer Spannungsänderung von weniger als $0,01 f_{tk}$ (Abheben des Ankerkopfes).

Am linken Draht ist vorgängig anodische Korrosion mit Materialabtrag erfolgt. Am rechten Draht ging der Bruch von einem Querriss aus (Spannungsrissskorrosion).

Brittle ruptures of wires of a strand of an anchor installed in 1978. Rupture happened in 1990 during lifting off the anchor head at a tension of $0.50 f_{tk}$. The left wire shows some previous loss of material due to anodic corrosion. The right wire shows no previous loss of material. Rupture started at a tension crack.



Der erste vollständig elektrisch isolierte Anker, auf 1965 kN gespannt, (1992).
The first completely electrically isolated anchor, locked-off at 1965 kN (1992).

stoffumhüllungen beim Transport, beim Einbau oder bei der Spannprobe verletzt worden. Letzteres jedoch nur, wenn die Anker infolge ungenügender Tragfähigkeit bei der Prüfung bleibende Verschiebungen des Verankerungskörpers in der Grösse von 20 mm erlitten.

Aus den Erfahrungen mit dieser Verankerung sind folgende Schlüsse gezogen worden.

- Die vollständige elektrische Isolation, also ein umfassender Korrosionsschutz, der auch langfristig am eingebauten Anker überprüfbar ist, ist technisch realisierbar.
- In der harten Baupraxis ist es sehr schwierig eine 100%ige Erfolgsquote zu erreichen. Eine Erfolgsquote von 90 bis 95% ist jedoch bei sorgfältiger Bauausführung mit gut geschultem Personal ohne exzessiven Kontrollaufwand erreichbar. Es erscheint deshalb wirtschaftlich sinnvoll und sicherheitsmässig vertretbar, bei umfangreichen Verankerungen eine Ausfallquote von 5 bis 10% beim umfassenden Korrosionsschutz zu akzeptieren. Denn richtig konzipierte Verankerungen mit zahlreichen Ankern weisen genügend Redundanz auf, dass der Bruch einzelner Anker das Bauwerk nicht unmittelbar gefährdet: Es bleibt genügend Zeit für den Ersatz dieser Anker. Überdies ist zu beachten, dass die Prüfmethode sehr rigoros ist.

Für einen Anker mit ungenügendem elektrischen Widerstand kann die Dauerhaftigkeit zwar nicht garantiert werden, er weist aber immer noch einen guten Korrosionsschutz auf und kann noch viele Jahre funktionsfähig bleiben. Die Sicherheit von Bauwerken, die mit weniger als 10 Ankern gestützt sind, wird durch die Quotenregelung nicht betroffen.

Neue Ankerform

Der technische Erfolg fand 1995 Eingang in die Empfehlung E SIA V 191, die für alle permanenten Anker eine vollständige elektrische Isolation vorschreibt. Sie verlangt auch für jedes Ankersystem eine erstmalige Prüfung. Diese Systemprüfung wird von einer Expertengruppe vorgenommen. Neben der Tragsicherheit der Spannverankerung werden alle für den Korrosionsschutz verwendeten Materialien auf Eignung und gegenseitige Verträglichkeit geprüft. Die elektrische Dichtigkeit der Verbindungsstellen wird unter harten Bedingungen getestet. Und schliesslich ist die Baustellentauglichkeit des Gesamtsystemes nachzuweisen. Seit 1998 dürfen in der Schweiz nur noch geprüfte Ankersysteme eingesetzt werden.

Bisherige Erfahrungen

Die bisherigen Erfahrungen sind gut. So wiesen von 57 1997 eingebauten Ankern im Jahr 2002 alle ein $R_1 > 0,1 \text{ M}\Omega$ auf. Bei anderen Verankerungen sind jedoch die Widerstände einzelner Anker nach einigen Jahren unter diesen Wert gefallen. An diesen Systemen sind Verbesserungen nötig. Weil mit der Widerstandsmessung die Lage einer undichten Stelle nicht eruiert werden kann, sind gezielte Verbesserungen nicht sofort möglich. Zuerst ist mit Versuchen herauszufinden, wo die Schwachstelle liegt.

Oft wird ein Abfall von sehr hohen Widerständen ($> 200 \text{ M}\Omega$) auf tiefe, aber noch genügende Werte (0,2 bis $1 \text{ M}\Omega$) beobachtet (Bild 4). Wir führen dies auf Diffu-

sion protection allowing for long-term surveillance can be achieved.

- Technical feasibility notwithstanding, it is nearly impossible to put the technology into practice at a rate of 100%. A quota of 90 to 95%, however, can be obtained by well-instructed staff without the necessity of excessive checks. Moreover, one needs to be aware that this testing method is very rigorous. No guarantee can be given for anchors whose electric resistance is insufficient, though. Yet, they will still have a good protection against corrosion and can be functional for many years to follow. For extended anchorages, it seems economically reasonable and justifiable in the interest of safety to tolerate a failure quota of 5 to 10%. Well-designed anchorages with a large number of anchors have enough redundancy to allow for the loss of some anchors without danger to the whole structure. For there remains enough time to replace some damaged anchors. These quota regulations do not apply to the safety of constructions which are propped up by less than 10 anchors.

New Swiss code for ground anchors

This technological innovation was taken up by the recommendation E SIA V 191 in 1995, which prescribes the complete electric isolation for all permanent anchors. For each anchor system an initial certification by a group of experts is required. Besides the bearing capacity of the anchor head components all materials used for corrosion protection are tested for suitability and compatibility. The electric density of the sealings of the different parts of the sheathing is examined under harsh conditions. Finally, the feasibility to install the anchor system under construction site conditions must be proven. Since 1998 only certified anchor systems are allowed in Switzerland.

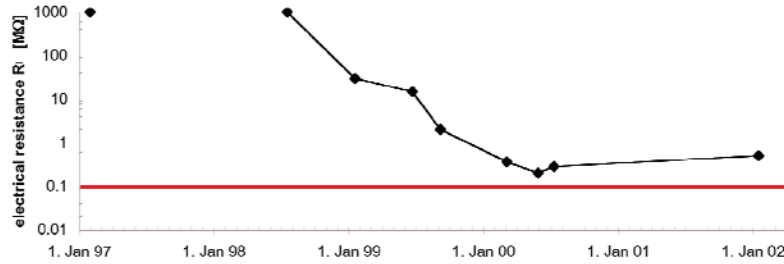
sion durch die Verbindungsstellen der Kunststoffumhüllung zurück. Der geforderte Wert $R_I \geq 0,1 \text{ M}\Omega$ hat sich in der Praxis als plausibel erwiesen: An verschiedenen Ankern mit deutlich tieferen Werten konnte eine wasserdurchgängige Leckstelle am Abdichtungssystem lokalisiert werden.

Noch nicht geklärt sind grosse Schwankungen der Messwerte an einzelnen Ankern (Bild 5). Es ist geplant, die Ursache für diese Schwankungen mit einem gezielten Untersuchungsprogramm zu klären.

Zurzeit müssen in der Schweiz diverse Verankerungen aus den 60er- und 70er-Jahren, also nach einer Nutzungsdauer von 25 bis 40 Jahren in Stand gesetzt werden, teils wegen Korrosionsschäden, teils wegen fehlender Überprüfbarkeit. Sie werden mit elektrisch isolierten Ankern ersetzt. Das Vertrauen der Baubehörden in die Ankertechnik ist wiederhergestellt!

Verfasser/Author

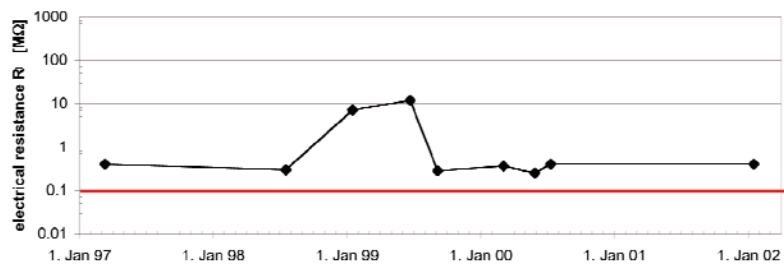
Ueli von Matt
Dr. Vollenweider AG
Geotechnik Grundbau Tunnelbau
Badenerstrasse 621
CH-8048 Zürich
vonmatt@drvollenweiderag.ch



4

Umfassend korrosionsgeschützter Anker. Abfall des elektrischen Widerstandes von sehr hohen Werten auf relativ tiefe, aber genügende Werte. Bei Widerstandswerten $R_I \geq 0,1 \text{ M}\Omega$ kann keine Korrosion auftreten.

Overall corrosion-protected anchor. Decline of electrical resistance from very high values to relatively low but sufficient values. With values $R_I \geq 0.1 \text{ M}\Omega$ there is no danger of corrosion damage.



5

Umfassend korrosionsgeschützter Anker. Schwankungen des elektrischen Widerstandes zwischen 0,25 und 12 MΩ, also im Bereich über dem minimal erforderlichen Wert von 0,1 MΩ. Eine Gefährdung des Ankers besteht nicht, die Ursache für die starke Variation der Werte ist noch zu klären.

Overall corrosion-protected anchor. Not explainable oscillation of the electrical resistance in a range above the minimum required value of $R_I \geq 0.1 \text{ M}\Omega$. The causes for the oscillation of the resistance values have yet to be investigated.

Gained experiences

So far, experiences with overall protected anchors are promising. For example, of 57 anchors, which were installed in 1997, all showed in 2002 a value of $R_I > 0.1 \text{ M}\Omega$. However, single anchors of other anchor systems showed lower values after some years. Hence, improvements of these systems are necessary. Since the position of a defective spot cannot be defined by measuring the electric resistance, specific improvements are not immediately possible. First, the defective spots must be found through experiments.

Quite often, a decline from a very high resistance ($> 200 \text{ M}\Omega$) to a low, but sufficient value (0.2 to 1 MΩ) is observed (figure 4), which in our opinion is due to diffusion through the sealings of the plastic sheaths. The required value of $R_I \geq 0.1 \text{ M}\Omega$ has proved plausible in practice: Leaks have been found in several anchors with significantly lower values.

There still is no explanation for the large oscillation of values of some anchors (figure 5). A thorough investigation of the causes of such oscillations is planned. In Switzerland, today, many anchorages from the 1960s and 1970s must be replaced after 25 to 40 years due to corrosive damage or due to impossibility of examination. They are being replaced by electrically isolated anchors. The confidence of authorities in the anchoring technology has been restored.