

## **Permanente, vorgespannte Boden- und Felsanker: Fluktuationen des elektrischen Widerstands**

**Tirants d'ancrage précontraints en sol et en rocher:  
Fluctuations de la résistance électrique**

**Permanent, prestressed ground anchors:  
Fluctuations of the electrical resistance**

**Dr. Vollenweider AG, Geotechnik Grundbau Tunnelbau, Zürich  
U. von Matt, dipl. Bauing. ETH/SIA**

**SGK, Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz, Zürich  
M. Büchler, Dr. sc. tech. ETH**

**Forschungsauftrag AGB2001/489 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

**Februar 2007**

**xxx**





Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle  
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen  
Office fédéral des routes  
Ufficio federale delle Strade**

# **Permanente, vorgespannte Boden- und Felsanker: Fluktuationen des elektrischen Widerstands**

**Tirants d'ancrage précontraints en sol et en rocher:  
Fluctuations de la résistance électrique**

**Permanent, prestressed ground anchors:  
Fluctuations of the electrical resistance**

**Dr. Vollenweider AG, Zürich  
Geotechnik Grundbau Tunnelbau  
U. von Matt, dipl. Bauing. ETH/SIA**

**SGK, Zürich  
Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz  
M. Büchler, Dr. sc. tech. ETH**

**Forschungsauftrag AGB2001/489 auf Antrag der  
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

## **Vorwort**

Die Einführung des umfassenden Korrosionsschutzes von permanenten vorgespannten Ankern, nämlich die vollständige elektrische Isolation der Anker von Baugrund und Bauwerk im Jahr 1995 wurde von den Vertretern der öffentlichen Bauträger allgemein begrüsst. Dies vor allem auch deshalb, weil es damit möglich wurde, die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes der vorgespannten Anker während ihrer ganzen Nutzungsdauer mit elektrischen Widerstandsmessungen zu überwachen.

Ein Teil der Anker zeigte bei den periodischen Überwachungsmessungen jedoch grosse Schwankungen des elektrischen Widerstandes. Dies weckte bei Bauherrenvertretern Zweifel am Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war, die Ursachen für die Fluktuationen des elektrischen Widerstandes zu klären und die mit ihnen verbundene Korrosionsgefährdung der Anker zu beurteilen. Dank der von der SGK entwickelten Messtechnik ist dies gelungen. Ich möchte an dieser Stelle der Baudirektion des Kantons Zürich, vertreten durch Herrn Ch. Gassmann, und Herrn Ph. Brühwiler, Zug, danken, dass wir an ihren verankerten Bauwerken über mehrere Monate Messungen durchführen durften. Mit dem vorliegenden Forschungsbericht werden die wesentlichen Forschungsergebnisse der Praxis zur Verfügung gestellt.

Ich danke den Mitgliedern der Begleitkommission B (BK B) Herrn Dr. P. Schmalz (Vorsitz), Herrn J.P. Joris, Herrn Dr. F. Hunkeler und Herrn Dr. P. Stoffel für die gute und anregende Zusammenarbeit.

Zürich, im Februar 2007

U. von Matt  
Dr. Vollenweider AG, Zürich

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	
<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1. Ausgangslage und Forschungsauftrag</b>	<b>8</b>
1.1 Idee und Entwicklung der elektrisch isolierten Ankersysteme	8
1.2 Erfahrungen mit elektrisch isolierten Ankern	11
1.3 Forschungsauftrag	12
<b>2. Vorgehen</b>	<b>13</b>
2.1 Geplantes Vorgehen	13
2.2 Gewähltes Vorgehen	14
<b>3. Konstruktion und potentielle Schwachstellen des Korrosionsschutzes</b>	<b>15</b>
3.1 Konstruktion von vorgespannten Ankern mit umfassendem Korrosionsschutz	15
3.2 Potentielle Schwachstellen der elektrischen Isolation	17
3.3 Wichtigste Systemunterschiede	19
3.4 Materialtechnische und konstruktive Fragen	21
3.4.1 Allgemeine materialtechnische Überlegungen	21
3.4.2 Glatthüllrohr	22
3.4.3 Wellrohr	22
3.4.4 Schrumpfschlauch	24
3.4.5 Isolationsplatte	26
3.4.6 Innerer Ankerkopfbereich	26
3.4.7 Plastische Korrosionsschutzmassen (Fette)	28
3.5 Gewonnene Erkenntnisse	29
<b>4. Kontinuierliche Messungen an Verankerungen</b>	<b>30</b>
4.1 Messgrößen und Messmethoden	30
4.1.1 Die elektrische Widerstandsmessung	30
4.1.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit	33
4.2 Ausgewählte Objekte	33
4.2.1 Hangsicherung Attikon	34
4.2.2 Stützwand Täntenholz	35
4.2.3 Pfahlwand Waldheim	35
4.3 Durchgeführte Messungen und Ergebnisse	36
4.3.1 Attikon	36
4.3.2 Täntenholz	47
4.3.3 Waldheim	53

4.4	Gewonnene Erkenntnisse	60
4.4.1	Der Anker als Wärmebrücke bei saisonalen Temperaturschwankungen	60
4.4.2	Der Anker ohne Einfluss der Wärmebrücke bei saisonalen Schwankungen	60
4.4.3	Der Anker ohne Einfluss der Wärmebrücke bei kurzzeitigen Schwankungen	61
4.4.4	Der Anker als Wärmebrücke bei kurzzeitigen Schwankungen	61
4.4.5	Einfluss der Fettverfüllung der Ankerhaube	61
4.4.6	Einbetonieren des Ankerkopfs	62
4.4.7	Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit	62
4.4.8	Einfluss der Temperatur	62
<b>5.</b>	<b>Forschungsergebnisse</b>	<b>63</b>
5.1	Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes	63
5.2	Fluktuationen des elektrischen Widerstandes	63
5.2.1	Ursachen für die Fluktuationen des elektrischen Widerstandes	63
5.2.2	Auswirkungen der Widerstandsfluktuationen auf den effektiven Korrosionsschutz des Ankers	64
5.3	Dauerhafte Abnahme des elektrischen Widerstandes	66
5.3.1	Ursachen für die dauerhafte Abnahme des elektrischen Widerstandes	66
5.3.2	Auswirkungen des dauerhaften Widerstandsabfalls auf die Korrosionsgefährdung des Ankers	67
5.3.3	Lokalisierung des Defekts der Isolation	68
<b>6.</b>	<b>Schlussfolgerungen für die Baupraxis</b>	<b>70</b>
6.1	Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes	70
6.2	Fluktuationen des elektrischen Widerstandes	71
6.3	Dauerhafter Abfall des elektrischen Widerstandes	71
6.4	Zugelassene Ankersysteme	72
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>74</b>
	<b>Anhang</b>	<b>75</b>
	Abnahmemessungen und Ergebnisse von periodischen Überwachungs- messungen des elektrischen Widerstandes an verschiedenen Verankerungen	
A.	Ankersystem A	77
B.	Ankersystem B	87
C.	Ankersystem C	96
D.	Ankersystem D	106
E.	Ankersystem E	107
F.	Ankersystem F	109

## Zusammenfassung

Verschiedene Korrosionsschäden haben die permanenten vorgespannten Anker zu Beginn der 1980er Jahre in Misskredit gebracht. Im Jahre 1985, beim Bau der Stützmauer am Bahnhof Stadelhofen in Zürich, entstand die Idee, die vorgespannten Anker vom Baugrund elektrisch zu isolieren, um die empfindlichen Spannstähle vor Streuströmen und auch generell gegen Wasserzutritt zu schützen. Mit dieser Idee ergab sich überdies die von Vielen geforderte Möglichkeit, die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes am eingebauten Anker durch eine Messung des elektrischen Widerstandes zu überprüfen.

Die Umsetzung dieser Idee erfolgte in Einzelschritten, begleitet von Rückschlägen. Erst 1992 gelang es erstmals einen vorgespannten Anker einzubauen, der auch im gespannten Zustand vollständig vom Baugrund und vom Bauwerk elektrisch isoliert war. Damit wurde es möglich, die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes der vorgespannten Anker während ihrer ganzen Nutzungsdauer durch elektrische Widerstandsmessungen zu überprüfen.

Die Empfehlung SIA V 191 „Boden- und Felsanker“ (1995) führte die Anforderung dieses „umfassenden Korrosionsschutzes“ für permanente vorgespannte Anker in der Schweiz ein. Wegen der Schwierigkeit diese hohe Anforderung auf der Baustelle zu 100% zu erfüllen, erlaubte sie dabei eine Ausfallquote von 5 bis 10%. Diese Regelung erwies sich als vernünftig und angemessen. Sie wurde deshalb 2003 von der Norm SIA 267 „Geotechnik“ übernommen.

Die Dr. Vollenweider AG führte ab 1992 an verschiedenen von ihr projektierten Verankerungen periodisch elektrische Widerstandsmessungen durch. Die Ergebnisse waren schwierig zu interpretieren: Ein Teil der Anker lieferte über Jahre stabile und hohe Widerstände, andere Anker zeigten starke Fluktuationen der Messwerte, eine dritte Gruppe von Ankern ergab einen sukzessiven, aber dauerhaften Abfall der Widerstände bis in den Bereich des festgelegten Grenzwertes oder sogar darunter.

Diese unterschiedlichen Ergebnisse weckten bei Bauherren Zweifel am Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes. Deshalb beantragte die Dr. Vollenweider AG bei der Arbeitsgruppe für Brückenforschung (AGB) des ASTRA einen Forschungskredit zur Klärung der Ursachen für die Fluktuationen und auch für den sukzessiven Abfall des elektrischen Widerstandes von umfassend korrosionsgeschützten Ankern.

Die Erforschung der Fluktuationen des elektrischen Widerstandes setzt voraus, dass die Widerstände von Ankern kontinuierlich gemessen werden können. Weil die Widerstandsmessungen mit einer hohen Spannung (500V) durchgeführt werden müssen, stand dafür keine Messmethode zur Verfügung. Die Schweizerische Gesellschaft für Korrosion (SGK) erklärte sich im Stand, eine solche Messeinrichtung zu entwickeln. Deshalb wurde der Forschungsantrag in Zusammenarbeit mit der SGK gestellt.

Neben der Zusammenstellung, Sichtung und Auswertung der bisher durchgeführten periodischen Überwachungsmessungen der Dr. Vollenweider AG – andere Ergebnisse waren leider nicht verfügbar – konzentrierte sich die Forschungsarbeit auf:

- Theoretische und materialtechnische Untersuchungen der potentiellen Schwachstellen der elektrischen Isolation der Anker
- Kontinuierliche Messungen der elektrischen Widerstände und der Klimadaten an je 8 bis 11 Ankern bei drei verankerten Bauwerken mit unterschiedlichen Ankersystemen

Ursprünglich war geplant, diese Messungen nur an einzelnen Ankern und jeweils nur 1 bis 2 Monate durchzuführen. Schon die ersten Ergebnisse zeigten jedoch, dass verschiedene Anker am gleichen Bauwerk sehr unterschiedliche Widerstandsverläufe lieferten, und dass neben täglichen Schwankungen auch markante saisonale Schwankungen auftreten. Dies erforderte eine Verlängerung der Messperiode pro Verankerung auf mindestens 10 bis 12 Monate und den Ausbau der Messeinrichtung für die gleichzeitige Erfassung von 11 Ankern sowie die Herstellung einer zweiten Messeinrichtung.

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

- Die starken Fluktuationen des elektrischen Widerstandes werden durch Kondensationsprozesse im Bereich des Ankerkopfes verursacht. Die Anker wirken zudem als thermische Erdsonden (Kühlelement im Sommer, Heizelement im Winter). Die Auswirkung dieser Wärmebrücke auf die Kondensationsprozesse im Bereich des Ankerkopfes ist jedoch stark von der Ankerkopfkonstruktion abhängig. Dies kann sogar zu direkt gegenläufigem Widerstandsverhalten von Ankern am gleichen Bauwerk führen. Die Fluktuationen des elektrischen Widerstandes gefährden das Ankerzugglied in aller Regel nicht, selbst wenn der Widerstand zeitweise unter den Grenzwert von  $0.1\text{M}\Omega$  abfällt.
- Starke Fluktuationen des elektrischen Widerstandes sollten aus überwachungstechnischen Gründen verhindert werden. Dies sollte mit einer Beschichtung der Kraftmessdosen mit einer elektrisch isolierenden Schutzschicht erreichbar sein.
- Schwächere Fluktuationen des elektrischen Widerstandes in der Grösse von einer Dekade können auch rein temperaturbedingt sein. Sie sind unbedenklich.
- Ein dauerhafter Abfall des elektrischen Widerstandes ist auf einen Defekt der Isolation in den Bereichen Verankerungslänge  $l_v$ , Übergang  $l_v / l_{fr}$  oder bei der oberen Abdichtung der inneren Ankerkopfabdichtung zurückzuführen. Eine Gefährdung des Ankerzuggliedes besteht bei Defekten in den ersten zwei Bereichen. Ein Defekt der Isolation bei der oberen Ankerkopfabdichtung gefährdet hingegen das Zugglied nicht.
- Es wird eine Messmethode zur Ermittlung der Lage eines Defektes der Ankerisolation vorgeschlagen. Diese Messmethode sollte jedoch mit weiteren gezielten Messungen überprüft werden, was im Rahmen dieses Forschungsauftrages nicht möglich war.
- Es besteht ein Bedarf von Verbesserungen der Ankersysteme, um künftig einen dauerhaften Abfall des elektrischen Widerstandes nach der Abnahme zu verhindern. Deutliche Indizien sprechen dafür, dass vor allem Ankersysteme mit inneren Ankerstützen aus PE verbessert werden müssen.
- Auch wenn noch Mängel auftreten, welche die Überwachung erschweren, sind das Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes und die diesbezüglichen normativen Festlegungen sinnvoll und angemessen.

## Résumé

Au début des années 1980, différents dégâts dus à la corrosion ont semé des doutes quant à la durabilité des tirants d'ancrage précontraints permanents. En 1985, lors de la construction du mur de soutènement de la gare de Stadelhofen, on a eu l'idée d'isoler électriquement les tirants précontraints du sol, afin de protéger en premier lieu les aciers délicats contre l'action des courants vagabonds, mais aussi contre l'humidité en général. Cette isolation électrique offrait en outre la possibilité, réclamée par beaucoup d'ingénieurs, de pouvoir contrôler, au moyen de mesures de la résistance électrique, l'efficacité de la protection anticorrosion des tirants d'ancrage permanents.

La réalisation de cette idée s'est effectuée pas à pas, accompagnée par des échecs. C'est en 1992 seulement qu'on a réussi à installer le premier tirant d'ancrage précontraint entièrement isolé électriquement du sol et de l'ouvrage ancré. Il est ainsi devenu possible, à l'aide de mesures de la résistance électrique, de surveiller l'efficacité de la protection anticorrosion des ancres précontraints durant toute leur durée d'utilisation.

C'est la recommandation SIA V191 „Tirants d'ancrage précontraints“ (1995) qui a instauré la requête de l'isolation électrique pour „une protection poussée contre la corrosion“ des tirants précontraints permanents en Suisse. Vu la difficulté de satisfaire pleinement à une telle exigence sur chantier, il a été accordé un taux de défaillance de 5 à 10 %. Ce règlement s'est avéré raisonnable et adéquat et il a été repris en 2003 par la norme SIA 267 "Géotechnique".

En 1992 déjà, le bureau d'ingénieurs Dr. Vollenweider AG avait commencé à effectuer périodiquement des mesures de résistance électrique sur différents tirants précontraints qu'il avait projetés lui-même. L'interprétation des résultats s'est avérée ardue: une partie des tirants a présenté des valeurs de résistance stables et élevées pendant des années, d'autres ont été soumis à de fortes fluctuations, tandis qu'un troisième groupe a subi des chutes de résistance successives mais constantes, allant jusqu'à la valeur limite admissible et même au-dessous.

La diversité de ces résultats éveilla chez les maîtres d'ouvrage des doutes quant au concept de cette protection poussée contre la corrosion. C'est pourquoi, le bureau d'ingénieurs Dr. Vollenweider AG sollicite un crédit de recherche auprès du groupe de travail "Recherche en matière de ponts" de l'OFROU, pour tenter d'élucider la cause des fluctuations et celle de la chute progressive de la résistance électrique dans les tirants précontraints bénéficiant d'une protection poussée contre la corrosion.

L'étude des fluctuations de la résistance électrique nécessite des mesures continues de la résistance électrique des tirants d'ancrage. Ces mesures devant être effectuées à haute tension (500 V), il n'existait encore aucune méthode de mesure adéquate. La Société suisse de protection contre la corrosion (SGK), forte de plusieurs années d'expérience dans la surveillance des structures en béton armé, était en mesure de développer une telle méthode. Elle a participé aux travaux de recherche.

Outre la récapitulation, le tri et l'évaluation des mesures périodiques déjà effectuées par Dr. Vollenweider AG - d'autres résultats n'étaient malheureusement pas disponibles -, les travaux de recherche se concentrèrent sur les points suivants:

- examen théorique et technique des points faibles possibles dans l'isolation électrique des tirants d'ancrage
- mesures continues des résistances électriques et des données climatiques sur trois ouvrages ancrés munis de systèmes d'ancrage différents, les mesures étant effectuées sur 8 à 11 tirants par ouvrage.

A l'origine, il avait été prévu d'effectuer de telles mesures sur un nombre réduit de tirants et ceci pendant 1 ou 2 mois seulement. Toutefois, les premiers résultats déjà montrèrent-que les différents tirants d'un même ouvrage présentaient des variations de la résistance électrique différentes et qu'en plus des fluctuations journalières, ils étaient soumis aussi à des fluctuations saisonnières prononcées. Ceci nécessita une prolongation de la période de mesure et une modification du dispositif de surveillance, permettant de mesurer jusqu'à 11 tirants d'ancrage pendant 10 à 12 mois.

Les recherches ont conduit aux résultats qui suivent :

- Les fortes fluctuations de la résistance électrique sont causées par des processus de condensation dans la tête du tirant. En outre, les tirants font office de sonde thermique (éléments réfrigérants en été, éléments chauffants en hiver), car ils sont en contact avec des zones de fond qui présentent une température constante tout au long de l'année. L'effet de ce pont thermique sur le processus de condensation dans la tête des tirants dépend fortement de la construction de la tête. Cette influence de la construction peut même conduire à des variations saisonnières inverses pour des tirants d'un même ouvrage. Néanmoins, les fluctuations de la résistance électrique ne compromettent généralement pas la durabilité des tirants précontraints, même si la résistance s'abaisse parfois au-dessous de la valeur limite de  $0.1 \text{ M}\Omega$ .
- Les fortes fluctuations de la résistance électrique devraient être éliminées, afin de parer à des problèmes d'interprétation des mesures. Cet objectif peut être atteint en recouvrant les boîtes dynamométriques d'une couche protectrice électriquement isolante.
- De faibles fluctuations de la résistance électrique, de l'ordre de grandeur d'une décade, peuvent être dues à des changements de température uniquement. Elles sont insignifiantes.
- La chute permanente de la résistance électrique est due à un défaut dans l'isolation électrique, soit dans la zone de la longueur de scellement  $l_v$ , celle de transition  $l_v / l_{fr}$  ou dans la zone étanche supérieure du dispositif d'étanchéité intérieur de la tête du tirant. Le tirant d'ancrage court un risque de corrosion lors de détériorations dans les deux premières zones, tandis qu'un défaut d'isolation dans le dispositif d'étanchéité supérieur de la tête du tirant ne met pas en danger le tirant lui-même.
- Une nouvelle méthode de mesure est proposée pour la localisation d'un défaut dans l'isolation. Cette méthode de mesure devrait néanmoins être vérifiée par des mesures complémentaires, ce qui n'a pas été possible dans le cadre de ce projet.

- Il existe un réel besoin d'amélioration des systèmes d'ancrage, afin de prévenir, dans le futur, une chute permanente de la résistance électrique après réception. Des indices précis signalent que ce sont surtout les systèmes d'ancrage équipés d'un dispositif d'étanchéité intérieur reposant sur des tubes en PE qui doivent être améliorés.
- Même s'il existe encore des défaillances qui rendent la surveillance difficile, le présent concept pour une protection poussée contre la corrosion au moyen de l'isolation électrique est raisonnable et adéquat.

## Summary

In the beginning of the 1980s various corrosion damages on prestressed permanent ground anchors have raised doubts regarding the durability of these systems. As a consequence, the concept of electrically insulated anchors was developed during the construction of a retaining wall at the train station Stadelhofen in Zürich. Primarily aimed to protect the sensitive prestressing steels against the detrimental influence of stray currents, the electrical insulation resulted also in the protection of the tensile member against any humidity. Moreover, the electrical insulation offered the possibility of a quality control of the corrosion protection of the installed anchor by means of an electrical resistance measurement as requested by many.

This concept was implemented in several single steps, which were also accompanied by setbacks. Finally, in the year 1992 the first electrically insulated ground anchor was installed that also allowed for measuring the electrical resistance in the prestressed state. Hence it was possible to monitor the efficiency of the corrosion protection over the entire service life of the ground anchor by means of resistance measurement.

The SIA recommendation V 191 "Soil and rock anchors" (1995) introduced the requirement of the electrical insulation for the corrosion protection of permanent prestressed ground anchors in Switzerland. Due to the difficulty in meeting these high requirement on the construction site, a failure rate of 5 to 10% of the anchors regarding the electrical resistance was allowed. This requirement proved to be reasonable and adequate and has, therefore, been also introduced in the SIA Standard 267 "Geotechnik" (2003).

Since 1992, the Dr. Vollenweider AG performed periodically resistance measurements on permanent ground anchors that were part of their projects. The interpretation of the obtained results was sometimes difficult: Some anchors showed stable and high resistance values over years, while the resistance values of others showed strong fluctuations. The values of a third group of anchors exhibited a slow but steady decrease in the range or even below the threshold.

These observations created doubts among the owners of the structures regarding the reliability of the corrosion protection concept that resulted in the support of a research project by the Working Group on "Bridge Research" (AGB) of the Swiss Federal Highway Authority (ASTRA). The goal of this project was the investigation of the reasons for the observed variations of the resistance of electrically insulated prestressed ground anchors.

This investigation required a continuous monitoring of the electrical resistance of the anchors. Since the Swiss Society for Corrosion Protection (SGK) had several years of experience with monitoring of reinforced concrete structures the research was performed in a joint project of Dr. Vollenweider AG and SGK.

In addition to summarizing and evaluating of the already available resistance data the research project focussed on:

- Investigation of the possible weak points of the electrical insulation of the ground anchors from a theoretical and materials science point of view

- Continuous monitoring of the electrical resistances and the corresponding environmental data of 8 to 11 ground anchors on three retaining walls containing different anchor systems

Originally, the measurement of single anchors during 1 to 2 months was planned. However, the first results demonstrated clearly that different anchors within the same structure exhibited very different time dependence of the resistance. Moreover, a strong seasonal influence besides the daily fluctuations was observed. As a consequence, an increase of the measuring period and a modification of the monitoring system were required to allow for measuring up to 11 anchors during 10 to 12 months.

The following results were obtained:

- The strong fluctuation of the electrical resistance is caused by condensation processes within the anchor head. The anchor strands act as heating elements in winter and cooling elements in summer, since they are in contact with deeper areas in the soil that exhibit a constant temperature during the year. The effect of this heat flow through the strands on the resistance of the anchor is depending to a significant degree on the design of the anchor head. This influence can cause an opposite seasonal dependence of the resistance of anchors on the same structure. However, it was found that the durability of the tensile member is not compromised by these fluctuations, even when the resistance decreased below the threshold of 0.1MΩ.
- Strong fluctuations of the electrical resistance should be eliminated in order to avoid problems in the interpretation of the monitoring data. This should be achievable with an electrical insulation of the load cells.
- Weaker fluctuations of the electrical resistance in the order of one decade can be caused by temperature variations and are irrelevant.
- The permanent decrease of the electrical resistance is caused by a defect in the electrical insulation on the bond length  $l_v$ , in the transition zone  $l_v / l_{fr}$ , or in the upper sealing of the inner anchor head seal. A possible corrosion risk is given in the prior two cases, while a defect in the upper sealing of the anchor head has no detrimental effect on the strands.
- A new measuring method is proposed for locating a defect in the insulation. However, this method should be tested regarding its reliability with additional investigations, which could not be integrated in the present project.
- There is a need for an improvement of the anchor systems in order to prevent the decrease of the electrical resistance after the installation of the anchors. There are clear indications that the systems with an inner anchor head sealing by tubes made of PE have to be improved.
- The present concept of corrosion protection by means of an electrical insulation and the respective normative rules are reasonable and adequate, although some deficiencies may still occur impeding the monitoring.

## 1. Ausgangslage und Forschungsauftrag

### 1.1 Idee und Entwicklung der elektrisch isolierten Ankersysteme

Ab Mitte der 1960er Jahre sind in der Schweiz, speziell beim Nationalstrassenbau sehr viele permanente Verankerungen eingebaut worden. Zu Beginn der 1980er Jahre wurden Korrosionsschäden und Brüche an vorgespannten Ankern bekannt. Die Ankerfirmen reagierten darauf mit einer Verbesserung des Korrosionsschutzes ihrer Ankersysteme (so genannter "doppelter Korrosionsschutz") [1]. Die Vertreter der öffentlichen Bauträger hingegen waren nachhaltig verunsichert. Einige verboten den Einsatz von permanenten Ankern in ihrem Einflussbereich, andere forderten, der Korrosionsschutz bzw. die Intaktheit der Anker müsse nach dem Einbau überprüfbar sein. Die verschiedenen vorgeschlagenen Methoden zur Ermittlung von Korrosionsschäden an vorgespannten Ankern, wie elektrische Impulsmessung, Ultraschall, Potentialmessungen bis hin zum Einbau von Kupferdrähten in die Anker zur Verbesserung der Aussagekraft von Potenzialmessungen, erwiesen sich jedoch alle als untauglich.

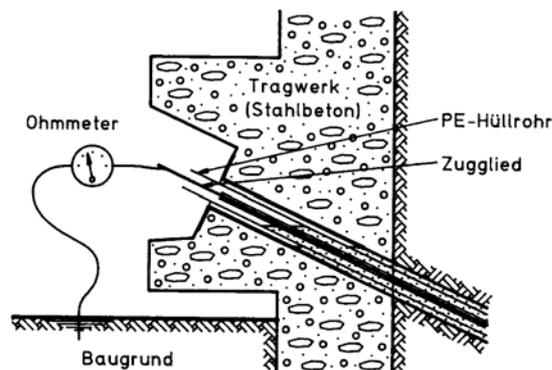
In dieser für die Ankertechnik kritischen Phase wurde um 1985 die Stützmauer am Bahnhof Stadelhofen in Zürich projektiert. Dabei wurden alle denkbaren Varianten untersucht, um auf permanente Anker zu verzichten. Es wurde aber keine sinnvolle und wirtschaftlich vertretbare Lösung gefunden. Die bis 22 m hohe Stützmauer wurde schliesslich als offene, mit 900 permanenten Ankern gestützte Pfahlwand konzipiert (Bild 1.1).



**Bild 1.1:** Stützmauer Bahnhof Stadelhofen (1986)

Weil das Baugebiet wegen der städtischen Tramlinien und eines in der Nähe liegenden Gleichrichters stark streustrombelastet ist, war die Frage des Korrosionsschutzes der Anker von zentraler Bedeutung für das Projekt. Denn Streuströme erhöhen die Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl im Baugrund erheblich und können überdies bei Spannstählen durch wasserstoffinduzierte Versprödung zu Spannungsrisskorrosion führen. Die Projektverfasserin, die Dr. Vollenweider AG, suchte deshalb das Gespräch mit der Korrosionskommission des SEV. Nach anfänglichen Verständnisschwierigkeiten verliefen diese interdisziplinären Gespräche sehr konstruktiv. Und die gemeinsam gefundene Lösung war

denkbar einfach: Der beste Schutz des Ankerstahls gegen eine Streustrombeeinflussung ist eine elektrische Isolation des Ankers gegen den Baugrund. Um dies zu erreichen, musste am offerierten Ankersystem mit so genanntem doppeltem Korrosionsschutz, wo das Zugglied eigentlich auf der ganzen Länge mit Kunststoff umhüllt ist, nur eine marginale konstruktive Änderung vorgenommen werden: Das zentral durch den Anker geführte und am Ankerfuss austretende Injektionsrohr für die äussere Primärinjektion musste nach aussen (ausserhalb der Kunststoffumhüllung) verlegt werden. Rasch realisierte der Projektverfasser, dass diese Lösung nicht nur einen Schutz gegen Streustromgefährdung, sondern auch einen perfekten Korrosionsschutz – noch abgesehen vom Ankerkopf – bedeutete. Denn mit der elektrischen Isolation ist auch jeder Wasserzutritt zum Ankerstahl verhindert. Wenn in der Kunststoffumhüllung keine korrosionsfördernden Materialien eingeschlossen sind, kann am Ankerstahl keine Korrosion mehr stattfinden. Und wichtiger zusätzlicher Vorteil: Die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes kann am eingebauten Anker mit einer einfachen Messung des elektrischen Widerstandes zwischen Ankerstahl und Baugrund überprüft werden (Bild 1.2).



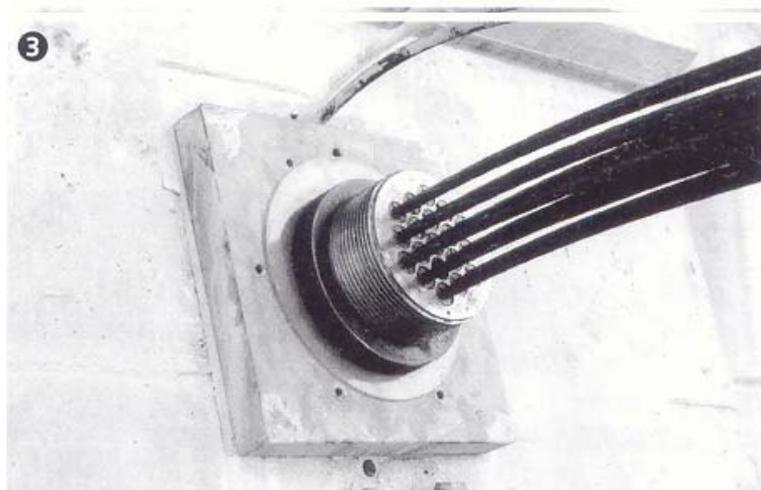
**Bild 1.2:** Elektrische Widerstandsmessung I am nicht gespannten Anker

Auf die Euphorie über die einfache gefundene Lösung folgte die bittere Enttäuschung: Von den ersten 10 so eingebauten Ankern zeigte kein einziger einen messbaren elektrischen Widerstand! Nach intensivem Hinterfragen von Theorie und Messmethode wurde begonnen, die Anker nach jeder Einbauphase zu messen. Sobald ein Anker schlechte Widerstandswerte zeigte, wurde er ausgebaut und minutiös untersucht: Bei jedem dieser Anker wurden Verletzungen der Kunststoffumhüllung gefunden, meist an der Übergangsstelle von der freien Ankerlänge zur Verankerungslänge oder am Ankerfuss. In der Folge wurden diese zwei Schwachstellen konstruktiv verstärkt und das Handling der Anker auf der Baustelle und beim Einbau viel sorgfältiger ausgeführt. Schliesslich erreichten über 90% der Anker den von der Korrosionskommission vorgeschlagenen Grenzwert von mindestens  $0.1 \text{ M}\Omega$  nach dem Einbau, den Nachinjektionen und der Spannprobe [2], [3].

Damit war ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem am eingebauten Anker überprüf-  
baren Korrosionsschutz getan. Das Endziel lag aber noch nicht in Reichweite: Ein von Baugrund **und** Bauwerk elektrisch isolierter Anker, dessen Isolation auch im gespannten Zustand, also während seiner ganzen Nutzungsdauer mit Messungen überprüft werden kann. Dazu musste auch der Ankerkopf vom Bauwerk isoliert werden und vor allem, als grösste Schwierigkeit, seine Verbindung zum Hüllrohr auf der freien Länge elektrisch dicht ausgeführt werden.

Ermutigt durch Vertreter des Bundesamtes für Strassen (ASB, heute ASTRA) wurde 1991 von der Dr. Vollenweider AG eine Verankerung mit 100 Ankern à  $P_0 = 2'000 \text{ kN}$  mit dieser Anforderung ausgeschrieben, wobei eine Ausfallquote von 10% akzeptiert wurde. Dies, um die Hürde nicht unerreichbar hoch zu setzen, aber auch mit der Überlegung, dass bei einer umfangreichen Verankerung eine Ausfallquote von 5 bis 10% beim umfassenden Korrosionsschutz sicherheitsmässig vertretbar und auch wirtschaftlich sinnvoll ist. Bekanntlich ist der Aufwand zum Erreichen der letzten 5 bis 10% enorm gross. Und richtig konzipierte Verankerungen weisen genügend Redundanz auf, dass ein Ankerbruch das Bauwerk nicht unmittelbar gefährdet. Es bleibt genügend Zeit für den Ankerersatz. Dabei ist zu beachten, dass Bauwerke, die mit weniger als 10 Ankern gestützt sind, wie zum Beispiel Seilbahnmasten, von einer solchen Quotenregelung nicht betroffen sind.

Tatsächlich reichte eine mutige und innovative Ankerfirma eine entsprechende Offerte ein. Sie entwickelte zwei verschiedene Lösungen, die beide erfolgreich auf der Baustelle eingesetzt wurden. Mit diesen je rund 50 Prototypen war die Machbarkeit einer vollständigen elektrischen Isolation der Anker von Baugrund und Bauwerk erwiesen (Bild 1.3). Die 1995 erschienene Empfehlung SIA V 191 "Vorgespannte Boden- und Felsanker" forderte deshalb folgerichtig für alle permanenten Anker die vollständige elektrische Isolation und führte dafür den Begriff "umfassender Korrosionsschutz" ein. Überdies verlangte sie eine erstmalige Prüfung der Ankersysteme. ASTRA und SBB haben daraufhin eine Experten-Gruppe Anker (EGA) gebildet, die diese Erstprüfung von Ankersystemen durchführte. Seit Sommer 1998, als drei Ankersysteme die erstmalige Prüfung bestanden hatten, lassen ASTRA und SBB nur noch erstgeprüfte Ankersysteme zur Ausführung von permanenten Verankerungen zu.



**Bild 1.3:** Der erste vollständig elektrisch isolierte Anker (1992)

Die im Jahr 2003 in Kraft gesetzte Norm SIA 267 "Geotechnik" übernimmt die Anforderungen der E SIA V 191 (1995). Anstelle einer erstmaligen Prüfung verlangt sie jedoch für Ankersysteme eine technische Zulassung, die gemäss den gesetzlichen Bestimmungen zu den Bauprodukten periodisch zu erneuern ist.

## 1.2 Erfahrungen mit elektrisch isolierten Ankern

Die Dr. Vollenweider AG hat seit 1992 rund 25 permanente Verankerungen projiziert und ausgeführt oder als Beraterin begleitet. Dabei sind in der Regel die Messanker sowie teilweise weitere Anker auch mit Messkabeln zur Messung des elektrischen Widerstandes ausgerüstet und diese Messungen in den Überwachungsplan integriert worden. Einige wenige Ingenieure haben diese von der Norm nicht vorgeschriebene Überwachungsmöglichkeit ebenfalls angewendet.

Die bisherigen Erfahrungen mit umfassend korrosionsschutzten Verankerungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### · **Abnahmemessungen**

Bei der grossen Mehrheit der erfassten Verankerungen wiesen über 90%, oft sogar über 95% der Anker bei der Abnahme einen höheren elektrischen Widerstand als der geforderte Grenzwert  $R_i \geq 0.1 \text{ M}\Omega$  auf. Eine Erfolgsquote von 100% wurde jedoch nur in Ausnahmefällen erreicht. Das Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes mit dem festgelegten Grenzwert und einer Ausfallquote von 5 bis 10% ist somit grundsätzlich praxistauglich.

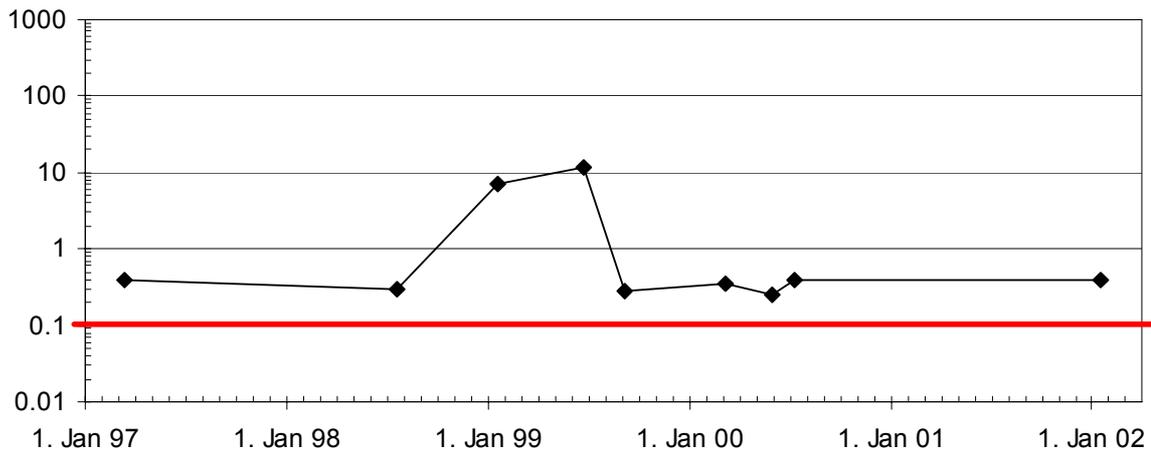
Bei einem erstgeprüften Ankersystem wiesen bei der Abnahme lediglich rund 60% der Anker einen genügenden elektrischen Widerstand auf. Die Abdichtung zwischen Ankerkopf und freier Ankerlänge funktionierte bei diesem System offensichtlich nicht systematisch. Die genaue Ursache für die hohe Ausfallquote konnte nicht eruiert werden, denn die Herstellerin verzichtete auf langwierige Abklärungen und übernahm kurzentschlossen das bewährte Abdichtungssystem einer anderen Firma.

Ein weiteres Ankersystem hat die zugelassene Ausfallquote von 10% mehrmals nur knapp eingehalten, in einigen Fällen sogar überschritten. Nach verschiedenen, nur teilweise erfolgreichen Verbesserungsmassnahmen hat sich die Herstellerin im Jahr 2005 entschlossen, ein grundlegend anderes Kopfabdichtungssystem zu entwickeln. Vor der Umsetzung dieses Vorhabens hat sie im Jahr 2006 eine andere Ankersystemherstellerin übernommen und wird künftig deren Kopfabdichtungssystem verwenden.

### · **Überwachungsmessungen**

Die von der Dr. Vollenweider AG und einzelnen weiteren Fachleuten periodisch durchgeführten Messungen des elektrischen Widerstandes an ausgewählten Ankern (in der Regel mit zusätzlichen Kabeln ausgerüstete Messanker) ergeben ein zwiespältiges, schwierig zu interpretierendes Bild: Ein Teil der Anker liefert über Jahre stabile oder nur auf sehr hohem Niveau (zwischen 50 und 200  $\text{M}\Omega$ ) variierende Widerstände. Andere Anker zeigen stark schwankende Messwerte, die zum Teil bei einzelnen Messungen sogar unter dem Grenzwert (0.1  $\text{M}\Omega$ ) liegen, dann aber wieder deutlich höher steigen (Bild 1.4). Eine dritte Gruppe von Ankern zeigt einen sukzessiven Abfall der elektrischen Widerstände auf ein Niveau, das nur wenig über dem Grenzwert oder sogar unter dem Grenzwert liegt.

Zu beachten ist, dass solch unterschiedliches Verhalten bei verschiedenen Verankerungen beobachtet wurde, also zumindest vordergründig nicht systemabhängig ist.



**Bild 1.4:** Schwankungen des elektrischen Widerstandes eines Ankers (System D)

Bei verschiedenen Bauherrenvertretern weckten diese Ergebnisse der Überwachungsmessungen zunehmend Zweifel an der Aussagekraft der elektrischen Widerstandsmessungen und sogar am Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes und seiner Überwachbarkeit.

Die Dr. Vollenweider AG stellte das Problem in der EGA zur Diskussion. Die EGA erachtete eine Klärung der Ursachen für die unerklärlichen Ergebnisse der Überwachungsmessungen als wichtig und dringlich und forderte die Dr. Vollenweider AG auf, bei der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB) des ASTRA einen entsprechenden Forschungsantrag einzureichen.

### 1.3 Forschungsauftrag

Voraussetzung für eine Erforschung der Schwankungen der elektrischen Widerstände von elektrisch isolierten Ankern ist die Möglichkeit, diese Widerstände kontinuierlich zu messen. Weil die Widerstandsmessungen mit einer Spannung von 500 bis 1'000 Volt ausgeführt werden müssen, stand dafür keine Messmethode zur Verfügung wie sie zum Beispiel für Ankerkraftmessungen und Extensometermessungen seit Jahren vorhanden ist. Die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Überwachungsmessungen der elektrischen Widerstände sind deshalb Monate bis Jahre auseinander liegende Momentaufnahmen ohne jegliche Information über zwischenzeitliche Schwankungen des elektrischen Widerstandes.

Die Dr. Vollenweider AG nahm deshalb Kontakt auf mit der Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK), der Nachfolgeorganisation der Korrosionskommission, mit der sie beim Bahnhof Stadelhofen die Idee der elektrisch isolierten Anker entwickelt hatte. Die SGK erklärte sich im Stand, eine Messeinrichtung zur kontinuierlichen Messung des elektrischen Widerstandes von isolierten Ankern zu entwickeln, und war daran interessiert, die Fragestellung gemeinsam mit der Dr. Vollenweider AG zu erforschen.

Im Juli 2002 reichte daraufhin die Dr. Vollenweider AG der AGB den Forschungsantrag unter Hinweis auf die Zusammenarbeit mit der SGK ein. Der Forschungsauftrag Nr. AGB 2001/489 "Untersuchung von Fluktuationen der elektrischen Widerstände von permanenten Ankern" wurde der Dr. Vollenweider AG vom ASTRA am 16. Dezember 2002 erteilt.

## **2. Vorgehen**

### **2.1 Geplantes Vorgehen**

Im Forschungsantrag war folgendes Vorgehen vorgesehen: Die Forschungsziele sollen mit drei verschiedenen, aufeinander abzustimmenden Strategien erreicht werden:

- a) Sammlung und statistische Auswertung der seit 1992 in der Schweiz (und – falls erhältlich – von in den letzten 2 bis 3 Jahren in Oesterreich und Deutschland) durchgeführten elektrischen Widerstandsmessungen an elektrisch isolierten Ankern. Die statistische Auswertung könnte Hinweise liefern auf systemabhängige, materialtechnisch bedingte oder ausführungstechnische Unterschiede und Mängel.
- b) Kontinuierliche Messung des elektrischen Widerstandes während eines repräsentativen Zeitraumes an drei ausgewählten Ankern mit bisher bei periodischen Überwachungsmessungen registrierten markanten Schwankungen der elektrischen Widerstände bei gleichzeitiger Registrierung aller aus heutiger Sicht denkbaren Einflussgrößen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Wassergehalt der isolierenden Materialien usw.
- c) Laboruntersuchungen an den für die elektrische Isolation verwendeten Materialien wie Korrosionsschutzmassen, Isolationsplatten, Verbindungsmittel in Funktion der Luftfeuchtigkeit, des Wassergehaltes und der Temperatur zur Ermöglichung einer korrekten Bewertung des an den Ankern registrierten Verhaltens. Die SGK verfügt über die dazu erforderlichen Geräte und das entsprechende Knowhow.

Während der Ausführung der unter a, b und c beschriebenen Strategien sind die anfallenden Ergebnisse laufend auszuwerten, zu vergleichen und das weitere Untersuchungsprogramm gegebenenfalls an die Ergebnisse anzupassen. Am Schluss erfolgt eine Gesamtauswertung mit den für die Baupraxis zu ziehenden Schlussfolgerungen.

## 2.2 Gewähltes Vorgehen

- a) Erhebung und statistische Auswertung der seit 1992 durchgeführten Widerstandsmessungen an elektrisch isolierten Ankern

Auf ein Schreiben der Dr. Vollenweider AG an alle Kantonsingenieure und die Ankerfirmen mit erstgeprüften Ankersystemen erfolgten zahlreiche Rückmeldungen. Deren Inhalt erwies sich jedoch für eine statistische Auswertung als unbrauchbar:

- Die Rückmeldungen der Kantone enthielten grossmehrheitlich nur die Abnahmemessungen von elektrisch isolierten Verankerungen, wobei sehr häufig keine Messwerte, sondern lediglich das Abnahmeergebnis mit erfüllt / nicht erfüllt angegeben war. Nur in Ausnahmefällen war das Ergebnis von zwei oder drei Folgemessungen angegeben.
- Die Rückmeldungen der Ankerfirmen bestanden nur aus Listen der ausgeführten elektrisch isolierten Verankerungen ohne Messwerte.

Damit war klar, dass dieser Teil des geplanten Vorgehens nicht gangbar war. Der Dr. Vollenweider AG verblieben für die Beurteilung der bisherigen Erfahrungen nur die von ihr selber durchgeführten Messungen der elektrischen Widerstände (siehe Abschnitt 1.2). Die Messungen sind im Anhang, geordnet nach den Ankersystemen, zusammengestellt.

- b) Kontinuierliche Messung des elektrischen Widerstandes an ausgewählten Ankern während eines repräsentativen Zeitraumes

Eigentlich war geplant, den Verlauf des elektrischen Widerstandes an je einem Anker bei drei ausgeführten Verankerungen während etwa 2 bis 3 Monaten zu messen. Glücklicherweise ermöglichte die von der SGK entwickelte Messeinrichtung die gleichzeitige Messung von 5 Ankern (später sogar von 11 Ankern). Rasch wurde aber klar, dass die Messwerte nicht nur Tageszyklen, sondern auch saisonale Schwankungen aufwiesen. Die Anker eines Objektes mussten demzufolge mindestens während 10 bis 12 Monaten gemessen werden. Um den geplanten Zeitrahmen für das Forschungsprojekt nicht total zu sprengen, wurde von der Dr. Vollenweider AG gemeinsam mit der SGK beschlossen, eine zweite Messeinrichtung herzustellen. Ab Winter 2003 konnte so an zwei Objekten gleichzeitig gemessen werden.

- c) Laboruntersuchungen an den für die elektrische Isolation verwendeten Materialien

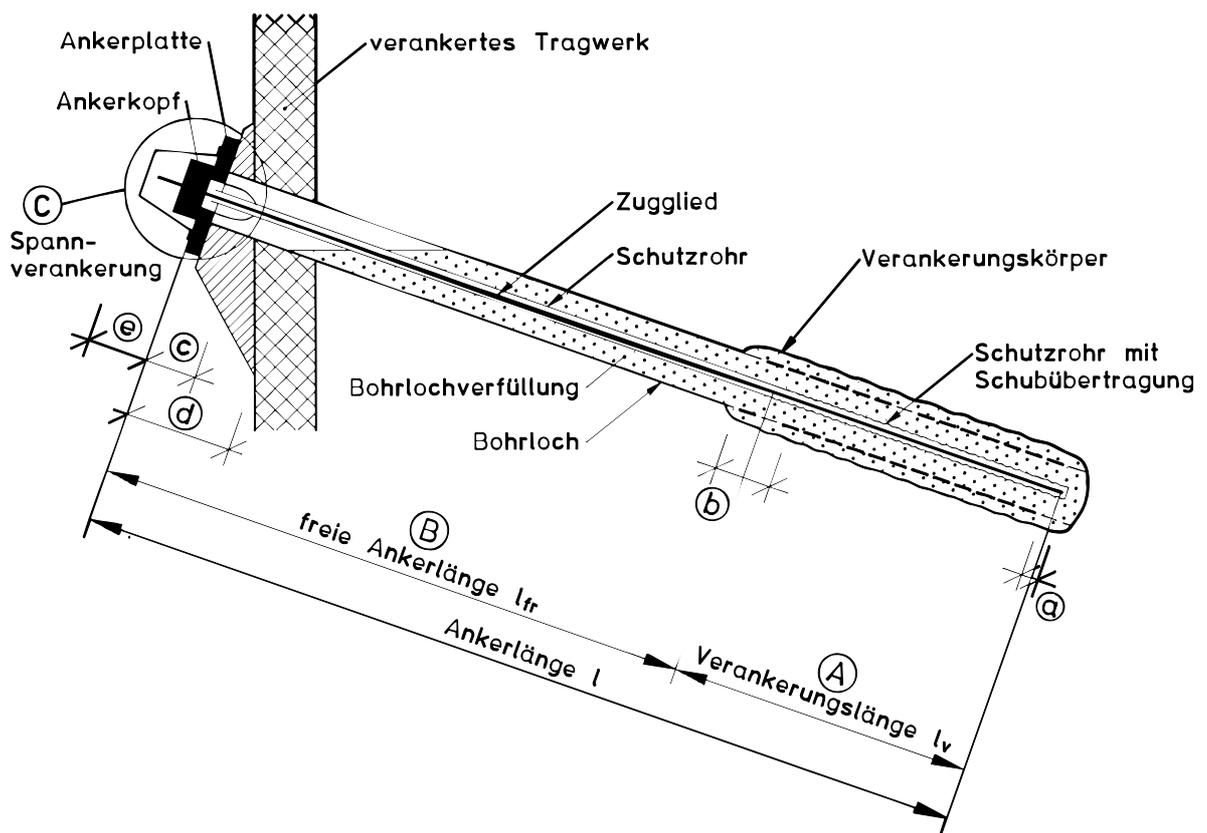
Ausgehend von den in Abschnitt 1.2 beschriebenen Erfahrungen, insbesondere der Tatsache, dass die elektrische Isolation bei vielen Ankern über Jahre funktioniert, wurden nicht alle für die Isolation verwendeten Materialien im Labor untersucht. Die Laboruntersuchungen beschränkten sich vielmehr auf bestimmte, für Beschichtungen oder Verbindungen verwendete Materialien. Hingegen wurden zusätzlich theoretische Überlegungen und Berechnungen zur Beurteilung von möglichen Schwachstellen durchgeführt.

### 3. Konstruktion und potentielle Schwachstellen des Korrosionsschutzes

#### 3.1 Konstruktion von vorgespannten Ankern mit umfassendem Korrosionsschutz

Ein Ankersystem kann in der Regel in folgende Bereiche und Übergangs- bzw. Abschlusszonen eingeteilt werden (Bild 3.1):

- |                                    |   |  |
|------------------------------------|---|--|
| Bereiche:                          | Ⓐ | Verankerungslänge $l_v$                                |
|                                    | Ⓑ | freie Ankerlänge $l_{fr}$                              |
|                                    | Ⓒ | Spannverankerung                                       |
| Übergangs- bzw.<br>Abschlusszonen: | Ⓐ | erdseitiges Ankerende (Ankerfuss)                      |
|                                    | Ⓑ | Übergang $l_v / l_{fr}$                                |
|                                    | Ⓒ | Übergang $l_{fr} /$ Spannverankerung                   |
|                                    | Ⓓ | Übergang Spannverankerung / Tragwerk (Krafteinleitung) |
|                                    | Ⓔ | luftseitiges Ankerende (Abschluss Spannverankerung)    |



**Bild 3.1:** Schematische Darstellung eines vorgespannten Ankers mit Bereichen, Übergangs- und Abschlusszonen

Aufbau des Korrosionsschutzes in den einzelnen Bereichen, Übergangs- und Abschlusszonen:

Hinweis: Weil zur Zeit nur Litzenanker über eine Zulassung als permanente vorgespannte Anker verfügen, beschränkt sich die Beschreibung auf Litzenanker.

- (A) Verankerungslänge  $l_v$ 

Hier sind die blanken, in zementösem Füllgut eingebetteten Litzen von einem Wellrohr oder Ripprohr aus HDPE umhüllt. Der Ringraum zwischen Wellrohr und Bohrlochwandung ist mit zementösem Füllgut zur Kraftübertragung verfüllt (Primär- und Nachinjektion).
- (B) freie Ankerlänge  $l_{fr}$ 

Die gefetteten, in Einzelrohren aus PE liegenden Litzen werden hier in der Regel vom Glatthüllrohr aus MDPE umhüllt. Der Zwischenraum ist mit zementösem Füllgut aufgefüllt. Ausnahme: Bei einem System besteht das Sammelhüllrohr aus dem gleichen Ripprohr wie auf der Verankerungslänge (siehe Abschnitt 3.3). Der Ringraum zwischen Sammelhüllrohr und Bohrlochwandung ist in der Regel mit zementösem Füllgut verfüllt. Diese Verfüllung ist nicht immer durchgehend vorhanden, weil in stark durchlässigen Baugrundsichten das Injektionsgut wegfließen kann.
- (C) Spannverankerung

Zwischen Ankerkopf und Ankerplatte oder unter der Ankerplatte liegt eine druckfeste Isolationsplatte, die den Ankerkopf gegenüber dem Tragwerk isoliert. Zusätzlich wird der Kontakt der hier gespreizten Litzen mit der Ankerplatte durch ein Rohr aus HDPE verhindert. Je nach System ist dieses Rohr gleichzeitig der innere Ankerstutzen oder ein kurzes Einzelstück (siehe Abschnitt 3.3).

Bei nicht einbetonierten Ankerköpfen (Kontroll- und Messanker) sind die Ankerköpfe und die Litzenüberstände mit einer Korrosionsschutzmasse beschichtet und durch eine Schutzhaube geschützt. Die Schutzhaube ist dann am tiefsten Punkt mit einer Bohrung  $\phi$  6 mm versehen zur Verhinderung von Kondenswasseransammlung. Bei einbetonierten Ankerköpfen ist die Schutzhaube vollständig mit einer elektrisch isolierenden Korrosionsschutzmasse verfüllt. Im ersten Fall wird die elektrische Isolation des Ankers zur Schutzhaube primär durch die Luft erreicht, im zweiten Fall durch die Korrosionsschutzmasse.
- (a) erdseitiges Ankerende (Ankerfuss)

Die elektrische Abdichtung des unteren Endes des Wellrohres der Verankerungslänge erfolgt mit einer Schrumpfkappe aus PE. Mit unterschiedlichen Massnahmen wie zum Beispiel Kunststoffzapfen, Metallkappe usw. wird bei den verschiedenen Systemen verhindert, dass die Litzenenden die Kunststoffabdichtung durchstossen können.
- (b) Übergang  $l_v / l_{fr}$ 

Die elektrische Dichtung der Verbindung Wellrohr – Glatthüllrohr erfolgt mit Schrumpfschläuchen aus PE. Je nach System und Ankergrösse werden ein oder zwei Schrumpfschläuche angeordnet. Zusätzlich wird die Verbindung oft durch ein in-

neres Stahlrohr stabilisiert. Beim System mit durchgehendem Wellrohr entfällt diese Verbindung.

© Übergang  $I_{fr}$  / Spannverankerung

Bei dieser Verbindung, die als einzige auf der Baustelle hergestellt werden muss, bestehen am meisten Systemunterschiede (siehe Abschnitt 3.3). Grundsätzlich gibt es zwei Konzepte:

- Innerer Ankerstutzen aus PE

Ein PE-Rohr, das durch die Ankerplatte bis zur Isolationsplatte reicht, wird über das Glatthüllrohr der freien Ankerlänge gestülpt. Die Dichtung zwischen diesem inneren Ankerstutzen und dem Glatthüllrohr erfolgt mit einer Lippendichtung oder mit einer auf der Baustelle verschraubten Quetschdichtung. Je nach Dichtungssystem und Litzenspreizung ist der innere Ankerstutzen oft aus mehreren PE Formstücken zusammengesetzt, die mit werkmässigen Spiegelschweissungen miteinander verbunden sind. Bei diesem Konzept liegt das Ankerzugglied bis zur Isolationsplatte auf der Ankerplatte durchgehend in einer Kunststoffumhüllung

- Innerer Ankerstutzen aus Stahl

Der innere Ankerstutzen ist an die Ankerplatte geschweisst und wird über das Glatthüllrohr der freien Ankerlänge gestülpt und dort mit einer auf der Baustelle verschraubten Quetschdichtung abgedichtet. Bei diesem Konzept haben die innere und die äussere Ankerkopfinjektion eine grosse Bedeutung. Die innere Kopfinjektion mit elektrisch isolierender Korrosionsschutzmasse gewährleistet die Isolation zwischen Litzen und innerem Ankerstutzen. Die äussere Kopfinjektion mit zementösem Füllgut gewährleistet den langfristigen Korrosionsschutz des inneren Ankerstutzens aus Stahl.

© Übergang Spannverankerung / Tragwerk (Krafteinleitung)

Die elektrische Isolation ist unter C beschrieben.

© luftseitiges Ankerende (Abschluss Spannverankerung)

Der Korrosionsschutz und die elektrische Isolation sind unter C beschrieben.

### 3.2 Potentielle Schwachstellen der elektrischen Isolation

#### Bauphase

Es versteht sich, dass in der Bauphase (Transport, Handling und Lagerung auf der Baustelle, Ankereinbau, Innen- und Ausseninspektion inkl. Nachinjektionen und Spannprobe) die ganze Kunststoffumhüllung der Anker verletzlich ist. Dies ist jedoch nicht Thema dieses Forschungsvorhabens, das nur Änderungen des elektrischen Widerstandes **nach** der Abnahmemessung untersucht.

Es ist darauf hinzuweisen, dass zur Beurteilung der Abnahmemessung und auch zur Beurteilung der Messungen im Nutzungszustand, das heisst zur Beurteilung der Ankergefährdung bei ungenügenden Messwerten, die Messung des elektrischen Widerstandes

nach jeder Bauphase sehr wertvoll ist. So liegt zum Beispiel bei einem Anker, der nach der Spannprobe noch sehr hohe Widerstandswerte zeigte, die Fehlstelle bei einer ungenügenden Abnahmemessung eindeutig im Ankerkopfbereich. Diese von der Norm nicht vorgeschriebenen Zwischenmessungen sollen deshalb in der revidierten Ankerrichtlinie des ASTRA (Ausgabe geplant 2007) zwingend vorgeschrieben werden.

### **Nutzungszustand**

Im Nutzungszustand bestehen an der elektrischen Isolation des Ankers folgende potentiellen Schwachstellen:

#### - äusserer Ankerkopfbereich

Die Isolation zwischen Ankerkopf und Ankerplatte bzw. zwischen Ankerplatte und Tragwerk (je nach Anordnung der Isolationsplatte) kann durch Feuchtigkeit, Verschmutzung, Pflanzen oder Insektenester überbrückt werden. Bei dieser Schwachstelle sind auch Schwankungen des elektrischen Widerstandes infolge wechselnder Feuchtigkeit gut vorstellbar. Der äussere Ankerkopfbereich ist in der Regel gut zugänglich und kann inspiziert und instandgesetzt werden.

#### - innerer Ankerkopfbereich

Der Übergang vom Hüllrohr der freien Ankerlänge bis zur Isolationsplatte weist in der Regel zwei Schwachstellen auf: die Dichtung zwischen Sammelhüllrohr und innerem Ankerstutzen und die Dichtung zwischen PE-Rohr und Isolationsplatte. Der innere Ankerkopfbereich ist aus mehreren Gründen heikel: Die Verbindung wird auf der Baustelle hergestellt (potentielle Ausführungsmängel), sie kann während der Nutzungsdauer durch Bauwerksverschiebungen und/oder -verdrehungen beansprucht werden und sie kann bereits bei der Herstellung Fehlstellen aufweisen, die aber bei der Abnahmemessung mangels leitender Feuchtigkeit (noch) nicht entdeckt werden.

#### - Übergang $I_v / I_{fr}$

Die mit Schrumpfschläuchen hergestellte Verbindung muss als Schwachstelle betrachtet werden, weil eine wasserdichte und zugfeste Verklebung von PE eigentlich nicht möglich ist. Überdies kann diese Verbindung bei gewissen Verankerungen im Nutzungszustand durch Längs- oder Querverschiebungen beansprucht werden.

#### - Wellrohr auf der Verankerungslänge $I_v$

Das Wellrohr, über welches die ganze Ankerkraft in den Baugrund übertragen wird, steht im Nutzungszustand unter hohen Schub- bzw. örtlichen Druckspannungen. Da PE ein viskoelastisches Verhalten hat, ist denkbar, dass das Wellrohr dieser Beanspruchung langfristig nicht standhält. Das Wellrohr muss deshalb grundsätzlich als potentielle Schwachstelle betrachtet werden.

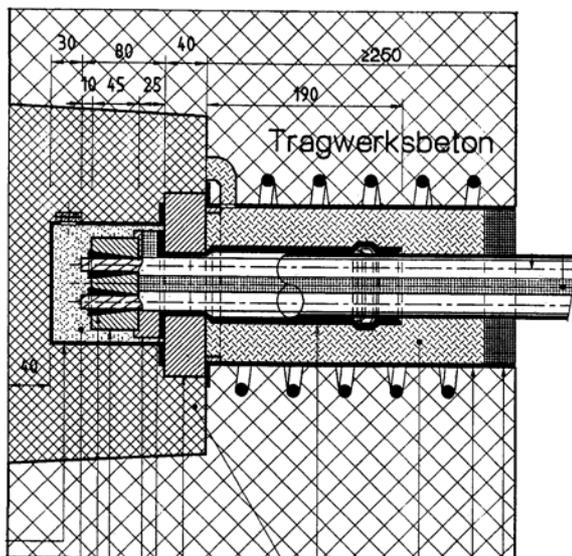
Die übrigen Bereiche der Kunststoffumhüllung, nämlich das Glatthüllrohr auf der freien Ankerlänge und der Abschluss am Ankerfuss, werden im Nutzungszustand nicht oder nur unwesentlich mechanisch beansprucht. Sie sind deshalb im Nutzungszustand nicht als potentielle Schwachstellen der elektrischen Isolation zu betrachten.

Die Untersuchung und die Beurteilung der potentiellen Schwachstellen der elektrischen Isolation sind der eigentliche Gegenstand des Forschungsvorhabens.

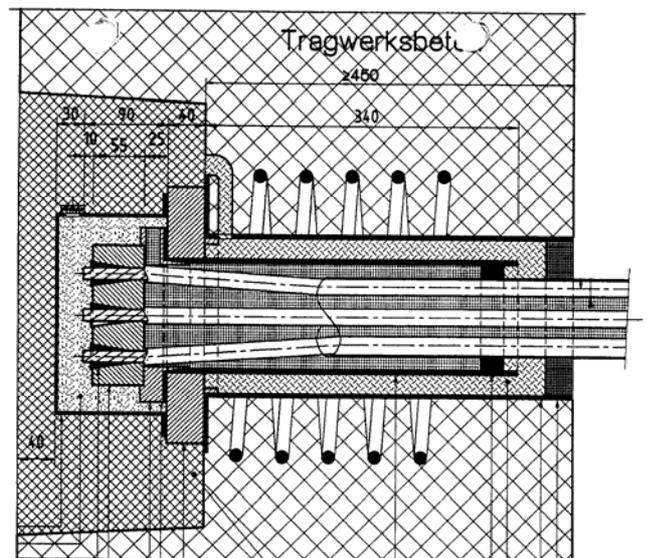
### 3.3 Wichtigste Systemunterschiede

Zurzeit sind in der Schweiz sieben Ankersysteme zur Anwendung als permanente Anker mit umfassendem Korrosionsschutz zugelassen. Wie im Abschnitt 3.1 erwähnt, bestehen die grössten Systemunterschiede im Übergang  $I_{fr}$  / Spannverankerung (innerer Ankerkopfbereich).

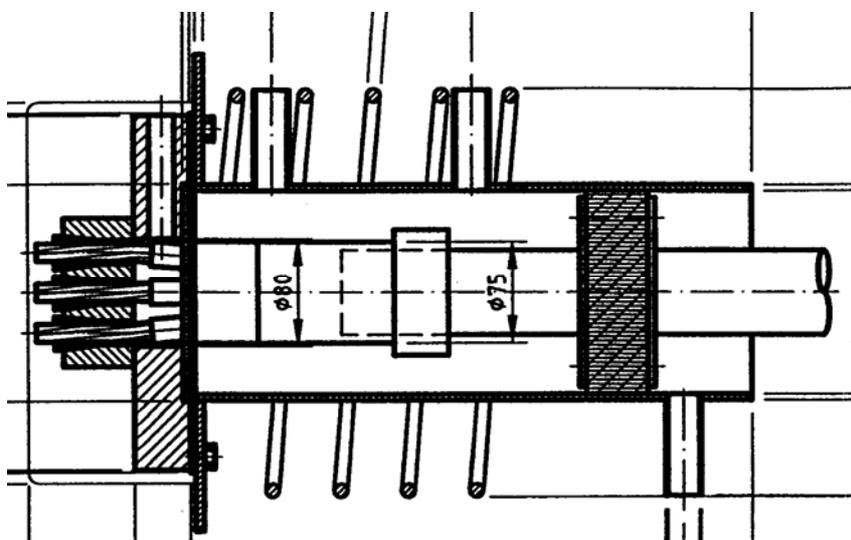
Die vier Systeme A, C, D und E wenden das Konzept "Innerer Ankerstützen aus PE" an (siehe Bilder 3.2 und 3.3). Die Abdichtung innerer Ankerstützen zum Glatthüllrohr der freien Ankerlänge erfolgt mit Lippendichtungen, teilweise bei grösseren Ankern mit geschraubten Quetschdichtungen (System A und künftig auch System C). Die Systeme D und E dichten zusätzlich den Ringraum zwischen Sammelhüllrohr  $I_{fr}$  und äusserer Ankerstützen mit einer geschraubten Quetschdichtung ab, damit die Lippendichtung nicht durch drückendes Wasser beansprucht werden kann (Bild 3.4).



**Bild 3.2:** Einbetonierter Ankerkopf System A für kleinere bis mittlere Ankerkräfte. Abdichtung zu Hüllrohr  $I_{fr}$  mit Lippendichtung.



**Bild 3.3:** Einbetonierter Ankerkopf System A für grosse Ankerkräfte. Abdichtung zu Hüllrohr  $I_{fr}$  mit verschraubter Quetschdichtung.



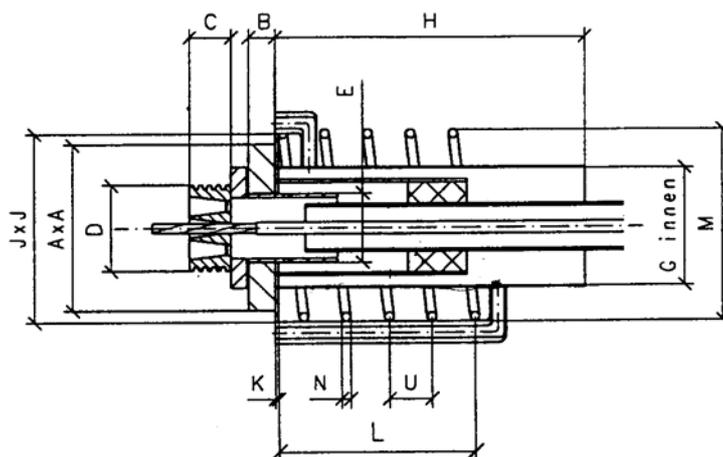
**Bild 3.4:** Ankerkopf System D. Lippendichtung innerer Ankerstützen / Hüllrohr  $I_{fr}$ . Quetschdichtung Hüllrohr  $I_{fr}$  / äusserer Ankerstützen.

Wesentliche konstruktive Unterschiede bestehen zwischen diesen vier Systemen auch bei der Dichtung zwischen innerem Ankerstutzen und Isolationsring. Bei den Systemen A und C liegt der Isolationsring auf der Ankerplatte. Zur Druckverteilung und Herstellung der Dichtung innerer Ankerstutzen / Isolationsring dient ein konischer Klemmring unter dem Ankerkopf. Der Isolationsring und der innere Ankerstutzen können aus materialtechnischen Gründen nicht verklebt werden. Die Dichtung wird durch gegenseitige Pressung hergestellt.

Bei den Systemen D und E liegt der Isolationsring unter der Ankerplatte. Hier wird die Dichtung innerer Ankerstutzen / Isolationsring durch die Pressung unter der Ankerplatte hergestellt.

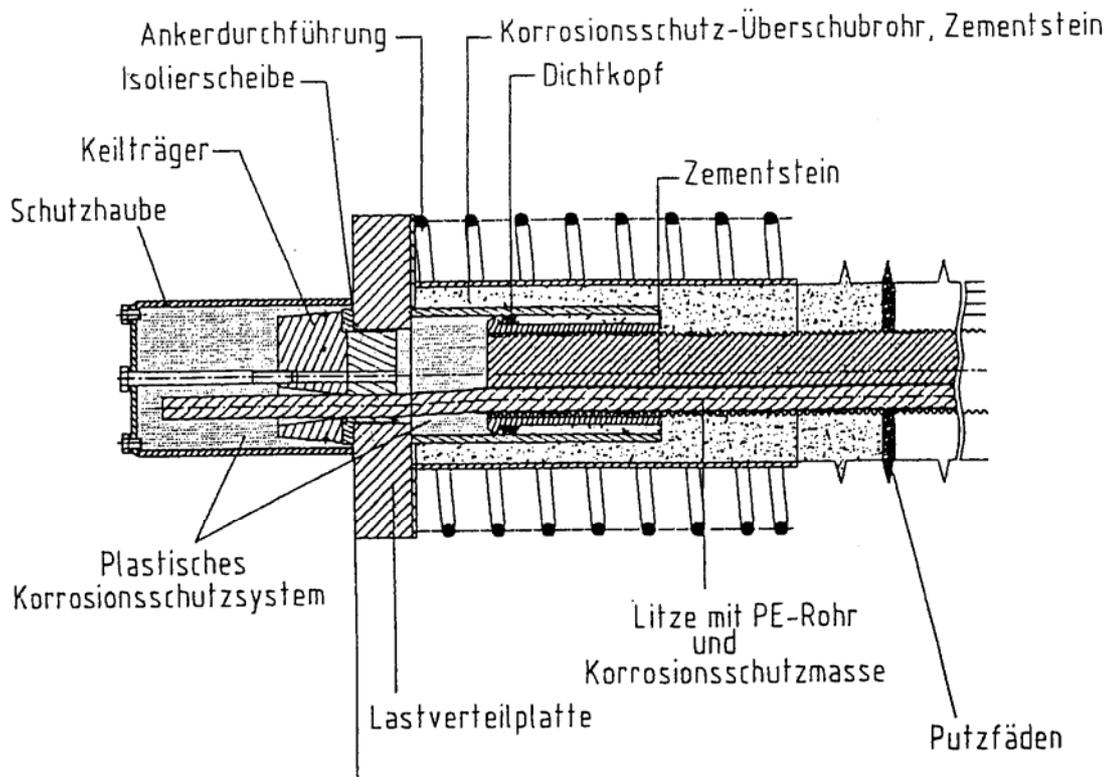
Anmerkung: Beim System E erfolgte die Abdichtung innerer Ankerstutzen / Glatthüllrohr ursprünglich mit einer Elektroschweissmuffe. Diese Lösung hat die erstmalige Prüfung bestanden, bei einer grösseren Verankerung jedoch nicht systematisch funktioniert, die Erfolgsquote betrug lediglich etwa 60%. Ob die Fehlstelle bei der Elektroschweissmuffe lag, konnte nicht geklärt werden. Die Herstellerin hat an Stelle langwieriger Untersuchungen kurzer Hand das System D übernommen.

Die drei Systeme B, F und G wenden das Konzept "Innerer Ankerstutzen aus Stahl" an. Das Abdichtungssystem der beiden Systeme B und F ist identisch (siehe Bild 3.5). Die Dichtung innerer Ankerstutzen / Glatthüllrohr  $I_{fr}$  erfolgt mit einer geschraubten Quetschdichtung. Die Dichtung zwischen dem kurzen, durch die Ankerplatte geführten PE Rohr und dem auf der Ankerplatte liegenden Isolationsring erfolgt durch Pressung durch einen unter dem Ankerkopf angeordneten Druckverteiler.



**Bild 3.5:** Ankerkopf System B. Verschraubte Quetschdichtung innerer Ankerstutzen (Stahl) / Hüllrohr  $I_{fr}$ . Durchführung durch Ankerplatte mit PE Rohrstück.

Beim System G erfolgt die Dichtung innerer Ankerstutzen zum Hüllrohr der freien Ankerlänge, das hier ein Wellrohr ist, mit einem "Dichtkopf" mit Lippendichtung (siehe Bild 3.6). Der Dichtkopf wird im Werk mit dem Wellrohr verklebt. Der druckfeste Isolationsring liegt direkt zwischen Ankerplatte und Ankerkopf (Keilträger). Im Bereich der Ankerplatte verhindert ein gelochter Kunststoffpfropfen den Kontakt der Litzen mit der Ankerplatte.



**Bild 3.6:** Ankerkopf System G. Lippendichtung innerer Ankerstutzen (Stahl) zu „Dichtkopf“ (verklebt mit Hüllrohr  $l_{fr}$ ). Durchführung durch Ankerplatte mit gelochtem Kunststoffpfropfen.

Anmerkung: Beim System G, wo das Wellrohr der Verankerungslänge  $l_v$  auch auf der freien Ankerlänge  $l_{fr}$  durchgeht, muss ausserhalb des Hüllrohres oberhalb der Verankerungslänge ein rund 2 m langer Pfropfen aus Bentonit eingebracht werden, wenn der Baugrund im Bereich  $l_{fr}$  nicht genügend weich gelagert ist. Dies zur Gewährleistung, dass die Ankerkraft tatsächlich im Bereich der Verankerungslänge auf den Baugrund übertragen wird. Dieser Umstand hat mit dem Korrosionsschutz nichts zu tun. Er wird nur zum Verständnis dieses speziellen Ankersystems angemerkt.

### 3.4 Materialtechnische und konstruktive Fragen

#### 3.4.1 Allgemeine materialtechnische Überlegungen

Wie im Abschnitt 1.2 beschrieben, werden bei allen zugelassenen Ankersystemen mindestens bei einem Teil der Anker bei der Abnahmemessung und auch bei den bisher vorliegenden Folgemessungen seit über 10 Jahren sehr hohe elektrische Widerstandswerte von über 50 M $\Omega$  erreicht. Daraus darf geschlossen werden, dass die für die elektrische Isolation der Ankersysteme eingesetzten Materialien und Materialstärken grundsätzlich geeignet sind.

### 3.4.2 Glatthüllrohr

Für das Glatthüllrohr auf der freien Ankerlänge werden die Werkstoffe MDPE und HDPE verwendet. Diese Werkstoffe werden auch für Rohrleitungen für Wasser und Gas eingesetzt. Die Rohre weisen relativ grosse Wandstärken von 4 bis 5 mm auf. Sie sind mit zementösem Füllgut verfüllt und in der Regel auch von zementösem Füllgut umhüllt. In gut durchlässigem Baugrund kann die äussere Umhüllung allerdings unvollständig sein. Wie im Abschnitt 3.2 beschrieben, werden die Glatthüllrohre im Normalfall nach dem Ankereinbau nicht oder nur unwesentlich mechanisch beansprucht. Eine Verletzung des Glatthüllrohres nach dem Ankereinbau ist deshalb höchstens in Ausnahmefällen überhaupt denkbar (örtliche Pressungen durch kantige Steine in Bereichen unvollständiger Umhüllung oder konzentrierte Querpressungen in Gleitflächen). Das Glatthüllrohr muss unseres Erachtens nicht als Schwachstelle des Korrosionsschutzes betrachtet werden. Die Eigenschaften des mehrheitlich verwendeten Werkstoffes MDPE 3802b sind in der Tabelle 3.1 aufgeführt.

Eigenschaft	MDPE 3802 b	PP H1022
Dichte bei 23 °C [g/cm <sup>3</sup> ]	0.947	0.901
Schmelzindex MFR 190/5 [cm <sup>3</sup> /10 min]	0.92	0.7
Streckspannung [N/mm <sup>2</sup> ]	18	25
Dehnung bei Streckspannung [%]	9	10
Zug-E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	700	1100
Shore-Härte D	60	66
Kerbschlagzähigkeit [kJ/m <sup>2</sup> ]	23 °C	35
	-30 °C	3
Vicat Erweichungstemperatur [°C]	125	149

**Tabelle 3.1:** Mechanische Eigenschaften des Glatthüllrohres (MDPE 3802b) und des Wellrohres (PP H1022).

### 3.4.3 Wellrohr

Für das Wellrohr oder Ripprohr auf der Verankerungslänge werden die Werkstoffe HDPE oder PP verwendet. Über das Wellrohr muss die ganze Ankerkraft auf den Baugrund übertragen werden, was durch seine Form (Verzahnung) und die vollständige Verfüllung und Umhüllung mit zementösem Füllgut erreicht wird. Das Wellrohr steht im Nutzungszustand unter hohen Schub- bzw. örtlichen Druckspannungen. Nun haben nicht vernetzte Kunststoffe (Elastomere) ein viskoelastisches Verhalten, das heisst sie kriechen unter mechanischer Beanspruchung schon weit unter der Streckgrenze des Werkstoffes. Die durchgehende und vollständige innere Verfüllung und äussere Umhüllung mit zementösem Füllgut verhindert konzentrierte örtliche Pressungen und erzwingt im Zwischenraum eine Volumenkonstanz. Damit steht dem Elastomer kein freies Volumen zur Verfügung, wohin es wegfliessen könnte. Dass diese Überlegung grundsätzlich funktioniert, ist durch

die erfolgreiche elektrische Isolation auch von Ankern mit sehr hohen Ankerkräften (bis 2'000 kN) erwiesen.

Trotzdem muss das Wellrohr als potentielle Schwachstelle des Korrosionsschutzsystemes betrachtet werden. Denn folgende Gefährdungsbilder bzw. eine Kombination von ihnen können zu einer Fehlstelle im Wellrohr und damit zu einem irreversiblen Abfall des elektrischen Widerstandes führen (örtliche Perforation des Wellrohres).

- Herstellungsbedingt weist das Wellrohr nur eine bescheidene Wandstärke von etwa 2 mm auf. Weil die innere und die äussere Schablone für die Herstellung der Wellrohrform sich durch "Spiel" und Abnutzung gegenseitig leicht verschieben können, ist die Wandstärke der Wellen nicht immer perfekt konstant. Im ungünstigen Fall können sehr dünne Wandstärken entstehen, die aber ohne mechanische Beanspruchung noch dicht sind und deshalb bei der Werkkontrolle nicht entdeckt werden.
- Während die innere Verfüllung des Wellrohres durch zementöses Füllgut systematisch gewährleistet werden kann, ist dies für die äussere Umhüllung nicht immer der Fall. Ungenügende Nachinjektionen und/oder Diskontinuitäten im Baugrund (Klüfte, grössere Durchlässigkeiten) können zu Lücken in der Umhüllung mit zementösem Füllgut führen.
- Stark unterschiedliches Tragverhalten des Baugrundes im Bereich der Verankerungslänge kann zu örtlich konzentrierten Verschiebungen führen, zum Beispiel in stark geklüftetem Fels oder bei Lage der Verankerungslänge teils im Lockergestein, teils im Fels.

Eine Abschätzung der durch eine Fehlstelle im Wellrohr verursachten Widerstandsverringerng ist anhand eines stark vereinfachten Modells möglich. Der Stromdurchtritt durch die Fehlstelle mit Durchmesser  $d$  hat die Ausbildung von je einem Spannungstrichter sowohl auf der Innen-, wie auch auf der Aussenseite des Wellrohres zur Folge. Der Widerstand  $R_B$  im Mörtel um das Hüllrohr lässt sich unter Annahme eines Wellrohres mit unendlich grossem Durchmesser und unter Einbezug des spezifischen Betonwiderstandes  $\rho$  gemäss Gleichung (3.1) beschreiben.

$$R_B = \frac{\rho}{2 \cdot d} \quad (3.1)$$

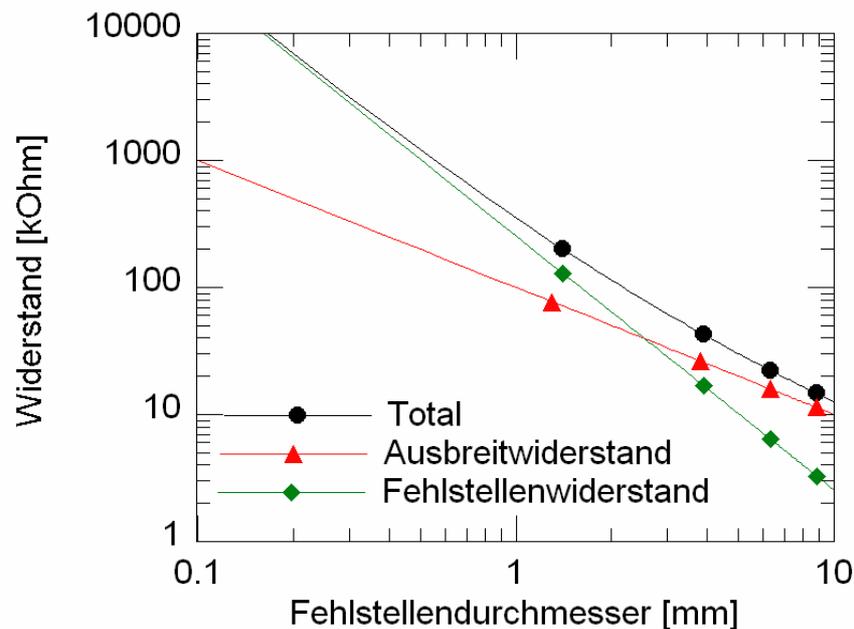
Die Konfiguration am Wellrohr ist zusätzlich durch den Spannungsfall in der Fehlstelle und die Spannungsverteilung auf der Innenseite des Wellrohres bestimmt. Folglich können die auftretenden Widerstände gemäss Gleichung (3.2) berechnet werden.

$$R_{tot} = R_B + R_F + R_W \quad (3.2)$$

Der Gesamtwiderstand  $R_{tot}$  setzt sich zusammen aus dem Ausbreitwiderstand im Mörtel um das Wellrohr ( $R_B$ ), dem Widerstand in der kreisrunden Hüllrohrfehlstelle ( $R_F$ ) und dem Widerstand innerhalb des Hüllrohres ( $R_W$ ). Unter Annahme eines Hüllrohres mit unendlich grossem Durchmesser lässt sich für eine Hüllrohrwanddicke  $t$  der Gesamtwiderstand der Fehlstelle gemäss Gleichung (3.3) berechnen.

$$R_{tot} = \frac{\rho}{d} + \frac{4\rho \cdot t}{d^2 \cdot \pi} \quad (3.3)$$

Die Berechnung des Gesamtwiderstands  $R_{tot}$  und der jeweiligen Beiträge des Ausbreitwiderstands ( $R_W + R_B$ ) und des Widerstands der Fehlstelle ( $R_F$ ) ist als Funktion des Fehlstellendurchmessers für ein Wellrohr mit 2 mm Dicke und einen Mörtelwiderstand von 100  $\Omega\text{m}$  in Bild 3.7 dargestellt.



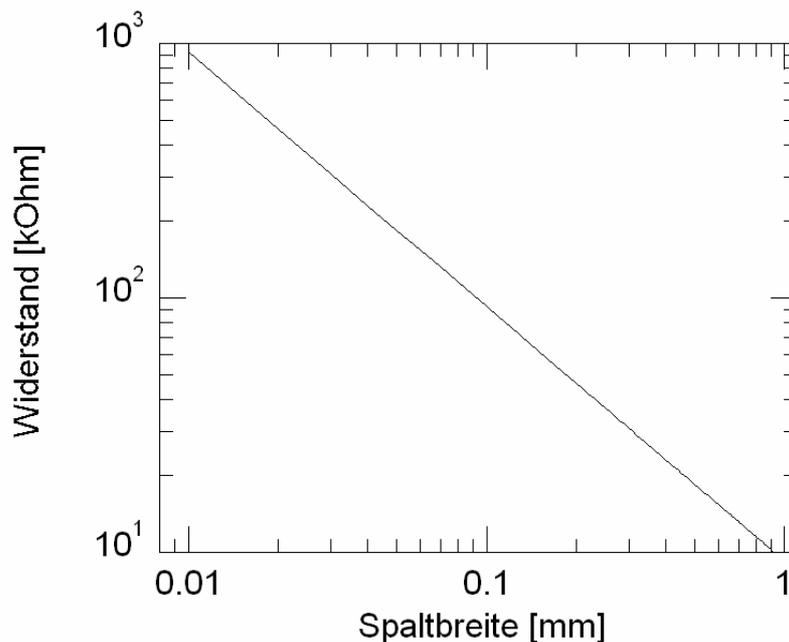
**Bild 3.7:** Gesamtwiderstand einer Fehlstelle als Funktion des Fehlstellendurchmessers (Total). Zusätzlich sind die Beiträge des Ausbreitwiderstands und des Fehlstellenwiderstands aufgeführt. Die Markierungen dienen der Identifikation der Kurven und stellen nicht einzelne Messwerte dar.

Aus Bild 3.7 geht hervor, dass der Fehlstellenwiderstand dominant ist für den Gesamtwiderstand solange der Fehlstellendurchmesser kleiner als die Wellrohrdicke ist. Für größere Fehlstellendurchmesser wird der Ausbreitwiderstand zum primären Einflussfaktor. Aus der Berechnung ergibt sich, dass ein Fehlstellendurchmesser von mehr als etwa 1 mm zu einem Abfall des Widerstandes unter den Grenzwert von 100 kOhm (0.1 M $\Omega$ ) führt.

#### 3.4.4 Schrumpfschlauch

Der für die Verbindung von Wellrohr und Glatthüllrohr verwendete Schrumpfschlauch besteht aus einem vernetzten Polyolefin, das auf der Innenseite mit einem Klebstoff beschichtet ist. Unter Erwärmung legt sich dieser Schlauch dicht an das Well- und Glatthüllrohr an. Der auf der Innenseite des Schrumpfschlauchs aufgebrauchte Klebstoff verflüssigt sich dabei, was zu einer Verklebung zwischen den Rohren und dem Schrumpfschlauch

führt. Dies ergibt eine feuchtigkeitsdichte Verbindung, welche sich in der Korrosionsschutztechnik und in der elektrischen Isolationstechnik generell gut bewährt hat. Dem Kleber kommt eine entscheidende Bedeutung zu und er ist wesentlich für den Gesamtwiderstand der Verbindung. Aus dem Rohrleitungsbau ist bekannt, dass derartige geklebte Verbindungen nicht immer dicht aufliegen. Dabei entstehen Spalten, in welche Wasser eindringen kann. Um die Auswirkungen einer derartigen Abhebung abzuschätzen, wurde eine theoretische Berechnung durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass der Schrumpfschlauch auf dem ganzen Umfang des Hüllrohrs abgehoben ist. Weiter wurde davon ausgegangen, dass Porenwasser des Injektionsmörtels in den Spalt eindringt. Für die Rechnung wurden ein spezifischer Widerstand von  $1 \Omega\text{m}$ , eine Verklebungslänge des Schrumpfschlauchs von beidseits 30 cm und ein Hüllrohrdurchmesser von 58 mm angenommen. Die Ergebnisse sind in Bild 3.8 dargestellt. Aus der Berechnung geht hervor, dass eine vollflächige Unterwanderung des Schrumpfschlauchs bei einer Spaltbreite von etwa 0.08 mm ausreicht, um den Widerstandswert des Ankers unter den Grenzwert von 100 kOhm fallen zu lassen. Folglich kommt der sauberen Verklebung des Schrumpfschlauchs eine entscheidende Bedeutung zu.



**Bild 3.8:** *Abhängigkeit des Widerstands von der Breite des Spalts zwischen dem Schrumpfschlauch und dem Hüllrohr.*

Schon in der Anfangsphase der Entwicklung des umfassenden Korrosionsschutzes wurde erkannt, dass die Verbindung des Wellrohres mit dem Glatthüllrohr mit einem Schrumpfschlauch eine sehr heikle Stelle am Schutzsystem ist. Denn das Schrumpfschlauchmaterial ist relativ weich und dünn und deshalb recht verletzlich. Zudem ist der Schrumpfschlauch exponiert, da er aussen auf den Hüllrohren aufliegt. Überdies wird die Verbindung durch das Auf- und Abrollen der Anker auf Bobinen oder Zwingen bei unterschiedli-

chen Temperaturen mechanisch beansprucht. Bei den meisten Ankersystemen wird deshalb die Verbindung Wellrohr - Glatthüllrohr durch ein innenliegendes Stahlrohr versteift und - vor allem bei grösseren Ankerdurchmessern - mit einem zusätzlichen zweiten, längeren Schrumpfschlauch ausgeführt.

#### 3.4.5 Isolationsplatte

Die druckfeste Isolationsplatte zur Isolation des Ankerkopfes vom Tragwerk besteht aus Hartpapier oder Glashartgewebe. Beides sind Verbundwerkstoffe aus einem Trägermaterial und einem Polymerharz. Beim Hartpapier ist das Trägermaterial Papier oder ein Baumwollgewebe, beim Glashartgewebe ein Glasfasergewebe. Beide Verbundwerkstoffe erreichen eine hohe mechanische Festigkeit und eine sehr hohe elektrische Isolationswirkung. Die dreidimensionale Vernetzung des Polymerharzes macht die Werkstoffe weitgehend beständig gegen Kriechprozesse und gegen Quellen durch Wasseraufnahme.

#### 3.4.6 Innerer Ankerkopfbereich

##### **Dichtung Sammelhüllrohr zu innerem Ankerstutzen**

Für diese Dichtung werden Lippendichtungen oder geschraubte Quetschdichtungen verwendet. Diese Dichtung wird auf der Baustelle hergestellt und muss auch nach der Montage gemäss Leitfaden für die Zulassung von Ankersystemen [6] eine Verschiebbarkeit von 30 mm aufweisen, zur Verhinderung einer Stauchung des Sammelhüllrohres durch Tragwerksverschiebungen beim Spannen der Anker. Damit besteht physikalisch gesprochen zwingend ein Spalt zwischen Dichtung und Sammelhüllrohr. Dieser Spalt ist nur wenige Zentimeter lang. Die Abhängigkeit von Spaltbreite und elektrischem Widerstand wurde für eine Verklebungslänge des Schrumpfschlaches von 30 cm untersucht (siehe Bild 3.8 im Abschnitt 3.4.4). Im Falle der Abdichtung des inneren Ankerstutzens ist die Situation durch die geringe Länge des Spaltes und die mögliche Verschmutzung der nur bedingt zugänglichen Abdichtungsstelle durch zementöses Füllgut oder gar feuchtes Erdmaterial zusätzlich verschärft. Somit besteht ein erhebliches Risiko, dass diese auf der Baustelle hergestellte Dichtung nicht systematisch genügend elektrisch dicht ist. Nun liegt aber auf der Innenseite der Dichtung elektrisch isolierende Korrosionsschutzmasse und die Litzen sind dort noch von den Einzelhüllrohren umhüllt. Eine ungenügende elektrische Isolation der Dichtung führt deshalb nicht zu einer Beeinträchtigung des elektrischen Widerstandes des Ankers. Dieser wird durch die Korrosionsschutzmasse im inneren Ankerkopfbereich trotzdem gewährleistet. Die Dichtung muss somit eigentlich nur den Durchfluss von drückendem Bergwasser und das Wegfliessen von Korrosionsschutzmasse verhindern, aber nicht zwingend elektrisch dicht sein. Langfristig wird die wichtige Funktion der Dichtung durch die äussere Ankerkopfinjektion mit zementösem Füllgut zusätzlich unterstützt.

##### **Dichtung innerer Ankerstutzen - Isolationsplatte**

Wie in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 beschrieben, bestehen hier die grössten Systemunterschiede. Diese Dichtungsstelle muss deshalb für die einzelnen Systeme getrennt diskutiert werden.

- Innerer Ankerstutzen aus PE und Isolationsring zwischen Ankerkopf und Ankerplatte (Systeme A und C)

Eine Verklebung der Isolationsplatte mit dem inneren Ankerstutzen ist materialtechnisch nicht möglich. Die Dichtung zwischen diesen beiden Elementen wird durch gegenseitige Pressung durch einen konischen Klemmring unter dem Ankerkopf hergestellt (Bild 3.2). Physikalisch besteht somit ein Spalt zwischen Isolationsring und innerem Ankerstutzen, der nur etwa 5 bis 6 mm lang ist. Ist die Pressung dort zu wenig gross oder wird die Pressung wegen Unebenheiten oder Fremdkörpern nicht überall gleichmässig verteilt, kann freies Porenwasser aus dem Injektionsgut der äusseren Ankerkopfinjektion kapillar zwischen innerem Ankerstutzen und Lochleibung der Ankerplatte hochsteigen und in den Spalt zwischen Isolationsring und innerem Ankerstutzen eindringen. Es kommt zum Kurzschluss zwischen Ankerkopf/Klemmring und Ankerplatte. Das dauerhafte Funktionieren der Dichtung ist somit stark abhängig von der Masshaltigkeit der Bauteile. Dabei ist auch der Umstand zu berücksichtigen, dass das PE des inneren Ankerstutzens wie in Abschnitt 3.4.3 beschrieben ein viskoelastisches Verhalten hat und unter Pressung wegstreicht, wenn es Raum dazu findet.

- Innerer Ankerstutzen aus PE und Isolationsring unter der Ankerplatte (Systeme D und E)

Die Dichtung zwischen Isolationsring und innerem Ankerstutzen wird durch gegenseitige Pressung unter der Ankerplatte hergestellt. Grundsätzlich gelten für diese Dichtung die gleichen Überlegungen wie für die Systeme A und C. Weil hier die Isolationsplatte unter der Ankerplatte liegt, grenzt die äussere Ankerkopfinjektion direkt an den physikalischen Spalt zwischen Isolationsplatte und innerem Ankerstutzen. Der Weg für kapillares Wasser ist also deutlich kleiner. Hingegen ist bei diesen Systemen die Kontaktfläche PE-Isolationsring dank einem Flansch des inneren Ankerstutzens deutlich grösser.

- Innerer Ankerstutzen aus Stahl (Systeme B, F und G)

Bei diesen Systemen ist der innere Ankerstutzen mit der Ankerplatte verschweisst. Damit ist ein Eindringen von Wasser durch Kapillarkräfte von der äusseren Ankerkopfinjektion ins Innere des Ankerkopfbereiches nicht möglich. Eine elektrisch dichte Verbindung zwischen Isolationsring und PE-Rohrstück in der Durchführung durch die Ankerplatte (Systeme B und F) resp. dem dort angebrachten Kunststoffpfropfen (System G) ist nicht erforderlich. Diese Bauteile müssen nur den Kontakt zwischen Litzen und Ankerplatte verhindern, nicht aber Wasser von aussen abhalten.

### **Schlussfolgerungen**

Die Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches ist für die elektrische Isolation des Ankers von grosser Bedeutung. Die angestellten Überlegungen führen allerdings zum Schluss, dass die Dichtung zwischen innerem Ankerstutzen und Sammelhüllrohr der freien Ankerlänge für die elektrische Isolation des Ankers nicht kritisch ist. Diese Dichtung muss lediglich den Durchfluss von Wasser und das Wegfliessen der Korrosionsschutzmasse verhindern, nicht aber zwingend elektrisch dicht sein. Bei den Ankersystemen mit einem inneren Ankerstutzen aus PE kann hingegen die Abdichtung zwischen innerem Ankerstutzen und Isolationsring für die elektrische Isolation des Ankers kritisch werden, wenn die einzelnen Systemteile ungenügend aufeinander abgestimmt sind oder eine ungenügende Masshaltigkeit aufweisen. Bei Systemen mit innerem Ankerstutzen aus Stahl besteht dieses Risiko nicht, wenn das Eindringen von Meteorwasser in den inneren An-

kerkopfbereich in der Zeit zwischen Spannprobe und Festsetzen des Ankers verhindert wird.

### 3.4.7 Plastische Korrosionsschutzmassen (Fette)

Verschiedene Komponenten des Ankers werden mittels Fetten vor Korrosion geschützt. Im Bereich des Ankerkopfs kommt den Fetten nicht nur eine Korrosionsschutzfunktion zu, sondern sie müssen auch eine elektrische Isolationswirkung aufweisen. Diese Wirkungsweise kann am einfachsten anhand von vollständig mit Fett verfüllten Ankerköpfen illustriert werden. Das Fett bildet dabei eine Brücke zwischen dem Keilträger und der Ankerplatte resp. der Schutzhaube. Sofern das Fett eine gewisse elektrische Leitfähigkeit aufweist, kann es zu einer Beeinträchtigung des elektrischen Widerstands des Ankers kommen.

Fette sind in der Regel Tri-Ester des dreifachen Alkohols Glycerin. Durch Oxidation mit Sauerstoff können sie in Karbonsäuren und Glycerin zersetzt werden. Dieser Prozess wird durch geringe Mengen von Schwermetallionen stark beschleunigt. Fette weisen polare Gruppen auf und können damit gewisse Mengen an Wasser aufnehmen. Bei teilweiser oder vollständiger Zersetzung kann sich im Fett eine Karbonsäure oder deren Salz ausbilden. Damit kann die elektrische Leitfähigkeit bei Wasseraufnahme stark erhöht werden. Im Gegensatz zu diesen natürlichen Fetten können auch unpolare Kohlenwasserstoffketten als Fette eingesetzt werden. Es handelt sich dabei meist um Destillationsprodukte der Erdölindustrie. Diese Fette sind nahezu vollständig hydrophob und können kaum Wasser aufnehmen. Die Fette können auch als Gemisch von polaren und unpolaren Gruppen eingesetzt werden.

In der Vergangenheit sind tatsächlich Probleme mit Fetten aufgetreten, welche eine zu geringe Isolationswirkung zeigten. Eine gewisse elektrische Leitfähigkeit kann durch folgende Effekte verursacht werden:

Zugabe von leitenden Partikeln als Stabilisatoren. So kann beispielsweise Russ in Fetten erhebliche elektrische Leitfähigkeiten ergeben.

Auch Wasser und darin gelöste Ionen können zu einer gewissen Leitfähigkeit führen. Je nach Anteil an polaren Gruppen und allfälligen Salzen kann eine Aufnahmefähigkeit von Wasser und Ionen auftreten.

Die heute verwendeten Fette zeigen einen sehr hohen spezifischen Widerstand wie aus den Messwerten in Tabelle 3.2 hervorgeht.

Produkt	Widerstand [Gohm*cm]
Visconorust	1.6
Denso Jet	1250
Denso Fill	1166

**Tabelle 3.2:** Spezifischer elektrischer Widerstand von verwendeten Fetten

Im Zusammenhang mit vollständig fettverfüllten Ankerköpfen sind zudem Grenzflächeneffekte aufgetreten. So wurde festgestellt, dass die hohen Temperaturen während des Sommers zu einer thermischen Ausdehnung des Fetts führen. Der Druckaufbau führt zu einem Austritt des Fetts aus der Ankerhaube. Bei der Abkühlung im Winter zieht sich das Fett zusammen. Im Normalfall wird dabei Luft unter die Ankerhaube gesaugt. Abhängig von der Viskosität des Fetts können auf diese Weise Hohlräume und Spalten unter der Ankerhaube entstehen, in welchen es unter ungünstigen Bedingungen zur Kondensation der Luftfeuchtigkeit kommen kann. Es wurden Fälle beobachtet, wo zwischen Fett und Ankerplatte ein Spalt entstanden ist, in welchem sich im Verlaufe der Zeit Wassertropfen gebildet haben.

### 3.5 Gewonnene Erkenntnisse

Die materialtechnischen Untersuchungen und die konstruktiven Überlegungen und Berechnungen zu den in Abschnitt 3.2 beschriebenen potentiellen Schwachstellen der elektrischen Isolation der Ankersysteme führen - kurz zusammengefasst - zu folgenden Erkenntnissen:

- Wellrohr ( $I_v$ )

Verschiedene Gefährdungsbilder können auch nach der Spannprobe und dem Festsetzen der Anker zu einer Defektstelle im Wellrohr führen. Eine solche Defektstelle führt zu einem irreversiblen Abfall des elektrischen Widerstandes unter den Grenzwert von 0.1 M $\Omega$ . Bei normgemässer Ausführung der Anker, insbesondere Vermeidung der Anordnung der Verankerungslänge in unterschiedlichen Baugrundtypen und ausreichende Konsolidierung des Bohrloches im Fels, wird sich das Eintreten der Gefährdungsbilder auf Einzelfälle beschränken. Ein verbreitetes oder gar systematisches Versagen des Wellrohres ist aufgrund der bisherigen Erfahrungen nicht zu befürchten.

- Übergang  $I_v / I_{fr}$

Diese kritische Verbindung ist bei allen Ankersystemen verbessert worden (doppelte Schrumpfschläuche etc.). Sie ist vor allem in den verschiedenen Phasen des Ankereinbaus und bei der Spannprobe gefährdet (was aber nicht Thema dieses Forschungsauftrages ist). Ein Versagen der elektrischen Isolation dieser Verbindung nach dem Festsetzen des Ankers durch sukzessives Unterwandern der Schrumpfschlauchverbindung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Weil grobe Mängel schon nach dem Ankereinbau resp. nach der Spannprobe manifest werden, dürfte es sich auch in diesem Fall um Einzelereignisse handeln. Denn die Schrumpfschlauchverbindung hat sich grundsätzlich bewährt.

Anmerkung: Es gibt keine messtechnische Möglichkeit festzustellen, ob bei einem Anker ein Defekt der elektrischen Isolation im Wellrohr oder bei der Verbindung  $I_v / I_{fr}$  liegt. Eine labormässige Untersuchung dieser Frage erscheint ebenfalls aussichtslos.

#### - Innerer Ankerkopfbereich

Die untere Abdichtung zwischen innerem Ankerstutzen und Sammelhüllrohr der freien Ankerlänge muss für die elektrische Isolation des Ankers nicht zwingend elektrisch dicht sein. Diese Dichtung muss nur den Durchfluss von Wasser und das Wegfliessen von plastischer Korrosionsschutzmasse verhindern.

Bei den Ankersystemen mit innerem Ankerstutzen aus PE besteht ein Risiko, dass Porenwasser der äusseren Ankerkopfinjektion kapillar zur Kontaktdichtung zwischen innerem Ankerstutzen und Isolationsplatte aufsteigt (obere Abdichtung) und - bei ungeeigneter Konstruktion oder ungenügender Masshaltigkeit der Bauteile - diese Kontaktdichtung durchdringt, was zu einem Kurzschluss führt. Dieses Risiko ist systemabhängig. Bei diesem Gefährdungsbild kann der Abfall der elektrischen Isolation des Ankers erst nach einer gewissen Zeit nach dem Festsetzen des Ankers eintreten. Bei Ankersystemen mit innerem Ankerstutzen aus Stahl besteht dieses Risiko nicht.

## 4. Kontinuierliche Messungen an Verankerungen

### 4.1 Messgrössen und Messmethoden

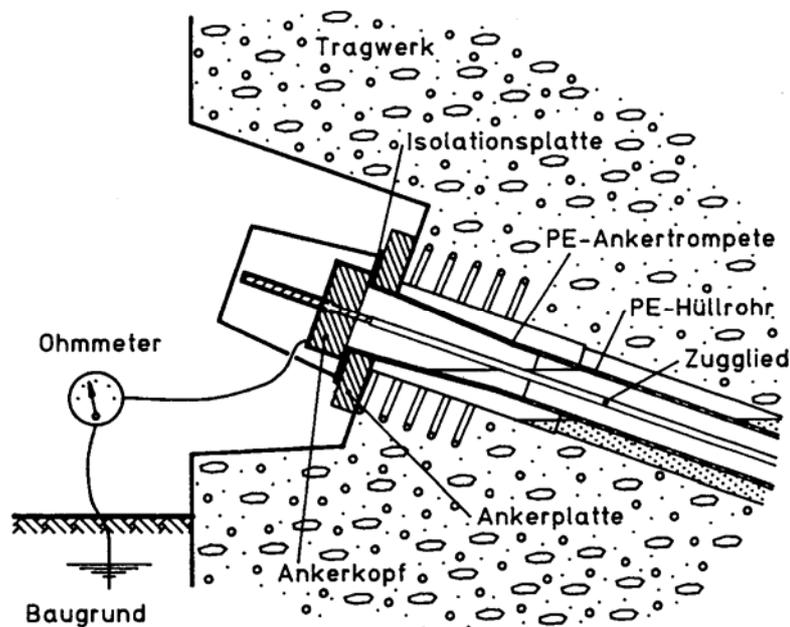
Bei der kontinuierlichen Überwachung der Anker wurde nicht nur der elektrische Widerstand, sondern auch die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur am Standort aufgezeichnet. Sofern dies messtechnisch möglich war, wurden diese Klimadaten sowohl in der Ankernische, als auch unter der Ankerhaube registriert. Die Messdatenerfassung erfolgte mit einem batteriebetriebenen Datenloggersystem, welches für die Bauwerksüberwachung in Zusammenarbeit mit der ETH-Zürich entwickelt wurde [7]. Diese Messanlage ist optimiert für den Feldeinsatz und die Aufzeichnung von korrosionsspezifischen Messdaten. Die Registrierung erfolgte in Messintervallen von 8 Minuten. Mit diesem Messintervall war es möglich, das System während eines Monats zu betreiben. Anschliessend musste der Datenspeicher ausgelesen und die Batterie ausgewechselt werden.

Die Details der Datenerfassung der einzelnen aufgezeichneten Messwerte und deren Auswertung werden im Folgenden diskutiert.

#### 4.1.1 Die elektrische Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessung am gespannten Anker wird gemäss Norm SIA 267 mit einer Gleichstromprüfung bei 500 V mit dem Gerät Metrigo 500 MV entsprechend dem Schema in Bild 4.1 durchgeführt. Für die kontinuierliche Widerstandsmessung wurde ein Metrigo Messgerät derart umgebaut, dass die Messung des Widerstands und die Messwerterfassung mit dem Datenlogger über einen Bereich von 5 Dekaden möglich wurde. Die neue Generation der Messgeräte verfügt über eine Digitalanzeige, welche vom verfügbaren Datenlogger nicht ausgelesen werden konnte. Glücklicherweise waren die ursprünglichen Zeigerinstrumente noch auf dem Markt erhältlich. Damit war es möglich, den Signalstrom des Zeigerinstrumentes für die Signalauswertung zu verwenden. Dabei wurde wie folgt

vorgegangen: Das Zeigerinstrument wurde aus dem Messkreis herausgelötet und stattdessen wurde ein Widerstand eingebaut, welcher dem Innenwiderstand des Zeigerinstruments entspricht. Somit war es möglich, den Spannungsfall über den Widerstand direkt mit dem Datenlogger zu erfassen. Der Messbereich erstreckt sich in dieser Konfiguration von  $500 \Omega$  bis  $50 \text{ M}\Omega$ . Es ist aber zu anmerken, dass die Messunsicherheit im Bereich der Messgrenzen durchaus einen Faktor 2 aufweisen kann. Die Problematik bestand nun aber darin, dass die Widerstandsmessung eine gewisse Messzeit benötigt, bis die kapazitiven Aufladungen abgeklungen sind. Dies bedeutet, dass die Widerstandsmessung 10 Sekunden vor der Messung des Spannungsfalls gestartet werden musste. Dazu wurde eine elektronische Timereinheit verwendet. Da der Einsatz von mehreren Metriso Widerstandsmessgeräten zu kostspielig gewesen wäre, wurden mit Hilfe eines Mehrkanalrelais mehrere Anker nacheinander mit dem gleichen Gerät gemessen. In Bild 4.2 ist die Messinstallation im zugehörigen Messkasten dargestellt.



**Bild 4.1:** Elektrische Widerstandsmessung I am fertig gespannten Anker.



**Bild 4.2:** Messaufbau für die kontinuierliche Widerstandsmessung. Oben links Timer und Relaissteuerung; oben rechts Datenlogger; Mitte links umgebautes Metriso Messgerät, Mitte rechts Mehrkanalumschalter.

Konkret gestaltete sich ein Messzyklus wie folgt: Am Ende der Datenaufnahme durch den Datenlogger sandte dieser ein TTL Signal an den Timer. Dieser begann zu laufen und schaltete 10 Sekunden vor der nächsten Datenaufnahme das Metriso Messgerät für 11 Sekunden ein. Nach 10 Sekunden wurde dann der Spannungsfall auf dem Widerstand vom Datenlogger erfasst. Eine Sekunde später wurde das Metriso wieder ausgeschaltet. Weitere 10 Sekunden später hatte der Datenlogger die Klimadaten registriert und den Messzyklus abgeschlossen, worauf er den Timer erneut mit Hilfe des TTL Signals in Betrieb setzte. Dasselbe TTL Signal wurde benutzt, um das Mehrkanalrelais einen Schritt weiterzuschalten. Die Widerstände der einzelnen Anker wurden folglich im Falle eines 12 Kanalrelais nur alle 12 Messzyklen des Datenloggers erfasst. Um eine unabhängige Kontrolle der korrekten Funktionsweise des Messaufbaus zu erhalten, wurde ein Kanal des Mehrkanalrelais mit einem 100 kOhm Widerstand belegt. Damit standen noch 11 Kanäle für die Messung der Anker zur Verfügung. Mit einem Messintervall des Datenloggers von 8 Minuten wurde jeder Anker alle 96 Minuten gemessen. Damit konnten genügend Messwerte erfasst werden, um den Einfluss der tageszeitlichen Schwankungen zu erfassen.

#### 4.1.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Zusätzlich zu den Widerstandswerten wurden die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur im Bereich der Nische und zum Teil zusätzlich unter der Ankerhaube gemessen. Dazu wurde ein kombinierter Temperatur / Feuchtefühler von Bettschen Elektronik AG eingesetzt. Die analogen Messausgänge des Fühlers konnten direkt vom Datenlogger erfasst werden.

Die Luft ist ein Gemisch verschiedener Gase. Eines dieser Gase ist der Wasserdampf. Die Menge an Wasserdampf, die in der Luft enthalten sein kann, ist allerdings begrenzt. Je wärmer die Luft ist, desto mehr Wasserdampf kann in ihr enthalten sein. Die relative Luftfeuchtigkeit gibt dabei an, wie viel Prozent des maximalen Wasserdampfgehaltes die Luft im Augenblick enthält. Da der maximale Wasserdampfgehalt mit steigender Temperatur ansteigt, fällt die relative Luftfeuchtigkeit mit steigender Temperatur (und umgekehrt). Die relative Luftfeuchtigkeit ( $r$ ) ist definiert als das Verhältnis vom augenblicklichen Dampfdruck ( $DD$ ) zum Sättigungsdampfdruck ( $SDD$ )(Gleichung 4.1).

$$\frac{r}{100} = \frac{DD}{SDD} \quad (4.1)$$

Gleichung 4.2 ist die Näherungsformel für die Berechnung des Sättigungsdampfdrucks. Die zugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.1 gegeben.

$$SDD = 6.1078 \cdot 10^{\frac{a \cdot T}{b+T}} \quad (4.2)$$

Bedingung	a	b
T > 0°C	7.5	237.3
T < 0°C	7.6	240.7

**Tabelle 4.1:** Parameter zu Gleichung 4.2

Anhand von Gleichung 4.1 und 4.2 lässt sich aus der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur die Druckdifferenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck und dem Dampfdruck berechnen. Wenn diese Druckdifferenz null ist, tritt Kondensation ein.

## 4.2 Ausgewählte Objekte

Die Auswahl der drei Verankerungen, an denen kontinuierliche Messungen des elektrischen Widerstandes vorgenommen wurden, erfolgte einerseits nach prinzipiellen Kriterien und andererseits nach pragmatischen Gesichtspunkten.

### Prinzipielle Kriterien für die Auswahl einer Verankerung:

- Das Ankersystem muss erstmalig geprüft sein und verbreitet eingesetzt werden.
- Die drei Objekte sollen mit drei verschiedenen Ankersystemen verankert sein. Dabei sollen beide Konzepte - innerer Ankerstützen aus PE oder aus Stahl - vertreten sein.

- Es müssen ausreichende Informationen über die Ankerarbeiten (Prüfungen und Messungen vorliegen).
- Es soll eine Messreihe des elektrischen Widerstandes von einzelnen Ankern seit Bauabnahme vorhanden sein.
- Einzelne Anker müssen deutliche Schwankungen und/oder eine Abnahme des elektrischen Widerstandes zeigen.
- Wunschbedarf: Wenn möglich sollen verschiedene Ankerkopftypen messbar sein (Messanker, Kontrollanker, Bauwerksanker).

#### **Pragmatische Gesichtspunkte bei der Auswahl einer Verankerung:**

- Das Einverständnis des Bauherrn für die Messungen muss vorliegen.
- Die Ankerköpfe müssen ohne Aufwendungen wie Gerüste oder Hebebühnen zugänglich sein.
- Die Verankerung soll nicht zu weit entfernt vom Standort der Forschungsstelle Zürich sein.

Aufgrund dieser Kriterien sind von der Dr. Vollenweider AG drei von ihr selber projektierte, begleitete (örtliche Bauleitung) und nach Bauabnahme überwachte Verankerungen für die kontinuierliche Messung der elektrischen Widerstände ausgewählt worden. Diese Auswahl mag einseitig erscheinen, war aber aufgrund der Auswahlkriterien und der in Abschnitt 1.2 beschriebenen Datenlage nicht anders möglich.

Die Dr. Vollenweider AG hält an dieser Stelle ausdrücklich fest, dass durch die von ihr getroffene Auswahl kein Ankersystem absichtlich bevorzugt oder benachteiligt wurde. Alle Daten dieses Forschungsprogrammes sind objektiv belegt und können von allen Interessierten überprüft werden.

#### **4.2.1 Hangsicherung Attikon**

Die Hangsicherung Attikon steht an der A1 bei der Abzweigung der A7 östlich von Oberwinterthur. Sie sichert den Rutschhang Eggwald. Das Bauwerk ist eine 210 m lange aufgelöste Bohrpfahlwand mit verankertem Kopfriegel. Die Hangsicherung wurde 1969 gebaut und mit 95 Stabankern verankert. Dabei wurden fünf verschiedene Stabtypen eingesetzt, die aber alle ungenügend korrosionsgeschützt waren. Aufgrund der 1995 durchgeführten Überprüfung und Nachrechnung der Verankerung wurde 1996 die gesamte Verankerung durch neue umfassend korrosionsgeschützte Litzenanker System B ersetzt, die auf einem neuen, dem Kopfriegel vorgesetzten Ankerriegel angeordnet sind. Das Bauwerk ist in [8] im Anhang 1 beschrieben.

Die 1996 eingebaute Verankerung besteht aus 94 Litzenankern à 4 Litzen zu 100 mm<sup>2</sup> ( $P_0 = 430$  kN). 7 Anker sind mit einer Kraftmessdose ausgerüstet (Messanker), 6 weitere Anker sind als Kontrollanker in abgedeckten Nischen für Kontrollen zugänglich, die übrigen Ankerköpfe sind einbetoniert. Alle Messanker und auch alle Kontrollanker sind mit Kabeln zur Messung des elektrischen Widerstandes ausgerüstet. Die Messkabel (Kraft

und elektrischer Widerstand) sind zu zwei Messkästen an beiden Enden des Kopfriegels geführt. Die Messkästen sind bequem vom Standstreifen der A1 aus zugänglich. Die seit 1997 durchgeführten periodischen Messungen sind im Anhang 1 zusammengestellt. Die Verankerung Attikon erfüllte alle oben aufgeführten Auswahlkriterien für kontinuierliche Messungen in idealer Weise.

#### 4.2.2 Stützwand Täntenholz

Die Stützwand Täntenholz sichert einen Hanganschnitt an der Westumfahrung Zürich in Birmensdorf. Die 1997 erbaute Stützwand ist rund 150 m lang und 10 bis 13 m hoch. Sie ist eine aufgelöste Bohrpfahlwand mit zwei verankerten Betonlongarinen. Insgesamt sind 175 Anker des Systems A mit vier oder fünf Litzen eingebaut ( $P_0 = 430$  kN resp. 545 kN). 21 Anker sind mit Kraftmessdosen als Messanker ausgebildet und zusätzlich mit einem Kabel zur Messung des elektrischen Widerstandes ausgerüstet. Die Messkabel sind zu Messkästen am Wandfuss geführt, die über einen Unterhaltungsweg bequem erreichbar sind. Wegen der grossen Wandhöhe wurden keine Kontrollanker, dafür mehr Messanker vorgesehen. Einzelne Anker der unteren Longarine mit ungenügendem elektrischem Widerstand sind nachträglich als Kontrollanker ausgebildet worden (aber logischerweise ohne Messkabel). Alle übrigen Ankerköpfe sind einbetoniert.

Die Verankerung Täntenholz erfüllte die Auswahlkriterien für kontinuierliche Messungen gut. Als Nachteil ist zu vermerken, dass hier nur ein Ankerkopftyp (Messanker) für die Messungen zur Verfügung stand. Eine zusätzliche Messung der vereinzelt Kontrollanker fiel ausser Betracht, da ihr elektrischer Widerstand ja seit dem Einbau ungenügend ist. Zusätzlich ist anzumerken, dass hier die Schutzhauben der Messanker mit Korrosionsschutzmasse verfüllt sind, was nicht mehr dem Leitfaden für die Zulassung von Ankersystemen [6] entspricht. Für das Forschungsprojekt erschien diese Verankerung trotzdem geeignet, was durch die Messergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse auch bestätigt wurde.

#### 4.2.3 Pfahlwand Waldheim

Die Pfahlwand Waldheim ist Teil einer permanenten Hangsicherung in einem aktiven Rutschhang für eine private Überbauung an der Waldheimstrasse in Zug. Zwischen den Untergeschossen und der Pfahlwand liegt ein begehbare Hohlraum, der oben mit einer Betonplatte abgedeckt ist. Die Verankerung ist deshalb dem Aussenklima nicht direkt ausgesetzt (keine Bewitterung, keine Sonnenbestrahlung, Temperaturschwankungen stark gedämpft und kaum je Frost).

Die 2004 gebaute Pfahlwand hat zwei verankerte Abschnitte. Der südliche, rund 10 m hohe Abschnitt hat zwei verankerte Betonlongarinen, der nördliche, 3 bis 6 m hohe Abschnitt hat eine verankerte Longarine. Insgesamt sind 28 Litzenanker des Systems C à 7 und 9 Litzen eingebaut ( $P_0 = 750$  resp. 980 kN). Davon sind 4 Anker mit Kraftmessdosen ausgerüstet (Messanker). 7 weitere Anker bleiben als Kontrollanker zugänglich. Die übrigen Ankerköpfe sind einbetoniert.

Die Messanker sind mit Kabeln zur Messung des elektrischen Widerstandes ausgerüstet, die Kontrollanker jedoch nicht. Hingegen sind hier - beeinflusst durch Fragestellungen dieses Forschungsprojektes - vier einbetonierte Bauwerksanker mit Kabeln zur Messung des elektrischen Widerstandes ausgerüstet worden. Die Kabel sind zu je einem Messkasten im südlichen und nördlichen Wandabschnitt geführt, die bequem von der Tiefgarage der Überbauung aus erreichbar sind.

Zwar liegt für diese Verankerung noch keine längere Messreihe der elektrischen Widerstände vor, im übrigen erfüllt sie die aufgestellten Auswahlkriterien für kontinuierliche Messungen jedoch sehr gut.

### 4.3 Durchgeführte Messungen und Ergebnisse

#### 4.3.1 Attikon

Die Verankerung Attikon wurde u.a. aufgrund von bei der periodischen Überwachung registrierten auffälligen Schwankungen der Widerstandswerte einzelner Anker für die kontinuierliche Überwachung ausgewählt (siehe Anhang B3). Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Messaufbau optimiert. Ursprünglich konnten nur die Widerstandswerte von zwei Ankern gemessen werden. Später war das System in der Lage sechs Anker zu messen. Schliesslich wurde die Messanlage noch weiter ausgebaut, so dass zuletzt 11 Anker erfasst werden konnten. Weil bei diesem Objekt die Messanker und die Kontrollanker mit Messkabeln ausgerüstet sind, konnten hier beide Ankerkopftypen gemessen werden.

#### **Generelle Beobachtungen**

Bei 4 von 5 gemessenen Kontrollankern lagen die Widerstandswerte dauerhaft über 25 M $\Omega$ . Die Widerstandswerte waren also immer im obersten Messbereich des Messaufbaus von 50 M $\Omega$  oder darüber. Damit zeigen 4 der 5 Kontrollanker dauernd einen hohen Widerstandswert.

Demgegenüber wurden bei den Messankern erhebliche Fluktuationen registriert. Die Ergebnisse von 4 der 6 gemessenen Messanker sind in Bild 4.3 dargestellt. Aus den Messungen geht hervor, dass die Widerstandswerte der Anker sich über den gesamten Messbereich erstrecken. Mit Ausnahme des Ankers 146 treten an allen Messankern Schwankungen im Widerstand auf, welche mindestens eine Dekade umfassen. In verschiedenen Fällen treten die grossen Schwankungen synchron bei mehreren Ankern auf. Bei den Ankern 104 und 120 schwanken die Widerstände um den Grenzwert von 100 k $\Omega$ , während die Werte der Anker 131 und 146 stets oberhalb des Grenzwerts liegen.

Bild 4.5 zeigt die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in der Ankernische des Messankers 176. Die jahreszeitlichen Schwankungen sind klar zu erkennen. Im Winter ist die relative Luftfeuchtigkeit generell höher als im Sommer. Sowohl in der Temperatur, wie auch in der relativen Luftfeuchtigkeit sind die saisonalen und die täglichen Schwankungen klar zu erkennen.

### **Spezialfälle der Widerstandsbeeinflussung**

Die Messungen an den Ankern mit typischem Widerstandsverlauf zeigten im Fall der Messanker erhebliche Variationen im elektrischen Widerstand, während bei den Kontrollankern durchwegs sehr hohe Widerstände gefunden wurden. Bei einem Kontrollanker wurde eine deutliche Abweichung vom generellen Verhalten festgestellt. Zwei Messanker zeigten überdies einen besonders stark saisonal geprägten Widerstandsverlauf.

So zeigte der Kontrollanker 184 starke Fluktuationen der Widerstandswerte (Bild 4.7). Innerhalb eines Tageszyklus tritt eine Variation des elektrischen Widerstands von mehr als einem Faktor 1000 auf. Aus dem Diagramm wird zudem klar, dass diese Variationen in hohem Masse durch die Jahreszeit beeinflusst werden. So ist der Widerstand im Winter generell erheblich höher. Beim Anker 184 wurden zusätzlich die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit in der Nische und unter der Ankerhaube erfasst. Die Ergebnisse für die Nische sind in Bild 4.8 aufgeführt. Aufgrund von Temperatur und Luftfeuchtigkeit lässt sich die Dampfdruckdifferenz zum Sättigungsdampfdruck berechnen. Damit lässt sich abschätzen, ob Kondensation zu erwarten ist. Diese Berechnung wurde für den Anker 184 für die Nische und die Haube durchgeführt (Bild 4.9). Es ist zu erkennen, dass die Dampfdruckdifferenz in der Nische im Winter sehr gering ist, was bedeutet, dass Kondensation zu erwarten ist. Im Sommer ist die Dampfdruckdifferenz hoch, mit Kondensation ist folglich nicht zu rechnen. Unter der Haube ist hingegen aufgrund dieser Berechnung während der gesamten Messdauer nie von Kondensation auszugehen, da stets eine Dampfdruckdifferenz gegeben ist. Im Sommer 2004 wurde Silikagel unter der Ankerhaube eingebaut. In der Messung ist dies an der erhöhten Dampfdruckdifferenz zu erkennen (Bild 4.9). Obwohl die Dampfdruckdifferenz unter der Haube zusätzlich erhöht wurde, kann kein Effekt auf den weiteren Widerstandsverlauf des Ankers 184 (Bild 4.7) ausgemacht werden.

Aufgrund der Messungen ist der Widerstand des Kontrollankers 184 im Winter hoch, wenn eigentlich Kondensation zu erwarten ist, während im Sommer, wo trocknende Bedingungen herrschen, der Widerstand absinkt. Dies deutet darauf hin, dass nicht primär die Dampfdruckdifferenz für den Einbruch des Widerstands im Sommer verantwortlich ist. Der Vergleich des Widerstandsverlaufs mit der Temperatur zeigt, dass die starken Schwankungen im Tagesverlauf nur dann auftreten, wenn die Temperatur oberhalb von ca. 12 °C ist. Sobald der Wert unter 8°C liegt, sind die Widerstandswerte konstant auf hohem Niveau. Dieser Effekt ist besonders klar beim abrupten Temperatursturz im Herbst 2004 zu erkennen. Der Widerstand ist dabei sofort auf ein hohes Niveau angestiegen (Bilder 4.7 und 4.8). Die saisonale Entwicklung des Widerstands verläuft also gegenläufig zur Kondensation von Feuchtigkeit. Weiter erfolgt der Umschlag im Widerstand, sobald die Temperatur im Bereich von 8 bis 12 °C liegt.

Diese auffällige Verknüpfung von Lufttemperatur und Widerstand kann anhand eines Modells zumindest qualitativ erklärt werden: Der Anker steht in Verbindung mit tieferen Zonen des Erdreichs. Damit wird der Anker auf der Temperatur des Erdbodens im Bereich der Verankerungslänge gehalten. Der einzige grossflächige Kontakt des Ankers mit der Atmosphäre liegt bei der Ankerplatte vor, wobei hier die Isolationsplatte eine thermische Barriere darstellt. Weiter stellt die Ankerhaube eine gewisse thermische Isolation dar, da der Anker nur durch Luftkonvektion unter der Haube mit der Umgebungstemperatur ins

Gleichgewicht gelangen kann. Damit ist davon auszugehen, dass der Ankerkopf im Sommer kühler und im Winter wärmer ist als die Umgebungsluft. Folglich wirkt der Anker im Winter als Heizelement und allenfalls kondensierte Luftfeuchtigkeit wird verdunsten. Im Sommer ist die Situation umgekehrt. Der Anker kühlt die warme und feuchte Luft ab und es kann lokal zur Kondensation kommen. Diese Erklärung ist in guter Übereinstimmung mit Beobachtungen an einer älteren Verankerung, welche bis in den Permafrost reicht. Die tiefe Temperatur der Litzen im Kopfbereich führt zur Kondensation von Feuchtigkeit, so dass die ungeschützten Ankerlitzen dort dauernd nass sind.

Mit dem geschilderten Modell lassen sich die beobachteten Effekte der saisonalen Schwankungen erklären. Zusätzlich treten aber auch kurzzeitigere Schwankungen auf. Diese sind in Bild 4.10 für den Sommer 2004 und in Bild 4.11 für den Winter 2004/2005 dargestellt. Im Sommer sind klar die tageszeitlichen Schwankungen der Temperatur zu erkennen. Generell ist eine Übereinstimmung von Temperatur und Widerstand zu finden. So ist jeweils um Mitternacht der Widerstandswert tief und am Mittag hoch. Es treten aber durchaus auch Abweichungen auf. So wird verschiedentlich am Mittag wieder ein Einbruch des Widerstands beobachtet. Die Verbindung von Temperaturverlauf und Widerstand lässt den Schluss zu, dass die Effekte primär auf Kondensation von Wasser zurückzuführen sein dürften. Die direkte Korrelation zwischen Lufttemperatur und Widerstand zeigt zudem, dass die Ursache für die Variation des Widerstandes im Bereich des Ankerkopfs liegen muss. Effekte im Verankerungsbereich könnten keine derart schnellen Variationen und keine Korrelation mit der Umgebungstemperatur ergeben.

Da die Luftfeuchtigkeit unter der Ankerhaube keinen Effekt auf den Ankerwiderstand hat, muss der widerstandsverringende Effekt unter dem Ankerkopf ablaufen. Aufgrund der Dokumentation des Ankereinbaus ist bekannt, dass die Anker im Bereich des Ankers 184 vor der inneren Ankerkopfinjektion mit Korrosionsschutzmasse stark beregnet wurden. Somit ist denkbar, dass Wasser in den Bereich hinter dem Ankerkopf gelangt ist.

Eine detaillierte Diskussion der Tagesschwankungen ist schwierig, da nicht bekannt ist, wo der Kondensationsprozess genau auftritt und welche Mengen an Wasser vorliegen. Gewisse Überlegungen sind aber dennoch möglich. So ist davon auszugehen, dass bei der Abkühlung der Luft die relative Luftfeuchtigkeit ansteigt. Im Falle der kühleren Ankeroberfläche wird es dort bevorzugt zur Kondensation kommen. Damit wird klar, dass das Absinken des Widerstands primär in der Nacht erfolgen muss, wie es auch tatsächlich beobachtet wird. Beim Aufwärmen der Luft wird es wieder zum Verdunsten und damit zum Widerstandsanstieg kommen. Somit lässt sich der Verlauf des Widerstands qualitativ erklären. Im Falle des Widerstandseinbruchs am Mittag kommt es möglicherweise zur Sättigung der Luft mit Feuchtigkeit, wodurch auf dem kälteren Anker erneut Kondensation einsetzt.

Im Gegensatz zum Sommer sind im Winter die charakteristischen Tagesgänge der Temperatur kaum zu erkennen. Entsprechend geringer ausgeprägt sind auch die Widerstandsschwankungen (Bild 4.11). Verschiedentlich wird mit sinkender Temperatur ein Anstieg des Widerstands beobachtet. Dieser Effekt könnte durch die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des Fetts verursacht sein. Es treten aber auch Abwei-

chungen von diesem Zusammenhang auf, welche durch überlagerte Kondensationsprozesse verursacht sein dürften.

Anhand dieser Überlegungen lassen sich die beobachteten Effekte qualitativ mit Kondensationsprozessen erklären. Die Verteilung der Feuchtigkeit, der Wärmefluss und die Luftkonvektion sind dabei entscheidend. Ohne deren detaillierte Kenntnis ist es nicht möglich, die beobachteten Effekte bis ins Detail zu erklären. Bei Kondensation muss aber nicht zwingend eine Verringerung des Widerstands auftreten. Die Kondensation muss eine niederohmige Verbindung zwischen dem Ankerkopf und der Ankerplatte oder der Bewehrung ergeben.

Mit Ausnahme von Anker 184 zeigen die Kontrollanker ein absolut synchrones Verhalten mit einem maximalen Widerstandswert zur Mittagszeit (Bild 4.12). Diese Schwankungen sind aber nur bei Temperaturen unterhalb von 12 °C zu beobachten, da in der übrigen Zeit die Widerstände oberhalb des Messbereichs lagen.

Die Messanker 161 und 176 zeigen einen stark saisonal geprägten Widerstandsverlauf (Bild 4.13). Allerdings sind die Schwankungen exakt entgegengesetzt zu jenen des Kontrollankers 184. Der Aufbau des Ankerkopfs ist komplett anders als jener des Kontrollankers. So ist die Isolationsplatte direkt mit der Nischenatmosphäre in Kontakt und nicht durch eine Haube geschützt. Der Verlauf der Widerstände ist qualitativ gut mit der Dampfdruckdifferenz in Einklang (Bild 4.9). So sinkt der Widerstand im Winter ab, wo die Dampfdruckdifferenz gering ist und bei grosser Dampfdruckdifferenz im Sommer steigt der Widerstand an. Aus dem Vergleich der Dampfdruckdifferenz in der Nische und dem Widerstand des Messankers 176 wird klar, dass vereinzelte Widerstandseffekte gut mit der Dampfdruckdifferenz korrelieren. Es können aber nicht alle Effekte darauf zurückgeführt werden.

Die Unterschiede zwischen dem Kontrollanker 184 und den Messankern 161 und 176 dürften primär durch den unterschiedlichen Aufbau des Ankerkopfs bestimmt sein. So liegt beim Anker 184 die Ankerbüchse auf einem Kraftverteiling und dieser liegt direkt auf der Isolationsplatte auf. Bei den Messankern ist jedoch die Kraftmessdose zwischengeschaltet und die Isolationsplatte ist direkt mit dem Nischenklima im Kontakt. Damit haben die Messanker eine bedeutend grössere Fläche an Metall für die Abstrahlung der Wärme des Ankers. Im Bereich der Isolationsplatte ist kaum mehr eine Beeinflussung der Temperatur durch den Erdboden zu erwarten. Damit wird die Kondensation im Bereich der Isolationsplatte bei den Messankern primär durch das Nischenklima beeinflusst, wie es auch tatsächlich beobachtet wird.

Die kurzzeitigen Schwankungen sind für den Sommer 2004 in Bild 4.14 dargestellt. Es wird eine gute Übereinstimmung im Verlauf des Widerstands der Messanker 161 und 176 gefunden. Der Widerstand ist um Mitternacht generell hoch und am Mittag tief. Somit ist auch im Tagesverlauf eine Gegenläufigkeit zu Kontrollanker 184 zu beobachten. Auch dieser Effekt dürfte auf die fehlende Kühlwirkung der Messanker zurückzuführen sein. Während dem Tag erwärmt sich die Luft in der Nische und nimmt Feuchtigkeit auf. Auf dem Stahl um die Isolationsplatte, welcher von der vorangegangenen Nacht kühl ist,

kommt es zur Kondensation. Im Verlaufe des Tages erwärmt sich der gesamte Nischenraum. Am Abend kühlt sich die Abdeckplatte der Nische ab und es kommt darauf zur Kondensation. Demgegenüber trocknet der während dem Tag erwärmte Bereich des Ankerkopfs aus.

Die Beurteilung des Tagesverlaufs hat ergeben, dass in vielen Fällen ein analoger Verlauf wie bei den Messankern 161 und 176 auftritt. Das heisst am Mittag sind die Widerstände tief und um Mitternacht hoch. Es treten aber auch Abweichungen von diesem Verhalten auf (Bild 4.4). Interessanterweise erfolgt diese Abweichung in den verschiedenen Nischen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Es treten folglich zwei Prozesse auf, welche sich nicht klar trennen lassen. Der Übergang zwischen den beiden Mechanismen ist besonders schön bei Messanker 104 im Bereich des 2. April zu erkennen (Bild 4.4), wo die Temperatur im Bereich von 8 °C liegt.

Der Wechsel zwischen gleichläufiger und gegenläufiger Korrelation des elektrischen Widerstands mit der Tagestemperatur dürfte in erster Linie durch die Wirkung des Ankers als Wärmebrücke zum Erdreich verursacht sein. Der Wärmefluss, die Wärmeabstrahlung am Anker sowie die Feuchteverteilung sind in diesem Fall entscheidend für den Verlauf des elektrischen Widerstands.

Unabhängig von der Ursache für den gleichsinnigen oder gegenläufigen Verlauf des Widerstands mit der Tagestemperatur kann festgehalten werden, dass die Prozesse für die beobachteten Widerstandsschwankungen auf den Kopfbereich begrenzt sind.

Um dies zu demonstrieren wurden die Messanker 104 und 120 im Februar 2005 beim Abbruch der Messanlage während 15 Minuten mit Warmluft von 50°C beheizt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Eine Temperaturänderung, welche nicht durch den Tagesgang verursacht wird, kann folglich bei den Messankern ebenfalls zu einem Anstieg des elektrischen Widerstands führen.

Anker	Widerstand vor Heizen	Widerstand nach 15 min. Heizen
104 M	186 kΩ	223 MΩ
120 M	1.59 MΩ	5.08 MΩ

**Tabelle 4.2:** Widerstandsveränderung von zwei Messankern durch 15 Minuten Heizen mit 50°C.

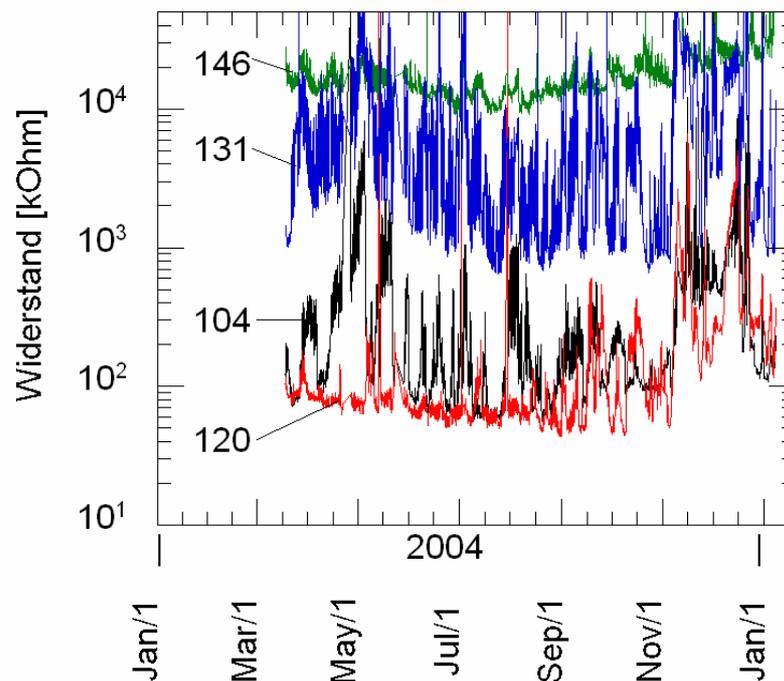
### Schlussfolgerung

Die Messanker der Hangsicherung in Attikon weisen erhebliche Schwankungen der Widerstände auf, welche sowohl einen Einfluss des Tagesgangs der Temperatur, als auch der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen erkennen lassen. Die schnelle Reaktion des Widerstands auf die Temperatur lässt den Schluss zu, dass es sich um einen Effekt im Bereich des Ankerkopfs handelt. Im Vordergrund stehen Kondensationsprozesse im Bereich der nicht abgedeckten Isolationsplatte, welche zu diesen Fluktuationen führen. Folglich dürften die Schwankungen in erster Linie mit der spezifischen Konstruktionsweise

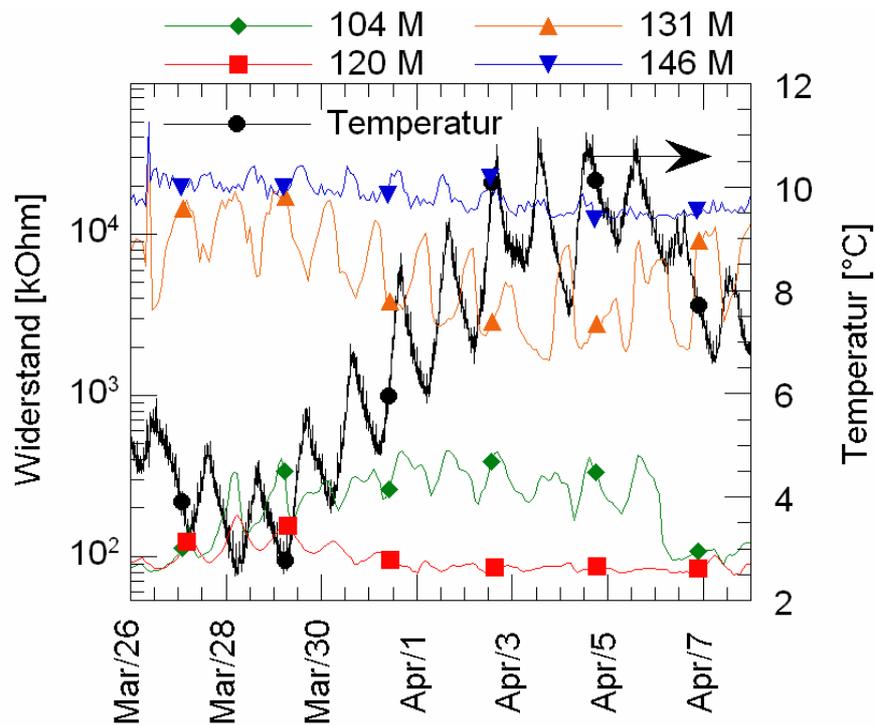
der Messanker verknüpft sein. Dass der Kondensationsfilm eine niederohmige Brücke zwischen Ankerplatte / Flanschblech und dem Ankerkopf bildet, ist darauf zurückzuführen, dass die Kraftmessdose nicht mit Fett beschichtet ist.

Bei den Kontrollankern ist die Isolationsplatte durch die Abdeckhaube vor unmittelbarer Feuchteinwirkung geschützt. Mit Ausnahme von Anker 184 werden durchwegs hohe Widerstände gefunden. Es treten auch in diesen Fällen Schwankungen mit der Tagestemperatur und den Jahreszeiten auf. Diese sind aber nur geringfügig. Weil die Kontrollankerköpfe durchgehend mit Fett beschichtet sind, kann ein Kondensationsfilm keine niederohmige Brücke bilden, das heisst auch bei Kondensation kommt es nicht zu einem Einbruch des elektrischen Widerstandes. Im Falle des Ankers 184 dürfte Feuchtigkeit hinter dem Ankerkopf für die Fluktuation des Widerstands verantwortlich sein.

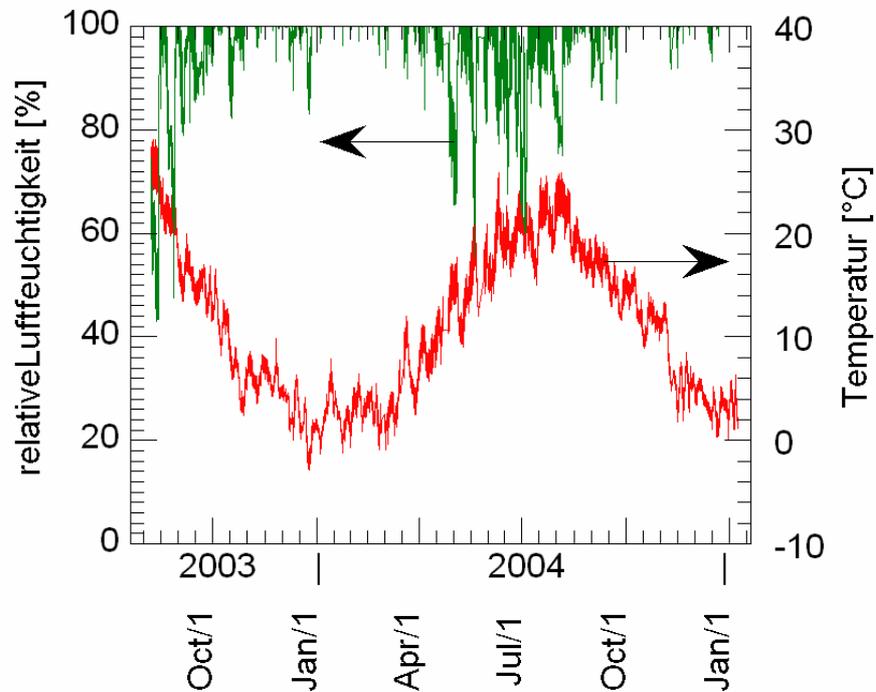
Die Untersuchung hat gezeigt, dass die zum Teil entgegengesetzte Temperaturabhängigkeit der Widerstände mit der Wirkung des Ankers als Wärmebrücke zum tieferen Erdreich zusammenhängt. Die Konstruktion des Kopfs, dessen Isolationswirkung, respektive sein Wärmeabstrahlvermögen entscheiden dabei über die primär auftretenden Effekte.



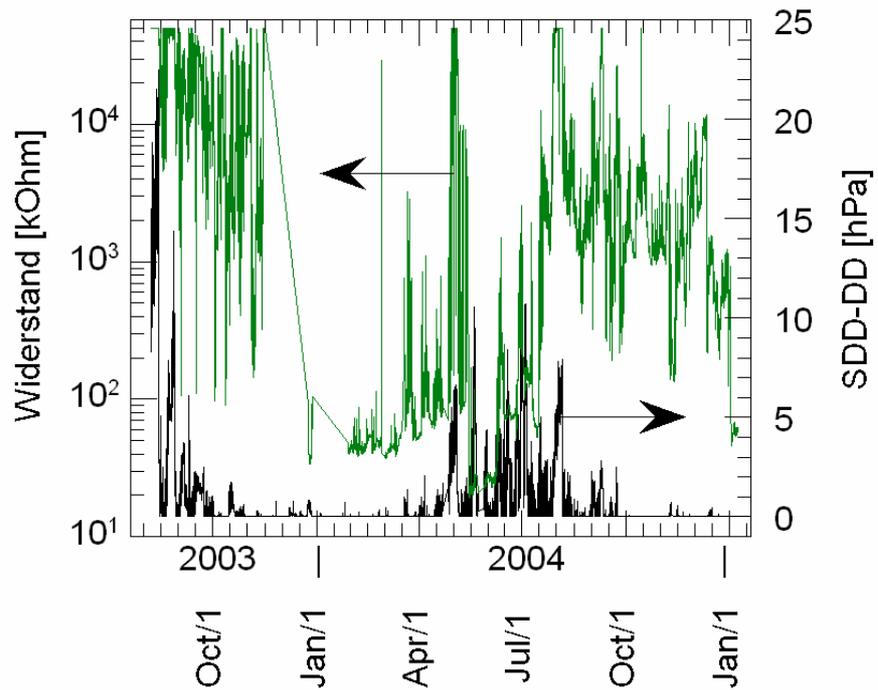
**Bild 4.3:** Widerstand von 4 Messankern in Attikon.



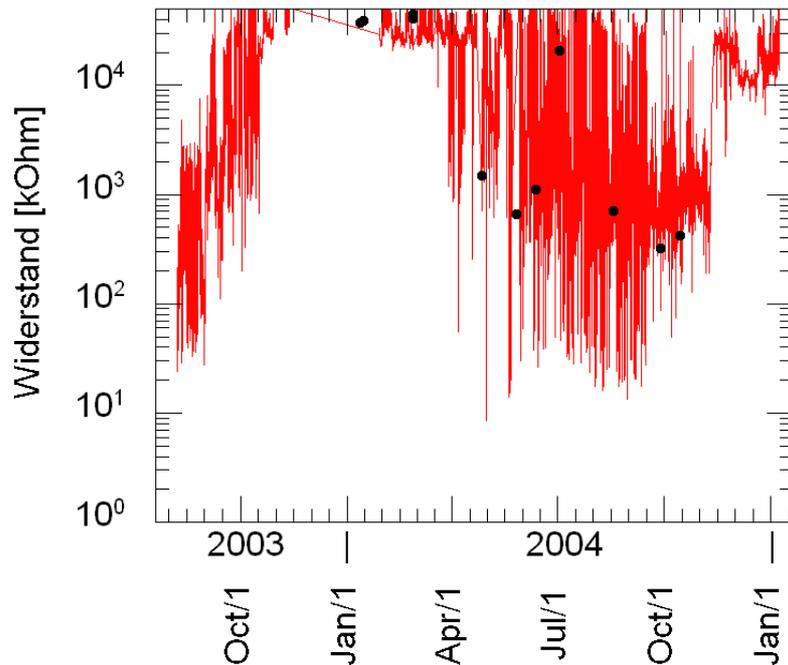
**Bild 4.4:** Verlauf der Widerstände von 4 Messankern im Vergleich zur Temperatur im Frühling 2004.



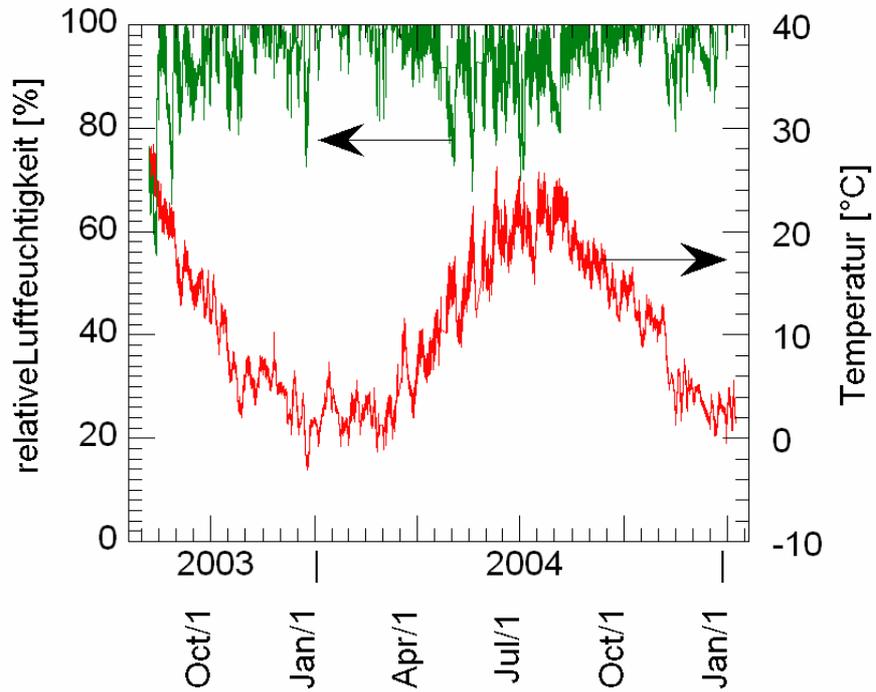
**Bild 4.5:** Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Ankernische des Messankers 176.



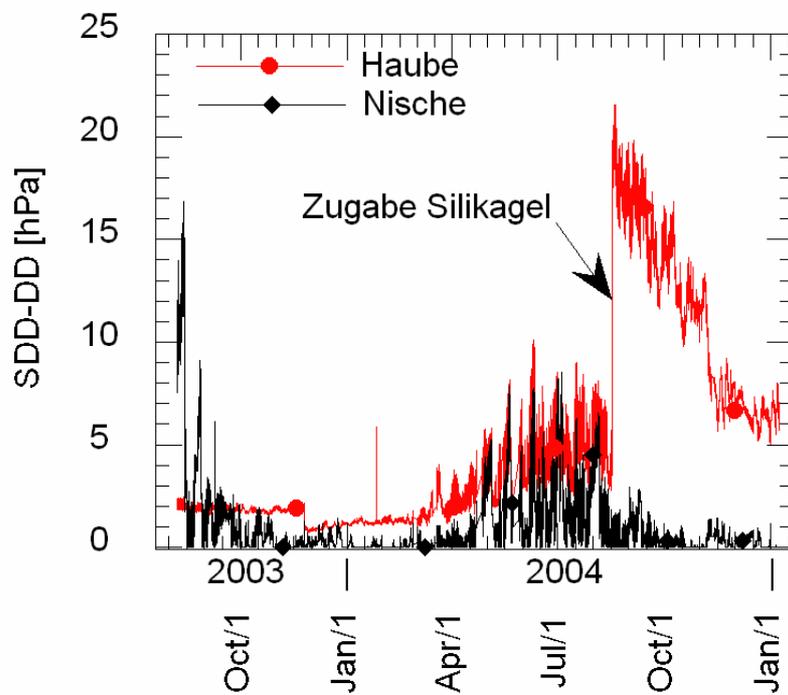
**Bild 4.6:** Dampfdruckdifferenz in der Nische des Messankers 176 und Widerstand.



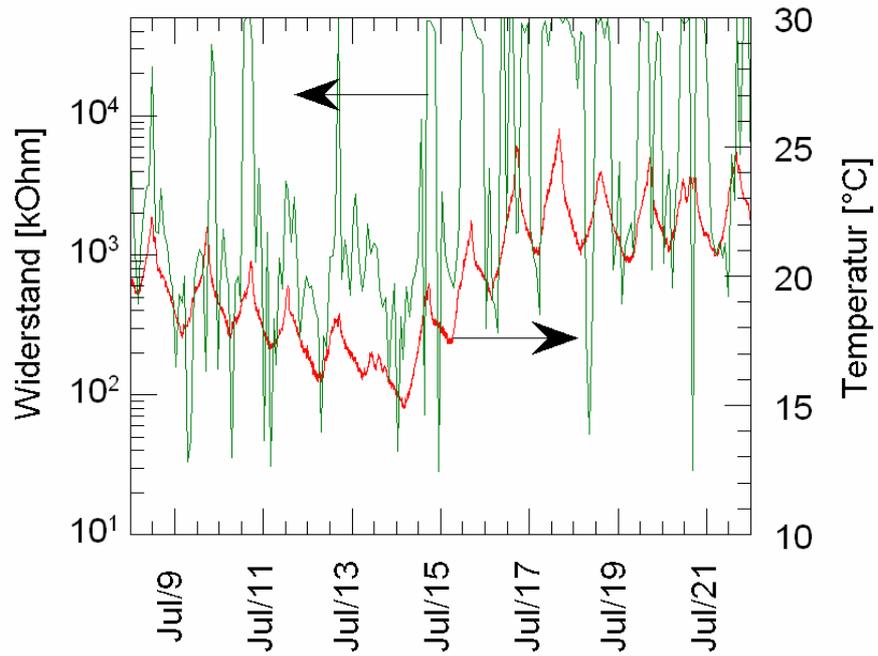
**Bild 4.7:** Elektrischer Widerstand des Kontrollankers 184. Die schwarzen Punkte sind Handmessungen, welche zur Kontrolle ausgeführt wurden.



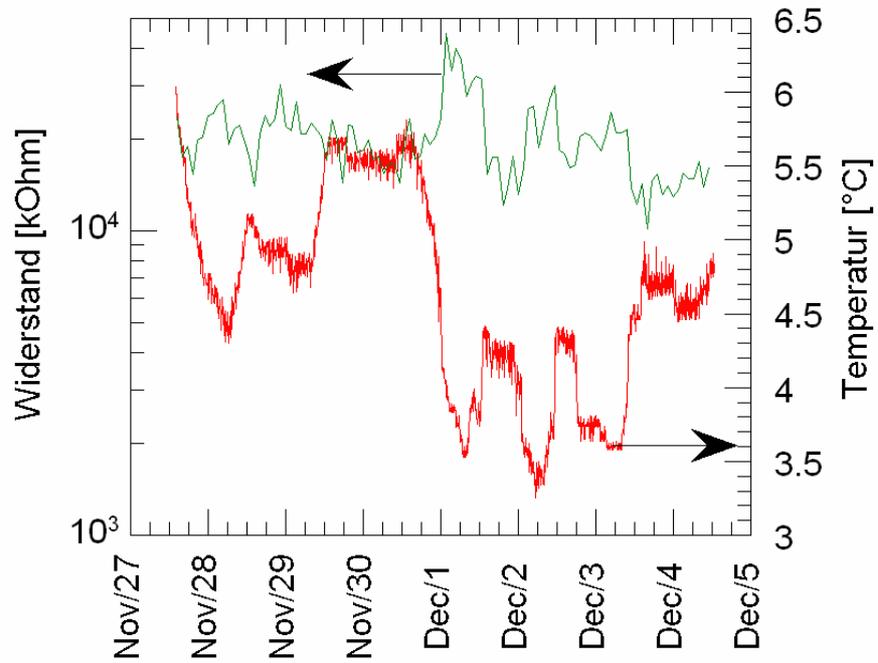
**Bild 4.8:** Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Nische des Kontrollankers 184.



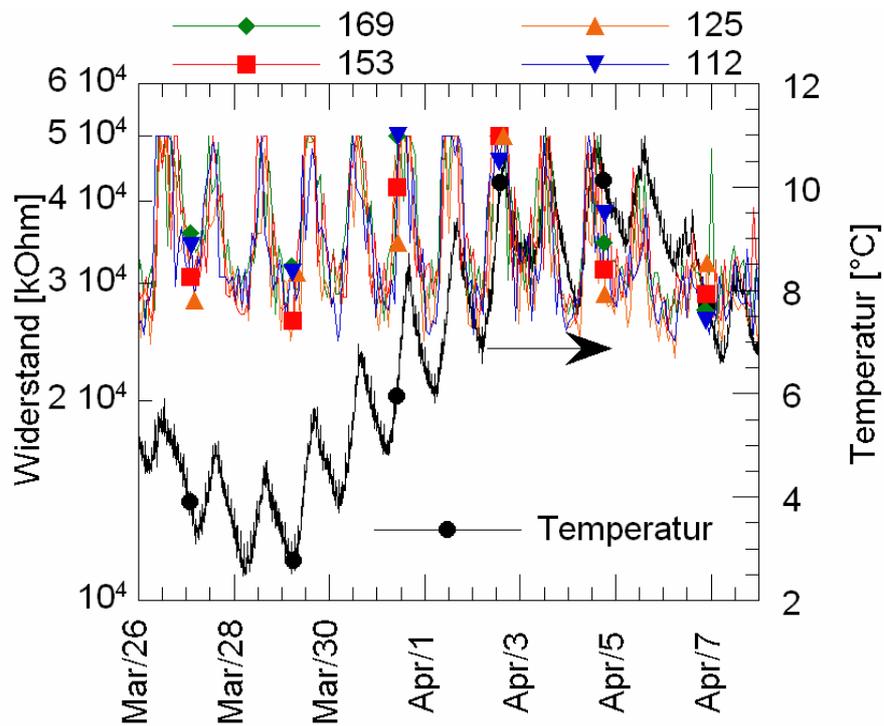
**Bild 4.9:** Dampfdruckdifferenz in der Nische und unter der Haube des Kontrollankers 184. Im Sommer 2004 wurde Silikagel unter der Haube eingebaut.



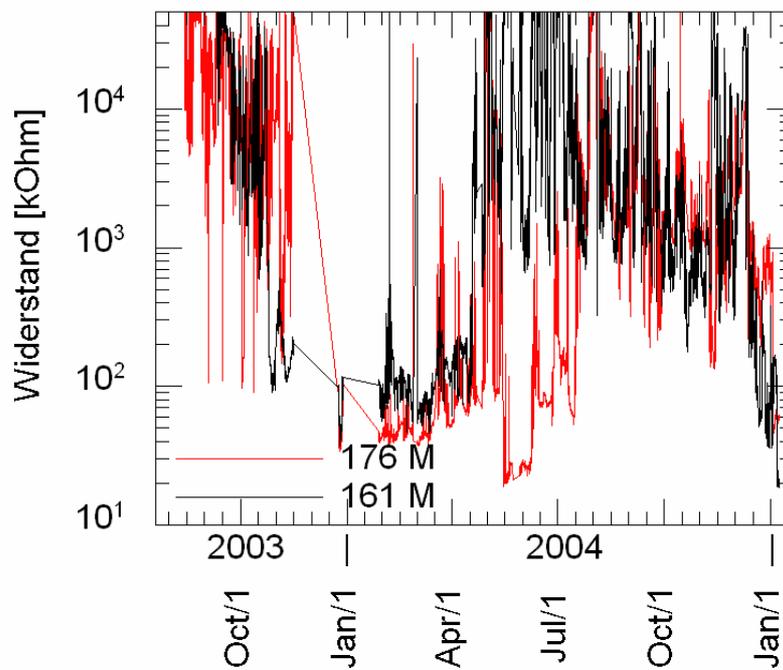
**Bild 4.10:** Temperatur und Widerstand von Kontrollanker 184 im Juli 2004.



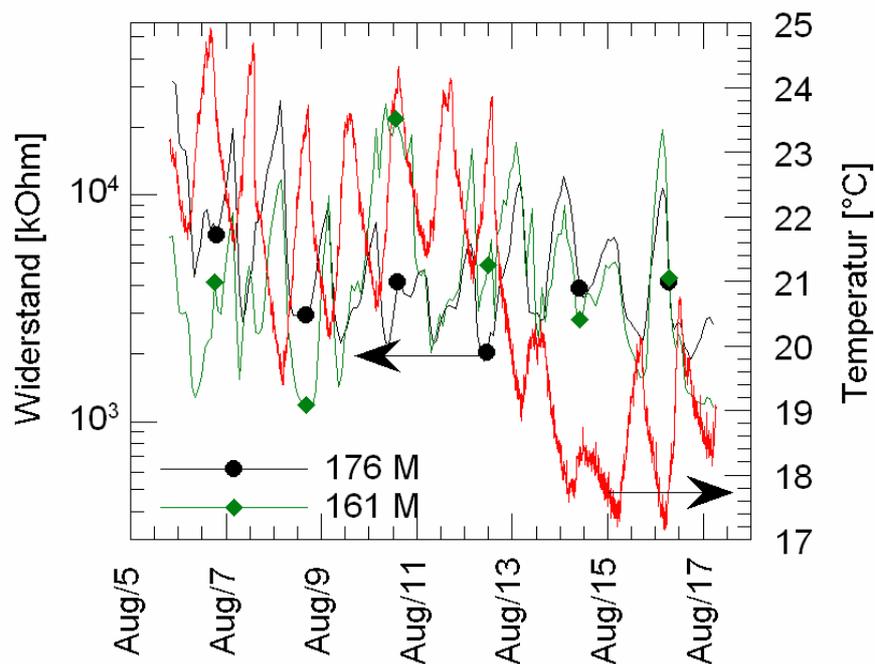
**Bild 4.11:** Temperatur und Widerstand von Kontrollanker 184 im Winter 2004.



**Bild 4.12:** Widerstandsverlauf im Vergleich zur Tagestemperatur der Kontrollanker in Attikon im Frühling 2004.



**Bild 4.13:** Elektrischer Widerstand der Messanker 176 und 161.



**Bild 4.14:** Temperatur und Widerstand der Messanker 176 und 161 im August 2004.

#### 4.3.2 Täntenholz

##### Generelle Beobachtungen

Bei der Stützwand Täntenholz sind nur die Messanker mit einem Messkabel ausgerüstet. Die kontinuierlichen Messungen erfassen somit ausschliesslich Messanker. Als Besonderheit sind hier die Schutzhauben, die den gesamten Ankerkopf inkl. Kraftmessdose umhüllen, vollständig mit Korrosionsschutzmasse verfüllt. Die Ergebnisse aller kontinuierlicher Widerstandsmessungen an der Verankerung Täntenholz sind in den Bildern 4.15 und 4.16 dargestellt. Im Vergleich zu den Messergebnissen an der Verankerung Attikon sind die Variationen im Widerstand deutlich geringer. Insbesondere treten keine Widerstandsänderungen von mehreren Dekaden innerhalb eines Tageszyklus auf. Die Tageschwankungen des Widerstands sind vernachlässigbar klein. Dies dürfte auf die vollständige Verfüllung der Schutzhaube mit Fett zurückzuführen sein. Dadurch wird eine thermische Isolation erreicht, welche die kurzfristigen Temperaturschwankungen weitgehend dämpft. Es sind aber durchaus jahreszeitlich bedingte Schwankungen von bis zu einer Dekade zu erkennen. So wird im Sommer ein Absinken des Widerstands beobachtet, während im Winter die Widerstandswerte generell höher liegen. Interessant ist zudem der meist synchrone Verlauf des Widerstands bei allen Ankern. Dieser Effekt ist im März 2005 besonders ausgeprägt, wo alle Anker einen markanten Widerstandsanstieg zeigten.

Der Vergleich der Klimadaten mit den Widerstandswerten zeigt wie in Attikon eine direkte Korrelation. Generell zeigen die Anker aber weniger ausgeprägte Widerstandsschwankungen. Aus dem Vergleich mit der Temperatur wird auch hier eine Korrelation zwischen Temperatur und Widerstand gefunden wie am Beispiel des Ankers 105 in Bild 4.17 ge-

zeigt ist. So wird generell mit dem Anstieg der Temperatur ein Absinken des Widerstands beobachtet. Die elektrische Leitfähigkeit von Elektrolyten erfolgt durch den Transport von Ionen. Da deren Beweglichkeit in hohem Masse von der Temperatur bestimmt wird, lässt sich der elektrische Widerstand als thermisch aktivierten Prozess über die Arrhenius Gleichung (4.3) beschreiben, worin  $\rho$  und  $\rho_0$  die spezifischen Widerstände des Elektrolyten bei der Temperatur  $T$  und bei der Referenztemperatur  $T_0$  und  $b$  der Temperaturkoeffizient sind.

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (4.3)$$

Die Darstellung der Messdaten entsprechend Gleichung 4.3 zeigt für die meisten Anker eine gute Korrelation (Bild 4.18). Insbesondere Anker 230 zeigt ein fast perfekt lineares Verhalten bei der Auftragung der logarithmierten Widerstandswerte gegen die reziproke Temperatur. Die übrigen Anker zeigen eine mehr oder weniger starke Abweichung von der Linearität sobald die Temperatur unter den Gefrierpunkt fällt. Es ist folglich davon auszugehen, dass im Falle des Ankers 230 die Temperatur nicht zu einem Gefrieren des Wassers geführt hat oder dass kein Wasser an der Leitfähigkeit beteiligt ist.

Nicht bei allen Ankern wird eine derart gute Übereinstimmung mit dem Arrheniusgesetz gefunden. Die ausgeprägtesten Abweichungen sind in Bild 4.19 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zum Teil eine Hysterese auftritt. Diese Abweichungen zeigen, dass zusätzliche Effekte beteiligt sein können. Aus Bild 4.15 geht hervor, dass der Anker 153 im Sommer 2004 und 2005 ein atypisches Verhalten zeigt. Der Vergleich mit dem Anker 239 zeigt, dass in den kalten Jahreszeiten ein synchroner Verlauf mit den Widerständen der übrigen Anker auftritt. Sobald die Temperatur aber oberhalb von ca. 12 °C ist, wird zum Teil ein gegenläufiger Verlauf beobachtet. Das heisst, mit sinkender Temperatur tritt ein Absinken des Widerstandes auf. Damit wird wie beim Anker 184 in Attikon ein Wechsel der Temperaturabhängigkeit beobachtet. Der Wechsel vom Winter zum Sommer dürfte mit der Wirkung des Ankers als Wärmebrücke zum Erdboden zusammenhängen. Demgegenüber könnte der gleichsinnige Verlauf von Temperatur und Widerstand bei kurzzeitigen Temperaturänderungen mit dem Trocknen des kondensierten Wassers bei erhöhter Temperatur erklärt werden.

### Spezielle Ergebnisse

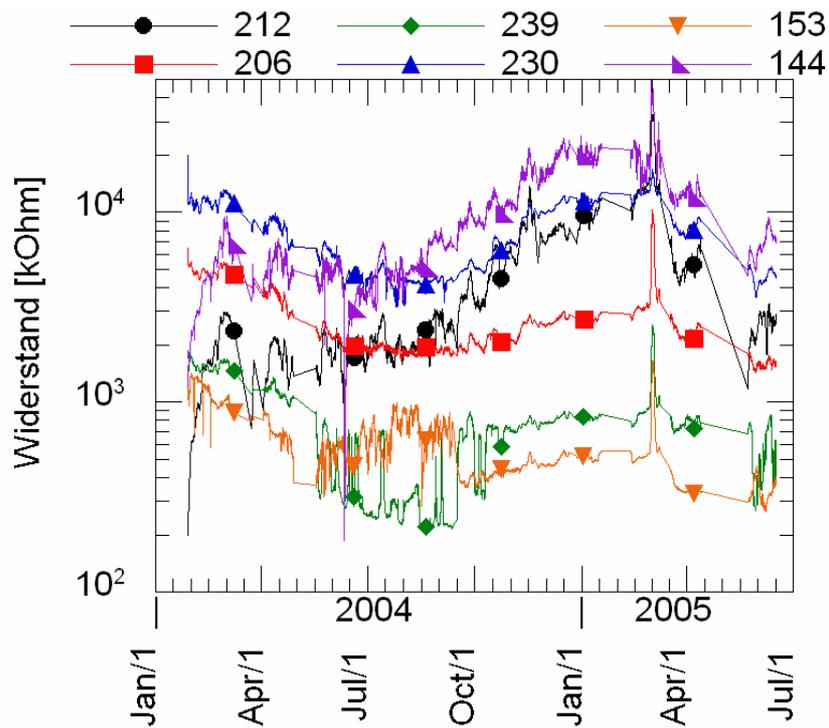
Eine markante Abweichung vom üblichen Widerstandsverlauf zeigt der Anker 248 (Bild 4.16). Der Widerstand variiert über den gesamten Messbereich der Messeinrichtung. Generell sind im Winter höhere Widerstandswerte zu beobachten, während sie im Sommer nur noch einige Ohm betragen.

Der Verlauf von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Nische des Ankers 248 während der Messdauer ist in Bild 4.20 dargestellt. Die Temperatur zeigt den üblichen Verlauf. Die Luftfeuchtigkeit ist aber im Vergleich zu jener in Attikon bedeutend höher. Dies könnte auf einen besser schliessenden Deckel oder einen feuchteren Untergrund zurückzuführen sein.

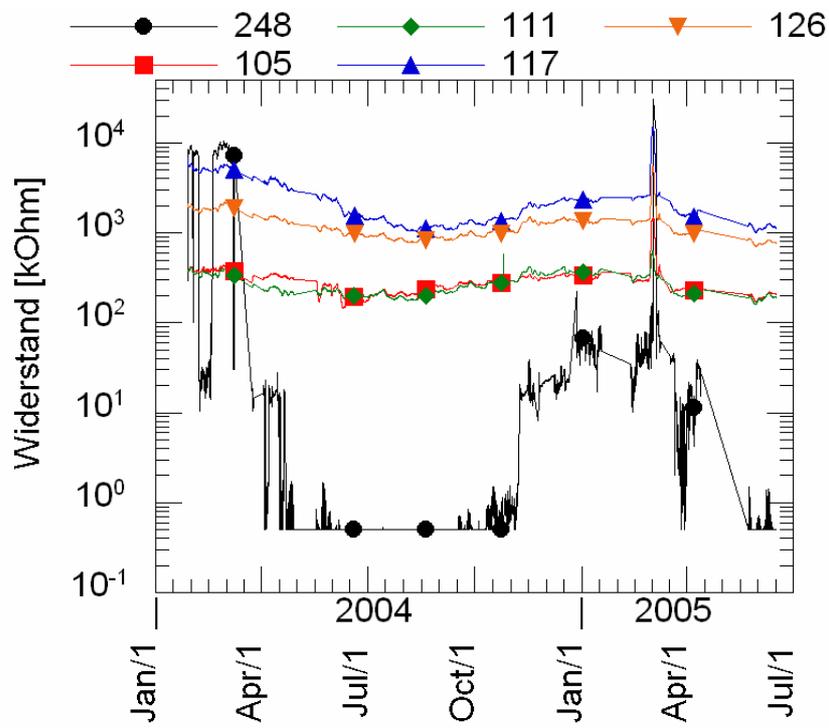
Die zeitweise geringen Widerstandswerte des Ankers 248 wurden bereits bei den periodischen Handmessungen festgestellt (siehe Anhang A2). Nach dem Abheben des Ankerkopfs bei einer Hauptinspektion wurde kondensiertes Wasser zwischen Fettverfüllung und Ankerplatte gefunden. Durch Trocknen konnten wieder einwandfreie Widerstände erreicht werden. Der beobachtete Einbruch des elektrischen Widerstands dürfte folglich direkt mit Kondensationsprozessen verknüpft sein. Die tiefen Werte des Widerstands im Sommer könnten analog zum Anker 184 in Attikon mit der Kühlwirkung des Ankers und Kondensation von Wasser im Sommer erklärt werden. Da die Schutzhaube mit Fett verfüllt und der Ankerkopf somit thermisch gut isoliert ist, kann die Temperaturdifferenz sogar noch grösser als in Attikon sein. Damit liesse sich der ausgeprägtere Effekt erklären. Der Vergleich von Temperatur und Widerstand in Bild 4.21 zeigt tatsächlich einen auffallenden Umschlag im Widerstand, sobald die Temperatur in den Bereich von 8 bis 12 °C gelangt. Dies ist besonders ausgeprägt im Herbst 2004, wo der abrupte Temperatursturz sofort zu einem Anstieg des Widerstands führt. Im Frühling 2004 ist zudem zu erkennen, dass eine kurzfristige Abkühlung unter 8 °C Anfang April zu einem vorübergehenden Widerstandsanstieg führt. Interessant ist der ausgeprägte Anstieg des Widerstands im März 2005, welcher gut mit dem Abfallen der Temperatur unter den Gefrierpunkt übereinstimmt. Dies ist ein Hinweis auf die Bedeutung von Wasser im Ankerkopf auf die gemessenen Widerstandswerte. Durch das Gefrieren des kondensierten Wassers wird dessen Beitrag zur Leitfähigkeit weitgehend unterbunden.

### **Schlussfolgerung**

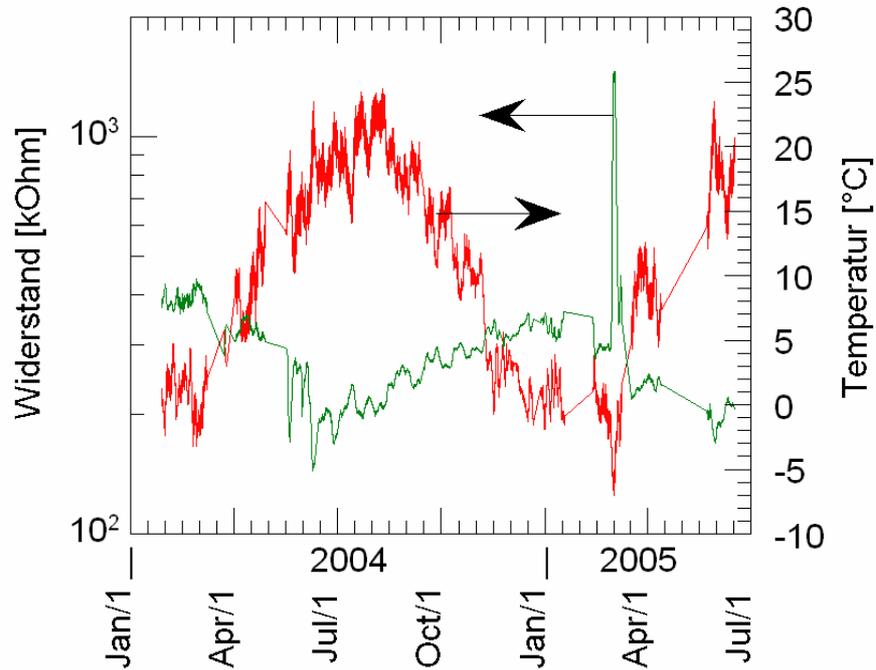
Aufgrund der Ergebnisse dürfte die primäre Ursache für die jahreszeitlichen Widerstandsschwankungen in der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit des Elektrolyten begründet sein. Ob es sich dabei um die Leitfähigkeit der Fettverfüllung im Ankerkopf oder um Feuchtfilme auf der Ankerkopfoberfläche handelt, kann nicht abschliessend beurteilt werden. Wasser im Bereich des Ankerkopfs spielt für den elektrischen Widerstand aber eine zentrale Rolle, wie aus dem synchronen Widerstandsanstieg beim Absinken der Temperatur unter den Gefrierpunkt hervorgeht. Wie bereits in Attikon können die Widerstandsfluktuationen mit Effekten im Kopfbereich der Anker erklärt werden.



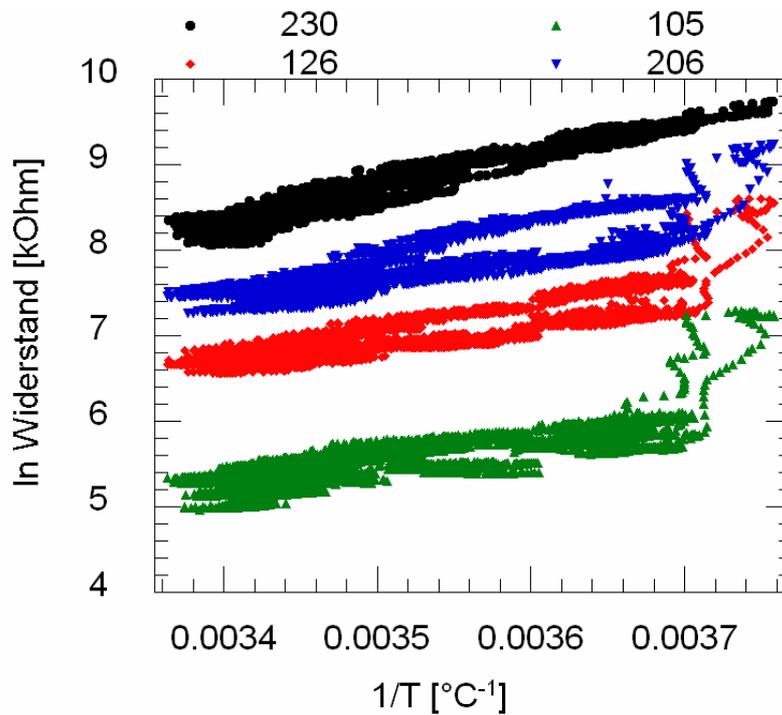
**Bild 4.15:** Widerstandsverlauf von 6 Ankeren an der Stützmauer Täntenholz.



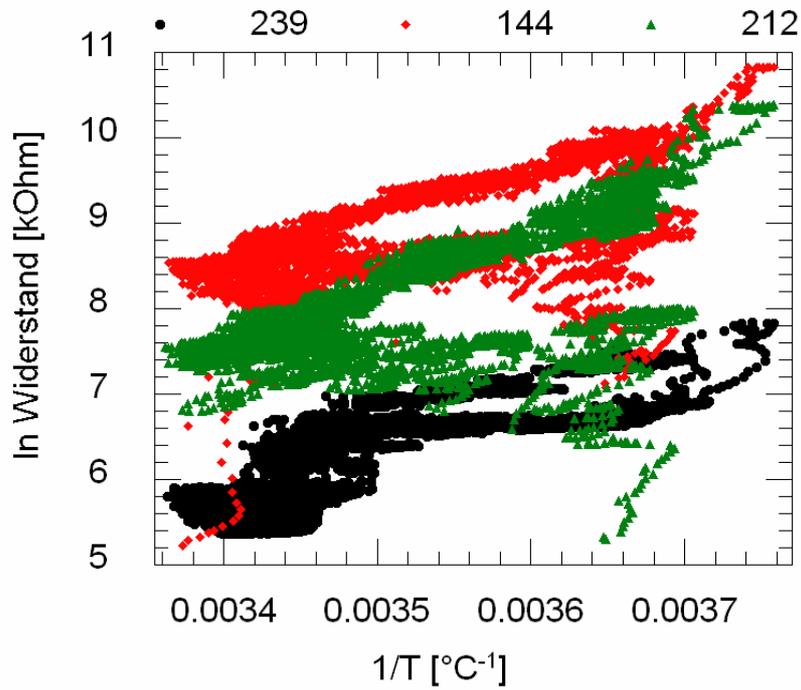
**Bild 4.16:** Widerstandsverlauf von 5 Ankeren an der Stützmauer Täntenholz.



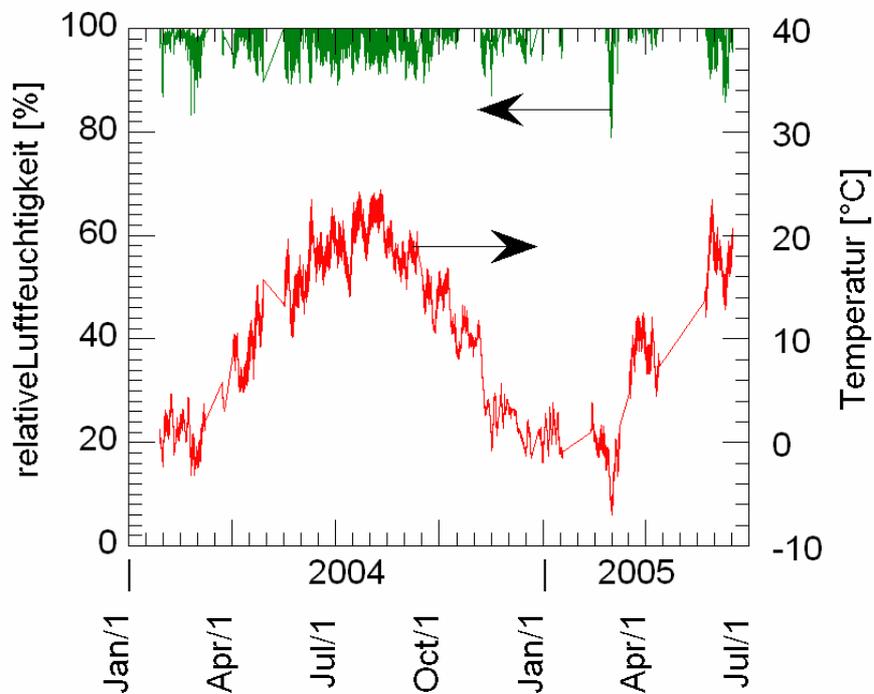
**Bild 4.17:** Widerstand des Ankers 105 und Verlauf der Temperatur in der Nische des Ankers 248.



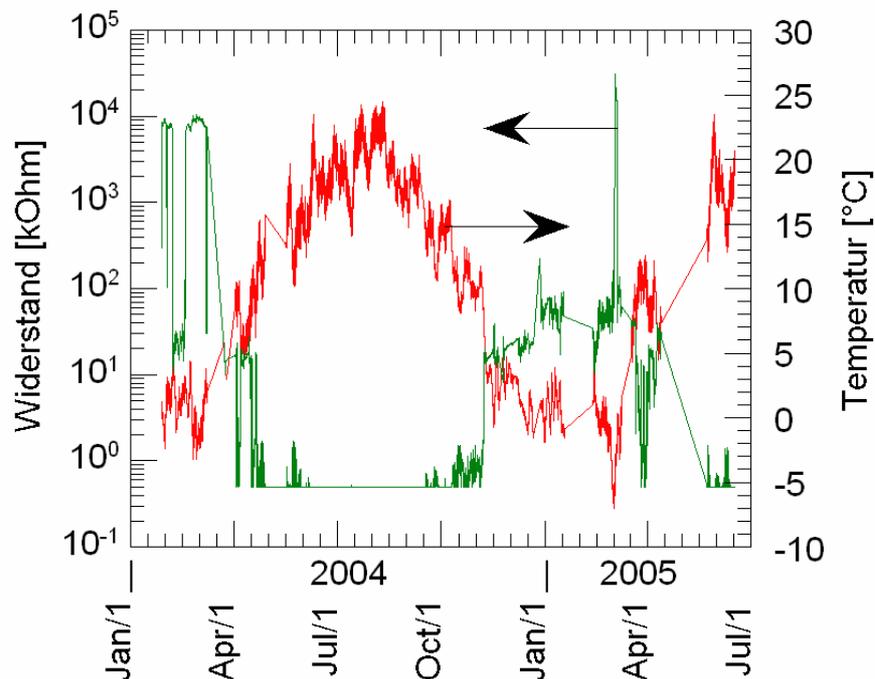
**Bild 4.18:** Darstellung der Widerstände der Anker 105, 126, 206 und 230 als Funktion der Temperatur.



**Bild 4.19:** Darstellung der Widerstände der Anker 144, 212 und 239 als Funktion der Temperatur.



**Bild 4.20:** Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in der Nische des Ankers 248.



**Bild 4.21:** Widerstand des Ankers 248 und Verlauf der Temperatur in der Nische.

#### 4.3.3 Waldheim

An der Pfahlwand Waldheim bot sich die Möglichkeit, die Auswirkung verschiedener Parameter zu verfolgen. So hat die Abschirmung der Pfahlwand gegenüber der direkten Bewitterung einen Effekt auf die Temperaturschwankungen, welchen die Ankerköpfe ausgesetzt sind. Diese Dämpfung der tageszeitlichen Schwankungen sollte sich auf den Widerstandsverlauf auswirken. Zusätzlich wurden hier vier einbetonierte Bauwerksankerköpfe mit Messkabeln ausgerüstet, um einen Vergleich zwischen zugänglichen und einbetonierten Ankerköpfen zu erhalten. In Tabelle 4.3 sind die verschiedenen untersuchten Anker aufgeführt. Die Pfahlwand ist aufgeteilt in einen südlichen höheren Abschnitt und einen nördlichen niedrigeren Abschnitt (siehe auch Anhang C8).

Anker	Ankertyp	Position
10.6 M	Messanker	Südseite
11.7 M	Messanker	Südseite
11.9	Bauwerksanker einbetoniert	Südseite
11.10	Bauwerksanker einbetoniert	Südseite
12.6 M	Messanker	Nordseite
12.13 M	Messanker	Nordseite
12.15	Bauwerksanker einbetoniert	Nordseite
12.17	Bauwerksanker einbetoniert	Nordseite

**Tabelle 4.3:** Einbauart und Position der untersuchten Anker

### **Generelle Ergebnisse**

Die Klimadaten, welche bei der Pfahlwand Waldheim aufgezeichnet wurden, sind in Bild 4.22 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn der Messung noch erhebliche Schwankungen der Temperatur aufgetreten sind, welche bis Ende September 2005 weitgehend verschwunden sind. Dieser Effekt ist auf den Abschluss der Bauarbeiten und die Unterbindung des direkten Frischluftzutritts durch die Garage zurückzuführen. Es fällt weiter auf, dass die Temperatur im Winter nicht in den Bereich des Nullpunkts absinkt. Die Installation eines zweiten Temperaturfühlers im nördlichen Teil der Stützmauer zeigt, dass dort die Temperatur generell etwas tiefer liegt. Dieser Effekt ist auf die unterschiedliche Belüftung der Wandabschnitte zurückzuführen. In Bild 4.23 ist die Dampfdruckdifferenz berechnet aus den Daten in Bild 4.22 dargestellt. Zu keinem Zeitpunkt war im Bereich der Pfahlwand mit Kondensation zu rechnen.

In Bild 4.24 sind die Widerstandswerte der Anker 11.9, 12.13M und 12.15 dargestellt. Die Widerstandswerte zeigen keine nennenswerten Schwankungen. Beim einbetonierten Anker 11.9 liegt der Widerstand oberhalb des Messbereichs der Anlage. Die Handmessungen haben ergeben, dass der Wert stets im Bereich von 1.5 bis 3 GOhm liegt. Der ebenfalls einbetonierte Anker 12.15 zeigt auch sehr konstante Widerstandswerte auf hohem Niveau, während beim Messanker 12.13 der Widerstand direkt am Grenzwert liegt.

### **Spezielle Ergebnisse**

Nicht alle Anker zeigen Widerstandsverläufe, welche unabhängig sind von den klimatischen Einflussfaktoren, wie aus den Ergebnissen in Bild 4.25 hervorgeht. Im Fall des einbetonierten Ankers 11.10 werden zwei auffällige Sprünge im Widerstand beobachtet. Aus dem Vergleich mit den Temperaturdaten geht hervor, dass der Abfall des Widerstands auftritt, sobald die Lufttemperatur über 13 °C steigt. Der erneute Anstieg erfolgt, sobald die Temperatur wieder unter diese 13°C absinkt. Aus den Handmessungen geht hervor, dass der Widerstand in der kalten Jahreszeit jeweils im Bereich von ca. 60 MOhm liegt. Der Widerstand verändert sich somit sprunghaft um einen Faktor 20. Der Effekt dürfte wie bereits bei einzelnen Ankern in Tändenholz und in Attikon auf die Kühlwirkung des Ankers während des Sommers zurückzuführen sein, was zu Kondensationsprozessen führt. Der Umstand, dass der Effekt auch bei einem einbetonierten Anker auftreten kann, ist ebenfalls in Übereinstimmung mit den Resultaten an den beiden anderen Stützmauern. So war beim Tändenholz der Ankerkopf mit Fett verfüllt und in Attikon wurde beim Anker 184 gefunden, dass die Kondensation hinter der Ankerplatte abläuft. Es ist folglich nicht erforderlich, dass der Anker direkt der Umgebungsluft ausgesetzt ist. Vielmehr ist eine Temperaturvariation ausreichend, um vorhandene Feuchtigkeit zur Kondensation zu bringen und damit den Widerstandswert abzusenken.

Eine weitere Beeinflussung des Widerstandswerts durch Temperaturschwankungen wurde beim Messanker 12.6 beobachtet (Bild 4.25). In diesem Fall treten keine Beeinflussungen durch jahreszeitliche Schwankungen auf. Insgesamt zeigt der Anker ein vergleichbares Verhalten wie jene in Bild 4.24. In einzelnen Fällen tritt aber eine Verringerung des Widerstandswertes um einen Faktor von bis zu  $10^4$  auf. Der Einbruch im Widerstand tritt auf, sobald die Temperatur um mehr als 3°C ansteigt. Der Widerstand steigt wieder an, sobald sich die Temperatur wieder absenkt. Die Daten vom September 2005 bei der letz-

ten Widerstandseinbusse deuten aber darauf hin, dass der Widerstand auch dann wieder ansteigt, wenn die Temperatur konstant bleibt. Die wenigen verfügbaren Daten lassen auch den Schluss zu, dass der Widerstandseinbruch besonders ausgeprägt ist, wenn die Umgebungstemperatur hoch ist. Interessanterweise ist das Verhalten von Messanker 12.6 sehr ähnlich jenem der Messanker 161 und 176 in Attikon (Bild 4.14). Auch dort wurde mit steigender Temperatur während dem Tageszyklus bei Temperaturänderungen von typischerweise mehr als 3 °C ein Absinken des Widerstandes beobachtet und auch dort war der Effekt besonders während dem Sommer ausgeprägt. Da bei der Pfahlwand Waldheim keine eigentlichen kurzzeitigen Temperaturschwankungen auftreten, beschränken sich diese Effekte auf die wenigen relativ schnellen Temperaturwechsel. In Anlehnung an die Erklärung für die Effekte in Attikon lässt sich der Prozess auch in Waldheim erklären: Während dem Temperaturanstieg der Umgebungsluft erwärmt sich die Luft unter der Ankerhaube und nimmt Feuchtigkeit auf. Auf dem Stahl um die Isolationsplatte, welcher von der vorangegangenen kälteren Periode noch kühl ist, kommt es zur Kondensation und damit zum Absinken des Widerstandes. Im Verlaufe der Zeit erwärmen sich Ankerplatte und Ankerkopf und nehmen die Lufttemperatur an. Dabei kann die kondensierte Feuchtigkeit wieder verdunsten und der Widerstand steigt wieder an. Alternativ kann auch die Umgebungsluft wieder abkühlen, worauf die Kondensation auf der nun kälteren Ankerhaube abläuft und der erwärmte Bereich des Ankerkopfs wieder austrocknet.

Der in Attikon beobachtete Effekt tritt folglich nahezu identisch bei vollkommen anderer klimatischer Einwirkung auf. In beiden Fällen handelt es sich um einen Messanker mit vergleichsweise grosser Oberfläche für den Wärmetransfer. Durch die Konvektion der Luft in Kombination mit der grossen Oberfläche fehlt dem Anker im Bereich der Isolationsplatte die Kühlwirkung im Sommer. Dies führt zu einem vergleichsweise schnellen Austrocknen der kondensierten Feuchtigkeit und damit zu einem schnellen Anstieg des Widerstands.

Im Gegensatz dazu bleiben beim einbetonierten Anker 11.10 während dem ganzen Sommer die kondensierenden Verhältnisse aufrechterhalten, da der Nischenbeton ein schnelles Erwärmen verhindert. Die vollständige Verfüllung der Ankerhaube mit Fett verstärkt die thermische Isolation noch zusätzlich, was eine noch ausgeprägtere Kondensation zur Folge hat. Daher bleibt der tiefe Widerstand über den ganzen Sommer erhalten. Dieser Effekt ist in Übereinstimmung mit dem Verhalten der Anker 248 in Tantenholz und 184 in Attikon.

Während der Widerstandsverlauf der Anker in Bild 4.25 in Einklang ist mit den Beobachtungen und Schlussfolgerungen der übrigen untersuchten Verankerungen, traten an der Pfahlwand Waldheim noch weitere Effekte auf (Bild 4.26). Besonders auffällig ist das Verhalten von Messanker 11.7. Es treten sehr ausgeprägte Sprünge im Widerstand auf, welche nicht in Übereinstimmung mit den klimatischen Grössen sind. Dieser Effekt wurde zunächst mit einem Kontakt der Ankerhaube mit den Litzen erklärt. Das Abheben der Ankerhaube sowohl bei 11.7 wie auch bei 10.6 hat aber zu keiner Veränderung des Widerstands geführt. Somit wurde von einem Versagen der Ankerisolation ausgegangen. Erst der Anstieg des Widerstands im Februar 2006 hat einen Hinweis für die mögliche Ursache gegeben. So fällt auf, dass die Widerstandswerte und ihr Verlauf bei den Messankern 11.7 und 10.6 nahezu identisch sind. Dies kann nicht mit einem Versagen der Isolation

der beiden Anker erklärt werden. Die Untersuchungen bei Abbruch der Messungen haben gezeigt, dass die Stecker der Kraftmesskabel, die ja elektrisch leitend mit der Kraftmessdose und den Ankerlitzen verbunden sind, ungeschützt im Messkasten aus Stahlblech lagen. Beide Stecker machten folglich über das Stahlblech und die Verschraubungen des Messkastens Kontakt mit der Stützmauer. Bei diesen Messungen wurde also primär der Ausbreitwiderstand der Verschraubungen des Messkastens geprüft! Die abrupten Sprünge sind auf Handmessungen im Kasten zurückzuführen, wo durch die Manipulationen der Kontakt zufälligerweise abgehoben oder wiederhergestellt wurde. Beim Abbruch der Messung wurde eine Messung bei getrenntem Kontakt durchgeführt. Diese zeigt den tatsächlichen Widerstand der Anker. Im Falle des Ankers 11.7 liegt der Widerstandswert dabei wieder auf dem Niveau von Mai 2005, was die weitgehende Konstanz der Widerstandswerte zeigt.

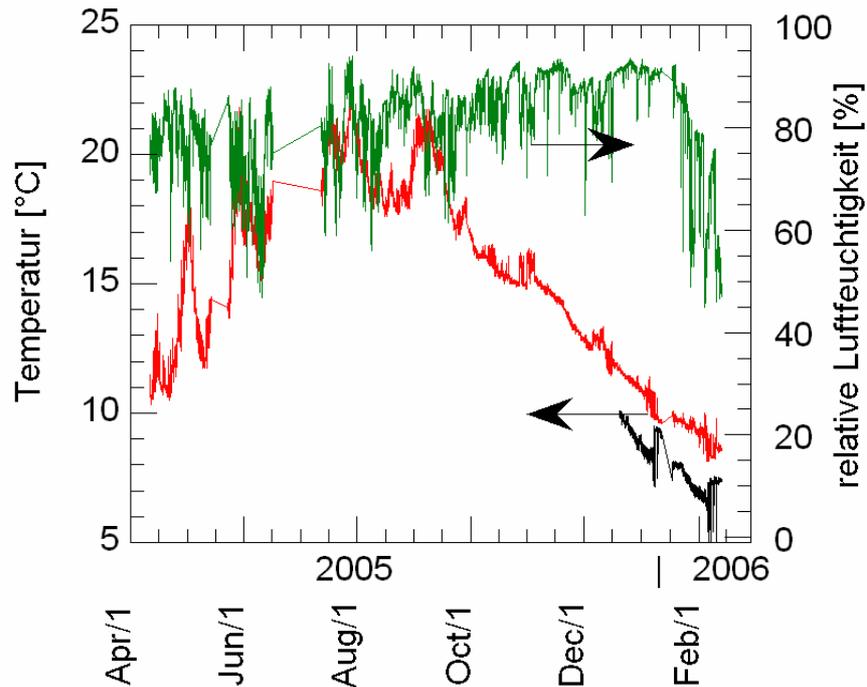
Beim einbetonierten Anker 12.17 wird im Verlaufe von Juni 2005 ein Absinken des Widerstands beobachtet (Bild 4.26). In diesem Zeitraum treten keine auffälligen klimatischen Effekte auf. Allerdings liegen vom Juni 2005 keine Temperaturmessungen im nördlichen Abschnitt der Pfahlwand vor. Es ist davon auszugehen, dass sich die Temperatur in diesem Teil der Pfahlwand tatsächlich von jener mit dem Temperaturfühler unterscheidet. Ein komplett unterschiedlicher Verlauf ist aber aufgrund der offenen Verbindung der beiden Abschnitte wenig wahrscheinlich.

Im Verlauf des Sommers sinkt der Widerstand weiter ab. Die vereinzelt Fluktuationen zeigen wiederum teilweise eine Korrelation mit der Temperatur. Anfang Januar 2006 wird dann ein erneuter Anstieg des Widerstands beobachtet, welcher aber bereits im Februar wieder abflacht. Im weiteren Verlauf sinkt der Widerstand gar wieder ab. Dies wurde auch durch spätere Handmessungen bestätigt. Eine klare Zuordnung des Ankers zu einem der diskutierten Effekte ist in diesem Fall nicht möglich. Es deutet Verschiedenes darauf hin, dass der einbetonierte Anker analog zum einbetonierten Anker 11.10 (Bild 4.25) beim Ansteigen der Temperatur ein Absinken des Widerstands zeigt. Im Winter führt das Abkühlen zu einem erneuten Anstieg des Widerstands. Zusätzlich zu diesem bekannten Prozess dürfte die Widerstandsentwicklung von einem kontinuierlichen Absinken des Widerstands begleitet sein. Es ist also davon auszugehen, dass die elektrische Isolation irgendwo entlang des Ankers zerstört oder unterwandert wird.

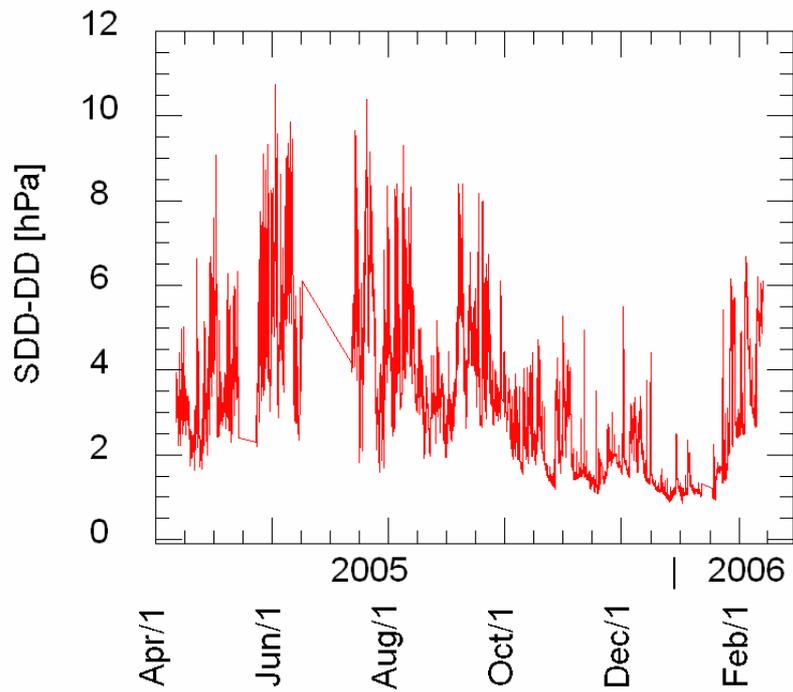
### **Schlussfolgerung**

Die Verhältnisse bei der Pfahlwand Waldheim ermöglichten aufgrund ihrer teilweisen Abschirmung vom Aussenklima die kurzzeitigen Tagesschwankungen zu dämpfen. Dadurch war es möglich, die saisonalen Effekte von kurzzeitigeren Prozessen zu trennen. Die Bedeutung des Ankers als Wärmebrücke zu den tieferen Zonen des Erdreichs wurde bestätigt. Ebenso konnte gezeigt werden, dass der geometrische Aufbau des Ankerkopfs, das heisst die sehr grosse Abstrahlfläche der Kraftmessdosen ebenfalls einen Einfluss auf den Widerstandsverlauf haben. Interessanterweise sind auch ohne kondensierende Bedingungen bei einem Messanker (mit Schutzhaube) kurzzeitige Einbrüche im elektrischen Widerstand festgestellt worden.

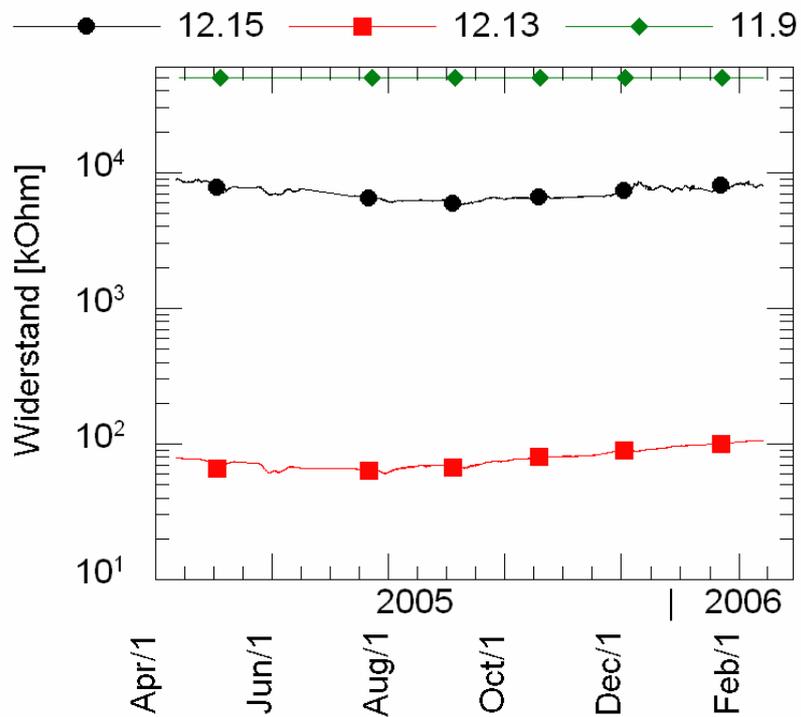
Weiter konnte nachgewiesen werden, dass auch das Einbetonieren der Ankerköpfe das Auftreten von saisonalen Schwankungen des elektrischen Widerstands nicht zu verhindern vermag. Trotz fehlender Bewitterung und vollständiger Fettverfüllung des Ankerkopfs vermochte allein die saisonale Temperaturschwankung Veränderungen im elektrischen Widerstand zu bewirken. Kurzzeitige Temperaturschwankungen haben aber in diesem Fall keine Auswirkung auf den elektrischen Widerstand.



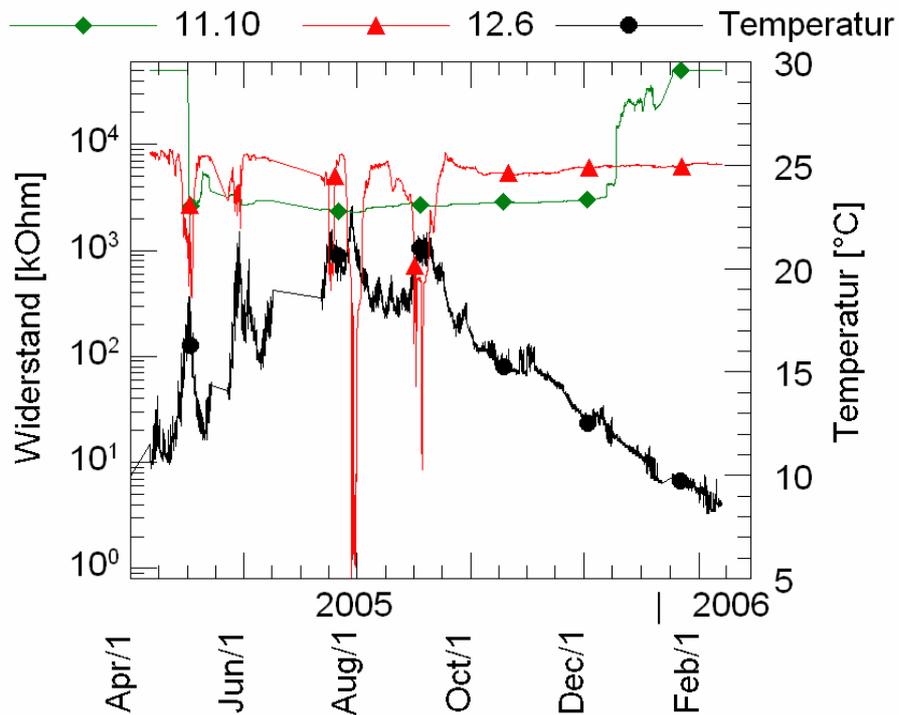
**Bild 4.22:** Relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur im südlichen Teil der Pfahlwand Waldheim. Im Dezember wurde ein weiterer Temperaturfühler im nördlichen Teil der Pfahlwand installiert.



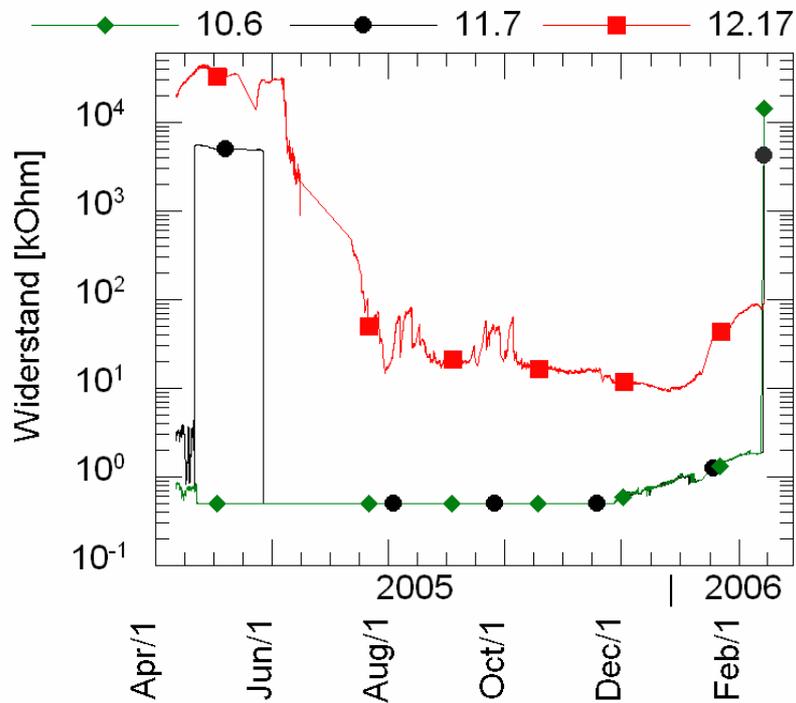
**Bild 4.23:** Dampfdruckdifferenz berechnet aus den Daten in Bild 4.22.



**Bild 4.24:** Widerstand der Anker 12.15, 12.13M und 11.9.



**Bild 4.25:** Verlauf des Widerstands der Anker 11.10 und 12.6M sowie der Temperatur.



**Bild 4.26:** Widerstandsverlauf der Anker 10.6M, 11.7M und 12.17.

#### 4.4 Gewonnene Erkenntnisse

Aufgrund der durchgeführten kontinuierlichen Messungen konnten verschiedene Einflussgrößen auf den elektrischen Widerstand der Anker identifiziert werden. Mehrheitlich sind die Widerstandswerte der Anker auf hohem Niveau und weitgehend stabil. Es treten aber verschiedentlich Abweichungen von diesem Verhalten auf. Interessanterweise zeigten die Ankersysteme der verschiedenen Hersteller allgemein gültige Gemeinsamkeiten.

##### 4.4.1 Der Anker als Wärmebrücke bei saisonalen Temperaturschwankungen

An allen drei untersuchten Bauwerken wurde jeweils mindestens ein Anker gefunden, bei dem der Widerstandsverlauf durch die Umgebungstemperatur bestimmt wurde. Typischerweise wurde dabei festgestellt, dass beim Überschreiten einer Lufttemperatur von 8 bis 13 °C eine Verringerung des elektrischen Widerstands auftrat. Sobald die Temperatur unter den Bereich von 8 bis 13 °C fällt, steigt der Widerstand wieder an. Die Luftfeuchtigkeit spielt dabei eine sekundäre Rolle. Dieser Effekt kann mit der Wirkung des Ankers als Wärmebrücke erklärt werden:

Da der Anker in Verbindung mit tieferen Zonen des Erdreichs steht, wird der Ankerkopf auf der Temperatur des Erdreichs im Bereich der Verankerungslänge gehalten. Der einzige grossflächige Kontakt des Ankers mit der Atmosphäre liegt bei der Ankerplatte vor, wobei hier die Isolationsplatte eine thermische Barriere darstellt. Im Sommer ist der Ankerkopf folglich kälter als die Luft und es kommt zu Kondensation von Feuchtigkeit, was zu einem Absinken des Widerstands führen kann. Umgekehrt wird der Ankerkopf im Winter durch das Erdreich geheizt, was zum Austrocknen und damit zu einem Anstieg des Widerstands führt.

Der Kondensationsprozess wirkt sich aber nur auf den elektrischen Widerstand des Ankers aus, wenn der Feuchtigkeitsfilm eine leitende Verbindung zwischen Ankerplatte resp. Bauwerk und Ankerkopf bildet. Ist der Ankerkopf flächendeckend mit elektrisch isolierender Korrosionsschutzmasse beschichtet, kann der Feuchtigkeitsfilm keine leitende Verbindung bilden. Trotz Kondensation im Bereich des Ankerkopfes fällt dann der Widerstand des Ankers nicht ab. Dies erklärt den konstant hohen Widerstandswert von 4 Kontrollankern in Attikon.

##### 4.4.2 Der Anker ohne Einfluss der Wärmebrücke bei saisonalen Schwankungen

Der Widerstandsverlauf von zwei Messankern an der Stützmauer in Attikon wurde durch die jahreszeitlichen klimatischen Einwirkungen bestimmt. Die Wirkung des Ankers als Wärmebrücke zu tieferen Zonen des Erdreichs ist bei Messankern stark abgeschwächt. Dies ist auf die vergleichsweise grosse Oberfläche und Masse der Kraftmessdose und die Distanz zwischen Ankerkopf und Isolationsplatte zurückzuführen. Dadurch wird die Kondensation von Wasser im Bereich der Isolationsplatte in erster Linie durch die Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Umgebung bestimmt. Bei kondensierenden Bedingungen wird es typischerweise zu einer Verringerung des Widerstandes kommen. Generell werden bei Messankern im Sommer hohe Widerstände und im Winter tiefe Widerstände beobachtet.

Dies gilt für die heute üblichen Messankerköpfe, wo die Messdosen aus nicht rostenden Stählen bestehen und deshalb nicht mit Korrosionsschutzmasse beschichtet sind. Im Ausnahmefall Tätenholz, wo Ankerkopf inkl. Messdose unter der vollständig mit Korrosionsschutzmasse verfüllten Schutzhaube liegen, haben Kondensationsprozesse nur dann eine Auswirkung auf den elektrischen Widerstand des Ankers, wenn sich durch Schrumpfung der Korrosionsschutzmasse ein Spalt zwischen Korrosionsschutzmasse und Ankerplatte bildet. In diesem Fall dominiert aber der Einfluss der Wärmebrücke den Verlauf des Widerstandes.

#### 4.4.3 Der Anker ohne Einfluss der Wärmebrücke bei kurzzeitigen Schwankungen

Es wurden verschiedene Messanker beobachtet, welche eine ausgeprägte Schwankung des Widerstands bei kurzzeitigen Temperaturänderungen zeigten. Typischerweise treten diese kurzzeitigen Temperaturänderungen während einem Tagesgang im Sommer auf. Während dem Temperaturanstieg der Umgebungsluft erwärmt sich die Luft unter der Ankerhaube und nimmt Feuchtigkeit auf. Auf dem Stahl um die Isolationsplatte, welcher von der vorangegangenen kälteren Periode noch kühl ist, kommt es zur Kondensation und damit zum Absinken des Widerstandes. Im Verlaufe des Tages erwärmen sich die Ankerplatte und der Ankerkopf und nehmen die Lufttemperatur an. Dabei kann kondensierte Feuchtigkeit wieder verdunsten und der Widerstand steigt wieder an. Alternativ kann auch die Umgebungsluft wieder abkühlen, worauf die Kondensation auf der kälteren Oberfläche der Ankerhaube erfolgt. Dieser Effekt basiert auf der unterschiedlichen Temperatur von Ankerkopf und Ankerhaube und der Konvektion der Luft zwischen diesen Elementen.

#### 4.4.4 Der Anker als Wärmebrücke bei kurzzeitigen Schwankungen

Nebst den saisonalen Schwankungen wurden in einem Fall auch kurzzeitige Schwankungen des Widerstands bei einem Anker beobachtet, welche primär durch den Tagesgang der Temperatur beeinflusst werden. Es handelt sich allerdings um einen Einzelfall (Anker 184 in Attikon), bei dem die Kondensation hinter der Ankerplatte abgelaufen sein muss. Es ist davon auszugehen, dass bei der Abkühlung der Luft im Hohlraum hinter der Ankerplatte die relative Luftfeuchtigkeit ansteigt. Im Falle des kühleren Ankerkopfes im Sommer (Kältebrücke) wird es dort bevorzugt zur Kondensation im Bereich der Elemente des Ankerkopfs kommen. Damit ist das Absinken des Widerstands primär in der Nacht zu erwarten. Beim Aufwärmen der Luft in dem Hohlraum wird es wieder zum Verdunsten und damit zum Widerstandsanstieg kommen.

#### 4.4.5 Einfluss der Fettverfüllung der Ankerhaube

Die Fettverfüllung der Schutzhaube beeinflusst das Widerstandsverhalten in hohem Masse. So bewirkt die Fettschicht eine erhebliche thermische Isolation des Ankerkopfs. Dies hat zur Folge, dass der schnelle Wärmeaustausch zwischen dem Ankerkopf und der Luft nicht mehr stattfinden kann. Dieser Wärmeaustausch eliminiert oder verringert bei Messankern normalerweise deren Wirkung als Wärmebrücke. Die Fettverfüllung hat nun aber zur Folge, dass die Wirkung als Wärmebrücke auch bei Messankern mit grosser Oberfläche der Kraftmessdose erhalten bleibt. Weiter führt die thermische Isolation dazu, dass

kurzzeitige Temperaturschwankungen so stark gedämpft werden, dass kaum mehr Auswirkungen des Tagesgangs der Temperatur auf den elektrischen Widerstand feststellbar sind.

Allerdings führt die gute thermische Isolation dazu, dass die Temperaturdifferenzen zwischen Umgebung und Ankerkopf im Sommer sehr hoch sein können. Insbesondere bei Spalten zwischen Ankerkopf und Fett, welche eine gewisse Konvektion zulassen, kann es in der Folge zu ausgeprägten saisonalen Widerstandsschwankungen kommen. Diese werden gerade durch die gute thermische Isolation des Ankerkopfs verursacht und entsprechen dem in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Prozess.

#### 4.4.6 Einbetonieren des Ankerkopfs

Das Einbetonieren der Ankerköpfe verhindert die direkte Einwirkung der klimatischen Einflussgrößen. Die Feuchtigkeit im Beton wird sich im Verlaufe der Zeit stabilisieren. Kurzzeitige Temperaturveränderungen werden weitgehend unterbunden. Saisonale Schwankungen der Temperatur treten aber nach wie vor auf. Sofern ein Hohlraum oder Spalt mit einer gewissen Feuchtigkeit im Bereich der Isolationsplatte vorliegt, können Kondensationsprozesse entsprechend Abschnitt 4.4.1 auftreten.

#### 4.4.7 Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit

Die Verringerung der Luftfeuchtigkeit erschwert das Auftreten der Kondensationsprozesse. Die meisten beschriebenen Effekte treten aber auch bei Reduktion der Luftfeuchtigkeit auf. Die Temperaturdifferenz zwischen der Ankerplatte und der Luft muss bei verringerter Luftfeuchtigkeit jedoch höher sein, damit Kondensation möglich ist. Die Messungen haben gezeigt, dass die Kondensationsprozesse auch bei verringerter Luftfeuchtigkeit auftreten. Lediglich der in Abschnitt 4.4.2 beschriebene Effekt dürfte durch das Absenken der Luftfeuchtigkeit zu unterbinden sein.

#### 4.4.8 Einfluss der Temperatur

Die Temperaturänderungen im Bereich des Ankerkopfs sind primär für die Schwankungen der Widerstandswerte verantwortlich. Ein Grossteil dieser Prozesse lässt sich mit Kondensationsprozessen erklären. Die Temperatur kann aber auch ohne Kondensation und Verdunstung zu Schwankungen im elektrischen Widerstand führen. So kann die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit des stromführenden Pfads z.B. der Korrosionsschutzmasse zu Schwankungen im Widerstand führen.

## 5. Forschungsergebnisse

### 5.1 Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes

Das Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes von vorgespannten permanenten Anker, nämlich die elektrische Isolation der Anker von Bauwerk und Baugrund, war kein direktes Objekt des Forschungsprojektes. Als wichtiges "Nebenprodukt" erlauben die durchgeführten Untersuchungen jedoch grundsätzliche Aussagen zum Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes:

- Das Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes ist richtig und sehr sinnvoll.
- Das Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes funktioniert in der Baupraxis auch bei grossen Ankerkräften.
- Die von den zugelassenen Ankersystemen eingesetzten Materialien und Materialstärken sind grundsätzlich geeignet und haben sich in den letzten gut 10 Jahren bewährt.
- Die in der Norm festgelegte Messmethode ist geeignet und der dort festgelegte Grenzwert von 0.1 M $\Omega$  ist als Kriterium für eine ausreichende Diffusionsdichtigkeit der Kunststoffumhüllung richtig.

Das heisst, die durchgeführten Untersuchungen liefern indirekt eine klare Bestätigung der Zweckmässigkeit der geltenden normativen Festlegungen bezüglich des umfassenden Korrosionsschutzes von vorgespannten permanenten Anker.

### 5.2 Fluktuationen des elektrischen Widerstandes

#### 5.2.1 Ursachen für die Fluktuationen des elektrischen Widerstandes

Die kontinuierlichen Messungen an ausgewählten Verankerungen haben ergeben, dass bei gewissen Anker neben saisonalen auch beträchtliche tägliche Fluktuationen der Widerstandswerte auftreten. Überdies wurde festgestellt, dass diese Fluktuationen nicht bei allen Anker synchron verlaufen. Die Widerstandsschwankungen können sogar bei Anker am gleichen Bauwerk direkt gegenläufig verlaufen. Die detaillierte Auswertung der Messungen an besonders auffälligen Anker zusammen mit den Informationen aus der Bauzeit und über die Ankerkopfkonstruktion führte schliesslich zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Fluktuationen der Widerstandswerte sind nachweisbar auf physikalische Prozesse im Ankerkopfbereich zurückzuführen.
- Primäre Ursache für grössere Schwankungen der Widerstandswerte sind Kondensationsprozesse.
- Schwächere saisonale Schwankungen sind rein temperaturbedingt (Abhängigkeit der Leitfähigkeit des Elektrolyten von der Temperatur)
- Wo - wie in den meisten Fällen - Feuchtigkeit im Spiel ist, kann das Durchschreiten des Gefrier- resp. Taupunktes zu abrupten Widerstandsänderungen führen.

- Ausmass und Verlauf der Widerstandsfluktuationen sind sehr stark von der Ankerkopfkonstruktion abhängig. So können zum Beispiel Messanker und Kontrollanker am gleichen Bauwerk direkt gegenläufige Widerstandsschwankungen zeigen.
- Es hat sich klar bestätigt, dass Anker im Sommer als Kälte- und im Winter als Wärmelieferant zum Ankerkopf wirken. Dieser Temperaturtransfer zum Ankerkopf wirkt sich jedoch - je nach Ankerkopfkonstruktion - sehr unterschiedlich auf den Widerstandswert aus.
- Die starken, auf Kondensationsprozesse zurückzuführenden Widerstandsschwankungen lassen sich grundsätzlich vermeiden. Denn die Schwankung des Widerstandes kann nur eintreten, wenn der Kondensatfilm eine niederohmige Brücke zwischen Bauwerk oder Ankerplatte und dem Ankerkopf bildet. Wenn der Ankerkopf flächendeckend mit elektrisch isolierender Korrosionsschutzmasse beschichtet ist, kann dies nicht eintreten. So zeigten 4 der 5 Kontrollanker in Attikon keine nennenswerten Widerstandsschwankungen (der fünfte Kontrollanker Nr. 184 ist ein Spezialfall). Ob eine wirksame Beschichtung auch bei Messankern erreichbar ist, wird in Abschnitt 6 diskutiert.

#### 5.2.2 Auswirkungen der Widerstandsfluktuationen auf den effektiven Korrosionsschutz des Ankers

Weil die Widerstandsfluktuationen auf Prozesse im Ankerkopfbereich zurückzuführen sind, ist die Korrosionsschutzwirkung des Hüllrohres auf der Verankerungslänge und der freien Ankerlänge durch Widerstandsschwankungen nicht beeinträchtigt. Daraus folgt, dass bei Ankern mit Widerstandsschwankungen der effektiv vorhandene elektrische Widerstand des Hüllrohres auf der ganzen Ankerlänge hinter dem Ankerkopf mindestens dem höchsten gemessenen Widerstand entspricht.

Nachfolgend wird diskutiert, ob Kondensationsprozesse im Ankerkopfbereich, die Widerstandsfluktuationen verursachen, eine Korrosionsgefährdung für das Stahlzugglied sein können.

#### **Anker mit typischen Fluktuationen des Widerstandes**

Alle Messanker in Attikon sowie der Messanker 12.6M in Waldheim ergaben typische Fluktuationen des Widerstandes. Bei diesen Ankern verursacht Kondensation eine leitende Verbindung zwischen der Ankerplatte, dem Flanschblech des äusseren Ankerstutzens oder der Schutzhaube und der Kraftmessdose. Eine Korrosionsgefährdung für das Stahlzugglied besteht nicht, da sich die Kondensationsprozesse nicht im Bereich des Zuggliedes abspielen.

Anmerkung: Wie weit der Anker 12.6M in Waldheim typisch ist, lässt sich nicht nachweisen. Die übrigen drei untersuchten Messanker sind leider für Vergleiche nicht repräsentativ: Der Anker 12.13M hatte schon seit der Abnahme einen unter dem Grenzwert liegenden Widerstand, bei den Ankern 10.6M und 11.7M fehlen vergleichbare Messwerte, weil die Kraftmesskabel elektrisch Kontakt mit dem Gehäuse des Messkasten hatten (siehe Abschnitt 4.3.3 und Bilder 4.24 und 4.26). Wir vermuten jedoch, dass der Anker 12.6 M (Bild 4.25) ein für die Messanker in Waldheim typisches Verhalten zeigt.

### **Spezialfälle mit grossen Fluktuationen des Widerstandes**

- Messanker 248 in Täntenholz (Bild 4.21):

Bei diesem Anker mit fettverfüllter Schutzhaube hat sich erwiesenermassen (Hauptinspektion) ein Spalt zwischen hochviskoser Fettverfüllung und Ankerplatte gebildet, in welchem Luft kondensieren konnte (Abschnitt 4.3.2). Das Kondensat bildet dort eine Brücke zwischen Ankerplatte resp. Schutzhaube und dem Kraftverteiling. Eine Korrosionsgefährdung für das Ankerzugglied besteht auch bei tiefem Widerstandswert nicht.

- Kontrollanker 184 in Attikon (Bild 4.7):

Bei diesem Anker muss ein Hohlraum mit Feuchtigkeit hinter der Ankerplatte vorhanden sein (Abschnitt 4.3.1). Es lässt sich nicht beurteilen, ob das Kondensat nur eine Brücke zwischen Ankerplatte / innerer Ankerstützen und Kraftverteiling bildet oder auch Kontakt zu einzelnen Litzen herstellt. Im zweiten Fall wäre eine Korrosionsgefährdung des Stahlzuggliedes vorhanden.

- Anker 11.10 in Waldheim (Bild 4.25):

Dieser einbetonierte Ankerkopf mit fettverfüllter Schutzhaube zeigt im Gegensatz zu den analogen Ankern 11.9 und 12.15 (Bild 4.24) markante saisonale Sprünge im elektrischen Widerstand. Die Sprünge der Widerstandswerte sind zweifellos auf Kondensationsprozesse im Ankerkopfbereich zurückzuführen (Kühlwirkung des Ankers im Sommer). Nicht genau bekannt ist jedoch die Lage der durch das Kondensat gebildeten leitenden Verbindung. Sie dürfte zwischen Ankerplatte / Ankerhaube und Kraftverteiling / Ankerbüchse verlaufen, allenfalls auch entlang des Messkabels zwischen Ankerhaube und Ankerbüchse. Jedenfalls spricht nichts dafür, dass Kondensation an den Ankerlitzen auftritt. Damit kann eine Gefährdung des Zuggliedes mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Daraus folgt, dass Fluktuationen des elektrischen Widerstandes für das Stahlzugglied in der Regel keine Korrosionsgefährdung darstellen und somit die Dauerhaftigkeit des Ankers nicht einschränken. Spezialfälle, wo diese Aussage nicht mit Sicherheit zutrifft, wie zum Beispiel Anker 184 in Attikon, sind durch präventive Massnahmen zu verhindern. So ist im Leitfaden für die Zulassung von Ankersystemen [6] der Schutz vor Benetzung der Ankerlitzen und des inneren Ankerkopfbereiches in der Zeit zwischen der Spannprobe und dem Aufbringen des definitiven Ankerkopfschutzes vorgeschrieben.

Auch wenn die Fluktuationen des Widerstandes den Anker nicht gefährden, ist es wünschenswert, diese Fluktuationen künftig möglichst zu verhindern. Denn bei der üblichen Überwachung von Verankerungen werden die Widerstandswerte höchstens einmal pro Jahr, oft sogar nur alle 5 Jahre gemessen. Ein tiefer, bei einer Haupt- oder Zwischeninspektion gemessener Widerstandswert hinterlässt beim Bauherrn eine grosse Unsicherheit. Denn anhand dieser Einzelmessung kann nicht beurteilt werden, ob eine Widerstandsfluktuation oder ein dauerhafter Abfall des Widerstandes vorliegt. Wenn es gelingt, künftig grössere Widerstandsfluktuationen zu verhindern, wäre ein wichtiger Schritt zur aussagekräftigeren Überwachung von Verankerungen getan. Diese Frage wird in Abschnitt 6 diskutiert.

### 5.3 Dauerhafte Abnahme des elektrischen Widerstandes

Wie in Abschnitt 1.2 beschrieben, ergaben die in den letzten gut 10 Jahren periodisch durchgeführten Überwachungsmessungen, dass bei einzelnen Ankern der Widerstand dauerhaft auf tiefe Werte oder sogar unter den Grenzwert von  $0.1\text{M}\Omega$  abgefallen ist. Bei einigen dieser Anker erfolgte der Widerstandsabfall sukzessive über mehrere Jahre, bei anderen Ankern von einer Messung zur nächsten, also in der Regel innerhalb eines Jahres, und wurde dann durch die weiteren Messungen bestätigt.

Der Zufall wollte, dass ein solcher dauerhafter Widerstandsabfall auch während der durchgeführten kontinuierlichen Messungen beobachtet werden konnte: Beim Anker 12.17 in Waldheim fiel der Widerstand innerhalb zweier Monate von über  $10\text{M}\Omega$  auf deutlich unter  $0.1\text{M}\Omega$  ab (Bild 4.26). Dies trat rund ein Jahr nach der Abnahmemessung ein. Untersuchungen am Ankerkopf konnten bei diesem Anker nicht durchgeführt werden, weil der Ankerkopf einbetoniert ist.

Die vorhandene Datenmenge von periodischen Überwachungsmessungen reicht nicht aus, um eindeutige statistisch belegbare Systemunterschiede zu eruieren. Aber es gibt doch deutliche Hinweise, dass ein dauerhafter Widerstandsabfall bei einigen Ankersystemen häufiger eintritt als bei anderen Systemen (siehe Anhang).

#### 5.3.1 Ursachen für die dauerhafte Abnahme des elektrischen Widerstandes

Aus der Diskussion der potentiellen Schwachstellen der elektrischen Isolation in Abschnitt 3.2 und den daraus gewonnenen Erkenntnissen (Abschnitt 3.5) lässt sich folgender Schluss ziehen:

Die Ursache für einen dauerhaften Abfall des Widerstandes nach der Abnahmemessung ist ein Defekt der elektrischen Isolation an einer der drei potentiellen Schwachstellen

- Wellrohr  $I_v$
- Übergang  $I_v / I_{fr}$  (Schrumpfschlauchverbindung)
- Obere Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches

Anmerkung: Mängel der Isolation im äusseren Ankerkopfbereich wie Verschmutzungen, Insektenester, Pflanzen oder ungewollte Kontakte der Litzenüberstände oder der Messdose zur Ankerhaube usw., die tatsächlich schon mehrfach zu (scheinbar) dauerhaften Widerstandsabfällen geführt haben, werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Denn solche Mängel sind bei Inspektionen dedektierbar und können einfach behoben werden (siehe z.B. Anhang C2, C5, C6 und C8).

Zu den drei im Vordergrund stehenden potentiellen Schwachstellen kann Folgendes gesagt werden:

- Wellrohr  $I_v$

Bei fachgerechter und normgemässer Ausführung der Anker, insbesondere Vermeidung der Anordnung der Verankerungslänge in unterschiedlichen Baugrundtypen und ausreichende Konsolidierung des Bohrloches im Fels, ist ein Defekt im Wellrohr nach der Spannprobe und der Abnahme aufgrund der bisherigen Erfahrungen kaum oder höchstens in Ausnahmefällen zu befürchten.

- Übergang  $I_v / I_{fr}$  (Schrumpfschlauchverbindung)

Ein Versagen der elektrischen Isolation dieser Verbindung nach der Spannprobe und der Abnahmemessung durch sukzessives Unterwandern der Schrumpfschlauchverbindung kann in Einzelfällen nicht ausgeschlossen werden. Diese Verbindung wird zwar im Werk, aber nicht maschinell, sondern "von Hand" hergestellt, so dass eine unterschiedliche Qualität der Verbindung logischerweise immer möglich ist. Überdies wird diese Verbindung in den verschiedenen Phasen des Ankereinbaus und bei der Ankerprüfung mechanisch beansprucht, so dass einzelne Verbindungen geschwächt werden könnten. Dies ist bei Ankern zu vermuten, die nach der letzten Nachinjektion oder nach der Spannprobe, also vor der Montage des Ankerkopfes und seiner Abdichtungen, zwar noch genügende, aber tiefe Widerstände haben, z.B. 0.5 bis etwa 2 bis 3 M $\Omega$ . Denn Anker mit absolut intakter Kunststoffumhüllung haben in dieser Phase Widerstände von 50 bis über 200 M $\Omega$ .

- Obere Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches

Wie im Abschnitt 3.5 beschrieben, besteht nur bei den Systemen mit innerem Ankerstutzen aus PE ein Risiko, dass die obere Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches kapillar unterwandert wird. Ob dies tatsächlich eintritt, ist bisher nicht bewiesen. Aber zwei Beobachtungen an diesen Systemen liefern doch klare Indizien dafür.

Erstens kam es in den vergangenen Jahren bei verschiedenen Verankerungen mit diesen Systemen immer wieder vor, dass einzelne Anker, die nach der Spannprobe noch einen sehr hohen Widerstand ( $\geq 200$  M $\Omega$ ) hatten, bei der Abnahmemessung einen sehr tiefen oder gar ungenügenden elektrischen Widerstand aufwiesen. Dies spricht doch sehr für ein Versagen der inneren Ankerkopfabdichtung,

Zweitens wurde vor allem bei diesen Systemen mehrfach beobachtet, dass einzelne Anker, die bei der Abnahmemessung noch hohe Widerstandswerte hatten (50 bis  $\geq 200$  M $\Omega$ ), schon bei den ersten Überwachungsmessungen tiefe oder gar ungenügende Widerstände zeigten, die bei den Folgemessungen auch tief blieben (siehe Anhang A und C).

Die untere Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches muss nach unserer Einschätzung für die elektrische Isolation des Ankers gar nicht elektrisch dicht sein (siehe Abschnitt 3.5).

### 5.3.2 Auswirkungen des dauerhaften Widerstandsabfalls auf die Korrosionsgefährdung des Ankers

Es gibt keine messtechnische Möglichkeit festzustellen, ob bei einem Anker ein Defekt der elektrischen Isolation im Wellrohr  $I_v$  oder bei der Verbindung  $I_v/I_{fr}$  liegt. Bezüglich der Korrosionsgefährdung ist diese Unterscheidung auch nicht relevant. In beiden Fällen findet Feuchtigkeit Zutritt zum Ankerzugglied, was das Zugglied grundsätzlich gefährdet. Dass ein Defekt im Wellrohr im untersten (baugrundseitigen) Bereich der Verankerungslänge, wo eine Korrosion des Zuggliedes den Anker kaum mehr gefährden würde, nach der Abnahme entsteht, ist nämlich höchst unwahrscheinlich (geringe Beanspruchung).

Bei einem Defekt der Ankerisolation im Bereich der oberen Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches hingegen verläuft der Strompfad bei der Messung zwischen Bauwerk

und Kraftverteilung / Ankerbüchse und die Feuchtigkeit dringt nicht bis zum Ankerzugglied vor. Solange nicht gleichzeitig eine zweite Defektstelle entlang des Ankers vorliegt, fließt kein Strom durch das Ankerzugglied und das Zugglied ist nicht gefährdet.

Demzufolge wäre es bei Ankern mit dauerhaftem Abfall des elektrischen Widerstandes von grossem Interesse zu eruieren, ob der Defekt der elektrischen Isolation beim Übergang  $I_v/I_{fr}$  resp. im Wellrohr  $I_v$  liegt, wo er das Zugglied gefährdet, oder ob der Defekt bei der oberen Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches liegt, was für das Zugglied keine Gefährdung bedeutet. Tatsächlich ist es bei einem zugänglichen Ankerkopf möglich, durch - allerdings ziemlich aufwändige - Messungen festzustellen, ob der Defekt "unten", also beim Übergang  $I_v/I_{fr}$  resp. im Wellrohr  $I_v$  liegt, oder "oben", bei der oberen Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches. Die Messmethode wird im folgenden Abschnitt 5.3.3 beschrieben. Für die Baupraxis kommt diese Abklärung wegen des beträchtlichen Aufwandes nur in wichtigen Einzelfällen in Betracht, die kostenrelevante Entscheidungen erfordern.

Zusammenfassend muss davon ausgegangen werden, dass bei Ankern mit dauerhaftem Abfall des Widerstandes unter den Grenzwert eine Korrosionsgefährdung des Zuggliedes besteht, falls nicht messtechnisch nachgewiesen wird, dass der Defekt der elektrischen Isolation im Bereich der oberen Abdichtung des inneren Ankerkopfbereiches liegt. Diese Gefährdung darf allerdings nicht als akut betrachtet werden, denn die Litzen sind im Bereich  $I_v$  und im Übergangsbereich  $I_v/I_{fr}$  mit zementösem Injektionsgut umgeben (äussere und innere Injektion). Andererseits ist die Gefährdung durchaus real, denn gerade in der obersten Zone von  $I_v$  und im Übergangsbereich  $I_v/I_{fr}$  weist das Injektionsgut wegen der Kraffteinleitung Risse auf.

### 5.3.3 Lokalisierung des Defekts der Isolation

Grundsätzlich ist es elektrotechnisch möglich zu unterscheiden, ob der Strom aus den Litzen oder aus dem Ankerkopf austritt. Die Unterscheidung erfolgt durch die Erfassung des ohmschen Spannungsfalls auf dem Ankerkopf.

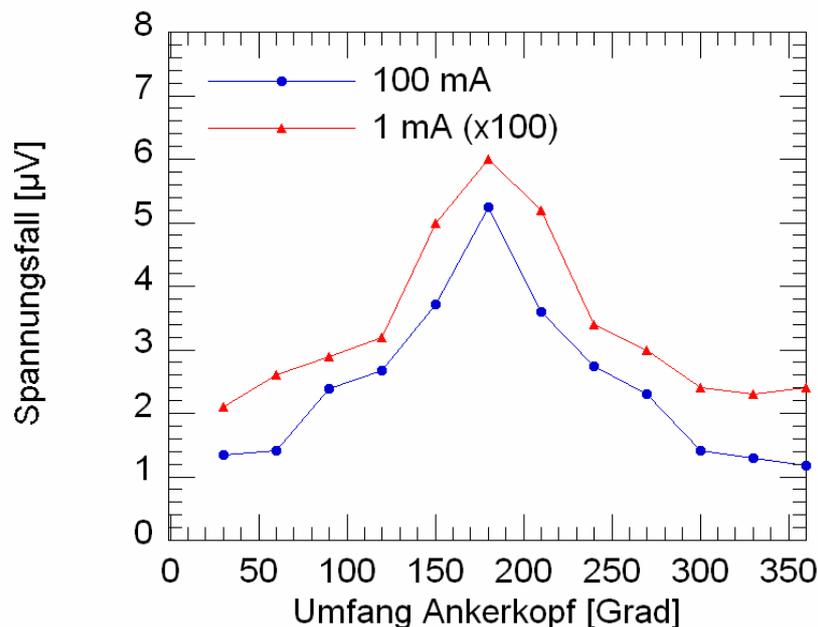
Bei der Widerstandsmessung wird der elektrische Strom entsprechend dem ohmschen Gesetz primär dem Pfad mit dem geringsten elektrischen Widerstand folgen. Der Stromfluss entlang dieses Strompfades wird zu einem gewissen ohmschen Spannungsfall führen. Die Messung des ohmschen Spannungsfalls ermöglicht demzufolge den Nachweis, dass Strom in dem entsprechenden Bauteil fließt. Die Messung des Spannungsfalls auf den Ankerlitzen ist nicht möglich, da keine Anschlüsse hinter dem Ankerkopf erstellt werden können. Demgegenüber kann der Spannungsfall am Ankerkopf direkt gemessen werden. Dazu wird die Spannung zwischen einem elektrischen Anschluss möglichst neben den Keilen und einem elektrischen Anschluss möglichst nahe bei der Isolationsplatte gemessen. Der Nachweis des Spannungsfalls auf dem Ankerkopf lässt den Schluss zu, dass zumindest ein erheblicher Teil des Messstroms im Bereich des Ankerkopfs austritt. Dies wiederum erlaubt die Schlussfolgerung, dass auf der freien Länge und der Verankerungslänge kein Defekt in der Isolation vorliegen dürfte. Lediglich bei je einer Defektstelle in der Verankerungslänge und im Ankerkopf mit vergleichbarem Widerstandswert ist diese Schlussfolgerung nicht korrekt. Die Messung an einem Anker an der Waldheimstrasse hat

ergeben, dass der Messstrom von 0.12 mA zu einem Spannungsfall von 5  $\mu\text{V}$  auf dem Ankerkopf führt. Somit kann geschlossen werden, dass der Strom über den Ankerkopf fließt und dass der Defekt in der Isolation folglich im Kopfbereich liegt.

Die Problematik dieser Messung besteht darin, dass die elektrische Leitfähigkeit des Ankerkopfs sehr hoch und typischerweise der Messstrom sehr gering ist. Dadurch werden die detektierbaren Spannungsfälle ausserordentlich tief. Im Messbeispiel handelte es sich um einen Messanker. In diesem Aufbau wird der Widerstand vergleichsweise hoch, da die Kraftmessdose eine beschränkte räumliche Ausdehnung und damit einen vergleichsweise hohen elektrischen Widerstand aufweist. Damit diese Messung auf sämtlichen Ankerkopftypen angewandt werden kann, muss eine höchstauflösende Spannungsmessung angewandt werden. Dafür kommt lediglich eine Wechselstrommessung bei tiefen Frequenzen in Kombination mit einem Lock-in Verstärker in Frage. Um die Grenzen dieser Messmethode zu erfassen, wurden Laboruntersuchungen ausgeführt. Dazu wurden 7 Ankerlitzen mit Keilen in einen Ankerkopf mit 55 mm Höhe und 110 mm Durchmesser eingepresst. In dieser Konfiguration wurde über die mittlere Ankerlitze ein Strom eingespiesen und verschiedene Fehlstellenkonfigurationen und Widerstände untersucht. Für die Messung des Spannungsfalls wurde ein Lock-in Verstärker verwendet (EG&G Model 5210). Es zeigte sich, dass ein Strom von 100 mA einen Spannungsfall von bis zu 5  $\mu\text{V}$  über den Ankerkopf ergibt, wenn der Strom durch den Ankerkopf und über die Isolierplatte in die Ankerplatte übertritt. Weiter wurde gefunden, dass die maximale Messauflösung ca. 10 nV beträgt. Dies bedeutet, dass die Messung des Spannungsfalls unter der gegebenen Konfiguration möglich wird, sobald der Messstrom ca. 0.5 mA beträgt. Derartige Messströme können mit handelsüblichen Geräten aufgebracht werden, wenn der Ankerwiderstand unter 100 k $\Omega$  absinkt.

Die Ergebnisse der Messung sind in Bild 5.1 dargestellt. Der Spannungsfall wurde auf dem Umfang des Ankerkopfs aufgezeichnet. Die Defektstelle befindet sich bei 180°. Es werden die Ergebnisse für zwei unterschiedliche Messströme von 100 und 1 mA gezeigt. Die Ergebnisse der Messung bei 1 mA wurden mit einem Faktor hundert multipliziert, um sie vergleichen zu können. Es zeigt sich, dass im Bereich der Fehlstelle ein Anstieg des Spannungsfalls auftritt. Dieser ist auf eine Konzentration des Stroms zurückzuführen.

Aufgrund der Ergebnisse kann gefolgert werden, dass es möglich ist den Strompfad im Bereich des Ankerkopfs zu bestimmen, wenn der Grenzwert des Widerstands nicht erfüllt ist. Diese Messung ermöglicht die Beurteilung, ob der Stromfluss über Ankerkopf und Ankerplatte erfolgt, ohne dass eine Korrosionsgefährdung der Litzen auftritt, oder ob der Strom über die Litzen austritt und folglich eine Korrosionsgefährdung gegeben sein kann. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist es sogar möglich, im Falle von Stromfluss über den Ankerkopf die exakte Lage der Fehlstelle auf dem Umfang des Ankerkopfs zu identifizieren.



**Bild 5.1:** Spannungsfall über die Höhe des Ankerkopfs bei 100 mA und 1 mA Wechselstrom mit 128 Hz. Die Fehlstelle befindet sich bei 180 Grad. Die Ergebnisse bei 1 mA wurden mit einem Faktor 100 multipliziert.

Die Zuverlässigkeit dieser Messung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. So erleichtert ein geringer elektrischer Widerstand der Ankerisolation die messtechnische Erfassung des Spannungsfalls, da grössere Ströme eingespielt werden können. Weiter wird die Messung durch starke Ankerköpfe vereinfacht, da der abgreifbare Strompfad länger wird. Dies trifft auch bei Verwendung eines Kraftverteilers oder bei einer Kraftmessdose zu.

## 6. Schlussfolgerungen für die Baupraxis

### 6.1 Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes

Das Konzept des umfassenden Korrosionsschutzes, nämlich die elektrische Isolation von permanenten vorgespannten Ankern wurde durch die Forschungsergebnisse als sinnvoll, machbar und wirksam bestätigt. Dies gilt sowohl für die normativen Festlegungen (Anforderungen, Messmethode, Grenzwerte) wie auch grundsätzlich für die von den zugelassenen Systemen verwendeten Materialien.

Die Forschungsergebnisse liefern keine Hinweise und Anhaltspunkte, welche Änderungen am Konzept, an der Messmethode oder an den Grenzwerten nötig erscheinen lassen.

## 6.2 Fluktuationen des elektrischen Widerstandes

Fluktuationen des elektrischen Widerstandes stellen in aller Regel keine Korrosionsgefährdung für die Anker dar. Markante Fluktuationen des Widerstandes, die sogar unter den Grenzwert von  $0.1 \text{ M}\Omega$  reichen können, sind auf Kondensationsprozesse im Bereich des Ankerkopfes zurückzuführen. Dabei können auf den ersten Blick überraschende Verläufe des Widerstandes auftreten, die aber mit der Wirkung des Ankers als "Erdsonde" erklärt werden können (Kälte / Wärme-Transfer von der Verankerungslänge zum Ankerkopf). Geringere Schwankungen des Widerstandes sind rein temperaturbedingt. Sie lassen sich kaum verhindern.

Störend und irritierend, wenn auch korrosionstechnisch harmlos, sind die markanten Fluktuationen des Widerstandes über mehrere Dekaden wie sie vorwiegend an Messankern beobachtet werden. Diese unerwünschten Erscheinungen lassen sich theoretisch und - so ist zu hoffen - künftig auch in der Praxis verhindern.

Um dies zu erreichen, wird vorgeschlagen, die Kraftmessdosen vor dem Einbau flächendeckend mit einer elektrisch isolierenden Korrosionsschutzmasse zu beschichten. Zusätzlich wird empfohlen, die Kontaktstellen zwischen Kraftmessdosen und Ankerkopfteilen nach dem Anbringen des üblichen Ankerkopfschutzes vor der Montage der Schutzhaube nochmals mit einer elektrisch isolierenden Schutzmasse zu beschichten. Ob diese Massnahmen zum Erfolg führen und nachhaltig gegen Fluktuationen des Widerstandes wirksam sind, muss die Praxis zeigen. Falls nötig, kann das Beschichten der Kraftmessdose und ihrer Kontaktstellen anlässlich von Hauptinspektionen auch ohne besonderen Aufwand wiederholt werden.

Gewisse für den Ankerkopfschutz verwendete Korrosionsschutzmassen weisen eine hohe Viskosität auf. Bei diesen Produkten besteht bei der durch Temperaturwechsel und Alterung bedingten Schrumpfung die Gefahr, dass sich die Masse von der Ankerplatte ablöst, sodass sich ein Spalt bildet. In diesem Spalt kann Luft kondensieren, was zu starken Fluktuationen des elektrischen Widerstandes führen kann. Es wird empfohlen, für den Ankerkopfschutz weniger viskose Korrosionsschutzmassen zu verwenden.

## 6.3 Dauerhafter Abfall des elektrischen Widerstandes

Zur künftigen Verhinderung des sehr unerwünschten und auch gefährlichen nachträglichen Abfalls des Widerstandes besteht ein zusätzlicher Abklärungsbedarf und ein Verbesserungsbedarf an den Ankersystemen.

Einerseits sollte durch gezielte Messungen gemäss Abschnitt 5.3.3 an verschiedenen Ankersystemen untersucht werden, ob mit dieser Messmethode eine gesicherte Aussage über die Lage des Defektes der elektrischen Isolation möglich ist. Dazu sind wahrscheinlich auch eigens präparierte Anker mit kontrolliert eingebauten "Defekten" zu untersuchen. Überdies sollte mit diesen Messungen unsere Einschätzung überprüft werden, dass ein nachträgliches Versagen der inneren Ankerkopfabdichtung nur bei Systemen mit inneren

Ankerstützen aus PE auftreten kann. Diese Messungen können aus Zeit- und vor allem aus Kostengründen nicht im Rahmen unseres Forschungsauftrages durchgeführt werden. Es wäre überdies sinnvoll, sie in Zusammenarbeit mit den Ankerherstellern durchzuführen.

Andererseits sind die Ankerfirmen aufgerufen, ihre Ankersysteme schon heute, also ohne die vorgeschlagenen Messungen abzuwarten, weiter zu verbessern. Denn der nachträgliche Abfall des elektrischen Widerstandes bei einzelnen Ankern ist eine Tatsache und beeinträchtigt das Vertrauen in die umfassend korrosionsgeschützten Anker. Und die potentiellen Schwachstellen der elektrischen Isolation, also die Stellen, wo Verbesserungen vorzunehmen sind, sind bekannt.

Für die Praxis wird bei Ankern mit einem Abfall des elektrischen Widerstandes nach der Abnahme unter den Grenzwert von  $0.1 \text{ M}\Omega$  folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Wiederholung der Widerstandsmessung bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zur Klärung, ob der Abfall des Widerstandes dauerhaft ist oder ob "nur" eine starke Fluktuation vorliegt.
- Wenn der Abfall des Widerstandes dauerhaft ist, sollte zunächst bei zugänglichen Ankerköpfen der Ankerkopf und die Messanlage inspiziert werden, zur Klärung, ob Mängel im äusseren Ankerkopfbereich vorliegen (Verschmutzung, Insektenester, Pflanzen, Wasserzutritt, Messkabeldefekt oder -erdung usw.)
- Wenn aufgrund dieser Abklärungen klar ist, dass ein Defekt der Isolation im unzugänglichen Ankerbereich vorliegt, sind diese Anker im Überwachungsplan speziell zu berücksichtigen (häufigere und intensivere Überwachung). Bei Kontrollankern ist zu prüfen, ob eine Kraftmessdose eingebaut werden kann.
- In gravierenden resp. besonders wichtigen Fällen empfiehlt es sich, mit Messungen gemäss Abschnitt 5.3.3 abzuklären, ob der Defekt im tieferen Ankerbereich oder bei der inneren Ankerkopfabdichtung liegt. Damit kann die Korrosionsgefährdung besser beurteilt werden.

#### **6.4 Zugelassene Ankersysteme**

2006 / 2007 müssen alle zugelassenen Ankersysteme ihre Zulassung erneuern. Für die Erneuerung der Zulassung ist die EMPA mit der sie beratenden Expertengruppe Anker (EGA) zuständig. Diese Stellen werden zu entscheiden haben, ob und wie die vorliegenden Forschungsergebnisse bei der Zulassungserneuerung berücksichtigt werden können.

Im Jahr 2006 haben folgende Änderungen bei den Ankerherstellern stattgefunden:

- Die Herstellerin des Systems A wurde von der Herstellerin des Systems C übernommen. Damit verschwindet eines der zugelassenen Ankersysteme. Das neue System C wird bezüglich der elektrischen Isolation voraussichtlich weitgehend dem bisherigen System A entsprechen.

- Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, hatte das System E nach einem Fehlschlag das System D übernommen und dafür die Zulassung erhalten. Nun will die Herstellerin von System E diese Zusammenarbeit wieder aufgeben und hat ein neues System für die Ankerkopfabdichtung entwickelt.

Ab 2007 müssen die Beschreibungen der Ankerkopfabdichtungssysteme in Abschnitt 3.3 somit teilweise revidiert werden.

## Literatur

- [1] F. Hunkeler, P. Matt, U. von Matt und R. Werner, Spannglieder, Schrägseile und Anker - Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden, Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag AGB 2000/470, Bericht VSS Nr. 588, August 2005
- [2] U. von Matt und R. Bressan, Boden- und Felsanker, Schweizer Ingenieur und Architekt, 105, 1987, Heft 7, Seiten 150 - 155
- [3] F. Hunkeler und F. Stalder, Streustromschutzmassnahmen an Fels- und Bodenankern, Schweizer Ingenieur und Architekt, 105, 1987, Heft 33-34, Seiten 978 - 983
- [4] U. von Matt, Instandsetzung und Verstärkung einer Felssicherung, Vorgespannter Beton in der Schweiz 1990 - 1994, Publikation zum 12. FIP Kongress, Washington 1994
- [5] U. von Matt, Dauerhafte vorgespannte Anker, Publikation fib-CH zum 1. fib-Kongress, Osaka 2002
- [6] EMPA (Zulassungsstelle) und Expertengruppe Anker (EGA), Leitfaden für die technische Zulassung von Ankersystemen gemäss Norm SIA 267, Fassung 29. Januar 2004
- [7] Y. Schiegg, Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung "Vergleichende Untersuchungen zum Chloridwiderstand von Betonen", FA 82/98, ASTRA, VSS-Bericht
- [8] F. Hunkeler, H. Ungricht und P. Matt, Korrosionsschäden an Spannstählen in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern, Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag 86/95, Bericht VSS Nr. 534, 1998

## **Anhang**

Abnahmemessungen und Ergebnisse von periodischen  
Überwachungsmessungen des elektrischen Widerstandes  
an verschiedenen Verankerungen

## **A. Ankersystem A**

- A1. A5 Pfahlwand Hunnenberg (Solothurn, Kanton Solothurn)
- A2. N20.1.4, Stützwand Täntenholz (Birmensdorf, Kanton Zürich)
- A3. SBB Stützwand Borntunnel Nord (Olten, Kanton Solothurn)
- A4. SBB Stützwände Borntunnel Süd (Aarburg, Kanton Solothurn)
- A5. A4, Stützwand Isenberg (Affoltern, Kanton Zürich)

## **B. Ankersystem B**

- B1. A2 Acheregg tunnel, Portalzone Süd (Hergiswil, Kanton Nidwalden)
- B2. NOK Kraftwerk Eglisau, Wehrpfeiler (Eglisau, Kanton Zürich)
- B3. A1 Wintherthur - Wil, Hangsicherung Eggwald (Attikon, Kanton Zürich)
- B4. A8 Loppertunnel Stützwand Südportal (Alpnachstad, Kanton Obwalden)
- B5. A2 Seelisbergtunnel, Amdenermergelstrecke (Beckenried, Kanton Nidwalden)
- B6. NOK Kraftwerk Eglisau, Zufahrtsstrasse Rechtes Ufer (Eglisau, Kanton Zürich)
- B7. Schinstrasse, Hangsicherung Caselertobel (Thuisis - Tiefencastel, Kanton GR)

## **C. Ankersystem C**

- C1. Lukmanierstrasse, Medelserrheinbrücke (Disentis, Kanton Graubünden)
- C2. Hauetli I (A8, Alpnachstad, Kanton Obwalden)
- C3. SBB Stützmauern Immensee - Arth Goldau (Goldau, Kanton Schwyz)
- C4. Tschierscherstrasse, Ricaldei (Passugg / Praden, Kanton Graubünden)
- C5. Pfahlwand obere Holzgrube (S9, Sihltalstrasse, Adliswil, Kanton Zürich)
- C6. Hauetli II B (A8, Alpnachstad, Kanton Obwalden)
- C7. A2 Stützmauer Friedental (Luzern, Kanton Luzern)
- C8. Waldheimstrasse (Zug, Kanton Zug)

## **D. Ankersystem D**

- D1. Hauetli II B (A8, Alpnachstad, Kanton Obwalden)

## **E. Ankersystem E**

- E1. RhB Hangsicherung Mülitobel (Saas, Kanton Graubünden)
- E2. Kraftwerk Linth-Limmern, NESTIL (Linthal, Kanton Glarus)

## **F. Ankersystem F**

- F1. Geschiebesammler KEB 1 und 2 (Beckenried, Kanton Nidwalden)

## A. Ankersystem A

### A1. A5 Pfahlwand Hunnenberg (Solothurn, Kanton Solothurn)

Typ: Hangsicherung, verankerte Bohrpfahlwand

Baujahr: 1994 - 1996

Anzahl permanente Anker: 103 Stück

Ankertypen:

103 Anker 5/13 und 7/13, 5 - 7 Litzen, Felsanker,

$P_0 = 400 - 650 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 8 \text{ bis } 9 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (Jan./ Feb. 1996)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	97 Stück	94%	98%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	4%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	2%	2%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 15 Messanker

Kontrollanker: 88 Stück

Bisherige Messungen:

Messwerte in Megaohm

Anker Nr.	29.2.1996	17.6.1997	10.3.1998	19.8.1998	7.6.1999	15.5.2003
101	20	17	0	0.03	0.01	0.31
108	200	200	200	200	200	35
115	200	60	9.2	200	200	0.08
121	200	200	200	200	0	0.02
128	5	0.49	0.65	0.46	0.37	0.8
135	80	80	5.9	3.2	0.25	0.12
141	40	90	2.2	3.4	200	0.48
148	70	5.2	5	10	200	2
155	200	100	100	200	200	15
161	12	1.6	3	2	200	1.8
168	200	100	100	200	200	0.02
175	7	2.5	2.4	1.8	200	0.01
181	12	0.9	0.7	0.75	200	0.01
188	0.12	0.02	0.12	0.02	200	0.01
195	0.22	0.12	0.2	0.07	200	0.04

Messungen zwischen 1999 und 2002 mit unrealistischen Werten, alle über 200 M $\Omega$  (Fremdmessung)  
Messung 15.5.2003 durch Dr. Vollenweider AG

## A2. N20.1.4, Stützwand Täntenholz (Birmensdorf, Kanton Zürich)

Typ: verankerte Bohrpfahlwand

Baujahr: 1997

Anzahl permanente Anker: 175

Stück

Ankertypen:

129 Anker 4/13, 4 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 430 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 \text{ bis } 17 \text{ m}$

40 Anker 5/13, 5 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 380 - 545 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 \text{ bis } 17 \text{ m}$

6 Anker 6/13, 6 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 400 - 500 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 \text{ bis } 17 \text{ m}$  (Versuchsanker)

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (1997, vor Intervention)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	152 Stück	87%	92%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	9 Stück	5%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	14 Stück	8%	8%

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (1997, nach Intervention)

9 Ankerköpfe wurden abgehoben, mit Heissluft getrocknet und mit Silikon abgedichtet.

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	158 Stück	90%	96%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	10 Stück	6%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	7 Stück	4%	4%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 21 Messanker

Kontrollanker: 9 Stück (alle mit ungenügendem elektrischen Widerstand)

Bisherige Messungen am Messkasten in beiliegender Tabelle (1 Seite):

## Stützwand Tantenholz / Widerstandsmessungen (M $\Omega$ m) an den Messankern

Anker Nr.	Abnahme	10.12.97	18.12.97	9.1.98	21.3.98	24.2.98	15.4.98	26.11.98	8.12.99	26.4.01	26.4.01	3.6.03	25.5.04	21.6.05	15.6.06
105	2.5	-	40	35	45	30	10	20	0.7	0.42		0.3	2.5	3.6	4
111	200	-	150	150	150	100	100	200	20	2		0.25	1.4	1.2	4
117	200	70	200	150	150	80	100	100	18	8		2.8	4.4	2.5	5
126	200	60	150	100	100	80	70	50	14	4.5		1.2	2.5	1.8	4.8
135	1.2	-	2.6	2.5	3	3	3.2	7	4	3.2		2	3.3	1.8	5.5
144	200	-	100	100	100	100	80	75	18	1.4		0.2	0.8	0.8	4.4
153	200	70	150	150	150	100	80	50	6	1.2		1	1.2	1.1	4.4
163	200	-	70	80	100	0.4	0.02	0.01	0.01	0.02		0.01	1	2	2.5
173	200	-	0.15	0.14	0.18	0.25	0.2	0.4	0.4	0.38		0.5	1.4	3	3
182	2	-	0.9	0.8	1	0.5	1.2	4.2	0.01	0.01		0.01	0.5	3	2.5
190	150	-	150	200	200	200	200	100	70	0.2		0.08	1.2	1.8	2.5
201	200	60	200	150	200	100	100	80	30	9		0.26	1	1.2	4.4
206	80	18	7	11	6.5	5.5	18	20	10	6		1.8	6.5	3.5	5.5
212	200	100	200	200	200	200	200	0.1	0.12	0.08		0.06	1.5	1.2	4.6
221	5	4	10	20	25	25	30	25	18	7		2.2	6.5	3	7.5
230	200	70	200	200	200	200	150	100	14	14		1	10	4	6
239	200	50	150	100	100	50	80	40	12	4.2		0.36	3.2	1.8	4
248	100	60	150	150	200	100	100	30	16	0.02	4,2 <sup>1)</sup>	0.01	2.1	0.8	3
257	200	100	70	100	70	100	100	2.2	1.2	0.7	0,7 <sup>1)</sup>	0.4	1.2	1.4	2
267	200	100	200	200	200	200	200	200	11	4.2	4,8 <sup>1)</sup>	0.5	2	1.4	2
276	40	60	30	20	30	15	3.2	2.4	0.02	0.01	0,05 <sup>1)</sup>	0.04	2	1	2.5

<sup>1)</sup> Messung direkt am gereinigten Ankerkopf bei Hauptinspektion

### A3. SBB Stützwand Borntunnel Nord (Olten, Kanton Solothurn)

Typ: Ankerriegel und Verstärkung von verankerten Bohrpfahlwänden

Baujahr: 2004

Anzahl permanente Anker: 234 Stück

Ankertypen:

229 Anker System A 12/13, 12 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1310 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 13 \text{ bis } 27 \text{ m}$

5 Anker System B (Notmassnahme 2002)

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$

Messung am Ankerkopf, alle Anker System A, Abnahmemessung 2004

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	223 Stück	98%	99%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	3 Stück	1%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	3 Stück	1%	1%

Messung am Messkasten, 11. Januar 2005 (43 Anker System A mit Messkabel)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	33 Stück	77%	86%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	9%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	6 Stück	14%	14%

Messung am Messkasten, 6. September 2005, alle 43 mit Messkabel ausgerüsteten Anker System A  
 Nach Entwässerung der Ankerschächte und Kopfschutzerneuerung

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	34 Stück	79%	91%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	5 Stück	12%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	9%	9%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker System A: 39 Messanker und 4 einbetonierte Anker mit Kabel zur Messung von  $R_I$

Mit Messkabel ausgerüstete Anker System B: 2 Messanker (Notmassnahme 2002)

Kontrollanker: 24 Stück

Einbetonierte Anker: 164 Stück plus 4 Stück mit Kabel zur Messung von  $R_I$

Bisherige Messungen am Messkasten in beiliegender Tabelle.

## Born Stützwand Nord

### Hangriegel 1 bis 3, Messkasten 1 (Wandfeld 2)

	Position Nr.	Anker Nr.	Messung	*) Geräte-einstellung	P <sub>0</sub> [kN]	Erneuerung Kopfschutz			
						VAG, Be	He	VAG, Rö	VAG, Rö
						11.01.05 schön, 7°C	03.06.05 schön, 30°C	06.09.05 schön, 26°C	27.07.06 schön, 30°C
el. Wid. [MΩ]	1	1.0.7	KMD Nr. 2921	---	1310	3.2		5.2	4
	2	2.0.7	KMD Nr. 2829	---	1310	55		4.0	1.7
	3	3.0.7	KMD Nr. 2932	---	1310	200		1.2	0.3

### Hangriegel 4 bis 8, Messkasten 2 (Wandfeld 6)

el. Wid. [MΩ]	1	4.0.7	KMD Nr. 2920	---	1310	28		4.4	1.2
	2	5.0.6	KMD Nr. 2823	---	980	200		17	3.9
	3	6.0.5	KMD Nr. 2923	---	1310	200		30	24
	4	7.0.6	KMD Nr. 2907	---	1310	200		35	19
	5	8.0.5	KMD Nr. 2827	---	1150	0.01		0.01	0.01

### Riegel Wandkopf und Longarine 1 bis 5, Messkasten 3 (Wandfeld 2/3)

el. Wid. [MΩ]	1	1.1.5	KMD Nr. 2946	---	1030	200		35	27
	2	2.1.5	KMD Nr. 2947	---	980	50		30	25
	3	3.1.5	KMD Nr. 2943	---	980	4	100	0.04	0.11
	4	4.1.5	KMD Nr. 2941	---	980	25	10	1.1	0.16
	5	5.1.4	KMD Nr. 2948	---	980	0.01	0.7	0.3	0.01
	6	1.2.2	KMD Nr. 2000	---	1310	200		200	200
	7	2.2.2	KMD Nr. 2959	---	1310	200		200	200
	8	3.2.2	KMD Nr. 2960	---	1310	200		200	200
	9	4.2.2	KMD Nr. 2957	---	1310	200		200	200
	10	5.2.2	KMD Nr. 2951	---	1310	200		200	200
	11	3.1.4	einb. Anker	---	980	30		5	3.7
	12	3.1.6	einb. Anker	---	980	4		2	45

### Riegel Wandkopf und Longarine 6 bis 10, Messkasten 4 (Wandfeld 7/8)

el. Wid. [MΩ]	1	6.1.4	KMD Nr. 2944	---	980	0.01	7	4.2	1.2
	2	7.1.4	KMD Nr. 2938	---	980	0.4	2	1.6	0.5
	3	8.1.3	KMD Nr. 2930	---	1310	0.01	0.2	0.02	0.08
	4	9.1.5	KMD Nr. 2945	---	980	0.01	16	5.5	2.8
	5	10.1.5	KMD Nr. 2942	---	1000	0.05	0.3	2.2	0.19
	6	6.2.2	KMD Nr. 2956	---	1310	200		200	200
	7	7.2.2	KMD Nr. 2953	---	1310	200		200	200
	8	8.2.2	KMD Nr. 2954	---	1010	200		200	200
	9	9.2.2	KMD Nr. 2955	---	1310	200		100	200
	10	10.2.2	KMD Nr. 2952	---	1310	200		80	200
	11	7.1.3	einb. Anker	---	980	200		200	200
	12	7.1.5	einb. Anker	---	980	200		200	200

**Riegel Wandkopf 11 bis 13 und Longarine 11 bis 12,  
Messkasten 5 (Wandfeld 12/13)**

	Position Nr.	Anker Nr.	Messung	*) Geräte-einstellung	P <sub>0</sub> [kN]	Erneuerung Kopfschutz			
						VAG, Be	He	VAG, Rö	VAG, Rö
						11.01.05 schön, 7°C	03.06.05 schön, 30°C	06.09.05 schön, 26°C	27.07.06 schön, 30°C
el. Wid. [MΩ]	1	11.2.2	KMD Nr. 2950	---	1310	200		50	29
	2	12.2.2	KMD Nr. 2949	---	1310	200		0.01	0.01
	3	11.1.5	KMD Nr. 2934	---	1310	0.26	0.2	0.16	2.3
	4	12.1.5	KMD Nr. 2931	---	1310	25	12	3.5	0.7
	5	13.1.5	KMD Nr. 2914	---	1310	32	12	0.32	0.17

**Riegel Wandkopf 14, Messkasten 6 (Wandfeld 14)**

Anker System B

el. Wid. [MΩ]		14.1	KMD Nr. 0225698	---	1090	1.2		0.38	0.8
		14.7	KMD Nr. 0225699	---	1090	6		0.34	0.47

**Riegel Wandkopf 15 bis 20, Messkasten 7 (Wandfeld 17/18)**

el. Wid. [MΩ]	1	15.1.4	KMD Nr. 2912	---	1310	0.38	1.2	0.42	0.49
	2	16.1.4	KMD Nr. 2935	---	1310	20	14	3	0.98
	3	17.1.4	KMD Nr. 2841	---	1310	0.14	3.2	1.8	0.01
	4	18.1.4	KMD Nr. 2837	---	1310	30	14	5.0	1.5
	5	19.1.3	KMD Nr. 2828	---	1310	4.2	2.1	9	1.4
	6	20.1.3	KMD Nr. 2821	---	1090	50	2.5	0.3	0.5

Bemerkung: Messankerschächte der Anker Wandkopfriegel am 11.01.2005 teilweise mit Wasser gefüllt

#### A4. SBB Stützwände Borntunnel Süd (Aarburg, Kanton Solothurn))

Typ: Ankerriegel und Verstärkung von verankerten Bohrpfahlwänden

Baujahr: 2004

Anzahl permanente Anker: 152 Stück

Ankertypen:

80 Anker à 10 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1090 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 8 \text{ bis } 39 \text{ m}$

72 Anker à 6 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 500 - 600 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 9 \text{ bis } 23 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (Ende 2004)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	145 Stück	95%	99%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	6 Stück	4%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	1 Stück	1%	1%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 41 Messanker und 8 einbetonierte Anker mit Kabel zur Messung von  $R_I$

Kontrollanker: 77 Stück

Bisherige Messungen am Messkasten in beiliegender Tabelle (2 Seiten):

## Born Stützwand Süd

### Hangriegel 6 bis 10 Messkasten 1 (Wandfeld 8)

	Position Nr.	Anker Nr.	Messung	*) Geräte-einstellung	P <sub>0</sub> [kN]	Erneuerung Kopfschutz			
						VAG, Be	He	VAG, Rö	VAG, Rö
						11.01.05 schön, 7°C	03.06.05 schön, 30°C	06.09.05 schön, 26°C	27.07.06 schön, 30°C
el. Wtd. [MΩ]	1	6.1.3	KMD Nr. 2840	---	1090	100		25	9.5
	2	7.1.4	KMD Nr. 2835	---	1090	200		40	57
	3	8.1.3	KMD Nr. 2922	---	1090	200		200	200
	4	9.1.3	KMD Nr. 2839	---	1090	75		11	12
	5	10.1.1	KMD Nr. 2933	---	1090	30		0.01	0.01

### Hangriegel 10 bis 12, Messkasten 2 (Wandfeld 12)

el. Wtd. [MΩ]	1	10.0.3	KMD Nr. 2919	---	1090	200		14	59
	2	11.1.1	KMD Nr. 2939	---	1090	100		9	14
	3	11.0.1	KMD Nr. 2511	---	570	200		150	350
	4	12.1.1	KMD Nr. 2940	---	1090	0.01		0.01	0.01
	5	12.0.1	KMD Nr. 2845	---	990	100		6.5	200
	6	13.1.3	KMD Nr. 2918	---	1090	40		7	8.5
	7	14.1.4	KMD Nr. 2836	---	930	0.75		0.28	2.9

### Wand Boningerstrasse Wandfeld 2 und 3, Messkasten 3 (Ecke Wandfeld 2)

el. Wtd. [MΩ]	1	2.1.4	KMD Nr. 2513	---	500	200		18	5
	2	3.1.4	KMD Nr. 2512	---	500	200		20	150
	3	2.2.4	KMD Nr. 2522	---	500	20		200	200
	4	3.2.4	KMD Nr. 2521	---	500	200		200	200
	5	2.3.3	KMD Nr. 2391	---	500	0.11	0.34	0.42	7
	6	3.3.3	KMD Nr. 2393	---	500	40	0.8	0.54	2.4
	7	2.1.1	einb. Anker	---	--	200		200	200
	8	2.1.2	einb. Anker	---	--	200		200	200
	9	2.3.1	einb. Anker	---	--	7.5		50	46
	10	2.3.2	einb. Anker	---	--	0.01		0.01	0.01

**Wand Boningerstrasse Wandfeld 4 und 5,  
Messkasten 4 (Ecke Wandfeld 5)**

Erneuerung  
Kopfschutz

	Position Nr.	Anker Nr.	Messung	*) Geräte-einstellung	P <sub>0</sub> [kN]	VAG, Be	He	VAG, Rö	VAG, Rö
						11.01.05	03.06.05	06.09.05	27.07.06
						schön, 7°C	schön, 30°C	schön, 26°C	schön, 30°C
el. Wld. [MΩ]	1	4.1.4	KMD Nr. 2372	---	500	200		200	200
	2	5.1.4	KMD Nr. 2514	---	500	200		200	200
	3	4.2.4	KMD Nr. 2525	---	500	200		200	200
	4	5.2.4	KMD Nr. 2524	---	400	200		200	200
	5	4.3.3	KMD Nr. 2519	---	500	100		25	10
	6	5.3.3	KMD Nr. 2520	---	430	33		7.5	5
	7	5.1.7	einb. Anker	---	--	11		200	200
	8	5.1.8	einb. Anker	---	--	200		200	200
	9	5.3.5	einb. Anker	---	--	0.01		0.06	31
	10	5.3.6	einb. Anker	---	--	0.01		0.01	0.01

**Wand längs SBB 10 bis 14, Messkasten 5 (Wandfeld 8)**

el. Wld. [MΩ]	1	6.3.2	KMD Nr. 2908	---	1090	200		0.3	0.6
	2	6.2.1	KMD Nr. 2926	---	1090	75		200	200
	3	7.3.2	KMD Nr. 2927	---	1090	200		200	200
	4	7.2.1	KMD Nr. 2928	---	1090	200		200	200
	5	8.4.4	KMD Nr. 2844	---	1090	200		200	200
	6	8.3.2	KMD Nr. 2924	---	1090	200		0.18	0.2
	7	8.2.3	KMD Nr. 2937	---	1090	200		200	200
	8	9.4.2	KMD Nr. 2916	---	1090	200		200	200
	9	9.3.2	KMD Nr. 2925	---	1090	200		200	200
	10	9.2.2	KMD Nr. 2936	---	1090	200		200	200

**Wand längs SBB 10 bis 14, Messkasten 6 (Wandfeld 11)**

el. Wld. [MΩ]	1	10.2.4	KMD Nr. 2843	---	1090	0.06		0.3	0.55
	2	11.2.2	KMD Nr. 2846	---	1090	200		200	200
	3	12.3.1	KMD Nr. 2909	---	1090	200		200	200
	4	12.2.2	KMD Nr. 2910	---	1090	5		12	15
	5	13.3.1	KMD Nr. 2911	---	1090	200		200	200
	6	13.2.2	KMD Nr. 2929	---	1090	200		200	200
	7	14.2.1	KMD Nr. 2516	---	540	200		200	200

## A5. A4, Stützwand Isenberg (Affoltern, Kanton Zürich)

Typ: verankerte Bohrfahlwand

Baujahr: 2005

Anzahl permanente Anker: 247 Stück

Ankertypen: 7/13 und 12/13, 6 bis 8 Litzen, Felsanker,  $P_o = 590$  bis  $880$  kN,  $l_{fr} = 16$  bis  $46$  m

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (2005)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1$ M $\Omega$	234 Stück	95%
$R_I$ 0.1 bis 1 M $\Omega$	7 Stück	3%	
$R_I < 0.1$ M $\Omega$	6 Stück	2%	2%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 25 Messanker

Übrige Anker einbetoniert

Bisherige Messungen am Messkasten:

Messwerte in Megaohm

Anker Nr.	Abnahme	25.4.2006	10.5.2006	20.9.2006
3	200	10	10	5.2
12	200	11	7	3.9
21	200	7	11	7
31	200	100	170	67
41	200	30	26	10
51	20	10	12	6.4
61	8	100	68	22
70	6	200	140	214
80	200	50	80	40
90	100	100	110	40
100	200	50	40	18
109	200	40	37	17
119	200	40	45	16
129	200	50	69	26
139	200	40	36	14
148	25	100	180	71
157	200	25	32	17
167	0.3	0.36	0.35	0.38
179	200	0.02	0.03	0.04
190	200	200	200	200
200	200	16	19	13
211	200	50	37	51
220	200	10	15	4.7
229	0.02	0.01	0.01	0.01
239	200	10	11	4.8

## B. Ankersystem B

### B1. A2 Acheregggtunnel, Portalzone Süd (Hergiswil, Kanton Nidwalden)

Typ: Felssicherung, Verstärkung einer bestehenden Verankerung

Baujahr: 1993

Anzahl permanente Anker: 3 Stück

Ankertypen: 3 Anker 5-19, 15 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1500 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 22 \text{ bis } 50 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (3. November 1993)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	67%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	1 Stück	33%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	0 Stück	0%	0%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 2 Messanker und 1 Kontrollanker

Bisherige Messungen am Messkasten:

Messwerte in  $\text{M}\Omega$

Datum	Nr. 101	Nr. 102	Nr. 104
03.11.1993	3	0.14	1.8
14.02.1994	0.11	0.17	0.08
17.05.1994	0.09	0.18	0.3
08.09.1994	0.06	0.18	0.12
05.12.1994	0.05	0.18	0.05
14.11.1995	0.05	0.18	0.01
27.08.1996	3.2	0.16	0.02
31.10.1996	5.5	0.17	0.01
01.07.1997	20	0.17	50
22.12.1997	12	0.15	50
26.02.1998	14	0.2	200
08.05.1998	6.5	0.2	200

neue Messkabel eingebaut (Fabrikationsfehler)

neue Kraftmessdosen eingebaut (Blitzschlag)

## B2. NOK Kraftwerk Eglisau, Wehrpfeiler (Eglisau, Kanton Zürich)

Typ: Verankerung von bestehenden Pfeilern

Baujahr: 1994/95

Anzahl permanente Anker: 45 Stück

Ankertypen:

45 Anker ED5-19/14, 14 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1500 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 20 \text{ bis } 37 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (1994/95)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	35 Stück	78%	96%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	8 Stück	18%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	4%	4%

Keine Überwachungsmessungen vorhanden

### B3. A1 Wintherthur - Wil, Hangsicherung Eggwald (Attikon, Kanton Zürich)

Typ: Hangsicherung, Verstärkung der verankerten Bohrpfahlwand

Baujahr: 1996

Anzahl permanente Anker: 94 Stück

Ankertypen: 94 Anker EF-5/4, 4 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 430 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 \text{ bis } 14 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (1996)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	89 Stück	95%	97%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	2%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	3 Stück	3%	3% *)

\*) 1 Hüllrohrverletzung durch Bauarbeiten und 1 Beschädigung während Ankerversuch

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 7 Messanker und 6 Kontrollanker

Einbetonierte Anker: 81 Stück

Bisherige Messungen:

Tabelle mit manuellen Messungen (1 Seite)

### A1.1.5 Hangsicherung Eggwald - Attikon

#### Korrosionsschutzmessungen (el. Widerstände in MOhm)

Datum	Anker Nr.													Bemerkungen
	104M	112	120M	125	131M	139	146M	153	161M	169	176M	184	192M	
Oktober 1996	200	200	100	75	100	200	200	200	200	200	200	200	100	direkt am Anker
28.02.1997	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	0.2	200	200	Am Messkasten
14.03.1997	200	200	100	200	80	200	100		200	200	100	200	80	Messung Dr. V. AG
10.04.1997	100	200	50	200	100	200	80		200	200	200	200	90	Messung Dr. V. AG
18.09.1997	30	100	70	90	70	150	30	70	200	200	100	100	70	Messung TBA ZH
10.03.1998	200	100	25	100	80	200	90	70	75	200	12	12	0.01	"
22.10.1998	8	100	6	100	30	200	25	75	75	200	25	25	50	"
29.03.1999	2.5	100	1.1	100	25	150	25	50	2.5	200	3	0.01	0.02	"
06.10.1999	2.4	100	2.8	75	16	200	14	8	3.8	200	3.1	0.2	4.8	"
07.04.2000	8	100	6	100	30	200	200	50	0.03	200	0.02	0.01	0.02	"
25.09.2000	18	200	27	80	100	200	100	80	30	200	50	3	30	"
27.03.2001	0.8	100	0.28	7	16	200	16	12	0.7	200	0.04	0.08	2	"
19.09.2001	2.4	80	4	100	16	100	14	30	5.5	100	7	0.12	3.4	"
14.11.2001	17	200	25	200	100	200	30	100	2.0	200	11	0.02	200	Hauptinspektion, Dr. V. AG
14.03.2002	1	100	0.5	100	2	100	18	80	0.5	200	0.1	0.02	1.6	TBA ZH
26.09.2002	1.6	16	1.4	100	2.5	100	18	100	2.6	200	5	0.04	2	TBA ZH
03.04.2003	1	100	0.4	100	2	100	20	100	0.05	200	0.02	0.12	0.03	TBA ZH
26.05.2004	0.6	100	0.18	100	30	200	16	100	100	200	200	200	50	TBA ZH
21.06.2005	200	200	200	200	200	200	200	*)	200	200	3	0.5	20	TBA ZH
14.06.2006	200	200	200	200	200	200	200	*)	200	200	1.8	9	9	TBA ZH

\*) nicht messbar

#### **B4. A8 Loppertunnel Stützwand Südportal (Alpnachstad, Kanton Obwalden)**

Typ: Verstärkung von verankerten Elementwänden

Baujahr: 1998

Anzahl permanente Anker: 44 Stück

Ankertypen: 44 Anker EG 5-12, 12 Litzen, mehrheitlich Felsanker,  $P_0 = 1140 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 15 \text{ bis } 44 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (18.11.1998)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	39 Stück	89%	96%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	3 Stück	7%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	4%	4%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 13 Messanker

Kontrollanker: 31 Stück

Bisherige Messungen am Messkasten in beiliegender Tabelle (1 Seite):

A8 Loppertunnel Portal Süd  
 Verstärkung Wand 3 und Ersatzmassnahme Wand 1

**Korrosionsschutzmessungen**

Widerstandsmessung I in MΩ		VAG								
	Abnahme- messung	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung	5. Messung	6. Messung	7. Messung	8. Messung	
<b>Wand 3</b>	Nr.	18.11.1998	01.12.1998	22.11.1999	16.11.2000	18.11.2005	12.11.2001	25.11.2002	24.10.2003	03.11.2004
Rippe 4	4.2	200	200	200	70	100	100	50	100	50
	4.5	70	30	50	20	30	30	2.8	2	13
Rippe 7	7.2	> 200	200	50	50	100	100	18	30	20
	7.4	170	100	40	50	100	100	18	30	20
	7.6	42	50	100	40	50	50	20	1.6	0.8
Rippe 10 / 11	10.2	> 200	200	200	100	200	80	14	50	18
	10.4	> 200	100	100	50	200	60	10	40	16
	10.5	2.8	3	4	4	4	1.5	0.32	1.2	0.6
	11.3	200	80	100	60	100	80	30	100	50
Rippe 12	12.2	> 200	200	200	100	100	100	50	100	100
	12.5	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.02
<b>Wand 1</b>	15.2	> 200	200	200	200	80	200	100	100	50
	15.5	0	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Permanente, vorgespannte Boden- und Felsanker:  
 Fluktuationen des elektrischen Widerstands

Ankersystem B

## B5. A2 Seelisbergtunnel, Amdenermergelstrecke (Beckenried, Kanton Nidwalden)

Typ: Verstärkung der Verankerung gegen Quellhebungen

Baujahr: 1999 - 2000

Anzahl permanente Anker: 381 Stück

Ankertypen: 381 Anker EG 5-12, 12 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1310 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 \text{ bis } 14 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (2000)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	339 Stück	89%	95%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	23 Stück	6%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	19 Stück	5%	5%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 16 Messanker

Übrige Anker als Kontrollanker, jedoch einbetoniert

Keine Überwachungsmessungen vorhanden

## B6. NOK Kraftwerk Eglisau, Zufahrtsstrasse rechtes Ufer (Deutschland)

Typ: Hangsicherung, verankerte Betonriegel

Baujahr: 2002

Anzahl permanente Anker: 20 Stück

Ankertypen:

20 Anker EG5-12/10, 10 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1000 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 25 \text{ bis } 30 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (2002)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	18 Stück	90%	100%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	10%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	0 Stück	0%	0%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 7 Messanker

Kontrollanker: 13 Stück

Keine Überwachungsmessungen vorhanden

## B7. Schinstrasse, Hangsicherung Caselertobel (Thuisis - Tiefencastel, Kanton GR)

Typ: Hangsicherung, verankerte Betonriegel

Baujahr: 2003

Anzahl permanente Anker: 56 Stück

Ankertypen:

56 Anker EF 5-12, 12 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 1310 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 22 \text{ bis } 50 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (Dezember 2003)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	52 Stück	93%	100%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	7%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	0 Stück	0%	0%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 16 Messanker

Übrige Anker als Kontrollanker

Bisherige Messungen:

Messwerte in Megaohm

Anker Nr.	Dez. 2003	14.9.2004	22.7.2005	12.4.2006
1.3	>200	200	200	5
1.9	1.8	200	200	2.6
2.4	>200	0.005	0.005	0.01
2.9	>200	0.005	0.005	0.01
3.3	>200	200	200	16
3.7	>200	200	200	9
4.3	>200	200	200	30
4.7	>200	200	200	30
5.2	2	0.04	0.05	0.06
5.6	>200	200	200	20
6.3	>200	100	85	30
6.9	>200	80	50	40
7.3	40	150	150	20
7.8	40	180	180	200
8.3	>200	0.02	0.01	0.02
8.7	>200	200	200	100

Bemerkung:

Die Ursache des starken Widerstandsabfalls der Anker 2.4, 2.9, 5.2 und 8.3 wird noch untersucht (Inspektion und Überprüfung von Ankerkopf und Messanlage)

## C. Ankersystem C

### C1. Lukmanierstrasse, Medelserrheinbrücke (Disentis, Kanton Graubünden)

Typ: Ersatz der Verankerung des Brückenendfeldes

Baujahr: 1998

Anzahl permanente Anker: 8 Stück

Ankertypen:

8 Anker à 7 bis 9 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 760 - 980 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 7 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (1998)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	7 Stück	88%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	1 Stück	12%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	0 Stück	0%	0%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 8 Messanker

Bisherige Messungen:

Messwerte in Megaohm

Anker Nr.	1.1	1.3	2.2	2.3	3.1	3.3	4.2	4.3
Datum								
17.12.1998	2.44	35.7	3.15	3.02	9.39	2.47	0.48	1.29
30.05.2001	2.2	30	3.5	3	10	2	0.5	1
08.01.2003	0.12	200	200	3	3	0.18	2.6	2.4

## C2. Hauetli I (A8, Alpnachstad, Kanton Obwalden)

Typ: Hangsicherung, verankerte Betonriegel

Baujahr: 1999

Anzahl permanente Anker: 47 Stück

Ankertypen: Anker à 12 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1320 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 13 \text{ bis } 18 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	38 Stück	81%	91%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	5 Stück	10%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	9%	9%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 4 Messanker

Übrige Anker: 43 Kontrollanker

Bisherige Messungen Messanker (Messwerte in  $\text{M}\Omega$ )

Anker Nr.	H2.1M	H3.3M	G2.2M	G2.6M
Abnahmewert				
Herbst 1999	>200	5.2	25	62
18.11.1999	12.7	18.5		
20.04.2000			200	200
16.11.2000	200	1	200	18
12.11.2001	200	0.7	200	25
25.11.2002	10	0.2	16	17
24.10.2003	5	0.1	6	50
03.11.2004	12	0.06	0.22	3.6
04.04.2005	200	1.8	200	200
18.11.2005	200	0.5	200	50

Vor Rodung \*)  
Nach Rodung \*)

\*) Brombeerranken wuchsen bei der Kabeldurchführungsöffnung in die Schutzhaube und überbrückten die elektrische Isolation des Ankerkopfes!

### C3. SBB Stützmauern Immensee - Arth Goldau (Goldau, Kanton Schwyz)

Typ: Verstärkung von Stützmauern mit verankerten Betonriegeln

Baujahr: 1999

Anzahl permanente Anker: 38 Stück

Ankertypen: 38 Anker à 4 Litzen, Fels- und Lockergesteinsanker,  $P_0 = 430 - 545 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 14 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (Juli 1999)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	37 Stück	97%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	1 Stück	3%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	0 Stück	0%	0%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 9 Messanker

Kontrollanker: 29 Stück

Bisherige Messungen, Messwerte in Megaohm

Anker Nr.	Juli 1999	Juni 2006
21.1	>200	3.4
21.2	>200	0.6
21.3 M	>200	0.3
21.4	2.46	2.3
21.5	0.189	100
21.6	>200	0.06
21.7 M	>200	100
21.8	>200	0.12
21.9	>200	2.6
21.10	>200	4
21.11 M	199	40
21.12	104	0.2
21.13	>200	200
21.14	>200	200
21.15	>200	2
21.16	>200	200
21.17 M	>200	200
21.18	>200	200
21.19	>200	1.3
21.20	>200	1.3
21.21	>200	1.4

Anker Nr.	Juli 1999	Juni 2006
52.1	>200	100
52.2	>200	2.5
52.3 M	>200	200
52.4	>200	0.01
52.5	>200	0.8
52.6 M	>200	0.12
52.7	>200	200
86.1	98	200
86.2	>200	7.5
86.3 M	>200	0.06
86.4	>200	0.01
86.5	>200	200
86.6	>200	0.5
86.7 M	>200	3.8
86.8	>200	0.06
86.9 M	138	0.01
86.10	>200	0.06

M = Messanker

#### C4. Tschiertscherstrasse, Ricaldei (Passugg / Praden, Kanton Graubünden)

Typ: Hangsicherung, verankerte Betonelemente

Baujahr: 1999 - 2000

Anzahl permanente Anker: 225 Stück

Ankertypen: 225 Anker à 10 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 980$  bis  $1000$  kN,  $l_{fr} = 22$  bis  $31$  m

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_i$  (2000)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_i > 1 \text{ M}\Omega$	130 Stück	58%	74%
$R_i \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	37 Stück	16%	
$R_i < 0.1 \text{ M}\Omega$	58 Stück	26%	26%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 38 Messanker

Kontrollanker: 187 Stück

Bemerkung:

Die Betonplatten erlitten z.T. beträchtliche Setzungen infolge der grossen Ankerkräfte.

Bisherige Messungen:

Beiliegende Tabelle (1Seite)

## Tschierscherstrasse, Ricaldei

Korrosionsschutzmessungen (el. Widerstände, Werte in Megaohm)

### Bereich Hangbrücke

Messanker Nr.	Datum/Visum	Datum/Visum	Datum/Visum	Datum/Visum
	Messung zur Bauabnahme Nov. 2000	31.10.2001 / Me, AL	10.06.2004 / Rö	27.10.2004 / Rö
H 2.1	OL	> 200	> 200	200
H 2.2	0.104	0.09	0.03	0.03
H 5.1	0.13	n.m.	0.11	0.12
H 5.3	> 200	> 200	> 200	200
H 7.1	0.14	0.06	0.02	0.02
H 7.3	> 200	> 200	> 200	200
H 10.1	0.11	0.05	0.06	0.06
H 10.3	0.8	0.36	0.12	0.17
H 12.1	> 200	> 200	200	200
H 12.3	> 200	> 200	1	0.5
H 15.1	0.01	0.023	0.01	0.01
H 15.3	0.08	n.m.	0.1	0.1
H 17.1	> 200	0.15	0.1	0.12
H 17.3	3.5	0.1	0.09	0.09
H 20.1	50	50	15	12
H 20.3	0.3	30	1	1
H 26.1	0.01	0.028	0.03	0.02
H 26.3	> 200	> 200	200	100
H 30.1	30	> 200	200	30
H 30.3	15	> 200	> 200	70

n.m.: nicht messbar

### Pfeilerriegel

Messanker Nr.	Datum/Visum	Datum/Visum	Datum/Visum	Datum/Visum
	Messung zur Bauabnahme Mai 2000	31.10.2001 / Me, AL	10.06.2004 / Rö	27.10.2004 / Rö
P 1.2	0.05	0.075	0.06	0.04
P 1.4	0.32	0.27	0.1	0.1
P 4.2	1.5	0.48	0.35	0.46
P 4.4	2	22	> 200	200
P 6.5	> 200	> 200	> 200	0.8
P 6.6	14	17	12	1.3
P 8.2	> 200	> 200	100	6.2
P 8.6	> 200	> 200	> 200	1.6
P 11.2	0.04	0.03	0.03	0.03
P 11.6	0.9	0.7	4.2	4.6
P 15.1	0.8	0.55	0.08	0.08
P 15.5	0.02	0.023	0.01	0.01
P 17.1	0.7	1.1	1.4	1.4
P 17.4	0.04	0.05	0.04	0.03
P 20.1	> 200	> 200	> 200	11
P 20.4	> 200	> 200	> 200	200
P 22.1	7.5	19	100	50
P 22.4	20	40	100	200

### C5. Pfahlwand obere Holzgrube (S9, Sihltalstrasse, Adliswil, Kanton Zürich)

Typ: Verankerte Bohrpfahlwand, Verstärkung

Baujahr: 2000-2001

Anzahl permanente Anker: 155 Stück

Ankertypen: 143 Anker à 5 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 420 - 545 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 \text{ bis } 17 \text{ m}$

12 Versuchsanker, 6 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 420 - 545 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 12 - 17 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	105 Stück	68%	95%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	42 Stück	27%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	8 Stück	5%	5%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 13 Messanker

Kontrollanker: 6 Stück

Übrige Anker: Einbetoniert

Bisherige Messungen in beiliegender Tabelle (1 Seite)

## Pfahlwand obere Holzgrube (S9, Sihltalstrasse, Adliswil, Kanton Zürich)

Elektrische Widerstände  $R_1$  Messungen Messanker (Messwerte in  $M\Omega$ )

Anker Nr.	113 M	123 M	131 M	140 M	151 M	161 M	170 M	179 M	189 M	204 M	222 M	244 M	265 M
Am Ankerkopf	3.59	3.18	3.58	0.65	>200	18.6	>200	>200	>200	>200	36	>200	1.1
Abnahme	0.11	0.02	2.3	2.1	23	54	8.8	252	0.524	200	35.6	3.2	50.5
16.02.2001	0.08	0.01	0.07	0.2	0.5	200	1.6	0.04	4	10	8	0.04	0.2
Aug 01	0.11	0.014	1.12	3.36	1.8	4.85	1.65	0.386	41.2	6.94	8.23	1.77	2.9
08.10.2001	0.07	0.01	0.42	0.09	0.18	1	0.32	0.01	2.8	2.9	1.5	0.2	1
07.12.2001	0.12	0.05	0.26	0.28	0.41	0.16	1.4	0.14	4.6	0.51	0.3	0.51	1.2
27.10.2003	0.16	0.02	0.85	0.05	0.55	1.9	0.48	0.01	2.8	3	2.5	0.3	1
vor Kontrolle 16.4.2004	0.23	0.02	0.02	0.03	0.16	3.1	0.38	0.01	100	0.32	100	0.08	0.18
nach Kontrolle 16.4.2004 *)	0.24	0.02								3.4	200	50	6.5
vor Kontrolle 26.5.2004	0.25	0.02	0.7	0.05	1.8	12	0.6	0.01	>200	2.2	150	100	14
nach Kontrolle 26.5.2004*)			20	1.5	200	26	0.8	200	>200				
Schlussm. 26.5.2004*)	0.26	0.02	13	1.2	200	20	0.8	200	>200	3.1	200	50	13
22.06.2005	0.26	0.02	13	0.7	200	8	0.8	200	200	0.18	200	44	2
02.11.2005	0.22	0.02	1.2	0.6	4.5	8	0.4	0.28	0.46	0.85	7	4	0.36

\*) verschmutzte Ankerköpfe gereinigt, Kurzschluss Haube-Litze bei Nr. 179 behoben

## C6. Huetli II B (A8, Alpachstad, Kanton Obwalden)

Typ: Hangsicherung, verankerte Betonriegel

Baujahr: 2000-2001

Anzahl permanente Anker: 144 Stück

Ankertypen: 144 Anker à 12 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1320 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 30 \text{ bis } 37 \text{ m}$

Von den 144 Ankern wurden 18 Stück nachträglich als Zusatzanker ausgeführt, weil die Ausfallquote der el. Widerstände bei den Ankern die 10%- Limite überstieg.

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_l$

alle Anker

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_l > 1 \text{ M}\Omega$	65 Stück	45%	74%
$R_l \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	42 Stück	29%	
$R_l < 0.1 \text{ M}\Omega$	37 Stück	26%	26%

nur Zusatzanker

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_l > 1 \text{ M}\Omega$	5 Stück	28%	72%
$R_l \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	8 Stück	44%	
$R_l < 0.1 \text{ M}\Omega$	5 Stück	28%	28%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 12 Messanker

Übrige Anker: 132 Kontrollanker

Bisherige Messungen Messanker (Messwerte in  $\text{M}\Omega$ )

Datum	I 2.2 M	K 1.2 M	L 2.2 M	M 2.2 M	M 5.2 M	N 2.2 M
11.05.2001	1,63	0,01	80	0,17	86	50
12.11.2001	1,2	0,08	1,2	0,2	0,04	100
30.01.2002	0.4	0.07	0.28	0.12	0.22	0.7
25.11.2002	0.07	0.01	0.08	0.03	0.07	0.09
23.03.2003	200	0.01	200	0.03	200	20
23.10.2003	4.1	0.01	200	0.04	200	5.3
03.11.2004	6	0.01	10	0.02	8	0.6
18.11.2005	4	0.01	80	0.01	100	3.5

Datum	N 4.2 M	O 3.2 M	P 4.2 M	Q 3.2 M	R 2.2 M	S 2.2 M
11.05.2001	0,38	81	0,48	0,01	>200	>200
12.11.2001	1,0	0,01	0,01	2,2	3,0	3,0
30.01.2002	0.04	0.7	0.2	4.6	18	18
25.11.2002	0.01	0.07	0.01	0.04	0.05	0.05
23.03.2003	0.05	1.3	0.01	3.6	200	26
23.10.2003	0.04	1.2	0.01	4.2	200	11
03.11.2004	0.04	0.5	0.01	2	0.2*	2.4
18.11.2005	0.03	1.2	0.01	3.4	200	3.8

\*) R2.2 Wespennest im Messkasten, wurde im April 2005 entfernt

## C7. A2 Stützmauer Friedental (Luzern, Kanton Luzern)

Typ: Verstärkung der verankerten Stützwand (Bohrpfähle und Schlitzwandelemente)

Baujahr: 2001

Anzahl permanente Anker: 31 Stück

Ankertypen: Anker à 4 bis 6 Litzen, Lockergesteinsanker,  $P_0 = 380$  bis  $520$  kN,  $l_{fr} = 11 - 14$  m

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (März 2001)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	16 Stück	52%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	13 Stück	42%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	2 Stück	6%	6%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 3 Messanker

Übrige Anker als Kontrollanker

Bisherige Messungen

Messwerte in Megaohm

Datum	Nr. 3.1	Nr. 7.1	Nr. 10.1
15.03.2001	0.06	2.45	0.01
22.05.2003	0.01	100	20

Abnahmemessung

## C8. Waldheimstrasse (Zug, Kanton Zug)

Typ: Bohrpfahlwand und Ankerriegel als Baugruben- und Hangsicherung

Baujahr: 2003 - 2004

Anzahl permanente Anker: 67 Stück

Ankertypen: 67 Anker à 7 - 12 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 560 - 980 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 13 - 34 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (Juli / Sept. 2004)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	41 Stück	62%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$			
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	15 Stück	22%	
	11 Stück	16%	16%

7 Stück mit PUR-Injektion im inneren Ankerkopf nachträglich abgedichtet.

Davon 2 Stück ohne Erfolg ( $< 0.1 \text{ M}\Omega$ )

Weil die Ausfallquote der el. Widerstände bei den Ankern die 10%- Limite überstieg, wurden nachträglich 2 Zusatzanker angeordnet.

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 8 Messanker und 4 einbetonierte Bauwerksanker

Kontrollanker: 8 Stück

Übrige Anker einbetoniert.

Bisherige Messungen:

Manuelle Messungen, Messwerte in Megaohm

SGK

Ort	Messanker Nr.	Abnahme Jul./Sept.2004	Messkasten				
			21.1.2005	2.2.2005	13.9.2005	1.2.2006	21.2.2006
Riegel	2.7M	100			0.22	0.65	
	3.2M	100			1.2	0.23	
	5.7M	0.5			0.36	0.30	
	7.4M	5				0.13	
Pfahlwand Haus C	10.6M	70	0.01 *)	30	0.01**)		16.7
	11.7M	4	18	6.8	0.01**)		4.1
	11.9	200	200	200	50		>200
	11.10	2.7	30	30	2.4		54
Pfahlwand Haus B	12.6M	1.85	10	12	3.2		5.4
	12.13M	0.04	0.09	0.1	0.07		0.11
	12.15	5	9	11	5.5		7.3
	12.17	2.9	8.5	9	0.03		0.04

M= Anker mit Kraftmessdose

\*) Schutzhaube berührte Litze, wegen langen Litzenüberständen

\*\* ) Kraftmesskabel verursachte Kontakt mit dem Messkastengehäuse

## D. Ankersystem D

### D1. Huetli II B (A8, Alpnachstad, Kanton Obwalden)

Typ: Hangsicherung, verankerte Betonriegel

Baujahr: 2000-2001

Ankertypen:

6 Anker à 12 Litzen, Felsanker,  $P_0 = 1320 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 34 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	67%	83%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	1 Stück	16%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	1 Stück	17%	17%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 1 Messanker

Übrige Anker: 5 Kontrollanker

Bisherige Messungen Messanker (Messwerte in  $\text{M}\Omega$ )

Datum	P 2.2 M
12.11.2001	0,2
30.01.2002	0.18
25.11.2002	0.07
23.03.2003	0.12
23.10.2003	0.12
03.11.2004	0.1
18.11.2005	0.11

## E. Ankersystem E

### E1. RhB Hangsicherung Mülitobel (Saas, Kanton Graubünden)

Typ: Hangsicherung mit verankerten Betonriegeln und Verankerung von Brückenpfeilern

Baujahr: 2002

Anzahl permanente Anker: 118 Stück (Hangsicherung) plus 21 Stück (Brückenpfeiler)

Ankertypen: 4 Litzen à 140 mm<sup>2</sup>, Lockergesteinsanker, P<sub>0</sub> = 540 kN, l<sub>fr</sub> = 11 bis 21 m

Hangsicherung, Abnahmemessung elektrischer Widerstand R<sub>I</sub> (2002)

Messwerte	Anzahl Anker		
R <sub>I</sub> > 1 MΩ	61 Stück	52%	60%
R <sub>I</sub> 0.1 bis 1 MΩ	10 Stück	8%	
R <sub>I</sub> < 0.1 MΩ	47 Stück	40%	40%

Brückenpfeiler, Abnahmemessung elektrischer Widerstand R<sub>I</sub> (2003)

Messwerte	Anzahl Anker		
R <sub>I</sub> > 1 MΩ	8 Stück	38%	62%
R <sub>I</sub> 0.1 bis 1 MΩ	5 Stück	24%	
R <sub>I</sub> < 0.1 MΩ	8 Stück	38%	38%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 19 Messanker

Übrige Anker als Kontrollanker

Bisherige Messungen

Messwerte in Megaohm

Anker Nr.	Datum				
	12.12.2002	10.06.2003	12.11.2003	16.08.2004	08.11.2005
2.2	200	200	200	18	92
2.7	200	1	3.2	2.2	25
5.2	200	0.11	0.04	0.01	0.02
5.7	200	0.38	12	2	1
10.2	200	0.06	0.1	0.04	0.08
10.5	0.12	0.01	0.08	0.04	0.08
14.2	0.19	0.32	0.35	0.2	0.3
14.7	0.02	0.01	0.06	0.02	0.06
18.2	1.8	0.04	200	100	200
18.5	200	0.29	70	90	200
21.2	0.02	0.08	0.05	0.1	0.4
21.5	200	20	200	200	200
303		200	2.5	150	200
302		0.11	0.72	0.42	0.4
602		0.07	0.02	0.01	0.01
603		4.5	0.11	0.07	0.01
V1001		2	0.02	0.01	0.02
W2002		1.5	6.8	2.5	10
W3002		0.04	0.02	0.01	0.02

12.12.2002: Abnahmemessung am Ankerkopf

## E2. Kraftwerk Linth-Limmern, NESTIL (Linthal, Kanton Glarus)

Typ: Baugrube, verankerte Betonwand

Baujahr: 2005

Anzahl permanente Anker: 219 Stück

Ankertypen: 219 Anker 4T13S bis 15T13S, 4 bis 15 Litzen, Felsanker,

$P_0 = 315$  bis  $1300$  kN,  $l_{fr} = 12$  bis  $29$  m

Nach Übernahme des Kopfabdichtungssystems D

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (2005)

Messwerte	Anzahl Anker		
$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	209 Stück	95%	98%
$R_I 0.1 \text{ bis } 1 \text{ M}\Omega$	6 Stück	3%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	4 Stück	2%	2%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 29 Messanker

Kontrollanker: 190 Stück

Noch keine Folgemessungen vorhanden.

## F. Ankersystem F

### F1. Geschiebesammler KEB 1 und 2 (Beckenried, Kanton Nidwalden)

Typ: Bauwerkssicherung, verankerte Betonriegel

Baujahr: 2003

Anzahl permanente Anker: 30 Stück

Ankertypen: 30 Anker à 6 - 7 Litzen und 9 Litzen, Felsanker,

$P_0 = 950 - 1310 \text{ kN}$ ,  $l_{fr} = 24 \text{ bis } 38 \text{ m}$

Abnahmemessung elektrischer Widerstand  $R_I$  (21.4.2004)

Messwerte	Anzahl Anker		
	$R_I > 1 \text{ M}\Omega$	20 Stück	67%
$R_I \text{ 0.1 bis } 1 \text{ M}\Omega$	3 Stück	10%	
$R_I < 0.1 \text{ M}\Omega$	7 Stück	23%	23%

Mit Messkabel ausgerüstete Anker: 7 Messanker

Übrige Anker als Kontrollanker

Bisherige Messungen:

Messwerte in Megaohm

KEB 1

Anker Nr.	21.4.2004	15.10.2004	3.11.2004	7.4.2005
2	1	1.1	1.1	1
4	200	200	200	200
7	0.01	0.01	0.01	0.02

KEB 2

3	0.02	0.03	0.03	0.04
8	200	150	150	200
13	0.12	0.11	0.11	0.15
19	100	100	100	100