

# Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 10

**bast**

# Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln

von

Alfred Maaß  
Beata Krieger

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 10

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A – Allgemeines
- B – Brücken- und Ingenieurbau
- F – Fahrzeugtechnik
- M – Mensch und Sicherheit
- S – Straßenbau
- V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Am Alten Hafen 113 – 115, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 4 60 93 – 95, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 89201:  
Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln**

### Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon (0 22 04) 43 – 0  
Telefax (0 22 04) 43 – 8 32

### Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 4 60 93 – 95  
Telefax (04 71) 4 27 65

ISSN 0943-9293

ISBN 3-89429-912-6

Bergisch Gladbach, November 1995

## Kurzfassung · Abstract · Résumé

### Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Qualitätsunterschiede von marktgängigen Hydrophobierungsmitteln sowie deren Dauerhaftigkeit im Hinblick auf die wasserabweisende Wirkung untersucht.

Um die formulierte Zielsetzung zu erfüllen, wurden Betonplatten mit 14 verschiedenen Hydrophobierungsmitteln nach einer festgelegten Applikationsmethode behandelt. Anschließend wurden die hydrophobierten Platten für eine Dauer von 5 Jahren der freien Witterung ausgesetzt. Die erste Messung fand jeweils 28 Tage nach der Behandlung mit einem Hydrophobierungsmittel statt. Danach wurden die Messungen alle 6 Monate wiederholt. Mit den Messungen wurde im November 1989 begonnen. Sie wurden im Frühjahr 1995 abgeschlossen.

Es wurden insgesamt 3 Versuchsreihen durchgeführt, die sich voneinander entweder durch verschiedene Feuchtegehalte der zu hydrophobierenden Betonplatten (3,5 Gew.-% in Versuchsreihe 1 und 3 bzw. 4,5 Gew.-% in Versuchsreihe 2) oder aber durch die verschiedenen Hersteller (extern - Versuchsreihe 1 und 2, BAST - Versuchsreihe 3) unterscheiden.

Eine ausreichende Hydrophobierungsqualität der Betonplatten der Versuchsreihe 1 wurde nur mit 2 Produkten erreicht. Die Hydrophobierungsqualität bleibt bei diesen Produkten über 5 Jahre nahezu unverändert. In der Versuchsreihe 2 konnte mit keinem der 13 Hydrophobierungsprodukte eine ausreichende Qualität erreicht werden. Eine erneute Hydrophobierung nach 2-monatiger Austrocknungszeit der Betonplatten führte dazu, daß mit 7 Produkten eine ausreichende Hydrophobierungsqualität erreicht werden konnte. Die Qualität bleibt jedoch nur für 5 Produkte über die Versuchsdauer von 4 Jahren unverändert. In 3 wurde mit allen 5 Produkten eine sehr gute Hydrophobierungsqualität erzielt, die über eine Versuchsdauer von 4,5 Jahren nahezu konstant blieb.

### Long Term Tests Into Water Repellents

The quality of commercial water repellents and their long term water repelling performance have been studied within the scope of this research project.

For this purpose, concrete slabs were treated with 14 different water repellents following a defined method of application. The treated slabs were then placed outside and exposed to weathering for a period of five years. The first measurement took place 28 days after treatment in each case. Thereafter measurements were repeated every six months. The measurements began in November 1989 and were completed in the spring of 1995.

On the whole, the project comprised three test series. The distinguishing feature was on the one hand the moisture content of the slabs to be treated (3.5 % by weight in the case of test series 1 and 3 and 4.5 % by weight in the case of test series 2) and, on the other hand, the manufacturer of the water repellents (products from an outside company: test series 1 and 2; products from BAST: test series 3).

In the first test series, only two products were found to be of satisfactory quality as water repellents, showing nearly unchanged performance characteristics over the period of five years. In the second test series, none of the 13 water repellents was found to perform to satisfaction. Therefore, the treatment was renewed after having left the slabs drying for a period of two months. In that case, seven products were found to perform satisfactorily, but only five of them retained their quality as water repellents over the testing period of four years. In the third test series, the water repelling performance of all five products turned out to be very good, hardly changing in quality over the test period of four and a half years.

### Études de longue durée des agents d'imperméabilisation

Ce projet de recherche porta sur les différences de qualité entre les agents d'imperméabilisation courants et sur leur capacité de conserver leurs propriétés imperméabilisantes à longue durée.

A cet effet, des dalles en béton furent traitées de 14 types d'imperméabilisants selon une méthode d'application bien définie et ensuite ouvertement exposées aux intempéries pour une durée de cinq ans. Les premières mesures furent effectuées chaque fois 28 jours après l'application des imperméabilisants et d'autres mesures s'ensuivirent au rythme semestriel. Les mesures commencèrent en novembre 1989 et furent terminées au printemps 1995.

Au total, trois séries de tests furent réalisées. Elles se distinguèrent d'un côté par des pourcentages d'humidité différents des dalles en béton à imperméabiliser (3,5% en poids pour la première et la troisième série de tests, 4,5% en poids pour la deuxième série) et de l'autre côté par la provenance des produits de fabricants différents (fabricants externes pour la première et la deuxième série, produits de la BAST pour la troisième série).

Dans la première série de tests, seulement deux produits ont fait preuve d'une qualité d'imperméabilisation satisfaisante. Ces produits conservent une qualité imperméabilisante quasiment inchangée pour une durée de cinq ans. Dans la deuxième série, aucun des 13 produits testés n'a montré une qualité d'imperméabilisation satisfaisante. A la suite d'une nouvelle application des imperméabilisants, après dessiccation préalable des dalles en béton pour la durée de deux mois, sept produits ont présenté une qualité d'imperméabilisation suffisante. Cependant, cinq produits seulement ont pu conserver cette bonne qualité pour la durée de l'essai de quatre ans. Dans la troisième série, tous les cinq produits ont obtenu une très bonne qualité imperméabilisante, demeurant quasiment constante pour la durée d'essai de 4,5 ans.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7
<b>2</b>	<b>Untersuchungsprogramm</b> .....	7
2.1	Konzept.....	7
2.2	Ausführung.....	8
<b>3</b>	<b>Materialien</b> .....	9
3.1	Hydrophobierungsmittel.....	9
3.2	Betonplatten.....	10
3.2.1	Versuchsreihen 1 und 2.....	10
3.2.2	Versuchsreihe 3.....	10
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise</b> .....	11
4.1	Behandlung der Betonplatten...	11
4.1.1	Allgemeines.....	11
4.1.2	Versuchsreihe 1.....	11
4.1.3	Versuchsreihe 2.....	11
4.1.4	Versuchsreihe 3.....	12
4.2	Auswahlverfahren.....	12
4.3	Applikationsverfahren.....	12
4.4	Behandlung der hydrophobierten Betonplatten.....	12
4.5	Beschreibung des Meßverfahrens und der Meßeinrichtung.....	13
4.6	Durchführung der Messungen...	14
<b>5</b>	<b>Meßergebnisse</b> .....	14
5.1	Bewertungskriterien.....	14
5.2	Versuchsreihe 1.....	14
5.3	Versuchsreihe 2.....	18
5.4	Versuchsreihe 3.....	22
5.5	Zusammenfassung der Meßergebnisse und Schlußfolgerungen.....	23
<b>6</b>	<b>Hinweise für die Praxis</b> .....	27
<b>7</b>	<b>Weiteres Vorgehen</b> .....	27
	<b>Zusammenfassung</b> .....	28
	<b>Literatur</b> .....	30
	<b>Anlagen</b> .....	31



## 1 Einleitung

Grundsätzlich bedarf ein regelwerksgerecht hergestellter Beton keiner zusätzlichen Maßnahmen; insbesondere sollen Oberflächenschutzmaßnahmen nicht alternativ zu den vorgeschriebenen betontechnischen Maßnahmen planmäßig vorgesehen werden.

In Ausnahmefällen kann es zweckmäßig sein, einen Oberflächenschutz für Bauteile im Spritzwasserbereich vorzusehen. Vorbeugend gegen das Eindringen betonschädlicher Stoffe können beispielsweise neu erstellte Brückenkapfen geschützt werden.

Eine der möglichen Oberflächenschutzmaßnahmen zum temporären Schutz gegen kapillare Wasseraufnahme ist die Hydrophobierung, deren Funktion in der Verminderung bzw. in dem Erschweren der Benetzung der oberflächennahen Zone des Betons mit Wasser besteht. Die Hydrophobierung hebt die kapillare Saugkraft des Baustoffes gegenüber Wasser auf, so daß weder Wasser noch im Wasser gelöste Schadstoffe in die Betonmatrix eindringen können. Die meist dünnflüssigen Hydrophobierungsmittel werden auf die Betonoberfläche aufgebracht und dringen in der Regel mehrere Millimeter tief in das Betongefüge ein. Dabei kleidet der aus speziellen siliciumorganischen Substanzen bestehende Wirkstoff die Porenwandungen mit einem dünnen Film aus, der weder die Gasdiffusionseigenschaften, noch die mechanischen Eigenschaften des Betons merklich verändert [Sas-1].

Hydrophobierungsmittel werden von der chemischen Industrie seit geraumer Zeit angeboten und wurden bereits vielfach zum Schutz von Betonbauteilen eingesetzt. Vor allem hinsichtlich der Dauerhaftigkeit der wasserabweisenden Wirkung liegen unterschiedliche Erfahrungen vor. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die Wirksamkeit und insbesondere die Dauer der Wirksamkeit der Hydrophobierungsmittel lange Zeit nicht quantitativ bestimmt werden konnte. Erst im Jahre 1989 wurde in der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Kontrollgerät entwickelt [Gat-1], mit dessen Hilfe die Qualität von Hydrophobierungen auf Betonbauwerken zerstörungsfrei überprüft werden kann. Im Jahre 1990 wurde das genannte Meßgerät bereits in den ZTV-SIB 90 [BMV-1] zur Überprüfung der Hydrophobierungsqualität vorgeschrieben. Weiterhin wurden im genannten

Regelwerk Mindestanforderungen in Bezug auf die hydrophobierende Wirkung festgelegt.

Die Entwicklung des Meßgerätes, welches nach dem Prinzip der elektrischen Leitfähigkeit arbeitet, wurde auch zum Anlaß genommen, das Forschungsprojekt "Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln" zu formulieren, dessen Ziel es war, Qualitätsunterschiede zwischen verschiedenen marktgängigen Hydrophobierungsmitteln quantitativ zu erfassen und die Lebensdauer derartiger Oberflächenschutzstoffe zu untersuchen und somit eine erste Antwort auf die Frage zu erhalten, was quantitativ unter „temporär“ zu verstehen ist, d.h., wie lange unter praktischen Bedingungen mit der Dauerhaftigkeit einer Hydrophobierung zu rechnen ist. Da es sich bei dem Kontrollgerät um ein neuartiges Meßgerät handelte, sollte im Rahmen dieses Projektes gleichzeitig dessen Funktionstüchtigkeit sowie die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse in Dauerversuchen überprüft werden.

## 2 Untersuchungsprogramm

### 2.1 Konzept

Im Rahmen des Forschungsprojektes 89201 „Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln“ sollten in erster Linie die Qualitätsunterschiede von verschiedenen marktgängigen Hydrophobierungsmitteln sowie deren Dauerhaftigkeit im Hinblick auf die wasserabweisende Wirkung untersucht werden.

Um die Zielsetzung erfüllen zu können, wurden von einer Firma nach einer von der BASt festgelegten Rezeptur (vgl. Kap. 3.2) Betonplatten hergestellt. Diese wurden mit verschiedenen Hydrophobierungsmitteln (vgl. Kap 3.1) nach einer zuvor festgelegten Applikationsmethode (vgl. Kap. 4.3) behandelt. Anschließend wurden die hydrophobierten Platten für eine Dauer von 5 Jahren der freien Witterung auf dem BASt-Gelände ausgesetzt. Die erste Messung (Meßreihe 1 - MR 1) sollte jeweils 28 Tage nach der Behandlung mit Hydrophobierungsmitteln stattfinden. Danach sollten die Messungen alle 6 Monate in einem Zeitraum von 5 Jahren (MR 2 bis MR 11), jeweils im Frühjahr und Herbst, durchgeführt werden. Hierdurch sollte u.a. geklärt werden, inwieweit die Witterungsbedingungen die Meßergebnisse beeinflussen.

An dem Forschungsvorhaben beteiligten sich 5 Firmen, mit jeweils ca. 3 Hydrophobierungsprodukten. Da nicht jede Firma über 3 unterschiedliche Produkte verfügte, wurden einige Grundprodukte in verschiedenen Konzentrationen aufgebracht, so daß letztlich 11 Grundprodukte und 3 Produkte mit geringerem Wirkstoffgehalt (verdünnte Produkte; vgl. Kap. 3.1) untersucht wurden.

Es wurden zunächst zwei Versuchsreihen (VR 1 und VR 2) geplant, die sich voneinander durch verschiedene Feuchtegehalte der zu hydrophobierenden Betonplatten (3,5 Gew.-% in VR 1 bzw. 4,5 Gew.-% in VR 2) unterscheiden sollten. In der VR 2 sollte u.a. das Auftragen von Hydrophobierungsmitteln auf eine frische oder feuchte Betonoberfläche (Einfluß eines Schlagregens) simuliert werden.

Um eine sichere Aussage über die mittlere Qualität des jeweiligen Hydrophobierungsmittels erreichen zu können, wurden für jedes Produkt und jede Versuchsreihe jeweils 3 Platten verwendet. Dabei wurde davon ausgegangen, daß 4 Meßwerte je Platte (vgl. Kap. 4.5), also insgesamt 12 Meßwerte je Produkt, statistisch repräsentative Ergebnisse liefern.

Für die Vorversuche [Gat-1] wurden Platten mit Abmessungen von 30 cm \* 30 cm \* 10 cm verwendet, die aus einem Beton B 35 (Sieblinie B 16) hergestellt wurden. Für die hier beschriebenen Langzeituntersuchungen wurden Betonplatten mit Abmessungen von 30 cm \* 30 cm \* 7,5 cm verwendet. Die Meßfläche von 30 cm \* 30 cm wurde beibehalten, da sie ausreichend Platz bietet, um 4 Meßgeber aufsetzen zu können. Um Gewicht zu sparen, wurde die Höhe der Platten von 10 cm auf 7,5 cm verringert. Ein Größtkorn von 16 mm konnte bei dieser Plattendicke weiterhin verwendet werden.

In den Vorversuchen [Gat-1] wurden die Hydrophobierungsmittel auf die Oberfläche der Platten mehrmals naß mit einem Pinsel aufgetragen. In der Baupraxis werden die Hydrophobierungsmittel durch Pinseln oder Spritzen auf horizontale Flächen bzw. durch Fluten auf vertikale Flächen aufgetragen. Da es im Rahmen der Langzeituntersuchungen besonders wichtig war, die genaue Menge an aufgenommenem Hydrophobierungsmittel zu erfassen sowie gleiche Randbedingungen für alle Platten zu gewährleisten, wurden die Platten, abweichend von der in der Praxis üblichen Vorgehensweise, für eine be-

stimmte Zeit in das Hydrophobierungsmittel eingetaucht (vgl. Kap. 4.3).

## 2.2 Ausführung

Mit den eigentlichen Messungen (Meßreihe 1 - MR 1) wurde im November 1989 begonnen. Die ersten 2 Meßreihen (MR 1 und MR 2) verliefen nach dem festgelegten Ablaufplan. Nach einem Jahr mußte das Meßprogramm jedoch modifiziert werden, da aufgrund der Meßergebnisse in der Meßreihe 3 davon ausgegangen werden mußte, daß die Betonplatten aufgrund extrem hoher Verdichtung des Betons und vermutlich auch aufgrund der Zugabe von Fließmitteln für einige Hydrophobierungsmittel einen ungeeigneten Untergrund darstellten. In der Baupraxis hätten derartig gut verdichtete und nachbehandelte Bauteile nicht hydrophobiert werden müssen.

Als Konsequenz wurde eine weitere Versuchsreihe (VR 3) in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Die Probekörper für diese Versuchsreihe wurden nach der Rezeptur der Probekörper für die Versuchsreihen 1 und 2 (vgl. Kap. 3.2) in der BAST hergestellt. Der Feuchtegehalt der Betonplatten für diese Versuchsreihe wurde mit 3,5 Gew.-% festgelegt. Durch einen Vergleich mit den Meßergebnissen aus der VR 1 sollte der Einfluß unterschiedlicher Untergrundeigenschaften auf die erreichte Hydrophobierungsqualität gezeigt werden.

Als Ergebnis der VR 2 (Feuchtegehalt der Probekörper 4,5 Gew.-%) im ersten Jahr des Versuchsprogramms zeigte sich, daß stark wassergesättigte Betonoberflächen nicht erfolgreich hydrophobiert werden können. Auch hier mußte das Meßprogramm modifiziert werden. Die Betonplatten der VR 2 wurden auf das Feuchteniveau von 3,5 Gew.-% der Betonplatten aus VR 1 und VR 3 gebracht und erneut hydrophobiert. Hierdurch konnte zusätzlich die Fragestellung, inwieweit eine Nachhydrophobierung möglich und erfolgreich sein kann, in die Untersuchungen einbezogen werden.

Auch in der VR 1 wurde nachträglich eine Modifizierung vorgenommen. Bei den MR 3, 6 und 10 wurden jeweils die Zonen zwischen den und um die Elektroden eines Gebers von 2 Meßflächen je Platte mit einem wasserdichten Isolationslack NB 3 abgedeckt, um die durch Witterungseinflüsse, insbesondere durch UV-Strahlung, abgebaute dünne Hydrophobierungszone meßtechnisch so zu isolieren, daß die tatsächli-

Ver- suchs- reihe	Meß- reihe	Anzahl der Produkte [-]	Hersteller der Betonplatten	Feuchtegehalt der Betonplatten [Gew.-%]	Datum der Erstmessung [MM.JJ]	Datum der Messungen [MM/MM]	Abweichende Meßtermine [Produkt]
1	1 - 11	14	extern	3,5	11.89	04/10	A3,B2,C1,C3,D3 jeweils im Mai
2	1 - 2	13	extern	4,5	11.89	04/09	A2,E1 im November u. März
	0 - 11	12		3,5	09.90	01/06	
3	3 - 12	5	BASt	3,5	10-11.90 04.91	01-03/ /06-09	B2 im September u. März

Tab. 1: Durchgeführte Versuchsreihen und Meßreihen

che Hydrophobierungsqualität bestimmt werden kann (vgl. Kap. 4.4).

In Tabelle 1 sind die Charakteristika der Versuchsreihen 1 bis 3 (VR) und der zugehörigen Meßreihen (MR) zusammengestellt.

### 3 Materialien

#### 3.1 Hydrophobierungsmittel

In Tabelle 2 sind die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Hydrophobierungsmittel, die nach den im folgenden kurz beschriebenen Wirkstoffgruppen gegliedert sind, zusammengestellt. Bereits zu Beginn der Untersuchungen wurde festgelegt, daß die einzelnen Produkte in kodierter Form aufgeführt werden.

##### Wirkstoffgruppe I: Alkylalkoxysilane

Alkylalkoxysilane vernetzen bei alkalischen Untergründen auf der Oberfläche, in Poren und Rissen zu einem hydrophobierenden Film und gehen echte chemische Bindungen mit dem Substrat ein. Sie benötigen zur Kondensation, also zur Entwicklung ihrer Wirksamkeit, eine relativ lange Zeit. Sie sind besonders niedermolekular bzw. niederviskos und können deshalb auch in kleinste Poren eindringen. Die Grundfeuchte des Betons, die erst bei deutlich höheren Temperaturen als 105°C herausgezogen werden könnte, ist für die chemischen Reaktionen ausreichend. Ein Nachteil derartiger Hydrophobierungsmittel liegt in ihrer relativ großen Flüchtigkeit. Je langsamer die Wirkstoffbildung und die Verbindung mit dem Substrat erfolgt, desto mehr Masse des Silans verdunstet und ist dadurch technisch unwirksam. Der Verlust durch Verdunstung ist um so größer, je weniger

alkalisch und je trockener der Untergrund einerseits ist und andererseits je günstiger die physikalischen Verdunstungsbedingungen sind. Als Verdünnung bzw. Lösemittel werden bevorzugt Wasser oder Alkohole verwendet. Eine Nachhydrophobierung ist mit Silanen problemlos möglich. Diese Wirkstoffgruppe spielt bei Oberflächenschutzmaßnahmen eine führende Rolle [Sas-1, Sch-1].

##### Wirkstoffgruppe II: Olig. Alkylalkoxysiloxane

Oligomere Alkylalkoxysiloxane benötigen im Vergleich zu den Alkylalkoxysilanen eine relativ kurze Zeit (4 bis 5 Std.), um ihre wasserabweisende Wirkung auf der Betonoberfläche zu entwickeln. Sie vereinen aufgrund ihres chemischen Aufbaus die Eigenschaften von Silanen und Siliconharzen, wie z.B. gutes Eindringvermögen und geringe Flüchtigkeit. Diese Produkte sind sowohl in Alkoholen als auch in Kohlenwasserstoffen löslich [Sas-1, Sch-1].

##### Wirkstoffgruppe III: Gemische aus Alkylalkoxysilanen und oligomeren Alkylalkoxysiloxanen

Diese Produkte vereinen die Eigenschaften der Wirkstoffgruppen I und II. Sie besitzen gutes Eindringvermögen sowie geringe Flüchtigkeit, d.h. nahezu keine Verdunstungsverluste bei der Anwendung. Bei der Applikation wird ein trockener Untergrund vorausgesetzt. Diese Produkte werden zunehmend für Hydrophobierungen eingesetzt.

##### Wirkstoffgruppe IV: Oligomere Alkylalkoxysiloxane und Acrylat-Copolymer

Durch Verwendung von Acrylat-Copolymer wird zusätzlich eine Verfestigung der abgewitterten

Wirkstoffgruppe	Konzentration [%]	Verdünnungsmittel	Produktkodierung
I. Alkylalkoxysilane	20	Wasser	A3
	40	Wasser	B2
	100	-	B1
	100	-	C1
	100	-	C2
II. olig. Alkylalkoxysiloxane	10	Testbenzin	A1
	10	Wasser	C3
	12	Testbenzin	E1
	16	Wasser	E2
III. Gemische aus Alkylalkoxysilanen u. olig. Alkylalkoxysiloxanen	20	Testbenzin	D2
	100	-	D3
IV. olig. Alkylalkoxysiloxane u. Acrylat-Copolymer	15	Testbenzin	A2
V. Siliconharz	12	Testbenzin	B3
	10	Testbenzin	D1

Tab. 2: Zusammenstellung der eingesetzten Hydrophobierungsmittel

Betonoberflächen erreicht. Die hohe Alkalibeständigkeit läßt zusätzlich die Applikation auf frischem Beton zu. Das Produkt wird derzeit nicht mehr verwendet.

#### Wirkstoffgruppe V: Siliconharze

Die wasserabweisende Wirkung von Siliconharzen stellt sich unmittelbar nach dem Auftragen des Harzes ein, d.h. relativ schnell nach der Verdunstung der aliphatischen oder aromatischen Lösemittel. Wegen kleiner Moleküle dringen die Siliconharze verhältnismäßig gut in Poren und Kapillaren von Baustoffen ein. Die erreichbaren Eindringtiefen liegen jedoch unterhalb derer von Silanen. Der Untergrund muß lufttrocken sein. Eine Nachhydrophobierung ist problemlos möglich. Derzeit spielen Siliconharze bei der Betonhydrophobierung keine Rolle mehr [Sas-1, Sch-1].

Wie aus der Tabelle 2 zu entnehmen ist, sind die Hydrophobierungsprodukte auf Alkylalkoxysilan- und oligomerer Alkylalkoxysiloxanbasis bei dieser Untersuchung stark vertreten, was dem damaligen Stand ihrer Verbreitung und der Technik (Projektbeginn 1988) entspricht.

Derzeit werden in der Baupraxis bei Anwendung im Brückenbau laut einer vorläufigen Zusammenstellung von Oberflächenschutzsystemen insgesamt 13 Produkte eingesetzt. Darunter sind zwei 100%-ige Alkylalkoxysilane (I), je ein 100%-iges bzw. 25%-iges oligomeres Alkylalkoxysiloxan (II) und neun Gemische (III), davon sieben Produkte in einer 20%-igen

Konzentration und jeweils ein Produkt in 25%-iger bzw. 100%-iger Konzentration.

## 3.2 Betonplatten

### 3.2.1 Versuchsreihen 1 und 2

Die Betonrezeptur für einen Beton B 35 wurde seitens der BAST vorgegeben. Es wurden 350 kg Zement PZ 35 F und ein Zuschlag mit einer Sieblinie B 16 ohne jegliche Zusatzstoffe und -mittel verwendet; der w/z-Wert betrug 0,5 (vgl. Kap. 2.2, 5.2 und 5.3).

Die 120 Platten wurden von einer Firma in 3 Chargen á 40 Stück in einer Magnoplan-Schalung mit wenig Schalöl hergestellt. Danach wurden sie auf einem Rütteltisch verdichtet. Abschließend wurden die Plattenoberflächen mit einem feinen Roßhaarbesenstrich versehen. Nach der Herstellung verblieben die Platten 1 Tag in der Schalung. Danach wurden sie 2 Tage in Wasser und anschließend 21 Tage lang bei einer Lufttemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % gelagert.

### 3.2.2 Versuchsreihe 3

Die Mischungszusammensetzung der 15 nachträglich in der BAST hergestellten Platten entspricht, bis auf geringe Abweichungen beim Zuschlag (Sieblinie), derjenigen der Platten aus den Versuchsreihen 1 und 2.

Diese 15 Betonplatten wurden in 3 Chargen zu je 5 Platten hintereinander hergestellt. Für jede

Charge wurden 40 l Beton in einem Zwangsmischer 3,5 min lang gemischt und anschließend in die Schalungen gefüllt, mit einem Fingerrüttler verdichtet und an der Oberfläche mit einem Stahllineal abgezogen. Nach Absinken des Abziehwassers (ca. 15 min) wurden die Oberflächen mit einem Roßhaarbesenstrich versehen.

Zur Bestimmung der Betonfestigkeiten wurde aus jeder Charge ein Probewürfel von 15 cm \* 15 cm \* 15 cm hergestellt. Einen Tag nach dem Betonieren wurden sowohl die Platten als auch die Würfel ausgeschalt und 7 Tage lang in einem Wasserbad gelagert. Hiernach lagerten sie bis zum 28. Tag in einer Klimakammer - 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit. Die 3 Würfel erreichten im Mittel eine Festigkeit von 52,2 N/mm<sup>2</sup> bei einem Raumgewicht von 2,32 kg/dm<sup>3</sup>.

## 4 Vorgehensweise

### 4.1 Behandlung der Betonplatten

#### 4.1.1 Allgemeines

Die Betonplatten für die VR 1 und 2 wurden sofort nach der Lieferung chargenweise ausgepackt. Dabei wurden Farbunterschiede der einzelnen Platten, auch innerhalb einer Charge, festgestellt. Als Grund dafür wurden unterschiedliche Feuchtegehalte der Probekörper vermutet, was durch Wiegen von zwei stark unterschiedlich gefärbten Platten auch bestätigt werden konnte. Insgesamt zeigte sich, daß der Wassergehalt der Platten zwischen 4,1 Gew.-% und 4,9 Gew.-% lag. Die geplanten Ausgangswerte von 3,5 Gew.-% (VR 1) und 4,5 Gew.-% (VR 2) wurden also nicht eingehalten. Um gleiche Randbedingungen für den Einsatz aller Hydrophobierungsprodukte zu gewährleisten, war es aber erforderlich, daß die Feuchtegehalte der einzelnen Platten nur geringfügig von den vorgesehenen Mittelwerten abweichen. Dies wurde dadurch erreicht, daß die eine Hälfte der Versuchsplatten (Nr. 1 bis 60) in einer Klimakammer - 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit - und die andere Hälfte (Nr. 61 bis 120) in einem Wasserbad gelagert wurden.

Die Platten für die VR 3 wurden sofort nach der Wasserlagerung gewogen, um den Gesamtwassergehalt bzw. die Abnahme des Wassergehaltes während der Lagerung in der Klimakammer bzw. in der Halle festzustellen. Da diese Platten ebenfalls mit einem Wassergehalt von

3,5 Gew.-% hydrophobiert werden sollten, jedoch einen mittleren Gesamtwassergehalt von 5,2 Gew.-% aufwiesen, mußten die Platten im Mittel ca. 1,7 Gew.-% an Feuchte verlieren.

#### 4.1.2 Versuchsreihe 1

Von den Platten, die in der Klimakammer lagerten (Nr. 1 bis 60), wurden täglich 10 Platten gewogen. Dabei zeigte sich, daß die feuchteren Platten am Anfang mehr an Gewicht verloren als die trockeneren. Im Laufe der Zeit wurde die Gewichtsabnahme immer kleiner, wobei die Unterschiede zwischen den einzelnen Platten ebenfalls kleiner wurden. Nach etwa 4 Wochen hatten die Platten in der Klimakammer die Ausgleichsfeuchte des vorgegebenen Klimas - 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit - erreicht, und danach war weder eine Gewichtszunahme noch eine Gewichtsabnahme festzustellen. Der Feuchtegehalt der Platten betrug im Mittel 3,5 Gew.-%.

#### 4.1.3 Versuchsreihe 2

Gleichzeitig wurden auch die wassergelagerten Platten gewogen. Im Laufe der Messungen zeigte sich jedoch, daß eine Ausgleichsfeuchte von 4,5 Gew.-%, wie sie für die Versuchsreihe VR 2 vorgegeben war und angestrebt wurde, nicht erreicht werden konnte.

Da für die Durchführung der Hydrophobierung eine augenscheinlich trockene Oberfläche erforderlich war, wurden die Platten Nr. 61 bis 120 nach der Wasserlagerung ebenfalls solange in der Klimakammer - 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit - gelagert, bis die Plattenoberflächen abgetrocknet waren.

Vorab wurde zunächst eine wassergesättigte Platte aus dem Wasserbad genommen, mit einem feuchten Schwammtuch rundum abgetupft und flach mit der zu hydrophobierenden Seite nach oben auf Dreikantleisten in die Klimakammer - 20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit - gelegt. Nach 2 Stunden wurde sie gewogen. Die verdunstete Wassermenge war sehr gering und lag bei etwa 0,1 Gew.-%. Es blieben noch einzelne feuchte Stellen an der Oberfläche sichtbar. Nach weiteren 4 Stunden Lagerung im Klimaschrank wurde sie erneut gewogen. Es wurde eine Wasserabnahme von 0,16 Gew.-% bei einer nunmehr überall trockenen Oberfläche festgestellt. Dieselbe Platte wurde noch einmal nach 24 Stunden gewogen, wobei die Wasserabnahme bei 0,35 Gew.-% lag. Zieht man die

0,35 Gew.-% von dem mittleren Wassergehalt von 5,2 Gew.-% ab, so erhält man mit 4,85 Gew.-% einen immer noch zu hohen mittleren Gesamtwassergehalt, wobei jedoch davon ausgegangen werden kann, daß der Wassergehalt in der zu hydrophobierenden Oberflächzone bereits unterhalb der angestrebten 4,5 Gew.-% liegt.

Um die geplante Feuchte von 4,5 Gew.-% in den oberen 10 bis 15 mm der Plattenoberfläche messen zu können, wurden CM-Feuchtemeßgeräte, die in der BAST bereits getestet wurden [Bud-1], eingesetzt. Für diese Untersuchungen wurden 2 Platten aus dem Wasserbad entnommen. Eine der beiden Platten wurde halbiert. Danach wurden beide Platten, wie oben beschrieben, behandelt und in die Klimakammer gelegt. Nach 2 Stunden wurden je 2 Proben an den Bruch- und Außenkanten beider Platten im Bereich der Oberfläche entnommen und mit 2 verschiedenen CM-Feuchtemeßgeräten untersucht. Der ermittelte Wassergehalt lag im Mittel bei 4,85 Gew.-%. Diese Untersuchung wurde in gleicher Weise nach 4 Stunden Lagerung in der Klimakammer wiederholt. Der mittlere Feuchtegehalt betrug diesmal 4,46 Gew.-%, bei einer Streuung von  $\pm 0,07$  Gew.-%. Eine weitere Messung nach 24-stündiger Klimalagerung ergab, daß der mittlere Feuchtegehalt in der oberen Zone (10 bis 15 mm) bei 3,85 Gew.-% lag. Anhand dieser Ergebnisse wurde festgelegt, daß die Platten der Versuchsreihe 2 nach der Wasserlagerung 4 Stunden in die Klimakammer (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) gelegt und danach hydrophobiert wurden.

#### 4.1.4 Versuchsreihe 3

Die Platten der VR 3 hatten nach einer Klimalagerung bis zum 28. Tag knapp 0,8 Gew.-% Wasser verloren, so daß ein weiteres Austrocknen und somit eine Reduzierung des Wassergehaltes um 1 Gew.-% erfolgen mußte. Hierzu wurden die Platten aus der Klimakammer in die Versuchshalle gebracht, wo auch die Hydrophobierungsarbeiten durchgeführt wurden. Etwa 3 Monate nach der Wasserlagerung der Platten aus der VR 3 war bei den ersten Platten der angestrebte Feuchtegehalt von 3,5 Gew.-% erreicht.

#### 4.2 Auswahlverfahren

Die Platten wurden nach dem Zufallsprinzip ausgewählt, um etwaige Einflüsse, bedingt durch Herstellungsunterschiede, auszuschließen. Es

wurden daher für die Versuchsreihen 1 und 2 bzw. 3 immer nur eine von den in 3 Gruppen à 40 bzw. à 5 Stück hergestellten Platten nacheinander entnommen.

#### 4.3 Applikationsverfahren

Jede Platte wurde nach der Entnahme aus der Klimakammer gewogen und dann mit der Oberseite nach unten in eine mit 1 Liter Hydrophobierungsmittel gefüllte Tauchwanne gelegt. Nach genau einer Minute wurde jede

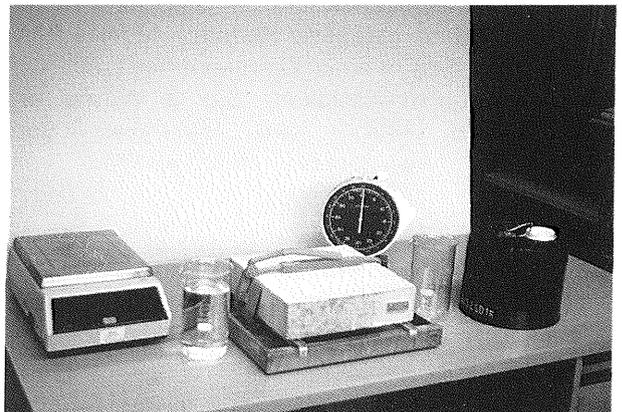


Bild 1: Applikationshilfen und -werkzeuge

Platte von den vier kleinen Auflagepunkten in der Tauchwanne abgehoben und in horizontaler Lage für eine Minute zum Abtropfen abgelegt (s. Bild 1). Danach wurden die Platten vertikal (Besenstrichstruktur von oben nach unten zeigend) auf eine Schmalseite gestellt, wodurch ein evtl. vorhandener Überschuß an Hydrophobierungsmittel eine weitere Minute lang abfließen konnte.

Diese Applikationsmethode brachte den erwünschten Erfolg. Die Differenz zwischen aufgenommenem und verbrauchtem Hydrophobierungsmittel lag im Schnitt bei etwa 2 g und ein weiteres Abtropfen von Hydrophobierungsmittel während der folgenden Arbeitsgänge fand nicht mehr statt.

#### 4.4 Behandlung der hydrophobierten Betonplatten

Nach der Hydrophobierung wurden die Platten für 24 Stunden in der Halle belassen; danach wurden sie auf Paletten liegend auf dem Gelände der BAST der Freibewitterung ausgesetzt (s. Bild 2). Am 27. Tag der Außenlagerung wurden alle Platten zur Erstmessung (MR 1 -VR 1 und VR 2 und MR 3 - VR 3) in die Halle trans-

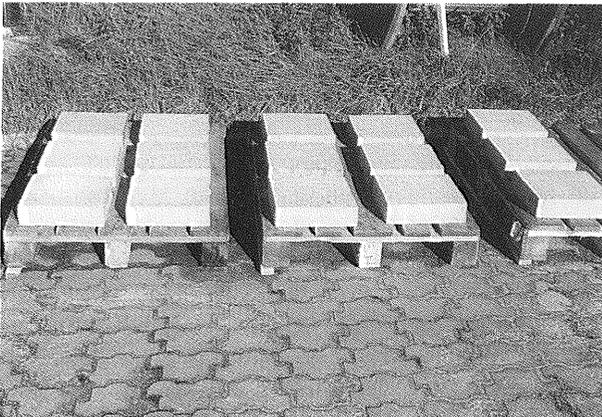


Bild 2: Hydrophobierte Platten in Freibewitterung

portiert. Die Platten wurden zuerst mit einer Waschlösung, bestehend aus Wasser und Spülmittel im Verhältnis etwa 1:100, und einer Handbürste an der Oberfläche gründlich gereinigt. Je nach vorhandenem Feuchtegehalt der Platten durch die vorhergegangene Freibewitterung (trocken oder feucht) mußten einige Platten mit Wasser abgespritzt werden. Besonders trockene Platten (nach langandauernden Sonnenscheinperioden) mußten mit der Unterseite etwa 2 cm tief, für 1 bis 2 Stunden in ein Wasserbad gelegt werden. Diese Maßnahme wurde durchgeführt, um Fehlmessungen aufgrund mangelnder elektrischer Leitfähigkeit des Betons auszuschließen.

Nachdem die Platten an der Oberfläche abgetrocknet waren, wurden mit einer Schablone 4 Meßflächen pro Platte angezeichnet. Die Messungen erfolgten dann am nächsten Tag, etwa 24 Stunden nachdem die Platten aus der Freibewitterung in die Halle transportiert worden waren.

#### 4.5 Beschreibung des Meßverfahrens und der Meßeinrichtung

Im Jahre 1990 wurde das in der BAST entwickelte Meßgerät in die ZTV-SIB 90 [BMV-1] als Hydrophobierungsprüfgerät eingeführt. Das Meßverfahren wird hier kurz beschrieben; eingehende Beschreibungen finden sich in [Gat-1, Gat-2].

Dem Meßverfahren liegt das physikalische Prinzip des Stromtransportes in elektrolytischen Lösungen zugrunde.

Zur Messung werden spezielle Meßgeber auf die Betonoberfläche gesetzt, die Elektrolytflüssigkeit, in der Regel Kalkwasser, an den Beton abgeben.

Die Art der Geber richtet sich nach der Lage der Betonfläche im Raum; es wird unterschieden zwischen Gebern zur Messung auf horizontaler Fläche, auf horizontaler Fläche über Kopf und auf vertikaler Fläche.

Durchbricht die Elektroflüssigkeit die hydrophobierte Schicht des Betons, so fließt zwischen den beiden Elektroden eines Meßgebers ein Strom, der mit dem Meßgerät aufgenommen wird. Bei kontinuierlicher Messung über einen gewissen Zeitraum führt dies zu einer Meßwert-Zeit-Kurve. Die Größe der zu bestimmten Zeiten abgelesenen Meßwerte hängen von der Größe und Anzahl der in der hydrophobierten Zone im Bereich der Meßflächen enthaltenen Fehlstellen ab. Form und Verlauf der so ermittelten Kurve sind charakteristisch für die Hydrophobierungsqualität.

Für die Durchführung der Messungen wurde über die gesamte Meßzeit von 5 Jahren die gleiche Meßkette, bestehend aus dem Meßgerät [Gat-1, Gat-2], einem Verteiler, einem Datenlogger und einem Drucker, eingesetzt (s. Bild 3). Nach ca. 2,5 Jahren wurden die 12 Meßgeber ausgetauscht.

Das handelsübliche Hydrophobierungsmeßgerät besitzt nur Anschlüsse für 4 Meßgeber. Um im Zuge der umfangreichen Untersuchungen Zeit einsparen zu können, wurde ein Verteiler mit 16 Anschlüssen (benötigt wurden nur 12 Anschlüsse) entwickelt und eingesetzt. Mittels dieses Verteilers konnten 12 Meßwerte je Minute über eine Meßdauer von 90 Minuten automatisch registriert und auf den Datenlogger übertragen werden. Anschließend wurden die Daten gesichert und zur weiteren Auswertung auf einem PC gespeichert.

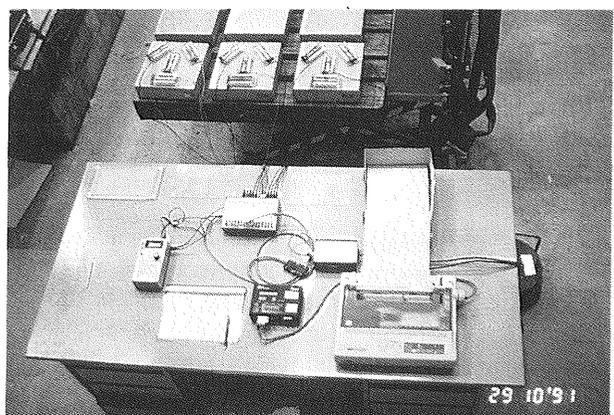


Bild 3: Meßeinrichtung

## 4.6 Durchführung der Messungen

Vor jeder Messung wurden die verwendeten Meßgeräte sowie die Meßgeber im Hinblick auf die Funktionstüchtigkeit überprüft. Bei der Vorbereitung der Meßgeber wurde wie folgt vorgegangen :

- Die Säuberung der Meßgeber von Hydrophobierungsablagerungen und Kalziumkarbonatresten erfolgte, indem die Meßelektroden (Metallstreifen) in den Gebertaschen zuerst mit einem in Spülmittel getränkten Wattestäbchen metallisch blank gerieben (Kalkbelag entfernen), und anschließend mit klarem Wasser abgespült werden.
- Danach wurden die nassen Meßgeber für eine kurze Zeit (Gebertaschen nach unten offen) auf eine saugfähige Unterlage gelegt und dann abgetrocknet.
- Zwischenzeitlich wurden die Schwämmchen aus dem Wasser genommen und leicht ausgedrückt, so daß sie nicht mehr tropften.
- Die Seiten der Schwämmchen, die an der Metallelektroden des Gebers anliegen sollen, wurden mit Kalk (Elektrolyt) bestreut.
- Danach wurden die Schwämmchen in die im Geber vorgesehenen Kammern (Gebertaschen) eingelegt und zwar so, daß 2 bis 3 mm des Schwämmchens gleichmäßig über die Geberunterkante hinausragen.
- Nach diesem Arbeitsgang wurden die im Meßgeber platzierten Schwämmchen mit gesättigtem Kalkwasser soweit aufgefüllt, daß bei leichter Schräglage des Gebers Kalkwasser aus dem Schwämmchen austrat.
- Die Flächen zwischen den beiden Schwämmchen wurden von ausgetretenem Kalkwasser befreit und getrocknet.
- Anschließend wurden alle Meßgeber mittels einer Kontrollplatte auf Funktionsfähigkeit überprüft.

Zur Durchführung der eigentlichen Messung wurden die Meßgeber, nachdem vorher alle Geräte eingeschaltet worden waren, auf die vorgesehenen Meßflächen aufgesetzt. Die Messung erfolgte jeweils über einen Zeitraum von 90 min; die Meßwerte wurden ausgedruckt und auf der Festplatte eines PC zur weiteren Auswertung abgelegt.

## 5 Meßergebnisse

### 5.1 Bewertungskriterien

In den ZTV-SIB 90 [BMV-1] ist festgelegt, daß die Mindestanforderungen an die Hydrophobierungsqualität erfüllt sind, wenn der nach Anhang 5 ermittelte Mittelwert (aus 4 Meßwerten) der Messungen zum Meßzeitpunkt  $t = 90$  min nicht größer als 300 mV ist, und wenn der größte Einzelwert zum Zeitpunkt  $t = 90$  min nicht mehr als 100 mV vom Mittelwert abweicht. Bei der Ermittlung der Meßgrößen handelt es sich tatsächlich um die Messung eines Stromflusses [mA], dessen Größe - wie im Kap. 4.5 beschrieben - direkt proportional zur Menge der Fehlstellen in der hydrophobierten Zone ist.

### 5.2 Versuchsreihe 1

In der Versuchsreihe 1 (VR 1) wurden insgesamt 11 Messungen (MR 1 bis MR 11) vorgenommen (Tab. 1). Die erste Messung (MR 1) erfolgte 28 Tage nach der Hydrophobierung (s. Kap. 4.7) im Oktober 1988. Danach wurden weitere 10 Meßreihen in einem zeitlichen Abstand von jeweils 6 Monaten durchgeführt, so daß jedes Jahr eine Frühjahrs- und eine Herbstmessung stattfand. Für einige Produkte (A3, B2, C1, C3 und D3) wurden die MR 4, 6 und MR 10 im Mai/Juni (statt im März/April) durchgeführt. Die MR 6 fand für die Produkte B3 und D1 Ende Mai an einem vom Zeitplan abweichenden Termin statt. Die MR 3, 6 und MR 10 (Meßzeitpunkte : 1 Jahr, 2,5 und 4,5 Jahre nach dem Meßbeginn) weichen von den anderen insofern ab, als hierbei jeweils 2 Meßstellen pro Platte mit dem Isolationslack NB 3 abgedeckt wurden (s. Kap. 2.2).

In den Anlagen sind die Merkmale der Versuchsdurchführung sowie die wesentlichen Ergebnisse in Übersichten, Tabellen und Diagrammen dargestellt.

#### Erste Messung nach der Hydrophobierung (MR 1) - 14 Produkte

Die Ergebnisse der MR 1 - die mittleren Meßwerte über die Meßdauer von 90 min - sind in der Anlage zu Kap. 5.2 zusammengestellt. Bei der Betrachtung der Auswertung fällt auf, daß die mittleren Meßwert-Zeit-Kurven in 3 Gruppen - X, Y, Z - eingeteilt werden können.

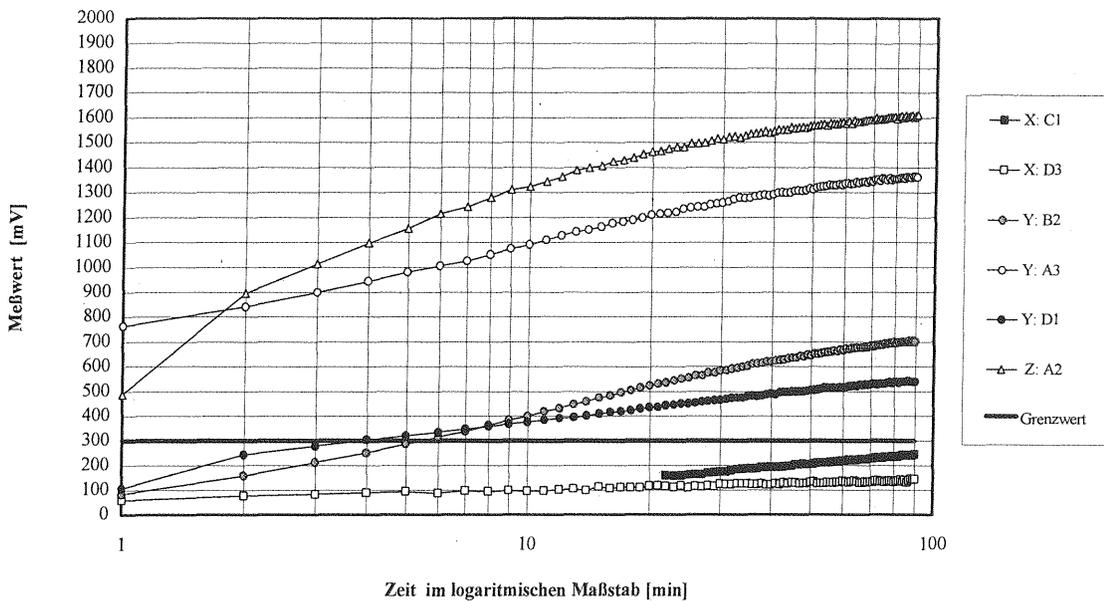


Bild 4: Versuchsreihe 1, Ergebnisse der MR 1

In Bild 4 sind die Meßergebnisse für repräsentative Vertreter der drei Gruppen, die Produkte C1 und D3 für die Gruppe X, die Produkte B2, A3, D1 für die Gruppe Y und das Produkt A2 für die Gruppe Z aufgetragen.

#### Gruppe X

Hydrophobierungsmittel: C1 (I)/ D3 (III)

Die Kurven der mittleren Meßwerte verlaufen über die gesamte Meßdauer nahezu parallel zur Zeitachse und bleiben deutlich unter dem Grenzwert von 300 mV. Die beiden Hydrophobierungsmittel besitzen eine gute chemische Bindung zum Substrat. Die damit ausgeführte Hydrophobierung besitzt **eine gute Qualität**.

#### Gruppe Y

Hydrophobierungsmittel: A3, B1, B2, C2 (I)/ A1, C3, E2 (II)/ D2 (III)/ D1 (V)

Die mittleren Meßwerte liegen nach einer Meßdauer von ca. 10 min (außer bei A3 und C3) oberhalb des Grenzwertes von 300 mV. Danach steigen sie zwar kontinuierlich an, aber weniger steil als in der Anfangsphase. Für die beiden Produkte A3 und C3 liegen die mittleren Meßwerte schon nach der ersten Minute weit über 300 mV. Ansonsten entwickeln sich die Meßwerte ähnlich wie bei den übrigen Produkten. Die Hydrophobierung besitzt für alle Produkte dieser Gruppe **eine nicht ausreichende Qualität**.

Wahrscheinlich sind die Produkte A1, A3, B2, C3, D1, D2, E2 (vgl. Tab. 2) zu stark verdünnt,

um eine ausreichende Wirksamkeit zu erzielen. Der Einfluß des Konzentrationsgrades des Hydrophobierungsmittels auf die Qualität ist am Beispiel der Produkte A3, B2 und C1 (s. Bild 4) besonders deutlich zu verfolgen. Während mit dem Produkt C1 (100%-iges Alkylalkoxysilan) eine gute Qualität der Hydrophobierung erreicht wird, besitzt die Hydrophobierung mit den verdünnten Produkten B2 (40 %) und A3 (20 %) eine nicht ausreichende Qualität, wobei die Qualitätsindikatoren (mittlere Meßwerte nach 90 min Meßdauer) bei 700 mV (B2) bzw. 1400 mV (A3) liegen. Mit den Produkten B1 und C2 wurde eine nicht ausreichende Qualität erreicht, da diese Produkte zum Zeitpunkt der Messung noch keine vollständige chemische Bindung mit dem Substrat eingegangen sind.

#### Gruppe Z

Hydrophobierungsmittel: E1 (III)/ A2 (IV)/ B3 (V)

Die mittleren Meßwerte erreichen in der Anfangsphase innerhalb der ersten 2 min sehr hohe Werte (ca. 800 mV) und steigen bis zum Ende der Messung kontinuierlich an. Die Hydrophobierung besitzt **eine unzureichende Qualität**.

Es liegt die Vermutung nahe, daß diese 3 Produkte eines Herstellers wegen ihrer langkettigen Molekularstruktur nicht in das dichte Gefüge des Betons eindringen können und lediglich adhäsiv in Form einer dünnen Schicht auf der Plattenoberfläche liegen.

### Langzeituntersuchung (MR 1 - 11) - 14 Produkte

Wie schon in Kap. 2 beschrieben wurde, erfolgte die Qualitätskontrolle der Hydrophobierung im allgemeinen alle 6 Monate über einen Zeitraum von 5 Jahren. Eine vollständige graphische Auswertung der Meßergebnisse ist als Anlage zu Kap. 5.2 beigefügt. Aufgrund der Meßergebnisse läßt sich die Wirksamkeit der einzelnen Hydrophobierungen 4 Gruppen - X, YX, YZ und Z - zuordnen. Die Gruppen X und Z (vgl. MR 1) sind von den Produkten her identisch. Die Gruppe Y ist in 2 Gruppen unterteilt: YX und YZ, wobei die Produkte der Gruppe YX einen ähnlichen Verlauf wie die Produkte aus der Gruppe X und die der Gruppe YZ einen ähnlichen Verlauf wie die der Gruppe Z aufweisen. In den Bildern 5 und 6 sind die Ergebnisse der Langzeituntersuchung für repräsentative Vertreter der jeweiligen Gruppen dargestellt.

#### Gruppe X

Hydrophobierungsmittel: C1 (I)/ D3 (III)

Die mittleren Meßwerte bleiben über die gesamte Versuchsdauer von 5 Jahren nahezu konstant und liegen unterhalb des Grenzwertes von 300 mV.

Die Meßergebnisse für das Produkt C1 lassen vermuten, daß der Bindungsprozeß zum Zeitpunkt der Meßreihe 2 (7 Monate nach der Hydrophobierung) noch nicht abgeschlossen war. Die Unterschiede zwischen den Frühjahrs- und Herbstmeßergebnissen sowie der Einfluß einer Lackbeschichtung auf die Meßergebnisse sind hier vernachlässigbar klein.

#### Gruppe YX

Hydrophobierungsmittel: A1, E2 (II)/ D2 (III)/ D1 (V)

Die mittleren Meßwerte bleiben über die gesamte Versuchsdauer von 5 Jahren auch hier nahezu konstant, liegen jedoch weit oberhalb des Grenzwertes.

Es ist anzunehmen, daß der Reaktionsprozeß zwischen den Produkten A1, D1 und D2 einerseits und dem Substrat andererseits bereits bis zur MR 2 (s. Anlage zu Kap. 5.2) abgeschlossen war. Die unzureichende Hydrophobierungsqualität hängt somit lediglich mit der mangelnden Wirkstoffmenge (zu niedrige Konzentration) zusammen. Außerdem treten hierbei die saisonbedingten Qualitätsunterschiede ab MR 4

(nach 1,5 Jahren) deutlich hervor, wobei im Herbst eine bessere Qualität als im Frühjahr zu verzeichnen ist. Nach den Wintermonaten (Frühjahrsmessung) weisen die Betonplatten höhere Feuchtegehalte auf als nach den Sommermonaten (Herbstmessung). Da mit zunehmendem Feuchtegehalt auch die elektrische Leitfähigkeit des nichthydrophobierten Betons steigt, ergeben die Frühjahrsmessungen etwas höhere Meßwerte. Dies gilt vor allem, wenn die Wirksamkeit der Hydrophobierung niedrig ist, also eine erhöhte Anzahl der Fehlstellen einen stärkeren Stromfluß zulassen. Für die Beurteilung der Qualität von Hydrophobierung sind diese geringen feuchteabhängigen Einflüsse jedoch vernachlässigbar.

Der Einfluß der Abdeckung von verwitterten oder teilweise verwitterten Zonen außerhalb der Meßflächen mit einem Isolationslack (NB 3) wird hier deutlicher. Die Meßwerte bei Abdeckung sind im Vergleich zu denen bei Nichtabdeckung niedriger, wobei die Differenz zwischen den jeweiligen Meßergebnissen im Verlauf der Versuchsdauer eine abnehmende Tendenz zeigt.

#### Gruppe YZ

Hydrophobierungsmittel: A3, B1, B2, C2 (I)/ C3 (II)

Die mittleren Meßwerte (s. Bild 6) nehmen innerhalb der ersten 1,5 Jahre (MR 4) stetig ab und erreichen bei einigen Produkten (B1, B2, C2) Werte, die unterhalb des Grenzwertes liegen. Im weiteren Verlauf sind keine bedeutenden Veränderungen mehr sichtbar.

In der Wirkstoffgruppe I sind die Hydrophobierungsmittel auf Alkylalkoxysilanbasis zusammengefaßt. Derartige Produkte benötigen zur Entwicklung ihrer Wirksamkeit eine relativ lange Zeit. Es ist anzunehmen, daß sich auch hier die vollständige Bindung zum Substrat über einen längeren Zeitraum entwickelte. Der genaue Zeitpunkt des Abschlusses des Bindungsprozesses kann anhand der Meßergebnisse nicht bestimmt werden. Inwieweit infolge einer fortschreitenden Karbonatisierung und der damit verbundenen Dichtigkeit des Betons und der Verschlechterung der Betonleitfähigkeit niedrigere Werte gemessen werden, kann anhand dieser Messungen ebenfalls nicht beurteilt werden.

Die saisonbedingten Unterschiede der Meßwerte sind hier weniger stark ausgeprägt. Für die Produkte B1 und C1 sind die Frühjahrsmeßwerte ungünstiger als die Herbstwerte. Für die Pro-

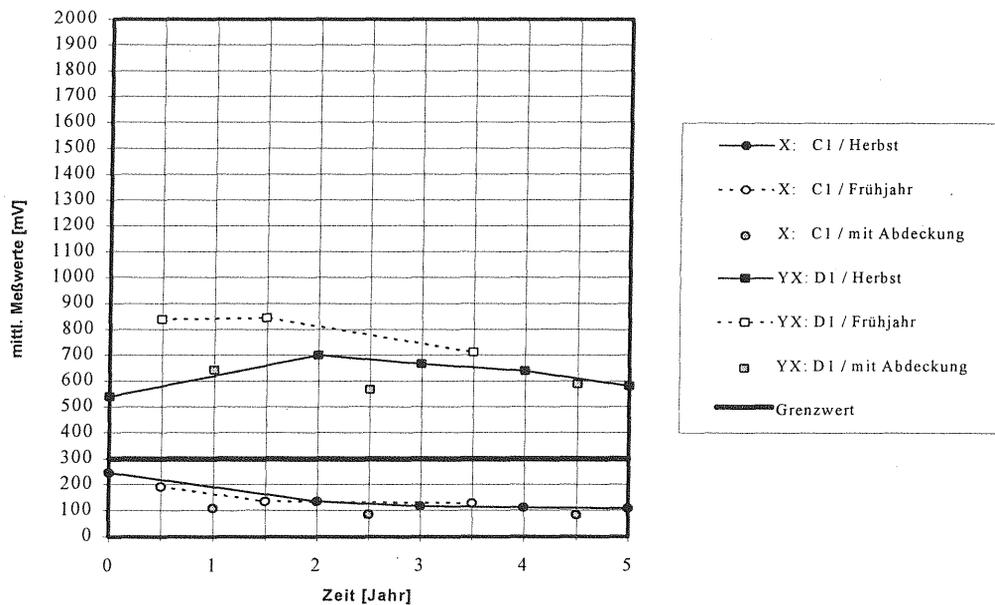


Bild 5: Versuchsreihe 1, Ergebnisse der Langzeituntersuchung, X: (C1) und YX: (D1)

dukte A3, B2 und C3 ergibt sich hingegen ein umgekehrtes Bild.

Die Erklärung hierfür ist, daß die „Frühjahrsmeßreihen“ für diese 3 Produkte (A3, B2, C3) von April auf Mai/Juni verlegt wurden. Höheren Außentemperaturen sowie geringere Niederschläge führten wahrscheinlich zu einer Abnahme der Feuchtegehalte bis zum Meßzeitpunkt. Mit der Abnahme des Feuchtegehaltes reduziert sich auch die Leitfähigkeit des nicht hydrophobierten Betons, welches bei qualitativ schlechter Hydrophobierung sehr viel deutlicher wird, als bei einer Hydrophobierung mit wenigen Fehlstellen.

Die Differenz zwischen den mittleren Meßwerten an abgedeckten und nicht abgedeckten Flächen ist hier deutlich sichtbar. Auch hier wurden niedrigere Werte gemessen, wenn die verwitterte Zone im Bereich der beiden Meßelektroden mit NB 3 isoliert wurde. Im Laufe der Zeit ergibt sich jedoch kein einheitliches Bild. Für die Fälle, in denen sich nach der Isolierung der verwitterten Betonoberfläche mit NB 3 die Meßwerte geringfügig verbessert haben, könnte folgender Einfluß maßgebend sein: Die verwitterte Betonoberfläche wird mit Hilfe einer speziellen Schablone so mit dem Isolationslack bestrichen, daß die beiden Meßflächen, auf die zur Messung die Schwammelektroden aufgestellt werden, ausgespart bleiben. Entlang der Begrenzungslinie zwischen Meßfläche und abgedeckten Bereich dringt Hydrophobierungsflüssigkeit in die

Meßfläche ein und engt, abhängig von der Dicke der Verwitterungszone, die Meßfläche in mehr oder weniger geringem Umfang ein, so daß praktisch auch eine reduzierte Anzahl an Fehlstellen und somit ein geringerer Meßwert erfaßt wird.

#### Gruppe Z

Hydrophobierungsmittel: E1 (II)/ A2 (IV)/ B3 (V)

In der MR 1 werden für diese Produkte extrem hohe mittlere Meßwerte in der Größenordnung von 1500 mV ermittelt. Im Laufe von 5 Jahren nehmen die Meßwerte kontinuierlich bis auf ca. 50 % des Ausgangswertes ab.

Die im Frühjahr und Herbst gewonnenen Meßergebnisse weichen stark voneinander ab. Es gilt auch hier, wie für die Produkte der Gruppe YX, daß bei Platten mit einer nicht ausreichenden Hydrophobierungsqualität die unterschiedlichen Feuchtezustände im Beton sehr ausgeprägt den Stromfluß und damit die Meßergebnisse beeinflussen.

Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, daß bei den hier beschriebenen Hydrophobierungen das Phänomen des Spreitens auftritt. Die Produkte haben keine gute Bindung zum Substrat, da sie, möglicherweise auf eine feuchte Betonoberfläche aufgebracht wurden und somit auf einem dünnen Feuchtefilm schnell ausreagieren ohne eine kohäsive Verbindung zum Substrat eingehen zu können. Sie liegen also lediglich als Reaktionsprodukte adhäsiv auf

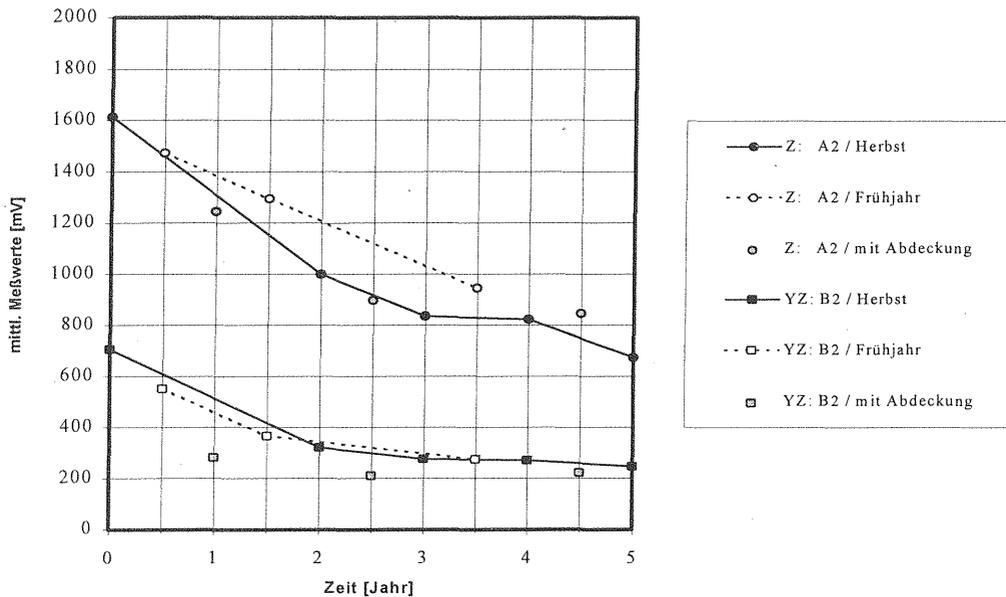


Bild 6: Versuchsreihe 1, Ergebnisse der Langzeituntersuchung, Z (A2) und YZ (B2)

der Oberfläche. Unter sommerlichen Bedingungen spreiten die kugelförmigen Reaktionsprodukte, was bei den Messungen fälschlicherweise als Qualitätssteigerung interpretiert werden kann. Da der Vorgang reversibel ist, muß die meßtechnisch erfaßte Hydrophobierungsqualität entsprechend den Witterungsbedingungen schwanken. Die hier beobachtete „ständige Qualitätsverbesserung“ hängt mit dem Spreiten insofern zusammen, als jeweils während der Kontraktion des Hydrophobierungsmittels bei feuchten und kühlen Witterungsbedingungen die dadurch fre werdenden Betonporen mit aus der Luft stammenden Feinteilchen und Schmutz belegt werden, die mit dem Hydrophobierungsmittel verkleben. Außerdem könnte auch eine fortschreitende Karbonatisierung zu einer scheinbaren Verbesserung der Hydrophobierung beigetragen haben.

Der Einfluß einer Abdeckung der verwitterten Zone mit NB 3 - Lack wird hier ebenfalls deutlich. Es gelten hier die gleichen Aussagen wie für die Gruppe YZ.

### 5.3 Versuchsreihe 2

Diese Versuchsreihe unterscheidet sich von der Versuchsreihe 1 lediglich durch höhere Ausgangsfeuchtegehalte beim Hydrophobieren der Betonplatten; sie lag bei 4,5 Gew.-%. Wie bereits in Kap. 2.2 erwähnt wurde, mußte das

Untersuchungsprogramm nach einem Jahr modifiziert werden. Die Betonplatten wurden auf einen Feuchtegehalt von 3,5 Gew.-% getrocknet und erneut hydrophobiert. Die Oberflächen-schutzmaßnahme wurde also hier in zwei Schritten, die als Vorhydrophobierung (MR 1 und MR 2) und als Endhydrophobierung (MR 0 und MR 3 bis MR 11) bezeichnet werden, durchgeführt. Die vollständige Auswertung dieser Versuchsreihe ist der Anlage zu Kap. 5.3 zu entnehmen.

#### Vorhydrophobierung

##### Erste Messung nach der Vorhydrophobierung (MR 1) - 13 Produkte

Die Meßkurven zeigen, daß innerhalb der ersten Minuten die Kurven der mittleren Meßwerte für alle 13 Produkte zunächst steil ansteigen; danach nehmen sie etwas langsamer, jedoch stetig zu. Es wurden mittlere Werte im Bereich von 400 mV bis 1600 mV am Ende der Messung, d.h. nach 90 min, festgestellt. Die Hydrophobierung besitzt hier **eine unzureichende Qualität**.

##### Langzeituntersuchung (MR 1 und MR 2) - 13 Produkte

Die Langzeituntersuchung besteht aus nur einer weiteren Meßreihe, die 6 Monate später durchgeführt wurde. Diese Messung lieferte noch ungünstigere Ergebnisse als MR 1; die Zunahme

der mittleren Meßwerte ( $t = 90 \text{ min}$ ) im Vergleich zur ersten Meßreihe liegt bei ca. 30% (Maximalwert ca. 2000 mV; vgl. Bilder 8, 9 und 10).

### Endhydrophobierung

Die Endhydrophobierung wurde ca. 2 Monate nach MR 2, d.h. im Mai/Juni, vorgenommen (Anl. Kap. 5.3 Tab. 1). Die erste Messung nach der Endhydrophobierung fand 28 Tage später in August/September bzw. für die Produkte A2 und E1 in November statt. Das Produkt B3 wurde nach den schlechten Ergebnissen der Vorhydrophobierung aus dem Untersuchungsprogramm ausgeschlossen, so daß für die Endhydrophobierung lediglich 12 Produkte herangezogen wurden.

### Erste Messung nach der Endhydrophobierung (MR 0) - 12 Produkte

Auch die Meßergebnisse der nachhydrophobierten Betonplatten (Anl. zu Kap. 5.3) lassen sich nach 3 Mustern (**P**, **Q**, **R**) ordnen. Im Bild 7 sind die Meßergebnisse für repräsentative Vertreter der drei Gruppen zusammengestellt.

#### Gruppe P

Hydrophobierungsmittel: B1, B2, C1, C2, A3 (I)/ D2, D3 (III)

Die mittleren Meßwerte verlaufen während der gesamten Meßdauer von 90 min auf relativ niedrigem Niveau ( $< 200 \text{ mV}$ ) beinahe parallel zur Zeitachse. Lediglich die mittleren Meßwert-

Zeit-Kurven für die Produkte D2 und A3 zeigen eine ansteigende Tendenz. Die Oberflächen-schutzmaßnahmen mit allen Produkten der Gruppe P **erfüllen** somit die festgelegten **Anforderungen an die Hydrophobierungsqualität**.

#### Gruppe Q

Hydrophobierungsmittel: A1, E2 (II)/ D1 (V)

Die mittleren Meßwerte steigen in den ersten 10 min (A1) bzw. 30 min (E2, D1) stetig an und danach flachen jedoch ab. Am Ende der Messung liegen die mittleren Meßwerte zwischen 400 mV und 700 mV. Die Hydrophobierung mit den genannten Produkten besitzt **eine unzureichende Qualität**, was wahrscheinlich auf die unzureichend aufgebraachte Wirkstoffmenge zurückzuführen ist.

#### Gruppe R

Hydrophobierungsmittel : A2 (IV) / E1 (II)

Die mittleren Meßwerte nehmen während der 90-minütigen Meßdauer zu und erreichen Werte in der Größenordnung von 500 mV bis 900 mV. Die Hydrophobierung mit diesen Produkten besitzt **eine unzureichende Qualität**. Wahrscheinlich liegen die Hydrophobierungsmittel A2 und E1, wie in der VR 1 (Gruppe Z), lediglich adhäsiv auf den Plattenoberflächen.

### Langzeituntersuchung (MR 0 und MR 3 bis MR 11) - 12 Produkte

Die Langzeituntersuchung besteht hier aus 10 Meßreihen. Die Hydrophobierungsmaßnahme mit den o.g. Produkten wurde Ende Juli durchgeführt. Wie aus dem Untersuchungspro-

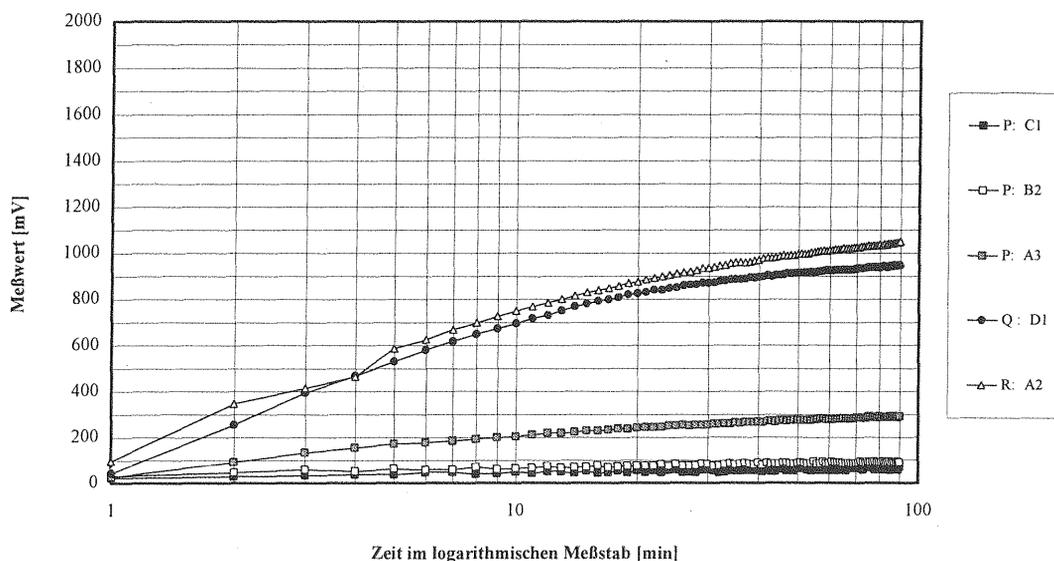


Bild 7: Versuchsreihe 2, Ergebnisse der MR 0

gramm ersichtlich ist (Anl. Kap. 5.3 Tab. 1), erfolgte die erste Messung (MR 0) nach 28 Tagen, d.h. im August/September. Die zweite Messung (MR 3) fand 3 Monate später statt, also im Dezember/Januar, und weitere Messungen folgten dann alle 6 Monate. In dieser Versuchsreihe muß zwischen Frühjahr-/Sommer- und Herbst-/Wintermessung unterschieden werden (vgl. in Anl. zu Kap. 5.3 Tab. 1).

#### Gruppe P

Hydrophobierungsmittel: B1, B2, C1, C2, A3 (I) / D2, D3 (III)

Die MR 3 (1 Jahr nach dem Meßbeginn) ergab im Laufe der Zeit für alle Produkte (außer C1 und B2) einen Anstieg der mittleren Meßwerte. Wie aus Bild 8 zu entnehmen ist, liefert die Hydrophobierung mit den Produkten C1 und B2 die beste Qualität. Die Verschlechterung der Hydrophobierungsqualität mit den übrigen Produkten (Differenz aus MR 0 und MR 3) kann dadurch erklärt werden, daß zum Zeitpunkt der MR 3 (Dezember/Januar) die schlechter hydrophobierten Betonplatten mehr Feuchtigkeit aufgenommen haben. Dadurch wurde die elektrische Leitfähigkeit des nicht hydrophobierten Betonuntergrundes erhöht. Entsprechend ergeben sich höhere mittlere Meßwerte. Während der gesamten Versuchsdauer der Langzeituntersuchung von 4 Jahren bleiben die

in der MR 3 erreichten mittleren Meßwerte bei- nahe konstant und unterhalb des Grenzwertes von 300 mV. Eine Ausnahme hiervon bilden die beiden Produkte A3 und D2, die den Grenzwert der MR 4 übersteigen. Bei dem Produkt A3 steigt die mittlere Meßwert-Zeit-Kurve sogar leicht an. Dies könnte ein Indiz für das Nachlassen der Wirksamkeit der Hydrophobierung sein.

Die Produkte C1 und B2 bestehen aus dem Produkt A3 jedoch in unterschiedlich hoher Konzentration. Die Meßwerte legen die Vermutung nahe, daß eine ausreichende Hydrophobierungsqualität aufgrund zu niedriger Konzentration des Produktes A3 nicht erreicht wird. Dies ist wahrscheinlich auch für das Produkt D2 der Fall.

Saisonale Qualitätsunterschiede sind zwar vorhanden, jedoch nicht besonders stark ausgeprägt. Sie hängen mit der sich verändernden elektrischen Leitfähigkeit des Betons infolge der Zu- oder Abnahme der Feuchtegehalte zusammen.

#### Gruppe Q

Hydrophobierungsmittel: A1, E2 (II) / D1 (V)

Im Verlauf der Versuchsdauer (4 Jahre) nehmen die mittleren Meßwerte von ca. 1000 mV (MR 3) bis auf 600 mV (MR 11) ab. Es ergibt sich zwar eine „Verbesserung der Hydropho-

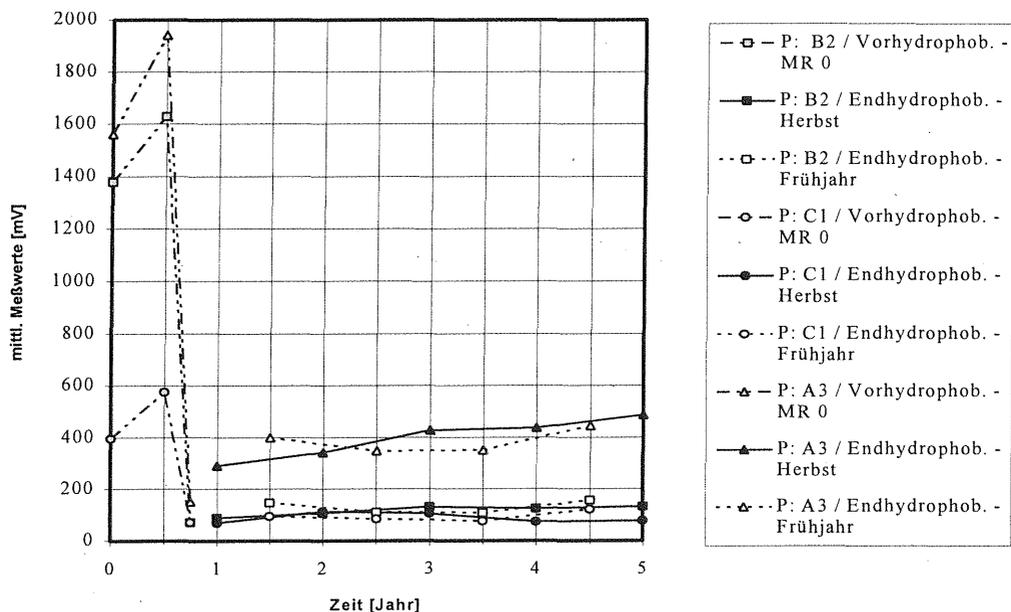


Bild 8: Versuchsreihe 2, Ergebnisse der Langzeituntersuchung, Gruppe P

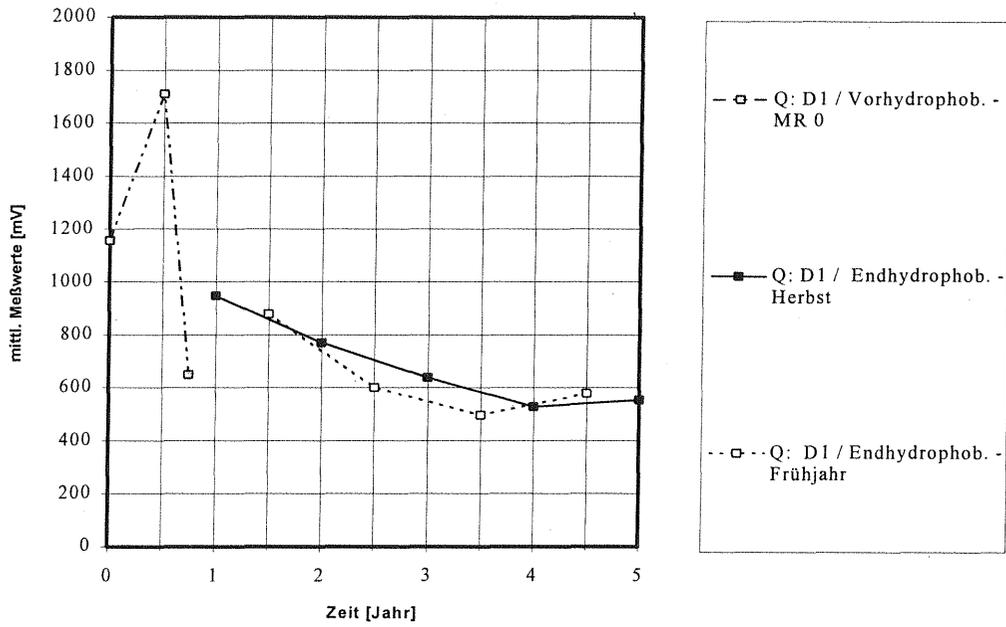


Bild 9: Versuchsreihe 2, Ergebnisse der Langzeituntersuchung, Gruppe Q

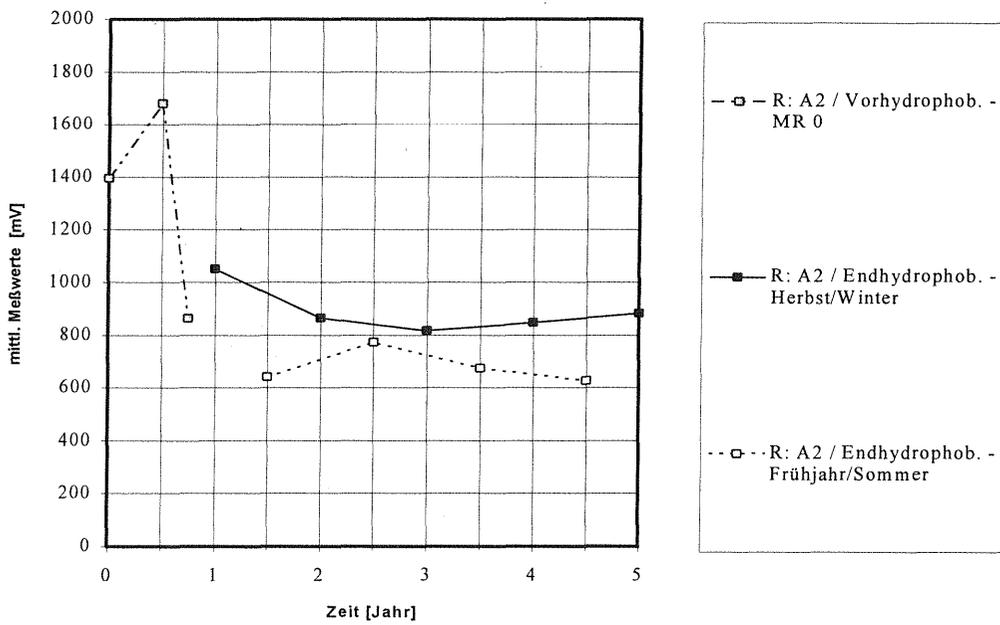


Bild 10: Versuchsreihe 2, Ergebnisse der Langzeituntersuchung, Gruppe R

bierungsqualität“; der Grenzwert von 300 mV wurde jedoch nicht erreicht und die Hydrophobierungsqualität bleibt unzureichend.

Eine Ursache für eine derartige Entwicklung der Hydrophobierungsqualität über 4 Jahre könnte in der fortschreitenden Karbonatisierung und einer daraus resultierenden Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit des nicht hydrophobierten Betons und einer Zunahme der Dichtigkeit des Substrates unmittelbar unterhalb der Hydrophobierungszone (Aussalzungszone) liegen. Die saisonbedingten Qualitätsunterschiede hängen hier wieder mit unterschiedlichen Feuchtegehalten während der Sommer- und Wintermessung zusammen.

#### Gruppe R

Hydrophobierungsmittel: A2 (IV) / E1 (II)

Für diese Produkte haben die Meßkurven keine eindeutige und einheitliche Verlaufsform, da die saisonbedingten Qualitätsunterschiede sehr stark ausgeprägt sind. Die mittleren Meßwerte erreichen während der Messungen (MR 3, 5, 7, 9 und 11) im Herbst/Winter wesentlich höhere Werte als die Messungen im Frühjahr/Sommer.

Wie aus Kap. 2.2 folgt, wurden die Herbst-/Wintermessungen tatsächlich jeweils im März und die Frühjahr-/Sommermessungen im September durchgeführt (vgl. Gruppe P und Q sowie VR 1). Die stark schwankenden Meßergebnisse hängen mit wechselnden Feuchtegehalten der Betonplatten sowie mit witterungsabhängigem Spreiten der Hydrophobierungsmittel

(vgl. VR 1 - Gruppe Z) zusammen. Insgesamt ist jedoch anzunehmen, daß der Beton im März (Herbst-/Wintermessung) einen höheren Feuchtegehalt aufweist als im September während der Frühjahr-/Sommermessung.

### 5.4 Versuchsreihe 3

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden die in der BAST hergestellten Betonplatten (vgl. Kap 2.2) mit 5 ausgewählten Produkten (ein Produkt je Firma) B2, C2 (I), E2 (II), A2 (IV) und D1 (V) hydrophobiert. Da diese Versuchsreihe erst 1 bzw. 1,5 Jahre nach dem Projektbeginn in das Meßprogramm aufgenommen wurde, liegen hier lediglich 10 Meßreihen vor (MR 3 bis MR 12).

#### Erste Messung nach der Hydrophobierung (MR 3) - 5 Produkte

In Bild 11 sind die Ergebnisse aus MR 3 dargestellt. Es zeigt sich, daß die Meßwert-Zeit-Kurven für alle Produkte auf einem sehr niedrigen Niveau ( $< 100$  mV) und parallel zur Zeitachse verlaufen. Die Hydrophobierungsmittel haben eine gute Bindung zum Substrat. Die Hydrophobierung besitzt **eine gute Qualität**.

#### Langzeituntersuchung (MR 3 bis MR 12) - 5 Produkte

Der konstante Verlauf der Kurven aus den mittleren Meßwerten über die Versuchsdauer von ca. 4 Jahren (vgl. Anl. zu Kap. 5.4) bestätigt, daß mit allen 5 Produkten eine gute Hydropho-

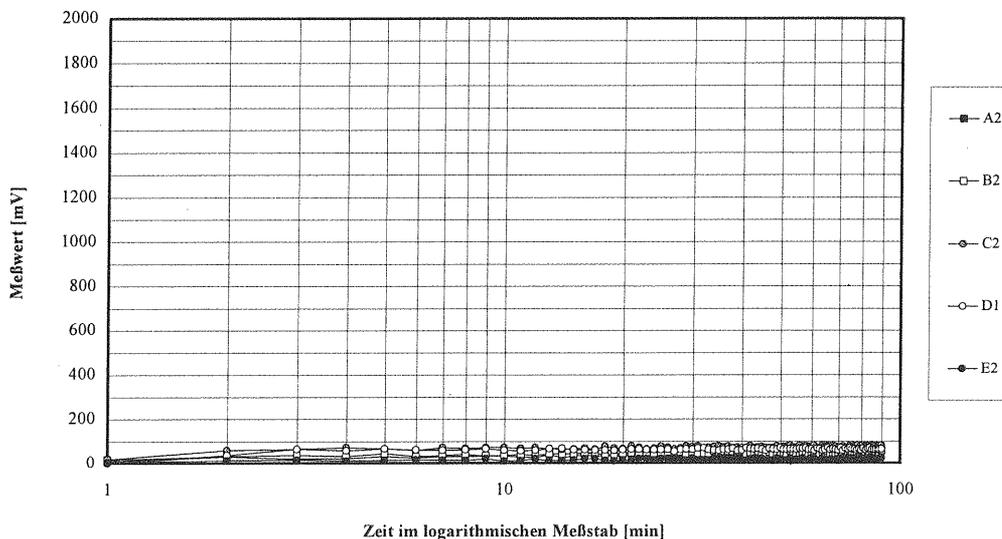


Bild 11: Versuchsreihe 3, Ergebnisse der MR 3

bierungsqualität erzielt wurde, auch mit solchen, die einen nur geringen Wirkstoffgehalt besitzen; dies deswegen, weil die offenporige Betonstruktur insgesamt mehr Hydrophobierungsmittel und somit auch mehr Wirkstoff aufnehmen konnte. Die saisonbedingten Qualitätsunterschiede liegen im Bereich der Meßgenauigkeit.

## 5.5 Zusammenfassung der Meßergebnisse und Schlußfolgerungen

Eine ausreichende Hydrophobierungsqualität der Betonplatten der **Versuchsreihe 1** wurde nur mit 2 Produkten (C1 und D3), einem 100%-igen Alkylalkoxysilan und einem 100%-igen Gemisch aus Alkylalkoxysilanen und oligomeren Alkylalkoxysiloxanen, erreicht. Die Hydrophobierungsqualität bleibt bei den beiden Produkten über 5 Jahre nahezu unverändert.

Mit den übrigen Produkten konnte in der **Versuchsreihe 1** keine ausreichende Qualität erreicht werden, da entweder die Wirkstoffmenge zu klein war (B1, C2) oder die Produkte zu stark verdünnt waren (A1, A3, B2, C3, D1, D2, E2). Es erwiesen sich 3 Produkte (E1, A2, B3) für derartigen Beton (vgl. Kap. 3.2.1) als ungeeignet, vermutlich weil sie wegen ihrer langkettigen Molekularstruktur nicht in das dichte Gefüge der Betonplatten eindringen konnten und lediglich adhäsiv auf deren Oberfläche lagen.

Bei einer guten Hydrophobierungsqualität spielt der Zeitpunkt einer Kontrollmessung sowie die Abdeckung der verwitterten Zone im Nahbereich der Meßflächen eine untergeordnete Rolle. Die beiden Einflüsse (Witterungsbedingungen und Abdeckung) machen sich bei den schlecht hydrophobierten Versuchsplatten bzw. bei niedriger Hydrophobierungsqualität deutlich bemerkbar. Bei der Interpretation der Meßergebnisse, die auf Platten mit Abdeckung gewonnen wurden, stellt sich die Frage, ob die niedrigeren Werte gemessen wurden, weil der Lack trotz sorgfältigen Auftragens in die Meßfläche eingedrungen ist und diese geringfügig eingeengt hat (s. Kap. 5.2). Dies wäre eine Erklärung für eine Verbesserung der Meßergebnisse. Diese Frage kann allerdings anhand der vorliegenden Daten nicht eindeutig beantwortet werden.

Die Betonporen der Platten aus der **Versuchsreihe 2** waren bei einem Feuchtegehalt von 4,5 Gew.-% bereits soweit mit Wasser gefüllt, daß eine Aufnahme von Hydrophobierungsmittel nur begrenzt möglich war. Schon die niedrige

mittlere Hydrophobierungsmittel-aufnahme von weniger als 5 g (Anl. Kap. 5.5 Tab. 1), ist ein Indiz für eine zu erwartende schlechte Hydrophobierungsqualität. Die in der MR 2 beobachtete weitere Verschlechterung der Hydrophobierungsqualität hängt wieder, wie bei der VR 1, mit den temporär wechselnden Feuchtegehalten zusammen. Es wurde mit keinem der 13 Hydrophobierungsprodukte eine ausreichende Qualität erreicht. Eine erneute Hydrophobierung nach 2-monatiger Austrocknungszeit der Betonplatten (Feuchtegehalt von ca. 3,5 Gew.-% - wie in der VR 1) führte dazu, daß mit 7 Produkten (Wirkstoffgruppen I und III - Alkylalkoxysilane und Gemische aus Alkylalkoxysilanen und oligomeren Alkylalkoxysiloxanen) eine ausreichende Hydrophobierungsqualität erreicht wurde. Diese ausreichende Qualität bleibt jedoch nur für die 5 Produkte B1, B2, C1, C2 (I) / D3 (III), also 100%-ige Produkte bzw. ein 40%-iges Produkt, über die Versuchsdauer von 4 Jahren unverändert. Eine nachlassende Wirksamkeit zeigen die Oberflächenschutzmaßnahmen mit den Produkten A3 (I) und D2 (III), beide Produkte mit 20%-igem Wirkstoffgehalt, die wahrscheinlich für den Anwendungszweck zu stark verdünnt waren.

Mit den übrigen Produkten A1, A2, D1, E1, E2 konnte keine ausreichende Qualität erreicht werden, wobei lediglich 2 Produkte (E1 und A2) für einen derartigen Beton (vgl. VR 1) ungeeignet sind.

In der **Versuchsreihe 3** wurde mit allen 5 Produkten der Wirkstoffgruppen I bis V eine sehr gute Hydrophobierungsqualität erreicht, die über eine Versuchsdauer von 4,5 Jahren annähernd konstant blieb. Die erhebliche Qualitätsverbesserung im Vergleich zu den Ergebnissen aus den VR 1 und VR 2 ist vor allem auf die offenporige Struktur des Betons der in der BAST hergestellten Platten zurückzuführen. Hierdurch konnten auch die nicht so eindringfreudigen Produkte (höhere Viskosität, längere Molekülketten) besser vom Beton aufgenommen werden. Alle Platten der VR 3 nahmen bei gleicher Eintauchzeit (1 Minute) erheblich mehr Hydrophobierungsmaterial auf als die Platten der VR 1 und VR 2 (Anl. Kap. 5.5 Tab. 1), so daß dadurch auch bei verdünnten Materialien eine höhere Menge an Wirkstoff aufgenommen werden konnte.

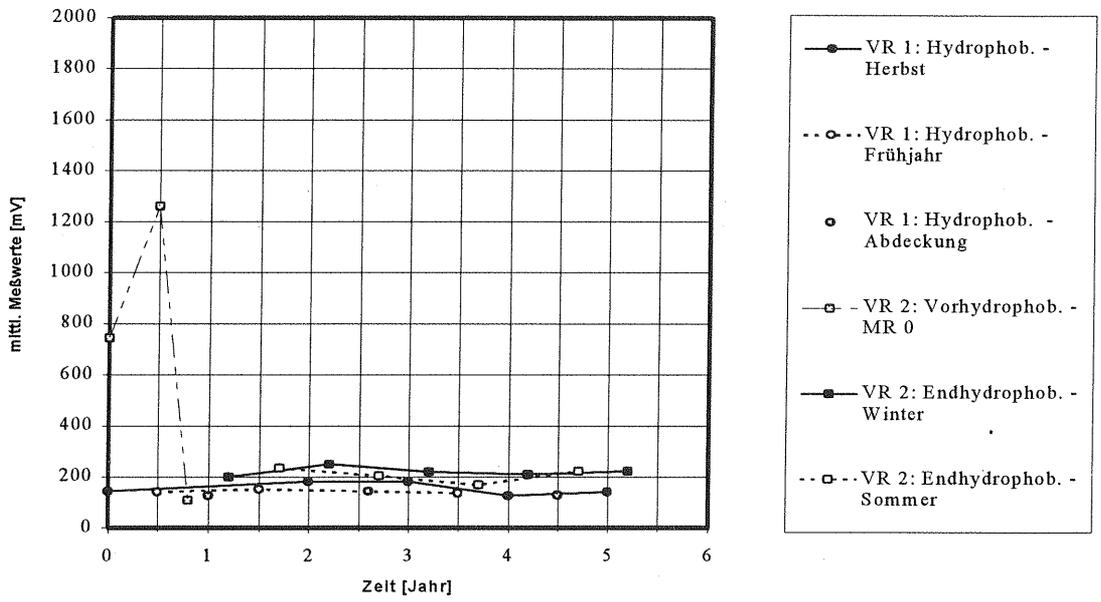


Bild 12: Vergleich VR 1 und 2; Produkt D3

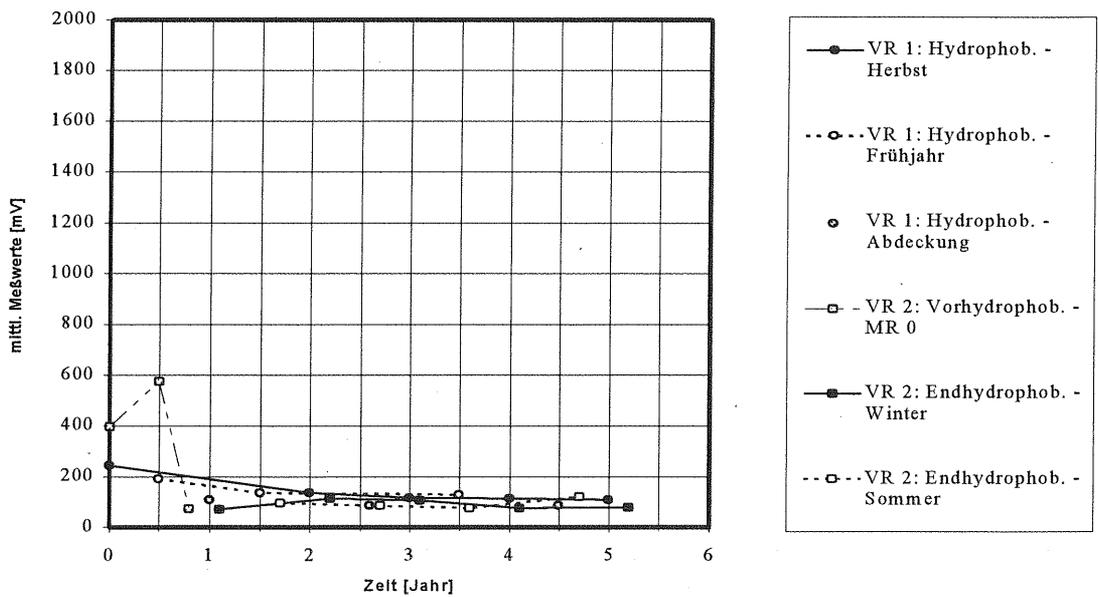


Bild 13: Vergleich VR 1 und 2; Produkt C1

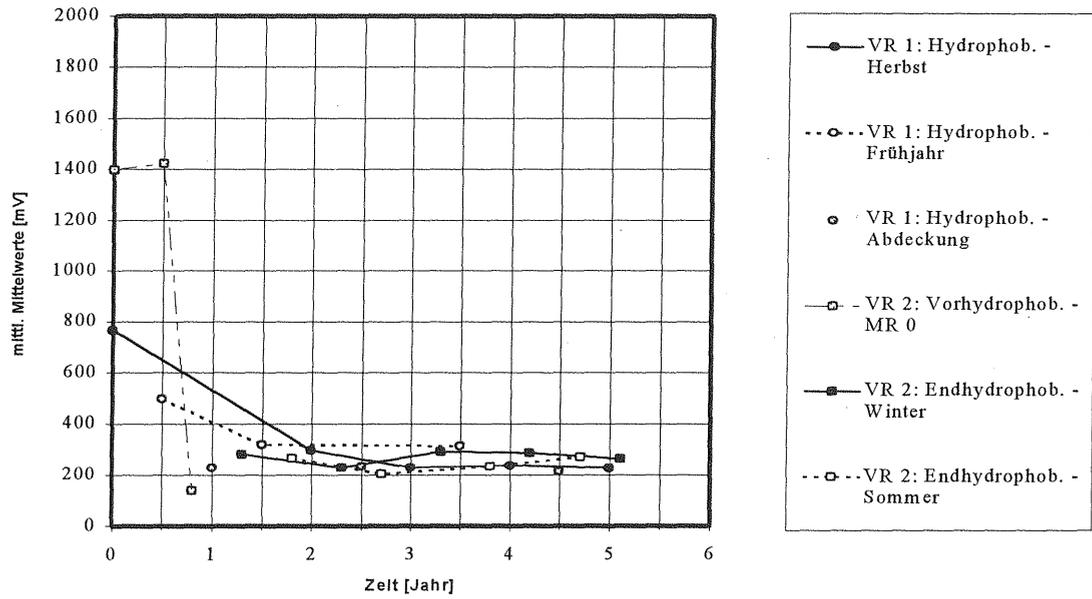


Bild 14: Vergleich VR 1 und 2; Produkt B1

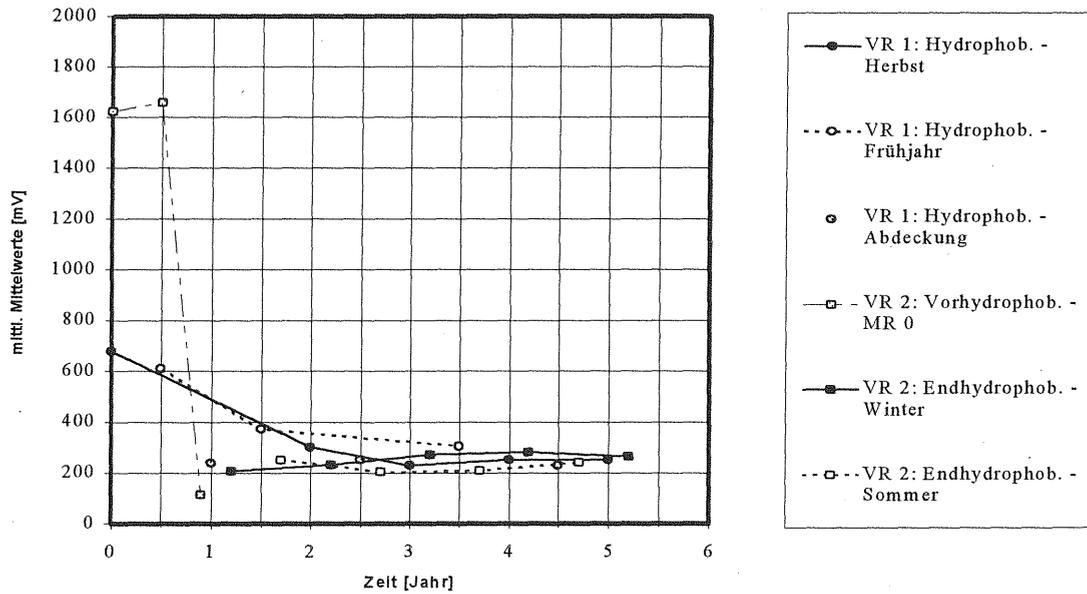


Bild 15: Vergleich VR 1 und 2; Produkt C2

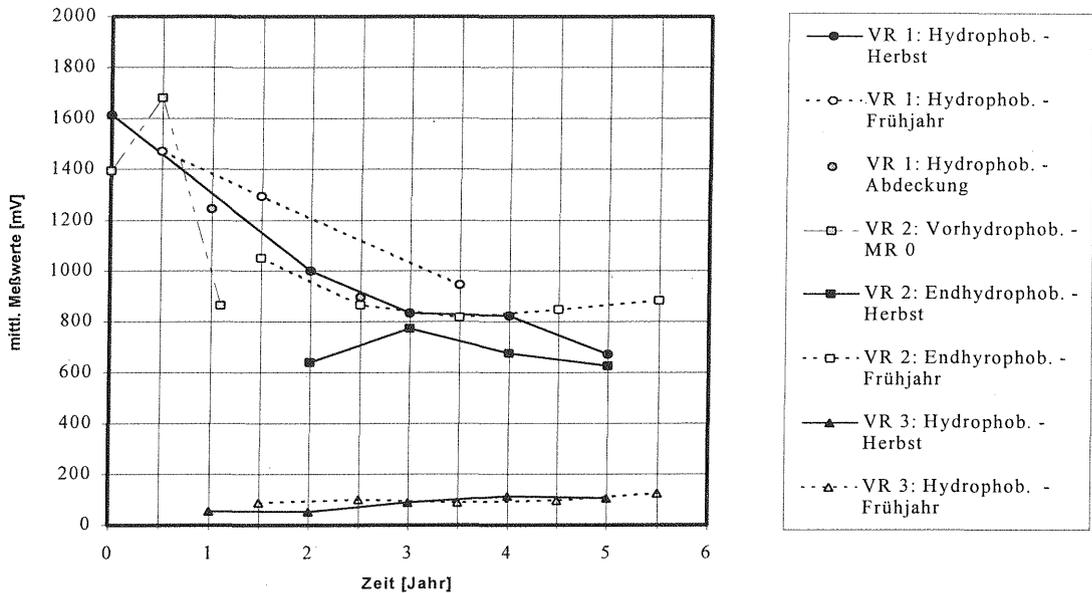


Bild 16: Vergleich VR 1, 2 und 3; Produkt A2

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Messungen der Versuchsreihen 1, 2 und 3 zu unterschiedlichen und teilweise bis zu 6 Monate auseinander liegenden Terminen vorgenommen (Anl. Kap. 5.2, 5.3 und 5.4 jeweils Tab. 1).

Demzufolge sind die Versuchsplatten zum Zeitpunkt der Messung unterschiedlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt gewesen, was besonders bei den schlecht hydrophobierten Platten bzw. den Platten mit niedriger Hydrophobierungsqualität die Meßergebnisse deutlich beeinflusst hat. Ein direkter Vergleich des Langzeitverhaltens aller Produkte ist deshalb nur eingeschränkt möglich.

So zeigt eine Gegenüberstellung der **Versuchsreihen 1 und 2 (Endhydrophobierung)**, daß für dieselben Produkte die Hydrophobierungsqualität eine ähnliche Größenordnung und einen einheitlichen Trend im Kurvenverlauf über die Beobachtungszeit aufweist. Für gut hydrophobierte Platten bzw. gute Hydrophobierungsqualität läßt sich ein Vergleich direkt ziehen. Als Beispiel sind in den Bildern 12 und 13 die Meßergebnisse der beiden Versuchsreihen für das Produkt D3 bzw. C1 dargestellt; weitere Ergebnisse sind in den Anlage zu Kap. 5.5 aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, daß die um 1 g höhere Aufnahmemenge des Produktes D3 in der VR 1 gegenüber der VR 2 zu einer Steigerung der Qualität geführt hat. Obwohl von dem Produkt C1 in der VR 2 um durchschnittlich 4 g mehr als in der VR 1 aufgenommen wurde, ergibt sich

hier lediglich eine geringfügige Verbesserung der Hydrophobierungsqualität.

Wegen der produktspezifisch unterschiedlichen Abbindeigenschaften lassen sich allein anhand der Aufnahmemenge an Hydrophobierungsmitteln keine quantitativen Angaben über die Hydrophobierungsqualität machen. Die mittlere Aufnahmemenge an Hydrophobierungsmitteln kann lediglich ein Anhalt für die Qualität der Hydrophobierung sein (Anl. Kap. 5.5 Tab. 1).

Interessant ist der Vergleich der Produkte B1, B2 und C2, für die sich in der VR 1 erst nach ca. 1,5 Jahren die volle Wirksamkeit entwickelt hat (Anl. Kap. 5.5 Bilder 4, 5 und 7). In der VR 2 wurde die volle Wirksamkeit und eine ausreichende Qualität bereits 3 Monate nach der Endhydrophobierung erreicht, wobei eine etwas kleinere Menge an Hydrophobierungsmitteln der Produkte B1 und C2 aufgenommen wurde. Dies bestätigt die Ergebnisse einer anderen Untersuchung [Rot-1], wonach sich ein mehrmaliges Aufbringen von Hydrophobierungsmitteln in bestimmtem zeitlichem Abstand auf der Basis von Silanen günstig auf die Qualität auswirkt.

In Bild 16 sind die Ergebnisse aller **Versuchsreihen VR 1 bis VR 3** für das Produkt A2 zusammengestellt. Hierbei soll verdeutlicht werden, daß die Betonqualität eine entscheidende Rolle für die Aufnahme der verwendeten Hydrophobierungsmittel spielt. Das Produkt A2 (15%-ige oligomere Alkylalkoxysiloxan und Acrylat-Copo-

lymer - Wirkstoffgruppe IV) wurde in den VR 1 und 2 als ungeeignet eingestuft, da in das extrem dichte Gefüge des Betons nur niedrig viskose Verbindungen (Wirkstoffgruppe I und III) eindringen konnten. In der VR 3 wurde hingegen mit demselben Produkt eine sehr gute Hydrophobierungsqualität erreicht, da in das offenporige Gefüge der in der BAST hergestellten Platten auch höher molekulare Verbindungen eindringen konnten.

## 6 Hinweise für die Praxis

Nach einer 5-jähriger Meßdauer, während der ca. 400.000 Meßwerte aufgenommen und ausgewertet wurden, kann nunmehr eindeutig festgestellt werden, daß sich das hier angewandte Meßverfahren in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse bewährt hat. Die auf dem physikalischen Prinzip des Stromtransportes in elektrolytischen Lösungen beruhende Meßmethode erlaubt die Ermittlung der Fehlstellen in einer Hydrophobierung, da der Durchfluß des Stromes direkt proportional zur Anzahl der Fehlstellen ist. Dabei wird eine ausreichende Feuchte im Betongefüge vorausgesetzt, damit der Strom fließen kann. Diese Meßmethode reagiert auf Veränderungen des Feuchtegehaltes im Beton. Dies macht sich ausschließlich bei den Platten mit unzureichender Hydrophobierungsqualität bemerkbar, was in der Bau Praxis allerdings nicht relevant ist. Abgesehen von den beobachteten Schwankungen wurden gute Übereinstimmungen der Ergebnisse von Messung zu Messung und von Platte zu Platte festgestellt. Voraussetzung für die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse ist bei den Wiederholungsmessungen eine möglichst präzise Platzierung der Meßgeber auf den jeweiligen Meßflächen und natürlich auch ein sauberes und funktionstüchtiges Meßgerät, sowie sein fachgerechter Einsatz.

Anfängliche Differenzen bei den Meßergebnissen von Geber zu Geber oder von Platte zu Platte haben sich bis zum Schluß der Messungen mit geringen Abweichungen fortgesetzt. Sehr häufig hingen diese Differenzen direkt mit den jeweils aufgenommenen Mengen an Hydrophobierungsmitteln zusammen. Differenzen und Schwankungen in den Ergebnissen von Messung zu Messung sind bei den schlecht hydrophobierten Platten bzw. den Platten mit niedriger Hydrophobierungsqualität deutlich höher als in Fällen hoher Wirksamkeit, weil dort die Anzahl der Fehlstellen insgesamt größer ist;

um so wichtiger ist es, immer wieder exakt an derselben Stelle zu messen.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes gesammelten Ergebnisse und Erfahrungen führen zu folgenden Empfehlungen :

Um eine gute Hydrophobierungsqualität zu erzielen, soll

- eine Hydrophobierung nicht auf nassen oder zu jungen Betonoberflächen vorgenommen werden. In Ausnahmefällen kann eine dennoch unter ungünstigen Bedingungen durchgeführte Maßnahme als Vorhydrophobierung betrachtet werden.
- in Zweifelsfällen der Feuchtegehalt des zu hydrophobierenden Betons bis zu einer Tiefe von 2 cm bestimmt werden. Dies kann entweder mit dem Hydrophobierungsmeßgerät (qualitativ, zerstörungsfrei) [Gat-2] oder mit einem CM-Gerät (quantitativ, nicht zerstörungsfrei) [Bud-1] erfolgen. Der Feuchtegehalt des Betons sollte 3,5 Gew.-% nicht überschreiten.
- geprüft werden, ob und welche Betonzusatzmittel verwendet worden sind, da diese in unterschiedlichster Weise Einfluß auf die Hydrophobierungsqualität nehmen [Gat-2].

Darüber hinaus wird empfohlen, vor der Hydrophobierung großflächiger Bauteile kleine Probestellen mit unterschiedlichen Produkten anzulegen. Mit dieser Maßnahme sowie mit Preisvergleichen zwischen den einzelnen Produkten soll ein optimales Preis-Leistungsverhältnis erzielt werden. Wegen der zahlreichen unterschiedlichen Einflüsse auf die Hydrophobierungsqualität, die teilweise sogar gegenläufig wirken können, ist es anhand solcher Probemessungen sogar möglich, die Qualität des Betons abzuschätzen.

## 7 Weiteres Vorgehen

Untersuchungen an hydrophobierten Betonfertigteilen im Olympischen Dorf in München zeigten, daß nach 15-jähriger Freibewitterung noch die gleiche Wirksamkeit festzustellen war wie kurz nach der Hydrophobierung. Aufgrund dieser Erfahrung [Sch-1] und der Ergebnisse der BAST-Versuche kann davon ausgegangen werden, daß bei fachgerechter Ausführung, korrekter Materialauswahl und optimaler Verarbeitung bei einer anfänglich guten Hydrophobie-

Ver-suchs-reihe	Hersteller der Betonplatten	Anzahl der Produkte	Produkt	Erläuterung
1	extern	5	B2 B1, C1, C2, D3	40% (Wasser) Alkylalkoxysilan 100% Alkylalkoxysilan 100 % Gemisch Alkylalkoxysilane u. olig. Alkylalkoxysiloxane
2	extern	5	B2 B1, C1, C2 D3	40% (Wasser) Alkylalkoxysilan 100% Alkylalkoxysilan 100 % Gemisch Alkylalkoxysilane u. olig. Alkylalkoxysiloxane
3	BASt	5	A2 B2 C2 D1 E2	15% (Testbenzin) olig. Alkylalkoxysiloxane u. Acrylat-Copolymer 40% (Wasser) Alkylalkoxysilan 100% Alkylalkoxysilan 10% (Testbenzin) Siliconharz 16% (Wasser) olig. Alkylalkoxysiloxane

Tab. 3: Geplante Versuchsreihen

rungsqualität eine Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren erwartet werden kann.

Um allerdings eine noch besser abgesicherte Aussage zur längerfristigen Wirksamkeit einer Hydrophobierung machen zu können, hat es sich als sinnvoll erwiesen, gezielt einige Untersuchungen fortzusetzen. Es ist daher geplant, mit geringem Aufwand über weitere 5 Jahre, jedoch nur einmal pro Jahr, Kontrollmessungen ausschließlich an den Platten durchzuführen, die derzeit eine ausreichende Hydrophobierungsqualität aufweisen (Tab. 5). Außerdem sollen an den schlecht hydrophobierten Platten bzw. den Hydrophobierungen mit geringer Wirksamkeit Zusatzuntersuchungen durchgeführt werden, vor allem im Hinblick auf diejenigen Einflußfaktoren, die sich positiv auf die Meßergebnisse auswirken. Dies sind u.a.:

- Karbonatisierung des Betons, die die elektrische Leitfähigkeit herabsetzt und den Beton infolge Feuchtetransportes von innen nach außen im zw. in der Aussalungszone den Beton dichter macht.
- Pseudohydrophobierung, d.h. Zusetzen der nicht mit Hydrophobierungsmittel gefüllten Poren durch feine Staubteilchen und Verschmutzung.

Da die Versuchsplatten inzwischen ca. 5 Jahre alt sind, sollte zusätzlich untersucht werden, ob sich eine Hydrophobierung auch auf die Karbonatisierung des Betons auswirkt; definitionsgemäß gilt die Hydrophobierung nicht als Schutz gegen das Eindringen von Kohlendioxid.

Mit dem im weiteren Verlauf der Untersuchungen gewonnenen Datenmaterial, sollte auch belegt werden, inwieweit eine Verkürzung der Meßdauer von 90 min möglich ist.

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes 89 201 „Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln“ wurden die Qualitätsunterschiede von 14 verschiedenen marktgängigen Hydrophobierungsmitteln sowie deren Dauerhaftigkeit im Hinblick auf die wasserabweisende Wirkung untersucht.

Um die formulierte Zielsetzung zu erfüllen, wurden die für dieses Forschungsprojekt von einer externen Firma (VR 1 und VR 2) und von BASt (VR 3) nach einer seitens BASt festgelegten Rezeptur (vgl. Kap. 3.2) hergestellten Betonplatten mit verschiedenen Hydrophobierungsmitteln (vgl. Kap 3.1) nach einer festgelegten Applikationsmethode (vgl. Kap. 4.3) hydrophobiert. Anschließend wurden die hydrophobierten Platten für die Dauer von 5 Jahren der freien Witterung auf dem BASt-Gelände ausgesetzt. Die erste Messung fand jeweils 28 Tage nach der Hydrophobierung statt. Danach wurden die Messungen zweimal im Jahr in einem Abstand von 6 Monaten vorgenommen.

In Tabelle 4 sind die Charakteristika der Versuchsreihen VR 1 bis 3 zusammengestellt. Mit den Messungen wurde im November 1989 begonnen. Die letzten Messungen wurden im Frühjahr 1995 durchgeführt.

Eine ausreichende Hydrophobierungsqualität der Betonplatten der **Versuchsreihe 1** wurde nur mit den beiden Produkten C1 und D3, einem 100%-igen Alkylalkoxysilan einerseits und einem Gemisch aus 100%-igem Alkylalkoxysilan und Alkylalkoxysiloxan andererseits, erreicht.

Die Hydrophobierungsqualität bleibt bei diesen Produkten über 5 Jahre nahezu unverändert.

Ver-suchs-reihe	Hersteller der Beton-platten	Feuchtegehalt der Betonplatten [Gew.-%]	Anzahl der Produkte	Produkte
1	extern	3,5	14	alle
2	extern	4,5	13	außer C3
		3,5	12	außer B3 und C3
3	BASt	3,5	5	A2, B2, C2, D1, E2

Tab. 4: Untersuchungsprogramm

Mit den übrigen Produkten konnte keine ausreichende Qualität erreicht werden, da entweder die eingetragene Wirkstoffmenge zu gering war (B1, C2) oder die Produkte zu stark verdünnt (A1, A3, B2, C3, D1, D2, E2) waren. Nur die 3 Produkte E1, A2, B3 erwiesen sich für den dichten Beton (vgl. Kap. 3.2.1) als ungeeignet, da sie keine kohäsive Verbindung zum Substrat ausgebildet haben und lediglich als Reaktionsprodukte adhäsiv auf der Plattenoberfläche lagen.

In der **Versuchsreihe 2** konnte mit keinem der 13 Hydrophobierungsprodukte eine ausreichende Qualität erreicht werden. Eine erneute Hydrophobierung nach Ablauf einer 2-monatigen Austrocknungszeit der Betonplatten bis auf einen Feuchtegehalt von 3,5 Gew.-% analog zu den Feuchtebedingungen in der VR 1 führte dazu, daß danach mit 7 Produkten aus den Wirkstoffgruppen I und III - Alkylalkoxysilane und Gemische aus Alkylalkoxysilanen und oligomeren Alkylalkoxysiloxanen - eine ausreichende Hydrophobierungsqualität erreicht werden konnte. Diese ausreichende Qualität bleibt jedoch nur für die 5 Produkte B1, B2, C1, C2 (I) und D3 (III) (100%-ige Produkte bzw. ein 40%-iges Produkt) über die Versuchsdauer von 4 Jahren unverändert. Eine nachlassende Wirksamkeit zeigen die Oberflächenschutzmaßnahmen mit den Produkten A3 (I) und D2 (III) (20%-ige Produkte), die wahrscheinlich zu stark verdünnt waren.

In der **Versuchsreihe 3** wurde mit allen 5 Produkten aus den Wirkstoffgruppen I bis V eine sehr gute Hydrophobierungsqualität erreicht, die auch über eine Versuchsdauer von 4,5 Jahren nahezu konstant blieb. Die erhebliche Qualitätsverbesserung im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Versuchsreihen 1 und 2 ist vor allem auf die offenporige Struktur des Betons der in der BASt hergestellten Platten zurückzuführen. Hierdurch konnten zum einen auch die nicht so eindringfreudigen Produkte mit höherer Viskosität besser vom Beton aufgenommen werden. Zum anderen nahmen alle Platten der Versuchsreihe 3 bei gleicher Eintauchzeit von 1 Minute erheblich mehr Hydrophobierungsmaterial auf, auch wenn es in verdünnter Form appliziert wurde, als die Platten der Versuchsreihen 1 und 2.

## Literatur

- [BMV-1] Abt. : Zusätzliche Technische Ver-  
Straßenbau tragsbedingungen und Richtli-  
BMV nien für Schutz und Instandset-  
zung von Betonbauteilen [ZTV-  
SIB 90].  
Verkehrsblatt - Verlag, 1990.
- [BMV-2] Abt. : Vorläufige Zusammenstellung  
Straßenbau von Oberflächenschutzsys-  
BMV temen, die die Grundprüfung  
nach den Technischen Lie-  
ferbedingungen für Oberflä-  
chenschutzsysteme, Ausgabe  
1990 bestanden haben.  
BASt, 1994.
- [Bud-1] Budnik, J. : Untersuchungen zur Bestim-  
Maaß, A. mung der Betonfeuchte mit  
dem CM-Gerät.  
BASt-Forschungsbericht,  
1987.
- [Bud-2] Budnik, J. : Instandhaltung von Betonbau-  
Großmann, werken.  
Verlag TÜV Rheinland, 1991.
- [Flu-1] Flückiger, D : Schutz von Beton durch Be-  
Elsener, B. schichtungen  
Böhni, H. Forschungsbericht der BfS,  
Zürich, 1994.
- [Gat-1] Gatz, H.-P. : Verfahren zur Beurteilung der  
Großmann, Qualität von Hydrophobierun-  
F. gen bei Beton.  
BASt-Forschungsbericht,  
1989.
- [Gat-2] Gatz, H.-P. : Langzeituntersuchungen  
Hörner, H.-J Hydrophobierungsmitteln.  
BASt-Forschungsbericht,  
1993.
- [Gat-3] Gatz, H.-P : Persönliche Mitteilung, 1995.
- [Rot-1] Roth, M. : Möglichkeiten zur Erhöhung  
der Eindringtiefe von Imprä-  
gniermitteln.  
Bautenschutz, Bausanierung  
10. Jahrgang, S. 9-13
- [Sas-1] Sasse, R. : Schutz und Instandsetzung  
von Betonbauteilen unter Ver-  
wendung von Kunststoffen.  
Sachstandbericht des DAfSB,  
1994.
- [Sch-1] Schuh- : Handbuch Betonschutz durch  
mann, H. Beschichtungen.  
u. a. Expert Verlag, 1992.

## Anlagen

In den Anlagen sind die zum besseren Verständnis der Zusammenhänge erforderlichen Ergebnisse dargestellt

## Anlage - Kapitel 5.2

MR	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1
1	09.11.1989	16.11.1989	05.12.1989	14.11.1989	05.12.1989	17.11.1989	24.11.1989
2	04.04.1990	11.04.1990	24.04.1990	05.04.1990	24.04.1990	11.04.1990	24.04.1990
3	11.10.1990	19.10.1990	08.11.1990	17.10.1990	08.11.1990	19.10.1990	30.10.1990
4	12.04.1991	19.04.1991	29.05.1991	16.04.1991	29.05.1991	23.04.1991	25.04.1991
5	10.10.1991	24.10.1991	07.11.1991	17.10.1991	07.11.1991	29.10.1991	07.11.1991
6	07.04.1993	14.04.1992	02.06.1992	19.04.1992	02.06.1992	26.05.1992	02.06.1992
7	07.10.1992	16.10.1992	29.10.1992	13.10.1992	29.10.1992	22.10.1992	29.10.1992
8	18.03.1993	20.04.1993	27.04.1993	06.04.1993	27.04.1993	22.04.1993	27.04.1993
9	06.10.1993	21.10.1993	09.11.1993	14.10.1993	09.11.1993	28.10.1993	09.11.1993
10	23.03.1994	12.04.1994	05.05.1994	30.03.1994	05.05.1994	14.04.1994	05.05.1994
11	29.09.1994	20.10.1994	27.10.1994	06.10.1994	27.10.1994	13.10.1994	27.10.1994

MR	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1
1	09.11.1989	16.11.1989	05.12.1989	14.11.1989	05.12.1989	17.11.1989	24.11.1989
2	04.04.1990	11.04.1990	24.04.1990	05.04.1990	24.04.1990	11.04.1990	24.04.1990
3	11.10.1990	19.10.1990	08.11.1990	17.10.1990	08.11.1990	19.10.1990	30.10.1990
4	12.04.1991	19.04.1991	29.05.1991	16.04.1991	29.05.1991	23.04.1991	25.04.1991
5	10.10.1991	24.10.1991	07.11.1991	17.10.1991	07.11.1991	29.10.1991	07.11.1991
6	07.04.1993	14.04.1992	02.06.1992	19.04.1992	02.06.1992	26.05.1992	02.06.1992
7	07.10.1992	16.10.1992	29.10.1992	13.10.1992	29.10.1992	22.10.1992	29.10.1992
8	18.03.1993	20.04.1993	27.04.1993	06.04.1993	27.04.1993	22.04.1993	27.04.1993
9	06.10.1993	21.10.1993	09.11.1993	14.10.1993	09.11.1993	28.10.1993	09.11.1993
10	23.03.1994	12.04.1994	05.05.1994	30.03.1994	05.05.1994	14.04.1994	05.05.1994
11	29.09.1994	20.10.1994	27.10.1994	06.10.1994	27.10.1994	13.10.1994	27.10.1994

Tabelle 1: Versuchsreihe 1, Meßzeitplan

## Anlage - Kapitel 5.2

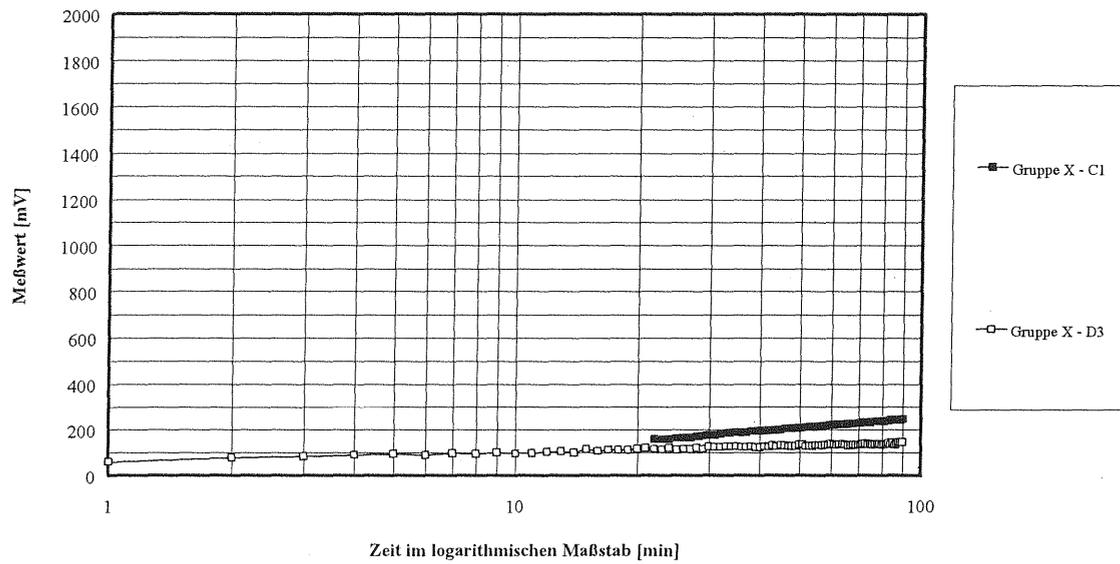


Bild 1: Versuchsreihe 1, Gruppe X, MR 1

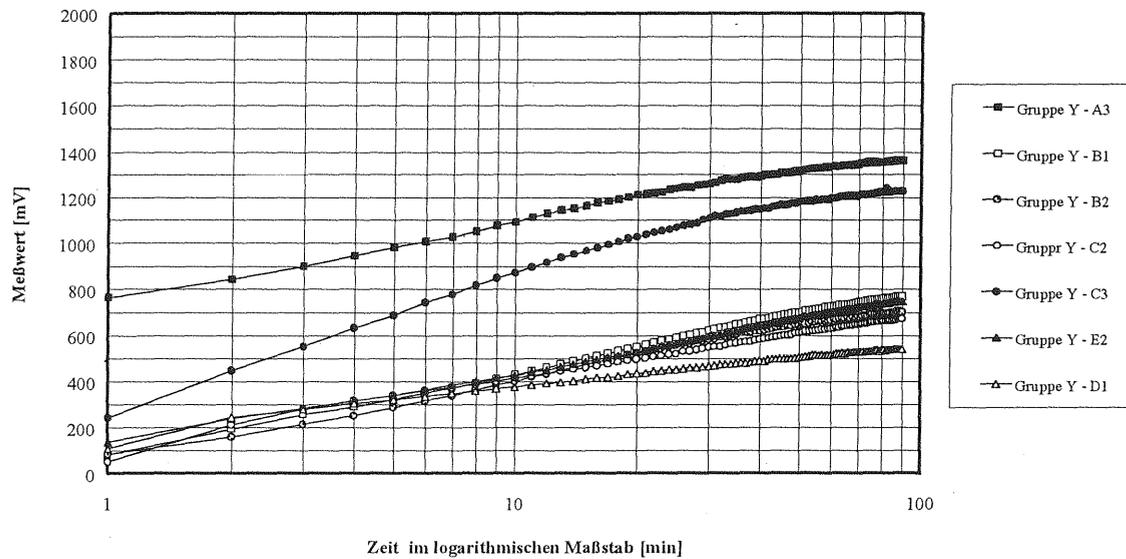


Bild 2: Versuchsreihe 1, Gruppe Y, MR 1

## Anlage - Kapitel 5.2

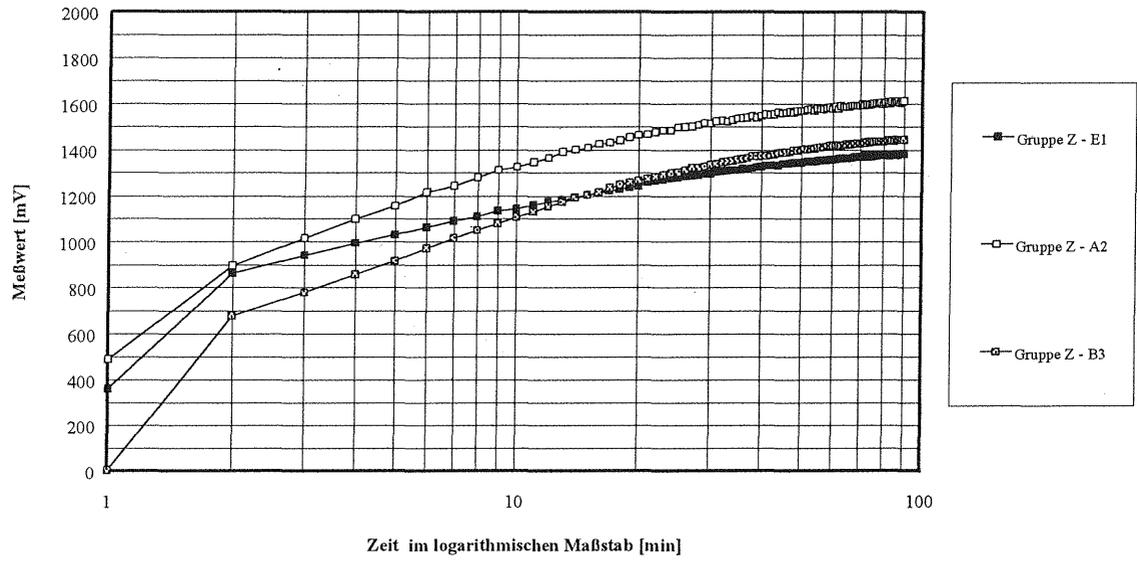


Bild 3: Versuchsreihe 1, Gruppe Z, MR 1

Anlage - Kapitel 5.2

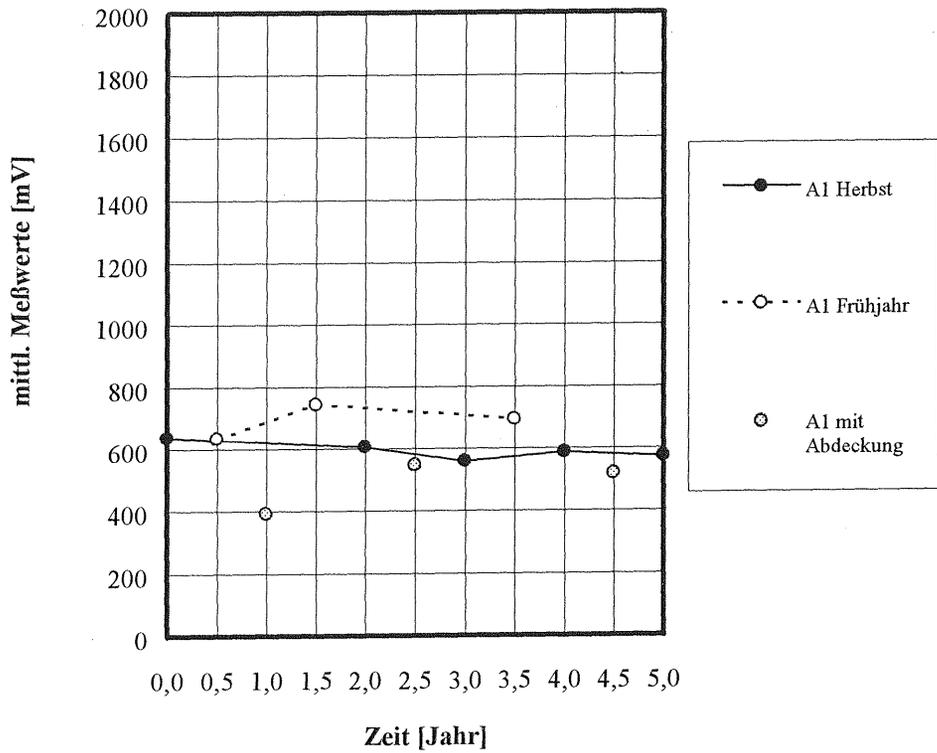


Bild 4: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt A1

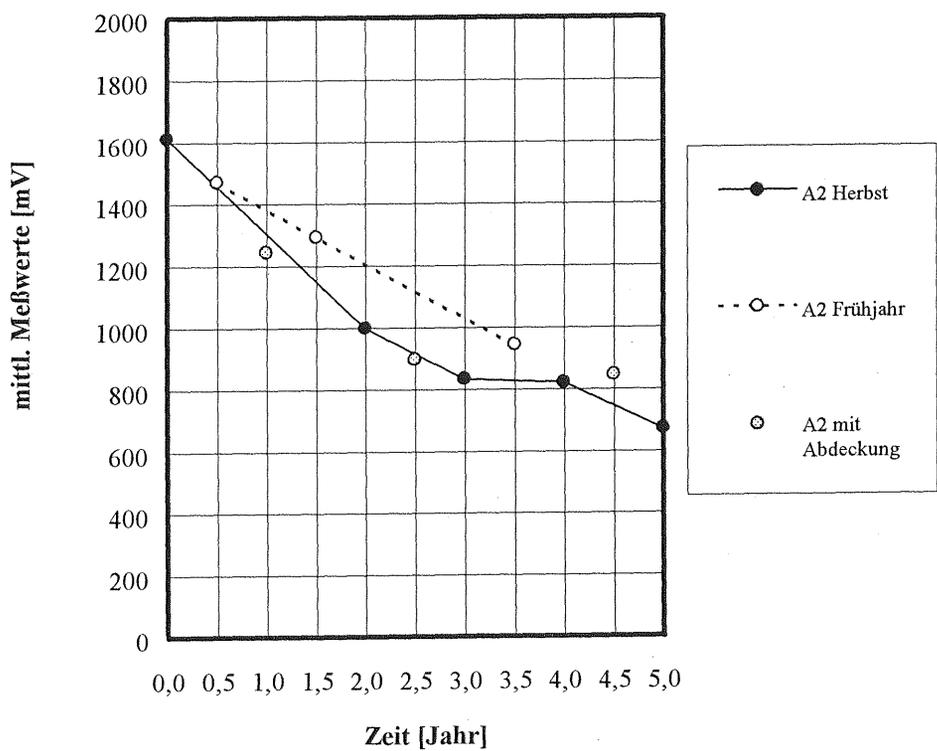


Bild 5: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt A2

## Anlage - Kapitel 5.2

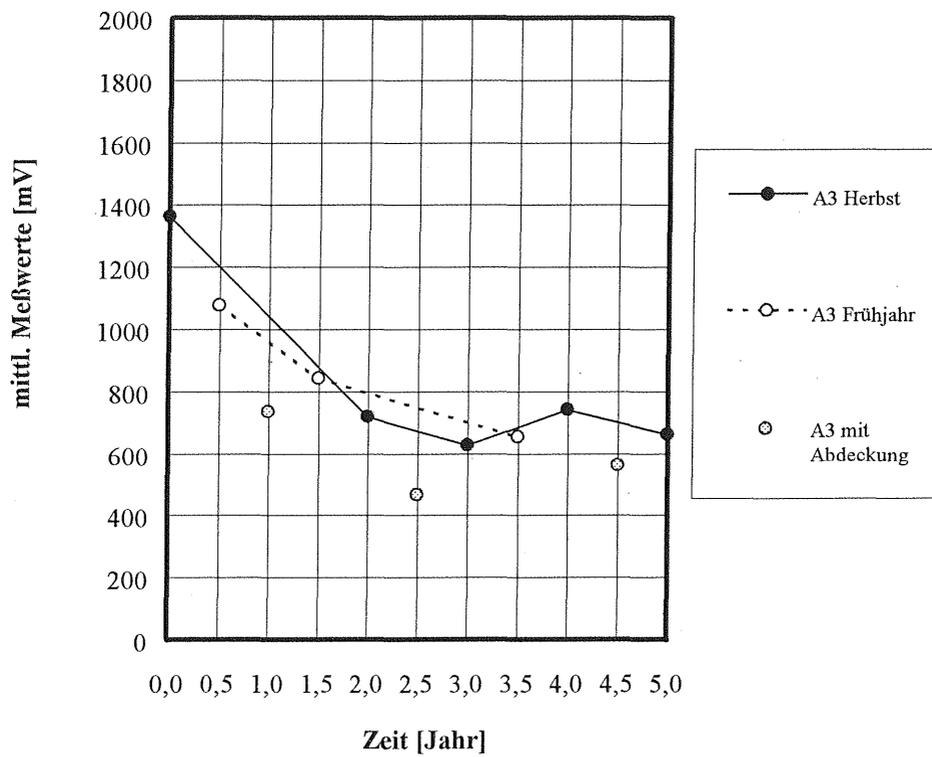


Bild 6: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt A3

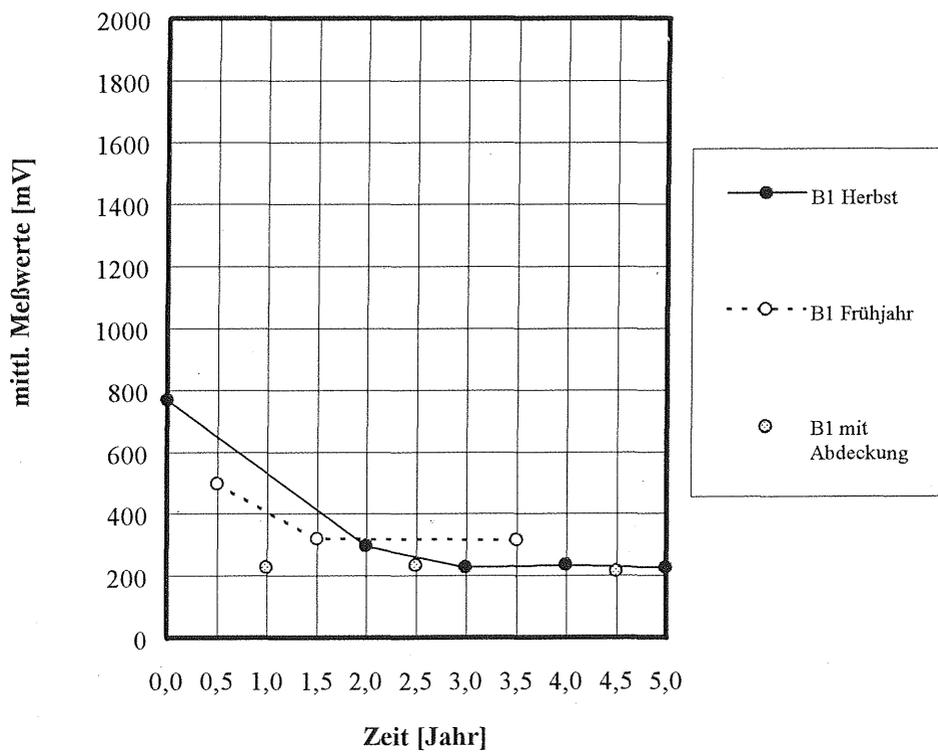


Bild 7: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt B1

## Anlage - Kapitel 5.2

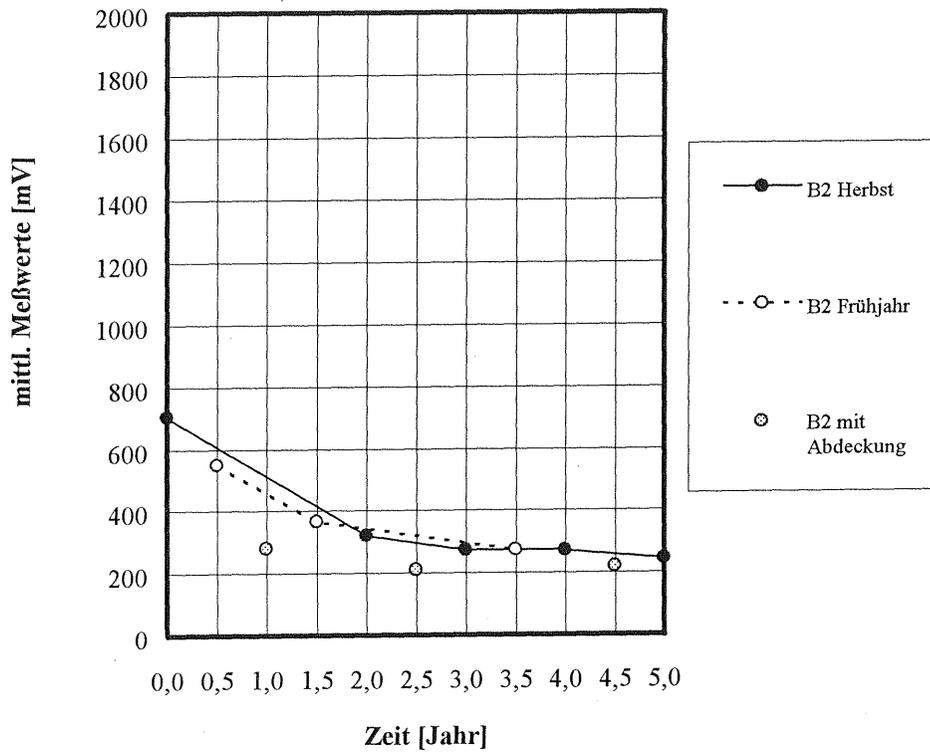


Bild 8: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt B2

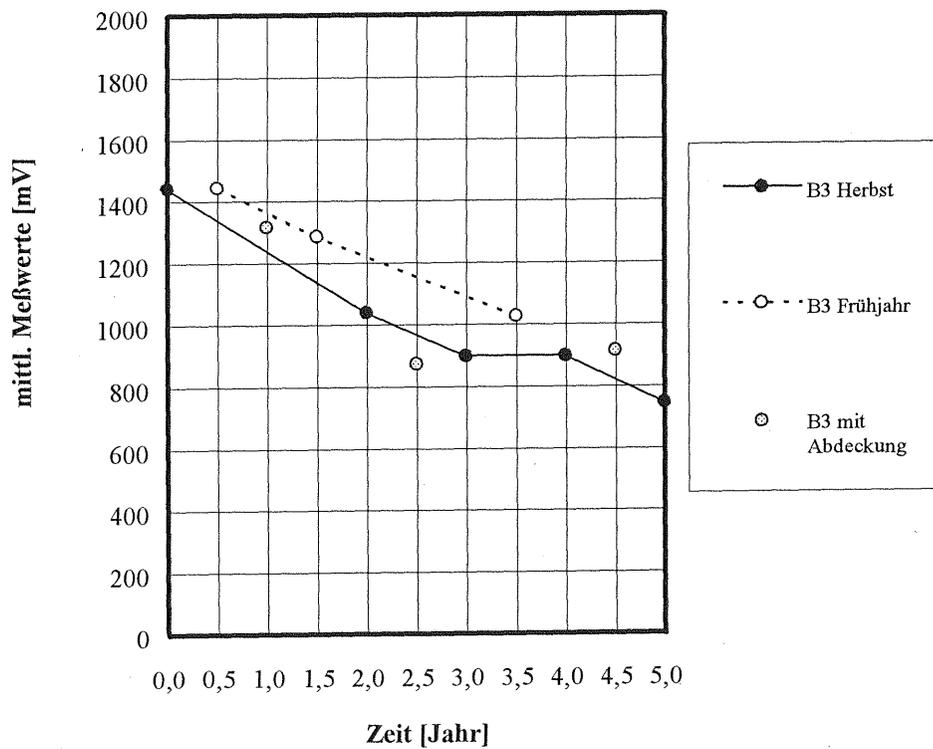


Bild 9: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt B3

Anlage - Kapitel 5.2

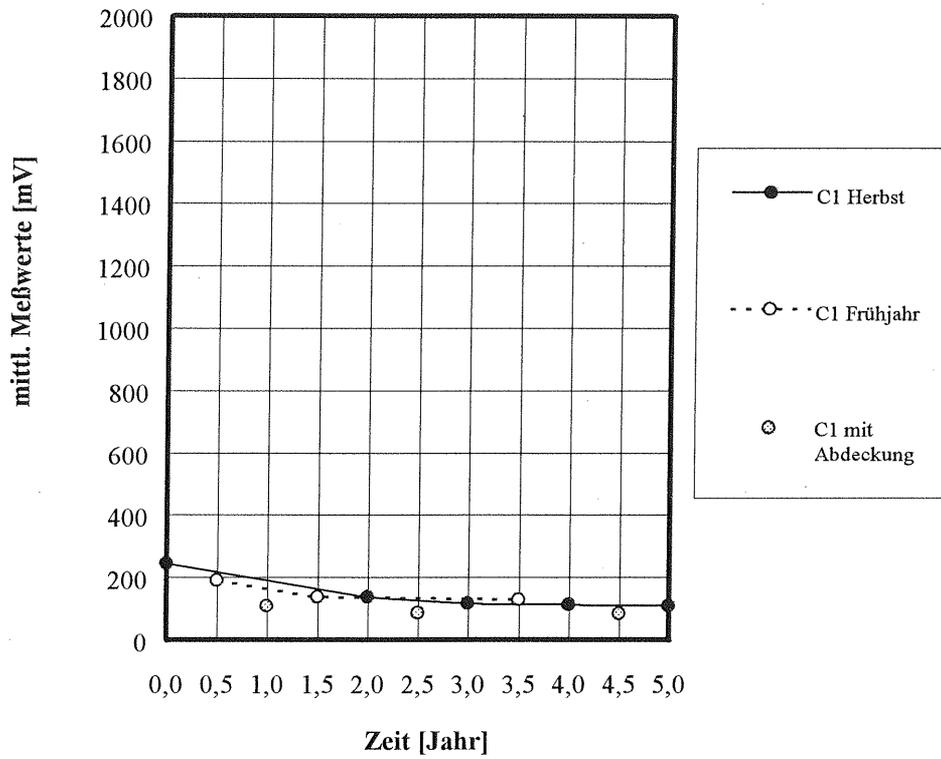


Bild 10: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt C1

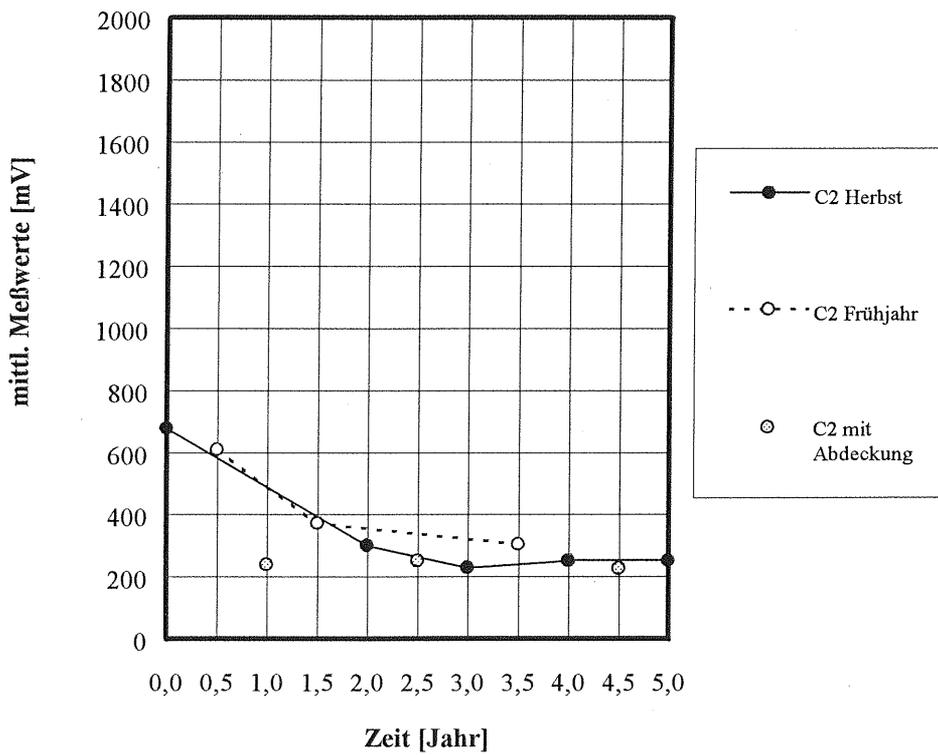


Bild 11: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt C2

## Anlage - Kapitel 5.2

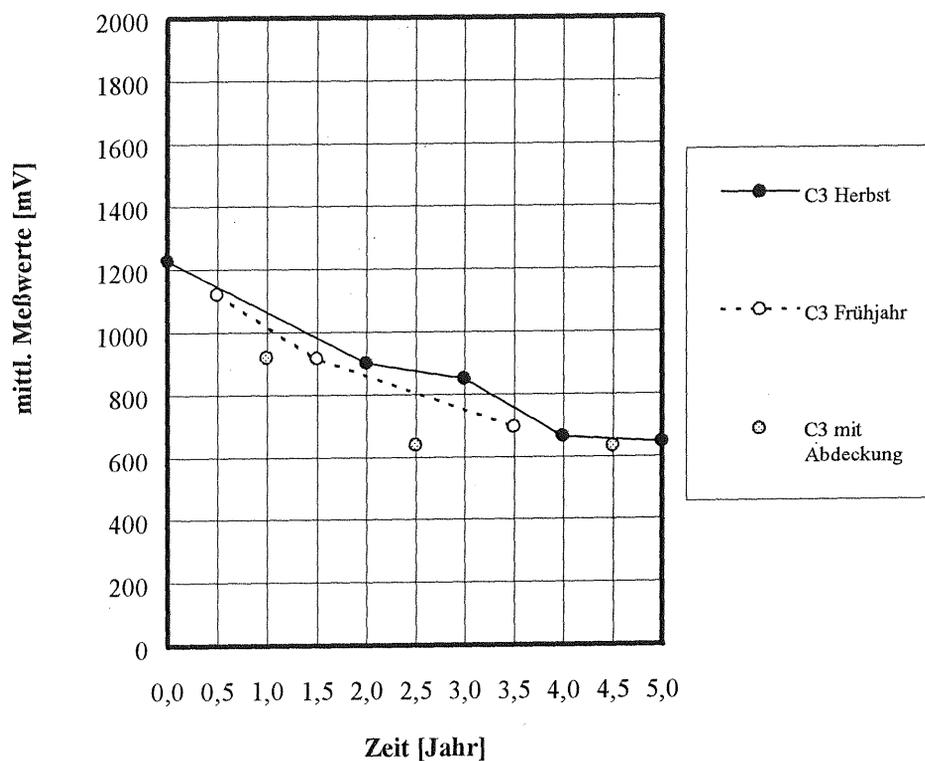


Bild 12: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt C3

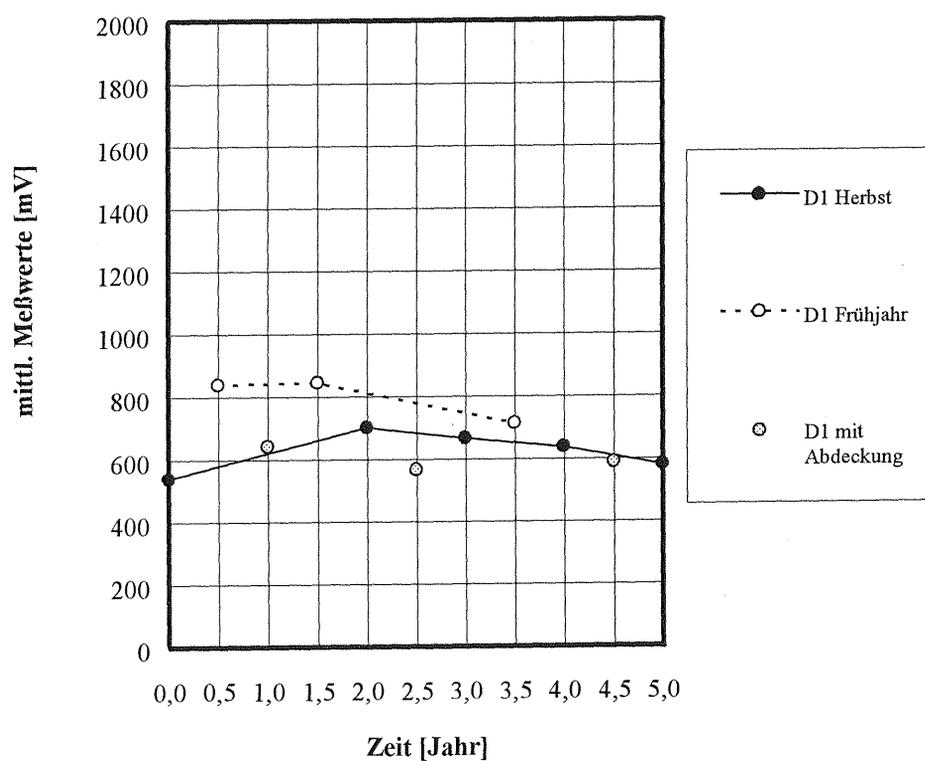


Bild 13: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt D1

Anlage - Kapitel 5.2

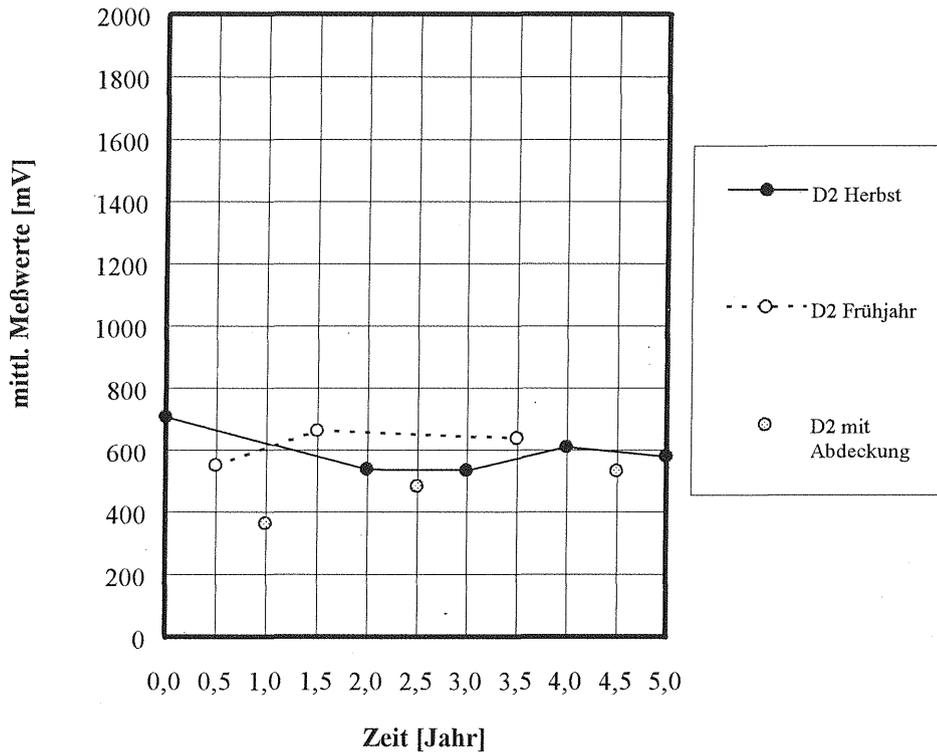


Bild 14: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt D2

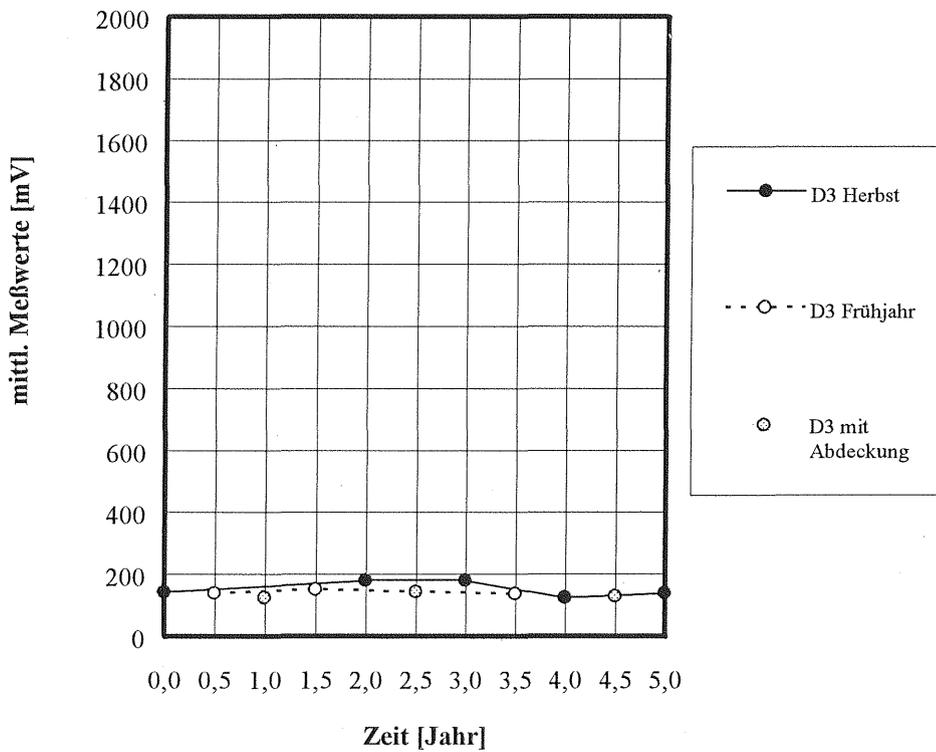


Bild 15: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt D3

## Anlage - Kapitel 5.2

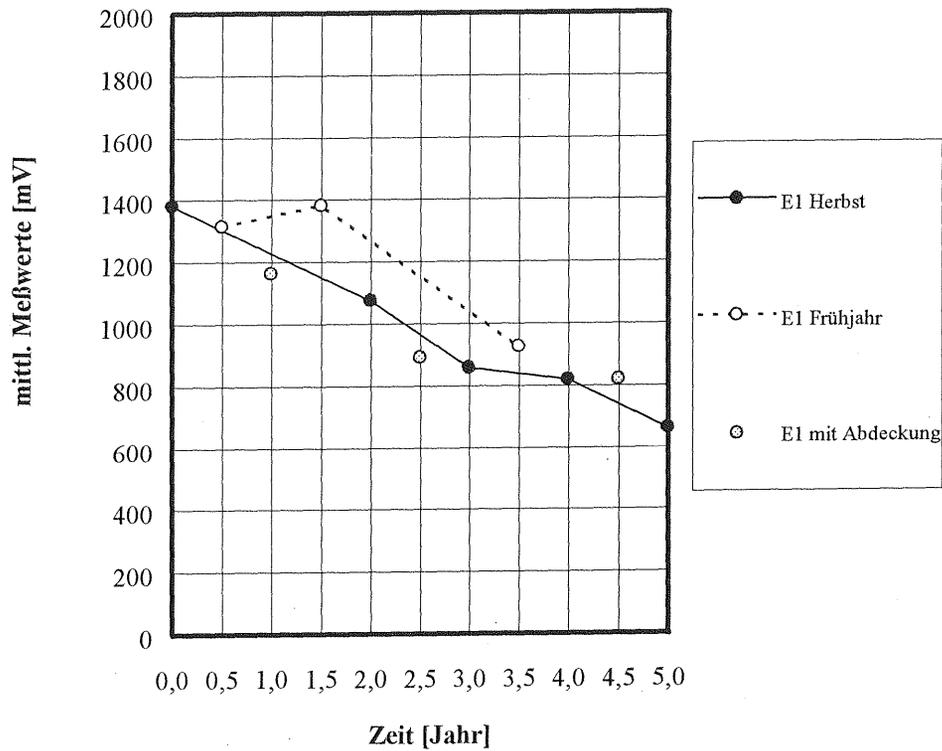


Bild 16: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt E1

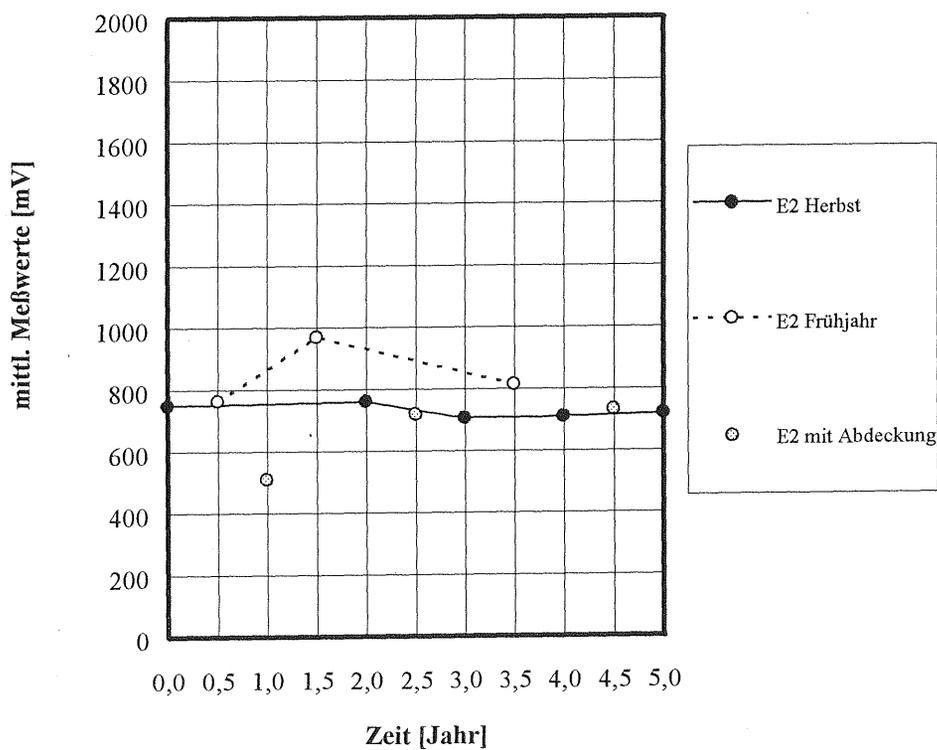


Bild 17: Versuchsreihe 1, Langzeituntersuchung, Produkt E2

## Anlage - Kapitel 5.3

MR	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1
1	09.11.1989	16.11.1989	05.12.1989	14.11.1989	05.12.1989		24.11.1989
2	21.03.1990	09.04.1990	20.04.1990	03.04.1990	20.04.1990		24.04.1990
0	08.08.1990	20.11.1990	29.08.1990	05.09.1990	29.08.1990		28.08.1990
3	04.12.1990	11.03.1991	20.12.1990	03.01.1991	20.12.1990		20.12.1990
4	04.06.1991	12.09.1991	03.07.1991	11.07.1991	02.07.1991		02.07.1991
5	16.12.1991	17.03.1992	14.01.1992	29.01.1992	14.01.1992		09.01.1992
6	03.06.1992	25.08.1992	15.07.1992	28.06.1992	15.07.1992		15.07.1992
7	08.12.1992	26.02.1993	22.12.1992	20.01.1993	22.12.1992		22.12.1992
8	27.05.1993	16.09.1993	01.07.1993	07.07.1993	01.07.1993		01.07.1993
9	01.12.1993	15.03.1994	22.12.1993	06.01.1994	22.12.1993		22.12.1993
10	26.05.1994	03.08.1994	06.07.1994	13.07.1994	06.07.1994		06.07.1994
11	22.11.1994	21.02.1995	21.12.1994	17.01.1995	21.12.1994		21.12.1994

MR	C2	C3	D1	D2	D3	E1	E2
1	14.11.1989		21.11.1989	09.11.1989	28.11.1989	16.11.1989	28.11.1989
2	03.04.1990		18.04.1990	21.03.1990	23.04.1990	09.04.1990	23.04.1990
0	05.09.1990		16.08.1990	08.08.1990	14.08.1990	20.11.1990	14.08.1990
3	03.01.1991		11.12.1990	04.06.1991	06.12.1990	11.03.1991	06.12.1990
4	11.07.1991		28.06.1991	16.12.1991	06.06.1991	12.09.1991	06.06.1991
5	29.01.1992		07.01.1992	04.06.1992	18.12.1991	17.03.1992	18.12.1991
6	28.06.1992		27.05.1992	08.12.1992	04.06.1992	25.08.1992	04.06.1992
7	20.01.1993		17.12.1992	27.05.1993	05.12.1992	26.02.1993	08.12.1992
8	07.07.1993		17.06.1993	01.12.1993	16.06.1993	16.09.1993	15.06.1993
9	06.01.1994		15.12.1993	26.05.1994	08.12.1993	15.03.1994	22.06.1994
10	13.07.1994		30.06.1994	22.11.1994	22.06.1994	03.08.1994	01.12.1994
11	17.01.1995		13.12.1994		01.12.1994	21.02.1995	

Tabelle 1: Versuchsreihe 2, Meßzeitplan

### Anlage - Kapitel 5.3

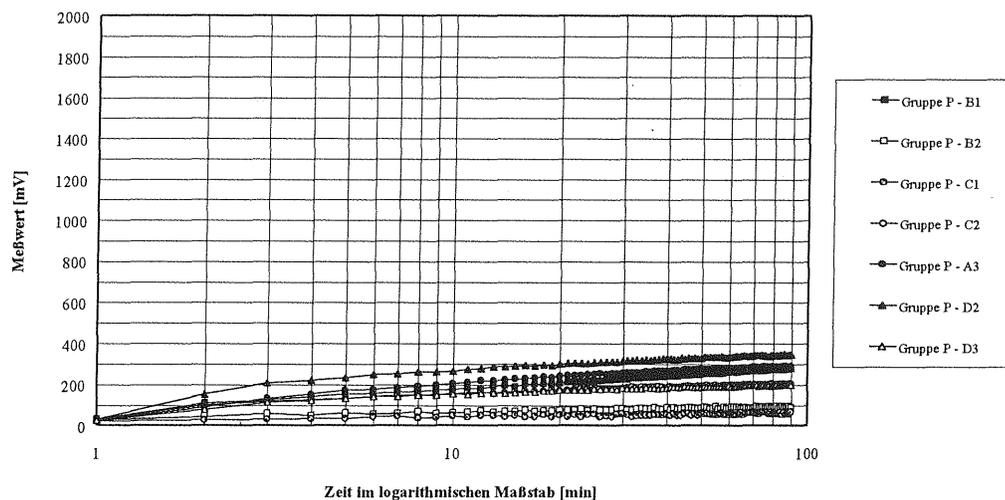


Bild 1: Versuchsreihe 2, Gruppe P, MR 3

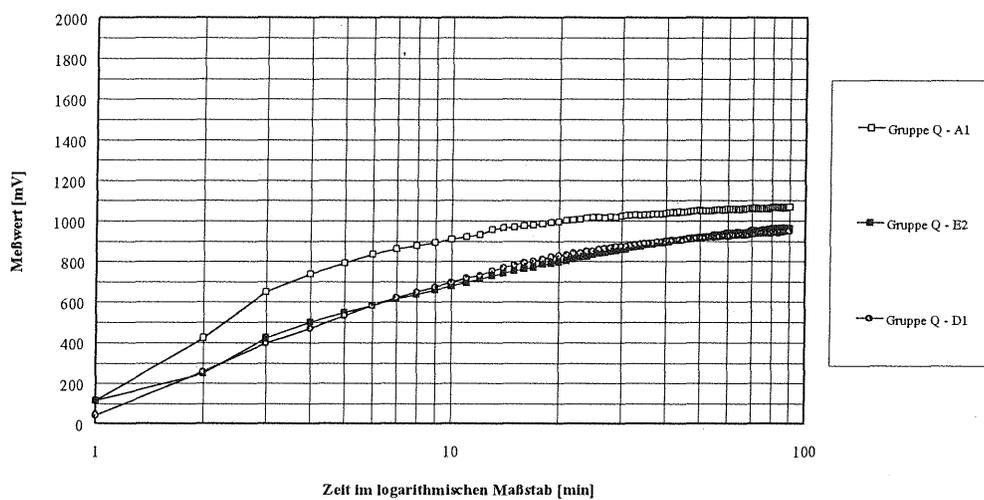


Bild 2: Versuchsreihe 2, Gruppe Q, MR 3

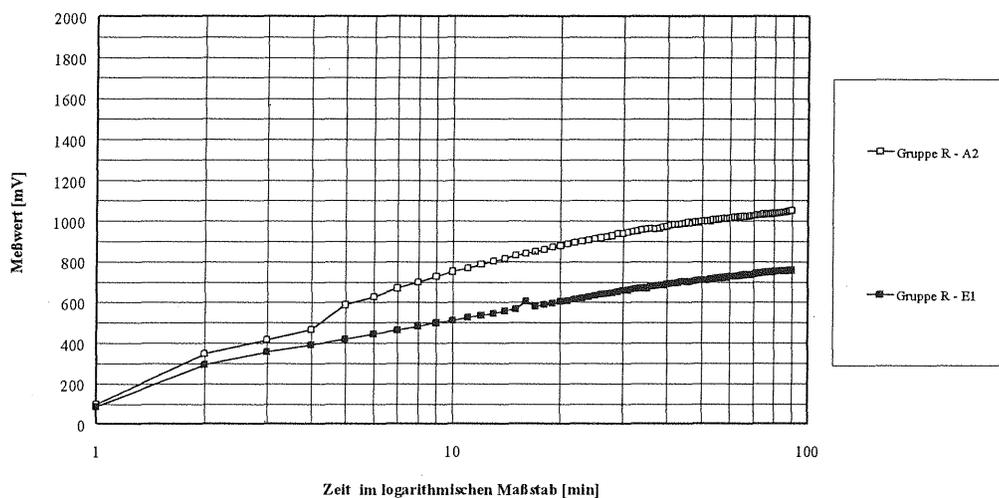


Bild 3: Versuchsreihe 2, Gruppe R, MR 3

Anlage - Kapitel 5.3

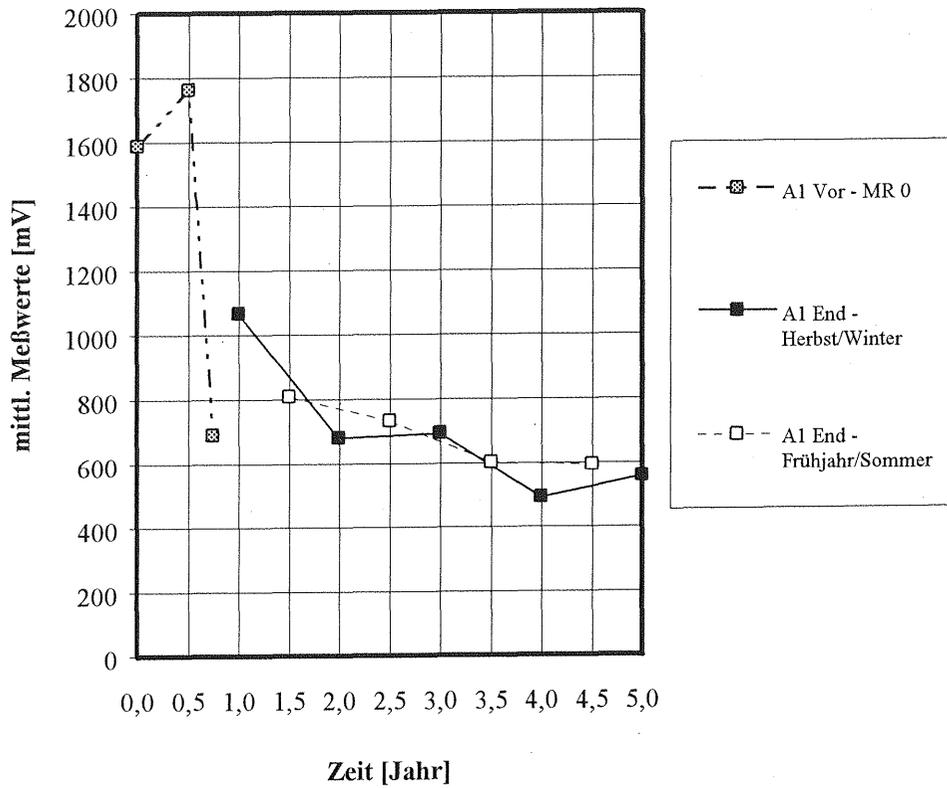


Bild 4: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt A1

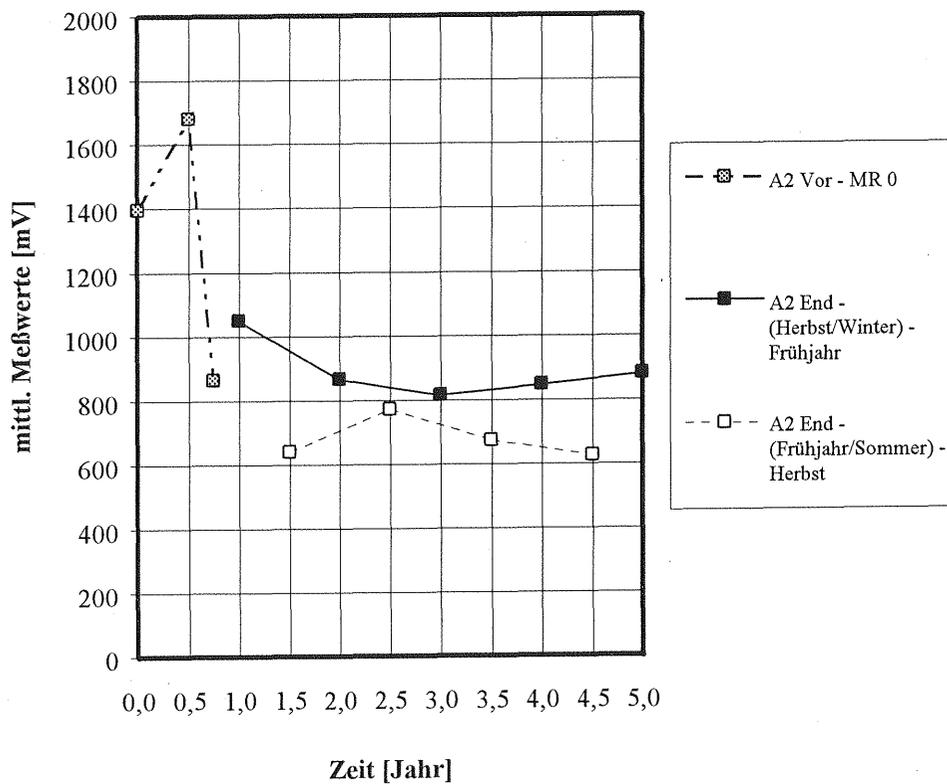


Bild 5: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt A2

## Anlage - Kapitel 5.3

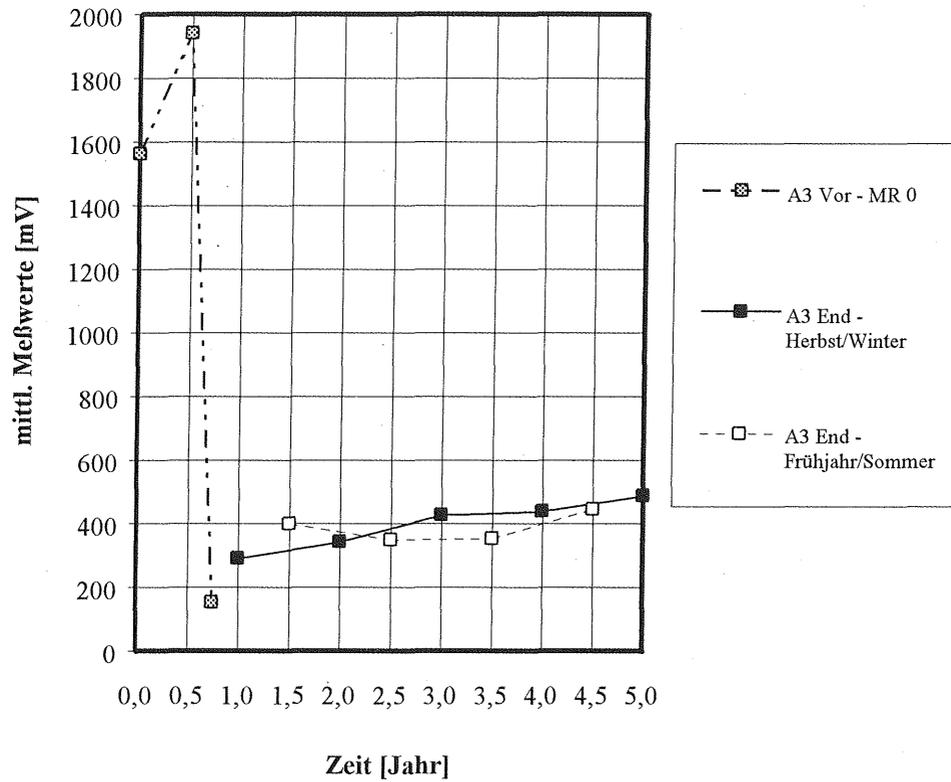


Bild 6: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt A3

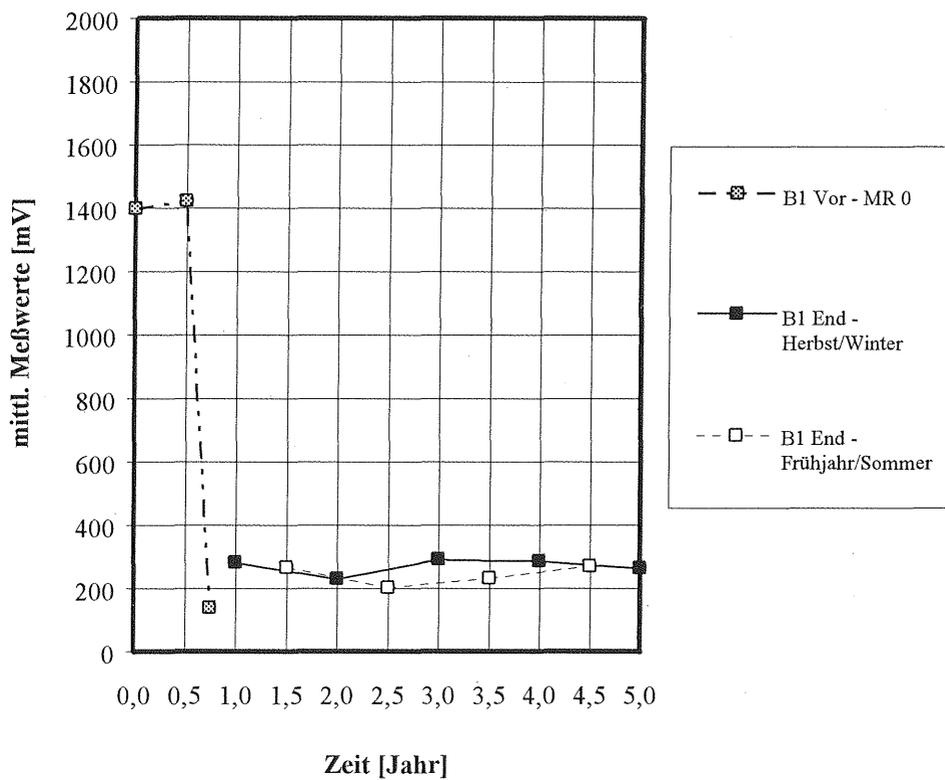


Bild 7: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt B1

## Anlage - Kapitel 5.3

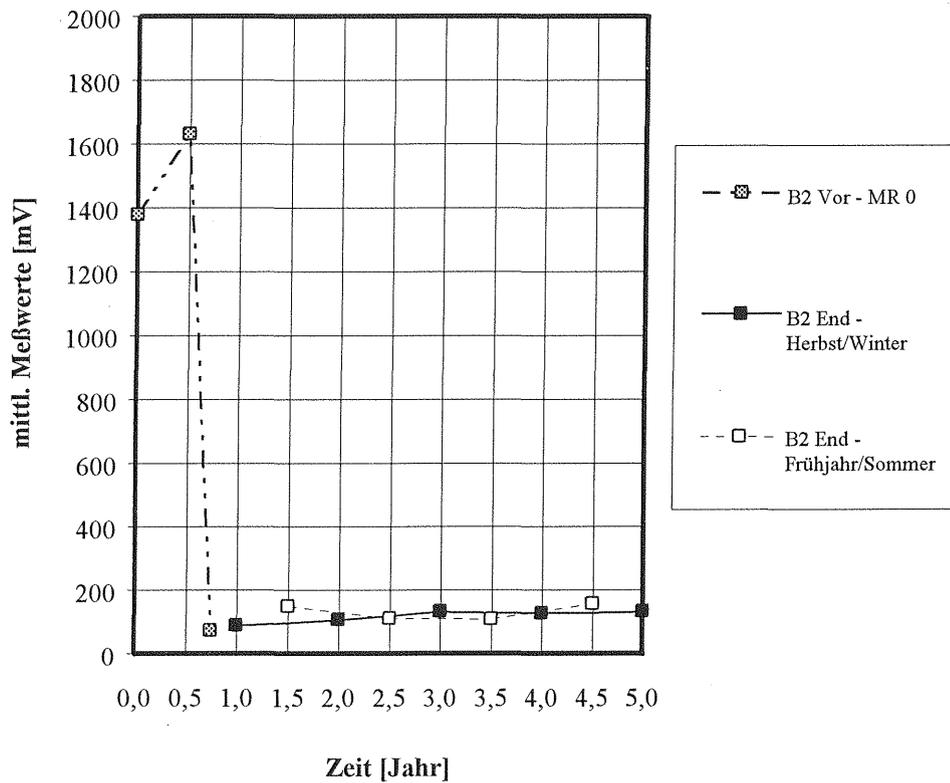


Bild 8: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt B2

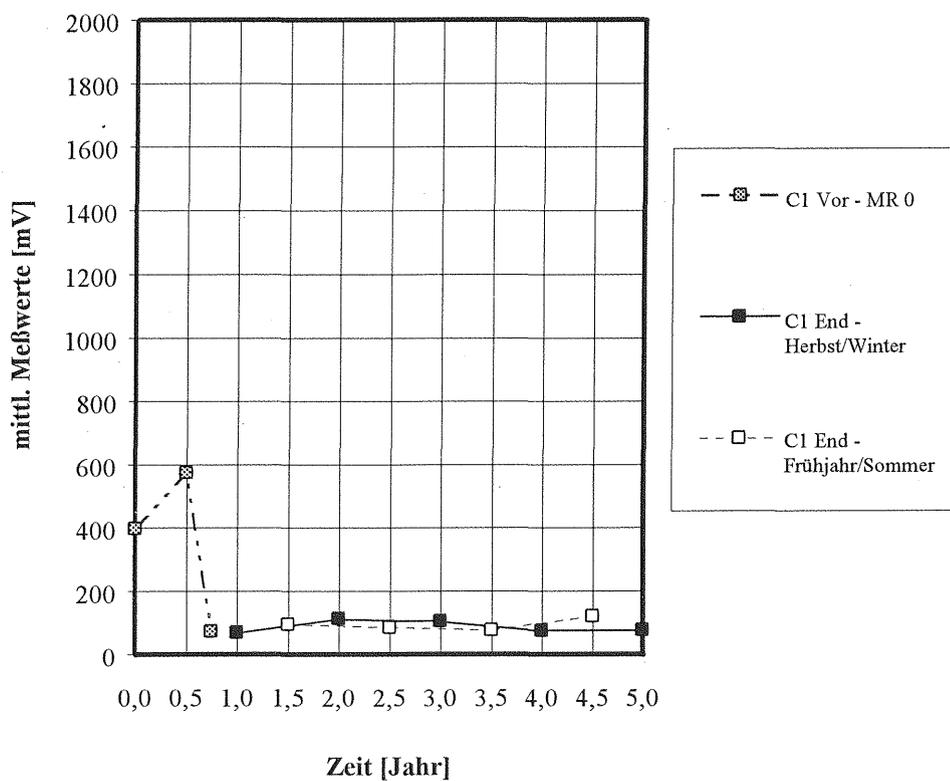


Bild 9: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt C1

## Anlage - Kapitel 5.3

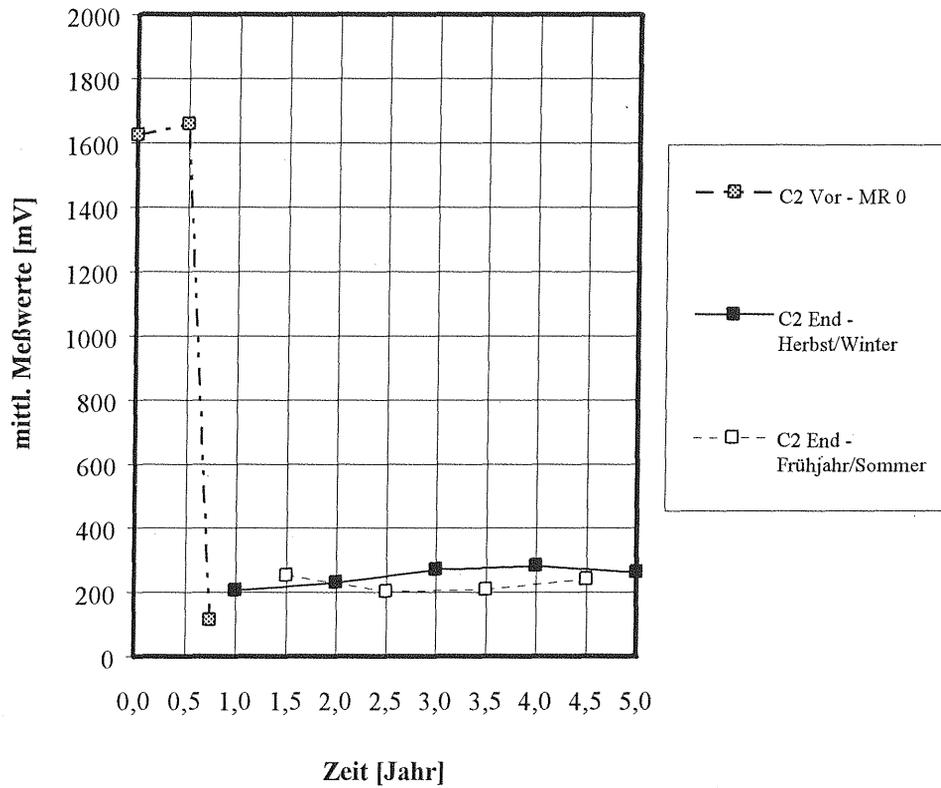


Bild 10: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt C2

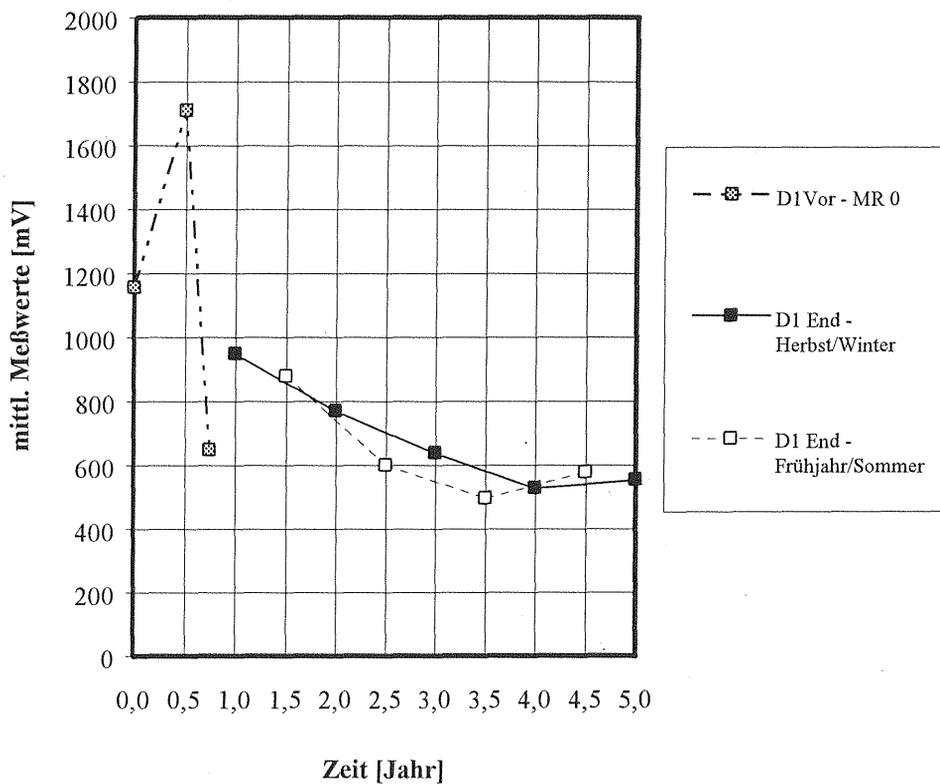


Bild 11: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt D1

Anlage - Kapitel 5.3

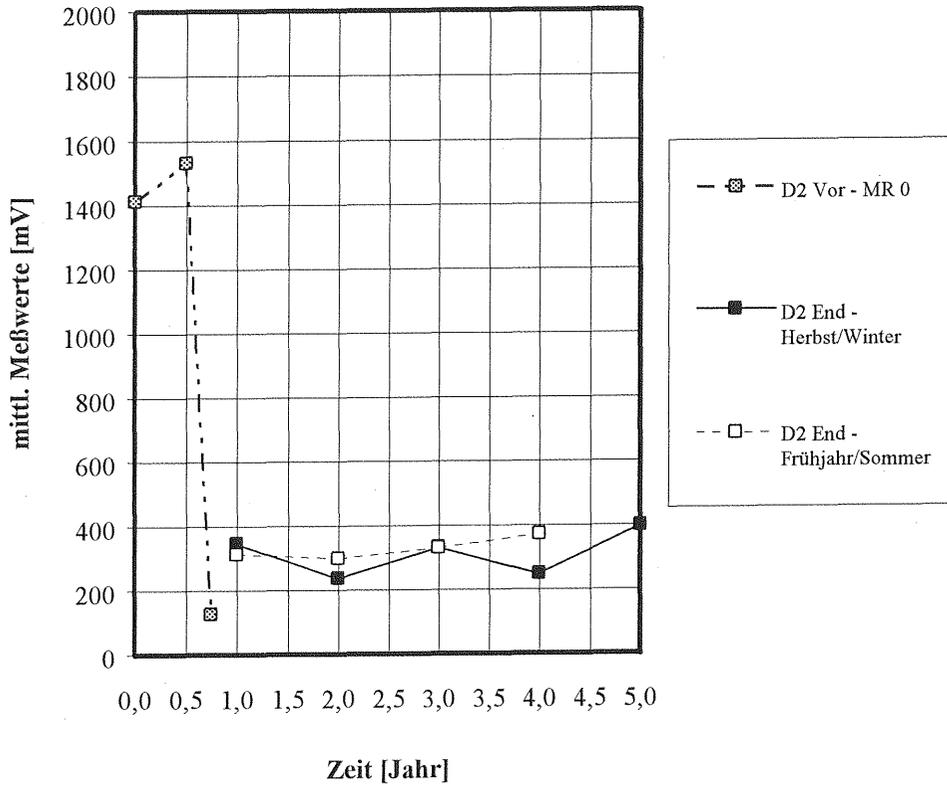


Bild 12: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt D2

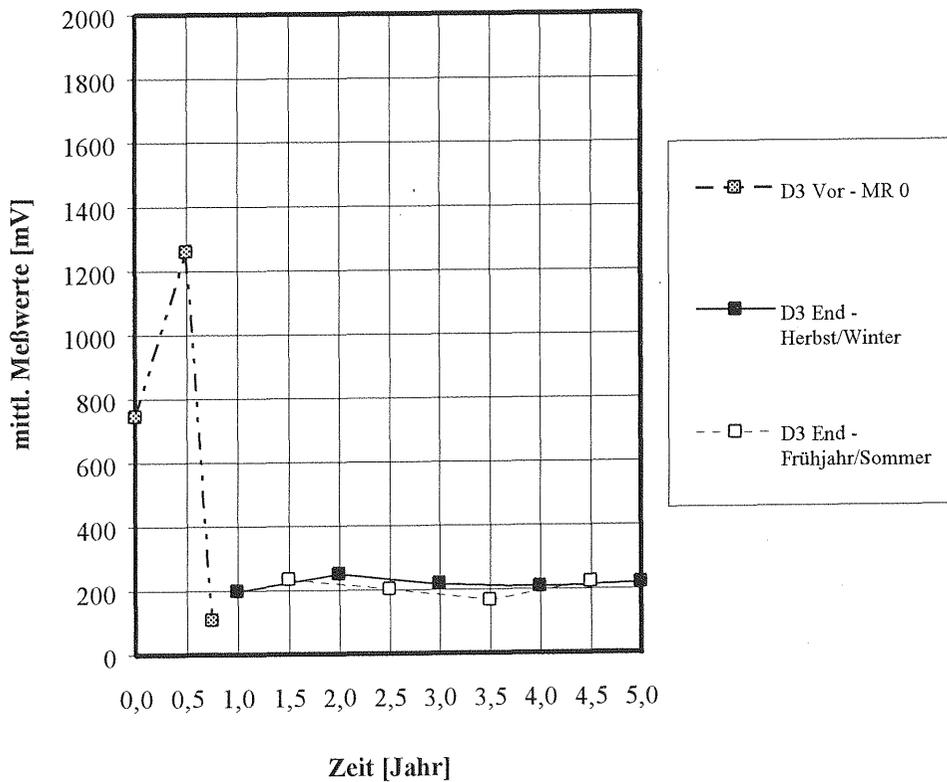


Bild 13: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt D3

## Anlage - Kapitel 5.3

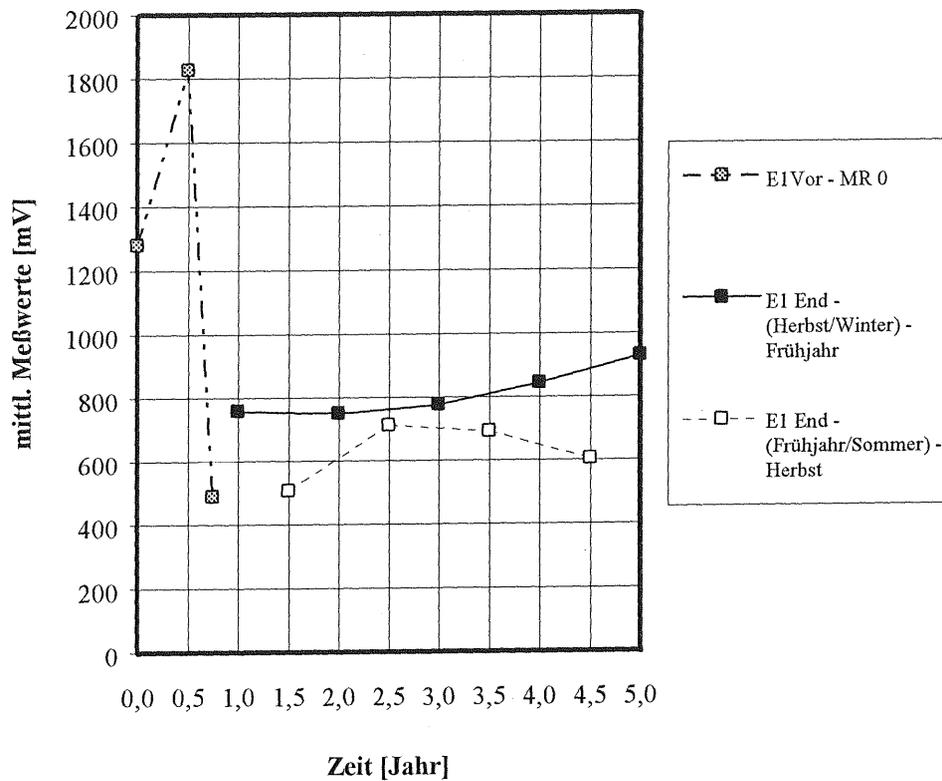


Bild 14: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt E1

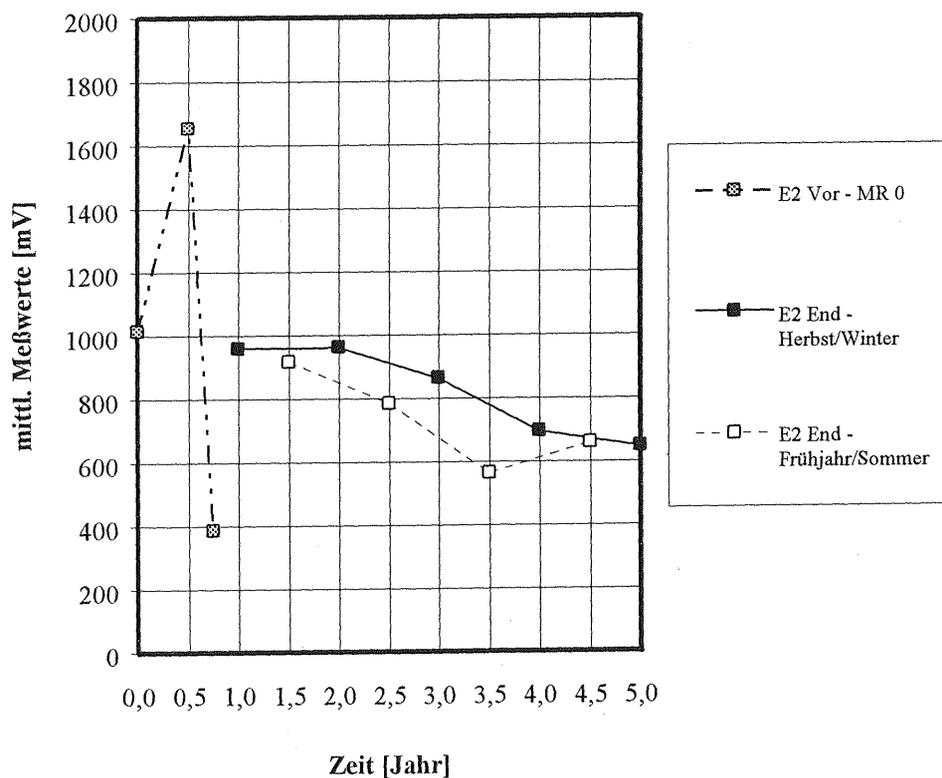


Bild 15: Versuchsreihe 2, Langzeituntersuchung, Produkt E2

## Anlage - Kapitel 5.4

MR	A2	B2	C2	D1	E2
3	23.11.1990	04.04.1991	04.09.1990	16.08.1990	07.08.1990
4	13.03.1991	04.09.1991	04.01.1991	11.12.1990	04.12.1990
5	20.09.1991	12.03.1992	16.07.1991	28.06.1991	29.05.1991
6	19.03.1992	19.08.1992	22.01.1991	03.01.1992	20.12.1991
7	19.08.1992	17.02.1993	30.07.1992	03.06.1992	03.06.1992
8	04.03.1993	11.08.1993	28.01.1993	17.12.1992	15.12.1992
9	29.09.1993	09.03.1994	23.06.1993	17.06.1993	04.06.1993
10	17.03.1994	26.07.1994	13.01.1994	15.12.1993	26.11.1993
11	10.08.1994	08.02.1995	20.07.1994	30.06.1994	24.06.1994
12	02.03.1995		05.01.1995	15.12.1994	06.12.1994

Tabelle 1: Versuchsreihe 3, Meßzeitplan

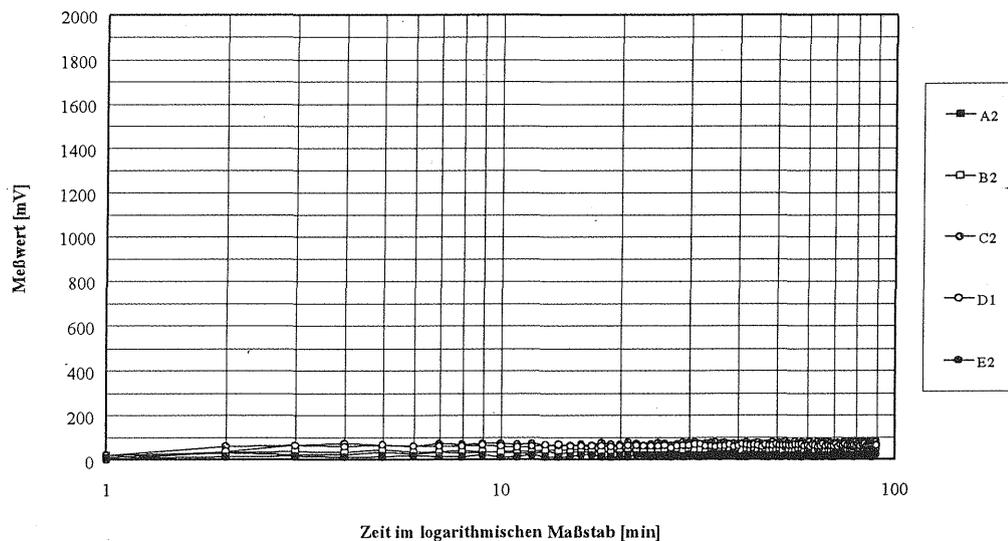


Bild 1: Versuchsreihe 3, MR 3

## Anlage - Kapitel 5.4

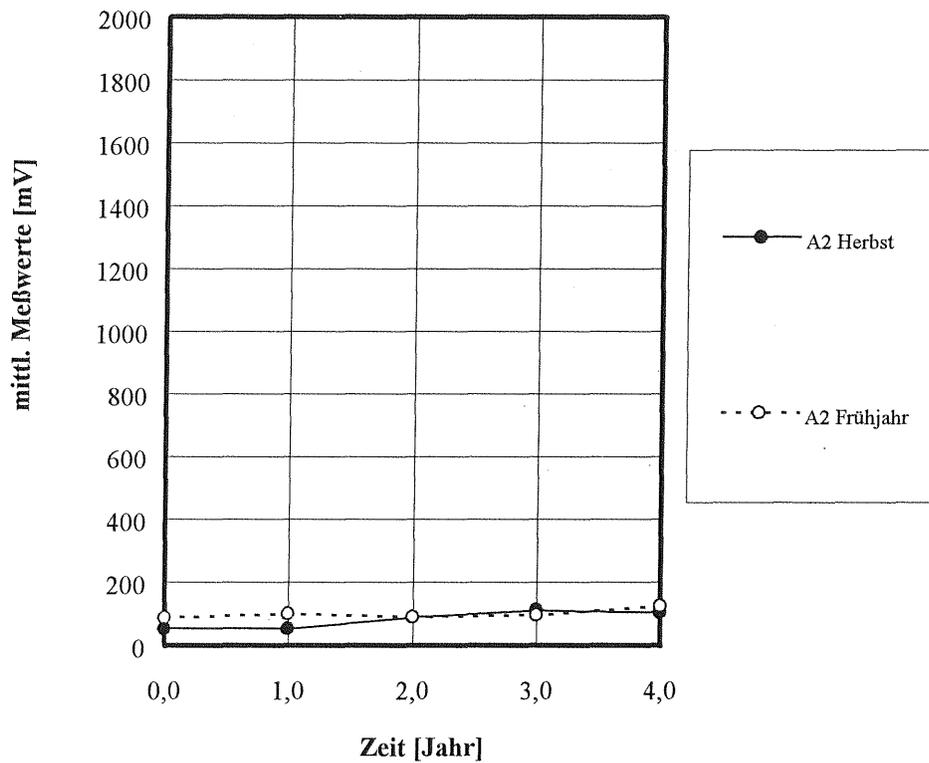


Bild 2: Versuchsreihe 3, Langzeituntersuchung, Produkt A2

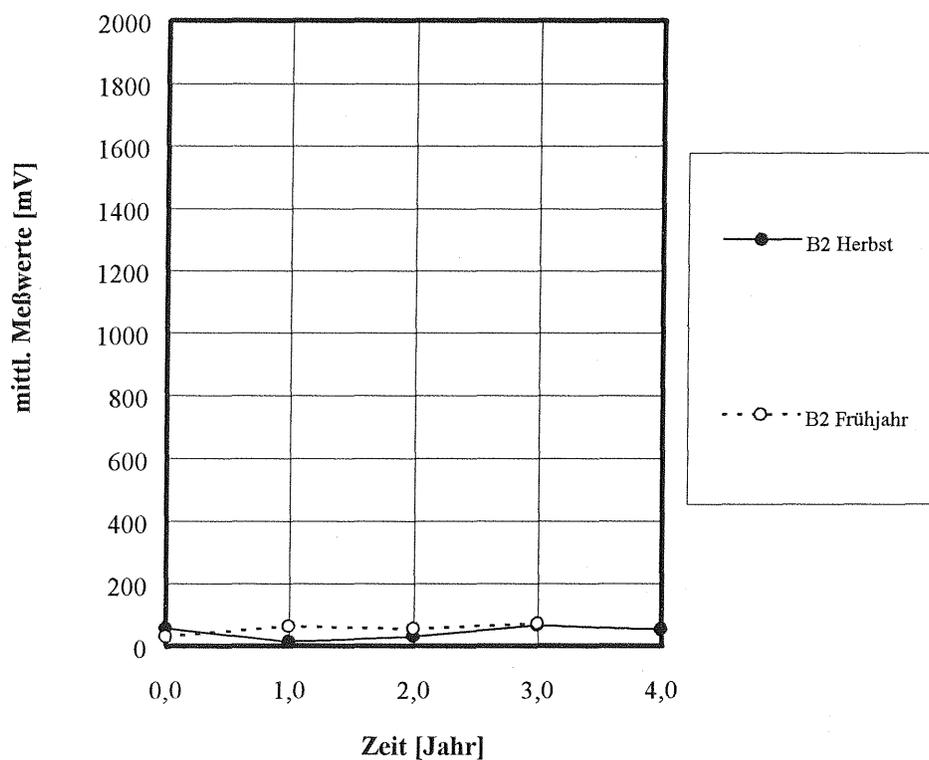


Bild 3: Versuchsreihe 3, Langzeituntersuchung, Produkt B2

## Anlage - Kapitel 5.4

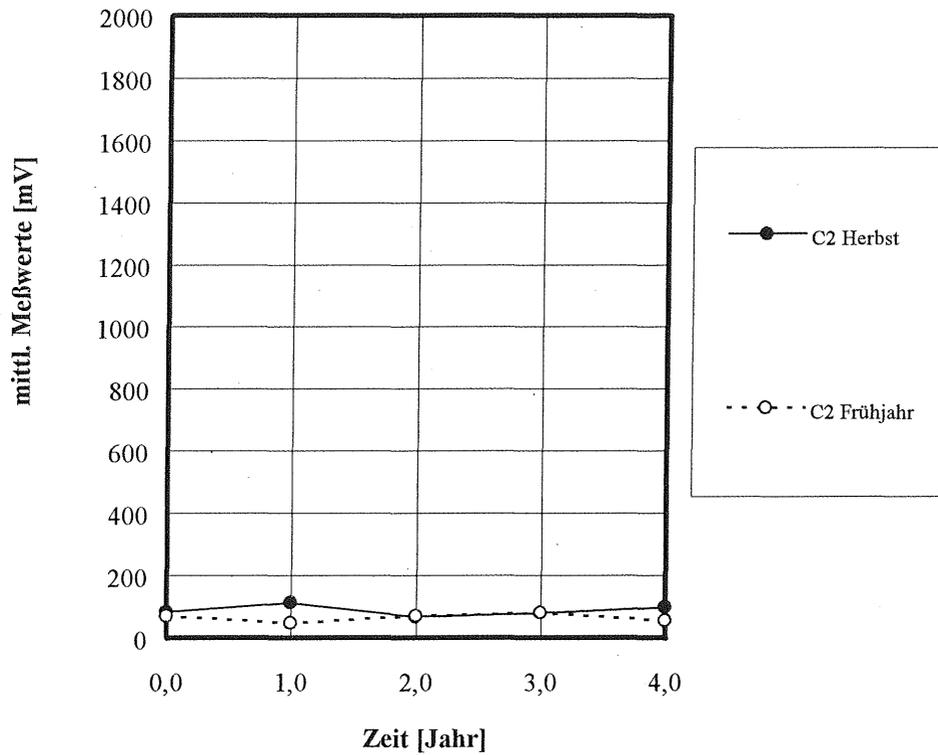


Bild 4: Versuchsreihe 3, Langzeituntersuchung, Produkt C2

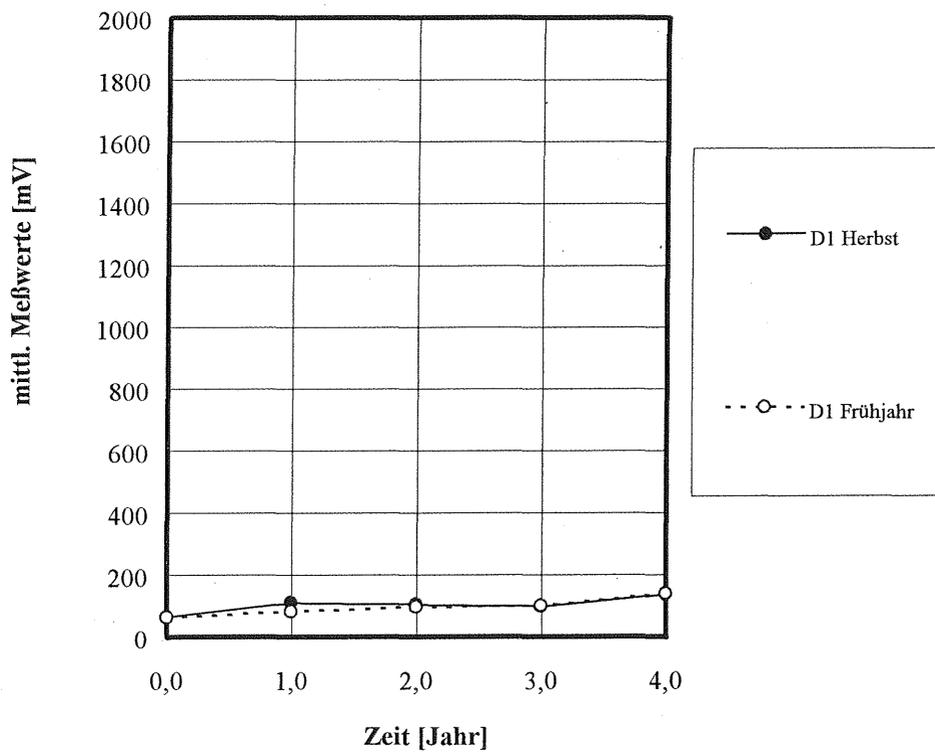


Bild 5: Versuchsreihe 3, Langzeituntersuchung, Produkt D1

## Anlage - Kapitel 5.4

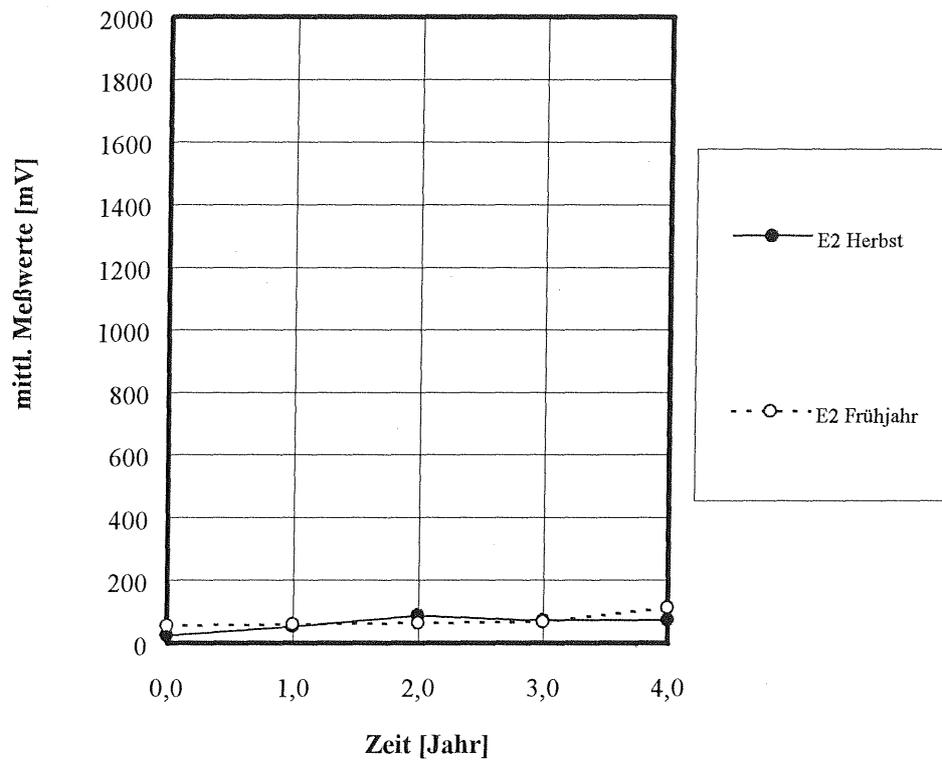


Bild 6: Versuchsreihe 3, Langzeituntersuchung, Produkt E2

## Anlage - Kapitel 5.5

Produkt	VR 1	VR 2 Vor.	VR 2 End.	VR 2 Summe	VR 3
A1	13,7	4,0	9,3	13,3	
A2	11,7	5,0	7,6	12,7	20,7
A3	12,3	3,7	10,7	14,3	
B1	16,0	3,0	11,3	14,3	
B2	8,7	6,0	13,6	19,7	38,0
B3	13,0	5,7			
C1	13,0	7,7	9,3	17,0	
C2	16,0	4,0	8,7	12,7	23,0
C3	20,7				23,0
D1	10,3	4,0	8,3	12,3	
D2	13,3	2,7	12,0	14,7	
D3	14,3	5,3	8,0	13,3	
E1	12,3	2,7	11,0	13,7	
E2	13,7	4,7	9,0	13,7	25,7
Mittelwert	13,5	4,5	9,9	14,3	26,7
Standardab.	2,3	3,5	1,8	3,9	7,3

Tabelle 1: Mittlere Aufnahmemenge an Hydrophobierungsmitteln in handelsüblicher verdünnter bzw. unverdünnter Form in [g]

Anlage - Kapitel 5.5

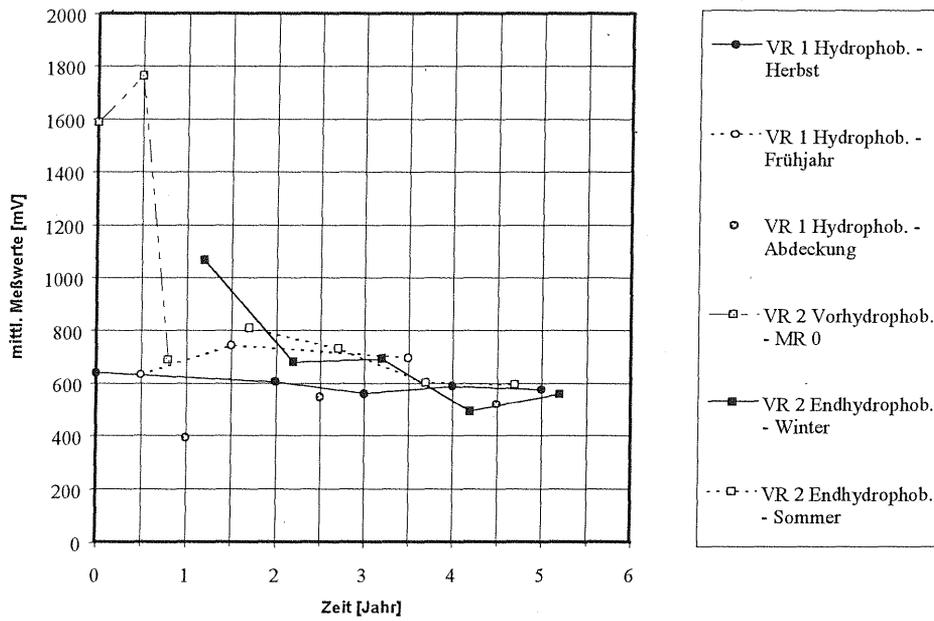


Bild 1: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt A1

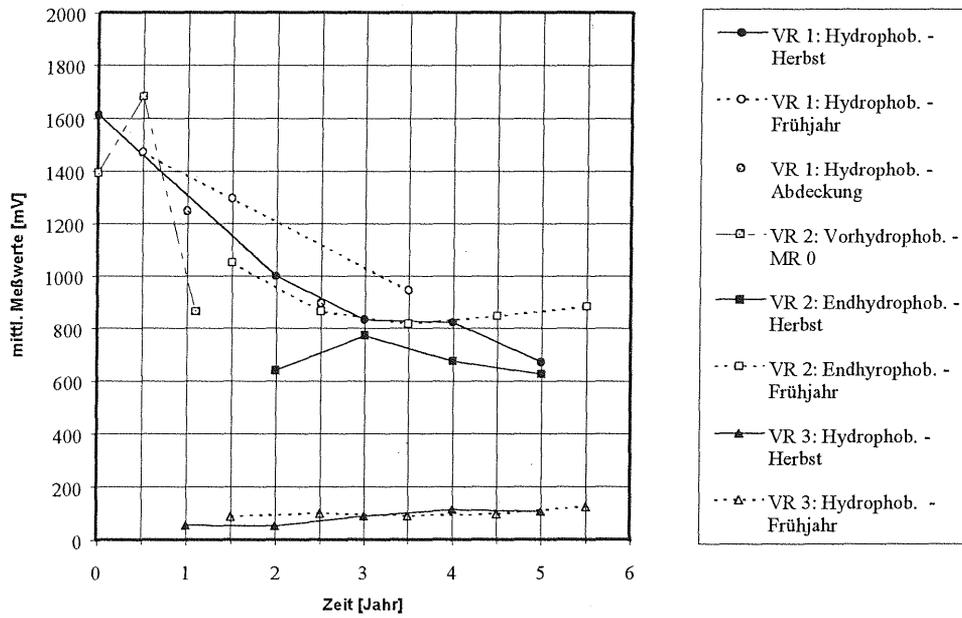


Bild 2: Versuchsreihen 1, 2 und 3, Langzeituntersuchung, Produkt A2

Anlage - Kapitel 5.5

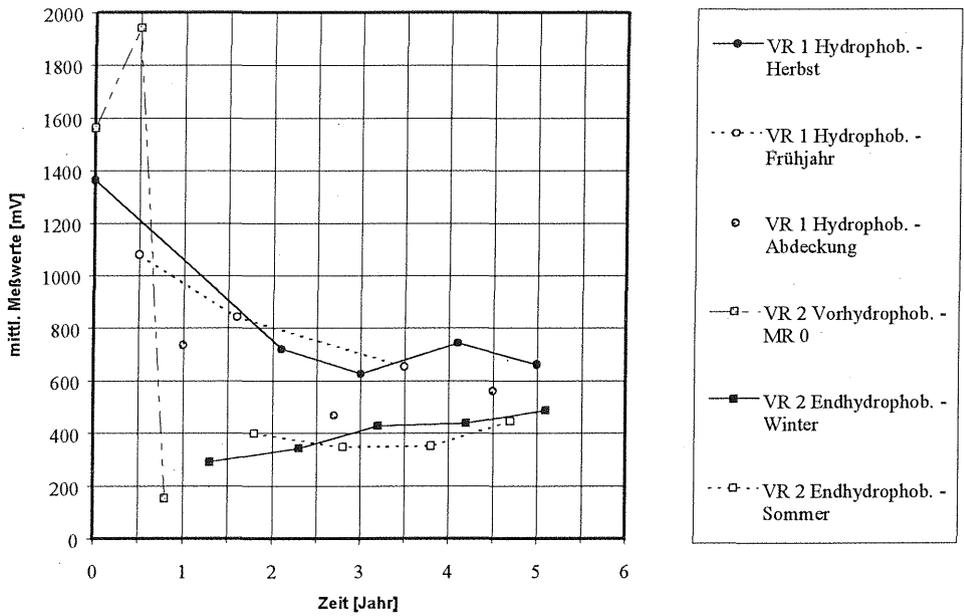


Bild 3: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt A3

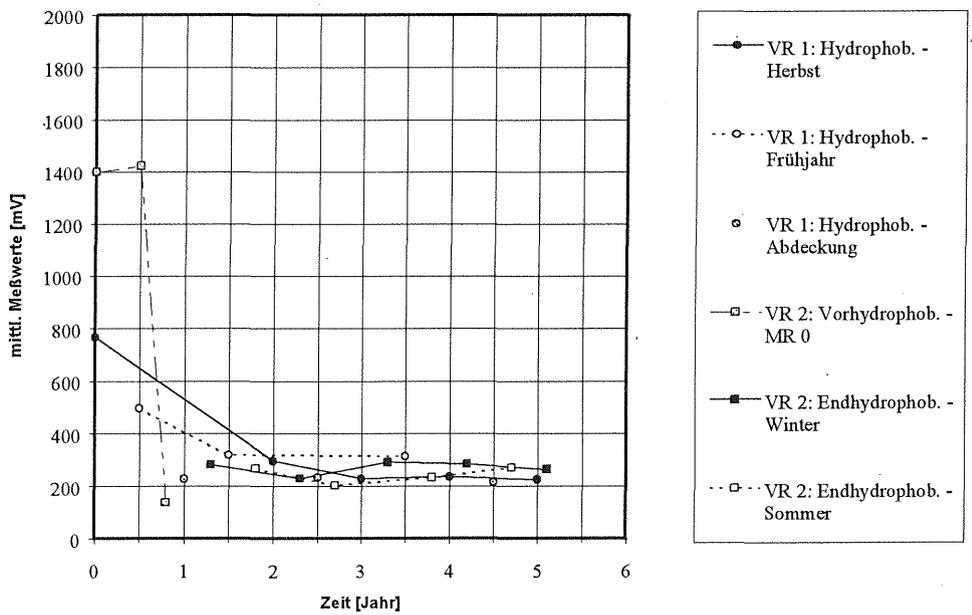


Bild 4: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt B1

## Anlage - Kapitel 5.5

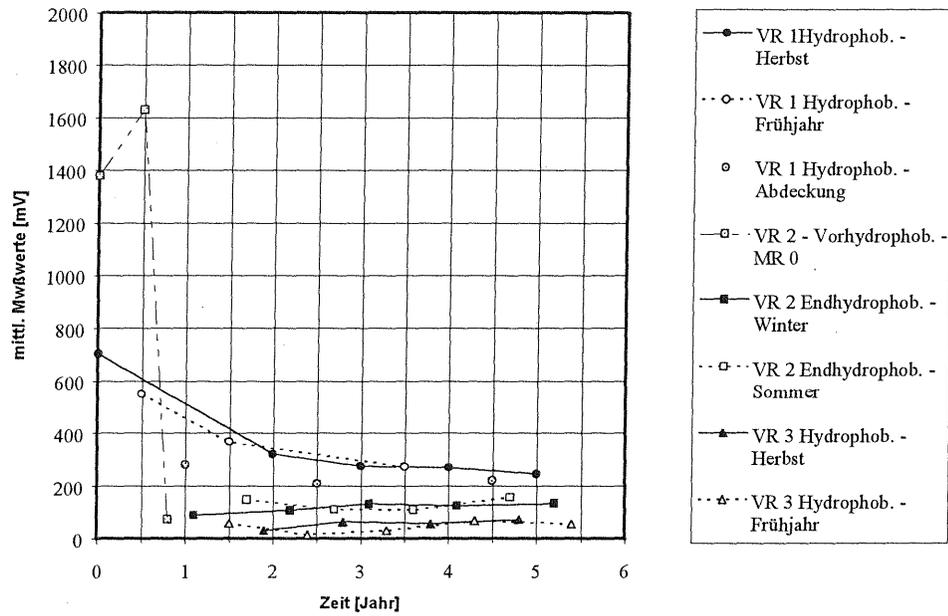


Bild 5: Versuchsreihen 1, 2 und 3, Langzeituntersuchung, Produkt B2

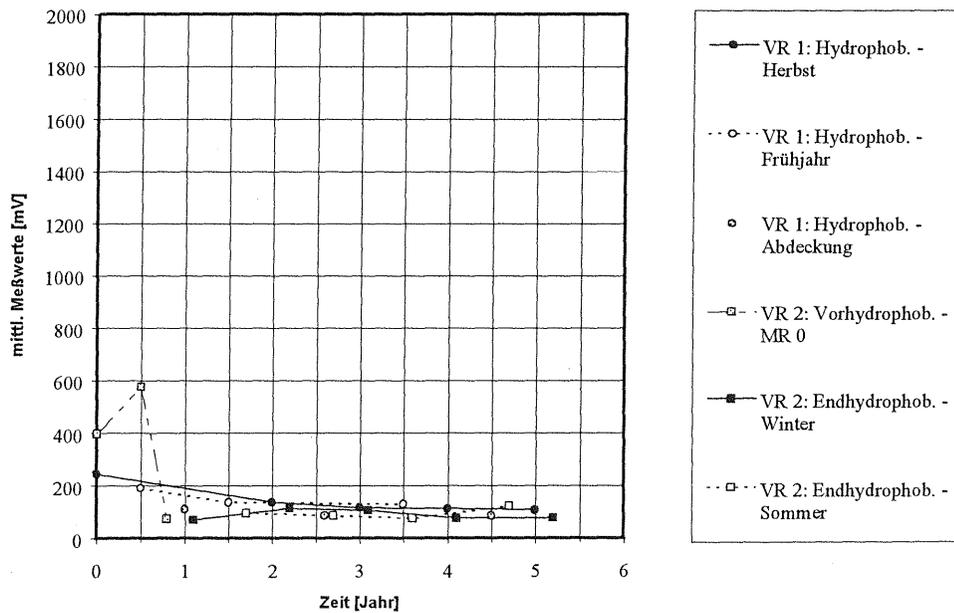


Bild 6: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt C1

## Anlage - Kapitel 5.5

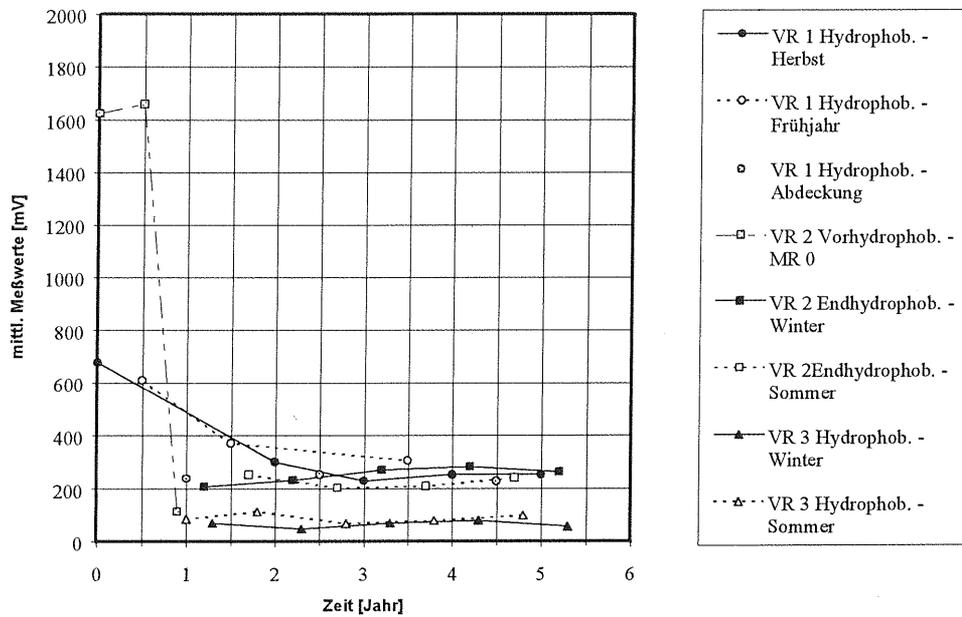


Bild 7: Versuchsreihen 1, 2 und 3, Langzeituntersuchung, Produkt C2

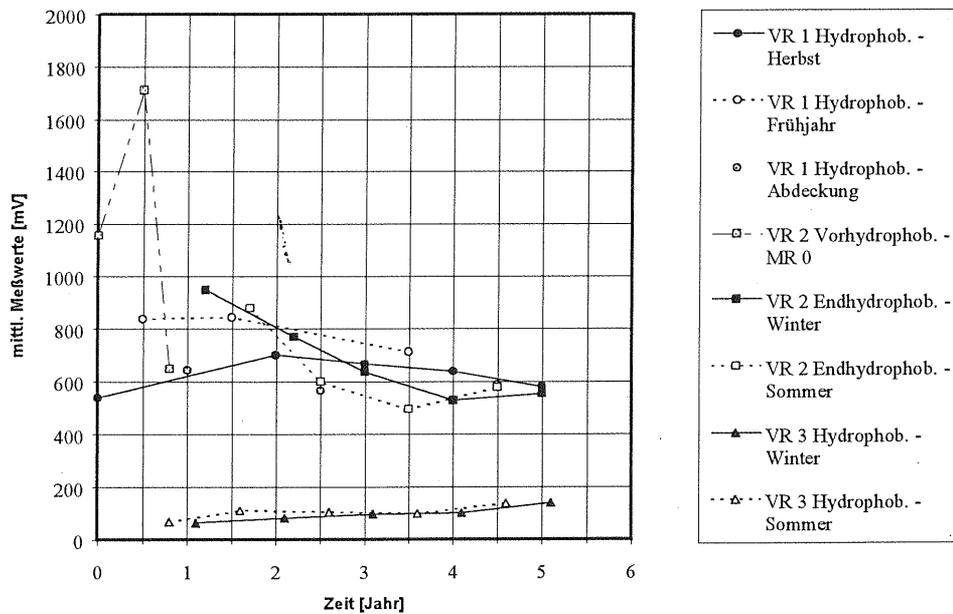


Bild 8: Versuchsreihen 1, 2 und 3, Langzeituntersuchung, Produkt D1

## Anlage - Kapitel 5.5

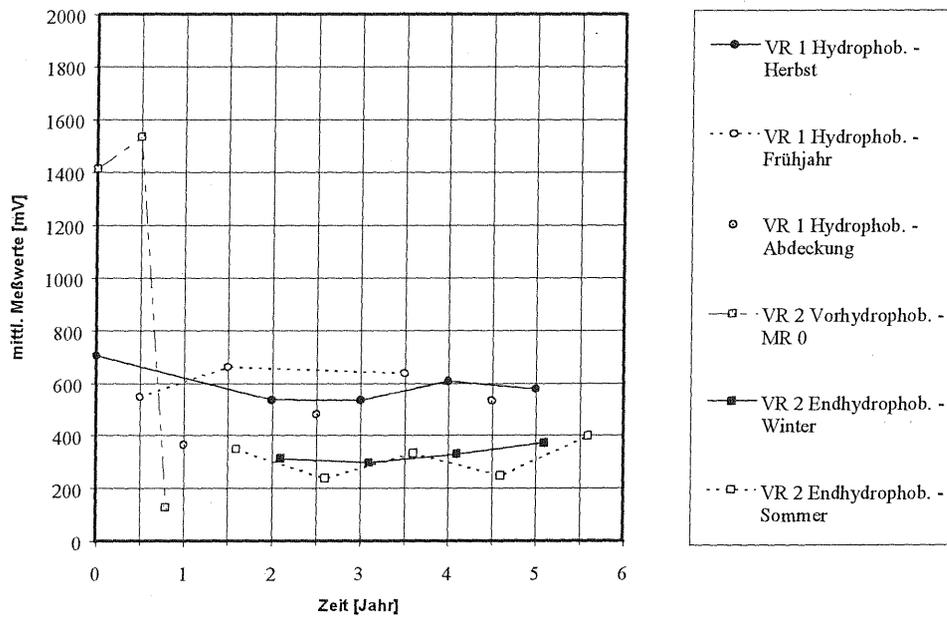


Bild 9: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt D2

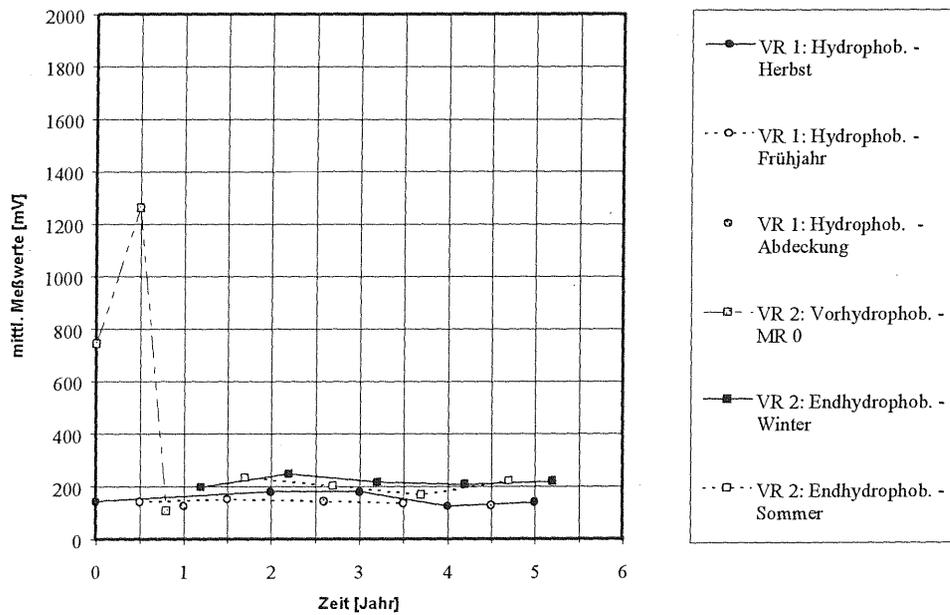


Bild 10: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt D3

Anlage - Kapitel 5.5

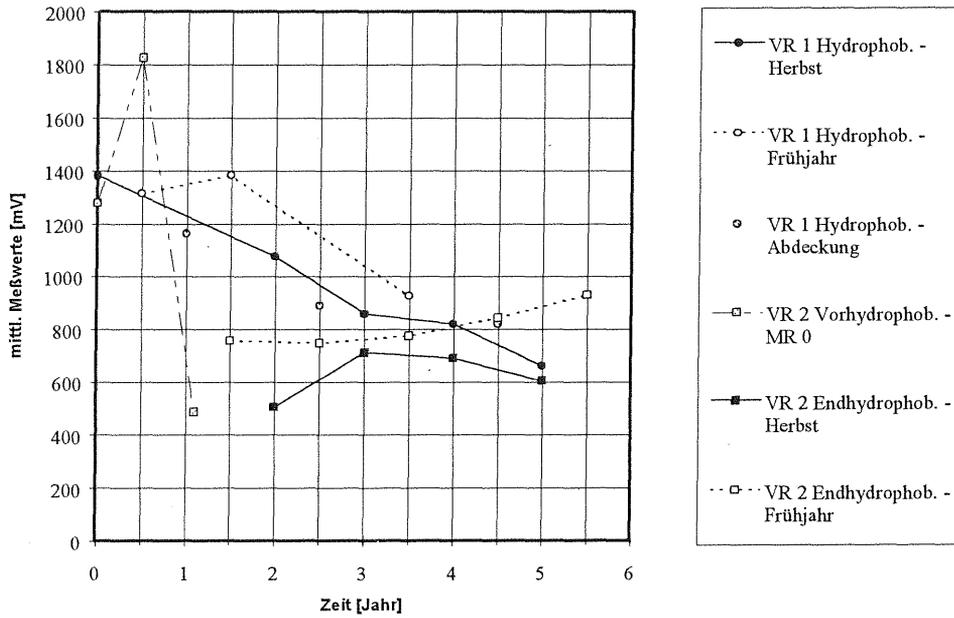


Bild 11: Versuchsreihen 1 und 2, Langzeituntersuchung, Produkt E1

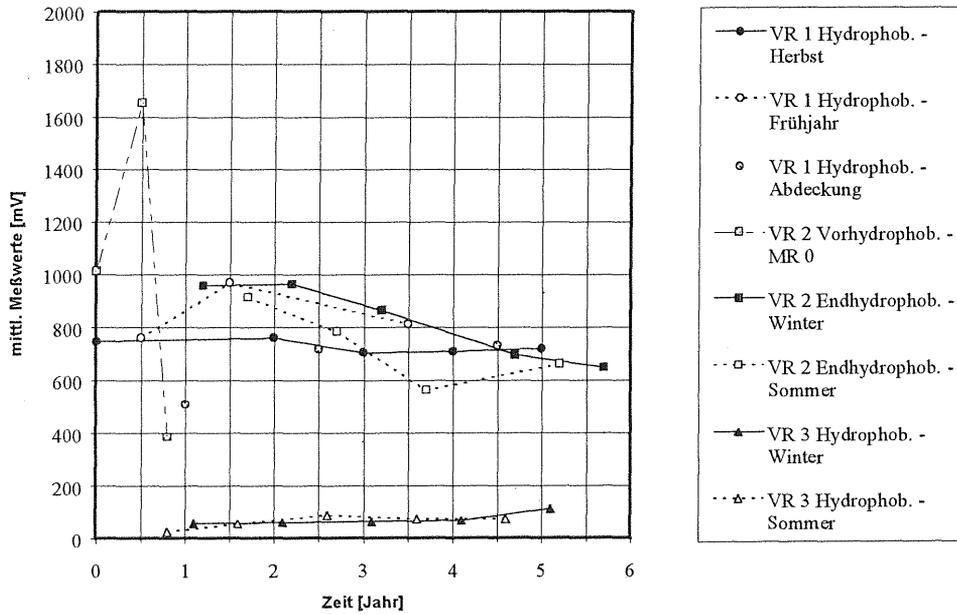


Bild 12: Versuchsreihen 1, 2 und 3, Langzeituntersuchung, Produkt E2

Schriftenreihe

**Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen**

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

B 10: **Langzeituntersuchungen von Hydropho-  
bierungsmitteln**  
von A. Maaß und B. Krieger  
60 Seiten, 1995 DM 24,00

B 1: **Realkalisierung karbonatisierter Beton-  
randzonen**  
von H. Budnik, T. Laakkonen, A. Maaß und F. Groß-  
mann  
28 Seiten, 1993 kostenlos

B 2: **Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT  
70 / BT 700**  
von H. Haser  
68 Seiten, 1993 kostenlos

B 3: **Temperaturunterschiede an Betonbrük-  
ken**  
von H. Knabenschuh  
64 Seiten, 1993 kostenlos

B 4: **Merkblatt zur Entnahme repräsentativer  
Strahlschuttproben MES-93**  
16 Seiten, 1993 DM 17,00

B 5: **Spezielle Probleme bei Brückenbauwer-  
ken in den neuen Bundesländern**  
von H. Haser und R. Kaschner  
44 Seiten, 1994 DM 22,50

B 6: **Zur Berechnung von Platten mit schwa-  
cher Querbewehrung**  
von R. Kaschner  
44 Seiten, 1995 DM 22,50

B 7: **Erprobung von dichten lärmindernden  
Fahrbahnbelägen für Brücken**  
von S. Sczyslo  
56 Seiten, 1995 DM 24,00

B 8: **Untersuchungen am Brückenbelag einer  
orthotropen Fahrbahnplatte**  
von J. Krieger und E. Rath  
140 Seiten, 1995 DM 34,00

B 9: **Anwendung von zerstörungsfreien Prüf-  
methoden bei Betonbrücken**  
von J. Krieger  
60 Seiten, 1995 DM 25,00

---

Zu beziehen durch:  
**Wirtschaftsverlag NW**  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 4 60 93-95, Telefax (04 71) 4 27 65