

**Über den Einfluß der Schichtdicke und der Alterung auf die  
Wirksamkeit von Oberflächenschutzsystemen für Betonbauteile**

DISSERTATION  
zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
der Fakultät Bauwesen  
der Universität Dortmund

von  
ROBERT ENGELFRIED  
Herdecke

Dortmund  
2000

## Vorwort

Während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl Bauphysik der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund habe ich mich unter der Leitung von Prof. Dr.- Ing. habil. H. Klopfer über Jahre hinweg intensiv mit Fragen des Bautenschutzes und speziell mit dem Betonschutz befaßt.

In Laborversuchen ist das Eignungsverhalten der Werkstoffe für Schutz- und Instandsetzung geprüft worden. An zahlreichen Betonbauwerken habe ich die Anwendung der Stoffe überwacht und bewertet.

Als die Universität Dortmund für die Fakultät Bauwesen Ende 1999 eine neue Promotionsordnung erlassen hat, die es fortan auch Fachhochschulingenieuren ermöglicht zu promovieren, regte Herr Prof. Dr.- Ing. J. Neisecke an, aus dem vorhandenen Fundus an Erkenntnissen eine Dissertation zu verfassen.

Beiden Professoren danke ich für die wertvolle Hilfestellung bei der Ausarbeitung. Ein besonderer Dank gilt auch den Firmen, deren Werkstoffe geprüft und angewendet wurden, den Bauherren, an deren Bauwerke ich Untersuchungen vornehmen konnte und den Verarbeitungsunternehmen, welche die Stoffsysteme dort zum Einsatz gebracht haben.

Tag der Einreichung: 23. November 2000

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Februar 2001

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. oec. publ. E. Leimböck

1. Gutachter: Prof. Dr.- Ing. J. Neisecke

2. Gutachter: Prof. Dr.- Ing. habil. H. Klopfer

# Über den Einfluß der Schichtdicke und der Alterung auf die Wirksamkeit von Oberflächenschutzsystemen für Betonbauteile

Inhaltsverzeichnis.....	2
<b>1. Einleitende Übersicht</b> .....	4
<b>2. Maßgebliche Funktionen von Betonbeschichtungen</b> .....	6
2.1 Die Beschichtung als Carbonisationsbremse .....	6
2.2 Die Beschichtung als Feuchteregulativ .....	11
2.3 Die Beschichtung als rißüberbrückende Schicht .....	14
<b>3. Schichtdicken</b> .....	18
3.1 Grundsätzliches zur Schichtdickenfestlegung .....	18
3.2 Statistische Grundlagen .....	21
3.3 Definitionen von Schichtdickengrenzwerten .....	24
3.4 Schichtdickenbestimmende Einflußgrößen .....	28
3.5 Methoden zur Messung von Schichtdicken .....	30
3.6 Grundsätzliches zur Untersuchung der Schichtdickenproblematik .....	32
3.6.1 Untersuchungen an Versuchsplatten .....	33
3.6.2 Untersuchungen an realen Bauteiloberflächen .....	36
3.6.2.1 Versuchsdurchführung und Darstellung der Ergebnisse .....	36
3.6.2.2 Folgerungen für die statistische Auswertung .....	40
3.6.2.3 Einfluß von Fertigungsverfahren .....	43
3.6.2.4 Einfluß von Schichtdickenmeßverfahren .....	44
3.7 Empfehlungen zur Schichtdickenbemessung .....	45

<b>4. Alterungsaspekte</b> .....	52
4.1 Grundsätzliches zur Alterung .....	52
4.2 Untersuchungen nach Langzeitalterung (Freibewitterung) .....	54
4.3 Untersuchungen nach Kurzzeitalterung (Freibewitterung + künstliche Alterung) .....	56
4.4 Bewertung .....	58
4.4.1 Änderung der carbonisationsbremsenden Wirkung .....	58
4.4.1.1 Erkenntnisse aus der Langzeitalterung (Freibewitterung) .....	58
4.4.1.2 Erkenntnisse aus der Kurzzeitalterung (Freibewitterung) .....	59
4.4.2 Änderung bei der Wasserdampfdurchlässigkeit Kurzzeitalterung/Freibewitterung) .....	62
4.4.3 Änderung des Rißüberbrückungsverhaltens .....	64
4.4.3.1 Erkenntnisse aus der Langzeitalterung (Freibewitterung).....	64
4.4.3.2 Erkenntnisse aus einer Kurzzeitalterung (Künstliche Alterung .....	65
<b>5. Konsequenzen für die Anwendung</b> .....	65
<b>6. Zusammenfassung</b> .....	68
Literatur .....	76
Formelzeichen .....	81
Lebenslauf .....	83
Bilder	
Tabellen	

## 1. Einleitende Übersicht

Die Verfügbarkeit des Verbundbaustoffes Stahlbeton ermöglichte es den Architekten und Ingenieuren, immer anspruchsvollere Baukonstruktionen zu erstellen. Auch eine angemessene Dauerhaftigkeit schien gesichert, denn der unter normalen atmosphärischen Bedingungen stets zum Rosten neigende Stahl wird ja in das schützende, alkalische Milieu des Betons eingebettet. Vom Beton selbst, einem Kunststein auf rein mineralischer Basis, war eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen die Einwirkungen aus der Umgebung zu erwarten. Weiterhin war eine wichtige Voraussetzung für den dauerhaften Verbund unter wechselnden Temperaturen durch die praktisch gleichen thermischen Längenänderungskoeffizienten von Stahl und Beton gegeben. So fand der Stahlbeton gleichermaßen Eingang im Hoch- und Ingenieurbau. Seine weite Verbreitung machte ihn zum "Baustoff des Jahrhunderts".

Bereits bald nachdem Monier im 19. Jahrhundert den Stahlbeton erfunden hatte, sind einige Schwächen dieses Verbundbaustoffes auch experimentell aufgedeckt worden [1.1]. Mit dem wirtschaftlichen Aufschwung in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts, und dabei dem Anschein nach begünstigt durch Fehler bei der Planung und der Ausführung, haben sich unerwartet viele Schäden an der Oberfläche von Stahlbetonkonstruktionen eingestellt, welche die Frage nach der Dauerhaftigkeit in den Mittelpunkt auch des wissenschaftlichen Interesses stellten.

Die Ursachen dieser Schäden sind in der Zwischenzeit praktisch vollständig geklärt und in zahlreichen Arbeiten dokumentiert [1.2] bis [1.9]. Die Lehren daraus, und die Schärfung des Bewußtseins für die Probleme, gestützt durch einschlägige Bestimmungen [1.10], haben dazu geführt, daß bei der Errichtung von Tragwerken aus Stahlbeton zwischenzeitlich ein höherer Qualitätsstandard hinsichtlich der erforderlichen Dauerhaftigkeit erreicht ist.

Ab Mitte der 70er Jahre zwangen Schäden an zahlreichen Stahlbetonbauwerken dazu, in nennenswertem Umfang Instandsetzungsarbeiten und vorbeugende Maßnahmen durchzuführen, um den Erhalt der Bausubstanz und letztendlich auch die Standsicherheit zu gewährleisten [1.11]. Eigens dafür geschaffene Richtlinien speziell für die Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen [1.12] und die allgemeinen Hoch- und Ingenieurbauwerke [1.13] sind zum Stand der Technik geworden.

Weiterhin hat sich gezeigt, daß Tragkonstruktionen aus Stahlbeton zwar technisch und wirtschaftlich höchsten Ansprüchen genügen, bestimmte Nutzungen die Oberflächengüte des Betons jedoch überfordern, weil z.B. mechanische oder chemische Einwirkungen eine

Überbeanspruchung darstellen [1.14]. Auch die planmäßig berücksichtigte Tatsache, daß Stahlbeton rißbehaftet ist, kann nicht bei allen Nutzungsarten ohne zusätzliche Maßnahmen akzeptiert werden [1.15]. Gezieltes Anwenden von Oberflächenschutzmaßnahmen ermöglicht dann erst die eigentliche Nutzung.

Seit geraumer Zeit verfügt die Bautenschutzmittelindustrie über ein breites Angebot an Beschichtungsstoffen auf Bindemittelbasis organischer Hochpolymere [1.16], die je nach Formulierung

- starr oder flexibel
- dichter oder durchlässig
- besonders widerstandsfähig gegen chemische, mechanische oder Witterungseinwirkung

sind und so ein weites Anwendungsspektrum abdecken.

Weil Beton ein poröser, für Gase und Flüssigkeiten permeierbarer Werkstoff ist und weil Risse infolge Erhärtungs-, Austrocknungs- und Tragwerkseinflüssen häufig unvermeidbar sind, kommt den Beschichtungen als Barrieren gegen eindringende schädliche Medien eine besondere Bedeutung zu. Eindringende Medien können den planmäßigen Korrosionsschutz aufheben, z.B. durch Carbonatisation oder wenn diese z.B. in Form von Chloriden die Passivierung der Bewehrungsstähle außer Kraft setzen. Dabei spielen Diffusionswiderstände von Beschichtungen gegen Kohlendioxid und Wasserdampf [1.17] sowie die Rißüberbrückungsfähigkeit flexibler Beschichtungen eine bedeutende Rolle [1.18].

Grundsätzlich können diese Funktionen nur dann von Beschichtungen erfüllt werden, wenn die speziellen Eigenschaften der Beschichtungsstoffe - wie etwa die Affinität zum Untergrund - sowie der entsprechend vorbereitete und vorbehandelte Betonuntergrund einen dauerhaften Verbund zwischen Beschichtung und Untergrund erwarten lassen. Sowohl beim Diffusions- als auch beim Rißüberbrückungsverhalten steht die Schichtdicke der Beschichtung in einem direkten Zusammenhang mit deren Leistungsfähigkeit [1.9] [1.17]. Hinsichtlich der Wirksamkeit von Beschichtungen als Oberflächenschutzmaßnahmen von Beton kommt der Schichtdicke deshalb eine zentrale Bedeutung zu. Diese Schichtdicke muß vor allem Mindestwerte bezüglich der Dicke und deren Streuung erfüllen.

Das herausragende Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, einerseits Schichtdicken für die verschiedenen Leistungsbereiche der Beschichtungen zu definieren. Andererseits sollen unter Berücksichtigung theoretischer Ansätze und praktischer Erfahrungen aus zahlreichen

in situ Schichtdickenmessungen Hilfestellungen zur Schichtdickenbemessung und zur Schichtdickenerzielung entwickelt und aufgezeigt werden.

In Kenntnis der Tatsache, daß organische Hochpolymere im Laufe der Zeit, d.h. mit zunehmendem Alter, Eigenschaftsänderungen [1.19] (Versteifung, Versprödung, strukturelle Defekte, Dickenabbau, etc.) erfahren, erhebt sich die Frage, ob und ggf. wie sich ein festgelegtes Leistungsprofil für das Diffusionsverhalten und die Rißüberbrückungsfähigkeit durch Alterung ändert.

Im Zusammenhang mit den Betrachtungen zur Schichtdicke wird anhand von Versuchsergebnissen an Beschichtungen, die einer künstlichen Bewitterung, insbesondere jedoch der Freibewitterung ausgesetzt waren, gezeigt, welche alterungsbedingten Änderungen der Leistungsmerkmale an gängigen Betonbeschichtungen eintreten und welchen Einfluß dabei die Schichtdicken haben. Es wird des weiteren aufgezeigt, welche Konsequenzen daraus hinsichtlich der Schichtdickenbemessung gezogen werden müssen, damit die Beschichtungen eine genügend große Nutzungsdauer der Stahlbetonbauwerke sichern helfen.

## **2. Maßgebliche Funktionen von Betonbeschichtungen**

### **2.1 Die Beschichtung als Carbonatisationsbremse**

Bewehrungsstähle erfahren ihren Korrosionsschutz neben dem dichten Gefüge vor allem durch das alkalische Milieu des sie umhüllenden Betons [1.10]. Im wesentlichen durch das bei der Hydratation anfallende Nebenprodukt Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) stellt sich im Gefolge der Zementhärtung im Porenwasser des Zementsteins ein pH-Wert von ca. 12,6 ein. Die dadurch entstehende Passivierung der Bewehrungsstahloberflächen ist jedoch nicht von endloser Dauer. Die in der Luft enthaltenen sauren Gase, insbesondere das in einer Konzentration von etwa 350 ppm (0,035 Volumenprozent) vorhandene Kohlendioxid, dringen in den Beton ein und neutralisieren das alkalische Milieu.

Anfangs wurde gemutmaßt, besonders in Ballungsräumen in der Luft enthaltene andere saure Gase, wie z.B. das Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) und möglicherweise auch die Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) sowie deren Folgeprodukte (Säuren), übten auf die Neutralisation des Betons neben  $\text{CO}_2$  zusätzlich einen bedeutenden Einfluß aus. Die Konzentrationen dieser Gase in Luft sind jedoch um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als diejenige von  $\text{CO}_2$ . Entsprechende Untersuchungen [2.1] [2.2] haben gezeigt, daß die in der Luft vorhandene  $\text{SO}_2$ -Konzentra-

tion auf die Umsetzung der Hydroxide des Zementsteines praktisch keinen Einfluß hat. Die Neutralisation des Zementsteins wird daher korrekterweise als Carbonatisation bezeichnet.

Das die Carbonatisation verursachende Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) gelangt durch Diffusion an den Zementstein. Den Verbrauch an  $\text{CO}_2$  zur Carbonatisation eines bestimmten Volumenelementes Beton einerseits, das Diffundieren von  $\text{CO}_2$  in den Beton andererseits und die sich daraus mathematisch herleitbare Carbonatisation als Funktion der Zeit [2.3] zeigen die folgende Schritte:

$$dm = A \cdot c_2 \cdot dx \quad (\text{Carbonatisation}) \quad (1)$$

$$dm = A \cdot \frac{c_1}{x} \cdot D \cdot dt \quad (\text{Diffusion, 1. Fick'sches Gesetz}) \quad (2)$$

In diesen Gleichungen steht  $c_1$  für die Konzentration von  $\text{CO}_2$  in Luft und  $c_2$  für das benötigte Äquivalent an  $\text{CO}_2$  zur Umsetzung der im Beton vorhandenen Hydroxide.

Durch Gleichsetzen und Kürzen mit A ergibt sich

$$c_2 \cdot dx = D \cdot \frac{c_1}{x} \cdot dt \quad (3)$$

Nach Trennen der Variablen x und t sowie durch formale Integration ergibt sich:

$$\int_0^x x \cdot dx = \int_0^t \frac{c_1}{c_2} \cdot D \cdot dt \quad (4)$$

Die Integration liefert dann:

$$\frac{x^2}{2} = \frac{c_1}{c_2} \cdot D \cdot t + k \quad (5)$$

Die Randbedingung

$$t = 0 \quad \text{für} \quad x = 0 \quad \text{liefert} \quad k = 0 \quad (6)$$

Daraus ergibt sich endgültig:

$$x = \sqrt{2 \cdot \frac{c_1}{c_2} \cdot D \cdot t} \quad (7)$$

Führt man in diese Gleichung die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  [2.4] ein, für die auch das Verhältnis des Diffusionskoeffizienten  $D_L$  von  $\text{CO}_2$  in Luft mit dem Diffusionskoeffizienten  $D$  des Baustoffs Beton gilt:



$$\mu = \frac{D_L}{D} \quad (8)$$

erhält man

$$x = \sqrt{2 \cdot \frac{c_1}{c_2} \cdot \frac{D_L}{\mu} \cdot t} \quad (9)$$

Trägt man die Carbonatisation graphisch als Funktion der Zeit im linearen Maßstab auf, so ergeben sich entsprechend Bild 1 Parabeln als Kurvenverläufe. Charakteristisch ist, daß die Geschwindigkeit anfangs groß ist und mit zunehmender Zeit immer mehr abnimmt.

Die wichtigsten Parameter, welche die Carbonisationsgeschwindigkeit beeinflussen, sind

- die **Betongüte** (ausgedrückt durch die Festigkeit und den Wasserzementwert; die Carbonisationsgeschwindigkeit verläuft umgekehrt zur Betongüte),
- die **Zementart** (Portland- oder Hochofenzement; das höhere alkalische Potential des Portlandzements verzögert die Carbonisationsgeschwindigkeit gegenüber der Verwendung von Hochofenzement) und
- der **Feuchtegehalt** (vom Regen durchnässter Beton carbonatisiert langsamer als trockener Beton).

Wenn die von der luftberührten Betonoberfläche in tiefere Zonen voranschreitende Carbonisationsfront die Bewehrungsstäbe erreicht, wird durch das Absenken des pH-Wertes auf ca. 9,5 und darunter eine Depassivierung der Stahloberflächen eingeleitet. Der Stahl ist dann korrosionsbereit. Treten korrosionsbegünstigende Bedingungen ein (Gegenwart von genügend Wasser, Sauerstoff und ggf. noch Korrosionstimulanzien), so beginnt der Bewehrungsstahl zu rosten. Mit dem Rosten geht eine Volumenvergrößerung einher, die einen Druck auf die Betondeckung ausübt und diese abheben kann. Bild 2 zeigt ein Betonbauteil im Freien, welches als Folge der beschriebenen Vorgänge schadhaft wurde.

Es soll an dieser Stelle nochmals angemerkt werden, daß auch noch andere äußere Einflüsse, z.B. eindringende Chloride, derartige Betonschäden infolge von Bewehrungskorrosion verursachen können. Häufigste Schadensursache ist jedoch die Carbonisation des Betons.

Wichtige Aufschlüsse hinsichtlich der Gefährdung der Bewehrung in den Betonbauteilrandzonen lassen sich nach Ermittlung der Betondeckung der Bewehrungsstäbe, der Carbonisationstiefe des Betons und der Betondruckfestigkeit gewinnen. Dazu müssen die

jeweils ermittelten Einzelmeßwerte einer statistischen Auswertung unterzogen werden. Bild 3 zeigt beispielhaft die Auswertung für die Stahlbeton-Skelettkonstruktion eines Kirchturms, Bild 4 diejenige eines Stahlbetonkamins in einem Flachglaswerk.

Im oberen Blatteil dieser Darstellungen zeigen die übereinander angeordneten Histogramme mit jeweils gleichem Abszissenmaßstab den Zusammenhang zwischen Carbonationstiefe (CT) und Betondeckung der Bewehrungsstähe (BE). Aus der Kombination der Darstellung der Betondeckung der Bewehrungsstähe und der Carbonisationstiefe des Betons kann abgelesen werden, ob Bewehrungsstähe bereits im neutralisierten Bereich des Zementsteins liegen.

Die miteinander korrespondierenden Histogramme zeigen im Falle des Kirchturms (Bild 3), daß ein Überlappungsbereich zwischen Carbonisationstiefe und Betondeckung vorliegt. Ein Handlungsbedarf für prophylaktische (carbonisationsbremsende) Maßnahmen ist überfällig. Im Fall des Stahlbetonkamins (Bild 4) ist aufgrund des Abstands zwischen CT und BE noch ein Korrosionsschutzpotential vorhanden, welches nicht unmittelbar zu einer carbonisationsbremsenden Schutzmaßnahme zwingt.

In den unteren Blatthälften der Bilder 3 und 4 sind die Betondruckfestigkeiten analog statistisch dargestellt. Daraus lassen sich ggf. Rückschlüsse auf die weitere Geschwindigkeit der Carbonisation ableiten.

Der Idee der Beschichtung als Carbonisationsbremse liegt zugrunde, daß ihre Permeabilität für CO<sub>2</sub> auf einem sehr niedrigen Niveau begrenzt werden kann. Die CO<sub>2</sub> Durchlässigkeit kann nach einer vom Verfasser entwickelten gravimetrischen Meßmethode [2.5] ermittelt werden. Nach ihrer praktischen Bewährung ist diese Methode zwischenzeitlich genormt [2.6].

Bild 5 zeigt das Kernstück des Meßgerätes, die Diffusionskapsel, in welche die zu prüfende Beschichtung eingebaut ist. Die für die Beschichtung maßgebliche Materialkenngröße, die sogenannte Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{\text{CO}_2}$  wird nach Ermittlung der Stoffmengenstromdichte wie folgt berechnet:

$$\mu_{\text{CO}_2} = \frac{D_L \cdot \Delta c}{i \cdot s} \quad [-] \quad (10)$$

In dieser Gleichung stehen  $D_L$  für den Diffusionskoeffizienten von CO<sub>2</sub> in Luft,  $\Delta c$  für den Konzentrationsunterschied für CO<sub>2</sub> zwischen Meßkammer und Diffusionskapsel,  $s$  für die Dicke der untersuchten Schicht und  $i$  für die ermittelte Stoffmengenstromdichte von CO<sub>2</sub>.

Die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  sagt aus, wieviel mal undurchlässiger die Beschichtung für die  $\text{CO}_2$ -Diffusion ist als Luft unter sonst gleichen Bedingungen. Eine Zusammenstellung von Diffusionswiderstandszahlen, die vom Verfasser u.a. an Beton, Zementmörteln und Beschichtungen auf Basis organischer Hochpolymere gemessen worden sind, findet sich in [1.17].

Die maßgebliche Rechengröße zur Bemessung einer Carbonisationsbremse ist die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_{D,\text{CO}_2}$  (Diffusionswiderstand), die nach Gleichung (5) aus dem Produkt von Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{\text{CO}_2}$  und Dicke  $s$  der Beschichtung gebildet wird:

$$s_{D,\text{CO}_2} = \mu_{\text{CO}_2} \cdot s \quad [\text{m}] \quad (11)$$

$s_D$  gibt demnach diejenige Dicke einer Luftschicht in Meter an, welche den gleichen Diffusionswiderstand gegenüber  $\text{CO}_2$  hat wie die Beschichtung der Dicke  $s$ .

Wie groß der Widerstand einer Beschichtung gegen  $\text{CO}_2$ -Diffusion sein muß, damit diese als Carbonisationsbremse wirkt, ist auf Bild 6 graphisch dargestellt [2.7]. Die Ursprungsgerade stellt den Carbonisationsfortschritt im Beton als Funktion der Zeit dar. Diesen Vorgang drückt auch Gleichung (9) aus. Weil an der Oberfläche keine Beschichtung vorliegt, kann der  $s_D$ -Wert zu Null gesetzt werden. Würde man die Betonoberfläche zum Zeitpunkt 1 Jahr beschichten, würde mit zunehmendem Diffusionswiderstand die Gerade, die den Carbonisationsverlauf darstellt, nach unten abknicken. Wenn ein Diffusionswiderstand  $s_{D,\text{CO}_2} = 50 \text{ m}$  erreicht ist, wird der Carbonisationsfortschritt so stark reduziert, daß für den Regelfall eine ähnliche Wirkung erzielt wird, wie wenn die Betonoberfläche mit einer Diffusionssperre für  $\text{CO}_2$  ( $s_{D,\text{CO}_2} = \infty$ ) belegt wäre. Daraus kann die Schlußfolgerung hergeleitet werden, daß eine Beschichtung dann als eine für Stahlbeton ausreichende Carbonisationsbremse anzusehen ist, wenn ihre diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_{D,\text{CO}_2} \geq 50 \text{ m}$  beträgt [2.7]. Welche Beschichtungen als Carbonisationsbremsen in Frage kommen können, ist weitgehend geklärt [1.17].

Anhand eines realen Bauobjektes, für welches aus der Bauwerksdiagnose eine Prognose zur weiteren Schadensentwicklung hergeleitet worden ist, soll hier erläuternd gezeigt werden, ob und in welcher Weise eine carbonisationsbremsende Beschichtung auf den weiteren Fortgang einwirken kann:

Der Betreiber eines Kohlekraftwerkes muß nach 30 Jahren Betriebszeit einen Kraftwerksblock wegen erreichter Unwirtschaftlichkeit der Anlage abbauen und durch einen neuen

Block ersetzen. Den zugehörigen Kaminkühler aus Stahlbeton will er nicht abbrechen, er kann als solcher aber auch nicht weiter genutzt werden. Er soll in ein Parkhaus für PKW von Betriebsangehörigen und Fremdarbeitern umgebaut werden. Dabei soll die kreiszylindrische Schale erhalten bleiben und in die Kühlturmtasse soll eine freistehende Stahlbetonkonstruktion mit PKW-Abstellplätzen eingebaut werden. Aus dieser Entscheidung ergab sich die Frage: Was muß getan werden, um den Bestand der Kühlturmschale für weitere 30 Jahre zu erhalten, und zwar unter Beachtung der geplanten Nutzungsänderung?

Zur Objektdiagnose ist in jedem Quadranten der Kühlturmschale innen- und außenseitig jeweils eine Fahrbühne aufgehängt worden. Auf jeweils einer vertikalen Mantellinie sind in mehreren Höhenlagen u.a. die Carbonisationstiefe, die Betondeckung und die Betondruckfestigkeit bestimmt worden. Die Auswertung der Meßwerte erfolgte analog zu den Bildern 3 und 4. Mit der graphisch dargestellten rechnerischen Abschätzung gemäß Bild 7 ist die Carbonisationstiefe an der Schalenaußenseite als Funktion der Zeit im Wurzelmaßstab über den nach 29 Jahren vorliegenden Mittelwert hinaus extrapoliert ( $s_{D,CO_2} = 0$  m). An der rechten Seite des Diagramms ist integral die ermittelte Betondeckung der Bewehrungsstähle aufgezeichnet. Aus dieser Darstellung kann abgelesen werden, daß zum Zeitpunkt der Diagnose ca. 44 % der erfaßten Bewehrungsstähle nicht mehr durch das alkalische Milieu des Zementsteins gegen Korrosion geschützt sind. Als Folge dieses Zustandes sind bis zum Zeitpunkt der Objektuntersuchung partiell auch schon Ausbrüche über Bewehrungsstählen entstanden. Die Fortschreibung des Carbonisationsverlaufs gibt Auskunft darüber, wann welche weiteren Anteile der Bewehrung dapassiviert werden.

Im Diagramm gemäß Bild 7 ist zusätzlich der zu erwartende weitere Carbonisationsverlauf für den Fall eingezeichnet, daß eine carbonisationsbremsende Beschichtung ( $s_{D,CO_2} \geq 50$  m) appliziert wird. Man erkennt aus Bild 7, daß dadurch eine sehr günstige Wirkung erzielt werden kann. Bild 8 zeigt das Objekt nach erfolgter Beschichtung der Außenseite. Der Kraftwerksbetreiber hat die Gelegenheit genutzt, dem neuen Parkhaus durch farbliche und strukturelle Gestaltung eine besondere Note zu geben.

## 2.2 Die Beschichtung als Feuchteregulativ

Beschichtungen werden im Bauwesen in erster Linie zur Begrenzung der Wasseraufnahme von Baustoffen eingesetzt, also um die Kapillarität an der Baustoffoberfläche zu unterbinden.

Im Zusammenhang mit der Beschichtung von Stahlbetonbauteilen wird oft die Frage diskutiert, ob und in welchem Maße Beschichtungen wasserdampfdurchlässig sein müssen, damit keine Schäden als Folge des "Dampfdrucks" auftreten. Dazu kann ganz allgemein gesagt werden, daß ein Wasserdampfdruck im Sinne der Wirkung einer Kraft pro Fläche, mit einer daraus folgenden Zerstörung der Beschichtung, im Bauwesen unter normalen Bedingungen nicht auftritt.

Der Gebrauch des Begriffs vom Dampfdruck geht in diesem Zusammenhang darauf zurück, dass man den (unglücklicherweise) als Partialdruck bezeichneten Anteil des Wassers am Gesamtanteil der Luft - dem Gesamtdruck der Atmosphäre - irrtümlich als Druck interpretiert, obwohl es sich nur um ein Konzentrationsmaß in einem sonst ausgeglichenen System handelt. Auch die in diesem Zusammenhang gelegentlich laut werdende Forderung nach der "Atmungsaktivität" von Oberflächenschutzsystemen auf Beton ist ohne Grundlage.

In der Regel sind die Diffusionswiderstände für Wasserdampf von Betonbauteilquerschnitten deutlich größer als diejenigen der meisten Betonbeschichtungen, so daß das Diffusionsverhalten durch die Beschichtungen nicht signifikant verändert wird [2.8]. Rechnerische Abschätzungen zeigen zudem, daß ein Austrocknen von Betonbauteilen auch noch in Gegenwart von Beschichtungen mit nennenswertem Diffusionswiderstand möglich ist.

In einigen Ausnahmefällen kann es sich als günstig erweisen, Betonbauteile nur mit solchen Beschichtungen zu versehen, die als Folge von Diffusionsvorgängen eine Anreicherung von Wasser in der Grenzfläche zwischen Bauteil und Beschichtung nicht zulassen. Es könnte dort zu einer unzulässigen Quellung kommen, mit der Folge der Abminderung des Haftverbundes. Eine Anreicherung von Flüssigwasser in den Poren der oberflächennahen Betonzone unter einer Beschichtung könnte außerdem zu Schäden bei Frosteinwirkung führen.

Bild 9 zeigt in beispielhaft schematischer Darstellung ausschnittsweise die Schale eines Naturzugkühlturms. Im Betriebszustand stellt sich ein Diffusionsstrom von innen nach außen ein. Wenn Beschichtungsmaßnahmen erforderlich werden, ist eine rechnerische Abschätzung notwendig [2.9] [2.10], um entscheiden zu können, mit welchen Diffusionswiderständen Schadenserscheinungen abgewendet werden können. Bild 10 zeigt das Ergebnis einer rechnerischen Simulation der betriebsbedingten, instationären Wärme- und Feuchtewirkungen in Form der Wassergehaltsverteilung in der Kühlturmschale. Zwei Beschichtungsalternativen ( $s_d = 0,34 \text{ m}$ ,  $s_d = 1,0 \text{ m}$ ) können als unkritisch, eine Beschichtungsal-

ternative ( $s_d = 3,8 \text{ m}$ ) muß unter den gewählten Randbedingungen als kritisch angesehen werden.

Schäden in Form von Blasen, Abplatzungen etc. an beschichteten Betonoberflächen, werden gelegentlich auf die "rückwärtige Durchfeuchtung" oder auf die Wirkung des „Dampfdrucks“ zurückgeführt. Ihre eigentlichen Ursachen liegen jedoch häufig in einer ungeeigneten Stoffrezeptur, in einer gestörten Benetzung der Betonoberfläche, in einer unzureichenden Untergrundvorbereitung, oder darin, daß die Temperatur zur ordnungsgemäßen Vernetzung der 2 K-Beschichtungsstoffe zu niedrig war.

Im Regelwerk [1.13] wird im Teil 1 das Instandsetzungsprinzip W als Maßnahme zum Korrosionsschutz der Stahlbewehrung im Beton genannt. Es beinhaltet die Absenkung des Wassergehaltes im Beton, um somit elektrolytische Teilprozesse einer möglichen Stahlkorrosion zu unterdrücken. Entsprechend formulierte Beschichtungen können die Flüssigwasseraufnahme, und bei einem entsprechend hohen Diffusionswiderstand temporär auch das Eindiffundieren von Wasser behindern, um auf diesem Weg das Betonbauteil trocken zu halten.

Die maßgebliche Materialkenngröße zur Steuerung der beschriebenen Diffusionsvorgänge ist analog zu den Ausführungen unter Ziffer 2.1 für Kohlendioxid auch für Wasser die Diffusionswiderstandszahl. Sie kann nach zwei Normen [2.11] [2.12] ermittelt werden. Bei der Wasserdampfdiffusion muß jedoch eine Besonderheit beachtet werden, die bei anderen Gasen, z.B. dem Kohlendioxid, nicht gegeben ist. Versuche haben gezeigt, daß der Transport von Wasser unter den Bedingungen von [2.11] oder [2.12] bei gleich großen (absoluten) Konzentrationsgefällen bei zunehmender Baufstoffeuchte zunimmt. Diese Gesetzmäßigkeit ist in Bild 11 grafisch dargestellt [2.13]. Diese Verhaltensweise kann man bei den Polymerbeschichtungen auf zwei Besonderheiten des Wassers zurückführen:

Einerseits weist das Wassermolekül mit seiner Anordnung von zwei Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom und den vier tetraedrisch ausgerichteten Elektronenorbitalen mit den gegenüberliegenden  $\delta^+$  (H) und  $\delta^-$  (O) Ladungen [2.14] eine polare Bindung auf. (Das linear ausgerichtete Kohlendioxidmolekül ist demgegenüber eine unpolare Verbindung). Durch diese polare Ausrichtung ist das Wassermolekül in der Lage, über die sich ergebenden Affinitäten zwischen den inneren Beschichtungsoberflächen und dem Wasser durch Quellen, in-Lösung-gehen etc. sich einen rascheren Durchgang zu verschaffen. Dies gelingt besonders gut bei Polymerbindemitteln aus wässriger Phase, aber auch bei solchen Bindemitteln mit polaren Molekülstrukturen. Dagegen kommt Wasser in weitgehend un-

polaren Polymeren wie z.B. Bitumen nur sehr langsam voran. Diese Abhängigkeiten lassen sich aus der graphischen Darstellung von Bild 11 deutlich ableiten.

Andererseits nimmt der Wassertransport auch dadurch deutlich zu, daß mit zunehmender Stoffeuchte neben der gasförmigen Diffusion der Transportmechanismus der Oberflächendiffusion auftritt und die Einlagerung von Wasserinseln den Diffusionsweg an den Engpässen unwirksam macht. Diese Mechanismen sind beim Transport von Kohlendioxid durch Beschichtungen nicht verfügbar. Diese unterschiedlichen Mechanismen erklären auch, warum sich die Diffusionswiderstandszahlen für Kohlendioxid und Wasser bei sonst gleichen Beschichtungen um bis zu mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden können [1.17], wobei die Diffusionswiderstände für Wasser stets geringer sind als diejenigen für Kohlendioxid.

Weil unter baupraktischen Verhältnissen in Beton eher feuchte als trockene Bedingungen vorliegen, wird die zur Beurteilung von Diffusionsvorgängen notwendige Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{H_2O}$  im sogenannten wet-cup-Verfahren ermittelt. Dieses deckt den Wasserdampfpartialdruckbereich im Konzentrationsgefälle von 100% gegen 50% relative Feuchte ab, in dessen Grenzen sich die Luftfeuchte im Außenklima bewegt.

### **2.3 Die Beschichtung als rißüberbrückende Schicht**

Stahlbetonbauteile bekommen planmäßig Risse. Sie werden bei Biegebelastung so bemessen, daß sie im gerissenen Zustand die Anforderungen an die Tragfähigkeit erfüllen. Das dauerhafte Verschließen von Rissen an der Oberfläche von Stahlbetonbauteilen ist zur Abwehr bestandsschädigender Folgen z.B. durch Korrosion von Bewehrungsstählen oder durch chemische Zersetzung von Baustoffen aufgrund von Nutzungseinflüssen usw. oft zwingend notwendig.

Am häufigsten hat man es bei Betonrissen mit periodisch bewegten Rissen zu tun, wobei die Bewegung meist eine Folge der thermischen Umgebungsbedingungen ist. An Brückenbauwerken oder bei Parkdecks kann die Rißweitenänderung zusätzlich aus Lastwechseln durch den Fahrzeugverkehr resultieren. Die Feuchteeinwirkung auf Rißbewegungen im Beton ist meist sehr gering.

Selten liegt der Fall vor, daß Risse in Betonbauteilen in völliger Ruhestellung sind. Beschichtungen müssen daher nicht nur einen stehenden Spalt füllen bzw. überdecken, son-

dern sie müssen die zwischen den Rißufern sich einstellenden Wegänderungen mitmachen, ohne ihre Funktion des dauerhaften Rißverschlusses zu verlieren.

Die dabei ablaufenden Rißweitenänderungen können im Verlaufe eines geplanten Nutzungszeitraumes sehr zahlreich sein. Wechselnde Sonneneinstrahlung, Abkühlung zwischen Tag und Nacht, aber auch jahreszeitlich bedingte Temperaturwechsel können Risse in Bauteilen im Freien über einen Zeitraum von 10 Jahren ohne weiteres bis zu 10.000 mal öffnen und schließen. Die Amplituden sind dabei jedoch sehr unterschiedlich [2.15]. In Innenräumen sind die Amplituden geringer und die Rißweitenänderungen langsamer, aber auch abhängig vom Nutzerverhalten eines Bauwerkes [2.16].

Bei Rissen in Fassadenbauteilen oder bei allseits luftumspülten Bauteilen kann man mit guter Näherung Rißweitenänderungen  $\Delta w$  in Abhängigkeit von der Temperaturänderung  $\Delta \vartheta$  nach der Formel

$$\Delta w = \alpha_{\vartheta} \cdot \Delta \vartheta \cdot \ell_0 \cdot h \quad [\text{mm}] \quad (12)$$

abschätzen. Der Faktor  $h$  berücksichtigt dabei in bewehrten Bauteilen die hemmende Wirkung der den Riß kreuzenden Bewehrung auf die Rißweitenänderung. Dieser Wert beträgt bei üblicher Bewehrung etwa 0,7, bei nicht bewehrtem Beton 1.

Um eine Vorstellung davon zu erhalten, welche Größenordnungen Rißweitenänderungen annehmen können, sei folgendes Meßergebnis angeführt [2.15]:

Es liegt eine Stahlbeton-Geschoßdecke vor, die über die Außenwand als Balkonkragplatte ins Freie verläuft (Bild 12). Das auskragende Bauteil erwärmt sich entsprechend der Anpassung an die angrenzende Außenluft und kühlt sich dann wieder ab. Im Inneren des Gebäudes ist die Geschoßdecke dagegen einer relativ konstanten Temperatureinwirkung ausgesetzt. Die dadurch in der über die Außenwand hinauskragenden Platte auftretenden Zwängungen haben senkrecht zur Längsrichtung der Kragplatte zu Trennrissen (mittlerer Rißabstand 0,4 ... 0,7 m) mit mittleren Rißbreiten von 0,3 mm geführt.

Über die Risse können Wasser, Sauerstoff und Stimulanzien an die Bewehrungsstähle gelangen und dort zu Korrosion und zur Schädigung des gesamten Bauteils führen. Bild 13 zeigt einen gerissenen Ausschnitt dieser Kragplatte aus der Froschperspektive. Mit Beginn des Versuchs lagen alle untersuchten Risse bereits mehrere Jahre vor. Mit Hilfe des sog. Setzdehnmessers sind über zuvor angebrachte Meßplättchen die Rißbreitenänderungen erfaßt worden. Dabei sind von Riß zu Riß - trotz etwa gleicher Rißabstände - zum Teil sehr unterschiedliche Rißbreitenänderungen gemessen worden. Auf Bild 14 ist im Zeitraum der



zunächst ansteigenden, dann aber sich absenkenden Außentemperatur die Öffnung von Rissen in zwei Erfassungsbereichen dargestellt. Man erkennt, daß in der kalten Jahreszeit ein starker Anstieg der Rißöffnung erfolgt. Die Richtlinie [1.13] geht im Teil 2, Bauplanung und Bauausführung bei der Rißüberbrückung mit flexibel formulierten Beschichtungen von einer Rißweitenänderung  $\Delta w = 0,2 \text{ mm}$  als Obergrenze aus (siehe Tabelle 1).

Wenn zur Rißüberbrückung Beschichtungen angewendet werden, bedarf es hinsichtlich der Rißweitenänderungen zunächst einiger besonderer Überlegungen. Betrachtet man den Fall der homogenen Beschichtung eines Einschichtsystems, wie er auf Bild 15 gezeigt ist, nimmt das Rißüberbrückungsvermögen  $\Delta w$  (entspricht der Rißweitenänderung) linear mit der Dicke dieser Beschichtung zu [1.18].

Dafür gilt die einfache Beziehung:

$$\Delta W = \varepsilon_{\max} \cdot S \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

Aus dieser Beziehung kann direkt abgeleitet werden, daß über die Auftragsmenge und somit über den Anstieg der Schichtdicke das Rißüberbrückungsvermögen gesteigert wird.

Bei einem Zweischichtsystem, wie es schematisch auf Bild 16 gezeigt ist, läßt sich ebenfalls nach der Doppelschichttheorie [1.18] über das Verhältnis von Dehnsteifigkeit einer Deckschicht und der Schubsteifigkeit einer darunter angeordneten Schwimmschicht eine Bemessungsformel für die Rißüberbrückungsfähigkeit ableiten:

$$\Delta W = \varepsilon_{\max} \cdot \sqrt{\frac{E}{G} \cdot s \cdot d} \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

Im rißüberbrückenden Zweischichtsystem muß die Unterschicht vor allem durch Scherung zur Rißüberbrückung beitragen. Die Deckschicht muß so ausgelegt werden, daß sie je nach Anwendungsbereich den Dehnbeanspruchungen aus

- a) Druck- und Zugkräften infolge der Rißbewegung ( $Z_R$ )
- b) Zugkräften infolge Schrumpfen (Alterung) und Temperaturdifferenzen ( $Z_{s+\vartheta}$ )
- c) Zug-, Druck- und Scherkräften infolge Verkehrsbelastung ( $Z_V$ )

genügt [2.16].

Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß eine Rißüberbrückungsfähigkeit lediglich durch Verwendung organischer Hochpolymere erzielt werden kann und dann auch nur, wenn diese flexibel formuliert sind. Für Betonflächen an Fassaden und ähnlichen nicht befahre-

nen und nicht begangenen Bauteilen finden die plastoelastischen, meist wäßrig formulierten Acrylkombinationsbindemittel, bei höheren Ansprüchen auch die elastomeren Polyurethanbindemittel Eingang. Rißüberbrückende Bodenbeschichtungen (sie müssen praktisch immer auch begeh- und befahrbar sein) werden auf Basis elastomerer, in situ weitmaschig vernetzender, organischer Hochpolymere formuliert. Die für die Rißüberbrückung am häufigsten eingesetzten Bindemittel sind hier die Polyurethane bzw. die Kombinationen mit Epoxiden. Letztere weisen neben der Flexibilität auch noch eine mechanische Widerstandsfähigkeit auf.

Die Pigmentierung und Verfüllung solcher Beschichtungsstoffe muß mit weichen, runden Körnern erfolgen, weil nur dadurch sichergestellt ist, daß die innere Verformung während einer Rißweitenänderung ohne Kerbbruchbildung ablaufen kann. Gegen diese durch Experimente abgesicherte These [2.14] [2.15], wird bei der Formulierung der Beschichtungsvarianten OS F b) nach ZTV-SIB 90 durch den Einbau von gebrochenen Quarzkörnern (wirtschaftliche Erwägungen) immer wieder verstoßen.

Die mit den Gleichungen (13) und (14) beschriebenen Verknüpfungen zwischen Rißweitenbewegung und Materialkennwerten der Beschichtung gelten zunächst im Bemessungsansatz ausschließlich für das zügige, einmalige Öffnen eines Risses. Der dauerhafte Verschuß eines Risses ist im Regelfall an ein vielfaches Öffnen und Schließen eines Risses gebunden. Daß damit eine Materialermüdung, und ein Rückgang der rißüberbrückenden Eigenschaften verbunden ist, kann als gesichert gelten.

Die im Laufe der Zeit zu erwartenden Eigenschaftsänderungen können bei der Formulierung nur zum Teil berücksichtigt und gesteuert werden. Das Experiment, welches sich am Einsatzbereich der rißüberbrückenden Beschichtung orientieren muß, ist hierbei unverzichtbar. Aber auch durch eine Simulation der Rißweitenänderungscharakteristik unter bestmöglicher Berücksichtigung der realistischen Beanspruchungsbedingungen kann ein Eignungsnachweis nur näherungsweise erfolgen.

Die Regelwerke [1.12] und [1.13] geben hierfür Rißüberbrückungsklassen vor. Tabelle 1 zeigt die Prüfbedingungen entsprechend der temperatur- bzw. verkehrslastgenerierten periodischen Rißweitenänderung, die in mehreren Stufen die Rißüberbrückungsfähigkeit abdeckt. Bild 17 zeigt schematisch den Aufbau der Rißüberbrückungs-Prüfmaschine, Baumodell Universität Dortmund. In dieser Prüfmaschine ist das Verhalten der Beschichtung über einem sich periodisch bewegenden Riß auf einer genügend großen Fläche (ca. 200 × 300 mm) an einem etwa 250 mm langen Riß beobachtbar. Die variierbaren Parameter sind

die Prüftemperatur  $\vartheta$ , der Rißweitenänderungsbereich  $\Delta w$ , die Rißweitenänderungsgeschwindigkeit  $f$  und die Anzahl  $n$  der Dehnwechsel.

In dieser Baukonstruktion lassen sich die Anforderungen an Beschichtungen aller Rißüberbrückungsklassen der Regelwerke [1.12] und [1.13] mit hoher Präzision überprüfen. Wegen einiger anlagentechnischer Besonderheiten und der, im Vergleich zu anderen Geräten, z.B. den in den Regelwerken [1.12] und [1.13] beschriebenen, deutlich verbesserten Probekörpern sind über die Regelwerksanforderungen hinausgehende Prüfungen möglich. Bild 18 zeigt eine fotografische Aufnahme des Probekörpertisches in der temperierbaren Prüfkammer.

### 3. Schichtdicken

#### 3.1 Grundsätzliches zur Schichtdickenfestlegung

Nahezu alle Leistungsmerkmale von Beschichtungen, wie

- \* Witterungsbeständigkeit,
- \* Diffusionswiderstand gegen Kohlendioxid,
- \* Diffusionswiderstand gegen Wasserdampf,
- \* Rißüberbrückungsfähigkeit,
- \* Verschleißwiderstand,
- \* Chemische Belastbarkeit

stehen in einem engen Zusammenhang mit der Schichtdicke.

Aus diesem Grund ist es unabdingbar, je nach Anwendungsgebiet und Funktion des Oberflächenschutzsystems eine Quantifizierung der Schichtdicken vorzunehmen, damit eine Bemessung der Beschichtung für den jeweiligen Anwendungsfall möglich wird.

In Technischen Merkblättern der Beschichtungsstoffe und in Auftrags-Leistungsbeschrieben wird als Maß für die Dicke häufig die wenig definierte "Schichtdicke" und manchmal auch nur die damit im Zusammenhang stehende "Auftragsmenge" des flüssigen Beschichtungstoffes herangezogen. Mit den Richtlinien [1.12] [1.13] sind folgende 6 Beschichtungsdi-  
cken-Begriffe eingeführt worden.

- \* systemspezifische Mindestschichtdicke ( $d_{\min s}$ ),
- \* systemspezifische Maximalschichtdicke ( $d_{\max s}$ ),
- \* produktspezifische Mindestschichtdicke ( $d_{\min p}$ ),

- \* produktspezifische Maximalschichtdicke ( $d_{\max p}$ ),
- \* Sollschichtdicke ( $d_{\text{soll}}$ ),
- \* mittlere Schichtdicke ( $d$ ).

Für diese 6 verschiedenen Begriffe gilt folgende Zuordnungskette:

$$d_{\min s} \leq d_{\min p} < d_{\text{soll}} \leq d \leq d_{\max p} \leq d_{\max s}$$

In der für Korrosionsschutzmaßnahmen im Stahlbau durch Beschichtungen und Überzüge bis 1998 erschienenen Norm DIN 55 928 [3.1] ist die Sollschichtdicke als Grenzwert im Sinne einer 5%-Fraktile angegeben. Diese Sollschichtdicke durfte um maximal 20% unterschritten werden. In der Definition unterschied sie sich somit von der Sollschichtdicke für den Anwendungsbereich Betonschutz (siehe oben) ganz beträchtlich. Auch in die Nachfolgenorm EN ISO 12944-5, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme [3.2] ist die Sollschichtdicke übernommen worden. Die Sollschichtdicke wird dort auch als *NDFT (nominal dry film thickness)* bezeichnet. Im erläuternden Text heißt es dazu wie folgt:

*Die ... angegebenen Schichtdicken sind Sollschichtdicken. Falls nicht anders vereinbart, sind Einzelwerte der Trockenschichtdicke, die 80% der Sollschichtdicke unterschreiten, nicht zulässig. Einzelwerte zwischen 80% und 100% der Sollschichtdicke sind zulässig, vorausgesetzt, daß der Mittelwert aller Meßergebnisse gleich der Sollschichtdicke oder größer ist und keine andere Vereinbarung getroffen wird. Es ist darauf zu achten, daß die Sollschichtdicke erreicht wird.....*

Aufgrund der Festlegung, daß der Mittelwert aller Meßergebnisse  $\geq$  Sollschichtdicke sein muß, könnte man eher eine Definition der Sollschichtdicke analog zu  $d_{\text{soll}}$  der Richtlinie [1.13] als zur Vorgängernorm DIN 55928 annehmen. Ein wissenschaftlicher Hintergrund ist aus dieser Definition jedoch nicht erkennbar.

Mit der Vorgabe von Schichtdickengrenzwerten wurde einerseits ein wichtiger Schritt zur Quantifizierung und somit auch zur Qualitätssicherung von Beschichtungsmaßnahmen eingeleitet. Andererseits sind Verständnis und Akzeptanz der vorgegebenen Regelungen bei den ausschreibenden Stellen, den Stoffherstellern und vor allem bei den Stoffanwendern bislang noch unbefriedigend.

Nach Meinung des Verfassers liegt dies zum einen daran, daß der Begriff Schichtdicke bei Beschichtungen ohne einfache Kenntnisse der mathematischen Statistik nicht bewältigt werden kann. Zum anderen geben bislang weder die einschlägigen Richtlinien noch die

allgemeine Fachliteratur ausreichend Hilfestellung bei der Anwendung der Schichtdickenvorgaben. Wenig akzeptanzfördernd wirkt sich die Tatsache aus, daß in zwei verschiedenen Arbeitsbereichen (Korrosionsschutz einerseits, Betonschutz andererseits), in denen häufig gleiche Planer, Stoffhersteller und Ausführungsunternehmer tätig sind, dem gleichnamigen Begriff der Sollschichtdicke eine unterschiedliche Bedeutung gegeben wurde. Hinzu kommt, daß sich die Messung der Dicke einer auf Beton applizierten Beschichtung schwieriger gestaltet als z.B. auf metallischem Untergrund.

Neben der grundsätzlichen Forderung der technisch und wissenschaftlich begründeten Plausibilität muß bezüglich der Akzeptanzverbesserung die Anzahl der Schichtdickengrenzwerte auf das unbedingt notwendige Maß reduziert werden. Die Akzeptanz würde auch dadurch verbessert, indem man die Kurzbezeichnungen so gestaltet, daß aus ihrer Symbolik ihre Bedeutung und ihr Anwendungsbereich erkennbar werden.

Hierfür schlägt der Verfasser im Rahmen dieser Arbeit folgendes Vorgehen vor:

Die Schichtdicke wird mit dem Buchstaben  $s$  benannt. Dieses Kürzel wird dem Buchstaben  $d$  vorgezogen, welcher in den Regelwerken [1.12] und [1.13] verwendet wird. Zu begründen ist dies damit, daß der Buchstabe  $s$  für Schichtdicken (auch undefinierte) von Anstrichen und Kunststoffbeschichtungen lange vor Einführung der Regelwerke die Standardbezeichnung war. Der Buchstabe  $d$  wird im Bauwesen häufig als Symbol von Bauteildicken und Bauteildurchmessern verwendet, bei welchen die Abmessungen in der Regel um Größenordnungen höher liegen als bei Beschichtungen.

Für die Bemessung werden insgesamt 4 verschiedene Schichtdicken benötigt:

- \* $S_{mit}$  Mittlere (arithmetische) Schichtdicke verbunden mit der Vorgabe einer begrenzten Streuung um den Mittelwert
- \* $S_{min}$  Mindestschichtdicke in der Definition der 5% Fraktile
- \* $S_{max}$  Maximalschichtdicke in der Definition der 95% Fraktile
- \* $S_{diff}$  Für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke

Zur Erschließung dieser Grenzwerte werden im folgenden die mathematischen Grundlagen der Statistik aufgezeigt. Davon abgeleitet und unter Zuhilfenahme eines beträchtlichen Fundus an Schichtdickenmessungen aus systematisch angelegten Versuchsreihen und aus Messungen an realen Bauobjekten wird im folgenden der Nachweis geführt, welche Schichtdickengrenzwerte bei Beschichtungen notwendig und richtig sind. Danach werden bislang noch fehlende Hilfestellungen aufgebaut, die es dem Planer, dem Stoffhersteller

und insbesondere dem Ausführungsunternehmer ermöglichen, die Bemessung durchzuführen und die Schichtdickentreffsicherheit zu verbessern.

### 3.2 Statistische Grundlagen

Aus der Neigung heraus, Sachverhalte vereinfacht zu sehen, vielleicht aber auch infolge einer gewissen Unkenntnis, wird beim Umgang mit Beschichtungen meist nur von der „Schichtdicke“ als singulärem Ereignis gesprochen. Es ist unter den Beteiligten in der Regel nicht ausreichend verinnerlicht, daß die Dicke eines Oberflächenschutzsystemes ausgesprochen pluralen Charakter hat.

Bild 19 zeigt einen Vertikalschnitt durch ein beschichtetes Betonbauteil. Aus dem Höhenprofil der dort applizierten beiden Beschichtungslagen erkennt man, daß bei eng genug aneinander gelegten Meßorten sehr viele verschiedene Schichtdicken vorliegen. Statistisch gesehen spricht man von einer Grundgesamtheit stetiger Merkmale, die sich in einer Verteilung ordnen [3.3]. Man bezeichnet die Wahrscheinlichkeit P für das Auftreten des Schichtdickenereignisses X in dem Intervall a bis b mit:

$$P(a < X < b). \quad (15)$$

Die Verteilung der Merkmale X (im vorliegenden Fall unendlich viele Schichtdickenwerte) innerhalb eines Intervalles kann durch sogenannte Fehlerkurven beschrieben werden. Die am weitesten verbreitete ist die sogenannte Normalverteilung. Sie ist von Karl Friedrich Gauß mathematisch wie folgt beschrieben worden:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (16)$$

In der Gleichung steht der Ausdruck  $1/\sigma\sqrt{2\pi}$  für die Höhe der Ordinate für den Fall, daß die Fläche zwischen Fehlerkurve und Abszisse gleich 1 ist. Der Exponent zur Basis e bestimmt die Form der Symmetrie der Fehlerkurve um die Mittelachse  $\mu$ .

Das sehr einprägsame Bild 20 der aus dieser Gleichung resultierenden "Glockenkurve" beschreibt die Wahrscheinlichkeit y der "fehlerhaften" Ereignisse um das eigentlich vorgegebene "fehlerfreie" Ereignismerkmal  $x = \mu$ . Die Werte von  $x' = \mu - a$  und  $x'' = \mu + a$  haben die gleiche Dichte und somit den gleichen Wert y.

Auf die Fläche eines beschichteten Betonteils bezogen heißt dies, daß mit einer vorgegebenen Menge an flüssigem Beschichtungsstoff eine mittlere Schichtdicke in Form des

Schichtdickenwertes entsprechend  $\mu$  mit der größten Einzelhäufigkeit vorliegt. Dies ist sozusagen die „fehlerfreie“ Schichtdicke, der Erwartungswert. Um diese Einzelhäufigkeit herum gruppieren sich jedoch praktisch unendlich viele „fehlerhafte“ Schichtdicken. Alle Ereignismerkmale (Schichtdickenwerte) werden in der stetigen Verteilung der Wahrscheinlichkeit der Schichtdickenereignisse für die betrachtete Fläche des Betonteils zusammengefaßt. Man kann diese Schichtdicken als Verteilung der Fehler bei der Reproduktion des Erwartungswertes ansehen. Die wichtigsten Merkmale dieser Grundgesamtheit sind die größte Häufigkeit der „fehlerfreien“ Schichtdicke  $\mu$  und die stetige und symmetrisch in zwei Richtungen verlaufende Abnahme der Häufigkeit der „fehlerhaften“ Schichtdicken. Gekennzeichnet durch die Wendepunkte der Glockenkurve bei  $x = \mu \pm \sigma$ .

Daraus wird deutlich, daß die weitverbreitete Vorstellung, die Schichtdicke läge als singuläres Ereignis vor, unvereinbar ist mit dem Fehlergesetz das man als „Normalverteilung“ bezeichnet. Dies muß dazu führen, daß man sich bei der Bemessung, Anwendung und Kontrolle von Schichtdicken an dieses Fehlergesetz hält.

Weil die unendlich große Zahl an Schichtdicken einer Grundgesamtheit meßtechnisch nicht zugänglich ist und deshalb für eine Auswertung auch nicht zur Verfügung stehen kann, bedient man sich des Modells der Stichprobengesamtheit. Dieses Modell erlaubt es, unter Beachtung statistischer Regeln eine endliche Zahl von angenähert normalverteilten Zufallsvariablen zu erheben, die in hohem Maße mit der Grundgesamtheit korrelieren. Dazu sind noch zwei wichtige statistische Schätzwerte erforderlich.

Die Gauß'sche Glockenkurve wird gemäß Gleichung (16) durch 2 Parameter vollständig charakterisiert. Am Scheitel der Kurve liegt die maximale Wahrscheinlichkeitsdichte des Schichtdickenereignisses vor. Sie wird für die Grundgesamtheit der Ereignisse mit dem Symbol  $\mu$  versehen. Praktisch gesehen, d.h. auf eine Stichprobengesamtheit bezogen, liegt auf der Abszisse an dieser Stelle  $x = \mu$  der arithmetische Mittelwert aller Schichtdickenwerte vor, der wie folgt definiert ist:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x \quad (17)$$

Auch um diesen durch  $\bar{x}$  markierten Abszissenwert ist die Verteilung symmetrisch. Das Maß der beidseitigen Abweichung der Schichtdickenwerte vom Mittelwert wird durch die Wendepunkte der Fehlerkurve beschrieben. Für die Grundgesamtheit bezeichnet man die jeweiligen Abschnitte auf der x-Achse als Standardabweichung  $-\sigma$  und  $+\sigma$  ( $\mu \pm \sigma$ ). Bezo-

gen auf die Gesamtheit der Ereignisse einer Stichprobe wird die Standardabweichung vom Verfasser mit  $ssa$  (**Stichprobenstandardabweichung**) bezeichnet. Sie ist praktisch gleich der Wurzel aus der Summe der quadrierten Abweichungen um den Mittelwert:

$$ssa = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (18)$$

„Praktisch“ bezieht sich dabei auf die Tatsache, daß im Nenner, wegen des bis dahin fehlenden Mittelwertes  $n-1$ , die um 1 verminderte Zahl der Meßwerte geschrieben wird.

Ein kleiner Wert für  $ssa$  bedeutet, daß die Glockenkurve sehr steil verläuft (enge Verteilung der Schichtdickenwerte um den arithmetischen Mittelwert), während ein großer Wert für  $ssa$  eine flache Kurve charakterisiert (weite Verteilung der Schichtdickenwerte um den arithmetischen Mittelwert).

Mit Hilfe der beiden Schätzwerte  $\bar{x}$  und  $ssa$  kann jeder Punkt  $x_i$  auf der Abszisse genau beschrieben werden:

$$x_i = \bar{x} \pm z \cdot ssa \quad (19)$$

Dabei wird für  $z$  eine positive reelle Zahl eingesetzt, die mit der Wahrscheinlichkeit des Schichtdickenereignisses entsprechend der Gauß'schen Glockenkurve verknüpft ist [3.4].

In Bild 21 sind 100 Schichtdickenmeßwerte aus einer Stichprobengesamtheit ihrer Häufigkeit nach in Klassenbreiten von  $40 \mu\text{m}$  geordnet und in einem Histogramm dargestellt worden. Mit Formel (17) ergibt sich für die Stichprobe ein arithmetischer Mittelwert (mittlere Schichtdicke) von

$$\bar{x} = s_{\text{mit}} = 248 \mu\text{m}. \quad (20)$$

Dieser Zahlenwert ist auf der Abszisse markiert. Mit Gleichung (18) ist die zu dieser Verteilung gehörende Stichprobenstandardabweichung errechnet worden. Die mittlere Streuung der Schichtdicken um den arithmetischen Mittelwert ( $s_{\text{mit}} \pm ssa$ ) beträgt dann

$$ssa = 58 \mu\text{m}.$$

Die durch diese Stichprobenstandardabweichung  $ssa$  bewirkten Abweichungen vom Mittelwert sind auf der Abszisse rechts und links vom arithmetischen Mittelwert markiert und zwar an den Stellen  $306 \mu\text{m}$  und  $190 \mu\text{m}$ .

Dem Histogramm auf Bild 21 ist die mathematische Beschreibung entsprechend Gleichung (16), die sogenannte Glockenkurve, überlagert. Rein visuell könnte man aus dieser Ge-



genüberstellung von Histogramm und Gauß'scher Fehlerkurve schließen, daß die Histogrammverteilung in hohem Maße mit der Fehlerkurve übereinstimmt. Für die in den folgenden Abschnitten 3.3, 3.6 und 3.7 verwendeten Ableitungen von Grenzwerten (Wahrscheinlichkeitsdichten) ist von größter Bedeutung, zu wissen, ob die Verteilung der Zufallsvariablen aus der Stichprobe einer Normalverteilung entspricht. Nur dann können die rechnerischen Betrachtungen zur Bemessung, Erzielung und Kontrolle von Schichtdicken vorgenommen werden.

Um eine wissenschaftlich abgesicherte Verifizierung vornehmen zu können, muß der sogenannte Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest [3.5] (im folgenden K-S-Test genannt) angewendet werden. Dabei wird das zweiseitige Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  zugrundegelegt. Mit Hilfe eines Statistikprogrammes (z.B. aus dem Programmpaket SPSS 9.0 für Windows) können die Meßwerte einer Stichprobe überprüft werden. Liegt der ermittelte Testwert  $> 0,05$ , kann auf eine Normalverteilung geschlossen werden, weil dann mit hoher Wahrscheinlichkeit widerlegt ist, daß die Stichprobe nicht der Normalverteilung entspricht.

### 3.3. Definitionen von Schichtdickengrenzwerten

Unter der Voraussetzung, daß sich Schichtdicken von Beschichtungen nach der von Gauß beschriebenen Gesetzmäßigkeit der Normalverteilung anordnen, können diese als Positionen bzw. als Grenzwerte auf der x Achse definiert werden. Klar muß dabei sein, daß der Grenzwert für eine die Schichtdicke kennzeichnende Größe je nach dem zu verfolgenden Ziel zu wählen ist. Dabei muß man sich weiter darüber im klaren sein, daß die Normalverteilung der Schichtdicken ein nach unten und nach oben offenes Intervall darstellt. Das bedeutet, daß man mit den Schichtdickengrenzwerten quantifizierende Größen festlegt, deren Anschlußbereiche zu größeren und kleineren Werten praktisch zwar endlich, theoretisch jedoch nicht begrenzt sind.

#### Die Mittlere Schichtdicke ( $s_{mit}$ )

Definiert man diejenige Schichtdicke, die dem sogenannten fehlerfreien Merkmal  $\mu$  aus Bild 20 entspricht, so stößt man auf den arithmetischen Mittelwert entsprechend Gleichung (17).

$$s_{mit} = \frac{\text{Summe aller Schichtdicken}}{\text{Anzahl der Schichtdicken}} \quad (21)$$

Dieser stellt in der Normalverteilung den Gipfelwert dar. Bild 22 veranschaulicht die Lage der mittleren Schichtdicke  $s_{mit}$  innerhalb der Normalverteilung. Weil links und rechts gleiche Mengen an Schichtdickenwerten vorliegen, kann man die mittlere Schichtdicke auch als 50%-Fraktile ( $s_{50\%}$ ) bezeichnen.

Wenn in der Praxis von der *Schichtdicke* gesprochen wird, dann ist damit am ehesten noch der arithmetische Mittelwert gemeint. Häufig wird aber nicht berücksichtigt, daß dieser Wert allein noch kein eindeutiges Qualitätsmerkmal ist. Beschichtungen unterscheiden sich bei gleichem Mittelwert qualitativ, wenn sie mit einer weiten (große Standardabweichung) oder mit einer engen Streuung (kleine Standardabweichung) verbunden sind.

Für bestimmte Anwendungszwecke muß die Beschichtungsdicke auf einem bestimmten Level gehalten und in ihren Abweichungen nach oben und nach unten begrenzt werden. Dies kann z.B. dann erforderlich sein, wenn Beschichtungen als Klebeverbindungen verwendet werden oder wenn sie einen farblich oder strukturell uneinheitlichen Untergrund abdecken müssen, um ein einheitliches Aussehen herzustellen.

Zur Begrenzung der Abweichungen um den arithmetischen Mittelwert herum wird die mittlere Schichtdicke  $s_{mit}$  in der Definition  $s_{50\%}$  mit der Variationszahl  $V_{s_{mit}}$  kombiniert:

$$V_{s_{mit}} = \frac{ss_a}{s_{mit}} \quad (22)$$

### Die Mindestschichtdicke ( $s_{min}$ )

Um Schutzwirkungen einer Beschichtung wie z.B.

- \* Witterungsbeständigkeit,
- \* Rißüberbrückungsfähigkeit,
- \* Verschleißwiderstand oder
- \* Chemische Belastbarkeit

an einer Betonoberfläche in hohem Maße gewährleisten zu können, sollte die Beschichtung möglichst an jeder Stelle eine bestimmte Mindestschichtdicke nicht unterschreiten. Da einerseits unter Berücksichtigung baupraktischer Gegebenheiten und andererseits unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine absolute Schichtdickenuntergrenze nicht gefordert werden kann, wird einer Tradition im Bauwesen folgend als Mindestschichtdicke nicht die absolute Untergrenze, sondern die 5%-Fraktile vorgeschlagen. Wenn man zugrundelegt, daß sich Schichtdicken nach der Normalverteilung entsprechend Gleichung (16) anordnen,

ergibt sich als Abszissenabschnitt für diesen Schichtdickengrenzwert  $s_{5\%}$ . Für die praktische Anwendung erhält dieser Grenzwert die Bezeichnung  $s_{\min}$  (wohlwissend, daß die Schichtdicke dadurch nach unten nicht absolut begrenzt wird, was man hinter dem Begriff der Mindestschichtdicke eigentlich vermuten würde). Aus der Gauß'schen Verteilungsfunktion läßt sich die Beziehung dazu wie folgt herleiten:

$$s_{\min} = s_{\text{mit}} - 1,64 \cdot s_{\text{sa}} \quad (23)$$

Anschaulich zeigt Bild 22, daß durch diese Definition 5% der Schichtdickenwerte unterhalb liegen dürfen und 95% der Schichtdicken  $\geq s_{\min}$  sein müssen. Das nach oben offene Intervall ist für das vorgesehene Wirksamkeitsziel zunächst nicht nachteilig. Vor allem aus ökonomischer Sicht wäre es jedoch verfehlt, die Abweichung nach oben unbegrenzt zu lassen, da sie kostenwirksam ist, ohne das Ergebnis aus technischer Sicht zu verbessern.

Die  $s_{\min}$ -Regelung läßt es zu, daß 5% der Schichtdickeneinzelwerte unterhalb des Grenzwertes liegen, wenngleich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens mit zunehmendem Abstand von  $s_{\min}$  immer kleiner wird. Aus praktischen Gründen könnte es sich als nützlich erweisen, den theoretischen Möglichkeiten sozusagen Einhalt zu gebieten und eine absolute Untergrenze z.B. auf  $0,8 s_{\min}$  festzulegen. Diese Begrenzung wurde in der Korrosionsschutznorm für Stahlbauten [3.1] verbindlich vorgegeben. Mit dieser Regelung würde man die statistische Betrachtungsweise allerdings verlassen.

Weil zur Erreichung der Mindestschichtdicke in bezug auf die mittlere Schichtdicke eine bestimmte Materialmenge vorgehalten werden muß, wird der Abstand  $s_v$  zwischen  $s_{\min}$  und  $s_{\text{mit}}$ , nämlich

$$s_v = 1,64 \cdot s_{\text{sa}} \quad (24)$$

als Vorhaltemaß bezeichnet.

#### Die Maximalschichtdicke ( $s_{\max}$ )

Werden Beschichtungen in zu großer Dicke aufgetragen, kann sich außer dem Kostennachteil auch ein technischer Nachteil z.B. daraus ergeben, daß Eigenspannungen in der Beschichtung (Nachvernetzung, Alterung etc.) den Haftverbund zum Untergrund unzulässig belasten. Über die Festlegung eines oberen Schichtdickengrenzwertes  $s_{\max}$  kann dem vorgebeugt werden. Dazu liegt es nahe, die Maximalschichtdicke spiegelbildlich zur Mindestschichtdicke zu definieren:

$$s_{\max} = s_{\text{mit}} + 1,64 \cdot s_{\text{sa}} \quad (25)$$

Auf Bild 22 ist dieser Grenzwert graphisch aufgezeigt. Man erkennt, daß die 95%-Fraktile eine Schichtdickenabweichung von 5% nach oben zuläßt. Weil zur Begrenzung der Schichtdicke auf  $s_{\max}$  gegenüber  $s_{\text{mit}}$  eine bestimmte Materialmenge zurückgehalten werden kann, wird der Abstand  $s_R$  zwischen  $s_{\max}$  und  $s_{\text{mit}}$ , nämlich

$$s_R = 1,64 \cdot s_{sa} \quad (26)$$

als Rückhaltemaß bezeichnet.

#### Die für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke ( $s_{\text{diff}}$ )

In den Abschnitten 2.1 und 2.2 ist die Bedeutung des Widerstandes bzw. der Durchlässigkeit von Betonbeschichtungen für Kohlendioxid und Wasserdampf aufgezeigt worden. Nach Gleichung (11) setzt sich der Diffusionswiderstand  $s_D$  aus dem Produkt der Materialkenngröße Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  und der Schichtdicke  $s$  zusammen. In Kenntnis der Ausführungen in Abschnitt 3.2 ergibt sich die Frage nach dem Schichtdickengrenzwert einer Schichtdickenverteilung, welcher den Diffusionswiderstand der genannten Gase  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  bestimmt. Zur Beantwortung dieser Frage führen folgende Überlegungen:

Betrachtet man den Diffusionsvorgang [3.6] durch eine Bauteilfläche und summiert die Diffusionsstromdichten  $\dot{m}_i$  der Schichtdickenabschnitte  $A_i$  aus einem Histogramm auf, gilt die Beziehung:

$$\dot{M} = \sum \dot{m}_i \cdot A_i = \sum \frac{A_i}{s_i} \cdot \frac{\delta \cdot \Delta p}{\mu} \quad [\text{kg/h}] \quad (27)$$

Die für den Diffusionsstrom effektive Schichtdicke ergibt sich daraus zu

$$s_{\text{diff}} = \frac{1}{\sum \frac{A_i}{A_{\text{ges}}} \cdot \frac{1}{s_i}} \quad (28)$$

Bildet man für die einzelnen Schichtdickenklassen eines Histogrammes mit den jeweiligen mittleren Schichtdicken  $s_n$  entsprechend den Balken 1...n und deren Häufigkeiten  $H_n$ , Verhältnisse, kann die für Diffusionswiderstände effektive Schichtdicke daraus wie folgt errechnet werden:

$$s_{\text{diff}} = \frac{1}{\frac{H_1}{s_1} + \frac{H_2}{s_2} + \dots + \frac{H_n}{s_n}} \quad (29)$$

Wenn man über eine größere Anzahl an Meßwerten  $s_i$  verfügt und ein entsprechendes Rechenprogramm anwendet, kann man die  $s_{diff}$  als Kehrwert der Summe aller reziproken Dickenwerte errechnen:

$$s_{diff} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i}} \quad (30)$$

Für diese Beziehung gilt immer:

$$s_{diff} \leq s_{mit} \quad (31)$$

Bild 22 veranschaulicht die ungefähre Lage der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicke  $s_{diff}$ . Mit größer werdender Streuung (zunehmender Standardabweichung) der Zahlenwerte driften die  $s_{diff}$  von der mittleren Schichtdicke  $s_{mit}$  in Richtung der kleineren Schichtdicken nach links ab.

Der Zusammenhang zwischen den beiden Schichtdicken  $s_{diff}$  und  $s_{mit}$  und der Streuung in einer Normalverteilung kann durch Bildung einer Variationszahl charakterisiert werden:

$$V_{s_{diff}} = 1 - \frac{s_{diff}}{s_{mit}} \quad (32)$$

Diese Variationszahl ist ein relatives, dimensionsloses Streumaß für  $s_{diff}$ . Zahlenwerte, die gegen Null streben, zeigen eine zunehmende Nähe zu  $s_{mit}$  an. Zahlenwerte, die gegen 1 streben, geben die zunehmende Entfernung der  $s_{diff}$  von der  $s_{mit}$  an.

An welcher Stelle der Abszisse sich  $s_{diff}$  befindet, hängt somit individuell von der durch den Mittelwert  $s_{mit}$  und die Stichprobenstandardabweichung  $s_{sa}$  geprägte Normalverteilung des Schichtdickenereignisses ab. Aus Tabellen über die Schranken von Standardnormalverteilungen [3.5], bzw. durch einen entsprechenden Einbau der Gesetzmäßigkeit in ein Rechenprogramm, kann der jeweilige Abszissenabschnitt in der Definition analog zu  $s_{min}(5\%)$ ,  $s_{mit}(50\%)$  und  $s_{max}(95\%)$  als  $s_{diff}(x)$ -Fraktilwert errechnet werden.

### 3.4. Schichtdickenbestimmende Einflußgrößen

Wenn Betonoberflächen beschichtet werden, beeinflussen mehrere unabhängig voneinander wirkende Parameter das Beschichtungsergebnis bezüglich der erwünschten Schichtdickentreffsicherheit und der Schichtdickengleichmäßigkeit. Im wesentlichen können sechs Einflußgrößen genannt werden:

- a) Es besteht ein einfacher, proportionaler Zusammenhang zwischen der Auftragsmenge  $m''$  eines flüssigen Beschichtungstoffes mit bestimmtem Festkörpervolumen  $FV$  und bestimmter Dichte  $\rho_{fl}$  und der zu erwartenden, mittleren Trockenschichtdicke  $s_{mit}$ .

$$s_{mit} \sim m'' \cdot FV \cdot \frac{1}{\rho_{fl}} \quad (33)$$

Die mittlere Schichtdicke fällt um so größer aus, je mehr Beschichtungstoff zum Einsatz gelangt, je größer das Festkörpervolumen und je kleiner die Dichte des flüssigen Beschichtungstoffes ist.

- b) Die Rauheit des zu beschichtenden Untergrundes spielt für die Gleichmäßigkeit der Schichtdicke eine bedeutende Rolle. Zum einen ist die effektive Fläche eines zu beschichtenden, rauhen Bauteiles größer, als diejenige eines glatten Bauteils - gleiche Abmessungen zur Länge, Breite etc. des Bauteils vorausgesetzt. Zum anderen verursachen rauhe Oberflächengeometrien, solange sie durch den Beschichtungstoff nicht egalisiert werden, deutlich ausgeprägtere Schwankungen der Dicken einer Beschichtung gegenüber einem ebeneren Substrat. Beide Einflüsse erkennt man auf Bild 19.
- c) Das Applikationsverfahren geht in das Schichtdickenergebnis ein, wobei unter den gängigsten Verfahren das Airless-Spritzen die gleichmäßigste Schichtdickenverteilung erwarten läßt. Wird ein Beschichtungstoff durch Pinselapplikation aufgetragen, resultiert daraus wegen der hinterlassenen „Pinselfurchen“ bereits eine geringere Gleichmäßigkeit. Bei der Rollenapplikation muß man mit den größten Schichtdickenschwankungen rechnen. Diese werden durch den Flor der Rolle verursacht, der grob strukturierte bis feinkörnige Dickenschwankungen (Orangenschaleneffekt) hinterläßt. Aus ökonomischer, umfeldschonender und handwerklicher Sicht hat sich aber gerade diese Applikationsmethode zu dem am meisten angewendeten bzw. anwendbaren Verfahren entwickelt. Es wirkt sich erfahrungsgemäß gleichermaßen kontraproduktiv auf die Schichtdickentreffsicherheit (ausreichend dicke Schicht) und auf die Schichtdickengleichmäßigkeit aus, insbesondere bei der Anwendung der weitverbreiteten, strukturviskosen, wäßrig formulierten Beschichtungstoffe.

Bei der Beschichtung von Bodenflächen werden Zahnleisten verwendet, um die Auftragsdicke zu steuern. Wenn die Zahnleisten verschleiben und nicht rechtzeitig ersetzt werden, kommt es oft unbemerkt zu drastischen Schichtdickenunterschreitungen. Bild 23 veranschaulicht diesen Einfluß. Bemerkenswert ist dabei, daß die Verminderung der Zahnhöhe um ein Viertel zu einer Halbierung der Schichtdicke führt.

- d) Einen ganz wesentlichen, oft weit gefächerten Einfluß auf die Schichtdickengleichmäßigkeit übt das handwerkliche Geschick des Anwenders aus, und zwar bei allen genannten Applikationsverfahren. Die nachweislich erbrachte Qualifikation des Handwerkers, manchmal auch nur seine Motivierung, sichern noch am ehesten das zu verfolgende Schichtdickenziel.
- e) Die rheologischen Eigenschaften des flüssigen Beschichtungstoffes nehmen Einfluß auf das Schichtdickenziel. Fließfähigkeit und Oberflächenspannung (Verlaufsvermögen) des Beschichtungstoffes als Flüssigkeit einerseits und strukturviskoses Stoffverhalten zur Erzielung standfester Naßfilme an senkrechten und geneigten Flächen andererseits bilden die beiden Grenzen für den Beschichtungstoff-Formulierer.
- f) Bei praktisch keiner Applikationsmethode (weder unter Baustellenbedingungen, noch unter den stationären Bedingungen einer werksmäßigen Herstellung) gelingt es, den gesamten zur Anwendung vorgesehenen Beschichtungstoff auch auf das Objekt zu bringen. Teile davon verbleiben in den Gebinden, in der Applikationsanlage, in den Verarbeitungswerkzeugen oder gehen beim Applikationsvorgang schlicht daneben. Dieser sogenannte Verarbeitungsverlust mindert das Schichtdickenergebnis.

Bild 24 zeigt auf, in welcher Reihenfolge einige der genannten Einflußgrößen auf die Gleichmäßigkeit des Schichtdickenergebnisses einwirken.

### 3.5 Methoden zur Messung von Schichtdicken

Bei jeder beschichteten Bauteiloberfläche liegt eine infinite Grundgesamtheit von Schichtdickeneinzelmerkmalen vor. Das heißt, man würde - auch wenn man nur eine sehr kleine beschichtete Fläche betrachtet - eine unendlich große Zahl an verschiedenen und gleichen Schichtdicken messen können, wenn man nur ein geeignetes Gerät oder eine entsprechende Meßmethode zur Verfügung hätte. Weil dies jedoch nicht praktikabel und zur ausreichend genauen Beurteilung auch nicht erforderlich ist, zieht man zur Bewertung des Schichtdickenergebnisses einer beliebig großen beschichteten Fläche stets nur die finite Gesamtheit einer Stichprobe heran. Voraussetzung, um von einer Stichprobe auf eine Grundgesamtheit schließen zu können, ist jedoch die Anwendung eines weitgehend strukturgleichen Modelles bei der Stichprobennahme [3.3].

Wenn diese Bedingung erfüllt ist, spricht man von einer repräsentativen Erhebung. Diese kann einerseits erwartet werden, wenn die Ermittlung der Schichtdickenmerkmale nach ei-

nem zufallsgesteuerten Auswahlverfahren erfolgt (Zufallsvariable). Andererseits erfordert die repräsentative Erhebung eine ausreichende Anzahl  $n$  der in die Bewertung einfließenden Schichtdickenwerte (Gesetz der großen Zahlen). Ein Meßgerät oder ein Meßverfahren darf nur dann eingesetzt werden, wenn die beiden genannten Bedingungen zur Stichprobennahme erfüllbar sind.

Im Prinzip kann die Messung der Dicke bereits an der Naßschicht, z.B. durch Anwendung des sog. Roßmann - Meßkammes oder der Rollfelge, [3.7] durchgeführt werden. Diese Methode taugt jedoch allenfalls für einen Tastversuch. Die Bedingungen für eine repräsentative Erhebung können damit nicht erfüllt werden, weil die Methode zu ungenau ist und in der verfügbaren Zeit nicht genügend Meßwerte erfaßt werden können. Bei zahlreichen Beschichtungen stimmt außerdem das Volumen des flüssigen, gerade aufgetragenen Stoffes nicht mit demjenigen der erhärteten Beschichtung überein. Außerdem zieht der Trocknungsvorgang bis hin zum Festkörper eine Schichtdickenabnahme nach sich. Damit erhöht sich die Ungenauigkeit des Meßergebnisses aus der Naßschichtmessung auch noch mit zunehmender Zeit. Der qualifizierte Schichtdickennachweis erfordert daher stets das Messen an der getrockneten bzw. chemisch vernetzten Beschichtung.

Während man auf metallischen Untergründen die Dicke von Oberflächenschutzschichten magnetinduktiv oder nach dem Wirbelstromprinzip zerstörungsfrei messen kann, ist dies auf mineralischen Untergründen wie Beton praktisch nur durch zerstörende Meßmethoden möglich.

Mit Abstand am häufigsten wird die Schichtdickenmessung im Keilschnittverfahren [3.8] durchgeführt. Damit lassen sich starr formulierte Schichten in einer Dicke bis ca. 1000  $\mu\text{m}$  messen.

Bild 25 zeigt die Anwendung des sog. Paint Inspection Gage (PIG). Die Meßgenauigkeit liegt schichtdickenabhängig im Bereich zwischen 2 und 20  $\mu\text{m}$ . Der Umgang damit erfordert gegenüber der Anwendung zerstörungsfrei arbeitender elektronischer Geräte auf metallischen Untergründen jedoch eine deutlich größere Erfahrung und Meßpraxis.

Wegen der handlichen Form kann das PIG an praktisch allen Orten eines Bauteils/Bauwerks eingesetzt werden, die für sachkundige Personen zugänglich sind (Bild 26). Auch wird es damit möglich, einen ausreichend großen Stichprobenumfang zu ermitteln. Somit können die Bedingungen zur repräsentativen Meßwerterfassung ohne Einschränkung erfüllt werden. Die unvermeidbare örtliche Zerstörung der Beschichtung hält sich in Gren-



zen. Die erzeugten Keilschnitte können in der Regel mit geringem Aufwand und ohne Funktionsbeeinträchtigung nachgebessert werden.

Wenn Probekörper vorliegen oder solche am Bauobjekt entnommen werden können und wenn dazu noch besondere Schlitze hergestellt werden, liefert die Vermessung unter dem Mikroskop die genauesten Ergebnisse. Bild 27 zeigt die Ermittlung eines Schichtdickenprofils unter dem Mikroskop längs einer Schnittfläche einer beschichteten Betonplatte. Für eine repräsentative Erhebung fehlt es dagegen bei diesem Verfahren an der ausreichenden Anzahl zufällig gewinnbarer Meßorte bzw. Meßbereiche, denn damit wäre ein beträchtlicher Arbeitsaufwand und eine erhebliche Zerstörung am Bauobjekt verbunden.

Liegen größere Schichtdicken oder ausgeprägt flexibel formulierte Beschichtungen vor, kann die Schichtdicke mit Hilfe einer Schieblehre mit aufgesetzter Meßuhr bzw. einer Mikrometerschraube an einem zuvor entnommenen Span gemessen werden. Die Meßgenauigkeit beträgt im relevanten Schichtdickenbereich zwischen 500 µm und 5 mm ca. 10 µm.

Problematisch in der Anwendung, weil auf den üblicherweise unebenen, beschichteten Untergründen schwierig handhabbar, muß das mit einer Penetrationsnadel sondierende Differenzdickenmeßgerät nach BAM bezeichnet werden, welches als Meßgeräte-Alternative in [1.12] genannt wird. Dabei werden mit einer Penetrationsnadel weiche Schichten - nur dafür ist das Gerät anwendbar - durchstoßen, bis man auf einen harten Untergrund stößt. Bild 28 zeigt die Geräte zur Bestimmung der Schichtdicke an flexiblen Schichten.

Das Vorhaben, Schichtdicken durch Ultraschallmessung zerstörungsfrei zu bestimmen, konnte sich bislang nicht durchsetzen, wengleich die damit verbundene zerstörungsfreie Prüfung einem lange gehegten Wunsch derer entgegenkäme, die Schichtdicken ermitteln.

### **3.6 Grundsätzliches zur Untersuchung der Schichtdicken**

In den vorausgegangenen Abschnitten sind die qualitativen Zusammenhänge zur Definition von Schichtdickengrenzwerten beschrieben worden. Diese basieren ganz wesentlich auf statistisch begründeten Annahmen über die Verteilung von Merkmalen zufällig entstandener Einheiten, die man Grundgesamtheiten nennt. Der Funktion der Beschichtung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Nun galt es, diese Vorgaben in entsprechend angelegten Experimenten zu verifizieren, d.h. der Theorie der Schichtdicken die Bestätigung durch belegbare Erkenntnisse folgen zu lassen. Nur dann ist es letztlich möglich, den Planern, den Stoffherstellern und den Ausfüh-

rungsunternehmern brauchbare Hilfestellungen an die Hand zu geben.

Um wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse vorlegen zu können, ist bei dieser Umsetzung großer Wert darauf gelegt worden, eine möglichst umfassende Erhebung von Schichtdicken von Beschichtungen an realen Bauwerken durchzuführen und dies auch bereits während der Ausführung von Beschichtungsmaßnahmen.

Bei der Durchführung solcher Erhebungen ist man unvermeidlich gewissen Einschränkungen unterworfen: Das Beschichten unterliegt im Vertragsverhältnis zwischen Auftraggeber (Bauherr) und Auftragnehmer (Beschichtungsunternehmer) stets auch kommerziellen Zwängen, die es dann nicht zulassen, im Vorfeld der Maßnahmen oder während der Beschichtungsausführung noch einige vielleicht interessante Varianten zur Berücksichtigung spezieller Einflußgrößen, Stoffklassen oder besonderen Prüfmodalitäten einzubauen.

Aus diesen Gründen sind zwei Experimentierfelder gewählt worden:

- a) Zum Studium des Einflusses unterschiedlicher Rauheiten des zu beschichtenden Untergrundes bei Anwendung unterschiedlicher Beschichtungstypen sind Betonplatten hergestellt, beschichtet und danach die Trockenschichtdicken gemessen worden. Dabei wurden unterschiedliche Meßmethoden eingesetzt. Diese systematisch angelegten Versuche sollten mögliche Lücken schließen, die an realen Bauobjekten - auch dann, wenn sehr viele Objekte verfügbar sind - nicht vermieden werden können.
- b) Die unter baupraktischen Bedingungen ausgeführten Beschichtungen sind an zahlreichen Bauobjekten (die Erfassung erstreckte sich auf ca. 80 Bauobjekte mit jeweils 2 bis 30 Meßserien) untersucht worden. Dadurch konnten vor allem auch die praxisbezogenen Einflüsse in die Bewertungen einfließen.

### **3.6.1 Untersuchungen an Versuchsplatten**

Als Untergründe dienten Betonplatten der Abmessungen 100 x 50 x 5 cm. Deren Oberflächen sind bei der Plattenherstellung in 3 verschiedenen Rauheiten ausgeführt worden.

Rauheit B: Durch Verwendung einer kunststoffbeschichteten Preßspanplatte als Schalung ist eine schalungsglatte, d.h. sehr ebene Oberfläche erzeugt worden.

Rauheit S: Durch Verwendung einer ungehobelten Holzschalung wurde eine schalbrettrauhe, d.h. eine mittelrauhe Oberfläche erzeugt.

Rauheit A: Durch Abziehen des Frischbetons mit einer Holzscheibe ist eine ausgeprägt rauhe Betonoberfläche hergestellt worden.

Auf diese Betonplatten sind zwei verschiedene Beschichtungsstoffe in jeweils zwei Einzelschichten, nämlich:

- a) ein Einkomponenten-Acrylat-Beschichtungsstoff (Kürzel C), lösemittelhaltig, pigmentiert (häufigstes Anwendungsgebiet: Sichtbeton im Freien), sowie
  - b) ein zweikomponentiger Epoxid-Beschichtungsstoff (Kürzel J), pigmentiert, lösemittelhaltig (häufiges Anwendungsgebiet: Stahlbetonkühlturmschale innen),
- mit den zwei Verarbeitungsverfahren

c) Airless-Spritzverfahren (Kürzel P) und

d) Rollenverfahren (Kürzel R),

appliziert worden.

Entsprechend den Anwendungsgebieten lauteten die Vorgaben zur Trockenschichtdicke:

- Acrylatbeschichtung  $s_{min} = 200 \mu m$
- Epoxidbeschichtung  $s_{min} = 300 \mu m$ .

Auf den Bildern 29 bis 34 wird an Schnitten durch die Versuchsplatten im Stereomikroskop gezeigt, welche unterschiedlichen Schichtdicken in Abhängigkeit von der Ebenheit des Untergrundes entstanden sind. Erwartungsgemäß steigen die Schichtdickenschwankungen vom glatt geschalteten Untergrund (Bilder 29 + 30) über die schalbrettrauhe Fläche (Bilder 31 + 32) bis zum ausgeprägt rauhen Untergrund (Bilder 33 + 34) an.

Die Ermittlung der Trockenschichtdicken mit den beschriebenen drei Meßmethoden/Geräten

- Keilschnittverfahren mit Paint Inspection Gage (Keil)
- Stereomikroskop mit 60-facher Vergrößerung an Schnittflächen (Mik)
- Ultraschallmessung De Felsco 100 (Ult)

wurden pro beschichteter Versuchsplatte durch zufällige Meßortauswahl an jeweils 100 Einzelmeßstellen vorgenommen.

Die Zahlenwerte sind mit einem dafür entwickelten Rechenprogramm weiterverarbeitet worden. Stellvertretend für die insgesamt 36 Meßreihen sind auf den Bildern 35 bis 40 die Ergebnisse von sechs Meßreihen dargestellt. Für jede Meßreihe sind die jeweils 100 Meß-

werte aufgeführt. Diese Meßwerte wurden der Häufigkeit nach in optimalen Klassenbreiten geordnet und in Histogrammen dargestellt.

Für eine visuelle Beurteilung in erster Näherung ist jedem Histogramm die Fehlerkurve entsprechend Gleichung (16) überlagert. Zur wissenschaftlich belegbaren Verifizierung ob jeweils Normalverteilungen vorliegen, ist für jede Stichprobe der K-S-Test angewendet worden.

An den Diagrammen sind jeweils die mittlere Schichtdicke  $s_{mit}$  und die Stichprobenstandardabweichung  $s_{sa}$  angeschrieben. Diese und die außerdem noch ermittelten Schichtdickenschätzwerte der Stichprobengesamtheit sind für jede der 36 Meßreihen in Tabelle 2 aufgelistet.

Mit den Ergebnissen aus den Versuchsplatten lassen sich interessante Parametervergleiche anstellen:

e) Für die Meßmethoden "Keilschnitt" und "Mikroskopisch" liegt eine relativ gute Übereinstimmung vor. Dies erkennt man beim Vergleich der arithmetischen Mittelwerte  $s_{mit}$  und der Variationszahlen  $V_{s_{mit}}$ . Dagegen divergieren die im Ultraschallverfahren erfaßten Mittelwerte zum Teil beträchtlich von denjenigen der beiden optischen Meßverfahren. Die Abweichungen sind sehr uneinheitlich. Die häufigste Verneinung bei der Abschätzung des Vorliegens einer Normalverteilung trat bei den im Ultraschallverfahren ermittelten Schichtdicken auf.

In den Bildern 41 bis 44 sind die Variationszahlen  $V_{s_{mit}}$  sowie die Variationszahlen  $V_{s_{diff}}$  für alle 36 Meßreihen vergleichend einander gegenübergestellt. Man erkennt, daß aus den beiden optischen Meßverfahren weitgehend gleiche Balkenprofile resultieren. Erwartungsgemäß ist auch, daß die Streuung mit zunehmender Ebenheit der Oberfläche abnimmt. Bei allen 4 Darstellungen zeigt sich jedoch, daß sowohl die Variationszahlen  $V_{s_{mit}}$  für die Streuung um die mittlere Schichtdicke  $s_{mit}$  als auch die Variationszahlen  $V_{s_{diff}}$  für das Abdriften der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicken  $s_{diff}$  bei der Keilschnittmessung kleiner ausfallen als bei der mikroskopischen Schichtdickenmessung. Zwar ist am geschnittenen Balken die Forderung nach der zufälligen Meßwerterhebung nicht erfüllt. Das Meßergebnis deutet jedoch darauf hin, daß mit der mikroskopischen Messung möglicherweise eine realistischere Erfassung der Streubreite einer Schichtdickenverteilung möglich ist gegenüber der Messung im Keilschnittverfahren.

Signifikant weichen die Balkenprofile aus der Ultraschallmessung davon ab. Daraus wird abgeleitet, daß mit den optischen Methoden vergleichbare (richtige) Meßwerte erhoben werden, während die Ultraschallmessung offensichtlich nicht verwertbare Ergebnisse liefert. Diese Feststellung läßt es als sinnvoll erscheinen, für die weiteren vergleichenden Betrachtungen nur noch die beiden optischen Meßverfahren heranzuziehen.

- f) Mit nur einer Ausnahme von 24 Meßserien liefern die beiden optischen Meßmethoden für beide Beschichtungen auf allen 3 verschiedenen Untergründen Meßwerte, für die der K-S-Test das Vorliegen von Normalverteilungen bestätigte.
- g) Für die beiden optischen Meßmethoden zeigen die Variationszahlen  $V_{Smit}$  beim Spritzverfahren unwesentlich geringere Streumaße gegenüber dem Rollverfahren. Dagegen bestimmt die Untergrundrauheit signifikant die Streuung, wobei erwartungsgemäß auf dem abgeriebenen Betonuntergrund (Rauheit A, ausgeprägt rauh) die höchsten und auf dem glatten Betonuntergrund (Rauheit B, schalungsglatt) die niedrigsten Variationszahlen  $V_{Smit}$  ermittelt worden sind.
- h) Läßt man nach den vorausgegangenen Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur Meßwerterhebung die Ultraschallmessung außer Betracht, dann zeigt sich (letzte Spalte der Tabelle 2), daß sich die für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke  $s_{diff}$  als eine Fraktile einpendelt, die zwischen  $s_{35\%}$  und  $s_{45\%}$  liegt. Dies entspricht einer Variationszahl  $V_{s_{diff}}$  von 0,02 bis 0,12. Auf alle Beschichtungen bezogen liegt im Mittel eine  $s_{diff}$  vor, die in der Normalverteilung als 41%-Fraktile angesiedelt ist. Erwartungsgemäß bewegt sich die Fraktile mit zunehmender Rauheit von der mittleren Schichtdicke nach links in Richtung kleinerer Schichtdicken. Signifikante Unterschiede zwischen den Applikationsverfahren und den zwei verschiedenen Beschichtungstypen Epoxid und Acrylat konnten nicht festgestellt werden.

### 3.6.2 Untersuchungen an realen Bauteiloberflächen

#### 3.6.2.1 Versuchsdurchführung und Darstellung der Ergebnisse

Die Messung von Schichtdicken auf Bauteilen mit meist großen Flächen ist im Zuge von Instandsetzungs- bzw. Ausstattungsmaßnahmen an Bauobjekten durchgeführt worden. Dies waren ausschließlich Bauobjekte, an welchen die Maßnahmen vom Verfasser überwacht worden sind.

Bei der Planung der Maßnahmen sind auch die Beschichtungsstoff-Klassifizierungen in den Richtlinien ZTV-SIB 90 [1.12] und RILI-SIB des DAfStb [1.13] berücksichtigt worden. Zum Teil kamen die dort vorgegebenen Systeme richtlinienkonform zur Anwendung, zum Teil sind sie im Schichtaufbau und bei den Schichtdicken variiert worden. Trotz dieser Änderungen lassen sich die gewählten Beschichtungen den OS-Klassifizierungen der Regelwerke zuordnen.

Aus den insgesamt ca. 450 verfügbaren Meßreihen sind 30 ausgewählt und zu 17 Anwendungs- und Klassifizierungsbereichen objektbezogen zusammengestellt worden.

Bei der Objektauswahl stand die Erfüllung der Bedingung der repräsentativen Erfassung der Schichtdicken im Vordergrund. Des Weiteren wurden vor allem diejenigen Beschichtungen einbezogen, bei welchen die Einhaltung der vorgegebenen Schichtdicke einen bedeutenden Einfluß auf die jeweils verfolgte Schutzwirkung hat. Im folgenden sind die 17 verschiedenen Bauobjekte näher beschrieben:

- (1) Klasse OS B (ZTV-SIB 90 [1.12]), Beschichtung der Wände in einem Fernstraßentunnel.
- (2) Klasse OS B (ZTV SIB 90), Beschichtung auf den Außenseiten von Naturzugkühltürmen bei der Nachrüstung für den REA-Betrieb [3.9].
- (3) Klasse OS B (ZTV-SIB 90), Beschichtung auf den Außenseiten von Naturzugkühltürmen beim Neubau für den REA-Betrieb [3.10].
- (4) Klasse OS C (ZTV-SIB 90), Beschichtung an den Widerlagern und dem Überbau einer Autobahnbrücke.
- (5) Klasse OS C (ZTV-SIB 90), Beschichtung an der Außenseite eines Stahlbetonschornsteins.
- (6) Klasse OS C (ZTV-SIB 90), Beschichtung an der Außenseite eines Wasserturms [3.11].
- (7) Klasse OS DI (ZTV-SIB 90), Beschichtung auf ESG (Einscheiben Sicherheitsgläsern) des BETOGLASS®-Systems [3.12].
- (8) Klasse OS DII (ZTV-SIB 90), Beschichtung an den Sichtbetonfassaden von Wohn- und Schulgebäuden sowie Sporthallen.
- (9) Klasse OS DII (ZTV-SIB 90), Beschichtung an den Außenseiten von Druckwasser-Kernreaktorkuppeln [3.13].
- (10) Klasse OS F, Aufbau a) (ZTV-SIB 90), Beschichtung auf Randkappen einer Autobahnbrücke.
- (11) Klasse OS F, Aufbau a) (ZTV-SIB 90), Beschichtung auf Stahlbeton-Zwischendecken von Parkhäusern [3.14].

- (12) Klasse OS F, Aufbau b) (ZTV-SIB 90), Beschichtung auf Stahlbeton-Zwischendecken von Parkhäusern.
- (13) Klasse OS 2 (RILI SIB [1.13]), Versiegelung an Waschbeton-Fassadenelementen von Schulhausgebäuden.
- (14) Klasse OS 6 (RILI-SIB), Beschichtung an den Innenseiten von Naturzugkühltürmen im Bestand für den Normalbetrieb.
- (15) Klasse OS 6 (RILI SIB), Beschichtung an den Innenseiten von Naturzugkühltürmen beim Neubau für den REA-Betrieb [3.10].
- (16) Klasse OS 8 (RILI SIB), Beschichtung auf Beton-Industrieböden
- (17) Klasse OS 9 (RILI SIB), Beschichtung an der Außenseite im Mündungsbereich eines Stahlbetonschornsteins [3.15].

Es sind diejenigen Schichtdickenmeßgeräte verwendet worden, die unter den baupraktischen Bedingungen mit größtmöglicher Erfolgserwartung einsetzbar waren. Dies waren das Keilschnittmeßgerät (Bild 26) und die Schieblehre mit Meßuhr zur Messung an entnommenen Spänen (Bild 28). An einem Objekt ist für vergleichende Betrachtungen zusätzlich das BAM Differenzdickenmeßgerät (Bild 28) angewendet worden.

Die Meßwerte sind unter Beachtung der Ausführungen in Abschnitt 3.5 zur repräsentativen Erfassung von Schichtdicken erhoben worden. Für 11 der 17 in die Bewertung einbezogenen Bauobjekte ist das jeweilige Schichtdickenergebnis auf den Bildern 45 bis 55 in Form der Verteilungsdiagramme graphisch dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung sind für 7 der 11 Bauobjekte fotografische Aufnahmen hinzugefügt. Am Verteilungsdiagramm sind der Gipfelwert  $s_{mit}$  und die Stichprobenstandardabweichung  $s_{sa}$  angegeben.

Bei den Bauobjekten (1), (2), (4), (5), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16) und (17) war zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer als Leistungsmerkmal die Mindestschichtdicke  $s_{min}$  in der Definition des 5%-Fraktilwertes vereinbart worden. Am Bauobjekt (7) mußte die mittlere Schichtdicke unter Berücksichtigung einer Variationszahl  $\leq 0,2$  und an den Bauobjekten (3) und (6) die für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke  $s_{diff}$  eingehalten werden. Zur Überprüfung dieser Anforderungen ist die Anzahl  $n$  der erfaßten Meßwerte rechnerisch ausgewertet worden. In der Spaltengruppe *Verifizierung der Vorgabe* der Tabelle 3 ist der soll-ist-Vergleich für den Fall der Anforderung Mindestschichtdicke  $s_{min}$  dargestellt. In der Spalte  $< s_{min}$  ist der prozentuale Anteil der Meßwerte genannt, der nach dem abschließenden Beschichten unterhalb des 5%-Fraktilwertes lag. Gelegentlich mußte bis dahin nachbeschichtet werden.

Insbesondere in Fachkreisen des Korrosionsschutzes von Stahlbauten [3.2] wird die Schichtdicke nach unten in nicht zulässiger Weise absolut begrenzt. Das heißt, kein Meßwert darf  $< 80\%$  der vereinbarten Untergrenze (dort Sollschichtdicke genannt) sein. In der Vorgängernorm [3.1] ist dieser noch zulässige Anteil der Abweichung (0,8 Sollschichtdicke) unterhalb der Untergrenze auf 5% des Anteils der Meßwerte festgelegt worden. Abgesehen davon, daß es aus statistischer Sicht nicht zulässig ist, eine absolute Untergrenze einzuführen, zeigen die Zahlenwerte der Spaltengruppe *Verifizierung der Vorgabe*, daß dies auch gar nicht notwendig ist.

Wenn nämlich die Definition der 5%-Fraktile angewandt und eingehalten wird, liegen bei den betrachteten Meßserien unterhalb einer  $0,8 s_{\min}$  - Grenze keine Meßwerte mehr. Unter Anwendung von Gleichung (19) ergibt sich über die Schranken der Standardnormalverteilung [3.4] unterhalb des Grenzwertes  $0,8 s_{\min}$  ein Flächenanteil von 0,5%. Dies bedeutet, daß unterhalb der  $0,8 s_{\min}$  Grenze theoretisch noch 0,5% der Meßwerte einer Stichprobe liegen können, immer vorausgesetzt, die Stichprobe entspricht der Gauß'schen Normalverteilung.

Die Rechenwerte in Tabelle 3 zeigen, daß unterhalb dieser  $0,8 s_{\min}$  - Grenze nur dann noch Meßwerte vorgefunden werden, wenn die Mindestschichtdicke in der Definition als 5%-Fraktile nicht erfüllt worden ist. Es wäre unlogisch, einerseits diesen Mangel zu dulden, das Ergebnis jedoch über eine weitere (und dazu auch noch untaugliche) Forderung begrenzen zu wollen. Die Ergebnisse aus den Versuchen an den 17 Bauobjekten (sie decken sich mit den hier nicht in die Bewertung eingeführten mehr als 400 weiteren in situ Meßserien) zeigen, daß eine aus statistischer Sicht ohnehin nicht zulässige Begrenzung eines offenen Intervalls (wie sie die Gauß'sche Verteilung ist) gar nicht nötig ist.

Diese bis heute in der Praxis nicht berücksichtigte Erkenntnis wird auch dadurch nicht erschüttert, wenn wegen des offenen Intervalls tatsächlich einmal eine (statistisch mögliche) Unterschreitung der  $0,8 s_{\min}$  - Untergrenze eintritt. Aufgrund dieses seltenen Ereignisses wird keine der von den Beschichtungen geforderten Eigenschaften ernsthaft gefährdet.

Im Datenblock *Errechnete Parameter* der Tabelle 3 sind analog zu den Untersuchungen an den Versuchsplatten (Abschnitt 3.6.1) diejenigen Schichtdickengrenzwerte und Variationsgrößen aufgelistet, die nach den Ausführungen unter Abschnitt 3.3 aus den Meßwerten für die 17 untersuchten realen Bauobjekte errechnet worden sind.



### 3.6.2.2 Folgerungen für die statistische Auswertung

#### a) Zur Normalverteilung

Unter Abschnitt 3.2 wurde bereits ausgeführt, daß es für die Bewertung von Schichtdickenergebnissen sowie für die Durchführung der Bemessung von Schichtdicken von größter Bedeutung ist, zu wissen, ob die Zufallsvariablen einer Stichprobe der Gauß'schen Normalverteilung entsprechen. Nur wenn die Bedingung erfüllt ist, kann unter Zugrundelegung der in Abschnitt 3.3 definierten Schichtdickengrenzwerte eine Erfolgskontrolle vorgenommen werden. Davon wiederum abgeleitet ist die Möglichkeit der Bemessung von Schichtdicken, die wiederum auf den Gesetzmäßigkeiten der Normalverteilung beruht. Man kann hierzu durch Anwendung eines visuellen Tests, der daraus besteht, daß man dem Histogramm der Stichprobe die Gauß'sche Fehlerkurve gemäß Gleichung (19) überlagert (siehe Bild 21), in erster Näherung abschätzen, ob diese Bedingung erfüllt scheint. Wissenschaftlich abgesichert kann eine solche Aussage jedoch nur durch Anwendung des K-S-Tests zur Ermittlung des zweiseitigen Signifikanzniveaus erfolgen (siehe Abschnitt 3.2). In der Spalte N-vert. der Tabelle 3 konnte nach Anwendung des K-S-Tests für 15 der 17 Klassifizierungsbereiche das Prädikat ja vergeben werden, d.h. es liegen bei den gewählten Meßserien überwiegend Gauß'sche Normalverteilungen vor. Damit kann davon ausgegangen werden, daß die Schichtdicken von Beschichtungen, die mit den gängigen Verarbeitungsverfahren appliziert wurden, sich unter baupraktischen Bedingungen in Gauß'schen Verteilungen anordnen.

Aus den in situ Untersuchungen ist diesbezüglich auch klar geworden, daß Abweichungen von der Gauß'schen Verteilung in Form von positiven oder negativen Schiefen, mehrgipflige Verteilungen etc. auf systematische Fehler zurückgehen, deren Ursache sowohl in der Beschichtungsanwendung als auch in der Meßwerterfassung liegen können:

Wenn bei der Anwendung pro Arbeitsabschnitt Änderungen eintreten, wie

- Temperaturunterschiede am Objekt und in der angrenzenden Luft
- Zu später Wechsel eines verschlissenen Verarbeitungsgerätes
- Anwendungspersonal mit unterschiedlichen handwerklichen Fähigkeiten
- Abweichungen in der Rheologie der Beschichtungsstoffe

und diese Änderungen bei der Meßwerterhebung nicht erkannt werden oder nicht er-

kannt werden können, kann eine merkliche Abweichung des Schichtdickenergebnisses von der zu erwartenden Normalverteilung eintreten.

#### b) Zur Variation um die mittlere Schichtdicke $s_{mit}$

Die Darstellung der Variationszahl  $V_{s_{mit}}$  in Bild 56 gibt eine beträchtliche Schwankungsbreite wider. Der arithmetische Mittelwert für diejenigen untersuchten Objekte, für die eine Normalverteilung vorliegt (alle Objekte außer (1) und (14) liegt bei  $V_{s_{mit}} = 0,19$ . Die Abweichung in Form des zugehörigen Variationsbeiwertes von 0,39 erscheint relativ hoch.

Nach den Erkenntnissen aus a) und b) ist es aus statistischer Sicht nicht möglich, die „Schichtdickenregelung“ (siehe Abschnitt 3.1) der neuen EN ISO 12944-5 (Korrosionsschutz von Stahlbauten ...) [3.2] unter baupraktischen Bedingungen zu erfüllen.

#### c) Zur Lage und Streuung der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicken $s_{diff}$

Wie man auf Bild 56 erkennen kann, ist der Fraktilewert der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicke  $s_{diff}$  bei praktisch allen Bauobjekten nur geringen Schwankungen unterworfen. Der Mittelwert aller Bauobjekte, ohne die Objekte (1) und (14), liegt als  $s_{42\%}$ -Fraktile vor. Die dazugehörige mittlere Variationszahl  $V_{s_{diff}}$  liegt bei 0,04. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wo die  $s_{diff}(x)$ -Fraktile in der Gauß'schen Verteilung liegen, ist als Bild 57 das Bild 22 zur Definition der  $s_{diff}$  ergänzt. Die zusätzlich eingezeichnete vertikale Markierung zeigt die an den realen Bauobjekten ermittelte mittlere  $s_{diff}$  in Form der  $s_{42\%}$ -Fraktile.

#### d) Zusammenhang zwischen $s_{diff}$ und $s_{sa}$

Wenn man die  $s_{diff}$  und die zugehörige  $s_{sa}$ , jeweils bezogen auf die mittlere Schichtdicke  $s_{mit}$ , gegeneinander aufträgt, ergeben sich für die Versuchsplatten und die realen Bauobjekte weitgehend identische Kurvenzüge. Bild 58 zeigt diesen Zusammenhang. Aus diesen Kurven läßt sich folgende quadratische Gleichung entwickeln.

$$\frac{s_{diff}}{s_{mit}} = 1 - \left( \frac{s_{sa}}{s_{mit}} \right)^2 \quad (34)$$

Stellt man die Gleichung (34) um, dann eröffnet sich die Möglichkeit, mit Hilfe dieser Gleichung mit guter Näherung  $s_{diff}$  errechnen zu können, wenn aus dem vorausgegangenen Meßvorgang lediglich der Grenzwert  $s_{mit}$  und die zugehörige Standardabweichung  $s_{sa}$  ermittelt werden konnten:

$$s_{\text{diff}} = s_{\text{mit}} \left[ 1 - \left( \frac{s_{\text{sa}}}{s_{\text{mit}}} \right)^2 \right] \quad (35)$$

Wie die Darstellung auf Bild 66 zeigt, liegt die mittlere Schichtdickenfraktile  $s_{\text{diff}}$ , welche für die untersuchten 17 Bauobjekte im Mittel das Diffusionsverhalten von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  durch die Beschichtungen steuert mit  $s_{\text{diff}}(x) = 42\%$  nahe beim arithmetischen Mittelwert  $s_{\text{mit}}$ . Unschwer kann man jedoch erkennen, daß die mittlere Schichtdicke  $s_{\text{mit}}$  das Diffusionsverhalten eigentlich nicht repräsentiert und korrekterweise bei der Ermittlung des Diffusionswiderstandes nicht in Gleichung (11) eingesetzt werden darf.

Über die Schranken der Standardnormalverteilung [3.4] läßt sich feststellen, daß die Schichtdicke bei  $s_{\text{diff}}(x) = 42\%$  gerade 4% unter dem Schichtdickenwert  $s_{\text{mit}}$  liegt.

Wie daraus die rechnerische Festlegung des korrekten (für Diffusionsvorgänge effektiven) Diffusionswiderstands

$$s_{D, \text{eff}} = \mu \cdot s_{\text{diff}} \quad [\text{m}] \quad (36)$$

erfolgt, sei an folgendem Beispiel gezeigt:

Die Ermittlung der Diffusionswiderstandszahl erfolgte im Laborversuch unter Berücksichtigung der korrekten Schichtdicke, d.h. für die zum Permeationsversuch vorgesehenen Beschichtungsproben wird die Schichtdicke  $s_{\text{diff}}$  entsprechend Gleichung (35) ermittelt. Aus dem Permeationsversuch errechnet sich der Diffusionswiderstand  $R$  wie folgt:

$$R = \frac{D \cdot \Delta c}{i} \quad [\text{m}] \quad (37)$$

Für  $R$  kann man auch einsetzen

$$R = \mu \cdot s_{\text{diff}} \quad [\text{m}] \quad (38)$$

Aufgrund der Absenkung der  $s_{\text{mit}}$  um 4%, wie sie für die Fraktile  $s_{\text{diff}}(x) = 42\%$  gilt, ergibt sich

$$\frac{s_{\text{diff}}}{s_{\text{mit}}} = 0,96 \quad \Rightarrow \quad s_{\text{diff}} = s_{\text{mit}} \cdot 0,96 \quad [\mu\text{m}] \quad (39)$$

Läge einer praktischen Rechnung eine Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{\text{CO}_2} = 1.250.000$  zugrunde, würde sich unter Einsatz einer  $s_{\text{mit}} = 160 \mu\text{m}$  ergeben:

$$s_{D, \text{CO}_2} = \mu_{\text{CO}_2} \cdot s_{\text{mit}} = 1.250.000 \cdot 0,00016 \text{ m} = 200 \text{ m} \quad (40)$$

Dagegen ergibt sich unter Einsatz der (korrekten)  $s_{\text{diff}}$  das folgende Ergebnis

$$s_{D, CO_2, eff} = \mu_{CO_2} \cdot s_{mit} \cdot 0,96 = 200 \text{ m} \cdot 0,96 = 192 \text{ m} \quad (41)$$

Analog dazu würde bei der Betrachtung der Wasserdampfdiffusion ein unter Berücksichtigung der  $s_{mit}$  errechneter Diffusionswiderstand von 2,0 m beim Einsatz der  $s_{diff}$  auf einen Diffusionswiderstand von 1,92 festgelegt.

Aus der baupraktischen Sicht ist diese Abminderung der Diffusionswiderstände um 4% keine signifikante Änderung, weshalb man nach Auffassung des Verfassers im Normalfall für die praktische Anwendung von der wissenschaftlich exakten  $s_{diff}$  abrücken und stattdessen dem Planer, dem Stoffhersteller und dem Anwender von Beschichtungsmaßnahmen ohne Bedenken für die Ermittlung von Diffusionswiderständen den Gebrauch des Schichtdickenwert  $s_{mit}$  empfehlen kann. Gleiches gilt auch für die Messung und Ermittlung von Diffusionswiderstandszahlen von Beschichtungen im Experiment.

### 3.6.2.3 Einfluß von Fertigungsverfahren

Bei der Untersuchung und Bewertung der rißüberbrückenden Bodenbeschichtungen (Typ OS F, Aufbau a) in Parkhäusern sind zwei Beschichtungsverfahren vergleichend betrachtet worden.

Die Applikation des Beschichtungstoffes der sogenannten hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschicht (HWO), auch Schwimmschicht genannt, wird je nach den technischen und ökonomischen Vorgaben manuell oder maschinell vorgenommen. Als Werkzeug zur Erzielung der gleichmäßigen und ausreichenden Schichtdicke wird in der Regel eine Kelle mit einem Zahnprofil verwendet (Bild 23), die von Hand geführt wird, wie auf Bild 51 gezeigt.

Wenn große zusammenhängende Fußbodenflächen beschichtet werden, setzt man auch zahnkellenbestückte Einbaufertiger ein. Neben wirtschaftlichen Vorteilen [3.16] sieht man gegenüber der Beschichtung von Hand auch noch eine gleichmäßigere Schichtdicke gewährleisten [3.17]. Bild 59 zeigt einen Einbaufertiger mit der am Heck angebauten Zahnleiste. Deren Profil ist identisch zu demjenigen für die Handfertigung.

Bei einem solchen Einbaufertiger ist der Anstellwinkel der Zahnleiste konstant, die Einzelängen der Zahnleistensegmente betragen 20 cm. Das Zahnprofil läßt somit eine konstante Menge Beschichtungstoff durchströmen und über die kurzen Zahnleistensegmente kann sich die ca. 2 m lange Zahnleiste Unebenheiten im Untergrund in begrenztem Umfang anpassen. Bei der manuellen Anwendung der Zahnkelle wird die 60 cm lange, starre Zahn-

leiste nicht stets im gleichen Anstellwinkel geführt, sondern entsprechend dem Bewegungsablauf des Handwerkers geneigt und aufgerichtet. An Bodenunebenheiten kann sich die 60 cm lange, starre Zahnleiste weniger anpassen als diejenige des Einbaufertigers. Per se ergeben sich daraus bei sonst vergleichbaren Bedingungen für die manuelle Applikation scheinbar ungünstigere Bedingungen als für die maschinelle.

An zwei Großobjekten sind die Fußbodenflächen jeweils mit einem rißüberbrückenden Beschichtungssystem der Klasse OS 11 nach RILI SIB (identisch zu OS F, Aufbau a der ZTV-SIB 90) beschichtet worden. Die Mindestschichtdicke  $s_{min}$  der HWO betrug in beiden Fällen 1500  $\mu\text{m}$ . Es wurde in beiden Fällen das gleiche Beschichtungssystem des gleichen Herstellers angewendet. Der Materialauftrag ist vom gleichen Fachunternehmen ausgeführt worden. Die ca. 17.000  $\text{m}^2$  umfassenden Flächen des Tiefgaragenobjektes sind mit dem Einbaufertiger beschichtet worden. Die ca. 10.000  $\text{m}^2$  messenden Flächen des oberirdischen Parkhauses wurden manuell beschichtet. In beiden Fällen kamen Zahnleisten mit identischer Zahngeometrie zum Einsatz.

An beiden Objekten sind auf Teilflächen zwischen 100  $\text{m}^2$  und 500  $\text{m}^2$  mit der Schieblehre an entnommenen Spänen Schichtdickenmessungen der HWO durchgeführt worden. In Tabelle 4 sind für jeweils 5 Meßserien die aus den Meßwerten errechneten Parameter zusammengestellt. Man erkennt, dass bei der manuellen Fertigung offensichtlich eine größere Stoffmenge zum Einsatz kam. Dies geht aus den Parametern  $s_{mit}$ ,  $s_{min}$ ,  $s_{max}$  und  $s_{diff}$  klar hervor. Hinsichtlich der erzielten Schichtdickenhöhe und der Schichtdickengleichmäßigkeit zeigen die relevanten Parameter  $V_{smit}$  und  $V_{sdiff}$ , daß bei beiden Anwendungsverfahren etwa gleich große Abweichungen vorliegen. Die Mittelwerte der beiden Variationszahlen für die jeweils 5 Meßserien sind nahezu gleich. Marginale Unterschiede liegen eher im Bereich der Meßungenauigkeit. Demnach hat hinsichtlich der Erzielung einer gleichmäßigen Schichtdicke keines der beiden Verfahren nennenswerte Vorteile vor dem anderen.

#### **3.6.2.4 Einfluß von Schichtdickenmeßverfahren**

Auf Bild 31 sind die Geräte abgebildet, die zur Messung von flexiblen Bodenbeschichtungen des Typs OS 11 (OS F, Aufbau a) unter baupraktischen Bedingungen eingesetzt werden können. Die Verfahren sind

- Schieblehre an entnommener Spanprobe
- Differenzdickenmeßgerät nach BAM

Mit beiden Verfahren sind an den genannten Großobjekten an identischen Arbeitsabschnitten die Schichtdicken gemessen worden. Auf den Bildern 61 und 62 sind die betreffenden Verteilungsdiagramme dargestellt. Daraus geht hervor, daß die Schichtdicke  $s_{mit}$  bei der Ermittlung mit der Penetrationsnadel des Differenzdickenmeßgerätes nach BAM 1,25 mal höher liegt als diejenige, die mit der Schieblehre an entnommenen Spänen gemessen wurde.

Die Gründe sind offenkundig: Beim entnommenen Span sind die obere und die untere Grenzfläche der Schicht visuell eindeutig erkennbar. Kornanteile aus einer obligatorischen Sandabstreuung, die ja nicht zur HWO zählen, können abgeschabt werden. Mit dem BAM Differenzdickenmeßgerät kann die Grenzfläche zum Untergrund durch die Penetrationsnadel nicht mit hinreichender Sicherheit ertastet werden. Die dort stets vorhandene Sandabstreuung wird (am Sandkorn vorbei) partiell durchstoßen. Die Sandkorndicke wird der HWO zugeschlagen. An der oberen Grenzfläche nivelliert der Gerätefuß die Schicht über den „Bergen“ der Beschichtung, was ebenfalls zu einer scheinbar höheren Schichtdicke führt.

Auf Bild 60 veranschaulicht eine schematische Zeichnung die Problematik dieses Meßverfahrens.

### 3.7 Empfehlungen zur Schichtdickenbemessung

Wenn Beschichtungsmaßnahmen geplant werden, muß der sachkundige Planer, abhängig von der Funktion der Beschichtung, entscheiden, welcher Schichtdickengrenzwert maßgeblich ist. Die Entscheidungshilfen dafür sind in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben. Im folgenden sind die 4 zur Auswahl stehenden Schichtdickengrenzwerte entsprechend der anwendungsorientierten Prioritätenfolge genannt:

- a) Mindestschichtdicke  $s_{min}$
- b) Für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke  $s_{diff}$  (evtl. ersetzt durch  $s_{mit}$ , siehe dazu Abschnitt 3.6.2.2)
- c) Mittlere Schichtdicke  $s_{mit}$  zusammen mit der Variationszahl  $V_{Smit}$
- d) Maximalschichtdicke  $s_{max}$

Richtgrößen zur Mindestschichtdicke finden sich in den Regelwerken [1.12] und [1.13]. Die mit einer Zulassung, z.B. nach [1.12] für verfügbare Produkte bereits festgelegten Min-

destdickungen sind in den Untersuchungsberichten zur Grundprüfung genannt. Der sachkundige Planer fordert diese beim Stoffhersteller an.

In den Regelwerken [1.12] und [1.13] wird auch die Maximalschichtdicke angesprochen. Sie wird dort, wie auch die Mindestschichtdicke zur Begrenzung von Diffusionsvorgängen herangezogen. Aus bauphysikalischer und aus statistischer Sicht ist das nicht korrekt. Die Ausführungen in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 setzen voraus, daß Schichtdicken als Normalverteilung vorliegen. Die Untersuchungsergebnisse, die in den Abschnitten 3.6.1 und 3.6.2 beschrieben worden sind, haben diese Hypothese bestätigt. Demnach ist die  $s_{max}$  ein Grenzwert im oberen Bereich der Normalverteilung (Bild 22), so wie die  $s_{min}$  ein Grenzwert, nämlich spiegelbildlich zur  $s_{max}$  (Bild 22) im unteren Bereich der Normalverteilung ist. Andererseits wurde gezeigt, daß Diffusionsvorgänge im direkten Zusammenhang mit der  $s_{diff}$  stehen und vereinfachend dafür auch die  $s_{mit}$  herangezogen werden kann. Nach dieser statistisch belegten Ausgangslage kann weder der untere Grenzwert ( $s_{min}$ ) noch der obere Grenzwert ( $s_{max}$ ) für die Bemessung von Diffusionsvorgängen verwendet werden. Dazu müßten sich die Schichtdicken jeweils um eine größte Wahrscheinlichkeitsdichte symmetrisch anordnen, wobei die beiden  $\bar{x}$ -Abschnitte identisch mit  $s_{min}$  bzw.  $s_{max}$  sein müßten. Dies ist unvereinbar mit der Wahrscheinlichkeitsdichte von Zufallsvariablen wie sie auf Bild 22 dargestellt sind. Man sollte daher die Begriffsdefinition der Maximal- und der Minimalschichtdicke in der Auslegung mit Bezug auf die Diffusion und die davon abgeleitete Bemessung aufgeben und abhängig vom Anwendungsbereich der Beschichtung eine  $s_{diff}$  bzw.  $s_{mit}$  vorgeben bzw. die Entscheidung zur Festlegung objektabhängig dem sachkundigen Planer überlassen. D.h. für Diffusionsvorgänge darf nur  $s_{diff}$ , bzw. mit zulässiger Vereinfachung  $s_{mit}$  (siehe Abschnitt 3.6.2.2) herangezogen werden.

Zur Bewertung der Kohlendioxiddiffusion (Carbonisationsbremse) wird der Diffusionswiderstand  $s_{D,CO_2} \geq 50$  m [2.7] angesetzt. Er ist allgemein einsetzbar, d.h. er hat überall dort Gültigkeit, wo normale atmosphärische Bedingungen herrschen und wo die Bauteilflächen luftberührt sind. Die Diffusionswiderstandszahl  $\mu_{CO_2}$  wird vom Stoffhersteller mitgeteilt.

Zur Bewertung der Wasserdampfdiffusion wird der Diffusionswiderstand in den Regelwerken generell auf  $s_{D,H_2O} \leq 4$  m begrenzt. Wie die Praxis zeigt, ist diese Forderung wenig verwendungs- und wenig aussagefähig. Je nach dem zu beschichtenden Betonbauteil könnte der Diffusionswiderstand einer Beschichtung sehr oft auch wesentlich größer sein (z.B. bei einem luftumspülten Betonbauteil im Freien). Andererseits gibt es Anwendungsfälle (z.B. Objekt (6) Bild 47), bei denen der Diffusionswiderstand deutlich unterhalb dieser 4

m-Grenze angesiedelt sein muß, um drohende Beschichtungsschäden abzuwenden. Für Anwendungsfälle dieser Art wird der sachkundige Planer individuell z.B. über die Abschätzung der instationären Feuchteverteilung in Bauteilen [2.9] [2.10] (siehe auch Abschnitt 2.2) die noch zulässige Schichtdicke  $s_{mit}$  festlegen.

Die relativ selten benötigte Maximalschichtdicke (sie mußte in den dem Verfasser vorliegenden ca. 450 Meßserien kein einziges mal überprüft werden) muß im Einzelfall in Kenntnis der Eigenspannungen eines einzusetzenden Beschichtungssystems kontrolliert werden. In diese Überlegungen sind auch die mechanische Güte der Randzone des zu beschichtenden Betonbauteils und ggf. zu erwartende thermische, hygrische und/oder ggf. chemische Wechselbeanspruchungen einzubeziehen.

Die unter a) bis d) dieses Abschnitts aufgestellte Prioritätenfolge kann nunmehr auch quantitativ eingegrenzt werden. Für die praktische Anwendung bei Planung, Ausführung und Kontrolle von Beschichtungsmaßnahmen wird man in wenigstens 95 % der Fälle mit den beiden Schichtdicken

- $s_{min}$     Mindestschichtdicke als 5 % Fraktile
- $s_{mit}$     Mittlere Schichtdicke (arithmetisches Mittel)

auskommen. In nur wenigen Ausnahmefällen wird man anstelle der  $s_{mit}$  die  $s_{diff}$  benötigen. Nach Auffassung des Verfassers kann man auf die  $s_{max}$  praktisch ganz verzichten. Gegenüber den in den Regelwerken gebrauchten 6 verschiedenen Schichtdicken ist dadurch wissenschaftlich begründet eine spürbare Vereinfachung erfolgt, die zu einer Akzeptanzförderung bezüglich der Richtlinienanwendung beitragen wird.

Wenn die Zielvorgabe in Form einer der vier Schichtdickengrenzwerte geklärt ist, muß die Menge des flüssigen Beschichtungsstoffes pro Bauteilfläche ermittelt werden. Dazu benötigt der Planer die im folgenden beschriebenen 5 Parameter (Schätzwerte) bzw. Materialkennwerte:

e) Standardabweichung der Stichprobe, im folgenden  $s_{sa}$  genannt.

Dieser Schätzwert ist in Abschnitt 3.2 definiert. Aufgrund der Tatsache, daß Schichtdicken pluralen Charakter haben und um das fehlerfreie Merkmal  $s_{mit}$  streuen, folgt eine nicht beeinflussbare Komponente, die man als applikationsimmanent bezeichnen muß. Darüberhinaus wird die Größe der Streuung erfahrungsgemäß durch das handwerkliche Geschick des Beschichters am stärksten beeinflusst. Weiteren Einfluß haben das Applikationsverfahren, der Verschleißzustand der Applikationswerkzeuge und die Rheologie



des Beschichtungstoffes. Diese Einflüsse sind bereits in Abschnitt 3.4 angesprochen worden.

#### f) Stoffzuschlag $\alpha$ (Verlust)

Unter baupraktischen Bedingungen kann nicht erwartet werden, daß der nach der Produktion in die Gebinde abgefüllte Beschichtungstoff bei der Applikation verlustfrei auf das Betonbauteil gelangt. Für den Materialverlust durch Entnahme aus dem Gebinde, Mischen von mehrkomponentigen Systemen, Applizieren mit verschiedenen Verfahren, muß - abhängig im wesentlichen vom Verarbeitungsverfahren - ein Stoffzuschlag ermittelt werden. Dieser muß zusätzlich zu der normal notwendigen Stoffmenge zum Einsatz gebracht werden, um das Schichtdickenziel zu erreichen. Er ist wie folgt definiert:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{\text{Stoffmenge am Objekt}}{\text{Stoffmenge im Gebinde}} \right) \quad [-] \quad (42)$$

#### g) Stoffzuschlag $\beta$ (Rauheit des Untergrundes)

Wenn Betonbauteile so glatt und planeben wären wie eine Glasscheibe, dann könnte man ohne diesen Parameter auskommen. Betonbauteile weisen jedoch immer eine Rauheit auf, die je nach Fertigungsart oder Verwitterungszustand ein weites Spektrum an Rauheit haben können. Bei den in Abschnitt 3.6.1 beschriebenen Versuchsplatten ist das Spektrum der baupraktisch am häufigsten vorliegenden Rauheiten in 3 Stufen in die Versuche eingegangen. Gegebenenfalls sollten übermäßig raue Flächen durch vorbereitende bzw. vorbehandelnde (egalisierende) Maßnahmen beschichtungsgerecht hergestellt werden [3.18]. Eine Beschichtung kann dann wesentlich gleichmäßiger erfolgen.

Die Rauheit des Betonuntergrundes wird neben dem zweidimensionalen Höhenprofil durch die effektive Fläche, bezogen auf die planebene Fläche charakterisiert. Mit Hilfe des sogenannten Wenzel-Quotienten, experimentell gestützt durch das Sandflächen-, alternativ das Zementleim- bzw. das Triangulationsverfahrens mittels Laserstrahl [3.19], kann die effektive Oberfläche im Prinzip ermittelt werden. Wegen des beträchtlichen Aufwandes wird dies jedoch nur ausnahmsweise durchführbar sein.

Rauheitsabhängig muß diejenige Stoffmenge ermittelt werden, die aufgrund der größeren (effektiven) Fläche appliziert werden muß, um das Schichtdickenziel zu erreichen.

Die Definition des Stoffzuschlags  $\beta$  lautet dann

$$\beta = \left( \frac{\text{effektive Bauteilfläche}}{\text{planebene Bauteilfläche}} \right) - 1 \quad [-] \quad (43)$$

Bei der Ermittlung bzw. der Abschätzung des Rauheitszuschlags muß beachtet werden, daß dieser mit zunehmender Schichtenfolge geringer anzusetzen ist, weil mit zunehmender Zahl der Einzellagen eine Egalisierung erfolgt. Der Rauheitszuschlag wird auch dann geringer, wenn bereits eine Beschichtungslage das Höhenprofil der Raustruktur erreicht bzw. überschreitet.

Waschbetonelemente haben extrem raue Oberflächen (siehe Bild 52). Mit folgender Modellrechnung kann die tatsächliche Oberfläche näherungsweise ermittelt werden. Es wird dabei vereinfachend angenommen, daß die Zuschlagkörner Zylinderform haben:

Bezogene (planebene) Fläche:  $A_b = 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} = 40.000 \text{ mm}^2$

Durchschnittlicher Durchmesser der Zuschlagsteine:  $\varnothing_{ST} = 11 \text{ mm}$

Anzahl der Zuschlagsteine, bezogen auf  $A_b$ :  $n = 15 \times 15 = 225$

Mittleres Tiefenprofil:  $h = 4 \text{ mm}$

Fläche pro Zuschlagsteinwand:  $A_{St} = \varnothing \times \pi \times h = 138 \text{ mm}^2$

Fläche aller Zuschlagstein(Zylinder)wände:  $A_{St,g} = 225 \times 138 \text{ mm}^2 = 31.050 \text{ mm}^2$

Effektive Waschbetonfläche:  $A_{\text{eff}} = A_b + A_{St,g} = 71.050 \text{ mm}^2$

#### h) Dichte des flüssigen Beschichtungstoffes $\rho_{fl}$

Beschichtungstoffe sind in der Regel Gemische aus Polymerbindemitteln, Pigmenten, Füllstoffen ggf. Lösemitteln oder Wasser und Zusatzmitteln. Die sich aufgrund der unterschiedlich spezifisch schweren Einzelkomponenten ergebende Dichte des Beschichtungstoffes - ausgedrückt in  $\text{g/cm}^3$  - wirkt sich auf die Schichtdicke aus. Je größer die Dichte des Beschichtungstoffes, um so geringer wird die Schichtdicke ausfallen.

#### i) Festkörpervolumen des flüssigen Beschichtungstoffes $FV$

Wenn Beschichtungstoffe aus lacktechnologischen Gründen flüchtige, organische Lösemittel oder Wasser enthalten, wird deren Masse dem Beschichtungstoff zugeschlagen. Nach der Applikation verdunsten diese und leisten keinen Beitrag zur Trockenschichtdicke. Dieser Einfluss wird durch das Festkörpervolumen rechnerisch berücksichtigt:

$$FV = \left( \frac{\text{Volumen des trockenen Rückstands}}{\text{Volumen des Beschichtungstoffes}} \right) \quad [-] \quad (44)$$

Umgangssprachlich spricht man von einem Festkörpervolumen von 60%, wenn aus 1 Liter Beschichtungstoff im Gebinde an der Bauteiloberfläche nach der Trocknung bzw. Vernetzung ein Volumen von 0,6 Liter verbleibt.

Die Materialkennwerte  $\rho_{fl}$  und  $FV$  werden ausschließlich vom Stoffhersteller bestimmt. In die Standardabweichung  $ssa$  gehen Einflüsse des Stoffherstellers (Rheologie) und des Ausführers (handwerkliches Geschick) ein. Der Verarbeitungszuschlag  $\alpha$  wird neben bestimmten und unbestimmten Baustelleneinflüssen vor allem vom Ausführer und dem von Dritten vorher eventuell festgelegten Applikationsverfahren beeinflusst. Der Rauheitszuschlag  $\beta$  ist bauteilbedingt. Seine Festlegung liegt in erster Linie im Obligo des Planers bzw. des Verarbeiters.

In Tabelle 5 sind die genannten und erläuterten Parameter (Schätzwerte) bzw. Parameterbereiche zusammengestellt. Diese wurden aus den in situ Ergebnissen (Abschnitt 3.6.2) unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Untersuchung der Versuchsplatten (Abschnitt 3.6.1) abgeleitet. Dabei ist folgendes zu beachten:

Die direkt in den Zeilen der Objekte (1) bis (17) in den Spalten für  $s_{mit}$ ,  $V_{smit}$ ,  $ssa$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  stehenden Zahlenwerte ohne Klammer resultieren direkt aus den rechnerischen Bewertungen der jeweiligen objektbezogenen Meßserien. Die in den Spalten  $ssa$  und  $\alpha$  in Klammern angegebenen Zahlenwerte wurden empirisch abgeschätzt. Sie würden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der bekannten Einflüsse für die alternativ möglichen Applikationsverfahren einstellen. Wenn in diesen Spalten einem Applikationsverfahren ein Strich zugeordnet ist, heißt dies, daß dieses Verfahren am betreffenden Bauobjekt nicht anwendbar war oder nicht gängig ist.

In den Spalten  $V_{smit}$  und  $\beta$  stehen in den leicht grau hinterlegten Zeilen diejenigen Zahlenwertbereiche, die unter Berücksichtigung aller verfügbaren Erkenntnisse aus den ca. 450 in situ Meßserien die Grenzen nach unten und nach oben abstecken. Dabei sind die Grenzen so gewählt worden, daß die Abweichungen beim handwerklichen Geschick noch akzeptabel sind ( $V_{smit}$ ) und die Anforderungen an einen beschichtbaren Untergrund ( $\beta$ ) erfüllt werden können.

Die Ausführungen in den Abschnitten 3.6.1 und 3.6.2 haben hinreichend ergeben, daß sich Schichtdicken von Beschichtungen auf Betonflächen nach der Gauß'schen Normal-

verteilung anordnen. Somit ist es möglich, die Rechenoperationen auf der Grundlage der Ausführungen in Abschnitt 3.3 durchzuführen, die ja aus der Funktion der Normalverteilung entsprechend Gleichung (16) abgeleitet sind.

Im ersten Schritt wird der Weg von den vorgegebenen Schichtdickengrenzwerten zu den zugehörigen mittleren Schichtdicken gesucht:

$$\text{Für } S_{\min}: \rightarrow S_{\text{mit}} = S_{\min} + 1,64 \cdot ssa \quad [\mu\text{m}] \quad (45)$$

$$\text{Für } S_{\text{diff}}: \rightarrow S_{\text{mit}} = \frac{S_{\text{diff}}}{2} + \sqrt{\frac{S_{\text{diff}}^2}{4} + ssa^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (46)$$

$$\text{Für } S_{\max}: \rightarrow S_{\text{mit}} = S_{\max} - 1,64 \cdot ssa \quad [\mu\text{m}] \quad (47)$$

Zwischen der erzielbaren mittleren Schichtdicke  $s_{\text{mit}}$  und der Auftragsmenge  $m''$  an flüssigem Beschichtungsmittel pro Fläche, liegt unter Einbeziehung der Schätzwerte gemäß f) bis i) folgende Proportionalitätsbeziehung vor:

$$s_{\text{mit}} \sim m'' \cdot FV \cdot \frac{1}{\rho_{\text{fl}}} \cdot \frac{1}{1+\alpha} \cdot \frac{1}{1+\beta} \quad (48)$$

Stellt man die Proportionalitätsbeziehung nach  $m''$  zu einer Gleichung um, und setzt die Gleichungen (45), (46) und (47) getrennt ein, erhält man diejenigen Gleichungen, mit denen die Auftragsmengen  $m''$  in  $\text{g}/\text{m}^2$  zur Erzielung der 3 folgenden, verschiedenen Schichtdickengrenzwerte errechnet werden können:

$$\text{Für } S_{\min} \rightarrow m'' = \frac{\rho_{\text{fl}}}{FV} \cdot (s_{\min} + 1,64 \cdot ssa) \cdot (1+\alpha) \cdot (1+\beta) \quad [\text{g}/\text{m}^2] \quad (49)$$

$$\text{Für } S_{\text{diff}} \rightarrow m'' = \frac{\rho_{\text{fl}}}{FV} \cdot \left( \frac{S_{\text{diff}}}{2} + \sqrt{\frac{S_{\text{diff}}^2}{4} + ssa^2} \right) \cdot (1+\alpha) \cdot (1+\beta) \quad [\text{g}/\text{m}^2] \quad (50)$$

$$\text{Für } S_{\max} \rightarrow m'' = \frac{\rho_{\text{fl}}}{FV} \cdot (s_{\max} - 1,64 \cdot ssa) \cdot (1+\alpha) \cdot (1+\beta) \quad [\text{g}/\text{m}^2] \quad (51)$$

Für die Auftragsmenge zur Erzielung der mittleren Schichtdicke ergibt sich die Gleichung, für  $m''$  direkt aus Gleichung (48):

$$\text{Für } S_{\text{mit}} \rightarrow m'' = \frac{\rho_{\text{fl}}}{FV} \cdot s_{\text{mit}} \cdot (1+\alpha) \cdot (1+\beta) \quad [\text{g}/\text{m}^2] \quad (52)$$

Gleichung (52) ist dann auch diejenige, die in dem überwiegenden Fällen (siehe Abschnitt 2.6.2.2) anstelle von Gleichung (50) für die Ermittlung der Stoffmenge zur Erzielung der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicke herangezogen werden kann.

## **4. Alterungsaspekte**

### **4.1 Grundsätzliches zur Alterung**

Unter Alterung versteht man nach DIN 50035-1 [4.1] die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge. Diese Definition ist auslegungsfähig. Im Fall der Beschichtungen werden darunter nur diejenigen Vorgänge verstanden, die mit der Änderung der wichtigsten Leistungsmerkmale verbunden sind, nicht jedoch z.B. die Zersetzung der Beschichtung. D.h. radikale Veränderungen, die mit der Zerstörung der Beschichtung gleichzusetzen wären, folgen zeitlich deutlich nach der Alterung. Allenfalls ein oberflächennaher Schichtabbau, verbunden z.B. mit einem Kreiden, kann noch dem Alterungsprozeß zugeschlagen werden. In diesem Sinne werden Beschichtungen auf Bindemittelbasis organischer Hochpolymere auch als Schutzschichten mit partiellem Opfercharakter eingesetzt.

Die organischen Hochpolymere sind im sauren Bereich – dieser reicht vom sauren Regen der atmosphärischen Beanspruchung bis zum Angriff des auf pH 2,5 angesäuerten Schwadens eines Naturzugkühlturms im REA-Betrieb [1.14] – wesentlich widerstandsfähiger als der übliche Normalbeton. Andererseits verlaufen interne Alterungsprozesse, welche die mechanische (Festigkeit) und die physikalische (Diffusion) Verhaltensweise betreffen, bei den organischen Hochpolymeren schneller ab als beim anorganischen Beton. Sowohl das günstigere Verhalten unter saurem Einfluß als auch das ungünstigere infolge der internen Alterung liegen in der organischen Struktur der Polymerbindemittel begründet, geprägt durch Verbindungen des Kohlenstoffs:

Durch Wärmeeinwirkung können niedermolekulare Bestandteile (Hochsiedende Lösemitel, Weichmacher etc.) aus dem Molekülverband ausgetrieben werden. Die Wärmeeinwirkung führt andererseits zu einer Nachvernetzung chemischer Strukturen, die meist mit einer Versprödung verbunden ist. Sie kann aber auch das Aufbrechen (Cracking) von intermolekularen Bindungen bewirken. Dabei handelt es sich in der Regel um chemische Reaktionen. Für diese chemischen Vorgänge ist bekannt, daß sie im allgemeinen mit zunehmender Temperatur auch stark anwachsen. Eine von van 't Hoff aufgestellte Regel sagt

[4.2], daß eine Temperaturerhöhung um 10 K die Reaktionsgeschwindigkeit (chemischer Prozeß) um das 2 bis 3 fache erhöht. Demnach altern Beschichtungen bei höheren Temperaturen ihres Umfeldes schneller als bei tiefen Temperaturen und umgekehrt. Zwar ist die Wärmeleitfähigkeit von organisch gebundenen Beschichtungen je nach Füllung mit anorganischen Pigmenten und Füllstoffen ein bis zwei Zehnerpotenzen geringer [4.3] [4.4] als bei mineralischen Baustoffen oder Metallen. Trotzdem werden angrenzende Luft- oder Bauteilschichten bei den meist sehr dünnen Dicken der Beschichtungen eine rasche Temperaturangleichung über den gesamten Querschnitt verursachen.

Die Lichteinwirkung und hier insbesondere diejenige der Sonneneinstrahlung im Freien führt letztlich auch zur Erwärmung der Beschichtung mit der oben genannten Wirkung auf die Beschleunigung der Alterung. Über die aus dem Lambert-Beerschen Gesetz hergeleitete Extinktion (Widerstand, welcher der Strahlung entgegengesetzt wird) [4.2] [4.5] ergibt sich jedoch, daß der Durchlaßgrad der Globalstrahlung mit zunehmender Dicke einer bestrahlten Schicht abnimmt. Daraus folgt dann, daß die „alternde Wirkung“ der Globalstrahlung vor allem an der Beschichtungsoberfläche wirkt. Dort sind es die energiereicheren kurzwelligeren Anteile des sichtbaren und nicht sichtbaren Lichtspektrums – sie sogenannte UV-Strahlung – welche versprödet und abtragend wirkt. Kreidungsvorgänge werden häufig durch diese Strahlenwirkung ausgelöst.

Insbesondere bei den wäßrig formulierten Bindemitteln tritt neben den wärmebedingt verursachten Veränderungen durch die Einwirkung von Wasser, sehr oft des Niederschlagswassers, ein „Auslaugen“ wasserlöslicher bzw. wassermischbarer Bestandteile ein.

Weil organisch gebundene, pigmentierte und mit Füllstoffen und Zusatzmitteln versetzte Beschichtungsstoffe Vielstoffgemische sind, gestaltet es sich schwierig, die genannten äußeren Einflüsse den beobacht- und meßbaren Änderungen von Beschichtungsstoffen zuzuordnen.

Bezogen auf die erforderliche Flexibilität von rißüberbrückenden Beschichtungen folgt aus den genannten Alterungsvorgängen im Verlaufe der Nutzungsphase der Beschichtung eine Versteifung, d.h. eine Abnahme der Flexibilität und somit auch eine Abnahme der Rißüberbrückungsfähigkeit. Die Permeabilität von Beschichtungen für die Gase Wasserdampf und Kohlendioxid kann durch Alterung sowohl erschwert als auch erleichtert werden.

Diese Vorgänge stehen in engem Zusammenhang mit den Eigenschaften der Rohstoffe und deren Rezeptierung [3.7]. Man ist bei der Entwicklung von Beschichtungsstoffen bemüht,

durch modifizierte Formulierung den genannten Alterungseffekten entgegenzuwirken. Andererseits ist bekannt, dass der von unterschiedlichen Herstellern belieferte Markt nicht nur optimale Beschichtungsstoffe anbietet. Wollte man diejenigen Eigenschaften einer Beschichtung, welche das Leistungsvermögen über einen sogenannten Nutzungszeitraum von 15 bis 20 Jahren prägen, im Vorfeld des Einsatzes der Stoffe erkennen, müßte ein Verfahren verfügbar sein, welches in einem stark zeitgerafften Versuch alle Alterungseinflüsse sichtbar macht. Trotz jahrelanger intensiver Forschungsarbeiten gelang es bis heute nicht, ein solches Verfahren zu finden.

Auch die in den Regelwerken [1.12] und [1.13] verankerten Kurzbewitterungsverfahren lassen keine verlässliche Prognose des Materialverhaltens bis zum Ende eines normalen Dauerhaftigkeitszeitraumes zu. Die sogenannten Eignungsversuche können jedoch dazu verwendet werden, plausible Wahrscheinlichkeiten für das Erreichen von Nutzungszeiträumen aufzustellen.

Die im folgenden beschriebenen Experimente beziehen sich auf Beschichtungsstoffe, die einerseits die entsprechenden Regelwerksprüfungen (u.a. [1.12] und [1.13]) erfolgreich durchlaufen haben. Zusätzlich konnte auf die Ergebnisse systematisch angelegter Freibewitterungsversuche über 1 Jahr, sowie für eine eingeschränkte Anzahl an Beschichtungen, auf die Ergebnisse von Permeations- und Rißüberbrückungsversuchen an bis zu 14 Jahre in situ unter normalen Freibewitterungsbedingungen gealterten Proben zurückgegriffen werden.

Die Aussagen aus Proben nach den letzteren Beanspruchungen können per se als besonders zuverlässig angesehen werden. Die Aussagen sind allerdings nur rückwirkend anwendbar. Wegen verschiedener Imponderabilien bleibt die Rezeptur eines Beschichtungsstoffes über einen Zeitraum von  $> 10$  Jahren nur selten unverändert. Rohstoffverfügbarkeit, Umweltauflagen, Kostengesichtspunkte etc., zusammengefaßt Produktpflege genannt, zwingen den Stoffhersteller häufig dazu, auch ohne qualitätsbedingten Anlaß eine Rezepturänderung vorzunehmen. Damit begibt er sich dann beim betreffenden Produkt von der gesicherten praktischen Bewährung hin zur Abschätzung einer Dauerhaftigkeits-Wahrscheinlichkeit für das geänderte bzw. neu entwickelte Produkt.

#### **4.2 Untersuchungen nach Langzeitalterung (Freibewitterung)**

An 3 Bauobjekten, an welchen die Sichtbeton-Fassadenflächen in den 80er Jahren im Zuge von Instandsetzungsmaßnahmen beschichtet worden sind, wurden Bohrkerne mit Durch-

messern von 90 mm entnommen. Von diesen Kernen sind 10 mm dicke Scheiben abgeschnitten worden, und zwar solche, auf welchen einseitig das Beschichtungssystem vorlag und solche, die nur aus Beton bestanden. Im einzelnen handelte es sich um folgende Beschichtungssysteme.

#### **Beschichtungssystem Bauobjekt A:**

Sichtbetonfassade des Rathausgebäudes einer oberfränkischen Stadt (Bild 63).

Beschichtungsaufbau: PCC-Feinspachtel

Reinacrylatbeschichtung, ehemals gelöst, pigmentiert (entsprechend OS C nach ZTV-SIB 90).

Alter der Beschichtung: 12 Jahre

#### **Beschichtungssystem Bauobjekt B:**

Sichtbetonfassade eines Verwaltungsgebäudes einer fränkischen Großstadt (Bild 64).

Beschichtungsaufbau: PCC-Feinspachtel

Flexibel formulierte Äthylen-Copolymer-Beschichtung, ehemals dispergiert, pigmentiert (entsprechend OS D II nach ZTV-SIB 90).

Alter der Beschichtung: 12 Jahre

#### **Beschichtungssystem Bauobjekt C:**

Schaft eines Fernsehturms in Norddeutschland (Bild 65).

Beschichtungsaufbau: PCC-Feinspachtel

Flexibel formulierte Äthylen-Copolymer-Beschichtung, ehemals dispergiert, pigmentiert (entsprechend OS D II nach ZTV-SIB 90)

Alter der Beschichtung: 14 Jahre

Diese Betonscheiben von den Objekten A, B und C (mit und ohne Beschichtung) sind bis auf eine Ausgleichsfeuchte  $< 5\%$  r.F. getrocknet worden. An diesen Proben sind mit dem unter Abschnitt 2.1 beschriebenen Verfahren die Diffusionswiderstände für Kohlendioxid ermittelt worden. Über Differenzbildung (beschichteter Beton minus unbeschichteter Beton) ist für jede der 3 Beschichtungen die Diffusionswiderstandszahl errechnet worden. In Tabelle 6 sind die Daten zu den Probekörpern und die Meßergebnisse aufgezeichnet.

Die von den entnommenen Bohrkernen der Objekte B und C abgeschnittenen kreisrunden Scheiben mit Beschichtung sind auf Stahlplatten geklebt und auf dem Probenuntergrund des Stahlisches der Rißüberbrückungsanlage gemäß Bild 17 verschraubt worden.



Ausgehend von einer Grundaufweitung  $w_0 = 0,05$  mm sind die Probekörper bei einer Frequenz  $f = 0,03$  Hz dem periodischen Rißweitenänderungsversuch unterzogen worden. Die Daten der Probekörper und die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 7 aufgelistet.

#### 4.3 Untersuchungen nach Kurzzeitalterung (Freibewitterung + künstliche Alterung)

Sechs marktverfügbare Beschichtungsstoffe sind auf kreisrunde Glasfrittescheiben [2.6] ( $\varnothing$  90 mm, Dicke 6 mm) appliziert worden.

**Beschichtung 1:** Gelöstes Reinacrylat, pigmentiert, entsprechend OS B nach ZTV-SIB 90.  
Schichtdicke  $s_{mit} = 170$   $\mu$ m

**Beschichtung 2:** Wässriges Reinacrylat, pigmentiert, entsprechend OS B nach ZTV-SIB 90.  
Schichtdicke  $s_{mit} = 185$   $\mu$ m

**Beschichtung 3:** Wässriges, flexibel formuliertes Äthylen-Copolymer, pigmentiert entsprechend OS D II nach ZTV-SIB 90.  
Schichtdicke  $s_{mit} = 340$   $\mu$ m

**Beschichtung 4:** 2K Epoxid, lösemittelhaltig, pigmentiert, angelehnt an RILI SIB, OS 6.  
Schichtdicke  $s_{mit} = 200$   $\mu$ m

**Beschichtung 5:** Dispersionssilikat, pigmentiert, entsprechend OS B, ZTV-SIB 90.  
Schichtdicke  $s_{mit} = 140$   $\mu$ m

**Beschichtung 6:** 2K PUR, lösemittelhaltig, pigmentiert, angelehnt an RILI SIB, OS 6.  
Schichtdicke  $s_{mit} = 250$   $\mu$ m

In dieser Aufstellung entspricht Beschichtung 1 der Beschichtung des Bauobjektes A. Die Beschichtung 3 ist identisch mit den Beschichtungen der Bauobjekte B und C gemäß Abschnitt 4.2.

Jeweils drei Scheiben mit den Beschichtungen 1 bis 6 sind sieben Tage nach der Herstellung auf dem Freibewitterungsstand auf dem Dach eines viergeschossigen Gebäudes in Dortmund montiert worden. Sie sind dort mit einer Neigung von  $45^\circ$  gegen die Vertikale in Richtung Süden ein Jahr lang der Freibewitterung ausgesetzt worden. Jeweils 3 Scheiben lagerten in dieser Zeit bei Normalklima weiter.

Nach einem Jahr sind an den unbewitterten und an den bewitterten Scheiben die Diffusionswiderstandszahlen der Beschichtungen für  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  entsprechend den Ausführungen in den Abschnitten 2.1 und 2.2 ermittelt worden.

Bild 66 zeigt stellvertretend für das Produkt gelöstes Reinacrylat (Beschichtung 1), 1 Jahr freibewittert, das Diagramm mit der Darstellung des weitgehend stationären CO<sub>2</sub>-Massenstroms aus einer Dreifachbestimmung über einen Permeationszeitraum von 7 Tagen.

In Tabelle 8 sind getrennt nach den unbewitterten (1 Jahr Lagerung bei Normalklima) und den 1 Jahr lang freibewitterten Beschichtungen 1 bis 6 die ermittelten Diffusionswiderstände und die daraus errechneten Diffusionswiderstandszahlen für die Kohlendioxid- und die Wasserdampfdiffusion aufgelistet.

In den letzten 2 Spalten der Tabelle 8 sind die Verhältniszahlen der Diffusionswiderstandszahlen für Kohlendioxid und Wasserdampf, jeweils auf die unbewitterten Proben bezogen, eingetragen. Zur anschaulichen Darstellung sind die Verhältniszahlen in Bild 67 in Form von Stabdiagrammen wiedergegeben.

Mit dem Beschichtungstoff, der an den Objekten B und C gemäß Abschnitt 4.2 zur Anwendung gekommen ist (Die originale Stoffrezeptur konnte vom Hersteller noch zur Verfügung gestellt werden), ist folgendes Beschichtungssystem in mehreren Probekörpern hergestellt worden:

#### **Beschichtungssystem D, Laborprobe**

Beschichtungsaufbau: PCC-Feinspachtelplatte 190 x 160 x 5 mm

Flexibel formulierte Äthylen-Copolymer-Beschichtung, wäßrig dispergiert, pigmentiert, (entsprechend OS D II nach ZTV-SIB 90).

Schichtdicke  $s_{mit} = 280 \mu m$

An diesen Probekörpern ist nach siebentägiger Lagerung in Normalklima eine künstliche Alterung begonnen worden. Diese **umfaßte** 680 Zyklen einer 25-minütigen Infrarotbestrahlung mit unmittelbar daran anschließender 5-minütiger Beregnung. Die Oberflächentemperatur stieg bei der Bestrahlung auf 55°C, die Beregnung erfolgte mit Wasser von 10°C. Die so gealterten Probekörper sind mit der unter Abschnitt 2.3 beschriebenen Versuchsanlage der Rißüberbrückungsprüfung mit der Zielvorgabe Rißüberbrückungsklasse I<sub>r</sub> (siehe Tabelle 1) unterzogen worden.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Tabelle 7 aufgezeichnet.

## 4.4 Bewertung

### 4.4.1 Änderung der carbonatisationsbremsenden Wirkung

#### 4.4.1.1 Erkenntnisse aus der Langzeitalterung (Freibewitterung)

Tabelle 6 zeigt, daß die Schichtdicken an den 3 Bauwerken A, B und C z.T. beträchtlich unter den planmäßig vorgesehenen lagen. Die deutlichste Unterschreitung liegt bei der Beschichtung am Bauobjekt A vor. Abhängig vom Beschichtungstyp, insbesondere vom Bindemittel, verursacht die Freibewitterung einen kreidungsbedingten Schichtdickenverlust [4.6]. Ein solcher Schichtdickenabbau ist in der Regel kleiner als  $3 \mu\text{m}$  pro Jahr. Nimmt man als planmäßige Vorgaben für das Objekt A eine  $s_{\text{mit}} = 140 \mu\text{m}$  (aus  $s_{\text{min}} = 80 \mu\text{m}$ ) und für die Objekte B und C eine  $s_{\text{mit}} = 370 \mu\text{m}$  (aus  $s_{\text{min}} = 300 \mu\text{m}$ ) an und rechnet eine jährliche Kreidungsrate von  $3 \mu\text{m}$  ein, dann folgt daraus, daß die Bauteilflächen der drei untersuchten Objekte von Anfang an unterbeschichtet waren. Eine solche Unterbeschichtung deckt sich mit Erfahrungen des Verfassers aus vielen Überwachungsmaßnahmen, nach denen aus kommerziellen und handwerklichen Gründen Sollabweichungen nach unten wesentlich häufiger sind als Abweichungen nach oben.

Unabhängig davon, ob von Anfang an eine zu geringe Schichtdicke vorlag oder durch die Freibewitterung erst ein Schichtdickenabbau entstanden ist, verringert sich die Gleichmäßigkeit der Schichtdicke bei vorgegebener Rauheit des Untergrundes mit abnehmender Schichtdicke. Dies bedeutet, daß die Schwachstellen und im Gefolge davon auch die Fehlstellen zunehmen. Somit ist es nicht verwunderlich, daß die Diffusionswiderstandszahl bei der Beschichtung A bei einer  $s_{\text{mit}} = 50 \mu\text{m}$  in der Größenordnung von 50.000 liegt, wogegen diese Beschichtung bei einer Prüfschichtdicke in der Größenordnung der üblicherweise praktizierten  $s_{\text{mit}} = 140 \mu\text{m}$  im Anfangszustand eine Diffusionswiderstandszahl aufweist, die ca. 2 Zehnerpotenzen höher liegt. Daß auch Alterungseinflüsse zu einer Abnahme des Diffusionswiderstandes führen, wird im Abschnitt 4.4.1.2 noch gezeigt.

An den Bauobjekten B und C sind rezepturgleiche Beschichtungsstoffe eingesetzt worden. Die Diffusionswiderstandszahl liegt für Objekt B mit  $s_{\text{mit}} = 160 \mu\text{m}$  deutlich unterhalb des Normalwertes. Für Objekt C mit der  $s_{\text{mit}} = 260 \mu\text{m}$  konnte durch Messung eine Diffusionswiderstandszahl ermittelt werden, die in der Größenordnung derjenigen des Ausgangswertes für das verwendete Produkt liegt.

Die Ergebnisse aus den Diffusionsversuchen an den 12 bis 14 Jahre freibewitterten Beschichtungen der Objekte B und C lassen somit die Schlußfolgerung zu, daß mit Beschich-

tungen bei angemessenen Schichtdicken eine langanhaltende carbonisationsbremsende Wirkung erzielbar ist. Dies kann man für das Objekt C uneingeschränkt bejahen. 14 Jahre nach Anwendung der Beschichtung liegt deren Diffusionswiderstand bei

$$s_{D,CO_2,260} = 68 \text{ m} \quad (s_{mit} \text{ entspricht etwa } 70\% \text{ der planmäßigen)} \quad (53)$$

Als 3. Index ist die  $s_{mit}$  der geprüften Beschichtung angegeben. Für die Beschichtung des Objektes B ist die Beurteilung nur eingeschränkt möglich. Weil es sich um das gleiche Fabrikat wie am Objekt C handelt, kann auch an dem anderen Gebäudestandort grundsätzlich ein gleiches Diffusionsverhalten angenommen werden. Wegen der deutlichen Unterbeschichtung liegt mit

$$s_{D,CO_2,160} = 27 \text{ m} \quad (s_{mit} \text{ entspricht etwa } 43\% \text{ der planmäßigen)} \quad (54)$$

gegenüber der Definition nach [2.7] jedoch eine Beschichtung mit nur noch halb so großer carbonisationsbremsender Wirkung vor.

Für das Objekt A hat die Beschichtung mit

$$s_{D,CO_2,50} = 2,5 \text{ m} \quad (s_{mit} \text{ entspricht etwa } 35\% \text{ der planmäßigen)} \quad (55)$$

nur noch eine völlig unzureichende carbonisationsbremsende Wirkung, was nach dem Gesagten an der starken Schichtdickenunterschreitung liegen dürfte.

#### 4.4.1.2 Erkenntnisse aus der Kurzzeitalterung (Freibewitterung)

In Tabelle 8 sind die Diffusionswiderstände der 12 Monate freibewitterten und der 12 Monate bei Normalklima gelagerten Beschichtungen einander gegenübergestellt. Die in der 2. Spalte vermerkten mittleren Schichtdicken  $s_{mit}$  sind bei der Versuchskörperherstellung so gewählt worden, daß sie nach Meinung und Erfahrung des Verfassers die Anforderungen an die notwendige Schichtdickengleichmäßigkeit erfüllen. Im Falle der Beschichtungen (1) und (2) sind die Schichtdicken oberhalb der Regelwerksempfehlungen [1.12] und [1.13] angesiedelt, im Falle der Beschichtung (3) liegt  $s_{mit}$  knapp unterhalb der Regelwerksvorgabe. Für die Beschichtungen (4) und (6) sind Schichtdicken gewählt worden, mit welchen die Anforderungen zur Gleichmäßigkeit erfüllt werden, obwohl nach der Empfehlung des Regelwerks [1.13] höhere Schichtdicken vorgesehen sind. Bei der Beschichtung (5) liegt  $s_{mit}$  in der Größenordnung der Regelwerksvorgabe.

In der 3. und 7. Spalte der Tabelle 8 sind die gemessenen Diffusionswiderstandszahlen der unbewitterten denjenigen der bewitterten Beschichtungen gegenübergestellt. Aus dem

Vergleich dieser Zahlenwerte erkennt man bereits die Tendenz der abnehmenden Diffusionswiderstände. In Spalte 11 der Tabelle 8 sind die Verhältniszahlen der Diffusionswiderstandszahlen, bezogen auf die Diffusionswiderstandszahlen der unbewitterten Beschichtungen, eingetragen. Zur besseren Veranschaulichung sind diese in Bild 67 in Form von Stabdiagrammen graphisch dargestellt. Dabei zeigt sich, daß die Diffusionswiderstände für Kohlendioxid bei den Beschichtungen (1) und (2) dramatisch, bei den Beschichtungen (3), (4) und (6) nur moderat zurückgegangen sind. Bei der Beschichtung (5) ist gar ein Anstieg des Diffusionswiderstandes eingetreten.

Diese Ergebnisse können wie folgt erklärt werden:

Der Mechanismus der CO<sub>2</sub>-Diffusion erfolgt (nähere Erklärung siehe Abschnitt 2.1) ausschließlich durch Gasdiffusion des unpolaren Moleküls CO<sub>2</sub> in Luft. Dazu müssen in den Beschichtungen luftgefüllte Hohlräume vorliegen, in welchen sich CO<sub>2</sub> konzentrationsabhängig fortbewegen kann. Ganz offensichtlich liegen im ungealterten Zustand der Beschichtungen (1), (2), (3), (4) und (6) nur in geringem Umfang solche Hohlräume vor. Durch die Freibewitterung (dabei wirken vor allem Temperatur- und Feuchtwechsel auf die Beschichtung ein) haben sich offensichtlich solche Hohlräume zusätzlich gebildet, oder bestehende Hohlräume haben sich erweitert, weil z.B. niedermolekulare organische Bestandteile ausgetreten sind. Die Bilder 68 und 69 zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen geschnittener Flächen der Beschichtung (2) nach Normalklimalagerung und nach 12 monatiger Freibewitterung. Die unter 20.000 facher Vergrößerung erkennbaren Strukturunterschiede deuten eine Hohlraumbildung als Folge der Freibewitterung an.

Daß diese Alterungsvorgänge bei den jeweils starr formulierten Beschichtungen (1), (2) sowie (4) und (6) unterschiedlich stark ausgeprägt auftreten, liegt wahrscheinlich am Mechanismus der Filmbildung. Die Beschichtungen (1) und (2) entstanden durch physikalische Trocknung, wogegen die Beschichtungen (4) und (6) durch räumliche, chemische Vernetzung entstanden sind. Dadurch haben sich Molekülverbände mit unterschiedlicher räumlicher Stabilität gebildet. Die Beschichtungen (1) und (2) haben vorzugsweise plastomeren, die Beschichtungen (4) und (6) bevorzugt duromeren Charakter. Einflüsse der Freibewitterung haben demnach in dem plastomeren Molekülverband der Beschichtungen (1) und (2) in merklichem Umfang für CO<sub>2</sub> diffundierbare Hohlräume schaffen können, während solche in dem duromeren Gerüst der Beschichtungen (4) und (6) nur in geringerem Umfang entstanden sind.

Bei der Beschichtung (3) liegt eine Bindemittelstruktur mit plastoelastischem Verhalten vor. Auch diese Beschichtung ist durch physikalische Trocknung verfestigt. Unter den Einflüssen der Freibewitterung erscheint diese flexibel formulierte Struktur jedoch weniger anfällig gegen intermolekulare Veränderungen mit der Neigung zur Hohlrumbildung zu sein, als es bei den physikalisch trocknenden Beschichtungstypen (1) und (2) der Fall ist.

Mit der Beschichtung (5) liegt ein Typ vor, der partiell organisch, überwiegend jedoch silikatisch, also anorganisch, gebunden ist. Die Zunahme des a priori geringen Diffusionswiderstandes könnte dadurch erklärt werden, daß, gebremst durch den organischen Bindemittelanteil als Folge der Freibewitterung eine Nachverkieselung mit der Wirkung des partiellen Hohlraumverschlusses eintritt. Die Bedingungen dafür sind durch die wechselnde Beregnung (Quellung) und Trocknung im Freien wesentlich günstiger als durch die gleichbleibenden klimatischen Bedingungen während der Normalklimalagerung.

In den Spalten 4 und 8 der Tabelle 8 sind die Diffusionswiderstände der unbewitterten und der bewitterten Beschichtungen gegenüber Kohlendioxid eingetragen. Trotz des dramatischen Rückgangs der Diffusionswiderstandszahlen bei den Beschichtungen (1) und (2) zeigen die Zahlenwerte in Spalte 8, daß für 5 der 6 untersuchten Beschichtungen noch ein deutlicher Abstand zum Grenzwert der Carbonisationsbremse ( $s_{D,CO_2} \geq 50$  m nach [2.7]) gegeben ist.

Bislang ist aus der Fachliteratur wenig darüber bekannt, ob und ggf. wie sich die carbonisationsbremsende Wirkung der dafür konzipierten Beschichtungen im Laufe der Nutzungsphase ändert. In einem Beitrag britischer Fachkollegen [4.7] ist nach vorausgegangenen Untersuchungen die These aufgestellt worden, daß anfangs vorhandene Diffusionswiderstände von z.T.  $s_{D,CO_2} > 100$  m nach einer Freibewitterung von einem Jahr ausnahmslos unter die Grenze  $s_{D,CO_2} = 50$  m abfallen. Die dort angeführten Beschichtungen sind z.T. vergleichbar mit den in Tabelle 8 genannten Beschichtungstypen.

Die in der genannten Arbeit gemachte Aussage des Verlustes der carbonisationsbremsenden Wirkung in der Definition  $s_{D,CO_2} > 50$  m mit einem deutlichen Abfall unter diese Grenze nach bereits einem Jahr kann durch die hier vorgestellten Untersuchungen nicht verifiziert werden. Insbesondere die nach Kurzzeitalterung (1 Jahr Freibewitterung) gewonnenen Ergebnisse, aber auch die Untersuchungen an bis zu 14 Jahren freibewitterten Beschichtungen bestätigen diese These nicht.

Es konnte in den vorliegenden Untersuchungen zwar die Tendenz bestätigt werden, daß stoffklassenabhängig deutliche Rückgänge der Diffusionswiderstände für Kohlendioxid auftreten. Wenn bestimmte, baupraktisch einhaltbare Bedingungen beachtet werden, z.B. die Anwendung ausreichender Schichtdicken, die Herstellung fehlstellenfreier Filme etc., bleibt die carbonisationsbremsende Wirkung nach der Definition  $s_{D,CO_2} \geq 50$  m entgegen der Ausführungen unter [4.7] langfristig erhalten.

#### **4.4.2 Änderung bei der Wasserdampfdurchlässigkeit (Kurzeitalterung/Freibewitterung)**

Aufgrund der nur begrenzten Anzahl an Probekörpern war es nicht möglich, an den in situ über 12 bis 14 Jahre freibewitterten Beschichtungen der Bauobjekte A, B und C das Diffusionsverhalten für Wasser zu bestimmen. Analog zur  $CO_2$ -Diffusion sind jedoch an Probekörpern (Beschichtungen auf kreisrunden Glasfritten) nach 12 monatiger Lagerung bei Normalklima (unbewittert) und an den 12 Monate der Freibewitterung ausgesetzten Beschichtungen (1) bis (6) die  $H_2O$ -Diffusionswiderstände im Feuchtbereichsverfahren 100% r.F. → 50% r.F. bestimmt und daraus die Diffusionswiderstandszahlen errechnet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 aufgezeichnet. Auch für diese Untersuchungen sind die Beschichtungen in den in Spalte 2 genannten Schichtdicken zur Anwendung gelangt.

Die in Spalte 5 für die unbewitterten Proben aufgelisteten Diffusionswiderstandszahlen liegen in den Größenordnungen, die bei anderen, vergleichbaren Beschichtungstypen gemessen worden sind [1.17]. Etwas ungewöhnlich erscheint zunächst die Richtung der Änderung der Kennwerte nach einjähriger Freibewitterung, denn von den 6 einbezogenen Beschichtungen ist bei 5 Beschichtungen ein Anstieg des Diffusionswiderstandes zu verzeichnen. Aus den Verhältniszahlen der Diffusionswiderstandszahlen gemäß Spalte 12 der Tabelle 8, insbesondere aber aus der graphischen Darstellung von Bild 76 wird dies anschaulich.

Für diese – gegenüber der  $CO_2$ -Diffusion – aufgetretene Umkehr der Änderung der Diffusionswiderstände gibt es eine plausible Erklärung. Dabei spielt der besondere  $H_2O$ -Transportmechanismus, der im wesentlichen auf die polare Struktur des Wassermoleküls zurückgeht (siehe Abschnitt 2.2) die dominante Rolle. Der Anstieg des Diffusionswiderstandes ist bei Beschichtung (2) am deutlichsten. Danach folgt mit deutlichem Abstand Beschichtung (3) und dann Beschichtung (5). Es handelt sich dabei um die sogenannten wäßrig basierten Bindemitteltypen. In Bindemittelstrukturen aus ehemals wäßriger Phase kann

sich das Wassermolekül durch seine gute Benetzung, durch Lösungsdiffusion bis hin zum Kapillartransport „schnelle“ Diffusionswege eröffnen. Auch wenn die Beschichtungen ein Jahr bei Normalklima lagern, sind diese leistungsfähigen Mechanismen noch vorhanden.

Durch alternierende Beregnung werden aus den wäßrig basierten Beschichtungen Benetzungs- und Emulgationshilfsmittel partiell ausgewaschen. Außerdem führt die Deposition von Staubteilen aus der Luft etc. zu einer Hydrophobierung. Beide Veränderungen behindern bzw. eliminieren die zuvor vorhandenen, leistungsfähigen Transportmechanismen. Die Diffusion von Wasserdampf kann dann im wesentlichen nur noch durch die reduzierte Lösungs-, bzw. die weniger effektive Gasdiffusion erfolgen [2.13].

Im Prinzip ist die H<sub>2</sub>O-Durchlässigkeit auch bei den Beschichtungen (1) und (4) nach einjähriger Freibewitterung rückläufig. Die Darstellung in Tabelle 8 und Bild 67 zeigt jedoch, daß die Tendenz zum Rückgang deutlich geringer ausgeprägt ist. Dies liegt wohl daran, daß deren Hydrophobie per se stärker ausgeprägt ist und praktisch keine Netz- und Emulgationshilfsmittel vorhanden sind, die ausgewaschen werden können. Daß Beschichtung (6) aus der aufgezeigten Tendenz ausschert, mag zunächst als nicht geklärte Ausnahme einer Regel erscheinen.

Eine interessante Stützung der aufgezeigten Regel ergibt sich aus Untersuchungen von Maultzsch [4.8]. Dort wird über die Flüssigwasseraufnahme von beschichteten Betonkörpern (Beschichtungstypen OS B und OS C nach [1.12]) vor und nach einer vergleichbaren Freibewitterung über 1 Jahr und über 3 Jahre berichtet. Die Wasseraufnahme geht nach 1 Jahr deutlich zurück (Größenordnung Faktor 10) und nimmt bis zum 3. Jahr noch weiter aber nur noch langsam ab.

Beim ersten Anschein mag der alterungsbedingte Anstieg der Diffusionswiderstände für Wasserdampf beunruhigen, wenn man die Anwendungsfälle vor Augen hat, bei welchen eine Behinderung der Wasserdampfdiffusion nachteilige Folgen haben kann (siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 2.2). Bei genauer Betrachtung der Kennwerte in Tabelle 8 erkennt man jedoch, daß von dem relativ kräftigen Anstieg der Diffusionswiderstände nur diejenigen Beschichtungen betroffen sind, die aufgrund ihrer Stoffrezeptur ohnehin geringe Diffusionswiderstände haben. Zudem läßt sich für einen kritischen Anwendungsfall durch computergestützte Simulationsrechnungen [2.10] relativ rasch klären, ob der alterungsbedingt erhöhte Diffusionswiderstand noch akzeptiert werden kann.



### 4.4.3 Änderung des Rißüberbrückungsverhaltens

#### 4.4.3.1 Erkenntnisse aus der Langzeitalterung (Freibewitterung)

Die Probekörper, welche an den Bauwerken B (Bild 64) und C (Bild 65) entnommen wurden und deren Beschichtungen 12 bis 14 Jahre lang freibewittert waren, sind mit der Zielvorgabe „Rißüberbrückungsklasse II“ (Tabelle 1) dem Rißüberbrückungsversuch unterzogen worden. Dabei ist ein schrittweises Herantasten bis zur genannten Rißüberbrückungsklasse praktiziert worden. Das Ergebnis ist in Tabelle 7 gezeigt. Der maßgebliche Unterschied zwischen den Beschichtungen der Bauobjekte B und C liegt in den unterschiedlichen Schichtdicken  $s_{\text{mit}} = 160 \mu\text{m}$  und  $s_{\text{mit}} = 260 \mu\text{m}$  der rezepturgleichen Beschichtung. Mit beiden Schichtdicken wird bei  $20^\circ \text{C}$  die Dehnwechselzahl 1.000 ohne Versagen erreicht. Nach dem Abkühlen der Beschichtung auf  $-10^\circ \text{C}$  versagt die Probe  $s_{\text{mit}} = 160 \mu\text{m}$  bereits nach wenigen Dehnwechseln, während mit der Probe  $s_{\text{mit}} = 260 \mu\text{m}$  auch nach 500 Dehnwechseln noch eine visuell intakte Schicht vorliegt. Wird dann die Rißweitenänderung von  $\Delta w = 50 \mu\text{m}$  auf  $\Delta w = 200 \mu\text{m}$  erhöht, kommt es ab 25 Dehnwechseln zum Versagen über dem Riß.

Das Fazit dieser Untersuchung ist, daß das Leistungsvermögen der vorliegenden, in situ 12...14 Jahre gealterten Rißüberbrückungsbeschichtung vom Typ OS DII entsprechend [1.12] im Zusammenhang mit den gewählten Rißweitenänderungen  $\Delta w$  signifikant abhängig ist von der Prüftemperatur und der vorliegenden Schichtdicke. Zu beachten ist dabei, daß beide Schichtdicken der in situ vorhandenen Beschichtung deutlich unter der im Regelwerk vorgegebenen Schichtdicke liegen. Die nach ZTV SIB 90 genannte  $s_{\text{min}} = 300 \mu\text{m}$  korrespondiert nach den Erhebungen und Auswertungen des Verfassers (siehe Abschnitt 3.6.2) wenigstens mit einer  $s_{\text{mit}} = 370 \mu\text{m}$ .

Aus der Stoffklasse der vorliegenden Beschichtung kann für den Langzeitabschnitt von 12 bis 14 Jahren ein Schichtdickenabbau von maximal  $20 \mu\text{m}$  angenommen werden. Es kann als sicher gelten, daß nach der in Formel (13) ausgedrückten Gesetzmäßigkeit, nach welcher die maximal mögliche Rißweitenänderung proportional zur Schichtdicke ist, auch nach der erfolgten 12 bis 14-jährigen Freibewitterung ein signifikant besseres Leistungsvermögen hätte festgestellt werden können, wenn die  $s_{\text{mit}}$  in einer Größenordnung von  $370 \mu\text{m}$  vorgelegen hätte.

Im Fachschrifttum findet man bislang nur wenige Untersuchungen zur Änderung der Rißüberbrückungsfähigkeit als Folge der Freibewitterung. In [4.9] wird über erste Ergebnisse

an 3 Jahre freibewitterten, rißüberbrückenden Bodenbeschichtungen eines vom Bundesminister für Verkehr geförderten F&E-Vorhabens berichtet. Als Defizit für die Beurteilung der in [4.9] mitgeteilten Erkenntnisse muß jedoch die völlige Außerachtlassung der eminent wichtigen Schichtdicke der rißüberbrückend wirkenden Schichten konstatiert werden.

#### **4.4.3.2 Erkenntnisse aus einer Kurzzeitalterung (Künstliche Alterung)**

Mit dem zum Bauobjekt C (Abschnitt 4.4.3.1) rezepturgleichen Beschichtungsmittel sind PCC-Trägerplatten [1.12] ca. 280 µm dick (mittlere Trockenschichtdicke) beschichtet worden. Diese wurden einer speziellen Kurzzeitalterung (siehe Abschnitt 4.3) unterzogen. Dabei wird durch kurzfristig hintereinander folgendes Quellen und Trocknen eine forcierte Alterung durch Wasser- und Wärmeeinwirkung hervorgerufen.

An diesem Beschichtungssystem D ist analog zu Abschnitt 4.4.3.1 der Rißüberbrückungsversuch durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgezeichnet. Man erkennt, daß das Leistungsvermögen der stofflich identischen Beschichtung in einer vergleichbaren Schichtdicke praktisch identisch zu demjenigen der 14 Jahre der Freibewitterung ausgesetzten Beschichtung des Bauobjektes C ist. Mit aller Vorsicht kann daraus abgeleitet werden, daß die beiden Proben C und D mit der gleichen Beschichtung (auch vergleichbarer Schichtdicke) mit jedoch deutlich unterschiedlicher Alterungsart und Alterungszeit unter sonst gleichen Prüfbedingungen beim Rißüberbrückungsversuch ein vergleichbares Leistungsvermögen aufweisen.

Aus den gleichen Gründen (Produktpflege etc.), die auch schon unter Abschnitt 4.1 genannt wurden, hat der Hersteller dieses Produkt bereits mehrere Jahre vor der Probenahme des 14 Jahre in situ beanspruchten Objektes aus der Produktion genommen und setzt es nur noch in wenigen Ausnahmefällen ein. Stattdessen hat er ein marktgängiges Produkt mit geänderter Rezeptur in die Produktion aufgenommen. Diesem neuen Produkt wiederum fehlt die nachgewiesene Langzeitbewährung, die selbstverständlich vom Vorgängertyp nicht übertragbar ist.

## **5. Konsequenzen für die Anwendung**

Wenn Beton beschichtet wird, dann verfolgt der Bauherr damit meist auch das Ziel, ihm ein freundliches Aussehen zu verleihen. Wesentliches Kriterium für die Schlußabnahme der Beschichtung ist nicht selten, daß die Fassade, das Ingenieurbauwerk oder der Fußbo-

den ein optisch ansprechendes Bild abgeben. Überwiegend werden Betonoberflächen jedoch nicht wegen der Verbesserung des Aussehens, sondern wegen eines erforderlichen Schutzes gegen Umgebungs- und Nutzungseinwirkungen beschichtet.

Keines der wesentlichen Leistungsmerkmale von Oberflächenschutzsystemen, wie Witterungsbeständigkeit, Diffusionswiderstand, Rißüberbrückungsfähigkeit etc., aber auch nicht die Schichtdicke oder die zeitlich bedingte Änderung dieser Merkmale durch Alterung können visuell wahrgenommen werden (allenfalls später die Versagensmerkmale). Von diesen optisch nicht feststellbaren Eigenschaften hängt aber das Funktionieren und die Dauerhaftigkeit der Oberflächenschutzmaßnahmen entscheidend ab. Aus diesem Grund wäre es vorteilhaft, wenn es gelänge, bei allen am Geschehen „Oberflächenschutz“ Beteiligten in viel stärkerem Maße das Bewußtsein für die wichtigsten funktionellen Eigenschaften der Schutzbeschichtungen zu wecken.

Bereits bei der Planung muß berücksichtigt werden, daß die Wirksamkeit einer Beschichtung neben der stofflichen Beschaffenheit entscheidend von der Anwendung in der richtigen Schichtdicke abhängt. Die entsprechenden Vorgaben zur Ausführung, wie Beschaffenheit des Untergrundes, Applikationsverfahren, Stoffauftragsmenge etc., die ja in die Bemessung eingehen, sollten vom Planer in viel stärkerem Maße als dies bislang geschah herausgestellt werden, damit der Auftragnehmer deren Bedeutung erkennen, einhalten und umsetzen kann.

Diese Zusammenhänge müssen auch dem Stoffhersteller bekannt sein und von ihm berücksichtigt werden. Nur dann kann er diejenigen Stoffe und Stoffsysteme entwickeln, welche nach den objektspezifischen Anforderungen benötigt werden.

Bereits im Stadium der Entwicklung von Beschichtungsstoffen wird ein großer Einfluß auf deren Qualität und die langfristige Beibehaltung ihrer Wirksamkeit genommen. Es wäre wünschenswert, wenn der Formulierer bei der Stoffentwicklung weniger von manchen Marktströmungen, von oft nicht nachvollziehbaren Umweltauflagen, vom schmerzlichen Kostendruck und anderen Hindernissen beeinflusst werden würde. Er könnte dann bei der Entwicklung den Gesichtspunkten „Dauerhaftigkeit“ und „Alterungsunempfindlichkeit“ ein größeres Augenmerk schenken.

Ganz sicher können und müssen bei der Planung und Ausführung von Oberflächenschutzmaßnahmen enorme weitere Anstrengungen unternommen werden, um unter den meist schwierigen Baustellenbedingungen in weit stärkerem Umfang als bisher dem Qualitätsziel

gerecht zu werden. Die größten Gegner des Erfolges sind auf der Baustelle häufig das Wetter, andere Handwerker und manchmal auch die eigenen Probleme, den Ablauf von Beschichtungsmaßnahmen richtig zu organisieren.

Von den zahlreichen Baustellen, auf welchen der Verfasser dieser Arbeit die Beschichtungsmaßnahmen überwacht hat, lag mit Beginn der Arbeiten in der Regel keine schlüssige Ausführungsanweisung vor, nach welcher das Ausführungspersonal die von den Planenden vorgesehenen Gesamtaktivitäten zweifelsfrei hätte umsetzen können. Dabei wäre das ausführende Personal häufig willens und fähig, auch anspruchsvolle Vorgaben (Schichtdickentreffsicherheit und Schichtdickengleichmäßigkeit gehören dazu) umzusetzen. Auf diesem Feld besteht ein großer Nachholbedarf. Im ureigensten Interesse sollte ein Fachunternehmen ständig und intensiv Anstrengungen unternehmen, das handwerklich geschulte Personal mit den notwendigen und erforderlichen Kenntnissen und Erkenntnissen zur Erzielung der vorgegebenen Beschichtungs-Leistungsmerkmale zu versorgen.

Die gängige Praxis geht davon aus, daß die Schichtdickenkontrolle über das Steuerinstrument „Ermittlung und Kontrolle der Stoffauftragsmengen“ erfolgen kann. Das sehen übrigens die Regelwerke [1.12] und [1.13] zum Teil auch so vor. Eine wichtige Erfahrung aus den Untersuchungen in Abschnitt 3.6.2 ist jedoch, daß dies nicht ausreicht. Bei dieser Methode werden die schichtdickenbestimmenden Einflußgrößen nicht bzw. völlig unzureichend berücksichtigt. Außerdem werden bei dieser „Erfolgskontrolle“ die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Schicht nicht ausreichend eingehalten: Wenn eine zu beschichtende Fläche in der einen Hälfte zu dünn schichtig, in der anderen Hälfte zu dick schichtig appliziert ist, mag das Ergebnis zwar im Mittel stimmen, tatsächlich sind die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit wegen der Schiefelage verfehlt. Über die in Kapitel 3 aufgezeigten Möglichkeiten der Steuerung der Schichtdickengleichmäßigkeit und der Schichtdickentreffsicherheit läßt sich der Aufwand der Erfolgskontrolle zwar einschränken. Aber nur durch Messung und Bewertung der Trockenschichtdicke, die auch im Zuge der Eigenüberwachung notwendig ist, kann verlässlich nachgewiesen werden, ob die vereinbarte Leistung erbracht wurde.

In der richtigen Eigenüberwachung liegt überhaupt der Schlüssel zum Erfolg einer Oberflächenschutzmaßnahme. Zwar wird sich der Bauherr bei entsprechender Bedeutung des Objektes zu seiner Absicherung eines qualifizierten Fremdüberwachers bedienen. Dabei muss aber stets bedacht werden, dass die Qualität der Beschichtung bei der Applikation

vor Ort erzeugt wird, während sie bei der Überwachung durch Dritte lediglich überprüft werden kann.

Wenn an der Oberfläche eines Betonbauteils, die mit einer rißüberbrückenden Beschichtung versehen wurde, im Laufe der Bauteilnutzung Risse auftreten, ist dies ein sichtbares Zeichen dafür, daß die Maßnahme unwirksam ist bzw. unwirksam wurde. Dies muß jedoch nicht das Ergebnis eines alterungsbedingten Nachlassens der rißüberbrückenden Wirkung sein. Dieses Versagen kann auch auf eine örtliche Überforderung des Systems zurückgehen. Analog zu dem eingangs beschriebenen, vermeintlichen Wirksamkeitsbefund durch visuelle Betrachtung reicht auch im Versagensfall einer rißüberbrückenden Beschichtung der optische Befund zur Beurteilung nicht aus.

Um herauszufinden, wann das Leistungsvermögen einer Beschichtung hinsichtlich der Regulierung von Diffusionsvorgängen oder der Überbrückung von Rissen signifikant nachläßt oder sich erschöpft hat, muß eine technologische Überprüfung vorgenommen werden, bei welcher die jeweiligen Leistungsmerkmale mittels geeigneter Methoden dargestellt und beurteilt werden können. Wie man aus den in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsergebnissen herauslesen kann, ist es nicht möglich, generell eine scharf gezogene Abgrenzung dahingehend vorzunehmen, nach welcher Zeit eine Beschichtung z.B. ihre rißüberbrückende Wirkung verloren hat und deshalb erneuert werden müßte. Zur Beantwortung solcher Fragen wird es in Einzelfällen ggf. einer individuellen Diagnose zum tatsächlichen Zustand bedürfen.

## **6. Zusammenfassung**

Die vorliegende Arbeit hat sich zum Ziel gesetzt, baupraktische Erfahrungen aus der Überwachung von Oberflächenschutzmaßnahmen auf Beton zu nutzen, um durch richtige Definition und Anwendung der Schichtdicke deren Wirksamkeit zu erhöhen. Dabei hat sich gezeigt, daß auch noch ein wichtiger Zusammenhang zwischen der Alterung von Beschichtungen, deren Schichtdicke und der zu erwartenden Dauerhaftigkeit der Oberflächenschutzmaßnahmen besteht.

Diese Betrachtungen gelten für alle visuellen und technischen Funktionen, die man der Betonbeschichtung zuteilt. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Bewertung jedoch zielgerichtet auf die wichtigsten Funktionen von Beschichtungen, nämlich auf ihre Wirkung als

- Carbonatisationsbremse

- Feuchteregulativ
- Rißüberbrückungsschicht.

Im Kapitel 2 sind die diesbezüglich bekannten und maßgeblichen Gesetzmäßigkeiten und Verhaltensweisen des Untergrundes Stahlbeton und der verfügbaren Beschichtungen sowie die bislang praktizierten Vorgehensweisen zur Erzielung der erwarteten Schutzwirkung dargestellt.

Der Umgang mit den Schichtdicken war bislang bei vielen Beteiligten problematisch, weil er zu wenig erläutert ist. In den Abschnitten 3.1 und 3.2 sind dazu die Grundlagen erarbeitet worden. Bereits hier haben Erkenntnisse aus der baupraktischen Erfahrung für die weitere Vorgehensweise Eingang gefunden:

- Bei den Anwendungsgebieten „Korrosionsschutz im Stahlbau durch Beschichtungen“ und „Oberflächenschutz für Beton“ werden Schichtdickenbegriffen unterschiedliche Bedeutungen gegeben, obwohl sich aus der Zielsetzung der Maßnahmen dafür keine Rechtfertigung ableiten läßt.
- Die in den Richtlinien für den Betonschutz vorgesehene Zahl von 6 Schichtdicken unterschiedlicher Bedeutung muß reduziert werden. Die nötige Effizienz kann auch mit einer geringeren Anzahl an Schichtdickendefinitionen erreicht werden.
- Bei der Betrachtung beschichteter Flächenanteile liegt nie eine einzige (singuläre) Schichtdickengröße vor. Man hat es stets mit unendlich vielen unterschiedlichen Schichtdickenwerten zu tun.

Daraus ergibt sich eine zentrale Folgerung:

- Die Hypothese lautet zunächst, daß sich die Schichtdicken in einer Normalverteilung anordnen. Zum Verständnis dieser Verteilung bedarf es der notwendigen statistischen Grundlagen. Wenn es gelingt, die Hypothese zu verifizieren, können die daraus ableitbaren Gesetzmäßigkeiten zur Bemessung, Steuerung und Kontrolle von Beschichtungsschichtdicken angewendet werden.

In Abschnitt 3.3 sind diejenigen Schichtdickengrenz- und Beiwerte definiert worden, welche aufgrund theoretischer Erwägungen, insbesondere aber der bauwerksbedingten Erfordernisse notwendig sind. Neben den beiden aus Sicherheitsbetrachtungen entstandenen, eher willkürlich festgelegten Grenzwerten  $s_{min}$  und  $s_{max}$ , verdient vor allem der dort entwickelte Grenzwert  $s_{diff}$  besondere Aufmerksamkeit, denn er repräsentiert wissenschaftlich be-

legbar das Diffusionsverhalten von Wasserdampf und Kohlendioxid durch Beschichtungen. Dafür gab es bislang auch in den Regelwerken keine akzeptable Schichtdickendefinition.

Im Abschnitt 3.4 sind die sechs wichtigsten qualitativen Einflußgrößen beschrieben, von denen bei der Applikation von Beschichtungen die Schichtdickentreffsicherheit und die Gleichmäßigkeit der Schicht abhängig sind. Dies sind

- die Auftragsmenge an Beschichtungstoff,
- die Untergrundrauheit,
- das Applikationsverfahren,
- das handwerkliche Geschick des Verarbeiters,
- die rheologischen Eigenschaften des Beschichtungstoffes und
- der Stoffverlust beim Beschichtungsvorgang.

Bei der Auswahl der Schichtdickenmeßmethode muß vor allem bedacht werden, daß nur eine endliche Menge an Zufallsvariablen verfügbar ist. Die Meßwerte müssen in ausreichender Anzahl vorliegen. Wichtigstes Gebot ist daher:

- Die Schichtdickenmessung muß repräsentativ sein. Diese Bedingung wird von folgenden Methoden/Geräten erfüllt:
  - Keilschnittverfahren an starren Schichten (Paint Inspection Gage)
  - Spanprobe an flexiblen Schichten (Mikrometerschraube)

Beide Methoden zählen zu den zerstörungsarmen Verfahren

- Die Probeentnahme am Bauobjekt (z.B. als Bohrkern) mit anschließender mikroskopischer Untersuchung etwa im Labor scheidet aus, weil die Bedingungen zur statistischen Auswertung (Repräsentanz) nicht erfüllbar sind. Außerdem spricht gegen diese Methode die starke Beschädigung des Bauteils.
- Die ebenfalls zerstörungsarme Differenzdickenmessung (System BAM) liefert systembedingt überhöhte Meßwerte.
- Mit dem in die Versuche z.T. einbezogenen, zerstörungsfrei arbeitenden Ultraschallmeßgerät war es nicht möglich, verifizierbare Meßwerte zu erheben.
- Naßschichtdickenmessungen erfüllen die Anforderungen zur statistischen Auswertung nicht.

Um gezielt die Einflüsse der Rauheit des Betonuntergrundes (stark, mittel, schwach), der Anwendung von zwei unterschiedlichen Beschichtungstoftypen (1K Acrylat, 2K Epoxid) und der gängigsten Applikationsverfahren (Airless-Spritzverfahren, Rollenverfahren) ermitteln zu können, sind Betonprobekörper der Abmessungen 100 x 50 x 5 cm beschichtet worden.

Die Schichtdickenmessungen (Keilschnittverfahren, Stereomikroskop am Plattenschnitt) und die statistische Auswertung erbrachten die Erkenntnisse:

- für 23 von 24 Meßserien konnte für die jeweiligen Stichproben das Vorliegen einer Normalverteilung nach Gauß bestätigt werden.
- Die Variationszahlen (damit wird die Streubreite der Meßwerte ausgedrückt)
  - sind in der Regel beim stark rauhen Untergrund am größten und nehmen über die mittlere zur schwachen Rauheit ab,
  - sind beim Rollenverfahren überwiegend höher als beim Airless-Spritzverfahren und
  - unterscheiden sich zwischen Acrylat- und Epoxidbeschichtung uneinheitlich aber nicht signifikant.
- Die für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke driftet, abhängig von den vorausgehend beschriebenen Streubreiten, zwischen den Fraktile  $S_{35\%}$  und  $S_{45\%}$ . Im Mittel ergibt sich der Fraktilwert  $S_{41\%}$ . Die Schichtdicke dieses Grenzwertes  $S_{diff}$  liegt somit um 5% niedriger als diejenige des arithmetischen Mittelwertes  $S_{mit}$ .

Die Untersuchungen an realen Bauteiloberflächen umfaßten eine Auswahl von 17 Anwendungs- und Klassifizierungsbereichen nach den, bzw. in Anlehnung an die Instandsetzungsregelwerke. Darin waren die gängigsten Oberflächensysteme enthalten. Es sind dabei die Meßverfahren

- Keilschnitt (PIG)
  - Spanprobe (Schieblehre mit Meßuhr)
- und vergleichend zur letzteren die
- Differenzdickenmessung (System BAM)

angewendet worden.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesen Versuchen können wie folgt zusammengefaßt werden:



- An 15 von 17 Meßserien beinhalteten die jeweiligen Stichproben Schichtdickenverteilungen, die der Normalverteilung nach Gauß entsprachen.
- Wenn die Forderung nach der  $s_{min}$  als 5%-Fraktile eingehalten wird und eine Normalverteilung vorliegt, bedarf es keiner weiteren Festlegung etwa auf  $0,8 s_{min}$  (Sollschichtdickenregelung, Korrosionsschutz im Stahlbau), weil dann unterhalb dieser  $0,8 s_{min}$ -Grenze praktisch keine Meßwerte mehr vorliegen. Theoretisch könnten dort noch 0,5% der Schichtdickenwerte sein.
- Wenn die Verifizierung einer Stichprobe hinsichtlich der Normalverteilung fehlschlägt, kann dies daran liegen, daß systematische Fehler in das Meßergebnis dieser Stichprobe eingehen, z.B. in Form von
  - signifikanten Temperaturunterschieden am Objekt, bzw. in der angrenzenden Luft während der Beschichtungsstoffapplikation oder
  - zu später Wechsel verschlissener Verarbeitungsgeräte.
  - Anwendungspersonal mit merklich unterschiedlichen handwerklichen Fähigkeiten,
  - Abweichungen in der Rheologie der Beschichtungsstoffe.
- Die vorgegebenen Schichtdickengrenzwerte, z.B.  $s_{min}$ , werden vom Verarbeiter im ersten, dem planmäßig vorgesehenen Beschichtungsgang, bei den meisten OS-System unterschritten, so daß dann eine Nachbeschichtung erforderlich wird. Eine Ausnahme davon bilden die Systeme OS B und OS C, wo bei Festlegung der regelwerkskonformen Mindestschichtdicke (80  $\mu$ m) die Überschreitung überwiegt.
- Die Streubreite um den Mittelwert korrespondiert mit der Abweichung von der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicke  $s_{diff}$ . Die mittlere Streuung in Form der Variationzahl beträgt für alle normalverteilten Stichproben der untersuchten realen Bauobjekte  $V_{smit} = 0,19$ . Dieses Streumaß kann noch Auffassung des Verfassers als normal für Betonbeschichtungen angesehen werden.
- Wird das Streumaß  $V_{smit} = 0,19$  wesentlich überschritten, fällt bei normaler Kalkulation der Auftragsmengen auch der ermittelte 5%-Fraktilewert der Stichprobe unter die Schichtdickenvorgabe.
- Die für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke  $s_{diff}$  driftet mit der Streubreite nach links ab. Über die normalverteilten Stichproben gemittelt liegt die Fraktile dieser Schichtdicke bei 42%. Der  $s_{diff}$ -Wert liegt somit 4% unterhalb der Schichtdicke  $s_{mit}$ .

Daraus folgt:

- Zur Ermittlung der Diffusionswiderstände für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O (Bestimmung im Laborversuch an Beschichtungen, rechnerische Festlegung in der Planungsphase) kann vereinfachend  $s_{mit}$  zugrundegelegt werden.
- Werden zur Bodenbeschichtung Zahnleisten verwendet, sind hoch verschleißfeste Materialien zu verwenden. Außerdem ist ein rechtzeitiger Ersatz vorzunehmen, um die Schichtdickenkonstanz gewährleisten zu können.

Für die Schichtdickenbemessung und die Ausführungskontrolle ergibt sich aus den Untersuchungen folgendes:

- Um sicherzustellen, dass über die Funktionen der Beschichtungen die korrekten Schichtdicken zur Anwendung gelangen, reicht es aus, bei der Bemessung zwei Grenzwerte zu berücksichtigen:
  - $s_{min}$ , Mindestschichtdicke als 5%-Fraktile
  - $s_{mit}$ , Mittlere Schichtdicke mit der Begrenzung der Streubreite auf  $V_{s_{mit}} \leq 0,2$
- Zur Ermittlung des zulässigen bzw. erforderlichen Diffusionswiderstandes für die CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O Diffusion darf weder  $s_{min}$  noch  $s_{max}$  herangezogen werden. Beide Grenzwerte repräsentieren nicht das Diffusionsverhalten einer Beschichtung. Wissenschaftlich belegbar steht für diese Funktion nur die  $s_{diff}$  bzw. vereinfachend die  $s_{mit}$  einer Normalverteilung.
- Bei der Festlegung des Diffusionswiderstandes für Wasser darf nicht bauteilunabhängig der in den Instandsetzungsregeln „allgemeingültig“ angegebene Wert  $s_D \leq 4$  m übernommen werden. Er muß individuell je nach Funktion der Beschichtung und nach Bauwerksbedingungen vom sachkundigen Planer durch richtige Auswahl von Diffusionswiderstandszahl und Schichtdicke gefunden werden.
- Die Maximalschichtdicke  $s_{max}$  kann vernachlässigt werden, da sie auch zur Schichtdickenbegrenzung nach oben praktisch keine Bedeutung hat.
- Die im Abschnitt 3.7 entwickelten Rechengänge ermöglichen es dem Planer und dem Verarbeiter unter Verwendung der in Tabelle 5 aufgelisteten Schätzwerte Beschichtungsstoff-Auftragsmengen zu ermitteln, um Schichtdickenvorgaben zu erfüllen.

- Unter Beachtung der Schätzwerte für die Bemessung und in Kenntnis der Einflußgrößen ist der Verarbeiter in der Lage, eine angemessene Eigenüberwachung im Sinne der Schichtdickentreffsicherheit vorzunehmen.
- Wenn es gelänge, die aufgezeigten Schritte konsequent anzuwenden, könnte sich die Erfolgskontrolle auf die Feststellung der verbrauchten Beschichtungsmengen beschränken. Nach der Erfahrung des Verfassers ist eine Erfolgskontrolle, wie sie unter Abschnitt 3.6.2.1 beschrieben worden ist, empfehlenswert.

Im Kapitel 4 sind die zu erwartenden Einflüsse der Alterung von organischen Hochpolymeren während der Nutzungsphase dargestellt, wobei das Augenmerk hauptsächlich auf die Änderung der maßgeblichen Funktionen von Betonbeschichtungen gerichtet ist.

Es sind Untersuchungen zum Rißüberbrückungsverhalten sowie zum Diffusionsverhalten für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O an zwei verschiedenen Beschichtungssystemen durchgeführt worden. Diese Beschichtungen stammten von Bauwerken, die 12 bis 14 Jahre der Freibewitterung ausgesetzt waren. Zusätzlich sind entsprechende Probekörper mit 6 verschiedenen, ausgewählten Betonbeschichtungen ein Jahr der Freibewitterung ausgesetzt und danach auf die Änderung ihres Diffusionsverhaltens untersucht worden. Dabei konnte folgendes gezeigt werden:

- Die Diffusionswiderstandszahl für CO<sub>2</sub> liegt an den mehr als 10 Jahren freibewitterten Proben in der zu erwartenden Größenordnung, wenn die mittlere Schichtdicke der planmäßig vorgesehenen entspricht. Mit zunehmendem Abfall der Schichtdicke unter diese Richtwerte nimmt auch die Diffusionswiderstandszahl deutlich ab. Dafür sind oberflächengeometrische und stoffliche Änderungen als Folge der Alterung verantwortlich.
- An den 1 Jahr freibewitterten Betonbeschichtungen fällt die Diffusionswiderstandszahl für CO<sub>2</sub> z.T. stark ab. Wenn jedoch die Schichtdicken in Größenordnungen liegen, die nach Meinung des Verfassers angemessen und z.T. auch regelwerkskonform sind, liegt der Diffusionswiderstand der relevanten Beschichtungen immer noch deutlich über dem allgemeingültigen Grenzwert  $s_{D,CO_2} \geq 50m$ .
- Der Diffusionswiderstand für H<sub>2</sub>O stieg bei den 1 Jahr freibewitterten Proben bei 5 von 6 Beschichtungen mit z.T. sehr unterschiedlichen Zuwächsen an. Die Gründe für dieses Änderungsverhalten können mit den Gesetzmäßigkeiten der Wasserdampfdiffusion und der Zusammensetzung der unterschiedlichen Beschichtungstypen erklärt werden. Die

größten Zuwächse liegen bei den anfangs relativ durchlässigen Beschichtungen vor. Ein signifikanter Einfluß auf die Funktion der Beschichtung am Objekt ergibt sich daraus in der Regel nicht.

- Bei den Rißüberbrückungsversuchen hat sich gezeigt, daß bei nahezu gleich lang (12 bis 14 Jahre) freibewitterten Beschichtungen bei knapp bemessener Schichtdicke ( $s_{\text{mit}} \sim 160 \mu\text{m}$ ) nur noch ein sehr eingeschränktes Rißüberbrückungsvermögen vorliegt. Beim gleichen Beschichtungstyp aber deutlich höherer Schichtdicke ( $s_{\text{mit}} \sim 260 \mu\text{m}$ ) liegt nach gleicher Freibewitterung eine deutlich höhere Rißüberbrückungsfähigkeit vor. Sie ist annähernd so hoch, wie bei einer etwa gleich dicken, rezepturgleichen Schicht, die „nur“ einer gerafften Alterung (Beregnung/Bestrahlung) im Labor ausgesetzt war.

Abschließend ist noch zu vermerken, daß es aus der Sicht des Verfassers wünschenswert wäre, wenn sich weitere Möglichkeiten der Untersuchung zum Diffusionsverhalten und zur Rißüberbrückungsfähigkeit an in situ gealterten Beschichtungen ergeben würden, um die vorgestellten Erkenntnisse auf eine breite Basis stellen zu können.

## Literatur

- [1.1] Zschokke, B.: Über das Rosten der Stahleinlagen im Eisenbeton, Schweizerische Bauzeitung, Bd. 67, Jahrgang 1916
- [1.2] Rehm, G.; Moll, H.: Zur Frage der Korrosion von Stahl in Beton, Zement-Kalk-Gips, Nr. 5/1960
- [1.3] Kishitani, K.; Hamada, K.: Dauerhaftigkeit des Stahlbetons in Zusammenhang mit Neutralisierung durch Kohlendioxid, Bericht des Kajima Institute of Constr. Technology, Tokyo, 1963
- [1.4] Kleinschmidt, H. J.: Untersuchung über das Fortschreiten der Carbonatisierung an Betonbauwerken, DAfStb, Heft 170 (65)
- [1.5] Schröder, F. u.a.: Einfluß der Luftkohlendioxid- und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahleinlagen, DAfStb, Heft 182 (67)
- [1.6] Kommission „Carbonatisierung“: Carbonatisierung des Betons, beton, Heft 7/1992
- [1.7] Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons, DAfStb, Heft 255 (1976)
- [1.8] Klopfer, H.; Zimmermann, G.: Sichtbeton-Fertigteile als Brüstungen, Betonabsprengungen durch korrodierende Stahlbewehrung, Bauschädensammlung, Forum-Verlag, Stuttgart
- [1.9] Klopfer, H.: Die Carbonatisation von Sichtbeton und ihre Bekämpfung, Bautenschutz und Bausanierung, Nr. 3/1978
- [1.10] Ergänzende Bestimmungen zur DIN 1045, Aufgaben der Betondeckung, Lage der Bewehrung, Beuth Verlag GmbH Berlin, 1988
- [1.11] Kordina, K.; Neisecke, J.: Reparatur und Schutz zerstörter oder nicht einwandfrei ausgeführter Betonoberflächen, Betonwerk + Fertigteiltechnik 48 (1982) 3, 48 (1982) 4, 48 (1982) 5
- [1.12] ZTV-SIB 90, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, 1990, BMV, Verkehrsblatt Verlag Dortmund
- [1.13] RILI SIB, Richtlinie für Schutz- und Instandsetzung von Betonbauteilen 1990,1992, DAfStb, Beuth-Verlag GmbH Berlin
- [1.14] Engelfried, R.: Instandsetzung und Ertüchtigung von Stahlbetonkühltürmen. VGB KraftwerksTechnik 71 (1991), H.12
- [1.15] Neisecke, J.: Beurteilung und Behebung von Cl-Schäden an Stahlbeton, DS-Der Sachverständige, Heft 11 (1985)

- [1.16] Wagner, H.; Sarx, H.-F.: Lackkunstharze, Carl Hanser Verlag, München 1971
- [1.17] Engelfried, R.: Diffusionswiderstandszahlen für Kohlendioxid und Wasser und deren praktische Anwendung, farbe + lack, Nr. 7/1983
- [1.18] Klopfer, H.: Eine Theorie der Rißüberbrückung durch Beschichtungen, Bautenschutz und Bausanierung 1982, Teil 1 Heft 2, Teil 2 Heft 3
- [1.19] Kittel, H.: Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Band I, Verlag W.A. Colomb in der Hennemann GmbH, Stuttgart-Berlin, 1971
- [2.1] Knöfel, D.; Böttger, K.G.: Zum Verhalten von zementgebundenen Baustoffen in SO<sub>2</sub>-angereicherter Atmosphäre, Betonwerk + Fertigteiltechnik, 1985, S 107 ...114
- [2.2] Engelfried, R.; Tölle, A.: Einfluß der Feuchte und des Schwefeldioxidgehaltes der Luft auf die Carbonatisation des Betons, Betonwerk + Fertigteil-Technik, D + E, 11/85
- [2.3] Nishi, T.: Untersuchungen über die Abminderung der alkalischen Reaktion (Carbonatisierung) im Beton in Japan, RILEM Symposium, Prag, 1961
- [2.4] Krischer, O.; Kröll, K.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik, Springer Verlag Berlin, 1963
- [2.5] Engelfried, R.: Carbonatisation von Beton, ihre Bedeutung und Beeinflussung durch Beschichtungen, defazet, Heft 9 (1977)
- [2.6] DIN EN 1062-6, Bestimmung der Kohlenstoffdioxid-Durchlässigkeit, Beuth Verlag GmbH Berlin
- [2.7] Klopfer, H.: Bauphysikalische Aspekte der Betonsanierung, Bautenschutz und Bausanierung Nr. 4, 1980
- [2.8] Klopfer, H.: Bauphysikalische Betrachtung der Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen für Betonoberflächen, DAB 1/90
- [2.9] Künzel, H.M. et. al.: Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren, WTA-Schriftenreihe, Heft 18, AEDIFICATIO Verlag, 1999
- [2.10] Worch, A.: Computergestützte Simulationsrechnungen zum Einfluß von Beschichtungen auf den Wassertransport in Betonbauteilen, Seminarhandbuch Oberflächen-schutz von Beton, Technische Akademie Esslingen, 29.11.1999
- [2.11] DIN 53122, Gravimetrische Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Prüfung von Kunststoffolien, Beuth Verlag GmbH, 1961
- [2.12] DIN 52615, Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen, Beuth Verlag GmbH Berlin, 1987

- [2.13] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1974
- [2.14] Christen, R.: Grundlagen der allgemeinen und anorganischen Chemie, Verlag Sauerländer Aarau, 1968
- [2.15] Gieler, R.P.: Überlegungen und Versuche zur Reißüberbrückungsfähigkeit spezieller Beschichtungssysteme an Fassaden, Dissertation, Universität Dortmund, 1989.
- [2.16] Homann, M.: Überlegungen und Versuche zur Reißüberbrückungsfähigkeit und Bemessung von Beschichtungssystemen für Industriefußböden, Dissertation, Universität Dortmund, 1997.
- [3.1] DIN 55928 Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge, Teil 5, 1980 Beuth Verlag GmbH Berlin
- [3.2] EN ISO 12944-5, Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme, 1998, Beuth Verlag GmbH Berlin
- [3.3] Haseloff, O.W.; Hoffman, H.-J.: Kleines Lehrbuch der Statistik, 4. Auflage 1970, Verlag Walter de Gruyter & Co. Berlin
- [3.4] Sachs, L.: Angewandte Statistik, 4. Auflage 1973, Springer Verlag Berlin
- [3.5] Hartung, J.: Statistik, 2. Auflage 1984, Oldenburg Verlag
- [3.6] Klopfer, H.: Kapitel Feuchte aus Lehrbuch der Bauphysik, 4. Auflage 1997, B.G. Teubner Verlag Stuttgart
- [3.7] Brock, Th.; Groteklaes, M.; Mischke, P.: Lehrbuch der Lacktechnologie, Vincentz Verlag Hannover, 1998
- [3.8] DIN 50986, Keilschnittverfahren zur Messung der Dicke an Anstrichen und ähnlichen Schichten, 1979, Beuth Verlag GmbH Berlin
- [3.9] Engelfried, R., Titze, B.: Instandsetzung von Naturzugkühltürmen für den Betrieb mit Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen (REA), industrieBAU 1999, Heft 5
- [3.10] Engelfried, R., Titze, B.: Planning, Dimensioning and Execution of Surface Protection Measures for Cooling Towers With Flue-Gas Injection at the Lippendorf Power Station, VGB PowerTech 1/2000.
- [3.11] Engelfried, R., Wittek, P.: Instandsetzung des Sichtbetons am Wasserturm Leverkusens, gwf Wasser Abwasser 140 (1999) Nr.2
- [3.12] Böe, H.-P.: Einsatzmöglichkeiten von BETOGLASS® im Hoch- und Tiefbau als alternative Oberflächenbekleidung, Seminarhandbuch Oberflächenschutz von Beton, 29.11.1999, Technische Akademie Esslingen

- [3.13] Engelfried, R., Paul, G.: Oberflächenschutzmaßnahmen am Reaktorgebäude (Sekundärabschirmung) eines Druckwasserreaktors, Bautechnik 76 (1999) Heft 7
- [3.14] Engelfried, R.: Kriterien zur Einhaltung der Schichtdicke bei rißüberbrückenden Bodenbeschichtungen, Tagungsband Internationales Kolloquium Industrieböden `99, 12.-14. Januar 1999, S 889, Technische Akademie Esslingen
- [3.15] Engelfried, R.: Gezielter Schutz für die Stahlbeton-Schornsteinmündung, VGB Kraftwerktechnik 72 (1992) Heft 5
- [3.16] Helf, C.: Ein Fertiger für Beschichtungen, Tagungsband Internationales Kolloquium 10.- 12. Januar 1995, Industriefußboden 95, Technische Akademie Esslingen, Seiten 421 bis 428
- [3.17] Schäper, M.: Eigenschaften von Fertiger-Beschichtungen, Tagungsband Internationales Kolloquium 10. – 12. Januar 1995, Industriefußboden 95, Technische Akademie Esslingen, Seiten 429 bis 435
- [3.18] Engelfried, R.: Qualitätssicherung bei Oberflächenschutzsystemen auf Beton, Seminarhandbuch Betonangriff-Betonschutz-Betoninstandsetzung, Haus der Technik Essen, 1997
- [3.19] Block, K.; Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund, beton, 2/98
- [4.1] DIN 50035, Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien, 1989, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [4.2] Näser, K.-H.: Physikalische Chemie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1974
- [4.3] Menges, G.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag, München-Wien 1975
- [4.4] DIN 4108, Wärmeschutz im Hochbau, Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte, November 1991
- [4.5] Hinzpeter A.: Physik als Hilfswissenschaft, Teil 5: Optik, Vanderhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1971
- [4.6] Zorll, U.: Römpf Lexikon Lacke und Druckfarben, Georg Thieme Verlag Stuttgart New York, 1998
- [4.7] Bassi, R.; Davis, H.: Long term durability of anti carbonation coatings under natural and artificial weathering conditions, Proceedings of the International Exhibition & Conference ConChem, 28 – 30. November 1995, Page 189, Brüssels
- [4.8] Maultzsch, M.; Günther, K.: Wirksamkeit von Oberflächenschutz für Beton nach Freibewitterung, Berichtsband zum Internationalen WTA-Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen - MSR V, 1999, Seite 803, Technische Akademie Esslingen



- [4.9] Lotzmann, S.: Rißüberbrückende Oberflächenschutzsysteme nach künstlicher und natürlicher Bewitterung, Tagungsband Internationales Kolloquium Industrieböden `99, 12 – 14 Januar 1999, Seite 709, Technische Akademie Esslingen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
D	[m <sup>2</sup> /s]	Diffusionskoeffizient
D <sub>L</sub>	[m <sup>2</sup> /s]	Diffusionskoeffizient von Gas (CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O) in Luft
E	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
FV	[---]	Festkörpervolumen
G	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubmodul
H	[---]	Häufigkeit
$\dot{M}$	[kg/h]	Massenstrom
N-vert.	[---]	Normalverteilung
P	[---]	Wahrscheinlichkeit
R	[m]	Diffusionswiderstand (im Experiment ermittelt)
V	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
V <sub>Sdiff</sub>	[---]	Variationszahl für S <sub>diff</sub>
V <sub>Smit</sub>	[---]	Variationszahl für S <sub>mit</sub>
X		Merkmal eines Intervalls
Z <sub>R</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugkräfte durch Reißbewegung
Z <sub>S+<math>\vartheta</math></sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugkräfte aus Schwinden und Temperaturänderung
Z <sub>V</sub>	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugkräfte aus Verkehrsbelastung
a, b		Intervallgrenzen
c	[kg/m <sup>3</sup> ]	Konzentration
d	[m]	Dicke
d	[mm]	mittlere Schichtdicke
d <sub>min s</sub>	[mm]	Systemspezifische Mindestschichtdicke
d <sub>max s</sub>	[mm]	Systemspezifische Maximalschichtdicke
d <sub>min p</sub>	[mm]	Produktspezifische Mindestschichtdicke
d <sub>max p</sub>	[mm]	Produktspezifische Maximalschichtdicke
d <sub>soll</sub>	[mm]	Sollschichtdicke
f	[s <sup>-1</sup> ] [Hz]	Frequenz
h	[---]	Die Reißweitenänderung abmindernder Faktor
h	[mm]	Höhe eines Tiefenprofils
i	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	Stoffmengenstromdichte
k	[---]	Faktor
l	[m]	Länge
l <sub>0</sub>	[m]	Ausgangslänge
m	[kg]	Masse
m <sup>“</sup>	[g/m <sup>2</sup> ]	Auftragsmenge
$\dot{m}$	[kg/m <sup>2</sup> ·h]	Massenstromdichte

n	[---]	Anzahl, Menge
p	[Pa]	Druck
r	[mm]	Steinhöhe
s	[m]	Dicke, Schichtdicke
S <sub>d</sub>	[m]	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (Rechengröße)
S <sub>D,H<sub>2</sub>O</sub>	[m]	Diffusionswiderstand für Wasserdampf (Rechengröße)
S <sub>D,CO<sub>2</sub></sub>	[m]	Diffusionswiderstand für Kohlendioxid (Rechengröße)
S <sub>D,eff</sub>	[m]	Für Diffusionsvorgänge effektiver Diffusionswiderstand
S <sub>mit, S50%</sub>	[µm]	Mittlere Schichtdicke
S <sub>min, S5%</sub>	[µm]	Mindestschichtdicke als 5%-Fraktile
S <sub>max, S95%</sub>	[µm]	Maximalschichtdicke als 95%-Fraktile
S <sub>diff</sub>	[µm]	Für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke
ssa	[µm]	Stichprobenstandardabweichung
sv	[µm]	Schichtdickenvorhaltemaß
sr	[µm]	Schichtdickenrückhaltemaß
t	[s]	Zeit
w	[---]	Rißweite
x	[m]	Wegkoordinate
$\bar{x}$	[µm]	Arithmetisches Mittel einer Stichprobe
y	[m]	Wegkoordinate
z		reelle Zahl
α	[---]	Stoffzuschlag aus Verlust
α <sub>ϑ</sub>	[K <sup>-1</sup> ]	Thermischer Längenänderungskoeffizient
β	[---]	Stoffzuschlag aus Rauheit
δ	[kg/m·h·Pa]	Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient
δ <sup>+</sup> δ <sup>-</sup>	[C]	Partiellladung
ε	[---]	Dehnung
ϑ	[°C]	Temperatur
μ	[---]	Diffusionswiderstandszahl
μ	[---]	Gipfelwert, Mittelwert, fehlerfreies Ereignis
π		Kreiszahl
ρ <sub>fl</sub>	[g/cm <sup>3</sup> ]	Dichte des flüssigen Beschichtungstoffes
σ	[µm]	Standardabweichung
∞		unendliche Größe
∅	[mm]	Durchmesser

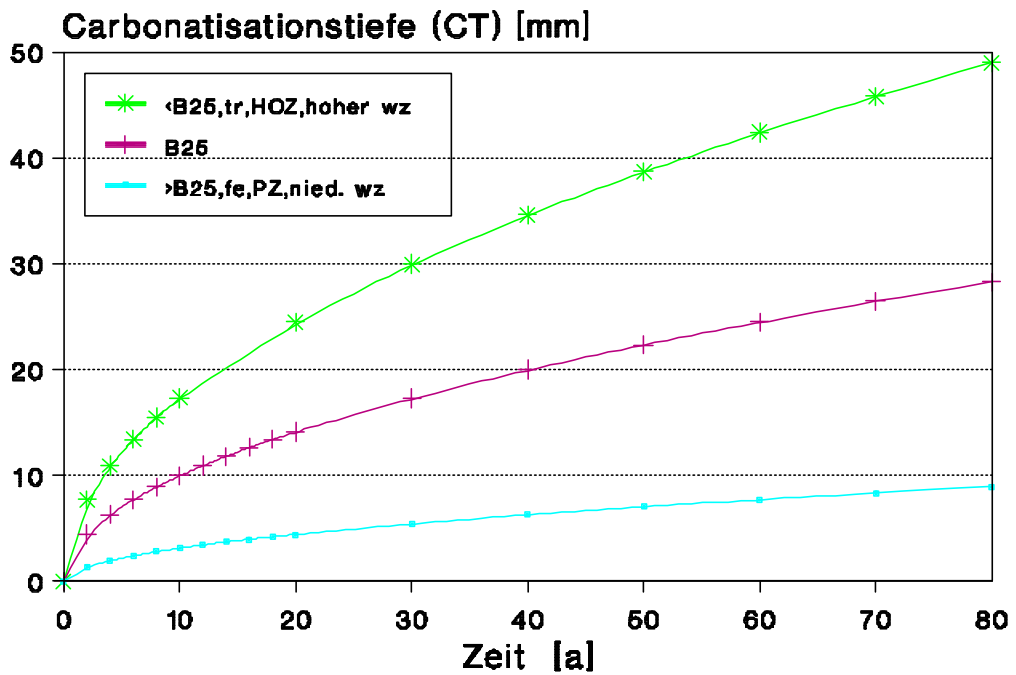


Bild 1: Carbonatisationsgeschwindigkeit im Beton, abhängig von drei Stoffparametern



Bild 2: Bewehrungstähe, die nach Carbonatisierung des Betons ihre Betondeckung durch Rosttreiben abgedrückt haben

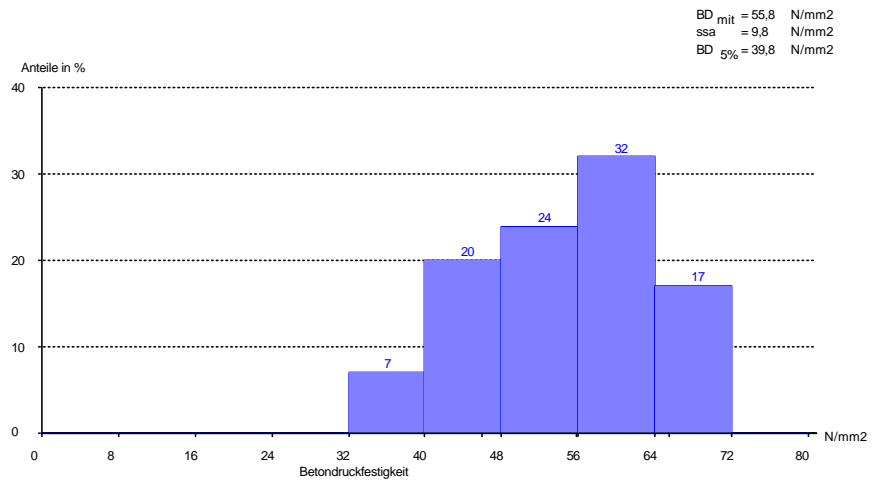
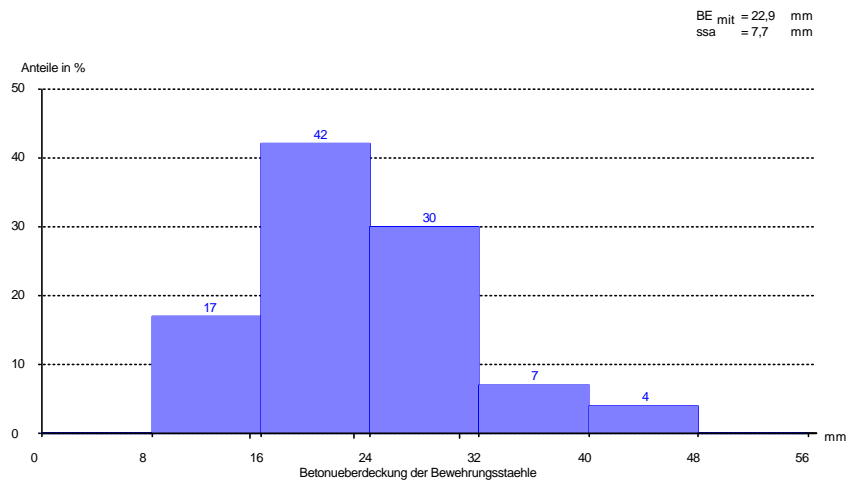
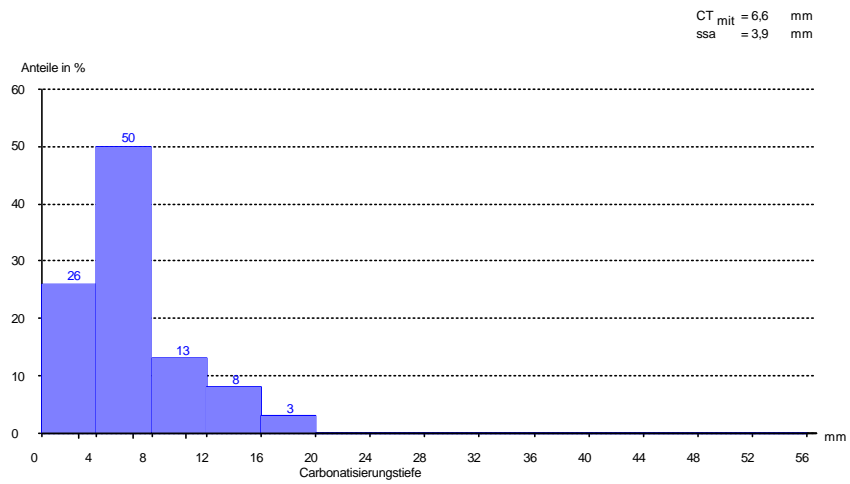


Bild 3: Stahlbeton-Skelettkonstruktion eines Kirchturms  
Carbonatisierungstiefe/Betondeckung/Betondruckfestigkeit

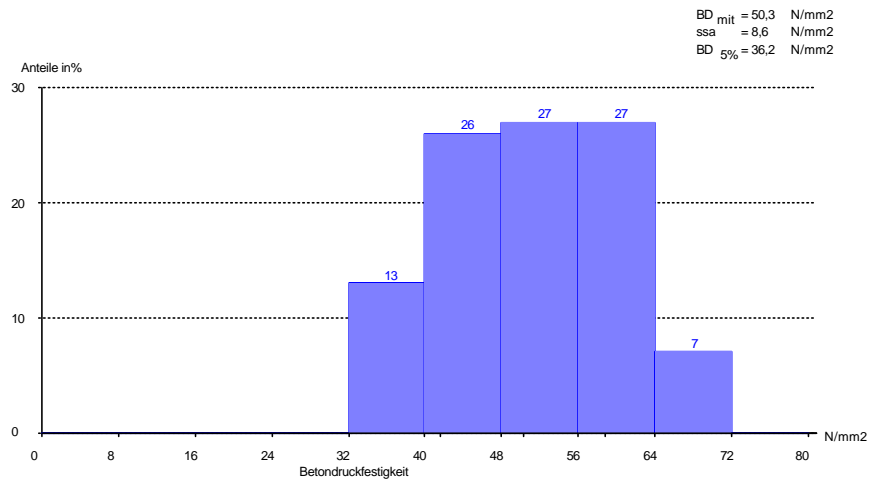
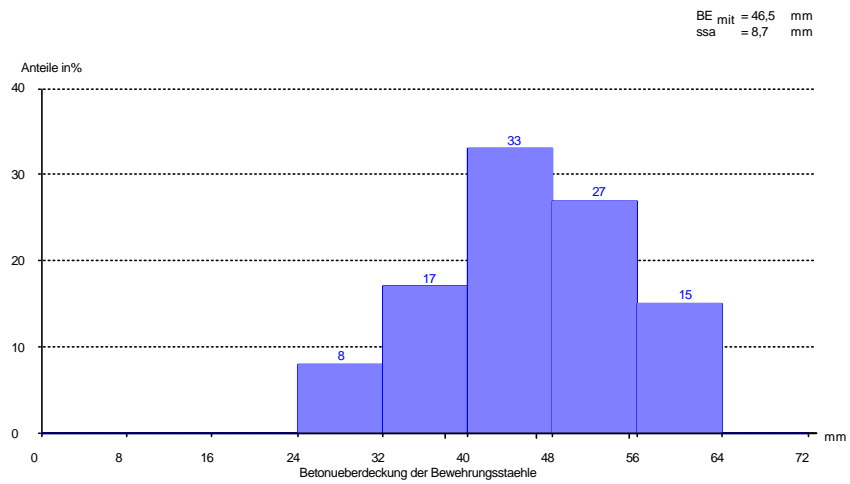
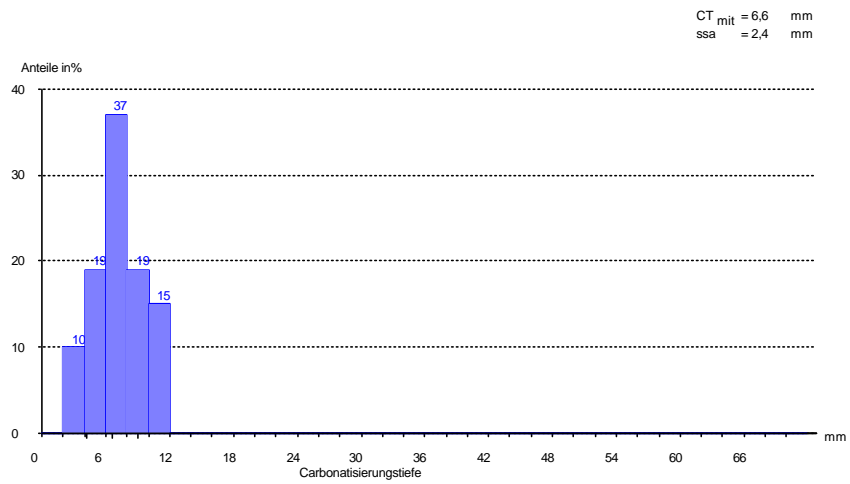


Bild 4: Stahlbetonkamin eines Flachglaswerkes  
Carbonatisierungstiefe/Betondeckung/Betondruckfestigkeit

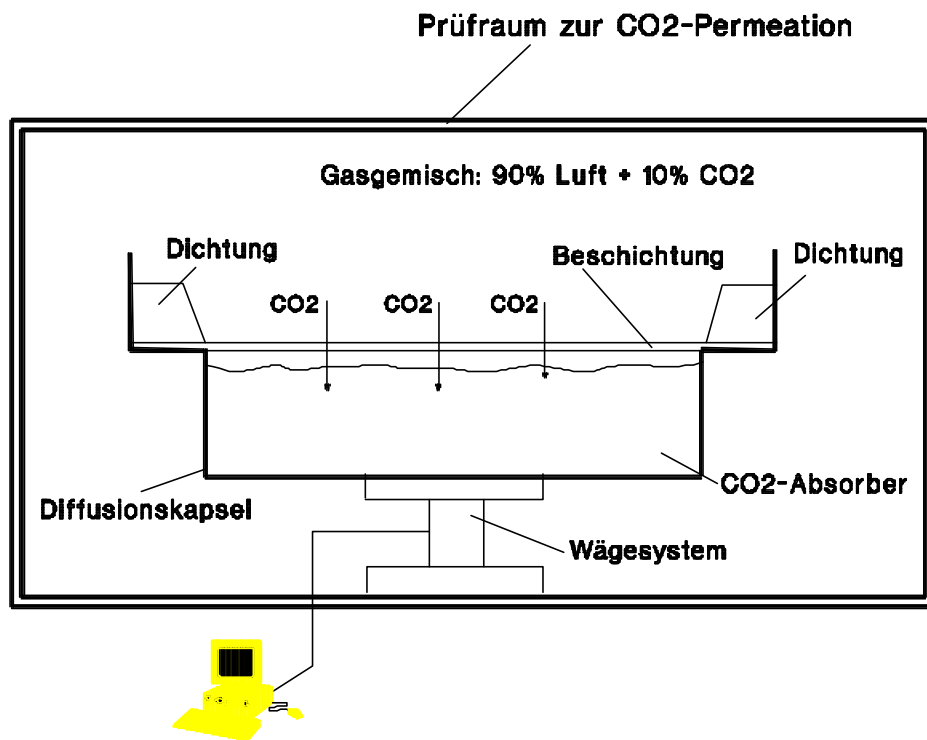


Bild 5: Gravimetrische Detektion der CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit

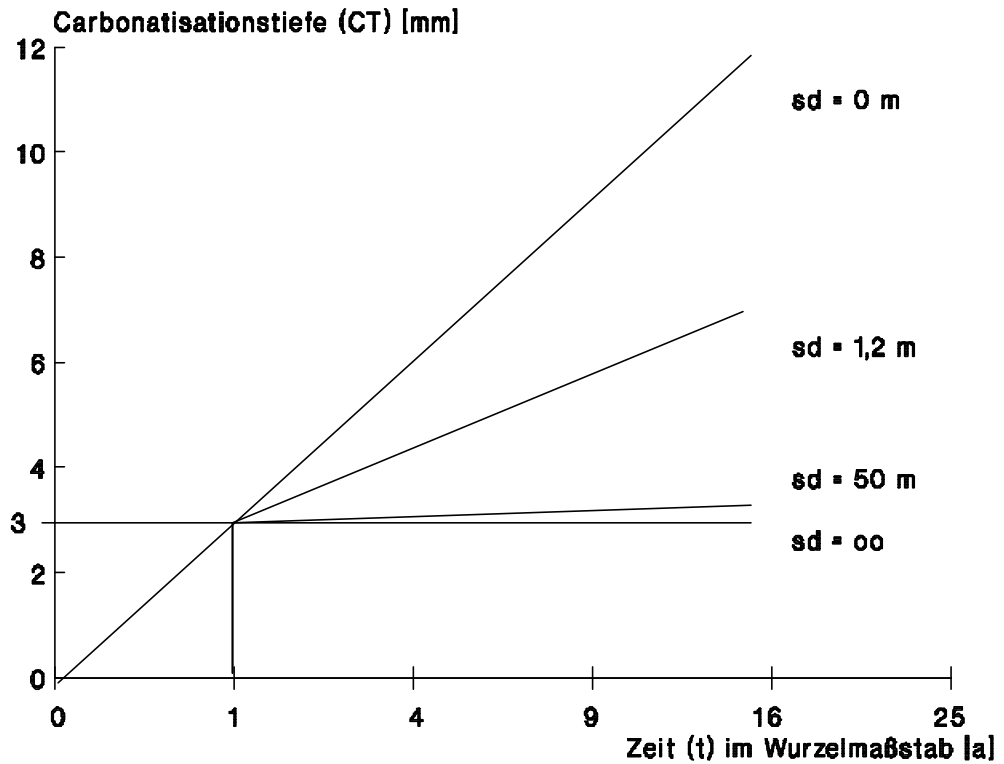


Bild 6: Definition der Carbonatisationsbremse [2.7]

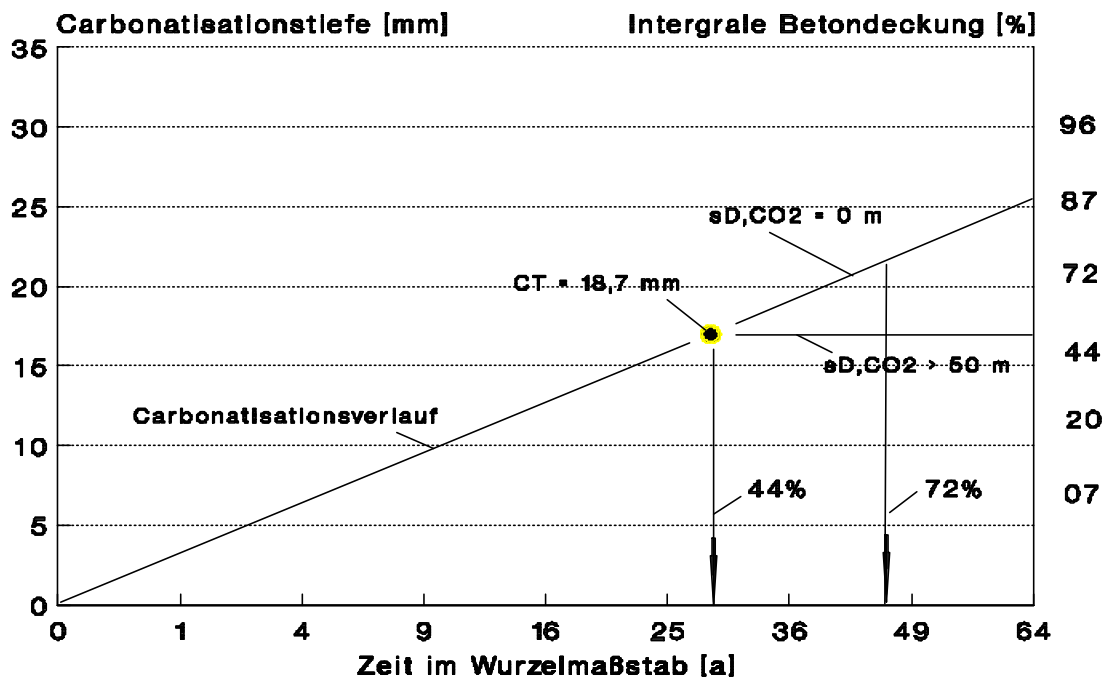


Bild 7: Zeitliche Prognose der Carbonatisierung mit und ohne Beschichtung



Bild 8: Kühlturm nach Ausführung der Beschichtungsmaßnahme, außen



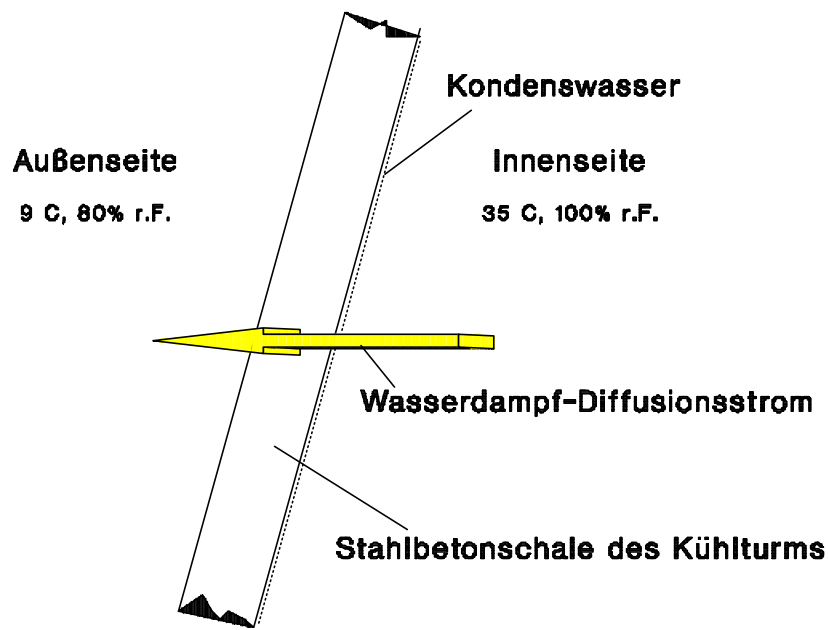


Bild 9: Schematische Darstellung der H<sub>2</sub>O-Diffusion durch eine Kühlturmschale

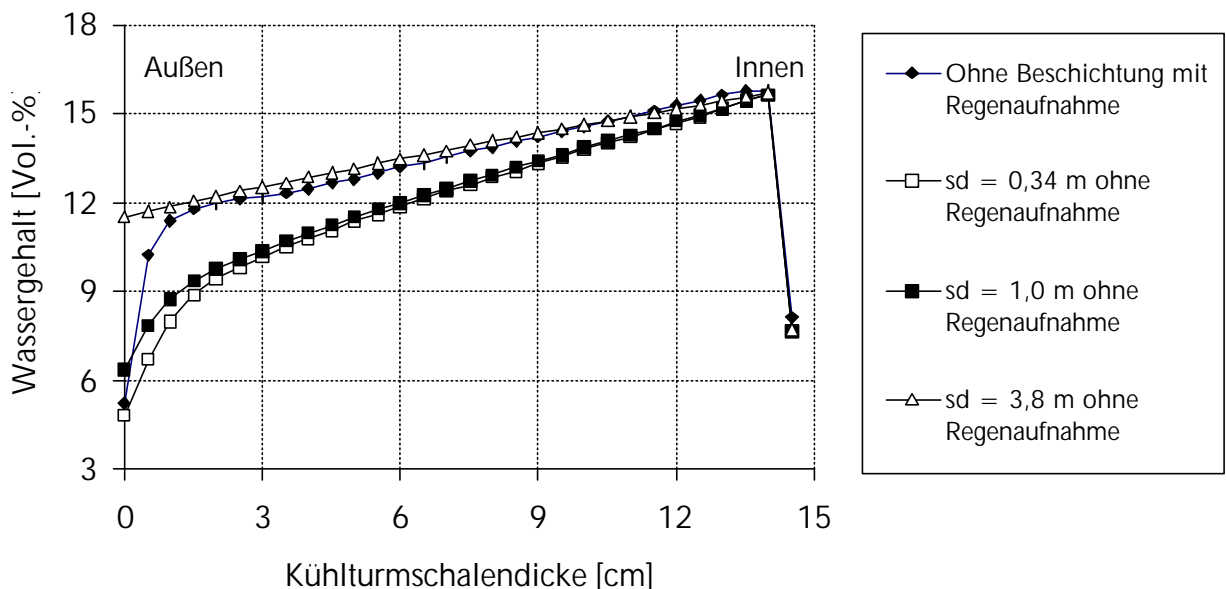


Bild 10: Mittlere Wassergehaltsverteilung in der Betonschale eines Kühlturms, abhängig von der außenseitigen Beschichtung  
 Betongüte: B 35, Innenseite ohne Beschichtung  
 Lastfall: Spitzenlast, nächtliche Abschaltung für 6 Stunden

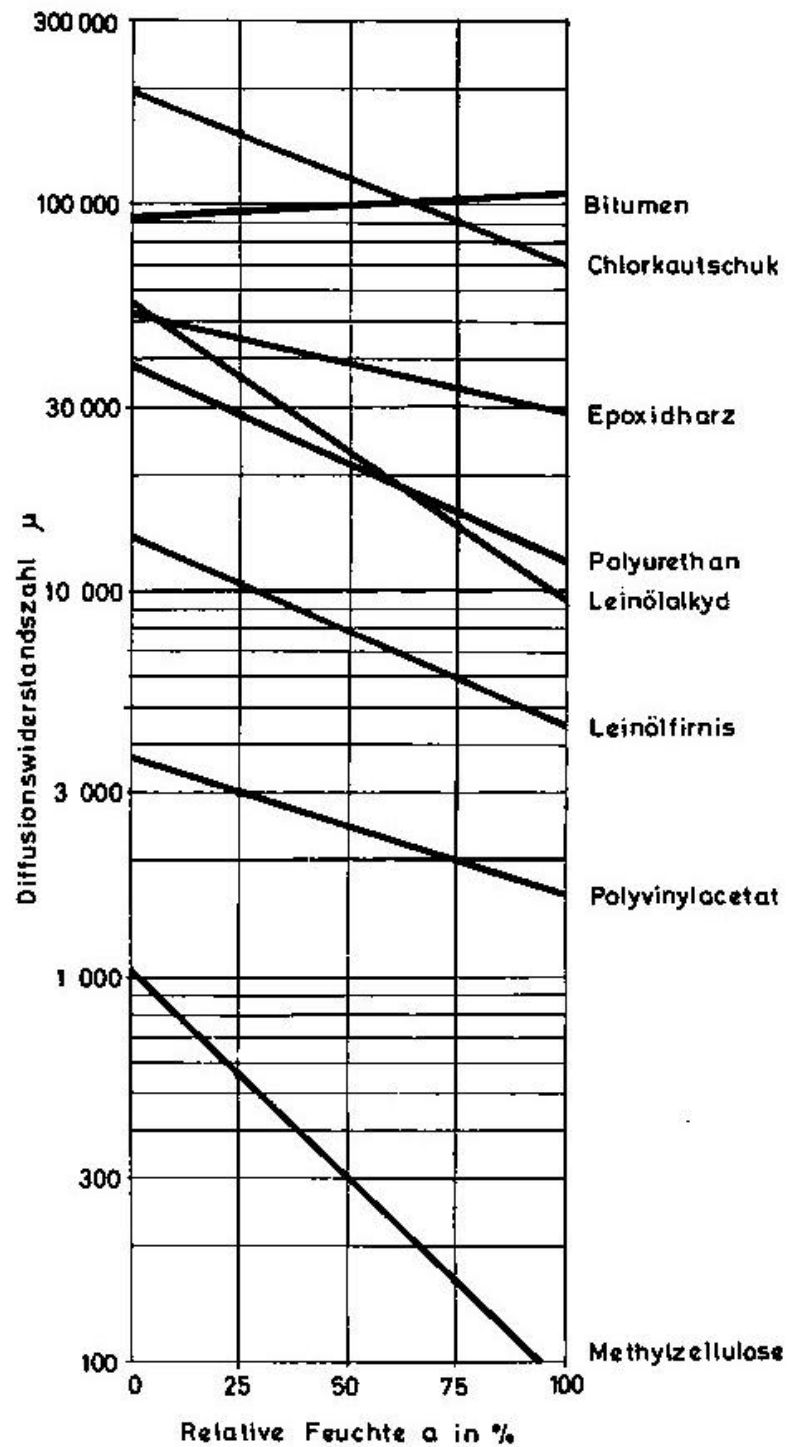


Bild 11: Diffusionswiderstandszahlen  $\mu_{H_2O}$  von Polymerbeschichtungen in Abhängigkeit vom Feuchtebereich



Bild 12: Auskragende Balkonplatte, 1. OG



Bild 13: Trennriß in Balkonplatte

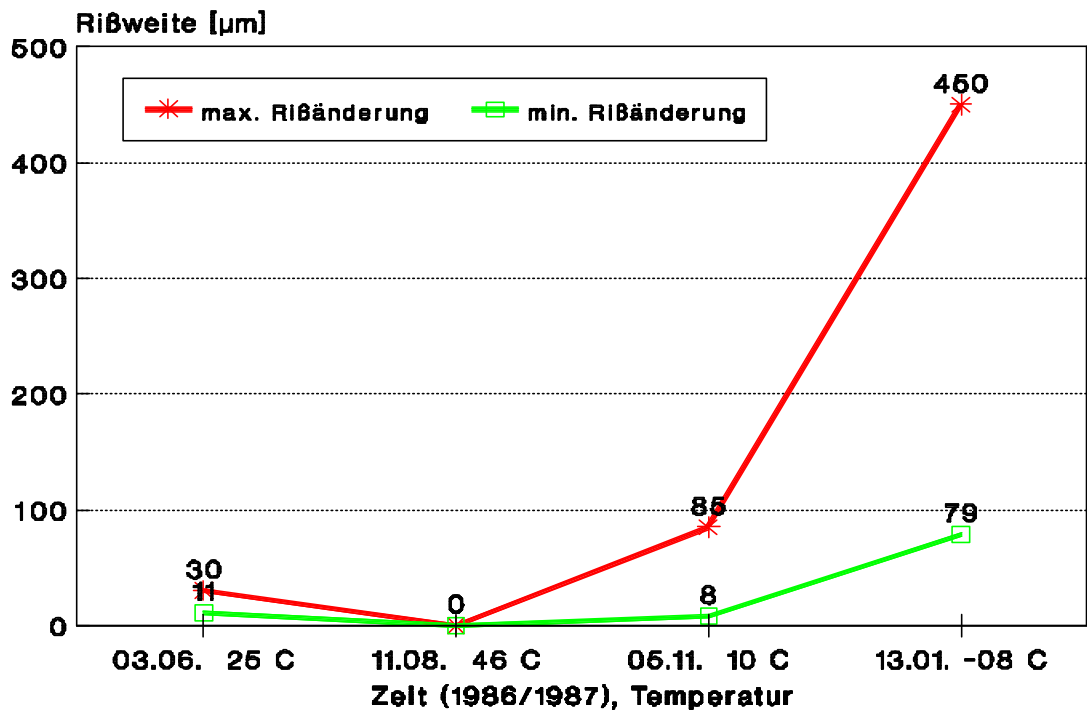


Bild 14: Gemessene Rißweitenänderung in Balkonkragplatte

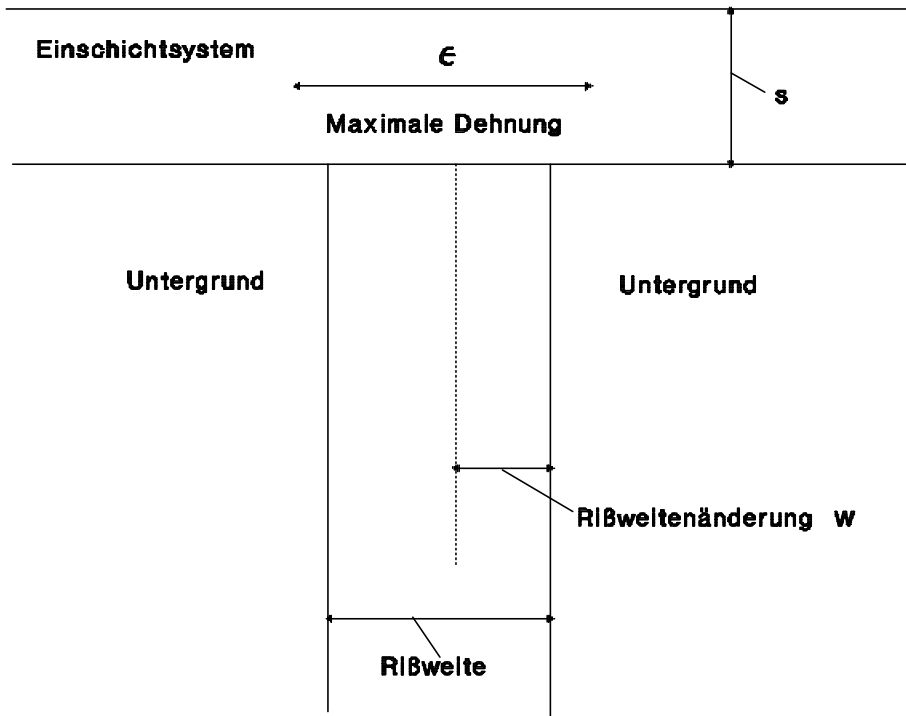


Bild 15: Bemessung für ein rißüberbrückendes Einschichtsystem

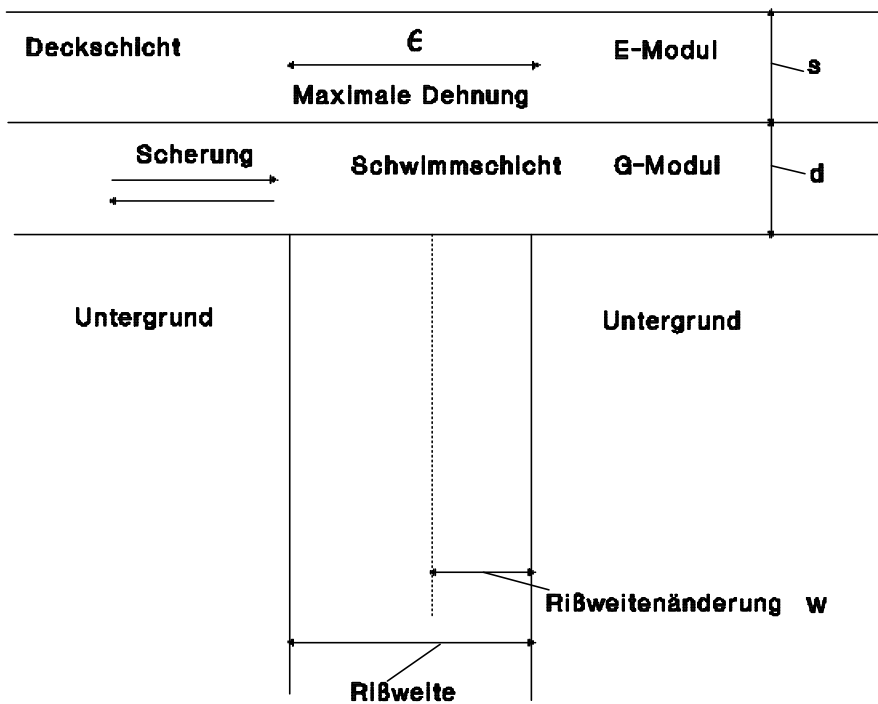


Bild 16: Bemessung für ein rißüberbrückendes Zweischichtsystem

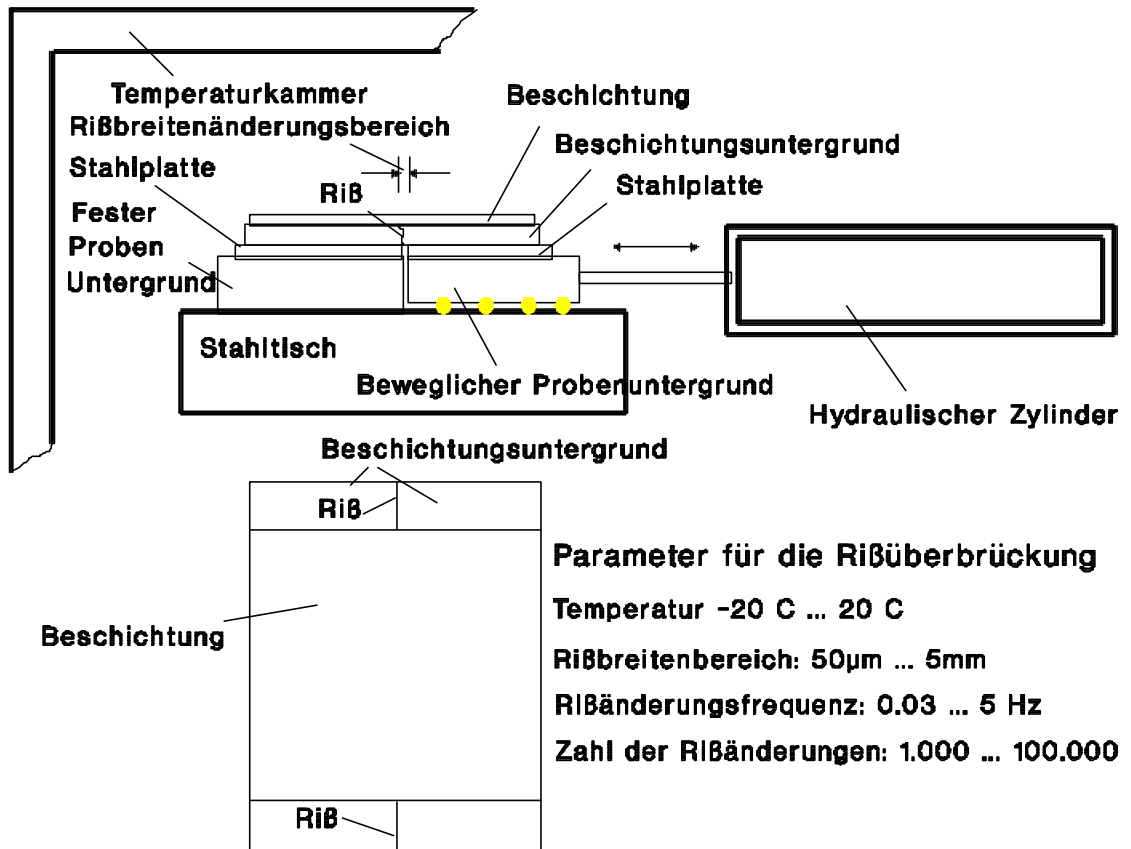


Bild 17: Schematische Darstellung der RiBüberbrückungs-Prüfmaschine

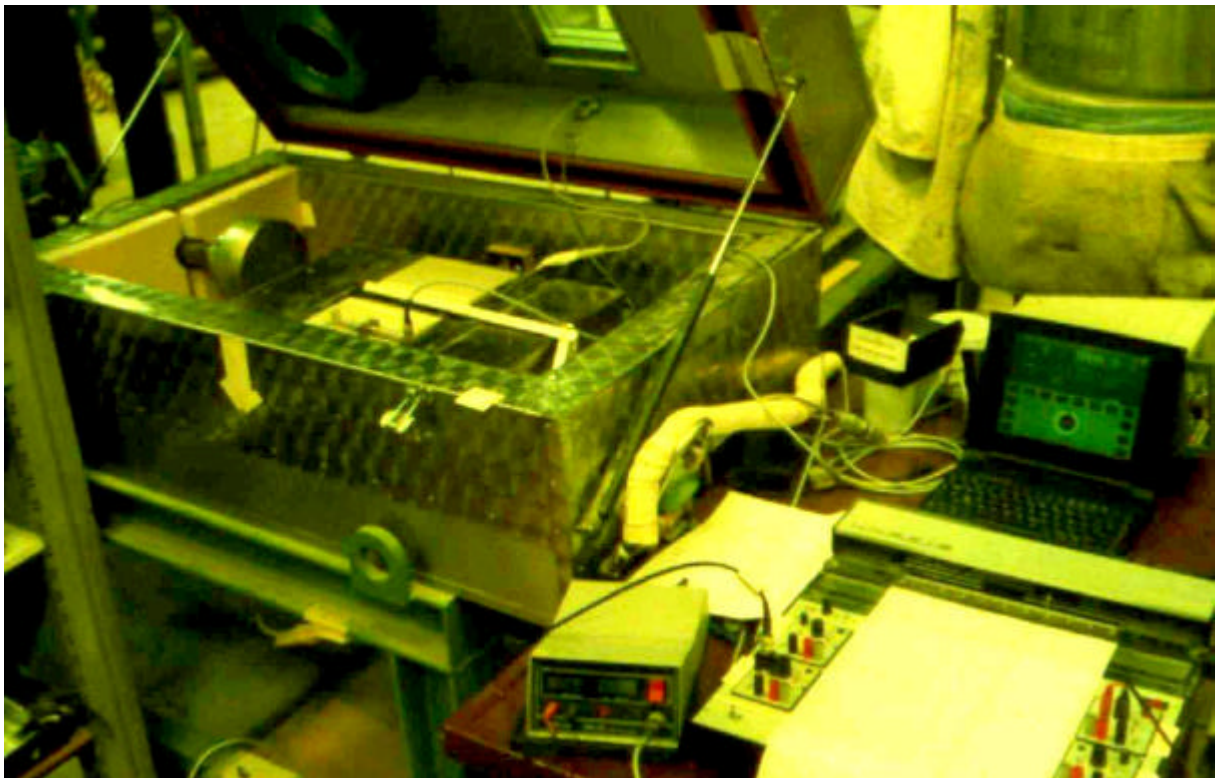


Bild 18: Ansicht des Prüfraums der RiBüberbrückungs-Prüfmaschine

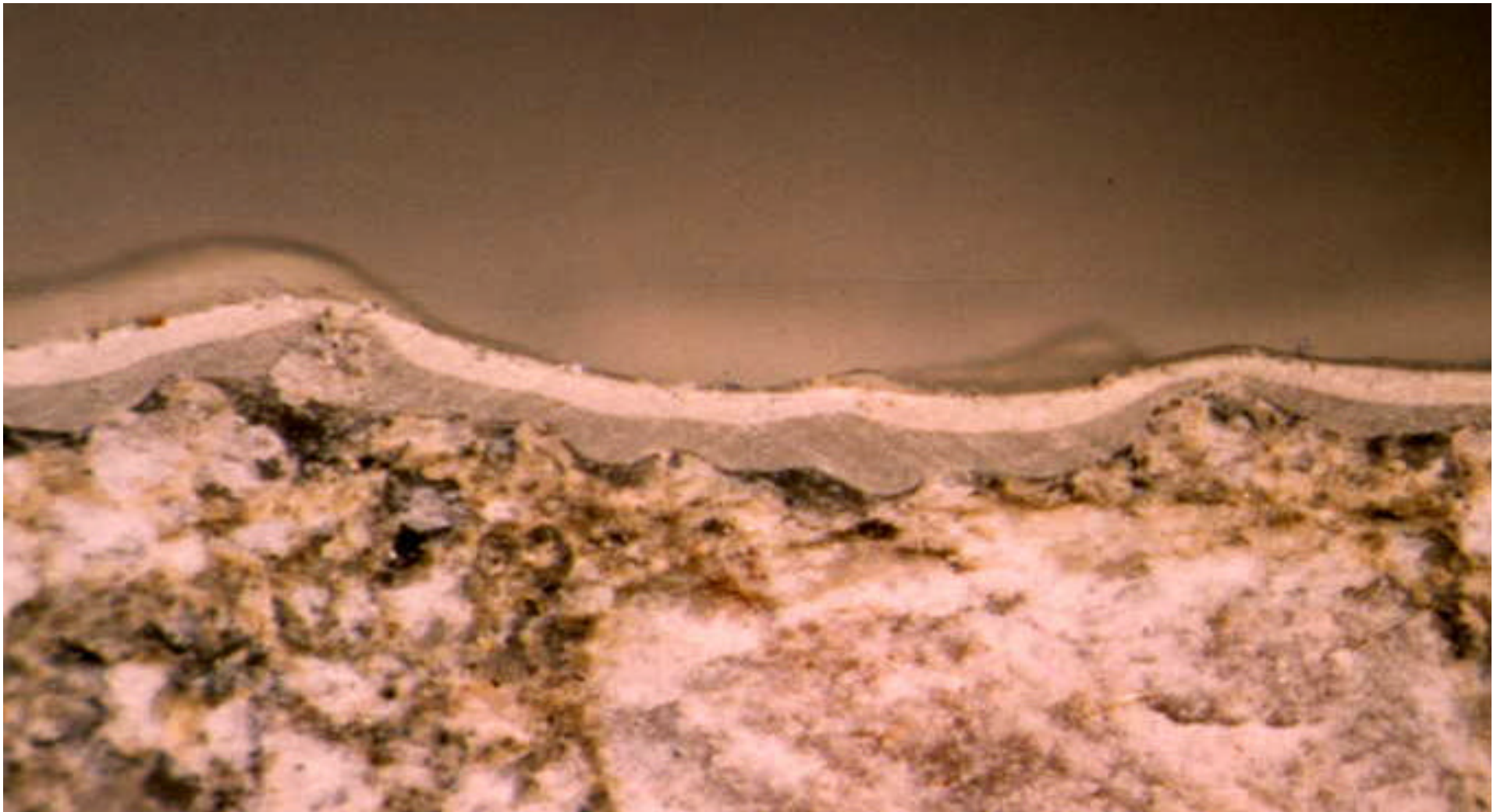


Bild 19: Vertikalschnitt durch ein beschichtetes Betonbauteil. Beschichtung weist sehr viele unterschiedliche Einzelschichtdicken auf

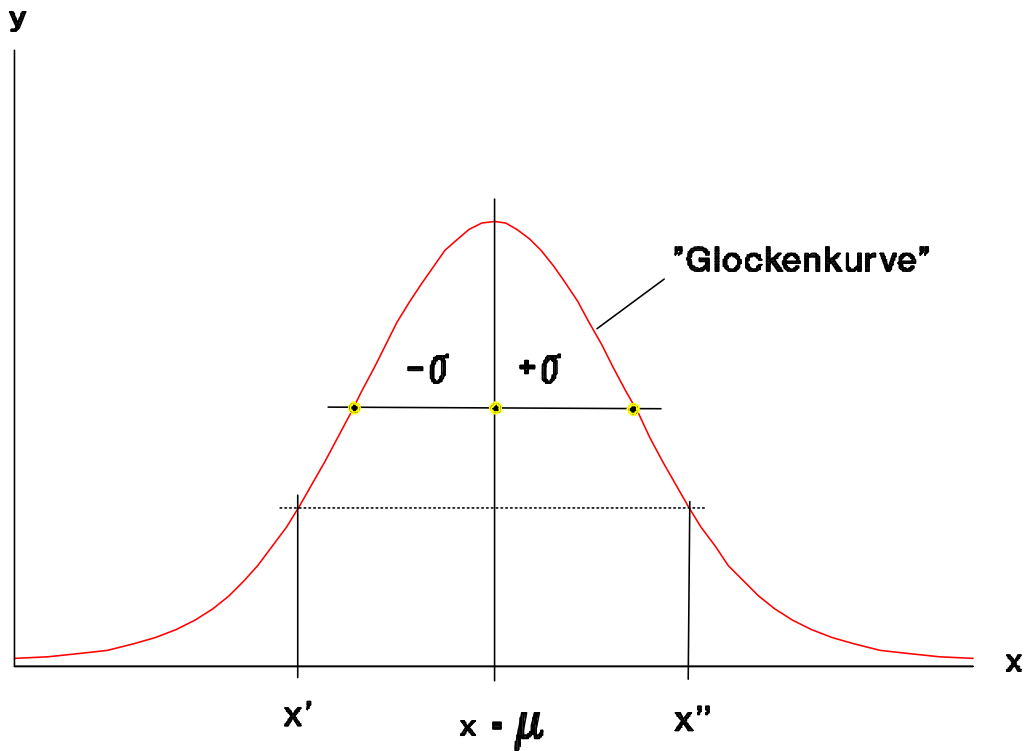


Bild 20: „Fehlergesetz“ Normalverteilung, symmetrisch um das „fehlerfreie“ Ereignismerkmal  $μ$  angeordnete, „fehlerhafte“ Ereignismerkmale

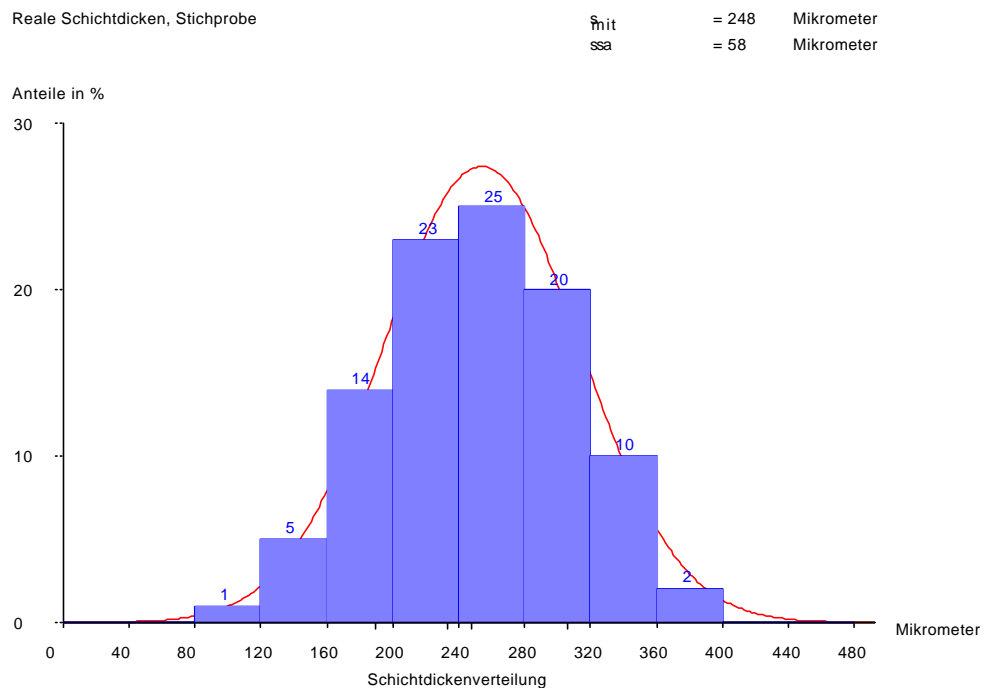


Bild 21: Gegenüberstellung Histogramm aus Bauteilmessung - Glockenkurve

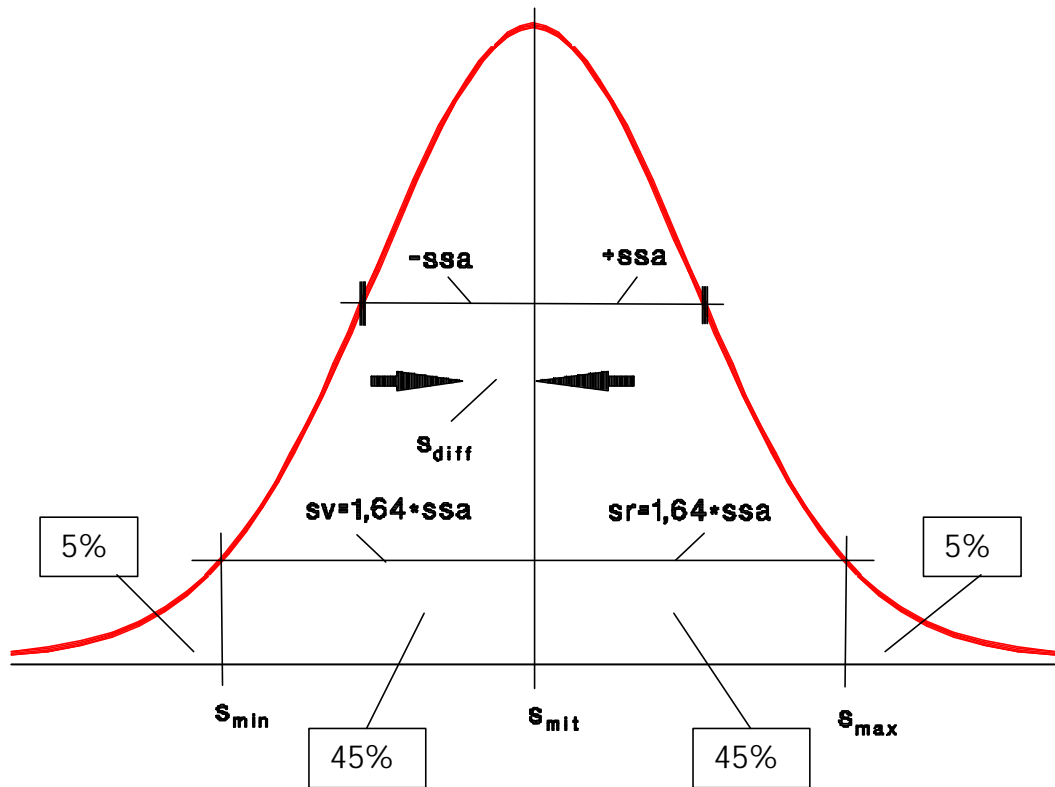


Bild 22: Definition der Schichtdickengrenzwerte

$s_{mit}$ : Mittlere Schichtdicke

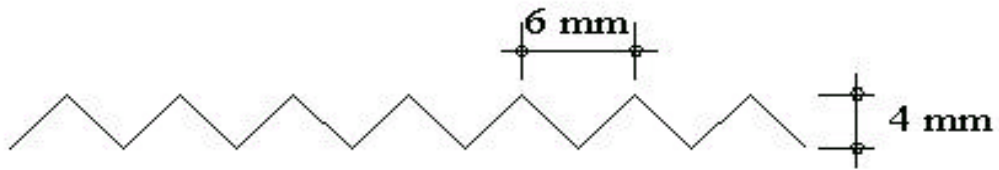
$s_{min}$ : Mindestschichtdicke (5%-Fraktile)

$s_{max}$ : Maximalschichtdicke (95%-Fraktile)

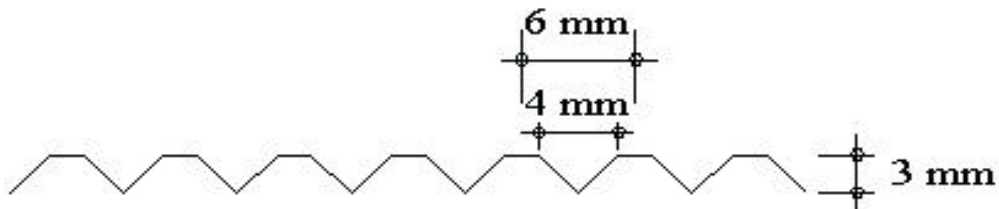
$s_{diff}$ : Für Diffusionsvorgänge effektive Schichtdicke



### Neue Zahnleiste:



### Verschlissene Zahnleiste:



Neue Zahnleiste:

$$A = \frac{g \cdot h}{2} = \frac{6\text{mm} \cdot 4\text{mm}}{2} = 12\text{mm}^2$$

$$\Rightarrow s = \frac{A}{b} = \frac{12\text{mm}^2}{6\text{mm}} = 2\text{mm}$$

Verschlissene Zahnleiste:  $A = \frac{g \cdot h}{2} = \frac{4\text{mm} \cdot 3\text{mm}}{2} = 6\text{mm}^2$

$$\Rightarrow s = \frac{A}{b} = \frac{6\text{mm}^2}{6\text{mm}} = 1\text{mm}$$

Bild 23: Einfluß des Zahnleistenprofils auf das Schichtdickenergebnis

# Parameter der Schichtdickenverteilung

Häufigkeit

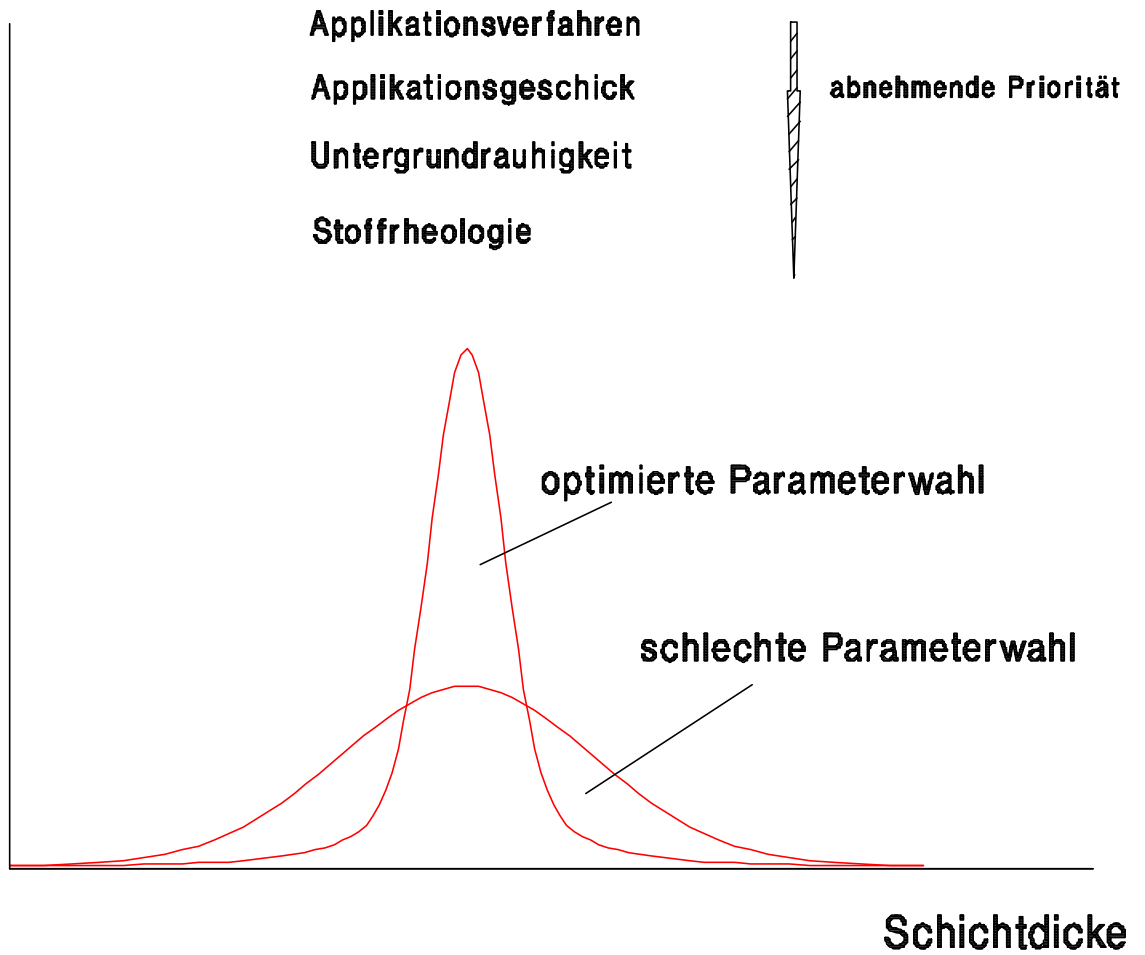


Bild 24: Parameterwahl als Einflußgröße für die Gleichmäßigkeit des Schichtdickenergebnisses

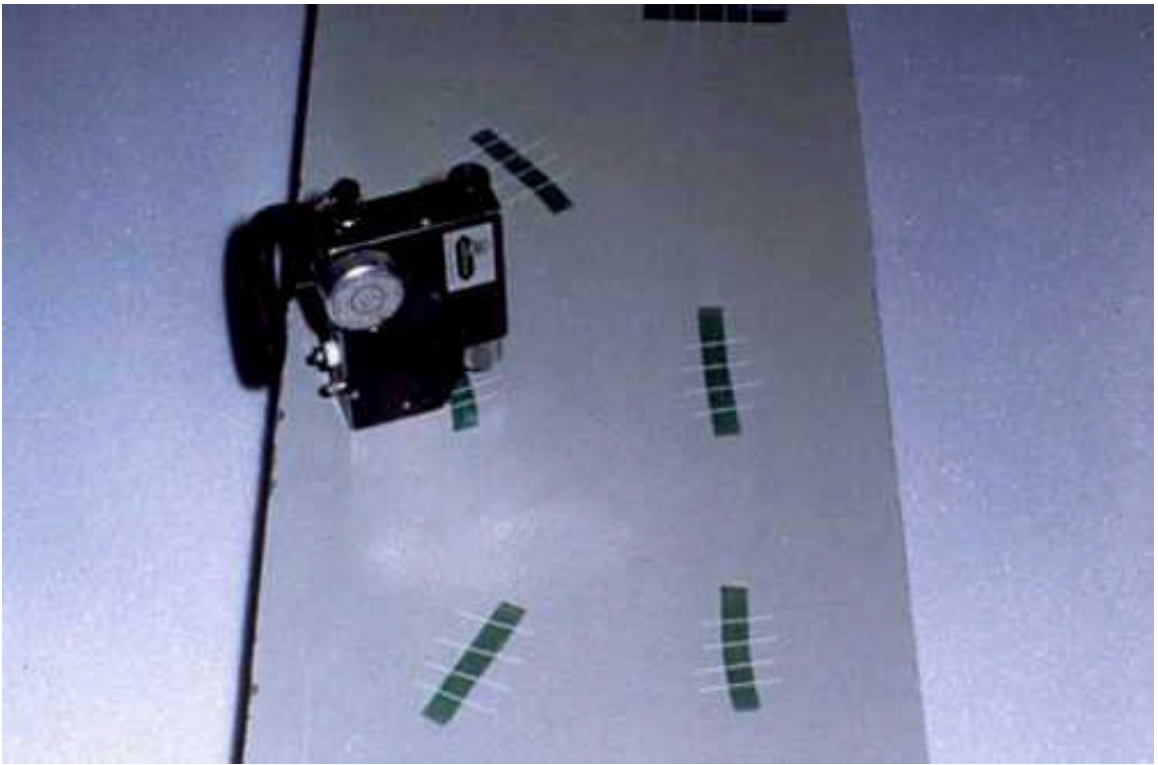


Bild 25: Schichtdickenmessung im Keilschnittverfahren an Probepplatten

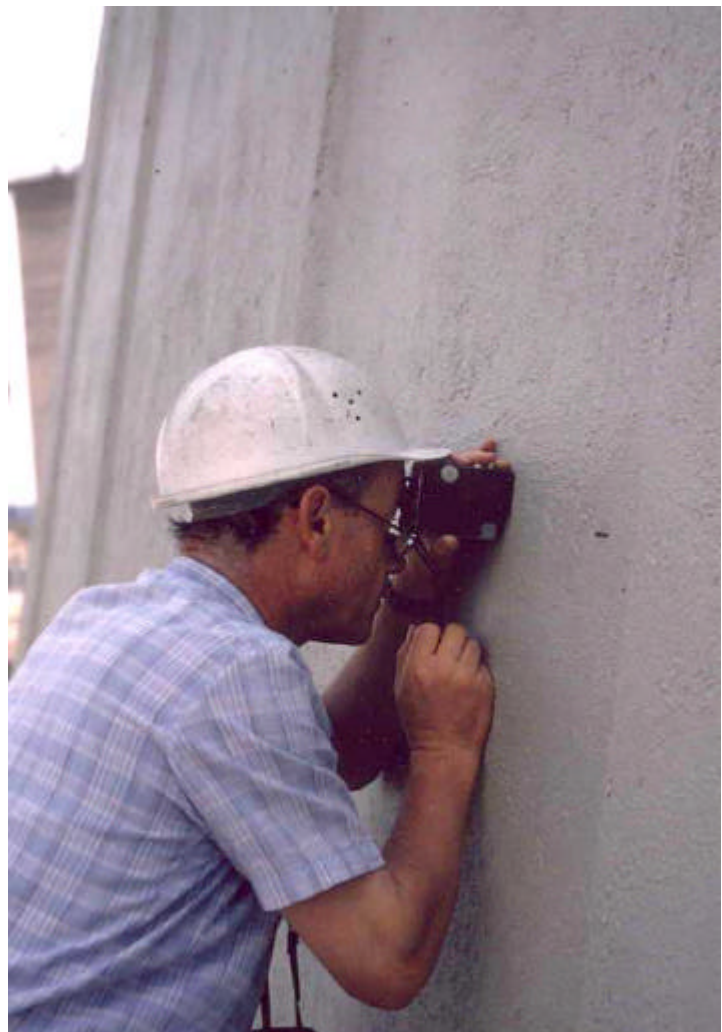


Bild 26:  
Schichtdickenmessung im Keilschnittverfahren in situ



Bild 27: Schichtdickenmessung an Schnittflächen von Probekörpern unter dem Stereomikroskop

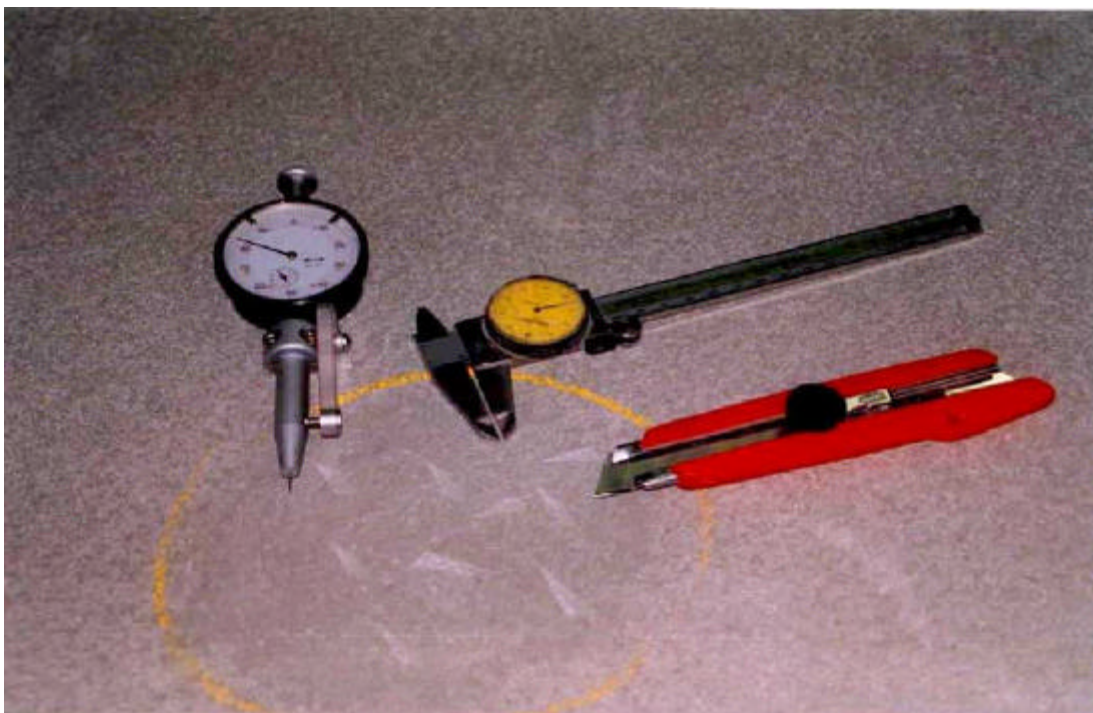


Bild 28: Schichtdickenmessung an einer Fußbodenbeschichtung  
links: Differenzdickenmeßgerät nach BAM  
rechts: Stahlklinge zur Spanentnahme, Schieblehre zur Dickenmessung

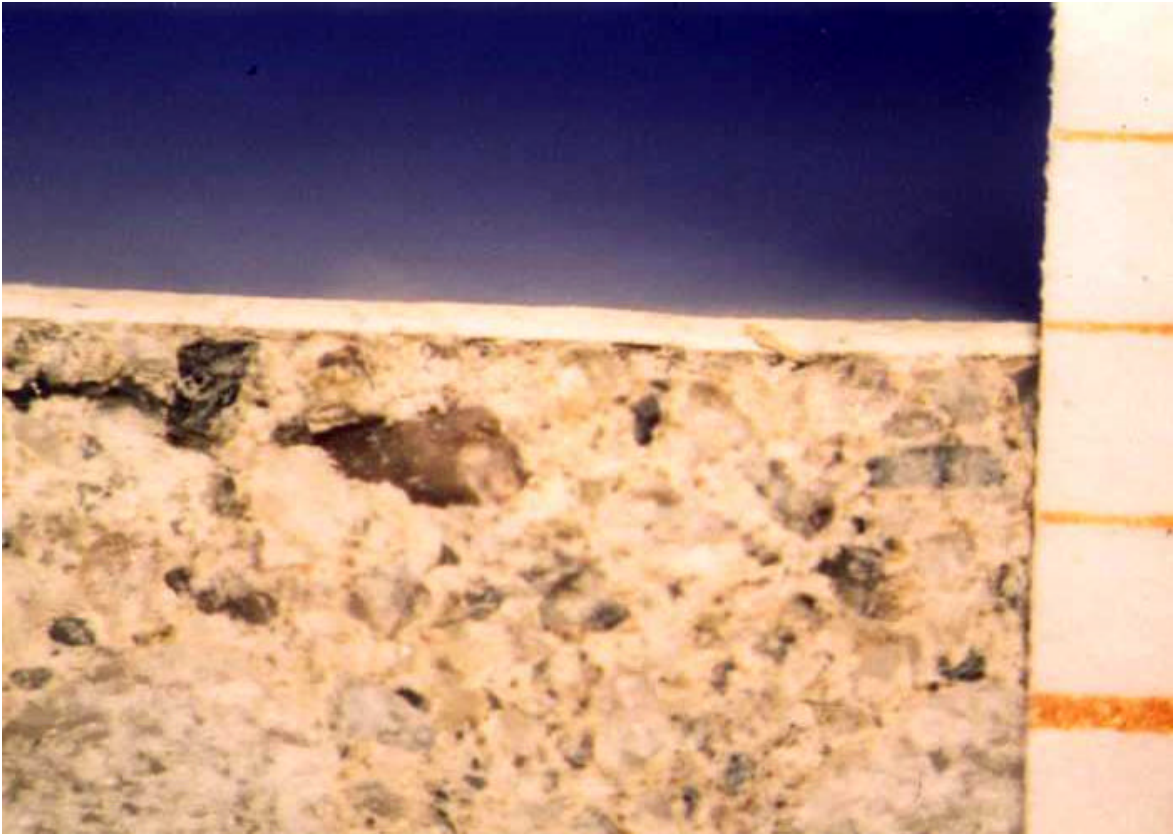


Bild 29: Rauheit B, schalungsglatt, Acrylat 2x airlessgespritzt

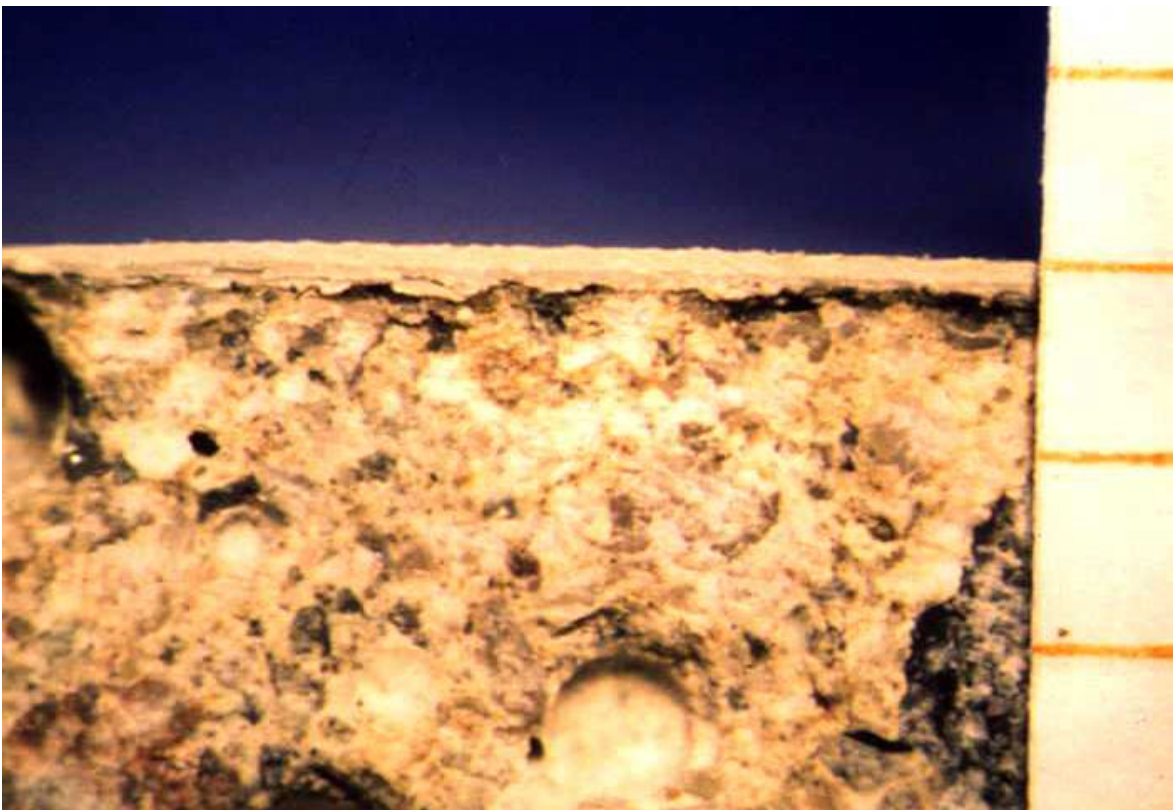


Bild 30: Rauheit B, schalungsglatt, Epoxid 2x airlessgespritzt

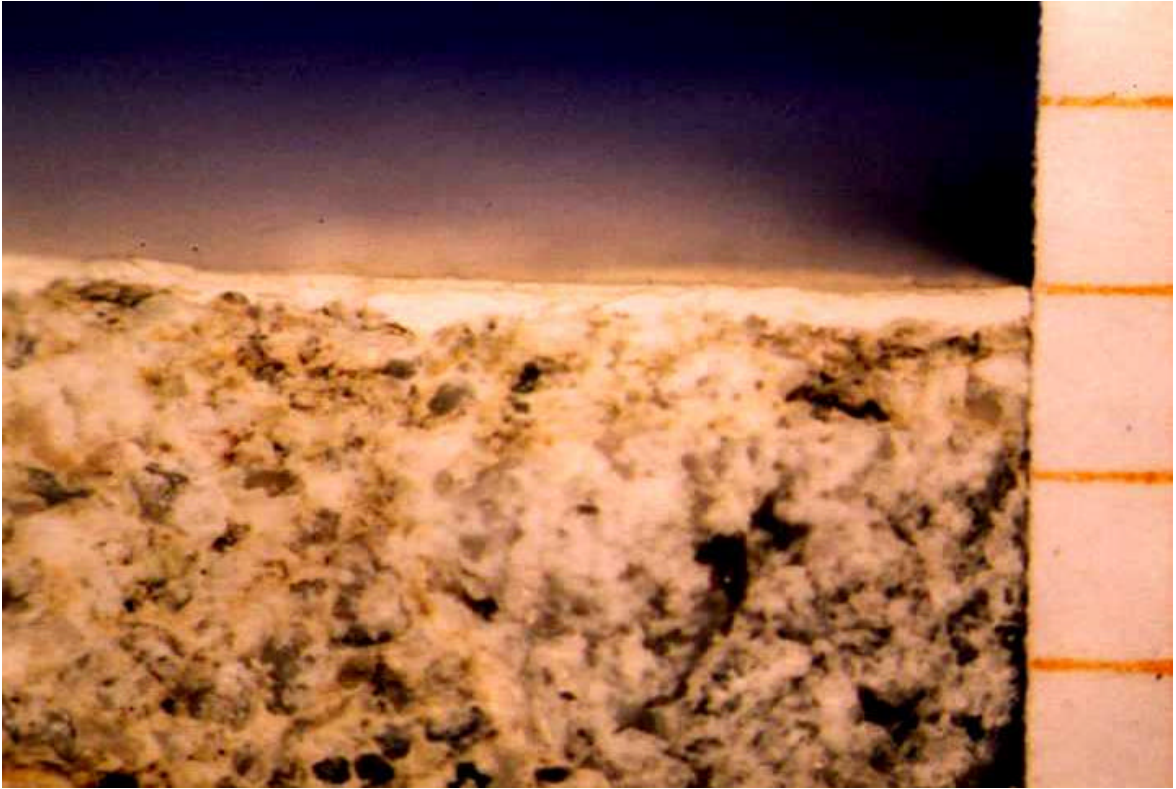


Bild 31: Rauheit S, schalbrettrauh, Acrylat 2x gerollt

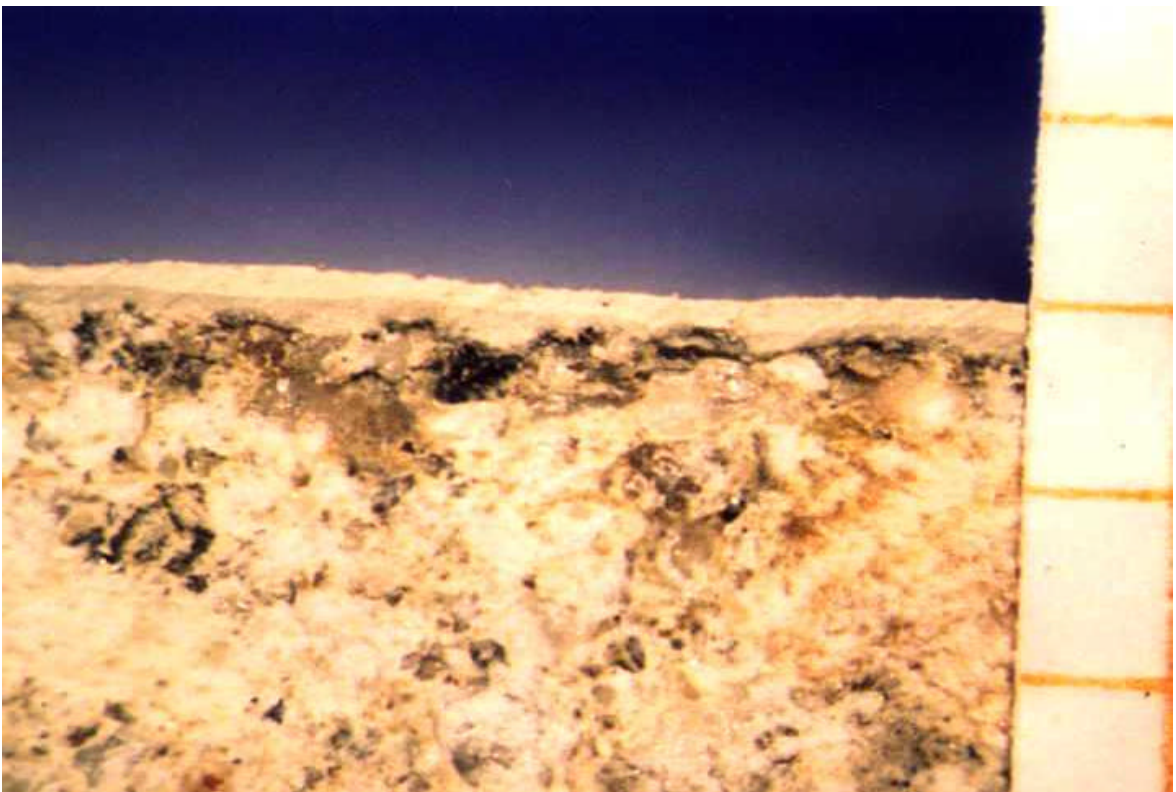


Bild 32: Rauheit S, schalbrettrauh, Epoxid 2x airlessgespritzt



Bild 33: Rauheit A, ausgeprägt rauh, Acrylat 2x gerollt

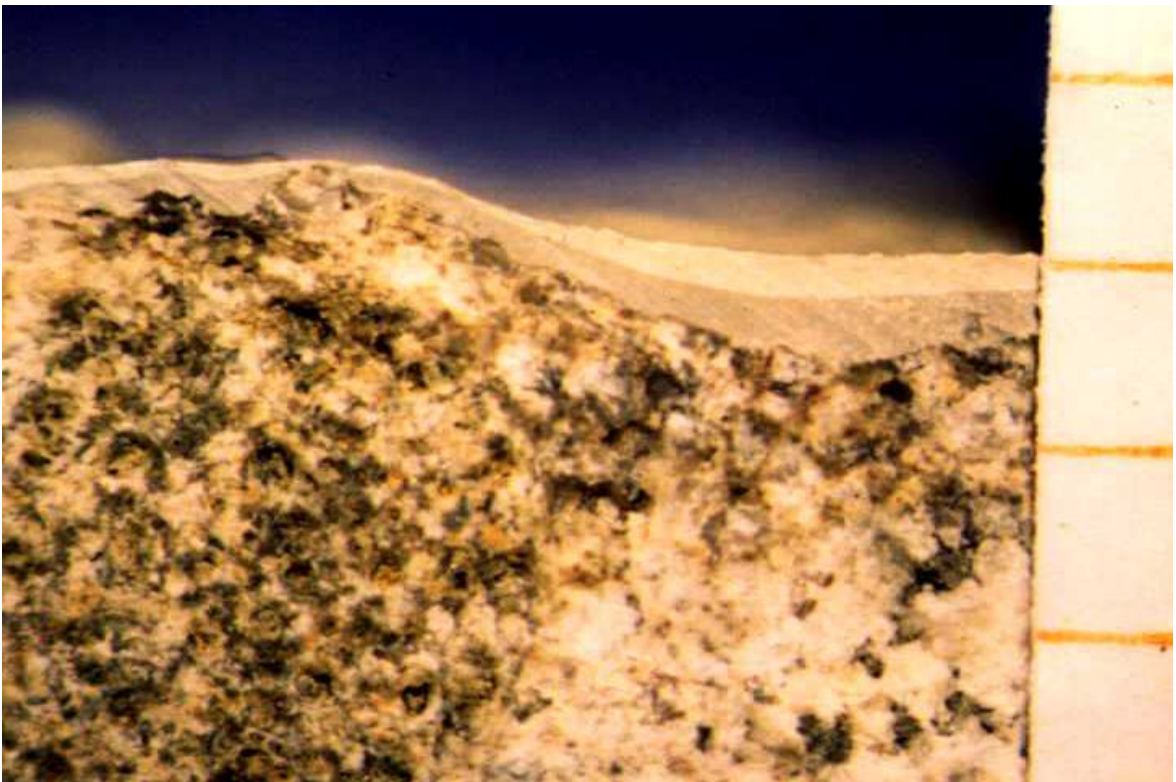


Bild 34: Rauheit A, ausgeprägt rauh, Epoxid 2x airlessgespritzt

150 ; 280 ; 210 ; 210 ; 210 ; 140 ; 210 ; 220 ; 190 ; 190 ; 200 ; 300 ; 210 ; 220 ; 240 ; 200 ; 240 ; 270 ;  
 170 ; 220 ; 250 ; 100 ; 240 ; 150 ; 230 ; 160 ; 280 ; 180 ; 150 ; 150 ; 310 ; 310 ; 260 ; 220 ; 210 ; 290 ;  
 310 ; 180 ; 160 ; 100 ; 160 ; 200 ; 140 ; 180 ; 110 ; 180 ; 260 ; 250 ; 250 ; 210 ; 270 ; 250 ; 200 ; 230 ;  
 230 ; 110 ; 150 ; 170 ; 120 ; 220 ; 260 ; 340 ; 110 ; 90 ; 210 ; 210 ; 260 ; 360 ; 180 ; 260 ; 230 ; 240 ;  
 300 ; 250 ; 210 ; 300 ; 200 ; 210 ; 230 ; 280 ; 90 ; 300 ; 360 ; 260 ; 290 ; 210 ; 220 ; 220 ; 170 ; 210 ;  
 220 ; 240 ; 250 ; 260 ; 210 ; 210 ; 290 ; 160 ; 250 ; 180  $\mu\text{m}$

$\bar{s}$  mit = 217 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 58 Mikrometer

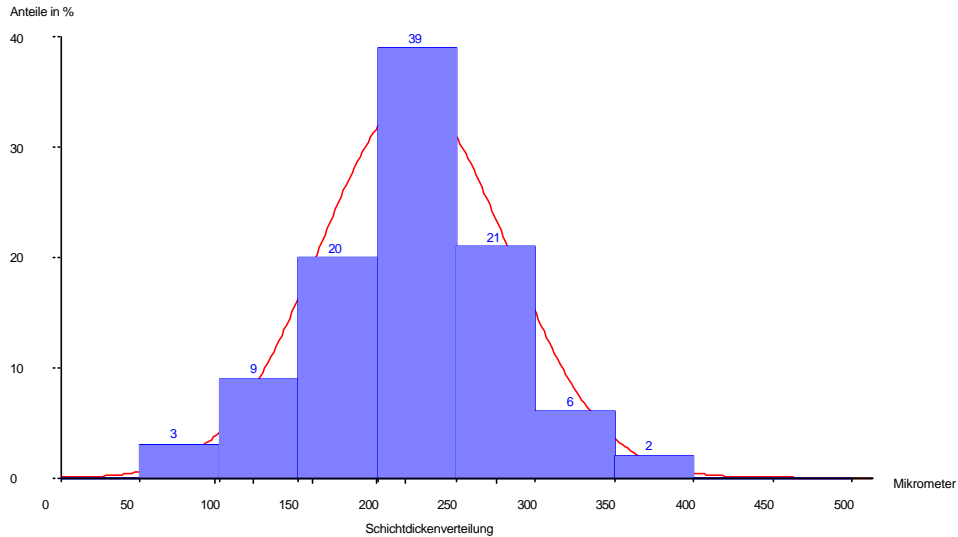


Bild 35: Rauheit A, Acrylat 2x gerollt, Keilschnittmessung

210 ; 230 ; 220 ; 180 ; 210 ; 240 ; 210 ; 210 ; 230 ; 220 ; 230 ; 190 ; 240 ; 250 ; 240 ; 250 ; 200 ; 230 ;  
 210 ; 240 ; 240 ; 240 ; 230 ; 240 ; 230 ; 200 ; 220 ; 200 ; 240 ; 250 ; 200 ; 230 ; 210 ; 170 ; 240 ; 220 ;  
 250 ; 220 ; 260 ; 240 ; 210 ; 200 ; 180 ; 230 ; 200 ; 230 ; 200 ; 210 ; 210 ; 250 ; 220 ; 180 ; 190 ; 210 ;  
 200 ; 210 ; 200 ; 250 ; 230 ; 210 ; 230 ; 230 ; 200 ; 220 ; 230 ; 220 ; 210 ; 210 ; 240 ; 250 ; 220 ; 220 ;  
 190 ; 200 ; 210 ; 200 ; 220 ; 220 ; 220 ; 230 ; 240 ; 220 ; 210 ; 220 ; 220 ; 210 ; 230 ; 230 ; 240 ; 220 ;  
 250 ; 250 ; 200 ; 220 ; 240 ; 190 ; 240 ; 240 ; 200 ; 210  $\mu\text{m}$

$\bar{s}$  mit = 220 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 19 Mikrometer

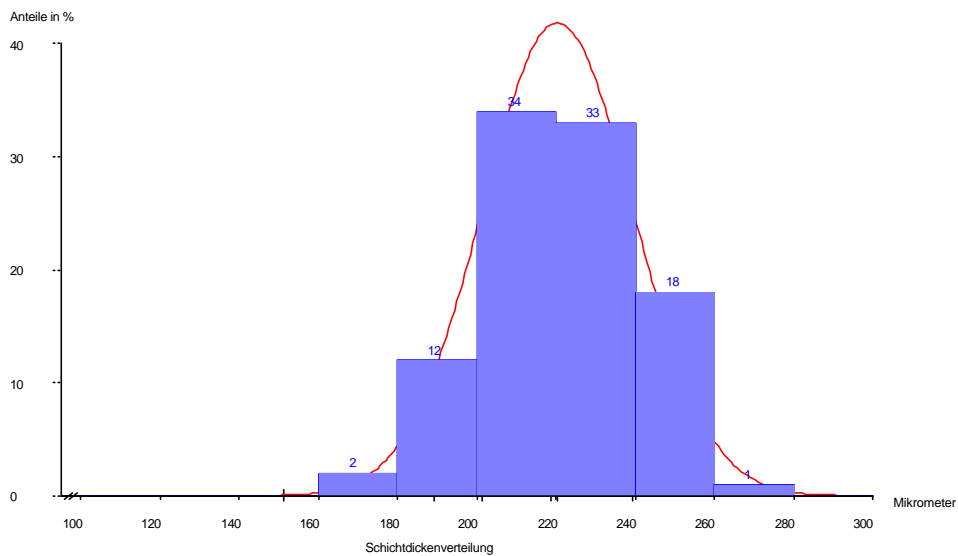


Bild 36: Rauheit B, Epoxid 2x airlessgespritzt, Keilschnittmessung



150 ; 360 ; 250 ; 290 ; 270 ; 380 ; 310 ; 290 ; 250 ; 260 ; 240 ; 220 ; 210 ; 140 ; 100 ; 210 ; 110 ; 390 ;  
 350 ; 170 ; 190 ; 120 ; 160 ; 110 ; 130 ; 250 ; 100 ; 110 ; 120 ; 110 ; 130 ; 120 ; 110 ; 130 ; 120 ; 260 ;  
 140 ; 110 ; 180 ; 120 ; 190 ; 200 ; 140 ; 240 ; 220 ; 280 ; 110 ; 110 ; 210 ; 140 ; 180 ; 160 ; 260 ; 210 ;  
 180 ; 200 ; 220 ; 190 ; 140 ; 210 ; 200 ; 280 ; 220 ; 340 ; 200 ; 430 ; 110 ; 280 ; 100 ; 270 ; 220 ; 140 ;  
 130 ; 80 ; 90 ; 180 ; 230 ; 170 ; 290 ; 170 ; 80 ; 120 ; 100 ; 240 ; 140 ; 170 ; 210 ; 200 ; 150 ; 190 ; 80  
 240 ; 140 ; 170 ; 160 ; 130 ; 230 ; 410 ; 220 ; 150  $\mu\text{m}$

$\bar{x}_{\text{mit}}$  = 192 Mikrometer  
 $s_{\text{sa}}$  = 78 Mikrometer

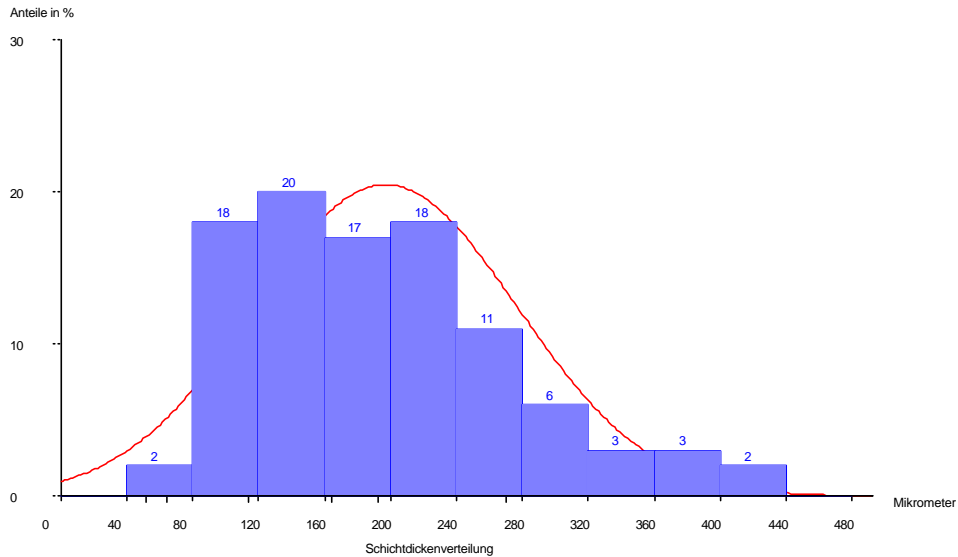


Bild 37: Rauheit A, Acrylat 2x gerollt, Mikroskopmessung

190 ; 200 ; 160 ; 210 ; 180 ; 200 ; 170 ; 220 ; 190 ; 210 ; 190 ; 200 ; 170 ; 180 ; 170 ; 160 ; 200 ; 220 ;  
 200 ; 190 ; 180 ; 190 ; 200 ; 170 ; 190 ; 210 ; 190 ; 150 ; 210 ; 180 ; 220 ; 180 ; 210 ; 220 ; 210 ; 220 ;  
 220 ; 190 ; 200 ; 190 ; 170 ; 200 ; 220 ; 210 ; 210 ; 180 ; 200 ; 210 ; 220 ; 190 ; 210 ; 220 ; 190 ; 230 ;  
 220 ; 200 ; 230 ; 210 ; 220 ; 210 ; 220 ; 200 ; 230 ; 190 ; 210 ; 180 ; 200 ; 170 ; 210 ; 190 ; 180 ; 200 ;  
 180 ; 170 ; 180 ; 200 ; 220 ; 180 ; 230 ; 160 ; 210 ; 170 ; 230 ; 180 ; 200 ; 230 ; 190 ; 200 ; 220 ; 210 ;  
 180 ; 190 ; 220 ; 210 ; 200 ; 190 ; 190 ; 200 ; 200 ; 170  $\mu\text{m}$

$\bar{x}_{\text{mit}}$  = 198 Mikrometer  
 $s_{\text{sa}}$  = 19 Mikrometer

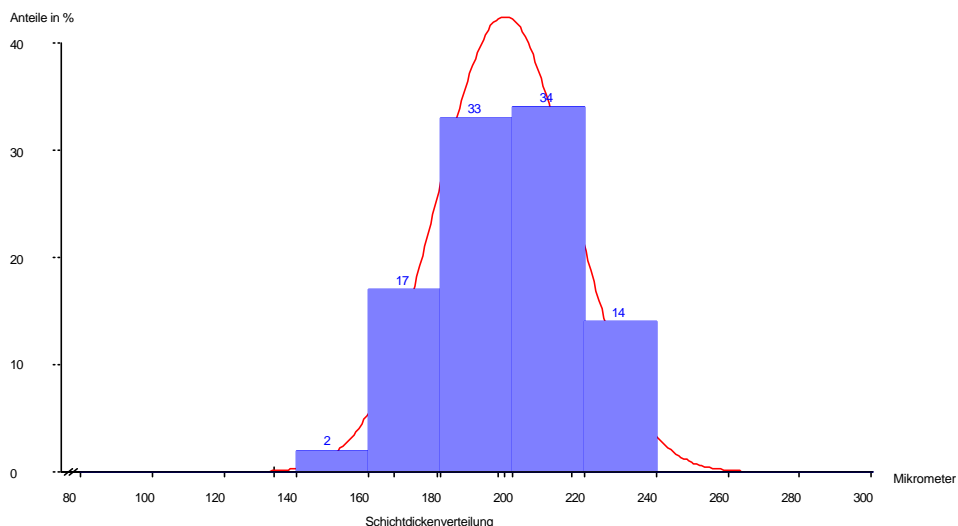


Bild 38: Rauheit B, Epoxid 2x airlessgespritzt, Mikroskopmessung

383 ; 343 ; 470 ; 165 ; 316 ; 345 ; 580 ; 251 ; 343 ; 532 ; 273 ; 467 ; 308 ; 596 ; 327 ; 497 ; 397 ; 534 ;  
 308 ; 453 ; 453 ; 348 ; 200 ; 429 ; 308 ; 421 ; 286 ; 318 ; 359 ; 426 ; 464 ; 413 ; 340 ; 399 ; 367 ; 283 ;  
 429 ; 289 ; 426 ; 567 ; 167 ; 486 ; 264 ; 235 ; 429 ; 402 ; 418 ; 181 ; 524 ; 297 ; 510 ; 337 ; 586 ; 586 ;  
 348 ; 229 ; 278 ; 184 ; 227 ; 194 ; 194 ; 580 ; 337 ; 486 ; 370 ; 529 ; 259 ; 332 ; 259 ; 478 ; 426 ; 440 ;  
 283 ; 383 ; 310 ; 532 ; 278 ; 289 ; 283 ; 194 ; 480 ; 251 ; 462 ; 356 ; 499 ; 381 ; 232 ; 232 ; 464 ; 175 ;  
 283 ; 235 ; 526 ; 391 ; 189 ; 599 ; 424 ; 462 ; 184 ; 289  $\mu\text{m}$

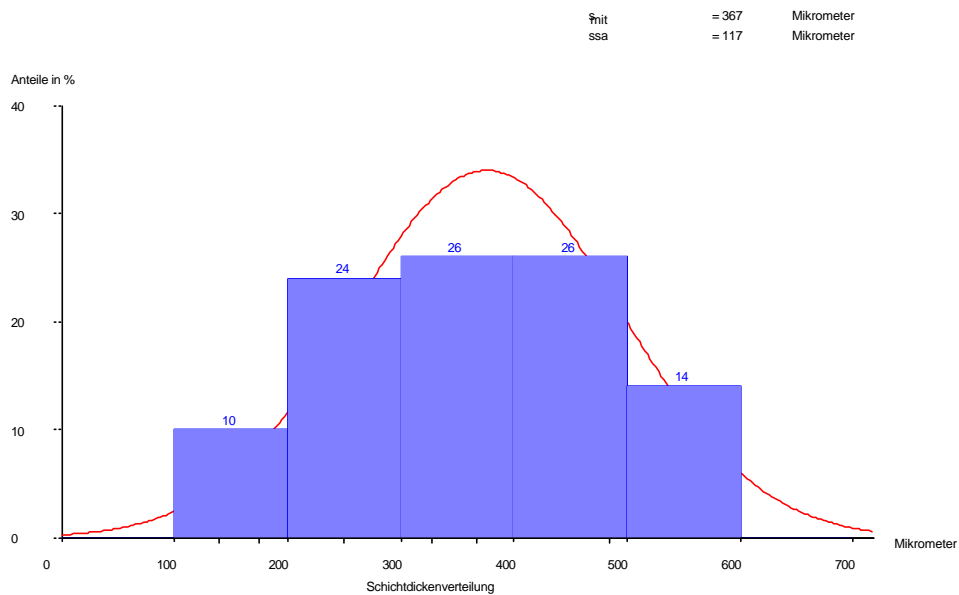


Bild 39: Rauheit A, Acrylat 2x gerollt, Ultraschallmessung

175 ; 189 ; 216 ; 219 ; 259 ; 221 ; 238 ; 219 ; 189 ; 283 ; 213 ; 211 ; 278 ; 197 ; 213 ; 165 ; 175 ; 308 ;  
 167 ; 227 ; 238 ; 208 ; 211 ; 221 ; 205 ; 208 ; 216 ; 240 ; 267 ; 213 ; 246 ; 224 ; 192 ; 232 ; 240 ; 248 ;  
 254 ; 238 ; 251 ; 200 ; 221 ; 259 ; 246 ; 297 ; 173 ; 216 ; 243 ; 246 ; 264 ; 251 ; 243 ; 273 ; 254 ; 238 ;  
 211 ; 286 ; 240 ; 178 ; 243 ; 221 ; 248 ; 289 ; 246 ; 246 ; 227 ; 243 ; 213 ; 192 ; 232 ; 219 ; 178 ; 248 ;  
 440 ; 194 ; 318 ; 197 ; 232 ; 248 ; 227 ; 235 ; 248 ; 238 ; 200 ; 370 ; 240 ; 273 ; 287 ; 291 ; 249 ; 219 ;  
 216 ; 248 ; 197 ; 240 ; 259 ; 332 ; 262 ; 308 ; 229 ; 189  $\mu\text{m}$

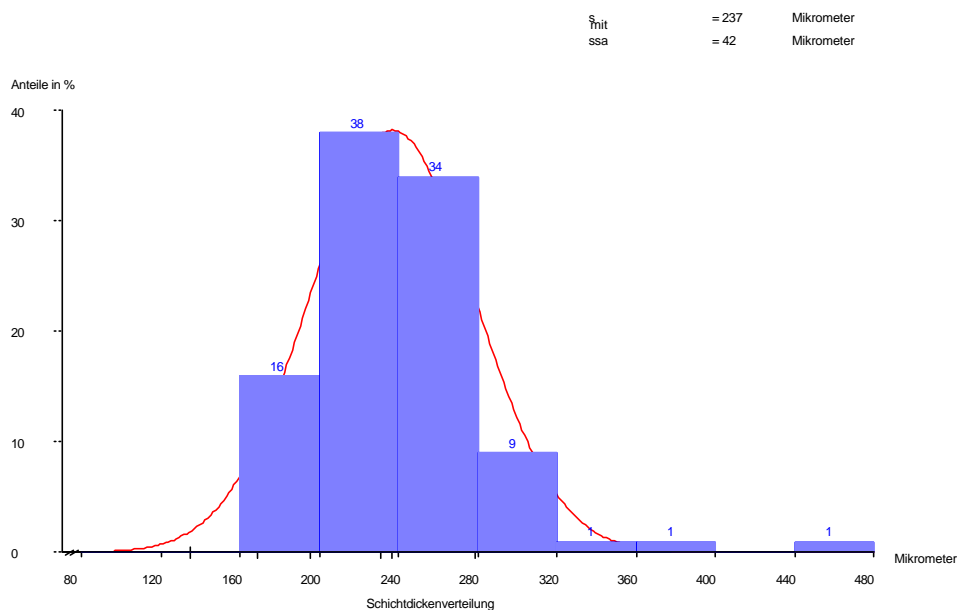


Bild 40: Rauheit B, Epoxid 2x airlessgespritzt, Ultraschallmessung

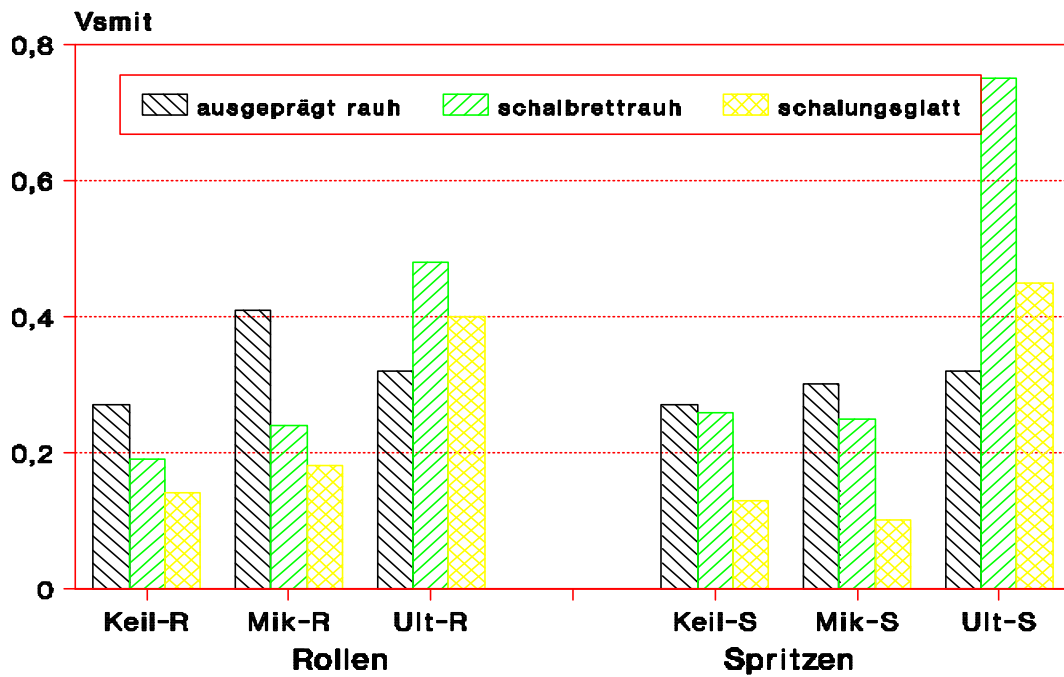


Bild 41: Acrylatbeschichtung auf Versuchsplatten  
Vergleich der Variationszahlen  $V_{smi}$

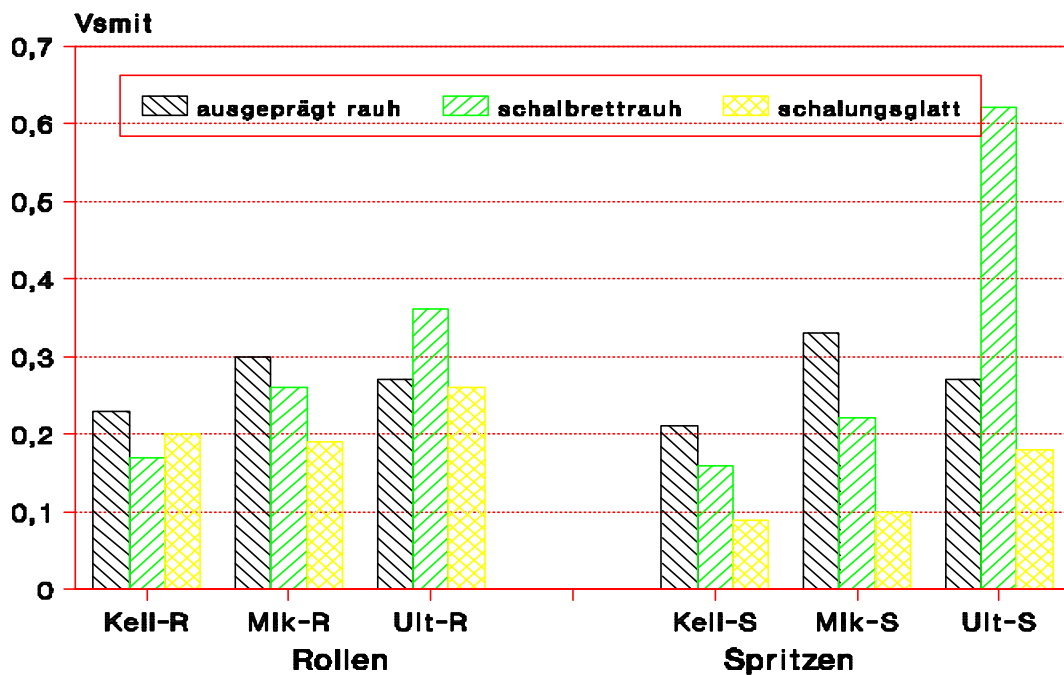


Bild 42: Epoxidbeschichtung auf Versuchsplatten  
Vergleich der Variationszahlen  $V_{smi}$

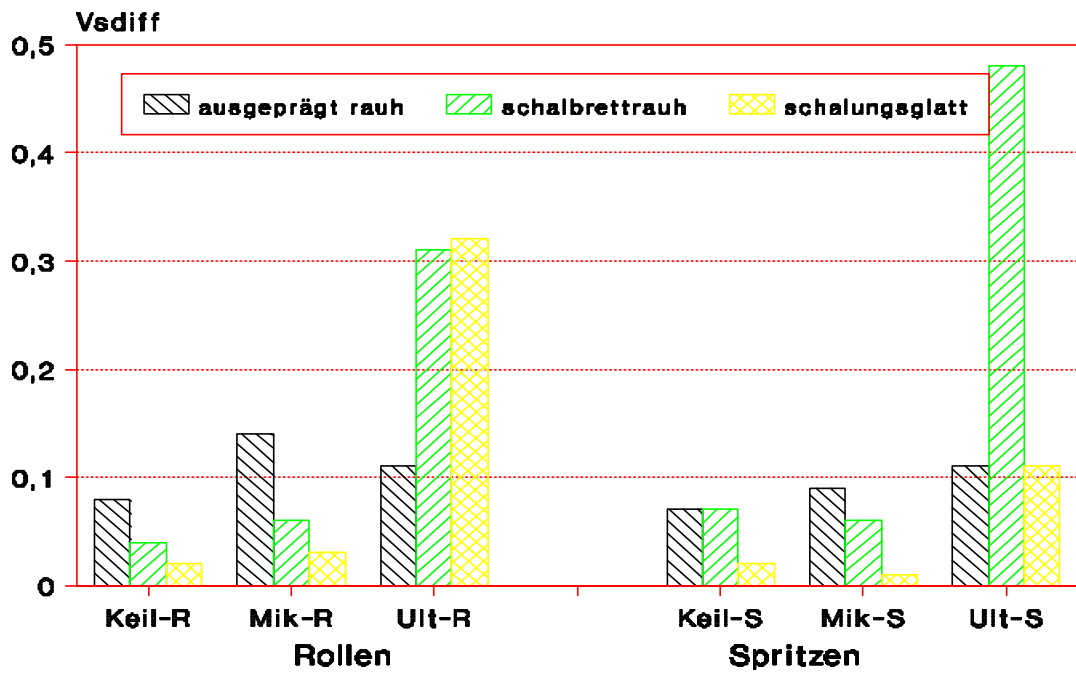


Bild 43: Acrylatbeschichtung auf Versuchsplatten  
Vergleich der Variationszahlen  $V_{s\text{diff}}$

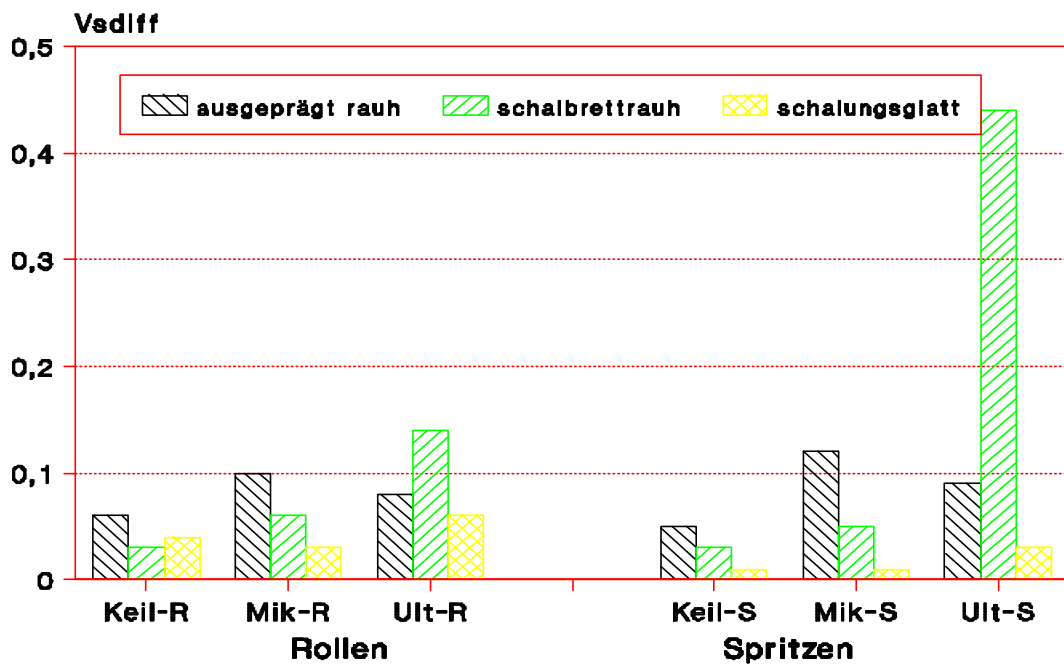


Bild 44: Epoxidbeschichtung auf Versuchsplatten  
Vergleich der Variationszahlen  $V_{s\text{diff}}$



$\bar{x}$  mit = 254 Mikrometer  
 ssa = 39 Mikrometer

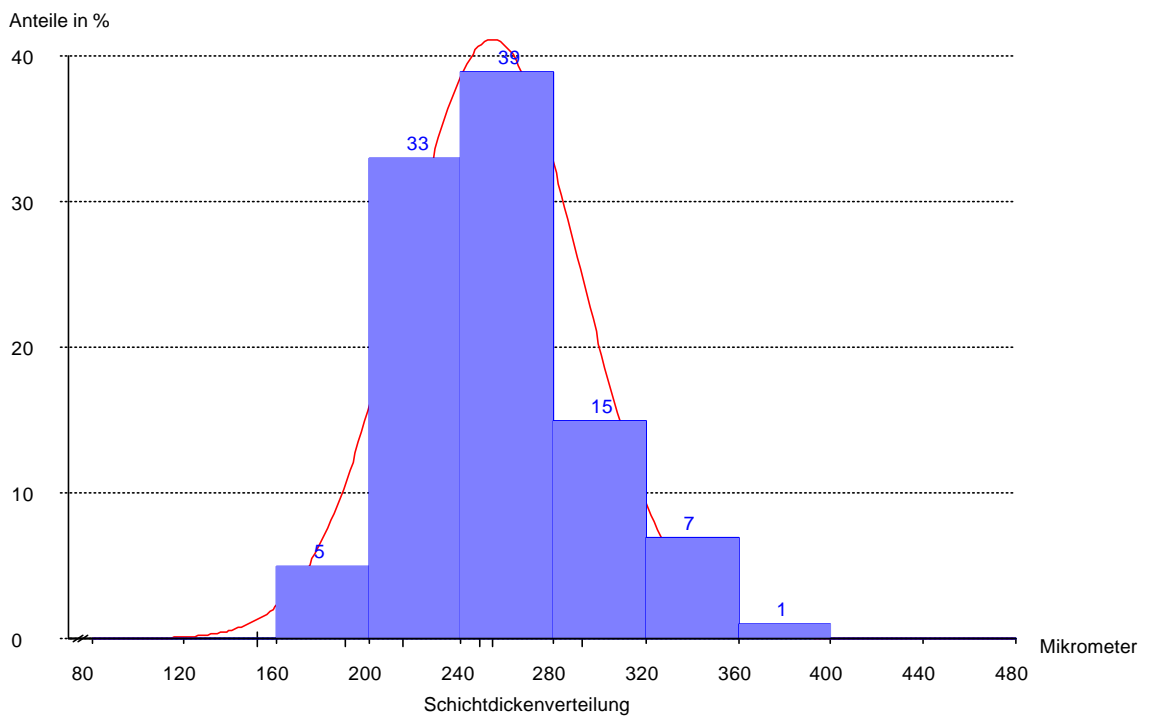


Bild 45: Schichtdickenergebnis Kühlturmaußenseite, OS B, PVC-Copolymer (2)

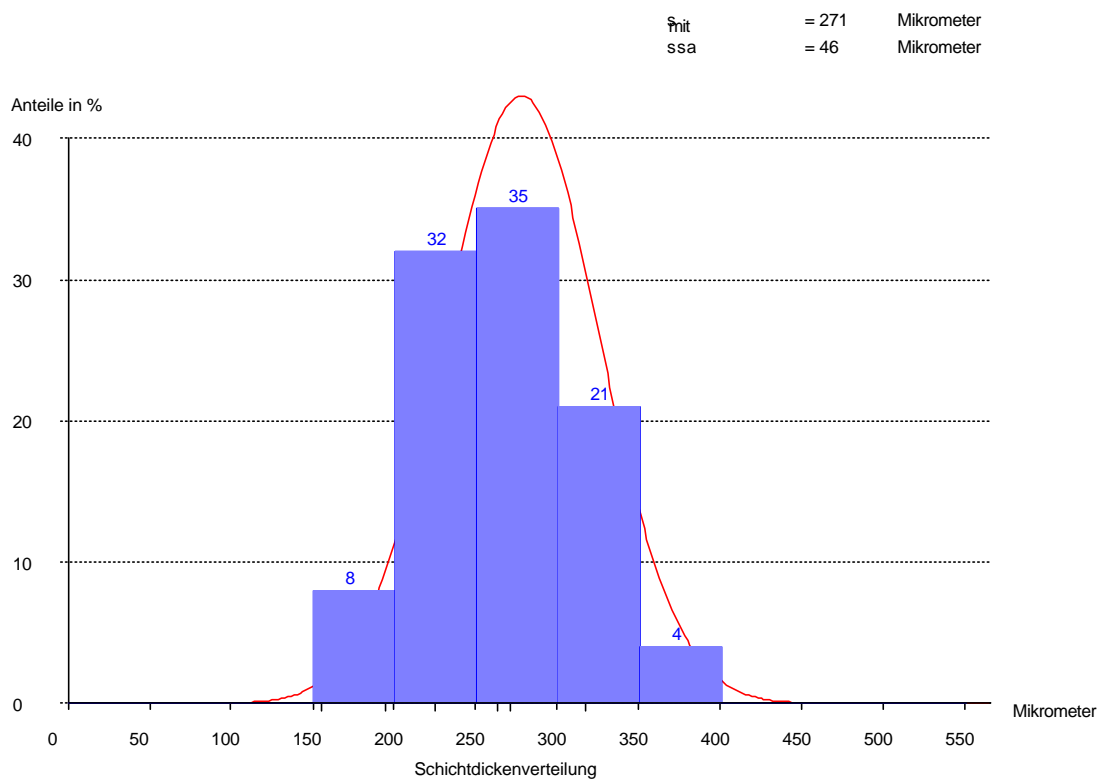


Bild 46: Schichtdickenergebnis Brückenüberbau, OS C, Acryldispersion (4)



$s_{mit}$  = 127 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 21 Mikrometer

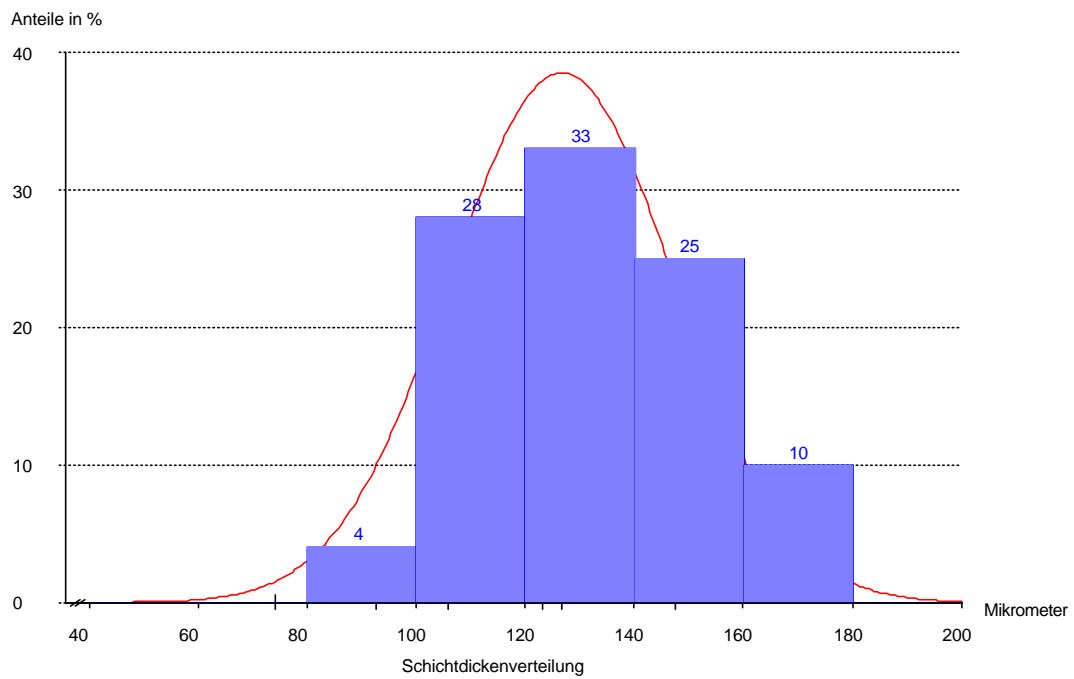


Bild 47: Schichtdickenergebnis Kegelschale Wasserturm, OS C, Acryldispersion (6)

$\bar{s}_{mit}$  = 194 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 59 Mikrometer

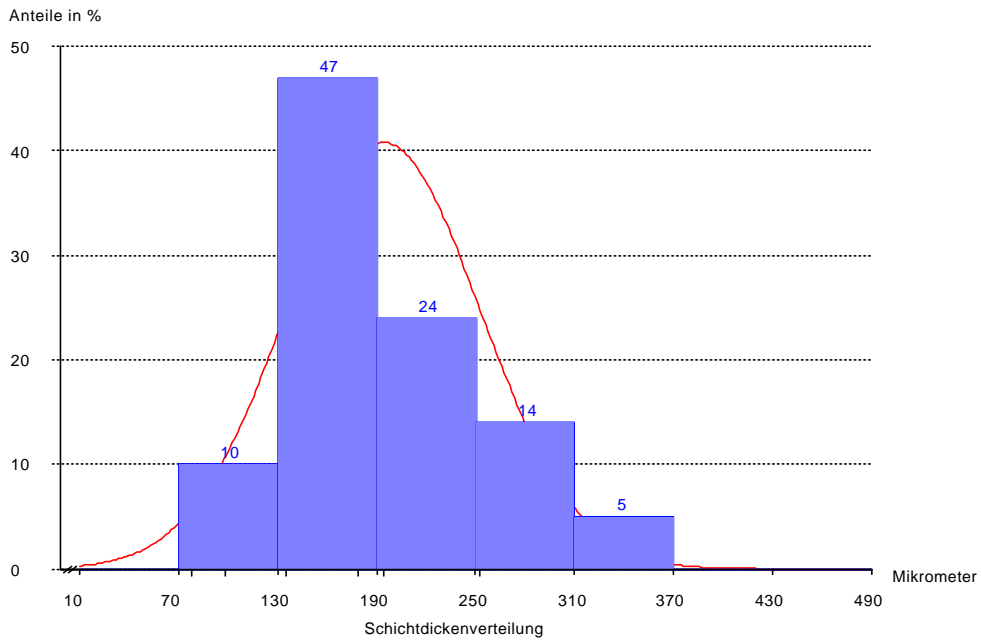


Bild 48: Schichtdickenergebnis Fernstraßentunnel, OS B, Epoxiddispersion (1)

$\bar{s}_{mit}$  = 2302 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 349 Mikrometer

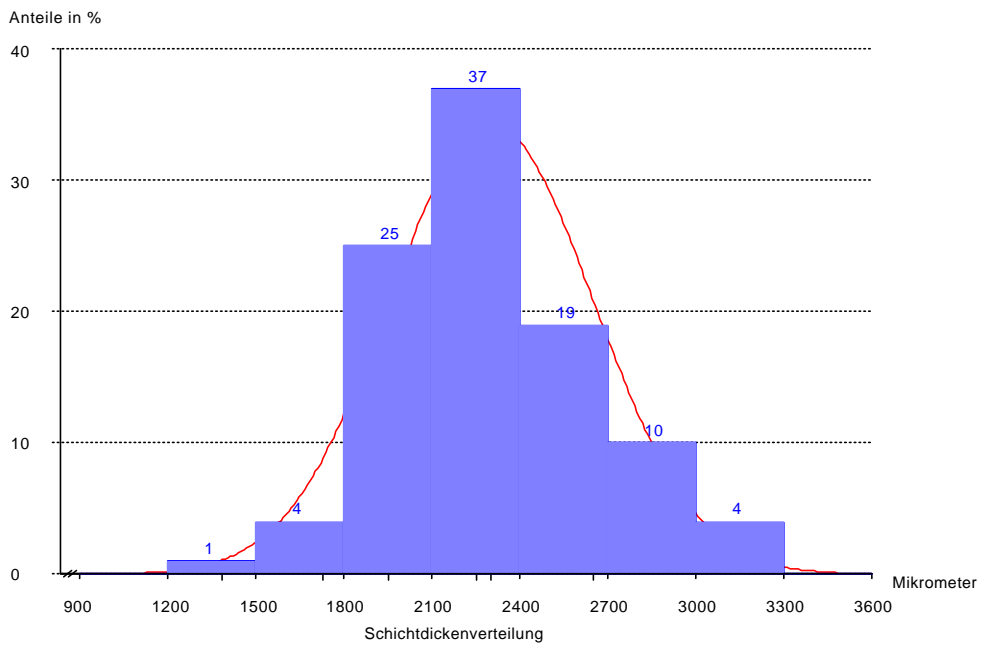


Bild 49: Schichtdickenergebnis BETOGLASS Halbzeug, OS DI, Polymer-Zement-Dispersion (7)





$s_{mit}$  = 482 Mikrometer  
 $s_{ssa}$  = 63 Mikrometer

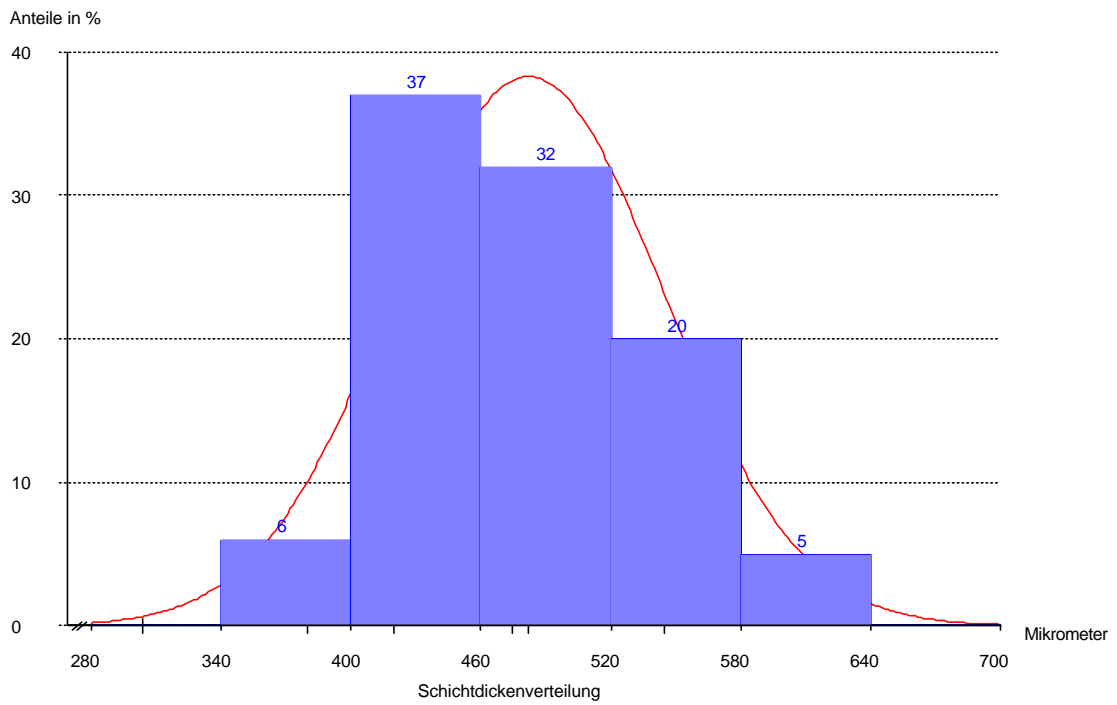


Bild 50: Schichtdickenergebnis Druckwasserreaktor, OS DII, Acryldispersion (9)



$s_{mit}$  = 1683 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 210 Mikrometer

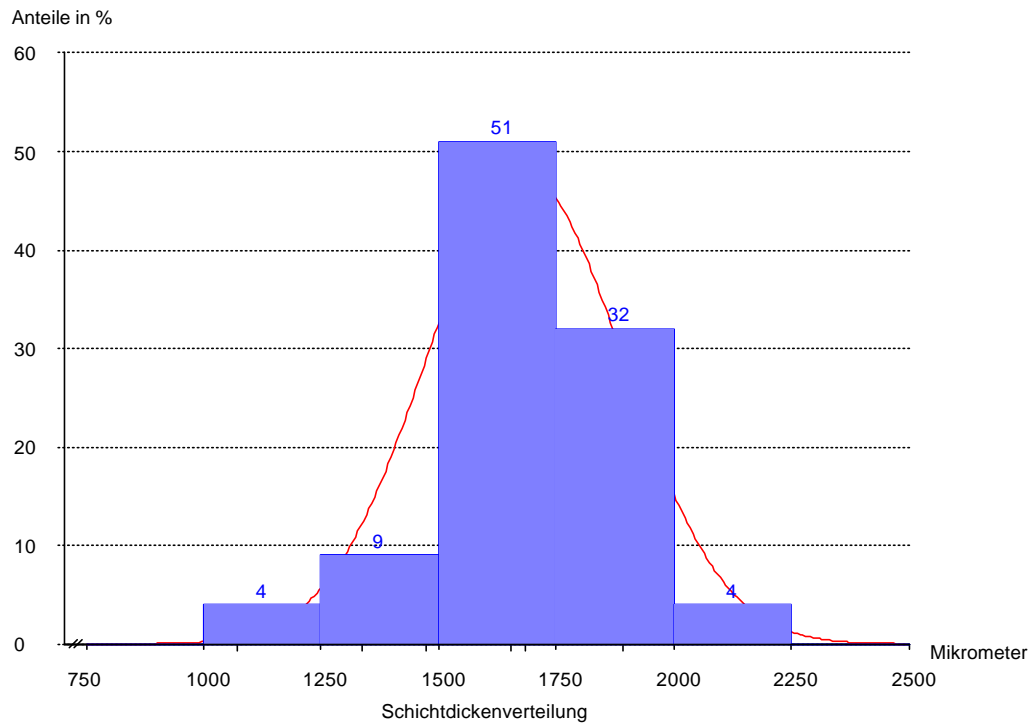


Bild 51: Schichtdickenergebnis Zwischendecke Parkhaus, OS F Aufbau a, Polyurethan (11)

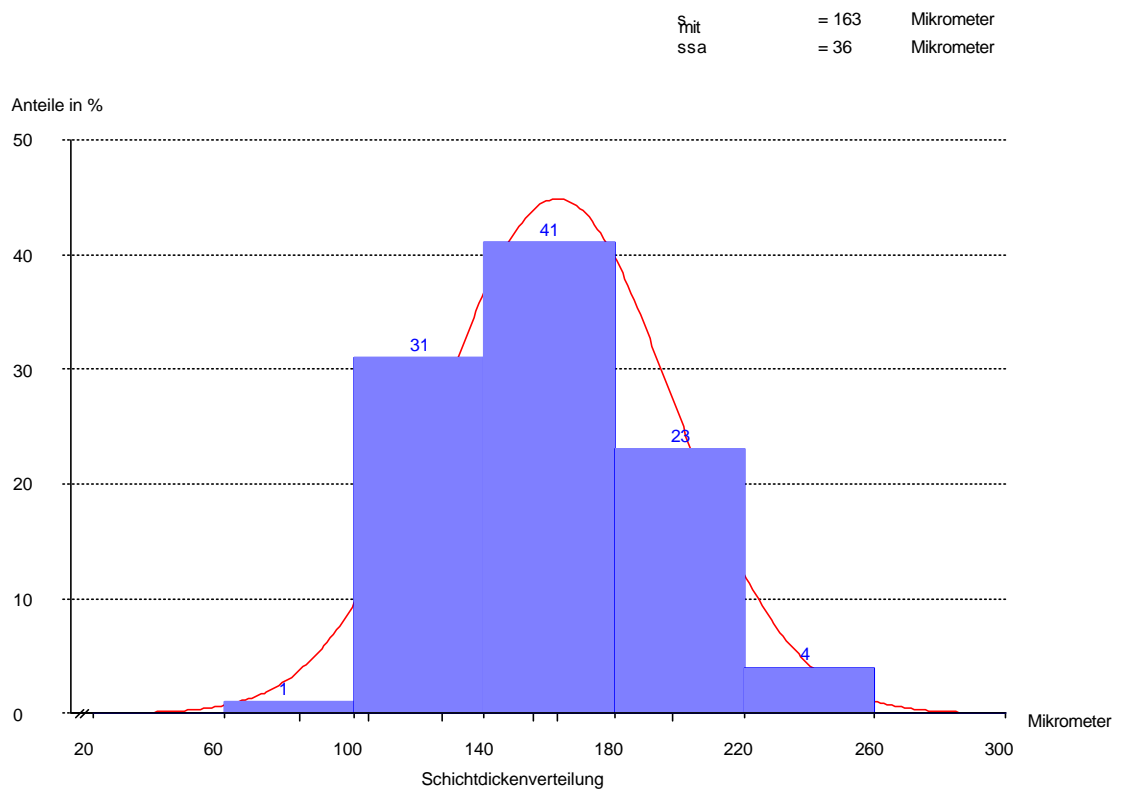


Bild 52: Schichtdickenergebnis Waschbetonfassade, OS 2, Acrylat gelöst (13)



$s_{mit}$  = 378 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 44 Mikrometer

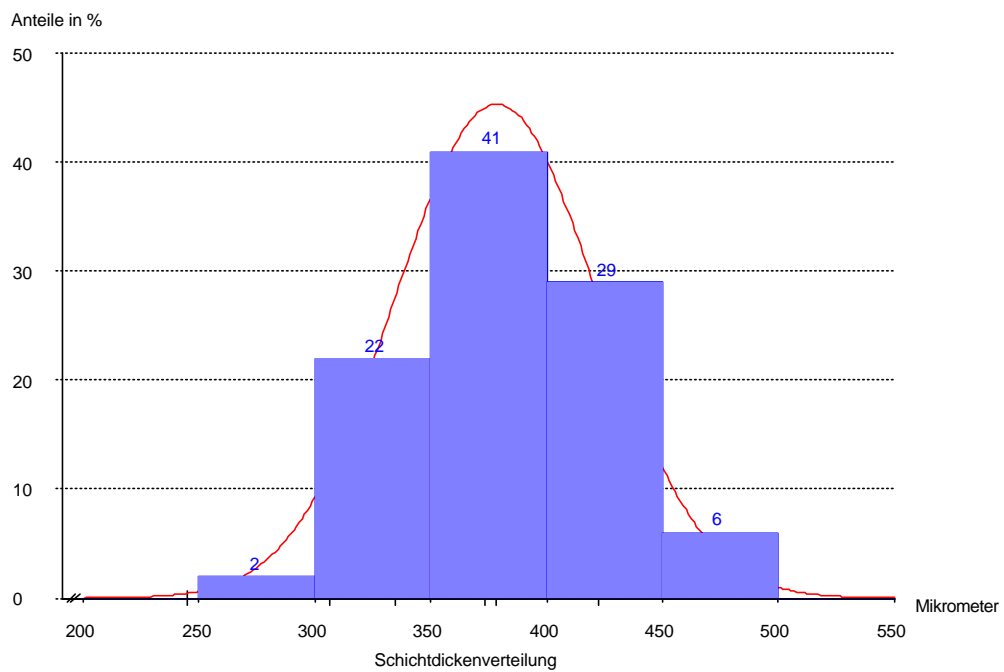


Bild 53: Schichtdickenergebnis Kühlturminnenseite, OS 6, Epoxid gelöst (15)

$\bar{s}_{mit}$  = 1653 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 477 Mikrometer

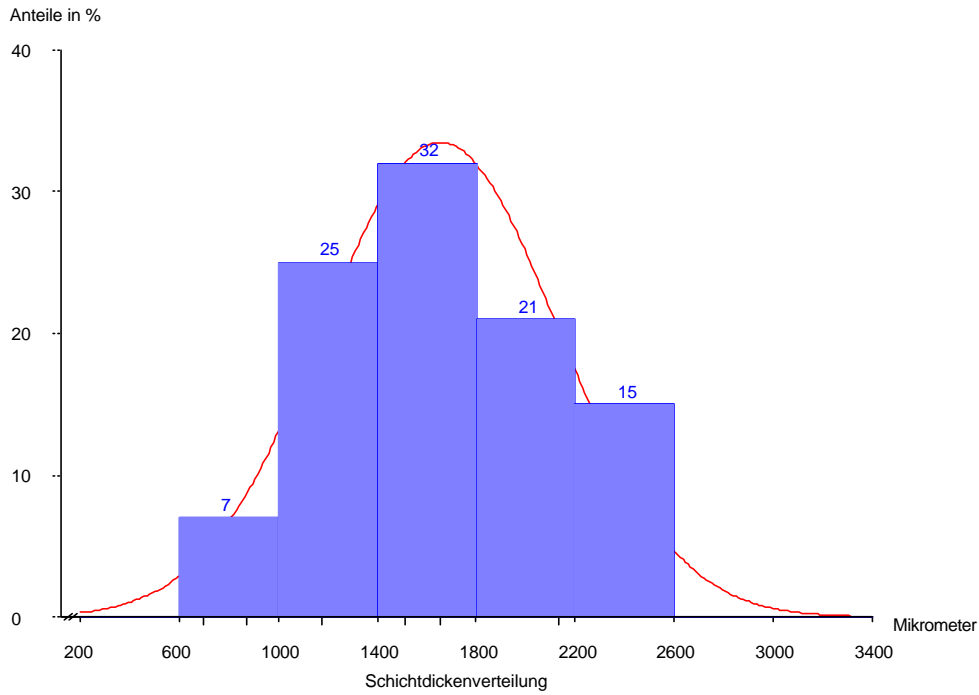


Bild 54: Schichtdickenergebnis Industriefußboden, OS 8, Epoxid lösemittelfrei (16)

$\bar{s}_{mit}$  = 1210 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 336 Mikrometer

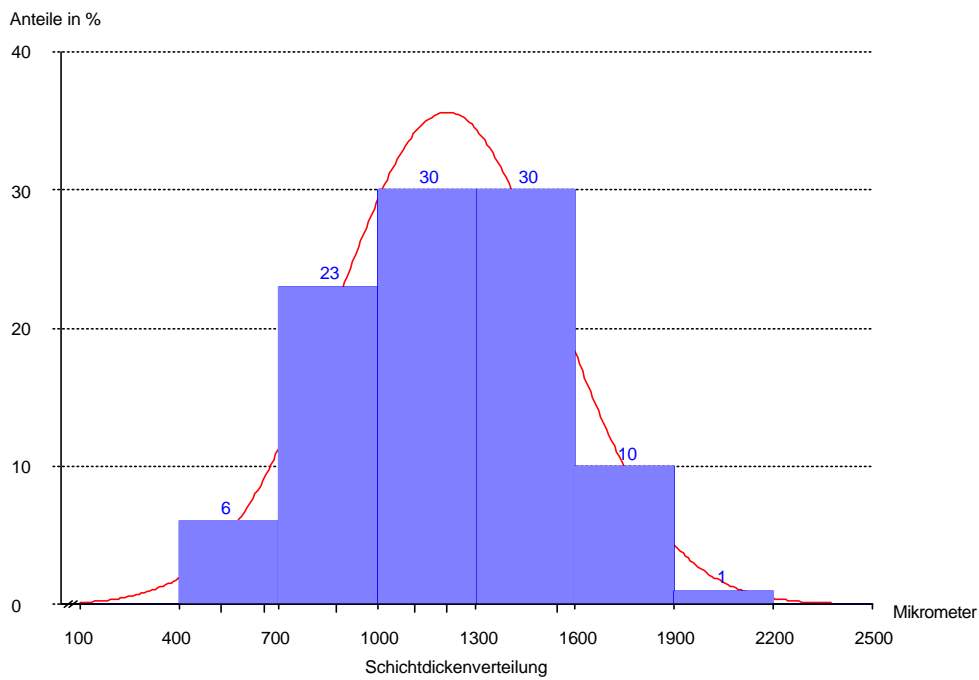
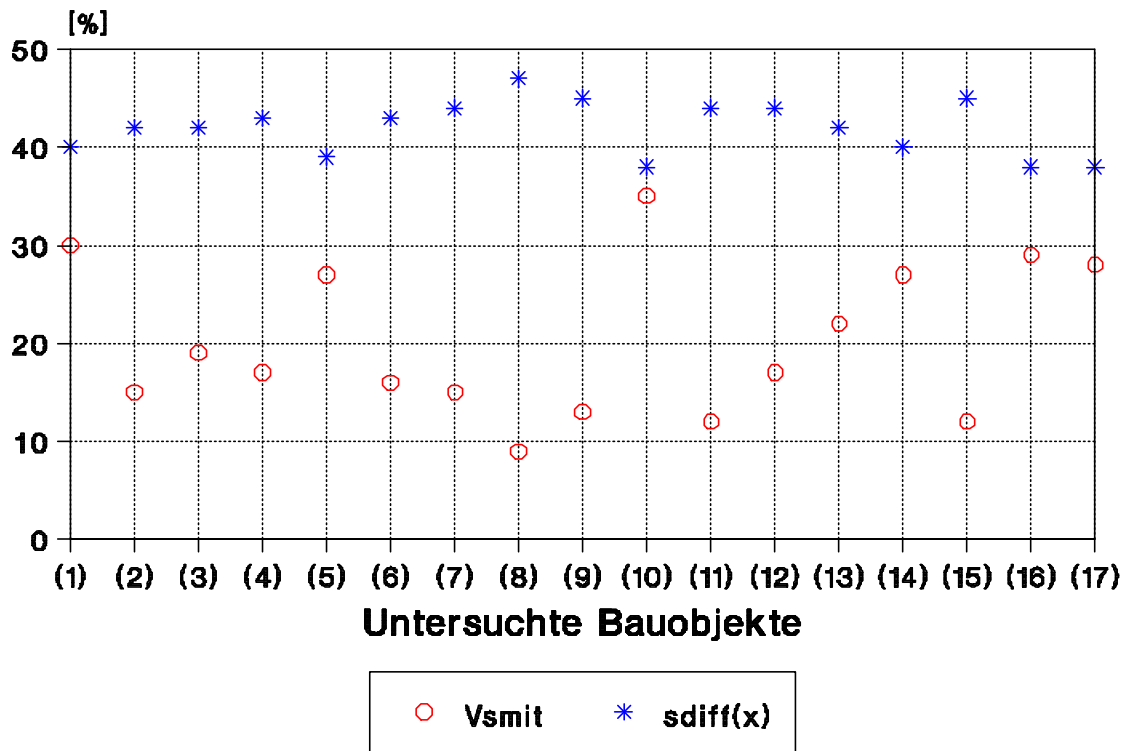


Bild 55: Schichtdickenergebnis Schornsteinmündung, OS 9, Polyurethan (17)



$V_{smit}$  : Variationszahl der Standardabweichung in der Definition  $ssa/s_{smit}$   
 $s_{diff}(x)$  : Fraktilwert der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicke  $s_{diff}$

Bild 56: Vergleich der Schichtdickenparameter an 17 realen Bauobjekten

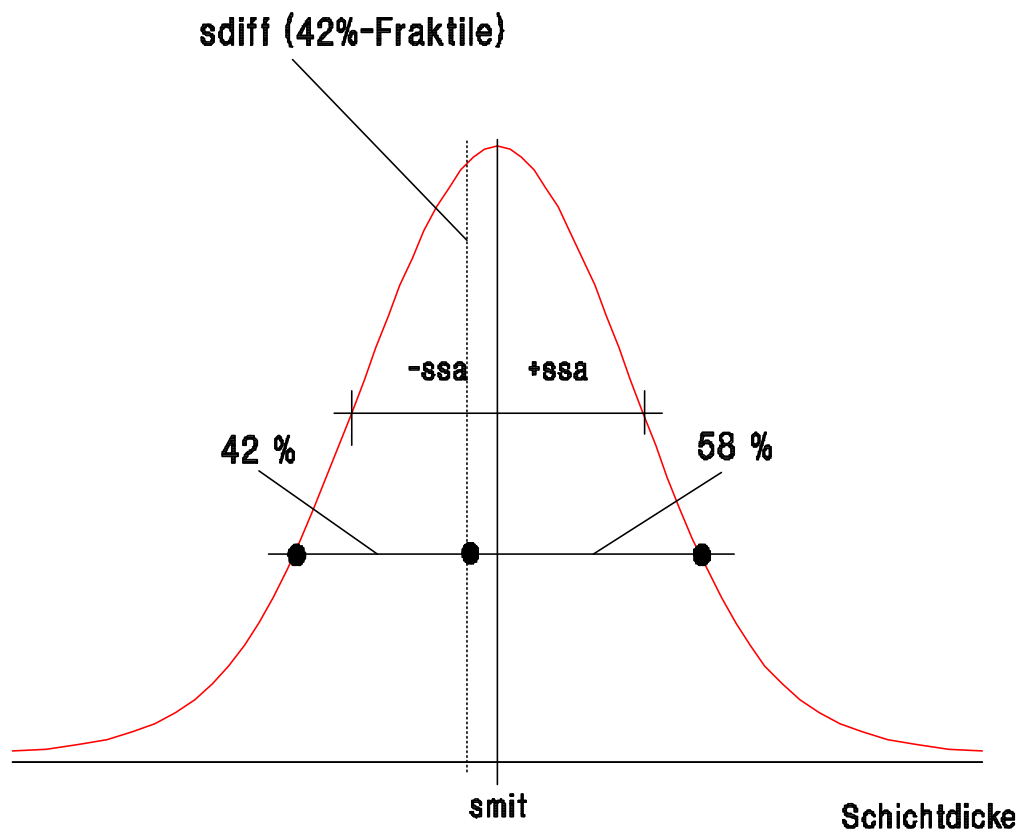


Bild 57: Lage des  $s_{diff}(x)$  42%-Fraktilwertes als mittlere Größe aus den Untersuchungen an realen Bauteilflächen

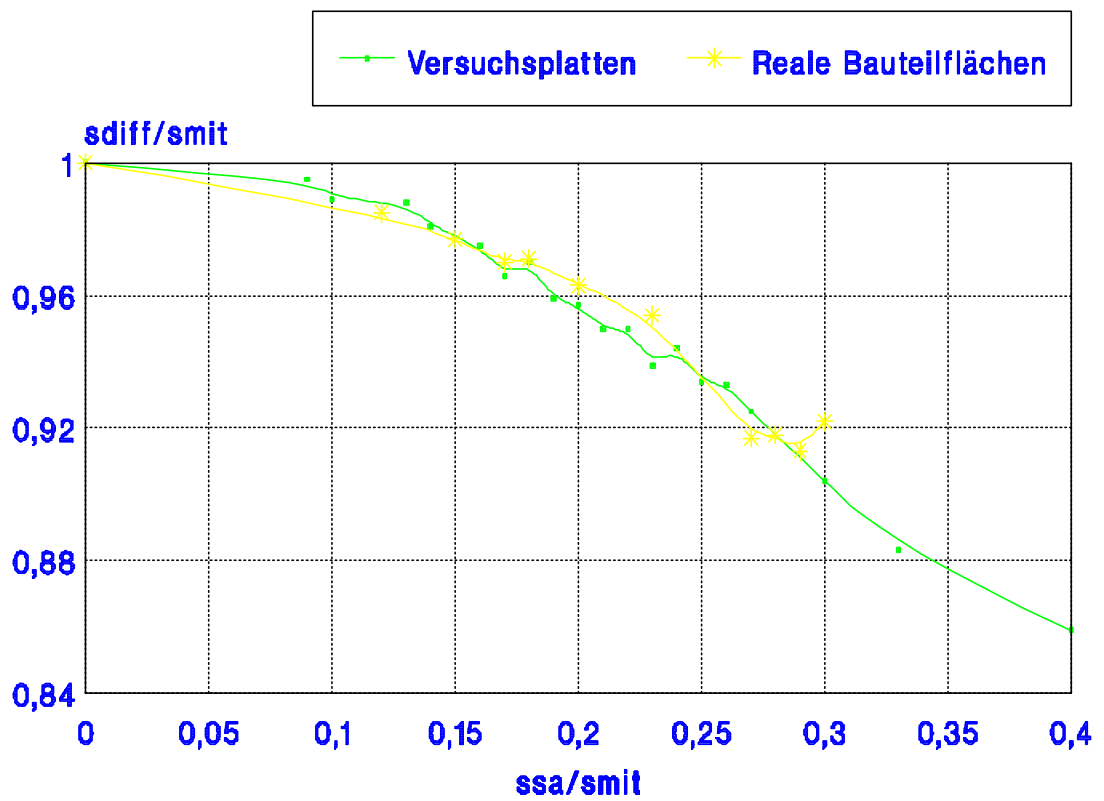


Bild 58: Zusammenhang zwischen der für Diffusionsvorgänge effektiven Schichtdicke  $s_{diff}$  und der Stichprobenstandardabweichung  $s_{sa}$ , jeweils bezogen auf die mittlere Schichtdicke  $s_{mit}$





Bild 59: Einbaufertiger mit 2 m breiter Zahnleiste aus 10 Zahnsegmenten

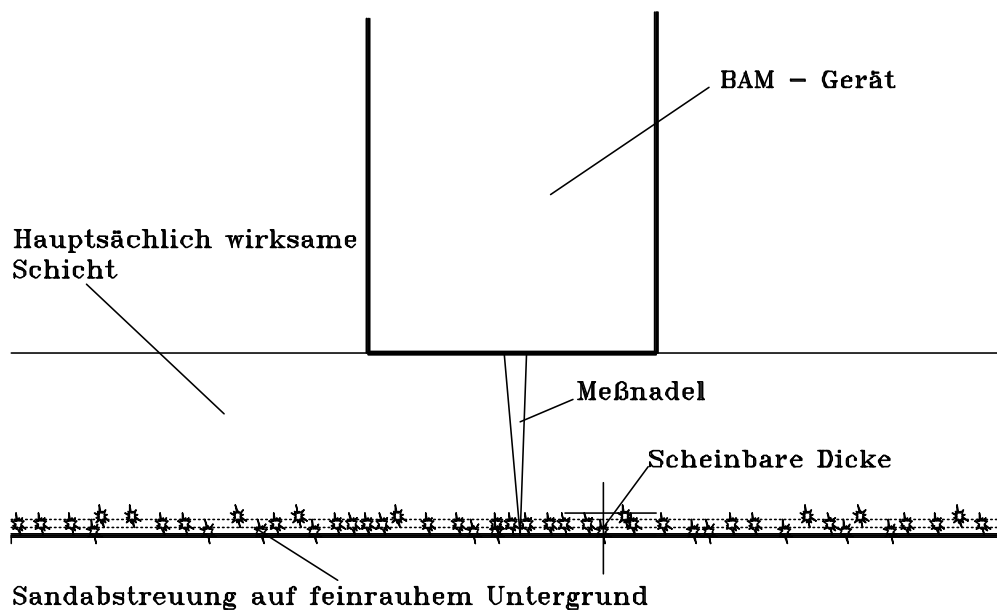


Bild 60: Meßunsicherheit *Scheinbare Dicke* bei BAM Differenzdickenmeßgerät

Parkhausbeschichtung, OS 11, Schwimmschicht  
 Messmethode Schieblehre an Spanprobe

$s_{mit}$  = 1733 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 195 Mikrometer

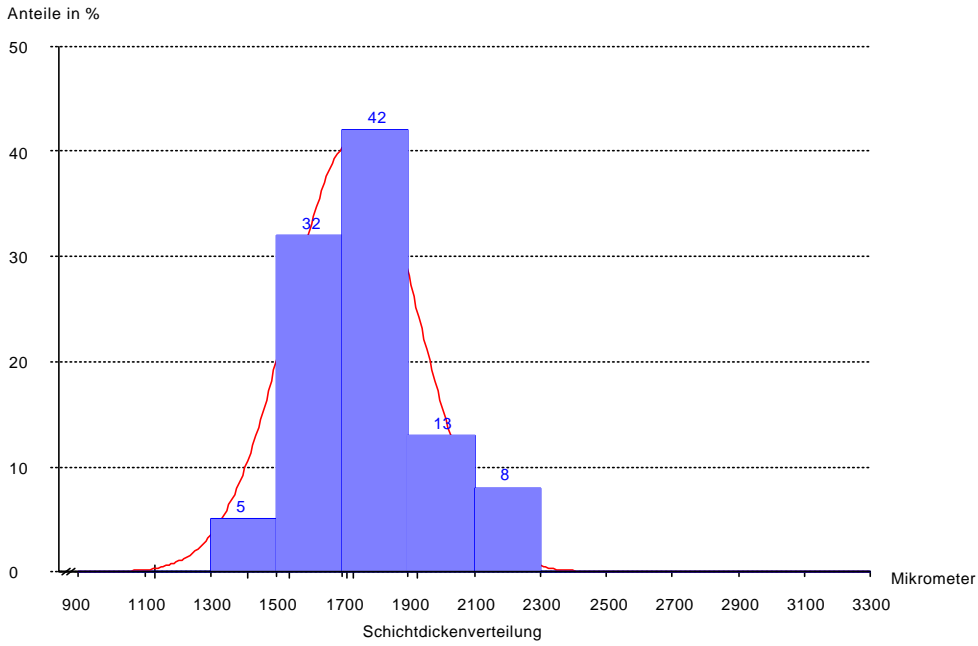


Bild 61: Schichtdickenergebnis aus der Messung an Spanproben

Parkhausbeschichtung, OS 11, Schwimmschicht  
 Messmethode BAM Differenzdickenmessgeraet

$s_{mit}$  = 2182 Mikrometer  
 $s_{sa}$  = 271 Mikrometer

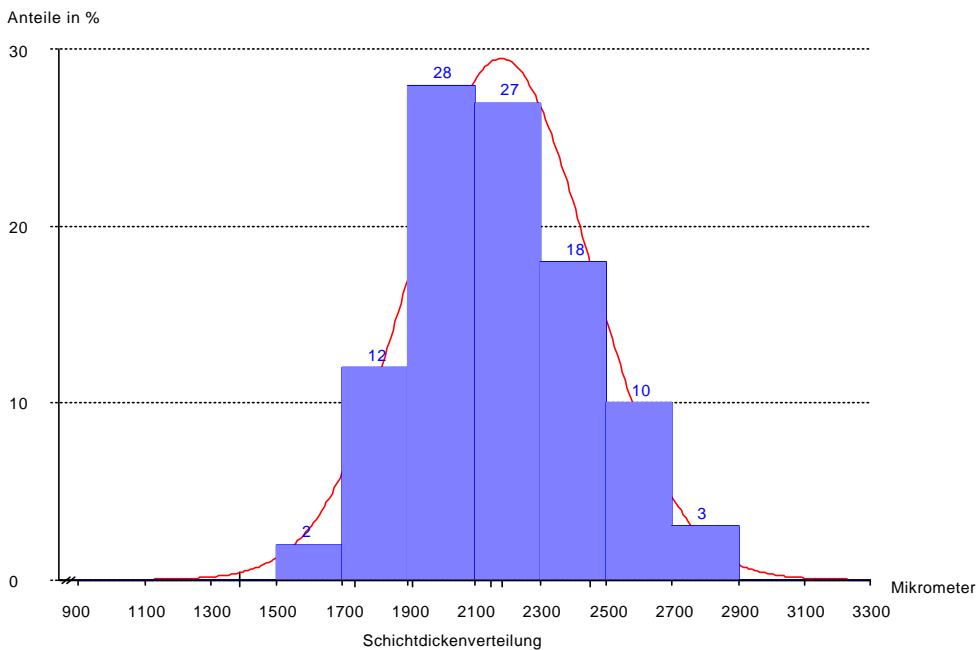


Bild 62: Schichtdickenergebnis aus der Messung mittels BAM Differenzdickenmeßgerät



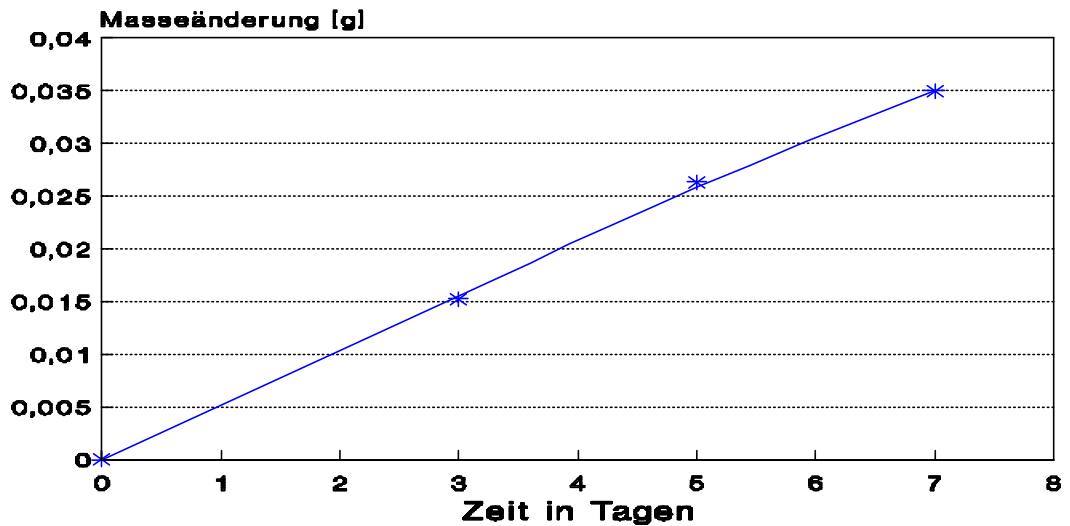
Bild 63: Rathausgebäude



Bild 64: Verwaltungsgebäude

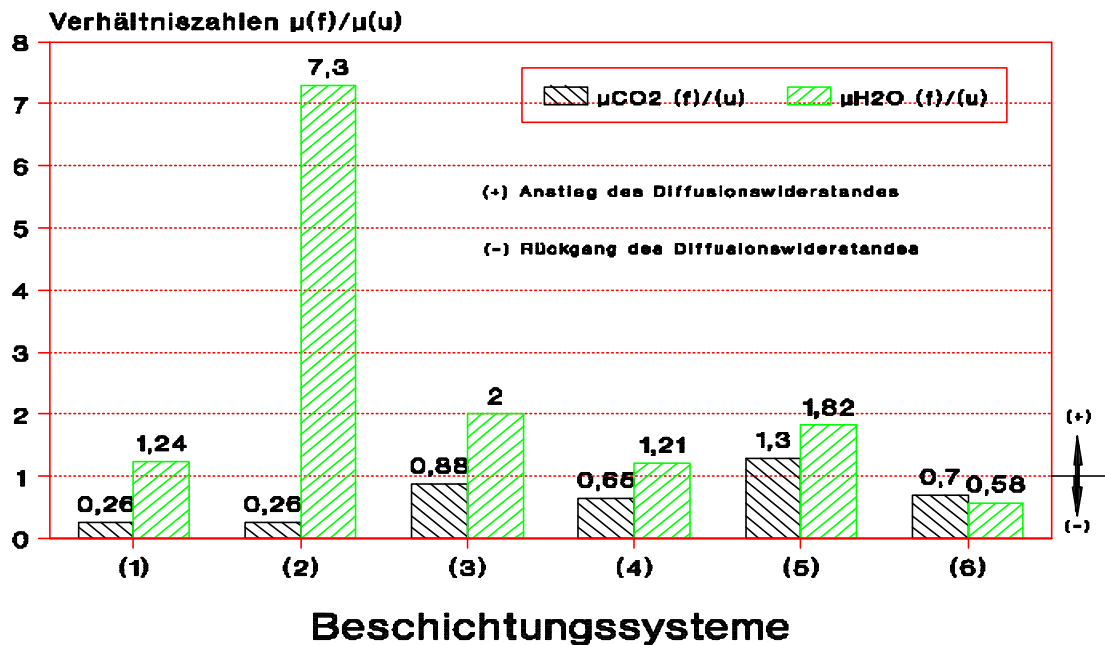


Bild 65: Fernsehturm



Massenstromdichte:  $i = 1,018 \text{ g/m}^2\text{-d}$ , Probendicke:  $s = 0,06 \text{ m}$ , Dreifachbestimmung  
 Anzahl der Wägungen: 4, Prüftemperatur:  $\vartheta = 22^\circ\text{C}$ , Diffusionswiderstand:  $R_{G,\text{CO}_2} = 250 \text{ m}$

Bild 66: Probe: Gelöstes Reinacrylat, 1 Jahr freibewittert  
 Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit auf Glasfritte



Legende: (f) = freibewitterte Beschichtung (u) = unbewitterte Beschichtung

Bild 67: Relative Änderung der Diffusionswiderstandszahlen, jeweils bezogen auf die bei Normalklima gelagerten, unbewitterten Beschichtungen

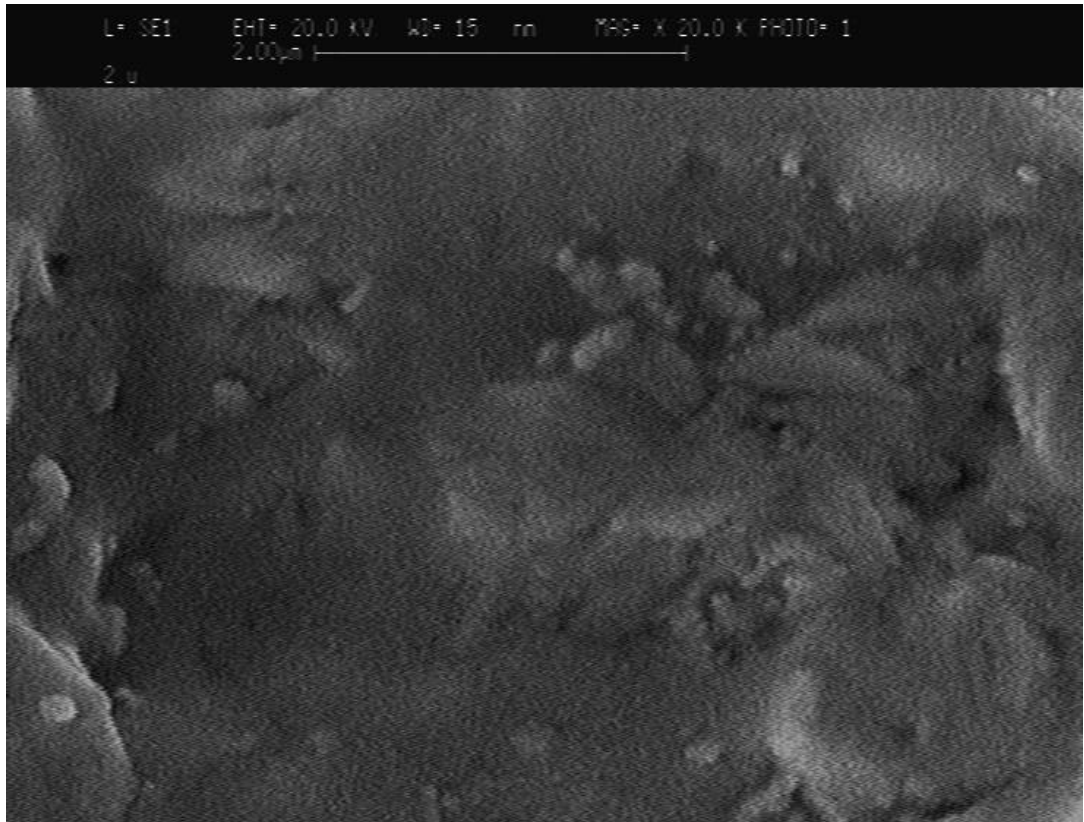


Bild 68: Beschichtungssystem 2, wässriges Reinacrylat, pigmentiert. 1 Jahr Lagerung beim Normalklima, Schnittfläche weist geschlossene Verfilmung auf.

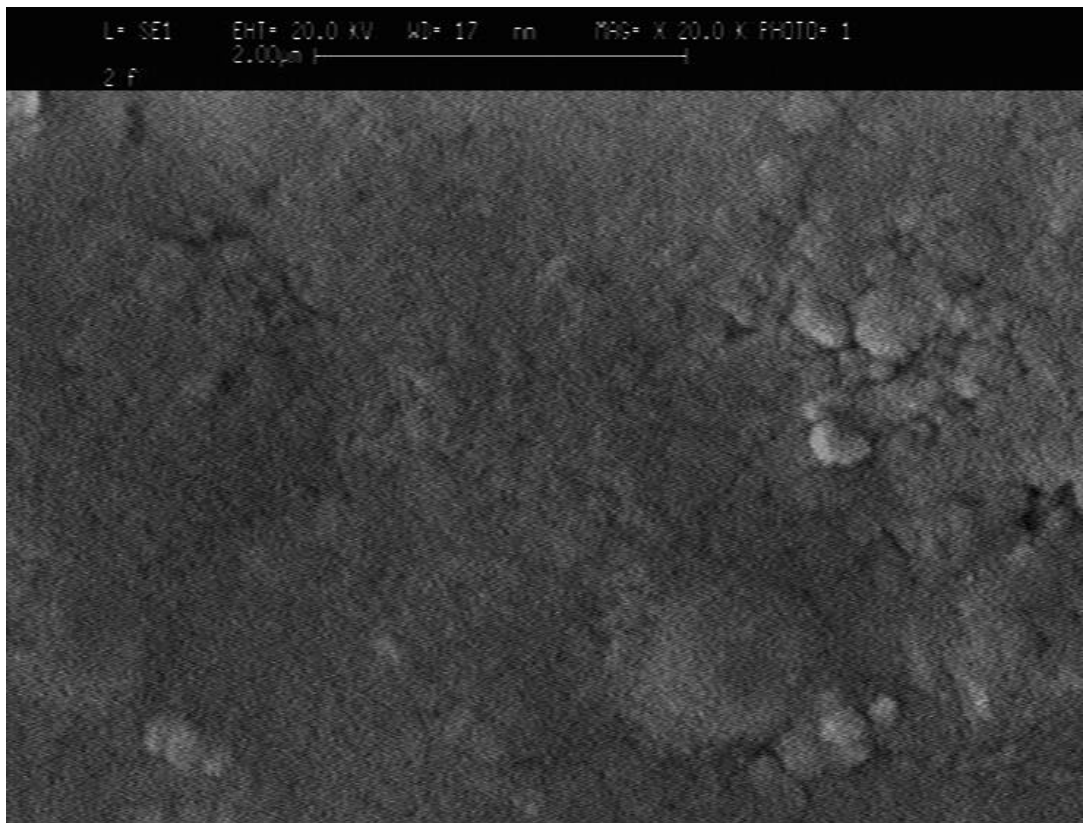


Bild 69: Beschichtungssystem 2, wässriges Reinacrylat, pigmentiert. 1 Jahr Kurzzeitalterung durch Freibewitterung, Schnittfläche weist partiell geöffnete Verfilmung auf.

Rißüberbrückungsklasse		Rißart	Prüfbedingungen
I <sub>T</sub>	gering	Vorhandene und nachträglich entstehende, oberflächennahe Risse, Rißbreite maximal 0,15 mm Rißbewegung unter Temperaturbeanspruchung bis 0,05 mm	$\vartheta_P$ = -20° C
			$w_{\vartheta,o}$ = 0,15 mm
			$w_{\vartheta,u}$ = 0,10 mm
			$n$ = 1000
			$\Delta w_{\vartheta}$ = 0,05 mm
			$f$ = 0,03 Hz
II <sub>T</sub>	erhöht	Vorhandene und nachträglich entstehende, oberflächennahe Risse und/oder Trennrisse, Rißbreite maximal 0,3 mm Rißbewegung unter Temperaturbeanspruchung bis 0,2 mm	$\vartheta_P$ = -20° C
			$w_{\vartheta,o}$ = 0,30 mm
			$w_{\vartheta,u}$ = 0,10 mm
			$n$ = 1000
			$\Delta w_{\vartheta}$ = 0,20 mm
			$f$ = 0,03 Hz
III <sub>T+V</sub>	erhöht	Vorhandene und nachträglich entstehende, oberflächennahe Risse und/oder Trennrisse, Rißbreite maximal 0,3 mm Rißbewegung unter Temperaturbeanspruchung bis 0,2 mm	$\vartheta_P$ = -20° C
			$w_{\vartheta,o}$ = 0,30 mm
			$w_{\vartheta,u}$ = 0,10 mm
			$n$ = 1000
			$\Delta w_{\vartheta}$ = 0,20 mm
			$f$ = 0,03 Hz
		Zusätzlich unter Temperatur- und Verkehrslastbeanspruchung	$\Delta w_v$ = 0,05 mm
			$n$ = 100000
			$f$ = 5 Hz

Legende:  $\vartheta$ : Temperatur    V: Verkehrslast    w: Rißbreite    f: Frequenz der Rißänderung     $\vartheta_P$ : Prüftemperatur    n: Anzahl der Rißwechsel  
 $w_{\vartheta,o}$ : obere Grenze der Rißöffnung     $w_{\vartheta,u}$ : untere Grenze der Rißöffnung     $\Delta w_v$ : verkehrslastbedingte Rißbreitenänderung  
 $\Delta w_{\vartheta}$ : temperaturbedingte Rißbreitenänderung

Tabelle 1: Prüfbedingungen für unterschiedliche Rißüberbrückungsklassen (ZTV-SIB 90, TP OS 1996)

	Probe	N-vert. K-S Test	Smit [ $\mu\text{m}$ ]	ssa [ $\mu\text{m}$ ]	V <sub>Smit</sub> [ -- ]	Smin [ $\mu\text{m}$ ]	Smax [ $\mu\text{m}$ ]	S <sub>diff</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	V <sub>Sdiff</sub> [ -- ]	S <sub>diff</sub> (x) [ % ]
(Bild 44)	Keil-ACR	ja	217	58	0,27	123	313	200	0,08	38
	Keil-SCR	ja	147	28	0,19	101	193	141	0,04	42
	Keil-BCR	ja	161	22	0,14	126	197	158	0,02	45
(Bild 46)	Mik-ACR	ja	192	78	0,41	64	320	165	0,14	36
	Mik-SCR	ja	143	34	0,24	88	199	135	0,06	41
	Mik-BCR	ja	136	24	0,18	97	175	132	0,03	43
(Bild 48)	Ult-ACR	ja	367	117	0,32	174	559	327	0,11	37
	Ult-SCR	ja	255	122	0,48	54	455	177	0,31	26
	Ult-BCR	ja	173	96	0,40	16	330	119	0,32	28
Acrylat n = 100	Keil-ACP	ja	242	65	0,27	136	350	224	0,07	39
	Keil-SCP	ja	224	58	0,26	129	319	209	0,07	40
	Keil-BCP	ja	179	22	0,13	144	215	177	0,02	45
Spritzen	Mik-ACP	nein	230	69	0,30	117	343	209	0,09	38
	Mik-SCP	ja	182	46	0,25	106	257	170	0,06	40
	Mik-BCP	ja	183	19	0,10	152	214	181	0,01	46
	Ult-ACP	ja	368	119	0,32	172	563	329	0,11	37
	Ult-SCP	nein	211	158	0,75	-48	470	110	0,48	26
	Ult-BCP	nein	83	37	0,45	23	144	74	0,11	40
Rollen	Keil-AJR	ja	248	58	0,23	152	343	233	0,06	40
	Keil-SJR	ja	206	36	0,17	146	265	199	0,03	43
	Keil-BJR	ja	163	33	0,20	109	217	156	0,04	42
	Mik-AJR	ja	240	72	0,30	122	358	217	0,10	38
	Mik-SJR	ja	165	43	0,26	95	236	155	0,06	40
	Mik-BJR	ja	152	29	0,19	104	200	146	0,03	43
	Ult-AJR	ja	425	114	0,27	238	612	391	0,08	38
	Ult-SJR	ja	349	126	0,36	142	556	299	0,14	35
	Ult-BJR	ja	246	63	0,26	143	349	232	0,06	41
Epoxid n = 100	Keil-AJP	ja	240	51	0,21	157	324	228	0,05	41
	Keil-SJP	ja	280	45	0,16	206	354	273	0,03	44
	(Bild 45) Keil-BJP	ja	220	19	0,09	189	251	219	0,01	46
Spritzen	Mik-AJP	ja	301	100	0,33	136	465	266	0,12	36
	Mik-SJP	ja	244	54	0,22	156	333	232	0,05	41
(Bild 47)	Mik-BJP	ja	198	19	0,10	167	229	196	0,01	46
(Bild 49)	Ult-AJP	ja	438	117	0,27	246	630	397	0,09	36
	Ult-SJP	nein	230	142	0,62	-4	463	129	0,44	24
	Ult-BJP	ja	237	42	0,18	168	306	231	0,03	44

Tabelle 2: Schichtdickenparameter der Versuchsplatten

Untersuchte Bauobjekte	Verifizierung der Vorgabe			Errechnete Parameter									
	$S_{min}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$< S_{min}$ [ % ]	$< 0,8 S_{min}$ [ % ]	n	N-vert. K-S Test	$S_{mit}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$s_{sa}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$V_{Smit}$ [ -- ]	$S_{min}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$S_{diff}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$V_{Sdiff}$ [ -- ]	$S_{diff}(X)$ [ % ]
(1) Fernstrassentunnel, OS B, Epoxiddispersion (R)	130	6	0	111	nein	194	59	0,30	98	291	179	0,08	40
(2) Kühlturm (alt) außen, OS B, PVC-Copolymer (R)	200	3	0	90	ja	254	39	0,15	190	318	248	0,02	42
(3) Kühlturm (neu) außen, OS B, PVC-Copolymer (R)	80	0	0	66	ja	136	26	0,19	94	179	131	0,04	42
(4) Brückenüberbau, OS C, Acryldispersion (R)	95	0	0	108	ja	271	46	0,17	195	346	263	0,03	43
(5) Schornstein, OS C, Acrylat gelöst (R)	200	2	0	198	ja	362	97	0,27	204	521	335	0,07	39
(6) Wasserturm, OS C, Acryldispersion (R)	80	0	0	69	ja	127	21	0,16	93	161	123	0,03	43
(7) BETOGLASS Halbzeug, OS DI, Polymer-CM (S) 1800	1800	5	0	80	ja	2302	349	0,15	1730	2874	2250	0,02	44
(8) Sichtbetonfassade, OS DII, Acryldispersion (R)	300	4	0	91	ja	343	33	0,09	290	397	340	0,01	47
(9) Druckwasserreaktor, OS DII, Acryldispersion (S)	400	3	0	60	ja	482	63	0,13	379	585	474	0,02	45
(10) Autobahnkappen, OS F a), Polyurethan (Z)	1500	0	0	20	ja	3510	1231	0,35	1491	5529	3132	0,11	38
(11) Parkhauszwischenendecke, OS F a), Polyurethan (Z)	1500	13	4	53	ja	1683	210	0,12	1338	2027	1655	0,02	44
(12) Parkhauszwischenendecke, OS F b), Polyurethan (Z)	3700	6	0	18	ja	4794	811	0,17	3465	6124	4660	0,03	44
(13) Waschbetonfassade, OS 2, Acrylat gelöst (R)	100	1	0	96	ja	163	36	0,22	104	222	155	0,05	42
(14) Kühlturm (alt) innen, OS 6, Epoxid gelöst (S)	160	55	27	126	nein	156	42	0,27	87	225	145	0,07	40
(15) Kühlturm (neu) innen, OS 6, Epoxid gelöst (S)	300	2	0	112	ja	378	44	0,12	306	450	373	0,01	45
(16) Industriefußboden, OS 8, Epoxid lösemittelfrei (Z)	1000	7	1	85	ja	1653	477	0,29	871	2435	1510	0,09	38
(17) Schornsteinmündung, OS 9, Polyurethan (S)	1000	29	15	96	ja	1210	336	0,28	659	1761	1111	0,08	38

(R): Applikation durch Rollen → Schichtdickenmessung: Keilschnittverfahren

(S): Applikation durch Airless-Spritzen → Schichtdickenmessung: Keilschnittverfahren (Ausnahme: Objekt 17, dort Spanprobe + Mikrometerschraube)

(Z): Applikation durch Zahnkelle → Schichtdickenmessung: Spanprobe + Mikrometerschraube

Tabelle 3: Ergebnisse von Schichtdickenmessungen an realen Bauobjekten



## Beschichtungsverfahren

Parameter	Zahnkelle mit der Hand geführt						Zahnkelle am Einbaufertiger						
	Meßserien					Mittelwert	Meßserien					Mittelwert	
	a	b	c	d	e		a	b	c	d	e		
n	[-]	30	40	40	50	50	--	18	53	81	61	60	--
S <sub>mit</sub>	[µm]	1542	1733	1761	1674	1785	1699	1586	1683	1483	1400	1103	1442
ssa	[µm]	197	195	259	426	287	273	204	210	308	223	223	234
V <sub>Smit</sub>	[-]	0,11	0,11	0,15	0,25	0,16	0,156	0,13	0,12	0,21	0,16	0,20	0,164
S <sub>min</sub>	[µm]	1219	1414	1337	976	1315	1252	1252	1338	933	1035	737	1059
S <sub>max</sub>	[µm]	1864	2052	2185	2372	2256	2146	1920	2028	1943	1765	1469	1825
S <sub>diff</sub>	[µm]	1518	1713	1726	1581	1744	1656	1562	1655	1364	1363	1055	1400
S <sub>diff(x)</sub>	[%]	45	46	45	41	44	44	45	44	40	43	42	43
V <sub>Sdiff</sub>	[-]	0,02	0,01	0,02	0,05	0,02	0,024	0,02	0,02	0,05	0,03	0,04	0,032

Tabelle 4: Vergleich der Schichtdickenparameter zwischen handgeführter und maschineller Fertigung einer rißüberbrückenden Parkdeckbeschichtung System OS 11 (RILI SIB)

Untersuchte Bauobjekte	Mittlere Schichtdicke	Variationszahl	Standardabweichung			Verlustzuschlag			Rauheitszuschlag
	Smit [ μm ]	V <sub>Smit</sub> [ -- ]	(R)	ssa [ μm ] (S)	(Z)	(R)	α [ -- ] (S)	(Z)	β [ -- ]
(1) Fernstrassentunnel, OS B, Epoxiddispersion	194	0,3 (0,15 ... 0,3)	59	(45)	---*	0,03	(0,05)	---	0,1 (0,1 ... 0,2)
(2) Kühlturm (alt) außen, OS B, PVC-Copolymer	254	0,15 (0,1 ... 0,25)	39	(35)	---	0,03	(0,1)	---	0,3 (0,2 ... 0,3)
(3) Kühlturm (neu) außen, OS B, PVC-Copolymer	136	0,19 (0,1 ... 0,25)	26	(32)	---	0,02	(0,1)	---	0,2 (0,1 ... 0,2)
(4) Brückenüberbau, OS C, Acryldispersion	271	0,17 (0,1 ... 0,2)	46	(42)	---	0,02	(0,05)	---	0,1 (0,1 ... 0,15)
(5) Schornstein, OS C, Acrylat gelöst	362	0,27 (0,1 ... 0,3)	97	(75)	---	0,03	(0,1)	---	0,1 (0,1 ... 0,15)
(6) Wasserturm, OS C, Acryldispersion	127	0,16 (0,1 ... 0,2)	21	(18)	---	0,03	(0,1)	---	0,1 (0,1 ... 0,15)
(7) BETOGLASS Halbzeug, OS DI, Polymer-CM	2302	0,15 (0,15 ... 0,25)	---	349	---	---	0,05	---	0
(8) Sichtbetonfassade, OS DII, Acryldispersion	353	0,09 (0,1 ... 0,2)	33	(32)	---	0,03	(0,05)	---	0,1 (0,1 ... 0,15)
(9) Druckwasserreaktor, OS DII, Acryldispersion	482	0,13 (0,1 ... 0,2)	(63)	53	---	(0,03)	0,05	---	0,1 (0,1 ... 0,15)
(10) Autobahnkappen, OS F a), Polyurethan	3510	0,35 (0,1 ... 0,2)	---	---	1231	---	---	0,01	0,2 (0,15 ... 0,25)
(11) Parkhauszwischenendecke, OS F a), Polyurethan	1683	0,12 (0,1 ... 0,2)	---	---	210	---	---	0,01	0,2 (0,15 ... 0,25)
(12) Parkhauszwischenendecke, OS F b), Polyurethan	4794	0,17 (0,1 ... 0,25)	---	---	811	---	---	0,01	0,2 (0,15 ... 0,25)
(13) Waschbetonfassade, OS 2, Acrylat gelöst	163	0,22 (0,15 ... 0,25)	36	---	---	0,02	---	---	0,78 (0,5 ... 1,5)
(14) Kühlturm (alt) innen, OS 6, Epoxid gelöst	156	0,27 (0,15 ... 0,3)	(42)	40	---	(0,03)	0,1	---	0,5 (0,3 ... 0,6)
(15) Kühlturm (neu) innen, OS 6, Epoxid gelöst	378	0,12 (0,1 ... 0,25)	(44)	40	---	(0,03)	0,1	---	0,1 (0,1 ... 0,15)
(16) Industriefußboden, OS 8, Epoxid lösemittelfrei	1653	0,29 (0,2 ... 0,3)	(470)	---	477	(0,01)	---	0,01	0,2 (0,15 ... 0,25)
(17) Schornsteinmündung, OS 9, Polyurethan	1210	0,28 (0,2 ... 0,3)	336	(305)	---	0,02	(0,1)	---	0,1 (0,1 ... 0,15)

(R): Applikation durch Rollen  
(S): Applikation durch Airless-Spritzen  
(Z): Applikation durch Zahnkelle

\* alle ---: nicht zutreffend  
Zahlenwerte ohne Klammer: objektbezogen  
Zahlenwerte in Klammern: Mittelwert bzw. Schwankungsbreite für Anwendungsbereich

Tabelle 5: Parameter bzw. Parameterbereiche für die Bemessung von Schichtdicken

Beschichtung / Bauobjekt / Alterung	Schichtdicke $s_{mit}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Diffusionswiderstandszahl $\mu_{CO_2}$ [ -- ]
A Reinacrylat, ehemals gelöst OS C / Rathausgebäude Bild 72, 12 Jahre freibewittert	50	48.500
B Äthylen-Copolymer OS DII / Verwaltungsgebäude Bild 73, 12 Jahre freibewittert	160	168.700
C Äthylen-Copolymer OS DII / Fernsehturm Bild 74, 14 Jahre freibewittert	260	263.800

Tabelle 6: Daten und Prüfergebnisse zum CO<sub>2</sub>- Diffusionswiderstand von Beschichtungen nach Langzeitalterung

Beschichtung / Bauobjekt / Alterung	Schichtdicke $s_{mit}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Prüftemperatur $\vartheta$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Rißweitenänderung $\Delta w$ [ $\mu\text{m}$ ]	Prüfresultat
B Acryl-Copolymer OS DII / Verwaltungsgebäude Bild 73, 12 Jahre freibewittert	160	20	50	Kein Versagen nach 1000 Dehnwechseln
		-10	50	Nach wenigen Dehnwechseln durchgerissen
C Äthylen-Copolymer OS DII / Fernsehturm Bild 74, 14 Jahre freibewittert	260	20	50	Kein Versagen nach 1000 Dehnwechseln
		-10	50	Kein Versagen nach 1000 Dehnwechseln
		-10	200	Erster Anriß nach 25 Dehnwechseln Nach 58 Dehnwechseln durchgerissen
D Äthylen-Copolymer OS DII / Laborprobe 680 Zyklen IR Strahlung / Beregnung (4.3)	280	20	50	Kein Versagen nach 1000 Dehnwechseln
		20	200	Kein Versagen nach 1000 Dehnwechseln
		-10	50	Kein Versagen nach 500 Dehnwechseln
		-10	200	Erster Anriß nach 33 Dehnwechseln Nach 47 Dehnwechseln durchgerissen

Grundaufweitung  $w_u = 50 \mu\text{m}$

Dehnwechselfrequenz  $f = 0,03 \text{ Hz}$

Tabelle 7: Daten und Prüfresultate zum Rißüberbrückungsverhalten einer stofflich identischen Beschichtung aus zwei Langzeitalterungsperioden und einer Kurzzeitalterung

Beschichtungen	Smit [ $\mu\text{m}$ ]	unbewittert (u)				12 Monate freibewittert				Verhältnis der Widerstände	
		$\mu_{\text{CO}_2}$ [ -- ]	$S_{D,\text{CO}_2}$ [ m ]	$\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ [ -- ]	$S_{D,\text{H}_2\text{O}}$ [ m ]	$\mu_{\text{CO}_2}$ [ -- ]	$S_{D,\text{CO}_2}$ [ m ]	$\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ [ -- ]	$S_{D,\text{H}_2\text{O}}$ [ m ]	$\frac{\mu_{\text{CO}_2(\text{f})}}{\mu_{\text{CO}_2(\text{u})}}$ [ -- ]	$\frac{\mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{f})}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{u})}}$ [ -- ]
(1) Acrylat gelöst, OS B	170	5.639.000	960	13.500	2,3	1.461.000	250	16.800	2,9	0,26	1,24
(2) Acrylat dispergiert, OS B	185	2.565.000	470	750	0,14	674.600	125	5.500	1,0	0,26	7,33
(3) Acrylat flexibel, OS DII	340	287.100	98	1.020	0,3	252.600	86	2.050	0,7	0,88	2,01
(4) Epoxid gelöst, OS 6	200	59.025.000	11.800	151.000	30	38.285.000	7.660	182.000	36	0,65	1,21
(5) Dispersionssilikat, OS B	140	88.570	12	680	0,1	115.000	16	1.240	0,17	1,29	1,82
(6) Polyurethan gelöst, OS 6	250	13.368.000	3.340	48.500	12	9.232.000	2.300	28.200	7,1	0,69	0,58

Tabelle 8: Diffusionswiderstände für CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O vor und nach Kurzzeitalterung (Freibewitterung)

## Lebenslauf

Name:	Engelfried
Vorname:	Robert
Geburtstag:	22.05.1941
Geburtsort:	Esslingen am Neckar
Eltern:	Karl Engelfried, Weingärtner Marta geb. Vetter, Hausfrau
Familienstand:	Verheiratet mit Suse geb. Goebel, zwei Töchter, ein Sohn
1947 bis 1955:	Besuch der Volksschule Esslingen-Sulzgries
1955 bis 1958:	Malerlehre Firma E. Luick, Esslingen, Lehrbrief Malergeselle
1958 bis 1965	Tätigkeit als Malergehilfe bei der Firma E. Luick, Esslingen
1961/62 und 1964/65:	Besuch der Höheren Fachschule für das Malerhandwerk Stuttgart, Meisterprüfung
1965 bis 1974:	Tätigkeit in der FMPA Bauwesen Universität Stuttgart, Abteilung Anstriche und Kunststoffbeschichtungen
1969 bis 1974:	Berufsbegleitender Besuch der Telekollegsschule I und II in Ess- lingen mit Abschluß Fachhochschulreife
1974 bis 1977:	Studium an der Fachhochschule für Druck, Fachrichtung Chemie mit Abschluß Diplom-Ingenieur (FH)
1977 bis 1978:	Tätigkeit als Projektingenieur bei der Firma SKS-Technik, Faurndau bei Göppingen
Seit 1978:	Technischer Angestellter am Lehrstuhl Bauphysik der Universität Dortmund