

**Biologische Besiedlung von Fassadenbeschichtungen  
in Abhängigkeit von Dispersion und Pigment-  
Volumen-Konzentration**

Von der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften  
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

angenommene Dissertation

von Herrn Michael Meder

geboren am 25.10.1964 in Darmstadt

Gutachterin : PD Dr. habil. Anna A. Gorbushina

Zweitgutachter : Prof. Dr. Frank Rößner

Tag der Disputation : 17. Juni 2008

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	
1.1. Allgemeine Aspekte der Besiedlung von Fassadenbeschichtungen	1
1.2. Fassadenbeschichtungsstoffe	4
1.2.1. Grundsätzlicher Aufbau und Zusammensetzung	4
1.2.2. Bindemittel	7
1.2.2.1. Aufbau und Herstellung	7
1.2.2.2. Wichtige Parameter	10
1.2.2.3. Filmbildung und ihre Hilfsmittel	11
1.2.2.4. Wichtige Monomertypen	13
1.3. Pigment-Volumen-Konzentration	14
1.4. Besiedlung von Fassadenbeschichtungen	16
1.4.1. Bedingungen für eine mikrobiologische Besiedlung	17
1.4.1.1. Wasserhaushalt	17
1.4.1.2. Nährstoffe	19
1.4.1.3. Temperatur- und Austrocknungstoleranz	21
1.4.2. Organismen	21
1.4.3. Biologisch induzierte Einflüsse	22
1.4.3.1. Abbau von mineralischen Oberflächen	22
1.4.3.2. Verfärbung durch mikrobiellen Bewuchs	23
1.4.4. Umwelt-induzierte Veränderungen der Fassadenfarben	24
1.4.4.1. Vergrauung	24
1.4.4.2. Kreidung	28
1.5. Zielsetzung	29
<b>2. Material</b>	
2.1. Die Dispersionen	31
2.2. Die Rezepturen	34
2.3. Plattenaufbau	36
2.4. Die Bewitterungsstände	37
2.4.1. Ernsthofen	38
2.4.2. Liederbach bei Frankfurt / M.	39
<b>3. Methoden</b>	
3.1. Charakterisierung des mikrobiellen Bewuchses	41
3.1.1. Auszählen des Bewuchses	41
3.1.2. Vergleich des Bewuchses mittels Area under the Curve (AUC)	44

---

3.1.3. Isolation von Organismen	47
3.1.4. Wachstumsversuche	48
3.1.5. Bilddokumentation Wachstum auf den Platten	49
3.1.5.1. Lichtmikroskopische Aufnahmen	49
3.1.5.2. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	50
3.1.6. PAS-Färbungen	52
3.2. Charakterisierung der Veränderungen der Testbeschichtungen	56
3.2.1. Messung L*-Werte und Glanzgrad, L*-Wert Verlustrate	57
3.2.2. Korrelation / Regression zwischen L*-Wert und Pilzanzahl/cm <sup>2</sup>	58
3.2.3. Wasserhaushalt der Beschichtungen	60
3.2.4. Optischer Eindruck nach ASTM und ISO	60
3.2.5. Randwinkelmessungen	63
<b>4. Ergebnisse</b>	
4.1. Pilzbewuchs auf den Platten	65
4.1.1. Ernsthofen	65
4.1.2. Liederbach	69
4.2. Vergleich der Platten mittels Area under the Curve	72
4.2.1. $\Delta$ -AUC PVK Ernsthofen	75
4.2.2. $\Delta$ -AUC Dispersionen Ernsthofen	76
4.2.3. $\Delta$ -AUC PVK Liederbach	77
4.2.4. $\Delta$ -AUC Dispersionen Liederbach	78
4.3. Isolation von Organismen	79
4.4. Wachstumsversuche	82
4.5. Bilddokumentation Wachstum auf den Platten	86
4.5.1. Lichtmikroskopische Aufnahmen	86
4.5.2. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	91
4.6. PAS-Färbungen	99
4.7. L*-Werte, Glanzgrade, L*-Wert Verlustrate	105
4.7.1. L*-Werte	105
4.7.2. Glanzgrad	108
4.7.3. L*-Wert Verlustrate	110
4.8. Korrelation / Regression zwischen L*-Wert und Pilzanzahl/cm <sup>2</sup>	112
4.9. Wasserhaushalt der Beschichtungen	114
4.10. ASTM und ISO Bewertungen	116
4.10.1. Ernsthofen ASTM Bewertungen	117

---

4.10.2.	Ernsthofen ISO Bewertungen	120
4.10.3.	Liederbach ASTM Bewertungen	121
4.10.4.	Liederbach ISO Bewertungen	124
4.11.	Randwinkelmessungen	125
<b>5.</b>	<b>Diskussion</b>	
5.1.	Bewertung des mikrobiellen Bewuchses	128
5.1.1.	Externe und substratspezifische Parameter	128
5.1.2.	Standorteinflüsse	130
5.1.3.	Substratspezifische Einflüsse	131
5.1.4.	Eigenschaften der Bindemittelfilme	134
5.1.5.	Wasserhaushalt (sd- und w-Werte) der Beschichtungen	136
5.1.6.	Verwertbare Inhaltsstoffe der Beschichtungen	138
5.1.7.	Wachstumsversuche	139
5.1.8.	Mikroskopische Bewertung der Oberflächen	140
5.1.9.	Erstbesiedlung, Sukzession	142
5.1.10.	Isolation von Organismen	143
5.1.11.	PAS-Färbung	144
<b>5.2.</b>	<b>Veränderungen der Testbeschichtungen</b>	145
5.2.1.	Der L*-Wert im Hinblick auf Verschmutzung bzw. Vergrauung	145
5.2.2.	Der L*-Wert im Hinblick auf den Bedeckungsgrad mit Pilzen	147
5.2.3.	ASTM und ISO Bewertung	149
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	151
<b>7.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	155
<b>8.</b>	<b>Anhang</b>	165

## 1. Einleitung

### 1.1. Allgemeine Aspekte der mikrobiellen Besiedlung von Oberflächen

Seit Leben auf der Erde existiert, sind Mikroorganismen ein wichtiger, aktiver Teil der auf unserem Planeten ablaufenden biologischen aber auch geologischen Stoffkreisläufe. Als Destruenten sorgen sie dafür, daß die in totem organischem Material gebundenen Nährstoffbestandteile wie Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel oder Stickstoff aus diesem Verbund gelöst und den Produzenten wieder zur Verfügung gestellt werden (Müller & Loeffler 1982). In geologischer Hinsicht nehmen z.B. Bakterien in marinem Milieu Einfluss auf Sedimentation und die Bildung von Stromatolithen (Noffke 2003; Reid, Dupraz et al. 2003), in terrestrischen Systemen bilden Pilze einen wichtigen Teil des Kalziumcarbonat-Zyklus (Verrecchia, Loisy et al. 2003). Durch den Angriff auf und den damit verbundenen Änderungen von Gesteinen und Mineralien tragen sie zur Verwitterung bei und sorgen so für eine beschleunigte Erosion und Bodenbildung. Durch diese Art Zusammenarbeit zwischen biogenen und physikalischen Einflüssen wurde das Bild der Erde in sehr großem Maße von Mikroorganismen mitbestimmt (Sterflinger 2000; Burford, Fomina et al. 2003; Chertov, Gorbushina et al. 2004; Gorbushina 2007).

Bei der Betrachtung der Besiedlung von Oberflächen rückten in den vergangenen Jahren vermehrt die Eigenschaften und Fähigkeiten der großen Gruppe der Pilze in den Mittelpunkt wissenschaftlicher Untersuchungen.

Da die im Reich Fungi zusammengefassten Organismen eine sehr große Variabilität bezüglich ihrer Lebensweise zeigen, ist es nicht verwunderlich, dass sie in und auf vielen verschiedenen Substraten gefunden werden. Durch diese hohe Anpassungsfähigkeit konnten sie fast alle erreichbaren Habitate besiedeln, auch solche, die von vornherein als nur extrem schwer besiedelbar erscheinen bzw. bei denen man eine Besiedlung nicht erwarten würde. Die in solchen Habitaten zu findenden Organismen werden als poikilo-tolerant bezeichnet, da sie stark fluktuierende Umweltbedingungen zu tolerieren in der Lage sind (Gorbushina 2007). Auf die Diversität und Anpassungen an diese Lebensweise wird in Abschnitt 1.4.6. näher eingegangen. Besiedelt werden nicht nur natürliche Substrate wie tote Lebewesen, der Boden und Felsen, sondern auch von Menschenhand, aus natürlichen und künstlichen Substanzen hergestellte, Gegenstände.

Neben der Funktion als Nahrungsquelle an z.B. anderen toten, aber auch lebenden, Organismen spielen Substrate als Unterlage für das Wachstum eine sehr große Rolle. Eine strikte Trennung zwischen reiner Unterlage und Nahrungsquelle gibt es nicht, vielmehr besteht ein fließender Übergang mit stärkerer Neigung zur Funktion als Unterlage. Eine Nahrungsquelle wie z.B. ein Kadaver wird auch immer Unterlage sein, während der Nährstoffcharakter eines Gesteins sehr viel geringer ist. Wo in diesem Spektrum Fassadenfarben einzuordnen sind, ist ein Aspekt der vorliegenden Arbeit. Neben der Funktion als reine Siedlungsflächen können sie auch Nährstoff- und Energiequelle sein.

Natürlich vorkommende und anstehende Gesteine bieten aufgrund ihrer Häufigkeit und schieren Masse einen der wichtigsten besiedelbaren Lebensräume (Sterflinger 2000; Warscheid & Braams 2000; Burford, Fomina et al. 2003; Pitzurra, Moroni et al. 2003; Chertov, Gorbushina et al. 2004; Hoffland, Kuyper et al. 2004; Gorbushina & Krumbein 2005).

Andere als Substrat verwendete Oberflächen sind z.B. Metalle (Mattila, Carpen et al. 1997; Mattila, Carpen et al. 2000) und Glasflächen (Krumbein, Urzi et al. 1991; Gorbushina & Palinska 1999).

Auch kunsthistorisch wertvolle Kulturgüter wie Gemälde, Fresken, Skulpturen oder Bauwerke (Garg, Jain et al. 1995; Ciferri 1999; Dornieden, Gorbushina et al. 2000; Gorbushina & Petersen 2000; Bassi & Giacobini 2001; Künzel & Sedlbauer 2001; Ascaso, Wierzchos et al. 2002; Gorbushina, Heyrman et al. 2004) werden besiedelt. Da es sich vor allem um Oberflächen im Außenbereich handelt, werden die zum Schutz dieser Oberflächen verwendeten Außenbeschichtungen natürlich ebenfalls von Pilzen besiedelt (Wee 1988; Gaylarde & Gaylarde 2000; Gaylarde & Gaylarde 2005).

In diesen Untersuchungen wurden die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften, ihre Sukzession sowie Art und Ausmaß der Veränderungen an den Untergründen wissenschaftlich bearbeitet. Zudem wurden Strategien zur Verhinderung einer Besiedlung insbesondere kulturhistorischer Objekte untersucht.

Die Besiedlung von Bauwerken durch Mikroorganismen führt oft zu optischen und/oder mechanischen Beeinträchtigungen, welche anschließend mit hohem

finanziellem Aufwand wieder beseitigt werden müssen. Das dadurch hervorgerufene öffentliche (bei Kulturgütern) und private Interesse an Ursachen und Möglichkeiten zur Verhinderung eines Befalls führte in den letzten Jahren verstärkt zur Untersuchung dieser Phänomene. Daß diese Problematik nicht erst in den letzten Jahren erkannt wurde, zeigen zahlreiche Untersuchungen und Veröffentlichungen aus der Vergangenheit (Whiteley 1966; Winters, Isquith et al. 1975; Gogoll 1984; Wee 1988).

Obwohl es sich daher keinesfalls um ein neues Problem handelt, erfuhr dieses Thema in den letzten 5 – 10 Jahren eine sehr viel stärkere Beachtung, vor allem in der Beschichtungsstoffe herstellenden Industrie.

Im Blickpunkt standen Themen wie die Frage nach dem Einfluss des verstärkten Einsatzes von Wärmedämm- Verbundsystemen zum Zwecke des Energiesparens auf eine veränderte Bewuchssituation mit Mikroorganismen. Damit verbunden stellen sich Fragen zur Bauphysik und deren Einwirkungen auf den Bewuchs, sowie zu Umweltbedingungen wie Feuchtehaushalt von Beschichtungen oder klimatischen Faktoren (O'Neill 1988; Bagda, Wühl-Coutourier et al. 1999; Künzel 2000; Bartholemy 2000a; Bartholemy 2000b; Künzel, Krus et al. 2001; Künzel & Sedlbauer 2001; Schumann & Messal 2002; Sedlbauer 2002; Wicki 2002; Zinsmeister 2002; Bagda 2002a; Bagda 2002b; Binkert 2003; Blaich 2003; Kastien 2003; Nay & Raschle 2003; Colon, Kuusisto et al. 2004; Krus & Fitz 2005).

Die Möglichkeiten, einen solchen Bewuchs zu verhindern bzw. zu reduzieren (Gillatt 1991; Heaton, Callow et al. 1991; Nay 2002; English, Fjelde et al. 2003; Hladik 2003; Klug 2003) wurden ebenfalls untersucht.

Trotz dieses verstärkten Interesses wurde der Einfluss der Bestandteile einer Beschichtung auf die Besiedlung mit Mikroorganismen bisher nicht eingehender untersucht. Vor allem wie Dispersionen auf eine Besiedlung reagieren, ist im Zusammenhang mit Fassadenfarbe nicht betrachtet worden. Untersuchungen an Polymeren und Bindemitteln sind durchgeführt worden (Heyn, Häfner et al. 1996; Heyn, Petersen et al. 1996; Webb, Nixon et al. 2000; Heyn 2002; Gu 2003; Lugauskas, Levinskaité et al. 2003), nicht jedoch im komplexen Verbund einer Fassadenfarbe.

Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen zum Einfluss dieser Hauptkomponente von Fassadenfarben vorgenommen.

## 1.2. Fassadenbeschichtungsstoffe

### 1.2.1. Grundsätzlicher Aufbau und Zusammensetzung

Beschichtungsstoffe sind nach EN 971-1 (Norm DIN EN 971-1 1995) flüssige oder pulverförmige Produkte, die auf einen Untergrund aufgetragen einen Film bilden, der schützende, dekorative und/oder andere spezifische Eigenschaften besitzt. Es sind komplexe Gemische, die sich aus verschiedenen organischen und anorganischen Rohstoffen zusammensetzen.

Die Bestandteile lassen sich in *Lösemittel*, *Feststoffe*, *Additive* und *Bindemittel* unterteilen. Als Lösemittel kommen entweder Wasser oder organische, kohlenwasserstoffhaltige Flüssigkeiten zum Einsatz. Während die Feststoffe nur in farbgebende Substanzen (Pigmente und Farbstoffe) sowie Füllstoffe unterteilt werden, bilden die Additive eine sehr heterogene Gruppe, in der die unterschiedlichsten Hilfsstoffe zusammengefasst werden. Die Gruppe der Bindemittel setzt sich aus den eigentlichen Filmbildnern sowie den unterschiedlichsten Weichmachern zusammen.

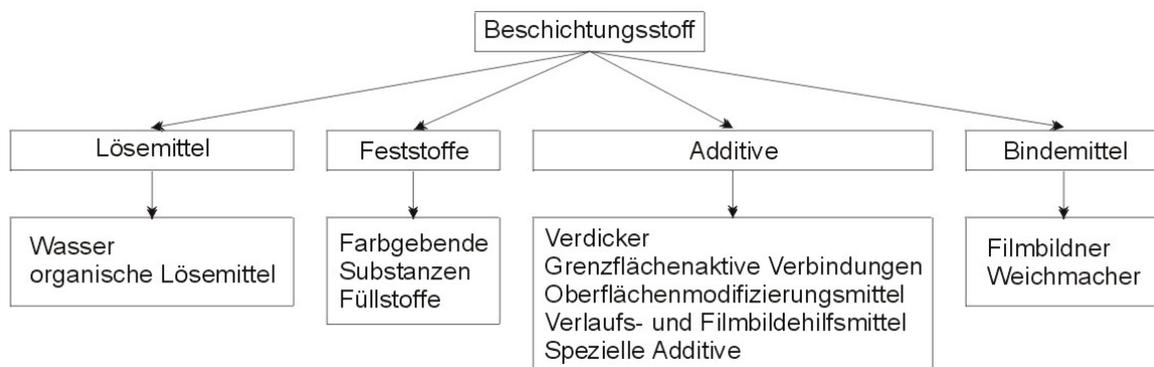


Abb. 1 : Bestandteile von Beschichtungsstoffen

#### *Lösemittel*

Lösemittel üben als flüchtige Komponenten nur eine vorübergehende Funktion aus, d.h. nach Aufbringen des Beschichtungsfilms werden diese Stoffe an die Atmosphäre abgegeben. Als wichtigstes Lösemittel wird heutzutage fast immer Wasser eingesetzt, organische Stoffe wie Aliphaten, Aromaten, Ester oder Alkohole gehen in ihrer Bedeutung als Lösemittel immer mehr zurück. Ursachen sind ein zunehmendes Umweltbewusstsein der Verbraucher und einschneidende

Vorschriften wie die VOC-Verordnung, die den Einsatz organischer Lösemittel stark einschränkt.

### *Feststoffe*

Die einen Teil der Feststoffe bildenden farbgebenden Substanzen können weiter in Pigmente und Farbstoffe unterteilt werden. Der Unterschied zwischen den beiden liegt in der Unlöslichkeit der meist aus feinen Teilchen bestehenden Pigmente. Farbstoffe hingegen sind in der Bindemittelmatrix löslich (Norm EN ISO 4618-1 2001a).

Trotz dieser formalen Differenzierung spricht man in der Praxis fast immer nur von Pigmenten. Dies wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit beibehalten.

Zur Farbgestaltung von Beschichtungen werden Bunt- und Weißpigmente verwendet, welche entweder organischer oder anorganischer Natur sein können (Zonnevillle 1998).

Organische Pigmente sind meist Substanzen, die in ihrer Molekülstruktur eine chromophore Gruppe aufweisen und in flüssiger Form angeboten werden. Anorganische Pigmente liegen dagegen meist als Pulver vor oder werden als Paste (Slurry) angeteigt eingesetzt.

Als Weißpigment eingesetzte Farbmittel weisen einen Brechungsindex von über 1,7 auf. Durch ihr hohes Deck- und Aufhellvermögen erzielt man helle Farbtöne bis hin zum reinen Weiß. Aufgrund seiner hervorragenden Eigenschaften wird heutzutage als weitaus wichtigstes Weißpigment Titandioxid verwendet. Von den beiden vorkommenden Kristallmodifikationen Rutil und Anatas wird überwiegend Rutil eingesetzt, da es das höchste Streuvermögen aller Weißpigmente (Brechungsindex 2,7) besitzt und zudem witterungsbeständiger als der Anatas ist (Dörr & Holzinger 1989). Die früher öfter eingesetzten Pigmente Zinkoxid (Lithopone), Zinksulfid oder Antimonoxid werden heute nur noch selten als Weißpigmente verwendet. Neben den besseren physikalischen Eigenschaften des Titandioxids sind es auch die aufgrund ihrer toxikologischen Einstufung erfolgten Gefahrstoff-Kennzeichnungen, die zum Austausch dieser Substanzen gegen Titandioxid geführt haben.

Füllstoffe sind nach EN ISO 4618-1 Substanzen in körniger oder pulveriger Form, die im Anwendungsmedium praktisch unlöslich sind und verwendet werden, um bestimmte physikalische Eigenschaften zu erreichen oder zu beeinflussen.

Weiterhin lassen sich Füllstoffe als Materialien definieren, die einen Brechungsindex unterhalb 1,7 haben und zur Vergrößerung des Volumens und zur Einstellung bestimmter technischer und optischer Eigenschaften eingesetzt werden (Dörr & Holzinger 1989).

Ähnlich wie die Pigmente können auch Füllstoffe anorganisch (mineralisch) oder organisch sein. Bei den wesentlich wichtigeren anorganischen Füllern unterscheidet man noch zwischen solchen natürlichen Ursprungs wie Calcit, Kreide, Dolomit, Quarz, Talkum, Glimmer, Diatomeenerde oder Schwerspat und synthetisch hergestellten Produkten wie gefälltes Calciumcarbonat, gefällter Schwerspat (Blanc fixe) oder gefällte Silikate. Zu den organischen Füllstoffen zählen neben Holzfasern auch Kunststoffpolymere (Dörr & Holzinger 1989; Apitz & Fichtner 2001; Norm EN ISO 4618-1 2001a; Norm EN ISO 4618-4 2001b). Faserfüllstoffe aus Glas oder Kunststoff kommen zudem immer mehr zum Einsatz.

### *Additive*

Nach EN ISO 4618-1 ist ein Additiv eine „Substanz, die einem Beschichtungsstoff in kleinen Mengen zugesetzt wird, um eine oder mehrere Eigenschaft(en) zu verbessern oder zu modifizieren“. Dazu zählen Netz- und Dispergiermittel, Entschäumer, Verdicker und Konservierungsstoffe.

*Netz- und Dispergiermittel* dienen dazu, die Benetzung und homogene Verteilung der Pigmente und Füllstoffe zu unterstützen und eine Reagglomeration durch Stabilisierung zu verhindern. Hierzu werden meist Polyphosphate und Polyacrylate eingesetzt.

Um eine Schaumbildung beim Herstellen und Applizieren zu vermeiden bzw. zu vermindern werden den Beschichtungen Mineralöle, Siliconderivate, Wachse und Fettsäuren als *Entschäumer* zugesetzt.

Da Beschichtungsmittel je nach Verwendungszweck unterschiedliche Rheologien aufweisen müssen, werden zur Einstellung der Viskosität in allen Scherbereichen sowie der Modifizierung verschiedener Eigenschaften wie Verlauf, Verarbeitbarkeit und Streichwiderstand drei verschiedenen Basistypen an *Verdickern* eingesetzt.

Verdicker auf Polysaccharidbasis (Methyl- oder Hydroxymethylcellulose) sind mengenmäßig die wichtigsten. Ihre Wirkung beruht auf der Bindung von Wassermolekülen innerhalb des Cellulosegerüsts über Wasserstoffbrückenbindungen. Aufgrund der Wasserlöslichkeit der Celluloseether auch im fertigen Film,

sollte ihr Anteil in Außenbeschichtungen gering gehalten werden. Die synthetischen Polyacrylat- und Polyurethanverdicker gehen mit den Dispersionsteilchen physikalische Wechselwirkungen ein. Als anorganische Verdicker sind Schichtsilikate wie Bentonit (Al-Silikat, Tone mit >50% Smektit) oder Hectorit (Mg-Silikat,  $\text{Na}_{0,3}(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ ) im Einsatz. Die verdickende Wirkung beruht auf der räumlichen Ausrichtung ihrer plättchenförmigen Kristallstruktur. Die beiden letzteren Verdickertypen besitzen kein Wasserrückhaltevermögen.

Konservierungsstoffe werden zum Verhindern des mikrobiologischen Befalls sowohl im Gebinde (Topfkonservierung) als auch im Film (Filmkonservierung) eingesetzt. Für die Topfkonservierung kommen hauptsächlich Isothiazolinone, Formaldehydabspalter oder Bronopol zum Einsatz. Dem Einsatzgebiet entsprechend weisen sie ein breites Wirkungsspektrum vor allem gegen Bakterien auf. Formaldehyd zeigt zusätzlich eine dampfraumkonservierende Wirkung, die sich auch gegen einen eventuellen Pilzbefall im Gebinde richtet.

Im applizierten Film stehen dagegen die Wirkungen gegen Pilze und Algen im Vordergrund. Für diesen Zweck werden Fungizide wie Carbendazim, Octylisothiazolinon oder Jodpropinylbutylcarbammat eingesetzt, während zur algiziden Wirkung Terbutryn, Irgarol oder Diuron Verwendung finden (Dörr & Holzinger 1989; Apitz & Fichtner 2001; Norm EN ISO 4618-4 2001b)

Da die Bindemittel in den, einen wesentlichen Teil der vorliegenden Arbeit ausmachenden, Freibewitterungen die tragende Rolle spielten, werden sie und ihre unterstützenden Zusätze Filmbildhilfsmittel und Weichmacher im folgenden Abschnitt ausführlich behandelt.

### 1.2.2. Bindemittel

#### 1.2.2.1. Aufbau und Herstellung

Bindemittel sind Stoffe, die die Bestandteile eines Beschichtungsstoffes zusammenhalten sowie die Haftung am Untergrund gewährleisten. Dazu wird eine zusammenhängende Schicht, der Bindemittelfilm, ausgebildet. Aufgebaut wird er aus dem eigentlichen Filmbildner, der entweder anorganischen (Wasserglas, Kalk, Gips, Zement) oder organischen Ursprungs (Natur- oder Kunstharze) bzw. eine

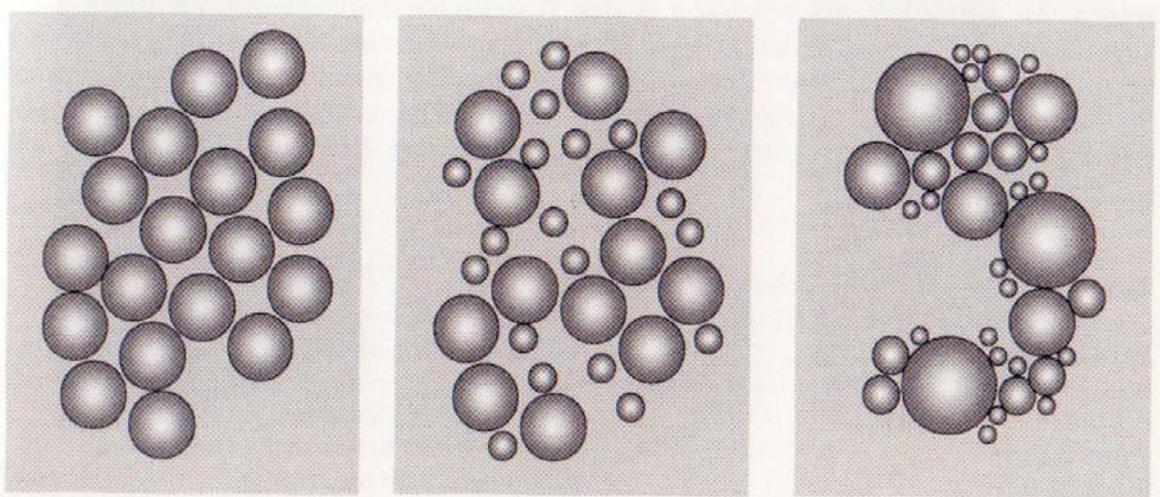
Kombination aus beiden sein kann. Angeboten werden Bindemittel als Dispersion, als Lösung oder als Pulver.

Nach Zonnevillje (1998) können zwei Einsatzformen anhand der Art des Bindemittels unterschieden werden:

*Form A:* das Bindemittel entsteht erst im Film durch Molekülvergrößerung aus einer nieder- oder mittelmolekularen Verbindung, z.B. Alkydharze, Diisocyanat + Polyol, Epoxidharz + Härter. Die Filmbildung geschieht durch eine chemische Reaktion (chemische Filmbildung).

*Form B:* das Bindemittel wird schon in hochmolekularer Form zugegeben, der Film entsteht durch Verdunstung des flüchtigen Anteils (physikalische Filmbildung), z.B. Vinyl- oder Acrylpolymerisate, Siliconharze.

Für Fassadenbeschichtungen werden fast immer Bindemittel der zweiten Gruppe, also hochmolekulare Kunstharz-Dispersionen eingesetzt, deren Eigenschaften für den jeweiligen Einsatzzweck modifiziert werden können. Diese Dispersionen bestehen aus in Wasser fein verteilten organischen Polymerpartikeln, die aufgrund der Grenzflächenspannung meist Kugelgestalt einnehmen. Aufgrund der Partikelgrößenverteilung kann zwischen drei verschiedenen Typen unterschieden werden. Eine Dispersion mit monomodaler Verteilung enthält nur eine definierte Partikelgröße, eine bimodale zwei Teilchengrößen während multimodale mehrere Teilchengrößen beinhalten.



monomodale Verteilung

bimodale Verteilung

multimodale Verteilung

Abb. 2 : Teilchengrößenverteilung verschiedener Dispersionen (Apitz & Fichtner 2001)

Da solche feindispersen Systeme aufgrund ihrer hohen Oberflächenenergie zum Koagulieren neigen, müssen zur Stabilisierung Emulgatoren oder Schutzkolloide eingesetzt werden. Als Emulgatoren werden Moleküle bezeichnet, die sowohl einen hydrophoben als auch einen hydrophilen Teil besitzen. Aufgrund dieser Struktur umhüllen Emulgatoren die Latexpartikel indem sie sich mit ihrem hydrophoben Ende um die Polymerpartikel gruppieren und damit die Koagulation verhindern. Man unterteilt Emulgatoren in anionisch, kationisch und nichtionisch, die Stabilisationswirkung beruht dabei bei ionischen Emulgatoren auf elektrostatischen Wechselwirkungen, während nichtionische Emulgatoren durch sterische Effekte stabilisieren.

Im Gegensatz zu den Emulgatoren werden als Schutzkolloide nicht geladene Polymere mit wasserlöslichen Polymersegmenten eingesetzt, die an der Oberfläche der Latexpartikel adsorbiert oder chemisch fest gebunden sind. Auch hier wird über sterische Effekte die Stabilisation erreicht. Gebräuchlich sind Polyvinylalkohole, Celluloseether oder Poly(1-vinyl-2-pyrrolidon) (Apitz & Fichtner 2001).

### Herstellung

Die bedeutendste Methode zur Herstellung unterschiedlicher Dispersionstypen ist die radikalische Polymerisation. Während dieses Vorgangs werden über die drei Schritte Start-, Wachstums- und Abbruchreaktion aus ungesättigten Monomeren polymere Makromoleküle hergestellt. Dabei unterscheidet man zwischen der Homopolymerisation mit einer einzigen Art von Monomeren und der Copolymerisation mehrerer verschiedener Monomere.

Das wichtigste Verfahren zur Herstellung von Kunstharzdispersionen ist die Emulsionspolymerisation. Hierbei werden die Monomere zusammen mit dem Emulgator im Reaktionsgefäß vorgelegt und über die drei Phasen Teilchenbildungsphase, Wachstumsphase und Monomerverarmungsphase polymerisiert.

In der Teilchenbildungsphase bildet der Emulgator sog. Micellen, in denen sich die in der wässrigen Phase gebildeten Oligoradikale ansammeln. Während der Wachstumsphase diffundieren Monomere aus der wässrigen Phase in diese Micellen und polymerisieren dort. Dies wird so lange fortgesetzt, bis nur noch

wenige Monomere vorhanden sind. Dadurch sinkt die Polymerisationsgeschwindigkeit und die Dispersion ist fertig. Oft wird in dieser Phase noch einmal eine bestimmte Menge Initiator zugegeben, um die Menge an Restmonomeren zu verringern. Dieser Rest sollte möglichst gering sein, er liegt meist unterhalb 2000 ppm (Apitz & Fichtner 2001).

#### 1.2.2.2. Wichtige Parameter

##### Glasübergangstemperatur $T_g$

Da Makromoleküle meist keinen definierten Schmelzpunkt aufweisen, sondern bei Erwärmung kontinuierlich erweichen und sich ausdehnen, können drei Zustände definiert werden, die ein solches Polymer annehmen kann.

Erstens den *Glaszustand*, bei dem die Moleküle „eingefroren“ sind, zweitens den *Glasübergangsbereich*, bei dem die Moleküle verstärkte Bewegungen ausführen und drittens den *viskoelastischen Zustand*, bei dem das Polymer gummiartiges Verhalten zeigt.

Die Temperatur, bei der ein viskoelastisches Polymer wieder in den harten Glaszustand übergeht, wird Glasübergangstemperatur  $T_g$  genannt. Meist ist dies keine bestimmte Temperatur sondern ein Übergangsbereich von 10 K – 20 K. Bestimmbar wird die  $T_g$  durch die Tatsache, daß sich mehrere Eigenschaften des Films wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit oder Brechungsindex an diesem Punkt diskontinuierlich ändern. Durch Bestimmen dieser Diskontinuitäten kann dann die  $T_g$  ermittelt werden.

Je höher die  $T_g$  eines Polymers, desto härter ist die Konsistenz des Films bei Raumtemperatur, dabei wirken Wassermoleküle je nach Struktur des Bindemittels als Weichmacher und reduzieren die  $T_g$  z.T. beträchtlich. Durch Sonneneinstrahlung kann es zu Vernetzungsreaktionen kommen, bei denen die  $T_g$  steigt (Wiese 1999; Apitz & Fichtner 2001).

##### Mindestfilmbildetemperatur MFT und Weißpunkt WP

Zwei weitere wichtige Parameter eines Polymerfilms sind die Mindestfilmbildetemperatur MFT und der Weißpunkt WP. Dabei ist die MFT als die niedrigste Temperatur definiert, bei der die Dispersion noch einen geschlossenen Film bildet, ohne nach dem Trocknen Risse zu zeigen, während der Weißpunkt die

Temperatur darstellt, oberhalb derer die Dispersion einen transparenten Film und unterhalb eine trübe, weißliche Schicht bildet.

Durch Untersuchungen wurde festgestellt, dass bei Temperaturen kurz oberhalb des Weißpunkts noch Mikrorisse im Film auftreten können, so dass der Weißpunkt immer unterhalb der MFT liegt (Wiese 1999; Apitz & Fichtner 2001).

#### 1.2.2.3. Filmbildung und ihre Hilfsmittel

Die Filmbildung einer Dispersion ist ein komplexer, mehrstufiger Prozeß, der in vier Phasen eingeteilt werden kann. Nach Aufbringen des Nassfilms verdunstet in der ersten Phase das Wasser, so dass der Abstand der Latexpartikel untereinander immer geringer wird, bis sie sich gegenseitig berühren und in einer dichtesten Kugelpackung anordnen.

Die zweite Phase beginnt, wenn sich im weiteren Verlauf der Trocknung aufgrund der auftretenden, einige hundert Hektopascal erreichenden, Kräfte (Oberflächenspannung, Kapillarkräfte) die Latexteilchen zu rhombischen Dodekaedern verformen.

In der dritten Phase kommt es zur sog. Koaleszenz, bei der die Partikelgrenzen aufgelöst werden und die zur Stabilisierung vorhandenen Abstoßungskräfte verloren gehen.

Die vierte Phase schließlich wird durch die Interdiffusion der Polymerketten bestimmt, die durch eine Durchdringung über ehemalige Teilchengrenzen hinweg zur Erhöhung der Reißfestigkeit des Films und dadurch zur Bildung eines mechanisch belastbaren Films führt. Dieser Film ist nicht mehr redispergierbar, was seine Wasserfestigkeit und damit seine Eignung zum Einsatz in Farben begründet (Apitz & Fichtner 2001).

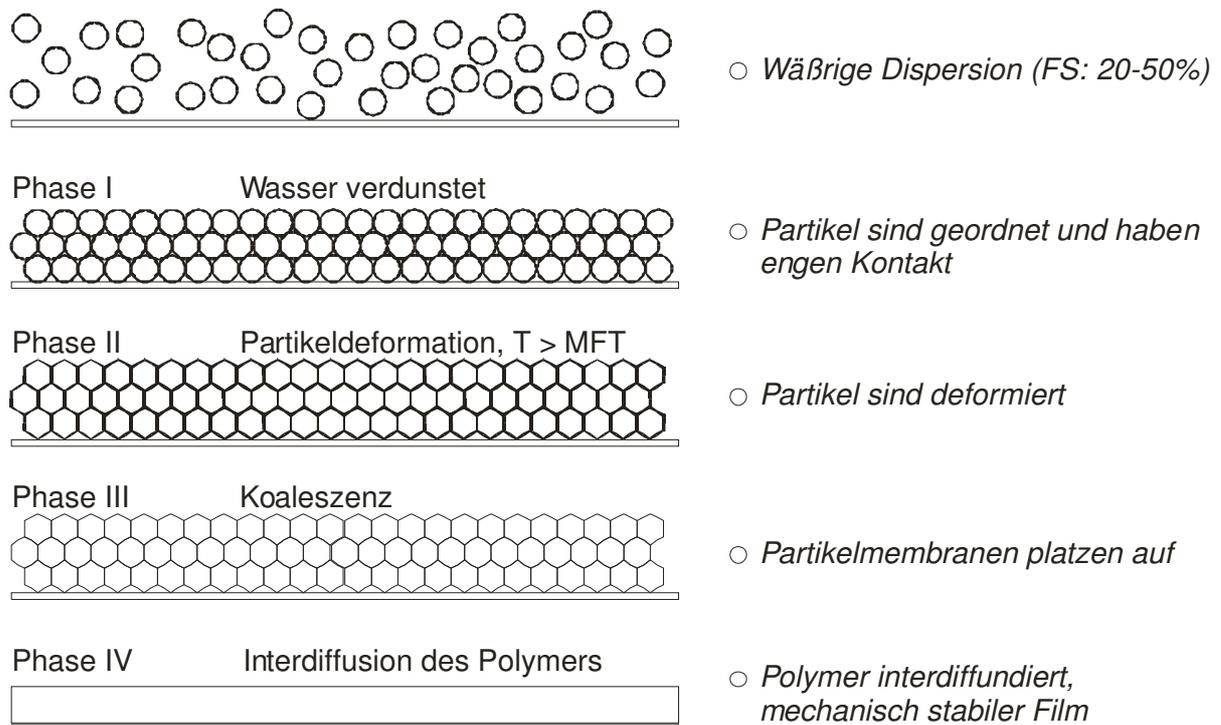


Abb. 3 : Schematische Darstellung der Filmbildung nach Apitz and Fichtner 2001

### Filmbildehilfsmittel und Weichmacher

Da Beschichtungsstoffe nur dann einen korrekten, rissfreien Film ausbilden können, wenn die Mindestfilmbildetemperatur (MFT) der Dispersion unterhalb der Verarbeitungstemperatur liegt, werden bei Einsatz von Bindemitteln mit höherer MFT Filmbildehilfsmittel dazu verwendet, die MFT auf eine im allgemeinen geforderte minimale Verarbeitungstemperatur von 5°C einzustellen. Dies kann nötig sein, da Dispersionen mit niedriger MFT für viele Anwendungen zu weiche Filme bilden.

Die dabei zum Einsatz kommenden Lösemittel diffundieren in die Polymerpartikel und bewirken eine Erweichung des Films. Da diese Substanzen nach Applikation des Films verdunsten (deshalb auch als „temporäre Weichmacher“ bezeichnet) gewinnt der Film beim Trocknen seine ursprüngliche Härte wieder zurück.

Während die Filmbildehilfsmittel die Filmhärte nur kurzfristig beeinflussen, üben Weichmacher diesen Effekt über einen sehr viel längeren Zeitraum aus. Obwohl die Grenze zwischen den beiden Klassen häufig bei einem Siedepunkt von 250°C gezogen wird, haben viele Weichmacher einen genügend hohen Dampfdruck, um im Laufe der Zeit an die Umgebung abgegeben werden zu können, weshalb sie

streng genommen auch zu den flüchtigen Komponenten gehören (Dören 1998; Apitz & Fichtner 2001).

#### 1.2.2.4. Wichtige Monomertypen

Von den verschiedenen zur Verfügung stehenden Typen an Bindemitteln für Beschichtungen sind nachfolgend die drei in dieser Arbeit näher betrachteten aufgeführt.

##### Vinylacetat – Ethylen

Obwohl Vinylacetat – Ethylen Dispersionen hauptsächlich im Innenbereich eingesetzt werden, werden auch vor allem im unteren Preissegment Fassadenfarben auf Basis dieser Dispersion angeboten. Vinylacetat an sich zeigt eine hohe  $T_g$  und starke Wasseraufnahme, so dass schon früh Comonomere zur Modifikation eingesetzt wurden. Das effektivste ist das Ethylen welches als gasförmiges Molekül eine Druckpolymerisation erfordert. Da das Ethylen eine sehr stark weich machende Wirkung besitzt, resultiert daraus bei steigendem Ethylengehalt eine stärkere Oberflächenklebrigkeit. Der gleiche Effekt macht sich bei Einsatz in niedrigpigmentierten Systemen bemerkbar, die daraus resultierende höhere Anschmutzneigung und die Erweichung bei Wasserbelastung setzen dem Einsatz im Außenbereich Grenzen.

##### Styrol / Acrylat

Styrol / Acrylat Dispersionen sind für einen breiten Einsatzbereich geeignet, die Filme sind im Vergleich mit anderen Typen stark hydrophob, wobei sich je nach Auswahl des entsprechenden Acrylsäureesters unterschiedliche Hydrophobien einstellen lassen. Insgesamt gesehen sind Styrol / Acrylate aufgrund der hohen  $T_g$  des Styrols (100°C) eher harte Dispersionen. Styrol fördert zwar das Pigmentbindevermögen, in niedrigpigmentierten Systemen im Außenbereich sind solche Systeme aber nicht empfehlenswert, da unter UV Einfluss ein Abbau des Polymers bei gleichzeitiger Vergilbung einsetzt.

##### Reinacrylat

Aufgrund der sehr guten Copolymerisationsfähigkeit mit sich selbst (und mit Styrol) bieten die Acrylate eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten, die zu der weiten

Verbreitung dieser Dispersionstypen geführt hat. Durch die hohe Bandbreite der Acrylate ist es möglich, Dispersionen mit einer  $T_g$  von  $-80^\circ\text{C}$  bis  $+100^\circ\text{C}$  sowie von hydrophob bis sehr hydrophil herzustellen. Daraus resultieren Filme, die eine geringe Wasseraufnahme haben und sehr beständig gegen UV-Licht sind. Wie auch bei S/A Dispersionen können durch Zugabe ungesättigter Carbonsäuren die Systeme stabilisiert werden und es resultieren hochwertige, stabile Dispersionen mit günstigem Bewitterungsverhalten.

### 1.3. Pigment-Volumen-Konzentration PVK

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Eigenschaften einer Beschichtung ist der Anteil an nichtflüchtigen Bestandteilen im getrockneten und ausgehärteten Film. Diese setzen sich wie oben beschrieben aus Pigmenten und Füllstoffen sowie den festen Bestandteilen der Dispersion zusammen und bestimmen so optische und mechanische Eigenschaften des Films.

Gemäß EN ISO 4618-1 wird das Verhältnis des Volumens von Pigmenten, Füllstoffen und/oder anderen nicht filmbildenden festen Teilchen zum Gesamtvolumen der nichtflüchtigen Anteile eines Beschichtungsstoffes als sog. Pigment-Volumen-Konzentration (PVK in Prozent) ausgedrückt (Norm EN ISO 4618-1 2001a). Dabei kennzeichnet eine hohe PVK einen niedrigen Gehalt an Dispersion und hohen Anteil an Pigmenten während niedrige PVK Werte naturgemäß das Gegenteil darstellen. Die PVK ist demnach eine Größe zur Charakterisierung des Verhältnisses von Pigment und Füllstoff zum Bindemittelanteil im fertigen Beschichtungsfilm, d.h. nach Abzug aller flüssigen (flüchtigen) Bestandteile und wird nach Gleichung 1 berechnet.

$$PVK = \frac{\text{Volumen Pigment} + \text{Volumen Füllstoff}}{\text{Volumen Pigment} + \text{Volumen Füllstoff} + \text{Volumen Bindemittel(fest)}} * 100(\%)$$

Gleichung 1 : Berechnung der Pigment-Volumen-Konzentration

Dies bedeutet, dass das Verhältnis des Pigment/Füllstoff-Volumens in Beziehung zum Gesamtvolumen der jeweiligen Beschichtung gesetzt wird.

Die Angabe der PVK einer Beschichtung ist aussagefähiger als die gewichtsbezogenen Angaben des betreffenden Beschichtungsstoffes, weil hierbei auch das spezifische Gewicht der eingesetzten Pigmente und Füllstoffe mit

berücksichtigt ist. Je niedriger die angegebene PVK, desto höher der Bindemittelanteil bzw. desto geringer die Pigmentierungshöhe. So liegen glänzende Dispersionslacke z. B. in einem PVK-Bereich von etwa 17-23 %, matte, waschbeständige Dispersionsfarben können über 80 % erreichen.

Neben der PVK sind in der Beschichtungsindustrie auch die Begriffe unterkritischer PVK-Bereich, kritische Pigmentvolumenkonzentration (KPVK) und überkritischer PVK-Bereich zur Charakterisierung bestimmter Filmeigenschaften gebräuchlich.

Die *kritische Pigmentvolumenkonzentration KPVK* ist definiert als die PVK bei der der Raum zwischen den sich (fast) berührenden Feststoffteilchen gerade noch mit Bindemittel gefüllt ist (Norm EN ISO 4618-1 2001a). Der Bereich unterhalb der KPVK wird unterkritisch, der oberhalb überkritisch genannt.

Dabei ist die KPVK eine wichtige Kenngröße von Beschichtungsfilmen, da sich an diesem Punkt bestimmte Eigenschaften der Beschichtung drastisch ändern. Porosität, Deckvermögen und Filmspannung ändern sich am stärksten, so dass diese Parameter zur Bestimmung der KPVK herangezogen werden können.

Da oberhalb der KPVK die Pigment- und Füllstoffteilchen nicht mehr vollständig vom Bindemittel umhüllt werden können, ergibt sich eine deutlich gröbere, poröse Oberfläche, die keinen Glanz mehr aufweist und zudem durch die entstandenen kleinen Hohlräume anfälliger für Verschmutzung und mikrobiellen Bewuchs sein kann.

Aufgrund der Abhängigkeit von den verwendeten Pigmenten, Füllstoffen und Bindemitteln hat jede Beschichtung eine spezifische KPVK. In einem vereinfachten Modell aus einem kugelförmigen, monomodalen Pigment/Füllstoff Gemisch und nicht starren Latexpartikeln liegt die KPV bei 76%. Allerdings sind in der Praxis weder die Pigment- oder Füllstoffteilchen perfekt rund noch weisen sie einheitliche Radien auf, so dass die reale KPVK oft deutlich von 76% abweicht. Aus diesem Grund kann die KPVK auch nicht errechnet werden, sondern muss immer praktisch bestimmt werden.

Bei den verschiedenen Putzen werden keine Angaben zur PVK gemacht, da dies nur bei feinteiligen Pigmenten und Füllstoffen in der Beschichtung sinnvoll ist. Größere Körnungen beinhalten zahlreiche Lufteinschlüsse im Film, die nicht durch Feinanteile ausgefüllt sind (Dörr & Holzinger 1989; Schmid 1994; Kuroпка 1998; Apitz & Fichtner 2001).

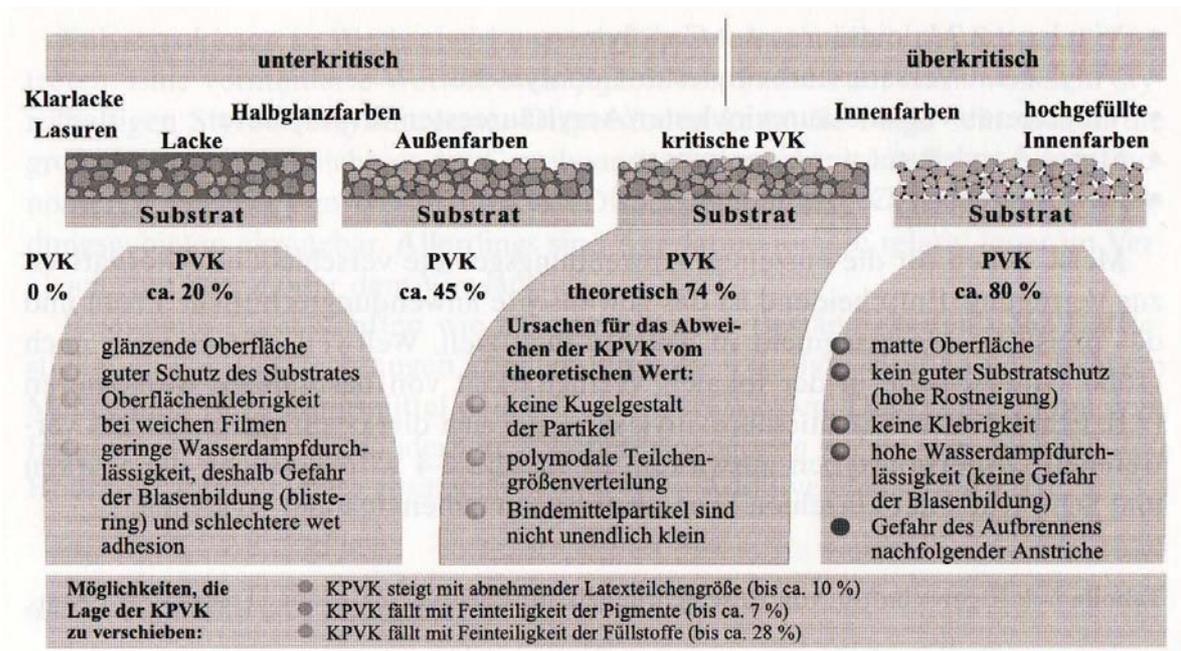


Abb. 4 : Schematische Darstellung der PVK und KPVK von Beschichtungen (Kuropka 1998)

#### 1.4. Besiedlung von Fassadenbeschichtungen

Mit Farben und Putzen beschichtete Oberflächen an Gebäudeaußenseiten werden zwangsläufig im Laufe der Zeit von Mikroorganismen besiedelt.

Voraussetzungen für das Wachstum von Organismen sind das Vorhandensein von Wasser und einer Energiequelle wie Sonne oder organischer Substanz sowie die Verfügbarkeit von Nährstoffen (Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel etc) und Spurenelementen (Eisen, Kupfer, Titan, Mangan etc). Generell müssten auch Fassadenbeschichtungen diese Voraussetzungen aufweisen, damit sie von Pilzen und Algen besiedelt werden können. Dabei sind die Eigenschaften der verwendeten Farbe, die Untergrundbedingungen (WDVS, Poroton, Kalksandsteinmauer) und die kleinklimatischen Verhältnisse des betreffenden Standortes mit entscheidend. Zu letzteren zählt auch die Qualität der Umgebungsluft, da Aerosole, Gase und partikuläre Verschmutzung die zu einem Wachstum nötigen Stoffe bereitstellen können (Gorbushina 2007). Alles zusammen definiert den Rahmen welche die Siedlungsfläche den Organismen bietet. Innerhalb dieses Rahmens sind verschiedene Parameter zu beachten, die Einfluss auf die Besiedlung nehmen.

#### 1.4.1. Bedingungen für eine mikrobiologische Besiedlung

##### 1.4.1.1. Wasserhaushalt

Der wichtigste Parameter ist das Wasser. Ohne eine ausreichende Feuchtigkeit ist kein Wachstum möglich. Durch Regen und Betauung kommt es zur zeitweisen Ausbildung eines Wasserfilms auf der Beschichtung, der das Wachstum begünstigt. Zudem dringt das Wasser in die Beschichtung und bei längerer Dauer der Überfeuchtung auch in den Untergrund ein (Öchsner, Bergk et al. 2005). Deshalb sollten Fassadenbeschichtungen möglichst wenig Wasser aufnehmen und es zudem sehr schnell wieder abgeben. Die beiden Parameter, die dieses Verhalten beschreiben sind die Wasseraufnahme bzw. –durchlässigkeit für das Eindringen des Wassers in die Beschichtung sowie die Wasserdampfdurchlässigkeit für den Wiederaustritt des Wassers in Form von Wasserdampf.

Diese bauphysikalischen Eigenschaften wurden in den beiden Normen DIN EN 1062-3 und DIN EN ISO 7783-2 eindeutig beschrieben.

##### Wasseraufnahme bzw. –durchlässigkeit

Beschichtungsfilme können auf verschiedene Arten Wasser aufnehmen. Zu Beginn des Kontaktes werden Wassermoleküle in den Film eingelagert (Quellung). Nach längerer Einwirkung bilden sich größere Wassertaschen, sog. Cluster, sowohl im Film als auch an der Film-Substrat Grenze.

Unter realen Bedingungen wird das Wasser aber nicht in der Beschichtung bleiben, sondern in den mehr oder weniger porösen Untergrund weiterwandern und dieses Reservoir bis zur spezifischen Sättigungsgrenze des verwendeten Untergrunds auffüllen. Daraus resultiert die Wasserdurchlässigkeit des Films (Schmid 1994).

Die kapillare Wasseraufnahme ist für eine Fassadenbeschichtung eine wichtige Eigenschaft, welche über den **Wasseraufnahmekoeffizient w** definiert wird.

Dieser nach der Norm DIN EN 1062-3 bestimmbare Wert ist eine Maßzahl zur Beschreibung des Wasseraufnahmevermögens von Baustoffen und Beschichtungen, die mit flüssigem Wasser in Kontakt stehen. Die Einheit des w-Werts wird in  $\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$  angegeben.

Dabei gilt nach DIN EN 1062-1 folgende Einteilung (Norm DIN EN 1062-1 8/2004):

Klasse w1 (hoch)	$> 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
Klasse w2 (mittel)	$0,1 - 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
Klasse w3 (niedrig)	$< 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

### Wasserdampfdurchlässigkeit

Während die kapillare Wasseraufnahme die Bewegung flüssigen Wassers im System Beschichtung – Untergrund beschreibt, wird die Diffusion von Wasserdampf als weiterer wichtiger Mechanismus über die Materialkonstante Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  definiert. Diese relative Größe beschreibt, um wie viel der Diffusionswiderstand eines Materials größer ist, als der einer gleichdicken, ruhenden Luftschicht (Apitz & Fichtner 2001).

Da die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  einen Baustoff aber nur mit einem Kennwert charakterisiert, die Schichtdicke eines Materials aber wichtig für die Diffusion ist, ergibt sich der exakte Diffusionswiderstand erst aus der Multiplikation mit der jeweiligen Schichtdicke eines Baustoffes oder den Einzelkomponenten eines kompletten Bauteils, d.h. die äquivalente Luftschichtdicke in m ergibt sich aus der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  multipliziert mit der Schichtdicke  $s$  in m. Daraus resultiert dann die **diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$** , definiert als  $s_d = \mu \cdot s$  mit der Einheit m.

Die Einteilung erfolgt wie beim w-Wert nach DIN EN 1062-1 in drei Klassen.

Klasse V1 (hoch)	$< 0,14 \text{ m}$
Klasse V2 (mittel)	$0,14 - 1,4 \text{ m}$
Klasse V3 (niedrig)	$\geq 1,4 \text{ m}$

Je kleiner der Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  ist, umso besser die Schutzwirkung infolge der geringen kapillaren Wasseraufnahme. Je kleiner der Wasserdampfdiffusionswiderstand  $s_d$ , desto größer ist die Wasserdampfdurchlässigkeit, d.h. desto mehr Wasser kann aus dem Untergrund durch die Beschichtung heraus diffundieren.

Für die Dauer der Feuchtebelastung einer Fassade hat nach Untersuchungen des IBP Holzkirchen die Art der Wasseraufbringung einen großen Einfluss auf das

Auftreten eines Bewuchses. Im Falle normalen Regens sind die auf der Oberfläche auftreffenden Tropfen relativ groß, so dass Schmutz und Staubteilchen durch ablaufendes Wasser abgewaschen werden. Im Gegensatz dazu sind die Tropfen bei Betauung oder Nebel sehr viel kleiner. Dies führt dazu, dass das Wasser nicht so schnell abläuft, es erfolgt keine Entfernung der Staubablagerungen und die Feuchtigkeit bleibt länger auf der Fassade.

Zusätzlich wird bei Einsatz eines WDVS durch die Verminderung des Wärmetransports durch das Mauerwerk und die verstärkte langwellige Energieabstrahlung die Dauer einer Tauwasserbelastung erhöht. Dies verlängert seinerseits die für ein Wachstum günstigen Bedingungen (Künzel, Krus et al. 2001; Künzel & Sedlbauer 2001; Krus & Fitz 2005).

Von Erfurth (2002, 2004) wird dies in Abrede gestellt. Für diesen Autor ist die Abtrocknungszeit nach Regen der wichtigste Parameter. Da die Trocknung entscheidend von den  $w$ - und  $sd$ -Werten beeinflusst wird und silikatische Produkte hier entsprechende Werte aufweisen, kommen für Erfurth nur solche Materialien in Frage (Erfurth 2002; Erfurth 2004).

#### 1.4.1.2. Nährstoffe

Neben dem Wasserregime ist die Verfügbarkeit von Nährstoffen der zweite wichtige Punkt. Hierbei kann zwischen der Versorgung aus dem Untergrund (autochthon) und der aus der Umgebung (allochthon) unterschieden werden.

Bei der Versorgung aus dem Untergrund werden Bestandteile der Beschichtung durch enzymatische Reaktionen in Lösung gebracht und in die Zelle aufgenommen. Dazu muss vom Mikroorganismus eine entsprechende enzymatische Ausstattung aufgebracht werden, die die vorliegenden Bestandteile aufspalten kann. Auch wasserlösliche Bestandteile in der Beschichtung, die mit der zwangsläufig einsetzenden Bewitterung ausgewaschen werden, können als Nährstoffquelle dienen.

Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass insbesondere Pilze Beschichtungen besiedeln (Kastien & Sutter 1992; Cox, Houtman et al. 1993; Cox, Faber et al. 1996; Heyn, Petersen et al. 1996; Webb, Nixon et al. 2000; Heyn 2002; Gu 2003; Lugauskas, Levinskaitė et al. 2003). Neben der Möglichkeit, durch Exoenzyme das Polymer direkt anzugreifen (Cox, Houtman et al. 1993; Crabbe, Campell et al. 1994; Cox, Faber et al. 1996; Webb, Nixon et al. 2000), hat die Verwertung von Additiven

(Weichmacher, Cellulosen) aus dem Polymer eine große Bedeutung als Nährstoffquelle für die Pilze (Lugauskas, Levinskaité et al. 2003).

Die allochthone Versorgung zielt auf die aus der Umgebung auf die Beschichtung verfrachteten Stoffe. Dabei handelt es sich um je nach Standort verschieden zusammengesetzte Ablagerungen, die z.B. aus Staub, Ruß, Pollen, organischen gasförmige Substanzen und von Insekten oder anderen Tieren abgelagerten Stoffen (Fäzes, Exuvien, Schleim von Schnecken etc.) bestehen können.

Alle diese organischen Stoffe können von Mikroorganismen zum Wachstum verwertet werden. Hierzu liegen vor allem aus Untersuchungen zur Biodeterioration von Stein Erkenntnisse vor. Obwohl Steinoberflächen und Fassaden auf den ersten Blick nur wenig miteinander zu tun haben, sind die Bedingungen für das Wachstum von Mikroorganismen doch vergleichbar. Beiden gemeinsam sind oft mikrostrukturierte Oberflächen, die wenig oder keine Nährstoffe zur Verfügung stellen, d.h. oligotroph sind. Beide werden den gleichen Umweltbedingungen (hohe Fluktuation an Feuchtigkeit, Temperatur, UV-Licht) ausgesetzt und beide werden von anderen Organismen, vor allem Arthropoden, als Lebensraum genutzt. In dem dadurch entstehenden Gefüge dienen Mikroorganismen als Nahrung für Arthropoden (durch Abweidung entstehender Biofilme) genauso wie diese oder ihre Hinterlassenschaften (Fäces, Exuvien) dann von Bakterien und Pilzen verwertet werden können (Gorbushina & Petersen 2000).

Wichtiger Punkt dieses Nahrungsnetzes ist der Eintrag von Kohlenstoffquellen aus der Atmosphäre. Da sich auf der Umwelt ausgesetzten Oberflächen passiv luftgetragene, partikuläre Stoffe ablagern (Saiz-Jimenez 1997; Bagda & Spindler 2002; Pitzurra, Moroni et al. 2003; Gorbushina 2007), stehen diese den dort lebenden Organismen zur Verfügung. Auch Fettsäuren sowie verschiedenste Kohlenwasserstoffe werden abgelagert und führen zu einem verstärkten Bewuchs, wie Untersuchungen an Gebäuden in Wien ergaben (Sterflinger & Prillinger 2001).

Trotzdem muss die Förderung mikrobiellen Wachstums nicht die zwangsläufige Folge von städtischer Luftverschmutzung sein. Bei Untersuchungen in amerikanischen Großstädten wurde keine Verbindung zwischen Pilzwachstum auf Kalkstein und Kohlenwasserstoffen aus der Atmosphäre festgestellt (Mitchell & Gu 2000).

### 1.4.1.3. Temperatur- und Austrocknungstoleranz

Durch die hohen Temperatur- und Feuchteschwankungen sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf, müssen auf exponierten Oberflächen siedelnde Organismen entsprechende Toleranzen entwickeln. Untersuchungen an steinbesiedelnden Pilzen zeigten, dass einer der wichtigsten Mechanismen der Austrocknungstoleranz das Wachstum in Form schwarzer, kleiner, runder Kolonien ist (meristematisches Wachstum). Dies ermöglicht es den Pilzen, das Volumen-Oberflächen Verhältnis möglichst optimal zu halten. Im Gegensatz zu nicht auf solchen extremen Standorten wachsenden Pilzen sind diese kleinen Kolonien selbst zu einer Ausbreitung fähig, da Sporen- oder Conidienproduktion bei meristematischen Pilzen nicht beobachtet wurde.

Zudem ist für eine hohe Temperaturtoleranz die Austrocknung der Pilze notwendig, da bei komplett hydrierten Thalli die Lethaltemperatur deutlich niedriger lagen (Sterflinger 1998).

### 1.4.2. Organismen

Die Diversität der auf den verschiedensten der Umwelt ausgesetzten Oberflächen gefundenen Organismen ist beträchtlich. Cyanobakterien, Algen, Pilze, Bakterien und Actinomyceten, Myxomyceten, Protozoen und kleinere Arthropoden wie Milben sind auf solchen Oberflächen zu finden (Crispim, Gaylarde et al. 2004; Gaylarde & Gaylarde 2005; Gorbushina 2007). Dabei stellen Pilze, Algen und Cyanobakterien die größte Biomasse, da sie besonders gut UV-Strahlung und wiederholte Austrocknung überstehen.

In vielen Publikationen wird eine Vielzahl von Organismen beschrieben, die an und auf unterschiedlichen Substraten gefunden wurden. Vor allem Pilze werden oft, sowohl in Kombination mit anderen Mikroorganismen als auch allein auf den verschiedensten Substraten wachsend beschrieben (Horvath, Brent et al. 1976; Wainwright, Ali et al. 1993; Crabbe, Campell et al. 1994; Diakumaku, Gorbushina et al. 1995; Garg, Jain et al. 1995; Wollenzien, de Hoog et al. 1995; Ciferri 1999; Gorbushina & Petersen 2000; Mitchell & Gu 2000; Warscheid & Braams 2000; Webb, Nixon et al. 2000; Blaich 2003; English, Fjelde et al. 2003; Gu 2003; Lugauskas, Levinskaité et al. 2003; Pitzurra, Moroni et al. 2003; Gorbushina,

Heyrman et al. 2004). Dies liegt sicher zum einen an ihrer weiten Verbreitung und zum anderen an ihrer hohen Konkurrenzfähigkeit in extremen Habitaten.

Starke Dunkelfärbung zum Schutz vor UV-Strahlung, Austrocknungs- und Salzresistenz sowie die Möglichkeit mancher Arten, dimorph zu wachsen (mit Hyphen oder hefeartige) führen dazu, dass solche Organismen hervorragend an Standorte mit harschen Bedingungen angepasst sind. Pilze können dabei in zwei Gruppen unterteilt werden, die sowohl taxonomisch als auch ökologisch unterschiedlich sind. Einmal die Hyphomyceten (mit Hyphen), die eher bei milden Bedingungen dominieren und zum Anderen die mikrokolonialen Pilze (MCF) die bei extremen Bedingungen die Oberhand haben (Gorbushina 2007).

Die untersuchten Substrate waren sehr unterschiedlich und reichten von Mauerwerk, Gestein, Baufarben, Malereien und Materialien aus Innenräumen bis zu Kunststoffen und Polymeren verschiedenster Art.

Auf Fassadenfarben wurden vor allem Pilze der Gattungen *Aureobasidium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Ulocladium*, *Phoma*, *Nigrospora*, *Epicoccum* u.a. aber auch eine Vielzahl von autotrophen Organismen gefunden (Wee 1988; Gillatt 1991; Heaton, Callow et al. 1991; Gaylarde & Gaylarde 2000; Bagda 2002b; Hofbauer, Breuer et al. 2003; Colon, Kuusisto et al. 2004; Saad, Kinsey et al. 2004; Gaylarde & Gaylarde 2005).

#### 1.4.3. Biologisch induzierte Einflüsse

##### 1.4.3.1. Abbau von mineralischen Oberflächen

Im Gegensatz zu mit Fassadenfarben beschichteten Oberflächen können natürliche Gesteine wie Kalk durch die Einwirkungen von Umwelt ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) und Mikroorganismen schneller angegriffen werden. Da aber bei länger andauernder Besiedlung auch Fassadenbeschichtungen erodieren, sollen kurz die wichtigsten Mechanismen der Gesteinszerstörung skizziert werden, da diese auch an Fassaden auftreten können.

Für einen mikrobiellen Angriff sind zum einen die Produktion und Exkretion von organischen und anorganischen Säuren und zum anderen mechanische Aktivitäten, wie das aktive Eindringen in die Oberfläche ausschlaggebend (Sterflinger 2000;

Burford, Fomina et al. 2003; Crispim, Gaylarde et al. 2004; Herrera & Videla 2004; Hoffland, Kuyper et al. 2004; Gorbushina & Krumbein 2005).

Sowohl Bakterien als auch Pilze sind zu beiden Methoden in der Lage, wobei das Eindringen durch die Hyphen der Pilze stärkere Ausmaße annehmen kann.

Sterflinger (2000) gibt für einen solchen Angriff folgenden Ablauf an. Während des oberflächlichen Wachstums heften sich die Pilze durch Appressorien (Anheftungszellen) an das Gestein. Anschließend dringen dünne Penetrationshyphen über Spalten und Lücken zwischen den Kristallen in das Gestein ein. Die Hyphen folgen diesen Spalten zu kleinen Hohlräumen, in denen neue Kolonien wachsen. Durch den ausgeübten Druck wird der Kristall gelockert bis er schließlich aus dem Gefüge heraus fällt. Dieser Vorgang verläuft kontinuierlich, so dass im Laufe der Zeit sog. Biopits (Löcher biogenen Ursprungs) resultieren, die bis zu 2 cm Durchmesser haben können.

#### 1.4.3.2. Verfärbungen durch mikrobiellen Bewuchs

Ein sehr auffälliges Merkmal mikrobiellen Bewuchses ist die Bildung verschiedener Verfärbungen durch biogene Pigmente wie Carotinoide, Chlorophylle und Melanine (Warscheid & Braams 2000), die besonders auf hellen Oberflächen deutlich sichtbar werden.

Die früher vertretene Meinung, dass es sich nur um Verschmutzungen nichtbiogenen Ursprungs wie Ruß, Staub etc. handelt, ist nach heutigem Kenntnisstand nicht mehr haltbar. Neben diesen Einflüssen sind Pilze, Algen und Cyanobakterien wichtige Verursacher solcher Verfärbungen, vor allem Pilze der Familie Dematiaceae (Gorbushina, Krumbein et al. 1993; Diakumaku, Gorbushina et al. 1995). Gründe für die Verfärbungen sind einmal Farbstoffbildung im Organismus selbst sowie Ausscheidungen und Präzipitationen im Umfeld. Einer der wichtigsten Vorteile, die ein Organismus durch Farbstoffbildung gewinnt, ist die Resistenz gegenüber schädlichen Umweltbedingungen wie z.B. zuviel UV-Strahlung (Gorbushina, Krumbein et al. 2002).

Neben Melanin als wichtigem Farbstoff konnten durch Analysen komplexe Mischungen aus verschiedenen Polysacchariden, Proteinen, Lipiden, Nucleinsäure-Derivaten und aromatische Komponenten als weitere Bestandteile solcher Verfärbungen erkannt werden (Saiz-Jimenez, Ortega-Calvo et al. 1995).

#### 1.4.4. Umwelt-induzierte Veränderungen der Fassadenfarben

##### 1.4.4.1. Vergrauung

Werden anfangs weiße Beschichtungsoberflächen der natürlichen Umwelt ausgesetzt, wird sich im Laufe der Zeit ein schwärzlich-grauer Schleier über die Beschichtung ausbreiten, der mit dem Begriff „Vergrauung“ umschrieben wird. Zu den beiden zu einer Vergrauung führenden Haupteinflüssen zählen Biomasseansammlungen durch die Besiedlung mit Mikroorganismen (dunkel gefärbte Pilze, Cyanobakterien, Algen) sowie Ablagerungen durch Tiere wie z.B. Fäzes, Exuvien oder Haare.

Der zweite Faktor ist die nicht biogen bedingte Verschmutzung z.B. durch sich aus der Luft ablagernde Schwebstoffe wie Ruß und Staub oder vom Boden durch Luftbewegung oder Wasserspritzer auf die Beschichtung aufgetragene Substanzen. Beide Faktoren wirken gleichzeitig auf eine Beschichtung ein und sind eng miteinander assoziiert. Aus diesem Grund ist es wichtig zu erkennen, wie stark ihr jeweiliger Einfluss auf die optischen Veränderungen der Oberfläche ist.

Für eine Bewertung dieser Veränderungen in Hinblick auf die Ermittlung von Unterschieden zwischen den Dispersionssystemen spielen deshalb neben den Eigenschaften der Beschichtung und dem Infektionsdruck durch Mikroorganismen auch die klein- und großklimatische Parameter eines Standortes mit der für die betreffende Umgebung typischen Art und Menge der in der Atmosphäre vorkommenden Partikel eine wichtige Rolle beim Einfluss auf das Phänomen der Vergrauung.

Die für die abiogene Verschmutzung von Fassadenbeschichtungen entscheidenden Partikelgrößenbereiche sind nach Untersuchungen von Bagda & Spindler (2002) die groben Partikel, der Grob- und Feinstaub. Dabei werden die groben Partikel und der Grobstaub durch Sedimentation auf den Beschichtungen abgelagert, während beim Feinstaub dieser Mechanismus keine Rolle spielt. Für diese kleinsten Partikel ist die Auswaschung aus der Atmosphäre durch Regen und die Absorption an der Beschichtung durch z.B. elektrostatische oder van-der-Waals-Kräfte bzw. Wasserstoffbrücken entscheidend.

Demnach kann zwischen einer reversiblen und irreversiblen Vergrauung unterschieden werden. Die reversible wird durch die größeren Partikel  $> 1 \mu\text{m}$  verursacht und kann mit einfachen Mitteln entfernt werden. Der Feinstaub hingegen ist für die irreversible Vergrauung verantwortlich und kann nur durch Lösemittel oder Detergentien entfernt werden (Bagda 2002; Bagda & Spindler 2002).

Da die Zusammensetzung der Grobstaubfraktion an verschiedenen Standorten im Jahresverlauf sehr viel stärker schwankt als die Feinstaubfraktion ist die irreversible Vergrauung besser reproduzierbar (Bagda 2002).

Die in der Atmosphäre auftretenden Partikelgrößenbereiche und deren Herkunft sind in folgender Tabelle nochmals zusammengefasst.

Bezeichnung	Größenbereich	Deposition	Herkunft
Grobe Partikel	$> 10 \mu\text{m}$	$> 1 \text{ cm/s}$ Sinkgeschwindigkeit	Lokal
Grobstaub	$1 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$	$0,1$ bis $1 \text{ cm/s}$ Sinkgeschwindigkeit	Lokal, natürlich, anthropogen, Mikroorganismen
Feinstaub	$100 \text{ nm}$ - $1000 \text{ nm}$	Bleibt in der Schwebelage bis Auswaschung durch Niederschlag	Großräumige Verteilung, wasserlösliche Salze verschiedener Nitrate und Sulfate, organische Verbindungen, Mikroorganismen
Ultrafeine Partikel	$< 100 \text{ nm}$	Abbau durch Oxidation, Umwandlung durch Koagulation	Bildung durch gasförmige Stoffe aus der Atmosphäre

Tab. 1 : Partikelverteilung (verändert nach Bagda & Spindler 2002)

Zur Quantifizierung einer Vergrauung können zwei prinzipiell verschiedene Methoden eingesetzt werden. Zum einen die subjektive Bewertung mit dem menschlichen Auge, bei der die zu quantifizierenden Oberflächen mit bereits existierenden Bewertungsskalen verglichen werden.

Neben der Möglichkeit selbst entwickelte Skalen zu verwenden, ist es für eine Vergleichbarkeit mit Ergebnissen anderer besser, standardisierte Skalen aus Normen zu verwenden. Die amerikanische Norm **ASTM D 3274-95 Standard Test Method for Evaluating Degree of Surface Disfigurement of Paint Films by Microbial (Fungal or Algal) Growth and Dirt Accumulation** sowie die europäische Norm **EN**

**ISO 4628-2:2003 Beschichtungsstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Beurteilung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 2 : Bewertung des Blasengrades** sind für einen solchen Zweck geeignet und wurden in vorliegender Arbeit verwendet (Norm ASTM D 3274-95; Norm DIN EN ISO 4628-2 3/2003).

Die zweite Möglichkeit besteht aus der Verwendung eines objektiv messenden Gerätes, um die subjektive Einflüsse bei der Bestimmung des Vergrauungsgrades auszuschließen. Farbliche Veränderungen und insbesondere die Abnahme der Helligkeit einer Beschichtung lassen sich durch ein Messgerät zudem wesentlich genauer erfassen.

Da der Grund für die Vergrauung aber sehr unterschiedlich sein kann, haben beide Methoden ihre Berechtigung. Das Gerät kann prinzipiell keine Unterscheidung zwischen Bewuchs von Mikroorganismen oder Schmutzaufgabe treffen. Eine Bewertung mit Skalen bietet durch die optische Bewertung zumindest theoretisch die Möglichkeit diese Unterscheidung zu machen. Eine Methode, biogene und abiogene Vergrauung auch quantitativ sicher zu differenzieren, existiert bislang nicht.

In der Farbenindustrie wird zum Zwecke der Bestimmung der farbmtrischen Eigenschaften einer Beschichtung ein Spektralphotometer verwendet. Dieses Gerät besitzt als eigentlichen Messkopf einen definierten, mit einer Öffnung versehenen Kugelraum (Ulbrichkugel), mit der das Gerät auf die zu messende Oberfläche aufgesetzt wird. Im Innern dieses Kugelraums wird ein Lichtblitz abgestrahlt, der durch Reflektion innerhalb der Kugel zu einem diffusen Licht gestreut wird, welches durch die Öffnung auch auf die zu messende Oberfläche gelangt. Durch Vergleich des von der Oberfläche reflektierten Lichts mit dem in der Kugel herrschenden diffusen Streulicht können die farbmtrischen Eigenschaften der Oberfläche erfasst werden.

Die gemessenen Werte sind reine Reflektionswerte, die für einen praktischen Gebrauch in der Coloristik auf das Sehverhalten des menschlichen Auges (z.B. besseres Farbunterscheidungsvermögen bei höheren Helligkeiten) umgerechnet werden müssen. Da es sich in diesem Anwendungsfall um die Messung von Unterschieden handelt, muss ein System verwendet werden, welches diese

Unterschiede möglichst präzise darstellt. Dazu wird oft das CIE-LAB System zur Messung von Farbunterschieden verwendet.

Der dazu verwendete Farbraum entstand durch eine Erweiterung der Normfarbtafel nach CIE (Commission Internationale d'Éclairage). Diese Normtafel war eines der ersten Ordnungssysteme mit dem man Farben einheitlich und objektiv miteinander vergleichen konnte. Um Farbunterschiede genau bestimmen zu können, ist diese Farbtafel aber ungeeignet, da sich in dem verwendeten zweidimensionalen System solche Differenzen nicht einfach als Entfernung ablesen lassen, sondern berechnet werden müssen. Deshalb wurden von der CIE 1976 die Farbwerte der Normtafel in drei neue Größen umgerechnet und in ein sog. psychometrisches Farbdigramm überführt. Die neuen Größen sind der L\*-Wert (lightness), der ein Maß für die Helligkeit der gemessenen Oberfläche ist und von 0 = schwarz bis 100 = Weiß reicht, der a\*-Wert, der für den Farbwert auf der Rot-Grün-Achse steht und der b\*-Wert, der den Farbwert auf der Blau-Gelb-Achse definiert.

In dem so entstehenden einheitlichen Farbenraum spannen die Achsen der vier Grundfarben Rot, Blau, Grün und Gelb eine senkrecht aufeinander stehende Ebene auf, auf der die achromatische (hell-dunkel) Achse ebenfalls senkrecht steht (Völz 1990; Kaffenberg, Turpitz et al. 1998).

Zusammenfassend heißt das:

L\*-Achse: definiert die Helligkeit

a\*-Achse: definiert Buntheit mit negativen Werten = grünlich und positiven Werten = rötlich

b\*-Achse: definiert Buntheit mit negativen Werten = bläulich und positiven Werten = gelblich

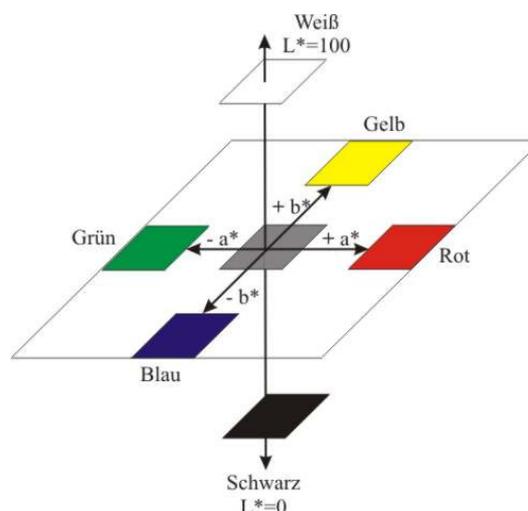


Abb. 5 : Grafische Darstellung der Farbachsen des CIE-LAB Systems (verändert nach Fachgruppe Putz & Dekor im Verband der deutschen Lackindustrie (2007))

Vergleicht man die vor, während und nach einer Bewitterung gemessenen  $L^*$ -Werte miteinander, kann durch Differenzbildung der  $\Delta L^*$ -Wert gebildet werden, der als Maß der Vergrauung gelten kann. Die resultierenden Werte sind negativ bei Verlust an Helligkeit und positiv bei Anstieg der Helligkeit.

$$\Delta L^* = L^*_{\text{bewittert}} - L^*_{\text{unbewittert}}$$

Gleichung 2 : Berechnung des  $\Delta L^*$ -Werts

Mit Hilfe des CIE-LAB System ist es möglich, den Farbabstand zweier farbiger Oberflächen eindeutig zu bestimmen. Man kann also nicht nur Helligkeitsunterschiede ermitteln, sondern auch echte Farbabweichungen wie Vergilbung oder Verfärbungen messen. Dazu wird der sog.  $\Delta E$ -Wert aus den  $L^*a^*b^*$ -Werten ermittelt.

$$\Delta E^*_{\text{ab}} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Gleichung 3 : Berechnung des  $\Delta E^*$ -Werts

#### 1.4.4.2. Kreidung

Ein bei Fassadenfarben wichtiger, nach längerer Einwirkung von Umwelteinflüssen auftretender Effekt ist die Kreidung. Hierbei handelt es sich gemäß der Norm EN 971-2 um das Auftreten von lose anhaftendem feinen Pulver auf der Oberfläche einer Beschichtung, hervorgerufen durch den Abbau eines oder mehrerer ihrer Bestandteile (Norm DIN EN 971-2 1995). Durch UV-Einfluss und photokatalytische Effekte im Zusammenspiel mit Titandioxid, Wasserbelastung und chemische Umwelteinflüsse ( $O_2$ ,  $SO_2$ , u.ä.) wird im Laufe der Zeit das Bindemittel im oberen Bereich des Films abgebaut, es kommt zu starkem Glanzverlust und zum Freiliegen der Pigmente und Füllstoffe, die in der Folge leicht abgerieben werden können. Da es sich hierbei um einen fortschreitenden Prozess handelt, reduziert sich der Beschichtungsfilm mit der Zeit immer mehr. Einerseits werden dadurch aufliegender Schmutz und auch Mikroorganismen von der Oberfläche entfernt, andererseits ist mit diesem Materialverlust auch der Verlust der Schutzfunktion verbunden, was nicht akzeptabel ist (Schmid 1994; Kuroпка 1998).

Von den für Fassadenbeschichtungen gut geeigneten Dispersionstypen sind Styrol / Acrylate gegen diesen Effekt etwas weniger resistent als Reinacrylate.

Ist die UV-Belastung zu Beginn einer Freibewitterung sehr hoch, so kann dies Auswirkungen auf das Kreidungsverhalten haben. So zeigen Exponate, die im August ausgelegt wurden schneller dieses Phänomen, als solche deren Freibewitterungsbeginn im Januar lag (Apitz & Fichtner 2001).

### **1.5. Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss den unterschiedliche Dispersionen sowie verschiedene Pigment-Volumen-Konzentrationen auf das Aufwuchsverhalten von Mikroorganismen auf Fassadenbeschichtungen haben, zu ermitteln. Das Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Pilze gelegt, da sie durch ihre Dunkelfärbung für die Praxis die größte Relevanz besitzen. Zudem sind durch ihre heterotrophe Lebensweise die Fragen der Energiegewinnung aus der Beschichtung und eine Schädigung derselben von Interesse.

Da im Bereich der Fassadenfarben unterschiedlichste Rezepturen existieren, wurde auf eine Standardrezeptur zurückgegriffen, die die wesentlichen Inhaltsstoffe einer solchen Beschichtung aufweist. Die untersuchten Pigment-Volumen-Konzentrationen wurden aus einem Bereich gewählt der für Fassadenfarben üblich ist.

Da das Kleinklima eines Standortes und die Ausrichtung der Proben auf den Bewuchs einen starken Einfluss ausüben können, wurden dieselben Proben an zwei verschiedenen Standorten bewittert, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Fragestellungen bearbeitet, die für das Aufwachsen von Pilzen auf Außendispersionsfarben von Bedeutung sind. Dazu zählen:

- Sind Beschichtungen mit bestimmten Dispersionen anfälliger gegen Pilzbewuchs als andere?
- Ist der Pilzbewuchs unabhängig von der eingesetzten Dispersion?
- Wie ist die Abhängigkeit von Standort und Exposition?
- Gibt es Unterschiede im Bewuchs bei verschiedenen PVK einer Dispersion?

---

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zwei quantitative Parameter ausgewählt, die die dazu nötigen Ergebnisse lieferten.

*A : Anzahl der auf der Beschichtung wachsenden Pilzkolonien pro Flächeneinheit*

Dieser Parameter ermöglicht Aussagen über die Widerstandskraft einer Beschichtung gegenüber dem Besiedlungsdruck von Mikroorganismen. Die Anfälligkeit für das Anhaften von Sporen, Conidien oder Thallusteilen, die Fluktuationen wachsender Kolonien im Verlauf der Zeit (Erosion – erneutes Wachsen) sowie der Einfluss von Oberflächeneigenschaften wie Klebrigkeit und Härte des Beschichtungsfilms sind Faktoren, die so bewertet werden können.

*B : Bedeckungsgrad der Beschichtungsoberfläche mit Biomasse*

Dieser Parameter ermöglicht hingegen Aussagen über die Wachstumsbedingungen auf der Beschichtung. Informationsgewinnung über und die Bewertungen von Faktoren wie die Verfügbarkeit von Nährstoffen aus der Beschichtung, die Etablierung von Pilzkolonien, der Einfluss der Oberflächenstruktur wie z.B. die Porosität oder der Einfluss der Anfälligkeit für Schmutzablagerungen werden hiermit möglich. Im Gegensatz zu Parameter A wird dabei nicht die Menge der auf den Beschichtungen wachsenden Organismen betrachtet, sondern die Fläche die die Biomasse einnimmt bestimmt.

## 2. Material

Zur Erfassung der Unterschiede im Bewuchs wurden sowohl die Art als auch die Menge der Dispersion in Form der Pigment-Volumen-Konzentration in der jeweiligen Variante verändert. Die beiden Parameter wurden in einer Standard-Farb Rezeptur variiert und die entstandenen Variationen auf Faserzementplatten aufgetragen, die in Freibewitterungsständen dem Umwelteinfluss ausgesetzt wurden.

### 2.1. Die Dispersionen

Es wurden fünf verschiedene Dispersionen der Fa. Celanese ausgewählt, die drei unterschiedliche Monomerkombinationen repräsentieren. Zusätzlich weisen die Dispersionen unterschiedliche Glasübergangstemperaturen  $T_g$  und Mindestfilmbildetemperaturen MFT auf, so dass mit diesen Typen in Europa mengenmäßig wichtige Bindemittel für Farben vertreten waren. Nachfolgend werden die Dispersionen im Einzelnen beschrieben.

Mowilith LDM 1871<sup>®</sup>

Die Mowilith LDM 1871 ist ein wässriges, ohne Weichmacherzusätze hergestelltes Copolymerisat aus Vinylacetat und Ethylen. Zur Stabilisierung werden Polyvinylalkohol und oberflächenaktiven Substanzen verwendet.

<b>Festgehalt</b>	<b>Viskosität</b>	<b>pH Wert</b>	<b>MFT</b>	<b><math>T_g</math></b>	<b>Teilchengröße</b>
53 ± 1%	2500 ± 1500 mPas	4,5 ± 0,5	0 °C	ca. 12 °C	ca. 0,1-0,45 µm

Tab. 2 : Parameter Mowilith LDM 1871

Oberhalb der MFT bildet die Mowilith LDM 1871 einen rissfreien und flexiblen Film, der als leicht trüb, weich und zäh charakterisiert wird. Aufgrund des sehr hohen Pigmentbindevermögens liegt der Haupteinsatzbereich in geruchsarmen, lösemittelfreien hochpigmentierten Innenfarben. Weitere Einsatzgebiete sind Latexfarben, blockfeste Seidenglanzfarben sowie Putze und Volltonfarben. Aufgrund von Celanese-internen Bewitterungsversuchen soll sie auch für Außenfarben geeignet sein.

**Mowilith LDM 6119<sup>®</sup>**

Die Mowilith LDM 6119 ist eine wässrige, weichmacherfreie Copolymerisat-Dispersion aus Styrol und einem Acrylsäureester mit oberflächenaktiven Substanzen zur Stabilisierung.

<b>Festgehalt</b>	<b>Viskosität</b>	<b>pH Wert</b>	<b>MFT</b>	<b>T<sub>g</sub></b>	<b>Teilchengröße</b>
50 ± 1%	2500 ± 1500 mPas	8,0 ± 1	0 °C	ca. 1 °C	ca. 0,13 µm

Tab. 3 : Parameter Mowilith LDM 6119

Die Mowilith LDM 6119 bildet oberhalb der MFT einen weichen, rissfreien Film mit niedriger Wasseraufnahme und geringem Weißanlaufen. Er wird als fast klar, etwas klebrig und teilweise mit Oberflächenstrukturen versehen beschrieben.

Empfohlene Einsatzgebiete sind Farben und Putze im mittleren bis hohen PVK-Bereich. Besonders geeignet ist sie für Anwendungen bei denen hohe Wasserfestigkeit und Alkalistabilität gefordert sind. Hochwertige Fassadenfarben mit guten Haftungseigenschaften, Grundierungen, emissionsarme Innen- und Latexfarben, Holzschutzfarben, rißüberbrückende Systeme, Spachtelmassen und Volltonfarben sind weitere Einsatzgebiete.

**Mowilith LDM 7729<sup>®</sup>**

Die Mowilith LDM 7729 ist eine weichmacherfreie Dispersion aus Acryl- und Methacrylsäureestern mit oberflächenaktiven Substanzen zur Stabilisierung.

<b>Festgehalt</b>	<b>Viskosität</b>	<b>pH Wert</b>	<b>MFT</b>	<b>T<sub>g</sub></b>	<b>Teilchengröße</b>
50 ± 1%	2000 ± 1500 mPas	8,5 ± 0,5	0 °C	ca. 0 °C	ca. 0,12 µm

Tab. 4 : Parameter Mowilith LDM 7729

Oberhalb der MFT trocknet der Film zu einem klaren, harten und reißfreien Film mit niedriger Wasseraufnahme und geringem Weißanlaufen, der zudem als elastisch und zäh beschrieben wird.

Die Mowilith LDM 7729 wird für die Einsatzgebiete Fassadenfarben, Holzschutzfarben empfohlen, da sie gute Haftungseigenschaften auf Holz und alten Alkydharzanstrichen oder Zinkblechen aufweist. Auch Volltonfarben können hiermit rezeptiert werden. Produkte auf Basis der Mowilith LDM 7729 zeigen eine hervorragende Wetter- und UV-Beständigkeit.

**Mowilith DM 611<sup>®</sup>**

Die Mowilith DM 611 ist eine wässrige, weichmacherfreie Copolymerisat-Dispersion aus Styrol und einem Acrylsäureester mit oberflächenaktiven Substanzen zur Stabilisierung.

<b>Festgehalt</b>	<b>Viskosität</b>	<b>pH Wert</b>	<b>MFT</b>	<b>T<sub>g</sub></b>	<b>Teilchengröße</b>
50 ± 1%	7500 ± 2000 mPas	8,0 ± 1	ca.17° C	ca. 19° C	ca. 0,15 µm

Tab. 5 : Parameter Mowilith DM 611

Der sich oberhalb der MFT bildende Film ist rissfrei und flexibel mit hoher Wasserbeständigkeit und Alkalistabilität. Die Wasseraufnahme ist gering, zusätzlich wird er als klar und klebfrei beschrieben.

Die Dispersion kann als Universalbindemittel für alle Arten von Farben im mittleren und hohen PVK Bereich eingesetzt werden. Aufgrund der Filmeigenschaften kann sie besonders für Anwendungen verwendet werden, bei denen hohe Wasserfestigkeit und Alkalistabilität gefordert sind. Beispielsweise Fassadenfarben, Grundierungen, rißüberbrückende Systeme aber auch Kleber und Spachtelmassen sowie zementhaltige Systeme.

Aufgrund der hohen MFT ist für eine einwandfreie Verarbeitung bei niedrigeren Temperaturen der Einsatz von Filmbildehilfsmitteln nötig. Zudem verbessern wassermischbare Lösemittel wie Ethylenglykol die Frostbeständigkeit.

**Mowilith LDM 7717<sup>®</sup>**

Die Mowilith LDM 7717 ist eine weichmacherfreie Dispersion aus Acryl- und Methacrylsäureestern mit oberflächenaktiven Substanzen zur Stabilisierung.

<b>Festgehalt</b>	<b>Viskosität</b>	<b>pH Wert</b>	<b>MFT</b>	<b>T<sub>g</sub></b>	<b>Teilchengröße</b>
46 ± 1%	400 ± 200 mPas	8,5 ± 0,5	ca.20° C	ca. 28° C	ca. 0,12 µm

Tab. 6 : Parameter Mowilith LDM 7717

Oberhalb der MFT trocknet die Mowilith LDM 7717 zu einem klaren, harten und rissfreiem Film mit niedriger Wasseraufnahme und geringem Weißanlaufen auf.

Aufgrund der hervorragenden Wetter- und UV-Beständigkeit von mit dieser Dispersion hergestellten Produkten eignet sie sich für Fassadenfarben und Kunstharzputze. Wie bei der Mowilith DM 611 ist auch hier aufgrund der hohen MFT der Einsatz eines Filmbildehilfsmittels angezeigt.

Bei allen fünf verwendeten Dispersionen ist die Verwendung der üblichen Pigmente, Füllstoffe und Additive gewährleistet, in Einzelfällen sollten Verträglichkeiten geprüft werden.

Um den Befall mit Mikroorganismen schon während der Lagerung zu verhindern, sind die Dispersionen mit einer Topfkonservierung ausgestattet. Die Lagerung sollte nicht über 6 Monate ausgedehnt werden, wobei die Temperaturen im Bereich 5-25°C liegen sollten. Frost und starke Sonneneinstrahlung sollten grundsätzlich vermieden werden.

## 2.2. Die Rezepturen

Mit jeder der fünf Dispersionen wurden fünf verschiedenen Testbeschichtungen hergestellt, die sich in der PVK unterschieden. Die PVK wurde dabei von 45 bis 65% in fünf - % Schritten erhöht, die Einstellung geschah über die Variation der Bindemittelmenge. Dazu wurde die Richtrezeptur L 3025 FAI der Fa. Celanese verwendet, von welcher zwei Varianten zum Einsatz kamen. Für Dispersionen mit niedriger MFT wurde die normale Version eingesetzt, während bei den beiden Dispersionen mit hoher MFT (DM 611, LDM 7717) zusätzlich 4,2% Dowanol DPnB als Filmbildehilfsmittel zugegeben wurde.

Pos	Inhaltsstoff	Funktion	Gewichtsanteile	Hersteller
1	Wasser		variabel	
2	Tylose MH 30.000 YP2	Verdicker	3	Clariant GmbH
3	Calgon N ( 10 %-ig )	Dispergiermittel	10	BK Giuliani
4	Lopon 895	Dispergiermittel	3,5	BK Giuliani
5	Agitan 281	Entschäumer	4	Münzing Chemie GmbH
6	Titandioxid Kronos 2190	Pigment	130	Kronos Titan GmbH
7	China Clay Grade B	Füllstoff	50	ECCI
8	Omyacarb 5 GU	Füllstoff	110	Omya GmbH
9	Omyacarb 15 GU	Füllstoff	150	Omya GmbH
10	Glimmer MU-N 85	Füllstoff	30	Ziegler & Co GmbH
11	Mergal K 14	Topfkonservierer	2	Troy Chemie
12	Natronlauge ( 10 %-ig )	Aufschließen Tylose	2	
13	Dispersion	Bindemittel	variabel	Celanese GmbH
	<b>Summe :</b>		<b>1000</b>	

Tab. 7 : Für die Tests verwendete Richtrezeptur L 3025 FAI

Mit dieser Richtrezeptur wurden die verschiedenen Farbmuster aufgebaut. Dabei wurde der Gehalt an Dispersion entsprechend der gewünschten PVK variiert. Als Beispiel sind in nachfolgender Tabelle die Feststoffgewichte, die Dichte der jeweiligen Inhaltsstoffe sowie das daraus resultierende Volumen für die Berechnung der PVK 65 für die Dispersion LDM 1871 angegeben.

	<b>Gewicht (fest) [g]</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>
Kronos 2190	130	4,1	31,71
China Clay B	50	2,6	19,23
Omyacarb 5 GU	110	2,7	40,74
Omyacarb 15 GU	150	2,7	55,56
Glimmer MU-N 85	30	2,85	10,53
<b>LDM 1871</b>	<b>93,4</b>	<b>1,1</b>	<b>84,91</b>
<b>PVK:</b>	<b>65</b>		

Tab. 8 : Parameter für die Berechnung der PVK

$$PVK = \frac{\text{Volumen Pigment} + \text{Volumen Füllstoff}}{\text{Volumen Pigment} + \text{Volumen Füllstoff} + \text{Volumen Bindemittel (fest)}} \cdot 100 (\%)$$

Gleichung 4 : Berechnung der PVK

Nach dieser Formel zur Ermittlung der PVK ergibt sich folgende Berechnung.

$$PVK = \frac{31,71 + 19,23 + 40,74 + 55,56 + 10,53}{31,71 + 19,23 + 40,74 + 55,56 + 10,53 + 84,91} \cdot 100 = 65$$

Gleichung 5 : Beispiel für die Berechnung der PVK

Da in dieser Berechnung für die Dispersionen der Festgehalt angegeben wurde, muß für die Erstellung der Rezeptur wieder auf Nassgehalt umgerechnet werden. Dazu wird das Trockengewicht mit dem Prozentsatz multipliziert. Nachfolgende Tabelle gibt die Naßmengen für die jeweiligen PVK bei den verschiedenen Dispersionen an.

<b>PVK</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>60</b>	<b>65</b>
Dispersion mit 53% FG LDM 1871	400,00	326,42	266,98	217,92	176,23
Dispersionen mit 50% FG LDM 6119, LDM 7729, DM 611	424,00	346,00	283,00	231,00	186,80
Dispersion mit 46% FG LDM 7717	488,52	398,65	326,07	266,15	215,23

Tab. 9 : Nassmengen der Dispersionen

### 2.3. Plattenaufbau

Als Trägersystem für die Farbproben wurden Standard-Faserzementplatten der Fa. Königsmann Dachsysteme, Waldfisch-Burgalben, mit den Abmessungen 50 cm x 20 cm für den Bewitterungsstand in Liederbach und 40 cm x 20 cm für den in Ernsthofen eingesetzt. Die Differenzen in der Größe resultieren aus unterschiedlichen Gestellgrößen auf den beiden Plätzen.

Um eine Standardisierung der Platten bezüglich Alkalität, auswaschbarer Substanzen etc. zu bekommen, werden standardmäßig alle für Freibewitterungen eingesetzte Platten vorher einer Konditionierung in Form einer 3x24-stündigen Wässerung unterzogen. Dies führt zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Nach dem Trocknen wurden die Platten gereinigt und vor dem Auftragen der eigentlichen Testbeschichtung einmal mit einer Grundierung nach Rezeptur 703 G grundiert. Die Kanten und die Plattenrückseiten wurden zudem mit einer Versiegelung nach Rezeptur L 7071 SAI versehen.

<b>Bestandteile</b>	<b>Gewichtsteile</b>
Mowilith DM 7410	700,0
Wasser	159,0
Wasser )	12,0
1,2 Propylenglykol ) zugeben	10,0
Netzmittel AMP 90 )	2,0
Texanol ) gemischt	10,0
Agitan 295 ) zugeben	2,0
Wasser )	36,0
Tafigel PUR 40 ) gemischt	4,0
Methoxybutanol ) zugeben	25,0
Wasser ) gemischt	9,5
Fluowet OTN ) zugeben	0,5
Südranol 230	30,0
	1000,0

Tab. 10 : Rezeptur L 7071 SAI für die Kanten- und Rückseitenabdichtung der Platten

Bestandteile	Gewichtsteile
10 %ige Lösung von Calgon N	10,0
Wasser	39,0
Entschäumer Tebefom 58 K*	1,0
Mowilith DM 760 ca. 34 %	380,0
Wasser	570,0
	1000,0

Tab. 11 : Rezeptur G 703 für die Grundierung der Platten

Die so präparierten Platten trockneten über Nacht bei Raumtemperatur (RT) im Labor. Danach wurden zwei Schichten der Testfarben mit einer dazwischen liegenden Trocknung über Nacht bei RT im Labor mittels einer Walze aufgetragen. Nach einer abschließenden dreitägigen Trocknung bei RT wurden die Platten auf die Bewitterungsstände transferiert (R. Stürmer 2007, pers. Mitteilung). Der Bewitterungsbeginn war am 30.07.2003.



Abb. 6 : Bewitterte Platte aus Liederbach

#### 2.4. Die Bewitterungsstände

Die Freibewitterungen wurden an zwei verschiedenen Orten durchgeführt. Zum einen auf dem Stand der Deutschen Amphibolin Werke in der Nähe von Ernsthofen im Odenwald und zum anderen auf dem Stand der Celanese Emulsions GmbH in der Nähe von Liederbach bei Frankfurt/M.

Die folgende Beschreibung der Standorte verdeutlicht die Unterschiede in den mikroklimatischen Feinheiten, die neben der Art der Beschichtung und der Ausrichtung der Proben wichtig für die Ausprägung des Bewuchses sind.

Gewässernähe, Vegetation, Verkehrsbedingungen oder die Höhe des Standorts können bedeutende Auswirkungen auf die Besiedlung mit Mikroorganismen haben.

#### 2.4.1. Ernsthofen

Der auf 225 m üNN liegende Stand in der Nähe von Ernsthofen befindet sich unterhalb einer relativ stark befahrenen Landstraße im Bereich einer feuchten Bachaue. Er ist durch Wald eingefasst, die Landstraße liegt zwar in unmittelbarer Umgebung, ist durch den Baumbestand allerdings abgeschirmt. Die in der Umgebung vorliegenden landwirtschaftlichen Nutzflächen sind durch die einfassende Vegetation abgeschirmt.

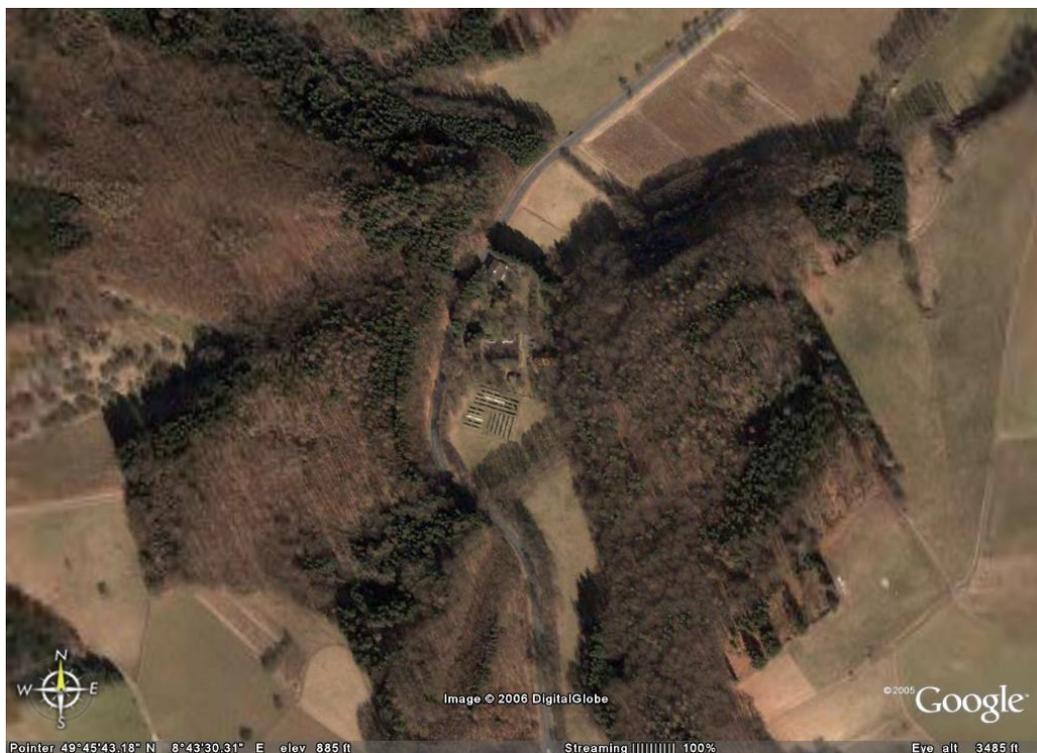


Abb. 7 : Luftaufnahme des Bewitterungsstandes in Ernsthofen

Der Platz ist mit Gras bewachsen, welches im Sommer durch regelmäßiges Mähen unterhalb der Plattengrenzen gehalten wird.

Die Platten sind mit der Ausrichtung West  $90^\circ$  in ca. 170 cm Höhe angebracht und mit jeweils drei Federmechanismen am Gestell befestigt. Im Bereich der Halterungen kam es bei einigen Platten zu einem Feuchtestau und z.T. sehr starkem Algenwachstum mit Läuferbildung. Wegen der nur geringen Größe der Befestigungen kam es aber zu keiner Beeinflussung der eigentlichen Messfläche innerhalb der Platte.



Abb. 8 : Plattenanordnung in Ernhofen

#### 2.4.2. Liederbach bei Frankfurt/M.

Der 6000 m<sup>2</sup> große, auf 143 m üNN liegende Stand liegt in offenem Gelände, welches fast ausschließlich einer landwirtschaftlichen Nutzung unterliegt.



Abb. 9 : Luftaufnahme des Bewitterungsstandes in Liederbach

Eingefasst wird der Platz durch *Rubus*-Hecken und leichten Baumbestand, der Untergrund des Platzes ist mit Gras bewachsen, welches im Sommer regelmäßig gemäht wird. In direkter Umgebung gibt es keine öffentlichen Straßen, nur die befestigte Wege, die als Zufahrten zu den Feldern dienen. Auch stehende oder fließende Gewässer sind nicht vorhanden.

Die Platten sind mit Ausrichtung Süd  $45^\circ$  in ca. 150 cm Höhe in ein Gestell eingelegt und nicht mit mechanischen Befestigungen fixiert. Im unteren Aufstandsbereich des Gestells bilden sich Ansammlungen von Schmutz und Detritus, die durch hohe Feuchtigkeit zu z.T. sehr starker Algenbildung führten. Zu einer Beeinflussung der Messfläche kam es allerdings nicht.



Abb. 10 : Plattenanordnung in Liederbach

### 3. **Methoden**

Zur Bewertung der Platten hinsichtlich des Pilzbewuchses wurden zwei in diesem Zusammenhang relevante Parameter für die Auswertung verwendet.

Durch das Ermitteln der Anzahl der KBE wachsender Pilzkolonien pro Flächeneinheit sind Aussagen über den Widerstand der Beschichtungen gegenüber dem Besiedlungsdruck durch Pilze möglich, während der Bedeckungsgrad der Beschichtungsoberfläche mit biologischem Bewuchs Aussagen über die Wachstumsbedingungen auf der Beschichtung ermöglichen.

#### 3.1. **Charakterisierung des mikrobiellen Bewuchses**

##### 3.1.1. Auszählung des Bewuchses

Aus Erfahrung früherer Bewitterungsversuche kommt es an den Befestigungsstellen der Platten in den Gestellen und den Rändern der Platten zu Artefakten. Die Befestigungen sammeln Wasser und erschweren die Abtrocknung, so dass hier im Laufe der Zeit sehr starkes Algenwachstum auftreten kann. An den Rändern der Platten sind oft verstärktes Pilz- und Algenwachstum zu beobachten, was eventuell auf andere Luftströmungsverhältnisse und in der Folge zu anderen Feuchte- und Nährstoffbedingungen führt. Da diese Artefakte die Ergebnisse beeinflussen würden, wurde die zu beobachtende Fläche auf die Mitte der Platten reduziert. An den Seiten wurden jeweils 3 cm ausgeschlossen, am oberen und unteren Rand wurden bei den Platten in Ernsthofen jeweils 5 cm, bei den Platten in Liederbach 10 cm ausgeschlossen.

Die dadurch entstandene Auswertefläche betrug demnach  $30 \times 14 \text{ cm} = 420 \text{ cm}^2$  pro Platte (vergl. Abb. 11). Diese Fläche wurde über eine Schablone in  $1 \text{ cm}^2$  große Quadrate unterteilt, um bei den Zählungen den Parameter *Pilzcolonien pro  $\text{cm}^2$*  zu gewinnen. Um einen guten Kompromiss zwischen Praktikabilität und möglichst vielen Werten zu bekommen, wurde das Auswertintervall auf zwei Monate, beginnend im Februar 2004, festgelegt.

Für jede Auswertung wurden die Platten von den Bewitterungsständen entfernt und unter einem Lichtmikroskop der Marke Olympus BX 51 mit Kameraaufsatz bei 50facher Vergrößerung bewertet. Danach wurden die Platten wieder zurück auf den Bewitterungsstand gebracht.

Bei den ersten vier Auszählungen wurden ein oder mehrere 1 cm<sup>2</sup> abmessende Quadrate definiert, die repräsentativ für den optischen Zustand der Platten zum jeweiligen Zählzeitpunkt waren. Von diesen Quadraten wurden Fotos bei 50-facher Vergrößerung gemacht, auf denen anschließend der Bewuchs ausgezählt wurde. Zeigte sich eine weitere Differenzierung des Plattenzustands, d.h. Bewuchs und Verschmutzung nahmen zu, so wurden weitere Quadrate in die Fotoserien aufgenommen. Da im Verlauf der Bewitterung die Differenzierung immer stärker einsetzte, wurde ab Oktober 04 auf die Fotos verzichtet und dafür mehr Felder ausgewertet.

Aus den durch die Schablone festgelegten 420 cm<sup>2</sup> wurden mittels Zufallsgenerator 30 Felder einmalig zur weiteren Auswertung ausgewählt. Die in diesen 30 cm<sup>2</sup> (≈ 7,1% der Gesamtfläche) wachsenden Pilz- und Algenkolonien wurden dann alle zwei Monate gezählt. Dadurch wurde der Plattenzustand wesentlich besser erfasst und es wurde möglich, statistische Auswertungen auf Grund der Einzelwerte der Quadrate durchzuführen.

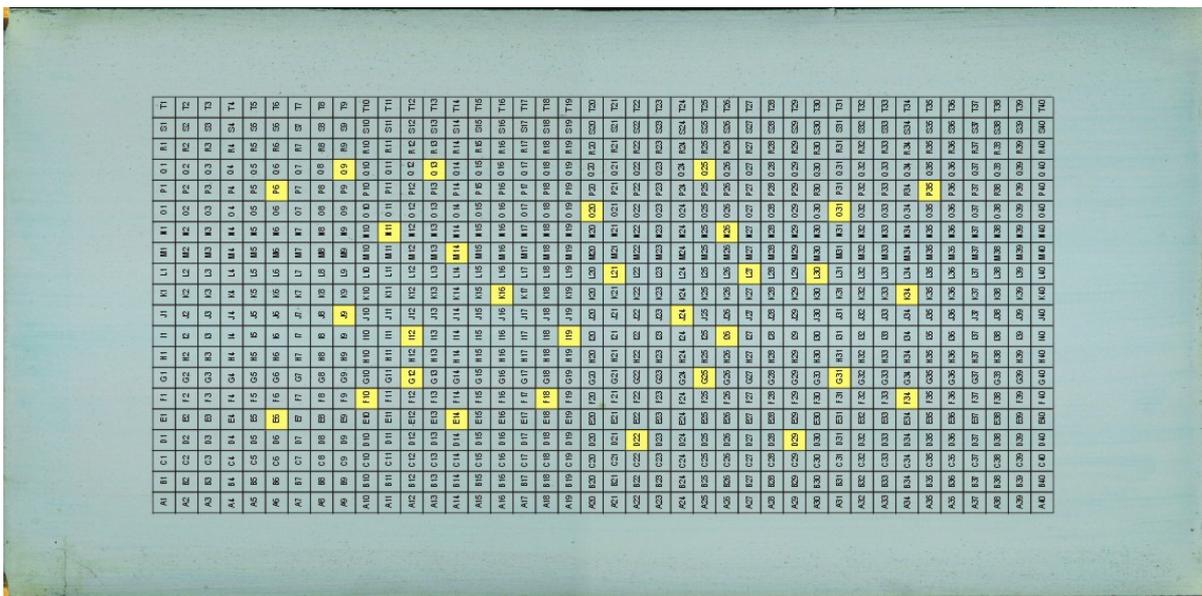
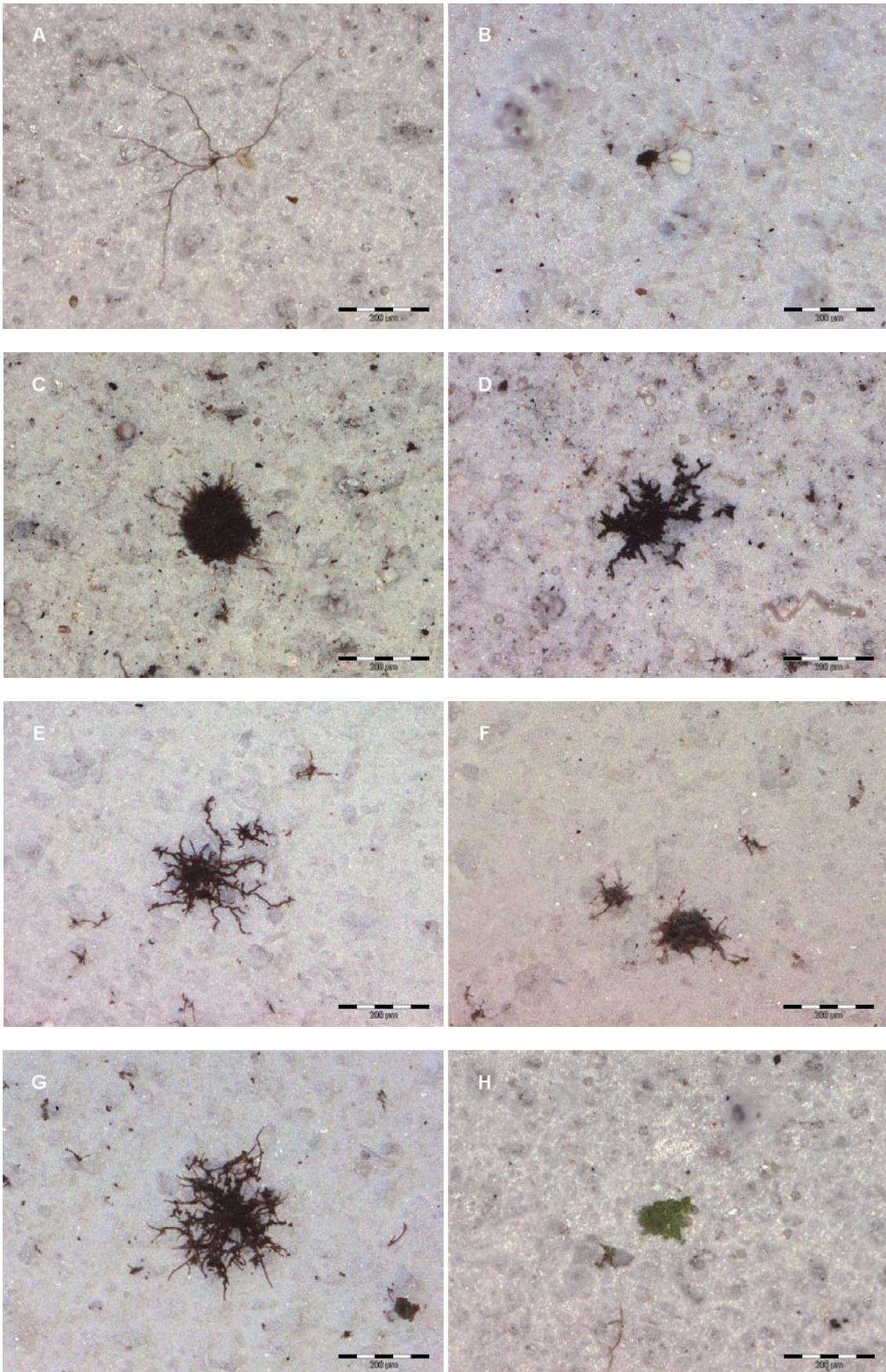


Abb. 11 : Schablone zum Auszählen der Pilzkolonien auf bewitterter Platte aus Ernsthofen

Da die ersten vier Auswertungen statistisch nicht mit den anderen Werten vergleichbar sind und die Zählung im April 2005 krankheitsbedingt für die Liederbach-Platten nicht durchgeführt werden konnte, wurden von den dreizehn Zählungen nur acht Auswertungen in die statistischen Betrachtungen miteinbezogen.

Tafel 1 : Beispiele von Wachstumsformen der auf den Platten gefundenen Kolonien



Als Pilzkolonie gewertet wurden Strukturen, die eindeutiges Wachstum in Form von Mycelbildung aufwiesen, als Algenkolonie wurden klar abgrenzbare, vitale Algen gewertet (vergl. Tafel 1).

Aus den Einzelwerten pro Quadrat wurde ein Mittelwert *Zahl der Pilzkolonien pro cm<sup>2</sup>* für jede einzelne Platte bestimmt, der als Grundlage für weitere Berechnungen und Auswertungen diente.

Die Algen wurden nicht detailliert, sondern nur in ihrer allgemeinen Entwicklungstendenz über den Beobachtungszeitraum betrachtet.

### 3.1.2. Vergleich des Bewuchses mittels Area under the Curve (AUC)

Um Aussagen über Unterschiede im Bewuchsverhalten der einzelnen Dispersionen und PVK besser darstellen und vor allem quantifizieren zu können, ist es nötig, die bei der Zählung ermittelten Werte Pilze/cm<sup>2</sup> miteinander zu vergleichen. Da es sich aber bei diesem Bewuchsverhalten um ein dynamisches, über einen längeren Zeitraum beobachtetes System handelt, ist es ebenso nötig, die Veränderungen im Zeitverlauf mit zu berücksichtigen. Ein Vergleich der Werte nur für die jeweiligen einzelnen Beobachtungszeitpunkte würde die dynamischen Veränderungen auf den Platten nicht genügend einbeziehen.

Um quantitative Veränderungen in der Zeit geht es auch bei vielen Fragestellungen in der klinischen Pharmakologie. Um das Verhalten einer Substanz in der Zeit, d.h. deren Aufnahme in den Organismus bzw. das Entfernen daraus durch Metabolismus und renaler Ausscheidung, zu ermitteln, werden bestimmte Methoden angewandt, die diese Informationen erbringen. Aufgrund der Analogie der quantitativen Wertebestimmung in der Zeit kann eine dieser Methoden auch in dem hier vorliegenden Fall eingesetzt werden (S. Wellek 2005, 2006 pers. Mitteilung).

Diese Methode ist die Bestimmung der Fläche einer Abbau- oder Abklingkurve einer Substanz im Zeitverlauf, die diese mit der x-Achse eines Koordinatenkreuzes einnimmt. Die Fläche ist dann ein Maß für das Verhalten des interessierenden Parameters in der Zeit und kann aufgrund der Standardisierung mit für veränderte Parameter ermittelten Flächen verglichen werden. Aufgrund der Flächenbestimmung wird die Methode Area under the Curve (AUC) genannt (Bourne 2007; Wikipedia 2007).

Zur Bestimmung dieses Wertes wird die von der Kurve und der x-Achse eingeschlossene Fläche integriert. Es handelt sich hierbei um ein bestimmtes Integral, da die Grenzen eindeutig festliegen.

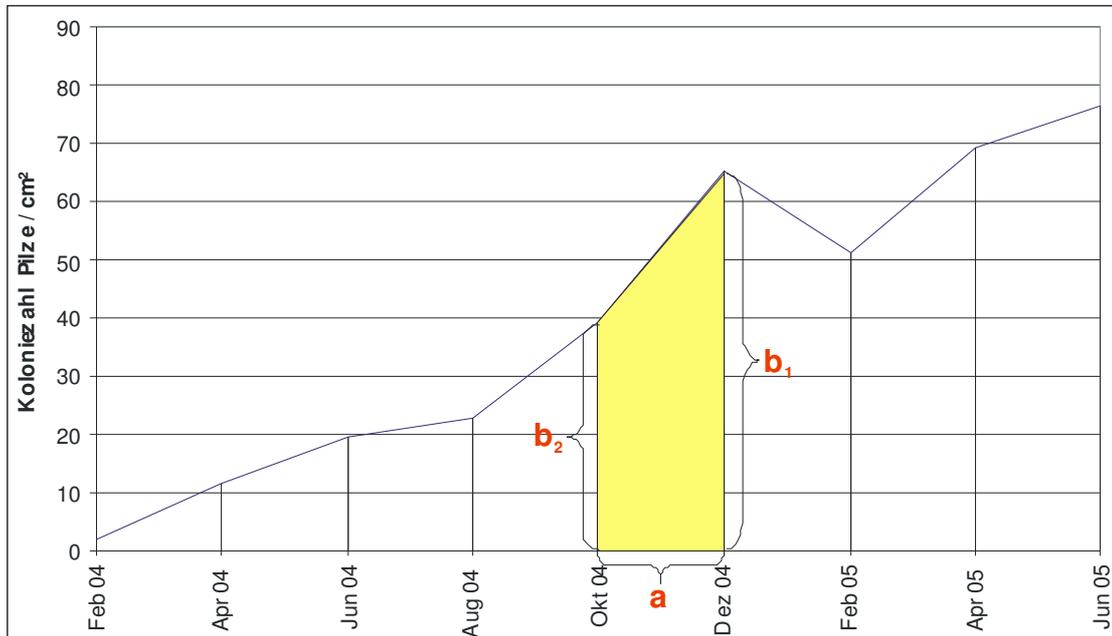


Abb. 12 : Grafische Darstellung der AUC

Die Berechnung der Fläche wird gemäß Gleichung 6 durchgeführt, dabei steht a für die Zeit zwischen zwei Zählzeitpunkten und b1 sowie b2 für die Anzahl an Kolonien zum jeweiligen Zählzeitpunkt.

$$AUC = \sum_{i=1}^k \left( \frac{a * (b_1 + b_2)}{2} \right)_i$$

Gleichung 6 : AUC Flächenberechnung

Es handelt sich hierbei um das über die Zeit gemittelt Niveau einer Einzelkurve, welches sich als die mittlere Ordinate auf diesem Profil darstellt. D.h. die Kurve ergibt ein Maß darüber, was im gesamten Beobachtungszeitraum an Pilzbewuchs zusammenkommt. Da es sich bei den Werten für jeden Beobachtungszeitpunkt um Mittelwerte aus den 30 Einzelfeldern handelt, repräsentiert der resultierende Wert dann die mittlere Anzahl der Pilzkolonien pro cm<sup>2</sup> auf der Platte integriert über die Zeit.

Nachdem der Pilzbewuchs pro Platte in dieser Weise standardisiert wurde, können die einzelnen Plattenwerte miteinander verglichen werden. Die sinnvollste Weise dies zu tun, ist durch Differenzbildung der ermittelten AUC Werte die Unterschiede darzustellen.

Wenn die Platten ein ähnliches Verhalten gegenüber Pilzbewuchs zeigen, so sind ihre jeweiligen AUC Werte ebenfalls ähnlich. Daraus folgt, dass die Differenz umso kleiner ist, je ähnlicher die Platten sind.

Die Differenz wird nach Gleichung 7 berechnet, wobei i und j verschiedene Platten kennzeichnen.

$$\mathbf{AUC\text{-}Differenz } D = AUC_i - AUC_j$$

Gleichung 7 : Berechnung der AUC Differenz

Nun stellt sich die Frage, inwieweit man die ermittelten AUC Werte statistisch trennen kann, d.h. ob zwischen den Werten auch signifikante Unterschiede vorliegen. Um das zu ermitteln, werden um die Werte Konfidenzintervalle gelegt, deren Grenzen eine Aussage über die Signifikanz zulassen.

Als sinnvolles Signifikanzniveau wurden 95% angenommen, so dass das Konfidenzintervall  $KI_{95}$  nach Gleichung 8 berechnet werden kann. Dabei bezeichnet D die Differenz zweier Platten nach Gl. 7 während  $SE_i$  und  $SE_j$  die Standardfehler der jeweiligen Platten darstellt.

$$\mathbf{Konfidenzintervall } KI_{95} = D \pm 1,96 * \sqrt{SE_i^2 + SE_j^2}$$

Gleichung 8 : Berechnung des Konfidenzintervalls  $KI_{95}$

Zur Signifikanzaussage kommt man, wenn man sich die Vorzeichen der Grenzen anschaut. Haben beide Konfidenzgrenzen dieselben Vorzeichen, dann ist die Differenz zwischen den beiden gemittelten AUC's signifikant. Haben die Grenzen des Konfidenzintervalls verschiedene Vorzeichen (sie schließen die Null ein), dann kann eine Differenz Null nicht ausgeschlossen werden, d.h. es liegt keine signifikante Abweichung vor.

### 3.1.3. Isolation von Organismen

Um einen Eindruck über die verschiedenen auf den Platten siedelnden Pilzspezies zu gewinnen, wurden nach Abschluss der Bewitterung 6,25 cm<sup>2</sup> große Felder mittels eines Stemmeisens von allen Platten abgenommen und in je 10 ml steriler 0,9%iger NaCl-Lösung eluiert.

Nach einer Suspendierung von 1h Dauer wurden 0,5 ml der Substrat-Biofilm Suspension mittels Drigalskispatel auf Sabouraud, MEA und Czapek-Dox Agar in dreifacher Ausfertigung ausplattiert. Einige der auf diesen Platten häufig gewachsenen Pilze wurden isoliert und bestimmt.

Zusätzlich wurden mit sterilem Besteck deutlich abgrenzbare Kolonien von den Platten abgenommen, auf Sabouraud Agar kultiviert und anschließend in Reinkulturen überführt. Da auf Sabouraud Agar die Determination von auf oligotrophen Untergründen wachsenden Demaciaceae allgemein als sehr schwierig angesehen wird, wurden die Kulturen auf Czapek-Dox Agar überführt, bei 25°C bebrütet und anschließend unter dem Mikroskop bestimmt. Für die Bestimmung wurden sowohl junge (ca. 1 Woche alt) als auch ältere Kulturen (ca. 2-3 Wochen alt) verwendet. Die Bestimmung erfolgte mit Literatur des Centralbureau voor Schimmelcultures Utrecht und von Arx (Domsch, Gams et al. 1980; von Arx 1981; de Hoog, Guarro et al. 2000).

Zur Kultivierung wurden kommerziell erhältliche Medien verwendet. Nachfolgend sind die Zusammensetzungen der Medien angegeben.

<b>Merck Sabouraud 4% Glucose Agar</b>		<b>Merck Czapek-Dox Agar</b>	
Pepton aus Casein	5 g/l	Saccharose	30 g/l
Pepton aus Fleisch	5 g/l	Natriumnitrat	3 g/l
D(+)-Glucose	40 g/l	Magnesiumsulfat	0,5 g/l
Agar-Agar	15 g/l	Kaliumchlorid	0,5 g/l
pH 5,6 ± 0,2 bei 25°C		Eisen-II-Sulfat	0,01 g/l
		di-Natriumhydrogenphosphat	1,0 g/l
		Agar-Agar	13 g/l
		pH 7,3 ± 0,2 bei 25°C	

<b>Merck Malz Extrakt Agar</b>		<b>Merck Kartoffel-Dextrose Agar</b>	
Malzextrakt	30 g/l	Kartoffelinfusion (aus 200 g Kartoffeln)	4 g/l
Pepton aus Sojamehl	3 g/l	D(+)-Glucose	20 g/l
Agar-Agar	15 g/l	Agar-Agar	15 g/l
pH 5,6 ± 0,2 bei 25°C		pH 5,6 ± 0,2 bei 25°C	

Tab. 12 : Zur Isolation der Organismen verwendete Medien

### 3.1.4. Wachstumsversuche

Da in der Freibewitterung unweigerlich allochthone, also von außen eingetragene, Nährstoffe für die Pilze zur Verfügung stehen, kann dies eine Bewertung der Anfälligkeit der Beschichtung erschweren. Zudem ist die Frage interessant, ob eine auf einer Beschichtung wachsende Pilzkolonie in der Lage ist, Nährstoffe aus dieser zu gewinnen. Da die Dispersionen einen Hauptanteil an organischer Substanz in Farben stellen, wurden Wachstumsversuche durchgeführt, mit denen geprüft werden sollte, ob bestimmte Pilze die in dieser Versuchsreihe verwendeten Bindemittel als einzige C-Quelle zu verwerten in der Lage sind.

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden sowohl Tests mit Pilzen in Flüssigkultur als auch Versuche auf Festmedien durchgeführt. Für die Tests in Flüssigkultur wurden die beiden isolierten Pilze *Cladosporium cladosporioides* und *Aureobasidium pullulans* in einem Mineralmedium unter Glucose-Zusatz angezüchtet. Für die Versuche auf den Festmedien wurden zusätzlich zu den beiden für die Flüssigkulturtests verwendeten Pilzen mit *Trichoderma harzianum*, *Ulocladium botrytis* und *Doratomyces purpureofuscus* noch drei weitere auf den Platten gefundene Pilze verwendet. Von diesen wurden Suspensionen in 0,9% NaCl-Lösung hergestellt, mit denen die Medien angeimpft wurden.

#### Flüssigkulturtests

Für den Test wurden 40 ml eines mineralischen Mediums in einem sterilen Gefäß vorgelegt und mit 0,5 g homogener Mycelsuspension beimpft. Die Homogenisierung wurde mit einem Hochenergiedispersierer der Marke Dispermat CV, VMA Getzmann GmbH, Reichshof, bei 12.000 U/min 3x10 sec durchgeführt. Als C-Quelle wurden jeweils 0,5 g Dispersion (ohne Topfkonservierung) bzw. 0,5 g 20%ige Glucoselösung zugegeben. Diese Anordnung wurde in dreifacher Wiederholung angesetzt, um nach jeweils vier Tagen Bebrüten bei Raumtemperatur über ein mit 1µm Porenweite versehenes Filter mittels Nutsche abfiltriert zu werden. Die nach den jeweiligen Tagen vorliegende Mycelmasse wurde bei 50°C im Trockenschrank getrocknet und ausgewogen. Aus der Massenzunahme kann auf die Verwertbarkeit der einzelnen Dispersionen als C-Quelle geschlossen werden.

## Festmedientests

Hierzu wurde mit Oxoid No. 1 Agar ein Nährboden verwendet, der sich durch Mineralsalzarmut auszeichnet. Zusätzliche Salze wurden keine zugegeben. In den nach dem Autoklavieren handwarm abgekühlten Agar wurde jeweils 1% sowohl unkonservierte als auch mit gängigen Topfkonservierungsmitteln konservierte Dispersion gegeben. Diese Unterscheidung soll zeigen, ob durch die Topfkonservierung ein Einfluss auf das Wachstum ausgeübt wird.

Nach Verfestigung wurde vier bis sieben Tage gewartet, ob eventuell Kontaminationen durch die Vermischung mit den Dispersionen auf den Nährböden auftraten. Keine der Platten wies solche Kontaminationen auf. Anschließend wurden die Platten mit  $3 \times 10^6$  µl Pilzsuspension beimpft. Die Auswertung des Wachstums erfolgte nach 3 bzw. 6 Wochen Bebrütung bei  $23 \pm 1$  °C.

Bei der Auswertung wurde der maximale Radius der gewachsenen Kolonien gemessen. Bei eventuell auftretendem außerhalb des eigentlichen Radius liegendem Wachstum wurde dies vermerkt.

### 3.1.5. Bilddokumentation Wachstum auf den Platten

#### 3.1.5.1. Lichtmikroskopische Aufnahmen

Um einen Überblick über das Erscheinungsbild der auf den Platten gewachsenen Pilzkolonien zu bekommen, wurden von jeder Platte zu bestimmten Zählzeitpunkten fünf Bilder in 50facher Vergrößerung mit dem Lichtmikroskop aufgenommen. Aufgrund dieser morphologischen Informationen war es möglich, Aussagen über das Wachstumsverhalten auf den einzelnen Beschichtungen zu machen. In Zusammenhang mit der Ausrichtung der Platten sollten zudem Informationen über die Anteile an autochthonen und allochthonen Nährstoffen gewonnen werden. Die Vermutung war, dass die Menge an verfügbarer Nahrung bei einigen Pilzen die Koloniegröße beeinflusst, so dass diese Kolonien umso größer werden, je mehr Nährstoffe zur Verfügung stehen.

Weiterhin wurde bei bestimmten Kolonien eine Zuwachsmessung gemacht. Hierbei wurde der Flächenzuwachs des Mycels und der Längenzuwachs einzelner Mycelfäden bei sechs Kolonien im Zeitraum zwischen April 2004 und Juni 2004 bestimmt. Aufgrund des beginnenden Vegetationszyklus sollte hier ein verstärktes Wachstum auftreten, was sich in zunehmender Mycelmasse und -länge

widerspiegeln sollte. Dies kann als Hinweis auf die Nährstoffverfügbarkeit sowohl allochthoner als auch autochthoner Herkunft gewertet werden.

Die Bestimmung des Flächenzuwachses wurde an lichtmikroskopischen Bildern der Kolonien vorgenommen. Dazu wurden die Bilder in Schwarz-Weiß Aufnahmen umgewandelt, so dass der zur Kolonie gehörende Anteil berechnet werden konnte.

Für den Längenzuwachs wurden an den gleichen Bildern ausgesuchte Mycelfäden im April und Juni 2004 vermessen und so der Zuwachs festgestellt.

Da die klimatischen Bedingungen einen bedeutenden Einfluss auf das Wachstum von Mikroorganismen vor allem bei oligotrophen Nährstoffverhältnissen haben, ist die Bewertung klimatische Parameter in Hinblick auf den Bewuchs auf den bewitterten Platten sinnvoll.

Da beide Standorte keine funktionstüchtigen Wetterstationen besitzen, mussten Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet werden. Da für die Region Ernhofen keine geeignete Station (gleiche Höhe, in der Nähe) vorhanden war, wurden nur Daten der ca. 10 km von Liederbach entfernt liegenden Station am Frankfurter Flughafen in die Auswertung übernommen.

Da für den Zeitraum April 2004 bis August 2004 detaillierte Aufnahmen von Pilzkolonien ausgewertet wurden, wurden zu diesen Daten die klimatischen Bedingungen ausgewertet.

Die vom DWD bereitgestellten Daten beinhalten Temperatur, Globalstrahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Luftfeuchte. Für Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag sind die Abweichungen vom langjährigen Mittel angegeben.

#### 3.1.5.2. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Um einen Eindruck vom Umfang des Abbaus der Beschichtungen durch die Pilze zu gewinnen, wurden von einigen ausgewählten Platten rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen mit einem Hitachi S-32 00 N gemacht. Diese Aufnahmen wurden dann mit Bildern der gleichen aber unbewitterten Beschichtungen verglichen. Hierbei ließ sich der Grad an sowohl biogener als auch abiogener Erosion ermitteln. Dabei wurden Bilder von aufgewachsenen Pilzen gemacht, bei denen sich erkennen ließ, wie weit sie die Beschichtung angegriffen oder sonst wie verändert hatten.

Um Objekte im REM untersuchen zu können, müssen sie wasserfrei sein und eine leitfähige Oberfläche aufweisen. Bei herkömmlicher Präparation biologischer Objekte kann es während der Trocknung allerdings sehr leicht zur Artefaktbildung und in der Folge zu nicht mehr interpretierbaren Ergebnissen kommen.

Um dies zu verhindern, wurde nach Abschluss der Entwässerung mittels Ethanolreihe eine Kritische – Punkt – Trocknung durchgeführt.

Komprimiert man ein Gas wie Kohlendioxid unter isothermen Bedingungen, so steigt der Druck bis zu einem bestimmten Punkt, an dem das Gas zu kondensieren beginnt. Der Druck bleibt dann konstant, bis alles Gas als Flüssigkeit vorliegt. Der Volumenbereich, in dem Gas und Flüssigkeit nebeneinander vorliegen (Zweiphasengebiet), wird mit zunehmender Temperatur immer kleiner. Bei einer Temperatur von 31 °C verschwindet er, d.h. oberhalb dieser 31 °C kann das Gas auch durch Druckerhöhung nicht mehr verflüssigt werden.

Der kritische Punkt ist die Druck – Volumen – Kombination auf der zur kritischen Temperatur gehörenden Isotherme, bei der dieses Zweiphasengebiet verschwindet. Für Kohlendioxid liegt dieser Punkt bei 31 °C und 73 bar (Gerthsen, Kneser et al. 1989; Wegener 1989).

Zur Trocknung muss der zur Aufbewahrung der biologischen Proben verwendete absolute Alkohol durch flüssiges Kohlendioxid ersetzt werden. Dies geschieht durch wiederholtes Spülen der Trocknungskammer mit flüssigem Kohlendioxid und dem anschließenden Ablassen des Gemisches. Befindet sich kein Ethanol mehr in der Kammer und den Proben, wird diese sehr langsam bis über die kritische Temperatur erwärmt. Bei Erreichen des kritischen Drucks geht das flüssige Kohlendioxid ohne Phasengrenze in die Gasphase über. Anschließend wird das Kohlendioxid sehr langsam (zur Vermeidung von Rekondensation) aus der Kammer abgelassen. Dadurch ist gewährleistet, dass empfindliche biologische Strukturen auch nach der Trocknung fehlerfrei erhalten bleiben und im REM untersucht werden können.

Die Proben wurden von in Liederbach bewitterten Platten jeder Dispersion der PVK Stufe 55 mittels eines Kreisbohrers ausgebohrt. Um eine Beschädigung der Oberfläche zu vermeiden wurden die Proben nicht von Bohrmehl gereinigt, da beim anschließenden Entwässern dies automatisch mit erfolgte. Die Stücke wurden dann sowohl in der Dicke reduziert, als auch auf die Größe eines REM-Tellers angepasst. Nach erfolgter Entwässerung und Kritischer-Punkt-Trocknung wurden die Proben auf

REM-Teller mittel leitfähigem Kleber aufgeklebt und in einem BAL-TEC Sputter Coater SCD 005 mit Platin bedampft, um eine leitfähige Oberfläche zu gewährleisten.

### 3.1.6. PAS-Färbungen

Um eine Unterscheidung zwischen Schmutzauflage und echtem Bewuchs zu erzielen, wäre es hilfreich, diesen Bewuchs in irgendeiner Weise kenntlich machen zu können.

Biologische Substanzen lassen sich mit geeigneten Methoden anfärben. In diesem Zusammenhang wurde die Anfärbung mittels der Perjodsäure-Schiff Reaktion verwendet.

Bei der PAS – Färbung handelt es sich um eine in der histologischen Technik häufig eingesetzte Färbemethode (Leonhardt 1990). Der Name ist die Abkürzung für **P**erjodic-**A**cid-**S**chiff-Reaction. Mit dieser Methode lassen sich verschiedene in biologischen Systemen vorkommende, kohlenhydrathaltige Substanzen spezifisch anfärben. Dazu zählen Glykogen, Polysaccharide, Cellulose, Phospholipide, neutrale Mucopolysaccharide sowie Muco - und Glycoproteine.

Diese Substanzen finden sich z.B. in Bindegewebsfasern (Kollagen), Basalmembranen und Zellwänden (Glykocalix). In der Dermatologie dient sie dazu, "PAS-positive" Mikroorganismen (Pilze) als Krankheitserreger in der Haut nachzuweisen (Sigma-Aldrich 2003; AWMF 2005; Wroblewski, Bär et al. 2005).

Während der Färbung werden nichtsubstituierte Glykol-Gruppen mit wässriger Perjodsäure zu Aldehyden oxidiert. Diese Aldehyde binden das Sulfid des Schiffschens Reagens (fuchsinschweflige Säure), das dabei freiwerdende Fuchsin (roter, basischer Farbstoff) kann dann die kohlenhydrathaltigen Substanzen rot anfärben. Nachfolgend wird überschüssige fuchsinschwefelige Säure entfernt und die Färbung stabilisiert.

Da in diesem Prozeß in der Regel nur biologische Substanzen angefärbt werden, sollte eine Unterscheidung zwischen mikrobiellem Bewuchs und normaler Schmutzauflage möglich sein.

Aufgrund der zum Teil sehr ausgeprägten Kolonienbildung und der starken Schwarzfärbung werden allerdings oft nur die Randbezirke bzw. vom Kolonienmittelpunkt aus wachsendes Mycel gefärbt, während die mittleren Bereiche

ungefärbt bleiben oder die Färbung nicht sichtbar wird. Bei Überfärbung zur Erfassung dieser Bereiche könnten Mineralkörner ebenfalls Farbstoff anlagern und somit positive Ergebnisse vortäuschen (W.E. Krumbein, pers. Mitteilung).

Trotzdem ist es möglich, durch genaue Beobachtung und technische Hilfsmittel einen Eindruck des Anteils an echtem Bewuchs auf der Oberfläche zu gewinnen.

Eines dieser Hilfsmittel ist die Auswertung der Oberflächen der Beschichtungen mittels computerunterstützter Bildauswertung. Dabei werden die eingefärbten Bildanteile berechnet und miteinander verglichen. Ein direkter Vergleich der biologisch bedingten Auflage wird damit möglich.

Durchgeführt wurden diese Berechnungen durch H. Dipl.-Math. Karsten Rodenacker am Institute of Biomathematics and Biometry in München. Verwendet wurde das Bildverarbeitungssystem IDL der Fa. ITTvis, Boulder, CO, U.S.A.

Bei der Berechnung wurde vom Originalbild ein LCh Bild (Luminance, Chrominance, Hue) erzeugt, welches dann vom Original abgezogen wurde. Dies diente der Hintergrundkorrektur, um Ausleuchtungsartefakte bei der Segmentierung zu vermindern. Anschließend wurde dann eine automatische Schwelle berechnet, ab welcher die Pixel des Bildes mit in die Berechnung eingehen sollten. Die nachfolgende Segmentierung lieferte alle Pixel, die dunkler als diese Schwelle waren oder einen Hue-Winkel (Farbwinkel) größer als -30 Grad hatten (vergl. Abb 13).

Damit wurden dann alle rötlichen und schwärzlichen Pixel eines Bildes erfasst. Bei der abschließenden Detektion wurde die Anzahl der rötlichen, nicht schwärzlichen Pixel ermittelt. Diese sowie die Gesamtanzahl aller Pixel des Bildes wurden dann in die Auswertung des Bedeckungsgrades einbezogen (Karsten Rodenacker, pers. Mitteilung).

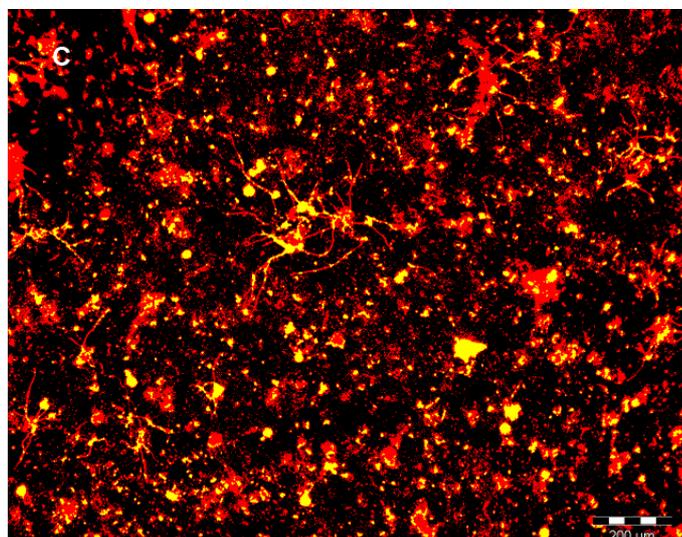
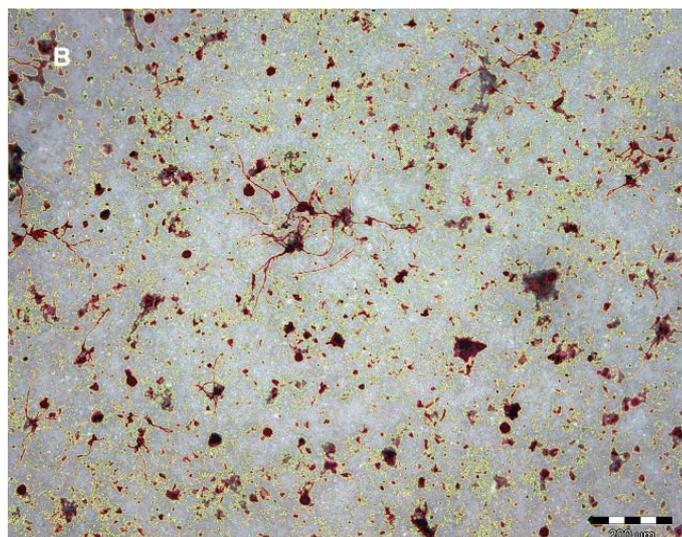
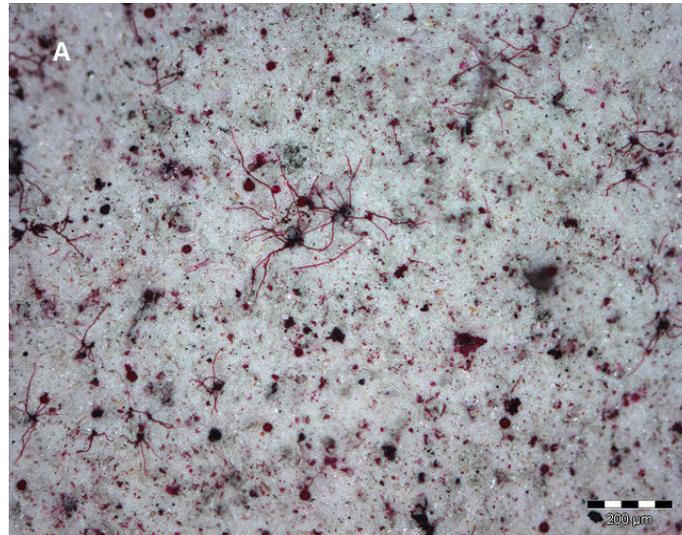
In Bildtafel 2 sind Beispielbilder dargestellt, die die Art der Markierung wiedergeben. Zum Vergleich sind einmal das Original sowie das bearbeitete Bild, in dem die detektierten Pixel entsprechend markiert sind sowie das entsprechende LCh Bild aufgeführt.

Tafel 2 : PAS Färbung Mowilith LDM 1871 PVK 45 Liederbach

A : Originalaufnahme einer Probe mit PAS Färbung

B : Bild mit Segmentierung aller roten und schwarzen Pixel

C : Luminanz-Bild der Probe



## Probenpräparation

Für die Färbungen wurden aus in Liederbach bewitterten Platten aller PVK Stufen jeder Dispersion Proben mittels eines Kreisbohrers ausgebohrt. Diese wurden dann mittels Hammer und Meißel auf Stücke entsprechender Größe reduziert. Diese Stücke wurden dann in Rollrandgläsern der Färbung unterzogen. Für die Berechnung der gefärbten Bildanteile wurde von allen Proben eine Aufnahme unter dem Lichtmikroskop bei 50facher Vergrößerung gemacht. Mit diesen Bildern wurden dann die Berechnungen wie oben beschrieben durchgeführt.

Folgende Werte wurden bei der Auswertung generiert.

- Anzahl aller Pixel pro Bild,
- Anzahl der dunkel gefärbten Pixel pro Bild,
- Anzahl der schwarz gefärbten Pixel pro Bild,
- Anzahl der rot gefärbten Pixel pro Bild.

Daraus wurden dann die prozentualen Anteile der eingefärbten Pixel berechnet. Die Werte „alle dunklen Pixel“ entsprechen dem Anteil dieser Bildpunkte am gesamten Bild, die beiden Werte „Schwarze Pixel“ und „Rote Pixel“ entsprechen den jeweiligen Anteilen an den „dunklen Pixeln“.

Zusätzlich wurde bei den Proben der PVK Stufe 45 auf den Stücken 1 cm<sup>2</sup> bei 50facher Vergrößerung sowohl vor als auch nach der Färbung fotografiert. Bei den Proben der PVK 55 wurden einzelne ausgewählte Stellen in 12,5, 25, 50, 100 und 200facher Vergrößerung ebenfalls vor und nach der Färbung fotografiert. Diese Bilder konnten dann miteinander verglichen werden, um Veränderungen erkennen zu können.

Folgende Vorschrift wurde für die Färbung verwendet.

<b>Vorgang</b>	<b>Dauer</b>
Probe fotografieren	
in 70% Ethanol in Rollrandgläsern anfeuchten (wenn länger, Gläser verschließen, bei 4 °C aufbewahren)	mind. 30 min
in 0,75% Perjodsäurelösung schütteln (Ansatz 0,75% Perjodsäure in Aqua dest.)	5-8 min
In 70% Ethanol schütteln	5 min
In fließendem Leitungswasser spülen	5 min
Wasser abgießen und Rest gut abpipettieren	
In Schiff´s Reagenz färben, dabei fortschreitende Rotfärbung beobachten	Wenige Sekunden bis 2 min
In 0,6% Natriumsulfitlösung schütteln (Ansatz : 0,6% Natriumsulfit in Leitungswasser : HCl = 95:5	2 x 3 min
In fließendem Leitungswasser spülen	10 min
Proben fotografieren	

Tab. 13 : Anleitung zur PAS Präparation

Die Lagerung erfolgte trocken in Rollrandgläsern, da bei Lagerung in 70% Ethanol die Beschichtung im Laufe der Zeit zerstört wird.

### **3.2. Charakterisierung der Veränderungen der Testbeschichtungen**

Zur Abschätzung der Anfälligkeit von Fassadenbeschichtungen gegenüber Pilzbewuchs ist nicht nur die Anzahl pro Flächeneinheit interessant, sondern auch die Größe der Kolonien, mithin die flächenmäßige Ausdehnung des Pilzbewuchses. Je größer eine Kolonie werden kann, desto besser sollten auch die Wachstumsbedingungen im Hinblick auf Wasser und Nährstoffverfügbarkeit sein. Die Ermittlung dieses Parameters gestaltet sich allerdings schwieriger als die Feststellung der Anzahl, da sich meist die Schmutzaufgabe nur wenig oder gar nicht von Pilzbewuchs unterscheidet. Deshalb sollte durch die Verwendung mehrerer Methoden untersucht werden, ob und in wie weit ein Bedeckungsgrad mit Pilzbewuchs überhaupt mit solchen Mitteln bestimmbar ist.

Zur Anwendung kamen Methoden zur Bestimmung der Helligkeit und des allgemeinen optischen Eindrucks der Oberflächen. Sie sind sowohl technischer Art, als auch auf der Erfassung mit bloßem Auge basierend. Die mit diesen Methoden gewonnenen Ergebnisse wurden dann sowohl im Hinblick auf die Eignung als Maß für die Pilzbedeckung als auch in Bezug zur Verschmutzungsneigung der Dispersionen ausgewertet.

Mit den zusätzlich durchgeführten Wachstumstests wurde das Nährstoffpotential der Dispersionen ausgelotet, während die Bilddokumentationen die Veränderungen der Oberflächen darstellen. Auch dies kann Aufschluss über das Ausmaß der Anfälligkeit gegenüber Pilzen geben.

### 3.2.1. Messung L\*-Werte und Glanzgrad, L\*-Wert Verlustrate

Eine dieser Methoden ist die Bestimmung der Helligkeit und der Farbwerte durch die L\*a\*b\*-Wert -Messungen. Diese Werte sowie die jeweiligen Glanzgrade wurden wie die Anzahl der Pilze alle zwei Monate bestimmt. Für die Bestimmung der L\*a\*b\*-Werte wurde das Messgerät Dr. Lange Spectro Color und für die Glanzmessung das Gerät Erichsen Picogloss 503 mit 85° Messwinkel verwendet. Auf jeder Platte wurden fünf Messungen in nachfolgend dargestellter Weise durchgeführt und die daraus gewonnenen Mittelwerte notiert.

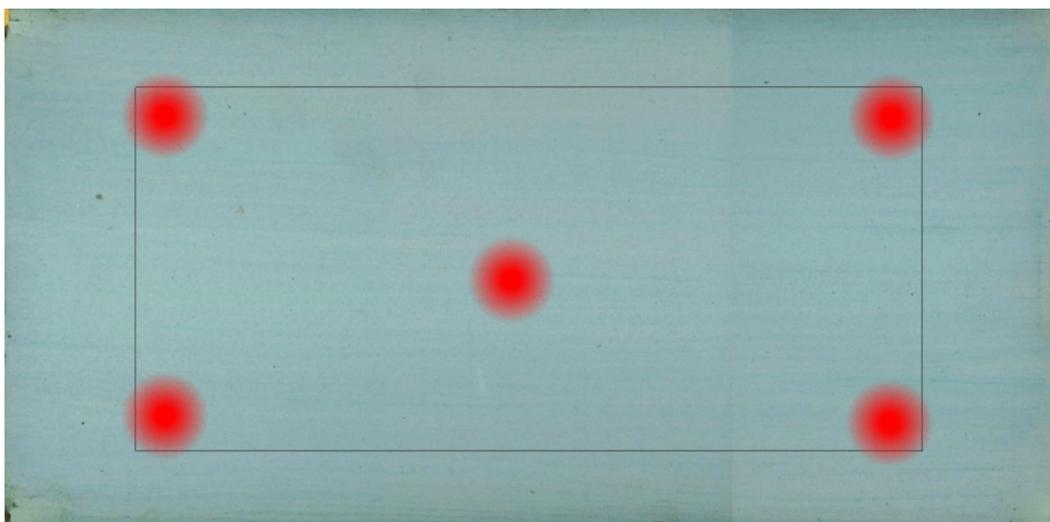


Abb. 13 : Messpunkte auf den Platten

Zur Abschätzung der in den zwei Monaten zwischen zwei L\*-Wert Bestimmungen aufgetretenen optischen Veränderungen wurde die L\*-Wert-Verlustrate von

Messung zu Messung in Prozent bestimmt. Dies zeigt, wie stark die Helligkeit der betreffenden Platte über die zwei Monate Versuchsdauer abgenommen hat. Im Zusammenschluss mit den Wetterdaten lassen sich hier witterungs- und umgebungsbedingte, d.h. kleinklimatische, Auswirkungen auf die Platten erkennen.

Zusätzlich wird die Differenz zwischen dem Nullwert und dem letzten gemessenen  $L^*$ -Wert, d.h. der Gesamt- $\Delta L^*$ -Wert, ermittelt und als Prozentwert angegeben. Daraus lässt sich dann ein Mittelwert für je zwei Monate Bewitterung berechnen. Durch Vergleich der explizit für jeden Zeitraum bestimmten Verluste mit dem Mittelwert ergeben sich weitere Hinweise auf die kleinklimatischen Bedingungen an den Standorten.

### 3.2.2. Korrelation / Regression zwischen $L^*$ -Wert und Pilzanzahl/cm<sup>2</sup>

Im Hinblick auf den Bedeckungsgrad der Beschichtungen mit Pilzen stellt sich die Frage, ob der  $L^*$ -Wert für die Bewertung des Pilzbewuchses ein geeigneter Parameter ist. Theoretisch sollten die Oberflächen der Beschichtungen durch den Bewuchs mit Pilzen (vor allem mit Dematiaceae, den sog. Schwärzepilzen) dunkler werden und demnach zu einem Fallen des  $L^*$ -Werts führen.

Da eine Verschmutzung allerdings den gleichen Effekt haben wird, müssen Veränderungen des  $L^*$ -Werts immer im Zusammenspiel Verschmutzung und Entwicklung des Pilzbewuchses betrachtet werden.

Um einen eventuell vorhandenen stochastischen Zusammenhang erfassen zu können, wurden diese beiden Parameter mittels einer Korrelations- und Regressionsanalyse betrachtet.

#### Korrelation

Zur Erfassung der Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs dient der Korrelationskoeffizient  $r$ . Dieser Koeffizient kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen, liegt er bei Null, besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den betrachteten Variablen. Ist er positiv, so besteht ein gleichläufiger, ist er negativ, ein gegenläufiger Zusammenhang. Für den hier betrachteten Fall ist ein gegenläufiger Zusammenhang wahrscheinlich, so dass der Korrelationskoeffizient negativ sein sollte (Sachs 2003).

## Regression

Mittels der linearen Regression wird abgeschätzt, wie stark der L\*-Wert durch den Pilzbewuchs beeinflusst wird. Man setzt also den Pilzbewuchs als unabhängige oder Einflussvariable  $x$  und den L\*-Wert als abhängige oder Zielvariable  $y$ .

Die ermittelten Wertepaare werden dann in einem Koordinatenkreuz als Punktwolke dargestellt, durch die eine Ausgleichs- oder Regressionsgerade gelegt wird. Diese Gerade hat die allgemeine Form  $y = a + bx$ .

Dabei steht  $a$  für den Schnittpunkt zwischen der angepassten Gerade und der  $y$ -Achse (Ordinatenabschnitt) und  $b$  für den Grad der Steigung der Geraden (Regressionskoeffizient). Bei der Anpassung der Geraden in die Punktwolke wird diese so gelegt, dass eine möglichst gute Annäherung an die empirisch ermittelten  $y$ -Werte erreicht wird. Die Quadratsumme der vertikalen Abweichungen dieser Punkte von der geschätzten Geraden soll möglichst klein sein (Prinzip der kleinsten Quadrate). Große Abweichungen tragen deshalb besonders stark zur Positionierung der Geraden bei (Sachs 2003). Die zur Berechnung der linearen Abhängigkeiten (I.A.) nötigen Gleichungen sind nachfolgend angegeben. Dabei bezeichnen  $X_i$  (für die Pilzanzahl) und  $Y_i$  (für den L\*-Wert) die Einzelwerte der jeweiligen Datenreihen, während  $\bar{X}$  und  $\bar{Y}$  die Mittelwerte der Datenreihen bezeichnen.  $N$  steht für die Anzahl der Werte in der Datenreihe.

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\left[ \sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2 \right]}}$$

Gleichung 9 : Berechnung der Stärke der I.A. ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten  $r$

$$b_{yx} = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

Gleichung 10 : Berechnung der Art der I. A ausgedrückt durch den Regressionskoeffizienten  $b$

Zur Prüfung des Korrelationskoeffizienten auf Signifikanz wird der Betrag von  $r$  mit einem für die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit und dem vorliegenden Freiheitsgrad entscheidenden, tabellierten Wert verglichen. Erreicht oder überschreitet er diesen Wert, liegt Signifikanz vor (Sachs 2003).

### 3.2.3. Wasserhaushalt der Beschichtungen

Die Ermittlung der für den Wasserhaushalt wichtigsten Parameter  $w$ - und  $sd$ -Wert erfolgt gemäß der beiden Normen DIN EN 1062-3 ( $w$ -Wert) und EN ISO 7783-2 ( $sd$ -Wert). Zur Bestimmung des  $w$ -Werts werden saubere und trockene Prüfkörper mit dem zu testenden Produkt beschichtet, die frei bleibenden Seiten werden gegen Eindringen von Wasser abgedichtet. Nach Trocknung und Konditionierung werden die Prüfkörper mit der beschichteten Seite in ein Wasserbad gelegt und in definierten Abständen gewogen. Die Massenzunahme wird grafisch gegen die Zeit aufgetragen, der  $w$ -Wert ist die Steigung des linearen Teils der Kurve (Norm DIN EN 1062-3 1998). Um das Verfahren abzukürzen wird oft der  $W_{24}$ -Wert angegeben, d.h. die ermittelte Wasseraufnahme nach 24-stündigem Eintauchen.

Für die Bestimmung des  $sd$ -Werts wird die Beschichtung auf poröse Glasfritten aufgetragen, getrocknet und konditioniert. Mit den so vorbereiteten Proben werden dann mit einer gesättigten Ammoniumdihydrogenphosphat-Lösung gefüllte Schalen abgedeckt. Da sich oberhalb der Lösung eine relative Luftfeuchte von 93% einstellt, besteht gegenüber den auf der beschichteten Seite eingestellten 50% relative Luftfeuchte ein Diffusionsgefälle. Der dadurch hervorgerufene Massenverlust an Wasser wird gemessen, gegen die Zeit aufgetragen und nach in der Norm angegebenen Gleichungen in den  $sd$ -Wert umgerechnet (Norm DIN EN ISO 7783-2 1999).

Die Messungen wurden im messtechnischen Labor des Dr.-Robert-Murjahn-Instituts, Ober-Ramstadt durchgeführt.

Die Wasseraufnahme der freien Dispersionsfilme wurde im Labor der Celanese Emulsions GmbH durchgeführt. Dabei wurden die Filme nach dem gießen bei 50 °C 24h getrocknet und anschließend bei Raumtemperatur 6 Tage gelagert. Danach wurden die Filme 24 h im Wasser gelagert und die Wasseraufnahme bestimmt.

Nach dem Trocknen bis zur Gewichtskonstanz wurde eine zweite Wasseraufnahme durchgeführt (T. Fichtner, pers. Mitteilung).

#### 3.2.4. Optischer Eindruck nach ASTM und ISO

Neben der technischen Ermittlung der Änderungen in der Helligkeit werden zur Abschätzung der makroskopischen Entwicklung auch einfache optische Bewertungssysteme verwendet.

In der Praxis ist es meist zu aufwendig und im Allgemeinen auch nicht nötig eine detaillierte Bewertung bewitterter Oberflächen vorzunehmen. Die Evaluierung der optischen Veränderungen von Fassadenoberflächen oder zu Testzwecken der Bewitterung ausgesetzten Platten wird in diesen Fällen oft mittels schneller und einfacher Bewertungsschemata durchgeführt, die der Einfachheit halber meist mit dem unbewaffneten Auge durchgeführt werden. Dabei werden diese Schemata sowohl für die Bewertung des Pilzbewuchses als auch für die der Verschmutzung eingesetzt, eine Differenzierung zwischen Verschmutzung und Pilzbewuchs erfolgt jedoch häufig nicht oder nur oberflächlich. Ursachen hierfür sind Schwierigkeiten, eine hinreichend genaue Unterscheidung zwischen Bewuchs und Verschmutzung zu treffen und die fehlende Zeit, eine eventuell vorhandene Vielzahl von Proben genauer mit dem Mikroskop zu untersuchen.

Durch Bewertung der Platten mittels der beiden in vorliegender Arbeit eingesetzten Schemata sollte überprüft werden, wie der Verlauf der Besiedlung und Verschmutzung durch solche Schemata einzuschätzen ist und sich damit ein Bedeckungsgrad für den Pilzbewuchs ermitteln lässt.

Die Beurteilungen wurden zu jedem Zählzeitpunkt nach zwei verschiedenen Normen vorgenommen. Einmal nach der amerikanischen Norm **ASTM D 3274-95** Standard Test Method for Evaluating Degree of Surface Disfigurement of Paint Films by Microbial (Fungal or Algal) Growth and Dirt Accumulation und zum anderen nach der europäischen Norm **EN ISO 4628-2:2003** Beschichtungstoffe – Beurteilung von Beschichtungsschäden – Beurteilung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen – Teil 2 : Bewertung des Blasengrades.

Die ASTM Norm legt ein zehnstufiges Bewertungssystem zugrunde, welches durch fünf Fotografien mit den Bewertungen 0, 2, 4, 6 und 8 unterstützt wird. Eine

Bewertung von zehn repräsentiert dabei eine völlig saubere, eine Null eine völlig verschmutzte Oberfläche.

Durch Vergleich der zu bewertenden Oberfläche mit den Fotos kann dann eine Zuordnung erfolgen. Ist die Verschmutzung zwischen zwei Photos angesiedelt, wird die entsprechende dazwischen liegende Bewertung ausgewählt.

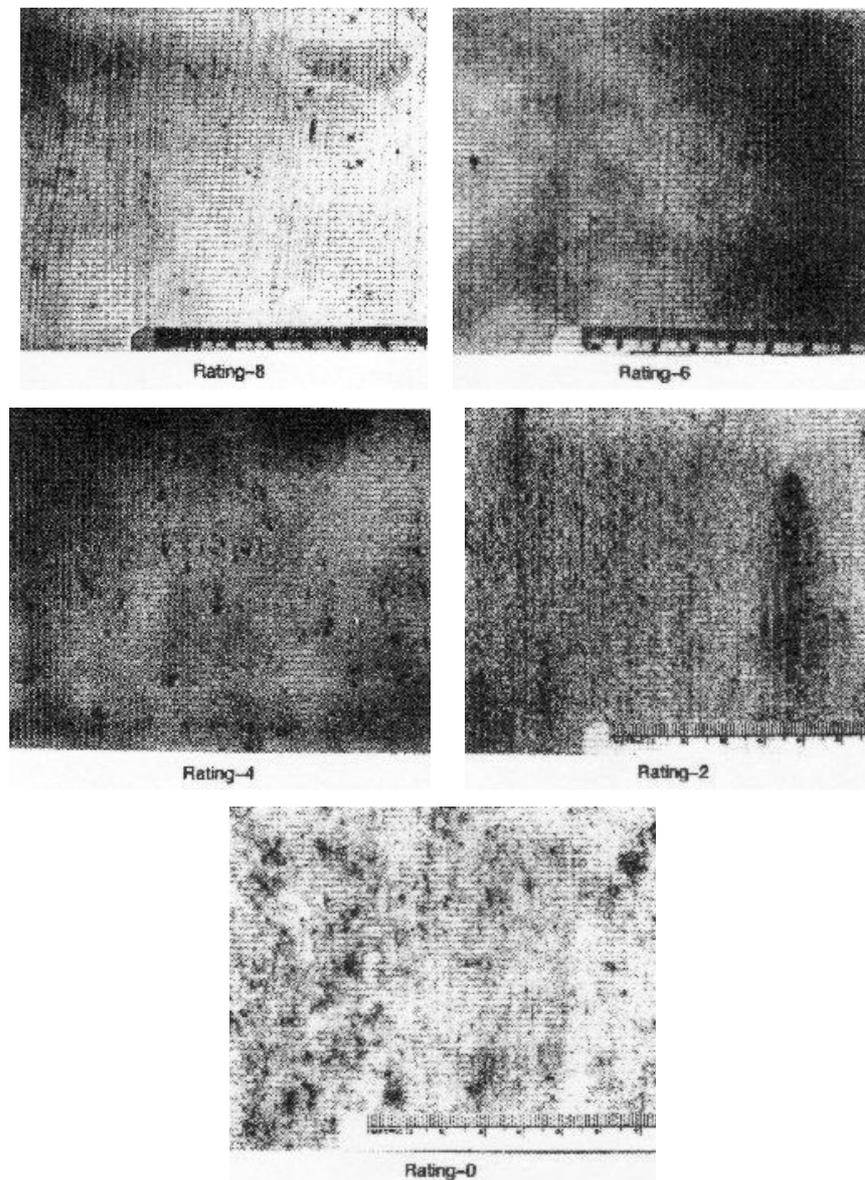


Abb. 14 : Kategorien der Norm ASTM D 3274-95

Der eigentliche Zweck der ISO Norm ist Bewertung der Größe und Menge von Blasen, die während einer Bewitterung auf Beschichtungen auftreten können. Da die optischen Veränderungen auf den Platten makroskopisch als Punkte verschiedener Größe in Erscheinung traten, kann hier in Analogie eine Bewertung nach dieser Norm durchgeführt werden.

Die Menge der Blasen, d.h. in diesem Falle der Verunreinigungen, wird in vier, die Größe in fünf Kategorien aufgeteilt. Beide Kategorien werden in Kombination eingesetzt, um eine eindeutige Bewertung vorzunehmen.

Beispielsweise werden sehr viele sehr kleine Verunreinigungen in der Menge mit 5 und in der Größe mit S2 bewertet, während sehr wenige aber sehr große in der Menge mit 2 und in der Größe mit S5 eingestuft werden.

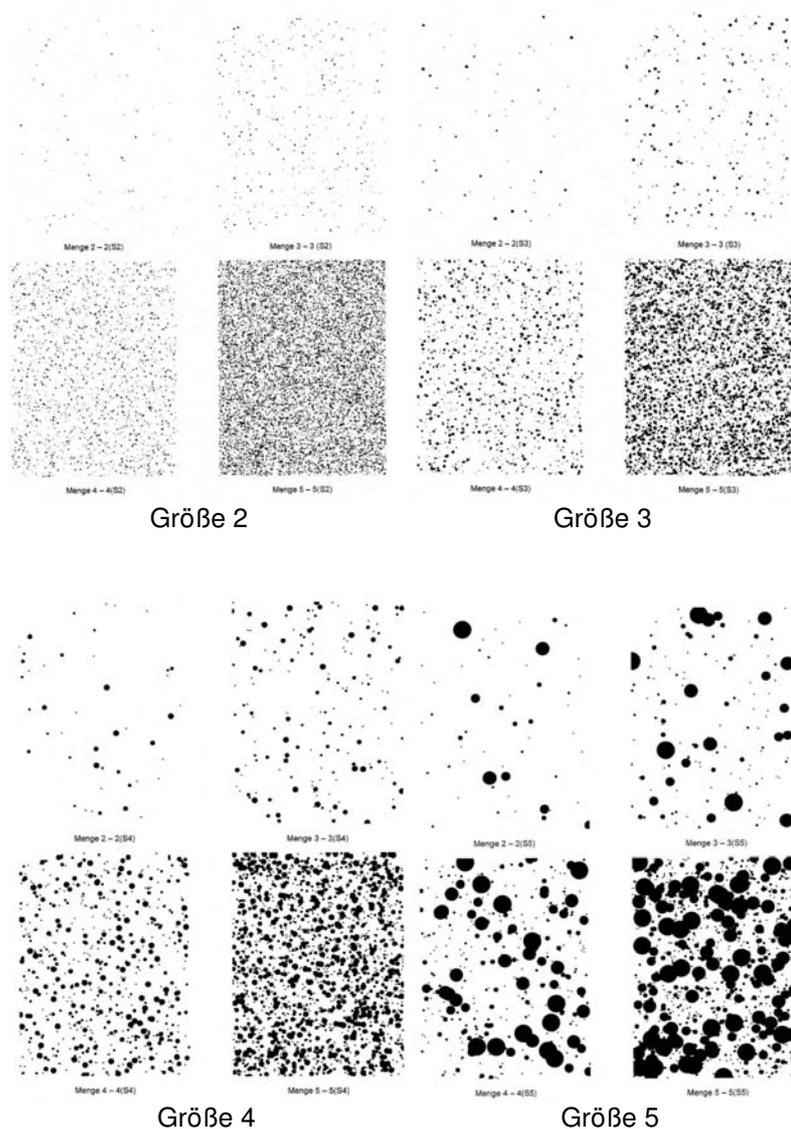


Abb. 15 : Kategorien der Norm EN ISO 4628-2:2003

### 3.2.5. Randwinkelmessungen

Setzt sich ein Wassertropfen auf eine Oberfläche, spannt der Rand dieses Tropfens mit dem Untergrund einen Winkel auf, dessen Größe entsprechend der Young-Dupree Gleichung von der Oberflächenspannung des Wassers, der des

Untergrunds und der Grenzflächenspannung zwischen diesen beiden abhängt. Prinzipiell kann man zwischen hydrophilen Oberflächen mit einem Winkel  $< 90^\circ$  und hydrophoben Oberflächen mit einem Winkel  $> 90^\circ$  unterscheiden (Bagda & Ülgen 2006). Bei bewitterten Oberflächen wird man oft niedrigere Randwinkel messen, da hier durch die Einwirkungen der Umwelt die anorganischen Bestandteile freigewittert wurden und diese selbst keine Hydrophobizität aufweisen. Um eventuelle Unterschiede im Bewuchsverhalten in Beziehung zur Resthydrophobizität der Beschichtungen setzen zu können, wurden bei allen Platten nach Abschluss der Bewitterungen die Randwinkel bestimmt. Zum Vergleich wurden die Beschichtungen auf Kunststoffolie aufgezogen, ebenfalls vermessen und mit den Werten nach der Bewitterung in Beziehung gesetzt. Daraus lässt sich dann die Wirkung der Bewitterung ableiten.

Für die Messungen wurde eine Randwinkelmessanlage Dataphysics Contact Angle System OCA 15 plus mit Teli CCD Kamera verwendet. Für die eigentliche Messung wurde ein Tropfen destillierten Wassers auf die Oberfläche abgesetzt. Direkt nach dem Absetzen wurde eine Kamera eingeschaltet, die über eine Minute alle zwei Sekunden ein Bild macht. In dieser Bildersequenz wurden anschließend mittels einer Software die Randwinkel gemessen. Die so gewonnenen Daten können dann grafisch und rechnerisch ausgewertet werden.

## 4. Ergebnisse

### 4.1. Pilzbewuchs auf den Platten

Die im Abschnitt 3.1.1. dargestellte Auszählung der Pilzkolonien auf den Platten führte pro Zählzeitpunkt zu jeweils 30 Werten pro Platte. In den nachfolgenden Tabellen sind die Mittelwerte der einzelnen Zählungen aufgeführt. Sie repräsentieren den mittleren Bewuchs pro cm<sup>2</sup> im ausgewerteten Bereich jeder einzelnen Platte.

Zuerst werden die Werte aus Ernsthofen vorgestellt, wobei zu Beginn ein Gesamtüberblick gegeben wird und nachfolgend die Dispersionen einzeln besprochen werden.

#### 4.1.1. Ernsthofen

	PVK	Feb 04	Apr 04	Jun 04	Aug 04	Okt 04	Dez 04	Feb 05	Apr 05	Jun 05	Aug 05	Okt 05	Dez 05	Feb 06
LDM 1871	45	1	0	32	5	2	11	20	23	39	65	51	69	77
	50	1	6	78	27	50	84	81	103	147	105	81	77	72
	55	5	37	60	58	75	127	120	165	173	144	115	102	66
	60	43	38	134	57	30	52	45	305	109	120	138	193	198
	65	21	30	128	131	374	420	357	371	489	412	414	405	341
LDM 6119	45	0	0	4	1	1	1	1	1	2	12	38	45	38
	50	2	0	2	6	0	1	1	1	2	7	38	31	29
	55	0	1	2	12	2	4	4	3	9	18	50	50	60
	60	0	0	0	2	4	5	6	3	8	16	46	41	51
	65	0	1	4	19	12	11	9	11	24	25	46	42	60
LDM 7729	45	0	1	3	1	0	1	2	1	8	8	30	32	42
	50	0	0	0	1	1	2	2	2	8	11	27	26	32
	55	0	1	0	4	3	3	5	5	12	16	25	30	38
	60	0	1	0	1	7	12	13	12	14	26	24	21	26
	65	2	2	0	10	17	18	22	27	37	29	36	43	44
DM 611	45	0	0	1	4	1	0	1	0	1	3	9	6	7
	50	0	0	9	3	5	5	6	3	8	14	28	32	40
	55	0	0	2	8	0	1	1	1	4	15	20	14	18
	60	0	0	0	0	2	3	3	2	6	13	18	19	26
	65	0	0	4	25	8	16	15	13	20	14	24	28	41
LDM 7717	45	2	10	28	23	13	17	17	11	15	27	45	46	52
	50	3	2	14	17	12	23	25	n.b.	20	23	39	59	64
	55	17	7	31	25	17	23	26	n.b.	29	39	78	112	93
	60	1	20	57	20	43	60	63	n.b.	76	48	42	43	49
	65	0	0	0	4	31	67	64	n.b.	118	150	166	185	152

Tab. 14 : KBE Pilze pro cm<sup>2</sup> Ernsthofen

Vergleicht man die Werte der einzelnen Dispersionen miteinander, fallen mehrere Punkte sofort ins Auge. Erwartungsgemäß steigt die Anzahl pro cm<sup>2</sup> im Laufe des Beobachtungszeitraumes bei jeder Dispersion an, dies entspricht der naturgemäßen Entwicklung von der Bewitterung ausgesetzten Oberflächen. Offensichtlich werden dabei die Dispersionen Mowilith LDM 1871 und Mowilith LDM 7717 am dichtesten bewachsen, während die anderen deutlich weniger Bewuchs aufweisen.

Bei allen Dispersionen liegt eine Tendenz zu stärkerem Bewuchs bei höheren PVK vor, wobei dieser Trend bei den weniger stark bewachsenen Serien nicht ganz so deutlich ausgeprägt ist.

Die aus anderen Bewitterungsserien bekannte Eigenschaft eines verzögerten Bewuchses in den ersten Monaten der Bewitterung ist auch hier erkennbar. Erst mit dem Beginn des Frühlings wird der Bewuchs stärker, wobei auch hier die beiden oben schon erwähnten Dispersionen 1871 und 7717 eher und stärker zulegen als die anderen. In nachfolgenden Verlaufsgrafiken steht a für die PVK 45, b für PVK 50, c für PVK 55, d für PVK 60 und e für PVK 65. Die Zahl bezeichnet die jeweilige Serie.

#### Serie 1 Mowilith LDM 1871

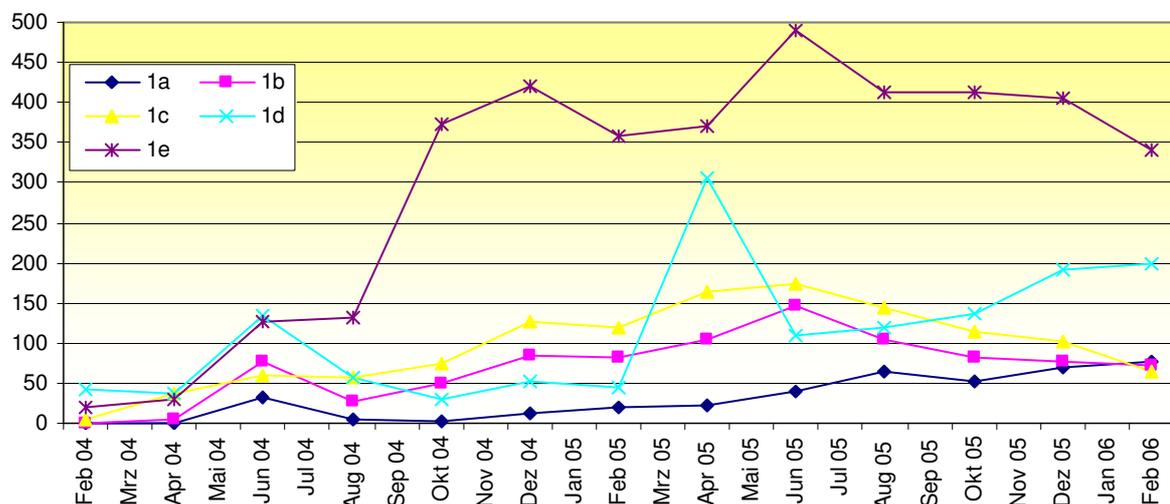


Abb. 16 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 1871

Im Verlauf der Serie ist der wesentlich stärkere Befall der PVK 65 (1e) ab Herbst 2004 deutlich erkennbar. Alle PVK zeigen einen Jahresgang, d.h. im Sommer und Herbst steigt der Befall an, während er im Winter stagniert oder zurückgeht. Dies kann sicher auf die Temperatur und Feuchtebedingungen der jeweiligen Jahreszeiten zurückgeführt werden.

## Serie 2 Mowilith LDM 6119

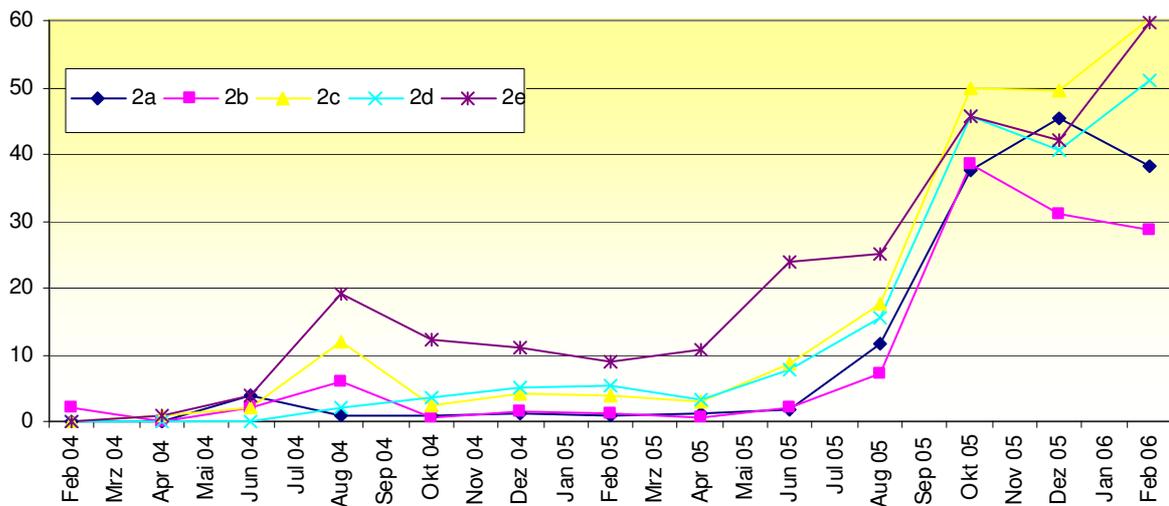


Abb. 17 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 6119

Einen Ausreißer wie bei der LDM 1871 gibt es hier nicht, obwohl auch hier die PVK 65 (2e) über weite Zeit deutlich stärker bewachsen war. Auch hier ist ein Jahresgang erkennbar, der vor allem im Herbst zu stärkerem Bewuchs führte und ab dem dritten Jahr (Herbst 2005) stark ansteigende Werte aufweist. Insgesamt zeigten alle PVK einen recht einheitlichen Verlauf, der erst in den beiden letzten Zählungen stärker aufsplittet.

## Serie 3 Mowilith LDM 7729

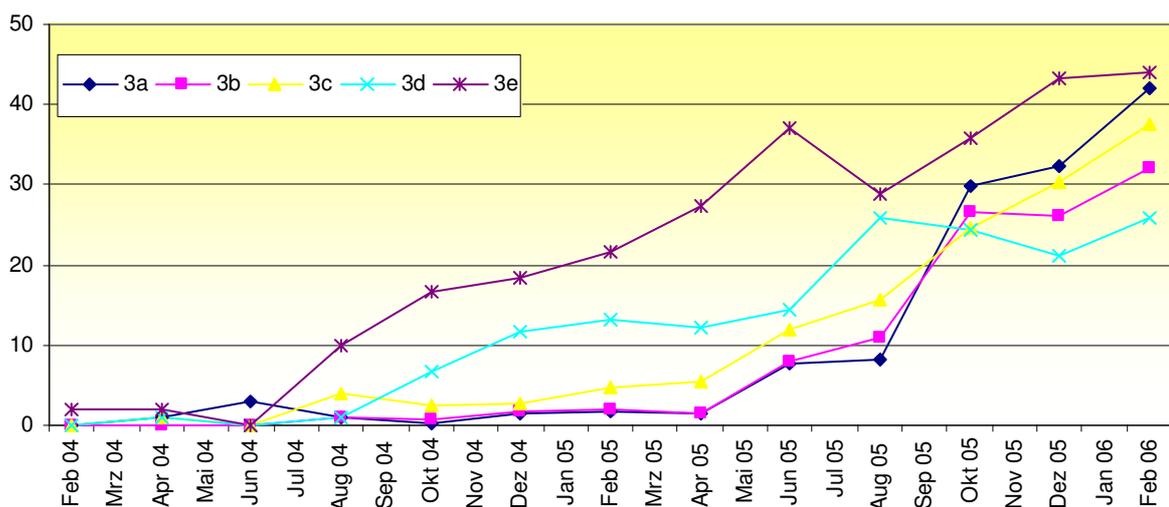


Abb. 18 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7729

Die beiden hohen PVK zeigen ab Sommer 2004 einen stärkeren Bewuchs, der bei den anderen erst ab Sommer 2005 erkennbar wird. Der Jahresgang ist bei dieser

Serie nicht so deutlich ausgeprägt, da im Winter die Werte stagnierten. Auch hier tritt in den letzten beiden Zählungen eine Aufsplitterung der Werte für die niedrigeren PVK ein.

*Serie 4 Mowilith DM 611*

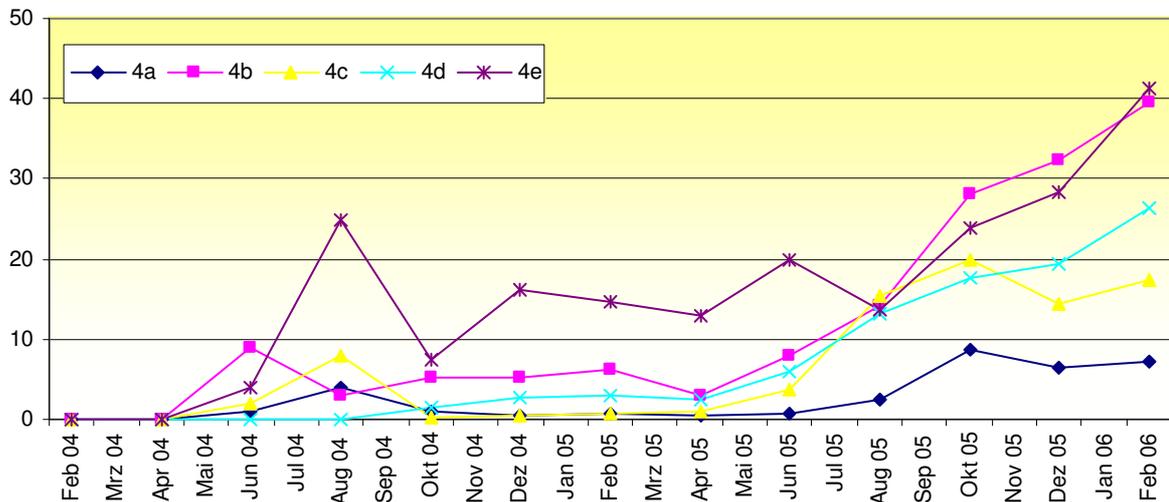


Abb. 19 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith DM 611

Der Jahresverlauf zeigt im Frühling einen leichten und im Sommer - Herbst einen stärkeren Anstieg des Wachstum. Im Gegensatz zu den anderen Serien liegt hier die PVK 50 (4b) deutlich höher. Wie bei den beiden vorhergehenden Dispersionen vergrößert sich die Spannweite der Werte bei den letzten beiden Zählungen. Der Anstieg des Befalls zu Beginn des dritten Jahres ist nicht so stark wie bei den beiden vorhergehenden Serien.

*Serie 5 Mowilith LDM 7717*

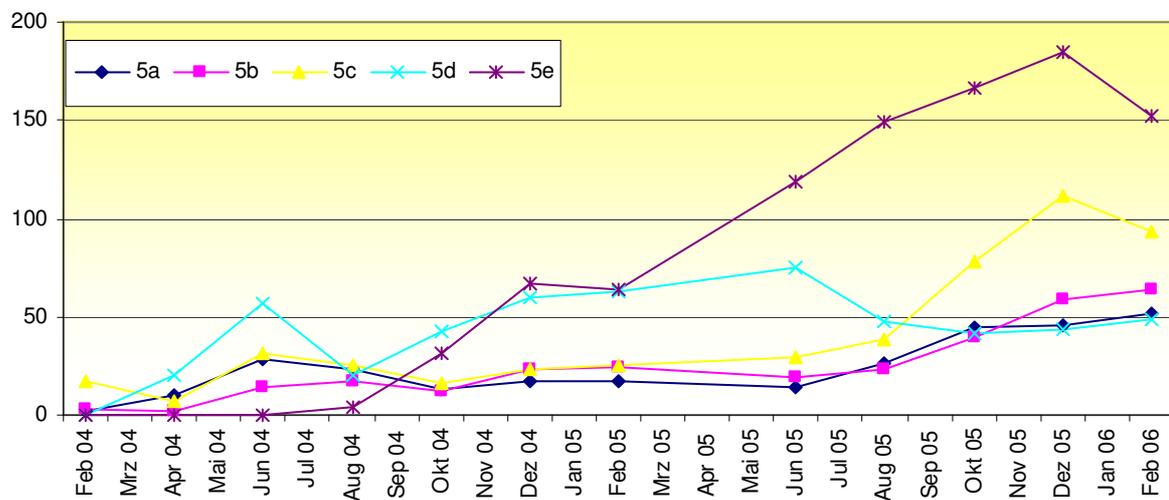


Abb. 20 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7717

Wie bei der LDM 1871 ist auch hier die PVK 65 mit einem sehr viel stärkeren Befall auffällig. Einen etwas gegensätzlichen Verlauf nimmt die PVK 60 im Sommer 2005. Entgegen den anderen PVK, die einen normalen Jahresgang zeigen, fällt der Befall ab und liegt bei der letzten Zählung am niedrigsten. Eine stärkere Aufsplitterung wie bei den vorhergehenden Serien tritt hier nicht auf.

#### 4.1.2. Liederbach

	PVK	Feb 04	Apr 04	Jun 04	Aug 04	Okt 04	Dez 04	Feb 05	Apr 05	Jun 05	Aug 05	Okt 05	Dez 05	Feb 06
LDM 1871	45	220	20	319	131	61	54	139	n.b.	279	300	254	456	440
	50	176	16	252	157	43	49	69	n.b.	130	118	121	262	346
	55	170	81	191	164	79	148	220	n.b.	394	282	430	810	745
	60	117	63	251	195	42	61	70	n.b.	109	121	161	201	327
	65	280	127	256	192	135	161	297	n.b.	439	469	521	1307	911
LDM 6119	45	129	88	213	127	37	72	68	n.b.	58	49	116	148	184
	50	78	58	208	154	44	116	86	n.b.	29	31	111	151	153
	55	229	193	334	200	89	187	161	n.b.	204	195	237	235	323
	60	253	251	225	133	89	183	160	n.b.	202	190	228	272	393
	65	120	128	228	125	76	122	93	n.b.	49	62	120	101	87
LDM 7729	45	268	202	249	167	67	109	73	n.b.	73	81	197	231	149
	50	192	104	324	142	61	109	102	n.b.	75	99	271	413	361
	55	162	112	233	105	56	107	105	n.b.	81	87	128	308	438
	60	103	60	344	162	102	149	159	n.b.	138	161	196	223	281
	65	66	37	336	238	85	100	103	n.b.	32	32	73	120	110
DM 611	45	173	172	212	144	109	133	116	n.b.	132	102	227	1007	1271
	50	68	82	307	205	78	62	44	n.b.	12	32	235	293	101
	55	252	261	259	205	108	84	109	n.b.	72	81	178	668	845
	60	0	2	21	25	127	82	81	n.b.	34	60	259	364	283
	65	115	229	137	104	72	67	106	n.b.	83	94	165	416	605
LDM 7717	45	233	295	340	206	90	80	65	n.b.	70	78	142	496	755
	50	89	219	183	154	88	92	97	n.b.	122	135	181	650	1027
	55	191	162	223	158	120	141	75	n.b.	25	41	266	521	392
	60	114	148	207	138	131	137	140	n.b.	103	140	195	452	517
	65	424	390	402	254	170	194	185	n.b.	203	243	417	650	723

Tab. 15 : KBE Pilze pro cm<sup>2</sup> Liederbach

Im Gegensatz zu den Werten aus Ernthofen sind hier eindeutige Tendenzen nicht erkennbar. Es kann weder der in Ernthofen erkennbare stärkere Befall bei höheren PVK erkannt werden, noch kann die dort sichtbare stärkere Besiedlung der beiden Dispersionen LDM 1871 und 7717 in den Liederbach-Werten wieder erkannt werden. Trotz der weniger stark ausgeprägten Differenzierungen ist der allgemeine

Trend zu stärkerem Bewuchs im Laufe der Zeit vorhanden. Zudem fällt auf, dass die Amplituden der Schwankungen in Liederbach stärker sind als in Ernsthofen.

### Serie 1 Mowilith LDM 1871

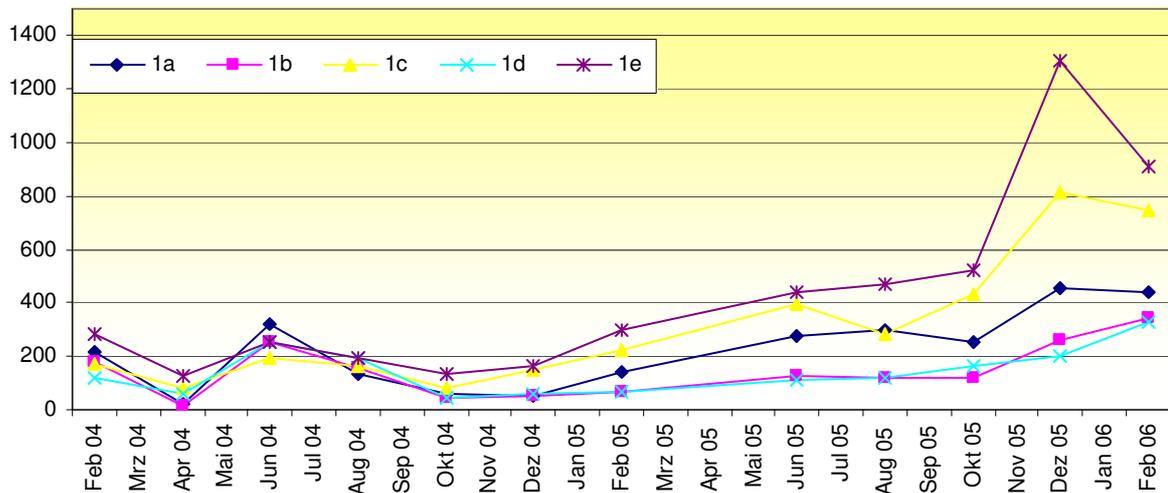


Abb. 21 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 1871

Die Werte zeigen einen relativ gleichmäßigen Verlauf mit einem Jahresgang, der zu Beginn deutlicher ausgeprägt ist als später. Während des Jahres 2005 spalten sich die Werte immer stärker auf, was zu einer sehr großen Spannweite im Dezember führt. Die PVK 65 ist auch hier am stärksten bewachsen.

### Serie 2 Mowilith LDM 6119

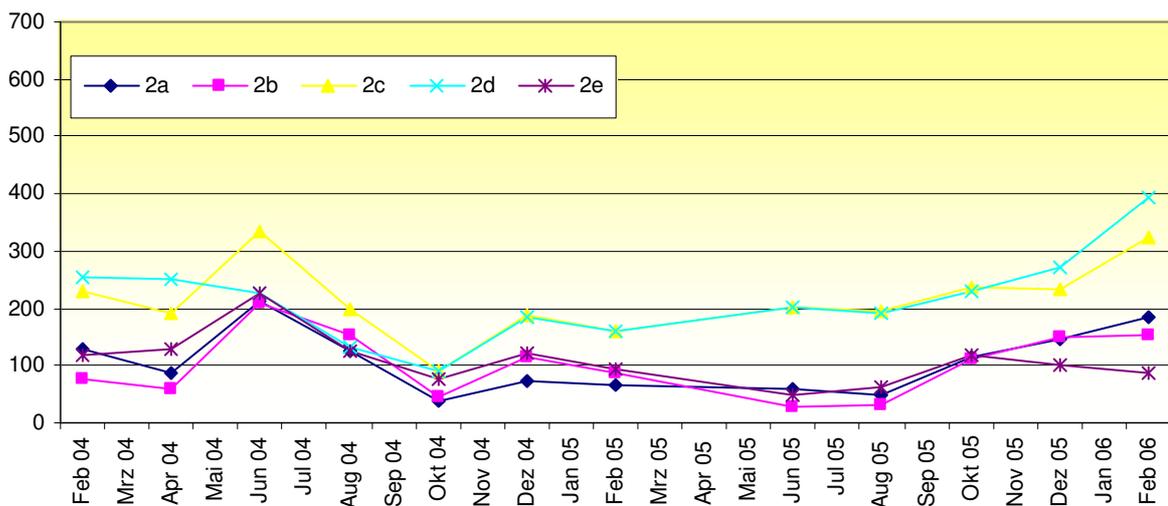


Abb. 22 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 6119

Ähnlich wie der LDM 1871 ist auch hier der Jahresgang zu Beginn deutlich ausgeprägt, mit einem Maximum im Frühsommer. Auffällig sind die beiden PVK 55

(2c) und 60 (2d), die sich deutlich von den anderen absetzen und im Winter 05-06 ansteigende Werte zeigen. Die Differenzierung der einzelnen PVK ist zu Beginn des Testzeitraumes etwa so stark wie am Ende, im mittleren Verlauf aber eher schwach ausgeprägt. Im Gegensatz zur vorherigen Serie ist die PVK 65 hier am schwächsten bewachsen.

### Serie 3 Mowilith LDM 7729

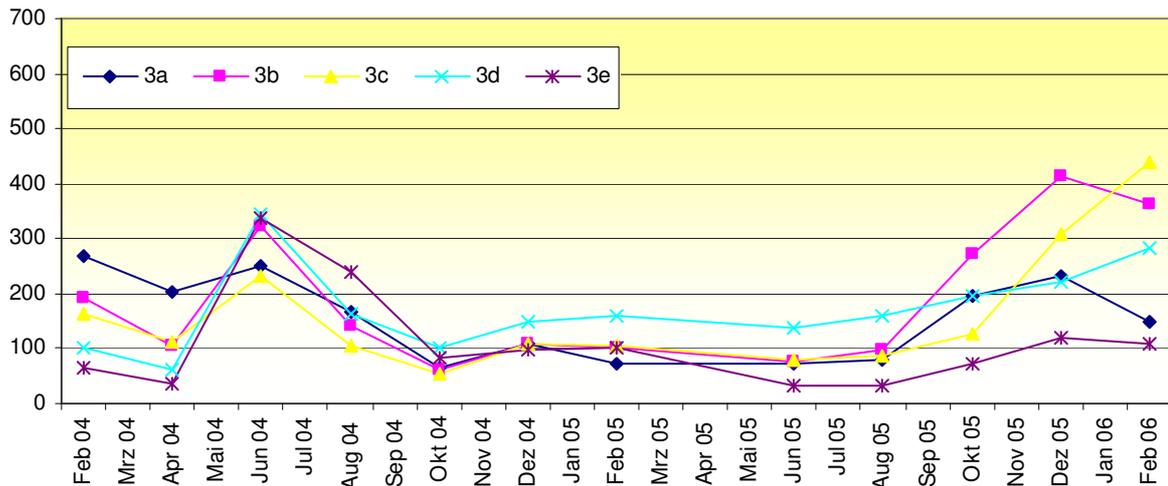


Abb. 23 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7729

Diese Serie zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie die LDM 6119. Jahrgang und Differenzierung der einzelnen PVK haben einen vergleichbaren Ablauf, die Aufspaltung am Ende des Testzeitraumes beginnt aber schon früher. Wie bei der LDM 6119 ist die PVK 65 am schwächsten bewachsen, auch die anderen PVK haben z.T. die gleiche Tendenz.

### Serie 4 Mowilith DM 611

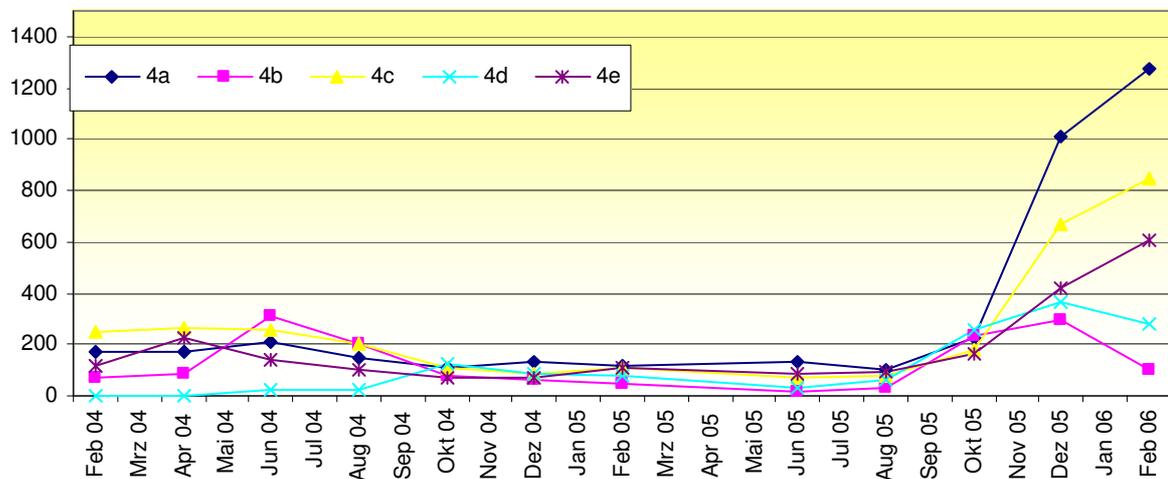


Abb. 24 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith DM 611

Besonders auffällig ist hier natürlich die extreme Aufspaltung der Werte während der letzten beiden Zählungen. Der Jahrgang an sich ist noch mit den vorhergehenden beschriebenen Dispersionen vergleichbar, obwohl zu Beginn weniger deutlich. Von Winter 04-05 zu Sommer 05 zeigt sich keine Änderung der Bewuchsstärke, umso mehr erstaunt der sehr starke Anstieg im Winter 05-06.

#### Serie 5 Mowilith LDM 7717

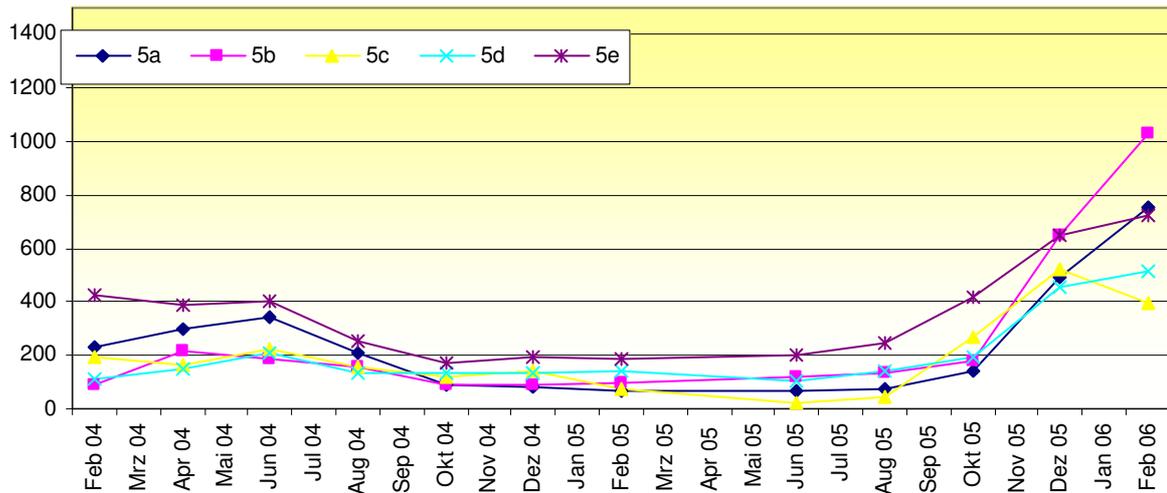


Abb. 25 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7717

Der Verlauf ähnelt dem der anderen Dispersionen. Zu Beginn ist eine größere Spannweite der Werte erkennbar, die im Verlauf abnimmt und am Ende des Testzeitraumes wieder zunimmt. Auch hier ist ein deutlicher Zuwachs an Besiedlung im Winter 05-06 erkennbar, der auch zu einer sehr deutlichen Differenzierung bei der letzten Zählung führt.

**Fußnote :** Die in beiden Tabellen auftretende Bezeichnung n.b. steht für nicht bestimmte Werte, da an diesen Zeitpunkten unfallbedingt keine Zählungen stattfinden konnten. In den nachfolgenden statistischen Auswertungen konnten deshalb die Werte aus dem April 2005 für Ersthofen nicht berücksichtigt werden.

#### 4.2. Vergleich der Platten mittels Area under the Curve

Um das Verhalten der einzelnen Platten hinsichtlich Pilzbewuchs vergleichen zu können, wurden für die einzelnen Platten sowie für die verschiedenen Dispersions- und PVK – Kombinationen gemäß der in Abschnitt 3.1.3 dargestellten Gleichungen die entsprechenden Werte berechnet.

Dazu gehören der mittlere AUC Wert pro Platte, die Differenzen zwischen zwei Platten sowohl gleicher Dispersion als auch gleicher PVK und die für die jeweiligen Kombinationen vorliegenden Konfidenzintervalle.

In nachfolgender Tabelle sind nun die berechneten AUC-Werte samt ihren korrigierten Standardfehlern für beide Bewitterungsstandorte angegeben.

Anschließend werden die Differenzen der AUC-Werte für die Platten nach Standorten getrennt vorgestellt.

	PVK	Ernsthofen		Liederbach	
		AUC mean	AUC se korr	AUC mean	AUC se korr
LDM 1871	45	648,13	60,271	3879,87	150,747
	50	1501,07	80,858	2087,93	212,245
	55	1996,97	72,705	6004,3	196,017
	60	1698,4	111,271	1992,63	208,193
	65	6556,27	570,974	8170,37	298,168
LDM 6119	45	239,6	19,478	1366,73	126,686
	50	195,03	14,447	1360,53	73,712
	55	342,97	40,072	3212,03	143,395
	60	308,5	13,413	3319	141,802
	65	418,37	25,408	1398,63	179,997
LDM 7729	45	213,73	33,947	1886,73	184,818
	50	194,27	41,359	2740,6	244,529
	55	237,1	106,226	2311,07	176,111
	60	281,27	87,094	2731,73	278,372
	65	490,37	190,805	1249	242,126
DM 611	45	49,17	12,717	5063,77	194,831
	50	246,8	9,224	1592,03	200,369
	55	131,43	22,61	3520,23	137,311
	60	160,43	18,206	2284,57	209,255
	65	316,37	36,622	2726,3	86,185
LDM 7717	45	428,93	7,006	2840,07	326,413
	50	497,07	28,745	3884,9	137,692
	55	777,87	23,642	2753,63	192,949
	60	891,4	11,938	3221,47	212,217
	65	1867,17	17,41	5063,2	88,918

Tab. 16 : AUC Werte der Platten

Trägt man die AUC Werte grafisch auf, so fällt auf, dass die Werte umso höher liegen, je höher die PVK ist. Besonders auffällig ist dies bei der LDM 7717 und der LDM 1871. Die anderen Dispersionen zeigen zwar den gleichen Trend, dieser ist aber nicht so auffällig wie bei den anderen beiden.

Bei der LDM 7729 sind die Standardfehlergrenzen im Vergleich zu den anderen vor allem bei den drei höheren PVK größer.

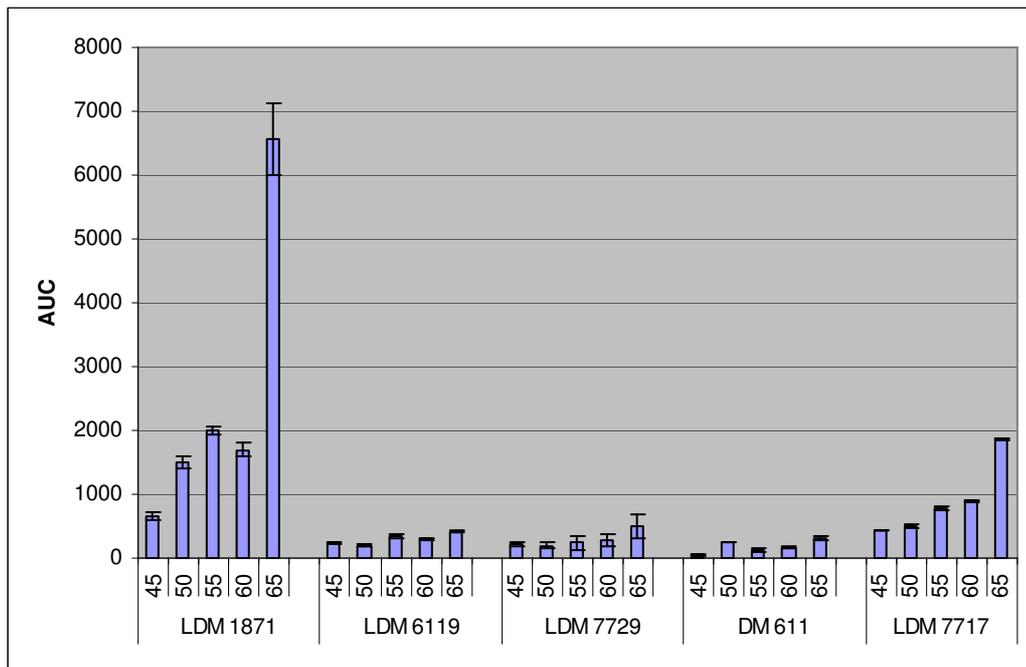


Abb. 26 : AUC Werte Ernstshofen

Trägt man die Werte aus Liederbach in der gleichen Weise auf, so zeigt sich, dass der in Ernstshofen klar erkennbare Trend hier weniger deutlich erkennbar ist. Zudem sind die Standardfehlergrenzen bei allen PVK bis auf die der LDM 1871 PVK 65 größer als in Ernstshofen.

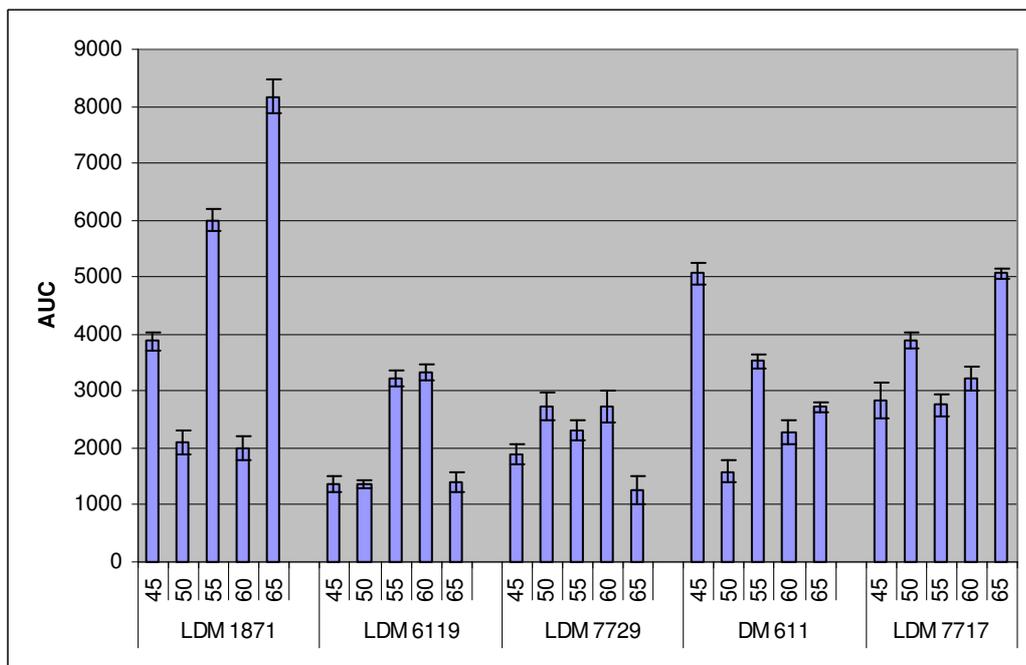


Abb. 27 : AUC Werte Liederbach

4.2.1.  $\Delta$ -AUC PVK Ernsthofen

Um den Einfluss eines unterschiedlichen Dispersionsgehaltes zu bewerten, wurden die fünf verschiedenen PVK innerhalb der Bindemitteltypen miteinander verglichen. Die Ergebnisse der resultierenden zehn Kombinationen sind in nachfolgender Tabelle angegeben. Neben dem eigentlichen  $\Delta$ -AUC sind auch die Grenzen der jeweiligen Konfidenzintervalle angegeben, aus denen sich die Signifikanz des Vergleiches der betreffenden Kombination ergibt.

Allgemein gilt, je weiter der  $\Delta$ -AUC von der Null entfernt liegt, desto größer ist der Unterschied zwischen den betreffenden Platten. Schließt das Intervall allerdings einen Vorzeichenwechsel ein, so kann die Differenz auch Null betragen, d.h. es bestünde kein Unterschied im Bewuchsverhalten der jeweiligen Platten. Ein signifikanter Unterschied ist dann nicht gegeben und die betreffende Kombination wurde in der Tabelle markiert.

	LDM 1871		LDM 6119		LDM 7729		DM 611		LDM 7717	
	$\Delta$ -AUC	Grenzen	$\Delta$ -AUC	Grenzen						
PVK 45-50	-852,94	± 197,665	44,57	± 47,5319	19,46	± 104,873	-197,63	± 30,7916	-68,14	± 57,989
PVK 45-55	-1348,8	± 185,099	-103,37	± 87,328	-23,37	± 218,576	-82,26	± 50,8443	-348,94	± 48,33
PVK 45-60	-1050,3	± 248,03	-68,9	± 46,3531	-67,54	± 183,213	-111,26	± 43,527	-462,47	± 27,13
PVK 45-65	-5908,1	± 1125,33	-178,77	± 62,7494	-276,64	± 379,851	-267,2	± 75,9836	-1438,24	± 36,783
PVK 50-55	-495,9	± 213,127	-147,94	± 83,4896	-42,83	± 223,427	115,37	± 47,8615	-280,8	± 72,948
PVK 50-60	-197,33	± 269,593	-113,47	± 38,6386	-87	± 188,974	86,37	± 40,0023	-394,33	± 61,006
PVK 50-65	-5055,2	± 1130,27	-223,34	± 57,2871	-296,1	± 382,663	-69,57	± 74,0209	-1370,1	± 65,868
PVK 55-60	298,57	± 260,52	34,47	± 82,8242	-44,17	± 269,237	-29	± 56,8964	-113,53	± 51,911
PVK 55-65	-4559,3	± 1128,15	-75,4	± 92,9985	-253,27	± 428,028	-184,94	± 84,3571	-1089,3	± 57,547
PVK 60-65	-4857,9	± 1140,16	-109,87	± 56,3129	-209,1	± 411,095	-155,94	± 80,1597	-975,77	± 41,375

Tab. 17 : AUC-Differenzen PVK Ernsthofen

Auffällig ist, dass die LDM 7729 in keiner PVK Kombination signifikante Unterschiede aufweist. Der Bewuchs ist zwar auf den ersten Blick unterschiedlich, durch die relativ starke Streuung der 30 Einzelwerte pro Platte kann aber ein statistisch relevanter Unterschied in den einzelnen PVK nicht postuliert werden. Im Gegensatz dazu weist die LDM 7717, welche ebenfalls eine Reinacrylat Dispersion ist, in jeder PVK-Kombination einen signifikanten Unterschied auf. Zudem sind die Konfidenzintervalle bei der 7717 deutlich kleiner, was ebenfalls eine Auswirkung der wesentlich geringeren Streuung des Pilzbewuchses auf dieser Dispersion ist.

Die beiden Styrol-Acrylate LDM 6119 und DM 611 zeigen ein insgesamt einheitlicheres Verhalten. Beide sind in der Kombination PVK 55-60 nicht signifikant verschieden. Zusätzlich ist dies bei der 6119 in der Kombination 45-50 und 55-65 der Fall, während die 611 nur noch bei 50-55 einen solchen Unterschied aufweist. Dies bestätigt die Annahme, dass näher beieinander liegende PVK auch ein ähnlicheres Bewuchsverhalten zeigen sollten. Auch bei den anderen Dispersionen ist es so, dass eher solche Kombinationen eine niedrige  $\Delta$ -AUC aufweisen.

Die LDM 1871 weist nur einen nicht signifikanten Unterschied auf, nämlich bei der Kombination PVK 50-60. Alle anderen sind statistisch verschieden, auch wenn vor allem die Kombinationen mit der PVK 65 sehr große Konfidenzintervalle aufweisen. Da aber die Unterschiede sehr stark sind liegt trotzdem Signifikanz vor. Durch diese etwas anders gelagerten Signifikanzen und die z.T. deutlich höheren  $\Delta$ -AUC Werte wird der Unterschied zu den anderen Dispersionen deutlich.

Zusammenfassend zeigen sich die beiden Reinacrylate deutlich verschieden in ihrem Verhalten bei verschiedenen PVK, während sich die Styrol-Acrylate deutlich einheitlicher verhalten. Die Vinylacetat-Ethylen Dispersion LDM 1871 wiederum ist von allen anderen verschieden.

#### 4.2.2. $\Delta$ -AUC Dispersionen Ernsthofen

Analog der Bewertung der Unterschiede zwischen den PVK innerhalb der Dispersionen wurden auch die Unterschiede der Dispersionen innerhalb der PVK betrachtet. Auch hier sind die  $\Delta$ -AUC-Werte und die Konfidenzgrenzen angegeben. Auch beim Vergleich der Dispersionen zeigt die LDM 7729 ein abweichendes Verhalten. Eigentlich wäre zu erwarten, dass Dispersionen mit gleicher Monomerbasis einander ähnlicher sind als solche mit unterschiedlichen Monomeren. Die LDM 7729 aber zeigt im Vergleich mit den beiden Styrol-Acrylaten in allen fünf Dispersionsstufen (bis auf PVK 45 mit der DM 611) so große Ähnlichkeit, dass eine Signifikanz nicht mehr gegeben ist. Vergleicht man die beiden Reinacrylate untereinander, so weichen alle PVK signifikant voneinander ab. Auch bei dem direkten Vergleich der beiden Styrol-Acrylate LDM 6119 und 611 sind alle PVK signifikant unterschiedlich, wenn auch mit z.T. nur geringer Differenz. Die LDM 1871 mit ihrem völlig anderen Monomersystem weicht von allen anderen in allen

PVK signifikant ab, was sowohl der Vorstellung entspricht, als auch mit den reinen Werten der Pilzanzahl konform geht.

Im Verlauf der PVK ist ein Trend klar erkennbar. Bei den meisten Dispersionskombinationen werden die  $\Delta$ -AUC Werte größer, d.h. die Unterschiede verstärken sich, je höher die PVK ist. Ausnahmen sind die nicht signifikanten Kombinationen mit der LDM 7729 und auch die Kombination der beiden Styrol-Acrylate. Bei den Kombinationen mit der LDM 1871 fällt zwar die PVK 60 immer etwas ab, der Trend aber bleibt erhalten.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Reinacrylate auch beim Vergleich der Dispersionen ein unterschiedlicheres Verhalten zeigen, als es die Styrol-Acrylate an den Tag legen. Das abweichende Verhalten der LDM 1871 bestätigt sich.

	PVK 45		PVK 50		PVK 55		PVK 60		PVK 65	
	$\Delta$ -AUC	Grenzen	$\Delta$ -AUC	Grenzen						
LDM 1871-LDM 6119	408,53	± 124,147	1306,04	± 160,991	1654	± 162,713	1389,9	± 219,67	6137,9	± 1120,2
LDM 1871-LDM 7729	434,4	± 135,58	1306,8	± 178,011	1759,87	± 252,3	1417,13	± 276,954	6065,9	± 1179,9
LDM 1871-LDM 611	598,96	± 120,732	1254,27	± 159,51	1865,54	± 149,233	1537,97	± 220,991	6239,9	± 1121,4
LDM 1871-LDM 7717	219,2	± 118,927	1004	± 168,198	1219,1	± 149,847	807	± 219,343	4689,1	± 1119,6
LDM 6119-LDM 7729	25,87	± 76,7107	0,76	± 85,8669	105,87	± 222,525	27,23	± 172,717	-72	± 377,28
LDM 6119-LDM 611	190,43	± 45,5933	-51,77	± 33,5955	211,54	± 90,1808	148,07	± 44,3223	102	± 87,363
LDM 6119-LDM 7717	-189,33	± 40,5714	-302,04	± 63,0557	-434,9	± 91,1918	-582,9	± 35,1941	-1448,8	± 60,369
LDM 7729-LDM 611	164,56	± 71,0516	-52,53	± 83,0552	105,67	± 212,867	120,84	± 174,394	174	± 380,8
LDM 7729-LDM 7717	-215,2	± 67,9383	-302,8	± 98,7195	-540,77	± 213,297	-610,13	± 172,3	-1376,8	± 375,53
LDM 611-LDM 7717	-379,76	± 28,4576	-250,27	± 59,1698	-646,44	± 64,118	-730,97	± 42,6711	-1550,8	± 79,477

Tab. 18 : AUC-Differenzen Dispersionen Ernsthofen

#### 4.2.3. $\Delta$ -AUC Liederbach

Entsprechend der Werte aus Ernsthofen wurden auch die für die in Liederbach bewitterten Platten ermittelten Resultate bearbeitet und in der gleichen Weise dargestellt. Entgegen den Ergebnissen für die Ernsthofer Platten, kann hier keine eindeutige Aussage über Unterschiede im Bewuchsverhalten bei verschiedenen PVK getroffen werden. Jede Dispersion zeigt bei der ein oder anderen PVK-Kombination fehlende Signifikanz. Ein einheitliches Bild, welche PVK Kombinationen nun verstärkt gleichen Bewuchs aufweisen ist nicht klar erkennbar. Sowohl weit voneinander entfernt als nahe beieinander liegende PVK können eine fehlende Signifikanz in ihren  $\Delta$ -AUC aufweisen. Der in Ernsthofen deutliche Trend zu größerer Ähnlichkeit bei näher beieinander liegenden PVK ist hier nicht

vorhanden. Insgesamt gesehen streut der Bewuchs auf den Platten in einer Weise, die andere Einflussgrößen als die PVK nahe legen.

	LDM 1871		LDM 6119		LDM 7729		DM 611		LDM 7717	
	$\Delta$ -AUC	Grenzen								
PVK 45-50	1791,94	510,25	6,2	287,277	-853,87	600,772	3471,74	547,773	-1044,83	694,36
PVK 45-55	-2124,4	484,668	-1845,3	375,029	-424,34	500,368	1543,54	467,177	86,44	743,19
PVK 45-60	1887,24	503,796	-1952,27	372,695	-845	654,912	2779,2	560,391	-381,4	763,1
PVK 45-65	-4290,5	654,854	-31,9	431,415	637,73	597,021	2337,47	417,563	-2223,13	663,08
PVK 50-55	-3916,4	566,269	-1851,5	316,014	429,53	590,638	-1928,2	476,091	1131,27	464,6
PVK 50-60	95,3	582,724	-1958,47	313,24	8,87	726,22	-692,54	567,843	663,43	495,83
PVK 50-65	-6082,4	717,35	-38,1	381,231	1491,6	674,478	-1134,27	427,512	-1178,3	321,26
PVK 55-60	4011,67	560,461	-106,97	395,269	-420,66	645,629	1235,66	490,556	-467,84	562,17
PVK 55-65	-2166,1	699,385	1813,4	451,06	1062,07	586,823	793,93	317,751	-2309,57	416,41
PVK 60-65	-6177,7	712,773	1920,37	449,121	1482,73	723,12	-441,73	443,565	-1841,73	450,98

Tab. 19 : AUC-Differenzen PVK Liederbach

#### 4.2.4. $\Delta$ -AUC Dispersionen Liederbach

Nachfolgend werden die Liederbach Ergebnisse für den Vergleich der Dispersionen vorgestellt. Die Auswertung erfolgte nach dem oben beschriebenen Vorgehen.

	PVK 45		PVK 50		PVK 55		PVK 60		PVK 65	
	$\Delta$ -AUC	Grenzen								
LDM 1871 - LDM 6119	2513,14	385,946	727,4	440,374	2792,27	476,021	-1326,37	493,718	6771,74	682,64
LDM 1871 - LDM 7729	1993,14	467,46	-652,67	634,636	3693,23	516,48	-739,1	681,323	6921,37	752,83
LDM 1871 - DM 611	-1183,9	482,828	495,9	572,091	2484,07	469,079	-291,94	578,555	5444,07	608,33
LDM 1871 - LDM 7717	1039,8	704,701	-1796,97	495,872	3250,67	539,096	-1228,84	582,685	3107,17	609,84
LDM 6119 - LDM 7729	-520	439,176	-1380,07	500,579	900,96	445,128	587,27	612,32	149,63	591,34
LDM 6119 - DM 611	-3697	455,499	-231,5	418,455	-308,2	389,13	1034,43	495,44	-1327,67	391,15
LDM 6119 - LDM 7717	-1473,3	686,265	-2524,37	306,115	458,4	471,181	97,53	500,257	-3664,57	393,49
LDM 7729 - DM 611	-3177	526,35	1148,57	619,627	-1209,16	437,697	447,16	682,572	-1477,3	503,73
LDM 7729 - LDM 7717	-953,34	735,204	-1144,3	550,036	-442,56	512,023	-489,74	686,076	-3814,2	505,56
DM 611 - LDM 7717	2223,7	745,07	-2292,87	476,513	766,6	464,167	-936,9	584,145	-2336,9	242,71

Tab. 20 : AUC-Differenzen Dispersionen Liederbach

Auch beim Vergleich der Dispersionen ist kein eindeutiger Trend erkennbar. Die meisten Kombinationen sind bei einer oder mehreren PVK statistisch nicht trennbar. Die betrifft sowohl Vergleiche innerhalb als auch zwischen Monomertypen. Sogar

dem Unterschied zwischen der LDM 1871 und der DM 611 fehlt in zwei PVK Kombinationen die Signifikanz, trotz der deutlichen Unterschiede im Monomersystem. Zum Teil liegt dies auch an den weiten Konfidenzgrenzen, die wiederum auf eine hohe Streuung der zugrunde liegenden 30 Einzelwerte schließen lassen.

Der in Ernthofen klar erkennbare Trend zu einer Steigerung der Differenzen bei steigenden PVK Abständen ist hier nicht zu sehen. Auch in dieser Richtung sind die Werte unregelmäßig verteilt und lassen keine klare Deutung zu. In jeder PVK Stufe kommen sowohl sehr hohe als auch nur geringe  $\Delta$ -AUC vor.

Insgesamt gesehen sind die Ergebnisse der  $\Delta$ -AUC Betrachtung für die Werte aus Liederbach deutlich verschieden von denen aus Ernthofen. Während die in Ernthofen ermittelten Daten eindeutige Trends und eine in sich geschlossene Konsistenz erkennen lassen, sind die Ergebnisse für Liederbach wesentlich weniger kohärent, sondern eher durch chaotisch anmutende Abweichungen und Differenzen sowohl in den  $\Delta$ -AUC als auch in den Konfidenzgrenzen geprägt.

#### 4.3. Isolation von Organismen

Die von den Platten isolierten Organismen waren zum größten Teil ubiquitär vorkommende Pilze, die durch natürlich Vorgänge in die Luft verfrachtet und im Laufe der Zeit auf den Platten abgelagert wurden.

Arten
<i>Acremonium cf. kiliense</i>
<i>Alternaria alternata</i>
<i>Aureobasidium pullulans</i>
<i>Botrytis cinerea</i>
<i>Cladosporium cladosporioides</i>
<i>Doratomyces purpureofuscus</i>
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>
<i>Trichoderma harzianum</i>
<i>Ulocladium botrytis</i>

Tab. 21 : Von den Platten isolierte Arten

Zusätzlich zu diesen Arten wurden weitere Hefen, Ascomyceten, mikrokolonial wachsende schwarze Pilze (MCF), verschiedene *Aspergillus* und *Penicillium* Arten, verschiedene Coelomyceten sowie steriles Mycel isoliert.

In nachfolgender Tabelle ist die Anzahl der determinierten Organismen auf den einzelnen Platten als KBE/cm<sup>2</sup> angegeben. Für die Coelomyceten wurde nur die Anwesenheit gekennzeichnet.

PVK	<i>Aureobasidium pullulans</i>	<i>Cladosporium cladosporioides</i>	<i>Doratomyces purpureofuscus</i>	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	<i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Ulocladium botrytis</i>	MCF	Coelomyces	
LDM 1871	45			6	167			X	
	50			26	19				
	55		13	16	3				
	60			227 / 10 <sup>4</sup>				X / X	
	65	220		3	208 / 3		190	74	X
LDM 6119	45				128				
	50				26		16		
	55								
	60	3			26		3		
	65				314			29	
LDM 7729	45						3 / 19	X	
	50	42					35		
	55				13			X	
	60	3			13			X	
	65				32		3		
DM 611	45	10			6		147		
	50	6			10		3		
	55				6		3	X / X	
	60	16			19		6 / 54	54	
	65				83		13		X
LDM 7717	45	3 / 16			16		6	10 <sup>3</sup>	X
	50				10		13		X
	55								
	60	3 / 10			67		6	224	
	65					54		3	

Tab. 22 : Anzahl pro cm<sup>2</sup> für determinierter Arten Ernsthofen (rot) und Liederbach (blau)

Bei der Abnahme mit sterilem Besteck wurden fast ausschließlich Schwärzepilze isoliert. Ursache dafür ist natürlich die bessere Erkennbarkeit und das damit erleichterte Abnehmen von der Platte. Die dabei am häufigsten angetroffenen Arten waren *A. alternata* und *C. cladosporioides*. Beide wurden auf den 6,25 cm<sup>2</sup> großen, abgenommenen Testflächen nicht bzw. nur einmal isoliert (*C. cladosporioides*). Eine eindeutige Ursache dafür ist nicht erkennbar.

Organismen, von denen es bekannt ist, dass sie auf Fassadenfarben und ähnlich oligotrophen Untergründen wachsen können, waren naturgemäß am häufigsten zu finden. Dazu gehören Arten wie *A. pullulans*, *C. cladosporioides* oder *U. botrytis* sowie die vor allem in Liederbach häufig aufgetretenen mikrokolonialen schwarzen

Pilze. Aufgrund der Häufigkeit, mit der diese Pilze auf solch extremen Standorten beschrieben wurden, sind diese Orte als Teil sowohl ihres Habitats als auch ihrer ökologischen Nische anzusehen. Ihr langsames Wachstum, ihre Widerstandsfähigkeit gegen Austrocknung, Temperaturschwankungen und UV-Belastung prädestinieren die schwarzen Pilze für diese exponierten Lebensräume (Gillatt 1991; Gorbushina, Krumbein et al. 1993; Gorbushina, Lyalikova et al. 2002; Gaylarde & Gaylarde 2005; Gorbushina, Beck et al. 2005).

Andere Pilze wie *Aspergillus* oder *Penicillium* Arten, *B. cinerea* oder *Acremonium cf. kiliense* sind normalerweise nur als Conidien auf Fassadenfarben zu finden. Durch geringere Austrocknungs- und Temperaturtoleranz sowie ungefärbtes Mycel sind sie anfälliger gegenüber den schnell wechselnden Umweltbedingungen wie Temperatur, Wassergehalt und UV-Belastung. Aufgrund dieser Anfälligkeit sind sie eher in feuchtebelasteten Innenräumen zu finden. Obwohl auch in solchen Situationen Schwärzepilze wie *Alternaria* sp. und *Cladosporium* sp. vertreten sind, besteht der Hauptanteil doch meist aus Pilzen der anderen Gruppe.

Insgesamt zeigt sich, dass einige der zu einer Erstbesiedlung fähigen und auch sehr oft als solche angetroffenen Gattungen vertreten sind. Die normalerweise zu diesen Erstbesiedlern zählende Gattung *Epicoccum* sp. konnte nicht determiniert werden. Warum *Epicoccum* sp. fehlt, ist jedoch nicht erkennbar, aufgrund der Lebensweise hätten Vertreter der Gattung auftreten können.

Besiedlungsunterschiede zwischen den einzelnen Dispersionen waren nur schwer erkennbar. Einige Tendenzen zeigen einen stärkeren Bewuchs der LDM 1871 mit Hefen, obwohl auf den Platten aus Ernsthofen auch auf den anderen Dispersionen Hefebewuchs vorhanden war. *T. harzianum* wurde ebenfalls mehr auf der LDM 871 sowie auch auf der LDM 6119 gefunden. *A. pullulans* hingegen war auf allen Platten beider Standorte häufig vertreten.

Bei den anderen Pilzen konnte keine Präferenz für die eine oder andere Dispersion gefunden werden. Auch die oben erwähnten Fälle geben nur einen Eindruck wider, da eine statistische Absicherung nicht erfolgte.

Auffällige Unterschiede zwischen den beiden Bewitterungsplätzen in Bezug auf die Häufigkeit der einzelnen Pilze waren nur bei der Hefe *Rhodotorula mucilaginosa*

und auch anderen Hefen sowie bei den mikrokolonialen Pilzen erkennbar. Während auf den Proben aus Ernsthofen sehr viele Hefen und weniger mikrokoloniale Pilze zu finden waren, stellte sich die Situation in Liederbach genau umgekehrt dar.

#### 4.4. Wachstumsversuche

##### Flüssigkulturtests

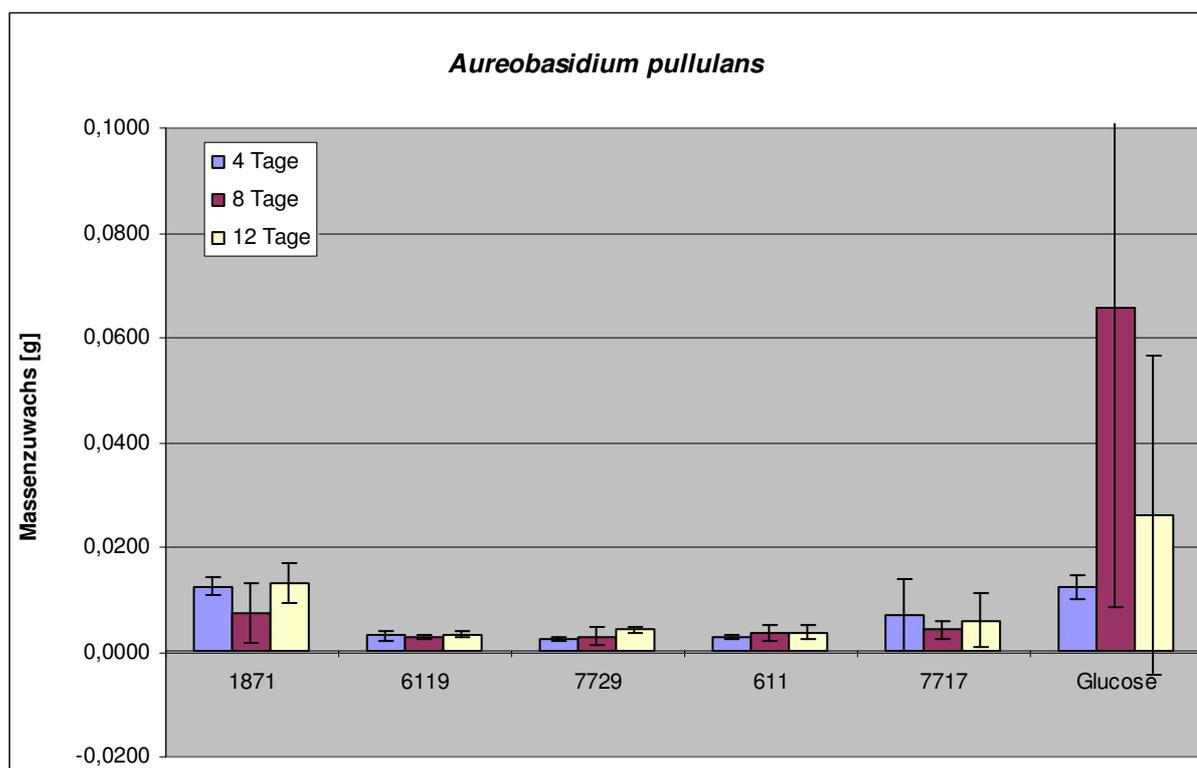
Mit den beiden Pilzen *Aureobasidium pullulans* und *Cladosporium cladosporioides* wurden jeweils drei Versuche (Oktober 2006, Februar und März 2007) durchgeführt. Von den bei den einzelnen Versuchen zurück gewogenen Biomassewerten wurden Mittelwert und Standardabweichung bestimmt.

Die Mycelsuspensionen beider Pilze zeigten im Vergleich der drei Tests zuweilen ein unterschiedliches Verhalten im Hinblick auf das Wachstum. Da vor jedem Test die Homogenisierung durchgeführt wurde, könnte die Belastung des Mycels bei diesem Vorgang eine Rolle spielen. Je nach resultierendem Vitalitätsgrad zeigten die Pilze ein besseres Wachstum oder nicht, was sich in den zum Teil höheren Standardabweichungen widerspiegelt.

Ein weiteres Problem war die Veränderung des pH-Wertes durch die wachsenden Pilze. Dadurch kam es zum Aufbrechen der Stabilisierung und zur nachfolgenden Agglomeration der Polymerteilchen. Aufgrund der Porenweite von 1µm konnte zwar ein Großteil der Agglomerate durchfiltriert werden, ein kleiner Teil jedoch blieb im Mycel hängen. Auch dies trug zu den teilweise hohen Standardabweichungen bei. Trotz dieser Schwierigkeiten geben die Versuche einen Eindruck, wie gut die einzelnen Dispersionen von den beiden Testpilzen verwertet werden können.

*Aureobasidium pullulans*

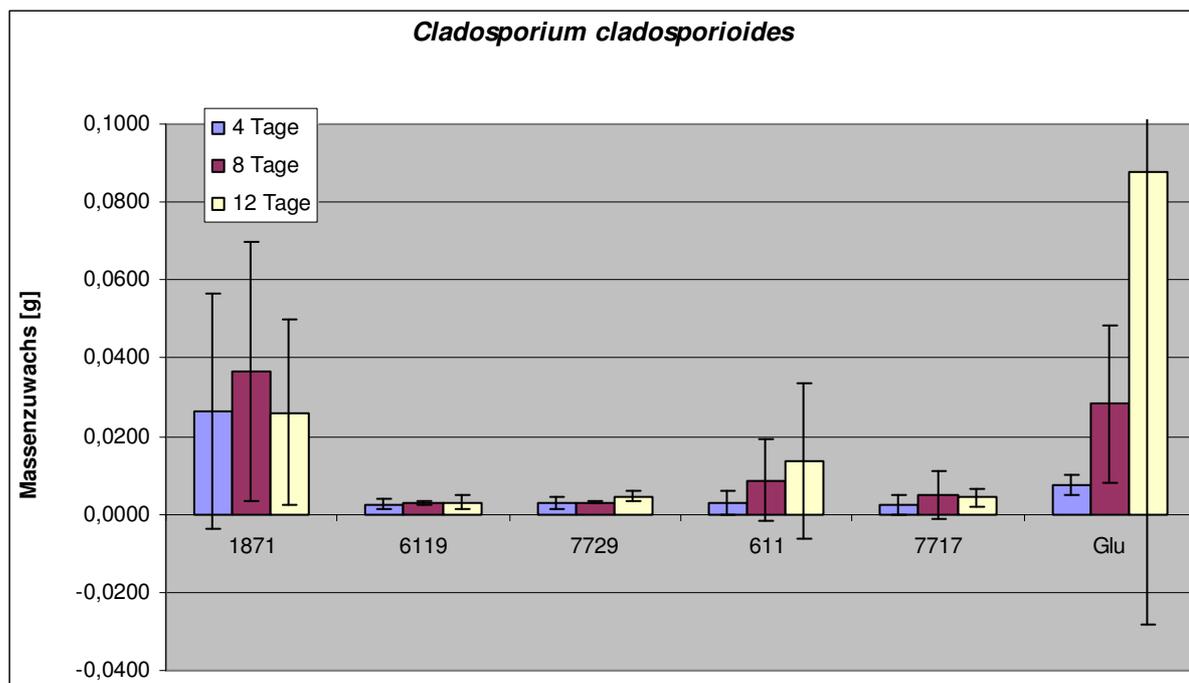
[g]	1871	6119	7729	611	7717	Glucose
4 Tage	0,011	0,004	0,002	0,003	0,015	0,01
	0,012	0,0029	0,003	0,0031	0,0038	0,013
	0,0143	0,0024	0,0023	0,0025	0,0025	0,0144
<b>Mw</b>	<b>0,0124</b>	<b>0,0031</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0029</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0125</b>
<b>Std-Abw</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0008</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0069</b>	<b>0,0022</b>
8 Tage	0,004	0,003	0,004	0,005	0,006	0,051
	0,0139	0,0031	0,0039	0,0038	0,0042	0,0173
	0,0041	0,0024	0,0012	0,0019	0,0024	0,1291
<b>Mw</b>	<b>0,0073</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,0030</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,0658</b>
<b>Std-Abw</b>	<b>0,0057</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0574</b>
12 Tage	0,01	0,004	0,005	0,005	0,012	0,058
	0,0173	0,003	0,0039	0,0027	0,003	0,0227
	0,0124	0,003	0,0041	0,0037	0,0032	-0,0024
<b>Mw</b>	<b>0,0132</b>	<b>0,0033</b>	<b>0,0043</b>	<b>0,0038</b>	<b>0,0061</b>	<b>0,0261</b>
<b>Std-Abw</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,0051</b>	<b>0,0303</b>

Tab. 23 : Biomassezunahme bei *A. pullulans*Abb. 28 : Grafische Darstellung der Biomassezunahme *A. pullulans*

*A. pullulans* zeigte vor allem bei der LDM 1871 und der LDM 7717 ein besseres Wachstum. Dabei zeigen die beiden Styrol-Acrylate keinen größeren Unterschied während die beiden Reinacrylate doch deutlich unterschiedlich verwertet werden.

*Cladosporium cladosporioides*

[g]	1871	6119	7729	611	7717	Glucose
4 Tage	0,061	0,001	0,001	0	0,001	0,009
	0,0102	0,0038	0,0033	0,0064	0,0007	0,0046
	0,0078	0,003	0,0043	0,0025	0,0053	0,0089
<b>Mw</b>	<b>0,0263</b>	<b>0,0026</b>	<b>0,0029</b>	<b>0,0030</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0075</b>
<b>Std-Abw</b>	<b>0,0300</b>	<b>0,0014</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0032</b>	<b>0,0026</b>	<b>0,0025</b>
8 Tage	0,0738	0,0024	0,0031	0,0021	0,0018	0,0508
	0,0093	0,0035	0,0033	0,0206	0,0009	0,0121
	0,0267	0,0032	0,0027	0,0034	0,012	0,0219
<b>Mw</b>	<b>0,0366</b>	<b>0,0030</b>	<b>0,0030</b>	<b>0,0087</b>	<b>0,0049</b>	<b>0,0283</b>
<b>Std-Abw</b>	<b>0,0334</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0103</b>	<b>0,0062</b>	<b>0,0201</b>
12 Tage	0,0538	0,0014	0,006	0,0012	0,0046	0,2212
	0,0141	0,0049	0,0046	0,0368	0,0019	0,02
	0,0106	0,0031	0,0035	0,0032	0,0064	0,0215
<b>Mw</b>	<b>0,0262</b>	<b>0,0031</b>	<b>0,0047</b>	<b>0,0137</b>	<b>0,0043</b>	<b>0,0876</b>
<b>Std-Abw</b>	<b>0,0240</b>	<b>0,0018</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0200</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,1157</b>

Tab. 24 : Biomassezunahme *C. cladosporioides*Abb. 29 : Grafische Darstellung der Biomassezunahme *C. cladosporioides*

Auch *C. cladosporioides* zeigte bei der LDM 1871 ein sehr starkes Wachstum. Im Gegensatz zu *A. pullulans* aber wurden die beiden Reinacrylate etwa vergleichbar stark umgesetzt. Die beiden Styrol-Acrylate hingegen wurden unterschiedlich verwertet. Die DM 611 führt hier zu einem besseren Wachstum als die LDM 6119. Als Fazit zeigt sich, dass beide Pilze die Dispersionen als C-Quelle nutzen können. Die Vinylacetat-Ethylen Dispersion LDM 1871 wurde dabei von beiden sehr gut

verwertet, während die beiden anderen Monomertypen deutlich unterschiedlich in Biomasse umgewandelt wurden.

### Festmedientests

Die Beimpfung der Platten wurde am 02.03.07 durchgeführt. Nach drei und sechs Wochen wurden dann die jeweiligen Längenzuwächse gemessen. Über alle Dispersionen gesehen zeigten *U. botrytis* und *C. cladosporioides* den stärksten Zuwachs. *D. purpurofuscus* wies hingegen kaum Wachstum auf, zum Teil war nur das Auskeimen der Conidien ohne weiteres Wachstum erkennbar.

Im Vergleich mit den beiden stärksten Pilzen war der Längenzuwachs bei *A. pullulans* deutlich geringer. Obwohl dieser Pilz oft auf Fassadenbeschichtungen gefunden wird, scheinen die Nährstoffe weniger aus der Beschichtung zu kommen. Von *T. harzianum* keimten nur wenige Conidien, die aber aufgrund der geringen Eigenfärbung nur sehr schlecht auf der Platte erkennbar waren. Wachstumsraten waren nicht messbar, da die Verfolgung der wenigen Mycelfäden nicht sicher machbar war.

Vergleicht man die Verwertbarkeit der einzelnen Dispersionen konnten die LDM 7717 und die DM 611 insgesamt von den Pilzen am besten als Nährstoffquelle genutzt werden.

[mm]	KM	Datum	LDM 1871	LDM 6119	LDM 7729	DM 611	LDM 7717
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	ohne	23.03.2007	12	6	5	22	19
		13.04.2007	13	9	5	25	21
	mit	23.03.2007	9	16	20	17	16
		13.04.2007	28	18	32	25	23
<i>Ulocladium botrytis</i>	ohne	23.03.2007	0,9	11	11	23	30
		13.04.2007	1	35	37	33	37
	mit	23.03.2007	0,9	22	12	30	30
		13.04.2007	1	30	33	30	39
<i>Doratomyces purpurofuscus</i>	ohne	23.03.2007	1	1	1	3	5
		13.04.2007	1	1	1	4	6
	mit	23.03.2007	0,9	1	3	0,9	1
		13.04.2007	0	1	3	1	1
<i>Aureobasidium pullulans</i>	ohne	23.03.2007	7	0,9	2	11	7
		13.04.2007	8	3	2	16	17
	mit	23.03.2007	7	7	9	9	7
		13.04.2007	8	11	13	15	10
<i>Trichoderma harzianum</i>	ohne	23.03.2007	nur wenige Conidien gekeimt, einzelne Mycelausläufer über ganze Platte, geringe Conidiogenese, keine echten Wachstumsraten messbar				
		13.04.2007					
	mit	23.03.2007					
		13.04.2007					

Tab. 25 : Längenwachstum auf Festmedien

#### **4.5. Bilddokumentation Wachstum auf den Platten**

##### **4.5.1. Lichtmikroskopische Aufnahmen**

Zur rein morphologischen Beurteilung des Wachstums wurden an bestimmten Zählungsterminen lichtmikroskopische Aufnahmen von Kolonien auf den Platten gemacht. Durch geeignete Wahl konnte die Entwicklung einiger Kolonien über mehrere Monate hinweg verfolgt werden. Aufgrund dieser Fotos war es möglich, sowohl den Längenzuwachs einzelner Mycelteile als auch den Flächenzuwachs einer solchen Kolonie zu ermitteln.

Da es sich bei dem Aufwachsen von Pilzen auf Beschichtungsflächen um einen biologischen Vorgang handelt, ist es nicht verwunderlich, dass auch hier ein stetiges Wechselspiel von Wachsen und Vergehen sowohl die Besiedlungsdichte als auch die Größe und Stärke der einzelnen Kolonien bestimmt.

Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, wurden sechs Kolonien über einen Zeitverlauf von sechs Monaten näher betrachtet. Einige Kolonien zeigten in dieser Zeitspanne ein von einem kleinen Zellhaufen ausgehendes Wachstum hin zu einer Kolonie mit ausgedehntem Mycelgeflecht, während andere sich nicht oder nur wenig veränderten. Auch das Aberodieren einer Kolonie konnte dokumentiert werden. Dabei wird eine Kolonie mit breitem, dichtem Mycel soweit durch äußere Einflüsse erodiert, dass der Hauptteil des Pilzkörpers verloren geht und nur noch in Resten vorhanden ist.

Da aus diesen Resten wiederum neue Kolonien entstehen können, ist dies ein schönes Beispiel einer Sukzession hin zu einer vollständigen Besiedlung. Im Laufe der Kolonisation von Oberflächen ergeben sich immer wieder Änderungen in der Artenzusammensetzung, der Größe und der Dichte der Kolonien, was in Analogie zu anderen von Grund auf neu zu besiedelnden Oberflächen, wie z.B. neu entstandene Vulkaninseln, steht. Nachfolgend ist die Entwicklung der Kolonien dargestellt. Die Tabellen geben den Flächenzuwachs der einzelnen Kolonien sowie den Längenzuwachs einzelner ausgewählter Mycelfäden an. Die ersten vier Kolonien fanden sich auf der Beschichtung mit Mowilith LDM 1871 in der 65%-PVK Stufe, die anderen beiden fanden sich auf der Beschichtung mit Mowilith LDM 6119 in 55%-PVK Stufe. Beide Platten wurden in Liederbach bewittert.

<b>Fläche [<math>\mu\text{m}^2</math>]</b>	<b>Feb 04 17.02.2004</b>	<b>Apr 04</b>	<b>Jun 04</b>	<b>Aug 04 16.08.2004</b>	<b>Zuwachs nach 179 Tagen</b>	<b>Zuwachs pro Tag</b>
Kolonie 1	15.888	20.090	210.157	391.194	375.307	2.097
Kolonie 2	25.442	27.365	176.942	300.816	275.374	1.538
Kolonie 3	1.499	2.250	17.327	26.346	24.847	139
Kolonie 4	5.878	4.619	27.754	62.312	56.435	315
Kolonie 5	20.997	16.297	81.698	10.371	-10.626	-59
Kolonie 6	4.029	2.130	1.482	1.340	-2.688	-15

Tab. 26 : Flächenausdehnung der betrachteten Kolonien

<b>[<math>\mu\text{m}</math>]</b>		<b>Länge am 13.04.2004</b>	<b>Länge am 14.06.2004</b>	<b>Zuwachs nach 61 Tagen</b>	<b>Wachstum / Tag</b>
Kolonie 1	Mycelfaden 1	0	512,2	512,20	8,40
	Mycelfaden 2	0	507,01	507,01	8,31
Kolonie 2	Mycelfaden 1	0	561,02	561,02	9,20
Kolonie 3	Mycelfaden 1	44,58	186,6	142,02	2,33
Kolonie 4	Mycelfaden 1	0	336,49	336,49	5,52
	Mycelfaden 2	0	324,97	324,97	5,33
Kolonie 5	Mycelfaden 1	0	271,6	271,60	4,45
	Mycelfaden 2	0	377,67	377,67	6,19

Tab. 27 : Längenzuwachs der betrachteten Kolonien

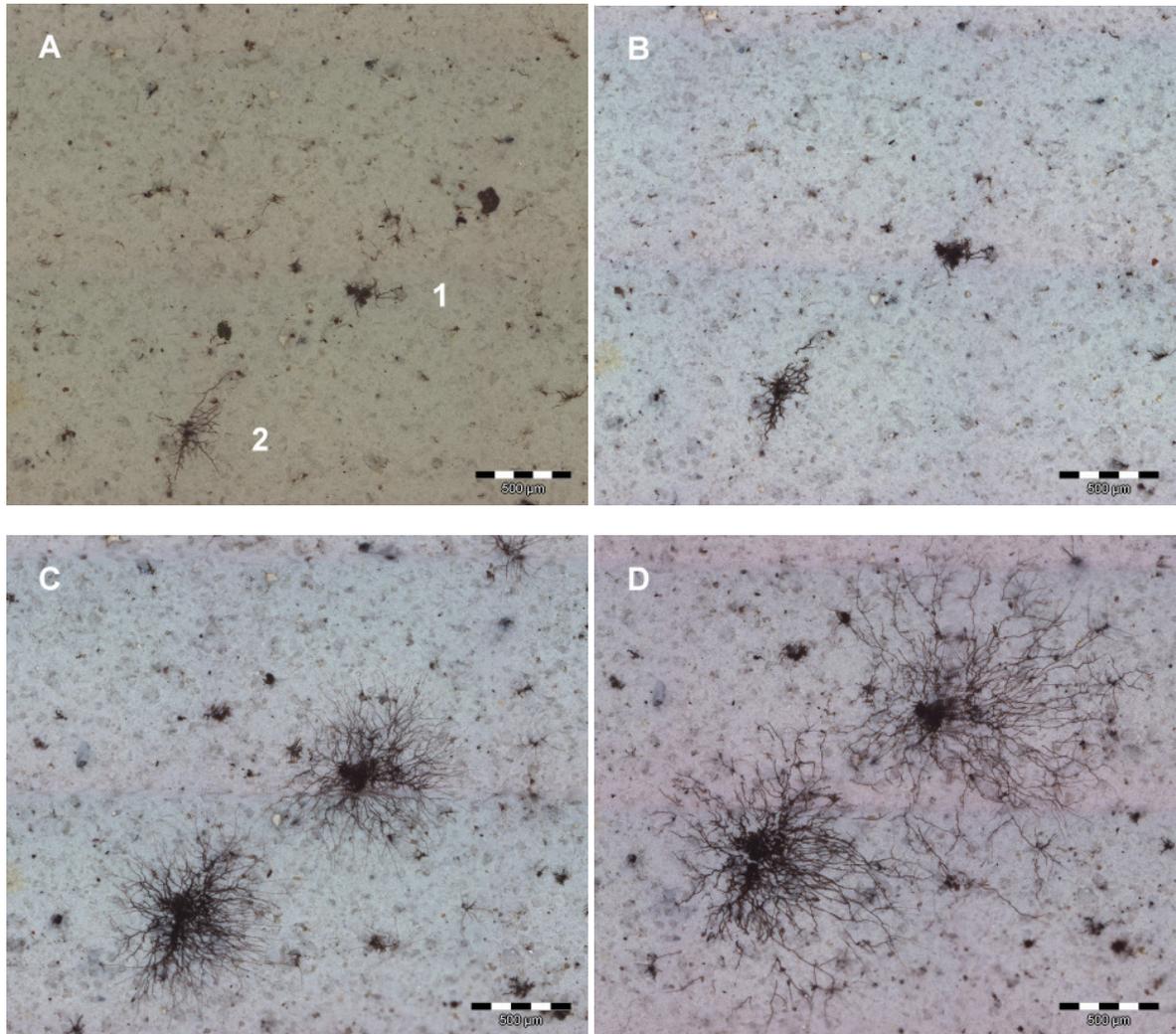
Tafel 3 : Wachstum der Kolonien 1 und 2 auf Mowilith LDM 1871, PVK 65%, Liederbach, Februar bis August 2004.

A: Februar 2004

B: April 2004

C: Juni 2004

D: August 2004



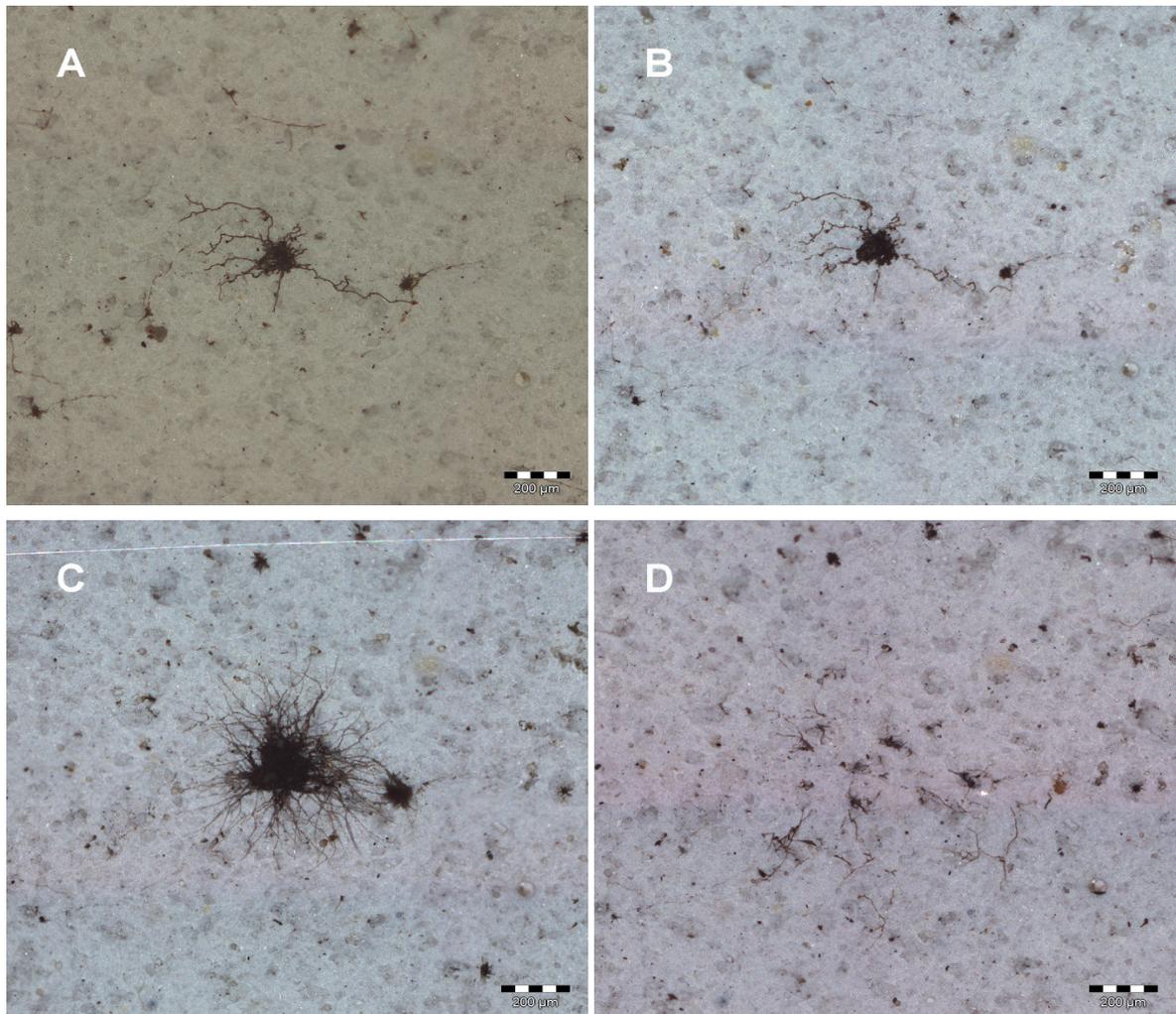
Tafel 4 : Wachstum der Kolonie 5 auf Mowilith LDM 6119, PVK 55%, Liederbach, Februar bis August 2004.

A: Februar 2004

B: April 2004

C: Juni 2004

D: August 2004



Mit den ersten beiden Kolonien wurde zwei ausgewählt, die im Beobachtungszeitraum einen sehr starken Zuwachs von Mycel aufzuweisen haben. Vor allem zu Beginn der Vegetationsphase zwischen April und Juni sind die Zuwächse besonders stark. Beide Kolonien zeigen hier auch mit 8-9  $\mu\text{m}$  / Tag das schnellste Wachstum einzelner Fäden. Die Kolonien drei und vier zeigen etwas weniger verzweigtes Wachstum, die Zuwachsrate war aber zumindest bei Kolonie 3 fast so hoch wie bei Kolonie 1. Das Wachstum der vermessenen Mycelfäden lag mit 2 bis 5  $\mu\text{m}$ /Tag etwas niedriger als bei 1 und 2. Das Verhalten der beiden anderen Kolonien war im Vergleich unterschiedlich. Während Kolonie 5 nach starkem Zuwachs bis Juni im weiteren Verlauf aberodiert wurde, zeigte Kolonie 6 überhaupt kein Wachstum sondern baute im Laufe der Zeit immer mehr ab. Das Längenwachstum bei Kolonie 5 bewegte sich im gleichen Bereich wie bei den Kolonien 3 und 4.

Die Bildersequenzen zeigen beispielhaft für die Kolonien 1 und 2 (auf Mowilith LDM 1871) sowie für Kolonie 5 (auf LDM 6119) deren Entwicklung während der sechs Beobachtungsmonate. Die beiden beobachteten Kolonien 1 und 2 bildeten ein starkes, weit verzweigtes Mycel aus. Andere im Bildausschnitt befindliche Kolonien zeigten hingegen kein oder nur unwesentliches Wachstum. Das Mycelwachstum auf der LDM 6119 war nicht ganz so stark wie auf der 1871, trotzdem bildete sich bis Juni 04 ein deutliches Mycel aus. Wie oben beschrieben, wurde diese Kolonie dann im Verlauf der zwei Monate bis August 04 aberodiert, so dass nun nur noch die Reste zu sehen sind.

Da für die Monate Februar bis August 2004 lichtmikroskopische Beobachtungen einzelner Kolonien vorliegen, wurde für den gleichen Zeitraum die Wetterbedingungen im Raum um Liederbach ausgewertet. Zur Auswertung kamen Daten der Wetterstation Frankfurt Flughafen des DWD. Es wurden die mittleren Temperaturen, der Niederschlag, die Globalstrahlung und die mittlere Luftfeuchte für jeden Tag zwischen dem 17.02.04 und dem 16.08.04 betrachtet.

Für jeden der vier Parameter wurden vier Unterteilungen aufgestellt, für die die Anzahl der Tage im Zeitraum zwischen den vier Beobachtungstagen separat ermittelt wurden. Auf diese Weise konnten die Wetterveränderungen zwischen den

Beobachtungen deutlicher dargestellt werden. Die Parameter verhalten sich im Allgemeinen entsprechend dem Jahresverlauf.

Anzahl Tage		17.02. bis 13.04.	14.04. bis 14.06.	15.06. bis 16.08.
Temperatur	<0°C	7	0	0
	0 bis 9,9°C	37	5	0
	10 bis 19,9°C	13	54	36
	>20°C	0	3	27
Niederschlag	<0,5 mm	43	49	38
	0,5 bis 0,9 mm	4	2	3
	1 bis 4,9 mm	9	5	14
	>5 mm	1	6	8
Globalstrahlung	<250 J/cm <sup>2</sup>	0	0	0
	250 bis 499 J/cm <sup>2</sup>	14	0	0
	500 bis 999 J/cm <sup>2</sup>	18	12	5
	>1000 J/cm <sup>2</sup>	25	50	58
Luftfeuchte	<60%	8	25	18
	60,5 bis 74,9%	27	24	27
	75 bis 89,9%	17	10	18
	>90%	5	3	0

Tab. 28 : Wetterdaten im Beobachtungszeitraum Februar 04 – August 04

#### 4.5.2. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Neben den lichtmikroskopischen Aufnahmen wurden von den Oberflächen auch Bilder im Rasterelektronenmikroskop gemacht. Durch die wesentlich höhere Vergrößerung konnten hierbei die Veränderungen der Oberflächen besser beurteilt werden. Es wurden von jeder Dispersion in der 55%-PVK Stufe aus Liederbach Präparate angefertigt und REM-Aufnahmen gemacht.

Die Oberfläche aller Bindemitteltypen zeigten Veränderungen, die auf einen aktiven Abbau der Beschichtung durch Pilze hindeuten. Dabei handelt es sich um ein aktives Eindringen und Erweitern in entweder schon vorher vorhandener Spalten oder kleiner Löcher bzw. um ein Anheften auf der Oberfläche mit einer mehr oder weniger weit gehenden Beschädigung derselben. Nachfolgend werden ausgewählte Bilder der einzelnen Dispersionen vorgestellt und besprochen.

Tafel 5 : Oberfläche der Mowilith LDM 1871, PVK 55%, Liederbach.

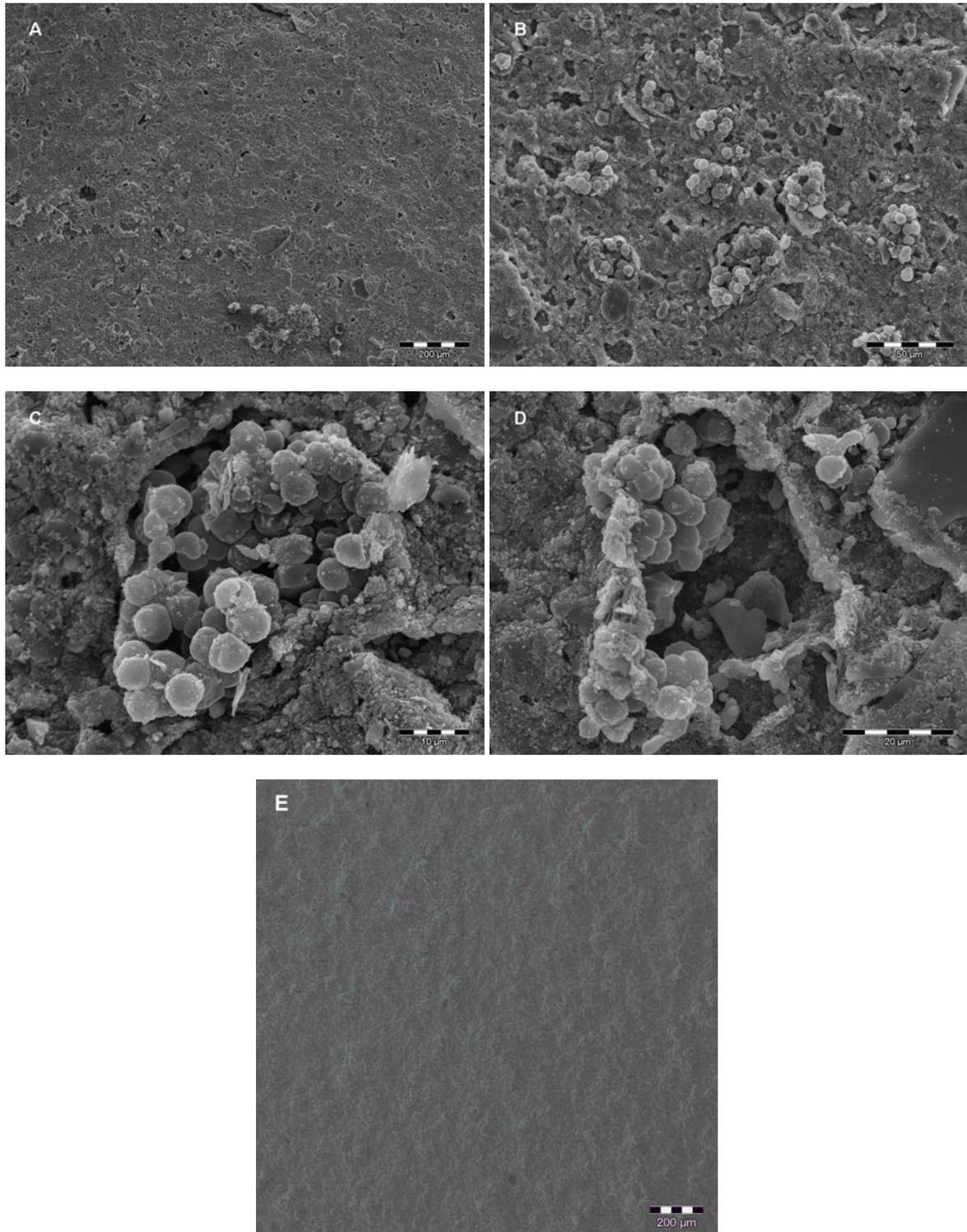
A: Übersicht über bewitterte Oberfläche.

B: Bewuchs auf der Oberfläche.

C: In die Beschichtung eingewachsene Kolonie.

D: Lochbildung, verursachende Pilzkolonie entfernt.

E: Unbewitterte Oberfläche



Tafel 6 : Oberfläche der Mowilith LDM 6119, PVK 55%, Liederbach.

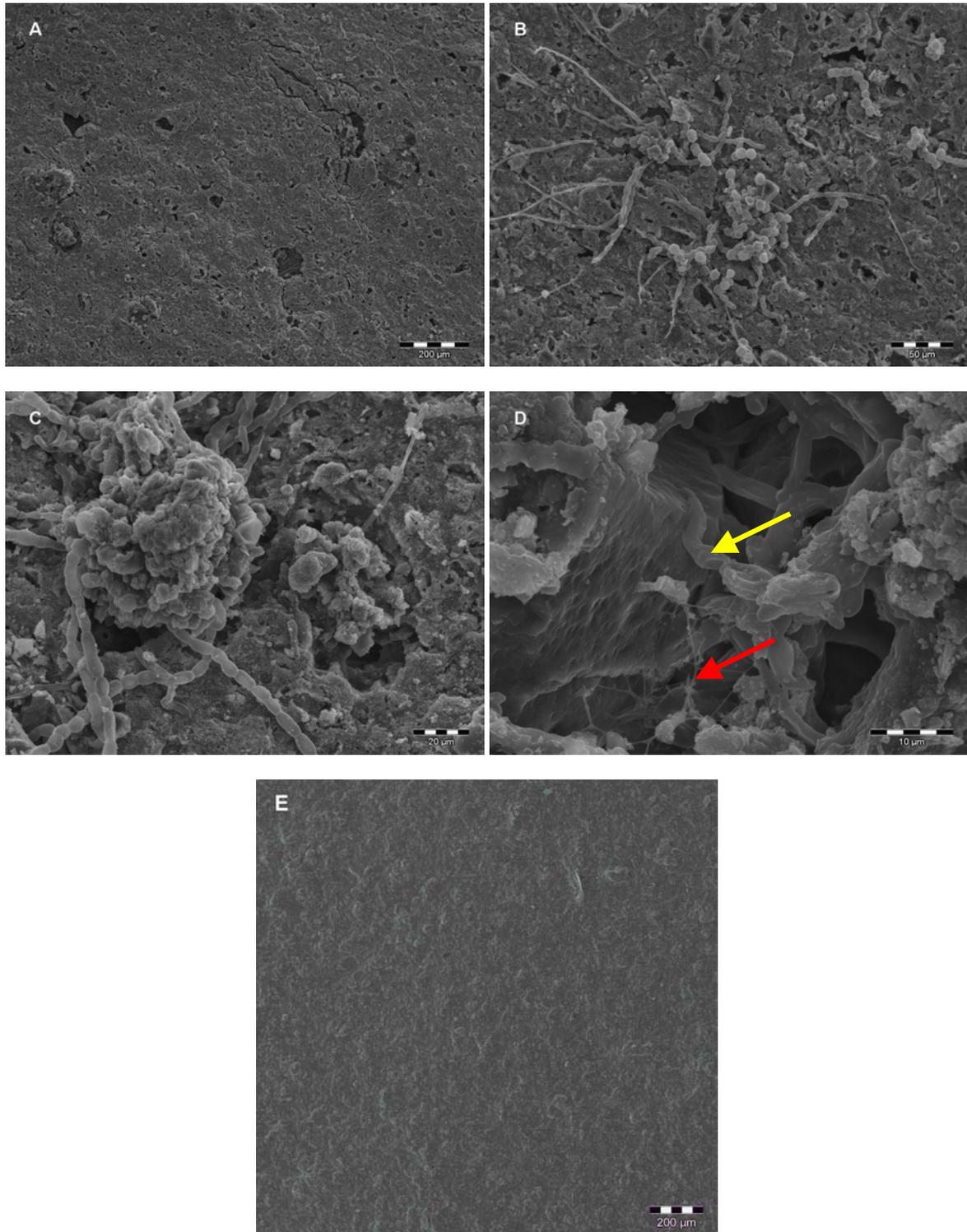
A: Übersicht über bewitterte Oberfläche.

B: Bewuchs auf der Oberfläche.

C: In die Beschichtung eingewachsene Kolonien.

D: Mycel in einer Vertiefung.

E: Unbewitterte Oberfläche.



Tafel 7 : Oberfläche der Mowilith LDM 7729, PVK 55%, Liederbach.

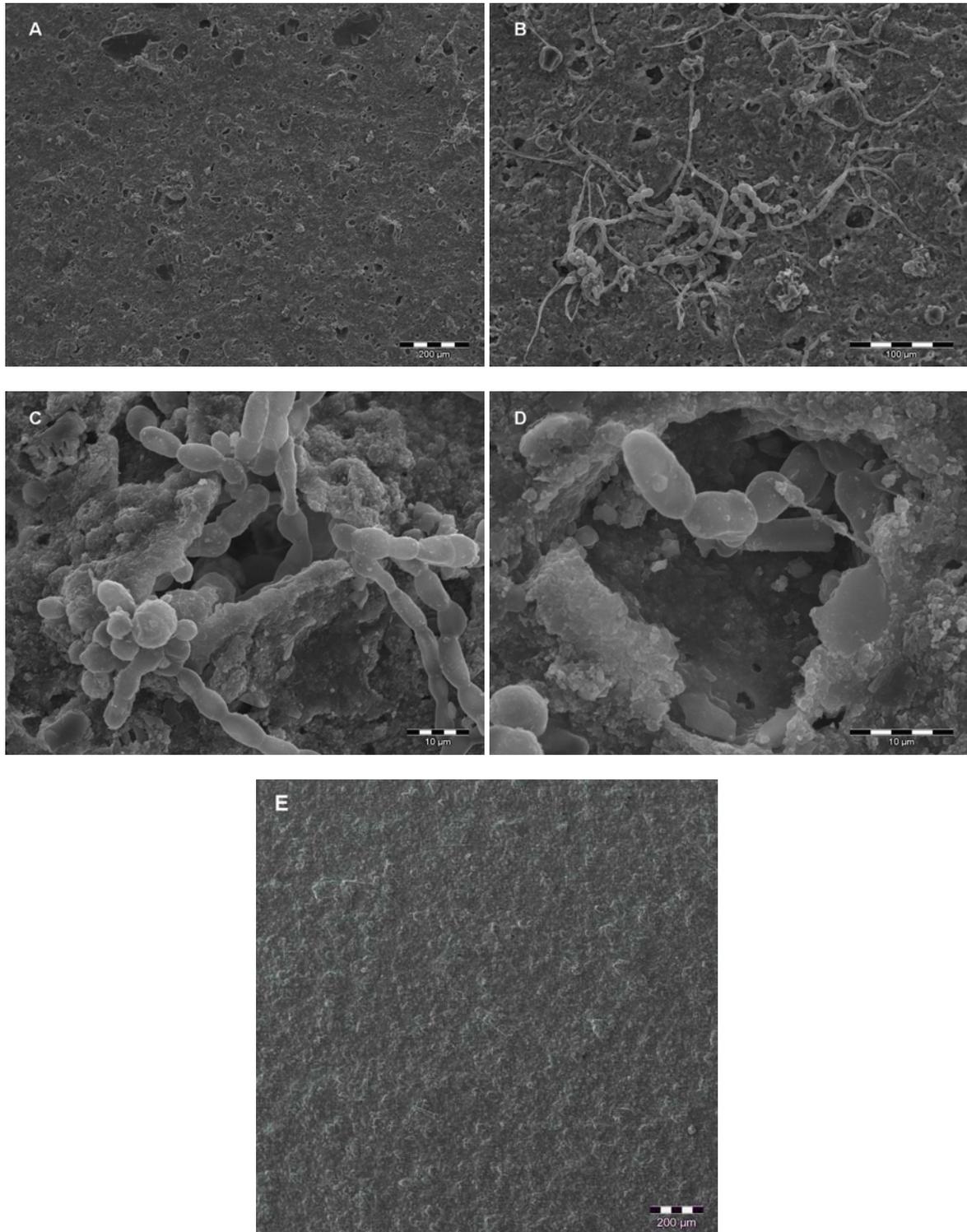
A: Übersicht über bewitterte Oberfläche.

B: Bewuchs auf der Oberfläche.

C: In die Beschichtung eingewachsene Kolonie.

D: Mycel in einer Vertiefung.

E: Unbewitterte Oberfläche.



Tafel 8 : Oberfläche der Mowilith DM 611, PVK 55%, Liederbach.

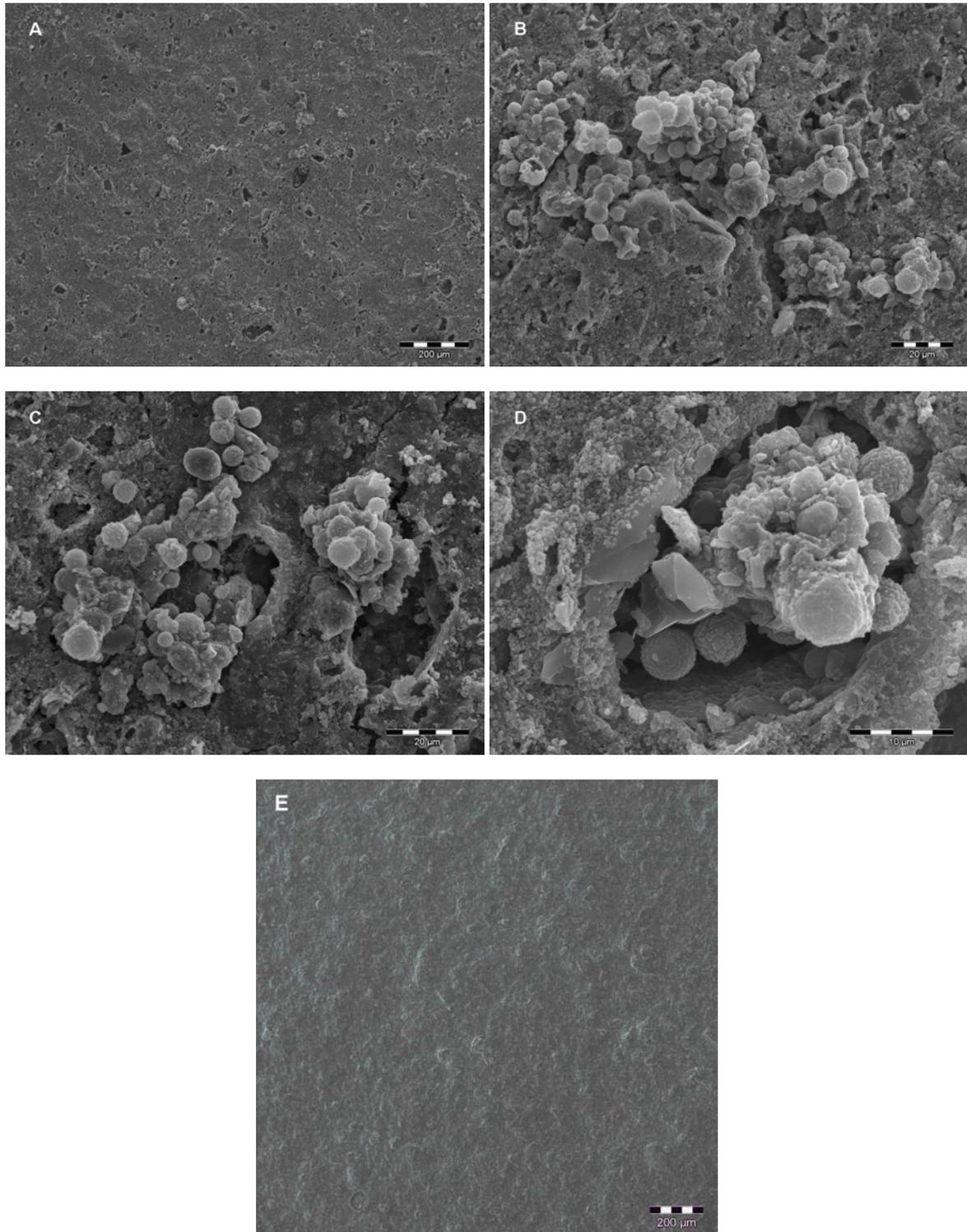
A: Übersicht über bewitterte Oberfläche.

B: Bewuchs auf der Oberfläche.

C: In die Beschichtung eingewachsene hefeartige Kolonien.

D: Hefeartige Kolonie in einer Vertiefung.

E: Unbewitterte Oberfläche.



Tafel 9 : Oberfläche der Mowilith LDM 7717, PVK 55%, Liederbach.

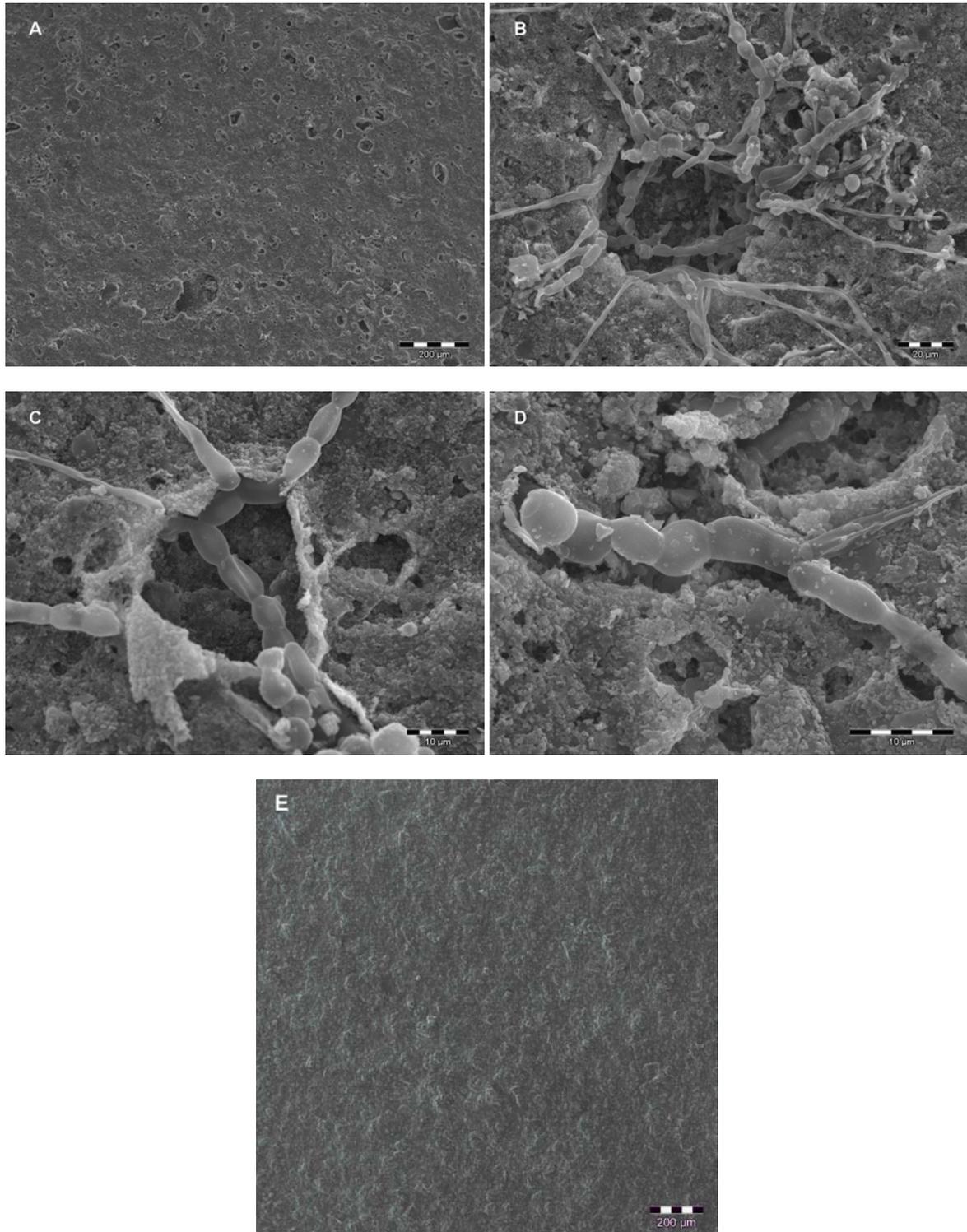
A: Übersicht über bewitterte Oberfläche.

B: Loch mit Kolonieresten.

C: In die Beschichtung eingewachsene Kolonie.

D: Mycelfaden in Vertiefung der Oberfläche.

E: Unbewitterte Oberfläche.



*Mowilith LDM 1871*

Das Übersichtsbild in 50-facher Vergrößerung zeigt eine recht grobporige Oberfläche, mit einigen größeren Fehlstellen und einer allgemein deutlich anerodierten Struktur. An einigen Stellen ist großflächiges Kristallwachstum erkennbar.

Bei 250-facher Vergrößerung wirkt die Oberfläche deutlicher strukturiert, man erkennt die Bindemittelschicht, die die Pigment- und Füllstoffe umschließt. Analysiert man die Stellen mit Pilzbewuchs, erkennt man, dass die Pilze in die Beschichtung eingedrungen sind und einen aktiven Abbau der Beschichtung betreiben. Besonders deutlich wird dies, wenn die Vergrößerung nochmals erhöht wird und einzelne Kolonien detailliert betrachtet werden.

In den Bildern 3 und 4 sind bei 800-facher bzw. 1000-facher Vergrößerung zwei einzelne Kolonien dargestellt.

Bild 3 zeigt eine Kolonie, deren oberer Rand etwas von der Vertiefung abgelöst wurde und deshalb den Rand dieses Lochs nachzeichnet. Die Kolonie sitzt fest in der Vertiefung, Teile davon werden von der Beschichtung verdeckt, was ein Hinweis auf ein aktives Wachstum unterhalb der obersten Beschichtungslage ist.

In Bild 4 ist die Kolonie eventuell durch die Präparation zum Teil entfernt worden. Die am linken Rand liegenden Reste sind aber trotzdem noch fest mit dem Rand der Vertiefung verbunden, einzelne Kolonieteile liegen wie in Bild 3 unterhalb des Rands der Vertiefung. Zudem sind der aufgeworfene Rand des Lochs und die z.T. runden Formen dieses Rands weitere Hinweise auf eine aktive Aufweitung dieser Vertiefung. Durch das Freilegen der Vertiefung ist ein Abschätzen der Tiefe möglich, in diesem Beispiel liegt sie bei ca. 10 µm.

*Mowilith LDM 6119*

Auch bei der LDM 6119 sind im Übersichtsbild bei 50-facher Vergrößerung einige größere Fehlstellen in der Beschichtungsfläche zu erkennen. Die Einwirkungen der Bewitterungseinflüsse sind ebenfalls deutlich sichtbar, beispielsweise die über 300 µm langen Längsrillen in der rechten oberen Bildmitte. Steigert man die Vergrößerung und sieht sich die mit Pilzen bewachsenen Stellen genauer an, so ist auch hier ein direkter Angriff auf die Beschichtung erkennbar. Wie bei der 1871 sieht man in den Bildern 2 und 3 von den Kolonien ihrer Morphologie angepasste Lochränder. In Bild 4 ist bei 1200-facher Vergrößerung ein solches Loch näher

dargestellt. Auffällig sind die Mycelteile, die in der Vertiefung sitzen, besonders das an der linken Wand anliegende Mycelende (gelber Pfeil). Zudem ist die Wand stark geglättet, was durch den enzymatischen Angriff auf die Beschichtung zustande kommt. Im unteren Teil des Bildes sieht man sehr dünne fadenartige Strukturen, bei denen es sich um Proteinfäden handeln könnte, die zur Stabilisierung und Befestigung der Kolonie am Untergrund sezerniert wurden (roter Pfeil).

#### *Mowilith LDM 7729*

Wie bei den beiden bisher besprochenen Dispersionen ist die Oberfläche der LDM 7729 in einem ähnlichen Zustand des erosiven Abbaus. Obwohl die bisherigen Dispersionen unterschiedliche Typen waren (1871 ist eine Vinylacetat-Ethylen, 6119 ist eine Styrol-Acrylat und 7729 ist eine Reinacrylat Dispersion) zeigen sich keine gravierenden Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit. Auch die Tatsache, dass die Pilze einen Abbau der Dispersion bewirken ist bei der 7729 verifizierbar. Bild 2 zeigt einen stark bewachsenen Ausschnitt mit einigen, in ihren Vertiefungen sitzenden Kolonien. Bild 3 zeigt die im rechten oberen Teil abgebildete Kolonie 900-fach vergrößert. Man erkennt den stark aufgewölbten Rand, an dem das Mycel dicht anliegt, sowie den innerhalb der Vertiefung liegenden Teil der Kolonie. Auch hier sind einige der oben erwähnten Proteinfäden am Mycel erkennbar. In Bild 4 ist ein Loch ohne die dazugehörige Kolonie dargestellt, wie in Bild 4 bei der 6119 kann auch hier eine Glättung der Wand erkannt werden, zudem sind einige Reste der Kolonie im unteren Teil sichtbar.

#### *Mowilith DM 611*

Auch die DM 611 zeigt eine durch die Bewitterung angegriffene Oberfläche, die durch mehr oder weniger große Vertiefungen charakterisiert ist. Obwohl auf der DM 611 weniger großflächiges Mycelwachstum auftrat, können bei genauem Hinsehen die gleichen Abbauvorgänge erkannt werden wie bei den anderen Dispersionen. Die Bilder 2 und 3 zeigen einige Kolonien, die ihre Vertiefungen ihrer Morphologie angepasst haben. Besonders gut sichtbar wird dies in Bild 4, hier sind auch Teile der Lochwand zu erkennen, die sich ähnlich der in den Bildern 4 der beiden vorhergehenden Dispersionen darstellt.

*Mowilith LDM 7717*

Wie bei den anderen zeigt das Übersichtsbild mit 50-facher Vergrößerung eine Oberfläche, die die Spuren der Bewitterung aufweist. Insgesamt gesehen ist ein Unterschied bei allen Dispersionen in dieser Vergrößerung nicht erkennbar, eventuell auch durch den naturgemäß kleinen Ausschnitt, obwohl darauf geachtet wurde, einen möglichst repräsentativen Teil zu erfassen.

Daß ein Abbau an Beschichtungsmaterial durch Pilze stattfindet, zeigen die Vergrößerungen einzelner Kolonien bzw. Mycelteile. In den Bildern 2 und 3 sind die Reste von z.T. entfernten Kolonien abgebildet. Sowohl der Boden als der Rand sind jeweils noch mit Mycelteilen besetzt, die in beiden Fällen z.T. deutlich unter dem Rand liegen. Bild 4 zeigt einen Mycelrest, dessen „Bett“ sich deutlich abzeichnet, d.h. durch aktiven Abbau hat sich der Pilz in die Beschichtung gearbeitet.

**4.6. PAS-Färbung**

Nach Durchführung der Färbungen und Analyse der Bilder wurde klar, dass durch die starke Schwarzfärbung der Pilzkolonien eine klare Unterscheidung zwischen Schmutz und Pilzkolonie nur bei relativ hoher Vergrößerung möglich ist. Ab 100facher Vergrößerung ist optisch klar erkennbar, ob es sich um einen Pilz oder anorganischen Schmutz handelt.

Mit Hilfe der in Abschnitt 3.1.6 erläuterten computerunterstützten Analyse wurde versucht, den biogenen Bedeckungsgrad auf den Platten zu ermitteln. Aufgrund der geringen Größe der Ausschnitte stellt dies allerdings nur eine Näherung dar, welche einen Eindruck der Besiedlungsdichte vermittelt. Da für die Herstellung der gefärbten Proben möglichst repräsentative Stellen ausgewählt wurden, sollte die Näherung jedoch schon sehr gut sein.

Nachfolgend werden die auf diese Weise ermittelten Werte dargestellt.

		Ernsthofen					Liederbach				
		PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65	PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65
alle dunklen Pixel	LDM 1871	19,00%	23,05%	30,35%	28,05%	29,15%	29,74%	31,16%	25,35%	28,99%	28,65%
	LDM 6119	27,14%	28,28%	20,82%	19,94%	21,91%	25,33%	31,30%	26,91%	28,67%	28,22%
	LDM 7729	21,15%	20,47%	19,92%	19,63%	18,44%	20,19%	25,45%	20,72%	24,28%	23,70%
	DM 611	28,53%	23,91%	15,89%	19,20%	19,66%	22,05%	31,70%	28,07%	25,64%	21,96%
	LDM 7717	18,06%	16,88%	15,41%	17,04%	16,43%	18,58%	18,66%	26,63%	19,29%	22,49%
Schwarze Pixel	LDM 1871	5,14%	3,18%	5,60%	9,37%	2,65%	14,12%	9,13%	10,50%	7,05%	5,05%
	LDM 6119	2,70%	2,68%	5,86%	6,32%	6,29%	10,38%	6,64%	8,53%	7,53%	5,53%
	LDM 7729	6,31%	9,92%	8,88%	7,62%	3,76%	10,84%	9,39%	14,23%	9,26%	8,55%
	DM 611	1,74%	3,33%	1,14%	4,02%	7,17%	12,73%	4,06%	10,07%	9,17%	8,87%
	LDM 7717	5,29%	5,04%	5,06%	7,46%	7,12%	18,23%	16,16%	17,42%	9,10%	9,14%
Rote Pixel	LDM 1871	94,86%	96,82%	94,40%	90,63%	97,35%	85,88%	90,87%	89,50%	92,95%	94,95%
	LDM 6119	97,30%	97,32%	94,14%	93,68%	93,71%	89,62%	93,36%	91,47%	92,47%	94,47%
	LDM 7729	93,69%	90,08%	91,12%	92,38%	96,24%	89,16%	90,61%	85,77%	90,74%	91,45%
	DM 611	98,26%	96,67%	98,86%	95,98%	92,83%	87,27%	95,94%	89,93%	90,83%	91,13%
	LDM 7717	94,71%	94,96%	94,94%	92,54%	92,88%	81,77%	83,84%	82,58%	90,90%	90,86%

Tab. 29 : Prozentuale Anteile an gefärbten Pixeln auf den Fotos der PAS-Färbung

Die roten Pixel repräsentieren also die durch die Färbung ermittelte Bedeckung durch organische Substanzen. Dieser Anteil liegt bei den Proben aus Liederbach deutlich niedriger als bei denen aus Ernsthofen. Die grafische Darstellung der Ergebnisse der fünf PVK Stufen verdeutlicht dies.

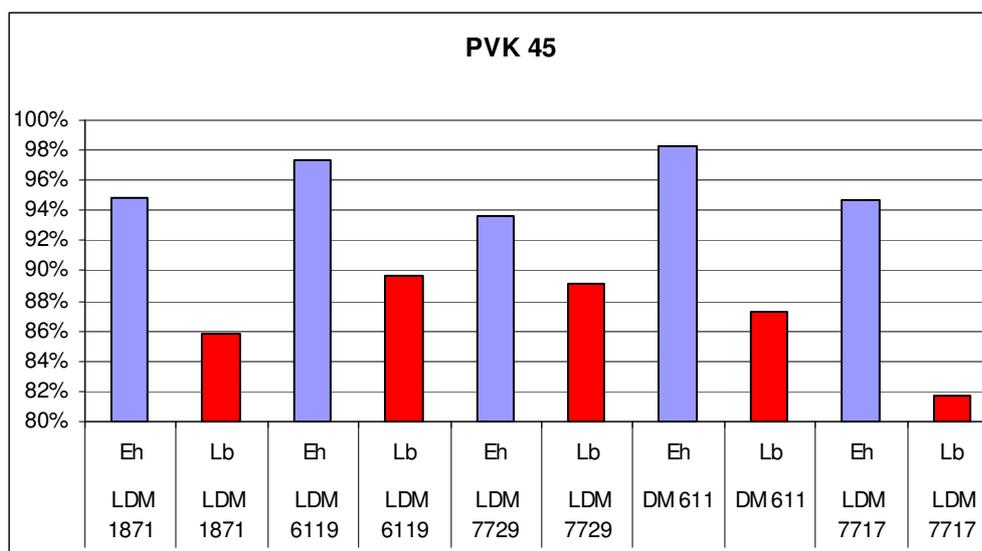


Abb. 30 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 45

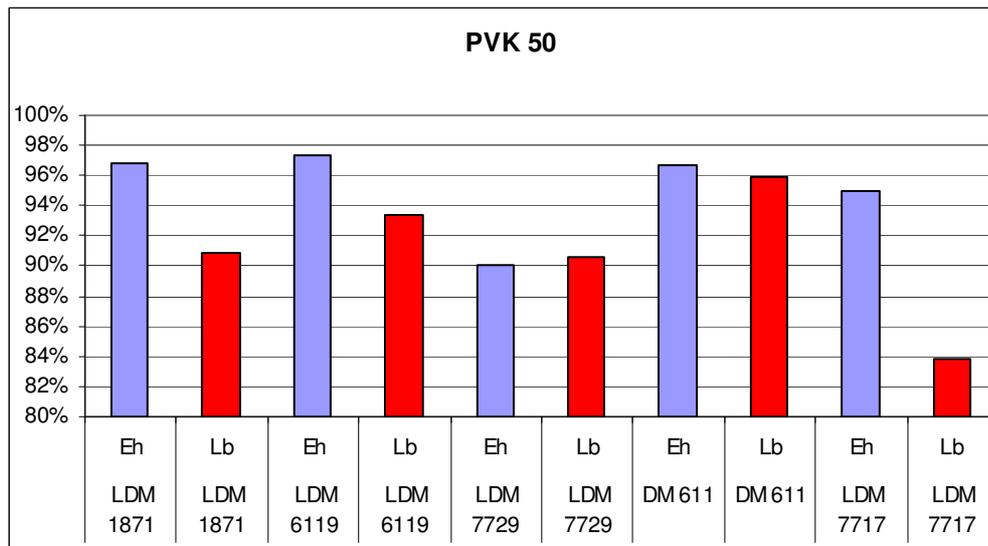


Abb. 31 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 50

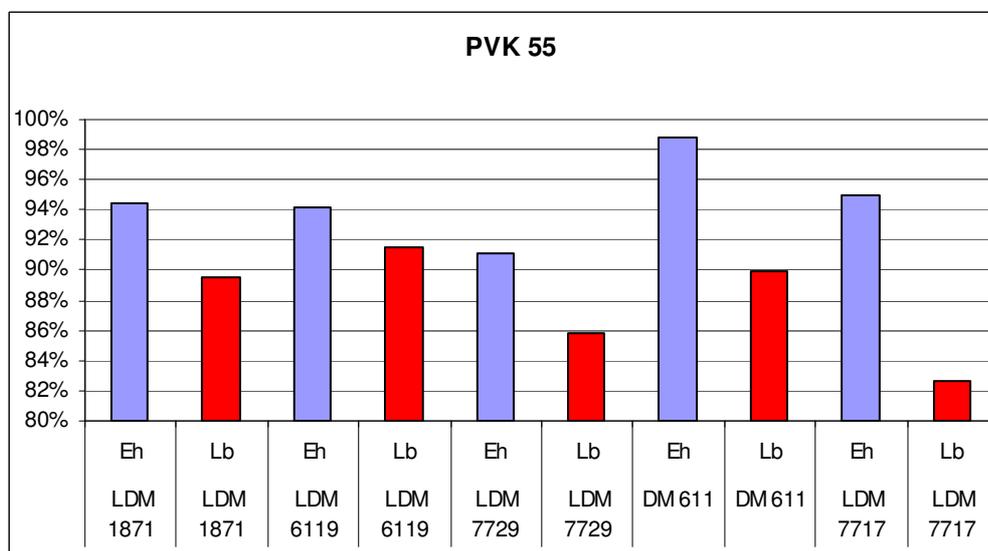


Abb. 32 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 55

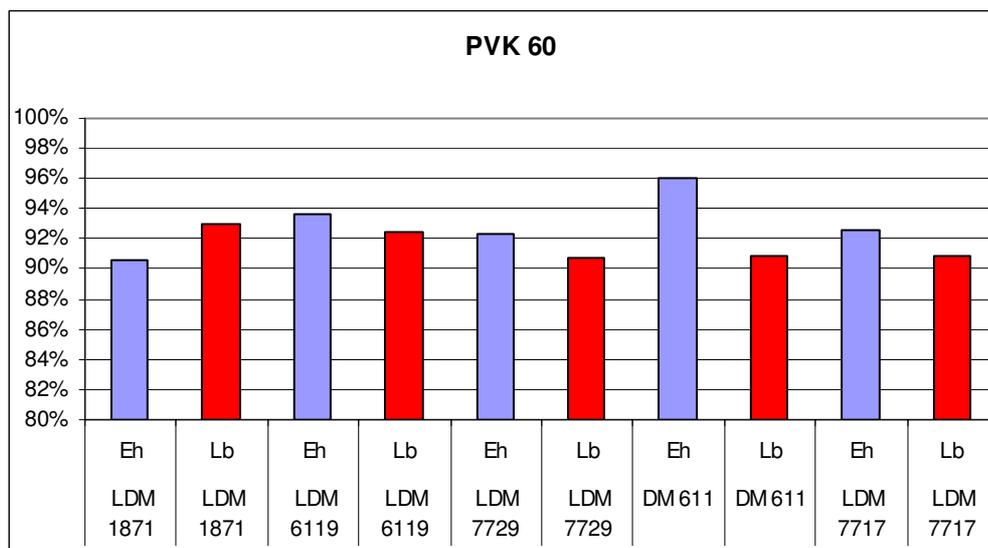


Abb. 33 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 60

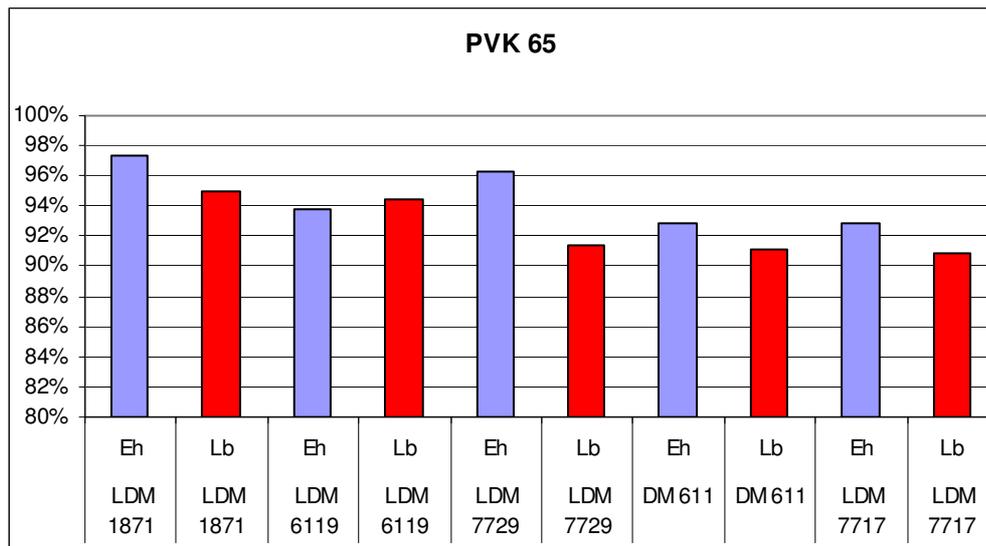


Abb. 34 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 65

Ursache ist die wesentlich stärkere Bedeckung der Platten in Liederbach durch anorganischen Schmutz. Die Bedeckung in Ernsthofen hingegen bestand zu einem sehr viel höheren Teil aus organischem, an diesem Standort fast sicher biogenem Material.

Der Trend zu einem stärkeren Pilzbewuchs bei höheren PVK zeigt sich hier eher bei den Werten aus Liederbach, während in Ernsthofen der Fall umgekehrt ist. Eine Ursache könnte die unterschiedliche Art der Verschmutzung sein. Während in Liederbach der Schmutz eher anorganisch ist (Staubentwicklung durch Landwirtschaft in der Nähe) sedimentiert in Ernsthofen eher organischer Schmutz (Pollen etc. aus der bewaldeten Umgebung) auf den Platten. Da niedrigere PVK stärker verschmutzen, führen diese unterschiedlichen Verhältnisse zu den beobachteten Resultaten.

Neben den Pilzkolonien werden durch die Färbung auch andere biologische Strukturen sichtbar, die auf den ungefärbten Proben nicht zu sehen sind. Vor allem Bakterienansiedlungen können so erkannt werden. Bei stärker befallenen Arealen lässt sich so eine beginnende Biofilmbildung nachweisen. Im ungefärbten Zustand noch als relativ wenig besiedelt erscheinende Gebiete erweisen sich nach der Färbung als doch deutlich mit Organismen und Substanzen biogenen Ursprungs belegt. Als Beispiele seien hier Bilder der Beschichtungen mit LDM 7729 und LDM 7717 in PVK 55 dargestellt.



Abb. 35 : Mowilith LDM 7729 PVK 55 Liederbach ungefärbt 100x



Abb. 36 : Mowilith LDM 7729 PVK 55 Liederbach gefärbt 100x

In der oberen Bildhälfte ist im ungefärbten Zustand nur wenig aufliegendes Material zu sehen. Nach Färbung allerdings stellen sich dieselben Bereiche als sehr stark mit Bakterien und anderen biogenen Ablagerungen belegt dar. Diese Bedeckung mit biologischer Substanz kann dann wiederum als Nährstoff für weiteren Aufwuchs vor allem von Pilzen dienen. Die ablaufende Sukzession führt dann zu einem fortschreitenden Bewuchs.

Bei 200facher Vergrößerung sind Erosionseffekte erkennbar, die bei Aufnahmen mit dem REM noch deutlicher zu Tage treten. Aber auch im lichtmikroskopischen Bild sind die Zerstörungen auf den Beschichtungen klar erkennbar. Im unten dargestellten Beispiel sind mehrere Kolonien in die Beschichtung eingedrungen und haben so die Oberfläche beschädigt.

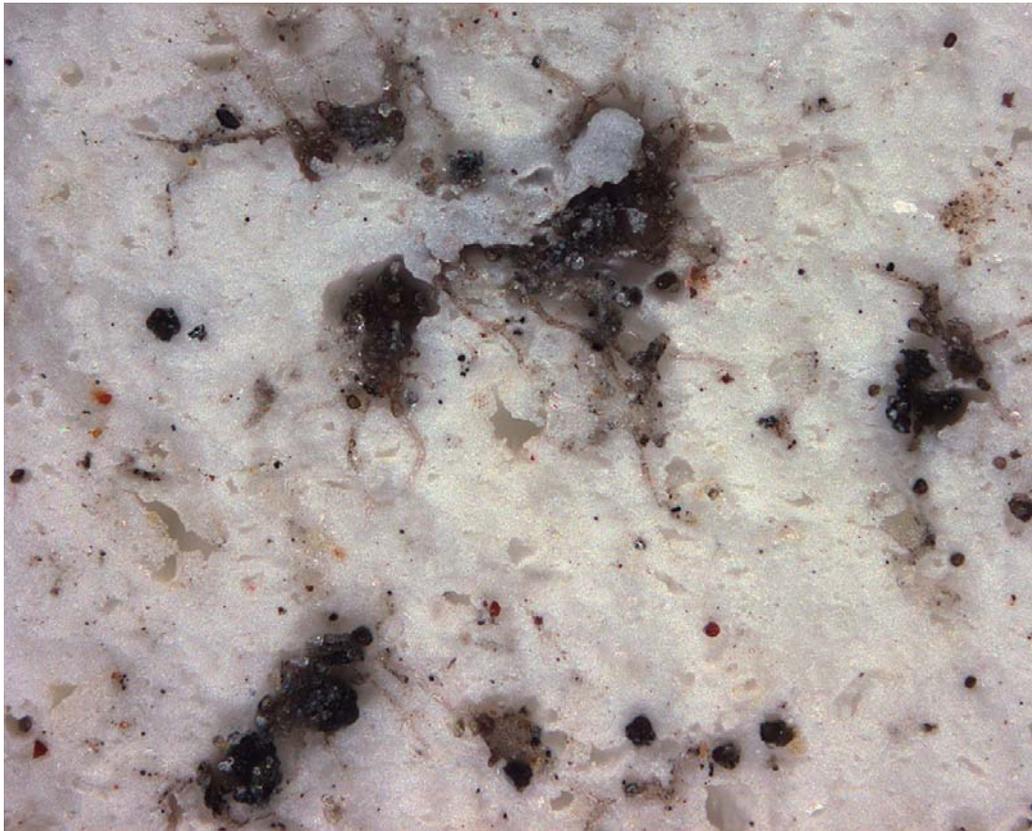


Abb. 37 : Mowolith LDM 7717 PVK 55 Liederbach ungefärbt 200x

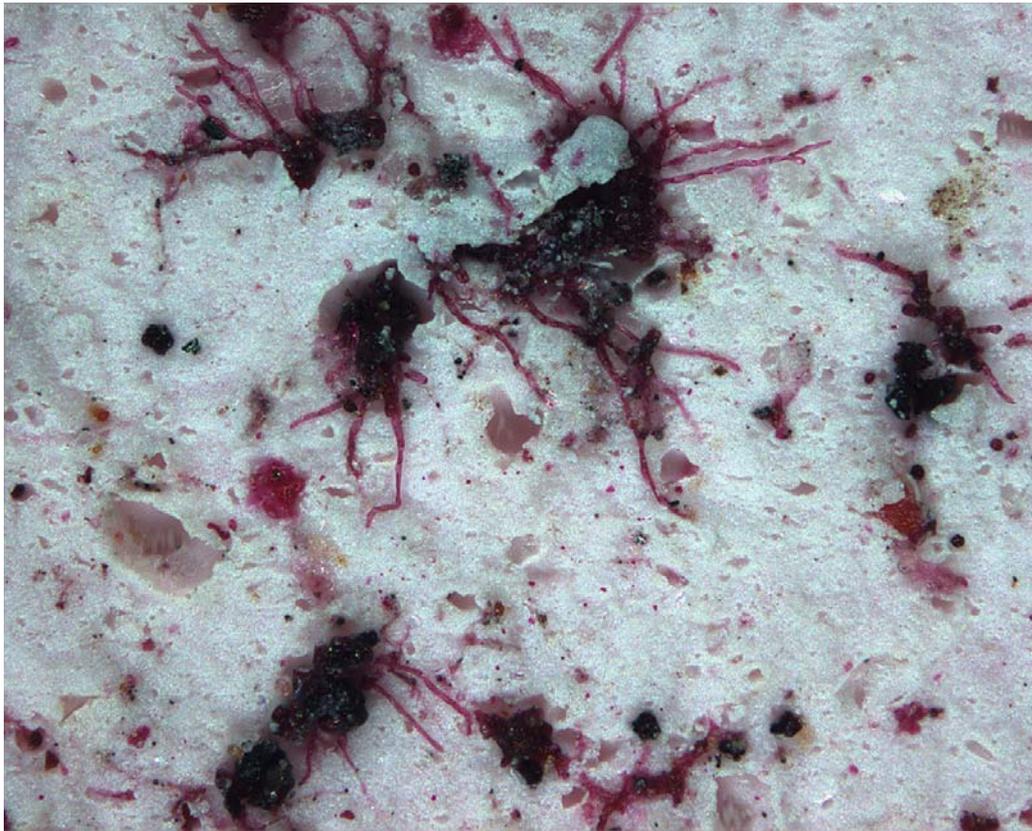


Abb. 38 : Mowolith LDM 7717 PVK 55 Liederbach gefärbt 200x

Dieses Biopitting ist bei allen Dispersionen nachweisbar und stellt einen deutlichen Hinweis auf die Degradation der Beschichtungen durch mikrobielle Einflüsse dar.

#### 4.7. L\*-Werte, Glanzgrade, L\*-Wert Verlustrate

##### 4.7.1. L\*-Werte

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, wurden die fünf über die Platte verteilten Einzelwerte gemittelt. Damit wurden auftretende Differenzen innerhalb der Platte ausgeglichen. Aus diesen Werten wurde dann der Gesamtverlust an Helligkeit ( $\Delta L^*_{\text{gesamt}}$ ) der einzelnen Platten berechnet, sowie die Verlustrate ( $\Delta L^*_{\text{Durchschnitt}}$ ) bestimmt, die die durchschnittliche Abnahme der Helligkeit zwischen zwei Messungen wiedergibt.

Nachfolgend sind die L\*-Werte der jeweiligen Platten angegeben.

Ernsthofen

Platte	Jul 03	Nov 03	Feb 04	Apr 04	Jun 04	Aug 04	Okt 04	Dez 04	Feb 05	Apr 05	Jun 05	Aug 05	Okt 05	Dez 05	Feb 06
1a	95,23	94,58	94,45	94,49	93,58	93,30	92,92	92,87	93,22	93,02	92,87	92,64	92,42	92,26	92,76
1b	94,94	94,37	94,17	93,88	93,10	92,88	92,68	92,38	92,53	92,43	92,22	92,07	92,09	91,90	92,42
1c	94,96	94,41	94,20	94,11	93,10	93,08	92,76	92,61	92,68	92,52	92,62	92,45	92,28	91,90	92,29
1d	94,77	94,17	93,84	93,79	92,82	92,71	92,64	92,35	92,40	92,39	92,43	92,28	91,96	91,06	91,20
1e	94,84	94,28	94,09	94,00	93,24	93,12	92,98	92,85	93,04	93,03	92,98	92,85	92,47	91,72	92,35
2a	95,10	94,33	94,06	93,70	92,38	92,29	91,84	91,39	91,76	91,36	91,45	91,26	91,32	90,79	91,37
2b	94,92	94,09	93,68	93,62	92,43	92,27	91,72	91,60	91,56	91,32	91,20	91,22	91,09	90,76	91,21
2c	94,76	94,23	93,65	93,50	92,35	92,10	91,81	91,46	91,58	91,43	91,20	91,11	90,83	90,6	90,95
2d	94,46	93,89	93,49	93,15	92,10	91,90	91,82	91,37	91,56	91,42	91,11	91,05	90,66	90,16	90,80
2e	94,53	93,67	93,40	93,30	92,46	92,21	92,04	91,84	91,78	91,78	92,01	91,80	91,37	90,92	91,25
3a	95,08	94,70	94,22	94,02	92,97	92,86	92,78	92,58	92,55	92,30	92,02	91,88	91,70	91,53	91,94
3b	95,12	94,56	94,33	94,05	93,05	93,00	92,75	92,38	92,49	92,13	92,12	91,84	91,52	91,11	91,45
3c	94,81	94,46	94,07	93,91	92,89	92,63	92,53	92,26	92,27	92,15	92,04	91,70	91,19	90,86	90,61
3d	94,67	94,24	93,92	93,95	93,03	92,95	92,87	92,72	92,82	92,70	92,57	92,41	91,98	92,01	92,01
3e	94,64	93,91	93,71	93,70	92,76	92,83	92,85	92,68	92,80	92,59	92,70	92,45	92,16	92,21	92,30
4a	95,01	94,11	93,92	93,91	92,64	92,53	92,32	92,38	92,23	92,23	92,13	92,25	92,04	92,17	92,38
4b	94,89	93,98	93,81	93,74	92,79	92,74	92,58	92,45	92,37	92,32	92,23	91,96	91,82	91,87	92,07
4c	94,80	93,96	93,75	93,62	92,83	92,59	92,32	92,39	92,45	92,37	92,42	92,30	92,29	92,26	92,56
4d	94,50	93,48	93,41	93,37	92,45	92,36	92,32	92,33	92,41	92,31	92,48	92,39	92,18	92,06	92,46
4e	94,66	93,54	93,38	93,37	92,62	92,44	92,51	92,52	92,60	92,39	92,42	92,37	91,91	91,90	92,23
5a	95,02	94,40	94,11	94,09	93,25	93,11	93,04	93,15	93,09	93,02	93,00	92,96	92,74	92,78	93,08
5b	95,05	94,49	94,17	94,30	93,45	93,06	93,20	93,29	93,01	93,19	93,28	93,26	92,98	93,01	93,20
5c	94,94	94,28	94,02	94,04	93,20	93,26	93,23	93,25	93,19	93,16	93,33	93,25	93,01	93,05	93,37
5d	94,84	94,13	93,87	93,81	93,06	92,90	92,98	92,92	92,79	92,86	92,9	92,86	92,55	92,51	92,97
5e	94,78	94,23	94,06	93,95	93,52	93,68	93,84	93,83	93,75	93,72	93,68	93,56	93,21	93,19	93,63

Tab. 30 : L\*-Werte Ernsthofen

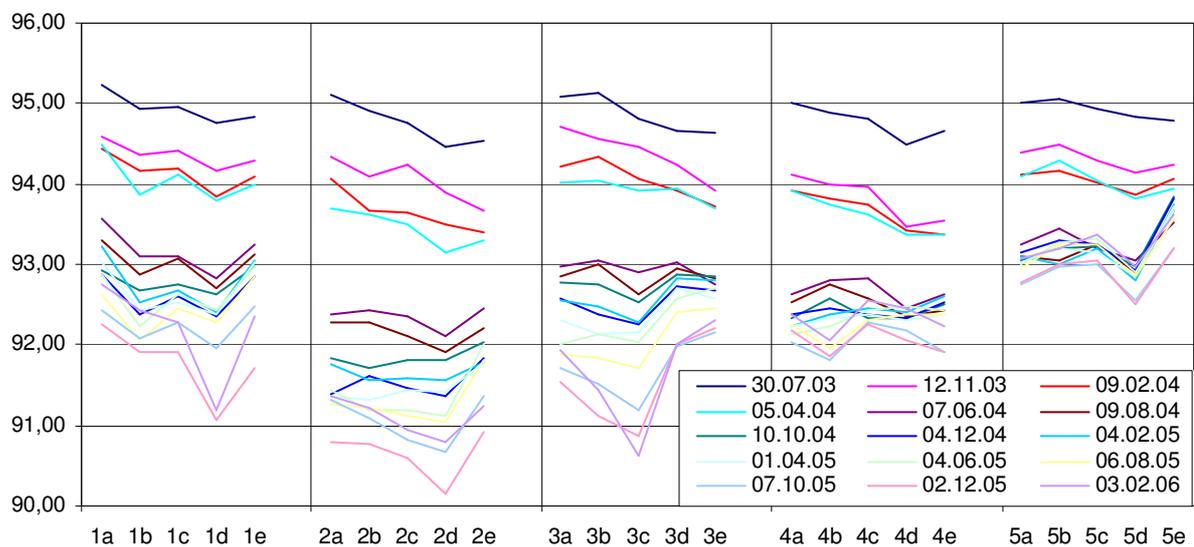


Abb. 39 : Grafische Darstellung der L\*-Werte Ernsthofen

In der graphischen Darstellung fällt auf, dass die Helligkeit in den ersten Monaten der Bewitterung sehr schnell abnimmt. Zwischen erster und zweiter sowie vierter und fünfter Messung ist jeweils ein Sprung feststellbar, der im ersten Fall die initiale Verschmutzung direkt nach Ausbringen der Platten auf den Bewitterungsstand und

im zweiten Fall den Beginn der ersten Vegetationsphase kennzeichnet. Im weiteren Verlauf wurden solch starke Veränderungen nicht mehr erreicht. Vor allem bei den beiden Dispersionen Mowilith DM 611 und LDM 7717 lagen die Werte sehr dicht beieinander. Den stärksten Verlust zeigte die Mowilith LDM 6119 während die LDM 7717 am wenigsten Einbußen aufweist. Insgesamt lagen alle Dispersionen immer über einem L\*-Wert von 90.

## Liederbach

Platte	Jul 03	Nov 03	Feb 04	Apr 04	Jun 04	Aug 04	Okt 04	Dez 04	Feb 05	Apr 05	Jun 05	Aug 05	Okt 05	Dez 05	Feb 06
1a	95,8	91,4	88,15	87,25	84,21	83,95	83,72	83,61	83,63	n.b.	82,93	82,02	81,46	81,42	83,33
1b	95,3	92,1	89,11	88,67	86,36	86,14	86,08	86,14	86,04	n.b.	86,83	86,77	87,14	86,63	87,23
1c	95,6	92,2	88,41	87,65	85,11	84,65	85,39	85,41	85,22	n.b.	85,23	85,67	86,27	86,34	87,44
1d	95,5	92,6	90,33	89,85	88,79	88,51	89,75	89,78	89,08	n.b.	90,01	89,76	89,90	88,00	88,97
1e	95,6	92,7	89,62	89,63	87,99	87,81	89,56	89,01	88,78	n.b.	89,04	89,05	88,26	87,90	88,68
2a	95,5	91,9	88,69	88,40	86,87	87,08	88,37	88,15	88,01	n.b.	88,56	88,92	88,61	87,76	87,77
2b	95,4	92,0	88,13	88,01	86,35	86,51	87,48	87,24	86,44	n.b.	87,10	87,44	87,02	86,75	86,68
2c	95,3	92,0	88,9	88,52	87,07	87,50	88,74	88,37	88,41	n.b.	88,94	89,09	89,28	88,78	88,58
2d	95,2	92,1	89,33	88,83	87,50	87,78	88,91	88,31	88,09	n.b.	88,72	89,18	89,11	87,56	88,12
2e	95,2	92,2	89,05	88,66	87,90	88,37	89,24	88,72	87,79	n.b.	88,99	88,01	89,04	87,75	87,57
3a	95,6	92,5	89,13	88,76	87,28	87,08	88,08	87,52	87,64	n.b.	87,56	87,71	88,24	87,49	87,32
3b	95,6	92,6	89,25	88,80	87,21	86,96	87,98	87,51	87,63	n.b.	87,45	88,18	88,29	87,8	87,51
3c	95,5	92,4	89,15	88,70	87,52	87,14	88,10	87,64	87,48	n.b.	88,03	88,68	88,69	87,83	87,40
3d	95,5	91,7	89,79	89,63	87,51	87,79	88,76	88,50	88,18	n.b.	88,42	88,84	88,95	88,36	87,98
3e	95,5	92,6	89,18	89,12	88,22	88,55	88,91	88,77	88,63	n.b.	88,97	89,43	89,17	88,38	87,49
4a	95,6	92,9	89,91	89,98	88,33	88,99	90,23	89,86	89,22	n.b.	90,04	90,48	89,87	89,32	89,41
4b	95,6	92,9	90,01	89,85	88,42	88,85	89,97	89,60	88,17	n.b.	89,67	90,01	88,91	88,09	88,49
4c	95,4	92,8	89,76	89,69	88,72	89,43	90,40	90,11	89,04	n.b.	90,37	90,55	89,72	89,66	89,68
4d	95,2	92,5	90,00	89,66	89,01	89,25	90,40	89,47	88,51	n.b.	89,48	89,71	88,85	87,34	87,32
4e	95,5	92,3	89,25	89,48	88,87	89,61	90,57	89,93	89,33	n.b.	90,21	90,50	89,9	89,37	89,36
5a	95,7	93,0	90,26	90,51	88,97	89,30	90,12	89,85	89,58	n.b.	90,36	90,53	90,04	89,77	89,66
5b	95,4	93,0	90,28	89,93	88,94	89,65	90,45	89,88	89,23	n.b.	90,19	90,10	89,99	89,36	89,50
5c	95,5	93,3	90,22	90,02	89,35	89,97	90,48	90,19	89,72	n.b.	90,93	90,86	90,69	89,45	89,13
5d	95,4	92,8	90,21	90,05	89,05	89,64	90,44	89,92	89,27	n.b.	90,03	90,14	89,93	89,00	88,82
5e	95,5	92,7	89,42	89,58	88,35	89,51	90,46	89,78	89,00	n.b.	89,92	90,02	89,64	88,97	88,81

**Fußnote** : Für April 2005 konnten für die Platten aus Liederbach unfallbedingt keine Werte gemessen werden.

Tab. 31 : L\*-Werte Liederbach

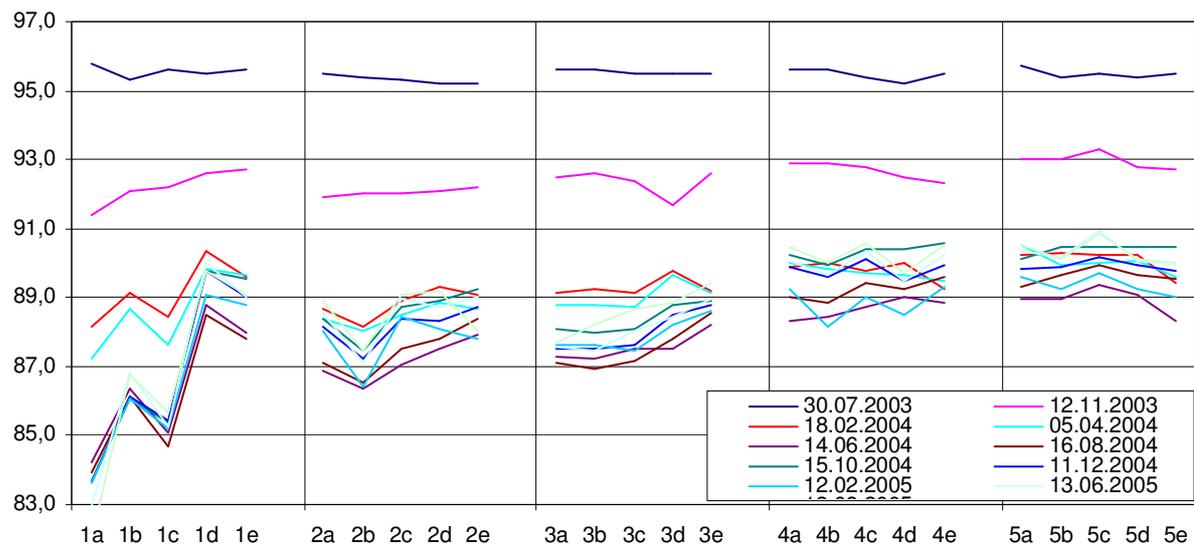


Abb. 40 : Grafische Darstellung der L\*-Werte Liederbach

Im Vergleich mit Ernsthofen verlieren die Platten in Liederbach noch schneller die ursprüngliche Helligkeit. Nach drei Messungen liegen die L\*-Werte bei allen Dispersionen schon unter 91 und auch die 90 wird nur von den Dispersionen Mowilith DM 611 und LDM 7717 sporadisch erreicht.

Insgesamt gesehen liegen die Werte ab der dritten Messung recht dicht beieinander, eine Ausnahme ist die LDM 1871, bei der zwei weitere Messungen zumindest bei den niedrigen PVK etwas weiteren Abstand haben. Den geringsten Verlust weist die LDM 7717 auf während die LDM 1871 die deutlich schlechtesten Werte hat.

An beiden Standorten ist nach dem initialen Verlust der Helligkeit eine Stagnation der Werte eingetreten, die durch Schwankungen des Verschmutzungsgrads der Platten im Laufe der Jahreszeiten ausgelöst wird. Die Erfahrungen aus anderen Bewitterungsversuchen haben gezeigt, dass eine weitere wesentliche Verschlechterung der L\*-Werte erst nach einer deutlich längeren Bewitterungsdauer erfolgt.

#### 4.7.2. Glanzgrad

Durch einen hohen Anteil an Dispersion kann sich an der Oberfläche einer Beschichtung ein geschlossener Bindemittelfilm ausbilden, in dem alle Pigment- und Füllstoffteilchen vollständig vom Bindemittel umschlossen werden. Je weniger

Bindemittel vorhanden ist, desto stärker liegen diese Teilchen frei, so dass daraus ein geringerer Glanzgrad resultiert.

Da der Glanz also zu einem großen Teil durch den Anteil an Dispersion in einer Beschichtung bestimmt wird, ist es nicht verwunderlich, dass sich die verwendeten fünf PVK deutlich im Glanz unterscheiden.

Je geringer die PVK, desto mehr Bindemittel ist in der Beschichtung enthalten, so dass bei PVK 45 naturgemäß der größte Glanz gemessen wurde. Die folgenden PVK Stufen fallen dementsprechend mit dem Glanz immer weiter ab. Während der Bewitterung änderte sich der Glanzgrad bei den meisten Platten nicht entscheidend. Bei einigen Platten mit Mowilith LDM 7729 stieg der Glanz, während bei der Mowilith LDM 1871 der Glanz etwas nachließ. Trotzdem zeigen die Werte, dass in der rel. kurzen Bewitterungsdauer noch kein wesentlicher Abbau der Dispersionen stattgefunden hat. Ein solcher Abbau würde zu einem Freiliegen der Pigment- und Füllstoffkörnchen führen, was den Glanzgrad deutlich reduzieren würde.

## Ernsthofen

Dispersion	Mowilith LDM 1871					Mowilith LDM 6119					Mowilith LDM 7719					Mowilith DM 611					Mowilith LDM 7717					
	PVK	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	v	5b	5c	5d	5e
Jul 03		1,9	1,4	1,2	1,1	1,1	1,9	1,5	1,3	0,9	0,9	1,8	1,5	1,2	1	0,9	1,6	1,2	1,1	0,6	0,9	1,8	1,5	1,1	1	1
Nov 03		1,7	1,4	1,2	1,1	0,9	1,8	1,4	1,2	1	0,9	1,7	1,5	1,2	1,1	0,9	1,5	1,2	1	0,9	0,9	1,7	1,4	1,2	1	0,9
Feb 04		1,8	1,6	1,2	1,1	1	1,8	1,5	1,3	1,1	1	1,8	1,6	1,2	1,1	1	1,5	1,2	1,1	0,9	0,9	1,8	1,5	1,2	1,1	1
Apr 04		1,7	1,6	1,3	1,1	1	1,8	1,5	1,3	1	0,9	1,8	1,5	1,2	1,2	1	1,4	1,1	1	0,9	0,9	1,7	1,4	1,2	1,1	1
Jun 04		1,7	1,6	1,3	1,1	1	1,9	1,6	1,4	1,1	1	1,9	1,7	1,4	1,2	1	1,4	1,2	1,1	0,9	0,9	1,7	1,5	1,2	1,1	1
Aug 04		1,6	1,5	1,3	1	0,9	1,8	1,6	1,3	1,1	1	1,9	1,6	1,4	1,2	1	1,4	1,2	1,1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,2	1,2	1
Okt 04		1,6	1,6	1,3	1,1	0,8	1,9	1,7	1,4	1,1	1	2	1,8	1,5	1,2	1,1	1,5	1,2	1,1	0,9	0,9	1,8	1,7	1,3	1,2	1
Dez 04		1,7	1,6	1,4	1,1	0,7	2	1,7	1,4	1,1	1	2,1	1,8	1,6	1,3	1,1	1,4	1,2	1,1	0,9	0,9	1,8	1,7	1,3	1,2	1
Feb 05		1,7	1,5	1,3	1,1	0,7	1,9	1,6	1,3	1,1	1	2,2	1,9	1,5	1,2	1,1	1,3	1,1	1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,2	1,2	0,9
Apr 05		1,8	1,7	1,4	1,2	0,8	1,9	1,7	1,4	1,1	1,3	1,9	1,6	1,6	1,3	1,1	1,4	1,2	1,1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,3	1,2	1
Jun 05		1,6	1,5	1,3	1,1	0,8	1,8	1,6	1,3	1,1	1	2	1,8	1,5	1,2	1,1	1,3	1,1	1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,3	1,2	0,9
Aug 05		1,7	1,5	1,3	1,1	0,7	1,8	1,6	1,3	1,1	1	2,1	1,7	1,5	1,2	1,1	1,3	1,1	1	0,9	0,9	1,6	1,5	1,3	1,1	0,9
Okt 05		1,6	1,5	1,3	1	0,7	1,7	1,6	1,3	1	1	2,1	1,9	1,5	1,2	1	1,2	1,1	1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,3	1,2	0,9
Dez 05		1,7	1,6	1,2	0,8	0,7	1,8	1,6	1,3	1,1	1	2,2	1,9	1,5	1,2	1,1	1,2	1,1	1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,3	1,1	0,9
Feb 06		1,6	1,6	1,2	0,8	0,6	1,8	1,6	1,3	1	1	2,3	1,8	1,4	1,1	1,1	1,2	1,1	1	0,9	0,9	1,7	1,6	1,3	1,2	0,9

Tab. 32 : Glanzgrade Ernsthofen

## Liederbach

Dispersion	Mowilith LDM 1871					Mowilith LDM 6119					Mowilith LDM 7719					Mowilith DM 611					Mowilith LDM 7717				
	PVK	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65	45	50	55	60
Jul 03	1,7	1,3	1,3	1,1	1	1,6	1,3	1,1	1	1	2,1	1,7	1,5	1,4	1	1,4	1,2	1	1	1	1,9	1,5	1,4	1,2	1
Nov 03	1,7	1,4	1,3	1,1	1	1,5	1,3	1	1,1	1	2,1	1,6	1,5	1,4	1,1	1,4	1,2	1	1,1	1	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1
Feb 04	1,7	1,4	1,3	1,1	1	1,5	1,3	1,1	1,1	1	2	1,7	1,5	1,4	1,1	1,4	1,2	1	1	1	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1
Apr 04	1,6	1,4	1,2	1,1	1	1,5	1,3	1,2	1	1	2	1,7	1,5	1,5	1,1	1,4	1,2	1	1	0,9	1,9	1,6	1,4	1,2	1
Jun 04	1,3	1,2	1,2	1,1	1	1,5	1,3	1,1	1	1	1,7	1,5	1,3	1,5	1	1,3	1,2	1	1,2	1	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1
Aug 04	1,4	1,4	1,2	1,2	1,1	1,6	1,3	1,1	1	1	1,9	1,6	1,4	1,7	1,1	1,1	1,3	1,1	1	1	2,1	1,6	1,5	1,2	1,1
Okt 04	1,3	1,3	1,2	1,2	1	1,8	1,3	1	1	1,1	2	1,7	1,3	1,6	1,2	1,4	1,3	1	1	1	2,1	1,6	1,7	1,3	1,1
Dez 04	1,5	1,4	1,2	1,4	1,1	1,4	1,3	1,1	1	1,2	2,1	1,7	1,4	1,7	1,3	1,4	1,4	1	1,1	1	2,1	1,7	1,6	1,2	1,2
Feb 05	1,7	1,6	1,4	1,5	1,1	1,7	1,4	1,3	1,2	1,3	2,4	2,1	1,6	1,8	1,3	1,7	1,5	1,2	1,1	1,1	2,4	1,8	2	1,3	1,3
Jun 05	1,5	1,5	1,2	1,6	1,2	2	1,3	1,1	1,1	1,3	2,2	1,9	1,5	1,6	1,2	1,6	1,4	1,1	1,1	1,1	2,3	1,7	1,8	1,2	1,1
Aug 05	1,6	1,7	1,3	1,7	1,2	2	1,3	1,1	1,1	1,3	2,4	2	1,5	1,7	1,2	1,7	1,3	1,1	1,1	1,1	2,3	1,7	1,8	1,3	1,2
Okt 05	1,5	1,6	1,2	1,6	1,1	2,3	1,2	1,1	1	1,2	2,2	1,8	1,5	1,7	1,2	1,5	1,2	1	1	1	2,2	1,6	1,7	1,3	1,2
Dez 05	1,8	1,8	1,3	1,7	1,3	2,5	1,4	1,2	1,2	1,3	2,7	2	1,6	1,8	1,4	1,7	1,3	1,1	1,2	1	2,4	1,7	1,8	1,4	1,2
Feb 06	2	2	1,4	1,6	1,4	2,4	1,6	1,4	1,2	1,3	2,8	2,2	1,7	1,9	1,4	1,7	1,5	1,2	1,4	1,2	2,5	1,9	2,1	1,4	1,3

Tab. 33 : Glanzgrade Liederbach

4.7.3. L\*-Wert Verlustraten

		Mowilith LDM 1871					Mowilith LDM 6119				
		PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65	PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65
Ernsthofen	Rate	-0,19%	-0,19%	-0,20%	-0,27%	-0,19%	-0,28%	-0,28%	-0,29%	-0,28%	-0,25%
	Verlust	-2,59%	-2,65%	-2,81%	-3,77%	-2,63%	-3,92%	-3,91%	-4,02%	-3,87%	-3,47%
Liederbach	Rate	-1,05%	-0,67%	-0,67%	-0,53%	-0,57%	-0,64%	-0,72%	-0,55%	-0,58%	-0,63%
	Verlust	-14,97%	-8,56%	-9,76%	-5,86%	-7,68%	-7,21%	-8,78%	-6,32%	-6,40%	-6,47%
		Mowilith LDM 7729					Mowilith DMM 611				
		PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65	PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65
Ernsthofen	Rate	-0,24%	-0,28%	-0,32%	-0,20%	-0,18%	-0,20%	-0,21%	-0,17%	-0,15%	-0,18%
	Verlust	-3,30%	-3,86%	-4,43%	-2,81%	-2,47%	-2,77%	-2,97%	-2,36%	-2,16%	-2,57%
Liederbach	Rate	-0,69%	-0,67%	-0,67%	-0,62%	-0,66%	-0,50%	-0,58%	-0,47%	-0,65%	-0,50%
	Verlust	-7,70%	-7,65%	-7,13%	-6,86%	-6,63%	-5,99%	-7,00%	-5,95%	-6,67%	-5,86%
		Mowilith LDM 7717									
		PVK 45	PVK 50	PVK 55	PVK 60	PVK 65					
Ernsthofen	Rate	-0,15%	-0,14%	-0,12%	-0,14%	-0,09%					
	Verlust	-2,04%	-1,95%	-1,65%	-1,97%	-1,21%					
Liederbach	Rate	-0,49%	-0,48%	-0,52%	-0,54%	-0,55%					
	Verlust	-5,91%	-5,67%	-5,04%	-5,73%	-6,14%					

Tab. 34: L\*-Wert Verlustraten Ernsthofen und Liederbach

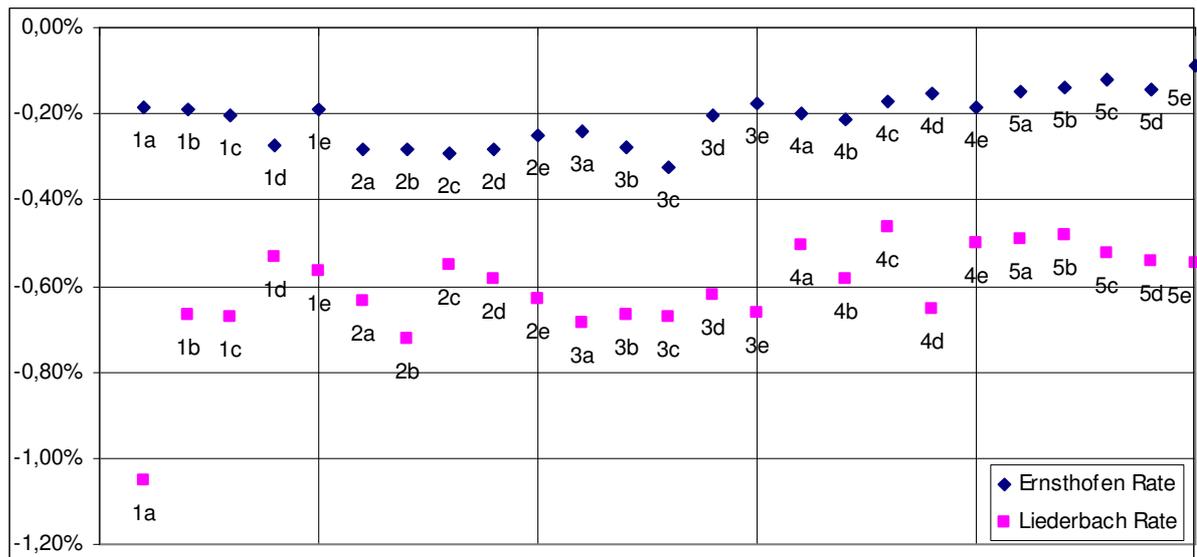


Abb. 41 : Grafische Darstellung der L\*-Wert-Verlustraten Ernsthofen und Liederbach

Alle Platten aus Liederbach zeigten höhere Verlustraten als ihre in Ernsthofen bewitterten Gegenstücke. Zudem streuen die Liederbach Werte stärker als die Ernsthofen Werte, vor allem bei der LDM 1871. Bei den Platten aus Ernsthofen weisen die DM 611 und die LDM 7717 die geringsten Verlustraten auf, während bei der LDM 6119 und LDM 7729 die L\*-Werte stärker abnehmen. Die LDM 1871 nimmt etwa einen Mittelplatz ein. Dieser Trend ist zwar undeutlicher, aber trotzdem auch in Liederbach erkennbar, allerdings weicht die LDM 1871 davon ab, da vor allem die PVK 45 eine sehr viel stärkere Verlustrate aufweist.

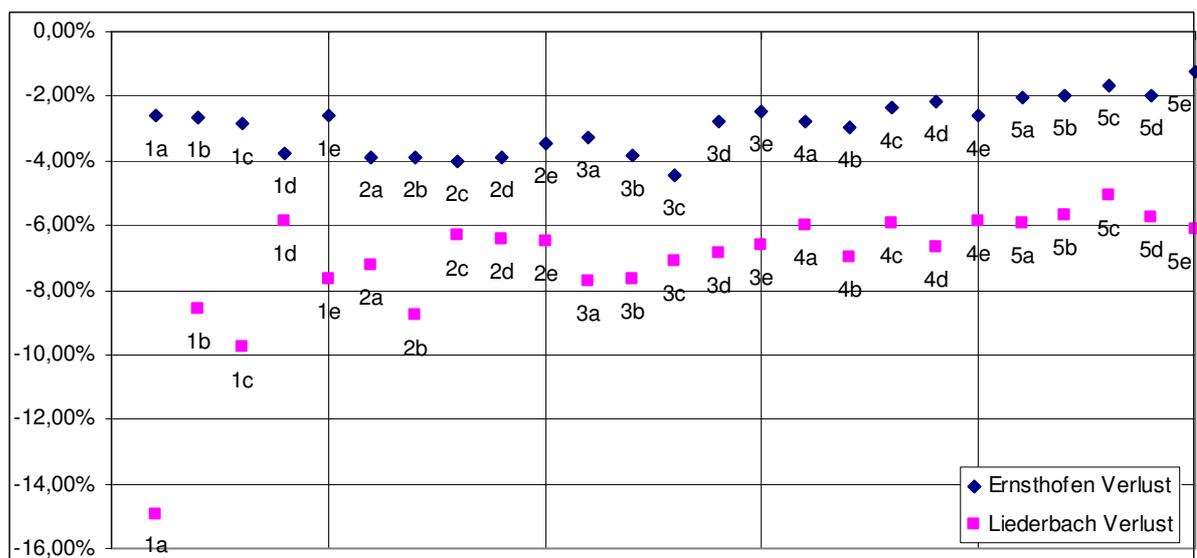


Abb. 42 : Grafische Darstellung des L\*-Wert-Gesamtverlusts Ernsthofen und Liederbach

Die Werte des Gesamtverlustes zeigen den gleichen Trend auf wie die der Verlustraten. Eine auf beiden Bewitterungsstandorten erkennbare Tendenz führt zu einem geringeren Gesamtverlust an Helligkeit mit steigender PVK.

Da bei niedrigeren PVK ein geschlossener Dispersionsfilm an der Oberfläche zustande kommt, schließt sich daraus zwangsläufig, dass das Bindemittel als eine Art Schmutzfänger dient was zu den z.T. beträchtlichen Einbußen an Helligkeit führte.

#### **4.8. Korrelation / Regression zwischen L\*-Wert und Pilzanzahl/cm<sup>2</sup>**

In nachfolgender Tabelle sind die für die Abschätzung des linearen Zusammenhangs zwischen der Anzahl der Pilze auf den jeweiligen Platten und ihrem L\*-Wert wichtigen Parameter angegeben.

Dabei steht  $r$  für den Korrelationskoeffizienten,  $r^2$  ist das Bestimmtheitsmaß,  $a$  steht für den Ordinatenabschnitt der Regressionsgeraden, während  $b$  die Steigung derselben darstellt. Die Regression von  $y$  auf  $x$  setzt die Fehlerfreiheit der Werte von  $x$  voraus. Da aber die Pilzanzahl naturgemäß fehlerbehaftet ist, muss bei der Bestimmung der beiden Geradenparameter eine Korrektur durchgeführt werden.  $a_{\text{korr}}$  und  $b_{\text{korr}}$  stellen deshalb die nach dem Bartlett Verfahren korrigierten Werte dar (Sachs 2003).

Die Signifikanz der Korrelationskoeffizienten wurde mittels Tabelle bestimmt. Wenn  $r$  den für den Freiheitsgrad  $n-2 = 10$  und die Irrtumswahrscheinlichkeit 5% im zweiseitigen Test tabellierten Wert von 0,576 erreicht oder überschreitet, liegt Signifikanz vor. Die nicht signifikanten  $r$  wurden in der Tabelle rot markiert.

Die Korrelationskoeffizienten liegen für die Platten aus Ernthofen deutlich höher als die für Liederbach. Auch die Signifikanz ist in Ernthofen höher. Daneben treten in Liederbach einige positive Korrelationen auf, was der Theorie widerspricht. Eigentlich sollten die L\*-Werte bei steigender Pilzanzahl fallen, bei Platten der 1871 oder 7729 war dies nicht der Fall.

Die Steigung der Regressionsgeraden  $b$  gibt an, wie stark sich die Helligkeit verändert, wenn die Pilzanzahl um eine Einheit, d.h. um eine Kolonie/cm<sup>2</sup>, steigt. In Ernthofen zeigen die Dispersionen einen Trend zu steigender Helligkeitsabnahme bei steigender PVK, besonders, wenn die korrigierten  $b$  betrachtet werden. In Liederbach ist dies nicht zu erkennen, da hier die Schwankungen zu groß sind.

PVK	Ernsthofen						Liederbach						
	r	r <sup>2</sup>	a	b	a <sub>korrr</sub>	b <sub>korrr</sub>	r	r <sup>2</sup>	a	b	a <sub>korrr</sub>	b <sub>korrr</sub>	
Mowliith LDM 1871	45	-0,702	0,493	93,692	-0,018	93,943	-0,026	<b>-0,470</b>	0,221	85,284	-0,007	88,300	-0,020
	50	-0,803	0,645	93,629	-0,014	94,367	-0,025	<b>0,025</b>	0,001	86,891	0,000	88,406	-0,010
	55	-0,705	0,497	93,760	-0,010	94,719	-0,021	<b>0,210</b>	0,044	85,751	0,001	86,084	0,000
	60	-0,788	0,621	93,511	-0,011	94,159	-0,018	-0,586	0,343	90,077	-0,005	90,059	-0,005
	65	-0,753	0,566	93,835	-0,003	94,151	-0,004	<b>-0,448</b>	0,200	89,133	-0,001	88,987	0,000
Mowliith LDM 6119	45	<b>-0,565</b>	0,319	92,350	-0,032	92,683	-0,060	-0,688	0,473	88,950	-0,008	91,669	-0,033
	50	<b>-0,557</b>	0,310	92,248	-0,038	92,677	-0,081	-0,671	0,450	87,801	-0,007	84,934	0,021
	55	-0,679	0,461	92,296	-0,030	92,642	-0,050	<b>-0,338</b>	0,115	89,224	-0,003	64,947	0,109
	60	-0,741	0,548	92,151	-0,038	92,376	-0,053	<b>-0,115</b>	0,013	88,661	-0,001	87,940	0,002
	65	-0,813	0,661	92,700	-0,032	92,886	-0,041	<b>-0,159</b>	0,025	88,652	-0,002	87,665	0,007
Mowliith LDM 7729	45	-0,672	0,452	93,000	-0,039	93,286	-0,065	<b>0,322</b>	0,104	87,398	0,003	86,804	0,007
	50	-0,802	0,644	93,110	-0,066	93,325	-0,090	<b>-0,122</b>	0,015	88,004	-0,001	88,097	-0,001
	55	-0,885	0,784	93,073	-0,073	93,243	-0,088	<b>-0,313</b>	0,098	88,316	-0,002	87,989	0,000
	60	-0,863	0,746	93,433	-0,055	93,461	-0,057	-0,750	0,563	89,684	-0,006	89,091	-0,003
	65	-0,805	0,649	93,305	-0,025	93,371	-0,028	<b>0,220</b>	0,048	88,588	0,007	89,533	-0,038
Mowliith DM 611	45	<b>-0,482</b>	0,232	92,852	-0,101	93,150	-0,210	<b>-0,245</b>	0,060	89,756	0,000	89,326	0,001
	50	-0,710	0,505	92,978	-0,035	93,195	-0,052	<b>0,276</b>	0,076	89,040	0,012	88,786	0,034
	55	<b>-0,481</b>	0,232	92,866	-0,032	93,054	-0,059	<b>-0,022</b>	0,000	89,765	0,000	89,942	-0,007
	60	<b>-0,450</b>	0,203	92,673	-0,021	92,762	-0,033	-0,760	0,578	89,747	-0,006	89,654	-0,005
	65	-0,779	0,607	92,995	-0,029	93,227	-0,044	<b>-0,232</b>	0,054	89,787	-0,004	90,235	-0,025
Mowliith LDM 7717	45	-0,657	0,432	93,657	-0,019	93,890	-0,028	<b>-0,321</b>	0,103	90,088	-0,001	89,338	0,002
	50	-0,620	0,384	93,696	-0,014	93,777	-0,017	<b>-0,375</b>	0,141	89,943	-0,001	89,763	0,000
	55	<b>-0,500</b>	0,250	93,555	-0,005	93,665	-0,008	-0,660	0,436	90,609	-0,003	89,858	0,001
	60	-0,633	0,401	93,560	-0,013	94,425	-0,033	-0,764	0,584	90,321	-0,003	90,015	-0,002
	65	-0,733	0,538	93,868	-0,003	93,854	-0,002	-0,608	0,370	90,146	-0,002	89,089	0,001

Tab. 35 : Korrelations- und Regressionswerte L\*-Werte und Pilzanzahl/cm<sup>2</sup> Ernsthofen und Liederbach

Zusammenfassend lässt sich in Ernsthofen sehr viel eher ein linearer Zusammenhang zwischen Pilzanzahl und L\*-Wert erkennen, als dies in Liederbach der Fall ist. Alle ermittelten Werte deuten auf weitere Einflussgrößen in Liederbach hin, die zusätzlich einwirken. Einer dieser Parameter ist mit Sicherheit der Winkel, in dem die Platten ausgerichtet wurden.

#### 4.9. Wasserhaushalt der Beschichtungen

Sd-Werte

Die Tabelle stellt die nach DIN EN ISO 12572 ermittelten Werte für die mit der jeweiligen Dispersion und PVK hergestellten Beschichtung dar.

[m]	LDM 1871	LDM 6119	LDM 7729	DM 611	LDM 7717
<b>PVK 45</b>	0,43	0,79	0,73	0,72	1,02
<b>PVK 50</b>	0,46	0,86	0,69	0,70	0,98
<b>PVK 55</b>	0,43	0,78	0,63	0,64	0,87
<b>PVK 60</b>	0,39	0,68	0,67	0,59	0,70
<b>PVK 65</b>	0,23	0,55	0,53	0,50	0,53

*Klasse V1 (hoch) < 0,14 m*

*Klasse V2 (mittel) 0,14 – 1,4*

*Klasse V3 (niedrig) ≥ 1,4*

Tab. 36 : Sd-Werte der Testbeschichtungen

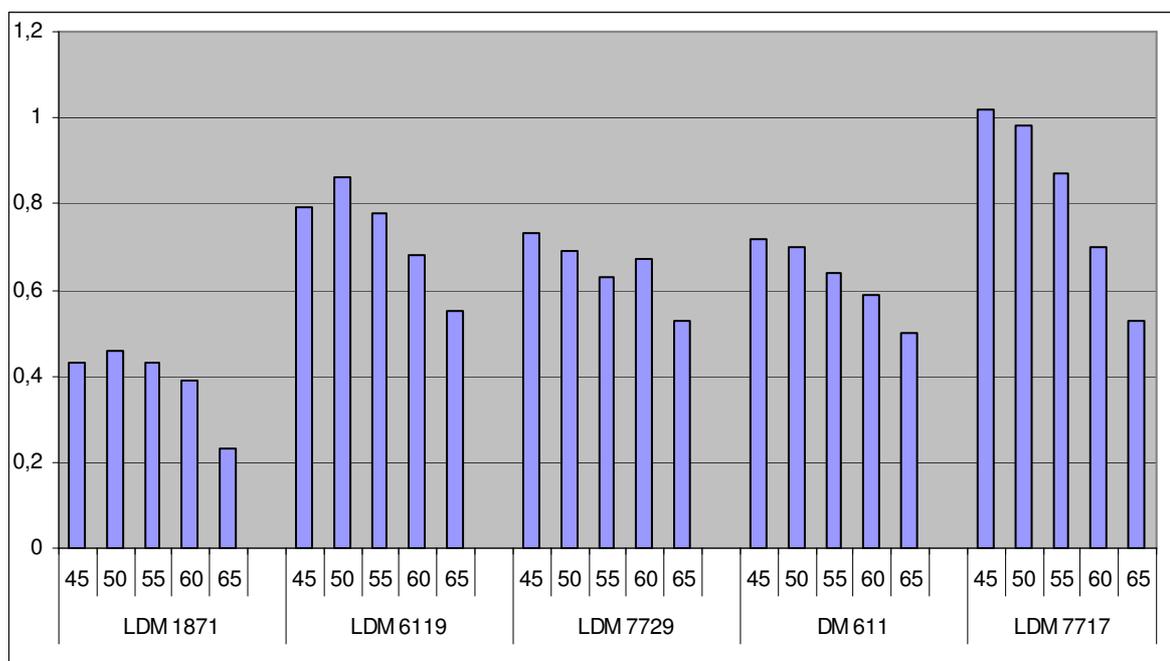


Abb. 43 : Grafische Darstellung der sd-Werte der Testbeschichtungen

Entsprechend der Einteilung der Diffusionsfähigkeit einer Beschichtung in EN 1062-1 weisen alle im Test verwendeten Varianten eine mittlere Diffusionsfähigkeit auf. In der Theorie sollte eine dispersionsarme Beschichtung (also mit hoher PVK) eingedrungenes Wasser wieder schneller abgeben können, da der Film weniger dicht ist als bei Beschichtungen mit höherem Dispersionsanteil. Die für diese Testreihe verwendeten Farben zeigen genau dieses Verhalten. Bei jeder Dispersion fällt der sd-Wert mit der PVK. Die Werte für Mowilith LDM 6119, LDM 7729 und DM

611 liegen recht dicht beieinander, während die LDM 1871 deutlich niedrigere Werte aufweist. Die LDM 7717 zeigt ein stärkeres Gefälle zwischen PVK 45 und 65.

### W-Werte

Die beiden nachfolgenden Tabelle stellen die für die einzelnen Varianten nach DIN EN ISO 7783-2 ermittelten w-Werte dar, einmal vor einer 72 h Bewässerung und dann nach einer solchen Behandlung.

	LDM 1871		LDM 6119		LDM 7729		DM 611		LDM 7717	
Konditionierung	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
<b>PVK 45</b>	0,11	0,02	0,06	0,05	0,04	0,02	0,10	0,10	0,05	0,01
<b>PVK 50</b>	0,18	0,14	0,09	0,08	0,08	0,07	0,12	0,13	0,04	0,02
<b>PVK 55</b>	0,16	0,09	0,13	0,17	0,07	0,07	0,16	0,18	0,07	0,06
<b>PVK 60</b>	0,18	0,17	0,14	0,17	0,12	0,11	0,21	0,26	0,11	0,13
<b>PVK 65</b>	0,17	0,11	0,16	0,21	0,14	0,12	0,24	0,26	0,11	0,09

Klasse w1 (hoch)  $> 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Klasse w2 (mittel)  $0,1 - 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Klasse w3 (niedrig)  $< 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Tab. 37 : w-Werte der Testbeschichtungen

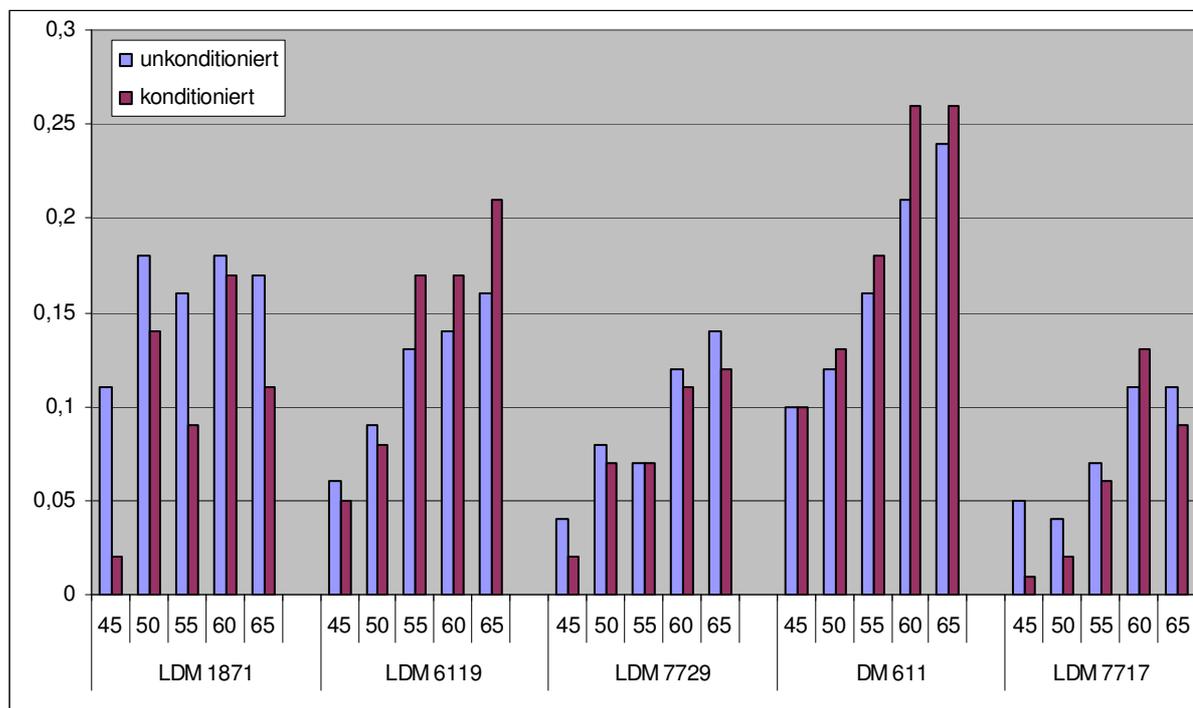


Abb. 44 : Grafische Darstellung der w-Werte der Testbeschichtungen

Die Wasserdurchlässigkeit der einzelnen Varianten verhält sich entsprechend der jeweiligen PVK. Bei niedrigen PVK, d.h. viel Bindemittel, sind die Werte niedriger, die Beschichtung nimmt demnach weniger Wasser auf. Hier werden z.T. Werte

erreicht, die nach DIN EN 1062-1 in Klasse w2 mittlerer Wasseraufnahme eingeordnet werden können. Die meisten Varianten liegen aber in Klasse w3, d.h. niedrige Wasseraufnahme. Nach Konditionierung fallen die Werte bei der LDM 1871 stärker ab, was mit einer Auswaschung von hydrophilen Substanzen zusammenhängt, die zu der größeren Wasseraufnahme geführt haben. Die anderen verändern sich nur marginal. Eine Korrelationsbetrachtung zwischen den AUC-Werten aus Ernsthofen und den Parametern des Wasserhaushalts zeigt eine größere Abhängigkeit vom sd-Wert.

Korrelation AUC mit	LDM 1871	LDM 6119	LDM 7729	DM 611	LDM 7717
<b>sd-Werte</b>	-0,9497	-0,8760	-0,9038	-0,6661	-0,9421
<b>w-Werte</b>	0,1852	0,9116	0,7217	0,5411	0,5936

Tab. 38 : Korrelation zwischen AUC Ernsthofen und sd- bzw. w-Werten der Beschichtungen

#### Wasseraufnahme der freien Dispersionsfilme

Die Bestimmung der Wasseraufnahme der Dispersionen ergab folgende Werte.

Dispersion	1. Wasseraufnahme	2. Wasseraufnahme
Mowilith LDM 1871	44%	22%
Mowilith LDM 6119	6%	5%
Mowilith LDM 7729	6%	5%
Mowilith DM 611	7%	5%
Mowilith LDM 7717	9%	8%

Tab. 39 : Wasseraufnahme der freien Dispersionsfilme

#### 4.10. ASTM und ISO Bewertungen

Die Beschichtungsoberflächen wurden entsprechend der in den Normen festgelegten Bewertungskriterien beurteilt. Aufgrund der Struktur der Werte der ISO Norm konnten nur die ASTM Werte grafisch dargestellt werden. Nachfolgend werden die ASTM- und ISO- Werte für die Standorte und Dispersionen einzeln kurz besprochen.

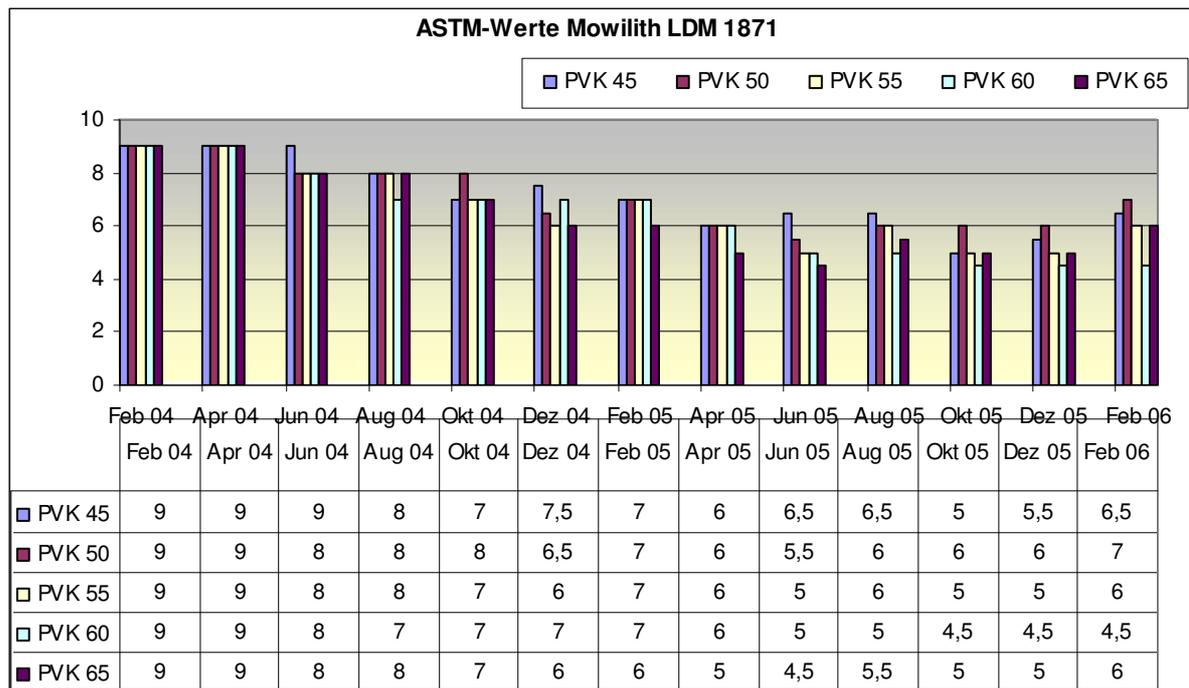
4.10.1. Ernsthofen ASTM Bewertungen

Abb. 45 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 1871 Ernsthofen

Die Bewertungen für die LDM 1871 fallen relativ kontinuierlich, die tiefsten Werte werden nach ca. 2 Jahren Bewitterung im Oktober 05 erreicht. Die Streuung der PVK untereinander ist relativ schwach ausgeprägt, steigt aber im Verlauf der Bewitterung an. Die einzelnen PVK schwanken im Verlauf wenig, große Bewertungssprünge sind nicht vorhanden.

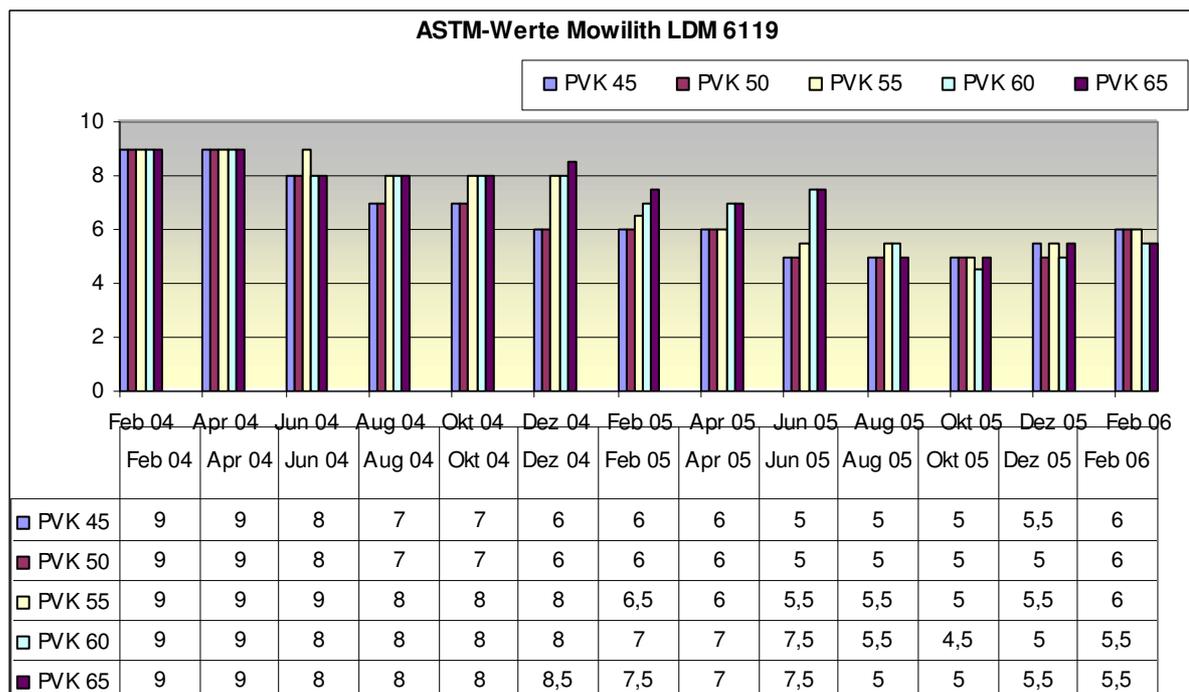


Abb. 46 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 6119 Ernsthofen

Auch die LDM 6119 Bewertungen fallen bis zu einem Tiefpunkt im Oktober 05. Die Streuung ist im Bereich Dezember 04 bis Juni 05 deutlich ausgeprägt, verringert sich jedoch bis Ende der Bewitterung wieder. Die PVK 65 zeigt stärkere Schwankungen und Bewertungssprünge, die anderen variieren hier weniger.

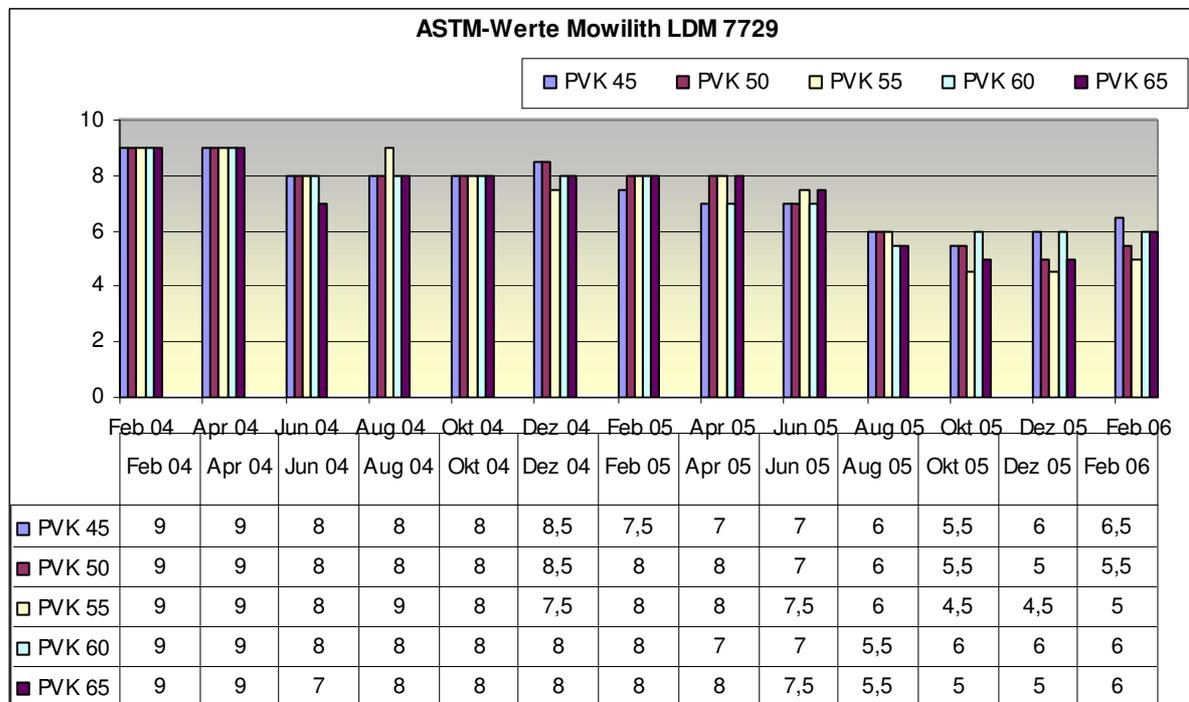


Abb. 47 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7729 Ernsthofen

Auch die LDM 7729 zeigt die geringsten Werte im Oktober 05, allerdings fallen die Bewertungen nicht so kontinuierlich wie bei den beiden vorhergehenden. Bis April 05 bleiben die Werte auf ziemlich gleichem Niveau, um dann stärker abzufallen. Die Streuung der PVK ist gering, wird aber gegen Ende der Bewitterung stärker. Die Schwankungen sind bis auf den stärkeren Verlust im August 05 (vor allem PVK 60 und 65) eher gering.

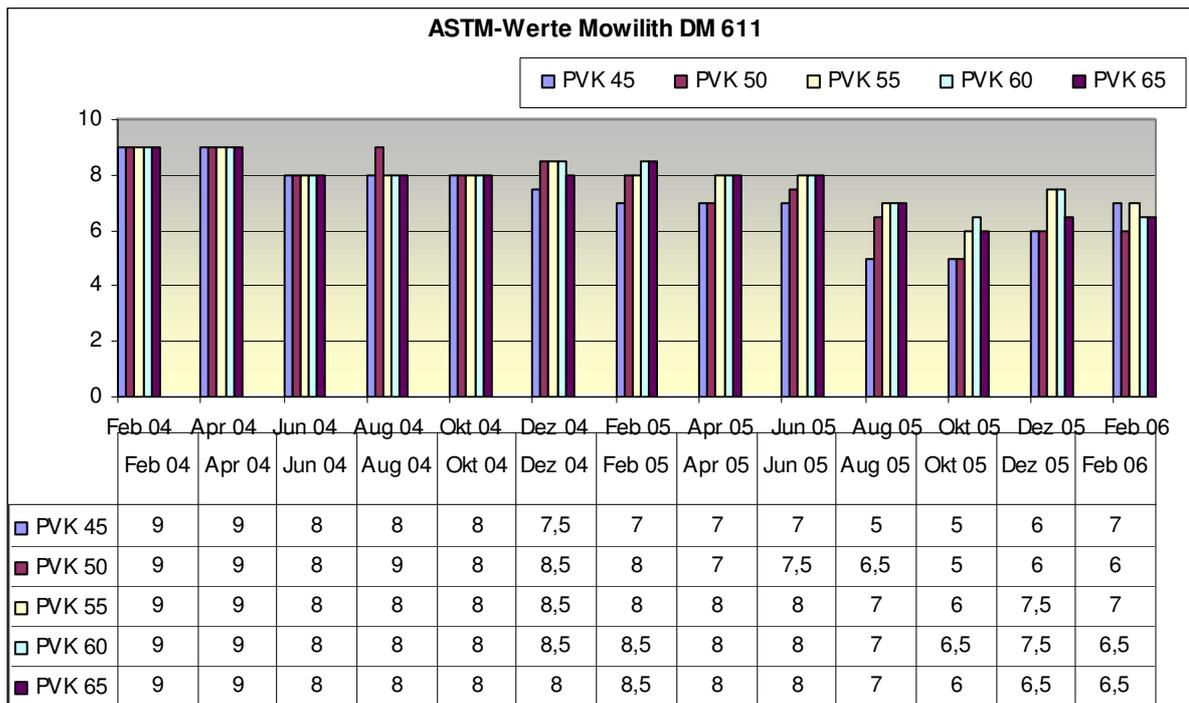


Abb. 48 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith DM 611 Ernsthofen

Ähnlich der 7729 bleiben auch die Bewertungen der DM 611 länger auf hohem Niveau, um dann ebenfalls im Oktober 05 die niedrigsten Werte zu erreichen. Die Streuung der PVK ist relativ stark und nimmt im Verlauf der Bewitterung zu. Die Schwankungen sind eher gering.

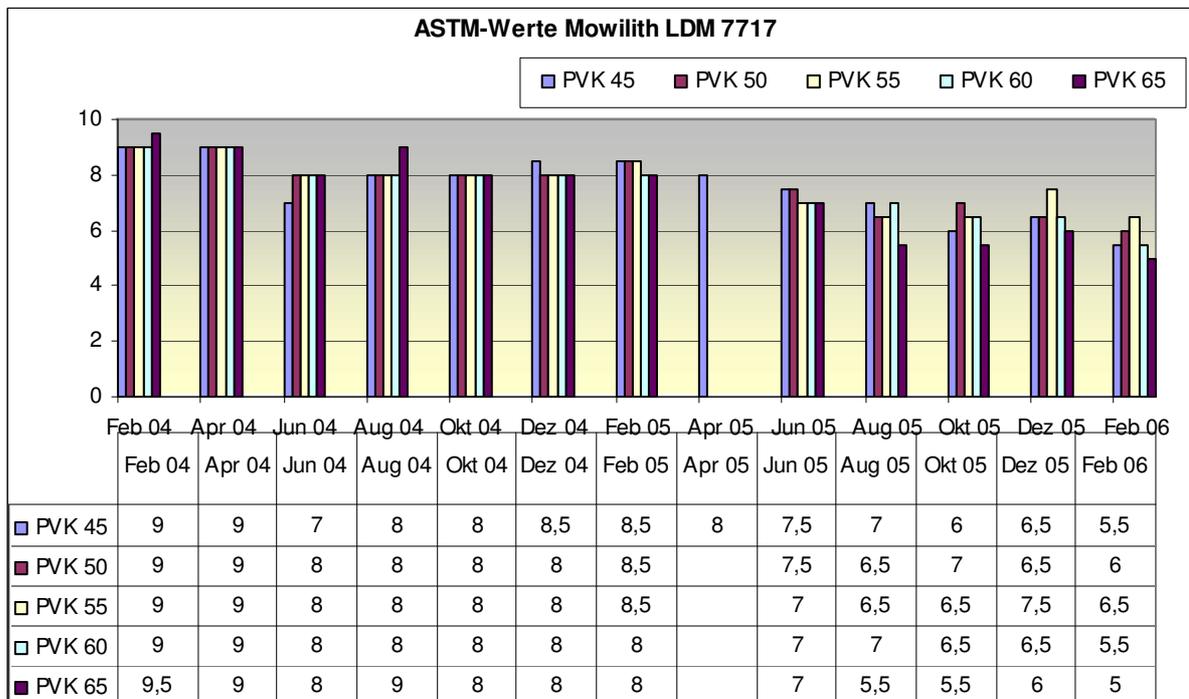


Abb. 49 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7717 Ernsthofen

Die Bewertungen der LDM 7717 zeigen in etwa den gleichen Verlauf wie die der beiden vorhergehenden. Ein relativ gleichmäßiger Verlauf mit einem Geringerwerden im Herbst 05, allerdings werden hier die geringsten Werte erst im Februar 06 erreicht. Die Streuung wird wie bei den anderen im Verlauf stärker, die Schwankungen sind gering.

#### 4.10.2. Ernsthofen ISO Bewertungen

Disp	PVK	Feb 04	Apr 04	Jun 04	Aug 04	Okt 04	Dez 04	Feb 05	Apr 05	Jun 05	Aug 05	Okt 05	Dez 05	Feb 06
Mowilith LDM 1871	45	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)
	50	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)
	55	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S3)	4(S2)	5(S2)
	65	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	4-5(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
Mowilith LDM 6119	45	3(S2)	3(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
	50	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
	55	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
	65	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
Mowilith LDM 7729	45	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)
	50	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)
	55	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	5(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)
	65	3(S2)	3(S2)	3(S2)	2-3(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)
Mowilith DM 611	45	2-3(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	2(S2)
	50	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)
	55	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)
	65	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)
Mowilith LDM 7717	45	2(S2)	2(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)
	50	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	n.a.	2(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)
	55	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	n.a.	2(S2)	2(S2)	3(S2)	2(S2)	3(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	n.a.	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)
	65	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	n.a.	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)

Tab. 40 : ISO Bewertungen Ernsthofen

Die ISO Bewertungen zeigen naturgemäß die gleiche Tendenz wie die mit ASTM, allerdings ist die „Auflösung“ geringer, da weniger Stufen in einer Größenklasse vorhanden sind. In Ernsthofen wurden nur Bewertungen der Klasse S2, also der geringsten Größe, vergeben. Dies bedeutet, dass die Kontaminationen (Kolonien oder Schmutzflecken) über die gesamte Bewitterungsdauer kleinflächig blieben und sich nur die Menge änderte. Dies spiegelt sich in der Spannweite von 2 (sehr gering) bis 5 (sehr viel) wider. Aufgrund der nur 5 Stufen sind Streuungen und Schwankungen der Einzelbewertungen gering, manche PVK änderte sich während

der kompletten Bewitterung nur um eine Stufe (z.B. DM 611 PVK 65). Der bei den ASTM Bewertungen erkennbare Umschwung im Winter 05-06 ist auch hier vorhanden, allerdings weniger deutlich. Die schlechtesten Bewertungen wurden sowohl im Oktober 05 als auch im Februar 06 gegeben, mit einer leichten Verbesserung im Dezember 05.

#### 4.10.3. Liederbach ASTM Bewertungen

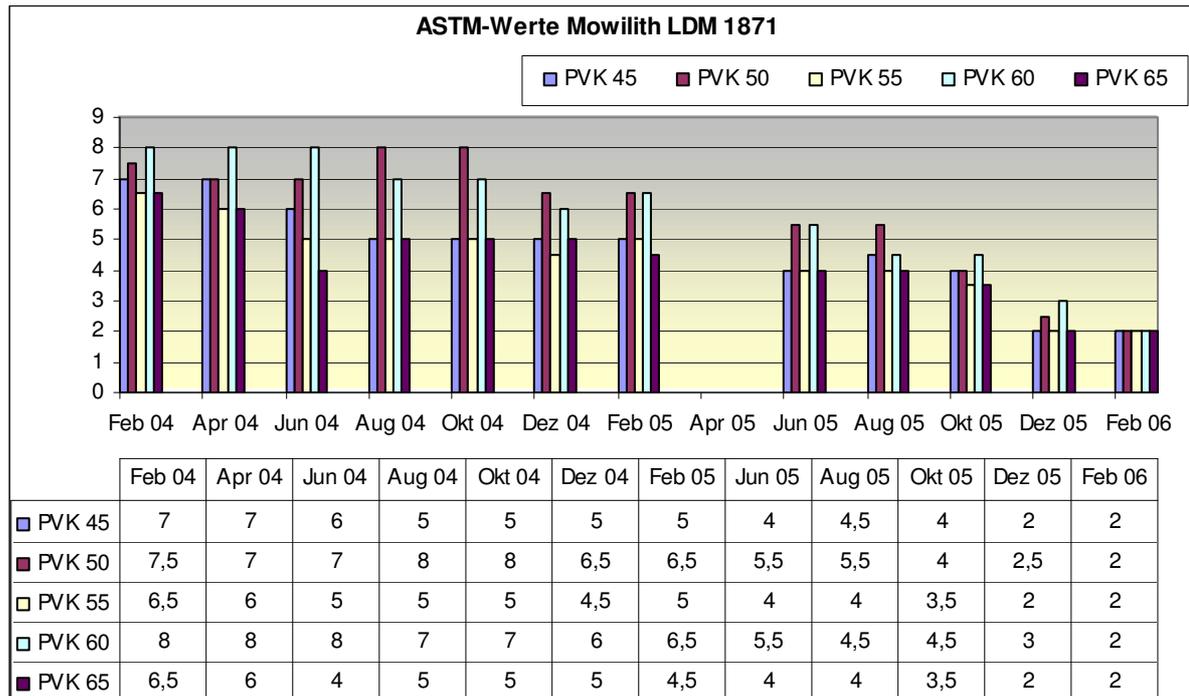


Abb. 50: Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7717 Liederbach

Ähnlich wie bei den Platten aus Ersthofen zeigen auch die in Liederbach bewitterten Beschichtungen eine mehr oder weniger kontinuierliche Zunahme der Auflage von Schmutz und Bewuchs im Laufe der Zeit. Bei der LDM 1871 werden die niedrigsten Werte am Ende der Bewitterung erreicht. Die Streuung der einzelnen PVK ist stark ausgeprägt, erst ab August 05 gleichen sie sich wieder an. Die Schwankungen der einzelnen PVK sind weniger stark, eine stärkere Zunahme der Verschmutzung ist zum Dezember 05 erkennbar.

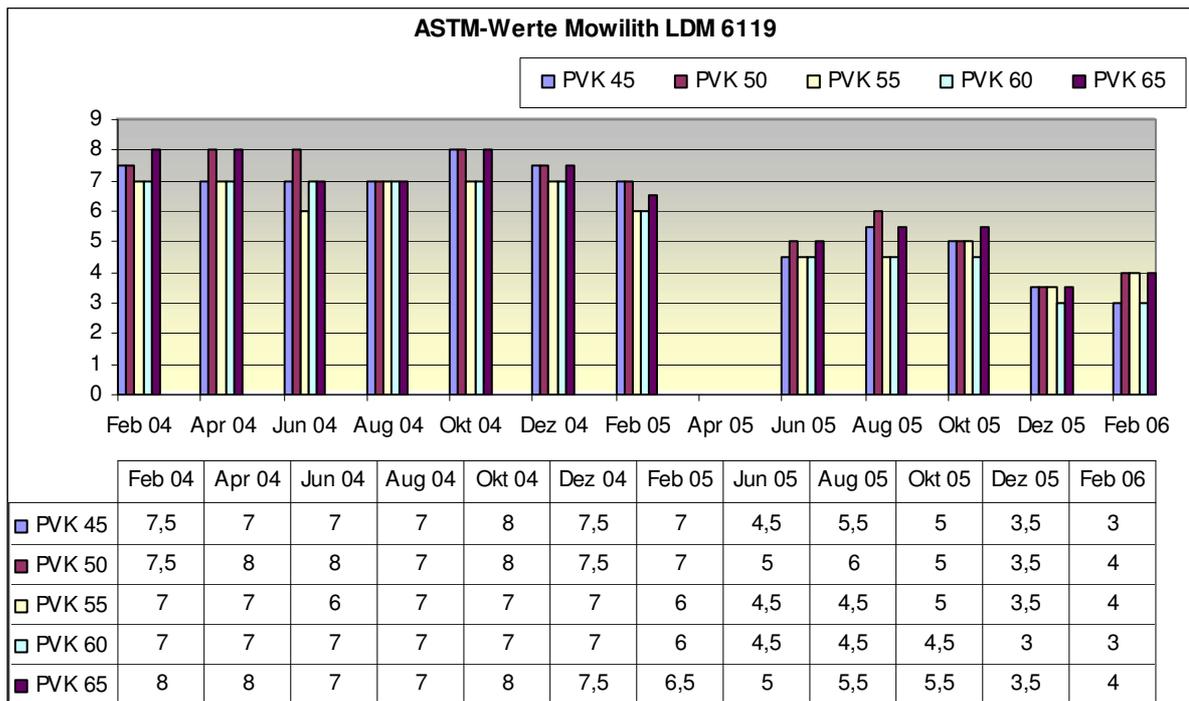


Abb. 51 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 6119 Liederbach

Die LDM 6619 zeigt ebenfalls einen recht gleichmäßigen Verschmutzungszuwachs, der im Dezember 05 am stärksten war. Die Streuung der PVK ist deutlich weniger stark als bei der 1871 und auch die Schwankungen sind gering. Auffällig ist eine Verminderung der Verschmutzung in den Spätsommer- bzw. Herbstmonaten Oktober 04 bzw. August – Oktober 05.

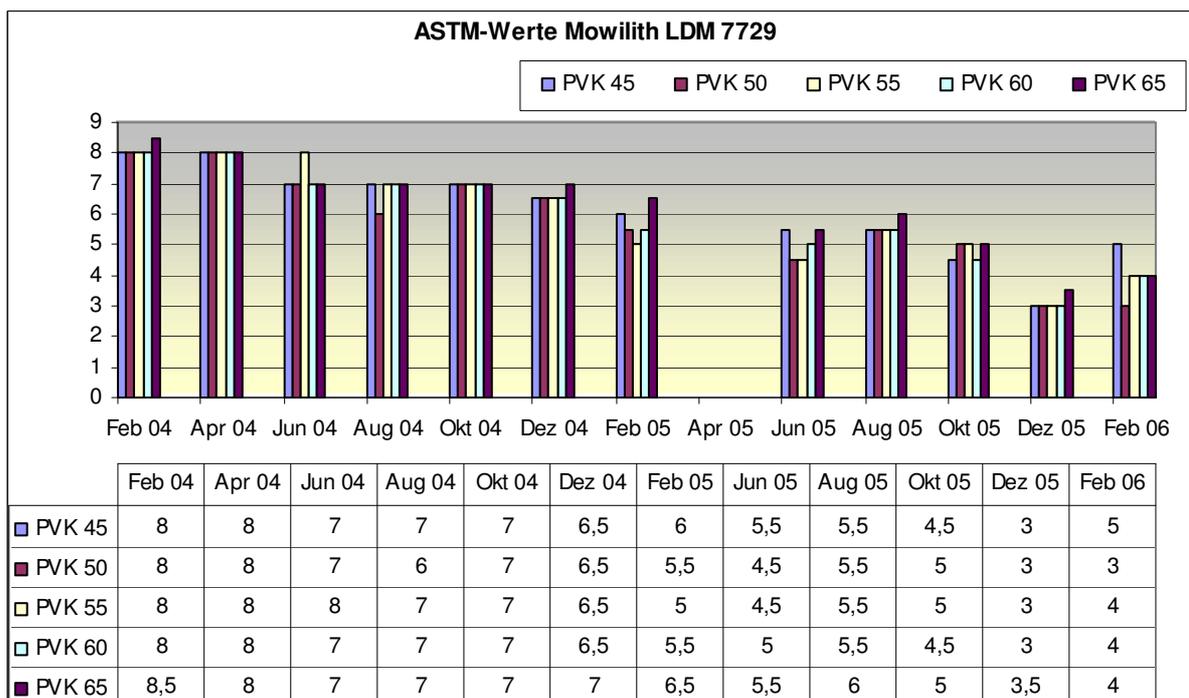


Abb. 52 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7729 Liederbach

Der kontinuierliche Verschmutzungszuwachs ist auch bei der LDM 7729 erkennbar, mit dem Tiefpunkt im Dezember 05. Die Streuung der PVK ist gering, ebenso wie die Schwankungen der einzelnen PVK. Eine Verringerung der Verschmutzung zeigt sich nur von Dezember 05 zu Februar 06.

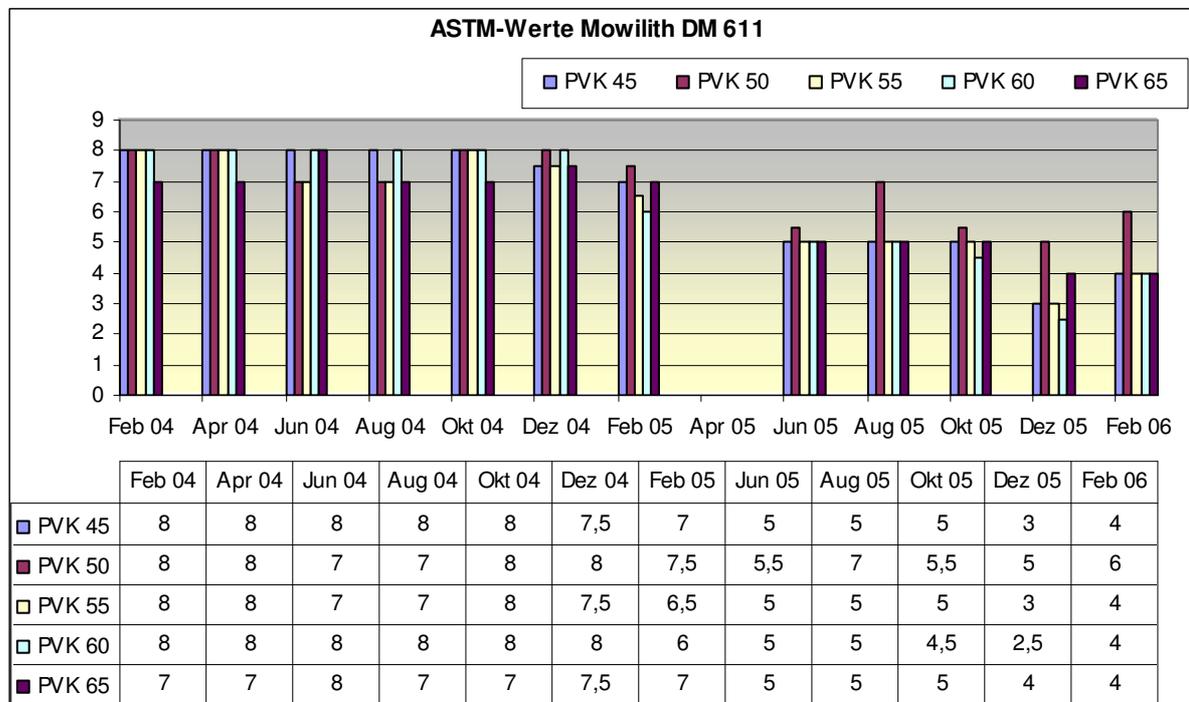


Abb. 53 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith DM 611 Liederbach

Die Werte für die DM 611 bleiben lange auf hohem Niveau, was eine entsprechende Sauberkeit widerspiegelt. Erst ab Februar 05 gehen die Werte gleichmäßig zurück. Ab dann wird auch die Streuung größer, vor allem im Hinblick auf die PVK 50. Die Schwankungen bleiben gering, die stärkste Verschmutzung wird im Dezember 05 erreicht.

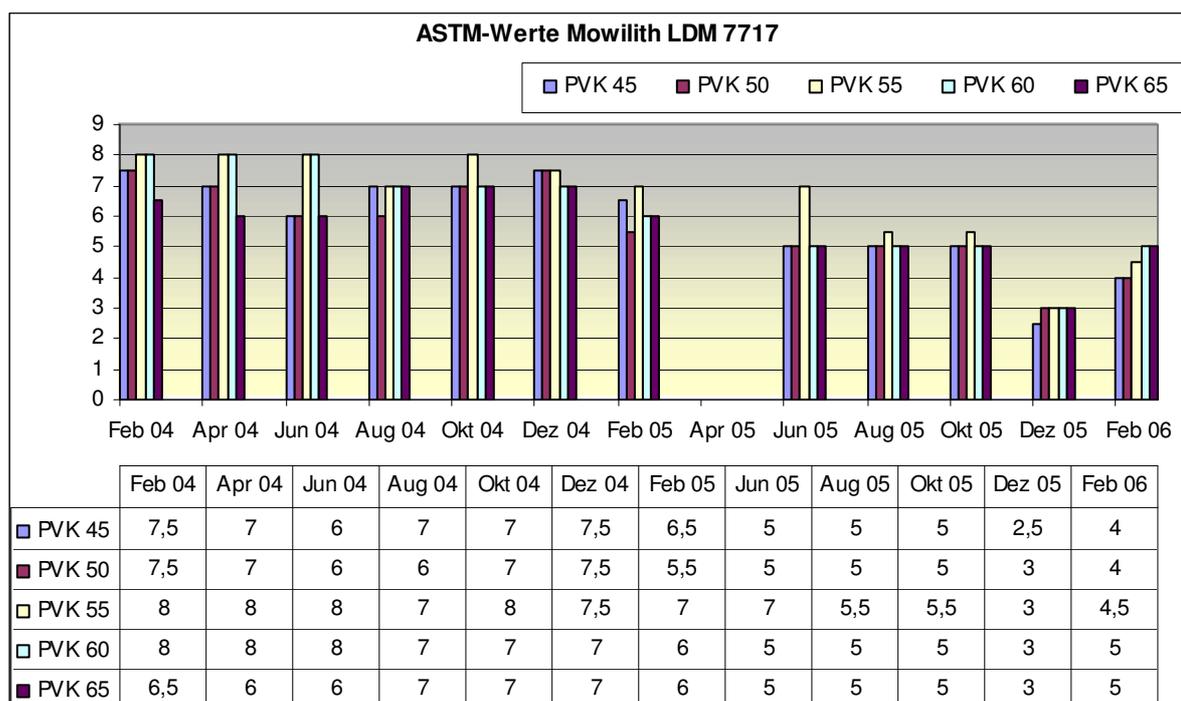


Abb. 54 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7717 Liederbach

Bei der LDM 7717 bleiben die PVK 55 und 60 bis Februar 05 relativ sauber, die anderen fallen erst ab, erholen sich aber dann wieder. Ab Februar 05 gehen die Werte zurück, im Dezember 05 wird die stärkste Verschmutzung erreicht. Die Streuung liegt im normalen Bereich, gegen Ende der Bewitterung wird sie nochmals etwas geringer.

#### 4.10.4. Liederbach ISO Bewertungen

Wie für die Platten aus Ernsthofen ist auch hier die Tendenz der ISO Bewertungen die gleiche wie die ASTM Bewertung. Allerdings bewegten sich die Verunreinigungen auf den Platten in Liederbach in zwei Größenklassen. Neben der Klasse S2 (geringste Größe) wurden auch Bewertungen der Klasse S3 (mittlere Größe) vergeben, d.h. manche der Verunreinigungen waren deutlich größer. Diese Größen variierten bei einigen Dispersionen, so dass in nachfolgenden Bewertungen von S3 wieder auf S2 reduziert werden musste. Hatte bei der LDM 1871 allerdings eine Bewertung einmal die S3 erreicht, behielten die Platten diese Größenklasse bei. Dies war ab Winter 04-05 der Fall. Die schlechteste Bewertung wurde hier im Februar 06 vergeben, während bei der ASTM Bewertung einige schon im Dezember 05 am schlechtesten lagen.

Disp	PVK	Feb 04	Apr 04	Jun 04	Aug 04	Okt 04	Dez 04	Feb 05	Jun 05	Aug 05	Okt 05	Dez 05	Feb 06
Mowiith LDM 1871	45	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S3)	4(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)
	50	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S3)	5(S3)	5(S3)
	55	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S3)	4(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)
	60	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S3)	4(S3)	5(S3)
	65	4(S2)	4(S2)	4(S3)	3(S3)	3(S3)	4(S3)	4(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)	5(S3)
Mowiith LDM 6119	45	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S3)	5(S2)
	50	3(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S3)	4(S3)
	55	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	5(S2)	5(S2)	3(S3)	5(S2)
	60	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S3)	5(S2)	4(S3)	5(S3)
	65	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S3)	5(S2)
Mowiith LDM 7729	45	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S3)	4(S2)
	50	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S3)	5(S2)
	55	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S3)	4(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S3)	5(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	5(S2)	4(S3)	5(S2)
	65	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S3)	4(S3)
Mowiith DM 611	45	2-3(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	5(S2)
	50	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)
	55	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	5(S2)
	60	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	2(S2)	4(S3)	4(S2)	4(S2)	5(S2)	4(S3)	4(S3)
	65	3(S2)	3(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S2)	3(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	5(S2)
Mowiith LDM 7717	45	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	4(S2)	5(S2)
	50	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S2)	2(S2)	4(S3)	4(S2)	4(S2)	5(S2)	4(S2)	5(S2)
	55	3(S2)	3(S2)	2(S2)	3(S2)	2(S2)	2(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S2)	3(S3)	5(S2)
	60	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S3)	4(S2)	4(S2)	5(S2)	3(S3)	4(S2)
	65	4(S2)	4(S2)	4(S2)	3(S2)	3(S2)	3(S2)	4(S3)	4(S2)	4(S2)	5(S2)	4(S3)	4(S2)

Tab. 41 : ISO Bewertungen Liederbach

#### 4.11. Randwinkel

Nach Beendigung der Bewitterung wurden auf den Platten die Randwinkel bestimmt. Hierbei wurden fünf Einzelwerte über die Platte verteilt gemessen. Dabei konnten eventuell vorhandene Unterschiede im Kontaktwinkel und somit auch in den Oberflächeneigenschaften ermittelt werden. Zudem konnte damit ein mittlerer Kontaktwinkel (plus Varianz und Standardabweichung) für die gesamte Platte bestimmt werden, mit dem sich die Ergebnisse aus Ernsthofen und Liederbach mit denen der unbewitterten Beschichtungen vergleichen lassen.

Um Vergleichswerte der unbewitterten Farben zu bekommen, wurden mit allen Varianten Kunststofffolien beschichtet und nach fünftägiger Trocknung 72 h statisch bewässert. Diese Bewässerung ist notwendig, da sich in den Beschichtungen Substanzen wie Emulgatoren etc. befinden, die, sofern sie nicht ausgewaschen werden, die Messung des Kontaktwinkels stören bzw. zu sehr stark variierenden Ergebnissen führen (R. Michel 2006, pers. Mitteilung).

Da die Winkel dieser Proben aufgrund der Bewässerung weniger stark schwanken wie die von bewitterten Farben, wurden hier nur drei Einzelwerte bestimmt. Von diesen Werten wurden dann ebenfalls Mittelwert, Varianz und Standardabweichung berechnet. Die Werte werden in folgender Tabelle vorgestellt.

Platte	PVK	Unbewittert			Liederbach			Ernsthofen		
		Mittelwert	Varianz	Std-Abw	Mittelwert	Varianz	Std-Abw	Mittelwert	Varianz	Std-Abw
Mowiith LDM 1871	45	75,53	10,16	3,19	36,63	10,48	3,33	54,33	154,37	12,44
	50	72,00	0,69	0,83	51,00	52,25	7,36	48,31	36,09	6,02
	55	78,52	4,29	2,07	47,86	75,67	8,97	18,56	61,78	7,80
	60	84,26	11,21	3,35	35,04	214,36	14,65	20,01	55,26	7,58
	65	86,77	8,48	2,91	19,88	97,66	10,38	11,00	75,79	8,71
Mowiith LDM 6119	45	82,35	0,71	0,85	62,17	125,27	11,19	58,18	66,37	8,19
	50	81,50	3,95	1,99	67,89	50,94	7,27	61,38	31,18	5,56
	55	83,55	5,87	2,42	55,02	18,01	4,23	55,66	9,50	3,20
	60	87,32	8,32	2,88	66,01	13,46	3,90	57,25	7,07	2,71
	65	91,01	2,16	1,47	75,14	249,45	15,77	54,00	144,48	12,16
Mowiith LDM 7729	45	75,16	7,82	2,80	65,03	7,47	2,84	70,92	12,02	3,53
	50	75,30	27,14	5,21	60,89	43,37	6,56	70,07	9,93	3,16
	55	80,79	5,84	2,42	59,38	151,44	12,25	66,74	6,54	2,62
	60	79,53	13,16	3,63	63,26	54,26	7,36	66,42	26,41	5,13
	65	88,24	2,16	1,47	66,98	27,89	5,30	67,13	36,67	6,07
Mowiith DM 611	45	70,71	0,68	0,82	50,72	25,62	5,13	67,96	19,67	4,51
	50	68,03	22,46	4,74	57,58	7,65	2,81	59,06	53,90	7,33
	55	72,08	7,39	2,72	39,64	40,41	6,42	58,75	45,90	6,82
	60	77,98	2,82	1,68	71,43	29,89	5,49	63,02	40,02	6,50
	65	86,37	2,88	1,70	52,45	73,55	8,59	63,82	19,21	4,40
Mowiith LDM 7717	45	62,15	10,54	3,25	56,73	8,12	2,85	62,74	32,58	5,82
	50	69,87	9,43	3,07	56,07	3,89	2,09	61,01	18,09	4,26
	55	66,09	1,57	1,25	56,22	52,47	7,21	68,23	6,44	2,59
	60	76,21	3,31	1,82	57,69	34,73	5,89	63,16	14,05	3,85
	65	76,86	3,44	1,85	52,53	39,20	6,26	37,83	361,14	19,17

Tab. 42 : Randwinkel der Beschichtungen unbewittert, Ernsthofen, Liederbach

Im unbewitterten Zustand zeigen alle Varianten einen Kontaktwinkel von  $<90^\circ$  bzw. knapp darüber (LDM 6119 PVK 65). Die Oberflächen sind demnach als eher hydrophil einzustufen. Diese Hydrophilie ist bei der LDM 7717 am stärksten ausgeprägt, während die LDM 6119 mit Kontaktwinkeln von z.T. deutlich über  $80^\circ$  schon leichte hydrophobe Tendenzen zeigt. Bei allen Dispersionen lässt sich eine Tendenz zu einer geringeren Hydrophilie bei höheren PVK feststellen. Die Varianz der Einzelwerte ist erwartungsgemäß gering, obwohl vereinzelt auch stärkere Schwankungen vorkamen. Die Abnahme des Winkels über die Messdauer war ebenfalls eher gering.

Im Unterschied dazu zeigen die bewitterten Beschichtungen eine z.T. deutliche Verringerung der Kontaktwinkel. Dies ist bei der LDM 1871 besonders stark ausgeprägt. Aber auch die anderen Dispersionen haben eine solche Zunahme der Hydrophilie aufzuweisen. In den meisten Fällen war die Abnahme des Winkels während der Messdauer sehr viel stärker als bei den unbewitterten Originalen, was sich auch in den Varianzen mancher Werte widerspiegelt.

Die bei den unbewitterten Farben erkennbare Tendenz zu einer geringeren Hydrophilie bei höheren PVK ist nun nicht mehr vorhanden. Bei manchen Dispersionen scheint diese Tendenz umgekehrt worden zu sein (LDM 1871 in Ernsthofen) mindestens jedoch sind die Kontaktwinkel der einzelnen PVK einander angeglichen worden.

## 5. Diskussion

### 5.1. Bewertung des mikrobiellen Bewuchses

#### 5.1.1. Externe und substratspezifische Parameter

Grundsätzlich wird das Wachstum von Pilzen auf Oberflächen von mehreren Parametern beeinflusst. Dazu gehören allgemeine, externe Einflussgrößen wie Groß- und Kleinklimate, das entsprechende Feuchtigkeitsregime und die Umgebung des betreffenden Standortes sowie die Ausrichtung nach der Himmelsrichtung und der Winkel der Exposition (Sais-Jimenez, Arino et al. 1995; May, Papida et al. 2000; Hofbauer, Breuer et al. 2006). Änderungen dieser grundlegenden Bedingungen beeinflussen natürlich auch die Möglichkeiten der Besiedlung verschiedenster Substrate.

Wie die einzelnen Substrate darauf reagieren, hängt aber von deren besonderen, d.h. substratspezifischen, Eigenschaften ab. Dazu gehören der Wasserhaushalt des Untergrundes und die Abbaubarkeit bzw. die Anfälligkeit, von Pilzen abgebaut zu werden. Auch die Eignung als Nährstoffdepot für Pilze oder die Leichtigkeit, mit der sich organisches Material bedingt durch die Oberflächenrauigkeit auf dem Substrat ablagern kann (von Werder, Koss et al. 2006) sind von Bedeutung.

Diese bei allen Substraten vorkommenden Parameter werden ergänzt durch die für Fassadenfarben typischen wie Typ und Menge des Bindemittels, dessen Tg und MFT, der spezielle Wasserhaushalt der Beschichtung, spezifiziert durch sd- und w-Werte sowie andere Inhaltsstoffe wie Verdicker, Emulgatoren und Füllstoffe.

Bei Bewitterung solcher Substrate ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Dispersionen auch ein unterschiedliches Bewuchsverhalten. Daraus lassen sich Annahmen herleiten, welche Dispersionen wie auf eine Besiedlung mit Pilzen reagieren.

Eine wichtige Eigenschaft ist die Oberflächenbeschaffenheit einer Beschichtung. Diese wird maßgeblich durch den Typ und die Menge des Bindemittels beeinflusst. Im frisch applizierten Zustand bildet die Dispersion eine mehr oder weniger glatte Oberfläche, in welcher die restlichen Bestandteile eingebettet vorliegen. Die Menge, definiert über die PVK, entscheidet, wie die Pigmente und Füllstoffe in der Matrix

vorliegen. Bei niedrigen PVK werden diese Teilchen komplett umhüllt, so dass der Anteil an direkt an der Oberfläche liegendem organischem Material deutlich höher liegt als bei Beschichtungen mit niedriger PVK. In der Theorie sollten Pilze deshalb besser auf Farben mit niedriger PVK wachsen, da die größere Menge an organischem Material als Kohlenstoffquelle genutzt werden könnte. Deshalb wären bei niedrigen PVK eine höhere Anzahl KBE Pilze /cm<sup>2</sup> zu erwarten.

Neben der Menge an Bindemittel spielen die Härte und Klebrigkeit der Dispersionen eine weitere wichtige Rolle. Diese über die MFT und T<sub>g</sub> beeinflussbaren Eigenschaften sind wichtig sowohl für die Anhaftung von Mikroorganismen als auch für die von Schmutz und Staub auf der Beschichtung. Je härter der Film ist, den eine Dispersion bildet, desto weniger sollten diese Vorgänge begünstigt werden. Dispersionen mit weichen Filmen hingegen müssten dann eine deutlich stärkere Anfälligkeit für Bewuchs und Verschmutzung aufweisen. Zudem ständen durch die stärkere Verschmutzung mehr allochthone Nährstoffe zur Verfügung, was einen Bewuchs nochmals fördern sollte. Nach erfolgter Besiedlung könnten die Pilze leichter in den Film eindringen, was sich an Schäden im mikroskopischen Bild nachweisen lassen sollte.

Da Wasser für das Wachstum von Mikroorganismen essentiell ist, kommt dem Wasserhaushalt einer Beschichtung große Bedeutung zu. Farben werden durch die beiden Parameter sd- und w-Wert in dieser Hinsicht charakterisiert. Diese Werte geben einen Hinweis auf die Fähigkeit der Beschichtung Wasser aufzunehmen bzw. dieses wieder abzugeben. Je stärker eine Beschichtung Wasser aufnimmt (hoher w-Wert) und je weniger gut sie dieses wieder abgibt (hoher sd-Wert) sollte sich in der Stärke der Besiedlung widerspiegeln, da das Wasser nun länger und öfter für die Pilze zur Verfügung stehen sollte. Hierbei spielen auch die über den Kontaktwinkel definierten hydrophob-hydrophilen Eigenschaften der Beschichtung eine Rolle. Zudem kommt auch das Verhalten der Beschichtung gegenüber den verschiedenen Arten von Niederschlag wie Regen, Tau, Nebel oder Schneefall zum Tragen.

Eigentlich sollten Dispersionen mit gleichen oder sehr ähnlichen Eigenschaften wie gleicher Monomertyp, gleiche MFT bzw. T<sub>g</sub> oder auch ähnlichem Wasserhaushalt auch ein analoges Bewuchsverhalten aufweisen. Entsprechendes gilt auch für nahe

beieinander liegende PVK, sie sollten sich ähnlicher sein als weiter auseinander liegende.

Ein Vergleich des Bewuchsverhaltens der hier getesteten Dispersionen zeigt, dass dies nicht zwangsläufig der Fall sein muß.

Die Bewertung der oben angesprochenen Parameter in ihrem Einfluss auf den Bewuchs gibt Auskunft darüber, welche Eigenschaften von Dispersionen die Angreifbarkeit, den Abbau und die Widerstandsfähigkeit von Fassadenbeschichtungen bedingen.

#### 5.1.2. Standorteinflüsse

Alle fünf Dispersionen zeigen auf beiden Bewitterungsstandorten z.T. klar erkennbare Jahresgänge. Dieser Wechsel zwischen Bewuchs und Erosion der Kolonien entspricht dem Wechsel der Jahreszeiten. Bei günstigen Bedingungen wie zu Beginn des Frühlings gedeihen auch Pilze besser, während im Winter eher erosive, d.h. Kolonien abtragende Vorgänge dominieren (Frost, mehr Regen, Hagel). Diese übergeordneten, großklimatischen Effekte stellen die grundsätzlichen Bedingungen für die Ansiedlung und das darauf folgende Wachstum nicht nur von Pilzen sondern auch anderen auf Oberflächen lebenden Organismen dar (Hofbauer, Breuer et al. 2006). Tomaselli, Tiano et.al. (2000) fanden solche Variationen auch bei Algenbewuchs auf italienischen Gebäuden.

Hinzu kommen Variationen im Wettergeschehen, z.B. trockene oder feuchte Perioden, die wiederum die jahreszeitlichen Bedingungen abändern. Mit dazu gehören die Menge und Zusammensetzung der in der Atmosphäre befindlichen Materie, die sich analog zu den Wetteränderungen ebenfalls ständig verändert.

Wie aus den exemplarisch dargestellten Wetterdaten für Liederbach ersichtlich, sind es hauptsächlich Temperatur und Niederschlag, die sich zu Beginn der Vegetationsperiode verbessern. Globalstrahlung und Luftfeuchtigkeit hingegen verschlechtern sich im Hinblick auf den Bewuchs eher. Die Globalstrahlung steigt, was eine erhöhte UV-Belastung bedeutet und die relativen Luftfeuchten bewegen sich durch die höheren Temperaturen in niedrigeren Bereichen.

Vergleicht man den Bewuchs in Ernthofen mit dem in Liederbach wird eine klar deutlich bessere Differenzierung des Bewuchses in Ernthofen deutlich. Dies manifestiert sich in einem Trend zu einem entgegen der theoretischen Annahme stehenden, stärkeren Bewuchs, je höher die PVK ist. Zudem ist der Bewuchs insgesamt gesehen in Ernthofen geringer als in Liederbach. Da an beiden Standorten das gleiche Set an Proben bewittert wurde, kann die Ursache nicht in den Beschichtungen oder Dispersionen liegen. Diese Unterschiede müssen durch andere, externe Faktoren dominiert werden. Diese Faktoren sind die Umgebung des Standortes, die Ausrichtung der Platten und vorhandene Unterschiede im Kleinklima.

Im Gegensatz zum mehr durch Wald und Wiese geprägten und in hügeligem Gelände liegenden Ernthofen ist in Liederbach die Umgebung flach, offen und durch landwirtschaftliche Flächen bestimmt. Aufgrund dessen wirken Witterungseinflüsse wie Wind, Schlagregen und Sonneneinstrahlung stärker auf die Liederbacher Platten als die in Ernthofen, die durch den umstehenden Bewuchs stärker geschützt werden. Zudem wird in Liederbach von den offenen Flächen mehr Schmutz und Staub aufgewirbelt, zum großen Teil auch durch die landwirtschaftliche Nutzung. Als hauptsächlich bestimmender Faktor ist aber die Ausrichtung der Platten zu nennen. Da die Neigung im Gegensatz zu den  $90^\circ$  in Ernthofen in Liederbach  $60^\circ$  betrug, blieb deutlich mehr aus der Atmosphäre sedimentierendes Material auf den Platten liegen. Diese Materialien können dann als allochthone Nährstoffe das Wachstum fördern. Der Einfluss, den Dispersionstyp und PVK als Nährstoffquelle für Pilze ausüben, wurde dadurch überdeckt. Die in Ernthofen anzutreffende Differenzierung ist deshalb auf den Platten aus Liederbach nicht oder nur in deutlich schwächerer Ausprägung auszumachen.

### 5.1.3. Substratspezifische Einflüsse

An beiden Standorten wurden die Mowilith LDM 1871 am stärksten und die Mowilith LDM 7717 am zweitstärksten befallen. Die anderen Dispersionen sind etwa gleich stark bewachsen. In Ernthofen ist die Mowilith DM 611, in Liederbach die Mowilith LDM 6119 am schwächsten betroffen. Bei allen Dispersionen ist ein Trend zu stärkerem Bewuchs bei höheren PVK (geringerer Gehalt an Dispersion) erkennbar. Da sich diese Entwicklungen auf den Platten beider Standorte wieder finden, sind

die Ursachen in den Eigenschaften der Beschichtungen und somit der Bindemittel zu suchen.

Obwohl die Trends bei beiden Standorten erkennbar waren, ergab der Vergleich der die Bewuchsstärke repräsentierenden AUC-Werte für die fünf Dispersionen in Ernthofen deutlich differenziertere Ergebnisse als für Liederbach. Aufgrund dessen werden hier vornehmlich die Ergebnisse aus Ernthofen besprochen. Der Einfluss externer Faktoren war dort geringer, so dass Unterschiede, bedingt durch die Eigenschaften und Mengen der Dispersionen deutlicher zum Tragen kamen. Trotzdem gelten die Aussagen im grundsätzlichen Trend auch für Liederbach.

Der theoretischen Vorstellung entsprechend sollte die Vina-Ethylen Dispersion mit den anderen keine ausgeprägte Ähnlichkeit aufweisen. Die beiden Styrol-Acrylate und die beiden Reinacrylate allerdings sollten jeweils untereinander mehr Ähnlichkeit im Bewuchs aufweisen als zwischen den Monomersystemen. Die  $\Delta$ -AUC-Werte der Kombinationen sollten demnach keine Signifikanz aufweisen.

Für die Vina-Ethylen trifft diese theoretische Aussage zu. Die  $\Delta$ -AUC-Werte mit den anderen Dispersionen sind in allen PVK Stufen nicht nur signifikant, sondern zudem deutlich größer als die entsprechenden Werte bei Kombinationen der anderen Dispersionen. Dies verdeutlicht den großen Unterschied im Pilzbewuchs zwischen der Vina-Ethylen-Dispersion und den anderen Monomersystemen. Darauf deutet auch das relativ einheitliche Niveau der Unterschiede mit den anderen Dispersionen hin. Obwohl die Mowilith LDM 7717 eine etwas geringere Differenz zeigt, verdeutlicht dies das grundlegend andere Verhalten dieser Dispersionen in Bezug auf Pilzbewuchs.

Im Vergleich der beiden anderen Monomersysteme zeigt sich, dass die theoretische Annahme, gleiche Monomere würden ein gleiches Bewuchsbild bedingen nicht immer richtig ist.

Das Reinacrylat Mowilith LDM 7729 zeigt eine so starke Ähnlichkeit mit den beiden Styrol-Acrylaten Mowilith LDM 6119 und Mowilith DM 611, dass die  $\Delta$ -AUC-Werte für die Kombinationen mit diesen Bindemitteln keine Signifikanz mehr aufweisen. Das Bewuchsverhalten der Mowilith LDM 7729 ähnelt somit mehr dem einer Styrol-Acrylat Dispersion. Dazu passt, dass die Unterschiede zwischen den beiden

Reinacrylaten Mowilith LDM 7717 und LDM Mowilith 7729 sehr stark ausgeprägt sind.

Obwohl die  $\Delta$ -AUC-Werte der beiden Styrol-Acrylate Mowilith LDM 6119 und Mowilith DM 611 im direkten Vergleich miteinander deutlich niedriger sind als die Werte des Vergleichs der beiden Reinacrylate, zeigt die vorhandene Signifikanz, dass das Bewuchsverhalten der beiden Styrol-Acrylate nicht gleich ist.

Die Theorie, dass gleiche Monomersysteme auch ein gleiches Bewuchsverhalten zeigen ist demnach nicht haltbar. Andere Parameter wie Wasserhaushalt, Oberflächenbeschaffenheit oder zusätzlich Inhaltsstoffe haben so starke Auswirkungen auf den Bewuchs, dass auch unterschiedliche Monomere sehr ähnliches Bewuchsverhalten zeigen können.

Nur aufgrund des Monomersystems Aussagen zum Pilzbewuchs zu treffen ist nicht möglich, wie die Situation bei der Mowilith LDM 7729 zeigt.

Auch beim Blick auf den Einfluss der Menge an Bindemittel zeigt sich, dass die einfache Annahme, je weiter die PVK auseinander liegen, desto stärker wäre der Unterschied so nicht haltbar ist. Besonders die Reinacrylate unterscheiden sich hier sehr stark. Während die LDM 7717 in allen PVK Stufen signifikant unterschiedlichen Bewuchs aufweist, ist dies bei der LDM 7729 genau das Gegenteil. Trotz z.T. größerer  $\Delta$ -AUC-Werte sind diese doch nicht signifikant.

Vergleicht man die  $\Delta$ -AUC-Werte für PVK-Kombinationen mit demselben Abstand (d.h. 5, 10 oder 15 PVK Stufen) sind ebenfalls deutliche Unterschiede erkennbar. Diese werden bei steigenden PVK größer, vor allem beim Übergang zur PVK 65 ergeben sich gravierende Differenzen.

Je weniger Bindemittel eine Beschichtung aufweist, desto weniger gut ist die Umhüllung der Füllstoff- und Pigmentpartikel mit Bindemittel. Die dadurch erhöhte Verfügbarkeit von Spurenelementen könnte in einem verstärkten Wachstum münden. Die erhöhte Rauigkeit der Oberfläche mit mehr und größeren Fehlstellen erleichtert das Ablagern und die Anheftung von Sporen bzw. Conidien. All dies verstärkt den Siedlungsdruck und führt zu dem beobachteten verstärkten Bewuchs bei solch hohen PVK. Diese Annahme wird durch den Trend zu einem allgemein höheren Bewuchs bei steigender PVK unterstützt.

Bei Annäherung an die kPVK (ca. 76%) wird die Diskrepanz zwischen Stufen nominal gleichen Abstands größer, so dass auch das Bewuchsverhalten deutlich

anders ist. Die Vergrößerung der Differenz zwischen PVK gleichen Abstands ist die Folge.

Am stärksten tritt dies bei der Mowilith LDM 1871 und der Mowilith LDM 7717 zu Tage. Die beiden Styrol-Acrylate zeigen hierbei die kleineren Schwankungen.

Da es sich bei den bewitterten Proben um vollständige Beschichtungen gehandelt hat, ist immer auch das Zusammenspiel der Komponenten wichtig.

Eigenschaften des Bindemittels wie Glasübergangstemperatur  $T_g$  und Mindestfilmbildetemperatur MFT sind grundlegend für die Richtung in der sich ein Bewuchs entwickeln wird. Diese beiden Parameter steuern das Verhalten des resultierenden Bindemittelfilms im Hinblick auf Härte und Klebrigkeit, Eigenschaften, die auf den Bewuchs starken Einfluss ausüben können.

Der Charakter der resultierenden Beschichtung mit ihrem Wasserhaushalt, der Oberflächenstruktur und der Angreifbarkeit durch Mikroorganismen variieren den Bewuchs darüber hinaus im Zusammenspiel mit Verschmutzung und anderen allochthonen Einflüssen. Deshalb soll nun auf diese Parameter näher eingegangen werden.

#### 5.1.4. Eigenschaften der Bindemittelfilme

Zwei wichtige Parameter eines Polymerfilms sind die Glasübergangstemperatur  $T_g$  und Mindestfilmbildetemperatur MFT.

	<b>Mowilith LDM 1871</b>	<b>Mowilith LDM 6119</b>	<b>Mowilith LDM 7729</b>	<b>Mowilith DM 611</b>	<b>Mowilith LDM 7717</b>
<b>MFT</b>	0° C	0° C	0° C	ca. 17° C	ca. 20° C
<b><math>T_g</math></b>	ca. 12° C	ca. 1° C	ca. 0° C	ca. 19° C	ca. 28° C
<b>Film</b>	Rissfrei Flexibel Leicht trüb Weich, zäh	Rissfrei  Fast klar Weich, etwas klebrig	Rissfrei Elastisch Klar Hart, zäh	Rissfrei Flexibel Klar Klebfrei	Rissfrei  Klar Hart

Tab. 43 : Zusammenfassung wichtiger Dispersionseigenschaften

Beide Parameter sind aufgrund der ähnlichen Einsatzgebiete der Dispersionen relativ einheitlich eingestellt. Sowohl im Hinblick auf die MFT als auch die  $T_g$  sind die Unterschiede im Bewuchs nicht erklärbar. Als Beispiel seien die Kombinationen Mowilith DM 611 mit den beiden Reinacrylaten Mowilith LDM 7717 und Mowilith

LDM 7729 genannt. Obwohl die MFT und Tg der Mowilith DM 611 eindeutig näher bei der Mowilith LDM 7717 liegen, ist das Bewuchsverhalten dem der Mowilith LDM 7729 so viel ähnlicher, dass eine signifikante Unterscheidung nicht mehr möglich ist. Aus den reinen Zahlenwerten dieser beiden Parameter ist also in Bezug auf den Bewuchs mit Mikroorganismen nichts herauszulesen. Daneben könnten aber weitere Eigenschaften wie Härte und Klebrigkeit der Filme eine Rolle im Bewuchsverhalten spielen. Die Tg gibt für die Härte zumindest eine Richtung vor, je höher sie liegt, desto härter sind meist die Filme. Die Anteile der einzelnen Copolymere entscheiden letztlich über den Charakter der Filme in dieser Beziehung (Apitz & Fichtner 2001).

Durch die weich machenden Eigenschaften des Ethylens bilden Vinylacetat-Ethylen Dispersionen Filme aus, die im Allgemeinen eher weich und relativ klebrig sind. Deshalb sollte in niedrigpigmentierten Systemen (niedrige PVK) die Verschmutzungsneigung höher sein. Staub- und Schmutzteilchen, Sporen, Conidien und sonstige Ausbreitungsaggregate von Pilzen oder auch Flechten sollten leichter auf der Oberfläche haften.

Acrylat-Dispersionen bilden eher harte und weniger klebrige Filme aus. Über die Mengen an harten Copolymeren wie Styrol oder Methylmethacrylat kann hier eine entsprechende Steuerung erfolgen. Die Anhaftung allochthoner Nährstoffe sollte deshalb weniger stark ausgeprägt sein.

Gemäß diesen theoretischen Überlegungen sollte die Dispersion LDM 1871 am stärksten befallen sein, gefolgt von der LDM 6119. Die LDM 7717 sollte zusammen mit der DM 611 am wenigsten Bewuchs aufweisen. Zudem sollten die niedrigen PVK stärker bewachsen sein.

Die LDM 1871 ist tatsächlich von allen Dispersionen am stärksten bewachsen, insofern stimmt dies mit zumindest einem Teil der Theorie überein. Die Acrylate allerdings zeigen ein Bewuchsbild, welches nicht mit dieser theoretischen Vorstellung erklärt werden kann. Völlig verwerfen kann man die Vorstellung, dass niedrige PVK aufgrund des höheren Dispersionsanteils stärker bewachsen werden. Dies war bei keiner Dispersion der Fall.

Allem Anschein nach sind die Unterschiede im Bewuchs nicht ursächlich und auf keinen Fall ausschließlich auf Härte bzw. Klebrigkeit der Filme zurückzuführen.

Weitere Eigenschaften, die im Zusammenspiel der Komponenten der gesamten Beschichtung begründet sind, müssen deshalb betrachtet werden.

#### 5.1.5. Wasserhaushalt der Beschichtungen

Da Wasser für Mikroorganismen die essentielle Grundvoraussetzung für Wachstum ist, kommt dem Wasserhaushalt von Beschichtungen große Bedeutung zu (Fitz, Hofbauer et al. 2006; Krus, Rösler et al. 2006). Die Schnelligkeit der Wasseraufnahme und -abgabe sollte für die Bewuchsentwicklung ein bestimmender Faktor sein. Zur Ermittlung des Wasserhaushalts der Beschichtungen wurden die sd- und w-Werte wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben bestimmt.

Die Struktur der Beschichtungen wird bei Verringerung des Dispersionsanteils immer offener, da der vom Bindemittel gebildete Film bei höheren PVK nicht mehr vollständig ausgebildet werden kann (Apitz & Fichtner 2001). Aufgrund dieses offeneren Gefüges zeigen alle Dispersionen steigende w-Werte (Wasseraufnahme) und fallende sd-Werte (Wasserabgabe) mit steigender PVK. Das Wasser kann zwar schneller eindringen, aber auch wieder schneller aus der und durch die Beschichtung entweichen.

Bei einer Korrelations- und Regressionsbetrachtung zeigen die sd-Werte einen stärkeren Zusammenhang mit dem Pilzbewuchs als die w-Werte. Vor allem nach der Konditionierung besteht für die w-Werte keine statistische Beziehung mehr zum Pilzbewuchs.

Dies könnte darauf hindeuten, dass die Wasserdampfdurchlässigkeit, also das Abgeben des aufgenommenen Wassers sowohl aus der Beschichtung selbst als auch aus dem darunter liegenden Reservoir das Pilzwachstum stärker beeinflusst als die reine Wasseraufnahme. Da die dünnen Farbfilme bei Belastung durch Regen oder Tau relativ schnell vollständig mit Wasser gesättigt sind, wird weiter vorhandenes Wasser in den Untergrund weitergeleitet. Aus diesem Reservoir speist sich dann bei Trocknung des gesamten Aufbaus das Wasser, welches Pilze auf der Oberfläche zur Verfügung haben. Da das Wasser als Wasserdampf entweicht, bildet sich in der dünnen Grenzschicht Farbe/Luft eine mit diesem Wasserdampf mehr oder weniger gesättigte Atmosphäre aus. Die für ein Auskeimen und Wachstum der Pilze nötigen hohen relativen Luftfeuchten von >80-90% (Grant, Hunter et al. 1989; Ezeonu, Noble et al. 1994; Nielsen, Holm et al. 2004) sind damit

vorhanden. Je offener eine Beschichtung ist (niedriger sd-Wert), desto mehr Wasserdampf kann pro Zeiteinheit aus dem Untergrund entweichen. Bei niedrigeren PVK und dementsprechend höheren sd-Werten steht den Pilzen hingegen weniger Wasserdampf zur Verfügung. Dieser theoretische Ablauf könnte die Werte bei der LDM 1871 erklären, die über alle PVK die geringsten sd-Werte aufweist und auch den stärksten Bewuchs zeigte.

Bei den Acrylaten hingegen spricht der stärkere Bewuchs der LDM 7717 bei gleichzeitig höheren sd-Werten dagegen. Eventuell spielt hier auch die Menge an aufgenommenem Wasser, also der w-Werte, eine Rolle, da die Formulierung mit LDM 7717 die geringste Wasseraufnahme aller Beschichtungen zeigte.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die freien Filme der beiden Styrol-Acrylat Dispersionen LDM 6119 und DM 611 eine tendenziell geringere Wasseraufnahme als die beiden Reinacrylate haben. Bei den entsprechenden Beschichtungen liegen die Verhältnisse umgekehrt. Auch die hohe Wasseraufnahme des LDM 1871 Films spiegelt sich nicht in der Beschichtung. Anscheinend hat die Wasseraufnahme des freien Dispersionsfilms keinen großen Einfluss auf den w-Wert einer Beschichtung.

Neben w- und sd-Wert ist auch die Hydrophobie eine wichtige Komponente des Wasserhaushalts einer Beschichtung. Durch die wasserabweisenden Eigenschaften einer Beschichtung wird der w-Wert verbessert, d.h. die Fassade nimmt weniger Wasser auf, welches später Mikroorganismen zur Verfügung stehen würde. Als Maß für die Hydrophobizität wurden die Randwinkel sowohl unbewittert als auch nach der Bewitterung gemessen.

Theoretisch sollten die hydrophoben Eigenschaften der Bindemittelfilme von Vinylacetat/Ethylen über Reinacrylat zu Styrol-Acrylat zunehmen (Apitz & Fichtner 2001). Die Frage ist allerdings, ob diese Eigenschaften für den Bewuchs relevant sind.

Setzt man Beschichtungen der Bewitterung aus, werden dadurch die Oberflächen angegriffen, Oberflächenstruktur, Porosität und Integrität des Films werden verändert.

Durch Bewuchs mit Mikroorganismen und der nachfolgenden Ausbildung eines Biofilms wird zudem die Hydrophilie einer Oberfläche erhöht, weil der Biofilm an sich hydrophile Eigenschaften besitzt und zur Retention von Feuchtigkeit führt (Morton & Surmann 1994; Crispim, Gaylarde et al. 2004). Durch die Ansiedlung von

Mikroorganismen wird demnach ein sich selbst verstärkender Mechanismus in Gang gesetzt, der die Kontaktwinkel bei bewitterten Platten verringert. Je stärker der Bewuchs ist, desto geringer sollten die Kontaktwinkel sein, ein Zusammenhang, der im vorliegenden Fall bestätigt wird.

Vergleiche der REM-Aufnahmen der unbewitterten und bewitterten Oberflächen zeigen mikrostrukturelle Veränderungen wie Lochbildung und Verstärkung der Rauigkeit, die zu einer verstärkten Wasseraufnahme führen können. Selbst bei reinen, lang andauernden Bewässerungen konnten solche Veränderungen festgestellt werden (von Werder, Koss et al. 2006).

Die zu Beginn der Bewitterung vorliegende geringe Hydrophobizität wird im Laufe der Zeit durch Wettereinflüsse und nachfolgenden Bewuchs weiter reduziert, es kommt zu einem fortschreitenden Verlust der wasserabweisenden Eigenschaften und in der Folge nehmen die Randwinkel immer weiter ab.

In diesem Fall ist also der Verlust der Hydrophobizität nicht der Grund für den Bewuchs, sondern der Bewuchs ist die Ursache für den Verlust. Dies bietet auch eine Erklärung für die z.T. hohen Varianzen der Kontaktwinkel der bewitterten Platten. Der Kontaktwinkel ändert sich mit unterschiedlicher Stärke des Biofilms.

Der Einfluss der Hydrophobizität der Bindemittel ist demnach nur sehr klein bzw. nicht relevant für die Bewuchsentwicklung. Bei expliziter Hydrophobierung der Fassadenfarbe durch z.B. Silikonharze wird hingegen ein Schutz vor Befall postuliert. Untersuchungen im Institut für Bauphysik Holzkirchen ergaben aber, dass eine hohe Hydrophobizität keine Garantie für bewuchsfreie Oberflächen darstellt. Auf Testbeschichtungen mit stark wasserabweisenden Eigenschaften wurde sogar ein verstärktes Wachstum festgestellt. Auf die Oberfläche auftreffender Regen soll in diesem Fall Schmutz und Bewuchs von der Beschichtung abwaschen. Der Regen perlte zwar ab, aber die kleineren Tropfen des Tauwassers verblieben länger auf der Oberfläche und standen dann den Organismen auch länger zur Verfügung (Krus & Fitz 2005; Fitz, Hofbauer et al. 2006).

#### 5.1.6. Verwertbare Inhaltsstoffe der Beschichtungen

Nicht nur die Dispersion selbst, sondern auch weitere in Beschichtungen verwendete Substanzen wie Celluloseverdicker, Emulgatoren, Netzmittel etc. stellen

durch ihren organischen Charakter potentielle Nährstoffe für Pilze und andere Mikroorganismen dar. Da allerdings die verwendeten Proben in der Matrix gleich waren und nur das Bindemittel verändert wurde, ist der verfügbare Anteil dieser anderen Inhaltsstoffe bei allen Proben gleich. Nur Bestandteile der Dispersionen können demnach in unterschiedlichen Mengen vorliegen und einen Einfluss auf den Bewuchs haben. Diese Inhaltsstoffe sind neben den eigentlichen Polymerteilchen Nasshaftungspromotoren, Emulgatoren oder ähnliche Substanzen. Diese könnten eventuell von Pilzen aus der Beschichtung extrahiert und als Nährstoffe verwendet werden. Allerdings dürfte durch die gute Wasserlöslichkeit dieser Substanzen eine relativ schnelle Auswaschung erfolgen, sobald die Proben der Bewitterung ausgesetzt werden. Insofern könnte durch diese erhöhte Verfügbarkeit ein Pilzbewuchs sehr schnell nach Beginn der Bewitterung einsetzen. Die Pilze könnten dann das vermehrt zur Verfügung stehende Nährstoffpotential wesentlich besser ausnutzen. In den meisten Fällen und auch bei den hier betrachteten Proben setzte die Besiedlung mit Pilzen allerdings erst 4-6 Monate nach Beginn der Bewitterung ein. Zu diesem Zeitpunkt dürfte die Auswaschung bereits weitgehend abgeschlossen sein. Unterschiede in den aus der Quelle Bindemittel stammenden verwertbaren Nährstoffe dürften deshalb nur einen sehr schwachen oder keinen Einfluss auf den Bewuchs gehabt haben.

#### 5.1.7. Wachstumsversuche

Im Gegensatz zur Situation im fertigen Beschichtungsfilm, in dem die Inhaltsstoffe den erst langsam aufwachsenden Pilzen nicht mehr zur Verfügung stehen, können diese Stoffe bei Tests an der flüssigen Dispersion von den Pilzen verwertet werden. Die Flüssigkulturtests zeigen, dass in dieser Situation das Wachstum eher von den zusätzlichen Inhaltsstoffen bestimmt zu werden scheint. Der jeweilige Vergleich der beiden Reinacrylate und Styrol-Acrylate legt diesen Schluss nahe, da bei beiden Paaren immer eine Dispersion deutlich besser verwertet wird. Allerdings sind durch die bei den Ergebnissen der Flüssigkulturtests erwähnten Schwierigkeiten die Werte nicht als quantitativ anzusehen, sondern geben nur einen Trend wieder.

Vergleicht man diesen Trend mit dem Bewuchs, so korrespondieren bei der Mowilith LDM 1871 die gute Abbaubarkeit und der starke Bewuchs recht gut, ebenso wie bei der Mowilith LDM 7717 für die Versuche mit *A. pullulans*.

Die Ergebnisse der Festmedientests zeigen für die Mowilith LDM 7717 eine gute Verwertbarkeit, für die Mowilith LDM 1871 hingegen nur eine mäßige.

Insgesamt zeigen die Tests, dass die Dispersionen als Nährstoffquelle genutzt werden können. Dies bestätigt sich auch im mikroskopischen Bild, in dem die abbauende Wirkung der Pilze auf die Beschichtungen deutlich wird. Zahlreiche Untersuchungen an reinen Polymeren betätigen die prinzipielle Abbaubarkeit solcher Stoffe (Kaplan, Hartenstein et al. 1979; Gillatt 1990; Kastien & Sutter 1992; Cox, Houtman et al. 1993; Cox, Faber et al. 1996; Heyn, Häfner et al. 1996; Heyn, Petersen et al. 1996; Kelley & Yaghmaie 2001; Heyn 2002).

#### 5.1.8. Mikroskopische Bewertung der Oberflächen

Durch die harten Bedingungen einer Freibewitterung kommt es naturgemäß zu deutlichen Veränderungen auf den Oberflächen der so behandelten Fassadenfarben. Es ändern sich Eigenschaften wie Kontaktwinkel und Wasserhaushalt und die Integrität der Oberfläche wird beeinträchtigt. Neben messtechnisch erfassbaren Entwicklungen ist deshalb auch eine optische Erfassung und Bewertung der Oberflächendegradation wichtig.

Durch Wasser, Temperatur, Sonneneinstrahlung mit UV-Belastung, Wind und externe Kraftereinwirkung wie Hagel wird die Farboberfläche sukzessive angegriffen. Zu Beginn einer Bewitterung wirken nur die genannten abiotischen Faktoren ein, die im weiteren Verlauf allerdings durch biologische Größen ergänzt und erweitert werden. Diese umfassen hauptsächlich die Ansiedlung von und den nachfolgenden Abbau bzw. Zerstörung des Farbfilms durch Mikroorganismen. Einfluss auf diesen Vorgang haben wiederum andere biotische Faktoren wie z.B. Abweidung durch Schnecken oder Arthropoden (Gorbushina & Petersen 2000) bzw. abiotische Einflüsse wie Hagel oder Frost.

Um diese Entwicklungen verfolgen zu können, wurden von den Beschichtungen mit der PVK 55 deshalb sowohl unbewittert als auch nach der Bewitterung REM- und lichtmikroskopische Bilder gemacht. Wie erwähnt hängt die Art der Oberflächenstruktur stark von der PVK ab, da die Menge an Bindemittel die Oberflächenstruktur bestimmt. Bei PVK 55 sind die Oberflächen im unbewitterten Zustand mehr oder weniger geschlossen, große Löcher und Hohlräume sind eher selten. Nach der Bewitterung allerdings sind bei allen Dispersionen z.T. große Löcher und Vertiefungen erkennbar. Auch die allgemeine Struktur ist deutlich

poröser, der Eindruck einer glatten Oberfläche fehlt völlig. Dabei spielt die Integrität der Oberfläche bei der Anhaftung von Mikroorganismen eine große Rolle (Lugauskas, Levinskaité et al. 2003).

Der Ablauf der Oberflächenschädigung ist die entscheidende Frage. Wird die Beschichtung erst durch abiogene Faktoren sozusagen „mürbe“ gemacht und mit Löchern und Vertiefungen versehen oder verursachen Pilze und andere Mikroorganismen eine Schwächung des Beschichtungsgefüges, welches dann durch abiogene Faktoren leichter geschädigt werden kann?

Eine eindeutige Entscheidung für den einen oder anderen Ablauf ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich. Eine Kombination mehrerer Faktoren ist jedoch, wie so oft bei Vorgängen mit biologischer Beteiligung, sehr wahrscheinlich.

Einige Indizien deuten auf ein Zusammenspiel erosiver Vorgänge durch Wasser und Temperatur und dem aktiven Angriff und Abbau der Beschichtung durch Pilze hin. In den ersten Monaten einer Bewitterung wird der Farbfilm sicherlich zuerst durch Wetter und klimatische Bedingungen beeinflusst. Allerdings kommt es zu ersten Anlagerungen von Schmutz, Staub und natürlich auch biologischem Material, welches sich bevorzugt in Vertiefungen ablagert. Dies sind dann die ersten Stellen, an denen Pilze durch aktives Vorgehen den Farbfilm schädigen können. Durch physikalisch-chemische Vorgänge wie Aufbrechen und Abheben der Filmbestandteile oder Sezernierung von Säuren und Enzymen (Webb, Nixon et al. 2000; Lugauskas, Levinskaité et al. 2003) sind die Pilze in der Lage, kleine, schon vorhandene Vertiefungen auszuweiten und sich so in die Beschichtung einzuarbeiten. Auf allen Dispersionen ist erkennbar, dass zumindest ein Großteil der sichtbaren Löcher durch biologische Einflüsse entstanden bzw. erweitert worden sind. Die Form der Vertiefung passt sich dabei exakt der Form einzelner Kolonien an und es besteht ein direkter Kontakt zwischen Pilz und Film. Oft sind aufgetriebene Lochränder erkennbar (z.B. bei Mowilith LDM 7729), entstanden durch das Wachstum der Pilzkolonie innerhalb des Farbfilms. Die dadurch entstandene Höhlung kann dann aktiv durch chemische Einflüsse vergrößert werden. Im weiteren Verlauf der Bewitterung wird die Oberfläche immer stärker angegriffen, es entstehen immer mehr und auch tiefere Fehlstellen, welche dann zu einer sukzessiven Degradation des Beschichtungsfilms führen.

### 5.1.9. Erstbesiedlung, Sukzession

Wie auf allen neu von Organismen zu besiedelnden Flächen kommt es auch auf Farboberflächen zu Sukzessionsvorgängen. Unter Sukzession versteht man die Abfolge verschiedener Eigenschaften eines Ökosystems im Verlauf der Zeit unter Berücksichtigung der daran beteiligten Organismen (Kinzelbach 1989; Streit 1994). Dazu gehören der Wechsel der Artenzusammensetzung und Biomasse im Zeitverlauf, hin zu immer komplexeren Biozönosen. Klassische Beispiele sind neu entstandene Lavafelder (Kinzelbach 1989) oder auch frisch vom Eis befreite Gletschervorfelder. Aus der belebten Umwelt werden Ausbreitungs- und Fortpflanzungseinheiten auf diese unbesiedelten Flächen verfrachtet, was bei geeigneten Bedingungen zur Neuansiedlung der betreffenden Organismen führt. Diese naturgegebenen, zwangsläufig ablaufenden Vorgänge gelten natürlich auch für Farbfilm an Fassaden. Auch hier gibt es Erstbesiedler, die als eine Art Pioniere die freien Flächen zuerst besiedeln. Dazu gehören sicherlich Bakterien und Archaeen, aber auch Pilze und Algen sind zu einer solchen Pionierbesiedlung fähig. Bei vorliegender Arbeit wurden auf allen Platten Pilze und nicht Algen als Erstbesiedler gefunden. Algen traten erst später auf und bevorzugten mit den mehr oben und seitlich gelegenen Bereichen auch andere Orte auf den Platten. Sehr ähnliche Verhältnisse wurden von Hofbauer et al. gefunden (Hofbauer, Breuer et al. 2006).

Lässt man eine Fassade über mehrere Jahrzehnte unangetastet, sind in der Folge auch andere Kryptogamen wie Moose und Flechten und schließlich auch höhere Pflanzen in der Lage diesen sehr extremen Lebensraum zu besiedeln. Aufgrund der Tatsache, dass Fassadenfarben vorwiegend an bewohnten Gebäuden anzutreffen sind, wird diese Sukzession allerdings normalerweise sehr viel eher unter- bzw. abgebrochen.

Aber auch in sehr viel früheren Stadien dieses Vorgangs sind zumindest Änderungen der Biomasse sehr häufig. Als Beispiel wurde die Entwicklung von Kolonien auf der Mowilith LDM 1871 über einen Zeitraum von mehreren Monaten beobachtet. Es zeigte sich der typische Ablauf eines sukzessiven Vorgangs mit Anwachsen der Biomasse bis zu einem bestimmten Punkt und dem anschließenden Verlust durch äußere Einflüsse. Diese waren meist Wetter- oder klimabedingt aber auch die Abweidung durch Schnecken, Milben oder andere Arthropoden trug zu

dem Verlust bei. Aus den Resten einer größeren Kolonie konnten dann im Verlauf wiederum neue Kolonien heranwachsen. Den für eine typische Sukzession charakteristischen Wechsel in der Artenzusammensetzung festzustellen lag außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Allerdings wird sich in den ersten Jahren einer Besiedlung nur wenig in dieser Hinsicht tun. Die Bedingungen sind für lange Zeit relativ gleichförmig, so dass nur eine begrenzte Anzahl spezialisierter Organismen für die Besiedlung sorgt.

#### 5.1.10. Isolation von Organismen

Eine vollständige und auch den Zeitverlauf abbildende Erfassung der Pilzflora auf den Platten wurde, wie oben erwähnt, nicht durchgeführt. Während der Bewitterungsdauer wurden deshalb nur stichprobenartig vereinzelte Proben genommen, während nach Beendigung der Bewitterung von jeder Platte einmal 6,25cm<sup>2</sup> Oberfläche zur Bestimmung der häufigsten Arten beprobt wurde.

Aufgrund der speziellen, oligotrophen Bedingungen auf den Platten wurden bei den Beprobungen hauptsächlich ubiquitäre Gattungen wie *Cladosporium*, *Alternaria*, *Aureobasidium* und *Ulocladium* gefunden. Dies sind die auf Beschichtungsstoffen und auch anderen oligotrophen und durch Stressparameter wie Trockenheit und UV-Belastung charakterisierten Substraten am häufigsten vorkommenden Gattungen (Gillatt 1991; English, Fjelde et al. 2003; Colon, Kuusisto et al. 2004; Saad, Kinsey et al. 2004; Gaylarde & Gaylarde 2005). Durch ihre hohe Widerstandskraft und Konkurrenzfähigkeit, auch aufgrund der Färbung durch Melanin, sind vor allem dunkel gefärbte Taxa sowohl qualitativ als auch quantitativ in der Mehrheit. Dies entspricht der Erfahrung aus anderen Beobachtungen an Fassaden und den darauf verarbeiteten Farben und Putzen und wird auch in der Literatur bestätigt (Shirakawa, Gaylarde et al. 2002; Bagda 2002b; Hofbauer, Breuer et al. 2003; Shirakawa, John et al. 2004; Hofbauer, Breuer et al. 2006).

Ursachen für die Unterschiede zwischen den Bewitterungsstandorten und den einzelnen Dispersionen sind sehr wahrscheinlich hauptsächlich in den kleinklimatischen Verhältnissen zu suchen. Die beiden Standorte unterscheiden sich hierin sehr stark. Vor allem Feuchteregime und UV-Belastung sind für diesen Fall die entscheidenden Parameter. In Ernsthofen könnten, bedingt durch die 90° Ausrichtung die Feuchtebedingungen ein wenig besser und die UV-Belastung etwas

geringer gewesen sein. Die hier häufiger aufgetretenen Hefen fanden günstigere Bedingungen vor als die mikrokolonialen Pilze, die durch ihr langsames Wachstum im Nachteil waren. In Liederbach wiederum war durch die 45° Lagerung die UV-Belastung sehr viel höher während sich gleichzeitig durch das schnelle Trocknen ungünstigere Feuchtebedingungen einstellten. Aufgrund dessen waren dann hier die Hefen im Nachteil, die mikrokolonialen Pilzen hingegen durch ihre hohe Widerstandsfähigkeit gegen Austrocknung im Vorteil.

#### 5.1.11. PAS Färbung

Die Verwendung der PAS Färbung stellt nach Warscheid & Braams (2000) die beste Methode zur Sichtbarmachung von subaerischen Biofilmen dar. Der durch die Färbung sichtbar und von anorganischer Auflage unterscheidbar gemachte organische Belag kann somit unter dem Lichtmikroskop in digitalen Bildern dokumentiert und anschließend weiter analysiert werden. Durch geeignete Methoden ist somit eine quantitative Analyse des Bedeckungsgrades möglich. Neben dem Einsatz bei Untersuchungen auf Gesteinsoberflächen (Sterflinger 2000; Gorbushina, Beck et al. 2005) und für Wachstumsuntersuchungen bei Pilzkulturen (Rodenacker, Hausner et al. 2003) kann diese Methode auch bei der Ermittlung der Verteilung und Bedeckung des organischen Belags auf Fassadenfarben verwendet werden.

Das Einfärben organischen, zumeist biogenen Materials bietet mehrere Vorteile bei der Bewertung biologisch bedingter Veränderungen auf Fassadenoberflächen. Zusätzlich zur reinen Unterscheidung zwischen Bewuchs und Schmutz ist eine Differenzierung hinsichtlich der Zusammensetzung der Schmutzbelastung möglich. Erkennbar ist dies an den unterschiedlichen Werten für rote Pixel in Liederbach und Ernthofen. Weist die Umgebung eines Standortes stärkeren Pflanzenwuchs auf, wird die organische Schmutzlast stärker sein als bei Standorten, bei denen mehr offenes, eventuell sogar ruderales, vom Menschen geprägtes Gelände vorherrscht.

Zusätzlich ist es möglich, auf den Oberflächen zwar vorhandene, vorher aber nicht sichtbare Organismen wie Bakterien erkennbar zu machen. Damit ist ein gutes Hilfsmittel verfügbar, die beginnende mikrobielle Sukzession sichtbar zu machen. Besonders zu Beginn von Bewitterungen werden damit prokaryotische Erstbesiedler erkennbar, d.h. deren frühe Sukzession kann verfolgbar gemacht werden. Auf

zahlreichen Proben konnte so auf scheinbar unbesiedelten Flächen das Vorhandensein von Prokaryoten nachgewiesen werden.

Durch die Färbung wird weiterhin eine bessere Kontrastierung der Organismen erreicht. Damit wird das Erkennen und Bewerten von durch diese Organismen verursachten Oberflächenschäden vereinfacht, ohne dazu REM Aufnahmen zu Rate ziehen zu müssen. Schon in den lichtmikroskopischen Aufnahmen werden diese Schäden eindeutig sichtbar.

Die Ergebnisse der Anfärbung der Oberflächen durch PAS sind konsistent mit denen anderer Methoden z.B. ASTM oder ISO Bewertung. Es steht eine Methodik zur Verfügung, die nicht nur für Untersuchungen an Bewuchs auf Oberflächen wie Stein oder Kunstwerken eingesetzt werden kann, sondern auch für die Evaluierung von Bewuchs auf Fassadenfarben.

## **5.2. Veränderungen der Testbeschichtungen**

### **5.2.1. Der L\*-Wert im Hinblick auf Verschmutzung bzw. Vergrauung**

Neben dem Bewuchs mit Mikroorganismen ist die nicht biogene Verschmutzung bzw. Vergrauung der zweite wichtige Parameter für die Veränderung von Fassadenbeschichtungen während ihrer Lebensdauer. Da der Schmutz zudem meist aus Kohlenstoffverbindungen besteht (Bagda & Spindler 2002), die wiederum von Pilzen genutzt werden können, kommt diesem Punkt große Bedeutung zu (Gorbushina 2007).

Da beide Faktoren Pilzbewuchs und Verschmutzung auf dem gleichen Substrat und im gleichen Zeitraum auftreten, ist es nur logisch, dass sich beide gegenseitig beeinflussen und zum Teil auch bedingen. Sowie eine Fassade frisch beschichtet wurde oder, wie in diesem Falle, Platten mit Fassadenfarbe der Bewitterung ausgesetzt wurden, beginnen die Veränderungen mit der Ablagerung von Schmutz und Ausbreitungseinheiten von Mikroorganismen.

In wieweit sich auf den verschiedenen Dispersionen Ablagerung von Schmutz und Staub halten, ist im Gegensatz zum Wachstum von Pilzen nur von den Oberflächeneigenschaften wie Härte und Klebrigkeit der Bindemittel und den Bedingungen des jeweiligen Standorts abhängig. Wasserhaushalt, Nährstoffe oder sonstige Anfälligkeit für Abbau spielt hierbei weniger eine Rolle. Vor allem der

Unterschied des Ausrichtungswinkels der Platten zwischen Liederbach (90°) und Ernsthofen (45°) hat hierbei starkes Gewicht. Durch diesen Unterschied werden die Ablagerungsbedingungen entscheidend geändert, bei 45° wird natürlich mehr Substanz abgelagert als bei 90°.

Die aufgrund dieser Rahmenbedingungen mögliche Arbeitshypothese besagt, dass die Proben aus Liederbach bedingt durch die flachere Ausrichtung insgesamt stärkere L\*-Wert Verluste aufweisen sollten als die aus Ernsthofen. Unabhängig vom Standort müssten niedrige PVK, hervorgerufen durch die stärkere Klebrigkeit des mit mehr Bindemittel versehenen Farbfilms, ebenfalls einen stärkeren L\*-Wert Verlust aufweisen.

Von den beiden theoretischen Vorstellungen bestätigt sich die von der allgemein stärkeren Verschmutzung in Liederbach eher als die andere. Der Einfluss des Ausrichtungswinkels ist in der Tat sehr stark. Die in Liederbach am wenigsten verschmutzte Mowilith LDM 7717 zeigt in etwa den gleichen L\*-Wert Verlust wie die am stärksten verschmutzte Mowilith LDM 6119 aus Ernsthofen.

Die zweite Vermutung der stärkeren Verschmutzung bei niedrigen PVK kann nur in Liederbach annähernd bestätigt werden. Obwohl auch dort Schwankungen innerhalb der einzelnen Dispersionen auftreten, folgt der allgemeine Trend dieser Vermutung. Stark ausgeprägt ist dies bei der Mowilith LDM 1871. Der weichere und klebrigere Film hält darauf abgelagertes Material besser fest und es kommt zu mehr Verschmutzung. Trotzdem unterliegt natürlich auch dieser Vorgang den Wettereinflüssen, wichtig hierbei sind vor allem die Niederschläge in Form von Regen und Hagel. Bei 45° Ausrichtung wirken diese stärker auf die Verschmutzung ein als bei 90°. Dies drückt sich in ausgeprägten Schwankungen der L\*-Werte in Liederbach aus, verursacht durch die erhöhte Ablagerung in Trockenperioden aber auch einem stärkeren Abwaschen bei Regen. Aus diesem Grund ist auch kein kontinuierlicher Helligkeitsverlust erkennbar. Nach dem starken Rückgang der Helligkeit in den ersten sechs Monaten schwanken die L\*-Werte innerhalb der PVK jeder Dispersion entsprechend den Wetterbedingungen.

In Ernsthofen stellt sich die Verschmutzung deutlich anders dar. Eine Zuordnung niedrige PVK gleich viel Verschmutzung ist nicht eindeutig herzustellen. Einzelne

Dispersionen zeigen einen gegenläufigen Trend oder die PVK verhalten sich mehr oder weniger ausgeglichen. Bedingt durch den höheren Anteil an Bindemitteln in den niedrigeren PVK ergeben sich auch höhere Helligkeiten, die vor allem in den ersten neun Monaten erhalten blieben. Erst danach setzte vor allem bei den Reinacrylaten der zu erwartende Trendwechsel ein, wenn auch sehr viel weniger stark als in Liederbach. Eine Erklärung könnte der nach neun Monaten steigenden Pilzbewuchs liefern. Dieser würde dann die Helligkeitsentwicklung stärker in Ernthofen als in Liederbach beeinflussen. Durch die 90° Ausrichtung sedimentiert grundsätzlich weniger Schmutz auf die Oberfläche und wird von Niederschlägen zudem weniger stark wieder abgewaschen. Der in den PVK der einzelnen Dispersionen über die Bewitterungsdauer erkennbare Trend zu weniger Helligkeit spiegelt dies wider. Nicht die Verschmutzung bestimmt den L\*-Wert wie in Liederbach, sondern der Bewuchs mit Pilzen.

Dieses Zusammenspiel und der Zusammenhang zwischen Verschmutzung und Pilzbewuchs ist demnach ein wichtiger Aspekt, der nachfolgend eingehender betrachtet wird.

#### 5.2.2. Der L\*-Wert im Hinblick auf den Bedeckungsgrad mit Pilzen

Wenn der L\*-Wert fällt kann also sowohl ein stärkerer Pilzbewuchs als auch eine verstärkte Anschmutzung oder auch beides in Kombination die Ursache sein. Da beide Parameter zum Fallen des L\*-Werts führen können, schließt sich daraus, dass bei fallendem L\*-Wert und gleichzeitig fallendem oder gleich bleibendem Pilzbewuchs nur die Anschmutzung die Ursache sein kann. Der Umkehrschluß, dass bei fallendem L\*-Wert und steigendem Pilzbewuchs die Pilze den Ausschlag geben ist nur bedingt möglich. Hierbei wäre der Abgleich mit einem direkten Anschmutzungsparameter hilfreich, der allerdings nicht vorhanden ist. Der Einfluss des Pilzbewuchses auf die Entwicklung des L\*-Werts ist demzufolge nur eingeschränkt bestimmbar.

Unter bestimmten Bewitterungsbedingungen allerdings kann eine Abschätzung dieses Einflusses vorgenommen werden. Diese Bedingungen beinhalten einen relativ verschmutzungsarmen Bewitterungsstand und eine 90° Ausrichtung der Platten, beides Bedingungen, die in Ernthofen erfüllt waren.

Wird nun eine Korrelationsberechnung zwischen Pilzanzahl und L\*-Wert gemacht, so wird die Korrelation negativ, wenn bei Zunahme des Bewuchses der L\*-Wert geringer wird, steigen oder fallen beide Werte so ist die Korrelation positiv. Eine negative Korrelation ist die zu erwartende Tendenz, da, wie oben bereits angeführt, ein Bewuchs mit Pilzen den L\*-Wert verringern sollte.

Je negativer die Korrelation zwischen Pilzbewuchs und L\*-Wert ist, desto stärker ist die Übereinstimmung zwischen fallendem L\*-Wert und steigendem Pilzbewuchs. Bei den oben genannten verschmutzungsarmen Bedingungen kann dann auf einen stärkeren Einfluss des Pilzbewuchses geschlossen werden.

Die Bedingungen in Liederbach sind aufgrund der 45° Bewitterung sehr viel stärker verschmutzungsanfällig, so dass hier die Korrelationen weniger Gewicht haben, d.h. je stärker der Einfluss von Schmutz ist, desto weniger klar ist die Korrelation.

Durch die 45° Ausrichtung in Liederbach ist die Belastung mit Schmutz so groß, dass der zusätzlich auftretende Pilzbewuchs in der Veränderung des L\*-Wertes keinen Niederschlag findet. Änderungen in der Biomasse der Pilze gehen in der allgemeinen Verschmutzung unter. Sehr prägnant macht sich dies bei der Mowilith LDM 1871 bemerkbar, deren hohe PVK Varianten zwar den stärksten Bewuchs aufweisen, aber auch die höheren, also besseren, L\*-Werte zeigen. Die Korrelation zwischen Pilzbewuchs und L\*-Wert ist daher bei allen Dispersionen wesentlich geringer als in Ernthofen. Neben der sehr oft fehlenden Signifikanz treten auch positive Korrelationen auf, was eigentlich der theoretischen Vorstellung widerspricht. Trotz des stärkeren Bewuchses durch die große Menge allochthoner Nährstoffe wird der L\*-Wert in Liederbach fast ausschließlich durch die Verschmutzung bestimmt.

Für die Platten aus Ernthofen kann der Einfluss des Pilzbewuchses auf den L\*-Wert bei Betrachtung der einzelnen PVK annähernd bestätigt werden. Die Korrelationen sind besser und die Trends der L\*-Werte aller Dispersionen sprechen dafür. Beim Vergleich der Dispersionen hingegen fällt auf, dass die Mowilith LDM 6119 zwar die niedrigsten L\*-Werte aufweist, der Pilzbewuchs hingegen nur schwach ausgeprägt ist. Das Gegenteil findet man bei der Mowilith LDM 7717, nämlich viel Bewuchs aber nur wenig Helligkeitsverlust.

Als Fazit kann man sagen, dass der L\*-Wert nur für die Betrachtung der allgemeinen Verschmutzung verwendet werden kann. Aufgrund der fehlenden Differenzierung zwischen biogenem und nicht biogenem Belag sind Aussagen zum Bedeckungsgrad mit Pilzbewuchs oder über die Anfälligkeit für Bewuchs mit diesem Parameter nicht möglich.

### 5.2.3. ASTM und ISO Bewertung

Wie der Titel der ASTM Norm klarstellt, umfasst der Anwendungsbereich hauptsächlich den Pilz- und Algenbewuchs, bewertet aber auch die nicht biogene Verschmutzung einer Oberfläche. Aufgrund von bei der Bewertung auftretenden Schwierigkeiten in der Unterscheidung zwischen Pilzbewuchs und Verschmutzung wird in der Norm explizit darauf hingewiesen, mit dem Mikroskop eine solche Unterscheidung zwischen mikrobiellem Bewuchs und Verschmutzung zu treffen. Da dies aber trotzdem in der Praxis meist nicht gemacht wird, wurde auch im vorliegenden Fall nur eine rein optische Bewertung vorgenommen.

Im Gegensatz dazu ist die ISO Norm nicht speziell für diesen Zweck entworfen worden. Da in ihr die Evaluierung der Blasenbildung einer Beschichtung beschrieben wird, ist eine Differenzierung in irgendeiner Form nicht nötig. Eine Untersuchung mit dem Mikroskop wird deshalb weder verlangt noch wäre sie angebracht.

Beide Normen sind naturgemäß vor allem in Grenzfällen stark vom subjektiven Eindruck des jeweiligen Bewertenden abhängig. Im Gegensatz dazu wurden die zu bewertenden Parameter auch mit objektiven Methoden bestimmt, so dass ein Vergleich möglich wird.

Grundsätzlich geben natürlich beide Normen den allgemeinen Trend zu mehr Verschmutzung wider. Im Grad der Genauigkeit und der Auflösung zwischen verschiedenen Dispersionen und PVK unterscheiden sie sich allerdings sowohl untereinander als auch im Vergleich zu den objektiveren Methoden.

Die ASTM Norm zeigt eine etwas bessere Differenzierung, da hier das spezifische Aussehen der Verschmutzung und des Pilzbewuchses zugrunde gelegt wurde und deshalb die Auflösung in den relevanten Größenbereichen besser ist. Die ISO Norm hingegen weist mit der Aufteilung in vier Größen- und Mengenklassen in dieser Hinsicht ungünstigere Voraussetzungen auf. Da die eigentlich von dieser Norm

---

bewerteten Blasen auf einer Beschichtung sehr viel größer werden können als Pilzkolonien oder Schmutzablagerungen, ist die Einteilung in den kleinen Größen zu grob. Die bessere Differenzierung ist eher mit der ASTM Norm möglich.

Die Handhabung der ASTM Norm ist etwas einfacher, da nur eine Skala zu beachten ist. Bei der ISO Norm wird durch die Unterscheidung in Größe und Menge immer eine Kombination verlangt, was in manchen Fällen Schwierigkeiten bereiten kann.

Wird die Vorgabe der ASTM Norm zur Unterscheidung zwischen Bewuchs und Schmutz umgesetzt, wird die Handhabung zwar etwas weniger einfach, bietet aber durch diese Unterscheidung weitere Vorteile.

Ein Nachteil bei der Bewertung von Bewitterungsplatten durch diese Normen ist die fehlende Erfassung des Verlaufs der Besiedlung mit Pilzen und Algen. Sukzessionsvorgänge sind nicht oder nur sporadisch erfassbar, da das Auf und Ab der Biomasse und Besiedlungsdichte nur unzureichend dokumentierbar ist. Ohne Zahlenwerte über die Menge an Bewuchs ist eine genauere Erfassung nicht möglich.

Kommt es nur auf die Bewertung einer bewitterten Oberfläche ohne Unterscheidung zwischen Bewuchs und Schmutz an, sind beide Normen einsetzbar, wobei die ASTM Vorteile bietet, da sie für diesen speziellen Zweck entworfen wurde.

## 6. Zusammenfassung

In vorliegender Arbeit wurden Auswirkungen und Einfluss von Art und Menge des eingesetzten Bindemittels auf den Bewuchs mit Mikroorganismen auf Fassadenbeschichtungen untersucht. Dazu wurden fünf Dispersionen in fünf PVK-Stufen an zwei Bewitterungsständen über einen Zeitraum von 31 Monaten bewittert. Während dieses Zeitraumes wurden der Bewuchs mit Pilzen, die Helligkeitsänderungen und weitere sich durch die Exposition verändernde Parameter in zweimonatigen Abständen ermittelt. Dies sollte eine Bewertung der Dispersionen im Hinblick auf den Bewuchs mit Pilzen ermöglichen.

Als Haupteinflussgrößen wurden neben Art und Menge die Eigenschaften der Dispersionsfilme und der daraus hergestellten Beschichtungen, der Wasserhaushalt der Beschichtungen sowie die Standortbedingungen wie Lage und Exposition untersucht und diskutiert.

Die eingesetzten Monomersysteme Vina-Ethylen auf der einen und die Acrylatsysteme auf der anderen Seite unterschieden sich im Pilzbewuchs deutlich. Die Farbe mit Vinylacetat/Ethylen wurde stärker bewachsen als die mit den Acrylatsystemen formulierten. Der Vergleich der Acrylate zeigte, dass der Bewuchs bei unterschiedlichen Copolymeren durchaus gleich sein kann. Der Einfluss der Copolymeren war demnach weniger stark ausgeprägt.

Die durch die Pigment-Volumen-Konzentrationen ausgedrückten unterschiedlichen Mengen an Dispersion zeigten bei allen Bindemitteln mehr Bewuchs mit steigender PVK, also mit abnehmendem Gehalt an Bindemittel. Dabei waren die Unterschiede zwischen den PVK bei der Vinylacetat/Ethylen Dispersion klarer als bei den beiden Acrylatsystemen. Die Ursachen lagen in der sich ändernden Oberflächenstruktur bei Verringerung der Bindemittelmenge.

Die zwei wichtigen Eigenschaften der Dispersionsfilme Härte und Klebrigkeit werden zum großen Teil über die Glasübergangstemperatur  $T_g$  und Mindestfilmbildetemperatur MFT definiert. Neben diesen beiden Werten spielen aber auch weitere Inhaltsstoffe der Dispersion eine Rolle bei der Ausbildung der beiden Parameter Härte und Klebrigkeit. Die reinen Zahlenwerte  $T_g$  und MFT erlaubten deshalb nicht immer eine eindeutige Aussage. Die Vinylacetat/Ethylen Dispersion weist zwar einen weichen und klebrigen Film auf und wurde auch am stärksten bewachsen. Acrylate mit der gleichen  $T_g$  oder MFT hingegen zeigten ein

abweichendes Bewuchsbild. Auch im Vergleich innerhalb der Acrylate waren gleiche Tg oder MFT kein Hinweis auf gleiches Bewuchsverhalten.

Im Wasserhaushalt der Beschichtungen zeigte der sd-Wert einen stärkeren Zusammenhang mit dem Pilzbewuchs als der w-Wert. Bei der Vinylacetat/Ethylen Dispersion waren niedrige sd-Werte mit hohem Bewuchs kombiniert, bei den Acrylaten war die Situation eher weniger differenziert, eventuell ist hier die geringere Wasseraufnahme entscheidender. Die Hydrophobizität der Beschichtungen, bedingt durch die der Bindemittel, hatte keinen Einfluss. Veränderungen dieser Eigenschaft werden eher durch den Bewuchs hervorgerufen als das der Bewuchs Änderungen an der Hydrophobizität verursacht.

Standort und Kleinklima übten Einfluss auf die Artenzusammensetzung und auch die Häufigkeit einzelner Mikroorganismengruppen aus. Die Ausrichtung der Proben war bestimmend für die Menge der abgelagerten Partikel. Aus diesem Grund wurde der Helligkeitsverlust in Liederbach hauptsächlich durch Schmutz bedingt, während in Ernthofen bei 90° Lagerung der Pilzbewuchs die Ursache war.

Will man Bewitterungsplatten in Hinblick auf Pilzbewuchs bewerten, ist die Ausrichtung der Proben entscheidend. Werden diese im 45° Winkel exponiert, verdecken die hohe Schmutzaufgabe und stärker einwirkende Erosion den von der Beschichtung selbst ausgehenden Einfluss.

Sowohl durch rasterelektronenmikroskopische als auch lichtmikroskopische Aufnahmen war ein Angriff auf und Abbau der Beschichtungen durch Pilze nachweisbar. Unterstützt wird dies durch die Verwertbarkeit der Dispersionen als einzige Kohlenstoff-Quelle für Pilze.

Unter mikrobiologischen Gesichtspunkten ist eine Fassadenfarbe mit Vinylacetat/Ethylen als Bindemittel weniger für den Außeneinsatz geeignet.

Obwohl auch Reinacrylate und Styrol-Acrylate durchaus stärker bewachsen werden können, sind sie wesentlich bessere Bindemittel für Fassadenfarben. Unterschiede in den weiteren Bestandteilen innerhalb der Dispersion können zu unterschiedlichem Bewuchserhalten führen, auch wenn das Monomersystem gleich ist. Tests vor einem kommerziellen Einsatz sind also immer angebracht.

## **Summary**

For the present paper the effects and influence of type and amount of binder on the growth of microorganisms on facadepaints have been examined. Thereto five binders in five pvc-steps have been weathered on two sites for 31 months. During this timeframe every two months the growth of fungi, the change in brightness and other parameters have been determined. This should allow an evaluation of the binders in respect to the growth of fungi.

Beside type and amount, the characteristics of the binderfilms and the resulting facadepaints, the water regime of the paints as well as the conditions of the exposure sites have been examined and discussed.

A clear difference regarding the fungal growth occurred between the monomersystems vinylacetate/ethylen and the acrylates. The paint with the vinylacetate/ethylen binder showed a stronger growth than the paint formulated with the acrylates. A comparison between the acrylate systems showed, that the growth on different copolymers could be identical. Therefore, the influence of the colpolmers was less distinct.

All binders showed more growth with increasing pigment-volume-concentration (pvc), i.e. with decreasing amount. The differences between the pvc were more obvious at the vinylacetate/ethylen binder than at the acrylate systems. The reason was the changing surface structure with the decrease of amount of binder.

The two important characteristics of binder films hardness and stickiness are in a large part determined by the glass transition temperature  $T_g$  and the minimum filmforming temperature MFT. Beside this two parameters other ingredients of the binder are important in creating the hardness and stickiness of a binder film. The pure values of  $T_g$  and MFT allow not always a definite predication. Indeed, the vinylacetate/ethylen shows a soft and sticky film and was also covered the most with fungi. But the acrylates with the same  $T_g$  or MFT showed a different growth. Also within the acrylates a similar  $T_g$  or MFT was no clue to a similar growth on the paint.

Concerning the water regime of the paints, the sd-value showed a stronger relation with fungal growth than the w-value. The vinylacetate/ethylen binder combined low sd-values with stronger growth, the acrylates where in this respect less differentiated. Maybe in this case the low water uptake is more decisive. The hydrophobicity of the paint, determined by that of the binder, had no effect on the growth. Changes of this attribute are rather influenced by the growth than vice versa.

Exposure site and microclimate had effects on the species composition and also on the abundance of some groups of microorganisms. The angle of exposure determined the amount of deposited material. Hence, the loss of brightness in Liederbach was mainly caused by dirt accumulation, whereas in Ernsthofen it was caused by fungal growth.

For estimating outdoor exposure samples in respect to fungal growth, the direction of exposure is crucial. Exposing them in a 45° angle, high dirt accumulation and a stronger erosion cover the influence of the coating itself.

Pictures from a scanning electron microscop as well as from a light microscop confirmed the attack on and a degradation of the coatings through fungi. This is supported through the utilisation of the binders as the single carbon source for fungi.

Seen from a microbiological perspective a paint with vinylacetate/ethylen as a binder is less suitable for facade applications. Though even acrylate systems can show a quite good growth of fungi, they are the better binders for facadepaints. Differences in essential ingredients can lead to different growth behavior, even when the monomer systems are similar. Tests prior to a commercial application are always appropriate.

## 7. Literaturverzeichnis

Apitz, G. & T. M. F. Fichtner (2001). Theorie des Fassadenschutzes. Kittel - Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Bd. 3. K.-D. Ledwoch.

Ascaso, C., J. Wierzchos, V. Souza-Egipsy, A. de los Rios & J. D. Rodrigues (2002). "In situ evaluation of the biodeterioration action of microorganisms and the effect of biocides on carbonate rock of the Jeronimos Monastery (Lisbon)." International Biodeterioration and Biodegradation **49**: 1-12.

AWMF (2005). Leitlinien der Dt. Dermatologischen Gesellschaft, der Deutschsprachigen Mykologischen Gesellschaft und des Berufsverbandes der Deutschen Dermatologen : Candidose der Haut ICD: B 37.2, Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften.

Bagda, E. (2002). "Klebrige Fassaden vergrauen schneller." farbe+lack **2**.

Bagda, E. (2002a). "Algen und Pilze." Ausbau & Fassade **4**.

Bagda, E. (2002b). "Algen und Pilze an Fassaden." farbe+lack **6**: 94-107.

Bagda, E. & G. Spindler (2002). "Warum Fassaden vergrauen." farbe+lack **1**.

Bagda, E. & A. Ülgen (2006). "Was hat der Kunde vom Abperleffekt?" farbe+lack **3**.

Bagda, E., G. Wühl-Coutourier & W. Lindner (1999). "Algen und Pilzen auf Fassadenbeschichtungen auf der Spur." farbe+lack **3**.

Bartholemy, H. (2000a). "Die Fassade lebt. Teil 1: Mikrobiologischer Bewuchs auf mineralischen Untergründen einschließlich WDVS." Malerblatt **11**.

Bartholemy, H. (2000b). "Die Fassade lebt. Teil 2: Mikrobiologischer Bewuchs auf Holz und Holzwerkstoffen." Malerblatt **12**.

Bassi, M. & C. Giacobini (2001). "Scanning electron microscopy : a new technique in the study of the microbiology of works of art." International Biodeterioration and Biodegradation **48**: 55-66.

Binkert, G. (2003). "Keine Fassade ist vor Algen oder Pilzen sicher." Applica **3**: 28-29.

Blaich, J. (2003). "Algen auf Fassaden." Applica **3**: 15-25.

Bourne, D. W. A. (2007). Area under the plasma concentration time curve (AUC), <http://www.boomer.org/c/p3/c02/c0210.html>.

Burford, E. P., M. Fomina & G. M. Gadd (2003). "Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals." Mineralogical Magazine **67**(6): 1127-1155.

Chertov, O., A. Gorbushina & B. Deventer (2004). "A model for microcolonial fungi growth on rock surfaces." Ecological Modelling **177**(3): 415-426.

Ciferri, O. (1999). "Microbial degradation of paintings." Applied and Environmental Microbiology **3**: 879-885.

Colon, I., E. L. Kuusisto & K. Hansen (2004). "Freibewitterungsstudie mit diversen Bioziden an unterschiedlichen Standorten in den USA : Standortabhängige Variation der Ergebnisse." Welt der Farben **10**: 18-21.

Cox, H. H. J., B. W. Faber, W. N. M. Van Heinigen, H. Radhoe, H. J. Doddema & W. Harder (1996). "Styrene Metabolism in *Exophiala jeanselmei* and involvement of a cytochrome P-450-dependent Styrene Monooxygenase." Applied and Environmental Microbiology **4**: 1471-1474.

Cox, H. H. J., J. H. M. Houtman, H. J. Doddema & W. Harder (1993). "Growth of the black yeast *Exophiala jeanselmei* on styrene and styrene-related compounds." Applied Microbiological Biotechnology **39**: 372-376.

Crabbe, J. R., J. R. Campell, L. Thompson, S. L. Walz & W. W. Shultz (1994). "Biodegradation of a colloidal ester-based polyurethane by soil fungi." International Biodeterioration & Biodegradation **33**: 103-113.

Crispim, C. A., C. C. Gaylarde & P. M. Gaylarde (2004). "Biofilms on church walls in Porto Alegre, RS, Brazil, with special attention to cyanobacteria." International Biodeterioration & Biodegradation **54**: 121-124.

de Hoog, G. S., J. Guarro, J. Gené & M. J. Figueras (2000). Atlas of Clinical Fungi. Utrecht, Centraalbureau voor Schimmelcultuur, Universitat de Rovira i Virgili.

Diakumaku, E., A. A. Gorbushina, W. E. Krumbein, L. Panina & S. Soukharjevski (1995). "Black fungi in marble and limestones -- an aesthetical, chemical and physical problem for the conservation of monuments." The Science of the Total Environment **167**(1): 295-304.

Domsch, K. H., W. Gams & T. Anderson (1980). Compendium of Soil Fungi. New York, Academic Press.

Dören, K. (1998). Filmbildehilfsmittel. Lackadditive. J. Bieleman. Weinheim, Wiley - VCH Verlag.

Dornieden, T., A. A. Gorbushina & W. E. Krumbein (2000). "Biodecay of cultural heritage as a space/time-related ecological situation - an evaluation of a series of studies." International Biodeterioration and Biodegradation **46**(4): 261-270.

Dörr, H. & F. Holzinger (1989). KRONOS Titandioxid in Dispersionsfarben. Leverkusen, KRONOS Titan GmbH.

English, S. E., S. Fjelde, M. Greenhalgh, R. W. McCabe, T. McKenna, L. H. G. Morton, B. Schmidt & I. Sherrington (2003). "Laboratory and field studies on thin paint film." International Biodeterioration & Biodegradation **52**: 247-253.

- Erfurth, U. (2002). "Mit Gift in die Sackgasse." Applica **19**: 8-12.
- Erfurth, U. (2004). "Der Feuchtehaushalt von Fassadenbeschichtungen." Applica **23-24**.
- Ezeonu, I. M., J. A. Noble, R. B. Simmons, D. L. Price, S. A. Crow & D. G. Ahearn (1994). "Effect of relative humidity on fungal colonisation of fiberglass insulation." Applied and Environmental Microbiology **6**: 2149-2151.
- Fachgruppe Putz & Dekor im Verband der deutschen Lackindustrie e.V. (2007). „CIELAB-System.“ Fachlexikon Putze und Beschichtungen, Wiesbaden
- Fitz, C., W. K. Hofbauer & M. Krus (2006). Mikrobielles Wachstum auf Fassaden - Ergebnisse einer mehrjährigen kontrollierten Freilandexposition. Algen auf Fassaden 6. Dahlberg-Kolloquium, Wismar, Verlag Bauwesen, HUSS.Medien, Berlin.
- Garg, K. L., K. K. Jain & A. K. Mishra (1995). "Role of fungi in the deterioration of wall paintings." The science of the total environment **167**: 255-271.
- Gaylarde, C. C. & P. M. Gaylarde (2005). "A comparative study of the major microbial biomass of biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America." International Biodeterioration and Biodegradation **55**(2): 131-139.
- Gaylarde, P. M. & C. C. Gaylarde (2000). "Algae and cyanobacteria on painted building in Latin America." International Biodeterioration & Biodegradation **46**: 93-97.
- Gerthsen, C., H. O. Kneser & H. Vogel (1989). Physik. Berlin Heidelberg New York, Springer Verlag.
- Gillatt, J. (1990). "The Biodeterioration of polymer emulsions and its prevention with biocides." International Biodeterioration **26**: 205-216.
- Gillatt, J. W. (1991). "The need for antifungal and anti-algal additives in high performance surface coatings." JOCCA **6**.
- Gogoll, W. (1984). "Pilze an Fassaden." Die Mappe, Sonderdruck **12**.
- Gorbushina, A. A. (2007). "Life on the Rocks." Environmental Microbiology **9**(7): 1613-1631.
- Gorbushina, A. A., A. Beck & A. Schulte (2005). "Microcolonial rock inhabiting fungi and lichen photobionts: evidence for mutualistic interactions." Mycological Research **109**(11): 1288-1296.
- Gorbushina, A. A., J. Heyrman, T. Dornieden, M. Gonzalez-Delvalle, W. E. Krumbein, L. Laiz, K. Petersen, C. Saiz-Jimenez & J. Swings (2004). "Bacterial and fungal diversity and biodeterioration problems in mural painting environments of St. Martins church..." International Biodeterioration and Biodegradation **53**(1): 13-24.

- Gorbushina, A. A. & W. E. Krumbein (2005). Role of microorganisms in wear down of rocks and minerals. Soil Biology. Microorganisms in Soil: Role in Genesis and Functions. F. Buscot & A. Varma. Berlin, Springer Verlag. **3**: 59-84.
- Gorbushina, A. A., W. E. Krumbein, C. H. Hamman, L. Panina, S. Soukharjevski & U. Wollenzien (1993). "Role of Black Fungi in Color Change and Biodeterioration of antique marbles." Geomicrobiology Journal **11**: 205-221.
- Gorbushina, A. A., W. E. Krumbein & M. Volkmann (2002). "Rock surfaces as life indicators : new ways to demonstrate life and traces of former life." Astrobiology **2**(2): 203-213.
- Gorbushina, A. A., N. N. Lyalikova, D. Y. Vlasov & T. V. Khizhnyak (2002). "Microbial Communities on the Monuments of Moscow and St. Petersburg: Biodiversity and Trophic Relations." Microbiology **71**(3): 350-356.
- Gorbushina, A. A. & K. A. Palinska (1999). "Biodeteriorative processes on glass:experimental proof of the role of fungi and cyanobacteria." Aerobiologia **15**: 183-191.
- Gorbushina, A. A. & K. Petersen (2000). "Distribution of microorganisms on ancient wall paintings as related to associated faunal elements." International Biodeterioration & Biodegradation **46**: 277-284.
- Grant, C., C. A. Hunter, B. Flannigan & A. F. Bravery (1989). "The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings." International Biodeterioration **25**: 259-284.
- Gu, J.-D. (2003). "Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials : recent research advances." International Biodeterioration & Biodegradation **52**: 69-91.
- Heaton, P., M. E. Callow, G. M. Butler & A. Milne (1991). "Control of mould growth by anti-fungal paints." International Biodeterioration **27**: 163-173.
- Herrera, L. K. & H. A. Videla (2004). "The importance of atmospheric effects on biodeterioration of cultural heritage constructional materials." International Biodeterioration & Biodegradation **54**: 125-134.
- Heyn, C. (2002). Mikrobieller Angriff auf synthetische Polymere-Untersuchungen im Rahmen der Denkmalpflege. Doktorarbeit. Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg.
- Heyn, C., K. Häfner, W. E. Krumbein & K. Petersen (1996). "Synthetische Polymere für die Festigung von Wandmalereien?" Restaurio **4**: 254-259.
- Heyn, C., K. Petersen & W. E. Krumbein (1996). "Untersuchungen zum mikrobielle Abbau in der Denkmalpflege eingesetzter synthetischer Polymere." Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **1**: 87-105.
- Hladik, M. (2003). "Langfristig mangelfrei." Die Mappe **5**.

Hofbauer, W. K., K. Breuer, C. Fitz & K. Sedlbauer (2006). Mikrobielles Wachstum auf Fassaden - Biologische Zusammenhänge und Grundlagen. Algen auf Fassaden 6. Dahlberg-Kolloquium, Wismar, Verlag Bauwesen, HUSS.Medien, Berlin.

Hofbauer, W. K., K. Breuer & K. Sedlbauer (2003). "Algen, Flechten, Moose und Farne auf Fassaden." Bauphysik **25**(6): 383-396.

Hoffland, E., T. W. Kuyper, H. Wallander, C. Plassard, A. A. Gorbushina, K. Haselwandter, S. Holmström, R. Landeweert, U. S. Lundström, A. Rosling, R. Sen, M. M. Smits, P. A. W. van Hees & N. van Breemen (2004). "The role of fungi in weathering." Front Ecol Environ **2**: 258-264.

Horvath, R. S., M. M. Brent & D. G. Cropper (1976). "Paint deterioration as a result of the growth of *Aureobasidium pullulans* on wood." Applied and Environmental Microbiology **10**: 505-507.

Kaffenberg, T. H., G. Turpitz & P. Baur (1998). Idee Farbe : die wichtigsten Farbordnungssysteme. Kittel-Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen Band 1. K.-D. Ledwoch. Stuttgart Leipzig, Hirzel.

Kaplan, D. L., R. Hartenstein & J. Sutter (1979). "Biodegradation of polystyren, poly(methylmethacrylat) and phenol formaldehyde." Applied and Environmental Microbiology **9**: 551-553.

Kastien, H. (2003). "Algen und Pilze im Brennpunkt der Diskussion." Applica **3**: 30-34.

Kastien, H. & H.-P. Sutter (1992). "Der quantitative mikrobiologische Abbau von Lackkunstharzen und Polymerdispersionen." farbe+lack **7**: 505-508.

Kelley, J. & P. A. Yaghmaie (2001). "Screening of fungal strains employed in the testing of plastic materials." International Biodeterioration & Biodegradation **48**: 84-93.

Kinzelbach, R. (1989). Ökologie, Naturschutz, Umweltschutz. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Klug, T. (2003). "Von der Konjunktur der Algen und der Biozide." Applica **3**: 37-38.

Krumbein, W. E., C. Urzi & C. Gehrman (1991). "On the biocorrosion and biodeterioration of antique and medieval glass." Geomicrobiological Journal **9**: 139-160.

Krus, M. & C. Fitz (2005). "Beeinflussung der Oberflächenfeuchte zur Vermeidung von Algenbewuchs." applica **9**: 6-9.

Krus, M., D. Rösler & K. Sedlbauer (2006). Mikrobielles Wachstum auf Fassaden - Hygrothermische Modellierung. Algen auf Fassaden 6. Dahlberg-Kolloquium, Wismar, Verlag Bauwesen, HUSS.Medien, Berlin.

- Künzel, H. M. (2000). Algen-Pilze-Flechten-Moose an Gebäudefassaden. Mitteilungen des Bundesverbandes der Deutschen Mörtelindustrie. **Information Edelputz**.
- Künzel, H. M., M. Krus & K. Sedlbauer (2001). Algen auf Außenwänden-Bauphysik als Ursache? Bauphysik als Lösung! 3. Dahlberg Kolloquium, Wismar.
- Künzel, H. M. & K. Sedlbauer (2001). "Algen auf Wärmedämm-Verbundsystemen." IBP-Mitteilung **382**(28).
- Kuropka, R. (1998). Anwendungen in der Anstrich und Lackindustrie. Wäßrige Polymerdispersionen - Synthese, Eigenschaften, Anwendungen. D. Distler. Weinheim, Wiley-VCH Verlag: 99-124.
- Leonhardt, H. (1990). Histologie, Zytologie und Mikroanatomie des Menschen. Taschenbuch der gesamten Anatomie, Band 3. Stuttgart, New York, Georg Thieme Verlag.
- Lugauskas, A., L. Levinskaitė & D. Peciulytė (2003). "Micromycetes as deterioration agents of polymeric materials." International Biodeterioration & Biodegradation **52**: 233-242.
- Mattila, K., L. Carpen, T. Hakkarainen & M. S. Salkinoja-Salonen (1997). "Biofilm development during ennoblement of stainless steel in baltic water : a microscopic study." International Biodeterioration & Biodegradation **40**: 1-10.
- Mattila, K., L. Carpen, L. Raaska, H.-L. Alakomi, T. Hakkarainen & M. S. Salkinoja-Salonen (2000). "Impact of biological factors on the ennoblement of stainless steel in baltic seawater." Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology **24**: 410-420.
- May, E., S. Papida, H. Abdulla, S. Tayler & A. Dewedar (2000). Comparative Studies of Microbial Communities on Stone Monuments in Temperate and Semi-Arid Climates. Of Microbes and Art: The role of Microbial Communities on the Degradation and Protection of Cultural Heritage, Florence, Italy 17-19.06.1999, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York.
- Mitchell, R. & J.-D. Gu (2000). "Changes in the biofilm microflora of limestone caused by atmospheric pollutants." International Biodeterioration & Biodegradation **46**: 299-303.
- Morton, L. H. G. & S. B. Surmann (1994). "Biofilms in biodeterioration." International Biodeterioration & Biodegradation **31**: 203-221.
- Müller, E. & W. Loeffler (1982). Mykologie, Grundriss für Naturwissenschaftler und Mediziner. Stuttgart, New York, Thieme Verlag.
- Nay, M. (2002). "Kann Wachstum von Algen und Pilzen an wärmegeämmten Fassaden verhindert werden?" Bauphysik **24**(1): 39-40.
- Nay, M. & P. Raschle (2003). "Algen und Pilze an Fassaden im Blickwinkel der Forschung." Applica **3**: 7-12.

Nielsen, K. F., G. Holm, L. P. Uttrup & P. A. Nielsen (2004). "Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism." International Biodeterioration & Biodegradation **54**: 325-336.

Noffke, N. (2003). Epibenthic cyanobacterial Communities interacting with sedimentary Processes in siliciclastic Depositional Systems (Present and Past). Fossil and Recent Biofilms - A Natural History of Life on Earth. W. E. Krumbein, D. M. Paterson & G. A. Zavarzin. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers: 265-280.

Norm ASTM D 3274-95 "Standard Test method for evaluating degree of surface disfigurement of paint films by microbial (fungal or algal) growth or soil and dirt accumulation."

Norm DIN EN 971-1 (1995). Fachausdrücke und Definitionen für Beschichtungsstoffe-Teil 1: Allgemeine Begriffe.

Norm DIN EN 971-2 (1995). Fachausdrücke und Definitionen für Beschichtungsstoffe-Teil 2: Spezielle Fachausdrücke für Merkmale und Eigenschaften.

Norm DIN EN 1062-1 (8/2004).

Norm DIN EN 1062-3 (1998). Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich-Teil 3: Bestimmung und Einteilung der Durchlässigkeitsrate für flüssiges Wasser (Permeabilität).

Norm DIN EN ISO 4628-2 (3/2003).

Norm DIN EN ISO 7783-2 (1999). Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für mineralische Untergründe und Beton im Außenbereich-Teil 2: Bestimmung und Einteilung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte (Permeabilität).

Norm EN ISO 4618-1 (2001a). Beschichtungsstoffe - Fachausdrücke und Definitionen - Teil 1: Allgemeine Begriffe.

Norm EN ISO 4618-4 (2001b). "Lacke und Anstrichstoffe - Fachausdrücke und Definitionen für Beschichtungsstoffe - Teil 4 : Fachausdrücke für Rohstoffe."

O'Neill, T. B. (1988). "Succession and interrelationships of microorganisms on painted surfaces." International Biodeterioration **24**: 373-379.

Öchsner, W. P., B. Bergk, E. Fischer & K. Gaszner (2005). "Wasseraufnahme von Beschichtungen." farbe+lack **7**.

Pitzurra, L., B. Moroni, A. Nocentini, G. Sbaraglia, G. Poli & F. Bistoni (2003). "Microbial growth and air pollution in carbonate rock weathering." International Biodeterioration and Biodegradation **52(2)**: 63-68.

Reid, P., C. D. Dupraz, P. T. Visscher & D. Y. Sumner (2003). Microbial Processes forming marine Stromatolithes - Microbe-Mineral Interactions with a Three-Billion-Year Rock Record. Fossil and Recent Biofilms - A Natural History of Life on Earth. W. E. Krumbein, D. M. Paterson & G. A. Zavarzin. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers: 103-118.

Rodenacker, K., M. Hausner & A. A. Gorbushina (2003). Quantification and spatial relationship of microorganisms in sub-aquatic and sub-aerial biofilms. Fossil and Recent Biofilms - A Natural History of Life on Earth. W. E. Krumbein, D. M. Paterson & G. A. Zavarzin. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers: 387-399.

Saad, D. S., G. C. Kinsey, S. Kim & C. C. Gaylarde (2004). "Extraction of genomic DNA from filamentous fungi in biofilms on water-based paint coatings." International Biodeterioration & Biodegradation **54**: 99-103.

Sachs, L. (2003). Angewandte Statistik. Berlin Heidelberg New York, Springer Verlag.

Saiz-Jimenez, C. (1997). "Biodeterioration vs Biodegradation : the role of microorganisms in the removal of pollutants deposited on historic buildings." International Biodeterioration & Biodegradation **40**: 225-232.

Saiz-Jimenez, C., X. Arino & J. J. Ortega-Calvo (1995). Mechanisms of stone deterioration by photosynthesis-based epilithic biofilms. Interactive physical weathering an bioreceptivity study on building stones, monitored by Computerized X-Ray Tomography (CT) as a potential non destructive research tool. M. De Cleene. Gent, Science Information Office, University of Gent: 25-62.

Saiz-Jimenez, C., J. J. Ortega-Calvo & J. W. de Leeuw (1995). "The chemical structure of fungal melanins and their possible contribution to black stains in stone monuments." The science of the total environment **167**: 305-314.

Schmid, E. V. (1994). Außenanstriche im Hochbau. Wiesbaden, Bauverlag GmbH.

Schumann, R. & C. Messal (2002). "Die Spuren der Sporen. Mikroalgen auf Häuserfassaden-bauphysikalische und biologische Betrachtungen." B+B **5**: 27-31.

Sedlbauer, K. (2002). "Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen." Bauphysik **24**(3): 167-176.

Shirakawa, M. A., C. C. Gaylarde, P. M. Gaylarde, V. M. John & W. Gambale (2002). "Fungal colonization and succession on newly painted buildings and the effect of biocide." FEMS Microbiology Ecology **39**: 165-173.

Shirakawa, M. A., V. M. John, C. C. Gaylarde, P. M. Gaylarde & W. Gambale (2004). "Mould and phototroph growth an masonry facades after repainting." Materials and Structures **37**: 472-479.

Sigma-Aldrich (2003). Perjodsäure-Schiff (PAS) Färbesystem. Verfahren Nr. 395.

- Sterflinger, K. (1998). "Temperature and NaCl-tolerance of rock-inhabiting meristematic fungi." Antonie van Leeuwenhoek **74**: 271-281.
- Sterflinger, K. (2000). "Fungi as geologic agents." Geomicrobiology Journal **17**: 97-124.
- Sterflinger, K. & H. Prillinger (2001). "Molecular taxonomy and biodiversity of rock fungal communities in an urban environment (Vienna, Austria)." Antonie van Leeuwenhoek **80**: 275-286.
- Streit, B. (1994). Ökologie kurzgefaßt. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, BI-Taschenbuchverlag.
- Verrecchia, E. P., C. Loisy, O. Braissant & A. A. Gorbushina (2003). The Role of Fungal Biofilms and Networks in the terrestrial Calcium Carbonate Cycle. Fossil and Recent Biofilms - A Natural History of Life on Earth. W. E. Krumbein, D. M. Paterson & G. A. Zavarsin. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers: 363-369.
- Völz, H. G. (1990). Industrielle Farbprüfung : Grundlagen und Methoden. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft mbH.
- von Arx, J. A. (1981). The Genera of Fungi Sporulating in Pure Culture. Vaduz, Gantner Verlag.
- von Werder, J., L. Koss, N. Lesnych & H. Venzmer (2006). Biofilme auf Fassadenbaustoffen - Forschung an der Hochschule Wismar. Algen auf Fassaden 6. Dahlberg-Kolloquium, Wismar, Verlag Bauwesen, HUSS.Medien, Berlin.
- Wainwright, M., T. A. Ali & F. Barakah (1993). "A Review of the role of oligotrophic microorganisms in biodeterioration." International Biodeterioration & Biodegradation **31**: 1-13.
- Warscheid, T. & J. Braams (2000). "Biodeterioration of stone: a review." International Biodeterioration and Biodegradation **46**(4): 343-368.
- Webb, J. S., M. Nixon, I. M. Eastwood, M. Greenhalgh, G. D. Robson & P. S. Handley (2000). "Fungal colonization and biodeterioration of plasticized polyvinyl chloride." Applied and Environmental Microbiology **8**: 3194-3200.
- Wee, Y. C. (1988). "Growth of Algae on exterior painted masonry surfaces." International Biodeterioration **24**: 367-371.
- Wegener, H. (1989). Physik für Hochschulanfänger. Stuttgart, Teubner Verlag.
- Whiteley, P. (1966). "The occurrence and control of mould and algal growth on paint films." Society of Chemical Industry Monograph **23**: 161-169.
- Wicki, N. (2002). "Algen und Pilze an wärmegeämmten Fassaden." Applica **23-24**: 15-19.

Wiese, H. (1999). Eigenschaften von Polymerdispersionen und Meßmethoden. Wässrige Polymerdispersionen - Synthese, Eigenschaften, Anwendungen. D. Distler. Weinheim, Wiley-VCH Verlag.

Wikipedia (2007). Area under the Curve, "[http://en.wikipedia.org/wiki/Area\\_under\\_the\\_curve](http://en.wikipedia.org/wiki/Area_under_the_curve)".

Winters, H., I. R. Isquith & M. Goll (1975). "A study of the ecological succession in biodeterioration of a Vinyl acrylic Paint film." Developments in Industrial Microbiology **17**: 167-171.

Wollenzien, U., G. S. de Hoog, W. E. Krumbein & C. Urzı (1995). "On the isolation of microcolonial fungi occurring on and in marble and other calcareous rocks." The science of the total environment **167**: 287-294.

Wroblewski, N., S. Bär & P. Mayser (2005). "Missing granulocytic infiltrate in pityriasis versicolor - indication of specific anti-inflammatory activity of the pathogen?" Mycoses **48**(s1): 66-71.

Zinsmeister, K. (2002). "Grüne Welle? Zunehmender Algen- und Pilzbewuchs an Fassaden." Der Maler und Lackierermeister **10**: 44-48.

Zonnevillje, F. (1998). Chemische Grundlagen der Lack und Beschichtungen - Zusammensetzung von Beschichtungsstoffen. Lehrbuch der Lacke und Beschichtungen, Bd. 1. K.-D. Ledwoch. Stuttgart, Hirzel Verlag: 63-149.

## 8. Anhang

### Abbildungsverzeichnis

- Abb. 01 : Bestandteile von Beschichtungsstoffen, Einleitung, S.4
- Abb. 02 : Teilchengrößenverteilung verschiedener Dispersionen, Einleitung , S.8
- Abb. 03 : Schematische Darstellung der Filmbildung nach Apitz & Fichtner 2001, Einleitung, S.12
- Abb. 04 : Schematische Darstellung der PVK und KPVK von Beschichtungen, Einleitung, S.16
- Abb. 05 : Grafische Darstellung der Farbachsen des CIE-LAB Systems, Einleitung, S.27
- Abb. 06 : Bewitterte Platte aus Liederbach, Material, S.37
- Abb. 07 : Luftaufnahme des Bewitterungsstandes in Ernsthofen, Material, S.38
- Abb. 08 : Plattenanordnung in Ernsthofen, Material, S.39
- Abb. 09 : Luftaufnahme des Bewitterungsstandes in Liederbach, Material, S.39
- Abb. 10 : Plattenanordnung in Liederbach, Material, S.40
- Abb. 11 : Schablone zum Auszählen der Pilzkolonien auf bewitterter Platten aus Ernsthofen, Methoden, S.42
- Abb. 12 : Grafische Darstellung der AUC, Methoden, S.45
- Abb. 13 : Messpunkte auf den Platten, Methoden, S.57
- Abb. 14 : Kategorien der Norm ASTM D 3274-95, Methoden, S.623
- Abb. 15 : Kategorien der Norm EN ISO 4628-2:2003, Methoden, S.63
- Abb. 16 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 1871, Ergebnisse, S.66
- Abb. 17 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 6119, Ergebnisse, S.67
- Abb. 18 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7729, Ergebnisse, S.67
- Abb. 19 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith DM 611, Ergebnisse, S.68
- Abb. 20 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7717, Ergebnisse, S.68
- Abb. 21 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 1871, Ergebnisse, S.70
- Abb. 22 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 6119, Ergebnisse, S.70
- Abb. 23 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7729, Ergebnisse, S.71
- Abb. 24 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith DM 611, Ergebnisse, S.71
- Abb. 25 : Verlauf des Pilzbewuchses auf Mowilith LDM 7717, Ergebnisse, S.72
- Abb. 26 : AUC Werte Ernsthofen, Ergebnisse, S.74
- Abb. 27 : AUC Werte Liederbach, Ergebnisse, S.74

- Abb. 28 : Grafische Darstellung der Biomassezunahme *A. pullulans*, Ergebnisse, S.83
- Abb. 29 : Grafische Darstellung der Biomassezunahme *C. cladosporioides*, Ergebnisse, S.84
- Abb. 30 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 45, Ergebnisse, S. 100
- Abb. 31 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 50, Ergebnisse, S. 101
- Abb. 32 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 55, Ergebnisse, S. 101
- Abb. 33 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 60, Ergebnisse, S. 101
- Abb. 34 : Grafische Darstellung der Anteile an roten Pixeln auf den Fotos für PVK 65, Ergebnisse, S. 102
- Abb. 35 : Mowilith LDM 7729 PVK 55 Liederbach ungefärbt 100x, Ergebnisse, S.103
- Abb. 36 : Mowilith LDM 7729 PVK 55 Liederbach gefärbt 100x, Ergebnisse, S.103
- Abb. 37 : Mowilith LDM 7717 PVK 55 Liederbach ungefärbt 200x, Ergebnisse, S.104
- Abb. 38 : Mowilith LDM 7717 PVK 55 Liederbach gefärbt 200x, Ergebnisse, S.105
- Abb. 39 : Grafische Darstellung der L\*-Werte Ernsthofen, Ergebnisse, S.106
- Abb. 40 : Grafische Darstellung der L\*-Werte Liederbach, Ergebnisse, S.108
- Abb. 41 : Grafische Darstellung der L\*-Wert-Verlusten Ernsthofen und Liederbach, Ergebnisse, S.111
- Abb. 42 : Grafische Darstellung des L\*-Wert-Gesamtverlusts Ernsthofen und Liederbach, Ergebnisse, S.111
- Abb. 43 : Grafische Darstellung der sd-Werte der Testbeschichtungen, Ergebnisse, S.114
- Abb. 44 : Grafische Darstellung der w-Werte der Testbeschichtungen, Ergebnisse, S.115
- Abb. 45 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 1871 Ernsthofen, Ergebnisse, S.117
- Abb. 46 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 6119 Ernsthofen, Ergebnisse, S.117

Abb. 47 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7729 Ernsthofen, Ergebnisse, S.118

Abb. 48 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith DM 611 Ernsthofen, Ergebnisse, S.119

Abb. 49 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7717 Ernsthofen, Ergebnisse, S.119

Abb. 50 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7717 Liederbach, Ergebnisse, S.121

Abb. 51 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 6119 Liederbach, Ergebnisse, S.122

Abb. 52 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7729 Liederbach, Ergebnisse, S.122

Abb. 53 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith DM 611 Liederbach, Ergebnisse, S.123

Abb. 54 : Grafische Darstellung der ASTM-Werte Mowilith LDM 7717 Liederbach, Ergebnisse, S.124

#### Bildtafeln

Tafel 1 : Formen von auf den Platten gefundenen Kolonien, Material, S. 43

Tafel 2 : PAS Färbung Mowilith LDM 1871 PVK 45 Liederbach, Methoden, S. 54

Tafel 3 : LM Aufnahmen LDM 1871, Ergebnisse, S. 88

Tafel 4 : LM Aufnahmen LDM 6119, Ergebnisse, S. 89

Tafel 5 : REM Aufnahmen LDM 1871, Ergebnisse S. 92

Tafel 6 : REM Aufnahmen LDM 6119, Ergebnisse S. 93

Tafel 7 : REM Aufnahmen LDM 7729, Ergebnisse S. 94

Tafel 8 : REM Aufnahmen DM 611, Ergebnisse S. 95

Tafel 9 : REM Aufnahmen LDM 7717, Ergebnisse S. 96

#### Gleichungsverzeichnis

Gleichung 01 : Berechnung der Pigment-Volumen-Konzentration, Einleitung, S.14

Gleichung 02 : Berechnung des  $\Delta L^*$ -Werts, Einleitung, S.28

Gleichung 03 : Berechnung des  $\Delta E^*$ -Werts, Einleitung, S.28

Gleichung 04 : Berechnung der PVK, Material, S.35

Gleichung 05 : Beispiel für die Berechnung der PVK, Material, S.35

- Gleichung 06 : AUC Flächenberechnung, Methoden, S.45  
Gleichung 07 : Berechnung der AUC Differenz, Methoden, S.46  
Gleichung 08 : Berechnung des Konfidenzintervalls, Methoden, S.46  
Gleichung 09 : Berechnung der Stärke der I.A. ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten  $r$ , Methoden, S.59  
Gleichung 10 : Berechnung der Art der I.A. ausgedrückt durch den Regressionskoeffizienten  $b$ , Methoden, S.59

### Tabellenverzeichnis

- Tab. 01 : Partikelverteilung (verändert nach Bagda & Spindler 2002), Einleitung, S.25  
Tab. 02 : Parameter Mowilith LDM 1871, Material, S.31  
Tab. 03 : Parameter Mowilith LDM 6119, Material, S.32  
Tab. 04 : Parameter Mowilith LDM 7729, Material, S.32  
Tab. 05 : Parameter Mowilith DM 611, Material, S.33  
Tab. 06 : Parameter Mowilith LDM 7717, Material, S.33  
Tab. 07 : Für die Tests verwendete Richtrezeptur L3025 FAI, Material, S.34  
Tab. 08 : Parameter für die Berechnung der PVK, Material, S.35  
Tab. 09 : Nassmengen der Dispersionen, Material, S.35  
Tab. 10 : Rezeptur L7071 SAI für die Kanten- und Rückseitenabdichtung der Platten, Material S. 36  
Tab. 11 : Rezeptur G703 für die Grundierung der Platten, Material, S. 37  
Tab. 12 : Zur Isolation der Organismen verwendete Medien, Methoden, S. 47  
Tab. 13 : Anleitung zur PAS Präparation, Methoden, S. 56  
Tab. 14 : KBE Pilze pro  $\text{cm}^2$  Ernthofen, Ergebnisse, S.65  
Tab. 15 : KBE Pilze pro  $\text{cm}^2$  Liederbach, Ergebnisse, S.69  
Tab. 16 : AUC Werte der Platten, Ergebnisse, S.73  
Tab. 17 : AUC-Differenzen PVK Ernthofen, Ergebnisse, S.75  
Tab. 18 : AUC-Differenzen Dispersionen Ernthofen, Ergebnisse, S.77  
Tab. 19 : AUC-Differenzen PVK Liederbach, Ergebnisse, S.78  
Tab. 20 : AUC-Differenzen Dispersionen Liederbach, Ergebnisse, S.78  
Tab. 21 : Von den Platten isolierte Arten, Ergebnisse, S.79  
Tab. 22 : Anzahl pro  $\text{cm}^2$  für determinierte Arten Ernthofen (rot) und Liederbach (blau), Ergebnisse, S.80

- 
- Tab. 23 : Biomassezunahme bei *A. pullulans*, Ergebnisse, S.83
- Tab. 24 : Biomassezunahme *C. cladosporioides*, Ergebnisse, S.84
- Tab. 25 : Längenwachstum auf Festmedien, Ergebnisse, S.85
- Tab. 26 : Flächenausdehnung der betrachteten Kolonien, Ergebnisse, S.87
- Tab. 27 : Längenzuwachs der betrachteten Kolonien, Ergebnisse, S.87
- Tab. 28 : Wetterdaten im Beobachtungszeitraum Februar 04 – August 04, Ergebnisse, S.91
- Tab. 29 : Prozentuale Anteile an gefärbten Pixels auf den Fotos der PAS-Färbung, Ergebnisse, S.100
- Tab. 30 : L\*-Werte Ernsthofen, Ergebnisse, S.106
- Tab. 31 : L\*-Werte Liederbach, Ergebnisse, S.107
- Tab. 32 : Glanzgrade Ernsthofen, Ergebnisse, S.109
- Tab. 33 : Glanzgrade Liederbach, Ergebnisse, S.110
- Tab. 34 : L\*-Wert Verlustraten Ernsthofen und Liederbach, Ergebnisse, S.110
- Tab. 35: Korrelations- und Regressionswerte L\*-Werte und Pilzanzahl/cm<sup>2</sup> Ernsthofen und Liederbach, Ergebnisse, S.113
- Tab. 36 : Sd-Werte der Testbeschichtungen, Ergebnisse, S.114
- Tab. 37 : w-Werte der Testbeschichtungen, Ergebnisse, S.115
- Tab. 38 : Korrelationen zwischen AUC Ernsthofen und sd- bzw. w-Werte der Beschichtungen, Ergebnisse, S.116
- Tab. 39 : Wasseraufnahme der freien Dispersionsfilme, Ergebnisse, S. 116
- Tab. 40 : ISO Bewertungen Ernsthofen, Ergebnisse, S.120
- Tab. 41 : ISO Bewertungen Liederbach, Ergebnisse, S.125
- Tab. 42 : Randwinkel der Beschichtungen unbewittert, Ernsthofen, Liederbach, Ergebnisse, S.126
- Tab. 43 : Zusammenfassung wichtiger Dispersionseigenschaften, Diskussion, S.134

### Danksagung

Für die Übernahme der Betreuung und der damit verbundene Ermöglichung der Durchführung einer externen Dissertation möchte ich ganz besonders Fr. PD Dr. habil. Anna A. Gorbushina und H. Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Wolfgang E. Krumbein danken. Ohne diese Übernahme wäre die ganze Arbeit nicht möglich gewesen.

Für die Betreuung am Rasterelektronenmikroskop und die Durchführung einiger Präparationen gilt mein Dank Fr. Renate Kort aus der Arbeitsgruppe Geomikrobiologie.

H. Karsten Rodenacker möchte ich für die Erstellung und Berechnungen der Bedeckungsgrade bei der PAS-Färbung danken.

Bei folgenden Kollegen der Celanese Emulsions GmbH möchte ich mich für die Ermöglichung und Unterstützung der Arbeit bedanken.

H. Dr. Rolf Kuroпка für die Bereitstellung der Dispersionen und Richtrezepturen, H. Dr. Stephan Krieger und H. Thomas Fichtner für wichtige Informationen und Tipps im Bereich der Dispersionen sowie H. Ralf Stürmer für die Betreuung der Bewitterungsplatten auf dem Stand in Liederbach.

Mein Dank für wichtige Hinweise und Tipps in Sachen Statistik geht an H. Prof. Dr. Dr. Stefan Wellek.

H. Dr. Thomas Brenner (Deutsche Amphibolin Werke, Ober-Ramstadt) und H. Dr. Dirk Then (Dr. Robert-Murjahn-Institut, Ober-Ramstadt) möchte ich für die Diskussionen und Anregungen im Verlauf der Arbeit bedanken.

H. Reinhardt Michel (Dr. Robert-Murjahn-Institut, Ober-Ramstadt) möchte ich für die Durchführung der w- und sd-Wert Bestimmungen danken.

# DIPL. - BIOL. MICHAEL MEDER

## PERSÖNLICHE ANGABEN

---

- Familienstand: ledig
- Staatsangehörigkeit: deutsch
- Geburtsdatum: 25.10.1964
- Geburtsort: Darmstadt

## AUSBILDUNG

---

- |             |                                                                                                                                              |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1981 – 1984 | Berufsausbildung zum Chemiefacharbeiter bei den Deutschen Amphibolin Werken (DAW) in Ober-Ramstadt                                           |
| 1986 – 1988 | Ausbildung zum REFA-Sachbearbeiter                                                                                                           |
| 1987 – 1990 | Besuch des Abendgymnasiums Darmstadt zur Erlangung der allgemeinen Hochschulreife                                                            |
| 1991 – 1993 | Grundstudium der Biologie an der Technischen Hochschule Darmstadt                                                                            |
| 1993 – 1995 | Hauptstudium an der TH Darmstadt, Fachrichtung Zoologie                                                                                      |
| Dez 1995    | Diplomprüfung in den Fächern Zoologie, Ökologie, Immunologie, Geologie<br>Gesamtnote : sehr gut                                              |
| 1996        | Diplomarbeit am Hessischen Landesmuseum in Darmstadt<br>Thema : Serologische Untersuchungen am <i>Vipera xanthina</i> -Komplex<br>Note : gut |

## BESCHÄFTIGUNGSVERHÄLTNISSE

---

- |             |                                                                                                          |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1984 – 1991 | verschiedene Tätigkeiten in Labor, Produktion und Verwaltung bei den DAW                                 |
| 1997 – 1999 | Tätigkeit als REFA-Sachbearbeiter bei den DAW                                                            |
| ab 2000     | Tätigkeit als Leiter des mikrobiologischen Labors und verantwortlich für die Betriebshygiene bei den DAW |

## INTERESSEN

---

Reisen, Lesen, Sport, Musik, Fotografie, Billard

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine eigene Unterschrift, daß ich die vorstehende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen genommen sind, als solche kenntlich gemacht habe. Die Versicherung bezieht sich auch auf in der Arbeit gelieferte Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Die Arbeit war in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung.

---

Michael Meder