



Hochschule Wismar

Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Master-Thesis

**Untersuchungen zur Beeinflussung der mikrobiellen
Pionierbesiedlung auf Natursteinen unterschiedlicher Art, Alterung
und Oberflächenbeschaffenheit durch verschiedene
hydrophobierende Oberflächenbehandlungen -
Laborversuche und vergleichende Betrachtung dokumentierter
Feldversuche**

zur Erlangung des Grades eines

Master of Science

der Hochschule Wismar

eingereicht von:

Gerhard Roth

geboren am 7. Oktober 1958 in München

Studiengang Master Bautenschutz

Betreuer: Prof. Dr. H. Venzmer

weitere Gutachter: Prof. Dr. Manfred-Josef Sellner

Augsburg, den 17. Mai 2019

Thema / Thesen / abstract

Untersuchungen zur Beeinflussung der mikrobiellen Pionierbesiedlung auf Natursteinen unterschiedlicher Art, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit durch verschiedene hydrophobierende Oberflächenbehandlungen – Laborversuche und vergleichende Betrachtungen dokumentierter Feldversuche.

Studies on the Influence of Microbial Pioneer Colonialization on Natural Stones of Varying Type, Aging and Surface Textures ba Assorted Hydrophobial Surface Texture and Comparative Observations of Documented Field Experiments.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
Diagrammverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	12
1. Einleitung	13
2. Entstehung von Leben	15
2.1. Lebewesen	15
2.2. Zellen	16
2.2.1. Metabolismus (Stoffwechsel)	19
2.2.2. Zellteilung	20
3. Mikroorganismen	22
3.1. Klassifizierung von Mikroorganismen	25
3.2. Bakterien (Bacteria; niedere Protisten, Prokaryonten)	26
3.3. (Mikro)Algen (höhere Protisten, Eukaryonten)	27
3.3. Pilze (Fungi oder Mycota; höhere Protisten, Eukaryonten)	29
3.4. Schimmel	30
3.5. Flechten (Lichen)	30
3.6. Biofilm	31
4. Besiedlung und Wachstum von Mikroorganismen an Bauwerken	33
4.1. Wachstumsbedingungen	33
4.2. Feuchte	34
4.2. pH-Wert	34
4.3. Temperatur	34
4.4. Nährstoffe	35
4.5. Kontamination und Befall	35

4.6. Bestimmung der Art des Befalls	37
5. Natursteine	38
5.1. Bildung und Verwitterung von Natursteinen	38
5.2. Magmatite (Erstarrungsgesteine)	40
5.3. Sedimente (Niederschlagsgesteine)	41
5.4. Metamorphite	43
5.5. Technische Eigenschaften von Gesteinen	44
5.5.1. Härte.....	45
5.5.2. Permeabilität	45
5.5.3. Porosität und Feuchtaufnahme	45
5.5.4. Frost- und Salzsprengung	46
5.5.5. Dehnung.....	46
6. Feuchteschutz durch Hydrophobierung	47
6.1. Konservierungsmittel und ihre Wirkmechanismen	48
6.2. Kohlenstoffverbindungen (Kunststoffe, Polymerkarbonate)	50
6.3. Siliziumorganische Verbindungen (Silikone)	51
6.4. Anforderungen an die Hydrophobierungsmittel	52
7. Eigene Untersuchungen	54
7.1. Probekörper	54
7.2. Versuchsaufbau und klimatische Randbedingungen	56
7.3. Untersuchungen zur Veränderung der stofflichen Eigenschaften von Natursteinen und Imprägnierungen durch Modulationen der Oberflächen, sowie durch künstliche Alterung	59
7.3.1. Veränderungen Rauheit durch handwerkliche Oberflächenbearbeitung ..	59
7.3.2. Veränderungen der Rauheit durch Imprägnierung	61
7.3.3. Veränderung der Probekörper durch künstliche Alterung	63
7.4. Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedelung	64

7.4.1 In Augenscheinnahme (visuelle Betrachtung)	65
7.4.2. PAM-Diagnostik (Fluoreszenzquantenausbeute)	66
7.4.3. Überprüfung des Befalls durch mikroskopische Auswertung von Strips..	68
7.5. Vergleiche / Verifizierungen	69
7.5.1. Auswahl der Natursteine	69
7.5.2. Besiedelung der frei bewitterten Natursteine.....	72
8. Zusammenfassung und Diskussion.....	74
8.1. Auswahl der Diagnostik für mikrobiellen Befall	74
8.2. vergleichende Bewertungsskala für Untersuchungen im freien Feld und im Labor.....	76
8.2.1 Ergebnisse der visuellen Betrachtungen	76
8.2.2. Ergebnisse der PAM-Diagnostik.....	77
8.2.3. Materialproben.....	80
8.3. Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) auf die Besiedelung	82
8.4. Einfluss der hydrophobierenden Imprägnierungen auf die Besiedelung	84
8.5. Einfluss der Alterung auf die Besiedelung.....	86
8.6. Einfluss der Gesteinsart und des Nährstoffangebotes auf die Besiedelung...	87
9. Schlussbemerkungen	90
10. Literaturverzeichnis	91
Weiterführende Literatur	93
11. Anhang	94
Ehrenwörtliche Erklärung.....	110

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Domänen des Lebens [6].....	16
Abbildung 2: Prokariotische Zelle ohne Zellkern [10]..	
Abbildung 3: Eukariotische Zelle mit Zellkern N [11].	18
Abbildung 4 Toleranzkurve für Wachstum [17].....	24
Abbildung 5: Wachstumskurve von Mikroorganismen am Beispiel einer Batch-Kultur. [17]	24
Abbildung 6: Kolonieaufbau, der für Zoogloea ramigera typisch ist (a). In (b) ist die Lage der Einzelzellen in der schleimigen Grundsubstanz erkennbar (aus UNZ, R. F., N. C. DONDERO: Canad. J. Microbiol. 13 [1967] 1671)1 [14, Seite 48].	27
Abbildung 7 Grünalge [3, Seite].....	28
Abbildung 8: Schwärzepilz [3, Seite 13ff]	29
Abbildung 9: Schimmelpilze [11, Seite 19]	30
Abbildung 10: Querschnitt durch eine Flechte [10, Seite 151]	31
Abbildung 11:Epprechtstein-Granit.....	41
Abbildung 12: Ihrlersteiner Grünsandstein mit deutlich erkennbaren weißlichen Fossilresten.	43
Abbildung 13: Wunsiedeler Marmor mit deutlich erkennbaren Calcit-Kristallen und Tönungen vermutlich durch Einlagerungen von Olivin und Serpentin.	44
Abbildung 14 Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Konservierungsmitteln nach Honsinger: stabilisierende Filme oder kompakte Festkörperstrukturen.	48
Abbildung 15: Verhältnis von Oberflächenspannungen und Randwinkel bei verschiedenen Stoffen. Während sich bei unbehandelten mineralischen Stoffen kein Randwinkel einstellt, ergibt sich bei Silikon z. B. ein Winkel von 120°.....	49
Abbildung 16: Bildung des PMMA aus Methacrylmethylester (32, Seite 313)	50
Abbildung 17: Vergleich Kohlenstoffkette (Kunststoff) und Siliziumorganischen Kette (31, Seite 288)	51
Abbildung 18: Monomeres Alkylalkooxysilan (31, Seite 290)	52
Abbildung 19: Ausbildung von Oberflächenspannung erhöhenden Schirmen durch die Alkydgruppe am Silikonharz [37, Seite 4]	53
Abbildung 20: Gefertigte Natursteinwürfel als Probekörper: Links Wunsiedler Marmor, mittig Ihrlersteiner Grünsandstein und rechts Epprechtstein-Granit.	55

Abbildung 21: Applikation der Hydrophobierungsstoffe bis zur Sättigung innerhalb max. 5 Minuten pro Fläche.	55
Abbildung 22: Kunststoffwanne mit eingedrehten Gewindestäben zur Lagerung der Probekörper.	56
Abbildung 23: Probekörper in geöffneter Wanne mit zusätzlicher UV-Beleuchtung.	57
Abbildung 24: Schräg gelagerte Probekörper, "frei" über dem Regenwasserbad schwebend.	58
Abbildung 25: Substrateinlagerung über die Atmosphäre in einer Klimawanne.	58
Abbildung 26: Laserscanmikroskop der Firma Keyence, VK 9710, mit Software unterstützter Auswertung am PC.	60
Abbildung 27: Bildliche Darstellung über falschfarbenen der Rauheit des Epprechtstein Granits: links glatte Oberfläche und rechts die raue.	61
Abbildung 28: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Kontaktwinkels bei aufgesetzten standardisierten Wassertropfen.	62
Abbildung 29: Messung des Kontaktwinkels eines definierten Wassertropfens zur Oberfläche eines Probekörpers.	62
Abbildung 30: Versuchsanordnung zur künstlichen Alterung durch eine intensive UV-Bestrahlung. Quarzlampe und frei aufgestellte Probekörper; ein Teilbereich ist vor dem UV-Licht mittels Metallstreifen abgeschirmt.	64
Abbildung 31: Anlage der Firma Walz, Typ IMAG- C; S/N: IKEA0130; Kamera Modell: IMAG-K. im Labor der Hochschule Wismar zur Messung der Fluoreszenzquantenausbeute durch die Puls-Amplitudenmodulierten Fotometrie (PAM).	66
Abbildung 32: Beispiel einer Auswertung durch die PAM-Diagnostik. Die roten Punktwollen stellen die Gebiete mit erhöhter Fluoreszenz dar: Max.-Wert 0,071 und Mittelwert 0,012.	67
Abbildung 33: Ihrlersteiner Sandstein.	71
Abbildung 34: Marmor-Obelisk.	71
Abbildung 35: Visuelle Feststellung von Flechten auf einem Ihrlersteiner Grünsandstein.	73
Abbildung 36: Befall mit Flechten und Schwärzepilzen auf Carrara- Marmor.	73
Abbildung 37: Flechten auf einem Ihrlersteiner Grünsandstein.	77
Abbildung 38: PAM-Messung der Besiedelung auf einem Wunsiedeler Marmor (keine Besiedelung).	79

Abbildung 39: Echtbild einer PAM-Messung (Wunsiedeler Marmor).	79
Abbildung 40: Probennahme im Labor Dr. Ziemer.	81
Abbildung 41: Schwärzepilz der Spezies Ulocladium	81
Abbildung 42: Bakteriencluster	81
Abbildung 43: Mycel	81
Abbildung 44: Schlauchpilz der Spezies Cladosporium.....	81
Abbildung 45: Stationär verbleibende Wassertropfen auf einer hydrophobierten Natursteinoberfläche.	85
Abbildung 46: Erhöhte Fluoreszenzquantenausbeute bei den hellen fossilen Trümmerresten im Ihrlersteiner Grünsandstein.	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nährstoffe in der Natur und Umwelt [RUNGE(5)].....	35
Tabelle 2: Die wichtigsten Primärbesiedler [HOFBAUER U.A (3 S. 149)]	36
Tabelle 3: Mineralklassen (14).....	38
Tabelle 4: Überblick über die Probekörper und deren Bezeichnungen.....	54
Tabelle 5: Mittlere Rauheiten [μm] von geschliffenen und handwerklichen Oberflächen, sowie deren Höhendifferenz (Δ).	60
Tabelle 6: Bewertung des Visuellen Bewuchses [HOFBAUER, BREUER, FITZ, SEDLBAUER (3 S. 146)].	65
Tabelle 7: Dahlberg-Skala zur Messung der Fluoreszenzquantenausbeute bei phototrophen Mikroorganismen[SELLNER (28 S. 24)].	67
Tabelle 8: Vergleichende graduelle Bewertung des Pionierbefalls.....	68
Tabelle 9: Besiedelung der frei bewitterten Natursteine. Vergleichende Darstellung der Untersuchungsmethoden und ihre Ergebnisse.....	73
Tabelle 10: Legende zur obigen Darstellung der Besiedelung der frei bewitterten Natursteine.nz bedeutet, dass aufgrund einer komplexen Biokruste keine Aussage gemacht werden kann. o bedeutet ohne Auswertung.....	73
Tabelle 11: Zusammenstellung von Diagnostikverfahren [SELLNER (29 S. 133)] ...	75
Tabelle 12: Vergleichende Bewertungsskala der Besiedelung	76
Tabelle 13: Spezies der nachgewiesenen Schimmelpilze.	82
Tabelle 14: Bezeichnungen der Probekörper:	97

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Feuchte-Temperatur-Diagramm des Raumklimas in den Wannen. Bei geschlossenen Wannen stellt sich das gewünschte Raumklima von ca. 24°C und ca. 75% rel. LF ein. Dieses Klima wird über 115 Tage für jeweils täglich 16 Stunden gehalten. Bei Öffnung des Klimaraums sinkt die rel. LF auf ca. 40 % des umgebenden Raumes.	57
Diagramm 2: Veränderung der Rauheit von glatten zu rauen-handwerklichen Oberflächen bei unbehandelten (OH) Natursteinen.....	60
Diagramm 3: Darstellung der Veränderungen der Rauheiten durch Imprägnierungen am Beispiel des Epprechtstein Granits. Die Veränderungen sind nicht prognostizierbar. Tendenziell kommt es nach einer Alterung zu einer Annäherung von Alterswert und Ausgangswert.	61
Diagramm 4: Überblick über Veränderungen der Randwinkel θ [°] nach Hydrophobierung. Am deutlichsten ist die Veränderung bei der unbehandelten rauen Oberfläche des Ihrlersteins (IS_OH) zu den behandelten IS_H, bzw. IS_HPMA.	63
Diagramm 5: Darstellung der Veränderungen der Randwinkel durch Imprägnierungen und künstliche Alterung bei Wunsiedler Marmor. Im Vergleich zum OH-Wert steigt der Randwinkel um nach der Alterung gemäß den Δz -Werten wieder zu fallen.	64
Diagramm 6: Entwicklung der Besiedelung am Epprechtstein Granit (Mittelwerte). Es wird maximal der Besiedelungsgrad 1 erreicht.	68
Diagramm 7: Besiedelungen auf frei bewitterten Natursteinen. Unter SONSTIGE fallen auch komplexe Besiedelungen wie Flechten.	72
Diagramm 8: Zeitverlauf der Pionierbesiedelung ermittelt durch PAM-Diagnostik am Beispiel nicht hydrophobierter (OH) Natursteine.	78
Diagramm 9: : Besiedelung der Probekörper mit Bakterien und/oder Schimmelpilzen in den ersten 115 Tagen. Festgestellt durch Mikroskopie	82
Diagramm 10: Durch handwerkliche Oberflächenbearbeitung wird die Rauheit der Steine deutlich erhöht.	83
Diagramm 11: Besiedelungsneigung bei rauen, bzw. glatten Oberflächen. Es ist lediglich eine Tendenz zu erhöhter Besiedelung auf rauen Oberflächen zu erkennen.	84
Diagramm 12: Heterogene Besiedelungsneigung bei behandelten und unbehandelten Probekörpern.	85

Diagramm 13: An behandelten und unbehandelten Oberflächen.: Unterschiedliche Pionierbesiedelung.	86
Diagramm 14: Veränderungen der Besiedelungsneigung bei gealterten Oberflächen. Eine erhöhte Besiedelung bei gealterten Oberflächen (-z) ist nicht zu erkennen.	87
Diagramm 15: Veränderung der Rauheit von glatten zu rauen-handwerklichen Oberflächen bei unbehandelten (OH) Natursteinen.....	96

Abkürzungsverzeichnis

EG	Eprechtstein Granit
H	siliziumorganische Hydrophobierung / hydrophobiert
HPMA	polymere Acrylat Hydrophobierung / hydrophobiert
IS	Ihrlersteiner Grünsandstein
PAM	Puls-Amplituden-Modifizierte Fluorometrie
WM	Wunsiedler Marmor
WTA	Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft
z	zerstörte Imprägnierung

1. Einleitung

Bakterien, Algen und Pilze besiedeln Architekturoberflächen und gelten mittlerweile nicht nur als ästhetischer Mangel, sondern werden zunehmend auch für Schäden auf diesen Oberflächen verantwortlich gemacht (1). Für die Besiedelung benötigen Sie vor allem Feuchte, günstige Temperaturen und Nährstoffe; sie wachsen „*zuerst dort, wo die Feuchtigkeit am höchsten ist und wo sie am längsten verweilt*“ (2 S. 45).

Großflächiger mikrobieller Befall ist erfahrungsgemäß auf bestimmte Kalk- und Sandsteine beschränkt. Die Umweltbedingungen auf Natursteinoberflächen, wie geringe Feuchte und schnelles Abtrocknen durch hohe Wärmespeicherung oder schwer lösbare Oberflächen, erlauben meist nur einen partiellen, lokalen Bewuchs an besonders geeigneten, exponierten Stellen.

Nach gängiger Theorie bildet sich nach einer Hydrophobierung von Werkstoffoberflächen, also auch von Natursteinen, eine oberflächennahe wasserabweisende Zone, in welche Feuchtigkeit nicht eindringen kann. Feuchte in Form von Regentropfen läuft an geneigter oder senkrechter Flächen schnell ab (bedingt durch seine Schwerkraft), bleibt aber als feiner Feuchtefilm (Tauwasser) stationär bis er abtrocknet (3).

Mit der Hydrophobierung von Natursteinen ändern sich die eingangs erwähnten, ungünstigen Bedingungen für eine Besiedelung, da jetzt ausreichend Feuchte über einen längeren Zeitraum für die Besiedelung zur Verfügung steht.

In vorliegender Arbeit sollen einige Parameter des Werkstoffes Naturstein und in der Praxis eingesetzter hydrophobierender Imprägnierungen dargestellt werden und dabei untersucht werden, wie sie sich auf die Besiedelung mit Mikroorganismen auswirken:

- Vergleichend wird untersucht, wie sich die durch Hydrophobierung veränderte Oberflächeneigenschaft auf die Pionierbesiedelung der Natursteine auswirkt.
- Weiter soll vergleichend überprüft werden, wie sich eine Hydrophobierung auf handwerklich-gestörten Oberflächen verhält und wie auf glatten, geschliffenen Oberflächen.

- Auch soll vergleichend betrachtet werden, ob die mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Natursteine und ihre Bindungssysteme einen Einfluss auf die Besiedelung hat.
- Untersucht wird, wie sich eine Besiedelung auf silizium-organischen Imprägnierungen (siliziumorganisches Siloxan) darstellt, bzw. auf polymeren-organischen Imprägnierungen (polymeres Acrylat).
- Vergleichend soll noch untersucht werden, wie sich bei künstlich gealterten, imprägnierten Oberflächen sowohl die Hydrophobierungen als auch die Besiedelung mit Mikroorganismen verhalten (künstliche Alterung der Oberflächen mittels Sandstrahlen und durch UV Belichtung und damit verbundener Ozonbelastung).

Untersucht werden die Besiedelungen auf Probekörpern aus den Gesteinen Epprechtsteiner Granit (kristallin, stark Quarz gebunden), Wunsiedeler Marmor (reine kristalline Calcitbindung) und Ihrlesteiner Grünsandstein (zementäre tonig-ferritische Bindung).

Es werden Gesteinswürfel mit jeweils sechs Zentimeter Kantenlänge hergestellt. Die jeweils axial gegenüberliegenden Flächen sind geschliffen, bzw. handwerklich geraut.

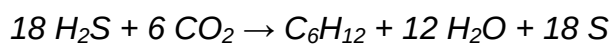
Die Probekörper werden im Labor in einem wechselnden Feuchtemilieu über sechzehn Wochen gelagert. Nach jeweils ca. vier Wochen werden Würfel entnommen und mittels PAM-Diagnostik auf Besiedelung hin untersucht. Das Feuchtemilieu wird durch gesammeltes Regen- und Tauwasser erzeugt.

Die erzielten Ergebnisse sollen mit Besiedelungen an dokumentierten hydrophobierten Natursteinoberflächen verglichen und diskutiert werden.

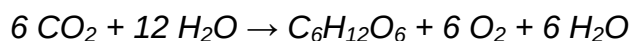
2. Entstehung von Leben

Wasser ist der elementare Stoff für Leben, da es durch seinen polaren Molekülaufbau in besonderer Weise geeignet ist, Stoffe aufzunehmen und abzugeben (Lösungen). In der Natur kommt Wasser selten rein vor.

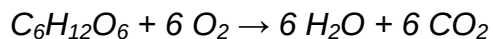
„Das Leben ist nach dem heutigen Erkenntnisstand im Wasser entstanden. ... Autotrophe Schwefelbakterien (Prokaryoten) produzieren aus Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid unter Zufuhr von Lichtenergie, organische Kohlenstoffverbindungen und Wasser:



Als Nachfolger nutzten Blaubakterien (Cyanobakterien) und alle späteren autotrophen Eukaryoten das hohe Redoxpotential des Wassers: Unter Zufuhr von Licht produzieren sie aus Wasser und Kohlendioxid Traubenzucker und Sauerstoff:



Durch diesen Prozess reicherte sich im Wasser und in der Atmosphäre immer mehr Sauerstoff an. Damit wurde die Gewinnung von Energie durch Zellatmung (Dissimilation) möglich:



... Wasser wurde damit zum Medium grundlegender biochemischer Vorgänge (Stoffwechsel) zur Energiegewinnung und –speicherung, wie der Photosynthese, Glykolyse, Eiweißabbau etc. “ [WIKIPEDIA (4)].

2.1. Lebewesen

Lebewesen bestehen aus **Zellen** die mit ihrem Erbgut zur Vermehrung und/oder Wachstum fähig sind. Lebewesen können nach ihrem Zellaufbau unterschieden werden (5):

- **Tiere** (Animalia) sind mehrzellige Lebewesen und ernähren sich von fertigen organischen Substanzen (heterotrophe Lebensweise).
- **Pflanzen** (Plantae) sind ebenso mehrzellige Lebewesen, nutzen Sonnenlicht als Energiequelle und können selbst körpereigene Stoffe aus anorganischen Stoffen aufbauen (autotrophe Lebensweise).
- **Protisten** sind mikroskopisch kleine Lebewesen, meist einzellig mit geringer morphologischer Differenzierung. Sie benötigen Feuchte für ihr Wachstum

und können Kolonien bilden. Nach ihrer Zellstruktur werden sie in höhere Protisten (Algen, Pilze, Urtierchen etc.) innerhalb der Domäne der Eukaryonten und in niedere Protisten (Prokaryonten) innerhalb der Domänen Bakterien und Archaea eingeteilt.

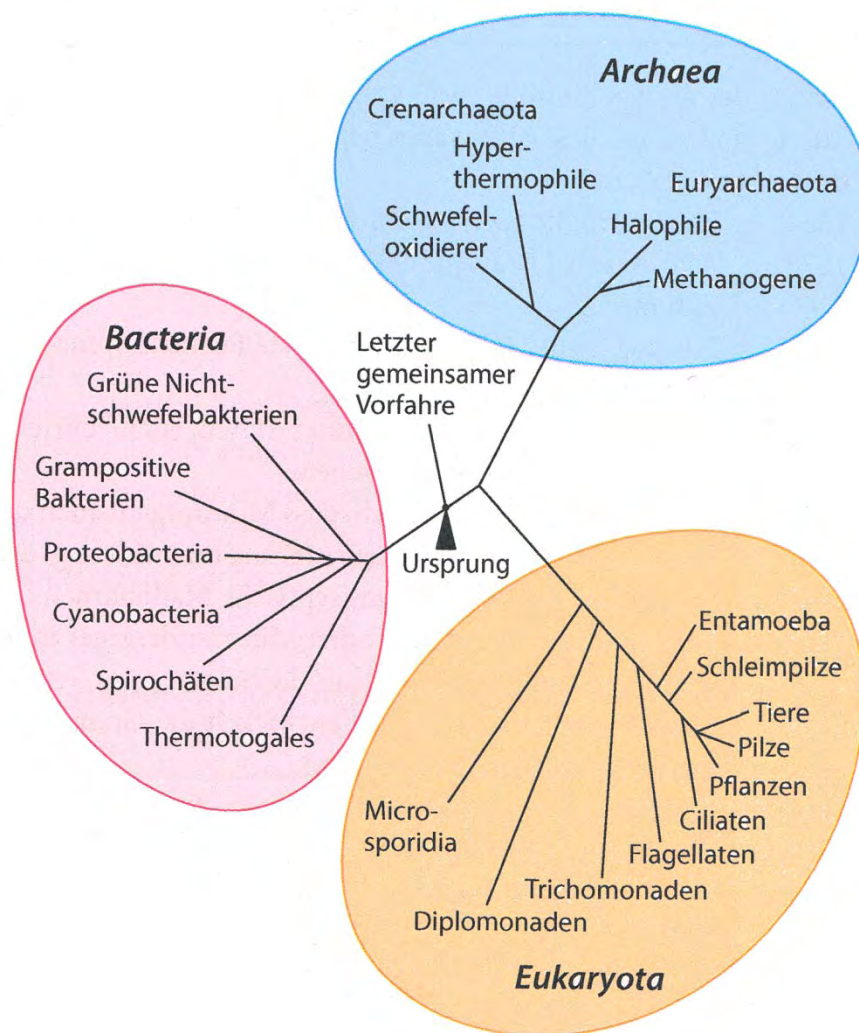


Abbildung 1: Domänen des Lebens [FRITSCH (6 S. 3)]

2.2. Zellen

„Alle Organismen sind entweder Zellen oder sie sind aus Zellen aufgebaut. Zellen gelten als Elementarorganismen; sie bestehen aus Membranen (Zellwände nur bei Pflanzen), Cytoplasma mit Einschlüssen wie Mitochondrien, Ribosomen, Lysosomen und meist aus einem Kern mit den Chromosomen. Die lebende Substanz der Zelle, das Cytoplasma ist in seiner Organisation und Konsistenz durch makromolekulare

organische Verbindungen bestimmt. Eiweißstoffe (Proteine, Proteide), Kohlehydrate, fettartige Stoffe (Lipide) und Nukleinsäuren. Hier finden Lebensprozesse statt. Alle Lebensvorgänge bei Mensch, Tier und Pflanze sind vom Cytoplasma abhängig, in ihm vollzieht sich der Stoff- und Energiewechsel. Anorganische wie organische Stoffe werden aufgenommen und biochemisch verarbeitet. Sonnenenergie wird in chemische Energie umgewandelt und die Zelle vermag sich zu teilen, wodurch Wachstum und Vermehrung ermöglicht werden. Bei einzelligen Lebewesen erfüllt die Zelle alle Aufgaben, bei höherer entwickelten bilden sich besondere Zellarten für die einzelnen Aufgaben heraus, wobei immer die gleichen Aminosäuren (höchstens 20) beteiligt sind“ [BROCKHAUS (7 S. 625)]

„Während die chemische Komposition der Umgebung sehr variabel sein kann, sind die molekulare Zusammensetzung und die Struktur der Zelle immer nahezu gleich. Die minimale Größe der Zelle ist durch das Volumen vorgegeben, das ihre lebenswichtigen Bestandteile einnehmen. Sie liegt bei etwa 0,2 µm. Die maximale Größe wird durch die Notwendigkeit bestimmt, alle Bereiche der Zellen zu versorgen. Sie liegt meistens unter 1 mm kann aber bei einigen bekannten erratischen Arten bis zu mehreren Millimetern betragen“ [FRITSCH (6 S. 9)]

Zellen bestehen aus:

- Wasser
- Polymere Kohlenstoffverbindungen (Struktur und Energielieferanten)
- DNA mit Proteinen

Es gibt zwei Gruppen von Zellen, die sich in ihrer Struktur stark unterscheiden: zum einen die Prokaryoten und zum anderen die Eukaryoten. Prokaryoten sind einfach gebauten Zellen ohne festen Zellkern. Die Erbinformationen befinden sich innerhalb des Cytoplasmas in einem Nucleoid genannten Bereich. Eukaryoten sind wesentlich komplizierter strukturiert und besitzen innerhalb des Cytoplasmas einen echten Zellkern, den Nucleus. Eukaryonten ähneln in ihrem Zellaufbau den Tieren und Pflanzen. Prokaryoten und Eukaryoten können sowohl als Einzeller als auch als Mehrzeller auftreten (8).

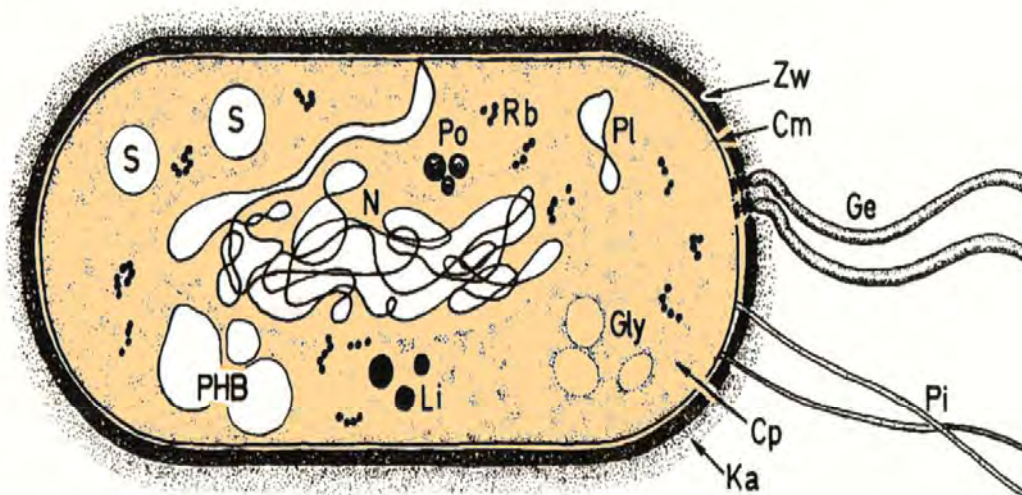


Abb. 2.4 Schematisches Längsschnittbild einer prokaryotischen Zelle (Bakterienzelle) und die Typen der intracytoplasmatischen Membranstrukturen. Cm = Cytoplasmamembran, Cp = Cytoplasma, Ge = Geißel, Gly = Glykogengranula, Ka = Kapsel, Li = Lipidtropfen, N = Nucleus oder Kern, PHB = Poly-β-hydroxybuttersäure, Pi = Pili, Pl = Plasmid, Po = Polyphosphatgranula, Rb = Ribosomen und Polysomen, S = Schwefeleinschlüsse, Zw = Zellwand

Abbildung 2: Prokaryotische Zelle ohne Zellkern [SCHLEGEL (8)].

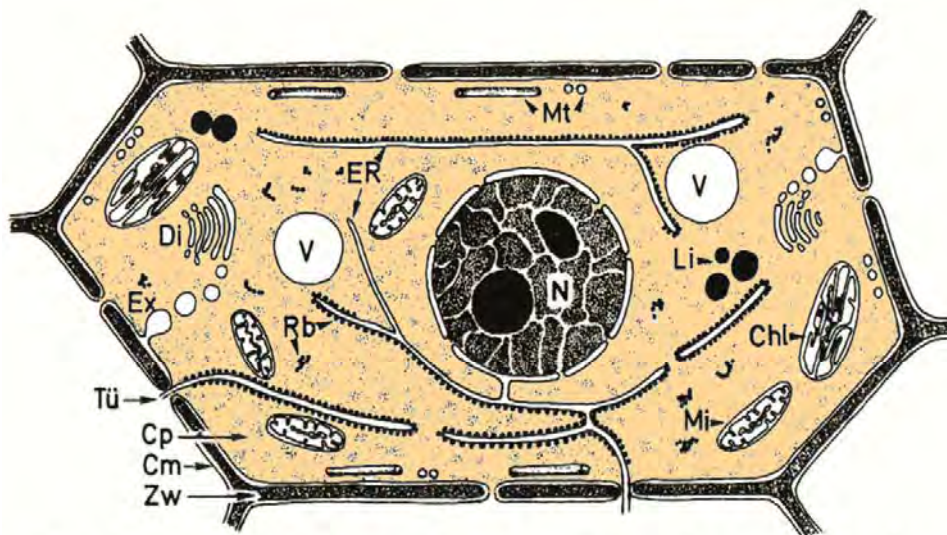


Abb. 2.1 Kombiniertes schematisches Längsschnittbild von einer eukaryotischen Zelle (Pflanzenzelle) (nach SITTE). Chl = Chloroplasten, Cm = Cytoplasmamembran, Cp = Cytoplasma, Di = Dictyosomen, ER = Endoplasmatisches Reticulum, Ex = Sekretionsvesikeln (Exocytose), Li = Lipidtropfen, Mi = Mitochondrien, Mt = Mikrotubuli, N = Nucleus oder Kern, Rb = Ribosomen, Tü = Tüpfel mit Plasmodesmen, V = Vakuolen, Zw = Zellwand

Abbildung 3: Eukaryotische Zelle mit Zellkern [SCHLEGEL (8)].

2.2.1. Metabolismus (Stoffwechsel)

Zellen wollen wachsen und sich vermehren. Alle Stoffwechselprozesse dienen diesem Faktum.

Um wachsen und/oder sich vermehren zu können benötigen Zellen Kohlenstoff, Energie und Nährstoffe. Diese müssen bis in den lebendigen Teil der Zelle, dem Cytoplasma mit dem Nucleoid, bzw. Nucleus, eingebracht werden, um dort die nötigen Ressourcen für die Zellteilung und -Vermehrung zur Verfügung zu stellen.

Durch exakte gesteuerte Prozesse innerhalb der Zellen werden dazu Ausgangsstoffe gespalten, abgebaut, verändert und gespeichert, um dann für den Zellaufbau verwendet werden zu können.

Diese Prozesse benötigen viel Energie, die gewonnen, gespeichert und verfügbar gemacht werden muss. Durch Oxidation bzw. Reduktion von Substraten mit Hilfe von Enzymen wird diese zunächst gewonnen, in Phosphatverbindungen (Phosphorylierung z.B. in Adenosintriphosphat ATP) gespeichert und dann für den Zellaufbau und die Zellteilung verwendet. Die Zelle muss also bestrebt sein, aus „den verfügbaren Nährstoffen, unter den gegebenen Milieuverhältnissen ein Maximum an ATP“ zu gewinnen [(SCHLEGEL (8 S. 201)].

Die Energiegewinnung erfolgt durch:

- Atmung,
- Gärung oder
- Photosynthese.

Als **aerobe Atmung** (Zellatmung, innere Atmung) werden Stoffwechselprozesse in Zellen von Lebewesen bezeichnet, bei denen der durch verschiedene oxidative Stoffwechselvorgänge anfallende und an speziellen Überträgern gebundener Wasserstoff oxidiert wird. Am Ende der Atmungskette und des Elektronenflusses steht molekularer Sauerstoff (O_2) als Endakzeptor der Elektronen. Bei der Zellatmung wird eine organische Verbindung vollständig oxidiert und dadurch vielmehr Energie freigesetzt als bei den anderen Stoffwechselprozessen der anaeroben Atmung und der Gärung.

Obwohl Sauerstoff der am häufigsten verwendete terminale Elektronenakzeptor im Energie liefernden Stoffwechsel ist, können ersatzweise eine Reihe von anderen Verbindungen als Elektronenakzeptoren fungieren: Schwefel $[S]$, Sulfat $[SO_4^{2-}]$, Eisen-III $[Fe^{3+}]$, Nitrat $[NO_3^-]$, Kohlendioxid $[CO_2]$ u.a. Diese Prozesse der **anaeroben**

Atmung sind weniger energieeffizient, ermöglichen aber Atmung in Umgebungen, in denen Sauerstoff fehlt.

In **Gärungsprozessen** wird Energie ohne Sauerstoff, als anaerobe Atmung auf verschiedene Arten gebildet. Es wird vergleichsweise wenig Energie aus einem Substrat z.B. Glucose gewonnen und der Energie- und Elektronenfluss erfolgt nur bis zu einem Abbauprodukt des Substrats wie z. B. Alkohol. Die Oxidation verläuft also unvollständig, da kein endgültiger Elektronenakzeptor zur Verfügung steht.

In der **Photosynthese** wird Lichtenergie in biochemische Energie (ATP) mit Hilfe von Pigmentmolekülen (Chlorophylle) umgewandelt.

Im Stoffwechsel von Zellen finden damit drei wesentliche Formen biochemischer Umwandlungen statt:

- Katabole Reaktionen: Abbauprozesse, Aufspaltung von organischen oder anorganischen Substanzen durch Oxidation/Dehydrogenierung (Elektronenfluss) zur Energiegewinnung.
- Intermediäre Umsetzungen durch Fixierung von Kohlenstoff oder Stickstoff, sowie Bildung von Zwischenprodukten durch Reduktion/Hydrogenierung.
- Anabole Reaktionen: Aufbauprozesse (Synthesen, Kohlenstofffluss) zum Zellwachstum.

Zellwachstum und -Vermehrung ist in der Regel an Wasser gebunden. Die im Wasser gelösten Substanzen dienen zur Energiegewinnung und als Nährstoffe.

2.2.2. Zellteilung

Zellen sind Grundbaustoffe von Leben.

Die Zellteilung und damit die Vermehrung kann durch mittige Teilung einer Mutterzelle zu zwei gleichen Tochterzellen erfolgen (binäre oder symmetrische Teilung) oder durch Teilung der Mutterzelle am Rand mit der Bildung von unterschiedlichen großen Tochterzellen (asymmetrische Teilung). Es bilden sich Protoplasten von denen einer dann die gemeinsame Hülle verlässt und eine Zellwand und damit eine neue Zelle bildet. Es können Zellverbünde und Kolonien erwachsen (6).

Eine Ausnahme stellen Pilzzellen dar, die sich asexuell wie oben beschrieben teilen können oder sexuell durch die Verschmelzung von zwei unterschiedlichen Geschlechtszellen. Pilze bilden in ihrer Wachstumsphase Zellfäden (Hyphen) bestehend aus der Zellwand und dem Cytoplasma etc. Die Hyphen können sich zu Geflechten (Mycele) verbinden (8).

Bei den höheren Eukaryonten erfolgt die Vermehrung sexuell durch Verschmelzen zweier Geschlechtszellen.

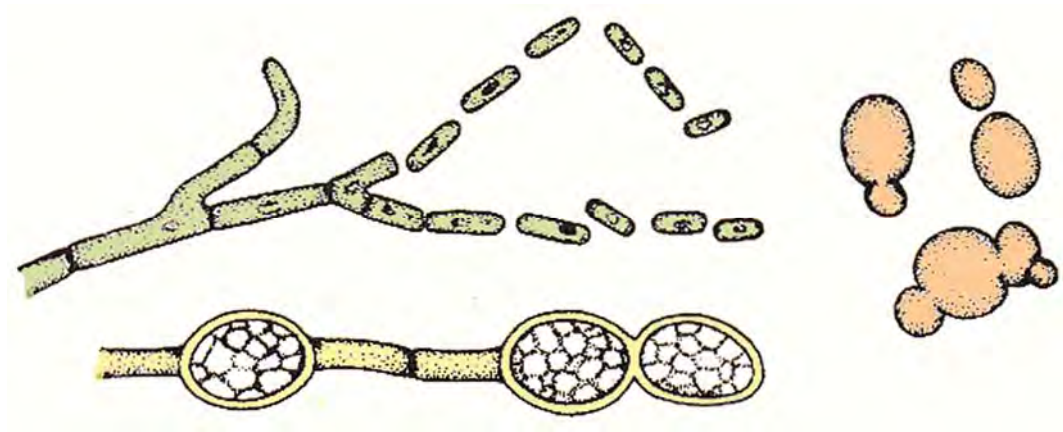


Abbildung 4: Asexuelle Fortpflanzung bei Pilzen durch Sprossung (hellrot), durch Zerbrechen der Hyphen (hellgrün) oder durch Sporenbildung (hellgelb) [SCHLEGEL (8 S. 131)]

3. Mikroorganismen

Mikroorganismen (Kleinstlebewesen, ugs. „Mikroben“) sind mikroskopisch kleine Lebewesen (Organismen) ab ca. 1/1000 mm (=1 µm). Bei den Mikroorganismen handelt es sich überwiegend um Einzeller, auch einige Mehrzeller entsprechender Größe gehören dazu. Mikroorganismen kommen in nahezu allen Umweltsituationen vor und bei allen Lebensbedingungen.

3.1. Zellaufbau

Wie eingangs beschrieben werden zum Zellaufbau (Biosynthese) chemische Bestandteile aus der Umgebung genommen, die die Zelle selbst nicht synthetisieren kann. Mikroorganismen benötigen als Nährstoffe die Makroelemente Kohlenstoff (C) aus dem Kohlendioxid der Luft oder organischen Verbindungen; Sauerstoff (O) aus Luft, Wasser, Kohlendioxid oder organischen Verbindungen und die Nährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Kalium (K), Natrium (Na) und Calcium (Ca), sowie Spurenelemente Chlor (Cl), Iod (I), Kupfer (Cu), Selen (Se), Cobalt (Co), Molybdän (Mo) und Ergänzungsstoffe (Aminosäuren, Purine, Pyrimide etc.) (6).

Kohlenstoff als Makroelement wird durch folgende Ernährungsarten gewonnen:

- Autotroph: Kohlenstoff wird von der Zelle selbst erzeugt.
- Heterotroph: Kohlenstoff wird durch Abbau von organischen Verbindungen generiert.

Mikroorganismen sind damit wichtig für den Kohlenstoffkreislauf, d.h. für die Mineralisierung organischen Kohlenstoffmaterials in anorganische Verbindungen. Entsprechendes gilt für den Stickstoff, den Phosphor, den Schwefel und die Kreisläufe anderer chemischer Elemente.

Die genannten Elemente können von chemolithotrophen Mikroorganismen u.a. aus Natursteinen und deren Verwitterungsprodukten gewonnen werden. Ebenso Magnesium, aus dem Photosynthese betreibende Mikroorganismen ihre *Pigmente (Chlorophyllen) gewinnen können*

Mikroorganismen werden auch „entsprechend der Energiequellen, die sie verwenden in Stoffwechselklassen eingeteilt. ...Organismen, die Licht als Energiequelle benutzen werden als phototroph bezeichnet und Organismen, die ihre Energie aus chemischen Verbindungen gewinnen als chemotroph. Die meisten Organismen in der Mikrobiologie nutzen organische Verbindungen als Energiequellen, ...und werden daher als chemoorganotroph bezeichnet. Organismen, die anorganische Substanzen als Energiequellen nutzen können, nennt man chemolithotroph.“ [RUNGE (5)].

Mögliche Energiequellen:

- *Phototroph (Photosynthese): einfallendes Licht als Energiequelle. Absorption durch spezielle Pigmente (Chlorophyllen) mit einem zentralen Magnesium Ion im Zentrum.*
- *chemotroph: chemische Verbindungen als Energiequelle.*
 - o Chemoorganotroph (organische Verbindungen, wie Zucker, Fette oder Aminosäuren)
 - o Chemolithotroph (anorganische Verbindungen, wie molekularer Wasserstoff, Ammoniak, Magnesium u. a.).

Mikroorganismen brauchen günstige Umweltbedingungen (abiotische, physikalisch-chemische Größen) um möglichst gut wachsen und gedeihen zu können.

Der Toleranzbereich für diese physikochemischen Bedingungen kann dabei je nach Mikroorganismus sehr verschieden sein; jedoch bevorzugen die meisten Temperaturen von 15 bis 45°C, verfügbares, flüssiges Wasser mit einem pH-Bereich von 5 bis 9 und einen atmosphärischen Druck von ca. 1 bar (0,1 Pa). Die Bedeutung des Sauerstoffes ist abhängig von der Fähigkeit der Mikroorganismen diesen als Aerobier zu nutzen oder als Anaerobier nicht zu gebrauchen.

Bei ungünstigen Bedingungen können sogenannte Endosporen gebildet werden, in denen sich die Mikroorganismen quasi in einen Erstarrungszustand mit minimaler vitaler Versorgung und Aktivität zurückziehen (6).

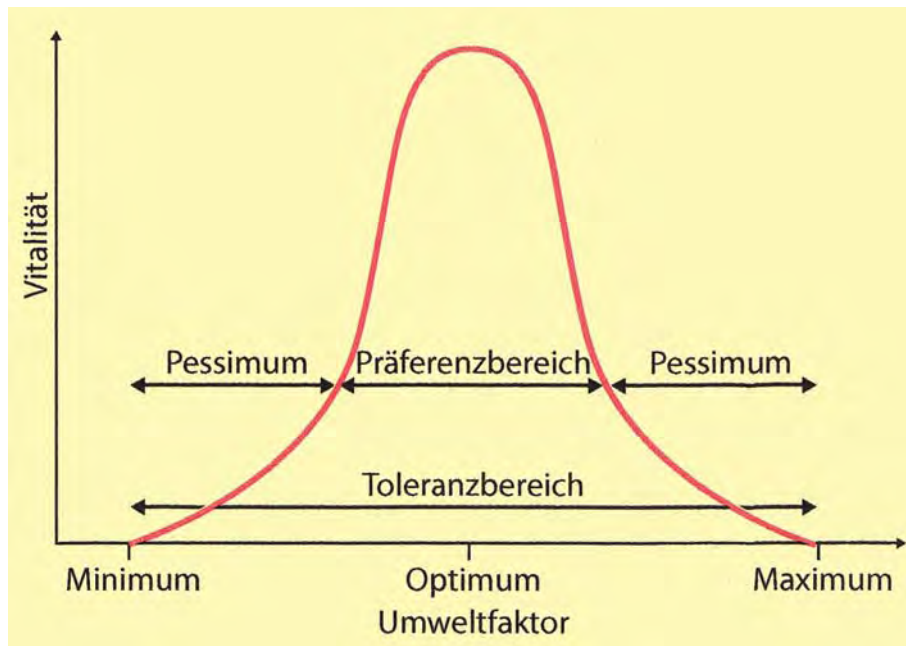


Abbildung 5 Toleranzkurve für Wachstum [FRITSCH (6 S. 47)]

Nach der Besiedelung mit Mikroorganismen erfolgt das Wachstum in vier Phasen:

- Anlaufphase oder lag-Phase bis zum Erreichen der maximalen Teilungsrate.
- Exponentielle Phase oder logarithmische Phase mit konstanter, maximaler Teilungsrate.
- Stationäre Phase mit einer allmählichen Verringerung der Teilungsrate
- Absterbephase

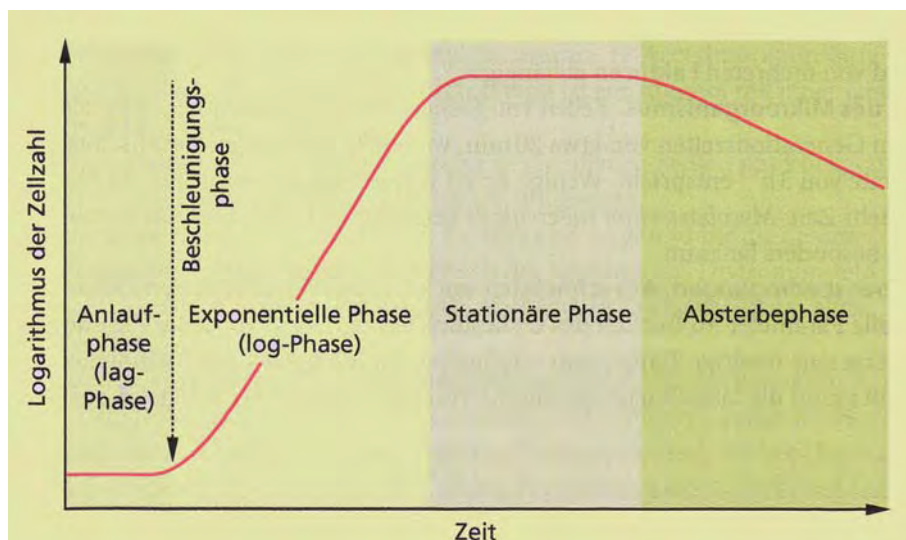


Abbildung 6: Wachstumskurve von Mikroorganismen am Beispiel einer Batch-Kultur [FRITSCH (6 S. 62)].

3.1. Klassifizierung von Mikroorganismen

Die Taxonomie (Klassifizierung) der Mikroorganismen erfolgt in der Regel nach systematischen Verwandtschaftsbeziehungen wie z. B. dem Zellaufbau in Prokaryonten und Eukaryonten:

- Prokaryonten: z. B. Bakterien und Archaea;
- Eukaryonten: z. B. Pilze, Mikroalgen, Protozoen (Urtierchen).

Die formale hierarchische Gliederung lautet:

Domäne | Reich | Stamm | Klasse | Ordnung | Familie | Gattung | Art (Spezies) | Stamm.

Domänen sind Bakterien (Bacteria), Archaeen (Archaea) und Eukaryonten (Eukarya) (siehe Abb.1).

Die gebräuchliche Benennung von Gattung und Art erfolgt analog einer binären Nomenklatur, bei der die Gattung mit einem Großbuchstaben beginnt und kursiv geschrieben wird – z. B. *Escherichia* – und die Art kursiv mit Kleinbuchstaben folgt – z. B. *coli* – ein Kolibakterium. Optional kann noch ein Stamm – nicht kursiv – hinzugeschrieben werden – z. B. **K12** (6).

Mikroorganismen können mikroskopisch, durch Zucht, durch Einfärbungen, durch Untersuchungen von Zellbestandteilen oder genetisch bestimmt werden.

Tabelle 1: Überblick Mikroorganismen

Lebewesen	Bakterium	Mikroalge	Pilz	Flechte
Zellenart	Prokaryont	Eukaryont	Eukaryont	Eukaryont
Fortpflanzung	Einfache Zellteilung zu diversen Kugelhaufen-, Stäbchen- oder Schraubenformen; Bildung von Kolonien (Biofilm)	Zellteilung	Aus sexuellen und asexuellen Zellteilungen entstehen Pilzfäden (Hyphen -> Mycele) daraus Fruchtkörper	Über Pilzpartner und deren Fruchtkörper; oft Bestandteile einer Biokruste
Stoffwechsel Energie- und C-Bausteinquelle	Kein Licht nötig. Chemotroph. Sowohl C-autotroph, als auch -heterotroph, sich schnell vermehrend. Kein Wasser nötig.	Sonnenlicht als Energiequelle. Phototroph. Meist chlorophyllhaltig, C-autotroph (CO ₂), Wasseraufnahme durch Osmose	C-heterotroph, enzymatisch gewonnenes organisches Material als Energiespender. Sporen benötigen Wasser, aber kein	Chemotroph und phototroph, siehe Symbionten. Flechten benötigen Wasser und Licht.

Stoffwechsel- produkte/Arten	Krankheits- und Fäulniserreger, Lebensmittelmodifikation, Mineralisierung. Zahlreiche Arten, auch Blaualgen.	Selbstreinigung von Gewässern. Braun-, Grün-, Rot- und Armleuchteralgen (Luftalgen).	Licht Lebensmittel(-herstellung) (Hefe); Pilzkrankheiten etc. Enzyme. Zahlreiche Pilzarten. Schwärze- und Schimmelpilze.	Symbiose aus Pilz und Bakterium oder (Grün)Algen: Krusten-, Laub- Oder Blattflechten, Strauch- und Gallertflechten. abgestorbene Flechten werden zu Nährschichten. Flechtensäuren greifen Gesteine an Überall, Feuchtezonen
Lebensort / Standort	Überall, primär im Boden	Meist im Wasser, einige auch an der Luft	Organische Substanzen	
Wasserhaushalt	Kein Wasser nötig.	Hohe Feuchte, z.T. flüssiges Wasser	Hohe Luftfeuchte, z.T. freies Wasser. Fehlende Feuchte kann durch Trockenstarre überdauert werden.	Flechten können ihren Wasserhaushalt nicht selbständig regeln. Ruhestarre
Min. Feuchte	-----	Rel. Luftfeuchte > 90%	Holzfeuchte > 20% Rel. Luftfeuchte > 80%	65%
Max. Feuchte	-----	---	Holzfeuchte < 32%	90%
Min. Temperatur	10°C (Blaualgen)	10°C	> 3°C (Starre bis -40°C)	
Max. Temperatur	Hitzetod bei Zellen >60°C, bei Sporen >120°C	< 30°C Hitzetod bei Zellen >60°C	+38°C Hitzetod bei Zellen >60°C, bei Sporen >80°C	
Beispiel	Zahlreiche Arten, auch Blaualgen.	Braun-, Grün-, Rot- und Armleuchteralgen (Luftalgen).	Zahlreiche Pilzarten. Schwärze- und Schimmelpilze	Krusten-, Laub- Oder Blattflechten, Strauch- und Gallertflechten.

3.2. Bakterien (Bacteria; niedere Protisten, Prokaryonten)

„Bakterien sind Prokaryonten, das bedeutet, ihre DNA ist nicht in einem vom Cytoplasma durch eine Doppelmembran abgegrenzten Zellkern enthalten wie bei Eukaryoten, sondern bei ihnen liegt die DNA wie bei allen Prokaryonten frei im Cytoplasma.“ [WIKIPEDIA (9)]. Die Zellwand und die Cytoplasmamembran schließen das Cytoplasma ab. Über ihre Komponenten und Strukturen wird der Ernährungshaushalt geregelt. An die Zellwände sind oft wasserhaltige Materialien und Strukturen angelagert, wie Kapseln und Schleimhüllen in Formen von Fäden oder Stielen. Bakterien vermehren sich durch Zellteilung (binäre Spaltung), Sprossen- oder Knospenausbildungen sind die Ausnahme.

Traditionell werden grün pigmentierte Bakterien - Cyanobakterien - aufgrund von äußerlichen Ähnlichkeiten ebenfalls zu den Algen gezählt. Als Bakterien gehören sie jedoch zu den Prokaryonten und sind somit keine Algen und auch keine Pflanzen. Bakterien und Cyanobakterien sind allgegenwärtig, nur das Besiedelungsmilieu entscheidet, welche Art wächst.

Am Bauwerk verhalten sich sogenannte Grünalgen, Blaualgen und Gelbgrünalgen aber wie echte Algen und bilden Kolonien an der Materialoberfläche oder in porösen Baustoffen kurz unter dieser.

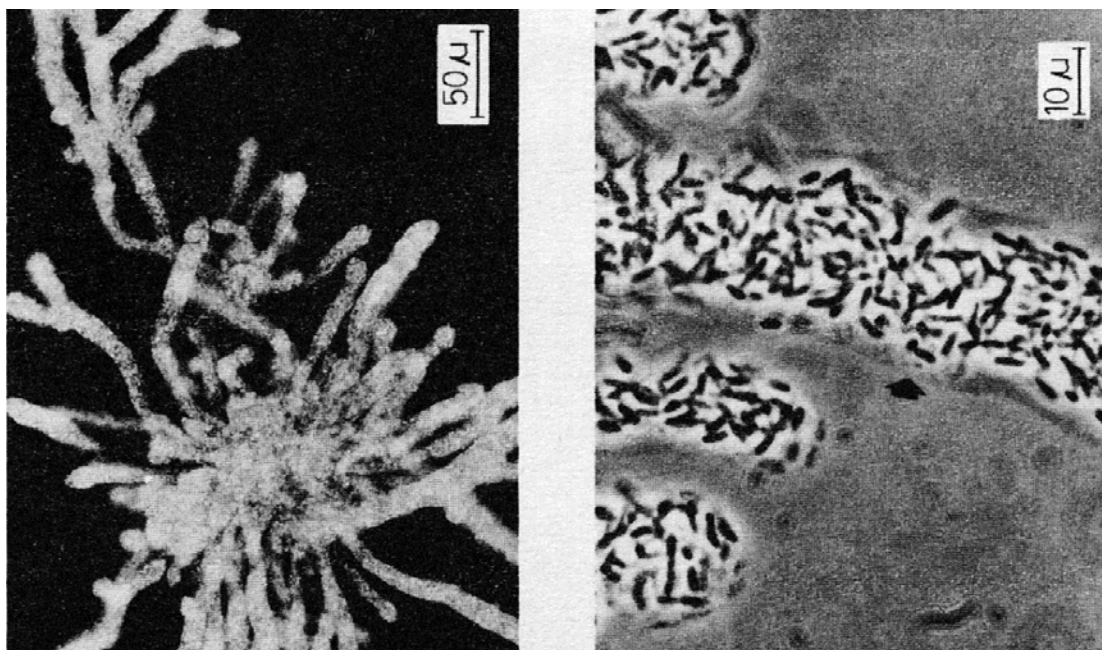


Abbildung 7: Kolonieaufbau, der für *Zoogloea ramigera* typisch ist (links). Rechts ist die Lage der Einzelzellen in der schleimigen Grundsubstanz erkennbar (aus UNZ, R. F., N. C. DONDERO: *Canad. J. Microbiol.* 13 [1967] 1671) [SCHLEGEL (8 S. 48)].

3.3. (Mikro)Algen (höhere Protisten, Eukaryonten)

Anhand ihrer Größe kann man Algen in zwei Gruppen einteilen. Als Mikroalgen werden mikroskopisch kleinen Arten zusammengefasst, zu ihnen gehören insbesondere einzellige Formen. Die Makroalgen (Großalgen) sind dagegen mit bloßem Auge erkennbar, ihre Länge reicht von wenigen Millimetern bis zu 60 Metern. Die meisten Großalgen leben im Meer (Seetang).

Als Mikroalgen (Mikroorganismen) werden definitionsgemäß nur ein- bis wenigzellige Algen angesehen. Mikroalgen betreiben wie alle Algen Photosynthese, sie nutzen Licht als Energiequelle und sind Kohlenstoff-autotroph, d.h. sie gewinnen ihn selbst aus Kohlendioxid.

Algen vermehren sich durch Replikation und Teilung ihres Zellkernes.

Man findet Algen hauptsächlich in den lichtdurchdrungenen Schichten der Meere und in allen Lebensräumen des Süßwassers. Im Wasser frei schwebende Algen bilden das Phytoplankton.

Ein kleinerer Teil der Algen hat sich durch Anpassung an (temporäre) Trockenheit auf Lebensräume außerhalb von Wasserkörpern spezialisiert. Luftalgen (Aerophyten) wachsen auf exponierten Oberflächen wie Baumstämmen und Felsen. Sie können diese oberflächlich bunt färben.“ [WIKIPEDIA (10)]. Algen benötigen eine längere Vorlaufzeit für ihren Bewuchs als Pilze, etablieren sich aber dauerhafter.

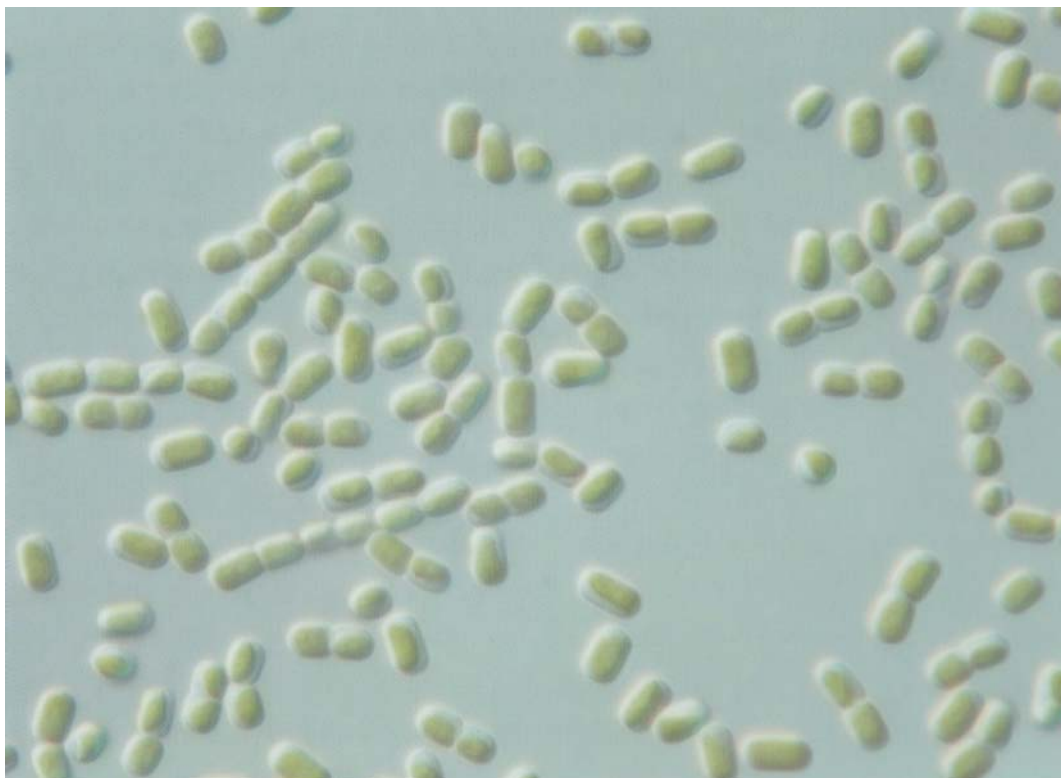


Abbildung 8: Grünalge [BÜCHLI;RASCHLE (2 S. 20)].

3.3. Pilze (Fungi oder Mycota; höhere Protisten, Eukaryonten)

Zu den Pilzen zählen Einzeller wie die Backhefe als auch Vielzeller wie die Schimmelpilze und die Ständerpilze. Pilze vermehren und verbreiten sich geschlechtlich (sexuell) durch Verschmelzung von zwei Keimzellen (Gameten) und/oder ungeschlechtlich (asexuell; Fungi imperfecti) durch Sporenbildung, vegetativ durch Sprossung oder Knospung ihrer manchmal sehr langlebigen Myzelien oder Mykorrhizen. Der Vegetationskörper wird Thallus genannt und besteht aus Hyphen (Fäden), bzw. Myzelien (Fadengeflechte). Sie sind die schädigenden Entwicklungsstadien der Pilze.

Von den Pflanzen unterscheiden sich die Pilze durch ihre Kohlenstoff-heterotrophe Lebensweise ohne Photosynthese und dem Abbau (Energiegewinnung) von vorhandenen organischen Stoffen (C-Stoffspender). Sporen benötigen geeignete Temperaturen und Wasser zur Keimung und zum Wachsen.

Am Bauwerk (Holzbaustoffe) spricht man von holzerstörenden oder Hausfäulepilzen.

Auf mineralischen Baustoffoberflächen finden sich überwiegend Schwärze- und Schimmelpilze.

Pilze stellen in der Regel den Primärbewuchs auf Fassaden.

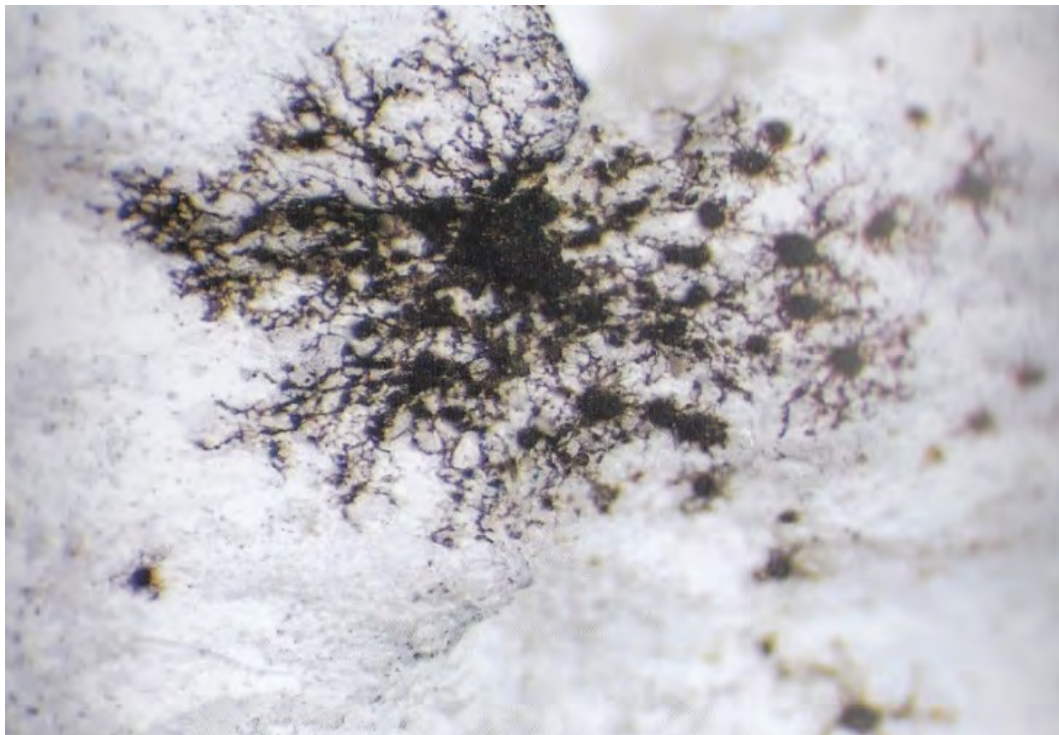


Abbildung 9: Schwärzepilz [BÜCHLI;RASCHLE (2 S. 13)].

3.4. Schimmel

Unter Schimmel wird ein komplexer mikrobieller Befall meist im Gebäudeinneren verstanden. Schimmel sind Lebensgemeinschaften von Schimmelpilzen, Hefen, Bakterien, Algen, Protozoen u.a. Schimmelpilze sind die Leitorganismen bei der Bestimmung von Schimmelbefall (11).

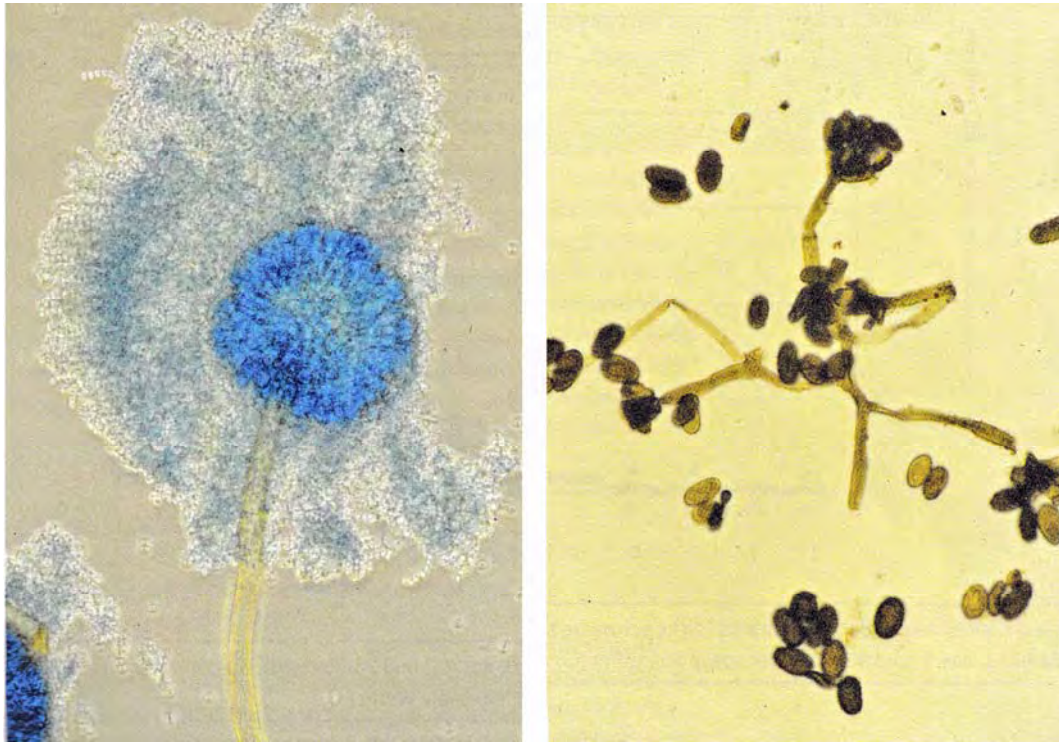
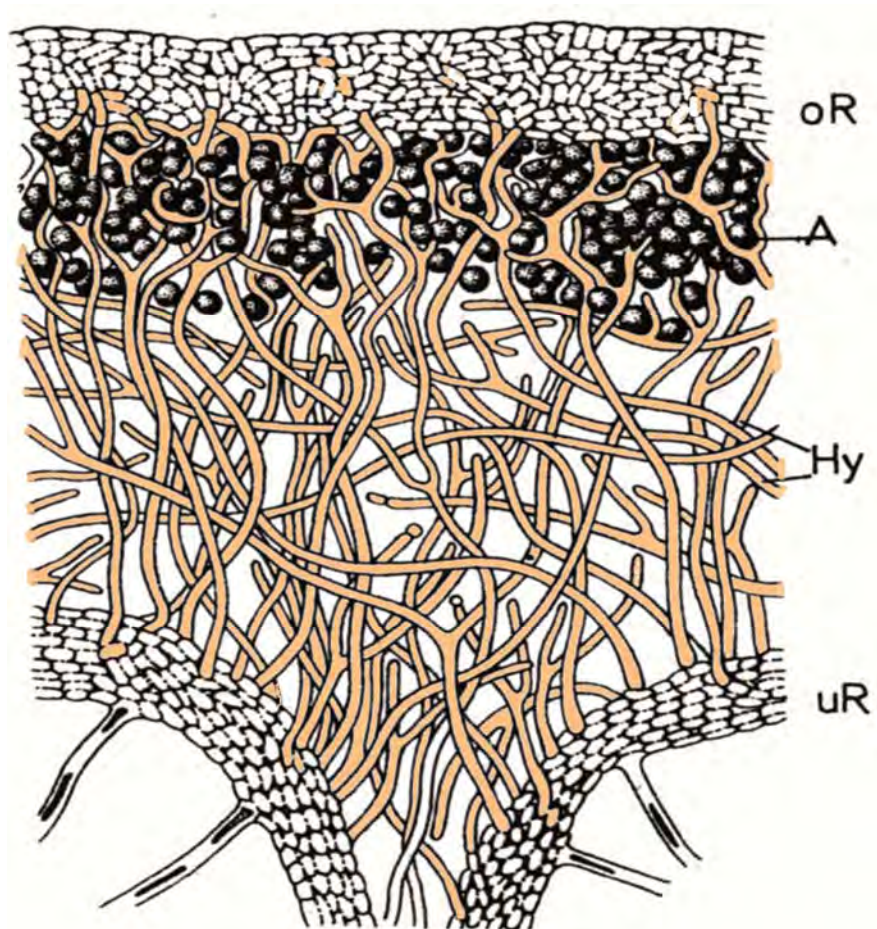


Abbildung 10: Schimmelpilze *Aspergillus* sp. (links und *Stachybotrys* sp. (rechts) [UBA (11 S. 19)].

3.5. Flechten (Lichen)

Flechten sind symbiotische Gemeinschaften von Pilzen und Algen und/oder Bakterien, die sich in Eigenschaften und Wuchsformen deutlich von ihren Ausgangspartnern (Symbionten) unterscheiden. Zu einer Pilzart gesellen sich immer ein oder mehrere andere Mikroorganismen, weshalb Flechten den Pilzen zugeordnet werden. Flechten sind oft Bestandteile von sogenannten Biokrusten.



„Abbildung 11: Querschnitt durch eine Flechte mit Algen (A), Pilzhyphen (Hy) und Rindenschichten (oR/uR) [SCHLEGEL (8 S. 151)].

3.6. Biofilm

„Biofilme bestehen aus einer Schleimschicht (Film), in der Mikroorganismen (z. B. Bakterien, Algen, Pilze, Protozoen) eingebettet sind. ...Biofilme bilden sich überwiegend in wässrigen Systemen, wenn sich dort Mikroorganismen an Grenzflächen ansiedeln. ...Die Grenzfläche, auf der sich der Biofilm bildet, oder genauer die Phase in die der Film nicht oder kaum hineinwächst bildet das Substratum. ...In Biofilmen leben normalerweise verschiedene Mikroorganismenarten gemeinsam. Neben den ursprünglichen Biofilm-Bildnern können auch andere Einzeller (Amöben, Flagellaten u. a.) integriert werden“ [WIKIPEDIA (12)].

Biofilme bilden sich in mehreren Phasen von der Anhaftung eines Mikroorganismus (Induktionsphase) über die Kolonisation (Akkumulationsphase) bis zum Wachstum und der Vergesellschaftung (Existenzphase). Biofilme bilden ähnlich den Flechten

komplexe (Schutz-) Gemeinschaften mit erhöhter chemischer und physikalischer Stabilität.

Je nach Zusammensetzung und Untergrund können Biofilme, schützen oder (massiv) schädigen (z.B. Biopitting).

4. Besiedlung und Wachstum von Mikroorganismen an Bauwerken

4.1. Wachstumsbedingungen

Algen, Pilze und Flechten wachsen unter verschiedenen Lebensbedingungen. Gemeinsam sind ihnen aber die Ansprüche an gemäßigte Temperaturen und das Vorhandensein von Feuchte in Material und Luft. Bakterien nehmen eine Sonderstellung ein, da sie je nach Art unter nahezu allen Bedingungen wachsen können.

Damit Mikroorganismen am Bauwerk siedeln können müssen also folgende Faktoren gegeben sein:

- Biologische Faktoren: Vorhandensein von keimungsfähigen Mikroorganismen (Sporen, meist in der Umgebungsluft; Aeroplankton). Geeignete Energie-, bzw. Nahrungsquellen (Untergrund, Umwelt, Schmutz).
- Physikochemische, abiotische Faktoren: Günstige, geeignete lokale Klimabedingungen (Temperatur, Feuchte, pH-Wert, Druck u. a.)

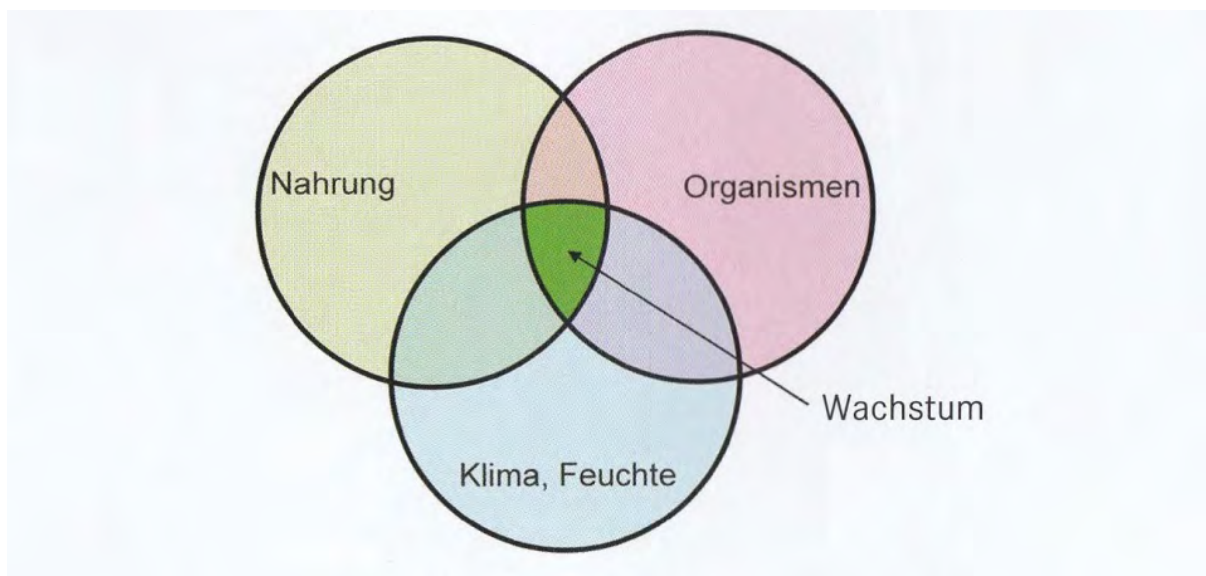


Abbildung 10: Grundlagen des Wachstums [BÜCHLI;RASCHLE (2 S. 12)].

4.2. Feuchte

Um an Bauwerken wachsen und Kolonien bilden zu können, müssen Mikroorganismen Wasser aufnehmen, denn Zellwachstum ist an Wasser gebunden. Die nutzbare Wassermenge am Besiedelungsort muss höher sein, als in der Zelle, damit es zur Wasseraufnahme kommt. Die im Wasser gelösten Substanzen dienen zur Energiegewinnung und als Nährstoffe.

„Die Wasseraktivität eines Habitats wird als aw-Wert dargestellt. Die Wasseraktivität von z. B. 0,75 bedeutet eine Gleichgewichtsfeuchte, die einer relativen Luftfeuchte von 75 % entspricht. ...Entscheidend ist die relative Feuchte im Gleichgewicht direkt an der Materialoberfläche. Algen haben höhere Wasseransprüche als Pilze“ [BÜCHLI;RASCHLE (2 S. 25)]. Luftströmung behindert oder stoppt Feuchte und Wachstum; stagnierende Luft ermöglicht sie. Eis stoppt das Wachstum.

Wasser kommt am Bauwerk als Niederschlag- und Tauwasser, als hygroskopische und als kapillare Feuchte, als Kondensations- oder als Luftfeuchte vor. Form (Aggregatzustand), Menge, Dauer und Salzgehalt an verfügbaren flüssigem Wasser (Feuchte) sind ausschlaggebend für die Besiedelung.

4.2. pH-Wert

Die Mehrheit der Organismen bevorzugt einen pH-Wert von 5 bis 9 (11).

4.3. Temperatur

Wachstumstemperaturen sind abhängig von der Material- und der Lufttemperatur. Am Bauwerk werden diese durch Umgebungs- und Raumklima definiert.

Jeder Mikroorganismus hat verschiedene, bevorzugte, optimale Temperaturbereiche, gedeiht aber auch unter ungünstigeren Temperaturbedingungen, wenn die anderen Faktoren es ermöglichen:

- Bakterien: Blaualgen 12 – 25 °C Oberflächentemperatur
- Algen: ca. 15 - 25 °C Oberflächentemperatur
- Pilze: ca. 20 – 25 °C Oberflächentemperatur
- Flechten: analog Pilze als Symbiont

4.4. Nährstoffe

Natursteine bieten mit ihren Mineralien anorganische Nährstoffe (dunkelgrün in der Tabelle hinterlegt), die photolithotrophe (z. B. Magnesium) und chemolithotrophe (z. B. Phosphor, Mangan etc.) Mikroorganismen verwerten können.

Tabelle 1: Nährstoffe in der Natur und Umwelt [RUNGE(5)].

Element	Symbol	Normale Form des Nährstoffs in der Umwelt
Kohlenstoff	C	CO ₂ , organische Verbindungen
Wasserstoff	H	H ₂ O, organische Verbindungen
Sauerstoff	O	H ₂ O, O ₂ , organische Verbindungen
Stickstoff	N	NH ₃ , NO ₃ ⁻ , N ₂
Phosphor	P	PO ₄ ³⁻
Schwefel	S	H ₂ S, SO ₄ ²⁻ , Metallsulfide
Natrium	Na	Na ⁺ in Lösung, als NaCl oder andere Natriumsalze
Kalium	K	K ⁺ in Lösung oder als diverse Kaliumsalze
Magnesium	Mg	Mg ²⁺ in Lösung oder als diverse Kaliumsalze
Calcium	Ca	Ca ²⁺ in Lösung, als CaSO ₄ oder andere Calciumsalze
Eisen	Fe	Fe ²⁺ oder Fe ³⁺ in Lösung, als FeS, Fe(OH) ₃ oder viele andere Eisensalze

4.5. Kontamination und Befall

Unter Kontamination versteht man eine lose Verunreinigung von Stoffen, während bei einem Befall die Mikroorganismen bereits mit dem Untergrund verbunden sind (11).

Die Besiedelung mit Mikroorganismen geschieht, sobald geeignete Umweltfaktoren gegeben sind. Schaden, bzw. massive Ausbreitung des mikrobiellen Befalls entsteht, wenn sowohl Temperatur als auch Feuchte in einem möglichst optimalen Verhältnis vorhanden sind. Das heißt, dass die Temperaturen nicht zu hoch, wenig Wind (Gefahr der Trockenheit) und die angebotene Wassermenge hoch sein sollten.

Nach Untersuchungen des Fraunhofer- und des Dahlberg -Instituts (13) ergeben sich besonders günstige Grundlagen für Algen- und mikrobielles Wachstum zur Herbst- und Frühjahrszeit bei moderaten Temperaturen und hohem Feuchteangebot durch Schlagregen und Tauwasserniederschlag über einen längeren Zeitraum hinweg.

Es kommt also nicht, bei der singular jeweils besten Bedingung zu einem Wachstum, sondern in der Summe der günstigen Möglichkeiten: ausreichende bis hohe Feuchte, niedrige bis mittlere Temperatur. So kann es über längere Zeiträume zu

wellenartigen Bewuchsentwicklungen kommen. Je höher die Raten sind, desto intensiver der Bewuchs!

Das Wasserangebot ist auch abhängig vom Baumaterial der Fassade. So zeigen traditionelle mineralische Systeme eine hohe Wasseraufnahme und –abgabe, moderne Wärmedämm-verbundsysteme und hydrophobierte Oberflächen jedoch nur eine geringe. Dies führt zu Feuchtefilmen auf so ausgestatteten Fassaden und damit zu einem entsprechend günstigen Wachstumsangebot für Mikroben.

Günstige Materialeigenschaften der Oberflächensysteme und deren Oberflächentexturen, d. h. Oberflächen, in denen Feuchtigkeit und Substrat möglichst lange gehalten werden, können den Befall begünstigen.

Mikroorganismen stehen untereinander in Wechselbeziehungen, so dass es in der Regel zu keinem singulären Befall kommt.

„Pilze erscheinen in der Sukzession Regel vor den Algen. Eine Besiedelung durch Algen erfolgt dabei unabhängig von der Ansiedelung von Pilzen und Bakterien. Flechten sind zum Teil an einer Erstbesiedlung beteiligt. ...Die meisten der vorkommenden Arten können eine gewisse Zeit in einem Latenzstadium überdauern und bei erneuter Benützung sehr rasch wieder aktiv werden. ... Pilze und Algen siedeln sich meist an verschiedenen Stellen.“ [HOFBAUER U.A. (3 S. 143)].

Mikrobieller Befall stellt nicht nur ein ästhetisches Problem dar, sondern kann auch schädigend wirken, sei es durch chemische, mechanische physikalische oder biologische Prozesse.

Tabelle 2: Die wichtigsten Primärbesiedler [HOFBAUER U.A (3 S. 149)]

Gruppe	Gattung Art
Pilze	<i>Ulocladium chartarum</i>
	<i>Cladosporium cladosporioides</i>
	<i>Epicoccum purpurascens</i>
	<i>Alternaria alternata</i>
Algen	<i>Stichococcus</i> spp. (z.B. <i>S. minutus</i> , <i>S. bacillaris</i>)
	<i>Diplosparea</i> spp. (z. B. <i>D. chodatii</i>)
	<i>Chlorella</i> spp. (<i>C. ellipsoides</i> , <i>C. vulgaris</i> , <i>C. minutissima</i>)
	<i>Klebsormidium</i> spp. (z. B. <i>K. flaccidum</i> ; vorwiegend bei Bewuchsentwicklung > 2 Jahre)

4.6. Bestimmung der Art des Befalls

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik untersucht mikrobiellen Bewuchs taxonomisch/systematisch und hat bis 2006 135 verschiedene Arten festgestellt und klassifiziert (13). Auch wenn einige Arten dominant sind, bedeutet dies nicht dass es sich nur um eine einzelne Art handelt. Meist geht es um verschiedene Organismen, die gemeinsam auftreten.

Die Art des jeweiligen mikrobiellen Befalls kann nur vom spezialisierten Fachmann vorgenommen werden. Dies geschieht durch mikroskopische Bestimmung, durch Probenentnahme Zucht, Messung und Auswertung in geeigneten Medien im Labor. Die Diagnosen können mittels eines Lichtmikroskops, eines Epifluoreszenzmikroskops erfolgen, oder durch die sogenannte PAM-Fluorometrie, sowie der PCR/DNA-Diagnostik.

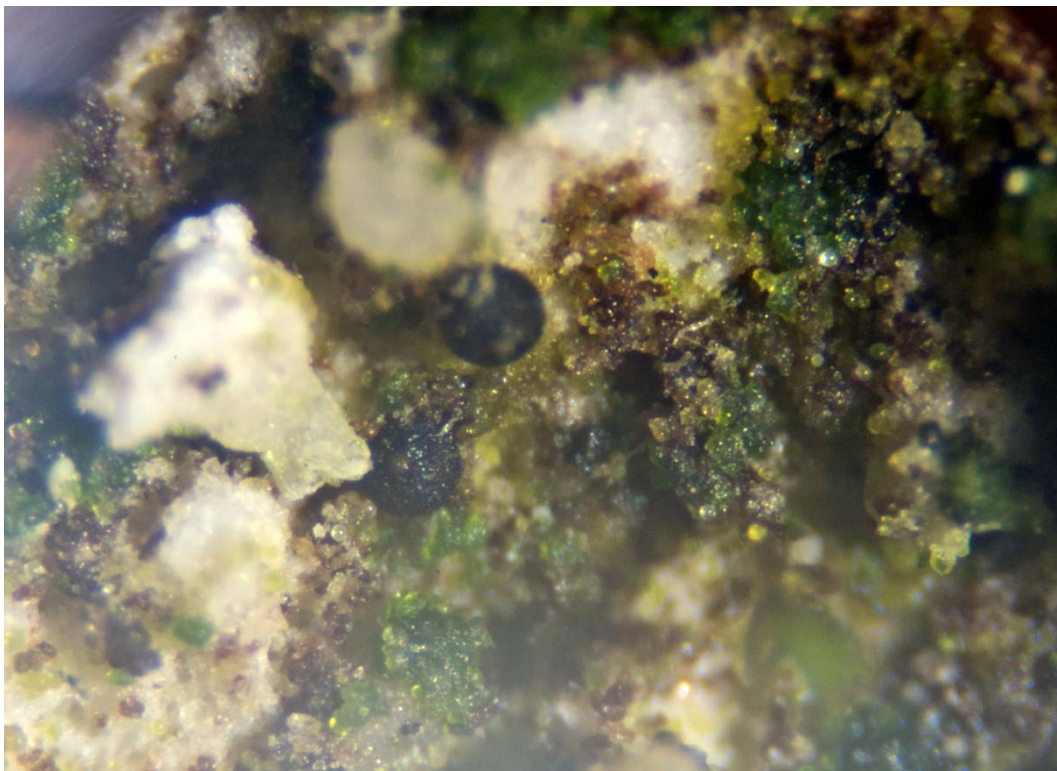


Abbildung 13 Mikrobieller Bewuchs auf Gips, gut erkennbar sind: Gipsmineral (weiß), (Schimmel)Pilz (schwarze Kugeln), Grünalgen (grün), Flechten (gelb-ocker)

5. Natursteine

5.1. Bildung und Verwitterung von Natursteinen

Natursteine entstehen in geologischen Zeiten und Prozessen auf verschiedene Weise und bilden so die Gesteinsgruppen Magmatite (Erstarrungsgesteine), Metamorphite (Umwandlungsgesteine) und Sedimente (Ablagerungsgesteine).

Je nach ihrer Genese werden diese aus verschiedenen Mineralien gebildet, die in verschiedener Art, Textur und Struktur miteinander verbunden sind.

Die gesteinsbildenden Mineralien bestehen überwiegend aus den 17 Elementen Wasserstoff [H], Kohlenstoff [C], Sauerstoff [O], Fluor [F], Natrium [Na], Magnesium [Mg], Aluminium [Al], Silizium [Si], Phosphor [P], Schwefel [S], Chlor [Cl], Kalium [K], Calcium [Ca], Titan [Ti], Mangan [Mn], Eisen [Fe] und Zirkonium [Zr]. Sie werden in Mineralklassen eingeteilt.

Tabelle 3: Mineralklassen (14).

Klasse	Verbindungen	Beispiele
Elementide	unverbundene Grundstoffe	Gediegene Metalle wie Kupfer Cu, oder Silber Ag, Graphit u. a.
Sulfide	Schwefelverbindungen.	Meist Erzminerale wie Chalkosin (Kupferglanz) Cu_2S , Pyrit (Eisen- oder Schwefelkies) FeS_2 .
Halogenide (Fluoride und Chloride)	Verbindungen mit Fluor, bzw, Chlor	z.B. Halit (Steinsalz) NaCl
Oxide und Hydroxide	Verbindungen mit Sauerstoff, bzw. Wasserstoff	Cuprit (Rotkupfererz), Cu_2O , Hämatit (Eisenglanz) Fe_2O_3 , Quarze SiO_2 , Spinell MgAl_2O_4
Karbonate (auch Nitrate und Borate):	Verbindungen Kohlenstoff und Sauerstoff	Salze der Kohlensäure H_2CO_3 , z.B. Calcit CaCO_3 , Magnesit MgCO_3 , Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Sulfate	Verbindungen aus Schwefel und Sauerstoff (SO_4 -Komplex)	wasserfrei z. B. Baryt BaSO_4 , wasserhaltig z. B. Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Phosphate (auch Arsenate und Vanadate)	Verbindungen mit Phosphor und Sauerstoff ($(\text{PO}_4)^{3-}$ Komplex),	Apatit $\text{Ca}_5[(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})/(\text{PH}_4)_3]$
Silikate	Verbindungen von Silizium und Sauerstoff	die größte Gruppe mit Quarz SiO_2 , Olivin $(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$, Talk $\text{Mg}_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$, Diopsid-Pyroxen $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$, Muskovit-Glimmer $\text{KAl}_2[(\text{OH})_2/\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]$, Biotit- Glimmer

		K(Mg,Fe ²⁺) ₃ [(OH) ₂ /Si ₃ AlO ₁₀], Alkalifeldspäte (K,Na)[AlSi ₃ O ₈], komplexe Minerale wie Granat, Hornblende-Amphibol u. a.
Organide	Kohlenstoffverbindungen.	

Die Bindung der Minerale untereinander erfolgt direkt kristallin (Kornverwachsungen), indirekt durch Diagenese als physikalische Kompaktion (Verpressung/Verkrallung) oder durch chemische Zementation mit einem Bindemittel.

Sind Gesteine mit charakteristischen Komponenten und Bindungen, Korngefügen und Porenräumen entstanden beginnt auch schon wieder deren Verwitterung.

Allgemein versteht man unter Gesteinsverwitterung die Veränderungen oder Anpassungen von Gesteinen an der Erdoberfläche (subaerische Verwitterung) oder unter Wasser (subaquitanische Verwitterung) in physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen und deren Interaktionen. Diese liegen zunächst in der Natur der Gesteine und sind Grundlage für die Gesteinsbildung der Sedimente aus magmatischen, metamorphen oder älteren Sedimentgesteinen. Durch neuzeitliche, vom Menschen verursachte Umwelteinflüsse (Umweltverschmutzung, Klima etc.) werden diese Prozesse verschärft (14).

Im Wesentlichen handelt es sich bei der Verwitterung um einen mannigfachen Angriff auf das Gestein über die Gesteinsoberfläche und die Gesteinsporen. Dieser kann zur Entfestigung des Kornverbandes und zur Umwandlung und Auflösung der Strukturen führen:

- **physikalisch:** mechanische Spannungen im oder auf dem Gestein durch Temperaturveränderungen, Frost- und Salzsprengung: Lockerung, Zerlegung etc.
- **chemisch:** Lösungs- und Umwandlungsreaktionen von gesteinsbildenden oder eingelagerten Mineralien und der spezifischen Bindemittel unter Einfluss von Wasser und darin gelösten Gasen und Ionen: Bindemittelverlust, Mineralumwandlung, Farbveränderung etc.
- **biologisch:** chemische oder physikalische Angriffe auf die Gesteinskomponenten durch Pflanzen oder Tiere und deren

Stoffwechselprodukte, meist organische Säuren (H^+ -Ionen): Krustenbildungen, Mineralumwandlungen etc.

- **anthropogen:** Veränderungen durch direkte und indirekte Eingriffe des Menschen: Zerstörungen etc.

Die mechanische Zerkleinerung (physikalische Verwitterung) ist in der Regel der Ausgangspunkt für Verwitterungsprozesse bevor dann die chemische und biologische Verwitterung einsetzen können. Dies führt auch zur chemischen Umwandlung der gesteinsbildenden Mineralen, wodurch von chemolithotrophen Mikroorganismen leichter Nährstoffe wie Magnesium (Mg) generiert werden können. Mineralumwandlungen finden z.B. bei Pyrolusit (Braunstein) $\beta\text{-MnO}_2$ zu Limonit $\text{FeO(OH)} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ statt, bei Olivin zu Serpentin $\text{Mg}_3[(\text{OH})_4/\text{Si}_2\text{O}_5]$, Olivin, Pyroxen oder Amphibol können auch in Talk $\text{Mg}_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ umgewandelt werden oder Feldspäte z. B. in Biotit $\text{K(Mg,Fe}^{2+})_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]$ oder in Kaolinit $\text{Al}_2[(\text{OH})_4/\text{Si}_2\text{O}_5]$. In seiner Dissertation stellt SEIFFERT (15) u. a. fest: *„Die Verfügbarkeit einzelner Elemente für Mikroorganismen hängt natürlich auch in erster Linie von der relativen Menge entsprechender Minerale und deren Auflöseraten ab. Die biotisch indizierte Auflösung ist oft indirekter Natur und agiert über Ausscheidung von Stoffwechselprodukten, die hydrolytische Prozesse in Gang setzen können.“*

5.2. Magmatite (Erstarrungsgesteine)

Im Erdinneren befindet sich eine zähflüssige Gesteinschmelze, das Magma. *„Dringt dieses Glutflussmaterial in die unteren Teile der Erdkruste hinein, entstehen nach langsamer Abkühlung die Plutonite. Ergießt sich das magmatische Material unmittelbar auf die Erdoberfläche, bilden sich hier bei relativ schneller Abkühlung die Vulkanite. Zwischen diesen beiden Gruppen liegen als Übergangsgesteine die Ganggesteine“* (16). Magmatite sind in hohem Maß von Silizium und Sauerstoff der Kieselsäure $[\text{SiO}_2]$ bestimmt.

Der **Epprechtstein Granit** aus dem Fichtelgebirge gehört in diese Gruppe, bzw. deren Untergruppe den Plutoniten (Tiefengesteine). Diese werden durch geologische Prozesse wie Gebirgsbildungen oder Verwitterung aus der Tiefe an die Erdoberfläche verfrachtet.

„Der Epprechtstein ist ein Berg im nördlichen Fichtelgebirge (Nordostbayern), 798 m ü. NN. Er ist der mineralogisch interessanteste Berg im Fichtelgebirge. Rund um den Gipfelbereich gibt es rund 20 Steinbrüche. In drei Steinbrüchen wird der Epprechtstein-Granit abgebaut, die anderen sind stillgelegt und teilweise renaturiert.“ [WIKIPEDIA (17)]. Aktuell wird er immer noch im bayerischen Fichtelgebirge bei Kirchenlamitz gebrochen. Nach Grimm (18) handelt es sich um einen mittelkörnigen, blassgelben bis gelben Granit mit schwarzen Biotit-Nestern; Feldspat deutlich weißgelb bis gelb; Quarz durchscheinend, oftmals in Aggregaten auftretend. Mineralbestand: Alkalifeldspat 37%, Quarz 33%, Plagioklas 20%, Biotit 6%, Muskovit und Chlorit 2%, Akzessorien 2% (Hornblende, Apatit, Turmalin, Zirkon, opakes Erz).



Abbildung 12: Epprechtstein-Granit

5.3. Sedimente (Niederschlagsgesteine)

Sedimente werden in der Regel nach ihrer Entstehung unterschieden:

- Klastische Sedimente (Ablagerungsgesteine): Sandsteine.
- Chemische-biogene Sedimente: Kalkgesteine, die meist im oder in Verbindung mit Wasser entstanden sind.
- Rückstandsgesteine: Kaolin, Bauxit.
- Kohlen

Sandsteine entstehen durch Erosion und Lösung von „alten“ Gesteinen, die als Verwitterungsprodukte neu vermengt, verdichtet und verkittet werden. Petrografisch werden sie durch ihren Mineralbestand, Kristallausformungen, durch Korngefüge und Porenraum (je nach der Höhe des Entstehungsdruckes und des Bindemittels) unterschieden, sowie chemisch u.a. durch ihre zementären Bindungssysteme von Kalziumkarbonaten oder Silikaten.

Reine Sandsteine sind sehr selten. Meist handelt es sich um polymineralische Gesteine mit komplexen Bindungen, sowie Einfärbungen und Einlagerungen. Die meisten Sandsteine sind überwiegend quarzitisch gebunden und weisen eine Korngröße von 0,02 bis 2 mm auf (16).

Der **Ihrlersteiner Grünsandstein**, auch Regensburger Grünsandstein oder Grüner Donausandstein genannt, ist ein grüner bis grünbrauner Kalksandstein mit Fossilbruchstücken. Dieser Grünsandstein entstand in der Oberkreide im Cenoman. *„In der Gegend von Regensburg liegt ein Grünsandstein mit einer Mächtigkeit von 10 bis 15 Metern auf den Jurakalken, der im Mittelalter und unter dem bayerischen König Ludwig I. in zahlreichen Brüchen nördlich von Kelheim in der Frankenalb in Niederbayern und früher in der Umgebung von Saal gebrochen wurde. Die zahlreichen Brüche lagen bei Bad Abbach-Oberndorf, Kapfelberg, und Kelheim und südöstlich von Amberg bei Hiltersdorf, Högling und Wolfering. Im Jahr 2008 ist lediglich ein Steinbruch in Betrieb. ... Der Ihrlersteiner Grünsandstein besteht aus 63 Prozent Quarz, 15 Prozent Glaukonit, 11 Prozent Gesteinsbruchstücke, 5 Prozent Fossilreste, 3 Prozent Alkalifeldspat, zu 3 Prozent aus Zirkon, Rutil und undurchsichtigem Erz. Glaukonit ist für die grüne Farbgebung verantwortlich. Der Sandstein ist hauptsächlich karbonatisch gebunden“* [WIKIPEDIA (19)].



Abbildung 13: Ihrlersteiner Grünsandstein mit deutlich erkennbaren weißlichen Fossilresten.

5.4. Metamorphite

Werden Gesteine jeglicher Art unter hohem Druck und hohen Temperaturen umgewandelt (Metamorphosen) entstehen Metamorphite. Die Umwandlung kann im Kontakt mit magmatischen Material entstehen oder durch regionale tektonische Überlagerungen oder Absenkungen. Es erfolgen Gefügeveränderungen, Umkristallisationen, Veränderungen der Mineralsubstanz, Zerstörung von Fossilien (16).

Einige Metamorphite (Umwandlungsgesteine:

- Gneise
- Schiefer
- Felse
- Marmore
- Etc.

„Der Wunsiedler Marmor ist eine Gruppe von metamorphen Karbonatgesteinen, die als Naturwerkstein hauptsächlich bei Wunsiedel in mehreren Steinbrüchen gewonnen wurden und werden. Dieser oberfränkische Calcitmarmor hat in seiner Region und darüber hinaus besonders in Bayern Verbreitung gefunden. Er tritt in

einem nördlichen (um Wunsiedel) und einem südlichen (um Marktredwitz und Arzberg) Band auf. ...Abbaustellen gab es in Tröstau, Wunsiedel, Holenbrunn, Sinatengrün, Stemmas, Thiersheim, bei Hohenberg an der Eger und bei Dechantsees und Neusorg. Der Wunsiedler Marmor ist in seinem Gefüge mittel- bis grobkörnig kristallin. Seine Farbe ist weiß bis hellgrau, er kann aber auch gelbe und leuchtend orange, seltener dunkelbraune Zonen aufweisen. Im Gesamtbild wirkt er körnig, mitunter farblich ungleichmäßig verteilt und zeigt parallele graue Streifungen. In der Hauptmasse handelt es sich um einen calcitischen Marmor. Dolomitgestein tritt sekundär in den Aufschlüssen von Sinatengrün und Göpfersgrün auf“ [WIKIPEDIA (20)].



Abbildung 14: Wunsiedeler Marmor mit deutlich erkennbaren Calcit-Kristallen und Tönungen vermutlich durch Einlagerungen von Olivin und Serpentin.

5.5. Technische Eigenschaften von Gesteinen

Die technischen Eigenschaften der Gesteine werden wesentlich bestimmt durch Art und Härte der Mineralien, die Bindung und das Korngefüge und deren Festigkeit, die Porosität und die Permeabilität, durch thermisches Verhalten und die Fähigkeit

Feuchte aufzunehmen und abzugeben, sowie durch Raumbeständigkeit und Dehnungsverhalten.

5.5.1. Härte

Die Härte von Mineralien wird definiert durch die Mohs'sche Härteskala. Nach dieser wird ein Mineral von dem nächst-festeren geritzt. Es entstehen zehn Härtegrade vom weichen Talk bis zum harten Diamant. Die Härte allein sagt nichts über die Festigkeit von Gesteinen aus. Wesentlich ist die oben beschriebene Bindung der Minerale über Kornkontaktflächen und Zementation: je inniger und fester verwachsen, desto widerstandsfähiger ist der Verband.

5.5.2. Permeabilität

Permeabilität bezeichnet die Durchlässigkeit eines Steines für Flüssigkeiten und Gase. Da im Porenraum von Steinen immer wechselnde Anteile von Wasser und Luft vorhanden sind, kann es bei zu geringer Durchlässigkeit zu Schäden kommen.

5.5.3. Porosität und Feuchtigkeitsaufnahme

Die Porosität ist das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesteinsvolumen der einzelnen Gesteine. Man unterscheidet u.a., ob es sich um isolierte Poren handelt oder nicht. Porengeometrie und Porengrößenverteilung bestimmen die Beweglichkeit von Gasen und Flüssigkeiten und damit wesentlich die chemisch-physikalischen Vorgänge im Gestein.

Die Porosität ist über Dichte oder Wassersättigung fest zu stellen und gibt einen Hinweis, wie der Zugang zum Inneren von Werksteinen ist.

Die Wasser- oder Feuchtigkeitsaufnahme kann flüssig durch ein Fluten und Tränken der Poren oder durch kapillares Saugen geschehen. Darüber hinaus spielen Adhäsionskräfte der Wasserstoffbrücken eine Rolle beim Verfüllen der Poren, sowie die Luftfeuchte, die in den Poren zu finden ist (bis hin zur Kapillarkondensation. Der Feuchteausaustausch kann auch gasförmig über Wasserdampfdiffusion erfolgen. Wassermenge ist auch die abgegebene Verdunstungsmenge an der Oberfläche.

Der Vorgang von Wasseraufnahme und Wasserabgabe kann über Lösungserscheinungen oder Schadstoffeinträge bereits schädigend auf Gesteine wirken. Weitere Schädigungen können durch Änderungen von Aggregatzuständen erfolgen.

5.5.4. Frost- und Salzsprengung

Die gefährlichste, schädigende Wirkung von eingebrachtem Wasser ist die Volumenausdehnung bei Frost. Gefrierendes Wasser kann bei einer Volumenvergrößerung von ca. 9% einen Druck bis ca. 200 N/mm² auf die Porenwand ausüben. Häufige Frost-Tau-Wechsel führen zu einem schnellen mechanischen Zermürben des Gesteins und damit zu seinem schnellen Verfall.

Ein ähnliches Phänomen stellt die Volumenausdehnung bei der Kristallisation von Salzen dar und die damit verbundene Salzsprengung.

5.5.5. Dehnung

Dehnungen im Gestein führen zu inneren Scherspannungen. Diese können durch hygrische Feuchtaufnahme und der damit verbundenen Längendehnung oder durch Wärmedehnung bei Temperaturerhöhung erfolgen.

Ist die auftretende Scherspannung höher als die Biegefestigkeit kann es zum Bruch kommen.

Die oben beschriebene Bindung der Minerale über Kornkontaktflächen und Zementation ist also wesentlich für die Widerstandsfähigkeit. Geschichtete Gesteine sind weniger widerstandsfähig als solche mit regellos klumpiger Textur.

6. Feuchteschutz durch Hydrophobierung

Wasser bzw. in Wässern gelöste oder geführte Stoffe bilden neben dem CO₂ aus der Luft das größte Potential zur chemischen und physikalischen Verwitterung von Natursteinen und mineralischen Baustoffen (siehe z. B. Feuchtigkeitsaufnahme, Frost- und Salzsprengung).

Wasser wirkt in verschiedenen Formen und Aggregatzuständen am Bauwerk:

- Gasförmig als Wasserdampf (hygroskopisch als Ausgleichsfeuchte)
- Flüssig als freies Wasser, in Tauwasser, durch Kondensation, als kapillare Feuchte, als (Schlag)Regen oder stauendes Sickerwasser etc.
- Fest als Eis.

Die Wasseraufnahme findet - wie oben beschrieben - im Porensystem der Natursteine statt. Hydrophobieren heißt damit, einen Naturstein oder Baustoff wasserabweisend auszustatten und damit präventiv einen wirksamen Schutz vor ungewolltes Wassereindringen zu erzeugen (Feuchteschutz).

Hydrophobierungsmittel gehören somit in die Gruppe der Konservierungsmittel, also zu den Bausubstanz erhaltenden Stoffen.

Historische Konservierungsmittel sind Öle, natürliche Harze und Wachse, auch anorganische Mittel wie Wassergläser. Auf die historischen Mittel soll hier ebenso wenig eingegangen werden wie auf Metallseifen.

Es werden typische Hydrophobierungsmittel betrachtet und vorgestellt, die heute industriell hergestellt werden. *„Dabei spielt die Wirkungsweise der unterschiedlichen Mittel, - filmbildend (dampfsperrend) oder porenauskleidend (diffusionsoffen) - zunächst keine Rolle, da nur die Reduktion der Wasseraufnahme von Bedeutung ist“* [SNETHLAGE (21 S. 157)].

Moderne Hydrophobierungen erfolgen durch Imprägnierungen, d. h. durch Stoffe, die möglichst tief in den Porenraum eindringen und reagieren ohne an der Oberfläche einen Film auszubilden und die Wasserdampfdurchlässigkeit zu verhindern.

6.1. Konservierungsmittel und ihre Wirkmechanismen

Industriell gefertigte Konservierungsmittel werden direkt auf die Baustoffoberflächen bzw. in die Porenräumen gebracht, wo sie einen Film bzw. Filmfragmente ausbilden, die sich dort verankern. Sie können auch in gelöster Form – in Lösemittel oder als Dispersion - an die Flächen gebracht werden, wobei das Mittel nach Verdunsten des Lösungsmittels zur Wirkung kommt.

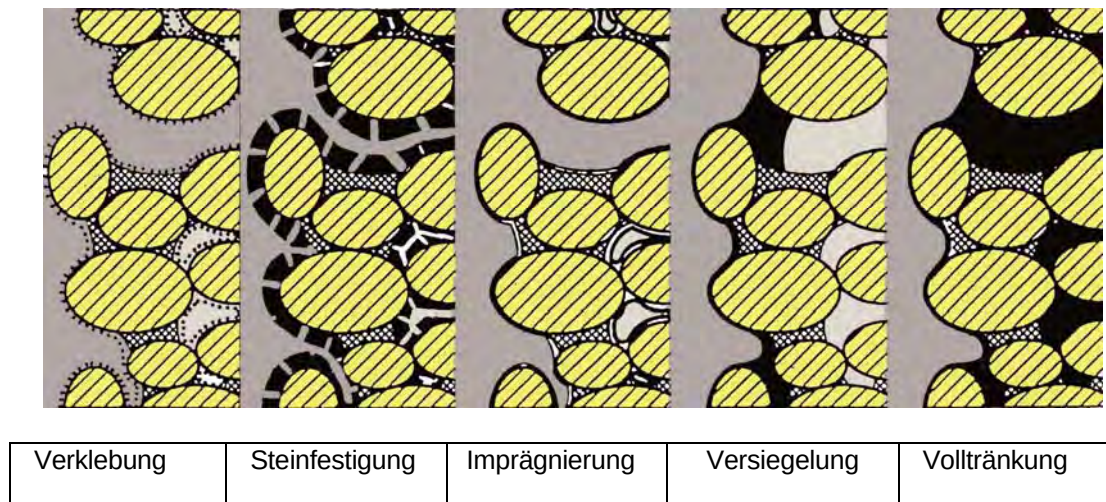


Abbildung 15 Schematische Darstellung der Wirkungsweise von Konservierungsmitteln nach HONSINGER (22).

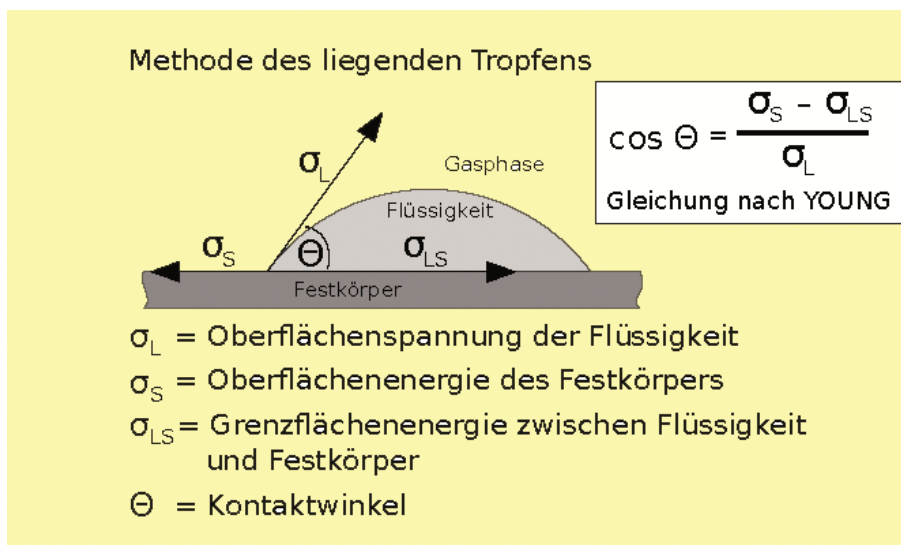


Abbildung 16: Schaubild Gesetzmäßigkeiten der Oberflächenspannung [WILLEMS (23)]

An den Grenzflächen von Stoffen treten Spanungskräfte auf, die einen Körper verformen. Bei Festkörper und Flüssigkeit wird z. B. durch diese Grenzflächenspannung (Kraft pro Länge) die Flüssigkeit zu einem Meniskus verformt. Jeder Stoff hat verschiedene Oberflächenspannungen, so dass sich bei Wassertropfen in der Regel ein spezifischer Randwinkel zur Festkörperoberfläche einstellt.

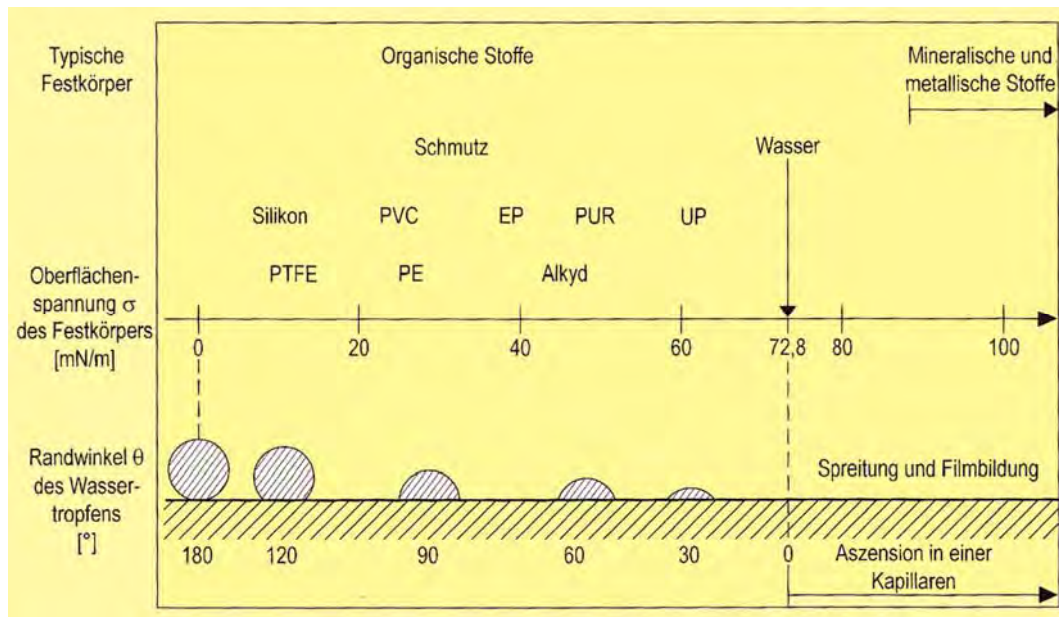


Abbildung 17: Verhältnis von Oberflächenspannungen und Randwinkel bei verschiedenen Stoffen. Während sich bei unbehandelten mineralischen Stoffen kein Randwinkel einstellt, ergibt sich bei Silikon z. B. ein Winkel von 120° [WILLEMS (23 S. 206)]

Anders gesagt, zeigen die niedrigen Grenzflächenspannungen mit 0 bis 60 mN/m und Winkel von θ 180° bis 30°, dass die Saugfähigkeit des Materials verloren gegangen ist (23).

Die Wirksamkeit von Hydrophobierungen kann über Tropfenaufsetzttests überprüft werden, wobei der Randwinkel zwischen 90° und 180° liegen muss, um als hydrophob, also wasserabweisend zu gelten.

Moderne Hydrophobierungsmittel bestehen aus synthetischen organischen oder siliziumorganischen Produkten, die meist kombiniert mit Zusätzen oder Mischungen zu Systemen vergütet sind:

- Organische (Kohlenstoff-) Polymerisationsprodukte (meist Acrylate), gelöst oder ungelöst.
- Siliziumorganische Verbindungen (Alkylakoxysilane und Organosiloxane), gelöst oder ungelöst.

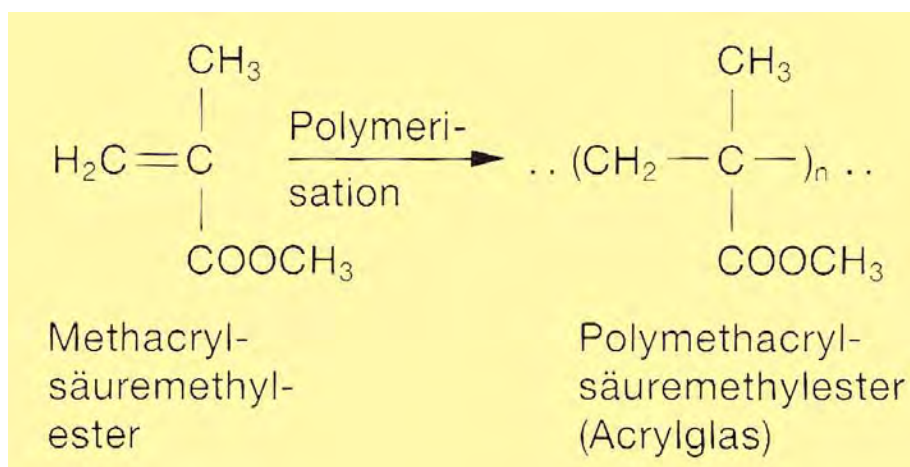
Die für die Hydrophobierung eingesetzten Mittel werden in der Folge kurz klassifiziert und beschrieben.

6.2. Kohlenstoffverbindungen (Kunststoffe, Polymerkarbonate)

Kunststoffe sind Verbindungen von Kohlenstoffatomen (C) mit Wasserstoffen (H) und anderen organischen Molekülgruppen. Bei ihrer Herstellung werden kleine Moleküle zu großen Strukturen verbunden. Die Komponenten (z.B. Harz und Härter) beginnen eine Polymerisation-Reaktion. Aus den monomeren Ausgangsstoffen werden große, komplexe, polymere Kettenmoleküle, die sich verschieden räumlich ausdehnen.

Produkte mit klebender, festigender und hydrophobierender Wirkung. Sie werden durch ihre Reaktionspartner und Bildungsreaktionsabläufe in Gruppen unterschieden, z. B.:

- Epoxidharze (EP)
- Polyurethanharze (PUR)
- Polyesterharze (PES)
- Acrylharze (PMMA)



Die eingesetzten Reaktionsharze sind synthetisch-organische **Abbildung 18: Bildung des PMMA aus Methacrylmethylester [KARSTEN (24 S. 313)].**

Zur Verwendung als Hydrophobierungsmittel werden die erzeugten Polymere in organischen Lösemitteln gelöst und appliziert; meist Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) oder Mischpolymerisate. Je nach Anwendungszweck und Anforderung wird deren Konzentration modifiziert. Nach der Applikation verdunstet das Lösemittel und die Kunststoffe lagern sich ab. Für eine kurze Zeit kommt es zu einer Nachpolymerisation.

Der durch die erzeugte Oberflächenspannung entstehende Randwinkel beim Tropfentest sollte größer 90° sein.

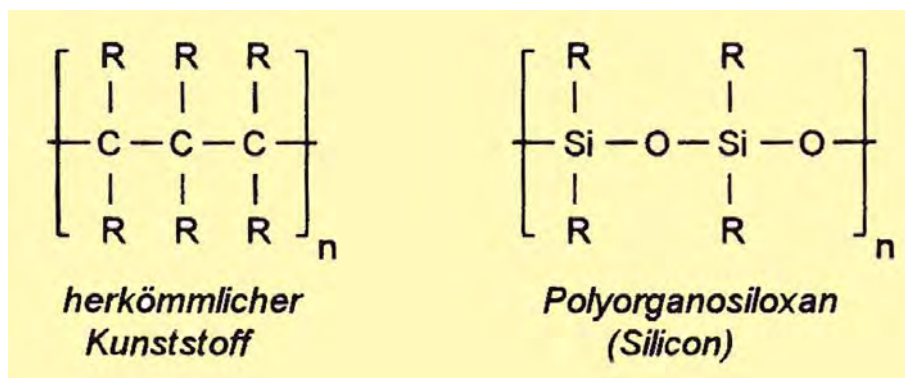


Abbildung 19: Vergleich Kohlenstoffkette (Kunststoff) und Siliziumorganischen Kette [KARSTEN (25 S. 288)].

6.3. Siliziumorganische Verbindungen (Silikone)

Silikone unterscheiden sich von den Kohlenstoffverbindungen dadurch, dass anstatt des Kohlenstoffatoms (C) und seiner Hauptketten (.z. B. Alkan-Kette -C-C-) Silizium-Sauerstoff-Verbindungen vorliegen (Siloxankette -Si-O-). Wird eine organische Kohlenstoff-Gruppe (R) an ein Siliziumatom gebunden, entsteht eine siliziumorganische Verbindung.

Alkylalkoxysilane sind monomere Verbindungen von Silizium mit funktionellen Alkoxygruppen und einem Alkylrest (OR) - umgangssprachlich Silane genannt. Diese können über Hydrolyse und Kondensation zu oligomeren oder polymeren Organosiloxanen (umgangssprachlich: Siloxane) verkettet werden.

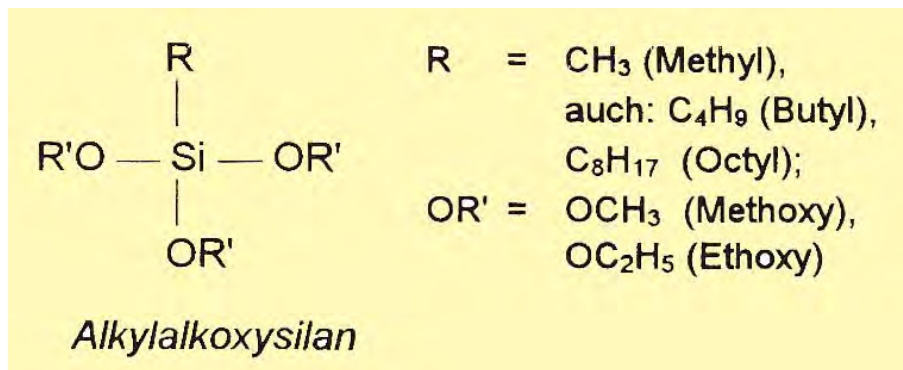


Abbildung 20: Monomeres Alkylalkoxysilan [KARSTEN (25 S. 290)].

Als Hydrophobierungsmittel kommen heute überwiegend Silan/Siloxan-Gemische in unterschiedlicher Applikationsform als Flüssigkeiten oder Cremes zur Anwendung (21). Der durch die erzeugte Oberflächenspannung entstehende Randwinkel des Tropfentests sollte bei ca. 120° liegen.

6.4. Anforderungen an die Hydrophobierungsmittel

Da die Permeabilität von Natursteinen durch deren unveränderliche Poren festgelegt ist, müssen die Hydrophobierungsmittel in ihrem flüssigen, nicht ausreagiertem Zustand eine Viskosität aufweisen, die es ihnen erlaubt, möglichst tief in das Porensystem der Steine zu gelangen. Dies ist durch möglichst geringe Molekülgröße erreichbar.

Als günstig hat sich auch herausgestellt, wenn sich die siliziumorganischen Mittel an ein silikatisches Grundgerüst im Naturstein andocken können.

Wässrige Dispersionen sind aufgrund des schlechten Eindringverhaltens (hohe Teilchengröße) nur eingeschränkt einsetzbar (21).

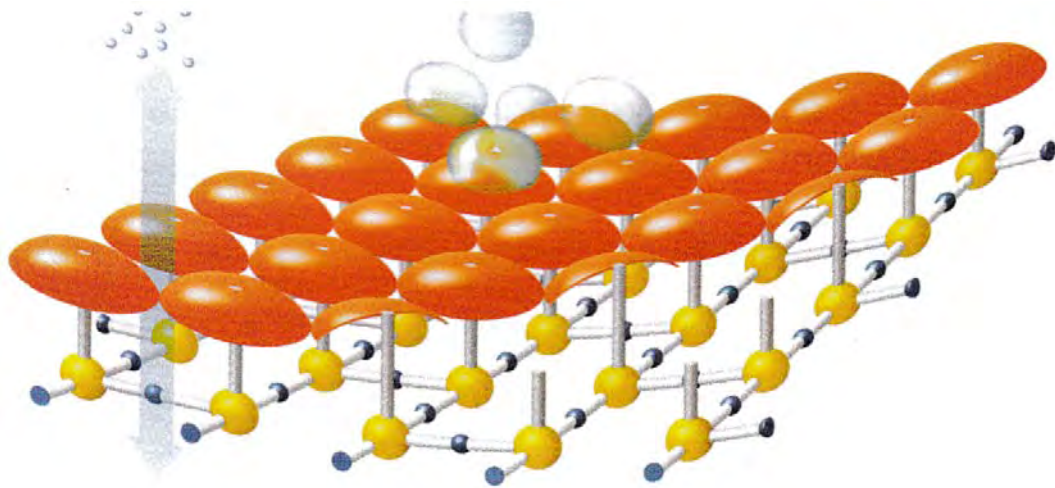


Abbildung 21: Ausbildung von Oberflächenspannung erhöhenden Schirmen durch die Alkydgruppe am Silikonharz [WTA (26 S. 4)].

7. Eigene Untersuchungen

7.1. Probekörper

Wie eingangs erwähnt finden vergleichende Untersuchungen zu den stofflichen Veränderungen bei Hydrophobierung und Bewitterung an den ausgewählten Natursteinen statt, sowie deren Auswirkung auf die Pionierbesiedelung der Natursteine mit Mikroorganismen.

Um zu betrachten ob die petrografischen Eigenschaften von verschiedenen Natursteinen (Bindungssysteme und Mineralienbestand als Nährstoffe) Einfluss auf die Besiedelung hat, werden verschiedene Gesteinsarten eingesetzt. Die Auswahlgesteine sind Epprechtstein Granit (Kürzel EG) aus der Gruppe der Magmatite, Wunsiedler Marmor (Kürzel WM) aus der Gruppe der Metamorphite und Ihrlersteiner Grünsandstein (Kürzel IS) aus der Gruppe der Sedimente.

Zunächst werden die ausgewählten Gesteine auf das Format von 6 x 6 x 6 gesägt. Es folgen die beiden Oberflächenbearbeitungen glatt (geschliffen) und rau (handwerklich geriffelt auf den jeweils gegenüberliegenden Seiten). Danach werden die Probekörper gereinigt und im Ofen bei ca. 105°C getrocknet. Nach einer Zwischenlagerung zum Erreichen ihrer Ausgleichsfeuchte werden sie hydrophobierend imprägniert (siliziumorganisch mit Moeller Stoncare HMK S233, bzw. mit dem organischen Polymerisat Motema Finish X10 von Intermonument).

Tabelle 4: Überblick über die Probekörper und deren Bezeichnungen.

Bezeichnung der Probekörper: □ EG = Epprechtstein-Granit □ IS = Ihrlersteiner Grünsandstein □ WM = Wunsiedeler Marmor	Bezeichnung der Oberflächenbearbeitungen: ➤ glatt = Schliff bis Korn 120 ➤ rau = handwerklich geriffelt
Bezeichnung der Imprägnierungen: ○ OH = ohne Hydrophobierung ○ H = hydrophobiert mit dem Silikonprodukt HMK-S233 (Moeller StoneCare) ○ HPMA = hydrophobiert mit dem Acrylatprodukt Motema-Finish-X-10 (Intermonument)	Bezeichnung der künstlichen Alterung: ◇ H_z = zerstörte Silikonimprägnierung ◇ HPMA_z = zerstörte Acrylatimprägnierung



Abbildung 22: Gefertigte Natursteinwürfel als Probekörper: Links Wunsiedler Marmor, mittig Ihrlersteiner Grünsandstein und rechts Epprechtstein-Granit.



Abbildung 23: Applikation der Hydrophobierungsstoffe bis zur Sättigung innerhalb max. 5 Minuten pro Fläche.

7.2. Versuchsaufbau und klimatische Randbedingungen

Der Versuchsaufbau soll natürliche Klimaabläufe im Freien weitgehend simulieren, findet aber im Labor statt. Es werden folgende Rhythmen festgelegt:

- Lichtveränderungen zwischen Tag (8 Stunden) und Nacht (16 Stunden).
- Feuchteveränderungen zwischen Tag (8 Stunden) und Nacht (16 Stunden).

Einige Parameter werden dabei möglichst konstant gehalten:

- Die Raum- und Wassertemperatur bei ca. 20°C und ca. 40% rel. LF.
- Die relative Feuchte in den Klimawannen nachts auf ca. 75 % rel. LF.

Es werden Wannen gefertigt, die einen abgegrenzten Klimaraum ergeben. In die PVC-Behälter werden Stäbe eingedreht, die eine möglichst offene Lagerung der Probekörper über einer Wasserfläche zulassen. Die Wannen können mit PVC-Deckeln geöffnet und dicht geschlossen werden.

- Tagsüber kann über die Atmosphäre Substrat eingetragen werden.
- Regenwasser dient als Feuchtespender.
- Dauer des Versuchs 115 Tage.

In der Regel sind sie tagsüber geöffnet und nachts komplett geschlossen. Dabei stellt sich die gewünschte hohe relative Luftfeuchte von ca. 75 % ein (siehe Diagramm).



Abbildung 24: Kunststoffwanne mit eingedrehten Gewindestäben zur Lagerung der Probekörper.



Abbildung 25: Probekörper in geöffneter Wanne mit zusätzlicher UV-Beleuchtung.

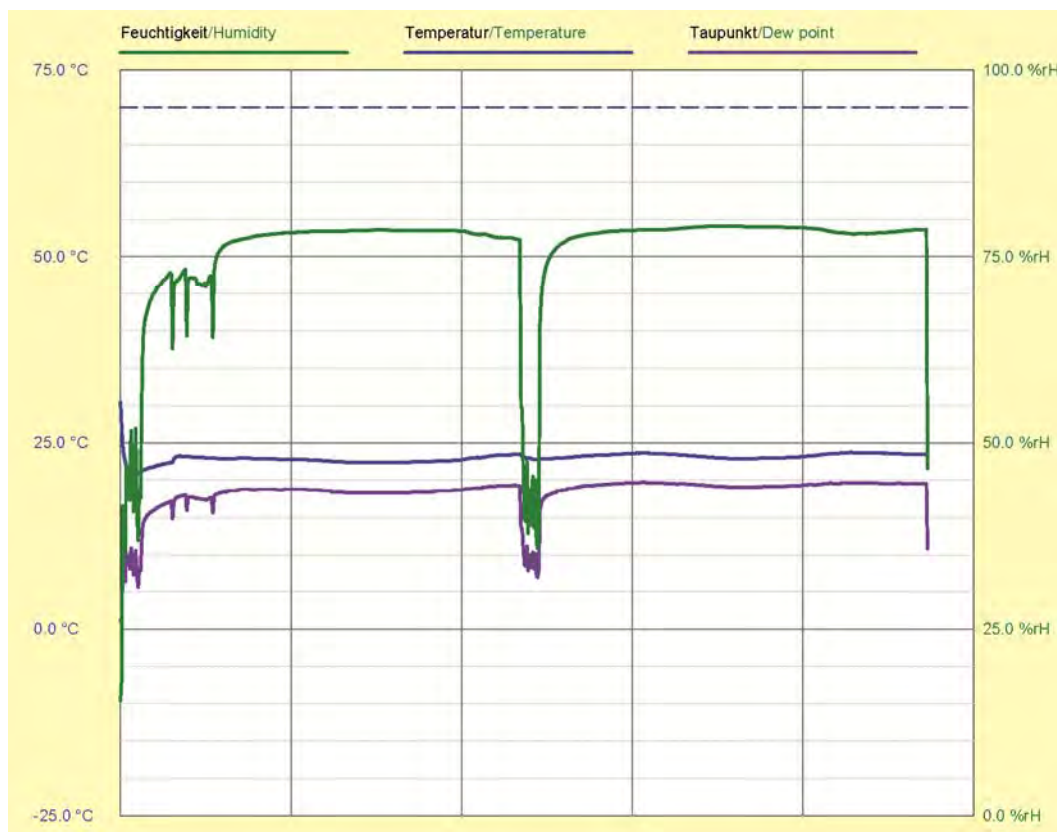


Diagramm 1: Feuchte-Temperatur-Diagramm des Raumklimas in den Wannen. Bei geschlossenen Wannen stellt sich das gewünschte Raumklima von ca. 24°C und ca. 75% rel. LF ein. Dieses Klima wird über 115 Tage für jeweils täglich 16 Stunden gehalten. Bei Öffnung des Klimaraums sinkt die rel. LF auf ca. 40 % des umgebenden Raumes.

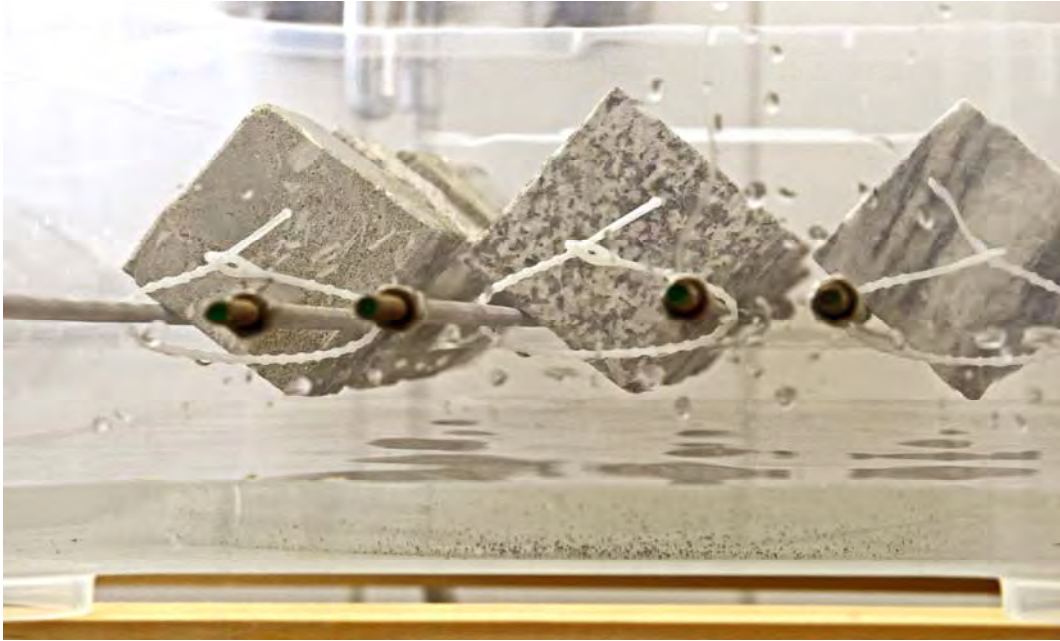


Abbildung 26: Schräg gelagerte Probekörper, "frei" über dem Regenwasserbad schwebend.



Abbildung 27: Substrateinlagerung über die Atmosphäre in einer Klimawanne.

7.3. Untersuchungen zur Veränderung der stofflichen Eigenschaften von Natursteinen und Imprägnierungen durch Modulationen der Oberflächen, sowie durch künstliche Alterung

Über spezifische Messungen wird überprüft, wie sich Feuchte auf imprägnierten rauen handwerklichen Oberflächen verhält und wie auf glatten geschliffenen und ob ein Unterschied bei der Besiedelung von horizontalen gelagerten Ablagerungsflächen und schrägen besteht.

1. Messung der Oberflächenrauheit mittels Laserscantechnologie.
2. Messung des Zustands der Hydrophobierung über Kontaktwinkel von aufgesetzten Wassertropfen.
3. Messung der Erstbesiedelung mit Mikroorganismen durch PAM und Klebekontaktstreifen.

Weiter wird untersucht wie sich bei künstlich gealterten Natursteinen die imprägnierten Oberflächen sowohl die Hydrophobierungen als auch die Besiedelung mit Mikroorganismen verhalten.

- Künstliche Alterung durch Veränderung der Oberfläche mittels Sandstrahlen (simulierter Windschliff).
- Künstliche Alterung der Oberfläche durch intensive UV Bestrahlung mit Entstehung von Ozon und hoher thermischer Belastung (simulierte Sonneneinstrahlung).
- Visuelle Begutachtung der bestehenden Besiedelung
- Messung der Besiedelung mit Mikroorganismen durch PAM-Diagnostik und mikroskopische Auswertung der Klebekontaktstreifen.

7.3.1. Veränderungen Rauheit durch handwerkliche Oberflächenbearbeitung

Die handwerkliche Oberflächenbearbeitung der Natursteine bedingt deren Rauheit. Geschliffene Oberflächen sind wesentlich glatter als raue. Die Differenz (Δ) variiert vom Faktor 2 bis 3,73. Gemessen wird mit einem Keyence Lasermikroskop in Mikrometer [μm].

Lasermikroskopie (27) ist ein Verfahren, dass dem Laserscanning sehr ähnlich ist. Dabei werden Objekte nicht mehr als Ganzes erfasst, sondern nur mehr mit einem gerichteten Lichtstrahl in kleinen punkt- oder linienförmigen Rastern. Die einzelnen

Rasterpunkte werden dann am Computer über Software mit analytischen Verfahren zusammengesetzt. Die Einsatzbreite eines solchen Mikroskops ist sehr hoch, da Objekte auch dreidimensional als Punktwolke oder mittels Falschfarben erfasst und im Computer weiterverarbeitet werden können (siehe Abbildung 29).



Abbildung 28: Laserscanmikroskop der Firma Keyence, VK 9710, mit Software unterstützter Auswertung am PC.

Tabelle 5: Mittlere Rauheiten [μm] von geschliffenen und handwerklichen Oberflächen, sowie deren Höhendifferenz (Δ).

IS_OH	glatt	23,23	rau	46,37	Δ 23,14
EG_OH	glatt	7,14	rau	33,77	Δ 26,63
WM_OH	glatt	9,68	rau	36,68	Δ 29,00

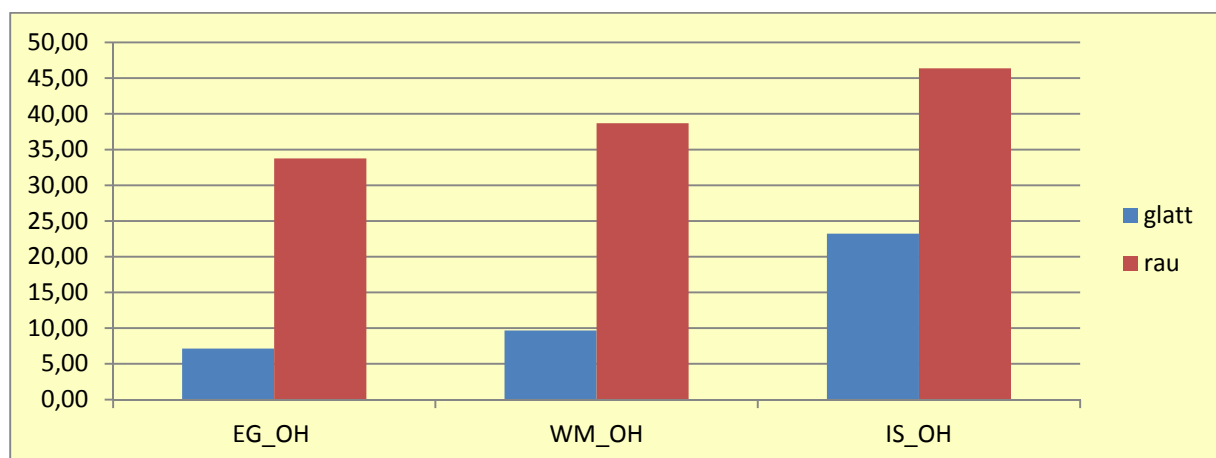


Diagramm 2: Veränderung der Rauheit von glatten zu rauen-handwerklichen Oberflächen bei unbehandelten (OH) Natursteinen.

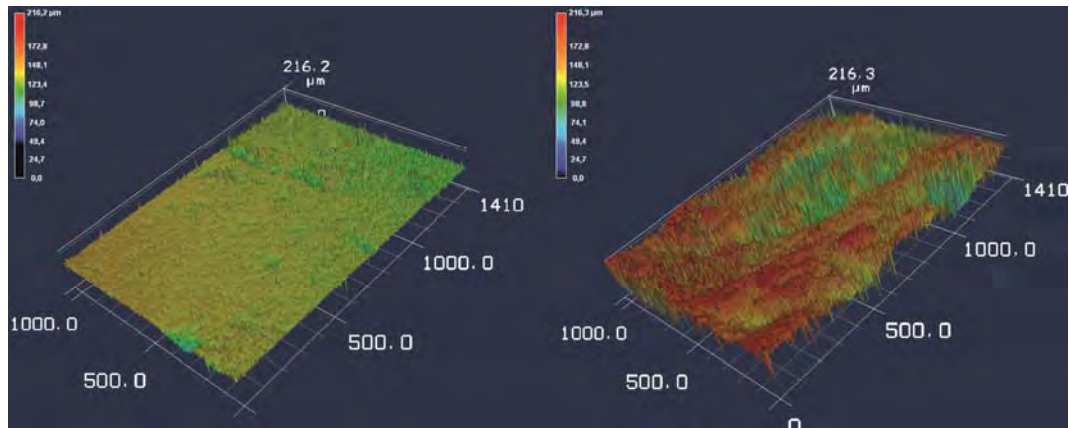


Abbildung 29: Bildliche Darstellung über falschfarben der Rauheit des Epprechtstein Granits: links glatte Oberfläche und rechts die raue.

7.3.2. Veränderungen der Rauheit durch Imprägnierung

Imprägnierungen verändern die Rauheit eines formatierten Probekörpers deutlich. Allerdings kann keine Gesetzmäßigkeit bezüglich der Veränderungen der Rauheit durch Imprägnierungen festgestellt werden. Es kommt zu Erhöhungen, aber auch zu Verringerungen der Rauheit durch Imprägnierungen und künstliche Alterung. Anhand der Messungen ist lediglich die Tendenz festzustellen, dass nach einer Alterung von Imprägnierungen es zu einer Annäherung des unbehandelten Probekörpers kommt.

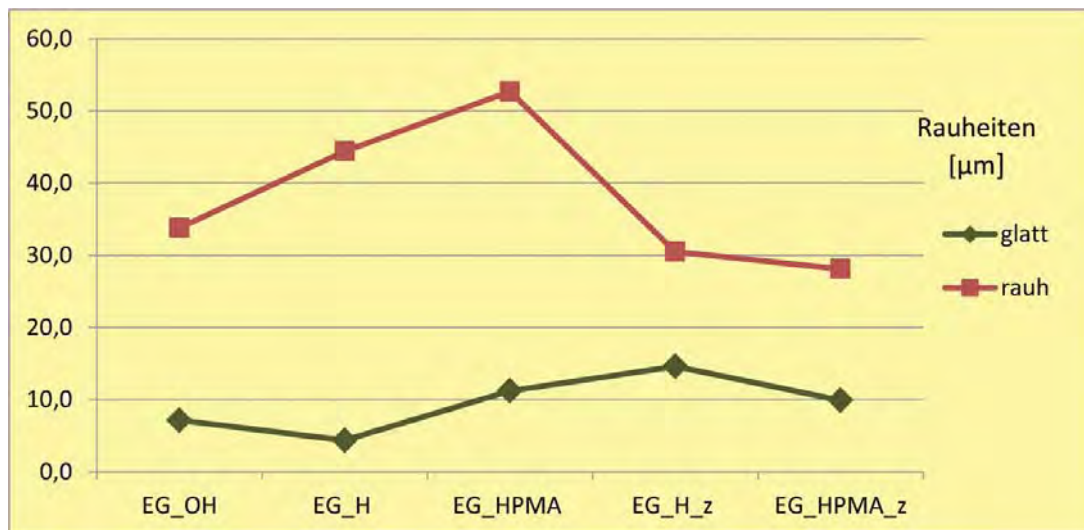


Diagramm 3: Darstellung der Veränderungen der Rauheiten durch Imprägnierungen am Beispiel des Epprechtstein Granits. Die Veränderungen sind nicht prognostizierbar. Tendenziell kommt es nach einer Alterung zu einer Annäherung von Alterswert und Ausgangswert.

7.3.3. Veränderung der Feuchteaufnahme durch Hydrophobierung

Zur Bestimmung der Wirksamkeit von hydrophobierenden Imprägnierungen wird der Randwinkel durch einen standardisierten Tropfentest festgestellt. Zum Einsatz kommt das Gerät Contact-Angle-System OCA der Firma dataphysics.

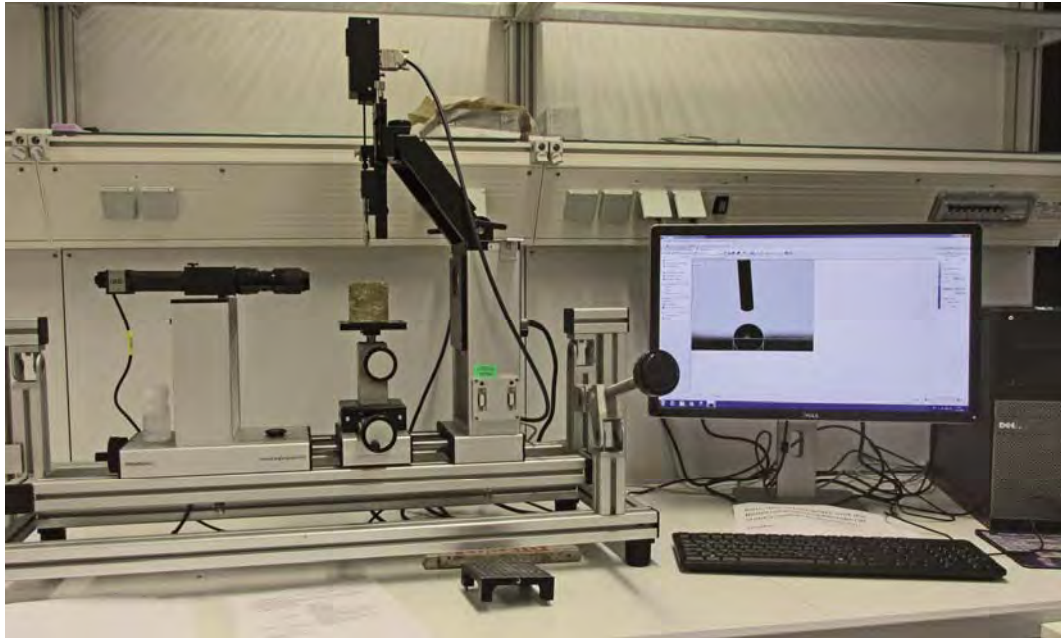


Abbildung 30: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Kontaktwinkels bei aufgesetzten standardisierten Wassertropfen.

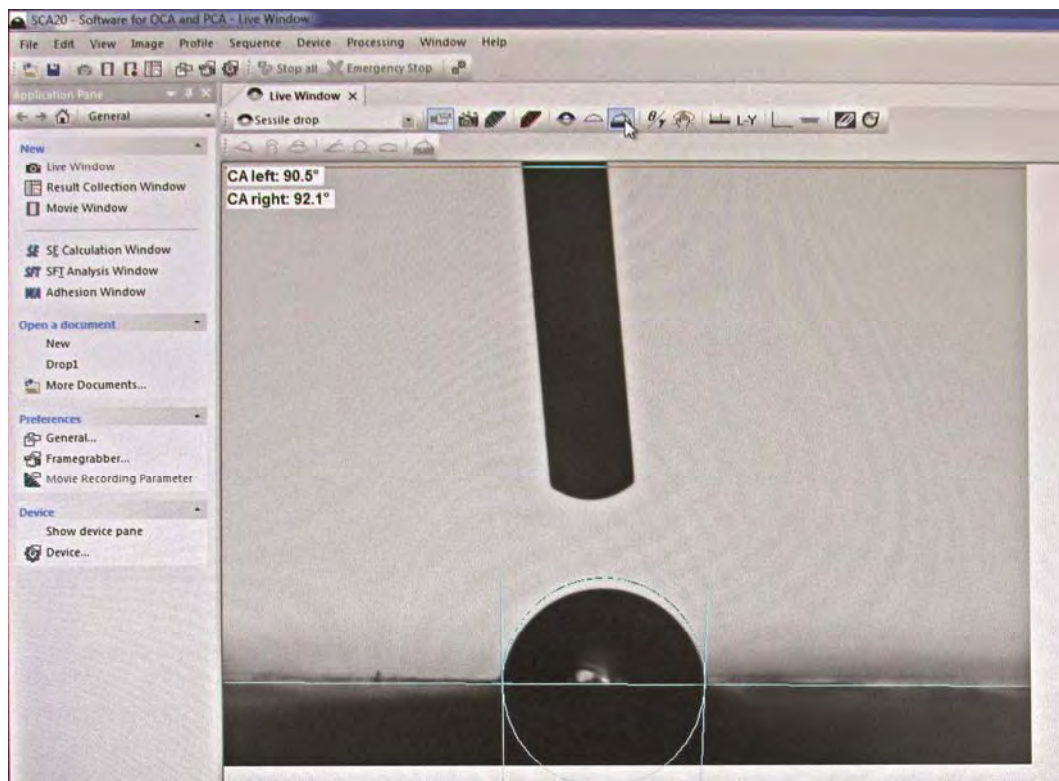


Abbildung 31: Messung des Kontaktwinkels eines definierten Wassertropfens zur Oberfläche eines Probekörpers.

Alle eingesetzten Imprägnierungen erhöhen die Hydrophobie deutlich.

Die prognostizierten Werte bei der siliciumorganischen Hydrophobierung liegt bei 120°. Diese Winkel werden nur zweimal erreicht.

Die Prognose bei der polymeren Kohlenstoffverbindung liegt bei ca. 90°, der in der Regel auch erreicht wird.

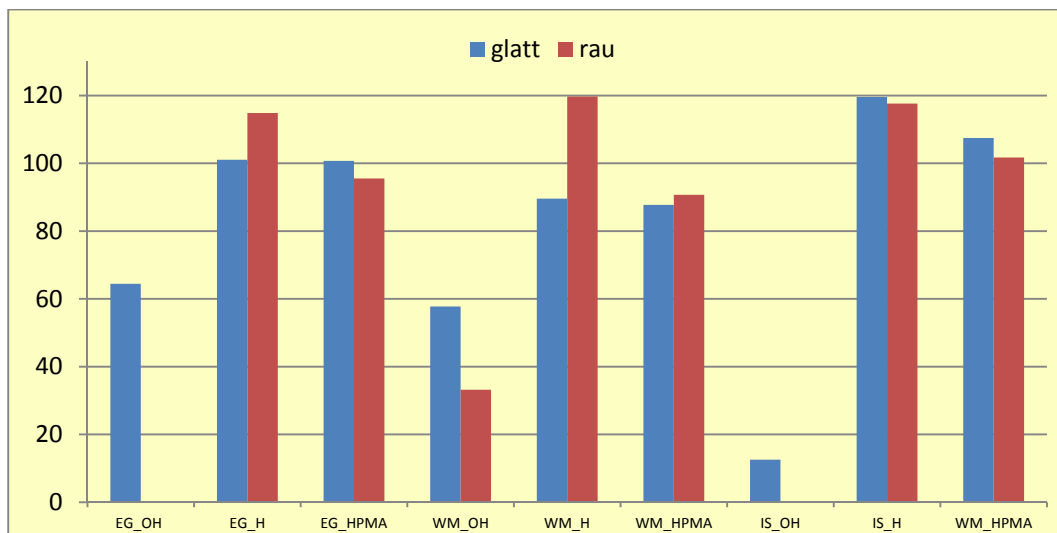


Diagramm 4: Überblick über Veränderungen der Randwinkel θ [°] nach Hydrophobierung. Am deutlichsten ist die Veränderung bei der unbehandelten rauhen Oberfläche des Ihrlersteins (IS_OH) zu den behandelten IS_H, bzw. IS_HPMA.

7.3.3. Veränderung der Probekörper durch künstliche Alterung

Die künstliche Alterung wird durch Sandstrahlen und einen Beschuss mit UV-Licht erzeugt. Ziel der künstlichen Alterung ist nicht die Zerstörung des Gesteins, sondern die Simulation von Verwitterung!

Der UV-Bestrahlung erfolgt über eine 400 Watt starke Quarzlampe in einer Entfernung von ca. 35 cm und über eine Dauer von 32 Stunden. Die Temperatur steigt dabei auf ca. 50°C. Die intensive Bestrahlung erzeugt Ozon, das allseits auf die Probekörper wirkt. Der Bestrahlungsraum ist mit reflektierenden Metallfolien allseits abgeschlossen.

Der simulierte Windschliff erfolgt über sandstrahlen mit Granatsand der Mohshärte 7 und einer Größe von 0,1 μm .



Abbildung 32: Versuchsanordnung zur künstlichen Alterung durch eine intensive UV-Bestrahlung. Quarzlampe und frei aufgestellte Probekörper.

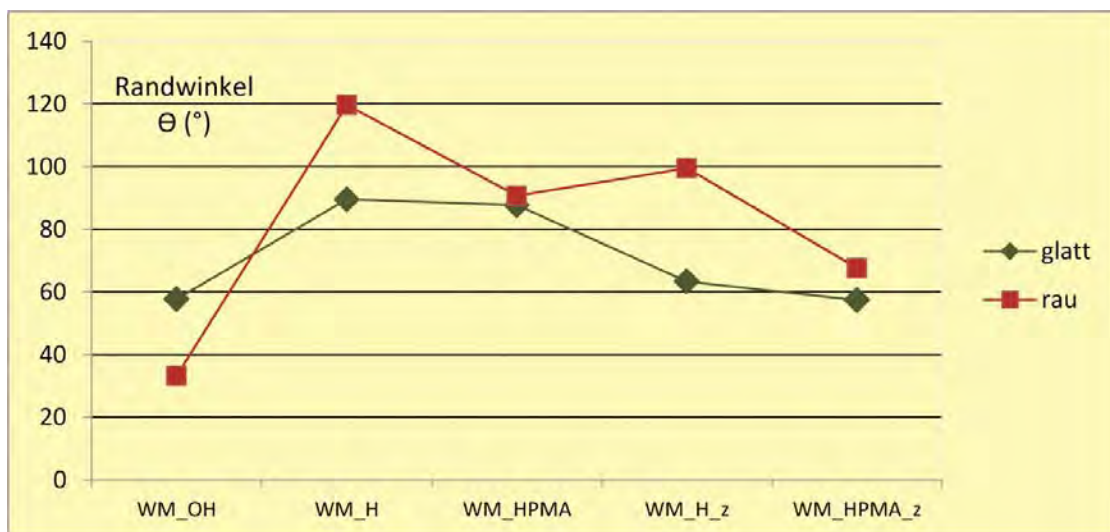


Diagramm 5: Darstellung der Veränderungen der Randwinkel durch Imprägnierungen und künstliche Alterung bei Wunsiedler Marmor. Im Vergleich zum OH-Wert steigt der Randwinkel um nach der Alterung gemäß den _z-Werten wieder zu fallen.

7.4. Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedelung

Die Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedelungen erfolgen visuell durch Augenschein und durch Lichtmikroskopie im Labor Dr. Ziemer in München, sowie durch PAM-Diagnostik am Probekörper im Labor der Hochschule-Wismar.

Die Messungen mit der PAM-Diagnostik werden nach 24, 59 und 115 Tagen Induktionszeit durchgeführt. Die Labor-Messungen von Probenabnahmen mit Strips nach 115 Tagen.

7.4.1 In Augenscheinnahme (visuelle Betrachtung)

Für die Visuelle Betrachtung wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut von HOFBAUER, BREUER, FITZ und SEDLBAUER ein Bewertungsschema erarbeitet und eingeführt das als Grundlage für die eigenen Betrachtungen und Bewertungen herangezogen wird (3).

Tabelle 6: Bewertung des Visuellen Bewuchses [HOFBAUER, BREUER, FITZ, SEDLBAUER (3 S. 146)].

Zahl	Kürzel	Bedeutung
0	-	visuell kein Befall zu erkennen
0-1	(+)	nur 1 bis 3 kleine Punkt(e) ¹⁾
1	+	2 bis wenige deutliche Punkte und/oder blasse – schütterre Flecken ²⁾ bzw. Ablaufspuren (gesamte Ausdehnung unter 5% oder sehr schwach)
1-2	+(+)	einige deutliche Punkte ¹⁾ bzw. schütterre Flecken ²⁾ , Gesamtausdehnung unter ca. 5% oder sehr schwach
2	++	zahlreiche Punkte ¹⁾ bzw. schütterre Flecken ²⁾ , gesamt 5% bis 25% von deutlichem Bewuchs und Verschmutzung betroffen
2-3	++(+)	Aufwuchs/Verschmutzung mäßig bis deutlich, 25% bis 37,5% sind insgesamt deutlich verschmutzt oder bewachsen
3	+++	Aufwuchs/Verschmutzung deutlich, 37,5% bis 50% der Oberfläche sind deutlich bewachsen oder verschmutzt
3-4	+++(+)	deutlich bis stark, 50% bis 62,5% der Aufnahmefläche sind von deutlichem Bewuchs und/oder deutlicher Verschmutzung betroffen
4	++++	starke(r) Bewuchs/Verschmutzung, 62,5% bis 75% der untersuchten Oberfläche sind deutlich bewachsen bzw. verschmutzt
4-5	++++(+)	stark bis sehr stark, 75% bis 87,5% der Fläche zeigen deutlichen Aufwuchs bzw. starke Verschmutzung
5	+++++	sehr stark, Fläche fast durchgehend bewachsen, 87,5% bis die gesamte Fläche sind von deutlichem Aufwuchs bzw. starken Verschmutzungen bedeckt.

¹⁾ als Punkte werden Aufwuchs bzw. Verschmutzungen gerechnet, deren Ausdehnung ca. 3 mm im Durchmesser nicht überschreitet.

²⁾ als Flecken werden flächige Erscheinungen mit einer Ausdehnung über ca. 3 mm bezeichnet.

7.4.2. PAM-Diagnostik (Fluoreszenzquantenausbeute)

Die Fluoreszenzmikroskopie ist eine spezielle Form der Lichtmikroskopie. Sie beruht auf dem physikalischen Effekt der Fluoreszenz, bei dem Fluoreszenzfarbstoffe (Fluorochrome) mit Licht einer Wellenlänge angeregt werden und dadurch wenige Nanosekunden später Licht einer anderen Wellenlänge abstrahlen; durch spezielle Filter wird sichergestellt, dass nur das abgestrahlte Licht beobachtet wird.

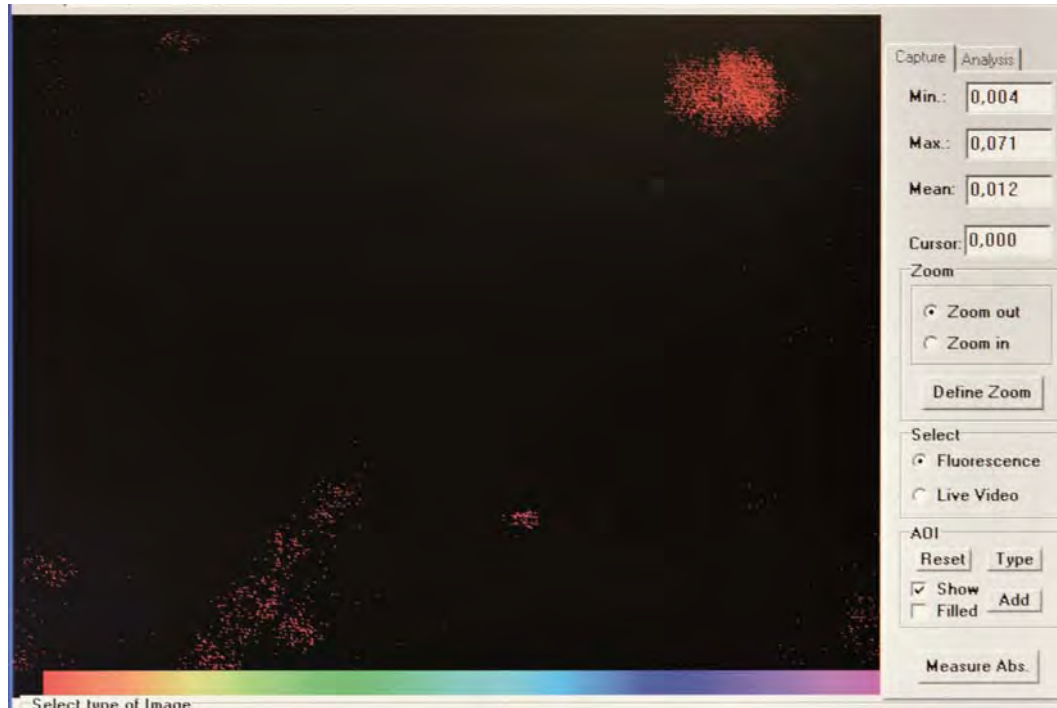
Um den Grad der mikrobiellen Algen- Besiedlung zu bestimmen, wird die sogenannte Puls- Amplitudenmodulierte Fotometrie (PAM- Messung) eingesetzt.



Abbildung 33: Anlage der Firma Walz, Typ IMAG- C; S/N: IKEA0130; Kamera Modell: IMAG-K. im Labor der Hochschule Wismar zur Messung der Fluoreszenzquantenausbeute durch die Puls-Amplitudenmodulierten Fotometrie (PAM).

Bei einer Messung mit der Puls-Amplitudenmodulierten Fotometrie (PAM) wird mit kurzwelligem blauem Fluoreszenzlicht Chlorophyll a angeregt und die rückstrahlende Fluoreszenz als Größe für die Effizienz der photosynthetischen Energieumwandlung bestimmt und damit auf den Grad der Besiedelung geschlossen. Die bestrahlte Probe zeigt eine proportional zum Chlorophyllgehalt messbare Fluoreszenz, die als Fluoreszenzquantenausbeute Φ_F bezeichnet wird (Verhältnis der emittierten Photonen zur Anzahl der absorbierten Photonen) (27).

Zur Untersuchung werden die Probekörper aus ihren Klimawannen genommen und unter der Messkamera positioniert und dann bestrahlt. Die Messung ergibt einen minimalen Wert (Min.) einen maximalen (Max.) und einen Mittelwert (Mean).



. Abbildung 34: Beispiel einer Auswertung durch die PAM-Diagnostik. Die roten Punktwollen stellen die Gebiete mit erhöhter Fluoreszenz dar: Max.-Wert 0,071 und Mittelwert 0,012.

Für die Bewertung der Messergebnisse hat das Dahlberg- Institut eine graduelle Skalierung erarbeitet. Gemessen an der Dahlberg Skala können für den Untersuchungszeitraum nur sehr geringe Besiedelungen festgestellt werden. Es wird maximal die Stufe 1, sehr schwach besiedelt erreicht.

Tabelle 7: Dahlberg-Skala zur Messung der Fluoreszenzquantenausbeute bei phototrophen Mikroorganismen[SELLNER (28 S. 24)].

Intensitätsstufe	Mittlere Fluoreszenzquantenausbeute	Besiedlungsgrad
0	$\leq 0,010$	ohne Besiedlung
1	0,011- 0,020	sehr schwach besiedelt
2	0,021- 0,040	schwach besiedelt
3	0,041- 0,080	mittelmäßig besiedelt
4	0,081- 0,160	stark besiedelt
5	$\geq 0,161$	sehr stark besiedelt

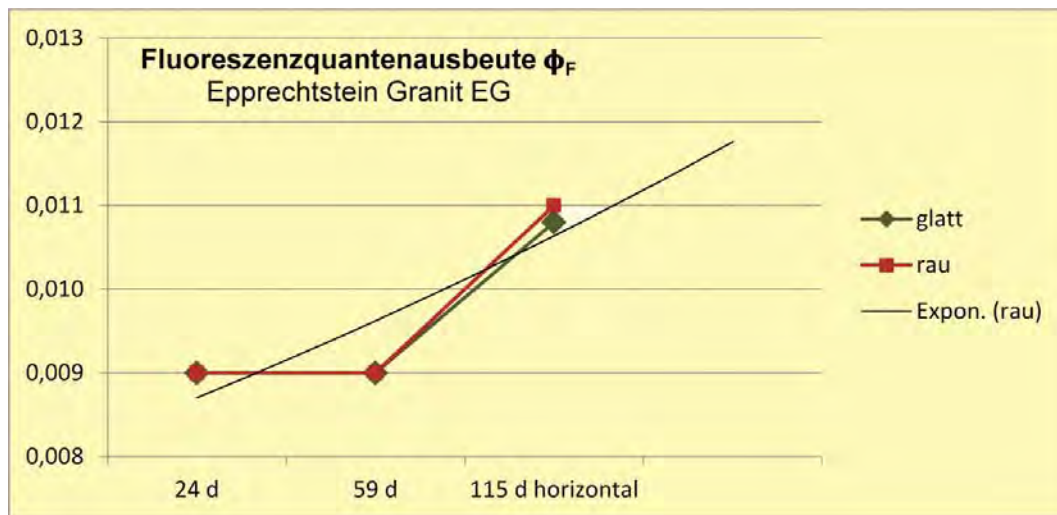


Diagramm 6: Entwicklung der Besiedelung am Epprechtstein Granit (Mittelwerte). Es wird maximal der Besiedelungsgrad 1 erreicht.

7.4.3. Überprüfung des Befalls durch mikroskopische Auswertung von Strips

Im Labor des Instituts Dr. Ziemer wird die Abnahme von Mikroorganismen mittels eines Vinylacetat-Klebestreifens (Oberflächenkontaktprobe) durchgeführt. Der Klebestreifen (Strip) wird mit Cottonblau angefärbt und auf einen Objektträger aufbracht. Anschließend erfolgt die Bewertung bei einer mikroskopischen Untersuchung bei 400-facher bzw. 1000-facher Vergrößerung.

Tabelle 8: Vergleichende graduelle Bewertung des Pionierbefalls..

Probe	Stein	visuell	Labor	PAM
4	EG_OH	0	2	1
1	WM_OH	0	1	1
5	IS_OH	0	1	1
7	EG_H	0	3	1
11	WM_H	0	1	1
15	IS_H	0	1	1
8	EG_HPMA	0	1	1
12	WM_HPMA	0	1	1
16	IS_HPMA	0	1	1
9	EG_H_z	0	1	1
13	WM_H_z	0	3	1
17	IS_H_z	0	1	1
14	WM_HPMA_z	0	1	1
10	EG_HPMA_z	0	1	1
18	IS_HPMA_z	0	3	1

7.5. Vergleiche / Verifizierungen

Die Verifizierung der Messergebnisse von Probekörpern im Labor erfolgt im Vergleich zu Natursteinen, die vom Autor seit Jahren im Freien exponiert sind und deren handwerkliche und konservatorische Bearbeitung gesichert sind.

7.5.1. Auswahl der Natursteine

Es werden frei stehende historische und moderne Grabmale auf verschiedenen Friedhöfen ausgewählt.

- Carrara Marmor, Protestantischer Friedhof Augsburg, polymere Hydrophobierung (HPMA) 2006.
- Hinterthissener Granit, Protestantischer Friedhof Augsburg, siliziumorganische Hydrophobierung (H) 2010.
- Ihrlersteiner GrünSandstein, Protestantischer Friedhof Augsburg, siliziumorganische Hydrophobierung (H) 2004 und 2013.
- Wunsiedeler Marmor Grabplatte, Wunsiedeler Friedhof, ohne Hydrophobierung (OH)
- Wunsiedeler Marmor Wandplatte, Wunsiedeler Friedhof, ohne Hydrophobierung (OH)
- Epprechtstein Granit Pultstein, Friedhof-Dachau, ohne Hydrophobierung (OH)
- Hinterthissener Granit, Friedhof Schrobenhausen, siliziumorganische Hydrophobierung (H) 2010.
- Ihrlersteiner GrünSandstein, Protestantischer Friedhof Augsburg ohne Hydrophobierung (OH)



**Abbildung 35: Carrara
Marmor, Friedhof Augsburg
HPMA.**



**Abbildung 36: Wunsiedler
marmor; Friedhof Wunsiedel
OH**



**Abbildung 37: Wunsiedler
Marmor; Friedhof Wunsiedel
OH**



Abbildung 38: Ihrlersteiner Sandstein Friedhof Augsburg OH



Abbildung 39: Ihrlersteiner Grünsandstein; Friedhof Augsburg H



Abbildung 40: Hinterthissener Granit; Friedhof Augsburg H



Abbildung 41: Hinterthissener Granit, Friedhof Schrobenhausen, hydrophobiert H



Abbildung 42: Epprechtstein Granit, Friedhof Dachau, ohne Hydrophobierung OH

7.5.2. Besiedelung der frei bewitterten Natursteine

Die frei bewitterten Natursteine befinden sich alle auf Friedhöfen, die weitgehend eine allseits gleich Be- und Verwitterung zulassen. Sie sind dem Autor bekannt, da er sie meist auch bearbeitet und ihren Verwitterungsverlauf beobachtet hat.

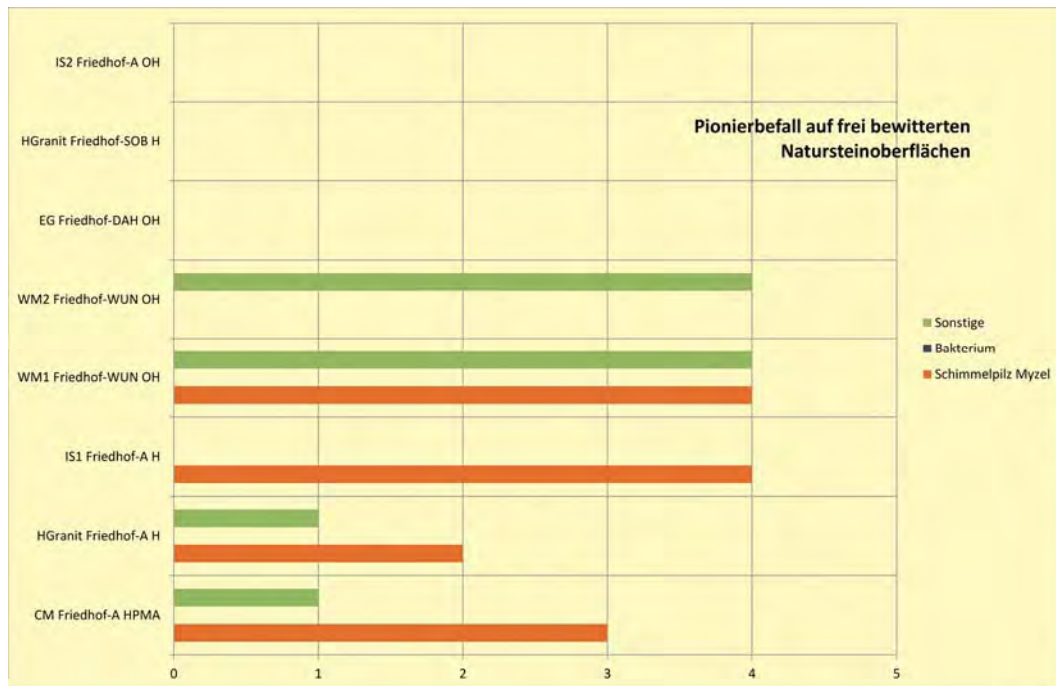


Diagramm 7: Besiedelungen auf frei bewitterten Natursteinen. Unter SONSTIGE fallen auch komplexe Besiedelungen wie Flechten.

Auf den Natursteinen der Feldversuche sind in mehreren Jahren überwiegend Pilze und Besiedelungsgemeinschaften von Flechten entstanden. Die einzelnen Partner der Siedlungsgemeinschaften sind mit den eingesetzten diagnostischen Verfahren oft nicht mehr detailliert feststellbar. *Einige Ergebnisse stehen noch aus.*

Die PAM-Diagnostik wird nur dreimal als Oberflächenkontaktprobe (Strips) eingesetzt und bewertet. Dieses Verfahren stellt keinen aktuellen Stand der Technik dar und müsste weiter als statistisch verwertbare Untersuchungstechnik geprüft werden.

Bakterien können nicht nachgewiesen werden.

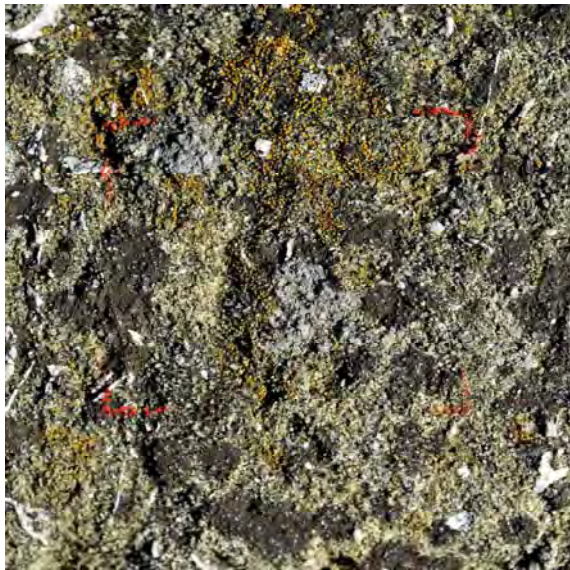


Abbildung 43: Visuelle Feststellung von Flechten auf einem Ihrlersteiner Grünsandstein.

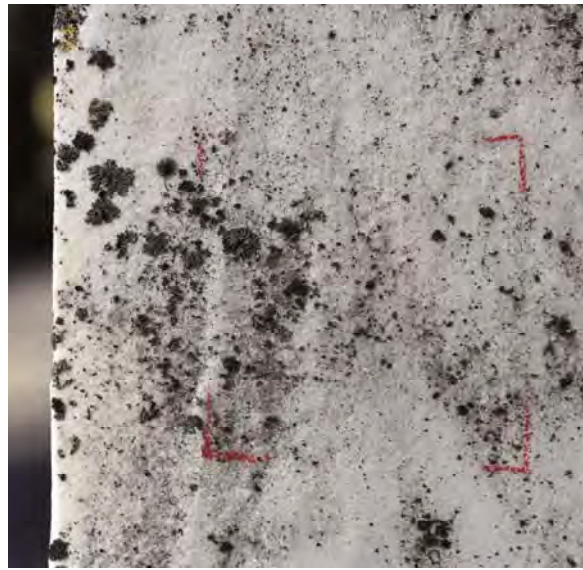


Abbildung 44: Befall mit Flechten und Schwärzepilzen auf Carrara- Marmor

Tabelle 9: Besiedelung der frei bewitterten Natursteine. Vergleichende Darstellung der Untersuchungsmethoden und ihre Ergebnisse..

Probe	Stein	visuell	Labor	PAM
2	CM (WM) Friedhof HPMA	4	3	3
3	Granit (EG) Friedhof H	3	2	2
6	IS Friedhof H	4	4	2
19	WM_Friedhof-1 OH	3	4	0
20	WM_Friedhof-2 OH	4	nz	0
21	EG Friedhof-DAH OH	3		0
22	HG (EG) Friedhof-SOB H	3		0
23	IS-2 Friedhof OH	3		0

Tabelle 10: Legende zur obigen Darstellung der Besiedelung der frei bewitterten Natursteine.nz bedeutet, dass aufgrund einer komplexen Biokruste keine Aussag gemacht werden kann. o bedeutet ohne Auswertung.

8. Zusammenfassung und Diskussion

8.1. Auswahl der Diagnostik für mikrobiellen Befall

Nach einer Besiedelung mit Mikroorganismen erfolgt das Wachstum in vier Stufen von der Anlaufphase zur exponentiellen Phase, schließlich zur stationären Phase und der Absterbephase (siehe Abbildung 5).

Die gängigen diagnostischen Verfahren sollten in der Lage sein, diesen Phasenverlauf zu erkennen und zu dokumentieren.

Zur Auswahl möglicher praxistauglicher Verfahren wird zunächst auf den aktuellen Leitfaden zur Erfassung von Schimmel des Bundesumweltamtes zurückgegriffen. In ihm wird bei den Untersuchungen u. a. zwischen anerkannten Regeln und Stand der Technik unterschied [BUA (11)]:

A. ANERKANNTE REGELN DER TECHNIK

Verfahren, die in der Fachwelt als verbindlich akzeptiert sind und von der Mehrheit der Fachleute in der Praxis angewendet werden:

Messung von Schimmelpilzen in der Luft ((DIN ISO 16000-16 bis -18)

Messung der kultivierbaren Schimmelpilze im Material (DIN ISO 16000-21)

Messung der Gesamtsporenzahl in der Luft (DIN ISO 16000-20)

B. STAND DER TECHNIK

Verfahren, die zwar verbreitet Anwendung finden, aber gegenwärtig in der Fachwelt nicht als weitgehend akzeptiert gelten.

Direktmikroskopie inklusive Klebefilmpräparate (noch nicht genormt)

Messung der kultivierbaren (Aktino)Bakterien im/auf Material (nicht genormt)

MVOC (Microbial Volatile Organic Compounds) Messungen (VDI 4254 Blatt 1)

In der Fachliteratur (28) werden darüber hinaus noch weitere visuelle und technische Verfahren beschrieben, die geeignet sind, mikrobiellen Befall zu diagnostizieren und zu beschreiben. Eine Visuelle in Augenscheinnahme kann nur bei deutlich

erkennbarem Befall zum Einsatz kommen. In der Anlaufphase ist eine detaillierte aussagekräftige Analyse nur mit aufwendigen Labortechniken möglich.

Tabelle 11: Zusammenstellung von Diagnostikverfahren [SELLNER (29 S. 133)]

Diagnostikverfahren	Nachweis für	Bemerkung
Visuelle Begutachtung	Algen Pilze	• (subjektive) Einschätzung von: - % besiedelter Flächenanteil - Intensität der Verfärbung • halbquantitativ, nur für Erstbegutachtung
Keimzahlbestimmung/ Plattierungen	Pilze, (Algen)	• klassisches Verfahren für Pilze, • für Algenbesiedlungsdichte an Fassaden kaum geeignet; nur zur Prüfung von Beschichtungsstoffen unter standardisierten Bedingungen
Chlorophyll a-Bestimmung	Algen	• durch unregelmäßiger Bewuchsmuster - hohe, repräsentative Probenanzahl nötig - Probenahme ggf. invasiv, • einfache Momentaufnahme der Besiedlung
Epifluoreszenzmikroskopie	Algen	• empfindliche Unterscheidung zwischen Algenbesiedlung und Schmutzpartikeln • raue Baustoffoberflächen im mikroskopischen Bild schwierig (Vergrößerung begrenzt), • hohe Probenzahl erforderlich • Besiedlungsdichte nur bedingt abschätzbar
Puls-Amplituden-Modulierte-Fluorometrie (PAM)	Algen	• hochempfindliche Methode • nicht invasiv • Vitalität und Dynamik von Besiedlungen ermittelbar • Prüfung neuer Produkte, Beschichtungen • Erfolgskontrolle von Sanierungen • weiterer Forschungsbedarf nötig
DNA-Diagnostik/PCR	Pilze Algen	• hochempfindliche Methode • Referenz-DNA der Organismen nötig • weiterer Forschungsbedarf nötig

8.2. vergleichende Bewertungsskala für Untersuchungen im freien Feld und im Labor

Zur Bestimmung des mikrobiellen (Pionier)Befalls werden aus den genannten Diagnostikverfahren folgende Techniken herangezogen:

1. Visuelle Begutachtung, Fotografie.
2. Puls-Amplituden-Modulierte-Fluorometrie (PAM) am Probekörper und an Klebproben.
3. Direkte Materialproben (Klebproben) mit Lösemittelauszügen und Mikroskopie.

Um vergleichende Untersuchungen und Betrachtungen zur Beeinflussung der mikrobiellen Pionierbesiedlung auf Natursteinen unterschiedlicher Art, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit durch verschiedene hydrophobierende Oberflächenbehandlungen sowohl im Labor als auch in Feldversuchen vornehmen zu können ist es notwendig, die oben beschriebenen differierenden Bewertungsskalen in ein System zusammen zu führen.

Ziel ist es, mit einer Bewertungszahl in allen gewählten diagnostischen Verfahren vergleichbare Zustände zu beschreiben. Ausgangspunkt ist dabei die visuelle Betrachtung, die als erster Indikator für eine ästhetische Analyse oder Bauzustandsbetrachtung dient.

Tabelle 12: Vergleichende Bewertungsskala der Besiedelung

Grad	Visuell	Mikroskop	PAM /	Dahlberg-Skala
0	nicht erkennbar	kein Befall	ohne Besiedelung	$\leq 0,010$
1	nicht erkennbar	vereinzelt, kein Befall	sehr schwach besiedelt	0,011 - 0,020
2	erkennbar	gering; kein Befall zu erwarten	schwach besiedelt	0,021 - 0,040
3	bewachsen	stellenweise deutlich; Befall nicht ausgeschlossen	mittelmäßig besiedelt	0,041 - 0,080
4	stark bewachsen	deutlich; Befall liegt vor	stark besiedelt	0,081 - 0,160
5	fast durchgehend bewachsen	massiv; starker Befall	sehr stark besiedelt	$\geq 0,161$

8.2.1 Ergebnisse der visuellen Betrachtungen

Bei der visuellen Bestimmung und fotografischen Dokumentation gemäß Tabelle 6 kann eine Besiedelung erst im fortgeschritten Stadium erkannt werden, also in der

exponentiellen Phase bis hin zur Sterbephase. Es kann auch nicht erkannt werden, ob es sich um lebende oder tote Kulturen handelt.

Ergebnisse:

- Pionierbesiedelungen können visuell nicht festgestellt werden.
- Fortgeschrittene Besiedelungen können gesehen, aber nur im geringen Maße spezifiziert werden (z. B. Flechte oder Pilzhyphe).



Abbildung 45: Flechten auf einem Ihrlersteiner Grünsandstein.

8.2.2. Ergebnisse der PAM-Diagnostik

Bei der Puls-Amplituden-Modulierten-Fluorometrie handelt es sich um eine zerstörungsfreie Methode, mit deren Hilfe die Intensivität der Besiedlung ausschließlich phototropher Organismen erfasst und bewertet werden kann. Auch hier gilt, dass nur geringe Aussagen über die Art des Befalls, sowie auf die aktuelle Wachstumsphase getroffen werden können.

Der technische Aufwand zur Installation in Feldversuchen ist sehr hoch. Allerdings kann auf einer großflächigen Klebprobe ein Befall diagnostiziert werden (siehe Abbildung 46).

Die PAM-Diagnostik eignet sich gut für die erste Einschätzung einer Besiedelung, da sowohl Schimmelpilze als auch Bakterien bei gleichen Umweltbedingungen zeitlich ähnlich siedeln.

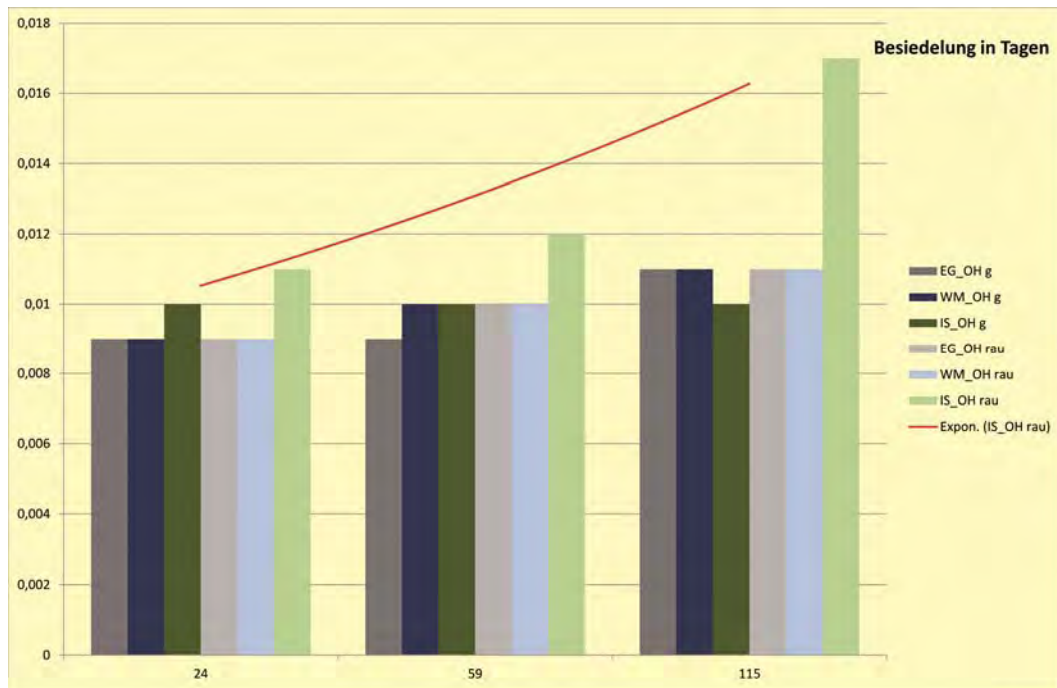


Diagramm 8: Zeitverlauf der Pionierbesiedelung ermittelt durch PAM-Diagnostik am Beispiel nicht hydrophobierter (OH) Natursteine.

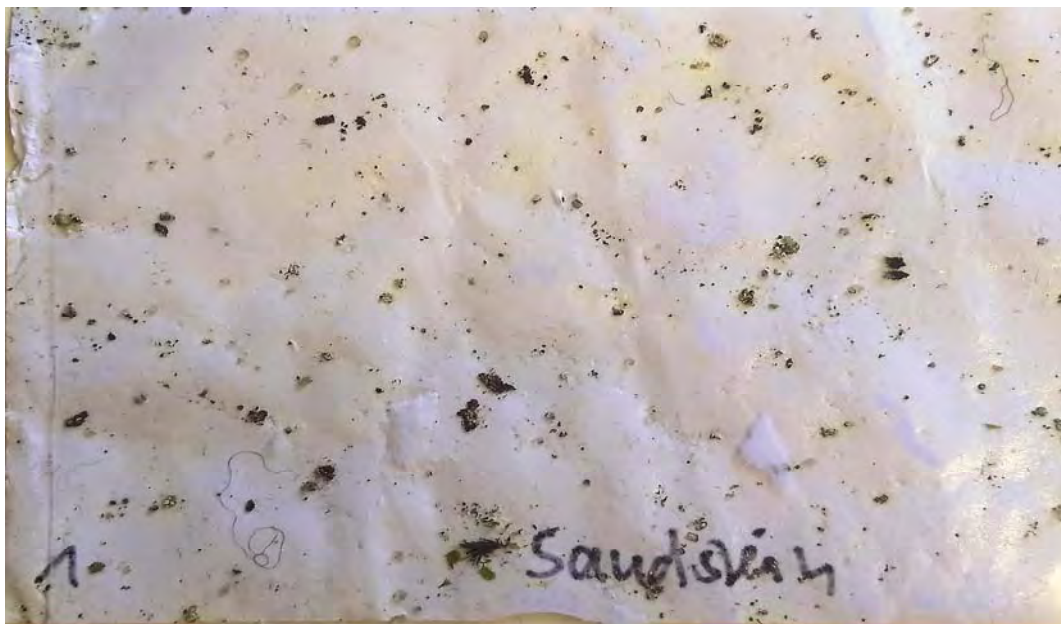


Abbildung 46: Strip auf weißem Grund für eine PAM-Diagnose.

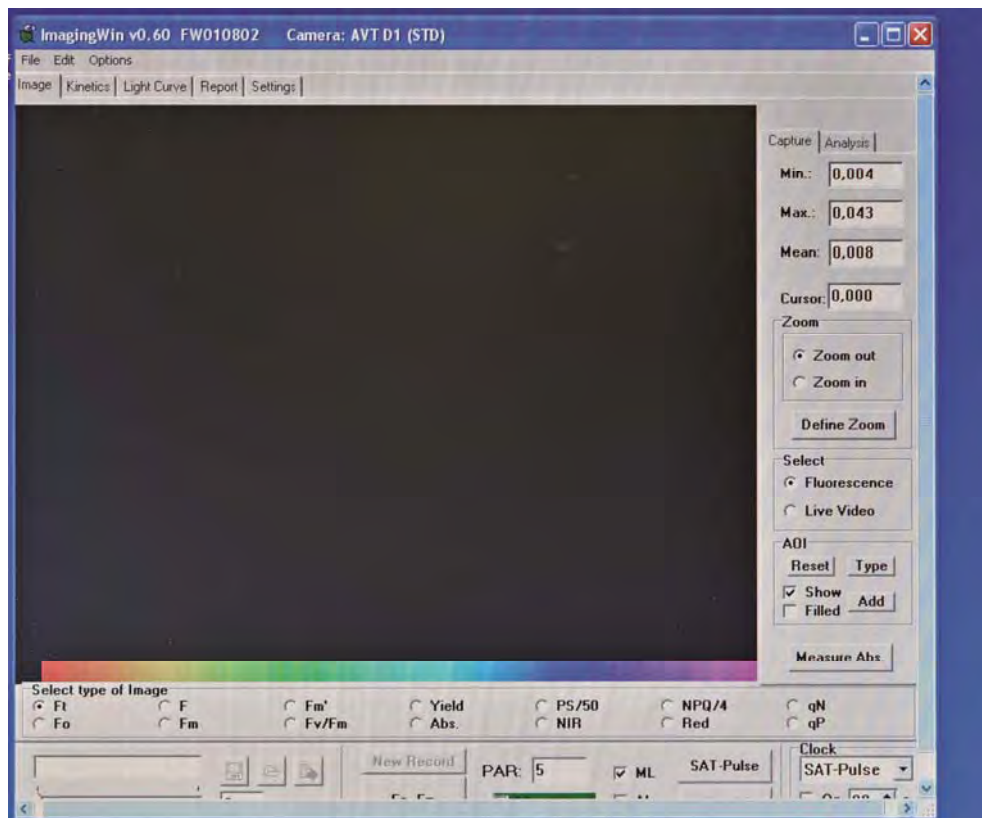


Abbildung 47: PAM-Messung der Besiedelung auf einem Wunsiedler Marmor (keine Besiedelung feststellbar).

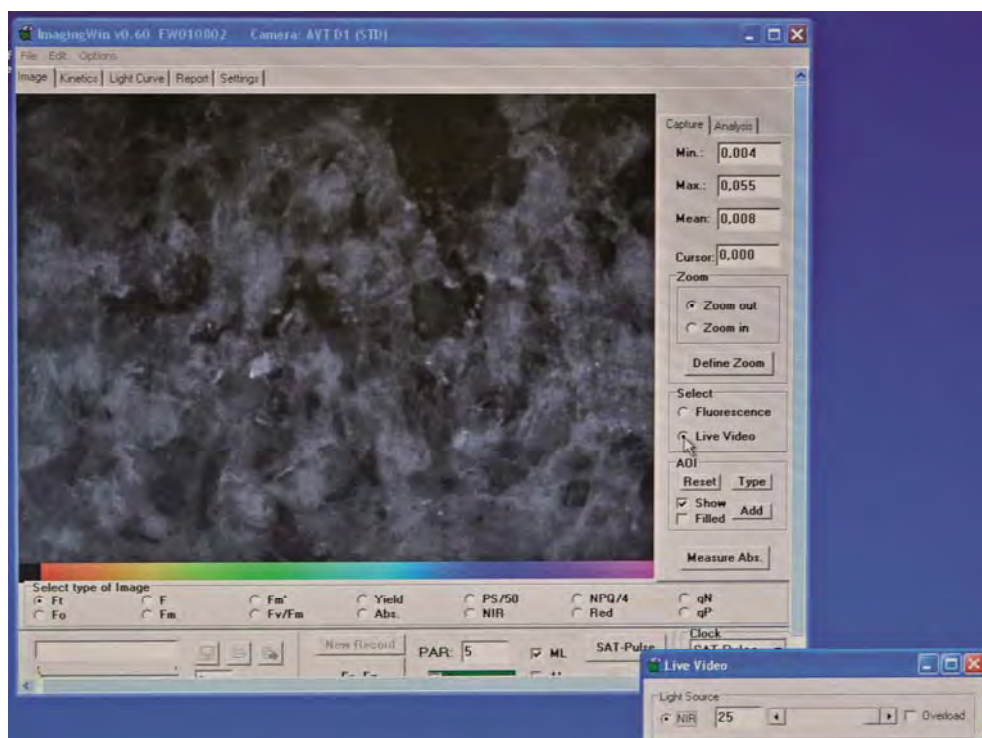


Abbildung 48: Echtbild einer PAM-Messung (Wunsiedler Marmor).

8.2.3. Materialproben

Prüfverfahren des Instituts Dr. Ziemer, München [ZIEMER (29)]:

„Bei der Oberflächenkontaktprobe (Klebeprobe) wird die Abnahme von Schimmelpilzbestandteilen mittels eines Vinylacetat-Klebestreifens durchgeführt. Ein transparenter Klebestreifen wird auf eine augenscheinlich befallene Stelle mit Schimmelpilzen gedrückt und abgezogen. Dies kann entweder vor Ort durch den Auftraggeber selbst erfolgen oder im Labor an geeigneten eingereichten Materialproben.

Daraufhin erfolgt eine Anfärbung des Klebestreifens mit Cottonblau und Aufbringen auf einen Objektträger mit anschließender mikroskopischer Untersuchung bei 400-facher bzw. 1000-facher Vergrößerung. Für eine fundierte Bewertung der einzelnen Oberflächenkontaktproben werden jeweils mindestens 200 Gesichtsfelder bei 400-facher Vergrößerung durchmustert. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Fragestellung eines aktiven Schadens oder eines möglichen Altschadens ist durch diese Methode nicht möglich. ...“

Es werden verschiedene Schimmelpilze und nicht näher definierbare Mycele festgestellt, sowie Bakterien. Da die Probekörper dem Sonnenlicht und Sauerstoff ausgesetzt sind, handelt es sich vermutlich um Cyanobakterien, da sie zur oxygenen Photosynthese fähig sind.

Bei den Exponaten der vergleichenden Felduntersuchungen sind komplexe Besiedelungen, wie Flechten, vorhanden aus denen einzelne Spezies nicht mehr isolierbar sind (siehe Diagramm 8).



Abbildung 49: Probennahme im Labor Dr. Ziemer. Ergebnisse auf folgenden Abbildungen.

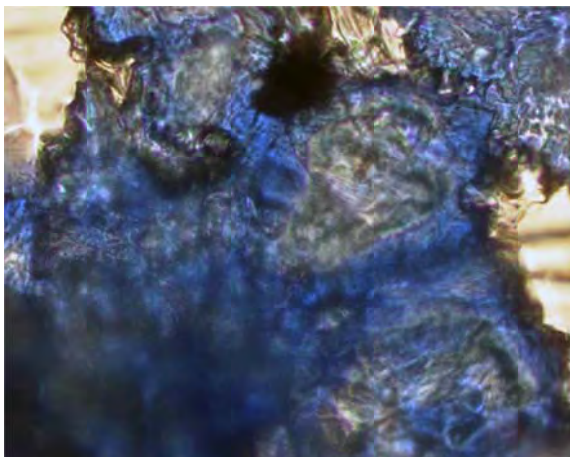


Abbildung 50: Schwärzepilz der Spezies Ulocladium

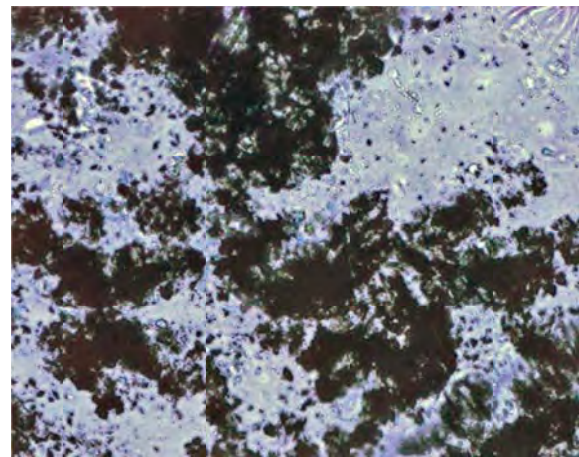


Abbildung 51: Bakteriencluster

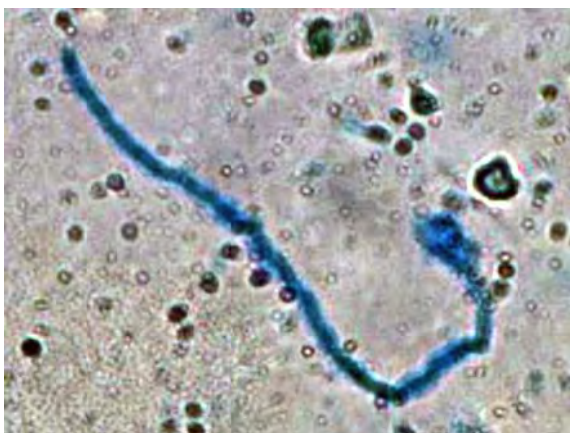


Abbildung 52: Mycel

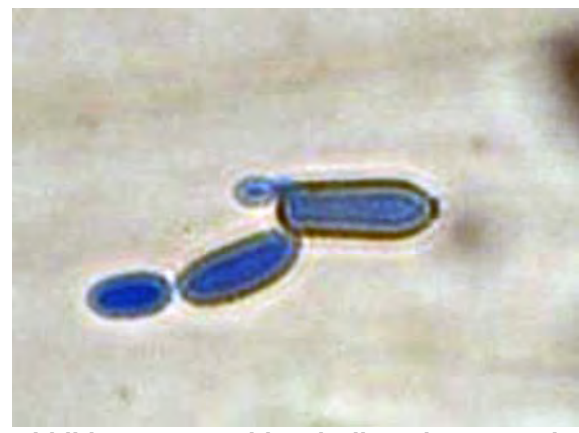


Abbildung 53: Schlauchpilz der Spezies Cladosporium

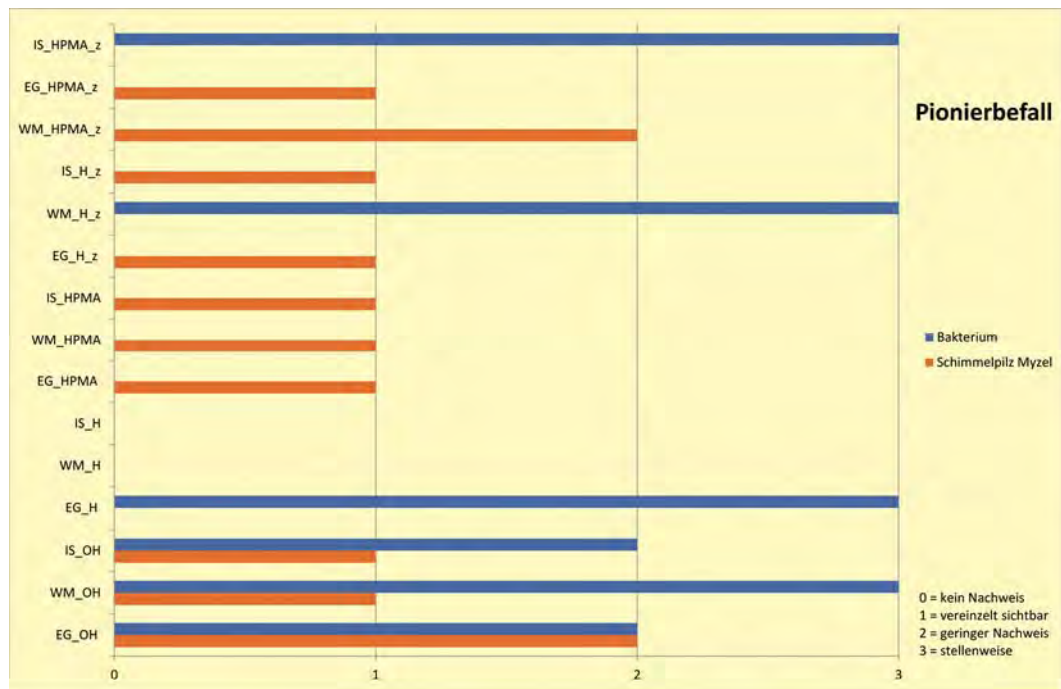


Diagramm 9: : Besiedelung der Probekörper mit Bakterien und/oder Schimmelpilzen in den ersten 115 Tagen. Festgestellt durch Mikroskopie

Tabelle 13: Spezies der nachgewiesenen Schimmelpilze.

<i>Alternaria spp.</i>	Fungi imperfecti (Schwärzepilz)
<i>Aureobasidium spp.</i>	Schlauchpilz (Blaufäule) "Schwarze Hefe"
<i>Cladosporium spp.</i>	Schlauchpilz (Schwärzepilz)
<i>Ulocladium spp.</i>	Schwärzepilz

8.3. Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) auf die Besiedelung

Durch eine erhöhte Rauheit erhöht sich auch die Größe der Oberfläche.

Mikroorganismen brauchen günstige Lebens- und Umweltbedingungen; Feuchte und Temperatur gehören dazu wie ein guter Nährboden. Raue und damit große Oberflächen begünstigen die Verkrallung von atmosphärisch angeliefertem Substrat und feuchten Niederschlägen sei es als Tau oder Regen.

Die handwerkliche Oberflächenbearbeitung der Natursteine erhöht deren Rauheit. um mindestens das 1,29 fache bis zum 10 fachen des jeweiligen Ausgangswertes je

nach Porosität (es muss unterschieden werden zwischen dichten Gesteinen wie Marmor und Granit und porösem Sandstein).

Ein unmittelbarer Zusammenhang von Rauheit und Besiedelung kann aber nicht nachgewiesen werden. Die Forschung von WERDER U.A. (29) auf verschiedenen strukturierten Putzoberflächen lassen aber einen Zusammenhang vermuten.

Die Besiedelung scheint unabhängig von Rauheit und Hydrophobie. Maßgebend scheint das Angebot an Nährstoffen zu sein

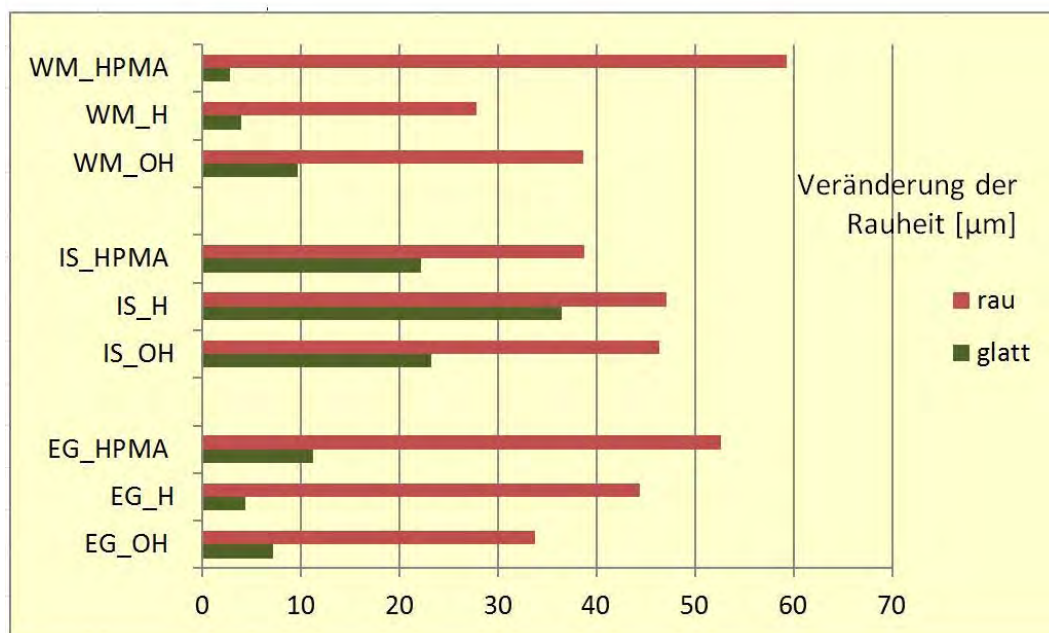


Diagramm 10: Durch handwerkliche Oberflächenbearbeitung wird die Rauheit der Steine deutlich erhöht.

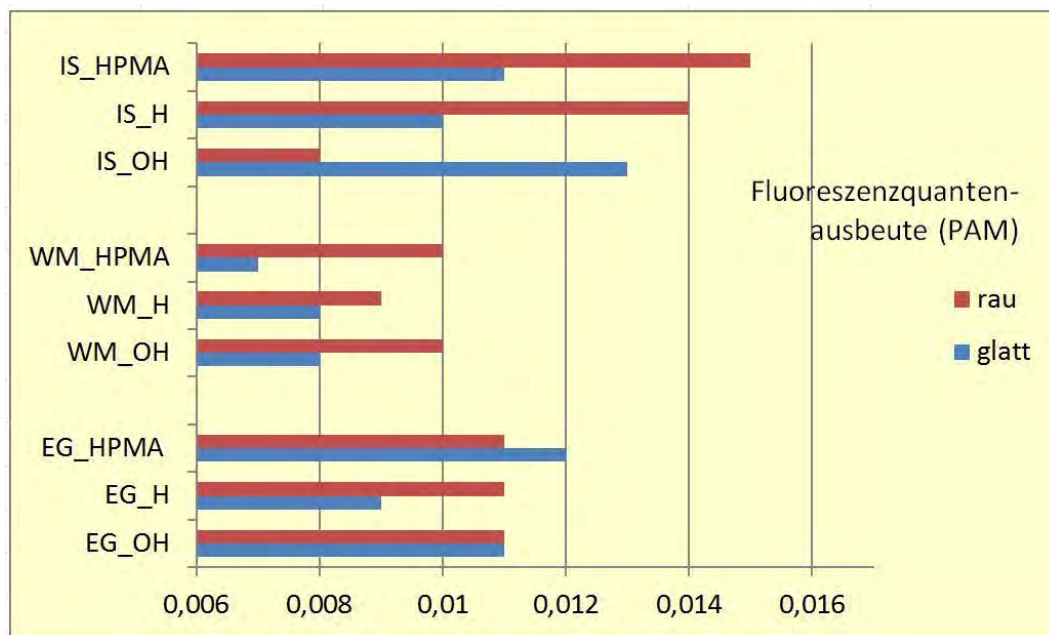


Diagramm 11: Besiedelungsneigung bei rauen, bzw. glatten Oberflächen. Es ist lediglich eine Tendenz zu erhöhter Besiedelung auf rauen Oberflächen zu erkennen.

8.4. Einfluss der hydrophobierenden Imprägnierungen auf die Besiedelung

Nach gängiger Theorie [WERDER U.A. (28)] soll sich nach einer Hydrophobierung von Werkstoffoberflächen - also auch von Natursteinen - ein Feuchtfilm auf diesen bilden, der solange stationär verbleibt bis er abtrocknet oder durch seine Schwerkraft an geneigter oder senkrechter Flächen abläuft.

Mit der Hydrophobierung von Natursteinen und dem verbleibenden Feuchtfilm steht damit über einen längeren Zeitraum ausreichend Feuchte für eine Besiedelung mit Mikroorganismen zur Verfügung.



Abbildung 54: Stationär verbleibende Wassertropfen auf hydrophobierten Natursteinoberflächen.

Es kann mit der PAM-Diagnostik keine erhöhte Besiedelungsneigung bei hydrophobierten Natursteinoberflächen im Vergleich zu nichtbehandelten festgestellt werden. Es ergibt sich vielmehr ein heterogenes Bild von der Besiedelung behandelter und unbehandelter Oberflächen.

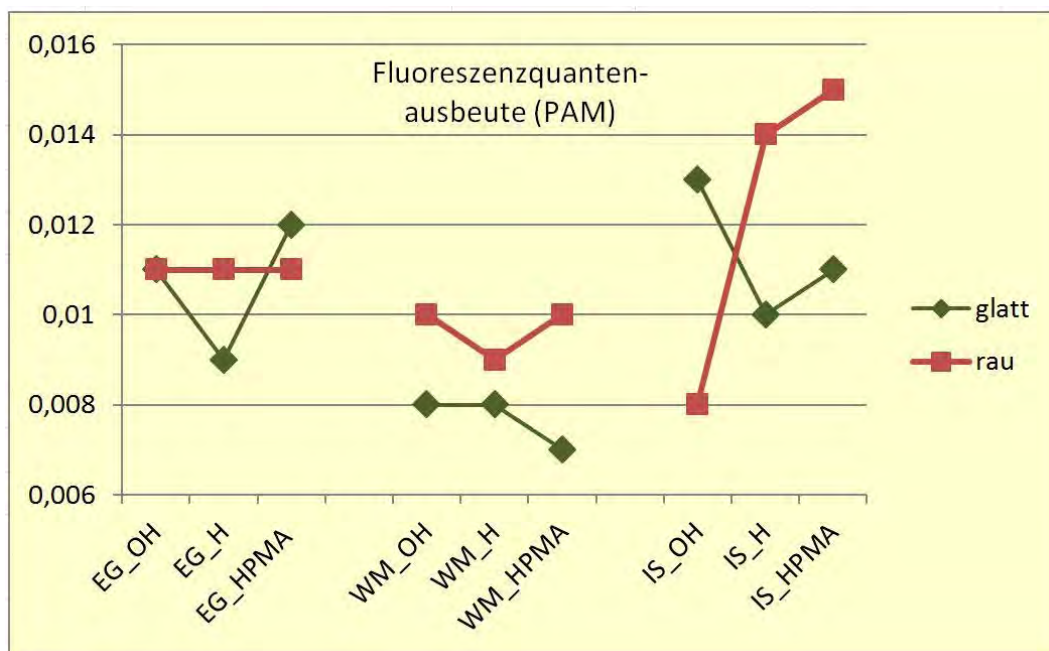


Diagramm 12: Heterogene Besiedelungsneigung bei behandelten und unbehandelten Probekörpern.

Die mikroskopische Diagnostik konkretisiert dieses Bild jedoch und zeigt, dass es bei den hydrophobierten Oberflächen des Wunsiedler Marmors (WM-H) und dem Ihrlersteiner Grünsandsteins (IS-H) zu keinerlei Besiedelung kommt. Auf den polymer imprägnierten Natursteinen siedeln ausschließlich Schimmelpilze.

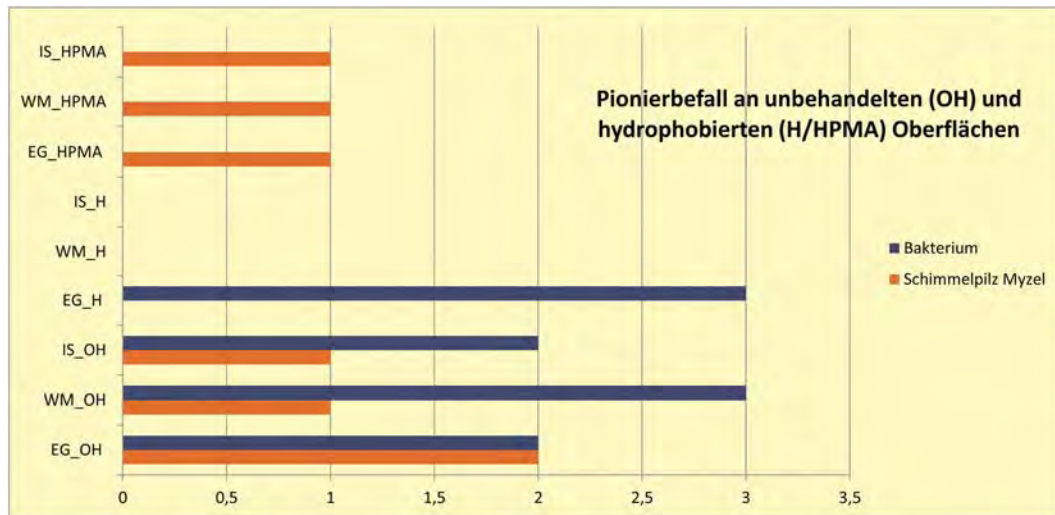


Diagramm 13: An behandelten und unbehandelten Oberflächen.: Unterschiedliche Pionierbesiedelung.

Welche Faktoren zu dieser Situation führen müsste in weiteren Versuchen geklärt werden.

8.5. Einfluss der Alterung auf die Besiedelung

Die Natursteinprobekörper sind künstlich gealtert. Ziel der Alterung durch Sandstrahlen und einen Beschuss mit UV-Licht und dabei erzeugtem Ozon ist die Simulation von Verwitterungsvorgängen in der freien Umwelt, nicht die Zerstörung des Gesteins.

Sowohl die Oberflächenrauheit (siehe auch Diagramm 3 bis 5) als auch deren Hydrophobie werden durch die künstliche Alterung deutlich verändert, ohne dabei einen Zusammenhang erkennen zu lassen.

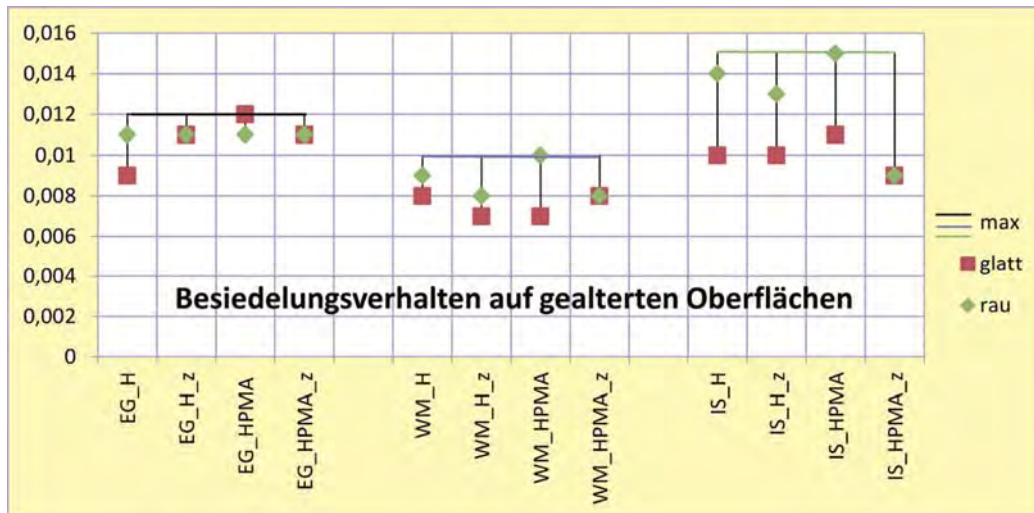


Diagramm 14: Veränderungen der Besiedelungsneigung bei gealterten Oberflächen. Eine erhöhte Besiedelung bei gealterten Oberflächen (-z) ist nicht zu erkennen.

8.6. Einfluss der Gesteinsart und des Nährstoffangebotes auf die Besiedelung

Wie eingangs erwähnt, benötigen Mikroorganismen um wachsen und/oder sich vermehren zu können u. a. Kohlenstoff, Energie und Nährstoffe.

Natursteine bieten als Nährstoffe ihre Mineralien entsprechend ihrer petrografischen Zusammensetzung und Substrat soweit es auf ihren Oberflächen abgelagert werden kann. In der Versuchsanordnung mit zeitweise verschlossenen Klimabehältern muss davon ausgegangen werden, dass in der kurzen Induktionszeit nur wenig Substrat aufgelagert wurde. Es stehen also überwiegend die gesteinsbildenden Minerale, eingebundene Verunreinigungen und Bindemittel als Nährstoffe zur Verfügung.

Mit Hilfe der PAM-Diagnostik kann sehr gut dieser Zusammenhang beobachtet werden, da z. B. bei den fossilen Einschlüssen des Ihrlersteiner Grünsandsteins eine erhöhte Fluoreszenzquantenausbeute erfolgt.

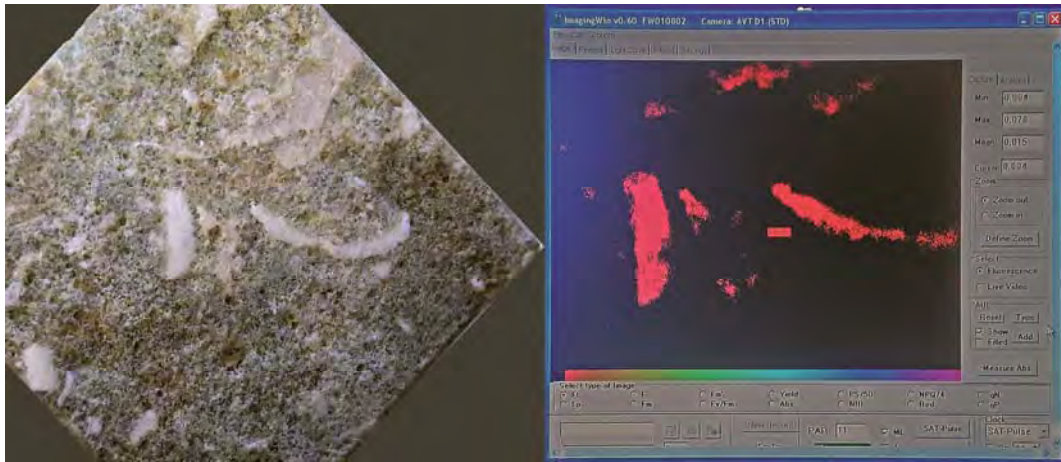


Abbildung 55: Erhöhte Fluoreszenzquantenausbeute bei den hellen fossilen Trümmerresten im Ihrlersteiner Grünsandstein.

Der Ihrlersteiner Grünsandstein enthält neben u.a. Quarz SiO_2 , Calcit CaCO_3 und Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Neben Quarz sind im Epprechtstein Granit Feldspäte wie Biotit $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]$ und Glimmer. Wunsiedler Marmor besteht überwiegend aus kristallinem Calciumkarbonat CaCO_3 . Und Anteilen an Dolomitgestein $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

Phototrophen und/oder chemolithotrophen Mikroorganismen steht damit eine große Auswahl an Nährstoffen zur Verfügung.

SEIFFERT (15) beschäftigt sich in seiner Dissertation u. a. ausführlich mit der Thematik des Nährstoffangebots von verschiedenen Natursteinen bei Verwitterung und Mineralumwandlung und der Nährstoffaufnahme durch Mikroorganismen mit einer einhergehenden biotischen Verstärkung der Gesteinsverwitterung. In Anreicherungsexperimenten von Eluaten im Durchfluss durch Gesteinsgranulate stellt er fest, [SEIFFERT (15 S. 106)] „dass die Konzentration im Eluat für aus dem Gestein herauslösbare Elemente mit der Zeit zunehmen. Unterschiede zwischen den biotischen und den abiotischen Proben zeigen sich für die Elemente Mangan, Magnesium, Natrium und Calcium, nicht aber für die Elemente Barium, Zink und Kalium (Abb.).“ Neben dem Makroelement Kohlenstoff benötigen Mikroorganismen als weitere Nährstoffe u. a. Mangan, Magnesium Natrium und Calcium.

Die über PAM-Diagnostik festgestellt bevorzugte Besiedelung auf einem Fossilrest mit einem vermutlich hohen Anteil an Dolomit korreliert mit den Experimenten von Seiffert.

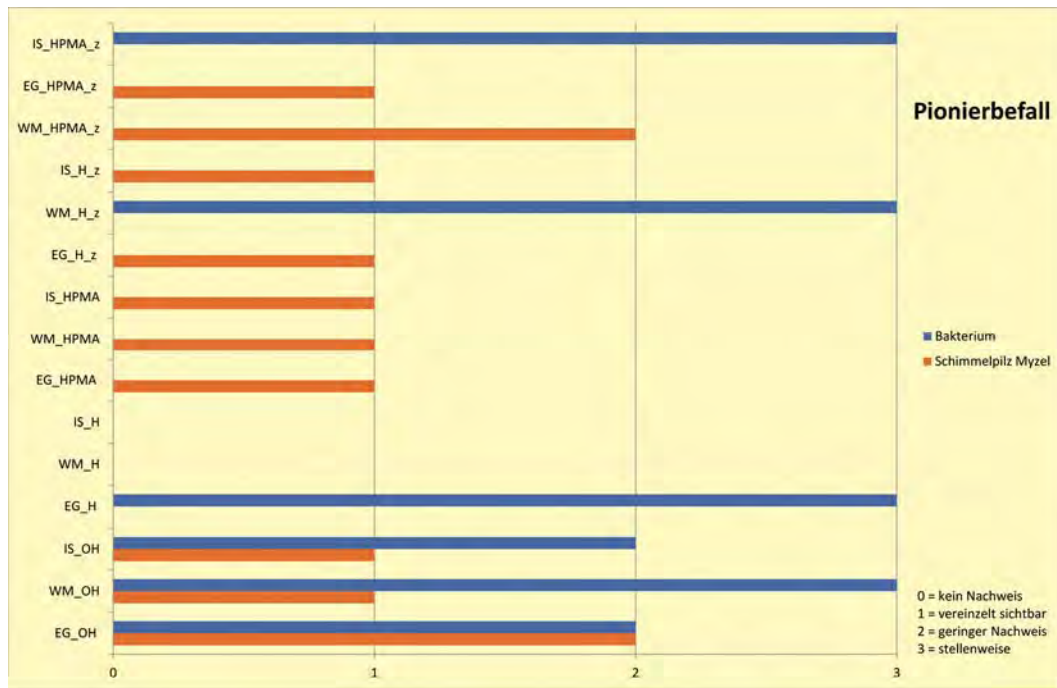


Abbildung 56: Überblick über alle mit Strips und Mikroskopie festgestellten Pionierbesiedelungen auf den Probekörpern im Labor vom 1. Januar bis 25. April 2019.

9. Schlussbemerkungen

Die Untersuchungen zur Beeinflussung der mikrobiellen Pionierbesiedlung auf Natursteinen unterschiedlicher Art, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit durch verschiedene hydrophobierende Oberflächenbehandlungen in Laborversuchen und vergleichenden Betrachtungen dokumentierter Feldversuche haben zusammengefasst folgendes erbracht:

1. Im Labor erfolgt eine Pionierbesiedelung auf den ausgewählten Natursteinen durch Schimmelpilze und Bakterien.
2. Bei Feldvergleichen mit einem lang andauernden Befall über mehrere Jahre hinweg liegen meist komplexe Siedlungsgemeinschaften vor und einzelne Spezies sind nicht isolierbar. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse oder eine Projektion von einem zum anderen ist nicht möglich.
3. Die Hydrophobierung spielt für die Besiedelung eine untergeordnete Rolle. Sie müsste über mindestens drei Jahre hinweg zerstörungsfrei untersucht und bewertet werden.
4. Der Einfluss der Oberflächenbearbeitung konnte nicht bestimmt werden. Ist aber wegen des Substratauftrags zu vermuten.
5. Bei gleichen Umweltbedingungen (Feuchte und Temperatur) entscheidet offensichtlich das Nährstoffangebot über die Art der Besiedelung.
6. Imprägnierungen können die Oberflächenrauheit erhöhen. Diese wird aber durch Verwitterung wieder verändert.
7. Hydrophobierende Imprägnierungen können bei Bewitterung zerstört werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollten zu weiteren Forschungen und Fragestellungen ermutigen; insbesondere zu:

1. Wie kommt es zur Nährstoffaufnahme durch Mikroorganismen bei den erhöhten Oberflächenspannungen von Imprägnierungen auf Baustoffen?
2. Welche Mechanismen führen zur Reduzierung, bzw. Zerstörung von hydrophobierenden Imprägnierungen?

10. Literaturverzeichnis

1. **SA., Gorbushina, W., Krumbein und BIODAM.** *Biofilm und subaerischer Biofilm als Verursacher von Schäden.* [Hrsg.] H. Venzmer. Stuttgart : huss / Fraunhofer IRB Verlag, 2006. Bde. Altbauinstandsetzung 11 - Fassadenbiofilme. ISBN 3-8167-6985-3.
2. **Büchli, R. und P., Raschle.** *Algen und Pilze an Fassaden.* Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2015. 978-3-8167-9274-1.
3. **C., Fitz, W., Hofbauer und M., Krus.** *Mikrobielles Wachstum auf Fassaden.* [Hrsg.] H. Venzmer. Stuttgart : huss / Fraunhofer IRB Verlag, 2006. Bde. Altbauinstandsetzung 11 - Fassadenbiofilme. 3-8167-6985-3.
4. <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasser>. [Online] 2019. [Zitat vom: 12. 05 2019.] https://de.wikipedia.org/wiki/Wasser#Grundbaustein_des_Lebens.
5. **D., Runge Dr.** Mikroorganismen und Bautsoffe. *Studienanweisung* . [Skript]. Wismar : WINGS, 2014. Bd. Semester 1.
6. **O., Fritsche.** *Mikrobiologie.* Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2016. 978-3-662-49728-9.
7. Zelle. *Brockhaus Enzyklopädie.* Wiesbaden : Brockhaus Verlag, 1974, Bd. 20.
8. **G., Schlegel H.** *Allgemeine Mikrobiologie.* Stuttgart : Georg Thieme Verlag, 1976. 3-13-444604-9.
9. <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikroorganismus>. <https://de.wikipedia.org>. [Online] [Zitat vom: 15. 05 2019.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikroorganismus>.
10. <https://de.wikipedia.org/wiki/Alge>. [Online] [Zitat vom: 15. 05 2019.] https://de.wikipedia.org/wiki/Alge#Algen_in_weiteren_Lebensr%C3%A4umen.
11. **Bundesamt, Umwelt, [Hrsg.].** *Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden.* Dessau-Röblau : Umwelt Bundesamt, 2017. 2363-8311.
12. <https://de.wikipedia.org/wiki/Biofilm>. [Online] Wikimedia. [Zitat vom: 15. 05 2019.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Biofilm>.

13. **Venzmer, H., [Hrsg.].** *Fassadenbiofilme*. Stuttgart : huss / Fraunhofer IRB Verlag, 2006. 3-8167-6985-3.
14. **S., Matthes.** *Mineralogie*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1996. 3-540-61046-4.
15. **F., Seiffert.** *Charakterisierung von Gesteinsbewuchs und -verwitterung durch einen Modellbiofilm*. Berlin; Freie Universität : Dissertation, 2014.
16. **W., Schumann.** *Der neue BLV Steine- und Mineralienführer*. München : BLV Verlagsgesellschaft GmbH, 1994. 3-405-14722-0.
17. <https://de.wikipedia.org/wiki/Epprechtstein>. [Online] Wikimedia. [Zitat vom: 15. 05 2019.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Epprechtstein>.
18. **W-D., Grimm.** *Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der BRD*. Ulm : Ebner Verlag, 2018. 978-3-87188-247-0.
19. https://de.wikipedia.org/wiki/Ihrlersteiner_Grünsandstein. [Online] Wikimedia. [Zitat vom: 15. 05 2019.] https://de.wikipedia.org/wiki/Ihrlersteiner_Grünsandstein.
20. https://de.wikipedia.org/wiki/Wunsiedler_Marmor. [Online] Wikimedia. [Zitat vom: 15. 05 2019.] https://de.wikipedia.org/wiki/Wunsiedler_Marmor.
21. **Rolf, Snethlage.** *Leitfaden Steinkonservierung*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2008. 978-3-8167-7554-6.
22. **J., Honsinger D.** *Strukturmerkmale polymerimprägnierter Sandsteine*. Aachen : RWTH Dissertation , 1990. Dissertation .
23. **M., Willems W., [Hrsg.].** *Lehrbuch der Bauphysik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2013. 978-3-8348-1415-9.
24. **R., Karsten.** *Bauchemie*. Karlsruhe : Verlag C. F. Müller, 1992. 3-7880-7438-8.
25. **R., Bendix.** *Bauchemie*. Wiesbaden : B. G. Taubner Verlag , 2003. 3-519-10226-9.
26. *Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen*. München / Stuttgart : WTA / Fraunhofer IRB Verlag, 2010. 978-3-8167-8312-1.
27. **J., Von Werder, C., Wagner und H., Venzmer.** *Monitoring von Algenbesiedelungen mit Hilfe der PAM-Fluorometrie*. [Hrsg.] Venzmer H. Stuttgart :

huss / Fraunhofer IRB Verlag, 2006. Bd. Altbauinstandsetzung 11 ; Fassadenbiofilme. 3-8167-6985-3.

28. **M., Sellner.** *Biofilme auf Fassaden - Diagnostikverfahren in einer Übersicht.* [Hrsg.] Venzmer H. Stuttgart : huss / Fraunhofer IRB Verlag, 2006. Bde. Altbausanierung 11 - Fassadenbiaofilme. 3-8167-6985-3.

Weiterführende Literatur

1. D. u. R. Aichele / H-W. u. A. Schwegler, *Der Kosmos-Pflanzenführer*, Frankh-Kosmos-Verlags-GmbH, Stuttgart 1996
2. K. Kempe, *Holzschädlinge*, Huss / Fraunhofer ITB Verlag, Berlin / Stuttgart 2009
3. J. v. Werner, *Skript zu „Fassadensanierung, Teil 2“*, Wings, Wismar 2014
4. Friedrich Müller, *Gesteinskunde*, Ebner Verlag, Ulm 2012 8. Auflage
5. *Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege*, Ebner Verlag, Ulm 1984
6. Holger Heinrich, *Vortrag Bedeutung magnesiumhaltiger Füllstoffe ... 13.* Intern. Konferenz Solarökologische Bausanierungen, Wietow 2019
7. Franz, Josef Hölzen, Helmut Weber, *Abdichtung von Gebäuden*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010
8. Otto Henning, Dietbert Knöfel, *Baustoffchemie*, Verlag Bauwesen / Huss Medien GmbH, Berlin 2002
9. Rolf P. Gieler, Andrea Dimmig-Ostburg, *Kunststoffe für den Bautenschutz und die Betoninstandsetzung*, Birkhäuser Verlag, Basel 2006
10. Andreas Gerdes (Hrsg), WTA-Schriftenteihe-Heft 10, *Hydrophobieren – Grundlagen und Anwendung*, Aedificatio Verlag GmbH, Freiburg / Unterengstringen 1996
11. Hans-Peter Leimer(Hrsg.), *Bauinstandsetzung und Bauphysik, gestern-heute-morgen*; WTA-Kolloquium; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2016

11. Anhang

11.1. Tabellarischer Überblick über alle technischen Messungen im Labor der Hochschule Wismar.

Messungen 24.01.2019 bis 26.04.2019 Master-Thesis

Gerhard A. Roth			Tropfen	24.01.2019
	Rauheit		Mittelwerte	PAM
	Ra			24 d
	Rauheit [μm]		[$^{\circ}$]	[Floureszenz]
EG_OH geschl.	7,142		64	0,009
EG_OH rauh	33,767		0	0,009
EG_H geschl	4,347		101	0,009
EG_H rauh	44,431		115	0,009
EG_HPMA geschl	11,209		101	0,009
EG_HPMA rauh	52,650		96	0,009
EG_H_z geschl O	14,600		82	0,009
EG_H_z rauh O	30,500		93	0,009
EG_HPMA_z geschl O	9,900		65	0,009
EG_HPMA_z rauh O	28,050		42	0,009
WM_OH geschl.	9,681		58	0,009
WM_OH rauh	38,683		33	0,009
WM_H geschl	3,920		90	0,009
WM_H rauh	27,840		120	0,009
WM_HPMA geschl	2,760		88	0,009
WM_HPMA rauh	59,260		91	0,009
WM_H_z geschl	7,950		63	0,009
WM_H_z rauh	21,170		100	0,009
WM_HPMA_z geschl	9,530		57	0,009
WM_HPMA_z rauh	41,110		68	0,009
IS_OH geschl.	23,229		13	0,011
IS_OH rauh	46,365		0	0,012
IS_H geschl	36,490		120	0,01
IS_H rauh	47,130		118	0,009
IS_HPMA geschl	22,240		107	0,011
IS_HPMA rauh	38,790		102	0,012
IS_H_z geschl	19,320		102	0,012
IS_H_z rauh	52,600		102	0,011
IS_HPMA_z geschl	38,180		90	0,01
IS_HPMA_z rauh	47,200		74	0,011

01.03.2019		03.04.2019			25.04.2019	
PAM		PAM _{senkrecht}	PAM _{schräg}		PAM _{senkrecht}	PAM _{schräg}
59 d [Floureszenz]		94 d Gerät defekt			115 d [Floureszenz] [Floureszenz]	
0,009					0,011	0,011
0,009					0,011	0,011
0,009					0,009	0,011
0,009					0,012	0,011
0,009					0,012	0,011
0,009					0,012	0,011
0,009					0,011	0,011
0,009					0,01	0,011
0,009					0,011	
0,009					0,011	
0,009					0,011	0,011
0,009					0,011	0,011
0,009					0,011	0,01
0,009					0,011	0,011
0,009					0,01	0,011
0,009					0,012	0,011
0,009					0,01	0,011
0,009					0,012	0,012
0,009					0,011	
0,009					0,011	
0,011					0,018	0,014
0,012					0,012	0,026
0,01					0,012	0,012
0,009					0,014	0,013
0,011					0,015	0,022
0,012					0,022	0,02
0,012					0,015	0,014
0,011					0,022	0,01
0,01					0,016	
0,011					0,014	

11.2. Rauheit

Darstellungen der Veränderungen der Rauheiten durch Imprägnierungen und künstliche Alterung bei den Probekörpern.

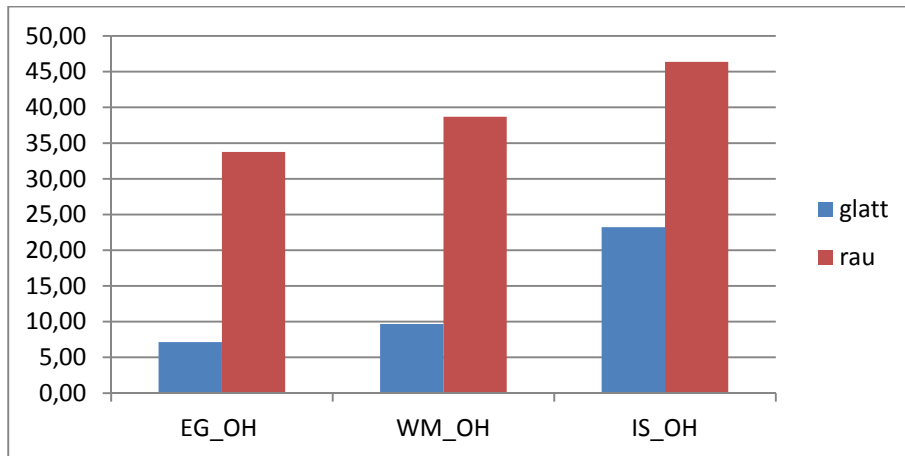
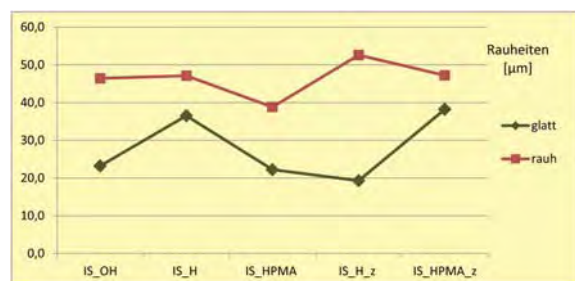
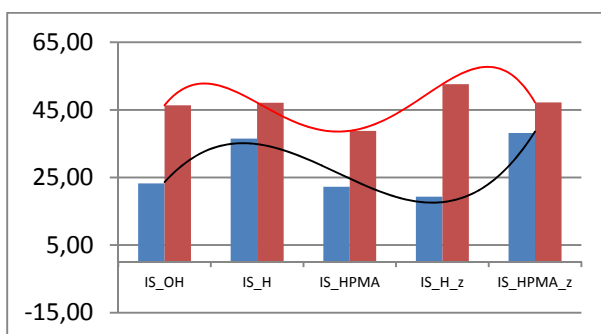
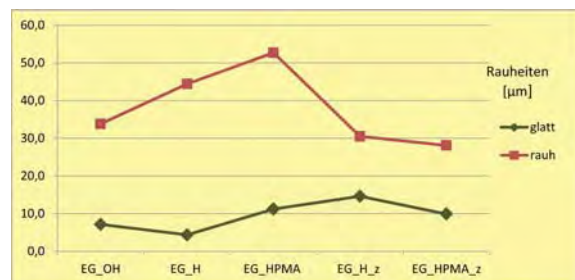
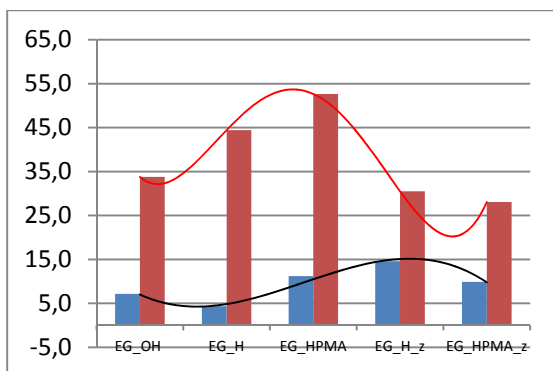


Diagramm 15: Veränderung der Rauheit von glatten zu rauhen-handwerklichen Oberflächen bei unbehandelten (OH) Natursteinen.



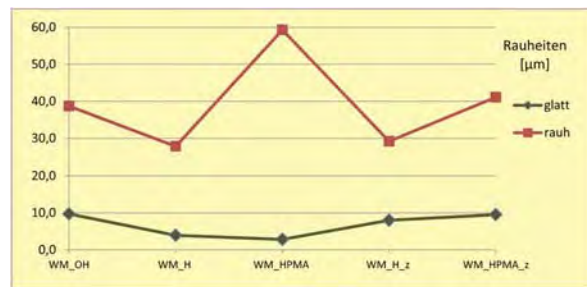
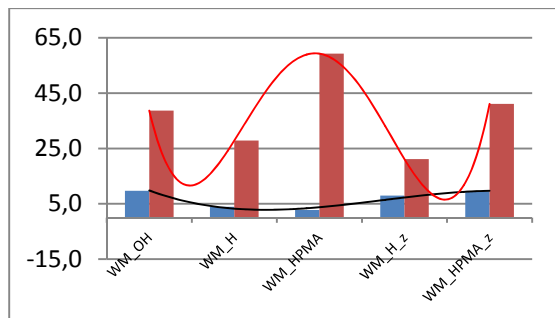
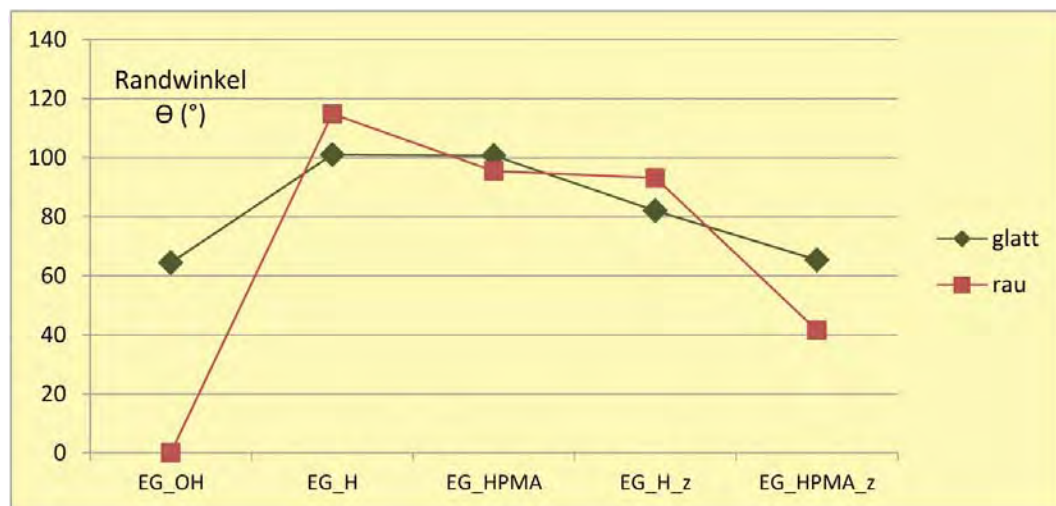
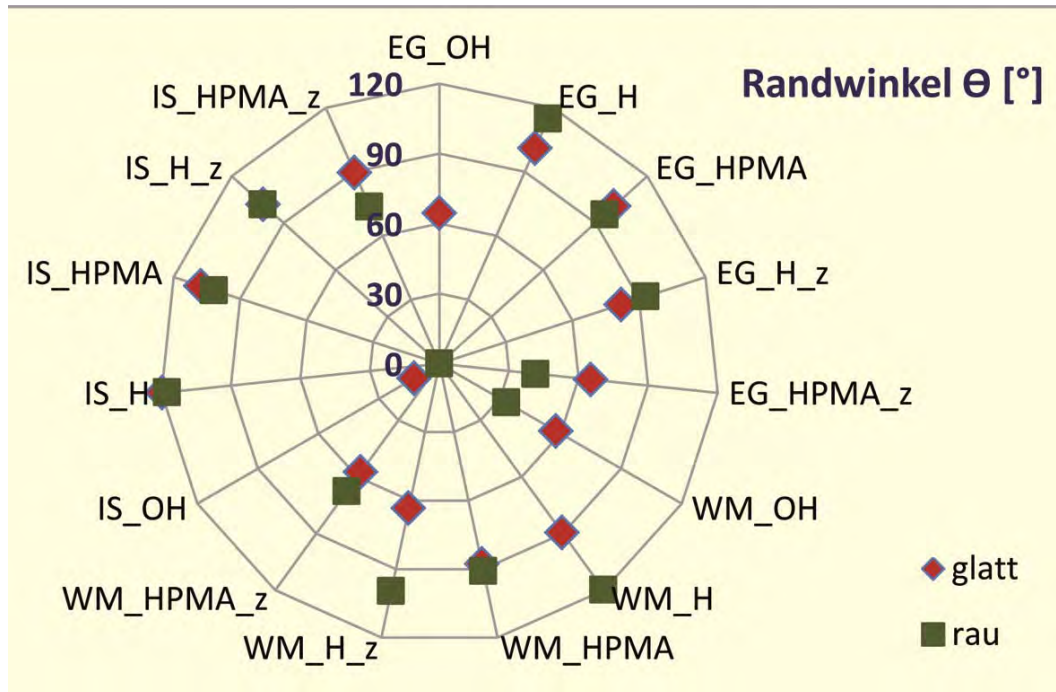


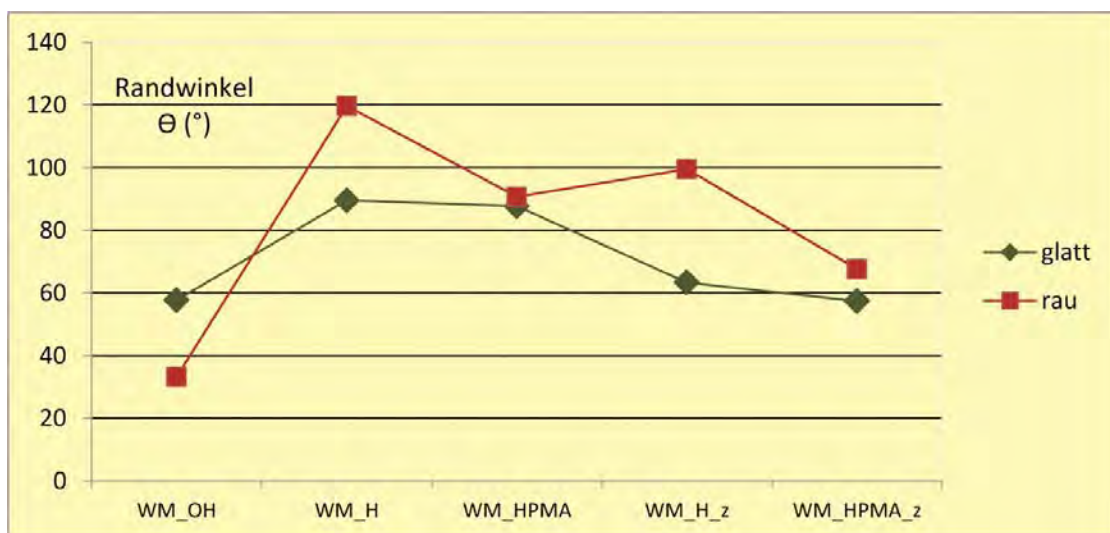
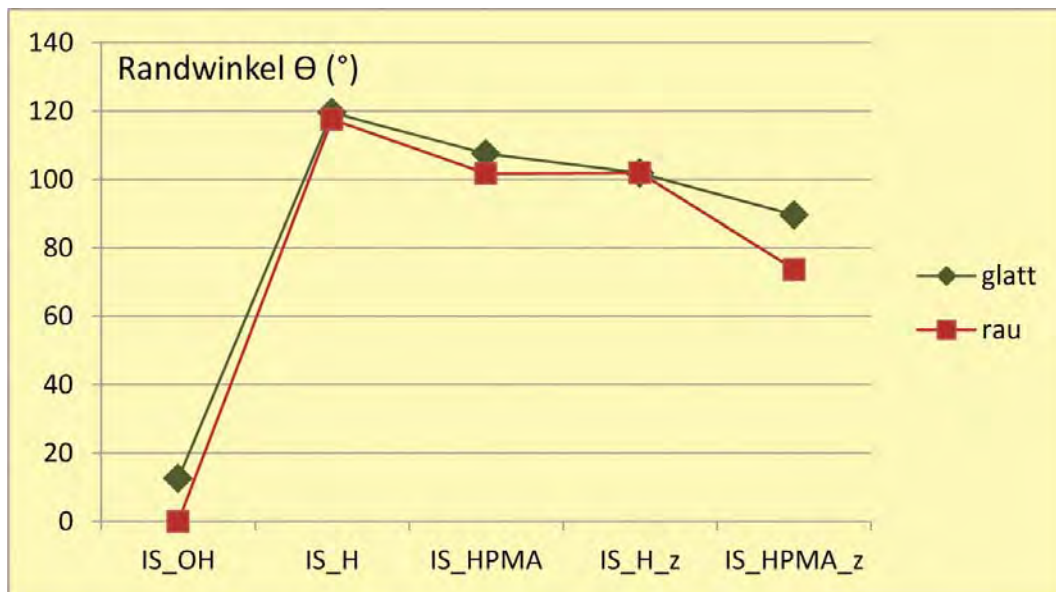
Tabelle 14: Bezeichnungen der Probekörper:

Bezeichnung der Probekörper: – EG = Epprechtstein-Granit – IS = Ihrlersteiner Grünsandstein – WM = Wunsiedler Marmor	Oberflächenbearbeitungen: – glatt = Schliff bis Korn 120 – rau = handwerklich geriffelt
Imprägnierungen: – OH = ohne Hydrophobierung – H = hydrophobiert mit einem Silikonprodukt – HPMA = hydrophobiert mit Acrylatprodukt	Künstliche Alterung: – H_z = zerstörte Silikonimprägnierung – HPMA_z = zerstörte Acrylatimprägnierung

11.3. Randwinkel

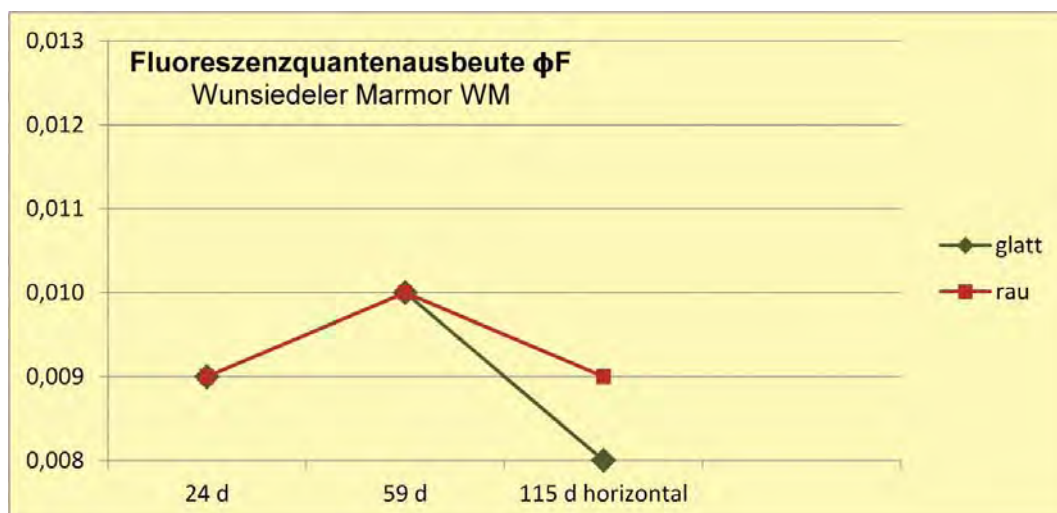
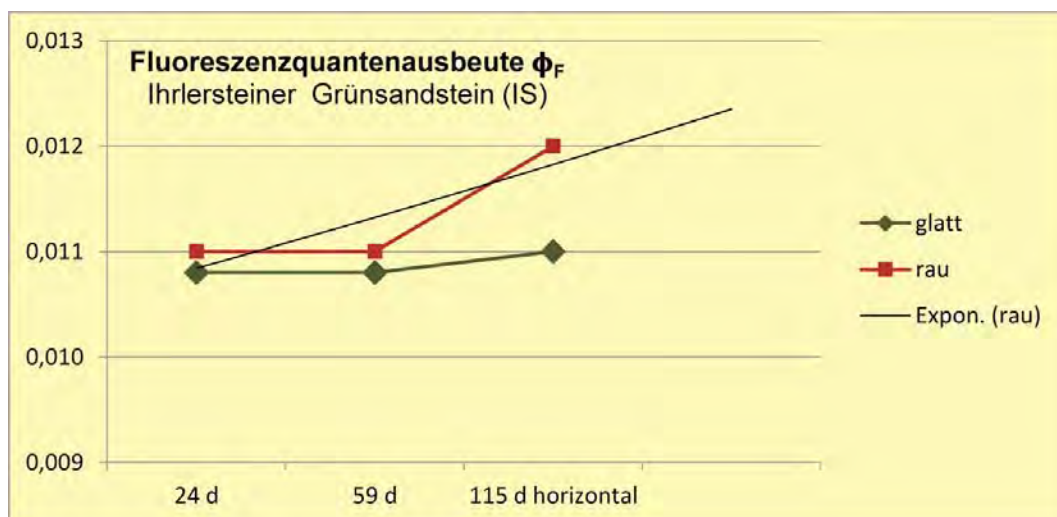
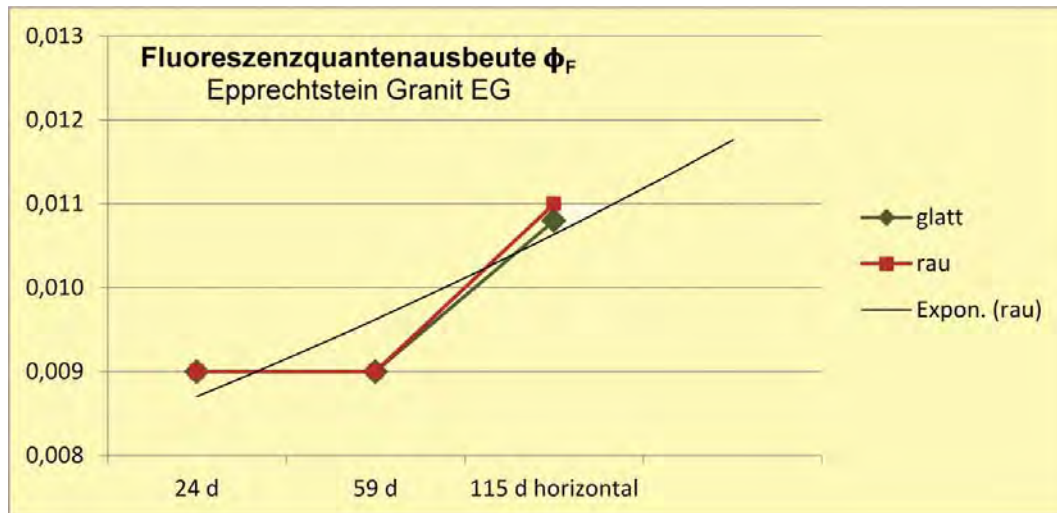
Darstellung der Veränderungen der Randwinkel durch Imprägnierungen und künstliche Alterung bei den Probekörpern. Im Vergleich zum OH-Wert steigen die Randwinkel um nach der Alterung gemäß den $_z$ -Werten wieder zu fallen.





11.4. Fluoreszenzquantenausbeute (PAM-Diagnostik)

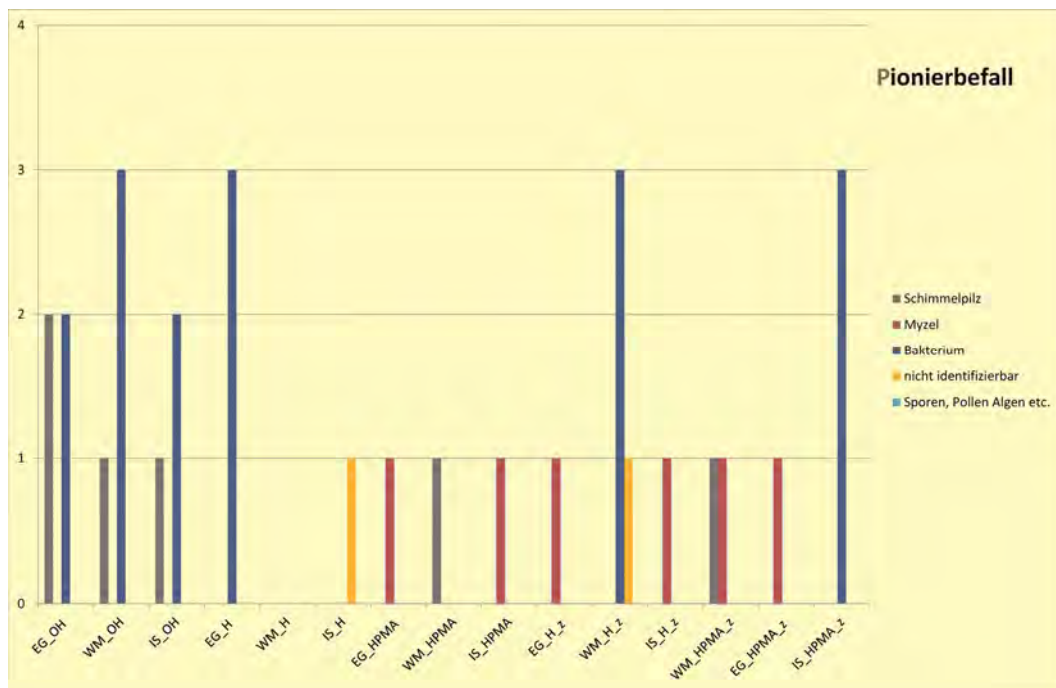
Darstellungen der Fluoreszenzquantenausbeute ϕ_F bei PAM-Messungen nach 24, 59 bzw. 115 Tagen Inkubation.



11.5. Pionierbesiedelung

Pionierbesiedelungen auf den Probekörpern nach 115 Tagen.

Befundung durch das Institut Dr. Ziemer.



Besiedelungen (Befall) von frei bewitterten Grabmalen





Ergebnistabelle Oberflächenkontaktproben / Materialproben:

Mikroorganismen, die in der Außenluft in erhöhten Konzentrationen vorkommen können

Gefährdung nach Prof. Sedlbauer		(B)	(B)	----	(C)					
Probe Nr.	Probe/Probennahmeort	<i>Alternaria</i> spp.	<i>Aureobasidium</i> spp.	<i>Cladosporium</i> spp.	<i>Ulocladium</i> spp.	mikroskopisch nicht näher identifizierbare Schimmelpilze	Myzel	Bakterien	andere Partikel oder Algen	Gesamtbewertung Schimmelpilze
1	Wunsiedeler Marmor ohne Hydrophobierung; Probekörper	+		+				+++		+
2	Marmor alt; Friedhof	++			+++	+++	++		Pollen	+++
3	Eprechtstein-Granit alt; Friedhof		++	+		++			Pollen	++
4	Eprechtstein-Granit ohne Hydrophobierung; Probekörper			++				++		++
5	Ihrler Sandstein ohne Hydrophobierung; Probekörper			+	+	+		++		+
6	Ihrler Sandstein alt; Friedhof				++++		++			++++

Myzel = Pilzfäden; spp. = eine Gattung; sp. = eine Art

Der biologische Begriff „section“ (= sec.) entspricht dem Begriff „Komplex“ im Leitfaden des UBA (November 2017). Darunter werden Arten zusammengefasst, die sich äußerlich (= phänotypisch) ähneln, genetisch jedoch verschieden sind.

	kein Nachweis; kein Befall
+	stark erhöhter Nachweis; kein Befall
++	geringer Nachweis; kein Befall zu erwarten
+++	stellenweise deutlicher Nachweis; Befall nicht ausgeschlossen
++++	deutlicher Nachweis; Befall liegt vor
+++++	massiver Nachweis; starker Befall liegt vor



Ergebnistabelle Oberflächenkontaktpollen:

Mikroorganismen, die in der Außenluft in erhöhten Konzentrationen vorkommen können

Probe Nr.	Probe/Probennahmeort	<i>Aureobasidium pullulans</i>	<i>Cladosporium</i> spp.	mikroskopisch nicht näher identifizierbare Schimmelpilze	Myzel	Bakterien	Gesamtbewertung Pilze und Bakterien
1	Klebeprobe A1: Wunsiedler Marmor, Probekörper WM-H			+	+		+
2	Klebeprobe A2: Wunsiedler Marmor, Probekörper WM-H_z			+		+++	+++
3	Klebeprobe A3: Wunsiedler Marmor, Probekörper WM-HPMA		+				+
4	Klebeprobe B1: Wunsiedler Marmor, Probekörper WM-HPMA_z		+		+		+
5	Klebeprobe B2: Epprechtstein-Granit, Probekörper EG-H					+++	+++
6	Klebeprobe B3: Epprechtstein-Granit, Probekörper EG-H_z				+		+
7	Klebeprobe C1: Epprechtstein-Granit, Probekörper EG-HPMA				+		+
8	Klebeprobe C2: Epprechtstein-Granit, Probekörper EG-HPMA_z				+		+
9	Klebeprobe C3: Ihrlersteiner Grünsandstein, Probekörper IS-H			+			+
10	Klebeprobe A1: Ihrlersteiner Grünsandstein, Probekörper IS-H_z				+		+
11	Klebeprobe A2: Ihrlersteiner Grünsandstein, Probekörper IS-HPMA				+		+
12	Klebeprobe A3: Ihrlersteiner Grünsandstein, Probekörper IS-HPMA_z					+++	+++
13	Wunsiedler Marmor, WM 2						---
14	Friedhof Wunsiedel, WM 1	++++	+				++++

Myzel = Pilzfäden; spp. = eine Gattung; sp. = eine Art

11. 6. Hydrophobierungsprodukte, Technische Merkblätter

MÖLLER-CHEMIE STEINPFLEGEMITTEL GmbH
ZIEGELTALSTRASSE 2
D-93346 IHRERSTEIN
TELEFON 09441-176940
TELEFAX 09441-1769499
www.moellerstonecare.eu
info@moellerstonecare.eu

MOELLER STONE CARE



TECHNISCHES MERKBLATT

HMK® S233 Silikon-Imprägnierung

BESCHREIBUNG: HMK® S233 ist eine gebrauchsfertige, lösungsmittelhaltige Imprägnierung auf Silikon-Basis für Natursteine, Kunststeine, Betonwerkstein, Terrazzo, unglasierte Ziegel- und Klinkerzeugnisse im Innen- und Außenbereich. Das Eindringen von Wasser und Schmutz wird vermindert.

EIGENSCHAFTEN: HMK® S233 vermindert das Eindringen von Wasser und Schmutz in die Oberfläche. Eine Anschmutzung wird dadurch stark verringert bzw. eine Reinigung deutlich erleichtert. Die wasser- und schmutzabweisende Wirkung hängt von der Saugfähigkeit des Untergrundes ab. Je mehr HMK® S233 vom Stein aufgenommen wird, umso besser ist die abweisende Wirkung. HMK® S233 ist UV-beständig und vergilbungsfrei. Die Dampfdiffusion des Steines wird geringfügig beeinträchtigt. Der zurückbleibende trockene Wirkstoff ist gesundheitlich unbedenklich. Die Farbe und Struktur der Oberfläche kann sich geringfügig verändern.

EINSATZGEBIET: HMK® S233 eignet sich für alle saugfähigen Natur- und Kunststeine im Innen- und Außenbereich, wie z.B. polierter, geschliffener oder sandgestrahlter Marmor, Kalkstein, Travertin, Solnhofener Platten, Betonwerkstein, Terrazzo, unglasierte Fliesen und Ziegelerzeugnisse, Granit, Gneis usw. – Nicht saugende Beläge, wie glasierte Fliesen u.ä., können nicht behandelt werden.

HALTBARKEIT: Die Haltbarkeit des applizierten Produktes hängt von der Saugfähigkeit, Sättigung und Beanspruchung des Belages sowie der richtigen laufenden Unterhaltsreinigung ab. HMK® S233 hält in der Regel mehrere Jahre und kann bei Bedarf erneuert werden.

UNTERGRUND: Bei der Behandlung von neu verlegten Flächen muss eine ausreichende Trocknungszeit eingehalten werden, damit die Feuchtigkeit aus Belag und Unterkonstruktion entweichen kann (max. Restfeuchte 2 bis 4%). Eine eventuell vorhandene Fußbodenheizung ist rechtzeitig abzuschalten. Der zu behandelnde Belag muss naturkalt, sauber, trocken, frei von Flecken, saugfähig und in einwandfreiem Zustand sein. Baumängel, wie z.B. fehlerhafte Anschlüsse, Risse, Ursachen für aufsteigende Feuchtigkeit müssen vor der Behandlung beseitigt werden. Es muss gewährleistet sein, daß Wasser und darin gelöste Stoffe nicht hinter die hydrophobierte Zone gelangen können, da dies zu Abplatzungen, Salzspaltungen und Frostschäden führen kann. Bei Vorhandensein von baustoffschädlichen Salzen ist eine quantitative Schadsalz-Analyse unerlässlich. Hohe Schadsalzkonzentrationen (besonders Sulfate, Nitrate und Chloride) führen zu schweren Baustoffschäden, die durch eine hydrophobierende Imprägnierung nicht verhindert werden können. Zur gründlichen Vorreinigung eignet sich HMK® R155 Grundreiniger - säurefrei.

Nach einer Grundreinigung sollte mindestens 1 bis 2 Tage gewartet werden, damit die Feuchtigkeit der Reinigung ausgetrocknet

ist (Restfeuchtigkeit 2 bis 4 %).

Legen Sie eine Musterfläche an, um Eignung und Verbrauch zu prüfen.

ANWENDUNG: HMK® S233 auf den naturkalten, sauberen, fleckenfreien, trockenen und saugfähigen Untergrund mit einem weichen Pinsel oder einer Kurzfloorrolle satt und gleichmäßig auftragen. Bei besonders saugfähigen Flächen nach ca. 24 Stunden nochmals behandeln. Überschüssiges HMK® S233 ist vor dem Antrocknen mit einem Papiertuch vollkommen zu entfernen. Bei unzureichender Entfernung von überschüssigem Material können dunkle Flecken oder Schlieren entstehen. An Fassaden ist ein Auftragen auch im Sprühverfahren (airless) möglich.

WICHTIG: Gummi, Kunststoffe, lackierte Flächen, gewachstes oder gebeiztes Holz sowie lösungsmittelunbeständige Flächen nicht behandeln.

VERARBEITUNGSTEMPERATUR: Die ideale Verarbeitungstemperatur der zu behandelnden Fläche liegt zwischen +12°C und +25°C. Nicht bei direkter Sonneneinstrahlung verarbeiten.

TROCKNUNGSZEIT: Je nach Raumtemperatur und Luftzirkulation ca. 4 bis 6 Stunden. Während dieser Zeit die behandelte Fläche nicht betreten und 12 Stunden vor Regen und starker Feuchtigkeit schützen.

Die wasserabweisende Wirkung entwickelt sich innerhalb von 24 Stunden.

ABPERLEFFEKT: Bei der Verwendung von HMK® S233 kann vorübergehend ein Abperleffekt entstehen, der sich wieder verliert. Dieser Abperleffekt eignet sich nicht, um die Wirksamkeit, Schutzwirkung und Dauerhaftigkeit von HMK® S233 zu beurteilen.

REINIGEN DER ARBEITSGERÄTE: Die Arbeitsgeräte können mit HMK® R799 oder Nitroverdünnung gereinigt bzw. mit klarem Wasser und etwas HMK® R155 Grundreiniger - säurefrei durchgewaschen werden.

BITTE BEACHTEN: Nicht zu behandelnde Flächen, Wände, Glas, Einrichtungsgegenstände usw. sind zu schützen.

ERGIEBIGKEIT: Je nach Material und Oberflächenbearbeitung ca. 5 bis 15 m²/Liter.

LAGERUNG: Kühl und trocken bis max. +25°C im originalverschlossenen Gebinde ca. 2 Jahre lagerfähig. Angebrochene Gebinde zügig verarbeiten. Für Kinder unzugänglich aufbewahren. Die gesetzlichen Vorschriften zur Lagerung dieses Produktes sind zu beachten.

TECHNISCHE DATEN: Form: flüssig
Farbe: farblos

Dieses technische Merkblatt kann und soll nur unverbindlich beraten. Alle Angaben über das Arbeiten mit unseren Spezialerzeugnissen sind mit den örtlichen Verhältnissen und den verwendeten Materialien abzustimmen. Legen Sie eine kleine Musterfläche an, um die Eignung sowie den Verbrauch zu bestimmen. Beachten Sie bei der Verarbeitung unserer Spezialerzeugnisse auch das Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31.

© MOELLER STONE CARE D-04.2014

MÖLLER-CHEMIE STEINPFLEGEMITTEL GmbH
ZIEGELTALSTRASSE 2
D-93346 IHRERSTEIN
TELEFON 09441-176940
TELEFAX 09441-1769499
www.moellerstonecare.eu
info@moellerstonecare.eu

MOELLER STONE CARE



Geruch: charakteristisch

ENTFERNUNG: **HMK® S233** kann mit **HMK® R154** Lösefix - was-
serlöslich und **HMK® R155** Grundreiniger - säurefrei in der Regel
wieder entfernt werden.

PFLEGEEMPFEHLUNG: Für die regelmäßige Unterhaltsreinigung
empfehlen wir **HMK® P324** Edel-Steinseife - Wischpflege und im
privaten Bereich zur Glanzauffrischung bei polierten Oberflächen
gelegentlich **HMK® P319** Marmor- und Granit-Polish.

SICHERHEIT: Die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vor-
sichtsmaßnahmen sind zu beachten. Unsere Produkte sind nach
der EG-Verordnung eingestuft und gekennzeichnet (Sicherheits-
datenblatt).

Bei der Verarbeitung in geschlossenen Räumen muss für eine
ausreichende Durchlüftung gesorgt werden. Genuss- und Le-
bensmittel sind vor den Arbeiten zu entfernen.

Flüssigkeit und Dampf entzündbar. Kann Schläfrigkeit und Be-
nommenheit verursachen. Kann bei Verschlucken und Eindringen
in die Atemwege tödlich sein. Giftig für Wasserorganismen, mit
langfristiger Wirkung. Ist ärztlicher Rat erforderlich, Verpackung
oder Kennzeichnungsetikett bereithalten. Darf nicht in die Hände
von Kindern gelangen. Vor Gebrauch Kennzeichnungsetikett le-
sen. Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen
und anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen. BEI VER-
SCHLÜCKEN: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt
anrufen. BEI KONTAKT MIT DER HAUT (oder dem Haar): Alle be-
schmutzten, getränkten Kleidungsstücke sofort ausziehen. Haut
mit Wasser abwaschen, duschen.

INHALTSSTOFFE: Silikone, Mineralöldestillat

UMWELTSCHUTZ: Nicht unverdünnt bzw. in größeren Mengen in
das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen
lassen.

ENTSORGUNG: Ungereinigte Verpackungen und größere Rest-
mengen sind gemäß den örtlichen behördlichen Vorschriften zu
entsorgen. Die Gebinde sind aus umweltfreundlichem Weißblech
und recyclebar. Restentleerte und gereinigte Gebinde können
über die Wertstoffsammelsysteme entsorgt werden.

LIEFERFORM (VE):

1-Liter Flasche:	12 Stück im Karton
5-Liter Kanister:	2 Stück im Karton
10-Liter Kanister:	1 Stück lose

Dieses technische Merkblatt kann und soll nur unverbindlich beraten. Alle Angaben über das Arbeiten mit unseren Spezialerzeugnissen sind mit den örtlichen
Verhältnissen und den verwendeten Materialien abzustimmen. Legen Sie eine kleine Musterfläche an, um die Eignung sowie den Verbrauch zu bestimmen.
Beachten Sie bei der Verarbeitung unserer Spezialerzeugnisse auch das Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31.

© MOELLER STONE CARE D-04.2014

INTER - MONUMENT

M-Finish X-10 / X-20

Form	Flüssigkeit
Farbe	farblos
Geruch	aromatisch
Chemische Zusammensetzung	in Lösung polymerisiertes modifiziertes Poly-methacrylat

	Type X 10	Type X 20
Wirkstoffgehalt	10%	20%
Dichte	0,86	0,87
Viskosität mPa·s /23°C	5	18 (Brookfield Spindel 1)
Auslaufzeit (ISO-Becher 2 mm)	75 sec.	105 sec
Lösemittel	Xylol	
Flammpunkt	+ 25 - 30°C	
Gefahrenklasse	3	
MAK-Werte	440 mg/m³	
Lagerung	Behälter dicht geschlossen, kühl an einem gut gelüfteten Ort aufbewahren	
Lagerstabilität	im Originalgebinde praktisch unbegrenzt	
R-Sätze	11-20/21-38	
S-Sätze	24/25	
Giftklasse	4, BAG T Nr. 54 165	

Anwendung:

M-Finish X 10 und X 20 unterscheiden sich nur durch den Wirkstoffgehalt an PMMA, sind in jedem Verhältnis untereinander mischbar und sind physikalisch trocknende, wasserfreie Imprägnier- und Schutzmittel für:

- ☐ Beton
- ☐ Glas
- ☐ Holz
- ☐ Natursteine
- ☐ Metalle
- ☐ Mineralfarben
- ☐ Putz
- ☐ Terrakotta
- ☐ Ziegel.

Bei porösen, saugenden Materialien tritt eine Festigung im Bereich der Oberfläche ein. Bei dichten Materialien bildet sich ein Schutzfilm.

Eigenschaften:

Das im M-Finish X enthaltene Polymethacrylat (PMMA) liegt als Lösungspolymerisat vor, d.h. das Produkt war noch nie fest und weist eine relativ geringe Molekülgröße auf. Daraus resultiert eine hervorragende Eindringtiefe. Das Molekül hat zusätzlich aktive Gruppen, welche mit den Grenzflächen reagieren. Dadurch wird die Haftung des des Polymethacrylats am Objekt optimal verbessert. Dies gilt besonders für Natursteine und auf Metallen.

Der luftgetrocknete Film von M-Finish ist:

- farblos
- absolut vergilbungsfrei
- wasserdampfdurchlässig
- schwer durchlässig gegenüber CO₂
- alterungsbeständig
- alkalibeständig
- säurebeständig

M-Finish kann mit Xylol, 2-Butanon (MEK), Aceton, Solvesso oder Shellsol weiter verdünnt werden. Wird bei den unbedingt erforderlichen Vorversuchen ein bestimmtes Mischungsverhältnis ermittelt, so kann diese Mischung ab einer gewissen Größenordnung werkseitig geliefert werden.

Wirksamkeit:

Der reine, luftgetrocknete PMMA-Film hat folgende Eigenschaften:

Diffusionswiderstandszahlen: μ CO ₂	6 100 000
μ H ₂ O	1 800
Pendelhärte nach DIN 53 157	120 sec.

Wirkstoffgehalt:

Dieser wurde bewußt bei der Type X 10 auf 10 und bei der Type X 20 auf 20 Gew. % Polymethacrylat in Lösung beschränkt.

Verarbeitung:

Die zu behandelnden Flächen oder Gegenstände müssen saugfähig, sauber, staubfrei und trocken sein. Nur wenn M-Finish in die Risse, Poren und Kapillaren eindringen kann erfolgt eine Festigung des Gefüges. Bei nicht saugenden Objekten erfolgt Bildung eines farblosen Schutzfilms.

Imprägnierung:

Bei Beton und Natursteinen wird M-Finish XA oder XB mit Pinsel, Rolle oder Sprühgerät aufgebracht. Eine Vernebelung ist zu vermeiden. Deshalb sollen Düsen und Drücke der Pumpen entsprechend ausgewählt werden. Flachstrahldüsen und Drücke von < 1 bar haben sich bewährt. Der Vorschub soll so gewählt werden, daß auf der Oberfläche ein ca. 20 bis 40 cm langer "Flüssigkeitsfilm" der Lösung entsteht. Beim Streichen mit Pinsel, Bürste oder Rolle sollte mit gut getränkten Werkzeugen satt aufgetragen werden.

Die Objekttemperatur sollte nicht unter + 2°C sein. Ideal sind + 5 bis 20°C. Die Applikation auf erwärmten Untergrund, z.B. durch Sonneneinstrahlung, ist zu vermeiden, da das Lösungsmittel zu schnell verdunstet und so keine ausreichende Eindringtiefe erreicht wird. Deshalb:

Nicht bei praller Sonne oder bei Regen applizieren!

Bei stark saugenden Untergründen kann problemlos mehrmals aufgetragen werden. Die nachstehende Tabelle gibt Richtwerte über den Verbrauch:

Untergrund:	1. Anstrich l/m ²	2. Anstrich l/m ²
Sichtbeton, sehr dicht:	0,2	0,2
Beton:	0,3	0,3
Natursteinboden, dicht:	0,2	0,3
porös:	0,4	0,5
sehr porös:	0,5	0,5
Kalkstein:	0,3	0,3
Sandstein:	0,5	0,5

Der erste Antrag sollte immer mit M-Finish X 10 erfolgen um eine Tiefenimprägnierung zu erreichen. Bei sehr porösem Untergrund kann für den, oder die folgenden Anstriche auch die Type M-Finish X 20 verwendet werden. Hier gelten dann ebenfalls die obigen Richtwerte.

Da die Porosität und somit die Saugfähigkeit der Baustoffe stark schwankt, sind Vorversuche zur Ermittlung des Verbrauchs unbedingt erforderlich.

Hinweis:

Ein Vorversuch gibt auch Aufschluß über eine Farbvertiefung oder Nachdunkelung bei Filmbildung, verursacht durch eine nicht bekannte Vorbehandlung des Untergrunds. Normalerweise tritt keine Farbveränderung und nur eine geringe Glanzbildung durch M-Finish ein, wenn nicht zu viel und deshalb zu dick appliziert wurde.

Geschieht dies dennoch, so läßt sich dieser Film mit M-Reiniger X entfernen. Dies sollte aber umgehend innerhalb von 15 Minuten erfolgen. Dies gilt auch für die Anwendung auf Glas, Metallen oder Holz. Diese Materialien werden von M-Finish nicht angegriffen.

Schutzsystem:

Eine klare Trennung zwischen einer Imprägnierung und der Wirkung als Schutzlack ist nicht möglich, der Übergang ist fließend. Dies gilt für trockenes Holz, (für archäologisches Nassholz: Konservierung mit Zucker) Metalle, aber auch für Glas.

Die niedrige Viskosität, diese kann durch Verdünnen noch herabgesetzt werden, erlaubt das Eindringen in die mit der Oberfläche in Verbindung stehenden Hohlräume. Unebenheiten, die durch Korrosion entstanden, können bei gleichzeitiger Festigung ausgeglichen werden. Die reaktiven Gruppen im Molekül gewährleisten die sehr gute Haftung an Glas, Marmor und Metall. Als Schutzanstrich für Vergoldungen in der Freibewitterung deshalb bestens bewährt. In der Regel wird M-Finish hier mit Pinsel aufgetragen, aber auch das Einlegen in die Lösung und somit Tränkung ist möglich und wird besonders bei der Konservierung von archäologischen Metallen angewandt. Dieser Vorgang kann mit verschiedenen Konzentrationen wiederholt werden. Der Vorteil dieser Technik ist, daß die Lösung, wenn diese durch Abdecken vor Verdunstung geschützt ist, beliebig lange Zeit einwirken kann.

Schutzmaßnahmen:

M-Finish ist nicht toxisch. Dennoch sollten die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden. Die Xyloldämpfe sind brennbar. **Nicht rauchen!**

Gefahren- und Sicherheitssätze:

R-Sätze:

- 11 Leichtentzündlich.
- 20/21 Gesundheitsschädlich bei Einatmen und bei Berührung mit der Haut.
- 38 Reizt die Haut.

S-Sätze:

S 24/25 Berührung mit den Augen und der Haut vermeiden.

Kennzeichnung: F: leichtentzündlich.

Toxikologie: es liegen keine Angaben vor.

Transport: IMDG CODE Kl. 3.2, 3084; UN-NR. 1307
GGVE Kl. 3, Z. 5, / GGVS 2301, <z. 5.

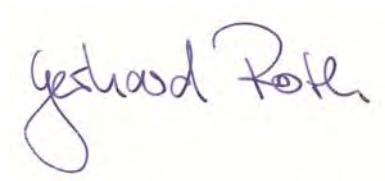
Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand unserer Kenntnisse. Sie dienen der Produktbeschreibung und stellen keine Zusicherung von Eigenschaften des beschriebenen Produktes im Sinne der gesetzlichen Gewährleistungsvorschriften dar.
Kie. 01.99Hü.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hinweise verwandt.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Augsburg, den 17. Mai 2019

A handwritten signature in blue ink, reading "Gerhard Roth". The signature is written in a cursive style with a large, looped 'G' and a distinct 'R'.

Gerhard Roth