



Gerhard A. Roth
FACHPLANUNG STEINSANIERUNG BAUTENSCHUTZ

Auszüge aus der

Master-Thesis

Untersuchungen zur Beeinflussung der mikrobiellen Pionierbesiedlung auf Natursteinen unterschiedlicher Art, Alterung und Oberflächenbeschaffenheit durch verschiedene hydrophobierende Oberflächenbehandlungen

Hochschule Wismar
Wings Masterstudium
Bautenschutz

Untersuchungen zur Beeinflussung der
mikrobiellen Pionierbesiedlung auf Natursteinen
unterschiedlicher Art, Alterung und
Oberflächenbeschaffenheit durch
verschiedene hydrophobierende
Oberflächenbehandlungen

Laborversuche und vergleichende Betrachtung
dokumentierter Feldversuche

Auszug aus der Master-Thesis zur Erlangung
des Grades eines Master of Science der Hochschule Wismar

Gerhard Roth

Wismar, 2019

Betreuer Prof. Dr. H. Venzmer,
weiterer Gutachter Prof. Dr. Manfred-Josef Sellner

Einleitung / Problemstellung

Bakterien, Algen und Pilze besiedeln Architekturoberflächen aus mineralisch gebundenen oder gebauten Werkstoffen wie Natursteine und andere.

Bei lang andauerndem Befall über mehrere Jahre hinweg entstehen meist komplexe Siedlungsgemeinschaften.

Für die Besiedelung benötigen sie nach gängiger Theorie vor allem Feuchte, aber auch günstige Temperaturen und Nährstoffe.

Sie wachsen „zuerst dort, wo die Feuchtigkeit am höchsten ist und wo sie am längsten verweilt.“ [1 S.45].

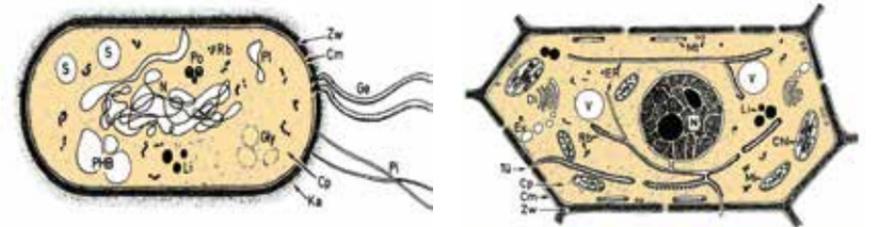
Die nachfolgenden Untersuchungen sollen zeigen wie die mikrobielle Pionierbesiedlung auf verschiedenen Natursteinen festgestellt werden kann und ob und welchen Einfluss Alterung (Verwitterung), Oberflächenbeschaffenheit und hydrophobierende Oberflächenbehandlungen auf eine Pionierbesiedelung durch Mikroorganismen haben.

Mikroorganismen

Mikroorganismen sind mikroskopisch kleine Lebewesen (ab ca. 1/1000 mm). Es handelt sich überwiegend um Einzeller, auch einige Mehrzeller entsprechend geringer Größe gehören dazu. Mikroorganismen kommen in nahezu allen Umweltsituationen vor und bei allen Lebensbedingungen.

Zum Zellaufbau werden u.a. chemische Bestandteile aus der Umgebung genommen. Sie benötigen Wasser und Nährstoffe wie Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Eisen, Magnesium, Kalium, Natrium und Calcium, sowie Spurenelemente [2].

Zellen von Mikroorganismen



Grafische Darstellungen von Zellen ohne (Prokaryont, links) und mit Zellkern (Eukaryont, rechts)

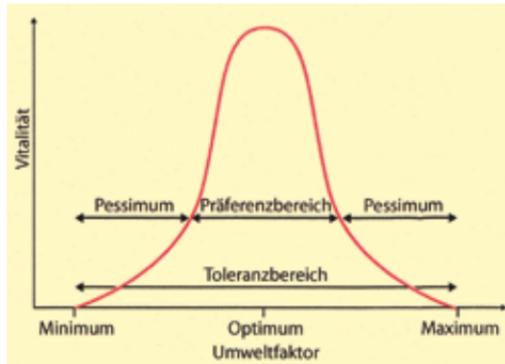
Wachstumsbedingungen

Die meisten Mikroorganismen sind heterotroph, sie benötigen zur Ernährung energiereiche organische Stoffe, während autotrophe sie aus anorganischen Verbindungen gewinnen.

Algen, Pilze und Flechten wachsen unter verschiedenen Lebensbedingungen. Gemeinsam sind ihnen aber die Ansprüche an

gemäßigte Temperaturen (15 bis 45°C) und das Vorhandensein von Feuchte (pH-Bereich von 5 bis 9) in Material und Luft (atmosphärischer Druck ca. 1 bar).

Bakterien nehmen eine Sonderstellung ein, da sie unter nahezu allen Bedingungen wachsen können.



Grafische Darstellung von Wachstum [2 S.47]

Wachstumsbedingungen

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 Faktoren:

Günstige, geeignete lokale Klimabedingungen (Temperatur, Feuchte / flüssiges Wasser; pH-Wert, Druck u. a.).



Grafische Darstellungen von Wachstumsbedingungen [1 S.12]

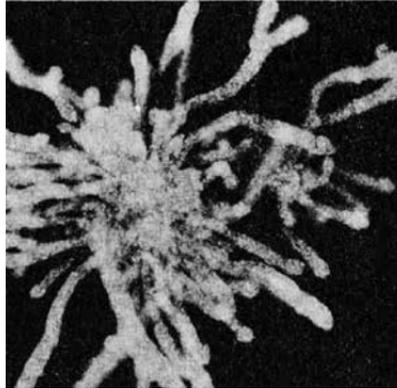
Bakterien

„Bakterien sind Prokaryonten, bei ihnen liegt die DNA wie bei allen Prokaryonten frei im Cytoplasma. 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.

Bakterien vermehren sich durch Zellteilung (binäre Spaltung), Sprossen- oder Knospenausbildungen sind die Ausnahme.

Bakterien und Cyanobakterien sind allgegenwärtig, nur das Besiedelungsmilieu entscheidet, welche Art wächst.

Am Bauwerk verhalten sich die fälschlicherweise als Grünalgen, Blaualgen und Gelbgrünalgen genannten Bakterien wie echte Algen und bilden Kolonien an der Materialoberfläche oder in porösen Baustoffen kurz unter dieser.



Bakterienkolonie [3 S.48]

Algen

Als **Mikroalgen** werden definitivonsgemäß nur ein- bis wenig zellige Algen angesehen. Mikroalgen betreiben wie alle Algen Photosynthese, sie nutzen Licht als Energiequelle und sind Kohlenstoffautotroph, d.h. sie gewinnen ihn selbst aus Kohlendioxid.

Die **Makroalgen** (Großalgen) sind mit bloßem Auge erkennbar, ihre Länge reicht von wenigen Millimetern bis zu 60 Metern. Die meisten Großalgen leben im Meer (Seetang).

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



Algenkolonie [1 S.20]

Pilze

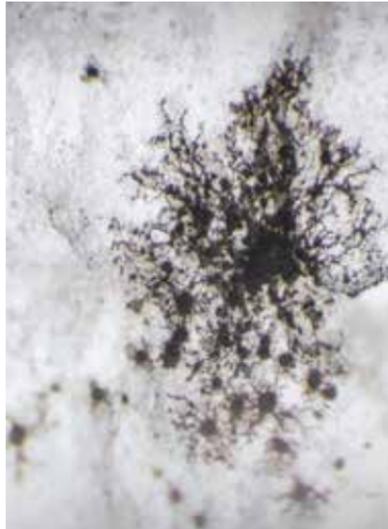
Pilze nehmen eine Sonderstellung ein, da sie sich neben den Arten der Zellteilung auch durch Hyphenbildung (Fäden) vermehren können.

Zu den Pilzen zählen Einzeller wie die Backhefe als auch Vielzeller wie die Schimmelpilze und die Ständerpilze. Von den Pflanzen unterscheiden sich die Pilze durch ihre Lebensweise ohne Photosynthese und dem Abbau von vorhandenen organischen Stoffen. Sporen benötigen geeignete Temperaturen und Wasser zur Keimung und zum Wachsen.

Am Bauwerk (Holzbaustoffe) spricht man von holzerstörenden Pilzen oder Hausfäulepilzen. Auf mineralischen Baustoff-

oberflächen finden sich überwiegend Schwärze- und Schimmelpilze.

Pilze stellen in der Regel den Primärbewuchs auf Fassaden.



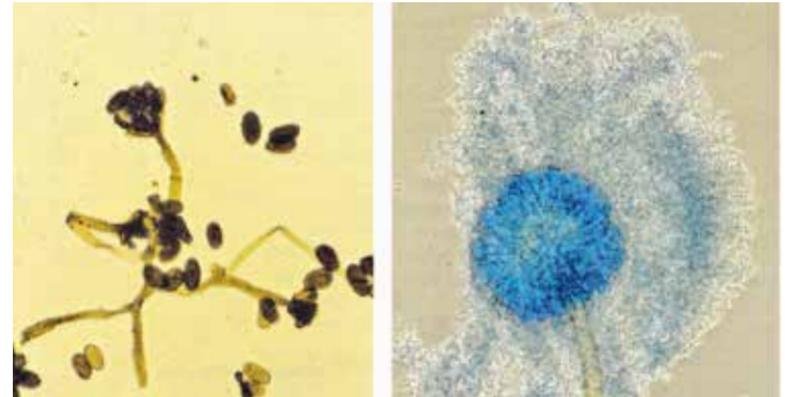
Schwärzepilz [1 S.13]

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.



Schimmelpilze [5 S.19]

Flechten

Flechten sind symbiotische Gemeinschaften von Pilzen und Algen und/oder Bakterien, die sich in Eigenschaften und Wachstumsformen 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.

Als Siedlungsgemeinschaften stellen sie keine Pionierbesiedelung dar.



Flechten

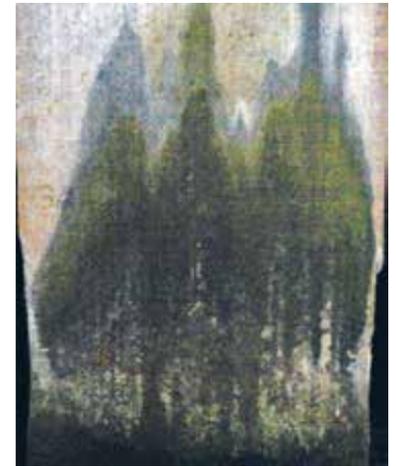
Biofilm

„Biofilme bestehen aus einer Schleimschicht (Film), in der Mikroorganismen (z. B. Bakterien, Algen, Pilze, Protozoen) eingebettet sind.

Biofilme entstehen, wenn Mikroorganismen sich an Grenzflächen ansiedeln. Sie bilden sich überwiegend in wässrigen Systemen, entweder auf der Wasseroberfläche oder auf einer Grenzfläche zu einer festen Phase.

Biofilme bilden ähnlich den Flechten komplexe (Schutz-) Gemeinschaften mit erhöhter chemischer und physikalischer

Stabilität und entstehen wie diese erst in Kolonisation von Pionierbesiedelungen - überwiegend in wässrigen Systemen.



Biofilm [6 S.94]

Natursteine

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

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

Diese Mineralien bestehen überwiegend aus den 17 Elementen Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, Fluor, Natrium, Magnesium, Aluminium, Silizium, Phosphor, Schwefel, Chlor, Kalium, Calcium, Titan, Mangan, Eisen und Zirkonium.

Sind Gesteine entstanden beginnt auch schon wieder deren Verwitterung in physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen.



Gliederung der Gesteine [7 S.59]

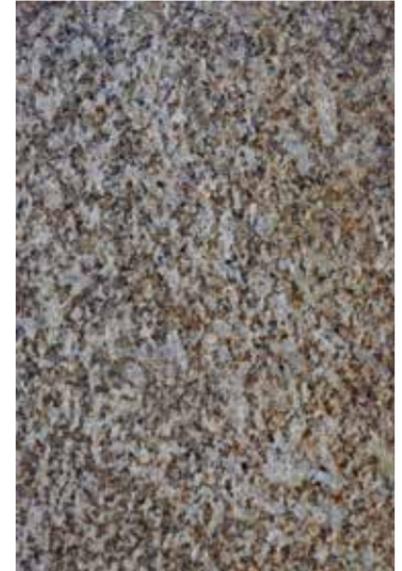
Magmatite (Erstarrungsgesteine)

Im Erdinneren befindet sich eine zähflüssige Gesteinschmelze, das Magma. „Dringt dieses Gießflussmaterial 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**.

Magmatite sind in hohem Maß von Silizium und Sauerstoff der Kieselsäure $[\text{SiO}_2]$ bestimmt.



Magmatit – Epprechtstein Granit

Sedimente (Niederschlagsgesteine)

Sandsteine entstehen durch Erosion und Lösung von „alten“ Gesteinen, die als Verwitterungsprodukte neu vermengt, verdichtet und verkittet werden. Klastisch als Ablagerungsgesteine, chemisch-biogen als Kalkgesteine oder als Rückstandsgesteine.

Petrografisch werden sie durch ihren Mineralbestand, durch Korngefüge und Porenraum unterschieden, sowie durch ihre zementären Bindungssysteme.

Reine Sandsteine sind sehr selten.

Meist handelt es sich um polymineralische Gesteine mit komplexen Bindungen, sowie Einfärbungen und Einlagerungen.



Sediment – Ihrlersteiner Grünsandstein

Metamorphite (Umwandlungsgesteine)

Werden Gesteine jeglicher Art unter hohem Druck und hohen Temperaturen umgewandelt (Metamorphosen) entstehen Metamorphite.

Die Umwandlung kann im Kontakt mit magmatischem Material entstehen oder durch regionale tektonische Überlagerungen oder Absenkungen.

Es erfolgen Gefügeveränderungen, Umkristallisationen, Veränderungen der Mineralsubstanz, Zerstörung von Fossilien.

Einige Metamorphite:

- Gneise
- Schiefer
- Felse
- Marmore



Metamorphit – Wunsiedeler Marmor

Verwitterung von Natursteinen

Unter Gesteinsverwitterung versteht man die Veränderungen oder Anpassungen von Gesteinen an der Erdoberfläche oder unter Wasser.

Im Wesentlichen handelt es sich bei der Verwitterung um einen Angriff auf den Stein über die Gesteinsoberfläche und die Gesteinsporen, der zur Entfestigung des Kornverbandes und zur Auflösung der Strukturen führt.

- **physikalisch:** mechanische Spannungen.
- **chemisch:** Lösungs- und Umwandlungsreaktionen unter Einfluss von Wasser und darin gelösten Gasen und Ionen.
- **biologisch:** chemische oder physikalische Angriffe auf die Gesteinskomponenten durch Mikroorganismen, Pflanzen oder Tiere und deren Stoffwechselprodukte.
- **anthropogen:** Veränderungen durch direkte und indirekte Eingriffe des Menschen: Zerstörungen etc..

Verwitterungs- und Feuchteschutz

Wasser bzw. in Wässern gelöste oder geführte Stoffe bilden neben dem CO_2 aus der Luft das größte Potential zur chemischen und physikalischen Verwitterung von Natursteinen und mineralischen Baustoffen.

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 Regen oder stauendes Sickerwasser etc..
- Fest als Eis.

Es kommt neben chemischen Angriffen zu physikalischen durch Volumenveränderungen

- bei Feuchtigkeitsaufnahme und -Abgabe,
- durch Kristallisationen während Frost- und Salzbildungsphasen.



Tropfenbildung auf hydrophobiertem Wunsiedeler Marmor

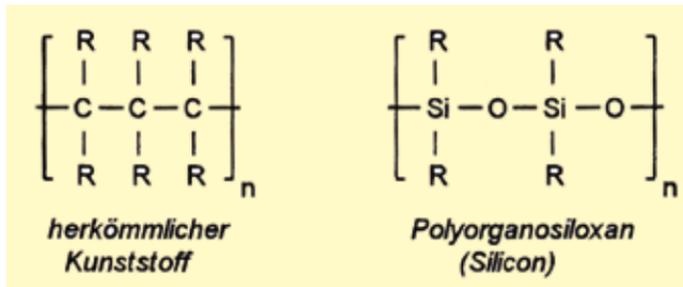
Hydrophobierungsmittel

Die Wasseraufnahme findet im Porensystem der Natursteine statt. Hydrophobieren heißt, einen Naturstein oder Baustoff wasserabweisend auszustatten und damit präventiv einen wirksamen Schutz vor ungewolltem Wassereindringen zu erzeugen.

Moderne Hydrophobierungsmittel bestehen aus synthetischen organischen oder siliziumorga-

nischen Produkten, die meist kombiniert mit Zusätzen oder Mischungen zu Systemen vergütet sind:

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



Grafische Darstellung von organischen und siliziumorganischen Verbindungen [8: S.288]

Untersuchungen

Die Untersuchungen sollen zeigen ob und welchen Einfluss Gesteinsart, Alterung (Verwitterung), Oberflächenbeschaffenheit und hydrophobierende Oberflächenbehandlungen auf eine Pionierbesiedelung durch Mikroorganismen haben.

Weiter welche Mikroorganismen die Pionierbesiedler darstellen und wie sie festgestellt werden können.

Dazu finden vergleichende Untersuchungen an den ausgewählten Natursteinen statt:

- Epprechtstein-Granit (Magmatit)
- Ihrlersteiner Grünsandstein (Sediment)
- Wunsiedeler Marmor (Metamorphit)

Es werden die Vergleichssteine mit jeweils zwei verschiedenen Oberflächenbearbeitungen, glatt und rau, angefertigt.

Das Format der Probekörper beträgt 6 x 6 x 6 Zentimeter.

Um zu untersuchen welchen Einfluss die petrografischen Eigenschaften von verschiedenen Natursteinen (Bindungssysteme und Mineralbestand) auf die Besiedelung hat, werden verschiedene Gesteinsarteneingesetzt und diese jeweils verschieden imprägniert (siliziumorganisch, bzw. polykarbonatisch).

Untersuchungen



Probekörper

Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau soll natürliche Klimaabläufe im Freien weitgehend simulieren, findet aber im Labor statt.

Es werden folgende **Rhythmen/Zyklen** festgelegt:

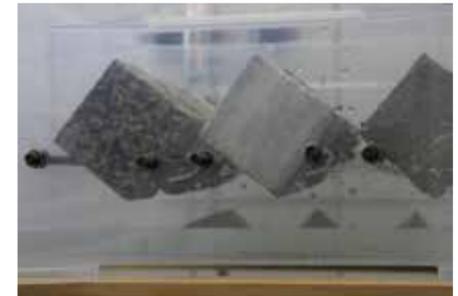
- Lichtveränderungen zwischen Tag (8 Stunden) und Nacht (16 Stunden).
- Feuchteveränderungen zwischen Tag und Nacht.

Einige Parameter werden dabei möglichst **konstant** gehalten:

- Die Raum- und Wassertemperatur bei ca. 20°C,
- die Luftfeuchte bei ca. 40% rel. LF.,

- die relative Feuchte in den Klimawannen nachts bei ca. 75 % rel. LF.

Präparierte Kunststoffwannen ergeben einen abgegrenzten Klimaraum.



In Wanne gelagerte Probekörper

Vergleichende Untersuchungen zu Oberflächenveränderungen

Wie verändern sich bei künstlich gealterten Natursteinen die imprägnierten Oberflächen und was bedeutet dies für die Pionierbesiedelung mit Mikroorganismen?

- Nach künstlicher Alterung durch Veränderung der Oberfläche (**Rauheit**) mittels Sandstrahlen (simulierter Windschliff).
- Nach künstlicher Alterung der **hydrophobierten Oberfläche** durch intensive UV Bestrahlung mit Entstehung von Ozon und hoher thermischer Belastung (simulierte Sonneneinstrahlung).

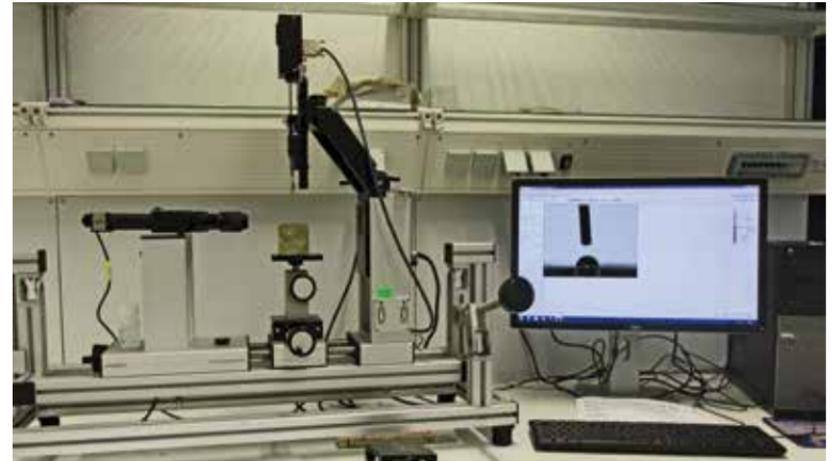


Messung der Oberflächenrauheit mit einem Kayence-Laserscan-Mikroskop

Vergleichende Untersuchungen zum Feuchteverhalten

Es wird überprüft, wie sich Feuchte verhält:

- Auf rauen handwerklichen Oberflächen, ohne (OH) und mit Imprägnierung (H/HPMA).
- Auf glatten geschliffenen, Oberflächen ohne und mit Imprägnierung.



Kontaktwinkelmessung von Wassertropfen mit einem Contact-Angle-System von „dataphysics“

Vergleichende Untersuchungen zum Pionierbefall

Für die Untersuchungen zum Pionierbefall mit Mikroorganismen erfolgt zunächst die Festlegung von geeigneten Diagnoseverfahren:

- PAM-Messungen rückstrahlender Fluoreszenz von phototrophen Mikroorganismen.
- Direktmikroskopie von eingefärbten Klebefilmpräparaten (Stripes).



Puls-Amplituden-modulierte-Fotometrie (PAM-Messung) mit Geräten und Software von WALZ

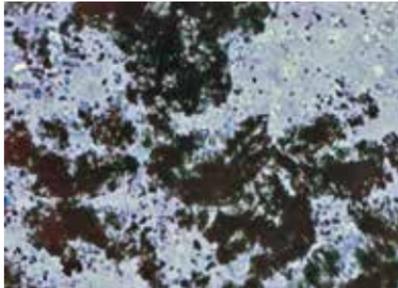
Diagnostik

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, werden verschiedene, differierende Bewertungsskalen in einem System zusammen geführt.

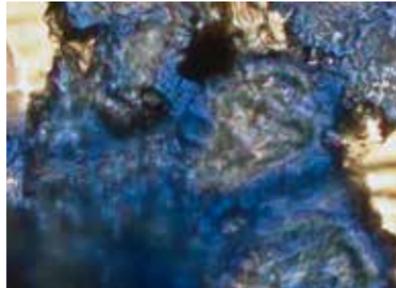
Grad	Visuell	Mikroskop	PAM	Dahlberg-Skala
0	nicht erkennbar	kein Befall	ohne Besiedelung	$\leq 0,010$
1	nicht erkennbar	vereinzelt, kein Befall	sehr schwach besiedelt	0,011 - 0,020
2	erkennbar	gering, kein Befall zu erwarten	schwach besiedelt	0,021 - 0,040
3	bewachsen	stellenweise deutlich; Befall nicht abgeschlossen	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	$\geq 0,161$

Die Untersuchungsmethodiken übergreifendes Bewertungsschema

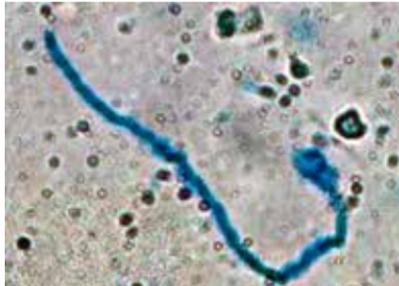
Pionierbesiedelung nach 115 Tagen _____



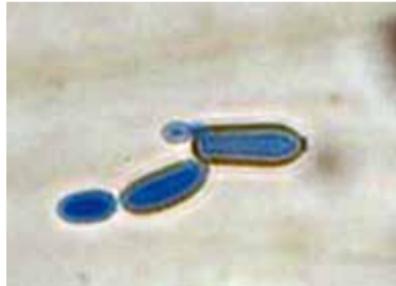
Bakteriencluster [9]



Schwärzepilz der Spezies *Ulocladium* [9]

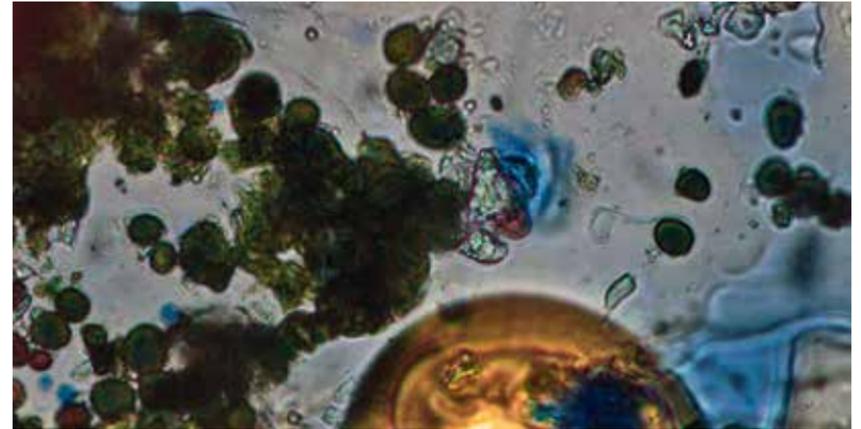


Myzel [9]



Schlauchpilz der Spezies *Cladosporium* [9]

Pionierbesiedelung nach 115 Tagen _____



Schimmelpilz aus der Gattung *Aureobasidium* [9]

Visuelle Diagnostik



Visuelle Diagnostik: Vergleich einer nicht erkennbaren Pionierbesiedelung (links) und einer fortgeschrittener Besiedelung mit Flechten (rechts) auf einem Ihrlersteiner Grünsandstein.

Besiedelung im Feldvergleich

Eine Besiedelung von Oberflächen frei exponierter Objekte ist meist visuell feststellbar.
Die einzelnen Gattungen müssen aber labortechnisch ermittelt werden.



Natursteine im Feldvergleich:

1. Carrara Marmor, Protestantischer Friedhof Augsburg, polymere Hydrophobierung (HPMA), aus dem Jahr 2006.
2. Hinterthisserer Granit, Protestantischer Friedhof Augsburg, siliziumorganische Hydrophobierung (H), aus dem Jahr 2010.
3. Ihrlersteiner Grünsandstein, Protestantischer Friedhof Augsburg, siliziumorganische Hydrophobierung (H), in den Jahren 2004 und 2013.
4. Wunsiedeler Marmor Grabplatte, Wunsiedeler Friedhof, ohne Hydrophobierung (OH).
5. Epprechtstein-Granit, Friedhof Dachau, unbehandelt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Rauheit

- Hydrophobierende Imprägnierungen erhöhen die Rauheit.
 - (Künstliche) Bewitterung kann zu einer Reduzierung der Rauheit führen.
 - Ein Einfluss der Oberflächenbearbeitung kann nicht festgestellt werden.
- Raue Oberflächen können die Besiedelungsneigung erhöhen, da das Substrat schneller auf der Oberfläche anhaften kann.

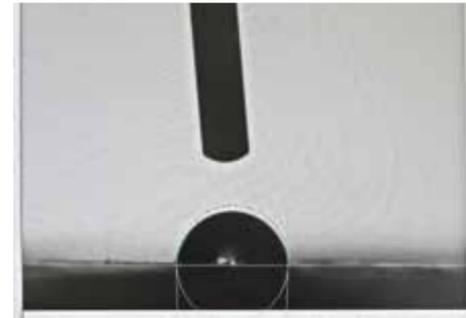
Untersuchung von Besiedelungen

- PAM-Untersuchungen sind zwar zerstörungsfrei, liefern aber nur beschränkte Ergebnisse, da nur die Fluoreszenzquantenausbeute phototropher Mikroorganismen gemessen wird.
- Oberflächenkontaktproben in Verbindung mit mikroskopischer Auswertung sind effizienter und differenzierter.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Hydrophobie

- Hydrophobie wird durch Bewitterung (UV-Licht) und Windschliff abgebaut.
- Die Wahl des Imprägnierungsmittels spielt für die Qualität der Hydrophobierung eine untergeordnete Rolle, wesentlich sind Minerale und Porenraum.
- Imprägnierungen können die Oberflächenrauheit erhöhen. Diese wird durch Verwitterung wieder verändert.
- Ein Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die Hydrophobierung konnte nicht festgestellt werden.



Randwinkelmessung

Zusammenfassung der Ergebnisse

Besiedelung

• Auf den ausgewählten Natursteinen erfolgt im Labor zunächst eine Pionierbesiedelung durch Bakterien und dann durch Schimmelpilze.

• Die Hydrophobierung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Besiedelung von Natursteinen.

• Pionierbesiedler sind Bakterien und Schimmelpilze.

• Bei Natursteinen im Freien mit einem lang andauernden Befall über mehrere Jahre hinweg liegen meist komplexe Siedlungsgemeinschaften vor und einzelne Gattungen sind schwer isolierbar.

Ein direkter Vergleich der zeitlich verschiedenen Besiedelungen oder eine Projektion von einer zur anderen ist nicht möglich.

• Der Einfluss der Oberflächenrauheit konnte nicht bestimmt werden; ist aber wegen des Substratauftrags zu vermuten: raue Oberflächen könnten die Besiedelungsneigung erhöhen.

• Bei gleichen Umweltbedingungen (Feuchte und Temperatur) entscheidet offensichtlich das Nährstoffangebot über die Art und die Reihenfolge der Besiedelung.

• Statistische Auswertungen mit Normalverteilungen lassen sich andernorts nicht durchführen, da es sich um Lebewesen handelt, die „individuell“ reagieren.

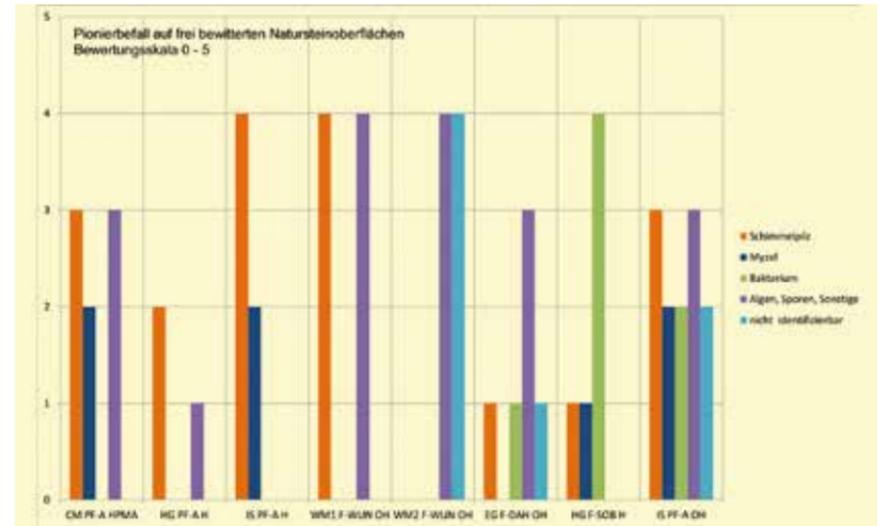
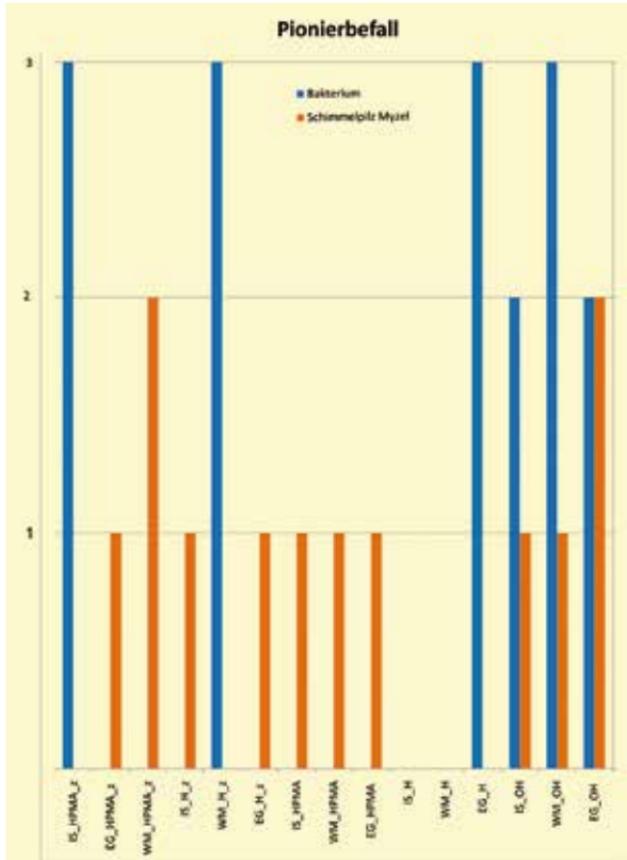


Diagramm der Besiedelung frei bewitterter Natursteine



Zusammenfassung der Ergebnisse

- Wesentlich für die Pionierbesiedelung ist (bei vergleichbarer Oberflächenfeuchte und Temperatur) zunächst das anorganische Nährstoffangebot des Natursteins!
- Bakterien besiedeln zuerst, gefolgt von Schimmelpilzen. Bakterien und Substrat dienen den Schimmelpilzen als organische Nährstoffquellen.

Mikroskopisch nachgewiesener Befall im Laborversuch und Einordnung gemäß neu entwickelter Bewertungsskala.

Literatur- und Bildnachweis

- [1] R. Büchli und P. Raschle. Algen und Pilze an Fassaden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015. 978-3-8167-9274-1.
- [2] O. Fritsche. Mikrobiologie. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2016. 978-3-662-49728-9.
- [3] G. Schlegel. Allgemeine Mikrobiologie. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1976. 3-13-444604-9.
- [4] D. Runge. Mikroorganismen und Baustoffe. Studienanweisung. [Skript]. Wismar: WINGS, 2014. Bd. Semester 1.
- [5] Bundesamt, Umwelt, [Hrsg.]. Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. Dessau-Röblau: Umwelt Bundesamt, 2017. 2363-8311.
- [6] M. Hoppert, S. König, J. Hegermann. [Hrsg.] Geowissenschaften und Denkmalpflege. Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermüller), 2005, ZDGG. 1860-1804.
- [7] F. Müller. Gesteinskunde. Ulm: Ebner Verlag, 1984
- [8] M. Willems W. [Hrsg.]. Lehrbuch der Bauphysik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013. 978-3-8348-1415-9
- [9] P. Ziemer Prüfberichte 020412.1991 und 1996 ; München, 2019.

Wenn nicht anders angegeben handelt es sich bei den Bildern um Aufnahmen und Grafiken des Autors.



Gerhard A. Roth
FACHPLANUNG STEINANSANIERUNG BAUTENSCHUTZ

GERHARD A. ROTH DIPLOM-RESTAURATOR(FH) | MEISTER UND RESTAURATOR IM STEINMETZHANDWERK | M.Sc. BAUTENSCHUTZ
Hochfeldstraße 37 | 86159 Augsburg | Tel. 0821-550350 | Fax: -559070
gerhard.roth@erhalten-in-stein.de | www.erhalten-in-stein.de



© Gerhard Roth, 2019
Layout: Gudrun Wirsieg
Druck: Kontrast-Druckerei, Augsburg



Gerhard A. Roth
FACHPLANUNG STEINSANIERUNG BAUTENSCHUTZ

