



Entwicklung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden anthropogen bedingter biogener Oberflächenveränderungen von Marmorskulpturen am Beispiel von ausgewählten Objekten der Parkanlagen von Schloss Sanssouci und Schloss Rheinsberg
(AZ 32866/01)

01.07.2015 bis 30.06.2018

ABSCHLUSSBERICHT

Wolfram Köhler

Labor Köhler Geschwister-Scholl-Straße 48 14471 Potsdam info@laborkoehler.de

ZUSAMMENFASSUNG

Das DBU-Projekt „Entwicklung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden anthropogen bedingter biogener Oberflächenveränderungen von Marmorskulpturen am Beispiel von ausgewählten Objekten der Parkanlagen von Schloss Sanssouci und Schloss Rheinsberg“ half, ein effektives Monitoringwerkzeug für Marmorskulpturen zu entwickeln.

Auf der Basis des optischen Oberflächentopographiesystems TRACEiT entstand eine Methode, die es möglich macht, sowohl die Oberflächentopographie als auch den Charakter von mikrobiologisch belasteten Marmorskulpturoberflächen zu untersuchen.

Dafür wurde das traditionelle optische Messsystem um Beleuchtungen mittels LED's mit 365 nm und 470 nm und unterschiedliche Wechselfilter erweitert.

Eine neue Steuer- und Auswertungssoftware macht es möglich, mehrere Messvorgänge in einem Messzyklus durchzuführen, ohne die Position des Messkopfes ändern zu müssen. Dadurch können die einzelnen Messergebnisse, 3D-Topographie und Fluoreszenzbilder, pixelgenau übereinandergelegt werden.

Das Messsystem ist besonders für insitu-Untersuchungen geeignet und gestattet es, eine größere Anzahl von Einzelmessungen in relativ kurzer Zeit durchzuführen.

An definierten Laborproben wurden mehrere Ausbaustufen des Messsystems getestet, ehe Reinigungsproben an Marmorgesimsteilen untersucht wurden.

Die Anwendungsuntersuchungen erfolgten an zwei Skulpturen aus dem Schlosspark in Rheinsberg und dem Sockel des Reiterdenkmales von „Friedrich II.“. Dabei konnten sehr unterschiedliche Erhaltungs- und Besiedlungszustände festgestellt werden.

Schlagnvorte: Marmor, Krusten, Mikrobiologie, Fluoreszenz, Oberflächentopographie, Ultraschall, Reinigung, Umweltbelastung

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	II
INHALT	III
1 EINLEITUNG	5
2 PROBLEMSTELLUNG.....	7
2.1 Marmorskulpturen in den Parkanlagen der SPSG.....	7
2.1.1 Marmorskulpturen im Park von Potsdam-Sanssouci.....	7
2.1.2 Marmorskulpturen im Schlosspark in Rheinsberg	12
2.2 Verwitterung von Marmor.....	14
2.3 Umwelt- und Klimabedingungen	17
2.4 Mikrobiologische Schadfaktoren.....	19
2.5 Oberflächenveränderungen.....	21
3 OBERFLÄCHENUNTERSUCHUNGSMETHODE.....	27
3.1 Ausgangssituation.....	27
3.1.1 Untersuchungsmethoden	27
3.1.2 TRACEiT	27
3.2 Physikalisch-, biologische und denkmalpflegerische Probleme	32
3.2.1 Calcit und seine Lumineszenz	32
3.2.2 Chlorophyll und seine Lumineszenz	34
3.2.3 Methodenbesonderheiten.....	35
3.3 Entwicklungsschritte und Problemlösungen	35
3.3.1 Kamera.....	35
3.3.2 Lichtquellen	36
3.3.3 Filter	38
3.3.4 Software.....	42
3.3.5 Rechner.....	43
4 ANWENDUNGSTESTS.....	44
4.1 Laboruntersuchungen	44
4.2 Prüfkörperuntersuchungen.....	48
4.3 Objektuntersuchungen	52
4.3.1 Schlosspark in Rheinsberg	52
4.3.2 Potsdam-Sanssouci	52
4.3.3 Ergebnisdiskussion	72
4.4 Weitere Anwendungsmöglichkeiten.....	74
5 DISKUSSION	75

6	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	76
7	FAZIT.....	77
	LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	78
	DANKSAGUNG.....	83

1 EINLEITUNG

Schon in der Antike waren Marmorskulpturen ein unverzichtbarer Bestandteil von Garten- und Parkanlagen in Griechenland und im Römischen Reich. In der Renaissance erlebte Marmor als Bildhauermaterial in Italien eine erneute Blüte und kam im 17. Jahrhundert auch an die Schlossanlagen der absolutistischen Herrscherhöfe nördlich der Alpen.

In antiken Quellen wird Marmor als ein verwitterungsfestes Baumaterial beschrieben, das für die Verwendung im Außenbereich empfohlen wird.

Aus dem Park von Potsdam-Sanssouci ist eine Episode überliefert, nach der König Friedrich II. während eines Spazierganges einen Gärtner beim Reinigen von Marmorskulpturen beobachtet und ihn befragt, was er denn mache. Die Antwort des Gärtners ist nicht bekannt. Die zwölf Skulpturen an der Großen Fontäne erhielten 1786 ihre ersten hölzernen Wintereinhausungen, die scheinbar in nachfolgenden Zeiten nicht durchgängig verwendet wurden. /1/

1880 gab es erste Berichte über schwere Schäden an Marmorgrabmalen auf Friedhöfen in Edinburgh. Es werden verbogene Grabplatten, Verzuckerungen und extreme Oberflächenverschmutzungen beschrieben. /2/

Auch über die Marmorskulpturen in Potsdam schrieb der spätere Direktor des Hohenzollernmuseums Paul Seidel 1892: „Die Aufstellung im Freien, ohne jeden Schutz, ist den Gruppen natürlicherweise nicht gut bekommen, und die feinausgearbeiteten Details sind schon vielfach beschädigt“.

Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die in der Garnison von Eiche stationierten kaiserlichen Rekruten jährlich zum „Puppenputzen“ mit Wurzelbürste, Seife und Wasser in den benachbarten Schlosspark von Sanssouci abkommandiert, wie mündlich durch den Chauffeur des Kaisers Großkopf überliefert wurde.

Die Verschmutzungen der Figuren waren so stark, dass man 1936, im Vorfeld der Olympiade in Berlin, die Figuren mittels Flusssäure reinigte, was zu erheblichen Materialverlusten an den künstlerisch wertvollen Oberflächen führte.

Die ursprüngliche Tradition der chemikalienfreien Reinigung wurde in den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts in Potsdam wieder aufgenommen und später mittels Reinigungslaserbehandlungen ergänzt.

Die schwarzen Krusten waren im 19. und 20. Jahrhundert durch die extrem saure SO₂-Belastung der Luft und den damit einhergehenden Gipsbildungen in Verbindung mit Ruß und mikrobiologischen Komponenten charakterisiert.

Mit der Abnahme der atmosphärischen SO₂-Konzentration und einer Zunahme der Stickoxidbelastung verändert sich auch der pH-Wert der Niederschläge vom sauren Bereich in Richtung basische Werte.

Die Folgen sind Veränderungen der mikrobiellen Besiedlung der Marmoroberflächen. Säureresistente Formen werden durch Organismen verdrängt, die basische Substrate bevorzugen.

Damit gehen Veränderungen bei der Flechtenbesiedlung einher. Es ist eine symbiotische Lebensgemeinschaft zwischen einem oder mehreren Pilzen (sogenannte Mykobionten) und einem oder mehreren Photosynthese betreibenden Partnern (Grünalgen oder

Cyanobakterien), und ein wesentlicher Bestandteil der Krusten auf Gesteinsoberflächen sind.

Da sich die Wiederbesiedlung gereinigter Skulpturenoberflächen scheinbar beschleunigt, verkürzen sich auch die Reinigungsintervalle und verstärken sich die mit jeder Reinigung verbundenen Materialverluste.

Um diesen Prozess wirksam zu verlangsamen, ist es notwendig, grundlegende Erkenntnisse über die mikrobiologische Besiedlungsdynamik auf Marmoroberflächen zu erlangen und neue Reinigungsstrategien zu erarbeiten.

Voraussetzung dafür ist eine effektive, zerstörungsfreie Monitoringmethode, die es erlaubt, am originalen Objekt Differenzierungen mikrobiologischer Besiedlungen vorzunehmen, deren Lebensaktivitäten zu erfassen und diese in Bezug zu den dreidimensionalen Marmoroberflächenstrukturen sowie deren Veränderungen zu setzen.

Das aktuelle Projekt *„Entwicklung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden anthropogen bedingter biogener Oberflächenveränderungen von Marmorskulpturen am Beispiel von ausgewählten Objekten der Parkanlagen von Schloss Sanssouci und Schloss Rheinsberg“* nutzt dafür eine Kombination verschiedener optischer Methoden und unterschiedlicher Wellenlängen, vom Ultraviolett- bis zum Infrarotbereich.

2 PROBLEMSTELLUNG

2.1 Marmorskulpturen in den Parkanlagen der SPSG

2.1.1 Marmorskulpturen im Park von Potsdam-Sanssouci

1744 wurde der terrassierte Weinberg in Potsdam auf Geheiß Friedrich II. angelegt und ein Jahr später mit dem Schloss Sanssouci bekrönt. Damit einher ging der Erwerb und die Aufstellung von zahlreichen Marmorskulpturen im Park, an den Fassaden der anderen Schlösser und deren Innenausstattung.

Diese Sammlung wurde auch im 19. Jahrhundert fortgeführt und auf nahezu alle Parkbereiche ausgeweitet. So befinden sich inzwischen mehr als 180 Marmorskulpturen, meist aus Carrara Marmor, im Park-Sanssouci. Dazu kommen zahlreiche Kapitelle und Zierelemente, die diese Sammlung abrunden. /2/

Das Reiterstandbild Friedrich II wurde 1865 durch A. Lazzerini und C. Baratta nach Ch. D. Rauch aus Carrara Marmor gearbeitet (SPSG, Skulpt.slg. 706). Es stand ursprünglich unterhalb des Schlosses Sanssouci.



Abbildung 1: Postkarte von 1922

Es wechselte in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts seinen Standort und befindet sich seither auf dem Parterre des Schlosses Große Orangerie.



Abbildung 2: Postkarte von 1934



Abbildung 3: Restaurierungsdokumentation vor Reinigung 1996

Die Restaurierung mit Reinigung erfolgte 1996. /3/



Abbildung 4: Restaurierungsdokumentation nach Reinigung 1996



Abbildung 5: Zustand 2014

Der Park-Sanssouci ist umgeben von stark befahrenen Haupt- und Durchgangstraßen und befindet sich mitten in der Stadt Potsdam, hat also ein typisches, urbanes Umfeld mit entsprechenden Klima- und Umweltbedingungen..

2.1.2 Marmorskulpturen im Schlosspark in Rheinsberg

Im Gegensatz dazu befinden sich die Marmorskulpturen im Schlosspark von Schloss Rheinsberg in einer ländlichen Umgebung und direkter Wassernähe. Die Standortbedingungen können als „Reinluftbedingungen“ bezeichnet werden.

Die Skulpturen wurden 1765/66 von G.A.Cybei in Rom aus Carrara Marmor gearbeitet.



Abbildung 6: „Feuer“ 2017

Die letzte Restaurierung erfolgte 2006.



Abbildung 7: „Winter“ 2017

Die letzte Restaurierung erfolgte 2005.

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgten an beiden Skulpturen Ultraschallmessungen, um deren Erhaltungszustand mit den Potsdamer Parkskulpturen vergleichen zu können.

Die Ultraschallmessungen ergaben 2017 teilweise ungewöhnlich hohe Schallgeschwindigkeiten, für die es keine schlüssige Erklärung gibt.

Konservierungen führen selten zu Schallgeschwindigkeiten über 6000m/s.

Marmore mit extremen Anisotropien können Einzelwerte weit über 7000m/s aufweisen.

Vergleicht man Marmorskulpturen ähnlichen Alters und ähnlicher lokaler Expositionsbedingungen miteinander, so sind Unterschiede zwischen dem urbanen Standort in Potsdam und den ländlich geprägten Standorten in Rheinsberg und Neuhardenberg zu erkennen. Alle drei Standorte sind wassernahe. Die Figuren der Großen Fontäne in Potsdam stehen um das Fontänenbecken. Während sich die Skulpturen in Rheinsberg in der Umgebung von Seen, teilweise direkt in Ufernähe, befinden.

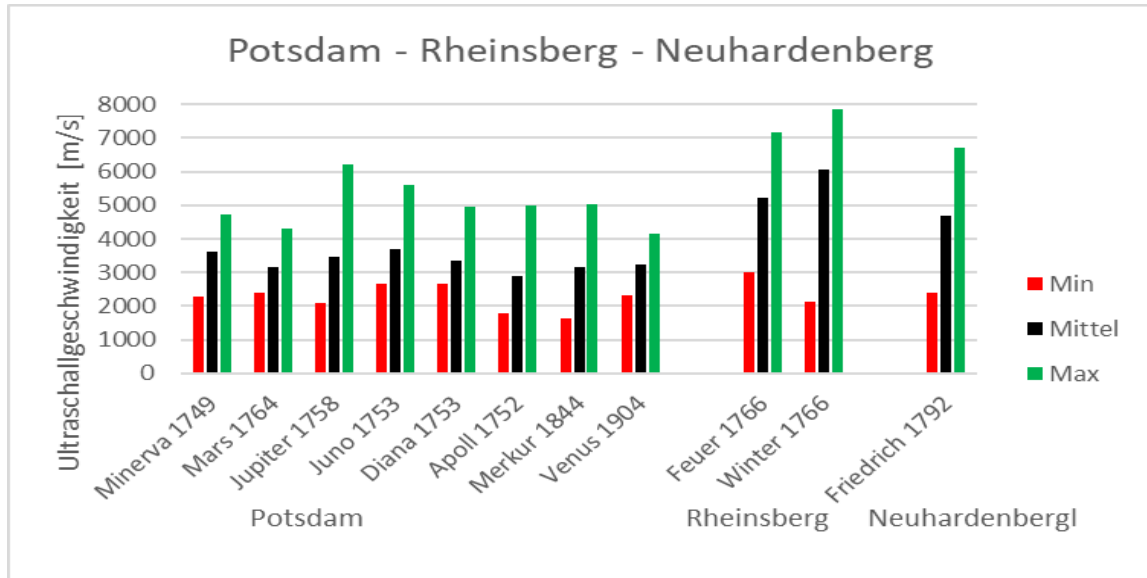


Abbildung 8: Vergleich Rheinsberg-Potsdam-Neuhardenberg

2.2 Verwitterung von Marmor

Marmore sind das Ergebnis metamorpher Gesteinsbildungsprozesse. Während die griechischen Marmore, ebenso wie die deutschen Vorkommen, durch Kontaktmetamorphose im Umfeld begrenzter magmatischer Inklusionen entstanden, sind die italienischen Marmore das Produkt regionalmetamorphoser Prozesse infolge großräumiger tektonischer Senkungen und Hebungen.

Solange die Marmore noch nicht abgebaut werden und sich im Berg befinden, ist das eigentliche Gesteinsgefüge sehr dicht und nahezu porenfrei, während die Lagerstätten selbst von zahlreichen Spannungsrissen und Klüften durchzogen sein können, die ihre Ursachen in zurückliegenden und aktuellen tektonischen Prozessen haben. Die Temperaturen im Berg sind sehr konstant und liegen bei $9 \pm 1^\circ\text{C}$. Während des Abbauvorganges werden die frischen Marmore zunehmend schwankenden Temperaturen ausgesetzt, was, verstärkt durch die extreme thermische Anisotropie der Calcitkristalle, zu ersten Rissbildungen zwischen den Kristallen und damit zum Beginn der thermischen Phase der Marmorverwitterung führt. In diese Spaltsporen dringt nun über mehrere Monate und Jahre Wasser ein und bildet die Voraussetzung der thermisch-hygrischen Verwitterungsphase von Marmor, die am Ende, innerhalb von ein oder zwei Jahrhunderten, zur vollständigen Gefügedestruktion und damit zum Totalverlust wertvoller Marmorkunstwerke führen kann. Da dieser Prozess direkt temperatur- und feuchteabhängig ist, wird er durch steigende Temperaturen und ein zunehmendes Feuchteangebot in der Atmosphäre beschleunigt.

Neben den tiefgehenden und relativ langsam verlaufenden Gefügezerstörungen des Marmors ist besonders seine Oberfläche einer Vielzahl von thermischen, hygri-schen, chemischen und biogenen Einflüssen ausgesetzt, die durch schnelle Änderungen, die oft dem Tages- und dem Jahreslauf folgen, gekennzeichnet sind. So sind selbst in Marmors-teinbrüchen die Wände, die aktuell nicht abgebaut werden, schon nach wenigen Jahren durch massiven Algen- und Flechtenbewuchs schwarz verfärbt.



Abbildung 9: Zerklüftete und verschwärzte Bruchwände in Carrara (Foto: I.Köhler)

Diese Verschwärzungen sind das Ergebnis komplexer Oberflächenveränderungen, die beginnend mit chemischen Einflüssen und Verschmutzungen, in mehreren Phasen zu einer massiven biologischen Besiedlung führen. Da auch diese Prozesse direkt temperatur- und feuchteabhängig sind, steigt ihre Dynamik mit zunehmenden Temperaturen und einem sich erhöhenden Feuchteangebot der Atmosphäre.

Tatsächlich beobachtet man seit dem vergangenen Jahrhundert eine Beschleunigung der Marmorverwitterung, besonders an wertvollen Park- und anderen Denkmalskulpturen. Dies betrifft nicht nur eine sich beschleunigende Gefügedestruktion, sondern auch und besonders Schädigungen der künstlerisch wertvollen und sehr sensiblen Marmoroberflächen.



Abbildung 10: Verschwärzungen und biogener Bewuchs am Friedrich-Denkmal aus Carrara Marmor im Park von Potsdam-Sanssouci (Foto: K.Lange)

Die Ursachen dafür sind in den sich verändernden Umweltbedingungen sowohl des Klimas, der globalen Erderwärmung und damit der Zunahme von Wasserdampf in der Atmosphäre, als auch in den sich verändernden Luftverunreinigungen, z.B. der Abnahme der SO_2 - und der Zunahme der CO_2 -Konzentration, zu suchen.

2.3 Umwelt- und Klimabedingungen

Das Land Brandenburg mit Potsdam und Rheinsberg liegt in der nördlichen Tieflandsbucht mit gemäßigttem mitteleuropäischem Grundklima.

Die Umweltbelastung ist prinzipiell durch die allgemeinen Luftschadstoffveränderungen in Deutschland, speziell in den einzelnen Landesteilen jedoch von regionalen Einflüssen geprägt. Diese werden durch ein unregelmäßiges und flächendeckendes Messnetzsystem kontinuierlich überwacht. /4/

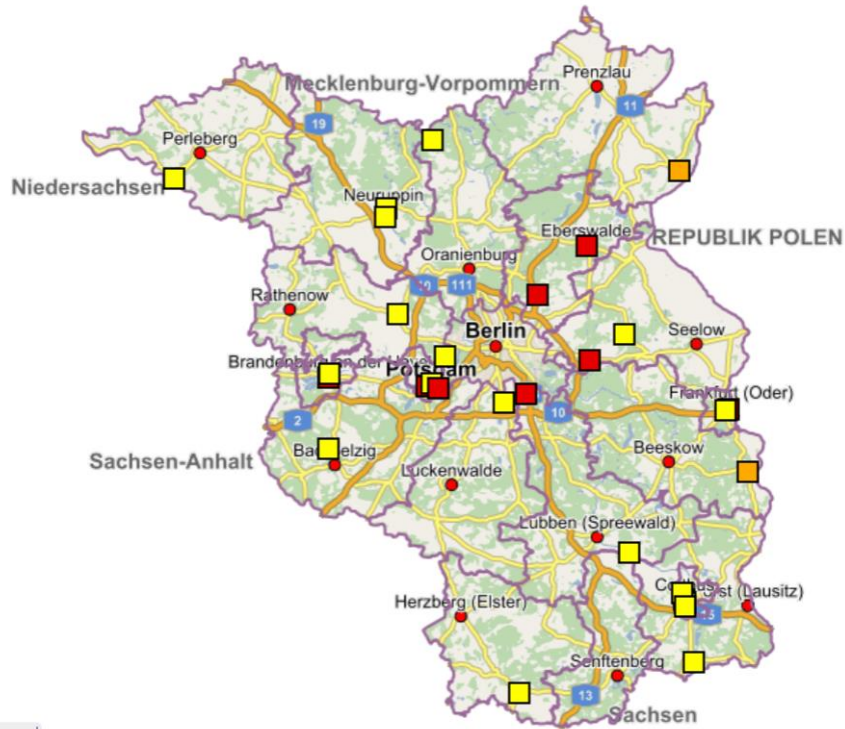


Abbildung 11: Luftgütemessstationen im Land Brandenburg

Generell ist die Luftbelastung durch stark gesunkene SO_2 -Konzentrationen, hohe und stark schwankende Feinstaubbelastungen sowie hohe und schwach fallende Ozon- und NO_2 -Belastungen gekennzeichnet. Letzteres hat seine Ursachen auch in besonders stark gestiegenen Verkehrsaktivitäten und wirkt sich daher vornehmlich in urbanen Standorten aus.

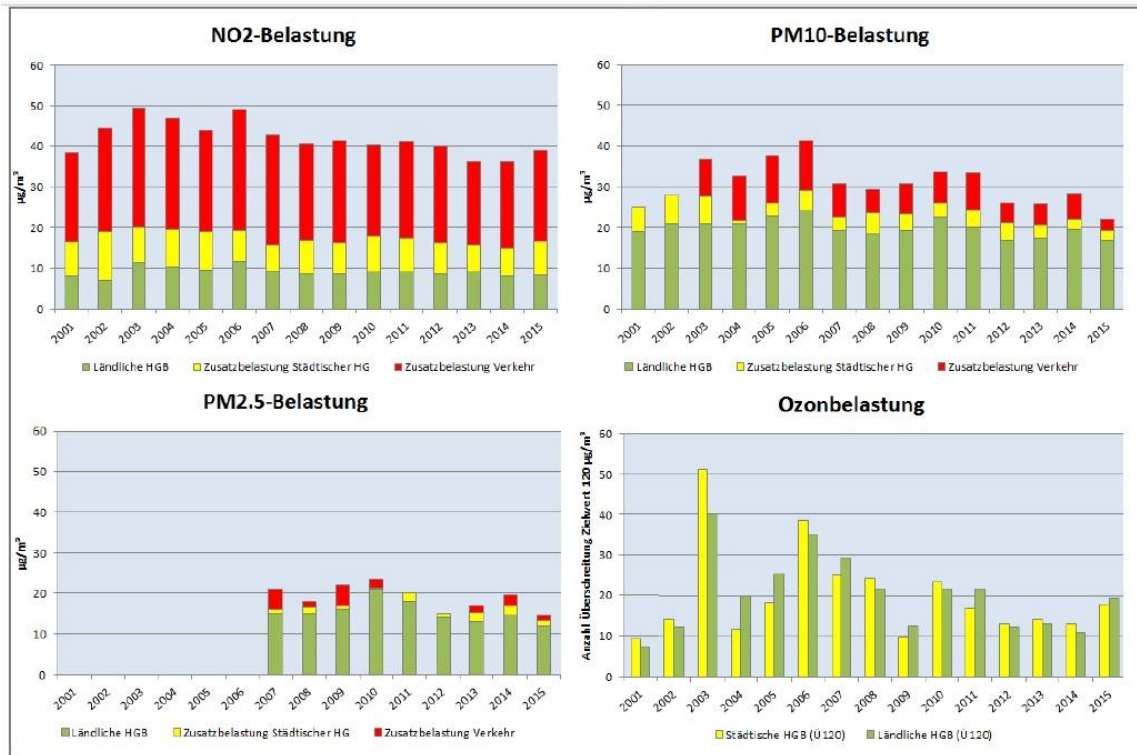


Abbildung 12: ausgewählter Luftverunreinigungen im Land Brandenburg von 2001 bis 2015

Der Unterschied zwischen städtisch und ländlich geprägten Standorten ist erheblich.

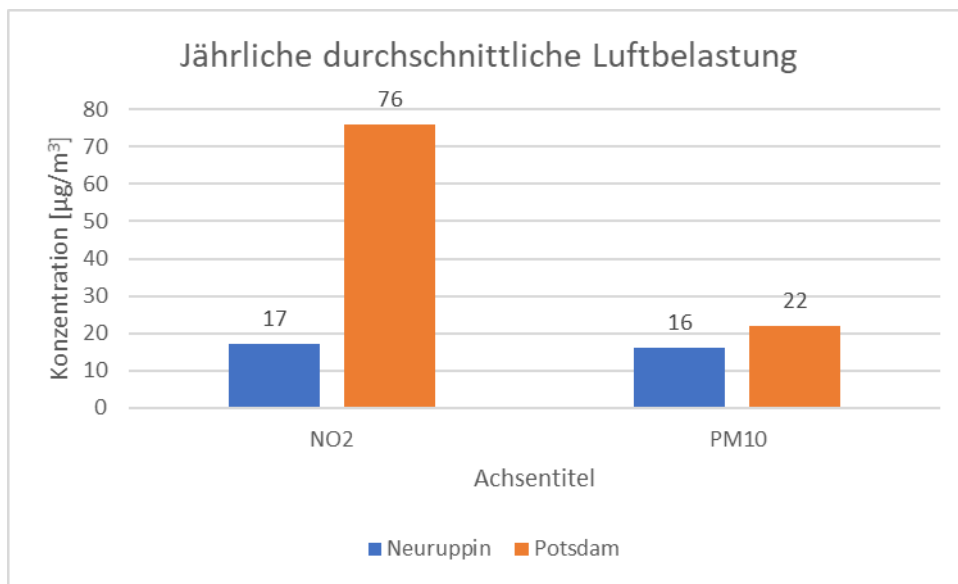


Abbildung 13: Vergleich zwischen Neuruppin und Potsdam

Die Messstation von Neuruppin liegt Rheinsberg am nächsten, während die Station von Potsdam an der Zeppelinstraße in der Nähe des Parkes von Sanssouci aufgestellt ist.

Ein weiteres Problem ist in den stark gestiegen Lufttemperaturen zu sehen. Allein in den letzten 20 Jahren ist auch in Potsdam die Durchschnittstemperatur um wenigsten 1°C von 9°C auf 10°C gestiegen.

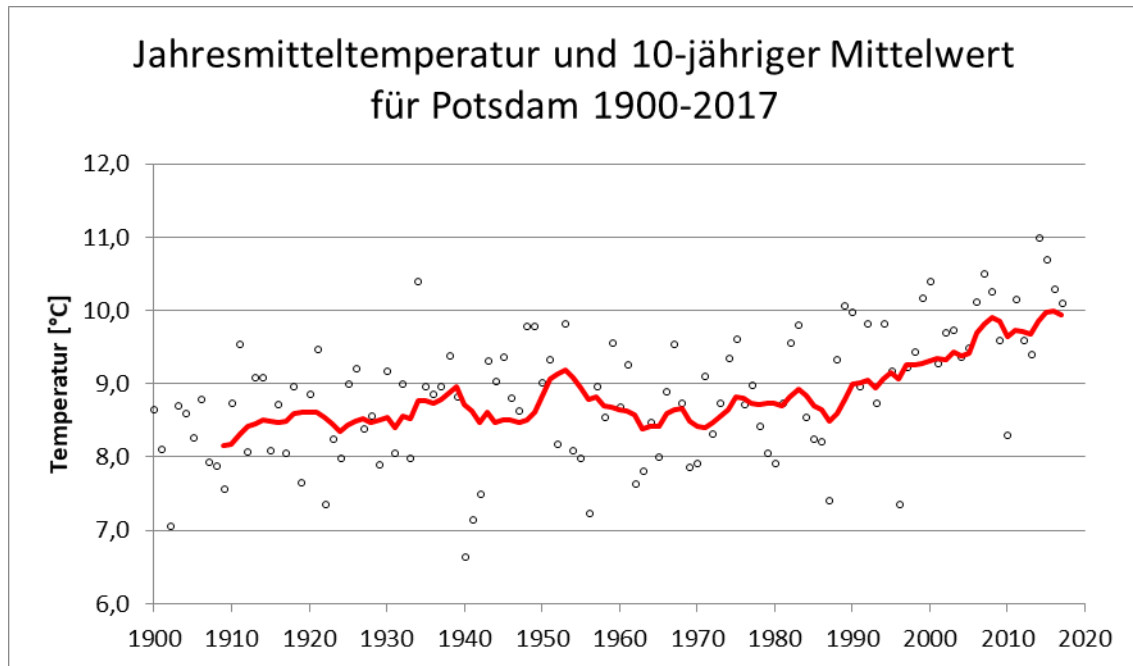


Abbildung 14: Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur in Potsdam von 1900 bis 2017

Dies bedeutet eine Erhöhung des chemischen Reaktionspotentials und eine Verstärkung biologischer Aktivitäten. Beides wird durch die mit dem Temperaturanstieg verbundene Zunahme der absoluten Luftfeuchte in der Atmosphäre verstärkt.

2.4 Mikrobiologische Schadfaktoren

Alle Klima- und Umwelteinflüsse wirken zuerst auf die Oberfläche des Marmors, ehe sie die tieferen Regionen in abgeschwächter und gedämpfter Form erreichen. Dies trifft neben den Temperaturschwankungen auch auf den Einfluss des Wassers zu. Wasser ist die Voraussetzung für alle chemischen und biologischen Prozesse, wie für alle Lösungsprozesse und die Grundlage aller Lebensprozesse von Organismen. /5/

Die Ansiedlung von Mikroorganismen (hier Pilze, Algen, Cyanobakterien) und epilithischen (auf Gestein) und epiphytischen (auf Bäumen und Sträuchern) Flechten wird von den Standort charakterisierenden abiotischen und biotischen Faktoren beeinflusst. Zu den abiotischen Faktoren gehören: Wasser (Regen, Tau, Luftfeuchtigkeit), Licht, Temperatur, Exposition, pH-Wert. Biotische Faktoren sind: Nährstoffanreicherung (Eutrophierung), Beschattung durch Bäume und Sträucher und anthropogene Einflüsse.

Diese Organismen benötigen zur Aufrechterhaltung ihrer Lebensvorgänge Energie. Phototrophe Organismen nutzen elektromagnetische Strahlung (Licht) und chemotrophe Organismen Reduktions-Oxidations-Reaktionen zur Energiegewinnung. Als organotroph werden alle Organismen bezeichnet, die organische Verbindungen als Wasserstoff-Donatoren verwenden. Die Begriffe autotroph und heterotroph beziehen sich auf die Herkunft des Zellkohlenstoffs. Autotrophe Organismen gewinnen zumeist den Zellkohlenstoff durch Fixierung von Kohlendioxid und die Heterotrophen aus organischen Verbindungen. Algen und Cyanobakterien werden als phototrophe bzw. autotrophe und Pilze als chemoorganoheterotroph Organismen eingestuft.

Flechten sind phototrophe Organismen.

Die Wasserstoffionenkonzentration d. h. der pH-Wert spielt für das Wachstum der Organismen eine wesentliche Rolle. Schon geringe Veränderungen der Konzentration können große Auswirkungen haben. Die Ansiedlung der Flechten auf Gestein oder Rinde hängt ganz erheblich vom pH-Wert des Substrats ab. Hinsichtlich der Gesteinsbesiedlung werden silicole und calcicole Flechten unterschieden. Die Ansiedlung wird erheblich vom pH-Wert des Substrats beeinflusst (Substratspezifität). Flechten mit einer weiten pH-Wert-Amplitude weisen daher ein breites Besiedlungsspektrum auf. Demgegenüber stehen die epilithischen (auf Gestein) und epiphytischen (auf Pflanzen) Flechten.

Wasser ist ein lebensnotwendiger Bestandteil für den Metabolismus eines jeden Organismus'. Jedoch sind auch hier Ruhestadien möglich, die ein Überdauern unter ungünstiger Bedingungen wie Trockenheit, Nährstoffmangel oder extremen Temperaturen ermöglichen.

Bisher nicht angesprochen wurde der gesteinszerstörende Aspekt, insbesondere der Pilze, die organische Kohlenstoffverbindungen zur Entwicklung benötigen. Neben den in Gartenlandschaften und Parks eher als „autochton“ anzusehenden organischen Stoffen wie sie z. B. von Linden abgegeben werden, sind hier insbesondere „allochtone“ Anteile aus Stäuben zu berücksichtigen, die als Nahrungsgrundlage für die heterotrophen Mikroorganismen dienen können.

Die Ansiedlung von Cyanobakterien, Algen und Pilzen und den Flechten auf den Marmor wirkt sich auch auf die Desintegration der Marmoroberfläche aus. Biogeophysikalisch-mechanische (Zugspannungen z. B. aufgrund von Schleimbildungen von Algen Cyanobakterien und Flechten) und biogeochemische (Bildung organischer Säuren von den Pilzen) Aktivitäten der Organismen können erheblich zur Degradation der Gesteinsoberfläche beitragen.

Eine Kartierung zahlreicher Trägerbäume, insbesondere Eichen, Kastanien und Linden, im Park Sanssouci, Potsdam, hat die Ansiedlung verschiedenster Krusten-, Blatt- und Strauchflechten erfasst. Ein Vergleich zwischen dem Reiterstandbild Friedrich der Große und den Laubbäumen hat gezeigt, dass drei Blattflechten sowohl auf dem Marmor als auch auf den Bäumen vorkommen, wenn auch die Ansiedlung auf der Reiterstatue nur spärlich ist, gegenüber einem üppigen Auftreten an den Laubgehölzen.

Es kann von einer deutlichen Zäsur zwischen den auf dem Gestein (Epilithen) und den auf den Bäumen (Epiphyten) siedelnden Flechten gesprochen werden, zurückzuführen auf die „sauren“ Borken und den „alkalischen“ Marmor. Die substratspezifischen Ansprüche der hier detektierten epilithischen und epiphytischen Flechten an den pH-Wert spielen eine wesentliche Rolle.

Die Eutrophierung bzw. die Nährstoffanreicherung des Substrats von außen gilt als ein limitierender Faktor bei der Besiedlung. Es ist in diesem Zusammenhang auffällig, dass die meisten der kartierten Flechten eine mäßige/deutliche Eutrophierung bis sehr starke Eutrophierung tolerieren. Das Maß der Eutrophierung bezieht sich auf eine mehr oder weniger starke Anreicherung mit Nährstoffen, d. h. Nährstoffanreicherung infolge einer Belastung mit organischen und anorganischen Stickstoffverbindungen, Phosphorgehalte und/oder andere Mineralgehalte. Seit ca. 15 Jahren lässt sich ein Phänomen beobachten, welches mit Eutrophierung überschrieben werden kann. Zahlreiche vergleichende Kartierungen (Dauerflächenkartierungen) zeigen die Dominanz der nitrophytischen Flechten. Demgegenüber nehmen acidophytische (Arten, die ein saures Substrat bevorzugen) und anitrophytische (Flechten, die nicht eutrophierte Substrate bevorzugen) Arten ab.

2.5 Oberflächenveränderungen

Marmorskulpturen sind besonders in Parkanlagen einem Befall durch Mikroorganismen ausgesetzt. Diese Erscheinung stellt nicht nur ein ästhetisches, sondern auch ein konservatorisches Problem dar. Die Oberfläche verändert ihre physikalischen Eigenschaften, thermische und hygrische Prozesse werden intensiviert (Dornieden et al., 2000). Die angegriffene Oberfläche reagiert empfindlicher auf die notwendigen Reinigungsmaßnahmen als eine intakte Oberfläche.

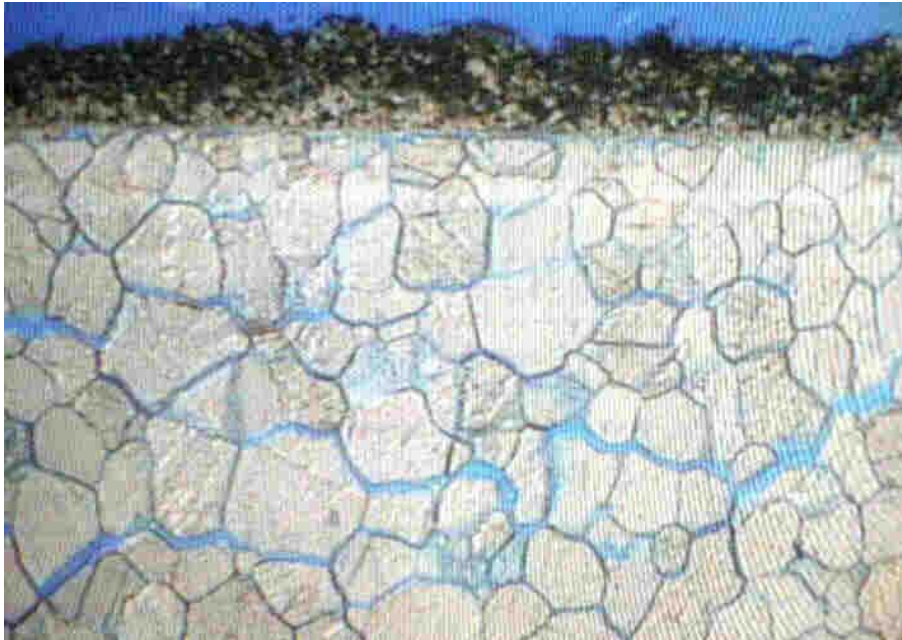


Abbildung 15: Dünnschliff einer Kruste auf einer Marmoroberfläche
Bildbreite etwa 3mm

Im Dünnschliff sieht man die Auflockerung des Calcitgefüges und eine aufsitzende Schmutzkruste. Diese Kruste ist durch ihre Zusammensetzung, ihre mechanischen und thermohygrischen Eigenschaften sowie ihre Oberflächentopographie bestimmt.

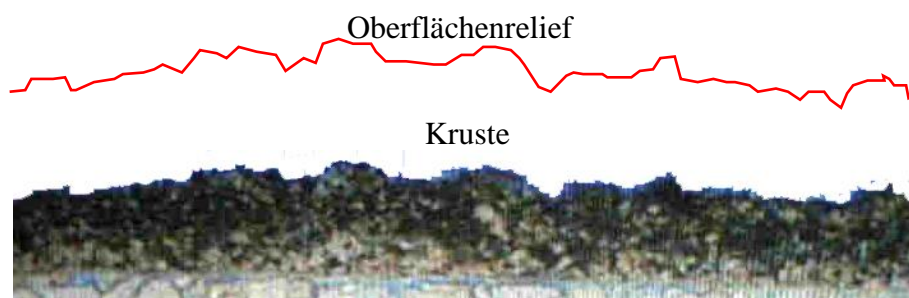


Abbildung 16: Oberflächenrelief und Kruste auf einer Marmoroberfläche

Die mechanischen Eigenschaften lassen sich durch den dynamischen E-Modul beschreiben, der sich durch zerstörungsfreie Messungen der Primär- und der Oberflächenwellengeschwindigkeit bestimmen lässt. /6/

Sekdärwelle, Scherwelle, Transversalwelle, S-Welle, s-Welle [m/s; km/s]

$$(1) \quad v_S = \sqrt{\frac{E}{\rho_R} \frac{1}{2(1 + \mu)}}$$

Oberflächenwellen, Grenzflächenwellen, Rayleighwellen, R-Welle, r-Welle [m/s; km/s]

$$(2) \quad v_R \approx \frac{0,82 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{2\rho_R(1 + \mu)}}$$

$$(3) \quad v_R \approx \frac{0,82 + 1,12\mu}{1 + \mu} v_S$$

$$(4) \quad v_R \approx 0,992 v_S$$

Dynamischer E-Modul [kN/mm²]

$$(5) \quad E = v_P^2 \rho_R \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}$$

Poissonzahl [-] 0,0...0,5

$$(6) \quad \mu = \frac{v_P^2 - 2v_S^2}{2(v_P^2 - v_S^2)}$$

Die Messungen erfolgten durch das parallele Aufsetzen von breitbandigen Schallwandlern auf die Oberfläche. Der Abstand der trocken angekoppelten Wandlerspitzen betrug 45mm.



Abbildung 17: Oberflächenultraschallmessung auf der Kruste einer Marmoroberfläche

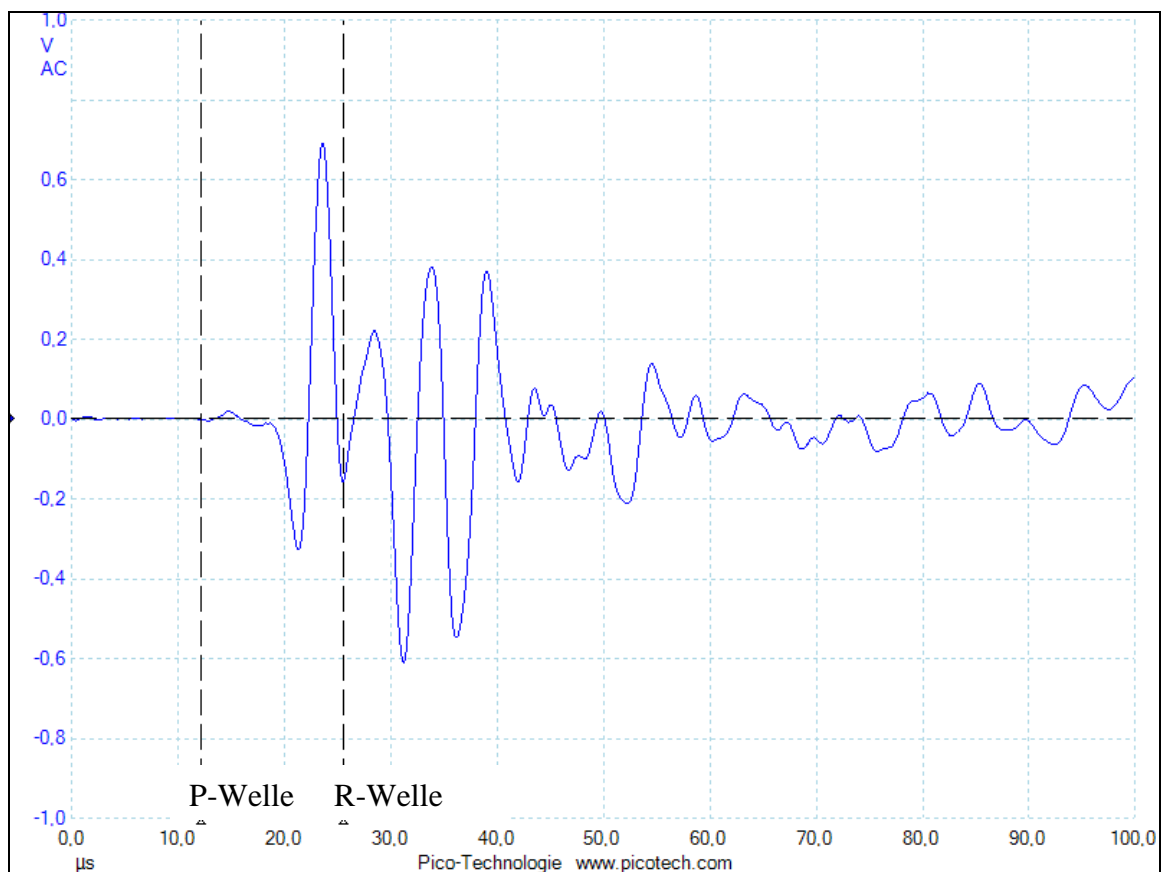


Abbildung 18: Wellenform mit P- und R-Welle in einer Marmorkruste

Die Untersuchungen erfolgten an drei Probekörpern aus unterschiedlichen Marmoren. Die Profile 1 und 2 waren aus mittelkristallinem Schlesischem Marmor, während das Profil 3 aus feinkörnigem Carrara Marmor bestand.



Abbildung 19: Marmorgesimsprofil 1



Abbildung 20: Marmorgesimsprofil 2

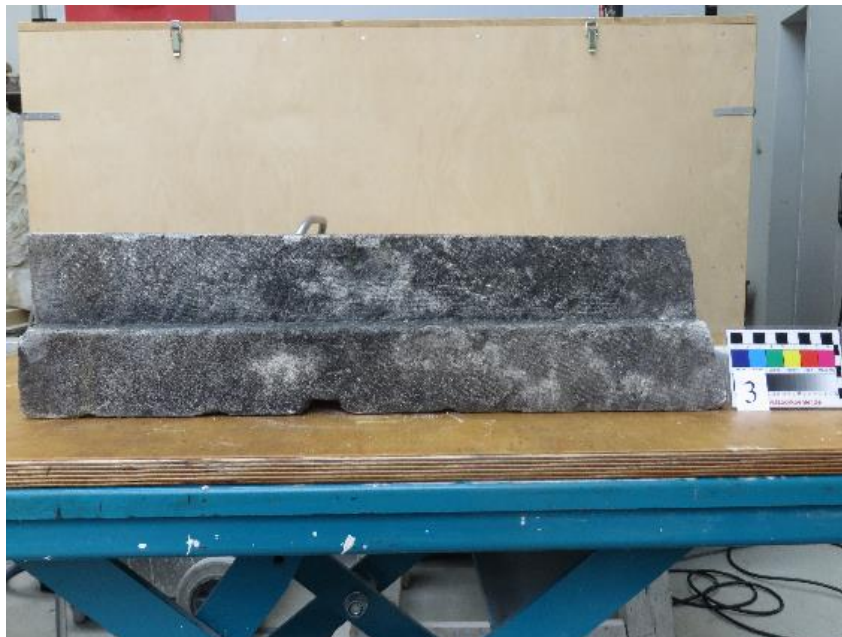


Abbildung 21: Marmorgesimsprofil 3

Parallel dazu wurden die Rautiefen der Oberfläche mit dem TRACEiT, einem optischen Oberflächentopographiemesssystem, gemessen.

Der Vergleich der P-Wellengeschwindigkeit zeigte besonders beim Probekörper 1 erhebliche Rauheitsunterschiede und Streuungen der Geschwindigkeiten.

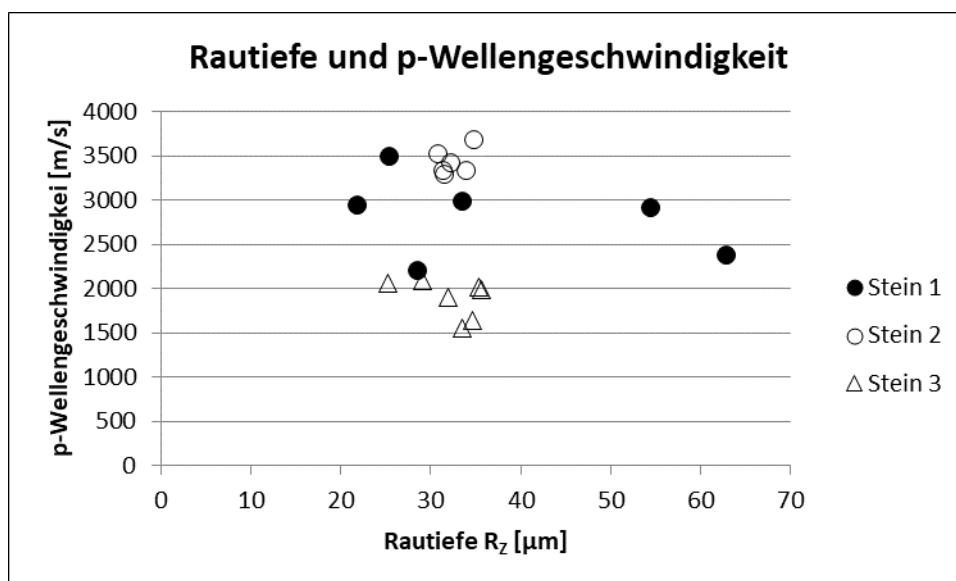


Abbildung 22: P-Wellengeschwindigkeit und Rautiefe

Vergleicht man die Oberflächenwellengeschwindigkeiten sind die Streuungen weniger stark ausgeprägt.

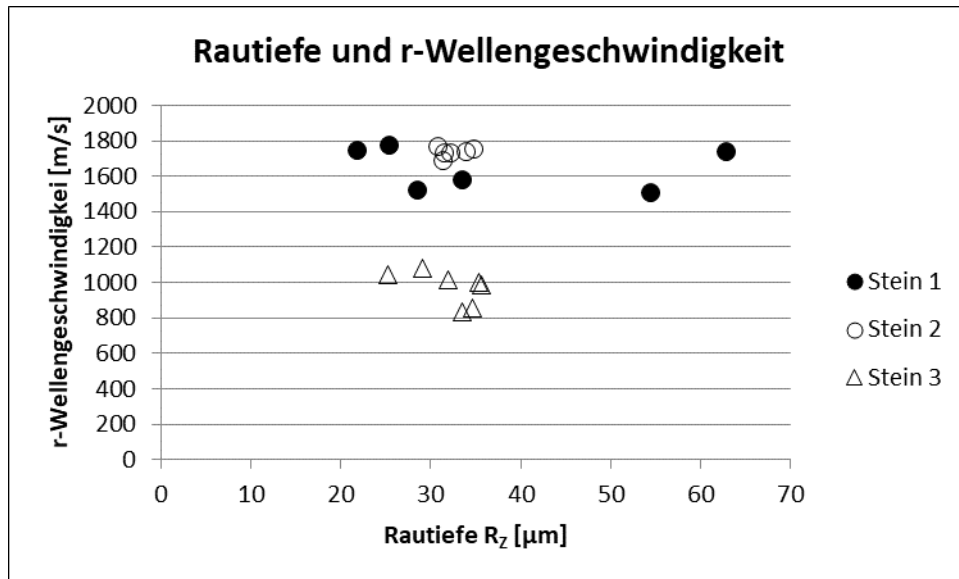


Abbildung 23: R-Wellengeschwindigkeit und Rautiefe

Berechnet man daraus den dynamischen E-Modul der Krusten mit einer angenommenen Rohdichte von $2,7 \text{ g/m}^3$, so ergeben sich recht eindeutige Ergebnisse. Die Kruste auf dem Carrara Marmor-Profilteil hat einen deutlich niedrigeren dynamischen E-Modul als die Krusten auf den Schlesischen Marmoren.

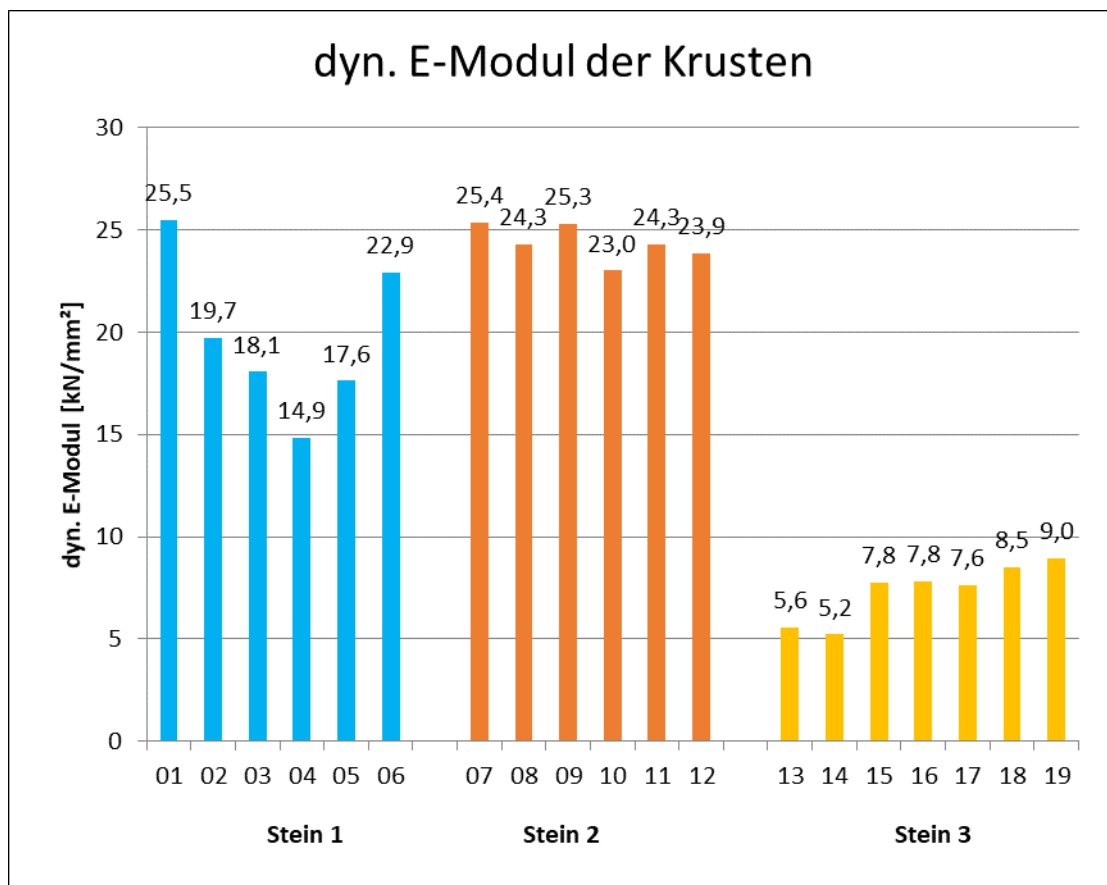


Abbildung 24: Dynamische E-Modul der Krusten

3 OBERFLÄCHENUNTERSUCHUNGSMETHODE

3.1 Ausgangssituation

3.1.1 Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchung von Materialoberflächen stehen unterschiedliche Methoden zu Verfügung, die entweder im Labor oder in situ einsetzbar sind.

Mikroskope benötigen meist Laborbedingungen, aber Scanningmikroskope können dreidimensionale Bilder liefern oder als Fluoreszenzmikroskope helfen, mikrobiologische Präparate zu untersuchen.

Mit verschiedenen Fluorometern ist es möglich, unterschiedliche mikrobiologische Effekte in situ in Flüssigkeiten oder auf Pflanzen und z.B. auf Gesteinsoberflächen zu analysieren.

Rauheitsmessgeräte kann man dafür verwenden, Oberflächentopographien im Labor und in situ zu vermessen und dreidimensional darzustellen.

Für die in situ-Untersuchung von mikrobiologisch dominierten Gesteinskrusten müssen diese Methoden parallel und möglichst in einem Arbeitsschritt angewandt werden. Dies soll mit der Modifizierung und Weiterentwicklung des TRACEiT-Messsystems erreicht werden. /7/

3.1.2 TRACEiT

Das TRACEiT®-System wurde ursprünglich für die Vermessung von Landschaftstopographien entwickelt.

Das verwendete TRACEiT®-System berechnet mit Hilfe der „shape from shading“-Technologie aus den Schattenwürfen dreier Schräglichtaufnahmen der Objektoberfläche die Oberflächentopographie einer 5mm x 5mm großen Fläche mit einer Ortsauflösung von wenigstens 10µm (optional 3µm) und einer Höhenauflösung von 1,5µm.

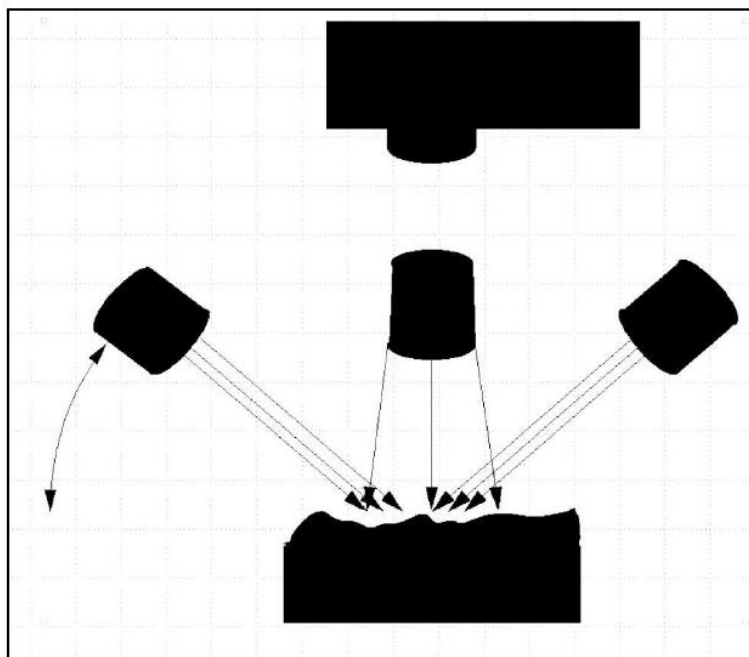


Abbildung 25: Messprinzip (INNOWEP GmbH)

Das Messsystem besteht aus einem Notebook und einem Messkopf, der an diesem mit einem USB-Kabel angeschlossen ist. Das System kann mehrere Stunden netzunabhängig betrieben werden.

Die Messung ist absolut zerstörungsfrei. Der Messkopf wird auf die zu untersuchende Oberfläche für etwa 30 Sekunden aufgesetzt.



Abbildung 26: Messung der Rauheit einer Marmoroberfläche durch Aufsetzen des Messkopfes (Foto: Irene Köhler)

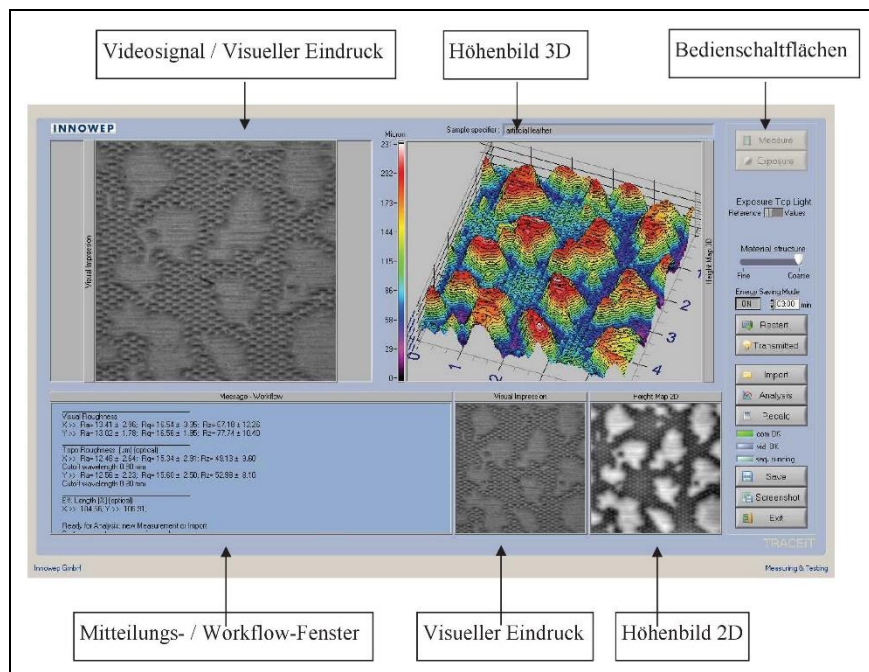


Abbildung 27: Messfenster der TRACETi®-Software (INNOWEP GmbH)

In der Regel beruht die Auswertung auf einem Datensatz von 500x500 Messpunkten, der optional auf 1000x1000 oder 1536x1536 Messpunkte erhöht werden kann.

Für eine statistische Absicherung der Ergebnisse sind mindestens fünf Einzelmessungen empfehlenswert. Bei der praktischen Anwendung dieser Messmethode zeigte sich, dass es sinnvoll ist, die Daten problemorientiert leicht modifiziert auszuwerten.

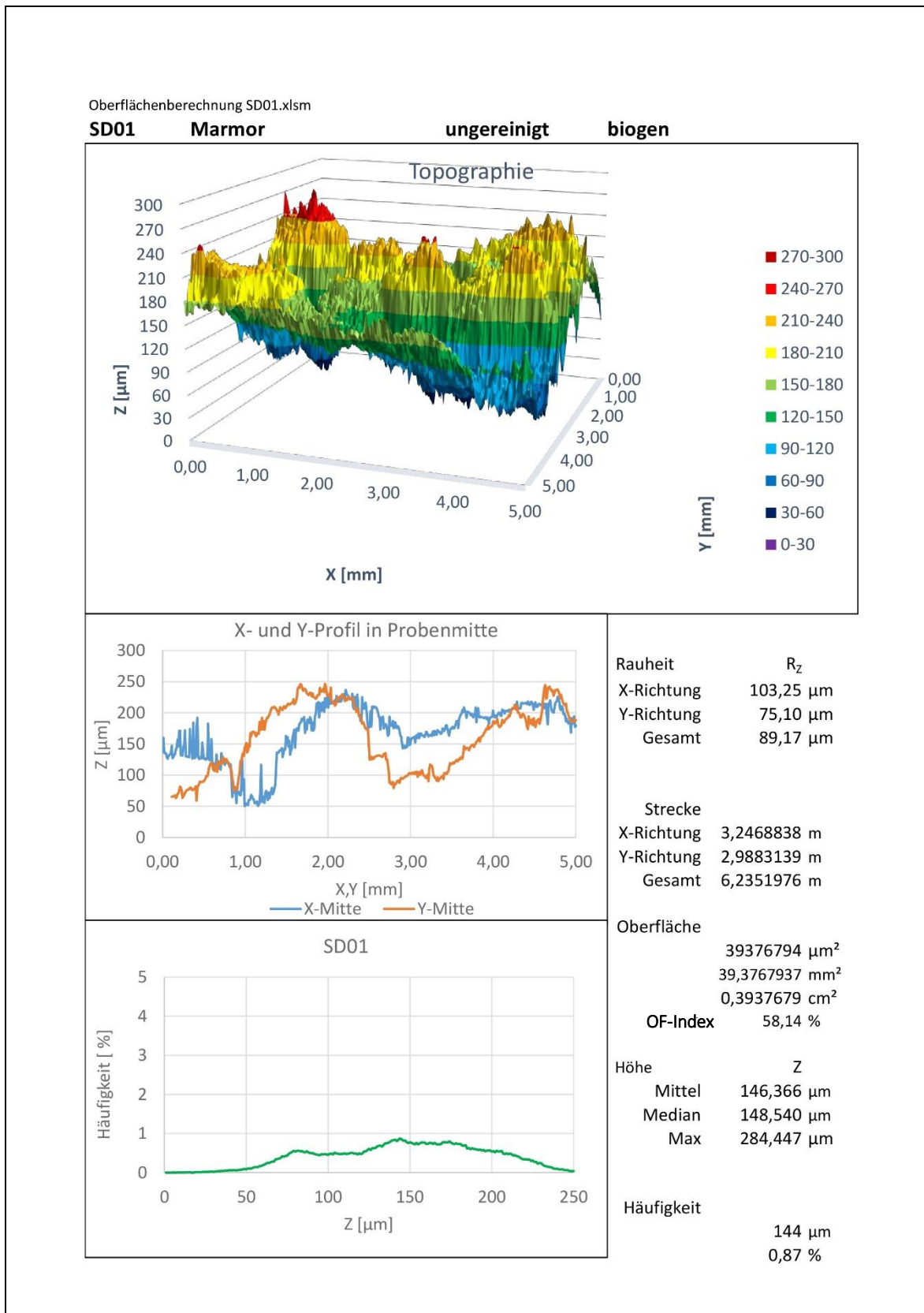


Abbildung 28: Ergebnisse einer Oberflächenmessung

Es können unterschiedliche Messgrößen berechnet und als Diagramme dargestellt werden.

- Topographiediagramm

Das 3D-Oberflächendiagramm beruht auf einem Datensatz, der durch Mittelwertbildung auf 250x250 Messpunkte reduziert wurde. Damit ist eine Glättung der Topographie verbunden. Die Z-Achse kann individuell skaliert werden.

- X- und Y-Profil in Probenmitte

In dieser Grafik sind die Linienprofile in X- und Y-Richtung in Probenmitte exemplarisch dargestellt.

- Häufigkeitsdiagramm

Diese Darstellung ermöglicht den Vergleich der Grob- und Feinstruktur unterschiedlicher Materialien und deren Oberfläche.

- Rauheit

Die Rauheit R_z berechnet sich angelehnt an die Vorschriften der DIN EN ISO 4287 aus der gemittelten Differenz von Z_{\max} und Z_{\min} von fünf aufeinanderfolgenden und gleichlangen Messstrecken.

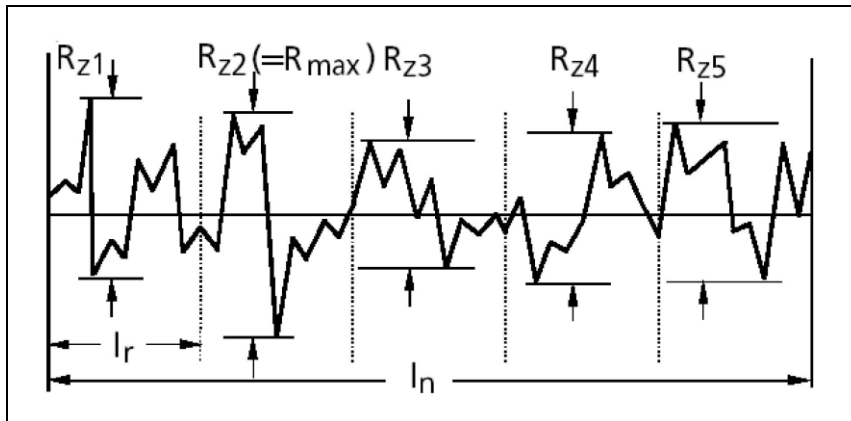


Abbildung 29: Definition von R_z

$$(7) \quad R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5})$$

In diesem Fall beträgt eine Messstrecke l_r 1mm. Es wird getrennt in X- und in Y-Richtung gemessen. Dieser Messwert findet, wie auch die anderen in der o.g. DIN beschriebenen Werte, bevorzugt in der metallverarbeitenden Industrie und der entsprechenden Forschung Verwendung. Für die Baustoffforschung hat R_z nach ersten Erfahrungen nur untergeordnete Bedeutung und weicht oft von visuellen und haptischen Befunden ab.

- Strecke

Die Strecke dient als Maß für die Grobstruktur der Oberfläche und ihre Anisotropie.

- Oberfläche

Zur Berechnung der Oberfläche wird diese in kleine Rechtecke geteilt, die summiert werden.

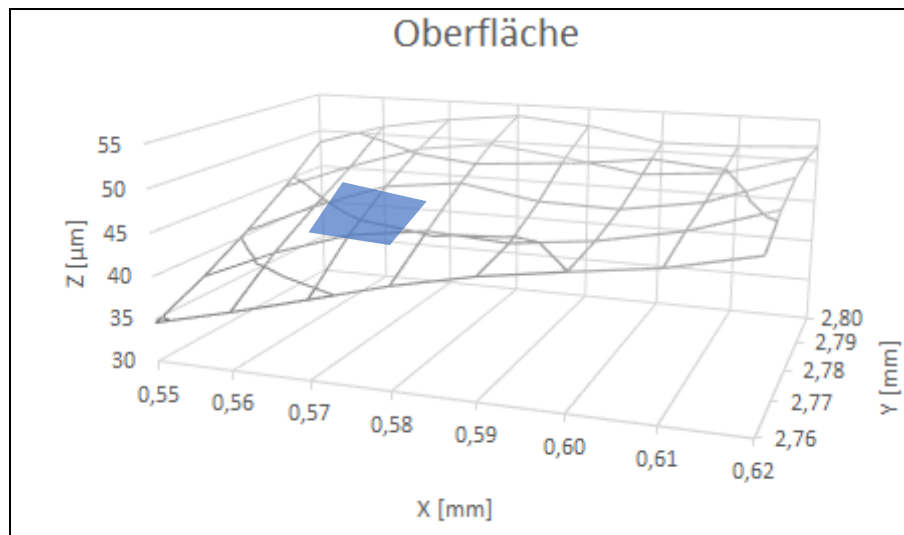


Abbildung 30: Zerlegung der Oberfläche in Rechtecke

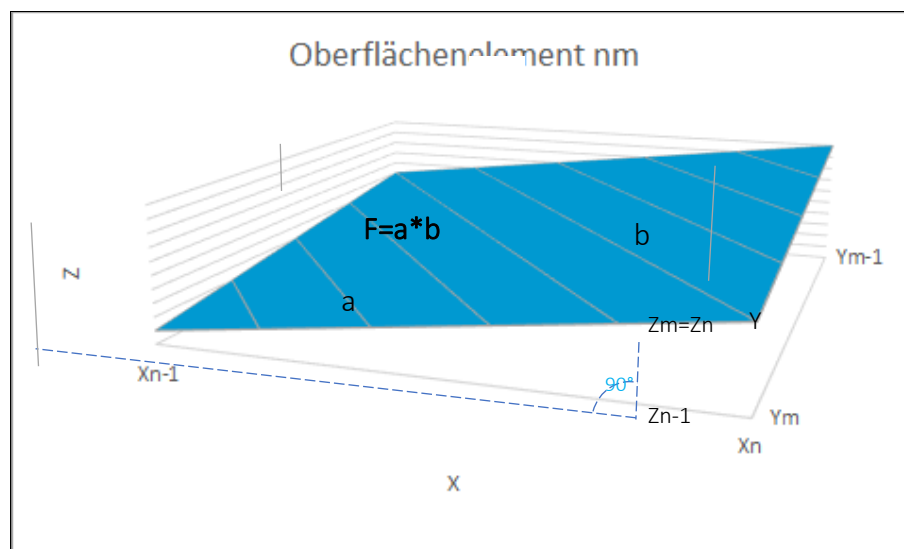


Abbildung 31: Einzelnes Oberflächenelement

Je feiner das Modell wird, desto größer wird die absolute Oberfläche.

- Höhe

Die Angabe der absoluten Höhe der Z-Werte erfolgt in μm und gibt neben den Mittelwert und den Median auch das Maximum an. Der Maximalwert korreliert recht gut mit der haptischen Wahrnehmung des Menschen von der ertasteten Oberfläche.

- Häufigkeit

Dieser Wert zeigt die Lage und relative Größe des Maximums der Häufigkeitsverteilung aller Z-Werte.

Klassische Anwendungen sind:

Zustandsuntersuchung

- Materialdifferenzierung
- Schichtdickenmessungen
- Rissuntersuchung

Maßnahmenkontrolle

- Reinigung
- Oberflächenbeschichtung

Langzeitkontrolle

3.2 Physikalisch-, biologische und denkmalpflegerische Probleme

3.2.1 Calcit und seine Lumineszenz

Calcitkristalle sind der dominante Matrixbestandteil von Marmor. Carrara Marmor besteht zu 99,9% aus diesem Mineral.

Es zeichnet sich durch mehrere optische Besonderheiten aus. Neben seiner Transparenz und seiner Doppelbrechungseigenschaft zeigt es eine orangerote Lumineszenz. /8/

Die Photolumineszenz ist wohl die bekannteste der Lumineszenzarten, die durch die Energie der Photonen des Lichtes (häufig der des Ultra-Violetten-Lichtes) verursacht wird. Man unterscheidet zwei Formen der Photolumineszenz nach der Langlebigkeit der Lumineszenzrückstrahlung: Erfolgt eine sofortige Abstrahlung der absorbierten Energie, dann spricht man von Fluoreszenz.

Bei Kristallen wird dieser Effekt durch Verunreinigungen mit Spurenelementen, die in das Kristallgitter eingebaut sind, hervorgerufen. /9/

Bei Marmor können das folgende Elemente und Wellenlängen in nm sein:

Mn – Mangan:	600-601; 610; 618
Eu – Europium:	575; 591; 592; 618-619; 650; 696; 709-710, 817;
Ce – Cerium:	355;
Pb – Blei:	312
Dy – Dyposium:	483; 577
Tb – Terbium:	544-545
Sm Samarium:	614-615; 626
Nd – Neodym:	817; 889

So führt Mangan bei Carrara Marmor zu einer Fluoreszenz bei 618nm, während Cerium zu einer Fluoreszenz zwischen 350...380nm führt. Die Fluoreszenzlinien sind teilweise sehr breit, so dass sie andere Effekte überdecken können.

Reference: Gaft, Reisfeld & Panczer (2005): Luminescence spectroscopy of Minerals and Materials, Springer, Berlin Heidelberg, 356 p.

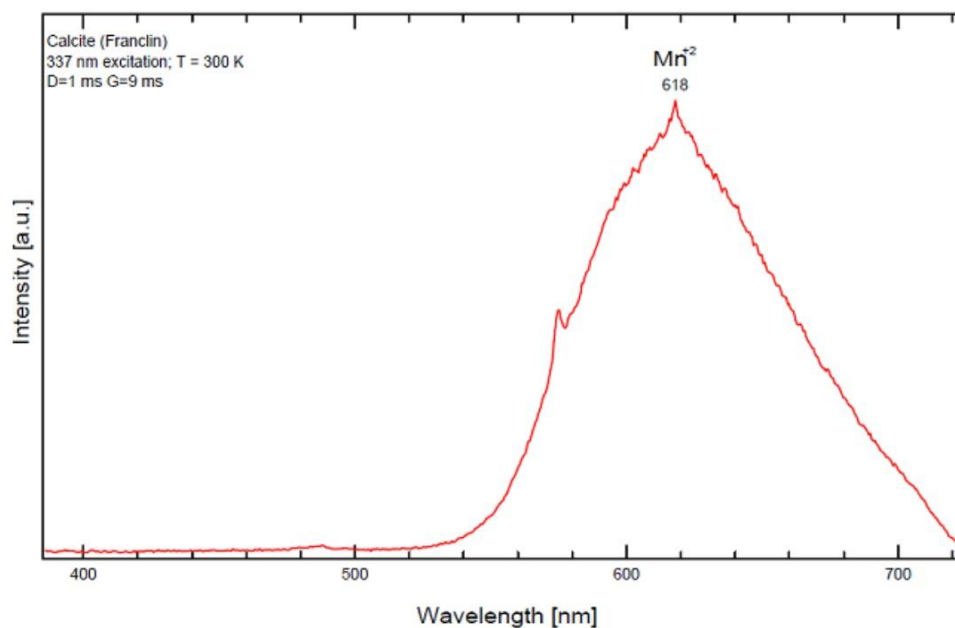


Abbildung 32: Lumineszenz von Calcit bei 618 nm

Reference: Gaft, Reisfeld & Panczer (2005): Luminescence spectroscopy of Minerals and Materials, Springer, Berlin Heidelberg, 356 p.

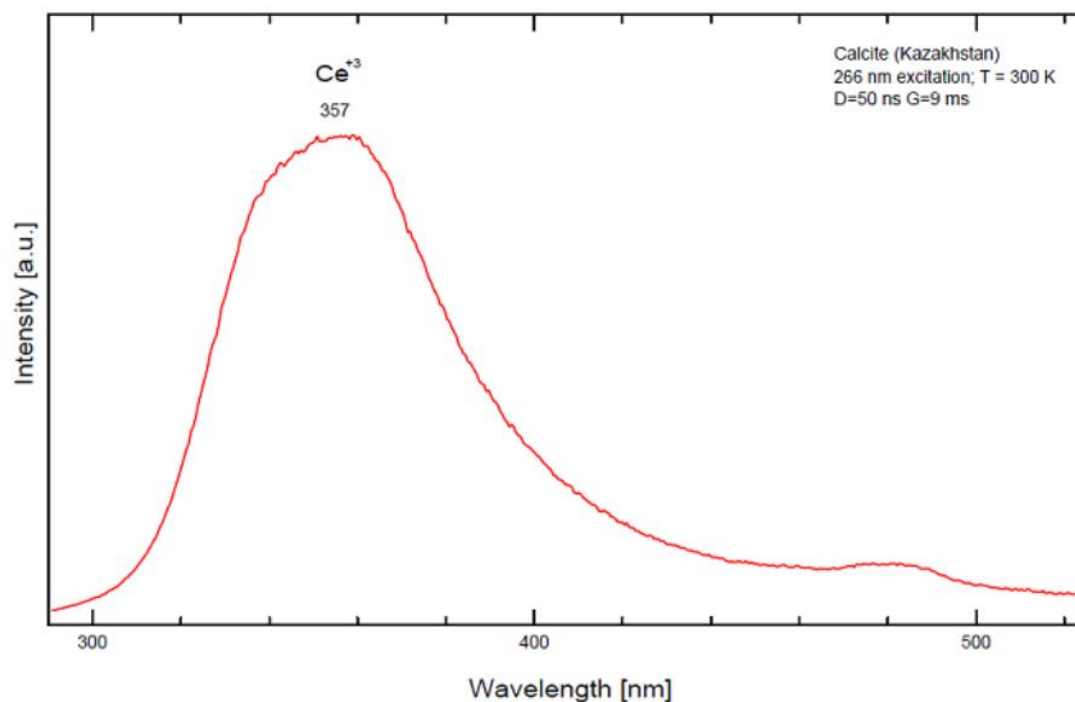


Abbildung 32: Lumineszenz von Calcit bei 357 nm

Simon & Snelhage (1994) haben eine dunkelrote Lumineszenz in einem Carrara Marmor aus Potsdam Sanssouci nachgewiesen (Abbildung 33:). /10/

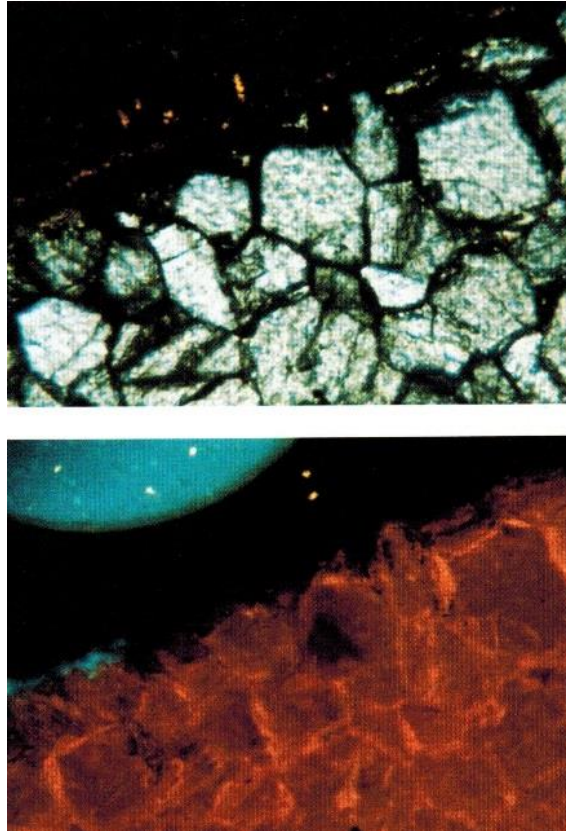


Abbildung 33: Lumineszenz von Calciten im Carrara Marmor. Simon & Sneathlage 1994.

Damit ist bei der Untersuchung von Krusten auf Marmor mit entsprechenden Fluoreszenzen zu rechnen.

3.2.2 Chlorophyll und seine Lumineszenz

Flechten sind ein wesentlicher Bestandteil der Krusten auf Gesteinen. Als Flechte (Lichen) bezeichnet man eine symbiotische Lebensgemeinschaft zwischen einem oder mehreren Pilzen und Photosynthese treibenden Grünalgen oder Cyanobakterien (früher Blaualgen). Sie benötigen dafür Chlorophyll, einen natürlichen Pflanzenfarbstoff. /8/

In Grünalgen und Cyanobakterien findet man Chlorophyll A und B, in Grünalgen nur Chlorophyll B und in Bakterien verschiedene Bakterienchlorophylle.

Möchte man den Charakter von Flechten näher untersuchen, ist das Verhältnis von Grünalgen, Cyanobakterien und Pilzen wichtig. Somit kommt der Messung der Anteile von Chlorophyll a und Chlorophyll B eine wesentliche Bedeutung zu.

Alle Chlorophylle absorbieren Licht im Ultraviolett- und Blaubereich und emittieren dieses in charakteristischen Wellenlängen wieder. Diese Biolumineszenz findet man meist im Rot- und Infrarotbereich des Lichtspektrums.

Der Bereich des sichtbaren Lichtes beginnt bei 380 nm im Blaubereich und endet bei 780 nm im Rotbereich.

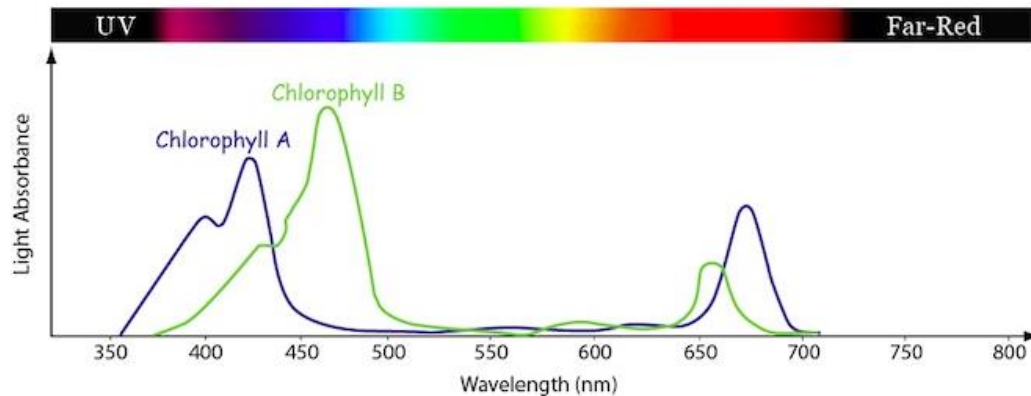


Abbildung 34: Lumineszenz von Chlorophyll A und B über 630 nm

Möchte man beide Chlorophylle voneinander unterscheiden, muss man sie getrennt und charakteristisch anregen. Da die Anregungswellenlängen des Chlorophyll a niedriger als die des Chlorophyll b sind, sollte man Anregungswellenlängen wählen, auf die nur eines der beiden Chlorophylle anspricht.

Für Chlorophyll a sind dies Wellenlängen unter 370nm, also im nahen UV-Bereich, und für Chlorophyll b über 460nm, also im Blaubereich des Spektrums.

Die Fluoreszenzwellenlängen beider Chlorophylle liegen über 630nm. Befinden sich diese Chlorophylle in Flechten auf Marmor, ist es notwendig, die Biolumineszenz von der dicht danebenliegenden Calcitfluoreszenz zu trennen, will man Störungen vermeiden.

Dieses Problem tritt bei einigen, nicht allen, Marmorvarietäten auf. Auch andere Gesteine können davon betroffen sein, fluoreszieren dann aber bei anderen Wellenlängen.

Anmerkung: die Unterscheidung zwischen Grünalgen und Cyanobakterien war zu keinem Zeitpunkt Ziel der Untersuchungen und im Hinblick auf die eigentliche Problematik auch nicht erforderlich!

3.2.3 Methodenbesonderheiten

Der angestrebte Einsatz eines weiterentwickelten Untersuchungssystems in situ an Denkmälern, bedeutet, dass einige Bedingungen erfüllt sein müssen, die bei Messungen unter Labor- oder Werkstattbedingungen keine Rolle spielen.

Dies ist in erster Linie die absolute Zerstörungsfreiheit der Methode, um untersuchungsbedingte Materialverluste der Originalsubstanz zu vermeiden.

Die Bedingung, dass die Methode in situ auch unter komplizierten örtlichen Umständen einsetzbar sein soll, bedeutet eine Minimierung des Gewichtes und der Abmessung des Gesamtsystems.

Darüber hinaus sollten Messungen ohne 220V-Anschluss über einen Zeitraum von wenigstens zwei bis drei Stunden möglich sein.

Da es notwendig ist, mehrere Messschritte hintereinander durchzuführen, ohne den Messkopf zu bewegen, muss eine entsprechende Messstrategie entwickelt werden, damit die gewonnenen Einzelergebnisse mit gleichen Ortskoordinaten genau übereinandergelegt werden können.

3.3 Entwicklungsschritte und Problemlösungen

3.3.1 Kamera

Das Messsystem verwendet eine kleine USB-Kamera.



Abbildung 35: USB-Kamera

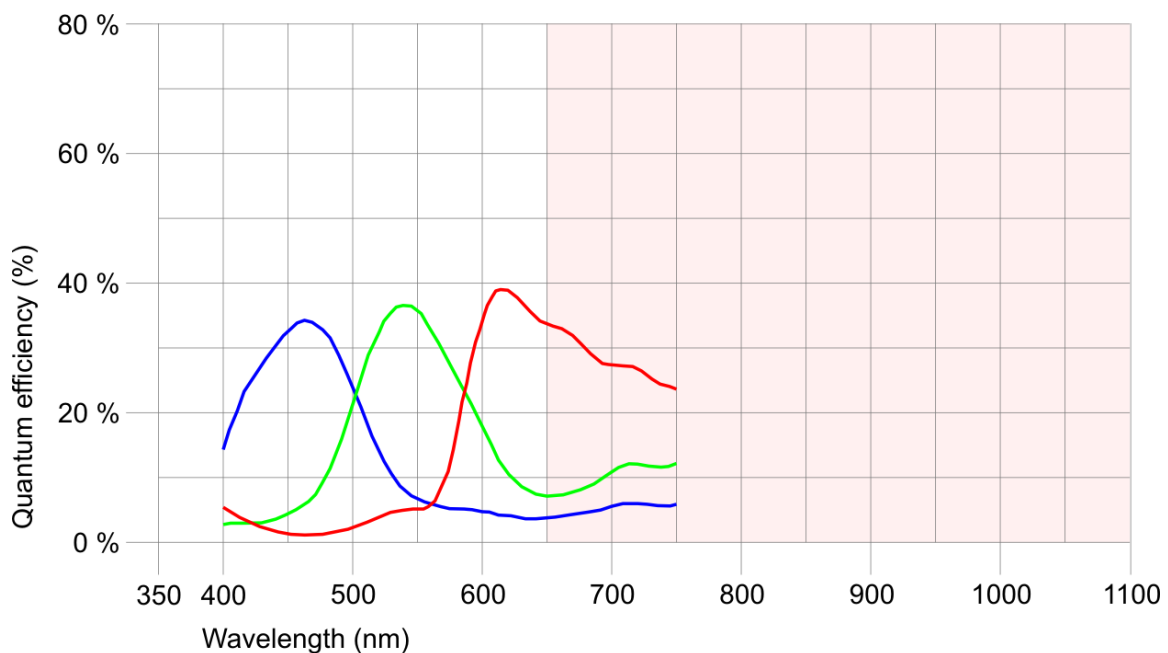


Abbildung 36: Quanteneffizienzkurve der Kamera

Die RGB-Empfindlichkeit der Kamera ist nicht gleichmäßig, reicht aber bis in den Rotbereich über 650 nm, in dem die wichtigsten Chlorophyllfluoreszenzen der Chlorophylle a und b zu erwarten sind.

3.3.2 Lichtquellen

Im TRACEiT-Gehäuse befinden sich drei, um 120° versetzte Weisslicht-LEDs, die schräg auf die zu untersuchende Fläche strahlen und diese beleuchten. Werden sie einzeln angeschaltet, erzeugen sie unterschiedliche Schattenbilder, die getrennt aufgezeichnet werden und die Basis für die Topographieberechnung bilden.

Für die Fluoreszenzmessungen wurden LED's mit unterschiedlichen Wellenlängen getestet, die jeweils als Paare auf drei Einzelplatten montiert wurden.



Abbildung 37: LED's in der Kamera

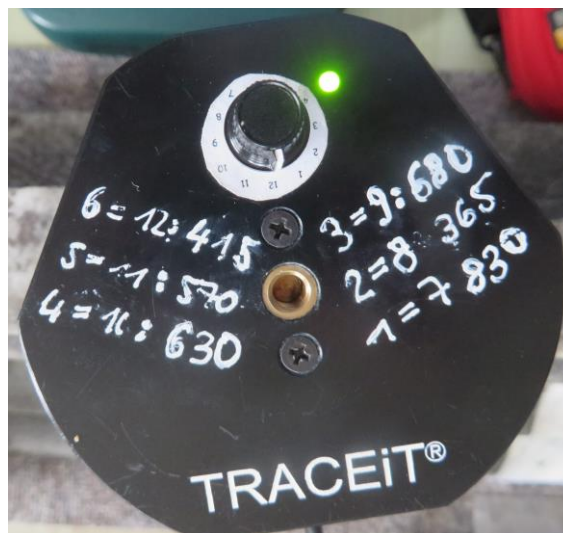


Abbildung 38: Getestete LED-Wellenlängen

Die getesteten Wellenlängen reichten vom UV-Bereich (365 nm) bis zum IR-Bereich (830 nm). Die Versuche wurden mit mikrobiologischen Mischkulturen durchgeführt, die sich in gläsernen Petrischalen befanden.

Lediglich bei einer Bestrahlung mit 365 nm war ein schwaches rotes Leuchten zu erkennen.

Bei nachfolgenden Versuchen auf Marmor überstrahlte bei dieser Beleuchtung ein grelles bläuliches Licht alle Strukturen. Dieser Effekt konnte später der Calcitfluoreszenz des Marmors zugeordnet werden und musste nachfolgend unterdrückt werden.

Als Konsequenz aus diesen Erfahrungen und nochmaligen Überlegungen zu möglichen Fluoreszenzen der Chlorophylle A und B fiel die Entscheidung, jeweils drei LEDs mit den Wellenlängen 365 nm und 470 nm der Firma NICHIA zu verbauen. /11, 12/

Spectrum

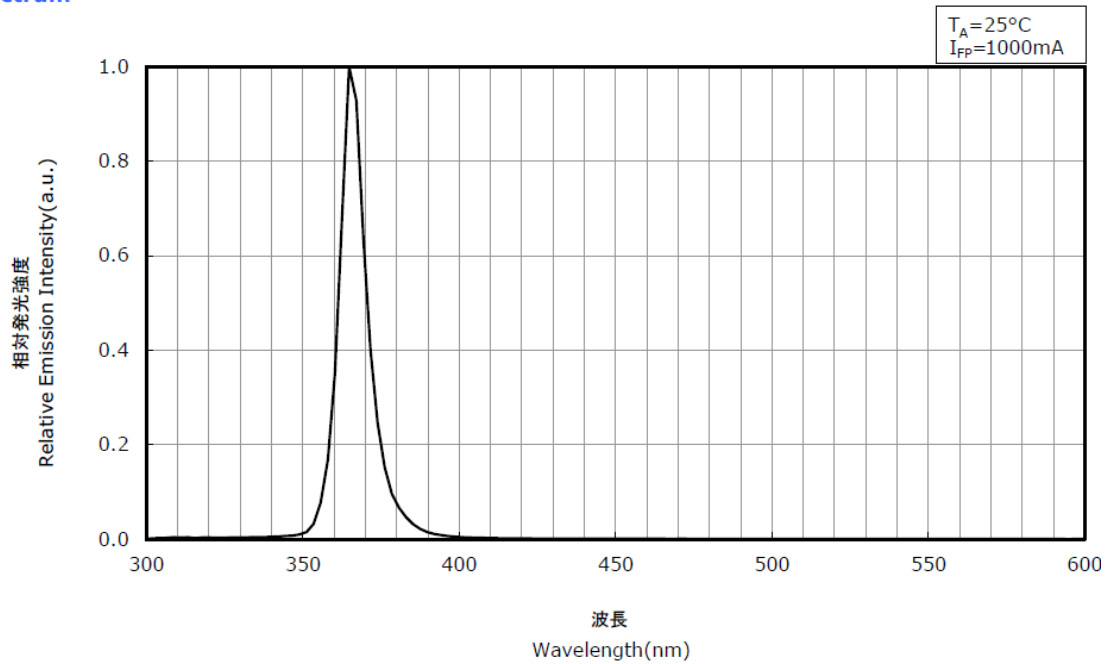


Abbildung 39: Spektrum der LED NVSU233B(T) mit dem Maximum bei 365 nm

Spectrum

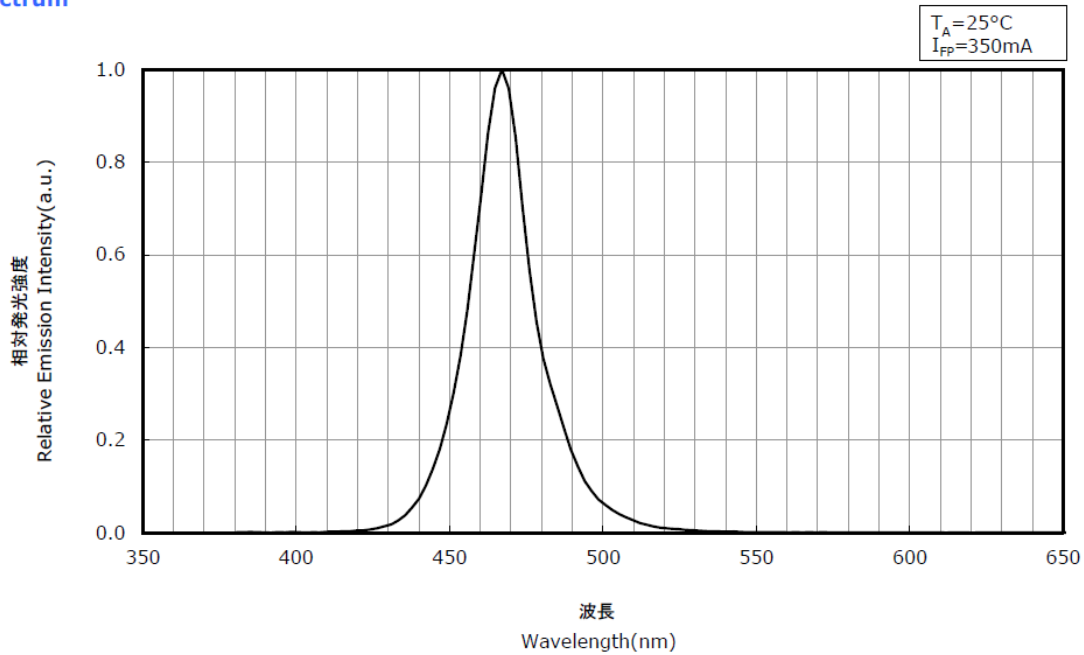


Abbildung 40: Spektrum der LED NCSB219BT-V1 mit dem Maximum bei 470 nm

3.3.3 Filter

Bei den erwähnten Versuchen zeigte sich, dass eine Lösung des Messproblems für Marmor ohne die Unterbindung der Calcitfluoreszenzen kaum realisierbar sein würde.

Dafür gab es zwei Lösungsansätze. Entweder man nutzte das relativ langsame Abklingen der Chlorophyllfluoreszenzen) und das schnelle Abklingen der Calcitfluoreszenzen, um

diese voneinander zu trennen oder man verwendete optische Filter, um die Calcitfluoreszenzen zu unterdrücken.

Versuche mit einem verzögerten Zuschalten der Kamera nach dem Abklingen der Calcitfluoreszenz führten zu keinen befriedigenden Ergebnissen, da die ebenfalls exponentiell abklingenden Chlorophyllfluoreszenzen wahrscheinlich schon zu schwach waren um durch die Kamera registriert zu werden.

Daher fiel die Entscheidung für den Einbau einer Filterhalterung zur Aufnahme von Filterschubladen und der Verwendung von unterschiedlichen Wechselfiltern.



Abbildung 41: Messkopf mit Filterschublade



Abbildung 42: Messkopf mit Filter

Augenblicklich sind drei unterschiedliche Filter im Einsatz.

Der IR-Sperrfilter ist ein Kurzpassfilter, der als Standardfilter vor der Kamera montiert ist und das langwellige Rot- und IR-Licht nicht passieren lässt.

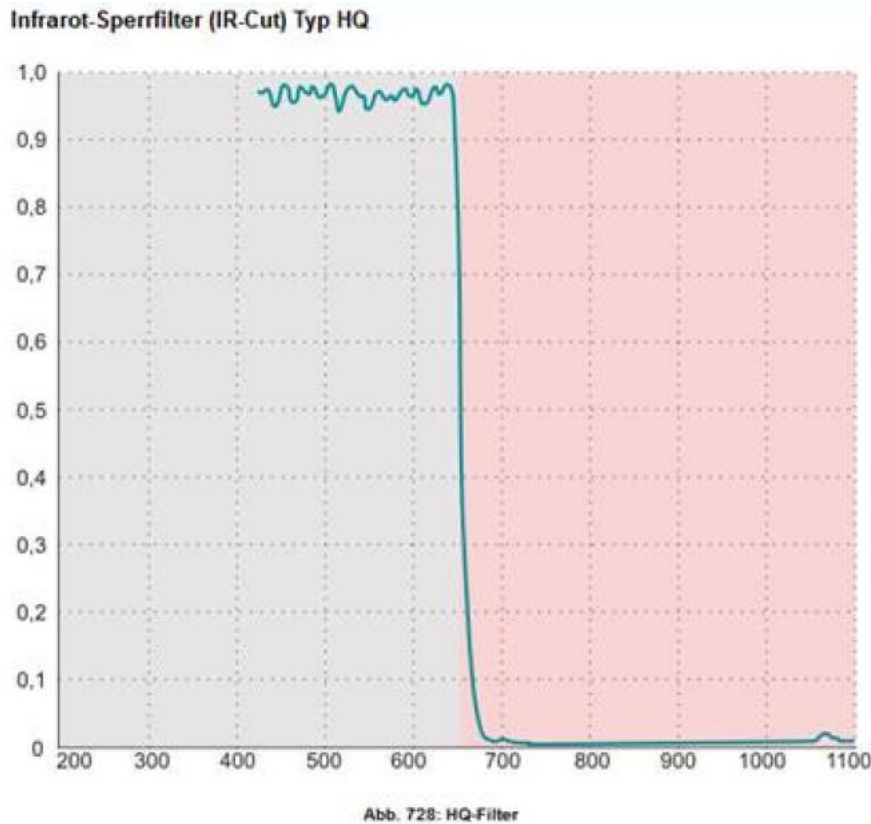


Abbildung 43: Kennlinie des Standardkurzpassfilter 650 nm

Beim Einsatz dieses Filters sind keine Fluoreszenzen von Chlorophyll A und B zu erwarten, während die Calcitfluoreszenzen bei 620 nm (Anregung: 365nm) gut erkennbar sind. Dies kann genutzt werden, Reinigungen zu bewerten, da Krusten auf Marmor die Calcitfluoreszenzen behindern. Je stärker die Calcitfluoreszenzen sind, desto sauberer ist die Marmoroberfläche. /13/

Der 625 nm – Langpassfilter lässt nur Strahlungen im langwelligem Rot- und IR-Licht passieren. Mit seiner Hilfe können die Calcitfluoreszenzen bei 620 nm unterdrückt werden, während die längerwelligeren Chlorophyllfluoreszenzen die Kamera erreichen können.

Dieser Filter kann zur Identifizierung und Differenzierung der Chlorophylle a und b eingesetzt werden, da er bei beiden Anregungswellen, 365 nm und 470 nm, verwendet werden kann. Dadurch muss kein Filterwechsel erfolgen.

625nm High Performance Longpass Filter, OD >4.0 Coating Performance FOR REFERENCE ONLY

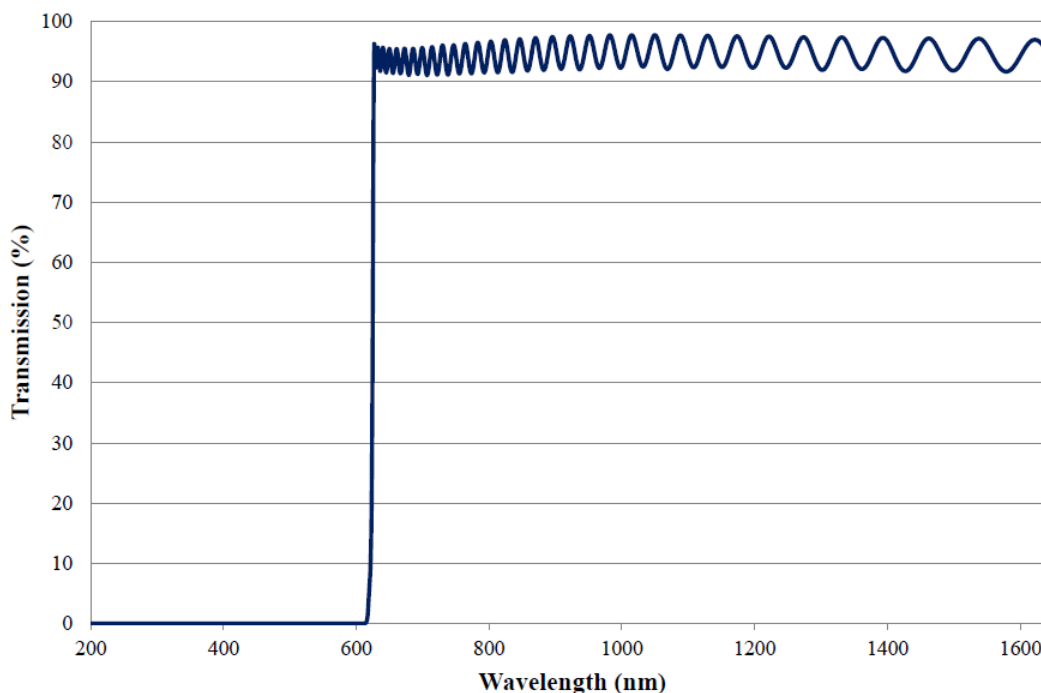


Abbildung 44: Kennlinie des 625 nm – Langpassfilter von Edmund-Optics

Als dritter Filter kommt ein 425 nm – Langpassfilter zum Einsatz.

Er wird für den sogenannten „Lebend-Tot-Test“ verwendet, um lebende und abgestorbene Mikroorganismen mit Hilfe von fluoreszierenden Anfärbungen zu unterscheiden. Mit Hilfe dieses Filters kann die Anregungswellenlänge von 365 nm von der Fluoreszenzwellenlänge der Anfärbechemikalie Calcofluor White (433 nm) getrennt werden.

425nm High Performance Longpass Filter, OD >4.0 Coating Performance FOR REFERENCE ONLY

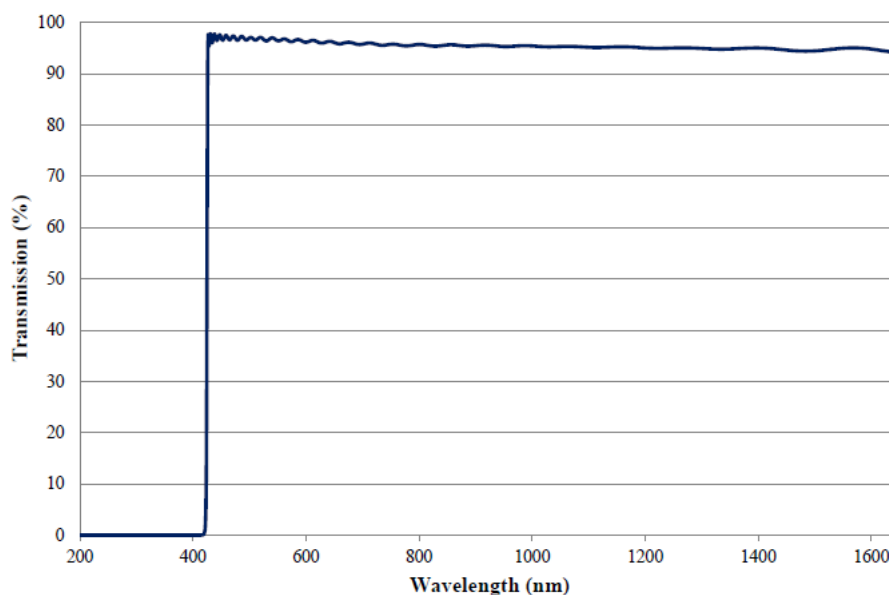


Abbildung 45: Kennlinie des 425 nm – Langpassfilter von Edmund-Optics

Calcofluor White regt lebende und tote Organismen, aber auch z. B. Zellulosefasern mit den für die Anfärbung erforderlichen reaktiven Gruppen zu Fluoreszenzen an.

Als zweite Chemikalie kommt dabei Acridin Orange mit einer Anregungswellenlänge von 470 nm zum Einsatz, das nur tote RNA zum Fluoreszieren veranlasst. Es gibt keine tote RNA, in toten Zellen kann DANN langfristig (teils noch in Mumien) überdauern, RNA ist nur in aktiven Zellen vorhanden und kurzlebig..

3.3.4 Software

Die notwendigen Messungen mit unterschiedlichen Lichtquellen und damit verbundenen unterschiedlichen Kameraeinstellungen sind mit der ursprünglichen Software nicht realisierbar. Daher war die Entwicklung einer völlig neuen Software notwendig, die diese Funktionen leisten kann.

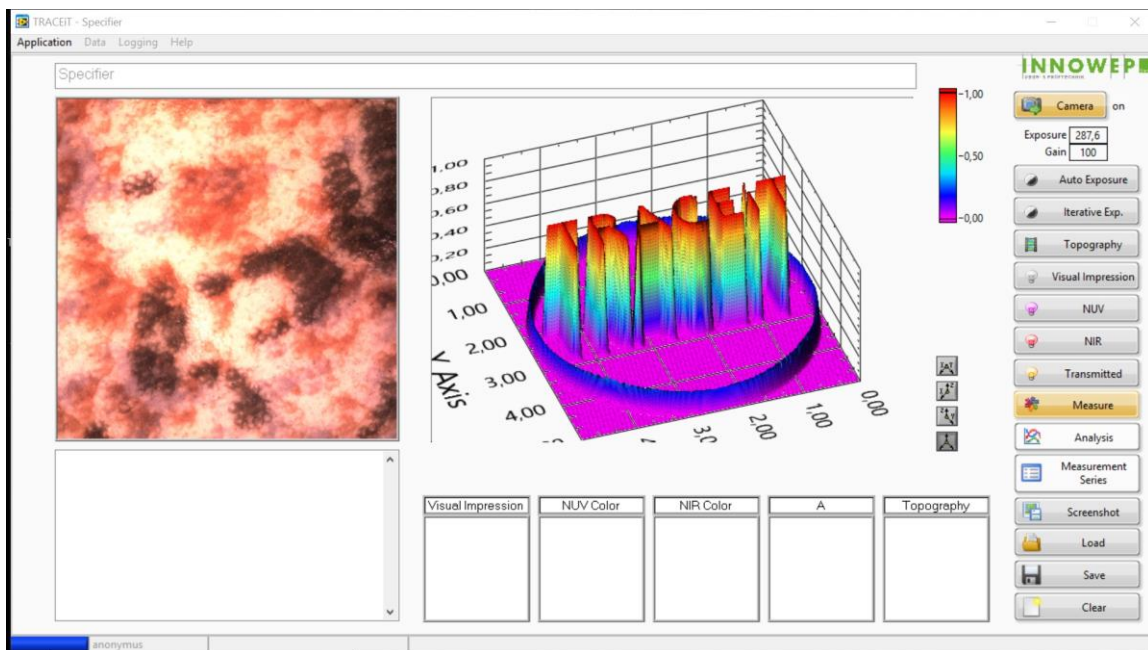


Abbildung 46: Oberfläche der neuen TRACEiT-Software

Diese Software liegt in einer Beta-Version vor, die alle notwendigen Funktionen und Auswertungsmöglichkeiten enthält. Wie bei allen neuen Programmen in diesem Entwicklungsstadium treten noch kleinere Fehler auf, die jedoch die Verwendung der Software für die vorgesehenen Messungen nicht beeinträchtigen.

Die neue Software hat gegenüber der Vorgängerversion einige wesentliche Veränderungen, die die von uns angestrebten Messungen überhaupt erst möglich machen.

Die unterschiedlichen Lichtquellen

- Sichtbares weißes Licht für Topographiemessungen
365 nm – Licht (NUV)
470 nm – Licht (NIR)
Lassen sich getrennt schalten und die entsprechenden Kameraparameter einstellen.
- Das Speichern von Ergebnisdateien wird vereinfacht und beschleunigt.
- Der Messvorgang wird zeitlich verkürzt, was mechanische Störungen reduziert.
- Es ist möglich mehrere Messmodi hintereinander ablaufen zu lassen und diese Makros individuell zu konfigurieren, wodurch es gelingt, Messungen mit unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen hintereinander und in einem Messvor-

gang durchzuführen ohne den Messkopf absetzen und eine neue Messung starten zu müssen.

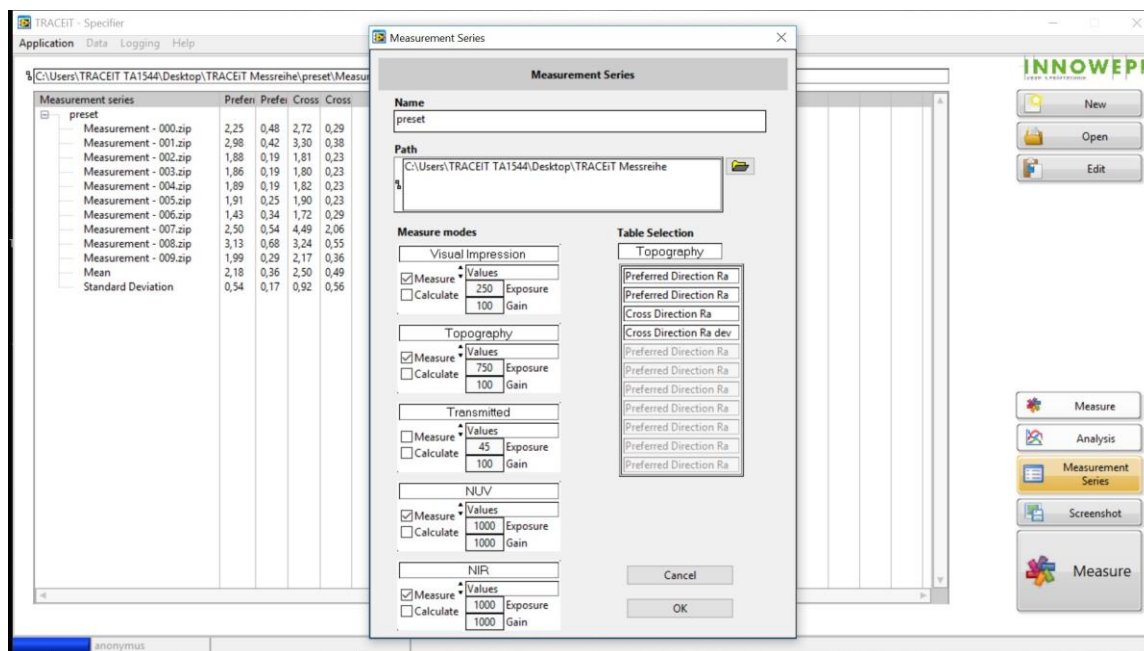


Abbildung 47: Messserienmenü der neuen TRACEiT-Software

Diese Entwicklungen führen zu einer deutlichen Verkürzung der Messzeiten und machen es überhaupt erst möglich, verschiedene Messungen so durchzuführen, dass ihre Ergebnisse pixelgenau übereinander gelegt werden können.

3.3.5 Rechner

Bei Objektuntersuchungen unter Baustellenbedingungen gab es mit der Bedienung des Messrechners immer wieder Handlingprobleme. Daher haben wir versucht, ob die Messung mittels Tablet vereinfacht werden können.

Die Wahl fiel, betriebssystembedingt auf ein 12zoll-Windows 10 – Tablet mit USB-Schnittstelle.

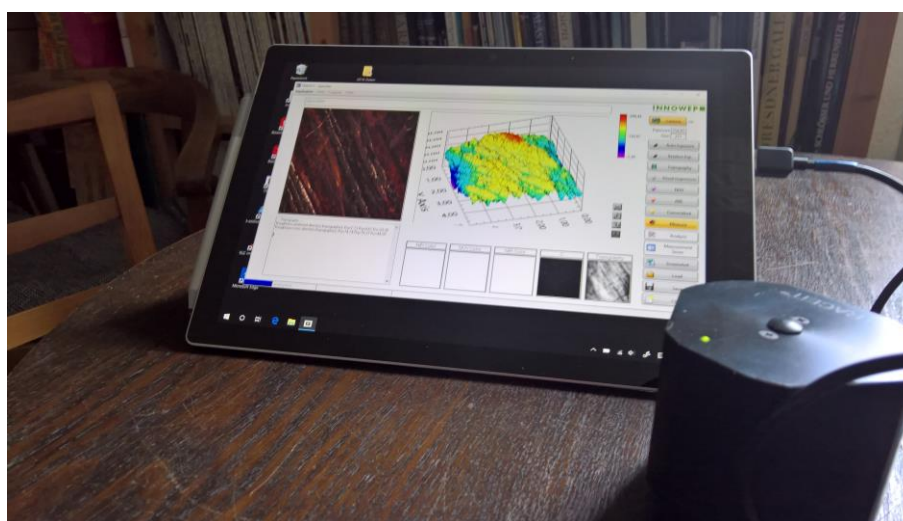


Abbildung 48: Windows-Tablet mit TRACEiT-Messkopf

Erste Messerfahrungen sind positiv. Es konnten Messzeiten von 3 Stunden erreicht werden, ohne den Akku vollständig zu entladen.

4 ANWENDUNGSTESTS

4.1 Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen sollten klären, ob es möglich ist, mittels des TRACEIT mikrobiologische Besiedlungen prinzipiell zu detektieren.

Folgende Proben werden mit dem TRACEIT Messkopf, der Lichtmikroskopie und der Fluoreszenzmikroskopie getestet:

Probe1: Marmor – Block, beimpft mit *Chlorella mirabilis*, *Pleurococcus* sp. und *Stichococcus* sp.

Probe 2: Thüster Kalkstein – Block mit *Engyodontium album*

Probe 3: Thüster Kalkstein – Block mit *Aspergillus versicolor*, *Eurotium herbariorum*, *Penicillium aurantiogriseum* und *Penicillium brevicompactum*

TRACEIT – Messkopf

Der TRACEIT – Messkopf ist bei der vorliegenden Untersuchung mit einem Sperrfilter ausgestattet, der alle Wellenlängen ≤ 625 nm herausfiltert.

Probe 1

Test mit dem TRACEIT Messkopf:

Anregung: 365 nm und 470 nm

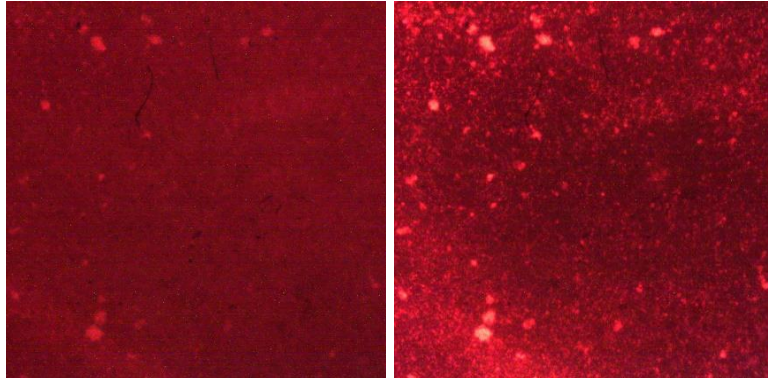


Abbildung 49 a und b: Chlorophyllfluoreszenz bei 365 nm und 470 nm, Marmorprobe beimpft mit Algen

Die Marmorprobe zeigt eine ausgeprägte Chlorophyllfluoreszenz der aufgeimpften Grünalgen. In Abb. 49a fluoreszieren die Zellen schwächer, da bei dieser Wellenlänge Chlorophyll a kein Absorptionmaximum aufweist. Demgegenüber kann bei der Wellenlänge 470 nm (Abb. 49b) das Absorptionsvermögen von Chlorophyll a und b gänzlich genutzt werden.

Probe 2

Test mit dem TRACEIT Messkopf:

Anregung: 365 nm und 470 nm

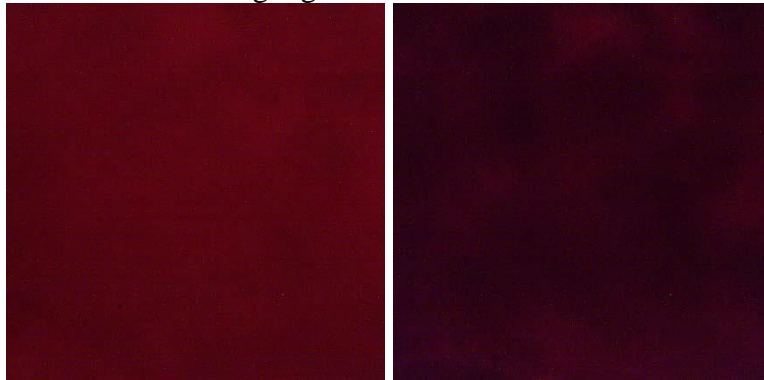


Abbildung 50 a und b: Thüster Kalksteinprobe mit Engyodontium album, ungefärbtes Präparat, Anregung bei 365 nm und 470 nm

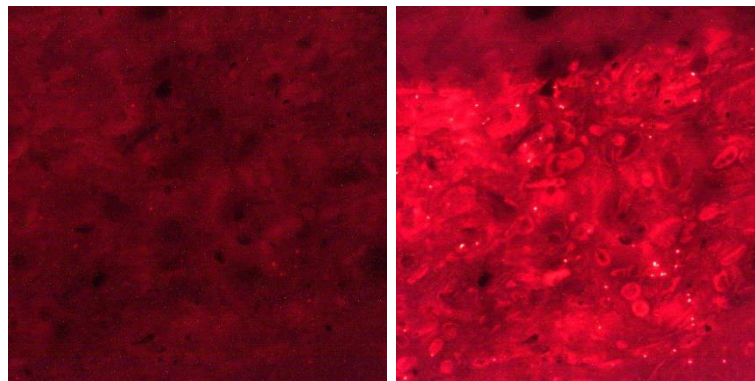


Abbildung 51 a und b: Thüster Kalksteinprobe mit Engyodontium album, mit Acridinorange gefärbtes Präparat

Abb. 50 a und b zeigen die Thüster Kalksteinprobe, angeimpft mit Engyodontium album und ungefärbt. Der Pilz zeigt bei der Anregung mit 365 nm und 470 nm keine Fluoreszenz.

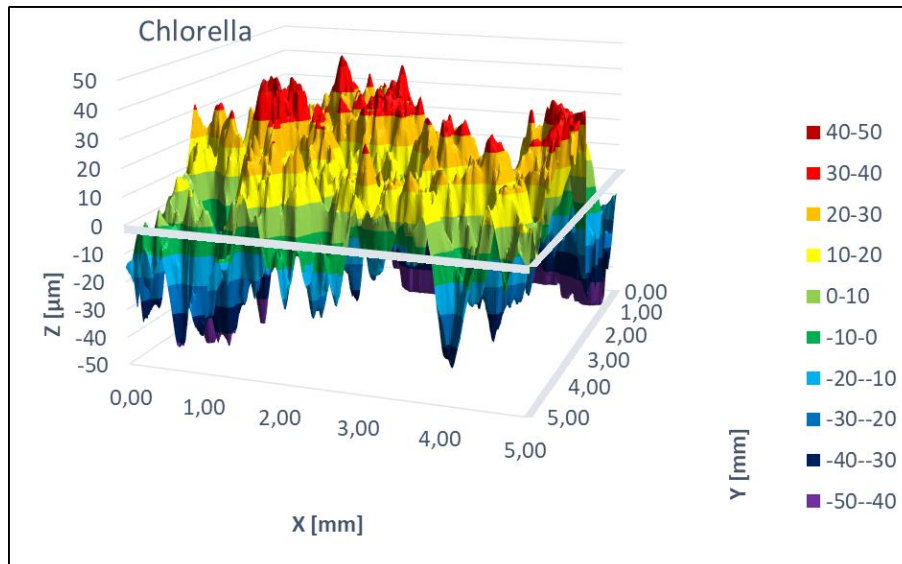
Nach der Anfärbung mit Acridinorange und einer Anregung bei 365 nm (Abb. 51a) ist auch keine Fluoreszenz zu beobachten, da bei dieser Wellenlänge weder DNA noch RNA absorbieren. Die Absorptionsmaxima liegen bei 502 nm (DNA) und bei 460 nm (RNA). Strukturen der Besiedlung sind aber zu erkennen.

Abb. 51b visualisiert eine ausgeprägte Fluoreszenz bei der Anregung mit 470 nm, zurückzuführen auf das hohe Absorptionsvermögen des

Acridin-RNA-Komplexes bei dieser Wellenlänge. Aufgrund des Sperrfilters im Messkopf, der alle Wellenlängen ≤ 625 nm herausfiltert kann die Fluoreszenz des DNA-Acridinorange Komplex nicht nachgewiesen werden, da das Emissionsmaximum hier bei 526 nm liegt. Die in Abb. 51b zu beobachtende Fluoreszenz resultiert also aus der Emission des RNA-Acridinorange-Komplexes. Folglich kann mit dem TRACEIT auf diese Weise eine Aktivität des Bewuchses nachgewiesen werden.

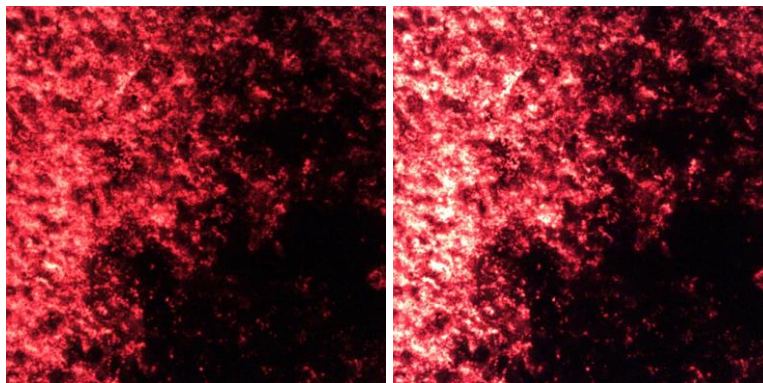
Eine Ausstattung des TRACEITS mit anderen Filtern würde in jedem Fall die Möglichkeiten des Einsatzes erweitern. So könnte z. B. mit einem Filter, der eine Emission um 520 nm ermöglicht, nach einer Anfärbung mit Acridin orange auch der DNA-Acridinorange-Komplex nachgewiesen werden. Ebenso sollten auch Aktivitätsnachweise über die Spaltung von Fluoresceindiacetat (FDA), lebend-tot Differenzierungen mit Calcofluor White und Propidiumiodid sowie reine Strukturfärbungen mit Calcofluor White möglich sein.

Chlorella (Grünalge) – Tageslicht – trocken



Rz: 61,86µm

Abbildung 52a: Topographie



365nm a (Grünalgen und Cyanobakterien) 470nm b (Grünalgen)

Mittel: 45,3 Max: 255 Mittel: 63,0 Max: 255

Abbildung 52 b und c: Fluoreszenzbilder

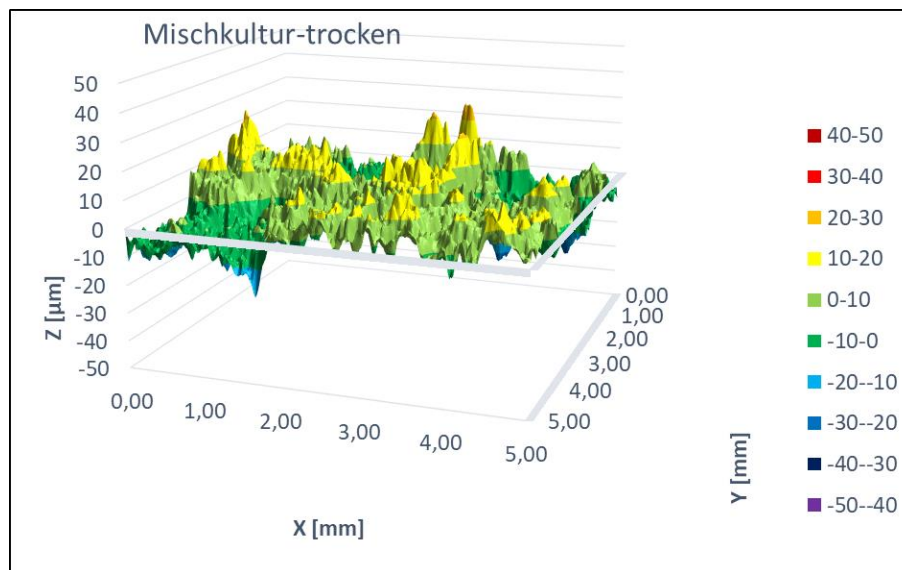
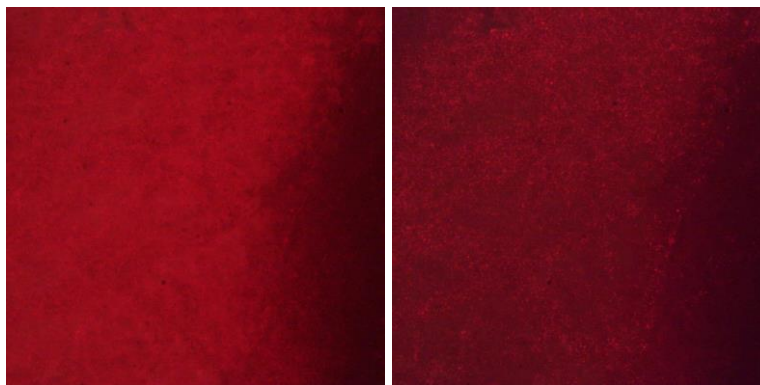
Mischkultur – trockenRz: 22,20 μm

Abbildung 53a: Topographie



365nm a (Grünalgen und Cyanobakterien)

470nm b (Grünalgen)

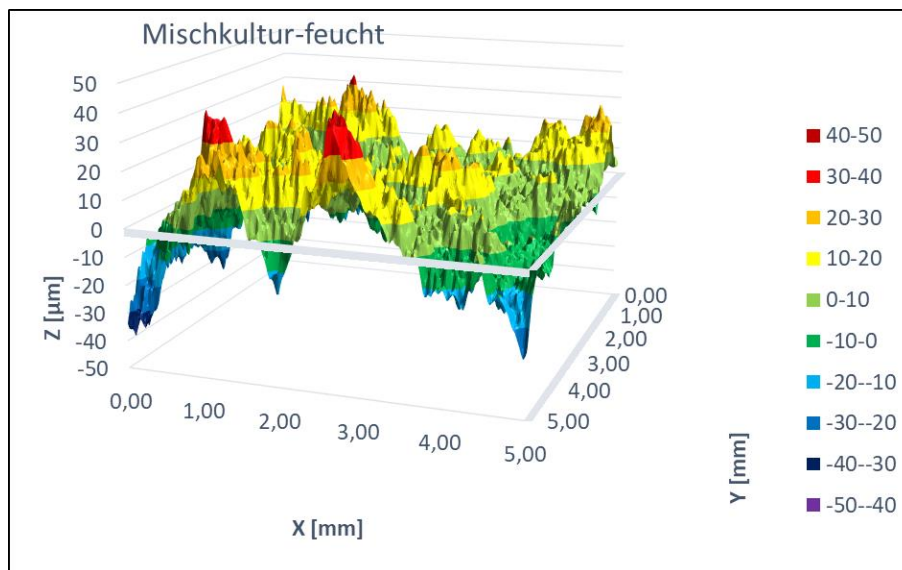
Mittel: 59,0

Max: 151

Mittel: 37,9

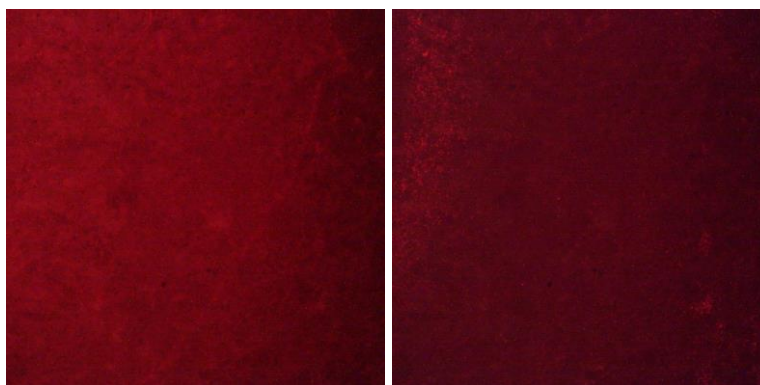
Max: 143

Abbildung 53 b und c: Fluoreszenzbilder

Mischkultur – feucht

Rz: 31,44µm

Abbildung 54a: Topographie

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 38,1

Max: 159

Mittel: 30,0

Max: 149

Abbildung 54 b und c: Fluoreszenzbilder

Die Rauheit der feuchten Mischkultur ist knapp 10 µm größer als die der trockenen Mischkultur, was auf ein Anschwellen der Zellen im feuchten Zustand schließen lässt.

4.2 Prüfkörperuntersuchungen

Erste Anwendungsversuche wurden an einem Marmorprofil vorgenommen, an dem sich unterschiedliche Reinigungsproben befanden.



Abbildung 55: Marmorgesimsteil 2

Vergleich von ungereinigten und gereinigten Marmoroberflächen mit UV-Anregung und Kurzpassfilter 650nm

Die Bildseiten von 5cm x 5cm entsprechen 5mm x 5mm auf dem Objekt.

ungereinigt 01

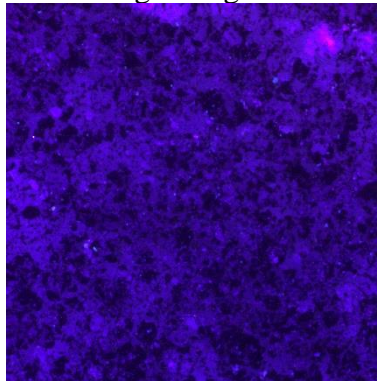


Abbildung 56: Anregung: 365nm; Standardfilter (Kurzpass 650nm)

ungereinigt 02

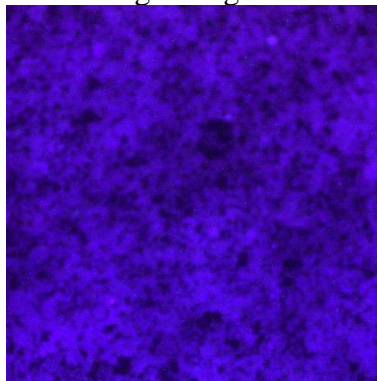


Abbildung 57: Anregung: 365nm; Standardfilter (Kurzpass 650nm)

Im ungereinigten Zustand verhindern die Krusten die Calcitfluoreszenz.

gereinigt mit Mikrodampfstrahl N2-2-1MD

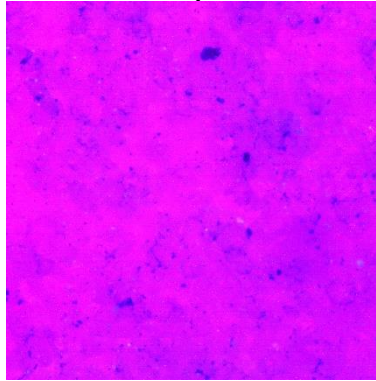


Abbildung 58: Anregung: 365nm; Standardfilter (Kurzpass 650nm)

gereinigt mit Kombination Mikrodampfstrahl/Mikropartikel N2-2-2K

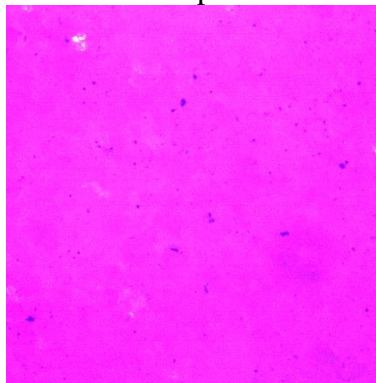


Abbildung 59: Anregung: 365nm; Standardfilter (Kurzpass 650nm)

gereinigt mit Mikropartikel N2-2-3MP

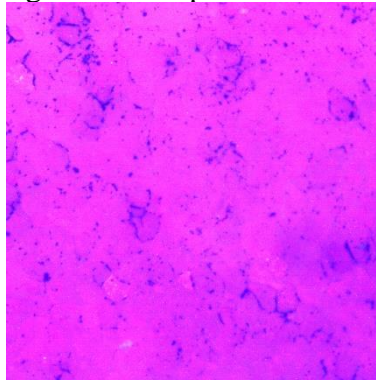


Abbildung 60: Anregung: 365nm; Standardfilter (Kurzpass 650nm)

Durch die Reinigung wird die Calcitoberfläche unterschiedlich gut freigelegt, so dass die Calcitfluoreszenzen gut beobachtbar sind. Dunkle Flecken sind verbliebene oder neue Verschmutzungen.

Fluoreszenzmessungen mit unterschiedlichen Filtern, und unterschiedlichen Anregungswellenlängen und Anfärbemethoden

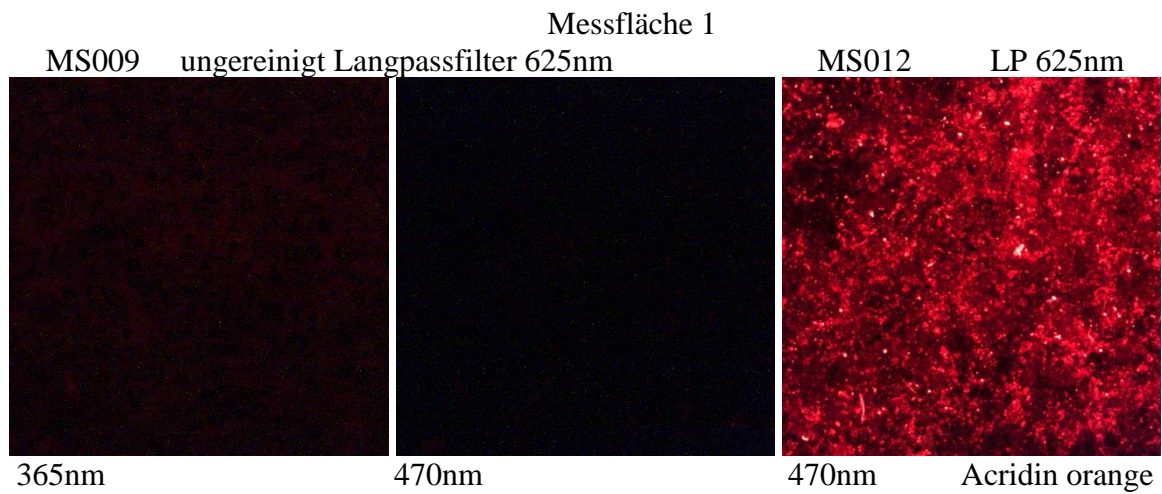


Abbildung 61 : Messfläche 1

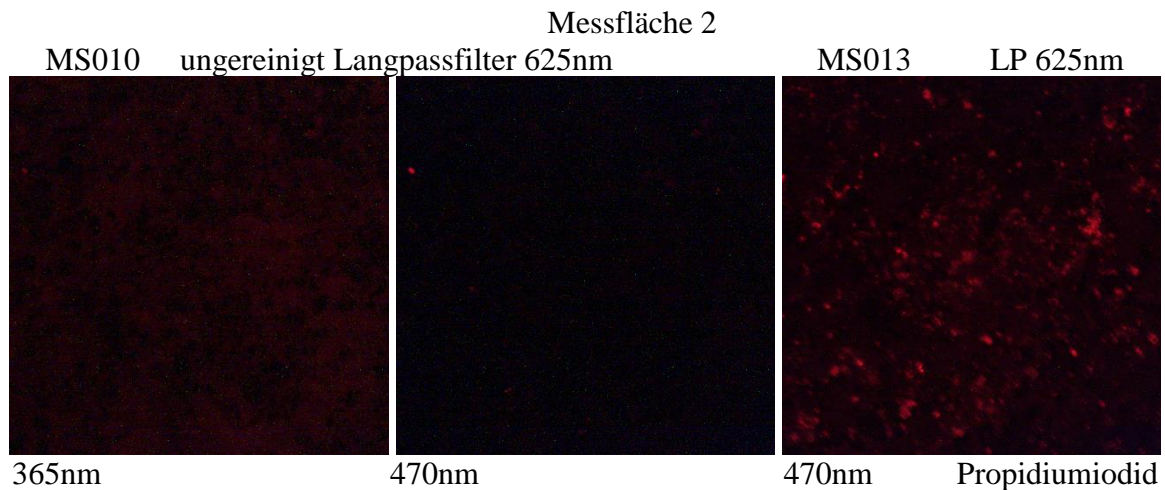


Abbildung 62: Messfläche 3

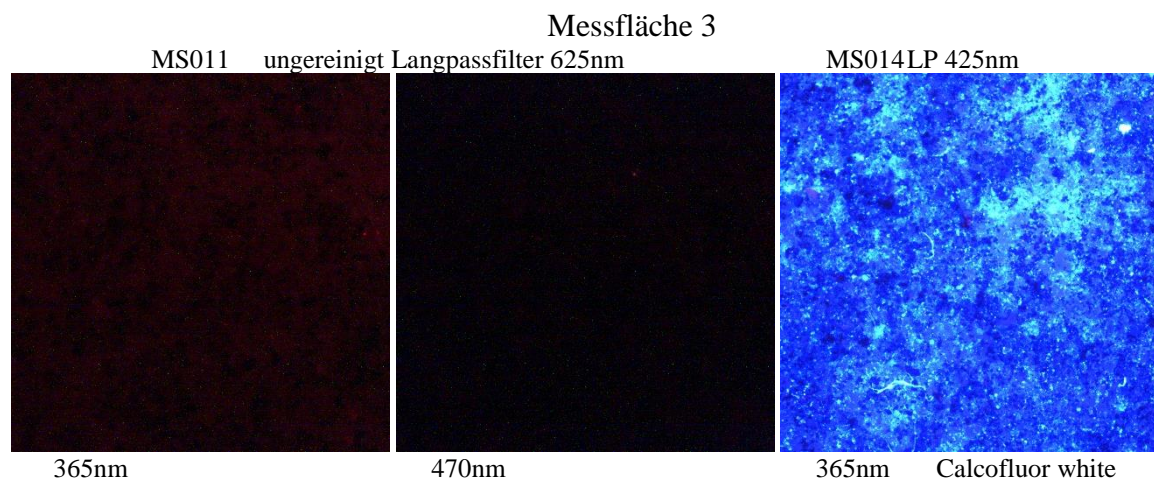


Abbildung 63: Messfläche 3

Während die Verwendung von Propidiumiodid nur schwache Fluoreszenzen zeigt, sind diese beim Einsatz von Acridin Orange und Calcofluor White sehr deutlich.

4.3 Objektuntersuchungen

4.3.1 Schlosspark in Rheinsberg

Die Untersuchungen an den beiden Skulpturen im Schlosspark von Rheinsberg beinhalten vergleichende Ultraschall- und Mikrobiologiemessungen.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten beider Skulpturen sind sehr hoch, was auf ihren guten Zustand hinweist.

Auf den Skulpturen „Winter“ und „Feuer“ in Rheinsberg dominieren Schwärzepilze und Grünalgen, insbesondere die Alge *Pleurococcus vulgaris* und der Pilz *Aureobasidium pullulans*. Leicht beschattete Stellen werden bevorzugt von der Alge besiedelt (z. B. Läuferstellen), hier dominiert sie gegenüber den Pilzen, wogegen die Pilze mehr oder weniger überall auf den Skulpturen vorkommen. Offensichtlich behandelte Stellen (z. B. Kittstelle am Fuß und Kopf) werden dominiert von den Pilzen, die vermutlich die zur Behandlung verwendete Substanz als organische Kohlenstoffquelle nutzen.

Mit Ausnahme der Grünalgen *Pleurococcus vulgaris* und des Pilzes *Aureobasidium pullulans* konnten alle anderen auf den Skulpturen siedelnden Organismen nur in geringem Umfang ausgemacht werden.

4.3.2 Potsdam-Sanssouci



Abbildung 64: Postament Friedrich II. Nordseite

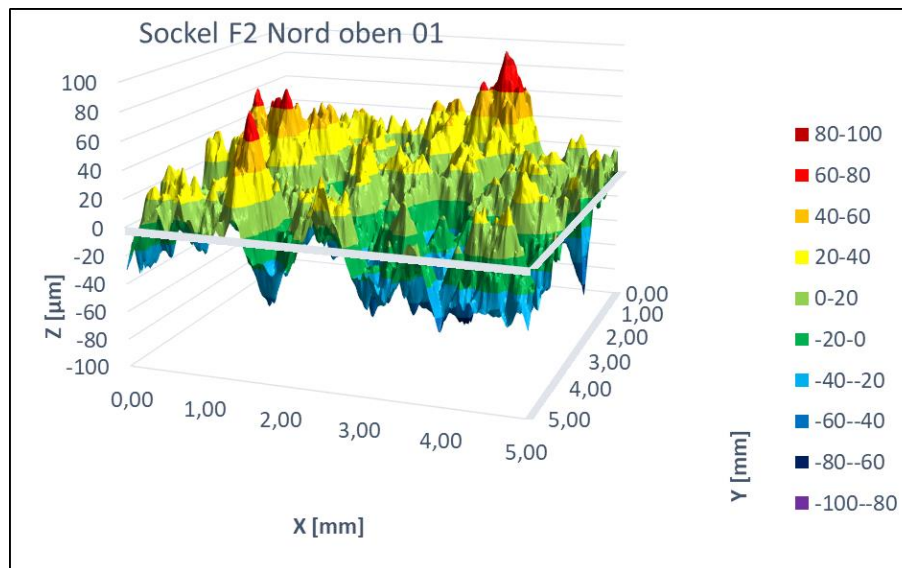
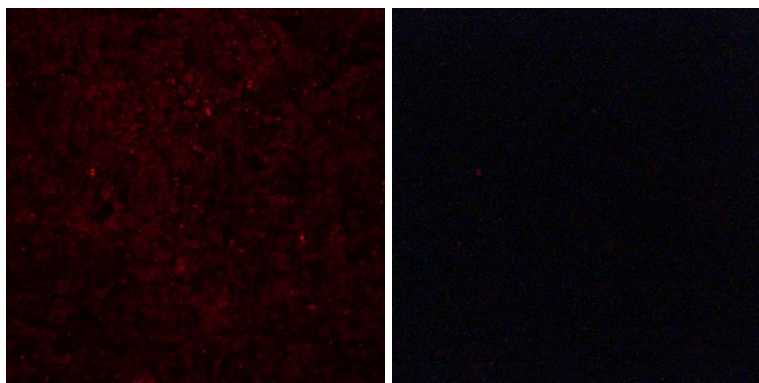
Sockel F2 Nord oben 01Rz: 77,84 μ m

Abbildung 65a: Topographie No01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

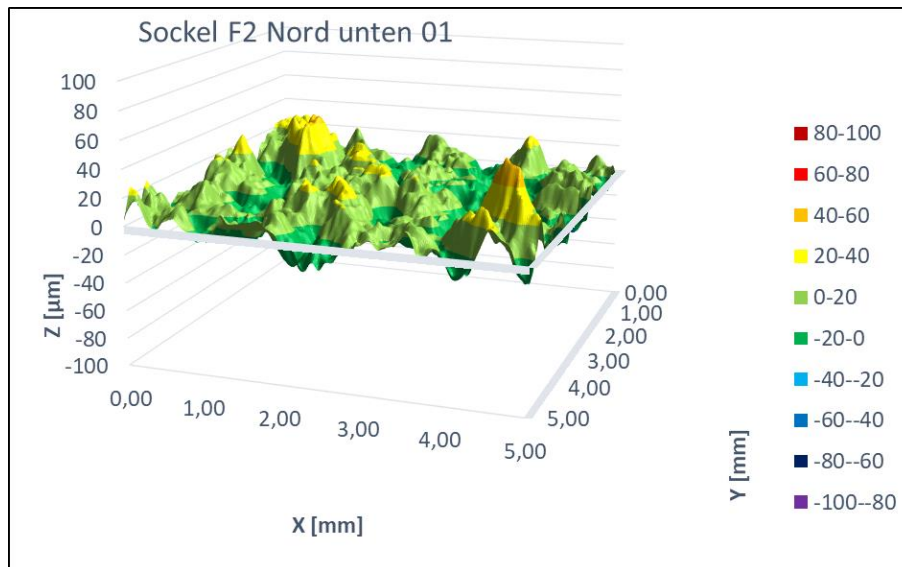
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 9,0 Max: 84 Mittel: 7,0 Max: 150

Abbildung 65 b und c: Fluoreszenzbilder No01

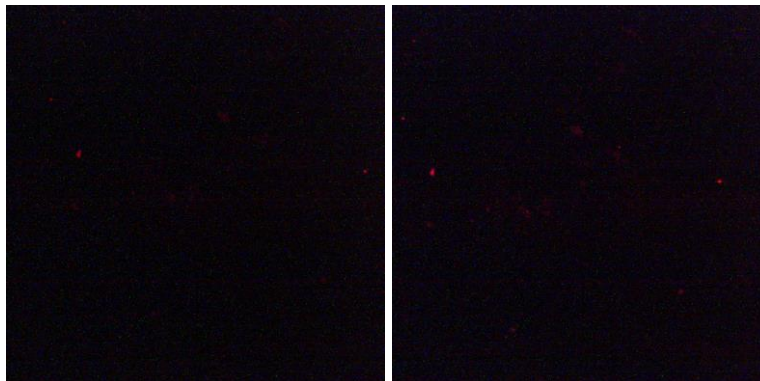
Mikrobiologischer Befund:

- 31 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 32 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 Nord unten 01

Rz: 36,06µm

Abbildung 66a: Topographie Nu01



365nm a (Grünalgen und Cyanobakterien) 470nm b (Grünalgen)

Mittel: 8,3 Max: 151 Mittel: 9,5 Max: 152

Abbildung 66 b und c: Fluoreszenzbilder Nu01

Mikrobiologischer Befund:

- 29 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 30 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

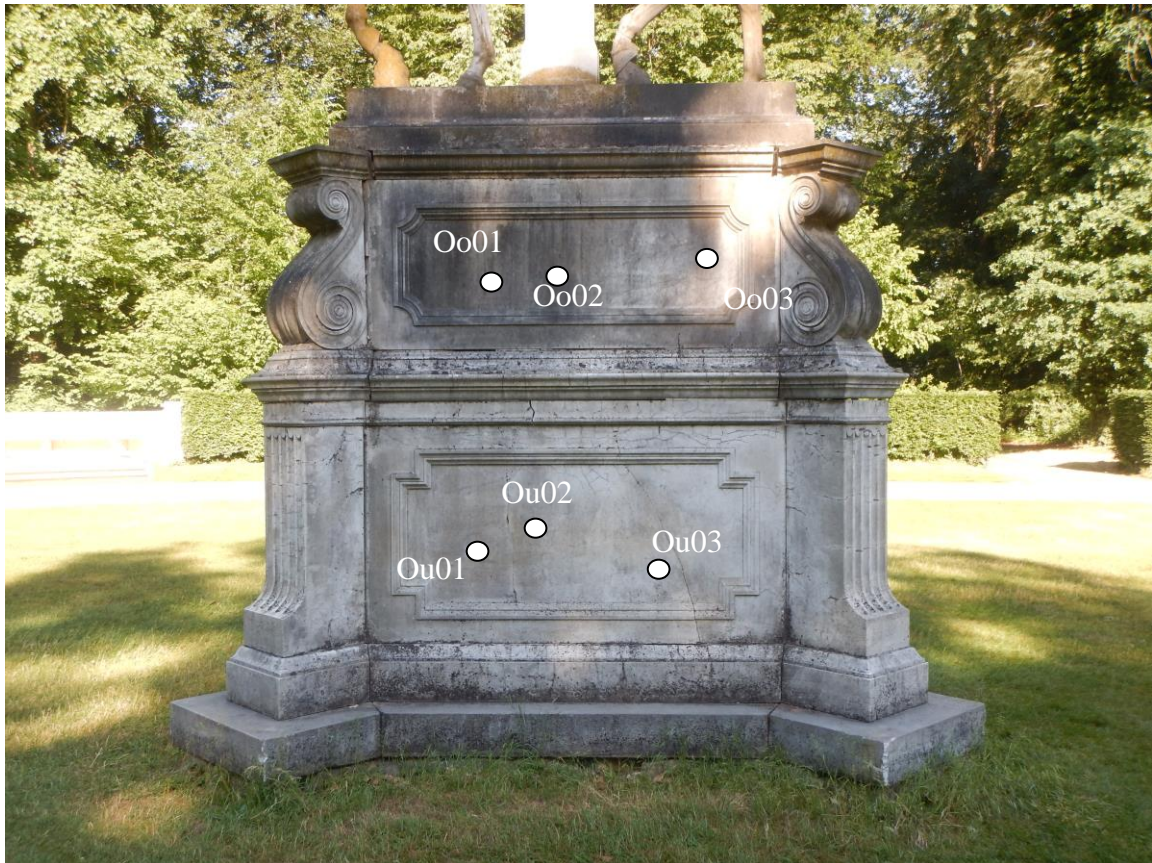
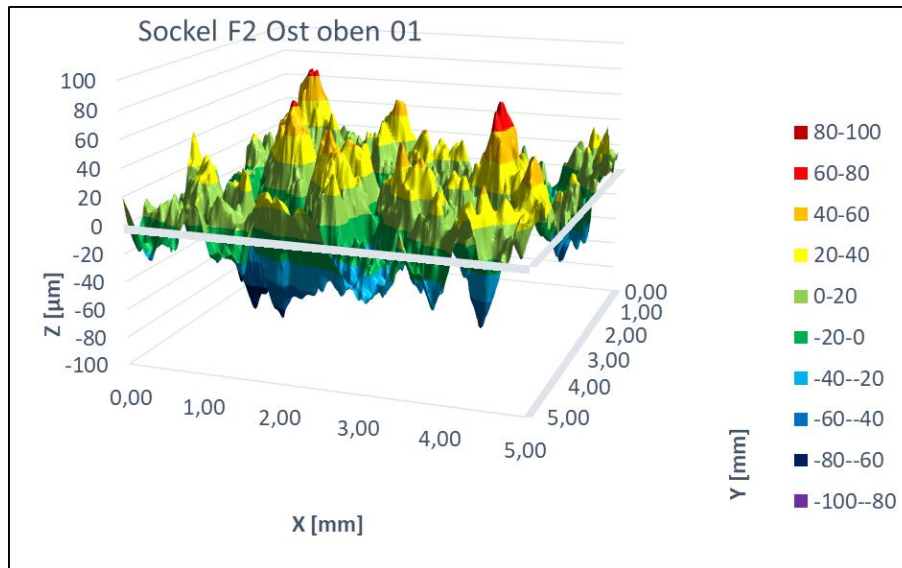
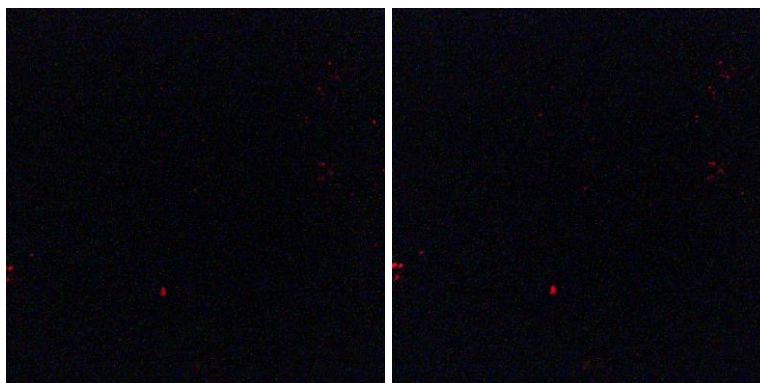


Abbildung 67: Postament Friedrich II. Ostseite

Sockel F2 Ost oben 01

Rz: 69,76µm

Abbildung 68a: Topographie Oo01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

Mittel: 7,8 Max: 160

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 8,3 Max: 178

Abbildung 68 b und c: Fluoreszenzbilder Oo01

Mikrobiologischer Befund:

7 Algen: Trebouxia sp.

Cyanobakterien: coccale und fädige Cyanobakterien

Pilze: schwarze Hefen

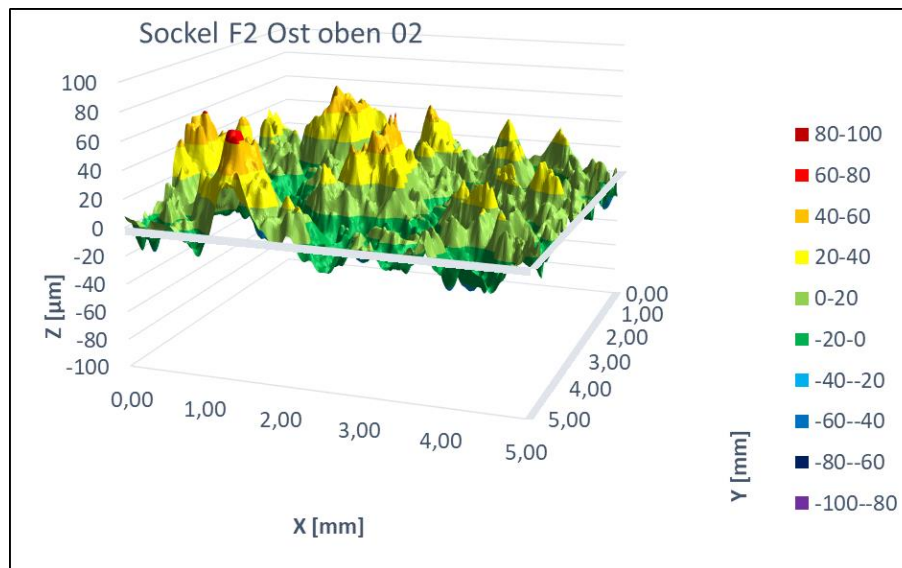
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

8 Algen: Trebouxia sp.

Cyanobakterien: coccale und fädige Cyanobakterien

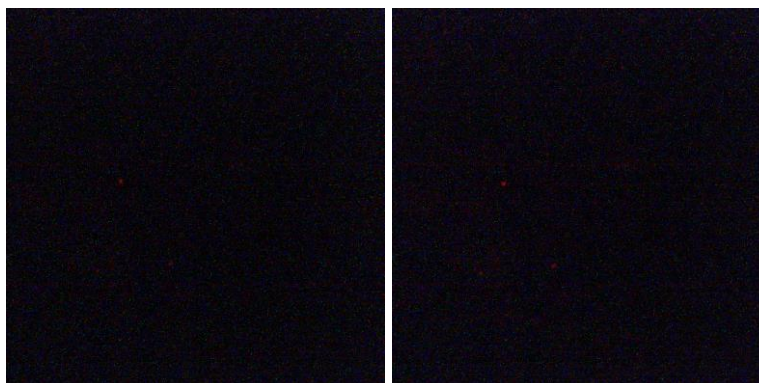
Pilze: schwarze Hefen

Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Socket F2 Ost oben 02

Rz: 43,82µm

Abbildung 69a: Topographie Oo02

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

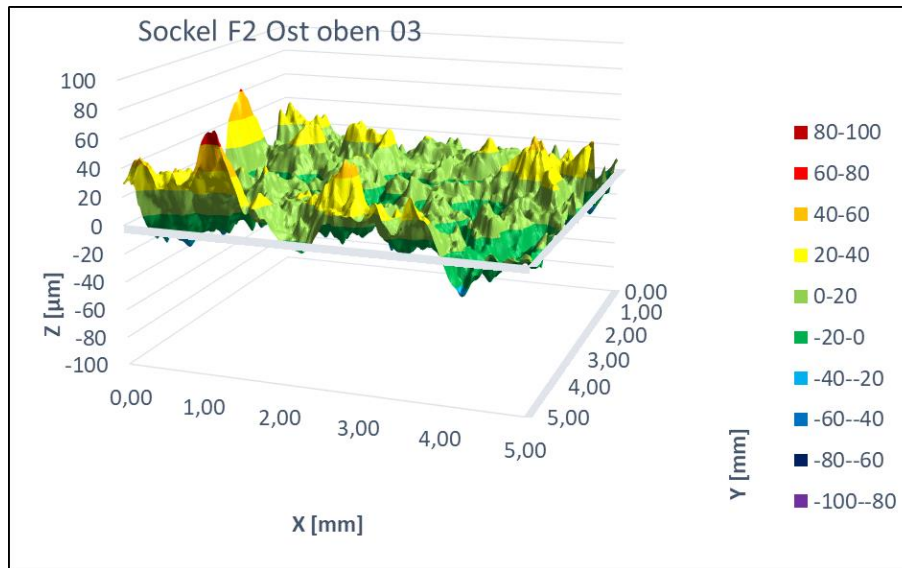
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 9,9 Max: 171 Mittel: 10,7 Max: 170

Abbildung 69 b und c: Fluoreszenzbilder Oo02

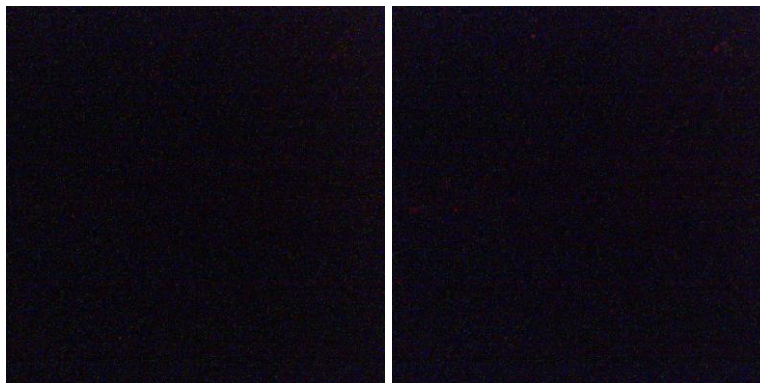
Mikrobiologischer Befund:

- 9 Algen: Trebouxia sp.
- Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Pilze: schwarze Hefen
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 10 Algen: Trebouxia sp.
- Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Pilze: schwarze Hefen
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 Ost oben 03

Rz: 40,39µm

Abbildung 70a: Topographie Oo03

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

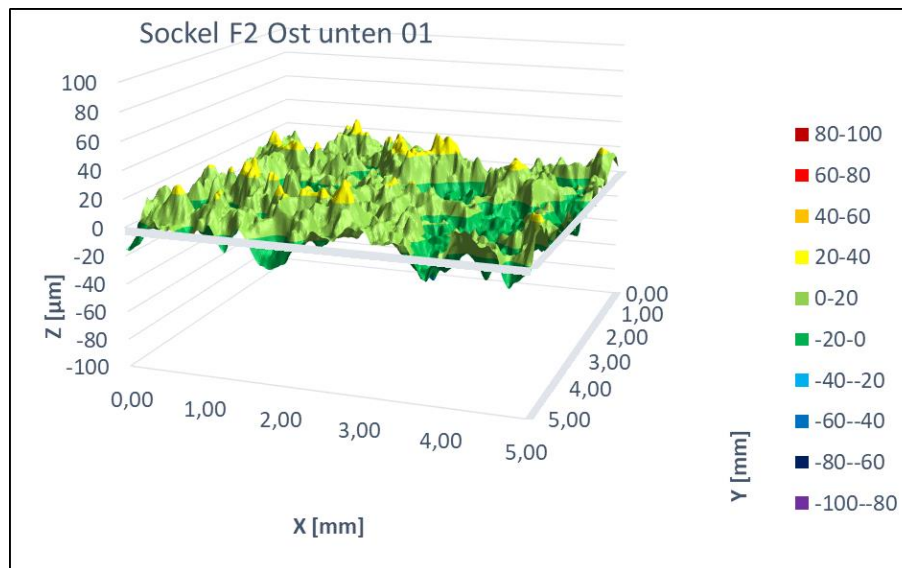
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 12,0 Max: 171 Mittel: 13,0 Max: 172

Abbildung 70 b und c: Fluoreszenzbilder Oo03

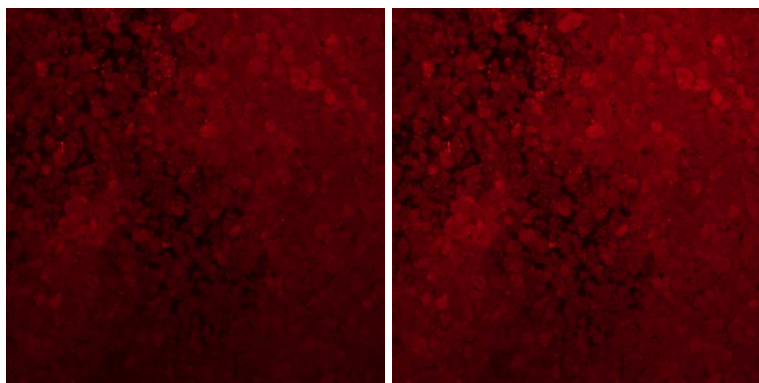
Mikrobiologischer Befund:

- 11 Algen: *Trebouxia* sp.
- Cyanobakterien: coccale und fädige Cyanobakterien
- Pilze: schwarze Hefen
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 12 Algen: *Trebouxia* sp.
- Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Pilze: schwarze Hefen
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 Ost unten 01

Rz: 27,80µm

Abbildung 71a: Topographie Ou01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

Mittel: 20,3 Max: 96

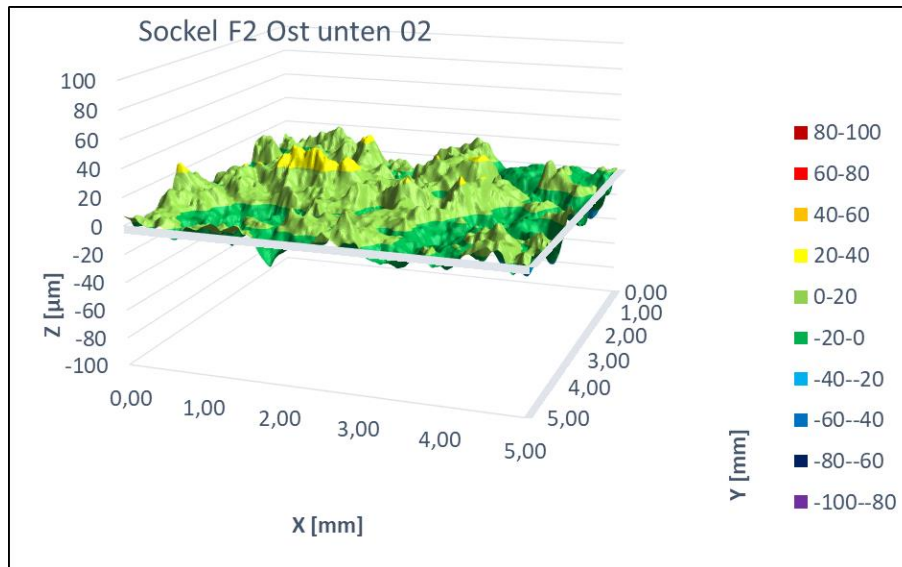
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 25,6 Max: 116

Abbildung 71 b und c: Fluoreszenzbilder Ou01

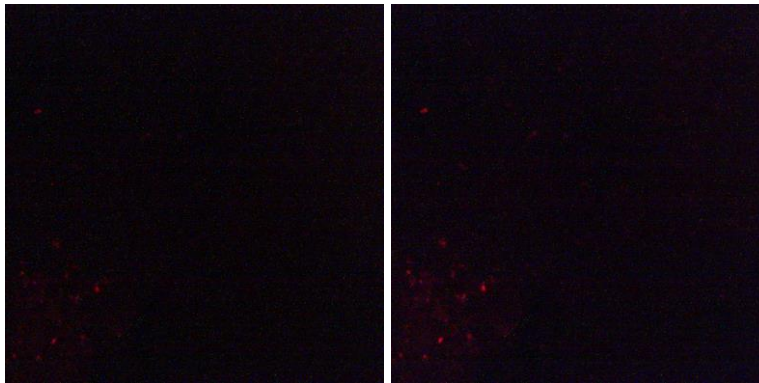
Mikrobiologischer Befund:

- 3 Algen: *Trebouxia* sp
- Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Pilze: *Cladosporium* sp., schwarze Hefen
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 4 Algen: *Trebouxia* sp.
- Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
- Pilze: *Cladosporium* sp., schwarze Hefen
- Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 Ost unten 02

Rz: 29,25µm

Abbildung 72a: Topographie Ou02

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

Mittel: 8,8 Max: 153

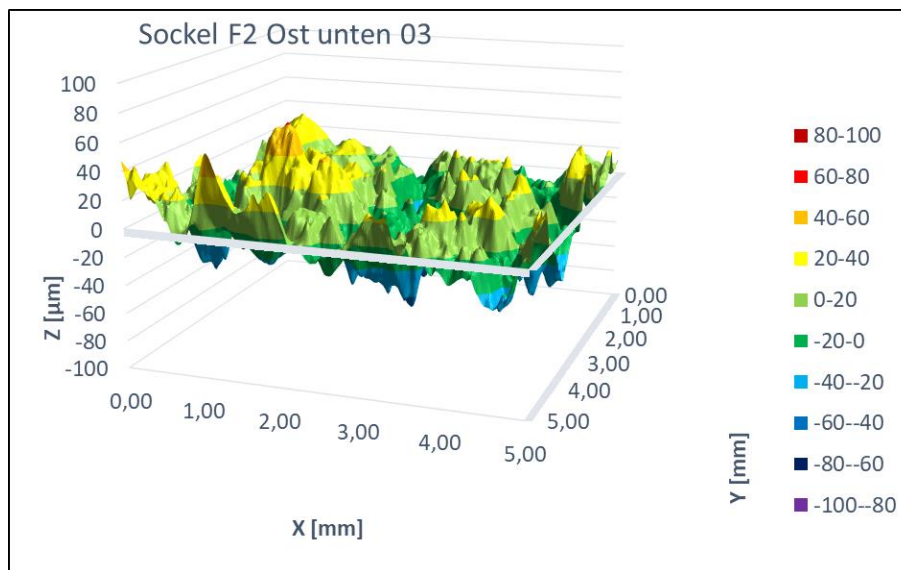
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 10,4 Max: 160

Abbildung 72 b und c: Fluoreszenzbilder Ou02

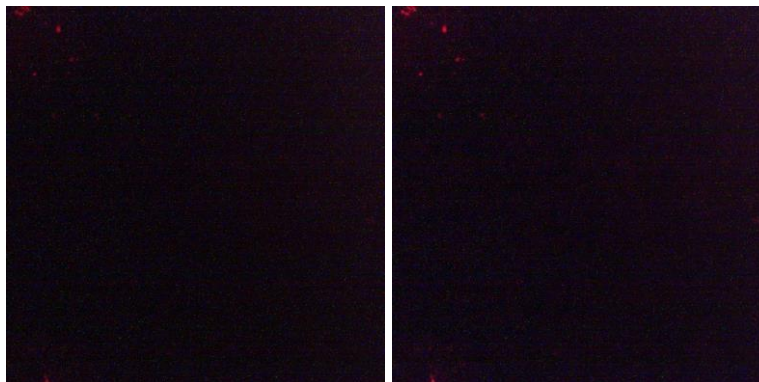
Mikrobiologischer Befund:

- 1 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: *Cladosporium* sp., schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 2 Pilze: *Cladosporium* sp., schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 Ost unten 03

Rz: 48,09µm

Abbildung 73a: Topographie Ou03



365nm a (Grünalgen und Cyanobakterien) 470nm b (Grünalgen)

Mittel: 12,6 Max: 154 Mittel: 14,3 Max: 154

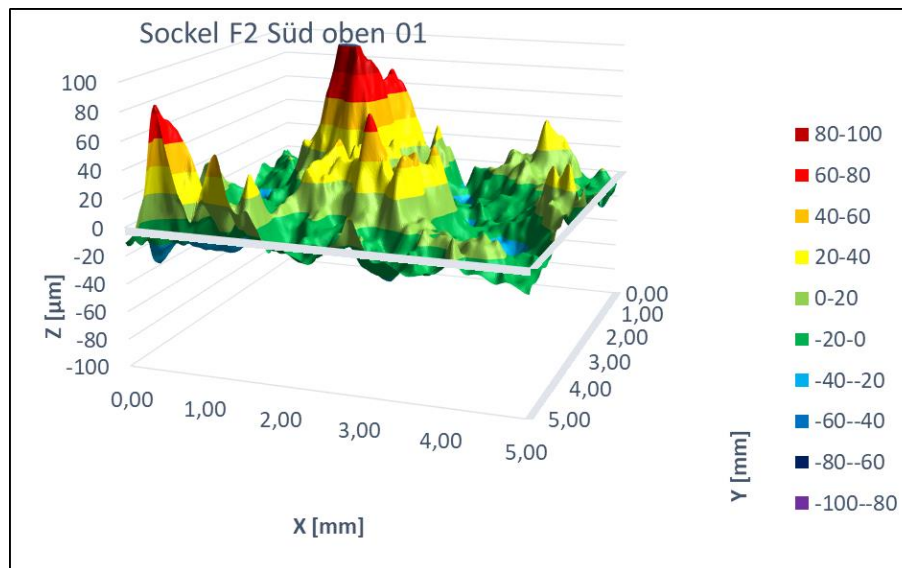
Abbildung 73 b und c: Fluoreszenzbilder Ou03

Mikrobiologischer Befund:

- 5 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: *Cladosporium* sp., schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 6 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: *Cladosporium* sp., schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

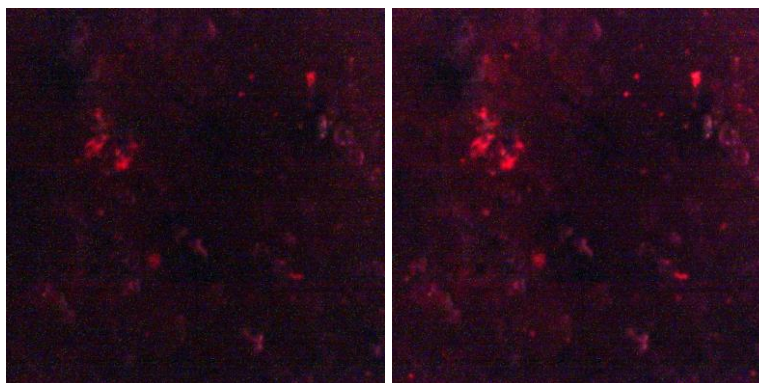


Abbildung 74: Postament Friedrich II. Südseite

Sockel F2 Süd oben 01

Rz: 34,19µm

Abbildung 75a: Topographie So01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 20,0 Max: 177

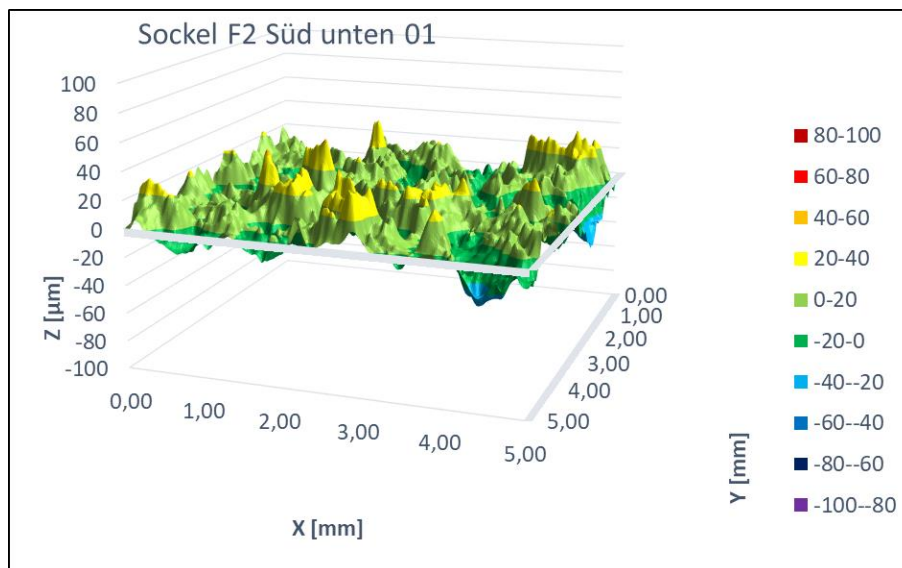
Mittel: 24,7 Max: 198

Abbildung 75 b und c: Fluoreszenzbilder So01

Die rot markierten Erhebungen im Topographiediagramm sind Grünalgenansammlungen.

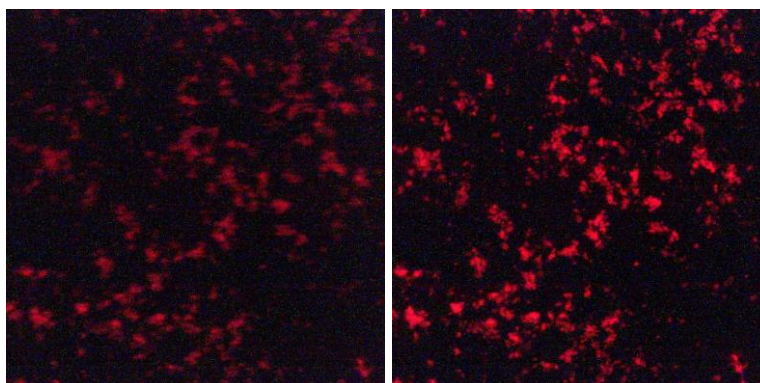
Mikrobiologischer Befund:

- 13 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Flechte: *Lecanora dispersa*
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 14 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Flechte: *Lecanora dispersa*
Diverses: Pollen,

Sockel F2 Süd unten 01

Rz: 47,50µm

Abbildung 76a: Topographie Su01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

Mittel: 17,7 Max: 191

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 19,0 Max: 211

Abbildung 76 b und c: Fluoreszenzbilder Su01

Mikrobiologischer Befund:

- 15 Algen: *Trebouxia* sp.
 Pilze: schwarze Hefen
 Flechte: *Lecanora albescens*
 Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 16 Algen: *Trebouxia* sp.
 Pilze: schwarze Hefen
 Flechte: *Lecanora albescens*
 Diverses: Pollen, Schmutzpartikel



Abbildung 77: Postament Friedrich II. Westseite

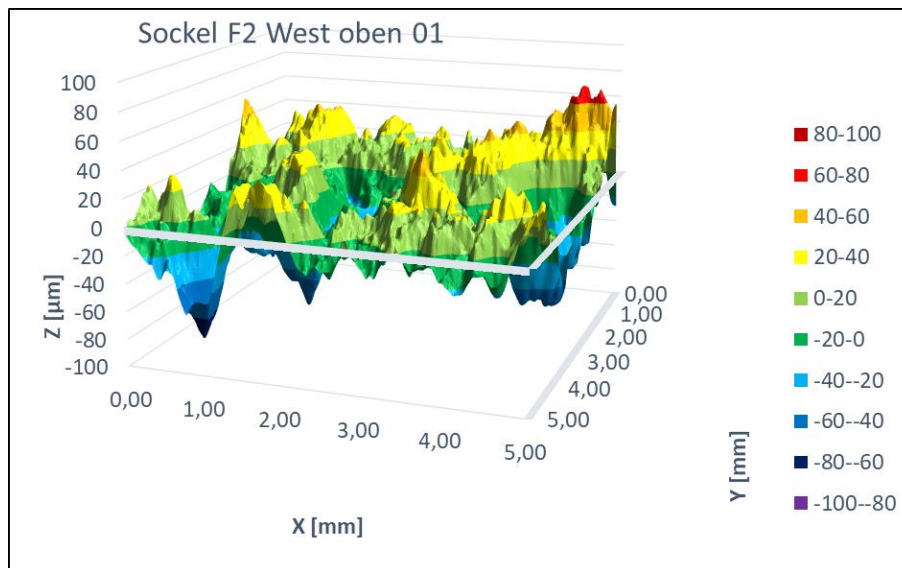
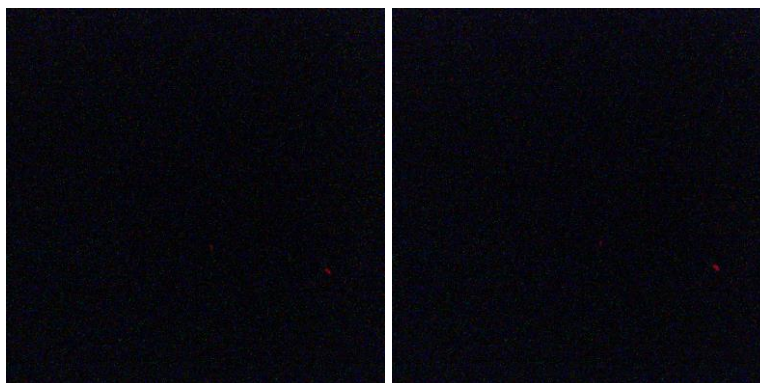
Sockel F2 West oben 01Rz: 59,80 μ m

Abbildung 78a: Topographie Wo01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

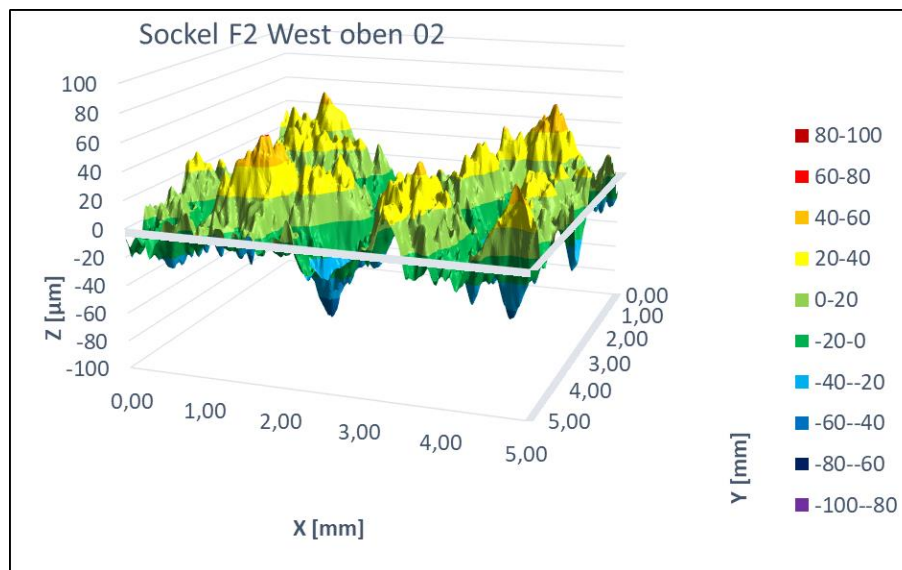
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 8,5 Max: 166 Mittel: 9,0 Max: 170

Abbildung 78 b und c: Fluoreszenzbilder Wo01

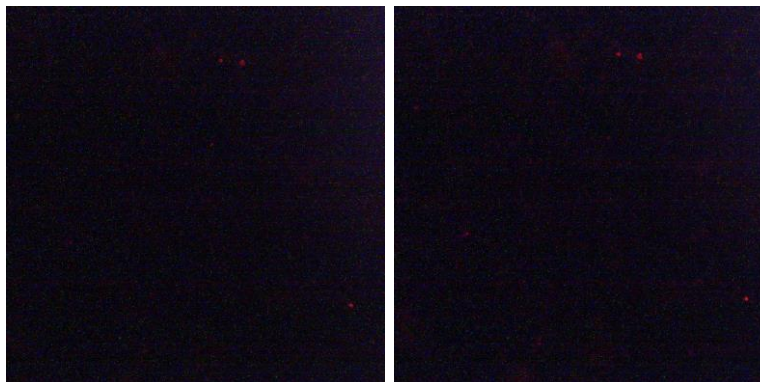
Mikrobiologischer Befund:

- 17 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale und fädige Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 18 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale und fädige Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 West oben 02

Rz: 55,02µm

Abbildung 79a: Topographie Wo02

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

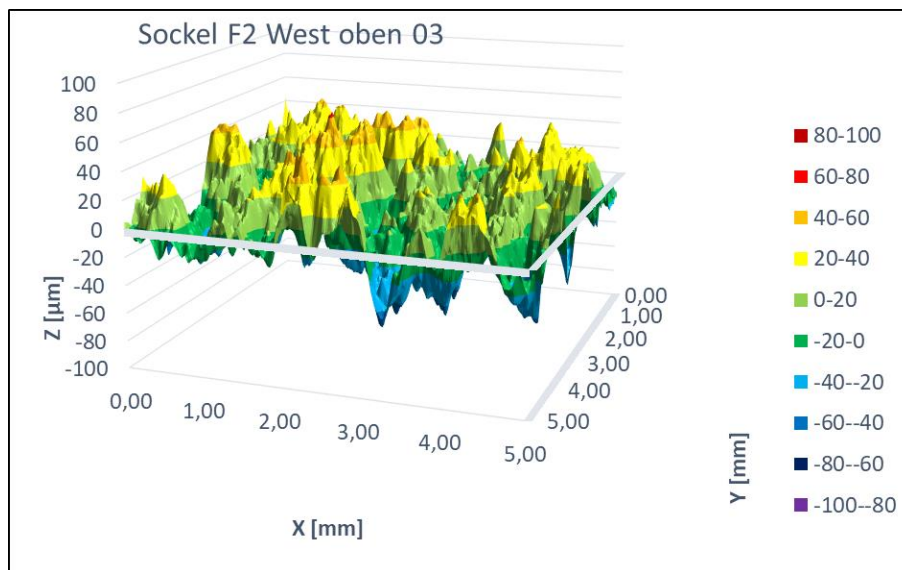
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 13,3 Max: 166 Mittel: 13,5 Max: 166

Abbildung 79 b und c: Fluoreszenzbilder Wo02

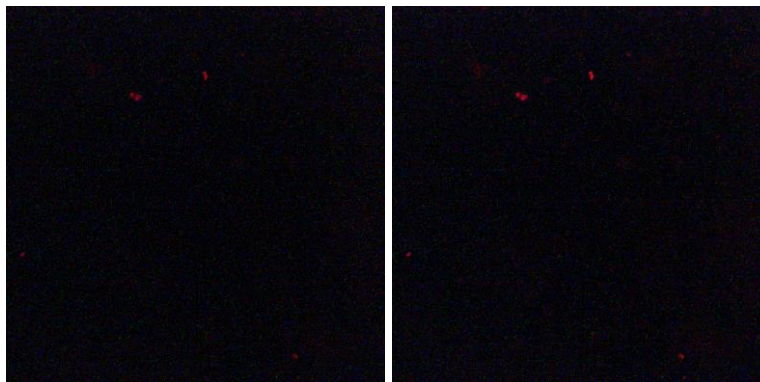
Mikrobiologischer Befund:

- 19 Algen: Trebouxia sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 20 Algen: Trebouxia sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 West oben 03

Rz: 52,58µm

Abbildung 80a: Topographie Wo03

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 7,7 Max: 161

Mittel: 8,3 Max: 178

Abbildung 80 b und c: Fluoreszenzbilder Wo03

Mikrobiologischer Befund:

- 21 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 22 Algen: *Trebouxia* sp.
Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Pilze: schwarze Hefen
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

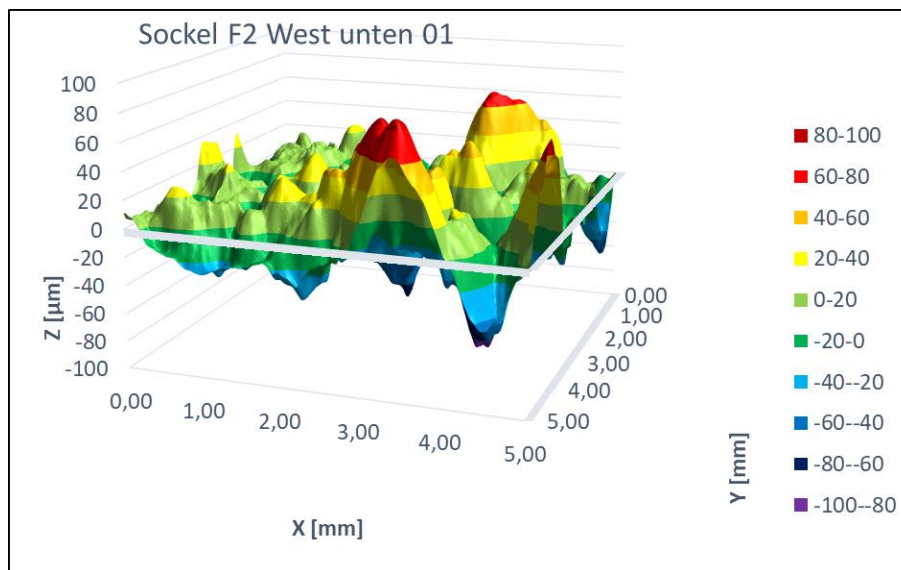
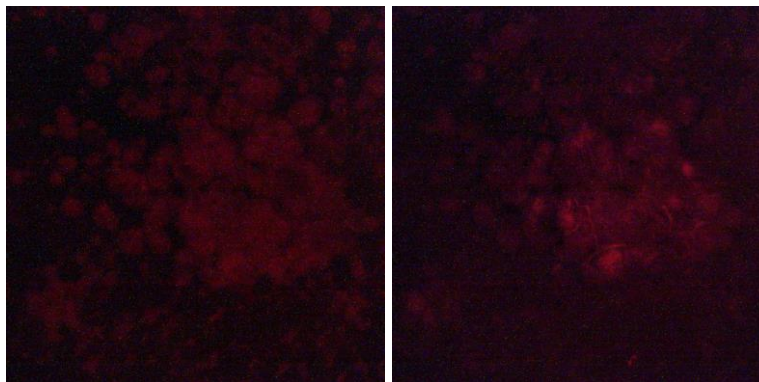
Sockel F2 West unten 01Rz: 59,48 μ m

Abbildung 81a: Topographie Wu01

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

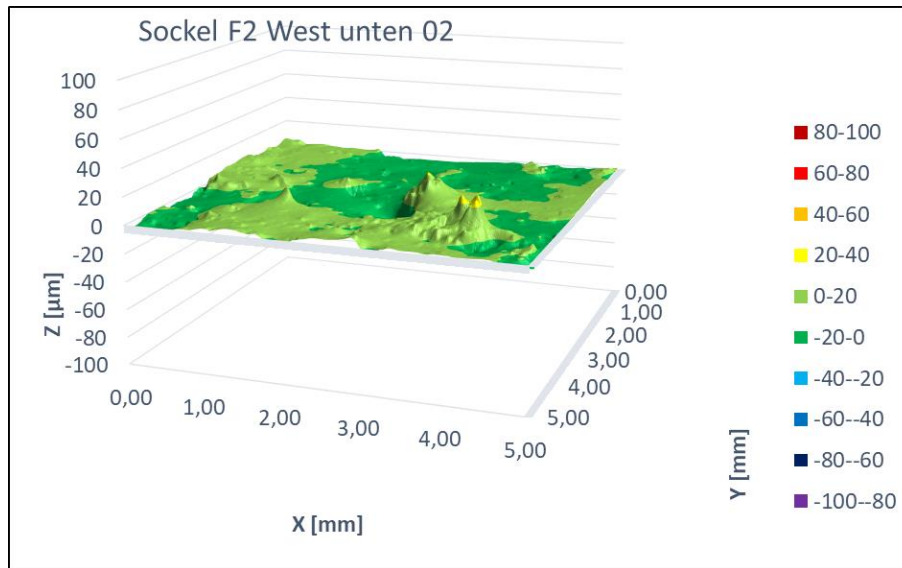
470nm b (Grünalgen)

Mittel: 15,7 Max: 166 Mittel: 17,5 Max: 166

Abbildung 61 b und c: Fluoreszenzbilder Wu01

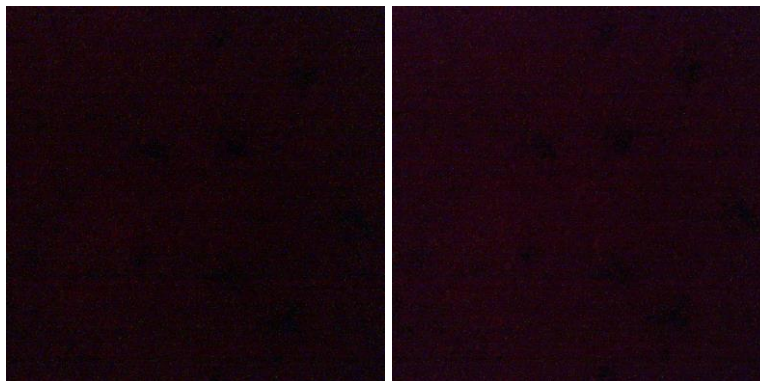
Mikrobiologischer Befund:

- 23 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 24 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Sockel F2 West unten 02

Rz: 9,36µm

Abbildung 82a: Topographie Wu02

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 11,7 Max: 160 Mittel: 14,4 Max: 159

Abbildung 82 b und c: Fluoreszenzbilder Wu02

Mikrobiologischer Befund:

- 25 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 26 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Die Topographie ist ungewöhnlich. Daher werden diese Messungen nicht mit in die Auswertung einbezogen.

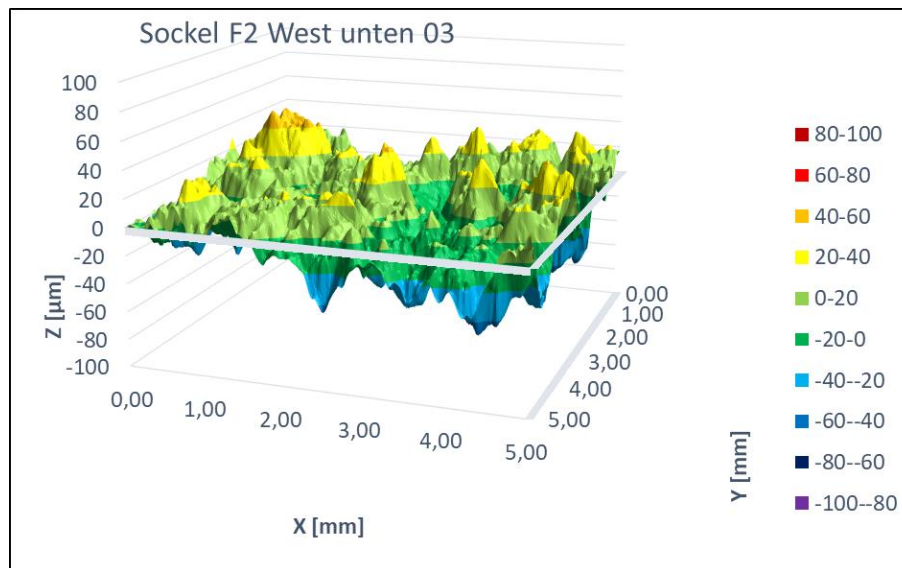
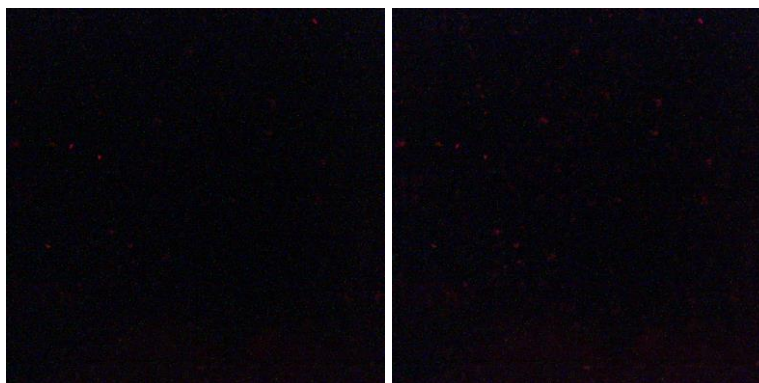
Sockel F2 West unten 03Rz $45,95\mu\text{m}$

Abbildung 83a: Topographie Wu03

365nm a (Grünalgen und
Cyanobakterien)

470nm b (Grünalgen)

Mittel: 7,0 Max: 152 Mittel: 8,4 Max: 157

Abbildung 83 b und c: Fluoreszenzbilder Wu03

Mikrobiologischer Befund:

- 27 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel
- 28 Cyanobakterien: coccale Cyanobakterien
Diverses: Pollen, Schmutzpartikel

Alle untersuchten Probeentnahmestellen zeigen eine Besiedlung von Grünalgen, Cyanobakterien und Pilzen. Darüber hinaus finden sich diverse Pollen und Schmutzpartikel.

Die Grünalge *Trebouxia* sp. kann auf allen Mikroskopieproben dokumentiert werden. Der Befund ist nicht überraschend, da fast alle auf dem Denkmal Friedrich des Großen siedelnden Flechten mit *Trebouxia* – Arten als Phycobiont vergesellschaftet sind, z. B. *Caloplaca citrina*, *Lecanora albescens*, *Lecanora dispersa*, *Phaeophyscia orbicularis*, *Physcia caesia*, *Physcia adscendens*.

Die Cyanobakterien sind sowohl mit coccalen als auch mit fädigen Arten vertreten.

Als Vertreter der Schimmelpilze können schwarze Hefen auf allen Proben nachgewiesen werden, *Cladosporium* sp. nur sporadisch.

Die Dominanz der Cyanobakterien ist augenfällig. Daher sind auch die Cyanobakterien in erster Linie für die dunkel gefärbten Gesteinsoberflächen auf den von ihnen besiedelten Bereichen verantwortlich zu zeichnen.

Bei der Ergebnisauswertung wurde die mittlere Helligkeit der beiden Fluoreszenzbilder bestimmt (0...255). Da es noch keine Kalibrierung und damit auch keine Vergleichsmöglichkeit der beiden Messungen bei 365 nm und 470 nm gibt, ist noch keine Quantifizierung der Ergebnisse möglich.

Vermutlich ist es notwendig, die Helligkeitswerte der 365 nm-Messungen etwa mit einem Wert von 4 zu multiplizieren.

4.3.3 Ergebnisdiskussion

Normiert man den Durchschnitt der Helligkeiten der beiden Aufnahmen (365 nm und 470 nm) auf 0%, so erkennt man, dass der obere Postamentbereich scheinbar stärker als der untere Bereich besiedelt ist, was dem augenscheinlichen Befund widerspricht, betrachtet man die Verschwärzung.

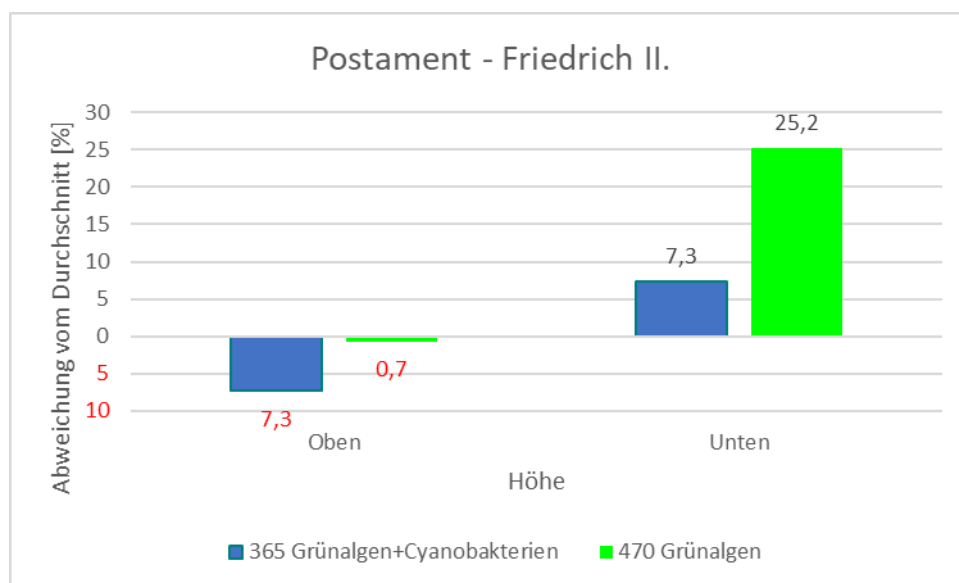


Abbildung 84: Vergleich Postament Fluoreszenz Oben-unten

Eine ähnliche Situation findet man, wenn die Himmelsrichtungsabhängigkeit der Ergebnisse ausgewertet werden. Hier treten die größten positive Abweichungen im Süden auf.

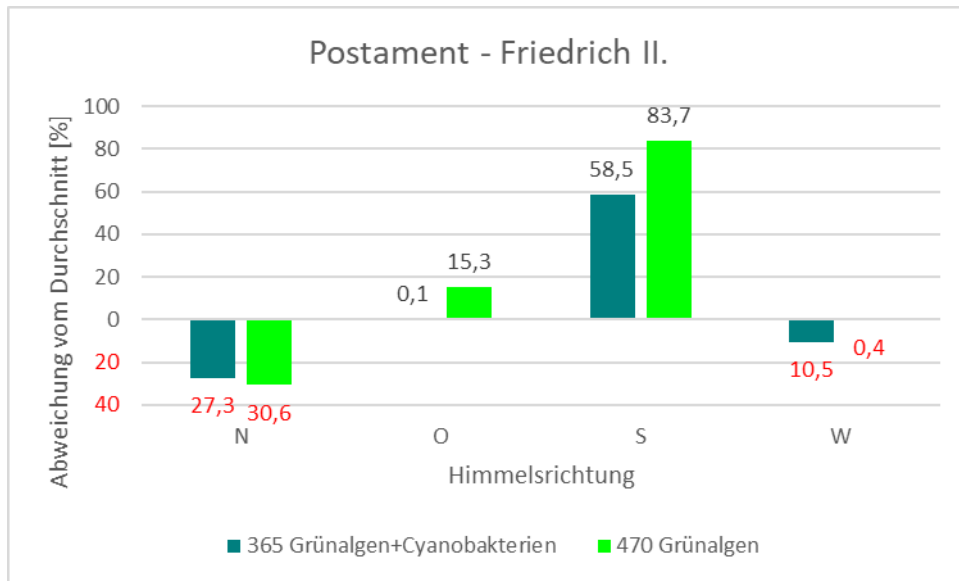


Abbildung 85: Vergleich Fluoreszenz Postament Himmelsrichtungen

Betrachtet man dazu die gemessenen Rauheiten, so sind diese bei höheren biologischen Befunden niedriger, als bei geringeren biologischen Befunden.

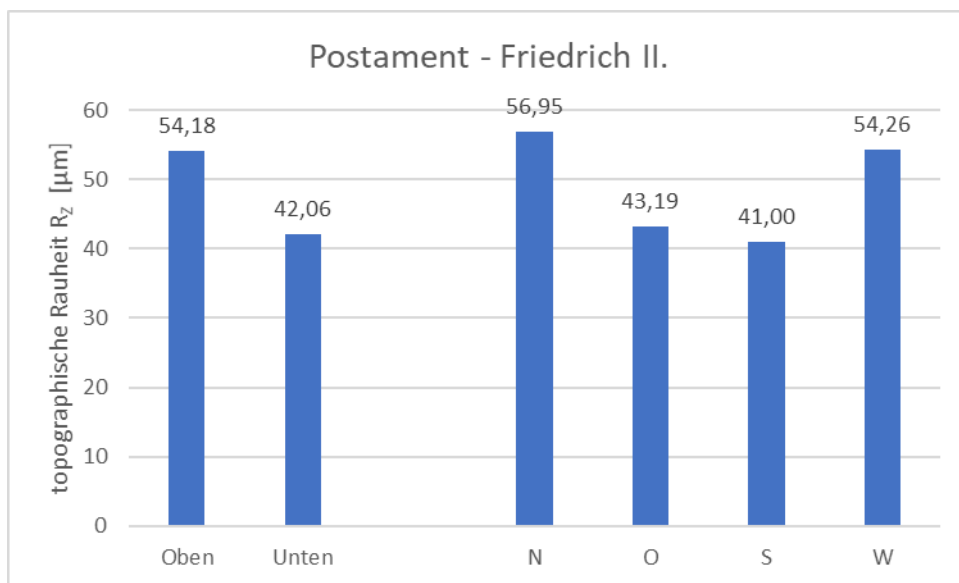


Abbildung 86: Vergleich Postament Rauheiten

Eine Erklärung könnte sein, dass die augenscheinliche Dunkelfärbung auf den verstärkten Befall mit schwarzen Hefen zurückzuführen ist, die im Fluoreszenzlicht nicht sichtbar sind.

Vergleicht man die beiden Standorte, Rheinsberg und Potsdam miteinander, so gibt es mehrere deutliche Unterschiede.

	Rheinsberg (Feuer und Winter)	Potsdam (Postament – F II.)
NO ₂ – Gehalt der Luft [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Neuruppin: 17	Zeppelinstraße: 76
US-Geschwindigkeit [m/s]	>5000	<4000
topographisch Rauheit RZ [μm]	Feuer: 25,28; Winter: 16,33	48,85
Mikrobiologischer Befund	Grünalgen: Pleuro- coccus vulgaris Pilze: Aureobasidium pullulans	Grünalgen: Trebouxia sp. Cyanobakterien, Pilze: Schwarze Hefen

Tabelle 1: Vergleich Rheinsberg-Potsdam

Die mikrobiologischen Besiedlungen beider Standorte unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer auftretenden Arten, als auch hinsichtlich ihrer Quantitäten.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die untersuchten Skulpturen “Feuer” und “Winter” im Schlosspark von Rheinsberg in einem deutlich besseren Zustand als das Postament des “Reiterstandbildes von Friedrich II.” sind. Dies betrifft sowohl die höheren Ultraschallgeschwindigkeiten, wie auch die geringeren Oberflächenrauheiten und die geringeren mikrobiologischen Besiedlungen.

4.4 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Die weiteren Anwendungsmöglichkeiten bestehen im Einsatz bei anderen mineralischen Baustoffoberflächen und Kunstgutoberflächen, wie Wandmalereien und Gemälden.

Dies betrifft in erster Linie den zerstörungsfreien Nachweis mikrobiologischer Besiedlungen und deren Charakterisierung.

Durch die Erweiterung der Methode mit Anfärbetests können unterschiedliche Problemstellungen, wie z.B. “Lebend-Tot-Tests” von mikrobiologischen Besiedlungen bearbeitet werden.

Darüber hinaus ist es mit dieser Methode möglich, den Erfolg von Reinigungsmethoden zu beobachten, um sie zu optimieren.

Gleichzeitig kann diese Methode genutzt werden, um im Rahmen von Langzeitmonitoringprogrammen die Dynamik von Wiederbesiedlungs- und -verschmutzungsprozessen zu beobachten.

5 DISKUSSION

Das Ziel, der Entwicklung einer zerstörungsfreien Untersuchungsmethode für anthropogen bedingter biogene Oberflächenveränderungen von Marmorskulpturen am Beispiel von ausgewählten Objekten der Parkanlagen von Schloss Sanssouci und Schloss Rheinsberg wurde erreicht

Dabei zeigte sich, dass die These, dass es Zusammenhänge zwischen Flechten auf Baumstämmen und auf Oberflächen benachbarter Marmorskulpturen gibt, nicht richtig war. Bestimmend für die jeweiligen Flechtenentwicklungen sind die Besiedlungsunterlage und allgemeine Umweltbedingungen.

In Rheinsberg konnten noch keine Fluoreszenzmessungen vorgenommen werden, da das Messsystem zu diesem Zeitpunkt noch nicht verlässlich arbeitete.

Bei der Geräteentwicklung traten verschiedene Probleme auf, deren Lösungen mehr Zeit beanspruchten, als ursprünglich geplant war. Dies betraf besonders die Unterdrückung der Calcitlumineszenzen, deren Wellenlängen sehr dicht neben denen der Chlorophyllfluoreszenzen liegen.

Zur Bestimmung der Intensität der Fluoreszenzen wurde das Freewareprogramm "ImageJ" verwendet, da diese Funktion noch nicht in der TRACEiT-Software implementiert ist.

Für eine bessere Interpretation der Messergebnisse und deren Quantifizierung ist eine Systemeichung notwendig, durch die die unterschiedlichen Anregungsintensitäten der verwendeten LEDs ausgeglichen werden können.

Das direkte Übereinanderlegen von 3D-Topographie und Fluoreszenzbildern wird derzeit getestet.

In der Projektlaufzeit fanden neun Projekt- und Arbeitstreffen in Potsdam, Hildesheim, Rheinsberg und Würzburg statt.

Die Zusammenarbeit der einzelnen Projektpartner, deren fachlicher und institutioneller Hintergrund, mehrere Restauratoren, Museologen, Physiker, Ingenieure, einem Geologen und Mikrobiologen aus seiner staatlichen Verwaltung, einer Hochschule, einem KMU und selbständigen Labors, war sehr unterschiedlich, gestaltete sich nach anfänglichen Anlaufproblemen sehr fruchtbar und am Ende auch erfolgreich.

6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Die Ergebnisse des Projektes werden im Rahmen eines Fachkolloquiums am 19. Oktober 2018 in Potsdam vorgestellt und diskutiert.

Zu diesem Zeitpunkt sollen die Projektergebnisse in einem FIDA-Arbeitsheft als Publikation vorliegen.

Weitere Teilpublikationen in unterschiedlichen Fachzeitschriften sind ebenso vorgesehen, wie Vorträge auf unterschiedlichen Tagungen und Kolloquien.

Da das Projekt vorrangig die Entwicklung einer Monitoringmethode für die Optimierung von Reinigungstechnologien zum Ziel hatte, steht nun dafür ein effektives Werkzeug zur Verfügung, das von unterschiedlichen Restauratoren genutzt werden kann.

Im Zusammenhang mit der weiteren Anwendung dieser Methode werden besonders die Software weiterentwickelt, sowie zusätzliche Filter und Anfärbechemikalien getestet.

7 FAZIT

Grundsätzlich hat sich der gewählte Lösungsansatz als richtig erwiesen.

Der zeitliche Rahmen, besonders für die Objektuntersuchungen, war sehr eng gefasst.

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

- /1/ **Hüneke, S., Lange, K. Will, R., Hofereiter, R.** (2011): *Die Götter kehren zurück - Marmorkopien für das Französische Rondell im Park Sanssouci - Eine Dokumentation*. Herausgegeben von der Generaldirektion der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, Jaron Verlag GmbH, Berlin.
- /2/ **Geikie, F.R.S.** (1880): *Rock-Weathering, as illustrated in Edinburgh Churchyards*. From Proceedings of the Royal Society of Edinburgh, Vol. X., April 19, 1880.
- /3/ **Rader, K.** (1996): *Restaurierungsdokumentation – Reiterstandbild „Friedrich II.“*. Potsdam.
- /4/ **Landesamt für Umwelt – Brandenburg** (2018): *Klimawandelmonitoring im Land Brandenburg – Basisbericht*. Fachbeiträge des Landesamtes für Umwelt, Titelreihe Heft-Nr. 154, Potsdam.
- /5/ **Gehrmann-Janssen, C., und Petersen, K.** (2014): *Untersuchungen der Mikrobiologie auf Marmoroberflächen - Perspektiven*. In Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8. Konservierungs-wissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: 125-133.
- /6/ **Pohl, E.** (1966): *Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- /7/ **Weinhold, W.** (2016): *TRACEiT -Handbuch V 2.11*, INNOWEP GmbH, Würzburg.
- /8/ **Snethlage, R.** (2017): *Über die Fluoreszenz von Chlorophyll*. Unveröffentlichtes Manuskript, Bamberg.
- /9/ **Gaft, M., Reifeld, R., Panczer, G.** (2005): *Modern Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials*, Springer, Berlin-Heidelberg.
- /10/ **Simon S, Snethlage R** (1994): *Kruste oder Patina? Verwitterungsformen im Oberflächenbereich kristallinen Marmors*. In R. Snethlage, Hrsg, Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 77-83. Verlag Ernst & Sohn Berlin.
- /11/ **NICHIA** (2018): *Datenblatt- NVSU233B(T)*, Nichia Corporation, Tokushima.
- /12/ **NICHIA** (2018): *Datenblatt- NCSB219BT-VI*, Nichia Corporation, Tokushima.
- /13/ **EDMUND OPTICS** (2018): *Produktkatalog*, Edmund Optics, Barrington.

Weitere Literatur und Quellen:

Damjanovic, Sandra (2014): Prüfmethode zur Messung von umweltbedingten Oberflächenveränderungen und Materialverlusten am Marmorskulpturen. In *Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen*. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: 45-50.

Dennings, Eberhard (1968): *Ergebnisse aus Untersuchungen zum mineralogischen Aufbau von Marmor*. Denkmalpflege Baden-Württemberg. Stuttgart.

Dornieden, Thomas, Gorbushina, Anna, A. und Krumbein, Wolfgang E. (2000): *Patina*. In: Ciferri, Tiano, Mastromei Hrsg. (2000): *Of Microbes and Art*, S. 105-119, Kluwer Academic Press, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow

Gehrmann, C. K. (1987): *Über den Einfluß silicoler und calcicoler Flechten auf Grabsteine jüdischer Friedhöfe unter besonderer Berücksichtigung von Standortbedingungen und Biokorrosionsprozessen*. Diploma: Oldenburg

Gehrmann, C. K., Krumbein, W. E. K. und Petersen, K. (1988): *Lichen weathering activities on mineral and rock surfaces*. *Studia Geobotanica* 8: 33-45

Gehrmann, C. K., Petersen, K. und Krumbein, W. E. K. (1988): *Silicole and calcicole lichens on jewish tombstones - interactions with the environment and biocorrosion*. In *6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* (Nicolas Copernicus University, ed.). Supplement: 33-38. Torun: Press Department.

Gehrmann; C. K., Krumbein, W. E. K., und Petersen, K. (1992): *Endolithic lichens and the corrosion of carbonate rocks - a study of biopitting*. *International Journal of Mycology and Lichenology* 5: 37-48.

Gehrmann-Janssen, C. (1995): *On the Biocorrosion by epilithic and endolithic lichens on carbonate rocks - biophysical and biochemical weathering aspects*. Ph. D. Thesis: Oldenburg

ICOMOS, International Scientific Committee for Stone (ISCS) (2010):, *Illustrated glossary on stone deterioration patterns, English-German Version, 2010*; http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Icomos_Glossar_deutsch-englisch%5B1%5D.pdf

Köhler, W. (1989):, *Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara Marmor in Potsdam Sanssouci*, Jahr der Veröffentlichung: 1991, veröffentlicht in *Kulturabkommen*, Dresden 1991 durch Herausgeber LDA Hannover, S. 50-54

Köhler, W.(1990): *Das Französische Figurenrondell im Park Sanssouci*. Kurztexzte zur Denkmalpflege; IRB-Bibliothek: DEUBA. MONUFAKT

Köhler, W., Krannich, K. (1981): *Untersuchungen zu Schadensursachen an Marmorskulpturen*, Herausgeber: *Neue Museumskunde Theorie und Praxis der Museumsarbeit* 24/4, S. 272-274

Köhler, Wolfram (2014): *Leitfaden für Ultraschallmessungen an Marmorskulpturen*. In *Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen*. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: 37-44.

Lange, Kathrin, Will, Roland (2014): Verwittert-Deponiert-Konservieren-Rekonstruieren? Die 24 Marmorskulpturen von der Fassade der Neuen Kammern im Park Sanssouci. In Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: 71-81.

LfU Baden Württemberg (ohne Jahreszahl): Eine Handreichung zum Indikator „Veränderungen des Bestandes an Flechten zur Ermittlung der Luftqualität“ in Arbeitsmaterialien Agenda-Büro Nr. 27; Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

Röhler, Hansjürgen (1979): Lehrbuch der Mineralogie. 4. Auflage. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

Sieler Kurt (2010): Fälschungen im Kunstrechtsstreit. In: Weller, Kemke, Dreier, Lynen Hrsg. (2010): Kunst im Markt – Kunst im Recht, S. 173. Verlage Nomo Baden-Baden, Dike Zürich, Facultas Wien

Snethlage Rolf, Pfanner Michael (2013):. Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßsnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2013.

Snethlage, Rolf (2014): Marmorkonservierung: Maßnahmen mit einer Risikokennziffer begründen und entscheiden – Realistischer Wunsch oder Fiktion?. In Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: 51-70.

Snethlage, Rolf (2014): Skulpturenmarmor – Beispiele-Pore Aspect Ratio-Bewertung mit Ultraschall. In Erhaltung von Marmorskulpturen unter mitteleuropäischen Umweltbedingungen. Beiträge des 8. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 17. Oktober 2014 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums Nr. 32: 21-30.

SPSG (2014): Historische Gärten im Klimawandel. Empfehlungen zur Bewahrung, Herausgeber: Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), 368 Seiten

Tretiach, Mauro, Stefano Bertuzzi, und Fabio Candotto Carniel (2012):. „Heat shock treatments: A new safe approach against lichen growth on outdoor stone surfaces“. Environmental Science & Technology 46, Nr. 12 (2012): 6851–59.

VDI-Richtlinie 3957 Blatt 13, „Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation) - Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte“

Beutler Martin (1998): Entwicklung eines Verfahrens zur quantitativen Bestimmung von Algengruppen mit Hilfe computergestützter Auswertung spektralaufgelöster Fluoreszenzanregungsspektren. Diplomarbeit Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Kiel

Richter Gerhard (1998): Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. Georg Thieme Verlag Stuttgart.

Schönmann Frank (1997/99): Chloroplasten als Orte der Photosynthese. LK Biologie

Simon S, Snethlage R (1994): Kruste oder Patina? Verwitterungsformen im Oberflächenbereich kristallinen Marmors. In R. Snethlage, Hrsg, Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, Band 4-1992, S. 77-83. Verlag Ernst & Sohn Berlin

wikipedia.org/wiki/Chlorophylle

wikipedia.org/wiki/Chlorophyllfluoreszenz

wikipedia.org/wiki/Elektronentransportkette

wikipedia.org/wiki/Kautsky-Effekt

wikipedia.org/wiki/Lichtsammelkomplex

wikipedia.org/wiki/Multiplizität

wikipedia.org/wiki/Photosynthese

wikipedia.org/wiki/Photosynthese

[wikipedia.org/wiki/Photosynthetisches Reaktionszentrum](http://wikipedia.org/wiki/Photosynthetisches_Reaktionszentrum)

[wikipedia.org/wiki/Photosystem I](http://wikipedia.org/wiki/Photosystem_I)

wikipedia.org/wiki/Protonengradient

www.membranproteine.net/fluoreszenzspektroskopie-o.pdf

www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/.../V04 -fluoreszenz.pdf

www.uni-konstanz.de/FuF/.../Photosynthese-Biophysik & Fluo-Methoden VTK 2008.pdf

www.fluomin.org/uk/fiche.php?id=157

DANKSAGUNG

Ohne die Unterstützung der Bundestiftung Umwelt, von Herrn Dr.P.Bellendorf, Herrn Prof.Dr.R.Snethlage, den Mitarbeitern der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg, besonders der Chefrestauratorin Frau K.Lange und des Skulpturenrestaurierungswerkstattleiters Herrn R.Will, wäre ein solch umfangreiches Projekt nicht denkbar gewesen. Ihnen allen sei hiermit ebenso gedankt, wie Frau Prof.Dr.K.Petersen und Frau Dr.C.Gehrmann-Janßen von der HAWK-Hildesheim für ihre unermüdliche Mitarbeit in allen Projektphasen und hilfreichen Beratungen bei mikrobiologischen Fragestellungen. Die kreativen Hard- und Softwarelösungen aus dem Hause INNOWEP waren die Voraussetzung für den Erfolg dieses Projektes. Herrn Dr.W.Weinhold, Herrn Dipl-Phys.J.Schary und Herrn Dipl.-Phys.Ch.Groß gilt hierfür ebenso mein Dank, wie meiner Frau, Dipl.Museologin I.Köhler, für ihre zuverlässige Unterstützung und Mitarbeit