



Forschungsprojekt AZ 33326

**„Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Konservierung umweltgeschädigter, historisch wertvoller Putz- und Steinoberflächen sowie zur Mauerwerkstüchtigung unter dauerfeuchten Bedingungen und mikrobiellen Belastungen an der Mikwe in Worms“**

Abschlussbericht von Michael Auras, Oliver Hahn, Cornelia Gehrman-Janssen,  
Karin Keller, Karen Petersen, Beate Skasa-Lindermeir, Eberhard Wendler

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

## Projektnehmer:

Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz

## Kooperationspartner

Stadt Worms

Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim

MKP GmbH, Weimar

Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege, München

Projektlaufzeit: 06.12.2016 - 31.01.2020

## Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht beinhaltet eine Zusammenfassung der wichtigsten Arbeitsergebnisse. Eine ausführliche Version ist in gedruckter Version erhältlich beim Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz, als IFS-Bericht Nr. 58 (2019), s. <https://ifs-mainz.de/veroeffentlichungen/ifs-berichte>.

## **Autorinnen und Autoren**

### **Dr. Michael Auras**

Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz

### **Dr. Cornelia Gehrman-Janßen**

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim

### **Dipl.-Ing. Oliver Hahn**

MKP GmbH, Weimar

### **Dipl.-Rest. Karen Keller**

Keller-Restaurierungen, Köln

### **Prof. Dr. Karin Petersen**

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim

### **Dipl.-Rest. Beate Skasa-Lindermeir**

Wolfenbüttel

### **Dr. Eberhard Wendler**

Fachlabor für Konservierungsfragen in der  
Denkmalpflege, München

**Abstract<sup>1</sup>**

The Mikveh of Worms was built in the late 12th century. The construction resembles a quadrangular underground tower. On its bottom, groundwater percolates through the walls and fills a water basin formerly used as a ritual bath. After periods of lacking maintenance, misuse, and vandalism, the structure is now characterized by unfavourable conditions such as high humidity, high salt content of the masonry, strong variations of the indoor climate and intensive growth of mould and algae. These parameters have led to heavy damage of stone, lime plaster, and masonry. Black gypsum crusts cover the surfaces, complex salt mixtures deteriorate the building materials, and the masonry is unstable due to the leaching of lime binder from the historic mortars.

Nevertheless, some decorative elements still exist. Three small columns made of sandstone and a few remnants of the original plaster have been preserved. After a careful examination of the building materials and the multiple damage processes, tests were carried out to evaluate various cleaning methods and conservation materials. Laser cleaning was tested on stone and plaster surfaces using different devices and varying parameters. Silicic acid ester was used for the strengthening of stone, nanolime for the strengthening of plaster. To reduce microbiological growth, tests were performed using UV-A radiation and photocatalytic active titania. Indoor climate was measured for comparison in different medieval Mikvaot and based on the results a ventilation system has now to be planned and evaluated for the Mikveh of Worms. Based on many careful steps a concept for the conservation and restoration of the Mikveh is under development, combining the requirements of different disciplines and regarding the authenticity of this unique historic structure.

**Zusammenfassung**

Die Mikve von Worms wurde im späten 12. Jahrhundert erbaut. Die Konstruktion ähnelt einem viereckigen unterirdischen Turm. Auf seinem Boden sickert Grundwasser durch die Wände und füllt ein Wasserbecken, das früher als rituelles Bad genutzt wurde. Nach Perioden mangelnder Wartung, groben Missbrauchs und Vandalismus ist das Bauwerk heute durch ungünstige Bedingungen wie hohe Luftfeuchtigkeit, hohen Salzgehalt des Mauerwerks, starke Schwankungen des Raumklimas und intensives Wachstum von Schimmel und Algen gekennzeichnet. Diese Parameter haben zu schweren Schäden an Stein, Kalkputz und Mauerwerk geführt. Schwarze Gipskrusten bedecken die Oberflächen, komplexe Salzmischungen schädigen die Baustoffe, und das Mauerwerk ist aufgrund der Auslaugung von Kalkbindemittel aus den historischen Mörteln instabil.

Dennoch sind noch einige dekorative Elemente vorhanden. Drei kleine Säulen aus Sandstein und einige Überreste des ursprünglichen Putzes sind erhalten geblieben. Nach einer sorgfältigen Untersuchung der Baumaterialien und der multiplen Schadensprozesse wurden Tests durchgeführt, um verschiedene Reinigungsmethoden und Konservierungsmittel zu bewerten. Die Laserreinigung wurde auf Stein- und Putzoberflächen mit verschiedenen Geräten und unterschiedlichen Parametern getestet. Kieselsäureester wurde für die Festigung von Stein, Nanokalk für die Festigung von Putz verwendet. Um das mikrobiologische Wachstum zu reduzieren, wurden unter anderem Tests mit UV-A-Strahlung und photokatalytisch aktivem Titandioxid durchgeführt. Das Raumklima wurde zum Vergleich in Worms und in mehreren mittelalterlichen Mikwen gemessen. Aufgrund der Ergebnisse gilt es nun, ein Belüftungssystem für die Mikveh von Worms zu planen und zu evaluieren.

Auf der Grundlage vieler sorgfältiger Schritte wird derzeit ein Konzept für die Konservierung und Restaurierung der Mikve entwickelt, das die Anforderungen verschiedener Disziplinen miteinander verbindet und dabei die Authentizität dieses einzigartigen historischen Bauwerks wahrt.

---

<sup>1</sup> A paper in English language will be published in the Proceedings of the 14. International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone (Stone2020). Siegesmund, S. & Middendorf, B. (eds.): Monument Future: Decay and Conservation of Stone, Mitteldeutscher Verlag, Halle.

## **Einführung**

Die Mikwe Worms wurde 1185/86 erbaut und war bis zum frühen 19. Jahrhundert rituell genutzt. Später wurde sie als Abwassergrube missbraucht und in den letzten Jahren des 19. Jahrhunderts ausgegraben und gereinigt. 1938 und 1942 wurde sie durch Vandalismus zerstört. In den späten 1950er Jahren wurden Reparaturmaßnahmen durchgeführt (Angaben zur Bau- und Restaurierungsgeschichte nach Kayser 2019).

Die Mikwe von Worms ist ein wichtiger Teil des mittelalterlichen jüdischen Erbes in Deutschland und steht zusammen mit anderen Denkmälern der SchUM-Städte Speyer, Worms und Mainz auf der deutschen Tentativliste für die Bewerbung als UNESCO-Welterbe.

Das Bauwerk ist unterirdisch gelegen, und etwa 8 m unter Geländeneiveau befindet sich ein Wasserbecken, das vom Grundwasser gespeist wird. Vom Eingang führt die obere Treppe zum Vorraum, von dem man über die untere Treppe zum Badebecken gelangt. Das Becken befindet sich am Fuß des vertikalen Badeschachtes. Grundriss und Querschnitt geben die Konstruktionsweise wieder (Abb. 1). Zwischen Vorraum und Schacht befindet sich ein großes offenes Fenster, das durch Pfosten und Riegel unterteilt ist.

Die Hauptprobleme des Bauwerks sind die Destabilisierung des Mauerwerks, die schädigende Wirkung löslicher Salze und ein intensives Wachstum von Grünalgen und Schimmelpilzen. All diese Probleme lassen sich auf die Wirkung von Wasser in Kombination mit anderen Parametern zurückführen.

Die Tragwerksuntersuchungen sowie das Konzept zur statischen Ertüchtigung wurden durch das Büro Barthel & Maus, München, außerhalb des hier vorgestellten Projektes (aber zeitlich parallel) erarbeitet und wurden von Maus (2019) publiziert. An dieser Stelle wird nicht weiter darauf eingegangen.

## **Baustoffe**

Das Bauwerk ist hauptsächlich aus rotem Buntsandstein lokaler Herkunft errichtet, der aller Wahrscheinlichkeit nach aus der Region Eisenberg-Carlsberg stammt. Er ist mittelkörnig und hauptsächlich durch Quarz, aber auch durch ferritische und tonhaltige Gesteinskörnungen zementiert.

Für die dekorativen Elemente im Vorraum wurde gelblichbrauner Sandstein aus dem Unterrotliegend verwendet, der früher in zahlreichen Steinbrüchen in der Region Rheinhessen/Nordpfalz gewonnen wurde (Typlokalität Flonheim) und hohe Anteile an Tonmineralien enthält.

Die Gewölbe der unteren Treppe und teilweise auch des Vorraums sind aus einem porösen Kalksinterstein unbekannter Herkunft gebaut.

Die Erhaltung von Resten des Originalputzes einschließlich gestalteter Oberfläche in einer mittelalterlichen Mikwe ist in Deutschland einzigartig. An einem Bogen im Vorraum befindet sich ein Putz mit spezieller Fugenritzung, einer sogenannten pietra rasa, wie sie für die Romanik typisch ist. Die pietra rasa wird durch Ritzung in den frischen, noch weichen Putz hergestellt und imitiert die Fugen einer sehr regelmäßigen Steinquaderung. Bereits bei einer früheren Untersuchung wurden Spuren einer früheren roten Farbfassung auf dem Putz gefunden (Bormann 2010).

Als Mauer- und Putzmörtel wurde Kalkmörtel verwendet. Das Kalkbindemittel enthält geringe Mengen an hydraulischen Komponenten, aber keine dolomitischen Anteile. Es ist anzunehmen, dass

als Rohstoff zur Bindemittelproduktion eines der nahegelegenen Vorkommen von tertiärem Kalkstein genutzt wurde. Als Zuschlagstoffe wurden Sand und Kies aus dem Rhein verwendet.

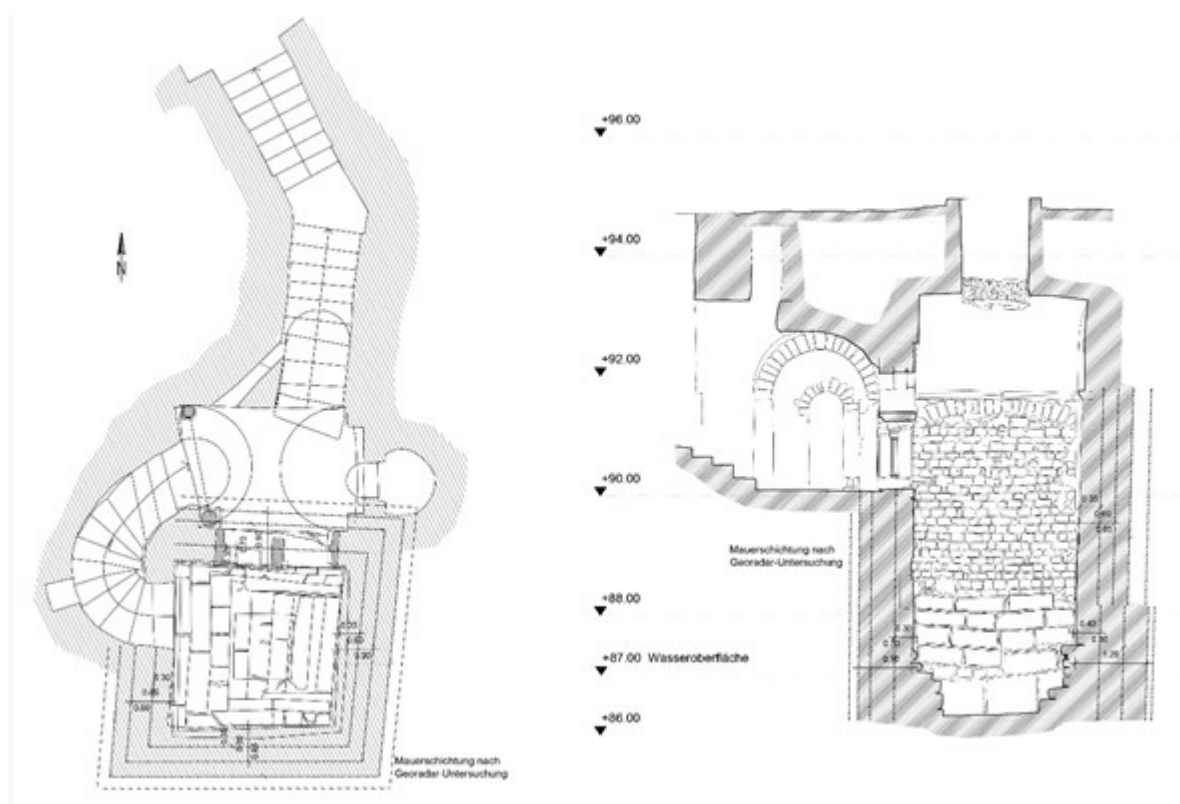


Abb. 1: Die bauliche Anlage der Mikve Worms in Grundriss und Querschnitt in N-S-Richtung (aus Kayser 2019)

In den 1950er Jahren wurden als Reparaturmaterialien gelbgebrannte Ziegelsteine sowie Zementmörtel und Beton verwendet. Die Reparaturmörtel und Betone weisen als Bindemittel einen alkalireichen Zement auf.

### Schadensphänomene

Die wenigen erhaltenen, aus Sandstein gearbeiteten Bauzeierelemente im Vorraum sind extrem geschädigt. Auch der Putz ist weitestgehend verloren und seine letzten Reste sind destabilisiert und lösen sich von der Wand (Abb. 2a). Zudem sind sie von schwarzen Gipskrusten bedeckt.

Ebenso sind die Sandsteinoberflächen zum großen Teil von schwarzen Krusten bedeckt, die aus Gips, Schmutz und Resten von mikrobiologischem Material bestehen (Abb. 2b + 2c-DS). Andere Sandsteinoberflächen weisen aufgrund der Anwesenheit von löslichen Salzen ein intensives Absanden auf. Die Wandoberflächen sind durch mikrobiologischen Bewuchs mit Schimmelpilzen und, wo sie dem Licht ausgesetzt sind, mit Grünalgen und untergeordnet mit Cyanobakterien gekennzeichnet (Abb. 2d).

Im mittleren und unteren Teil des Badeschachtes ist das Kalkbindemittel aus dem Setzmörtel des Mauerwerks ausgewaschen worden. Ursache hierfür ist Niederschlagswasser, das im überdeckenden Boden versickert und in das Mauerwerk eingedrungen ist (Abb. 3). Die Auswaschung des Kalkbindemittels aus den Fugen hat einerseits zur Destabilisierung des Mauerwerks geführt (Mau 2019), andererseits zur Bildung mehrlageriger Kalksinterkrusten auf den Oberflächen von Putz und

Stein (Abb. 2e), die nicht zu verwechseln sind mit dem bereits erwähnten Kalksinterstein. Diese Kalksinterkrusten sind teilweise von Mikroorganismen durchwachsen und können mehrere Millimeter dick werden (Abb. 2f).

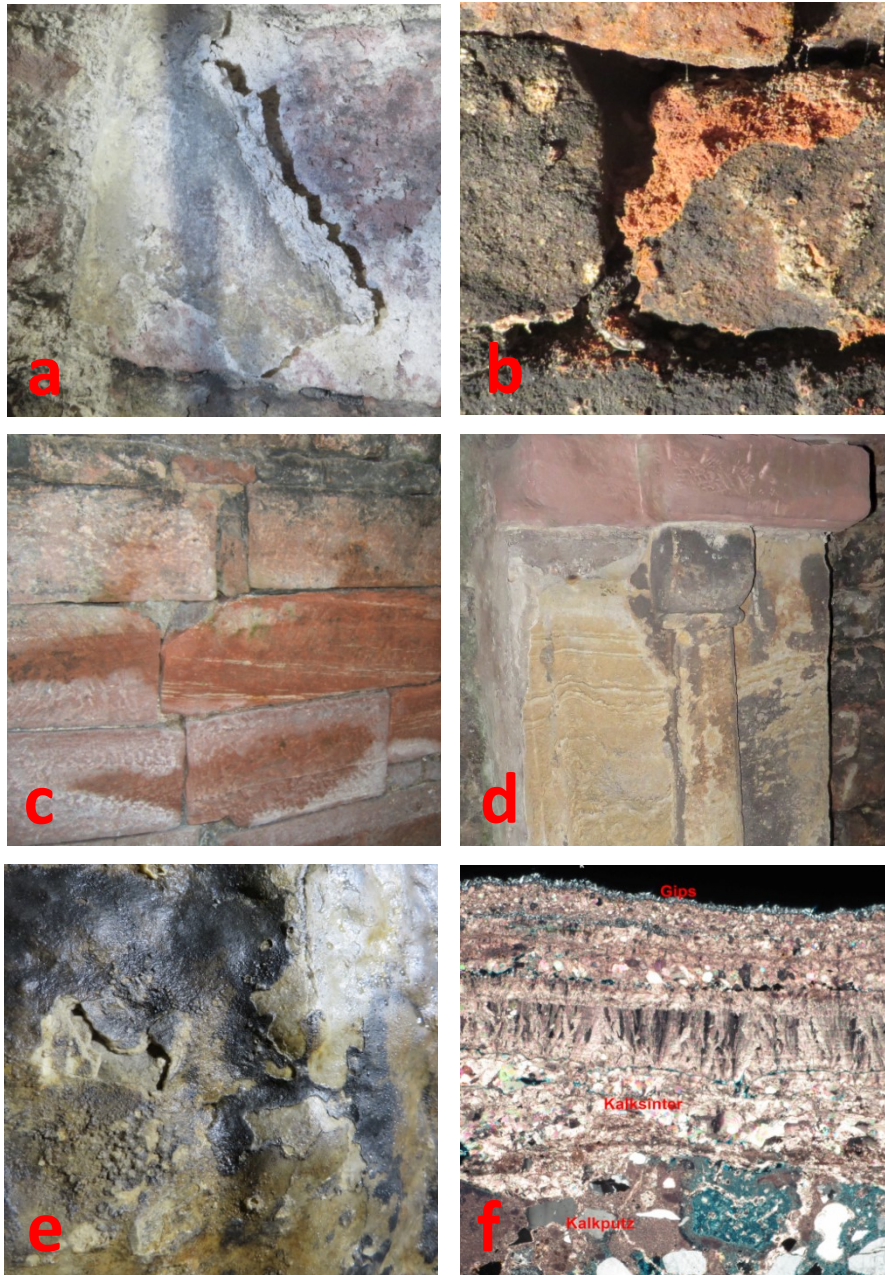


Abb. 2: Schadensphänomene in der Mikwe: a) Ablösung einer Putzscholle von der Wand; b) Buntsandstein mit schwarzer Kruste und starkem Absanden; c) Buntsandstein mit Salzausblühungen; d) Rotliegend-Sandstein mit Absanden und schwarzer Kruste; e) Mehrlagige Kalksinter auf Wandoberfläche; f) Dünnschliffaufnahme mit Kalkputz (unten), Kalksinter (mitte) und Gipsauflagerung (oben)



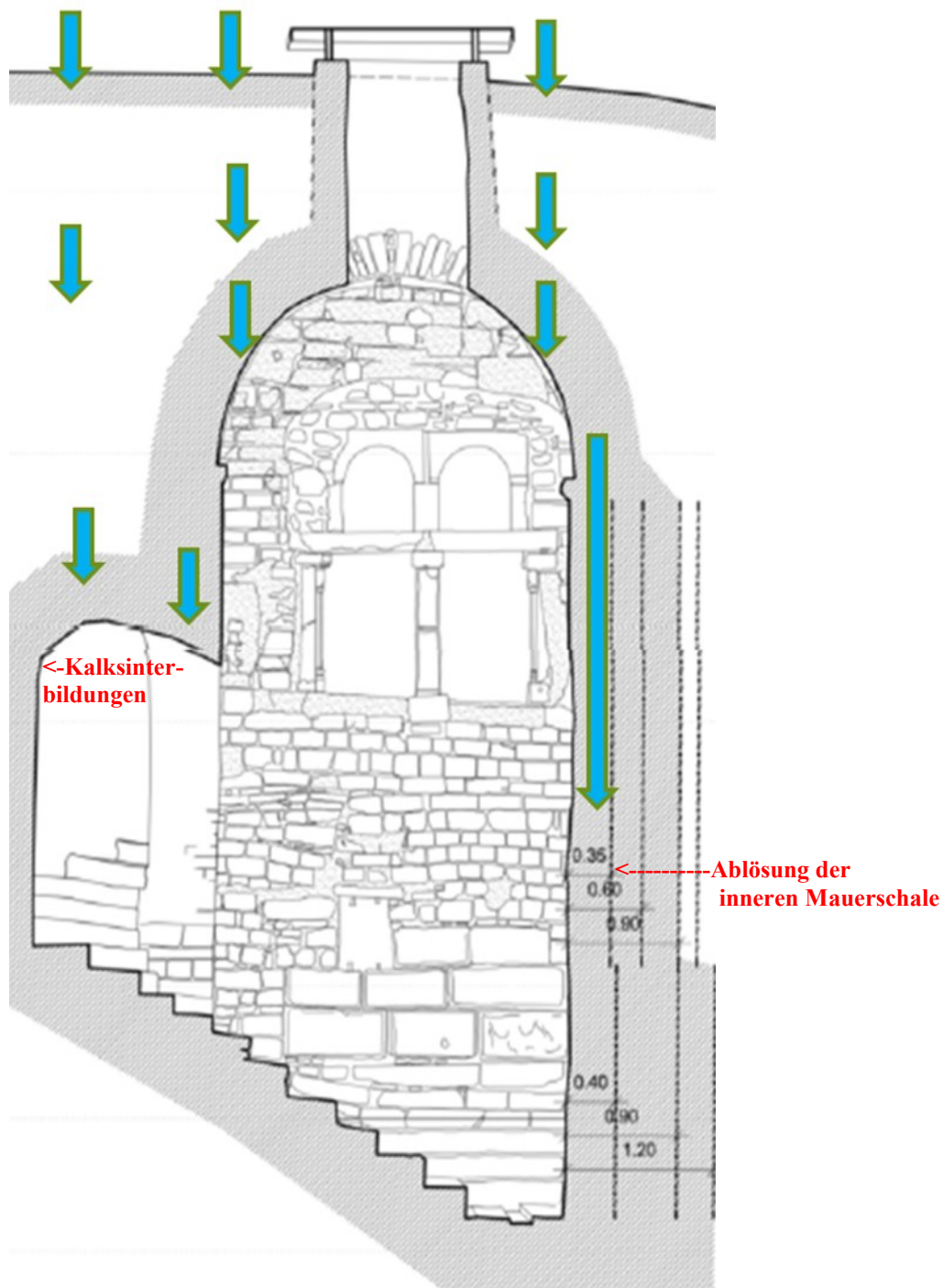


Abb. 3: Schematische Darstellung des Eindringens von Niederschlagswasser (blau) in die Konstruktion (Querschnitt Ost-West).

Die Ursachen der Schäden sind vielfältig und es besteht dringender Bedarf einer Konservierung. Betrachtet man jedoch die verschiedenen Faktoren, die Einfluss auf die Raumschale der Mikwe nehmen, so wird ein recht komplexes System erkennbar (Abb. 4). Die Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren verdeutlicht, dass jede Einzelmaßnahme sorgfältig abzuwägen ist, da jeder Eingriff in dieses System Auswirkungen auf weitere Faktoren hat.

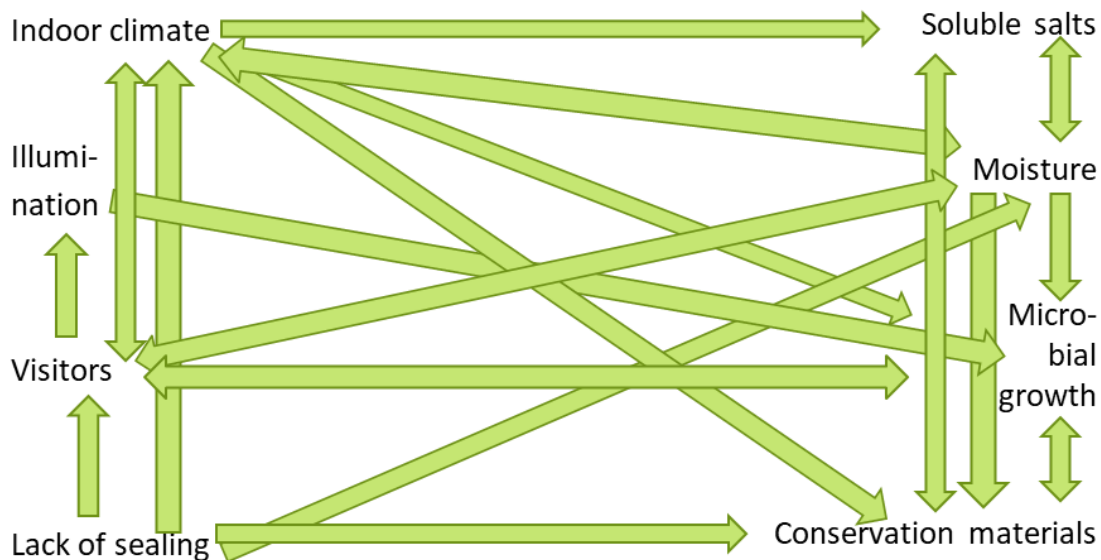


Abb. 4: Einflussfaktoren und Wechselwirkungen in der Raumschale der Mikwe

### Bauschädliche Salze

In den Baustoffen der Mikwe sind verschiedenste wasserlösliche, bauschädliche Salze zu finden. So unterschiedlich ihre Zusammensetzung, so verschieden sind ihre Herkunftsquellen:

- Die Bildung von Gipskrusten ist aller Wahrscheinlichkeit nach hauptsächlich durch die frühere Luftverschmutzung und die anschließende Reaktion von Schwefeldioxid mit Kalk verursacht worden.
- Nitratbelastungen in Mörtel- und Steinproben wurden in allen Teilen der Mikwe gefunden. Besonders hohe Nitratkonzentrationen finden sich vor allem im unteren Teil des Schachtes und sind vermutlich auf die frühere missbräuchliche Nutzung des Bauwerks als Abwassergrube zurückzuführen.
- Es ist davon auszugehen, dass durch Niederschlagswasser zusätzliche Nitrate aus dem Erdreich über in der Mikwe in das Mauerwerk der Mikwe eingetragen wurden.
- Bei den Reparaturmaßnahmen Ende der 1950er Jahre wurden Mörtel und Betone verwendet, die alkalireiche Zemente als Bindemittel enthielten. In den Sandsteinen, die an diese zementgebundenen Materialien unmittelbar angrenzen, treten hohe Belastungen durch Natriumsulfate auf, weshalb anzunehmen ist, dass Alkali- und vermutlich auch Sulfationen aus den zementgebundenen Materialien mobilisiert und in angrenzende Sandsteinelemente eingetragen wurden.
- In einer Schabeprobe von losen Steinschüppchen auf der Oberfläche einer der kleinen Sandsteinsäulen wurden zusätzlich Magnesiumionen nachgewiesen. Da keine Dolomitmörtel verbaut wurden, steht zu vermuten, dass sie auf einen Dolomitgehalt des Sandsteins zurückzuführen sind. Innerhalb des Herkunftsgebietes (Rheinessen/Nordpfalz) sind dolomitische Zemente in den Sandsteinen des Unterrotliegend häufig anzutreffen (Schäfer 1986).

Relevant für die Schadenswirkung bauschädlicher Salze sind die Häufigkeit und Geschwindigkeit von Kristallisations- und Umkristallisationsprozessen. Trocknet der Baustoff, in dessen Porenflüssigkeit



die Salze gelöst sind, so kristallisieren diese bei Unterschreitung einer spezifischen Restfeuchte im oberflächennahen Porenraum aus. Bei welchen Feuchte- und Temperaturbedingungen dies geschieht ist abhängig von der vorliegenden Salzart bzw. Ionenmischung im Porenwasser. Mit dem Feuchtenachschub aus dem Inneren des Baustoffs werden weitere Salzionen nachgeliefert und die Salzkristalle wachsen weiter. Schließlich üben die Salzkristalle durch ihr Bestreben, weiterzuwachsen, einen Kristallisationsdruck auf die Porenwände des Baustoffs aus. Da in der Regel keine stationären Feuchtebedingungen herrschen, ändern sich die Kristallisationsbedingungen und damit auch die Kristallisationsdrücke auf das Baustoffgefüge häufig und führen im Lauf der Zeit zur Materialermüdung, d.h. zur Schädigung des Baustoffs. Details zur Genese von salzbedingten Schäden sind u.a. auf [salzwiki.de](http://salzwiki.de) zusammengefasst.

Da die Salzkristallisation abhängig ist von den Feuchtebedingungen, d.h. vom Raumklima (relative Luftfeuchte, Temperatur) und der Zusammensetzung der vorliegenden Salzlösung, wurde überprüft, ob es einen Bereich des Raumklimas gibt, in dem keine oder nur geringe Salzkristallisation auftritt. Hierzu wurden die Kristallisationsbedingungen für mehrere Proben aus verschiedenen Teilen der Mikwe mittels numerischer Modellierung berechnet. Hierfür wurde die Software ECOS/RUNSALT eingesetzt (Thermodynamisches Modell nach Price 2000; Benutzeroberfläche nach Bionda 2006; zu den Einschränkungen der Software s. Steiger 2009). Abbildung 5 zeigt, dass die Kristallisationsbedingungen der Salzlösungen aufgrund ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung in den verschiedenen Teilen der Mikwe sehr unterschiedlich sind. Die Ergebnisse belegen das Fehlen eines Klimakorridors zur Vermeidung von Salzkristallisation.

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es notwendig, eine Kombination aus Salzreduktion und Stabilisierung des Raumklimas anzuwenden, um die schädliche Wirkung von löslichen Salzen zu reduzieren. Zum einen soll die Menge der in den Baustoffen gespeicherten bauschädlichen Salze reduziert werden, zum andern die Häufigkeit von Feuchteänderungen (und damit von Kristallisationsprozessen) zu verringern.

In Musterflächen wurden Sandsteinelemente mit Kompressen behandelt, um einen Teil der löslichen Salze zu extrahieren. In Anbetracht des feuchten Raumklimas und des Vorhandenseins von Schimmelpilzen wurden zellulosefreie Kompressen verwendet, die aus Sepiolith und einem Leichtzuschlag bestehen. Das Fehlen der Zellulose mindert einerseits die Gefahr der Schimmelbildung in den Kompressen, erhöht aber auch die Trocknungsgeschwindigkeit der Kompressen deutlich. Im Ergebnis wurden nur sehr geringe Salzmengen aus dem Stein in die Kompressen extrahiert (ca. 20 g/m<sup>2</sup>). Es wird vermutet, dass die Diskrepanz zwischen den schnell trocknenden Kompressen und dem langsam trocknenden Sandstein die Ursache für die schlechten Entsalzungsergebnisse darstellen. Andere Verfahren zur Salzreduzierung sind zu erproben, z.B. das Vakuum-Waschen.

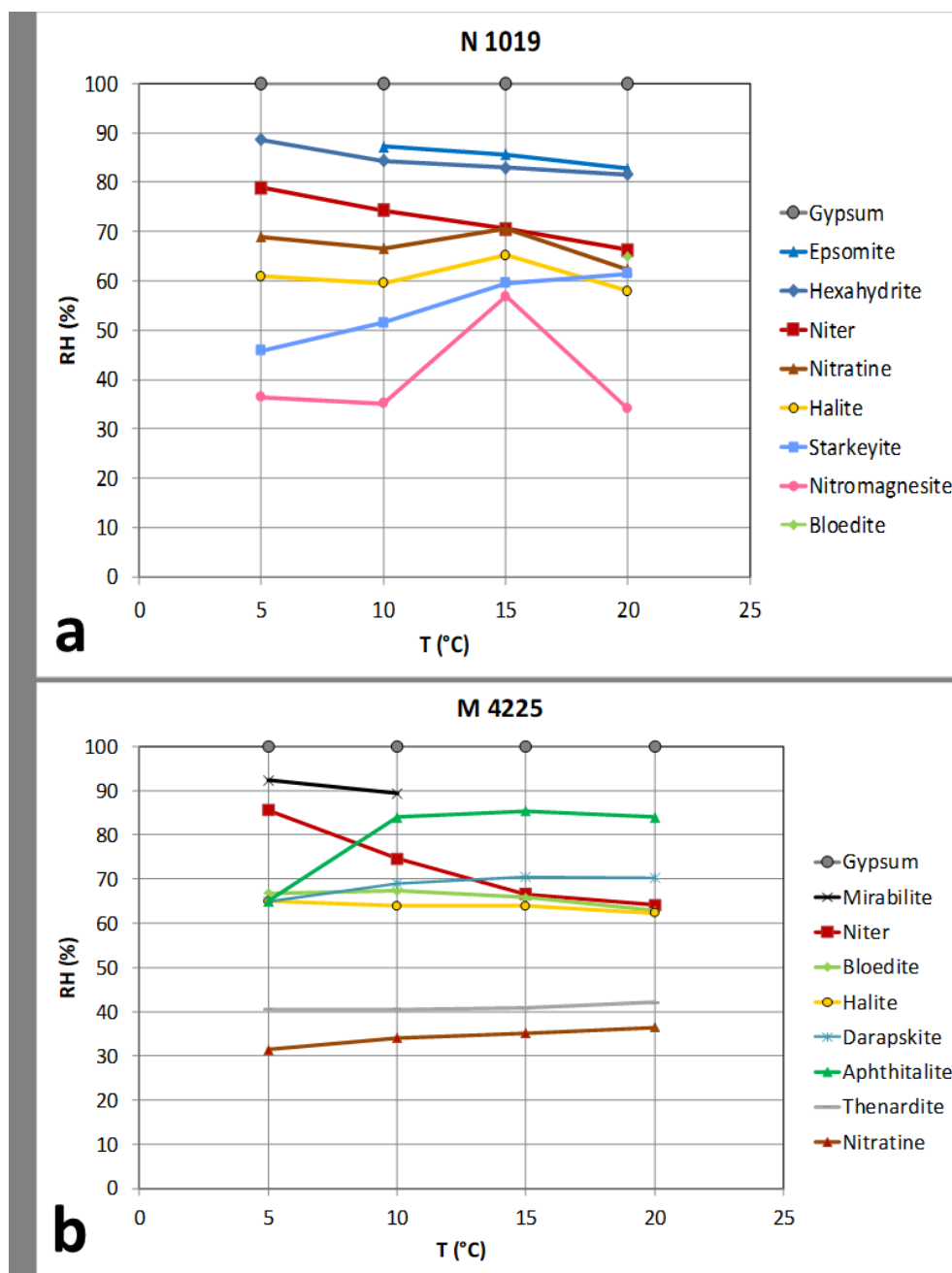


Abb. 5: Kristallisationsbedingungen verschiedener Salzmischungen aus der Mikwe a) im unteren Teil des Badeschachtes; b) im Vorraum

### Belastung durch mikrobiologische Besiedlung

Die meisten Oberflächen der Mikwe sind mit einem mikrobiologischen Film bedeckt. Diese Biofilme beeinflussen sowohl das Erscheinungsbild des Rauminnen, weisen aber auch ein Schadenspotential auf (Petersen 2014). Darüber hinaus könnte er je nach den in und auf diesen Biofilmen lebenden Arten schädliche Auswirkungen auf die Besucher haben. Daher wurden die Arten und die Aktivitäten der auf den Wandoberflächen lebenden Mikroorganismen ebenso bestimmt wie die Anzahl der Luftkeime.

Die erste Untersuchung der Raumluft zeigte eine Zunahme der Luftkeime im Vergleich zur Situation im Freien. Um die Auswirkungen auf Raumklima und Salzkristallisation zu prüfen, wurde während einer mehrmonatigen Testperiode die Eingangstür der Mikwe geschlossen und abgedichtet. Ziel war eine Stabilisierung des Raumklimas, eine Maßnahme, die in der Mikwe Friedberg vor ca. 20 Jahren

erfolgreich umgesetzt wurde. Da während dieser Testperiode die Menge an Luftkeimen in der Mikwe Worms um ein Vielfaches anstieg, wurde die Tür wieder durch die alte Gittertür ersetzt. Dadurch wurde die Durchlüftung der Mikwe wesentlich intensiviert und die Luftkeimbelastung sank umgehend auf das Niveau der Außenluft ab (Abb. 5).

Neben seinen ästhetischen und substanzschädigenden Auswirkungen behindert der mikrobiologische Film auf den Baustoffoberflächen notwendige Konservierungsmaßnahmen und sollte entfernt werden. Da es sich bei der Mikwe um einen religiösen Ort des Lebens handelt, sollte der Einsatz von chemischen Bioziden, die in den Baumaterialien verbleiben, vermieden werden. Andere Methoden zur Reduzierung des Algenwachstums wurden getestet:

- Desinfektion der Oberflächen durch UV-C-Strahlung,
- die Verwendung von grünem Licht, um die Fähigkeit der Algen zur Photosynthese zu reduzieren,
- Reduzierung des mikrobiellen Wachstums durch photokatalytisch aktives Titandioxid.

Eine einmalige Desinfektion der Oberflächen ist als Voraussetzung für die Reinigung der Oberflächen einschließlich der Entfernung von Biofilmen notwendig. Getestet wurde eine Desinfektion durch UV-C-Strahlung. Während der Test auf einer Steinoberfläche zu guten Ergebnissen führte, funktionierte ein weiterer Test auf Putz nicht zufriedenstellend. Hier ist der Biofilm tiefer in das Mikrogefüge des Putzes und in die unregelmäßige Topographie seiner geschädigten Oberfläche eingewachsen. Weitere Tests zur Entfernung von Algen aus dem Putz sind notwendig.

Die in der Mikwe vorkommenden Algenarten wurden im Labor kultiviert, um die Effizienz von grünem Licht zur Reduzierung der Chlorophyllproduktion zu überprüfen. Der Grundgedanke ist die wellenlängenabhängige Wirksamkeit von Chlorophyll und anderen Pigmenten bei der Photosynthese (Abb. 6). Sie zeigt ein Absorptionsminimum im grüngelben Bereich. Dementsprechend wurde eine monochromatische LED mit einer Wellenlänge im Bereich 525/550 nm für die Labor- und in situ-Versuche ausgewählt.

Die Chlorophyllproduktion wurde bei Bestrahlung mit grünem Licht, sowie bei Tageslicht und bei Dunkelheit gemessen. Während konstantes Tageslicht die Produktion bis zu einem Maximum steigert und völlige Dunkelheit sie fast vollständig verhindert, reduzieren konstantes grünes Licht und abwechselnde Zyklen von grünem Licht und Dunkelheit die Produktion von Chlorophyll auf etwa 44 bzw. 19 %. Ein signifikanter Effekt der Beleuchtung auf das Wachstum von Schimmelpilzen wurde nicht beobachtet. Daher wird eine Kombination aus einer Notbeleuchtung mit schwachem grünem Licht (Dauerlicht) und einer über Bewegungssensoren gesteuerten, nur temporär für den Besucherverkehr eingeschalteten weißen LED-Beleuchtung als praktikabler Ansatz für die künftige Beleuchtung der Mikwe angesehen. Dies wird das Algenwachstum reduzieren und gleichzeitig den Zugang für Besucher ermöglichen.

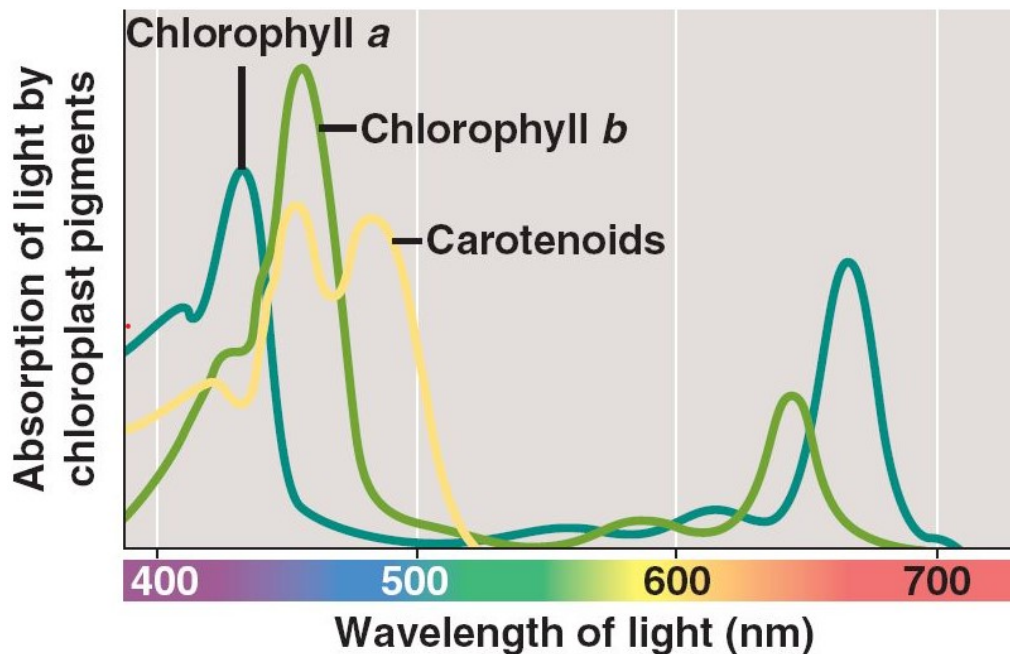


Abb. 6: Wellenlängenabhängige Lichtabsorption von Chlorophyll und Karotinoiden<sup>2</sup>

Um eine Wiederbesiedlung nach der Desinfektion zu verhindern, wurden Tests mit photokatalytisch aktivem Titanoxid durchgeführt. Auf der Grundlage von Labortests wurden zwei Produkte aus feinkörnigem Anatas auf Testflächen in der Mikwe verwendet (BLA von Fa. Henan Chemicals und Kronoclean 7000 von Fa. Kronos). Das TiO<sub>2</sub> wurde mit Kieselsäureester (KSE 300 von Fa. Remmers) auf der Steinoberfläche fixiert. Um eine Weißfärbung des Steins zu vermeiden oder zumindest auf ein unauffälliges Maß zu reduzieren, wurde die Konzentration von TiO<sub>2</sub> im Kieselsäureester auf ein Minimum von 0,6 M.-% reduziert. Vorversuche hatten gezeigt, dass diese Konzentration für eine photokatalytische Reaktion ausreicht. Zur Aktivierung des TiO<sub>2</sub> wurde ein Jahr lang eine UV-A-Lampe für 12 Stunden täglich während der Nachstunden eingeschaltet. Die Wirkung auf Grünalgen wurde durch die Messung der Fluoreszenz von Chlorophyll als Indikator für den Aktivitätsgrad der Photosynthese kontrolliert (Imaging-PAM-Mini-M von Fa. Walz). In einigen Musterflächen wurde innerhalb der einjährigen Bestrahlung nach einem Jahr fast keine Wirkung auf die Photosyntheseaktivität gemessen. Jedoch wurde in Testflächen, die sehr nahe an der UV-Lampe lagen, eine starke Abnahme der Fluoreszenz beobachtet. Daraus kann geschlossen werden, dass die Intensität der UV-A-Strahlung für Testflächen in einem Abstand von ca. 1,5 m von der Lampe zu gering war (Abb. 7a, b), während das System bei Distanzen von ca. 0,2 m sehr gut funktionierte (Abb. 7c, d). Hier konnte die Photosyntheseaktivität nahezu vollständig unterbunden werden. Daraus ist zu folgern, dass für die Anwendung eines solchen Systems im Gebäudeinneren UV-A-Lampen mit höherer Strahlungsleistung benötigt werden.

<sup>2</sup> Quelle: Cooke, S.J. on <https://socratic.org/questions/how-does-light-frequency-affect-the-rate-of-photosynthesis>

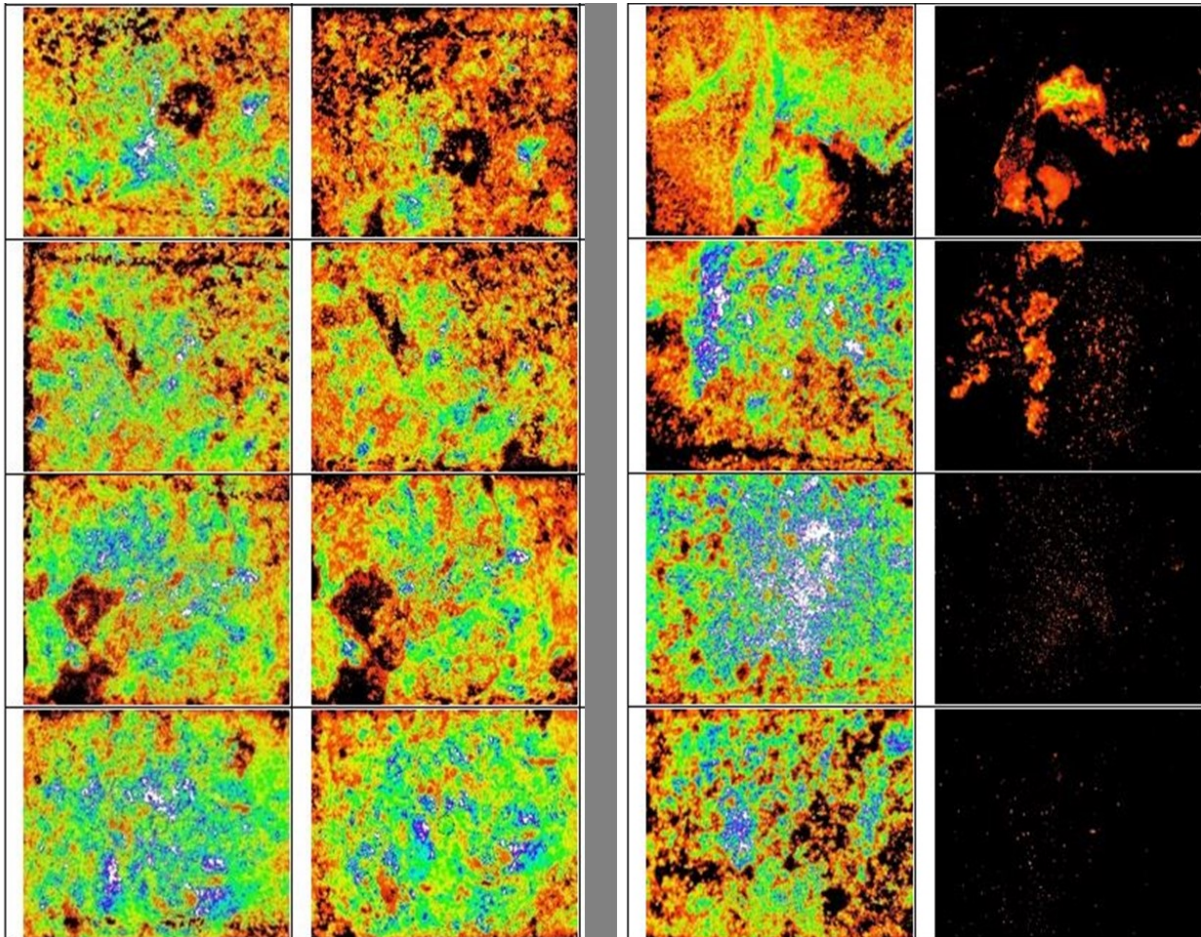


Abb. 7: Fluoreszenzmessungen auf je 4 mit Grünalgen besiedelten Teilflächen in der Mikwe: Spalte a) Testflächen an der unteren Treppe vor und b) nach einjähriger UV-A-Bestrahlung; c) Testflächen nahe der UV-A-Lampe vor und d) nach einjähriger UV-A-Bestrahlung

### Raumklima

Das Raumklima wurde zwei Jahre lang an verschiedenen Orten innerhalb und außerhalb der Mikwe Worms gemessen. Ergänzend wurden Nebelversuche zur Untersuchung der Luftströmungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen sehr ungünstige Bedingungen:

- Im unteren Teil des Badeschachtes und im unteren Treppenabgang ist das Raumklima durch hohe Luftfeuchtigkeit und geringe Luftströmungen gekennzeichnet.
- Im Vorraum und im oberen Teil des Badeschachtes gibt es hingegen intensive Klimaschwankungen aufgrund der starken Luftströmung zwischen der Gittertür im oberen Treppenabgang und dem Lüftungsschacht in der Kuppel (Abb. 8). Entsprechend dieser Situation sind die Wandflächen im oberen Teil des Bauwerks besonders häufigen Salzkristallisations-/Lösungs- und Dehydratations-/Hydratationsprozessen ausgesetzt.

Vergleichsmessungen wurden in anderen mittelalterlichen Mikwen von vergleichbarer Größe, aber unterschiedlichem Raumklimamanagement durchgeführt (Abb. 8):

- Die Mikwe von Speyer ist in konstruktiver Hinsicht der Wormser Mikwe sehr ähnlich. Sie ist etwas älter und größer als ihr Wormser Pendant und kann als dessen Vorbild angesehen werden. Im Gegensatz zu Worms wurde über dem Bauwerk ein Schutzdach errichtet, um das Eindringen von Regenwasser in das Mauerwerk zu verhindern. Das Raumklima variiert wie in

Worms sehr stark, die relative Luftfeuchte liegt jedoch aufgrund des Schutzbaus im Mittel deutlich niedriger als in Worms.

- In der Mikwe von Friedberg hingegen bleibt die Eingangstür jedoch ständig geschlossen und die Belüftung ist auf ein Minimum reduziert. Folglich ist hier das Raumklima sehr stabil und dauerfeucht (Abb. 8).
- Ein Besuch in der Mikwe von Andernach ergab, dass hier das Raumklima im unteren Teil des Bauwerks von einem Lüftungssystem abhängt, das nicht zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit oder Temperatur, sondern zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft installiert wurde. Andernach liegt in einer Region mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Boden, die durch die frühere vulkanische Tätigkeit verursacht werden.

Ein ähnliches Lüftungssystem wie in Andernach könnte eine Lösung für die Raumklimaprobleme in Worms darstellen. Sie erfordert jedoch die Installation von technischen Geräten und einer Schleuse am Eingang (Abb. 9). Beide Elemente sind im Hinblick auf die Integrität des Bauwerks nicht unproblematisch. Im nächsten Schritt wird eine Modellierung der Luftströmung und der durch ein solches System einstellbaren Temperatur- und Feuchteverteilung als Entscheidungsgrundlage für den zukünftigen Umgang mit dem Raumklima erforderlich sein.

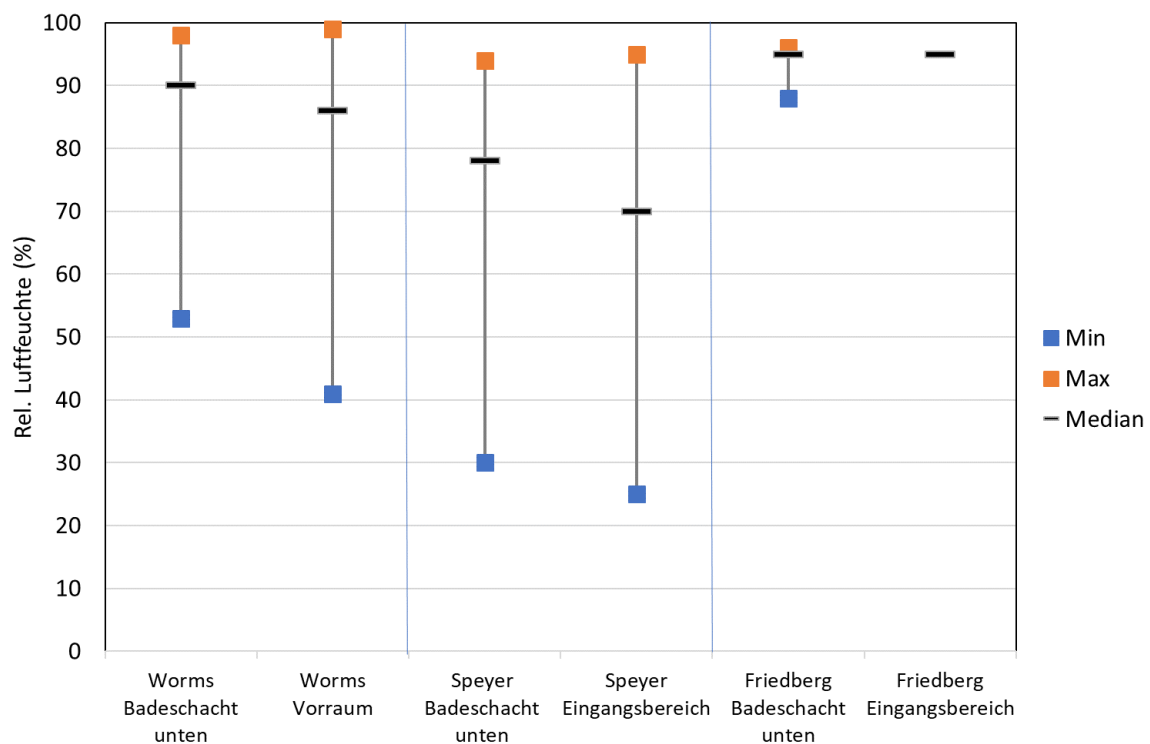


Abb.8: Streuung der relativen Luftfeuchtigkeit in den Mikwen Worms und Friedberg, jeweils oben und unten gemessen, bei einjähriger Messung



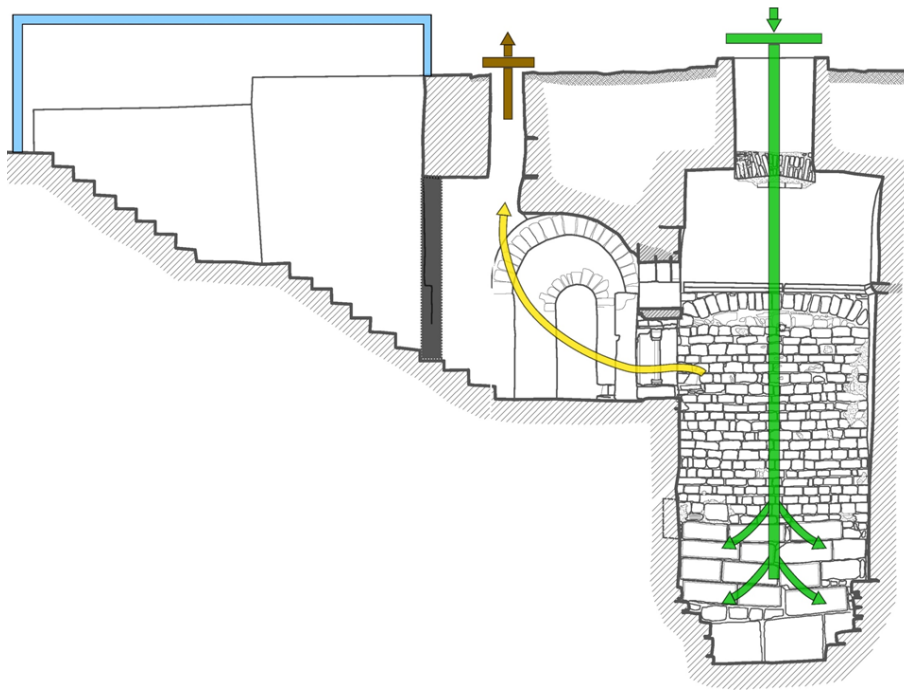


Abb. 9: Erster schematischer Entwurf für ein Belüftungssystem (Zeichnung: MarxKrontal GmbH)

### Konservierung von Putz und Stein

Die originalen Putzoberflächen sind zum großen Teil mit schwarzen Gipskrusten bedeckt. Zur Reduzierung dieser Krusten wurden Arbeitsproben mit verschiedenen Laser-Reinigungsgeräten angelegt. Letztlich wurde für eine größere Musterfläche ein Nd-YAG-Laser (Phoenix R10 von Fa. Lynton) eingesetzt (Abb. 10). Während die ästhetische Verbesserung offensichtlich ist, wurde der Gipsgehalt nicht vollständig entfernt. Dies wurde durch Untersuchungen mittels Lichtmikroskopie und mobiler Röntgenfluoreszenzanalyse und Ramanspektrometer nachgewiesen wurde (Abb. 11).



Abb. 10: Zwischenstadium bei der Laserreinigung des mittelalterlichen Putzes mittels Lasergerät (Aufnahme K. Keller).

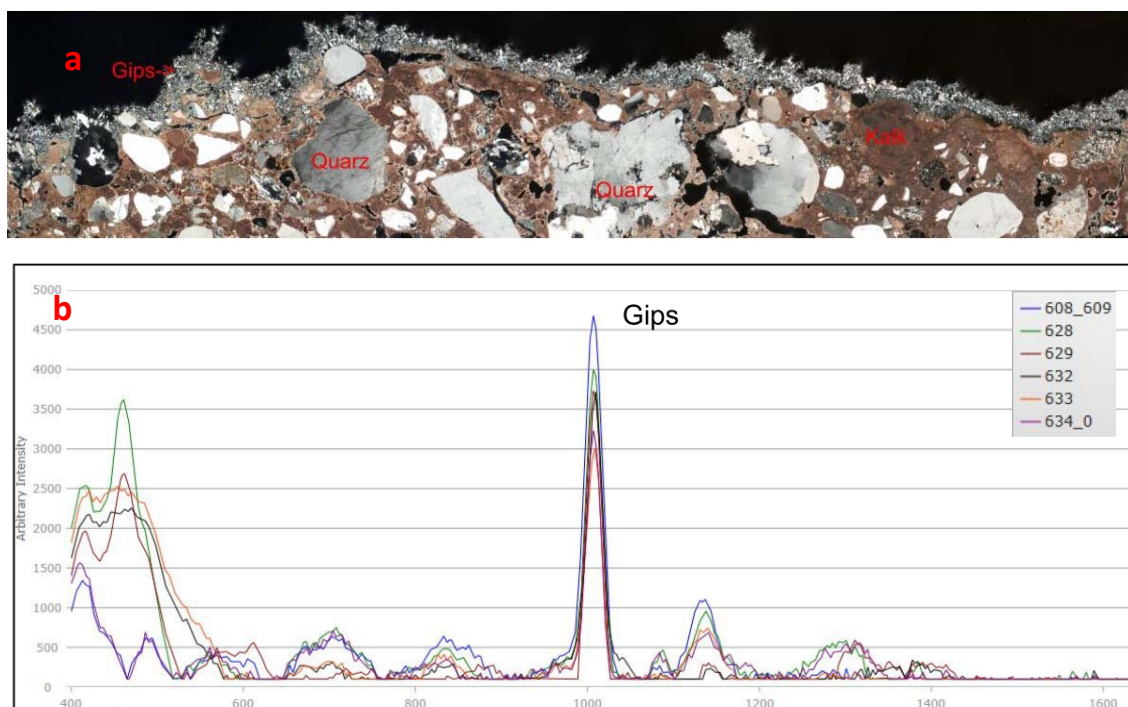


Abb. 11: Nachweis von Gips auf Putzoberfläche nach Laserreinigung: a) Die lichtmikroskopische Untersuchung am Dünnschliffpräparat zeigt eine auf ca. 50  $\mu\text{m}$  ausgedünnte Gipsschicht auf dem Putz, Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (M. Auras). b): Raman-Spektren, aufgenommen an gereinigten und ungereinigten Putzoberflächen (Paz<sup>3</sup>).

Mit dem Lasergerät wurden neben dem Putz auch die skulptierten Oberflächen der steinernen Bauzier gereinigt und von schwarzen Krusten befreit.

Reinigungsversuche am Mauerwerk zeigten, dass eine sorgfältige Reinigung mit Bürsten und Staubsauger ausreicht. Ziel ist, losen Schmutz vom Mauerwerk zu entfernen, aber die Patina der geschwärzten Wände zumindest teilweise zu erhalten.

Der Putz wurde mit so genanntem Nanokalk, einer Dispersion von sehr kleinen Calciumhydroxid-Partikeln in Ethanol (Calosil E 25 von Fa. IBZ-Salzchemie), gefestigt. Die Ränder der Putzschollen wurden mit baustellengemischtem Mörtel auf der Basis von natürlichem hydraulischem Kalk angebösch. Zur Festigung von Sandstein kam Kieselsäureester zum Einsatz (KSE 300 von Fa. Remmers). Die Oberflächen von Zementmörtel und Beton wurden zurückgearbeitet und durch einen ästhetisch ansprechenden Kalkmörtel ersetzt. Er soll im Lauf der Zeit lösliche Salze aus dem Zement aufnehmen und somit als Opferschicht wirken.

### Schlussfolgerungen

Unter den Bedingungen eines unterirdischen historischen Bades sind die konservatorischen Probleme vielfältig und die Lösungsansätze manchmal widersprüchlich. So wäre es beispielsweise sinnvoll, das Raumklima auf einem Niveau hoher Luftfeuchtigkeit zu stabilisieren, um die Häufigkeit von Salzkristallisationsprozessen zu reduzieren. Doch bei diesem Klima steigt die Zahl der Luftkeime exponentiell an, was ein potenzielles Gesundheitsrisiko für die Besucher darstellt. Daher muss jede Intervention sehr sorgfältig erwogen und überwacht werden.

<sup>3</sup> Aus: Zerstörungsfreie Materialanalysen zum Nachweis von Gips auf gereinigten und ungereinigten Putz- und Steinoberflächen in der Mikwe in Worms mittels mobiler Röntgenfluoreszenz- und ramanspektroskopischer Methoden. Untersuchungsbericht (unveröff.). Paz Laboratorien für Archäometrie, Bad Kreuznach, 22.10.2019.

Ansätze für einige der Probleme konnten im Projekt entwickelt werden, andere müssen weiter untersucht und vertieft werden. Eine Abdichtung der Bodenoberfläche über der Mikwe ist in Planung, um das weitere Eindringen von Regenwasser zu verhindern. Das Raumklima könnte höchstwahrscheinlich durch die Entwicklung eines maßgeschneiderten Belüftungssystems stabilisiert werden, aber zunächst müssen die technischen und ästhetischen Aspekte eines solchen Systems sorgfältig bewertet und abgewogen werden. Das mikrobielle Wachstum von Algen und Schimmelpilzen kann durch ein anderes Beleuchtungssystem und durch die photokatalytische Wirkung von Titandioxid reduziert werden. Es fehlt jedoch noch eine Methode zur effektiven Desinfektion von Putz, die den Einsatz chemischer Biozide vermeidet. Für die meisten der notwendigen Konservierungsschritte wurden geeignete Methoden und Mittel erfolgreich getestet. Es bestehen jedoch weitere Defizite wie die im Putz verbliebenen Gipsgehalte und die noch unzureichende Extraktion von löslichen Salzen aus den Sandstein-Zierelementen. Weitere Untersuchungen und Verfahrenserprobungen sind notwendig, um ein Konservierungskonzept zu erarbeiten, das den hohen und teils widersprüchlichen Anforderungen dieses wichtigen Zeugnisses des früheren jüdischen Lebens und Glaubens in Deutschland gerecht wird.

## Dank

Die Autoren danken der Jüdischen Gemeinde Mainz für die Genehmigung zur Untersuchung der Mikwe. Den Kolleginnen und Kollegen der Stadt Worms, der Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz, des Ministeriums für Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz sowie des Architekturbüros Hamm sei für ihre mannigfaltige Unterstützung herzlich gedankt. Ebenso danken wir den zahlreichen Kolleginnen und Kollegen, die unsere Recherchearbeiten zur baulichen Situation anderer mittelalterlicher Mikwen unterstützten.

Vielen Dank der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Projektförderung!

## Literatur

Bionda D. (2006): Modelling indoor climate and salt behaviour in historical buildings: A case study. PhD thesis, Diss Nr 16567 ETH Zürich.

Bormann M. (2010): Die mittelalterliche Mikwe zu Worms - Untersuchungen zur Reduzierung von Krusten und Stabilisierung der salzbelasteten Putze auf erdberührtem Mauerwerk. Unveröff. Diplomarbeit FH Köln.

Kayser C. (2019): „Einen Brunnen grub er, führte auf das Gewölbe...“ – Bauforschung an der Mikwe von Worms. In: Auf dem Weg zu einem Konservierungskonzept für die Mikwe in Worms. Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz, IFS-Bericht 58:7-33.

Maus H. (2019): Die statisch-konstruktive Instandsetzung. In: Auf dem Weg zu einem Konservierungskonzept für die Mikwe in Worms. Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz, IFS-Bericht 58:35-42.

Petersen K. (2014): Mikrobiologische Material-schädigung an Naturstein und Vorgehensweise zu deren Beseitigung. In: Patitz, G., Grassegger, G., Wölbart, O. (Eds.): Natursteinbauwerke, Untersuchen-Bewerten-Instandsetzen. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, S.175-182.

Price C.A. (2000): An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials. European Commission Research Report No 11. Archetype Publications, London.

Schäfer, A. (1986): Die Sedimente des Oberkarbons und Unterrotliegenden im Saar-Nahe-Becken. Mainzer Geowiss. Mitt 15: 239 – 365.

Steiger M. (2009) Modellierung von Phasengleichgewichten. In: Schwarz H-J., Steiger M. (Hrsg.): Salzsäuren an Kulturgütern - Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Hannover, 80-99.



Der ausführliche Bericht (100 S.) ist in gedruckter Form erhältlich bei:

Institut für Steinkonservierung e.V., Große Langgasse 29, 55116 Mainz, [www.ifs-mainz.de](http://www.ifs-mainz.de)