



Klimawandel und setzungsbedingte Bauwerksschäden – Am Beispiel der Wormser Synagoge

Abschlussbericht
zu einer durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Fachtagung
vom 21. - 22. März 2023 in Worms



Aktenzeichen: 38710/01
Fördersumme: 21.075 €
Projektlaufzeit: 16 Monate (24.02.2023 - 30.06.2024)

Kooperationspartner:

Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz (GDKE)
Direktion Landesdenkmalpflege
Schillerstr. 44
55116 Mainz



Rheinland-Pfalz

GENERALDIREKTION
KULTURELLES ERBE

LANDES DENKMALPFLEGE

Institut für Steinkonservierung e. V.
Dr. Enno Steindlberger

Mainz, 17. Dezember 2024

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Hintergrund und Zielsetzung zur Durchführung einer Fachtagung	1
2. Antragsteller und Kooperationspartner	2
3. Grundlagen	2
3.1 Klimawandel, Dürreperioden und Austrocknung der Böden	3
3.2 Verbreitung setzungsempfindlicher Böden	3
3.3 Bauwerksschäden durch Setzung des Bodens	3
3.4 Ingenieurtechnische Maßnahmen zur Ertüchtigung des Bodenaufbaus sowie zur Unterfangung von Gebäudefundamenten	3
3.5 Alternative im Einzelfall: Feuchtemanagement setzungsempfindlicher Böden	5
4. Schadensverlauf am Modellobjekt Synagoge Worms	5
5. Umweltrelevanz des angedachten Feuchtemanagements	7
6. Innovativer Charakter des Projektes / Ausblick	8
7. „Fragenkatalog“ zur Fachtagung	8
8. Tagungsprogramm	9
9. Öffentlichkeitsarbeit und Publikation der Ergebnisse	10
10. Fazit, Fortführung der Thematik und Perspektiven	11

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Rissverlauf an der Synagoge außen, statisch-konstruktive Sicherungsmaßnahme	6
Abb. 2: Rissverlauf im Innenbereich der Synagoge, Sicherungsmaßnahme durch lastabtragende Gerüststellung.	6
Abb. 3: Freilegung des Fundamentes unter archäologischer Begleitung mit Nachweis einer Lehmschicht und tonreichen Sedimentschichten.	8
Abb. 4: Abstützung von einsturzbedrohten Teilen des Gewölbes in der Synagoge Worms.	8
Abb. 5: Blick in den Tagungsraum mit Rednerin und Auditorium.	9

1. Hintergrund und Zielsetzung zur Durchführung einer Fachtagung

Die Folgen des Klimawandels sind allorts feststellbar und betreffen auch die historische Bausubstanz in vielfältiger Weise. Während die Folgen von Starkregenereignissen stark im Fokus des Interesses stehen, sind andere Effekte des Klimawandels im Bereich der Baudenkmalpflege bislang weniger beachtet. Jedoch wurden mehrfach Bodensenkungen infolge von Austrocknungsprozessen im Boden als Schadensursache für Setzungsrisse an Gebäuden festgestellt. Als ein prominentes Beispiel - und gleichzeitig auch Fallstudie - sei die mittelalterliche Synagoge in Worms genannt.

Die Synagoge ist wesentlicher Bestandteil des UNESCO-Weltkulturerbes SchUM-Stätten und daher im besonderen Interesse der Öffentlichkeit. Seit einiger Zeit treten am Gebäude starke Rissbildungen auf, die nach umfassenden Untersuchungen einer Ton- oder Lehmschicht zugeordnet werden können, die - vermutlich als Abdichtung gegenüber Bodenfeuchtigkeit - bereits bei der Errichtung unter dem Fundamentmauerwerk eingebaut wurde. Die aktuell zunehmend heißen und langanhaltend trockenen Sommerperioden bedingen eine Austrocknung des Untergrundes bis zu dieser Schicht, was offensichtlich zu ausgeprägten Setzungen des Bauwerks führt und dies wiederum in der aktuellen Standsicherheitsgefährdung des Gebäudes resultiert und umfangreiche Schutzmaßnahmen erforderlich macht. Da die üblichen Maßnahmen zur Nachgründung, Fundamentunterfangung und Bodenertüchtigung im vorliegenden Fall mit massiven Eingriffen und potentiell negativen Auswirkungen auf die archäologischen und bauhistorischen Befunde in der ehemaligen Baugrube und im historischen Fundamentmauerwerk verbunden wären, wird ein konservatorisches Konzept verfolgt, welches durch ein Management des Feuchtegehaltes im Baugrund weitere Setzungsprozesse verhindern soll.

Das Verständnis zu den ablaufenden Prozessen im Baugrund und die resultierenden Schadensbilder im Detail ist in Fachkreisen bislang nur unzureichend bekannt. Ebenso wenig sind die Möglichkeiten konkreter Sanierungstechniken mit ihren jeweiligen Auswirkungen auf die Bausituation zusammengetragen und kritisch hinterfragt. Gerade im Kontext mit denkmalpflegerischen, archäologischen, ökologischen oder auch religiösen Vorgaben ist eine Auseinandersetzung mit dem Thema jedoch absolut notwendig. Um eine Schadensentwicklung überhaupt erst nicht zur Entwicklung gelangen zu lassen, sind Modelle zu einem präventiven, das heißt konservierenden Maßnahmenkatalog von besonders hohem Interesse.

Um einen örtlichen sowie überregionalen Interessenskreis aus Planung, Denkmalschutz, Handwerk usw. erreichen zu können, wurde die Ausrichtung einer **Fachtagung** - inklusive Exkursion zur konkreten Baustelle an der Synagoge Worms - als ideales Medium angesehen. Dabei sollten die Auswirkungen des Klimawandels auf den Feuchtehaushalt der Böden und die daraus resultierenden Fragestellungen wie das Schwindverhalten der Böden und dadurch verursachte Bauwerksschäden mit Fachleuten aus Geotechnik, Baugrundgeologie, Tragwerksplanung, Archäologie und Denkmalpflege erörtert werden. Die gängigen Ertüchtigungsmethoden sollten mit ihren Vorteilen, Nachteilen und Nebeneffekten gegenübergestellt und hinterfragt sowie auch der konzeptionelle Ansatz eines Feuchtemonitorings und Feuchtemanagements dargestellt und die Chancen einer Realisierbarkeit ausgelotet werden. Dieser vereinigt die Vorteile des geringsten Eingriffs mit dem des geringsten Ressourcenverbrauchs.

Als aktuelles Beispiel wurde die Gründungsproblematik der Wormser Synagoge (Teil des UNESCO-Welterbes SchUM-Stätten) einbezogen und beispielhaft vorgestellt.

Im Nachgang zur Tagung und zu einer verbundenen Weitertragung sollten die Ergebnisse verschriftlicht und in der Berichtsreihe der Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz, Direktion Landesdenkmalpflege, publiziert werden.

2. Antragsteller und Kooperationspartner

Der **Antragsteller** zur DBU-geförderten Fachtagung war das Institut für Steinkonservierung e. V., eine gemeinsame Einrichtung der staatlichen Denkmalpflege der Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland und Thüringen mit Sitz in Mainz:

Institut für Steinkonservierung e. V. (IFS)

Große Langgasse 29
55116 Mainz
Tel.: 06131 2016 500
E-Mail: info@ifs-mainz.de
Web: <https://ifs-mainz.de>

Kooperationspartner

Als Kooperationspartner beteiligte sich die Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz, Direktion Landesdenkmalpflege. Neben der Mitorganisation der Veranstaltung wurden durch sie die Drucklegung des Themenheftes (s. u.) sowie die Öffentlichkeitsarbeit wahrgenommen:

**Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz (GDKE)
Direktion Landesdenkmalpflege**

Schillerstr. 44
55116 Mainz
Tel.: 06131 2016 0
Fax: 06131 2016 222
E-Mail: landesdenkmalpflege@gdke.rlp.de

3. Grundlagen

Bauwerksschäden infolge Austrocknung von Böden sind nicht als Sonderproblem zu betrachten, vielmehr führen die Effekte immer längerer Trockenperioden aufgrund steigender Temperaturen bereits vielfach zu massiven Schäden. Die fortschreitende Austrocknung feuchtesensibler Böden kann Setzungsprozesse zur Folge haben, die sich in Mauerwerksrissen in Gebäuden äußern. So zitiert beispielsweise die *British Geological Society* die *Association of British Insurers*, dass infolge der Hitzeperiode im Sommer 2018 von mehr als 10.000 britischen Haushalten Schadensansprüche in einer Gesamthöhe von mehr als 64 Mio. £ infolge von Setzungsschäden an Gebäuden angemeldet wurden¹.

In Deutschland wurde das Problem in verschiedenen Regionen als schadensursächlich erkannt (z. B. in Norddeutschland² oder im Rhein-Main-Gebiet³). In manchen Fällen wird argumentiert, die Austrocknung der Böden würde durch Bäume beschleunigt, die den tieferen Bodenschichten das Wasser entziehen⁴, sodass eine Überlagerung verschiedener Ursachen vorliegt. Das gelegentlich geforderte Fällen der Bäume würde jedoch die innerstädtische Aufheizung weiter vorantreiben, sodass sich auf längere Sicht andere Probleme verstärkten. In solchen Fällen sind gleichermaßen die Aspekte von Naturschutz und Gebäude- bzw. Denkmalschutz zu berücksichtigen und Lösungen zu finden, die möglichst der Erhaltung von Bauwerken und Flora und Fauna gleichermaßen dienen.

¹ <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/shallow-geohazards/clay-shrink-swell/>, zuletzt 21.08.2024

² https://www.lz.de/owl/22830901_Gebaeudeschaeden-wegen-Trockenheit-Ein-Riss-geht-durch-OWL.html, zuletzt 21.08.2024

³ <https://www.op-online.de/offenbach/schaeden-durch-setzrisse-baeume-geben-haeusern-offenbach-rest-10518856.html>, zuletzt 21.08.2024, <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/risse-in-hauswaenden-auf-der-suche-nach-der-wurzel-des-problems-v1,risse-gebäude-100.html>, zuletzt 21.08.2024

⁴ s. Fußnoten 2 und 3

3.1. Klimawandel, Dürreperioden und Austrocknung der Böden

Die Folgen des Klimawandels sind weltweit spürbar und stehen aufgrund ihrer massiven wirtschaftlichen Folgen sowie der Lebensbedrohung vieler Menschen in der öffentlichen Wahrnehmung. Die langen Trockenperioden führen vermehrt zu Waldbränden, einer Beschleunigung des Waldsterbens, Lebensmittelknappheit, Versteppung weitläufiger Landschaften und Wasserknappheit.

Weniger beachtet sind bislang die Schäden an Bauwerken, die durch trocknungsbedingte Setzungen verursacht werden. Berichtet werden solche Schäden neben den eingangs bereits genannten Beispielen z. B. auch aus einem Gebiet mit großflächigen Lössablagerungen in China⁵.

3.2. Verbreitung setzungsempfindlicher Böden

Die Erfassung und Bewertung von Böden sind in Deutschland Aufgabe der geologischen Dienste der Bundesländer. Je nach Bundesland gibt es bereits Karten zu Georisiken, speziell auch zur Gefährdung durch Setzungen⁶ korrespondierend zur Verbreitung toniger und lehmiger Böden. Es zeigt sich, dass solche Böden u. a. im Oberrheingraben stark verbreitet sind⁷.

3.3. Bauwerksschäden durch Setzung des Bodens

Als Beispiele von Gebäuden mit setzungsbedingten Mauerwerksschäden seien an dieser Stelle die evangelische Kirche in Planig (Rheinland-Pfalz, Landkreis Bad Kreuznach) oder auch die Gründerzeitbauten in Offenbach am Main genannt. Die Schäden können auf Schwindprozesse infolge Austrocknung tonmineralhaltiger Bodenschichten zurückgeführt werden⁸. In beiden Fällen werden neben langen Trockenperioden zusätzliche Faktoren wie ein reduzierter Feuchtenachschub infolge Flächenversiegelung und Feuchteentzug durch große, gleichzeitig tiefwurzelnde Bäume in Bauwerksnähe für die starke Austrocknung der Böden verantwortlich gemacht. Im Bereich Ostwestfalen-Lippe scheinen vergleichbare Schäden an Gebäuden mit und ohne Baumbestand aufzutreten⁹.

3.4. Ingenieurtechnische Maßnahmen zur Ertüchtigung des Bodenaufbaus sowie zur Unterfangung von Gebäudefundamenten

Bei historischen, auch denkmalgeschützten Bauwerken treten über die Standzeit häufig Risse in Wänden, Böden oder Decken auf, die oft konstruktive oder materialtechnische Ursachen haben. Nicht selten sind sie aber auf Veränderungen des Baugrundes infolge Auswaschungen, Aufweichen von bindigen Böden, Überlastungen, Setzungen des Untergrundes usw. zurückzuführen. Insbesondere Absenkungen des Grundwasserspiegels werden regelmäßig mit Fundamentschäden in Verbindung gebracht.

Mit den resultierenden Bauschäden sind oftmals Einschränkungen in der Nutzung, nicht selten aber auch drohende Verstürze bis hin zu Totalverlusten ganzer Bauteile verbunden. Ein rechtzeitiges Erkennen und entsprechendes Handeln sind daher zwingend erforderlich. Beginnende oder abgeschlossene Rissbildungen können aus optischen oder witterungstechnischen Hintergründen verschlossen werden, bedarfsweise sind zusätzlich statisch-konstruktive Maßnahmen notwendig. Kritisch müssen dagegen aktive Bewegungen mit korrespondierender Rissweitenveränderung bewertet werden.

Für eine fachgerechte Sanierung von Fundamentmängeln stehen unterschiedliche Verfahren innerhalb des Spezialtiefbaus zur Verfügung, die sich durch Art und Umfang des Eingriffs und somit auch in der jeweiligen objektspezifischen Machbarkeit und der Nachhaltigkeit unterscheiden. Selbstverständlich müssen, gerade unter den Aspekten einer denkmalgerechten Vorgehensweise, eine umfassende Fach-

⁵ s. Fußnoten 1 bis 3

⁶ <https://www.bgs.ac.uk/datasets/geosure/>, download 16.01.2023, <https://maps.lgrb-bw.de/>, download 08.01.2023

⁷ <https://bodenviewer.hessen.de/mapapps/resources/apps/bodenviewer/index.html?lang=de>, download 17.01.2023, https://mapclient.lgb-rlp.de/?app=lgb&view_id=18, download 17.01.2023

⁸ Ansgar Wehinger (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz), pers. Mitt.; Christine Heinrich (Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie), pers. Mitt.

⁹ s. Fußnote 2

planung mit Voruntersuchungen und eine angepasste Methodik ausgewählt werden. Dementsprechend müssen Bodenverhältnisse, Wasserhaushalt, Gründungsmauerwerke und aufgehendes Mauerwerk ausreichend untersucht werden. In der aktuellen Entwicklung sich verstärkender Klimaveränderungen mit langen Austrocknungsperioden von Boden und Mauerwerk sind auch diese Aspekte viel genauer in die Ursachenforschung oder Sanierungstechnik mit einzubeziehen. Leider ist eine ungehinderte Zugänglichkeit bereits für die Voruntersuchungen, oft aber auch in der Sanierungsmaßnahme kaum oder nur eingeschränkt möglich. Insbesondere sind bei Denkmalobjekten oft archäologische Befunde, eng verbaute Mauerwerke und niedrige Raumhöhen als Erschwernisse zu nennen. Unumgänglich sind entsprechende Abstimmungen zwischen Eigentümern, Tragwerksplanern, Bodengutachtern, Denkmalpflegern und Bautechnikern.

Die nachfolgend aufgezeigten Verfahren geben eine Übersicht zu den heute regelmäßig angewandten Techniken bei Setzungsschäden, die neben reparierenden, verstärkenden Aspekten oft auch rein vorbeugender Natur sein können:

- Bei sog. Nachgründungen erfolgt oft eine Verbreiterung der Fundamente. Vor allem bedingt durch Umbauten, Umnutzungen oder Lasterhöhungen können eine Fundamentverbreiterung (durch sog. Streichbalken) oder eine tieferreichende, ergänzende Unterfangung sinnvoll erscheinen, entsprechende Normungen (z. B. DIN 4123) regeln diese Verfahren. Die Methode ist mit hohem Aufwand verbunden und setzt ein Freilegen oder auch temporäres Abstützen des Mauerwerks voraus. Zusätzlich können Vernadelungen im Mauerwerk für eine Mauerwerksstabilisierung bzw. Lastverteilung sorgen. Ein derartiges Vorgehen setzt ausreichende Platzverhältnisse, aber auch das Vorhandensein unkritischer Baumaterialien sowie ein Fehlen historisch wertvoller Befunde voraus.
- Zu einer Verbesserung, d. h. Erhöhung der Tragfähigkeit des Baugrundes werden Verfahren des Verpressens und Vermörtelns angewandt. Alternativ stehen dabei Injektionen (Poreninjektionen) insbesondere nichtbindiger Böden oder aber Düsenstrahlverfahren zur Verfügung. Bei letzterem wird der entfestigte Boden mit einer Zementsuspension vermischt, der nach Ausreaktion einen homogenen, stabilisierten und ertüchtigten Untergrund herstellt. Bei Verbindung der zunächst einzelnen „Mörtelsäulen“ untereinander entsteht so ein geschlossener Unterbau erhöhter Stabilität. Auch diese Verfahren setzen eine größere technische Einrichtung voraus, die, abgesehen von wirtschaftlichen Aspekten, eine sensible, denkmalpflegerische, archäologische Vorgehensweise zumeist ausschließen.
- Im Falle unzureichender Tragfähigkeit des Baugrundes notwendig werdende Nachgründungen von Einzel- oder Streifenfundamenten können auch mit Pfahlkonstruktionen durchgeführt werden. Eingesetzt werden dabei unterschiedliche Systeme wie z. B. Klein- oder Mikrobohrpfähle aus Ortbeton oder Verbundmaterialien (sog. Verpresspfähle). Eingbracht werden die Pfähle mit entsprechenden Bohrgeräten mittels Verrohrung oder Einrammen. In den Hohlkörper werden lastaufnehmende Eisen, Profilstäbe o. ä. eingestellt, die von einer Zementmasse umhüllt werden. In Abhängigkeit des Objektes stehen dabei im Detail unterschiedliche Varianten zur Verfügung. Die aufzunehmende Last wird aber grundsätzlich über Mantelreibung ins tiefere Erdreich abgetragen.
- Nach erfolgten Absenkungen von Mauerabschnitten können Anhebungen und Bodenstabilisierungen notwendig werden. Methodisch stehen hierzu einerseits die zementär gebundenen Druckverpressungen im Fundament- bzw. Bodenbereich zur Verfügung, bei der mittels optischer exakter Kontrolle (z. B. Laser) bereits (geringe) Hebungen durch den aufgebauten Innendruck der Suspension vollzogen werden können. Weitaus effizienter wird diese Technik mit dem gezielten Einbringen von expandierendem Reaktionsharz umgesetzt. Die Technik steht eng mit der Fa. *Uretek* verbunden. Ein zweikomponentiges Expansionsharz wird dabei in den betreffenden Bodenbereich eingebracht. Aufgrund der schnell ablaufenden Aushärtungsreaktion können Mittelzugabe und resultierende Expansion (= Anhebung) gut gesteuert werden. Allerdings muss als Begleiterscheinung das irreversibel eingebrachte Harz im Boden-

bereich diskutiert werden, das z. B. wie im Falle der Synagoge in Worms, vorhandene archäologische Bodenschätze und historische Baubefunde nicht mehr zugänglich macht, beschädigt oder zerstört. Grundsätzlich ist das Uretex-System jedoch als gängige Sanierungsmethode, verbunden mit Anhebung und Stabilisierung des Untergrundes, anzusehen.

3.5. Alternative im Einzelfall: Feuchtemanagement setzungsempfindlicher Böden

Eine interessante Alternative liegt darin, den Baugrund mit konservatorischen Methoden zu stabilisieren, d. h. ein Feuchtemanagement zur Überbrückung der Trockenperioden unter Verzicht auf die o. g. ingenieurtechnischen Eingriffe in den Baugrund zu installieren. Notwendig wären hierzu Langzeitmessungen der Bodenfeuchte. Dabei ist vorab zu klären, in welchen Bodenhorizonten dies notwendig ist, welche Messmethoden und Feuchtesensoren geeignet sind und mit welchem Aufwand dies ermöglicht werden kann.

Auch beim Thema einer gezielten Bodenbefeuchtung stellen sich eine Reihe von Fragen: Wie kann so etwas technisch umgesetzt werden? Wann und in welchem Umfang ist eine Feuchtezufuhr sinnvoll bzw. notwendig? Erscheint ein derartiges Vorgehen realisierbar?

Es gibt bereits ein Fallbeispiel, in dem eine Bodenbefeuchtung mittels einer Rohr-Rigolenversickerung umgesetzt wurde. Es handelt sich um die bereits erwähnte evangelische Kirche in Planig. Dort wurden große Bäume im Umfeld der Kirche gefällt, Oberflächen entsiegelt und das Niederschlagswasser der Dachentwässerung in eine Rigole geleitet, von wo aus es über ein Rohrsystem langsam im Untergrund versickert. Zur Kontrolle des Systems wurden regelmäßige Rissbreitenmessungen am Bauwerk und eine Erfassung der Grundwasserpegelstände durchgeführt¹⁰.

4. Schadensverlauf am Modellobjekt Synagoge Worms

Die seit dem Mittelalter bestehende jüdische Synagoge in Worms wurde durch die Pogrome der Nationalsozialisten im November 1938 schwer beschädigt, ein Jahr später riss man das aufgehende Mauerwerk bis teilweise auf eine Höhe von 2,50 m und mehr ab. Der Wiederaufbau der jüdischen Synagoge in Worms ist 1961 unter Verwendung des historischen Fundamentmauerwerks, zahlreicher originaler Substanz und insbesondere auch von Teilen des aufgehenden Mauerwerks an der Nordwestecke abgeschlossen worden.

Die seit zwei Jahrzehnten festgestellten Risse am Außenmauerwerk der Nordfassade in Nähe des Eingangsportals sind bereits auf historischen Fotografien der Synagoge vor ihrer Zerstörung erkennbar.

Seit 2016 weiteten sich die Risse auf, was ab 2020 Besorgnis erregende Ausmaße annahm. Die Risse pausen sich im Innenbereich des Mauerwerks durch (vgl. Abb. 1 und 2). Im Jahre 2021 musste eine am Bauwerk deutlich sichtbare Zugankersicherung samt Fassadenverstrebung eingebaut werden.

Zur Ursachenermittlung wurden im späten Frühling 2022 an der Westseite erste Eingriffe in den Baugrund getätigt, die archäologisch begleitet waren (vgl. Abb. 3). Per Kanalbefahrung entdeckte man einen insgesamt desolaten Zustand der Entwässerungsleitungen im Synagogenhof und ein defektes Grundleitungsrohr an der Nordwestecke der Synagoge. Daher wird die Dachentwässerung seitdem auf anderem Weg abgeleitet, um die Gefahr von Ausspülungen an Fundamentmauerwerk oder Sohle zu vermeiden. Die Risse verstärkten sich jedoch weiterhin zusehends, teilweise auf Rissbreiten bis über 15 mm. Als mögliche Ursachen waren zu diesem Zeitpunkt ein Versagen des mittelalterlichen Gründungsmauerwerks, gravierende Probleme mit dem Bodenuntergrund und/oder Einwirkungen des im Sommer 2022 über Wochen herrschenden heißen und niederschlagslosen Klimas in Worms in Betracht gezogen worden. Die Rissbreiten wurden bzw. werden mittels Rissbreitenmonitorings ständig überwacht.

¹⁰ Ansgar Wehinger (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz), pers. Mitt.

Abb. 1: Rissverlauf an der Synagoge außen, statisch-konstruktive Sicherungsmaßnahme.



Abb. 2: Rissverlauf im Innenbereich der Synagoge, Sicherungsmaßnahme durch lastabtragende Gerüststellung.



Zur Erkundung der Ursachen wurde das Fundament im Hauptschadensbereich freigelegt. Es zeigte sich schadensfrei, doch wurde direkt unter der Sohle eine dichte Lehmschicht gefunden. Baugrundsondierungen zeigten, dass zusätzlich in Tiefen von 2,5-4,0 m bereichsweise tonreiche Sedimentschichten anzutreffen sind.

Wegen des zunehmend gefährdeten statischen Zustands der Synagoge wurde überlegt, eine Baugrundverbesserung mittels Injektion eines Zweikomponenten-Kunstharzsystems vorzunehmen. Diese Planung löste wegen der damit verbundenen unwiederbringlichen Verluste der hochwertigen archäologischen Befunde an der Synagoge große Diskussionen vor Ort aus.



Abb. 3: Freilegung des Fundamentes unter archäologischer Begleitung mit Nachweis einer Lehmschicht und tonreichen Sedimentschichten.



Abb. 4: Abstützung von einsturzbetrohten Teilen des Gewölbes in der Synagoge Worms.

Um der Gefahr eines Teileinsturzes zu begegnen, wurden im August 2022 sämtliche Gewölbe im Westjoch der Synagoge mit einem lastabtragenden Gerüst bzw. mit Unterzügen gesichert (s. Abb. 2 und 4). Eine Sperrung der Synagoge war damit unnötig geworden. Zur vertieften Erkundung der Gründung und des Baugrundes wurden Kernbohrungen an mehreren Stellen der Synagoge durchgeführt und die Bohrkerns analysiert. Eine Pfahlgründung des mittelalterlichen Bauwerks ist nicht nachweisbar.

Mit dem Ende der heißen und trockenen Witterung über die Sommermonate 2022 und ersten Niederschlägen im Frühherbst 2022 haben sich die Rissbewegungen vorerst beruhigt.

5. Umweltrelevanz des angedachten Feuchtemanagements

Um den oben ausgeführten Setzungen entgegenzuwirken, werden Böden i.d.R. mit Kunstharz oder Zementleim verpresst oder es werden Fundamentunterfangungen mit Betonbalken oder Kleinbohrpfählen aus Beton eingebracht (s. Kap. 3.1).

In Bereichen mit erwartungsgemäß hoher archäologischer oder bauhistorischer Befunddichte sind beide Verfahren nicht unproblematisch, zumal durch diese Verfahren der Wasserhaushalt des Bodens sowie der Lebensbereich von Bodenlebewesen und Pflanzen teilweise dauerhaft verändert werden.

Sehr viel ressourcenschonender und umweltgerechter erscheint der Ansatz, durch zeitweise Feuchtezufuhr die Eigenschaften feuchtesensitiver Böden in einem unkritischen Bereich zu halten (s. Kap. 3.).

Dadurch sollen die Setzungsprozesse gestoppt oder auf ein unkritisches Maß reduziert und der Schadensfortschritt am kulturellen Erbe angehalten werden. Zur Bodenbefeuchtung soll in erster Linie Niederschlagswasser eingesetzt werden. Kombinationen mit partieller Flächenentsiegelung sind zu prüfen. Es steht zu erwarten, dass durch Bodenbefeuchtungen auch das Wasserangebot für die Flora, insbesondere für Bäume im Wirkungsbereich derartiger Maßnahmen, erhöht wird.

Eine Übertragung des Konzepts zum Zwischenspeichern von Niederschlagswasser in Kombination mit gezielter Bodenbefeuchtung auf die Problematik der Trockenheit an innerstädtischen Baumbepflanzungen oder in historischen Parks und Gärten ist durchaus vorstellbar. Unter dem Stichwort *Schwammstädte* wird dieser Aspekt aktuell zahlreich diskutiert.

6. Innovativer Charakter des Projektes / Ausblick

Aufgrund der in manchen Fällen problematischen Auswirkungen der genannten ingenieurtechnischen Maßnahmen ist für die Synagoge Worms angedacht, einen neuartigen Ansatz zu erproben. Ein Feuchtemanagement mit gezielter Bodenbefeuchtung soll das weitere Austrocknen und Schwinden des Baugrunds in Trockenperioden aufhalten, somit den Baugrund unter dem mittelalterlichen Mauerwerk stabilisieren und weitere Setzungen vermeiden. Dieser konservatorische Ansatz würde die technischen Eingriffe in einen Boden mit zu erwartender hoher archäologischer Befunddichte minimieren und somit einen nicht unwesentlichen Anteil zum Erhalt des kulturellen Erbes beisteuern. Die aus der Objektstudie gewonnenen Erkenntnisse wären für zahlreiche weitere Gebäude und Mauerwerke im Umfeld denkmalgeschützten oder archäologisch bedeutsamen Bestandes als mögliche Alternative zu standardisierten Vorgehensweisen zu bewerten. Auf die Übertragbarkeit der angestrebten Lösung auf andere Themenbereiche und Problemfelder wurde bereits unter dem Punkt Umweltrelevanz (s. Kap. 5) hingewiesen.

7. „Fragenkatalog“ zur Fachtagung

Die angedachte Fachtagung sollte sich mit den o. g. Schwerpunktthemen auseinandersetzen. Entsprechend wurden im Vorfeld die wesentlichen, grundsätzlichen wie auch objektspezifischen Fragestellungen formuliert und zu einer Anfraging entsprechender Referentinnen und Referenten aus ganz Deutschland herangezogen. Die nachfolgend aufgezählten Fragestellungen sollten während der Tagung konkret herausgearbeitet werden:

- Mit welchen klimatischen Entwicklungen ist künftig zu rechnen?
- Welche Folgen haben diese Entwicklungen auf setzungsempfindliche Böden?
- Welche Bodenarten sind besonders betroffen?
- Wie kann derartigen Setzungen entgegengewirkt werden?
- Welche Auswirkungen können die unterschiedlichen „Gegenmaßnahmen“ auf archäologisches Erbe und denkmalgeschützte Bausubstanz haben?
- Kann eine gezielte zeitweise Befeuchtung von Böden eine realistische Alternative zur Vermeidung von setzungsbedingten Gebäudeschäden in archäologisch relevanten Untergründen darstellen?

Zudem sollte als Modellobjekt die unlängst als Teil des Weltkulturerbe SchUM-Stätten anerkannte Synagoge in Worms eingehender zur Schadensproblematik betrachtet werden. An diesem Gebäude ist vorgesehen, keine Eingriffe in den Baumbestand vorzunehmen, da die Bäume etliche Meter Entfernung zu den Bauwerken (Synagoge, Mikwe, Raschi-Haus) halten. Die Gestaltung des Synagogengartens einschließlich seines Baumbestandes soll so weit wie möglich beibehalten werden. Lediglich über der unterirdischen Mikwe soll zum Schutz vor Niederschlagswasser eine Bodenabdichtung unterhalb der Grasnarbe eingebracht werden, was in einem eng begrenzten Bereich mit kleineren Änderungen in der Geländetopographie verbunden sein wird. Die komplexen Zusammenhänge in Verbindung mit dem setzungsempfindlichen Untergrund sollten ebenfalls durch die Vortragsthemen behandelt werden.

8. Tagungsprogramm

Die zweitägige Fachtagung inklusive Exkursion wurde durch das IFS in Zusammenarbeit mit der GDKE, der Denkmalbehörde sowie den fachlich Beteiligten vor Ort (d. h. in Worms) organisiert. Die Veranstaltung wurde am 21. und 22. 3. 2023 im Tagungszentrum „Das Wormser“, unweit und somit fußläufig gut zur Synagoge gelegen, durchgeführt. Mit 109 Teilnehmenden war die Tagung gut besucht.

Die Tagung startete morgens mit Grußworten des

- Wormser Oberbürgermeisters Herrn **Adolf Kessel**.
- Nachfolgend begrüßte Frau **Dr. Heike Otto** als Generaldirektorin der Generaldirektion Kulturelles Erbe Rheinland-Pfalz (GDKE) die Teilnehmenden.

Der Themenblock des ersten Tages beinhaltete schwerpunktmäßig die aktuellen Auswirkungen und Tendenzen des Klimawandels. Im weiteren Verlauf wurden anhand von Praxisbeispielen die konkreten Auswirkungen von Austrocknungsprozessen in Form mannigfaltiger Schadensprozesse im Mauerwerk, deren individuelle Lösungsansätze zur Schadensvermeidung sowie die geotechnischen Hintergründe und die naturwissenschaftlichen, mineralogischen Wirkprozesse innerhalb von quellfähigen Böden bzw. Tonmineralen fachkundig dargestellt.

Im Einzelnen stellten nachfolgende Referentinnen und Referenten ihren Fachvortrag vor:

- **Frau Dr.-Ing. Roswitha Kaiser** (Landeskonservatorin, GDKE): Konservatorische Herausforderungen bei der denkmalfachlichen Begleitung von Maßnahmen an der Synagoge Worms.
- **Frau Dr. Lola Kotova** (Climate Service Center Germany (GERICS) / Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, Hamburg): Klimawandel und seine Auswirkungen auf Rheinland-Pfalz.
- **Herr Dipl.-Ing. Gregor Stolarski** (LGA Bautechnik GmbH, Nürnberg): Einwirkungen aus Veränderungen der Bodenfeuchte auf Tragwerke historischer Konstruktionen – Fallbeispiele.
- **Herr Prof. Dr.-Ing. Hauke Zachert / Frau Julia-Isabelle Ruopp** (TU Darmstadt, Institut für Geotechnik): Setzungsrisse als Klimawandelfolgen: bodenmechanische Ursachen und geotechnische Lösungsansätze.
- **Herr Priv.-Doz. Dr. Markus C. Blaich** (Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege): Beton, Stein und Eisen bricht. Beispiele zur Sicherung mittelalterlicher Fundamente in Niedersachsen.



Abb. 5: Blick in den Tagungsraum mit Rednerin und Auditorium.

Zum Ausklang des ersten Tages wurde eine

- **Führung zum jüdischen Friedhof sowie zur Synagoge** angeboten.

Beide Stätten sind herausragender Bestandteil des jüngst als UNESCO-Welterbe ausgezeichneten historischen jüdischen Erbes der SchUM-Städte. An der Synagoge konnten in kleinen Gruppen die Komplexität der Schadensbildung und auch der Handlungsbedarf zu einer Rissanierung eindringlich demonstriert werden. Die dortigen besonderen Verhältnisse mit einer beengten Zugänglichkeit, der archäologischen Fundstellen und sensibler religiöser Einschränkungen resultierten schnell in Fachdiskussionen der Teilnehmer und zeigten das große fachliche Interesse des Themenbereichs auf.

Der zweite Tag der Tagung war konkret der Synagoge mit ihrem geschichtlichen Werdegang und den bautechnischen Untersuchungen und Sanierungskonzepten gewidmet:

- **Frau Nadine Hoffmann** (GDKE, Welterbesekretariat Rheinland-Pfalz, GDKE): Der Synagogenbezirk in Worms als Teil der UNESCO-Welterbestätte SchUM-Stätten Speyer, Worms und Mainz.
- **Herr Aquilante De Filippo / Frau Bettina Gransche** (Untere Denkmalschutzbehörde, Stadt Worms): Erkenntnisstand zur Bau- und Restaurierungsgeschichte der Wormser Synagoge.
- **Herr Dr.-Ing. Ulf Grziwa** (Neiss Tragwerksplanung GmbH, Worms): Tragkonstruktion und Bauwerkssicherung. Maßnahmen zur baustatischen Gebäudeüberwachung und -stabilisierung.
- **Herr Holger Grewe** (Stadt Ingelheim, Forschungsstelle Kaiserpfalz): Archäologische Grabungen und Befunde 1957– 2022.
- **Herr Dr.-Ing. Heribert Feldhaus** (Büro für Bauaufmaß und Bauforschung, Trier): Die Fundamente der Wormser Synagoge aus Sicht der Bauforschung.
- **Herr Dipl.-Ing. Jürgen Hamm** (Hamm Architektur und Denkmalpflege, Worms): Zusammenfassung: Schäden und bisherige Sicherungsmaßnahmen.
- **Herr Prof. Dr.-Ing. Christoph Duppel** (Hochschule RheinMain, Wiesbaden): Bauaufnahme und Bestandserkundungen an der Synagoge in Worms – Ergebnisse einer Projektarbeit des Studiengangs Baukulturerbe.
- Mit einer abschließenden Podiumsdiskussion, moderiert von **Herrn Dr. Michael Auras** (Institut für Steinkonservierung e. V.), wurden die Ergebnisse der Tagung zusammengefasst, aufgearbeitet und zukünftig notwendige Abstimmungen und Themenkomplexe diskutiert. Die Podiumsdiskussion war mit Vertretern und Vertreterinnen aus den Fachgebieten bauliche und archäologische Denkmalpflege, Statik und Architektur/ Fachplanung besetzt.

9. Öffentlichkeitsarbeit und Publikation der Ergebnisse

Die zur Tagung gehörende Publikation ist im Frühsommer 2024 erschienen und wird auf der Homepage der GDKE (s. o.) beworben sowie inhaltlich vorgestellt (<https://kulturerleben.rlp.de/service/presse/detail/klimawandel-und-setzungsbedingte-bauwerksschaeden-am-beispiel-der-wormser-synagoge>).

Klimawandel und setzungsbedingte Bauwerksschäden am Beispiel der Wormser Synagoge. - Denkmalpflege in Rheinland-Pfalz. Aus Forschung und Praxis, Band 7, Hrsg.: GDKE, Landesdenkmalpflege / Institut für Steinkonservierung e. V., 168 S., 211 Abb., ISBN: 978-3-7319-1416-7, Michael Imhof Verlag, 29,95 Euro.

Das Heft ist über den Buchhandel zu erwerben.

Ein Presstext zur Tagung und Publikation wurde durch die GDKE verfasst und herausgegeben.

Eine Rezension in der Fachzeitschrift: Die Denkmalpflege - Wissenschaftliche Zeitschrift der Vereinigung der Denkmalfachämter in den Ländern ist für die Ausgabe November 2024 vorgesehen.

10. Fazit, Fortführung der Thematik und Perspektiven

Die Synagoge in Worms, ein wichtiger Teil des UNESCO-Weltkulturerbes SchUM-Stätten, verdeutlicht mit den aktuell eingebrachten Sicherungsmaßnahmen sowohl am Außenbau als auch an den Gewölben des Westjochs innen eindringlich die Auswirkungen von austrocknungsbedingten Schwindprozessen im Boden, was sich mit Setzungen im Fundamentbereich und letztendlich im gesamten Baukörper durch Rissbildungen präsentiert. Ausgehend von denkmalpflegerischen, archäologischen, bauspezifischen und religiösen Hintergründen können an der Synagoge keine „standardisierten“ Ertüchtigungskonzepte zu einer Stabilisierung des Baukörpers umgesetzt werden, vielmehr werden individuelle, alternative Konzepte und Detailplanungen benötigt. Die Erschwernisse, die einer schnelle Konzeptfindung entgegenstehen, wurden durch Vorträge zur baulichen Geschichte mit Zerstörung und Wiederaufbau sowie den vorliegenden Boden- und Gründungsverhältnissen aufgezeigt.

Die sehr komplexen Schadensprozesse werden mit den verstärkten Klimaveränderungen insbesondere der letzten Jahre in Verbindung gebracht. Augenscheinliche Austrocknungen und Absenkungen des Grundwasserspiegels lassen sich bereits aus den Niedrigwasserpegeln des Rheins ablesen, wobei Worms in seiner direkten Nähe zum Rhein sicherlich von diesen Auswirkungen direkt betroffen sein dürfte.

Um vertiefte Kenntnisse zu den Folgen des Klimawandels und die dadurch verbundenen Gebäudeschäden sowie auch die möglichen Untersuchungskampagnen, wirksame Gegenmaßnahmen oder prophylaktische Verhinderungskonzepte aufzeigen und vermitteln zu können, organisierte der Projektnehmer IFS in Zusammenarbeit mit der Landesdenkmalpflege Rheinland-Pfalz eine zweitägige Tagung, die den aktuellen thematischen Forschungsstand vorstellte. Unter Beteiligung von Planern, Wissenschaftlern und Fachleuten -insbesondere aus dem Bereich Denkmalpflege und Archäologie- konnten wesentliche Grundlagen und innovative Konzepte vorgestellt werden, die eine übergeordnete aber auch konkrete Übertragung auf die Synagoge in Worms zum Ziel hatte.

Als ein wichtiges Resümee der Tagung kann festgehalten werden, dass eine Klimaveränderung definitiv bereits stattgefunden hat und auch weiterhin -tendenziell sich verstärkend- stattfinden wird. Die Veränderungen sind durch langjährige regionale, nationale wie internationale Wetteraufzeichnungen sowie die globalen Auswirkungen mit Extremwetterbedingungen zu belegen. Auch in Deutschland sind die Veränderungen markant durch einerseits Starkregenereignisse bzw. Überschwemmungen und andererseits durch langanhaltende Hitzeperioden mit tiefgründigen Austrocknungen dokumentiert.

Die Synagoge in Worms als Fallbeispiel scheint mit ihrem Schadensbild und der Schadensentwicklung durchaus keinen Einzelfall darzustellen, wie dies anhand den Fachvorträgen mit weiteren prominenten Beispielen aus der jüngsten Zeit eindrucksvoll belegt wurde. Die auftretenden Setzungsprobleme stehen offensichtlich in klarer Abhängigkeit mit den verstärkt in den letzten Jahren auftretenden Trocken- bzw. Dürreperioden.

Die Vorgänge im Boden erweisen sich allerdings als sehr komplex und verlangen nach einer sorgfältigen Untersuchung. Grundlegend gehen die Setzungen innerhalb der Baugründung auf die Anwesenheit von quellfähigen Tonmineralen bzw. lehmig-tonigen Bodenschichten zurück, was ein Auftreten der Schäden auf solche Untergrundbeschaffenheiten mit natürlichen Sedimentablagerungen oder auf künstliche Baumaßnahmen begrenzt. Die Schwindvorgänge im Boden laufen dabei als kontinuierliche Prozesse über eine größere Spannbreite im Feuchtegehalt ab, so dass sie über einen längeren Zeiteinwirkung stattfinden.

Ein wichtiger Schritt bei der Erkennung und weiteren Fachplanung im Umgang mit Schwindvorgängen bzw. Setzungserscheinungen ist die Aufzeichnung des vorherrschenden Feuchtegehaltes im betroffenen Bodenbereich. Als geeignetes Werkzeug sind hierzu sog. Setzungsspiegel einsetzbar, welche die Schwindvorgänge (Setzungen) messen. Zudem ist mithilfe von Feuchtesensoren, welche die Kapillarsaugspannung im Boden aufzeichnen, auch der korrespondierende Feuchtegehalt im Boden zu ermitteln. Ein Feuchtemonitoring wäre mit wissenschaftlichen Untersuchungen also durchaus durchzuführen; die Frage, wann und wie stark der Boden auf einen Feuchtwechsel reagiert, könnte mithilfe dieser Methodik angegangen werden. Davon ausgehend wurden Überlegungen geäußert, über ein

entsprechendes Feuchtemanagement diese Setzungen abfangen oder zumindest abpuffern zu können. Unterstützt wird dieser Ansatz durch einen Vergleich konkret abgerufener Messdaten zur Rissbreitenmessung an der Synagoge. Demnach sprechen erhöhte bzw. zunehmende Feuchtegehalte nach Regenereignissen dafür, dass sich der Baugrund bereits deutlich zu stabilisieren beginnt. Eine Korrelation zwischen dem Einsetzen des herbstlichen Niederschlags und dem (vorläufigen) Ende der setzungsbedingten Verformungen mit Rissbreitenveränderungen ist somit gegeben.

Ein derart gestaltetes Feuchtemanagement wurde mit einem vergleichbar geschädigtem Referenzobjekt diskutiert, bei dem ein Rissmonitoring installiert ist und bereits seit einigen Jahren ausgewertet wird. Die Messdaten werden insbesondere mit einer durchgeführten Baumaßnahme einer Rigolenversickerung interpretiert, durch die anfallendes Regenwasser kontinuierlich in den Untergrund zu einer Vergleichmäßigung des Feuchtehaushalts eingebracht wurde. Eine genaue Auswertung und Korrelation der Parameter müssen sicherlich noch erfolgen, vorbehaltlich scheint aber eine -zumindest temporäre- Stabilisierung des Untergrundes mithilfe solcher Maßnahmen erfolgreich zu funktionieren. Wie jedoch eine prognostizierte Verstärkung der Klimaveränderung und die einhergehende tiefergründige Austrocknung der Bodenschichten damit zu lösen wäre, muss kritisch hinterfragt werden. Zumindest könnten aber die nächsten Jahre überbrückt und währenddessen weitere Konzepte diskutiert und überprüft werden.

Unabhängig, welche baulichen Maßnahmen zur Behebung der Setzungen oder entsprechender Rissbildungen ausgeführt wurden, ist ein anschließendes Monitoring unabdingbar, da sich ein Erfolg bei den komplexen Vorgängen oft erst nach langjähriger Kontrollzeit aufzeigen lässt.

Die Vorträge aus den unterschiedlichen Disziplinen haben gut dargestellt, dass nach wie vor ein großer Forschungsbedarf zu einer grundsätzlichen Korrelation von Rissbildungen und Klimaeinwirkungen besteht. Auch belegen aktuelle Literaturrecherchen eine bislang nur ansatzweise Aufarbeitung des komplexen Themas. Die große Resonanz während der Tagung innerhalb des beteiligten Fachkreises beweist zudem die aktuelle Brisanz zur Schadensentwicklung. Mit dem Fachkolloquium und der zugehörigen Publikation ist es gelungen, eine notwendige verstärkte Aufmerksamkeit der Bauverantwortlichen auf das Thema der Bauwerksschäden durch austrocknungsbedingte Bodensetzungen zu lenken. Die Beiträge im Tagungsband liefern eine gute Grundlage, die Hintergründe der Setzungserscheinungen entsprechend der Rissbildungen an Bauwerken zu verstehen und auch geeignete Sanierungstechniken oder prophylaktische Maßnahmenkonzepte auswählen zu können.

Mit einer angedachten Fortsetzung des Forschungsthemas sollen eindeutiger Zuordnungen, gezieltere Sanierungsmaßnahmen und eine wirksame Schadensverhütung zusammengetragen und ausgewertet werden. Dies erscheint umso wichtiger für Bauwerke in Risikogebieten, die im Untergrund bzw. Baugrund durch lehm- oder tonhaltige Bodenaufbauten in besonderer Art betroffen sind. Nach abschließender Expertenmeinung bietet sich eine an die Tagung fortführende Erstellung einer Machbarkeitsstudie an, die in konkreten Maßnahmen mit Überwachung und Regelung der Bodenfeuchte am Weltkulturerbe der Synagoge Worms resultieren soll. Nach einer Umsetzung der Maßnahme wird eine regelmäßige Zustandskontrolle des Bauwerks notwendig sein. Dies wäre jedoch bereits durch die turnusmäßigen Besuche der ICOMOS-Monitore sichergestellt.

Wenn das angedachte System einer Regenwasserspeicherung in Kombination mit einer gezielten Bodenbefeuchtung erfolgreich umgesetzt werden kann, böte es das Potential, auch zum Schutz vorhandener innenstädtischer Baumbestände eingesetzt zu werden.

Eine wesentliche Frage blieb unter vielen Teilnehmern aber nach wie vor unbeantwortet: ob und inwieweit eine Rissbildung in Gebäuden auf vergleichbare Prozesse, wie an der Synagoge in Worms vorgestellt, zurückzuführen ist und mit welcher Untersuchungsmethodik dies festzulegen sei. Im Nachgang zur Tagung wurden die Fragestellungen dementsprechend in einer kleinen Arbeitsgruppe diskutiert und Überlegungen zu einer Forschungsvertiefung ausgesprochen.

Sollten an anderen Bauwerken mit nahem Baumbestand vergleichbare Setzungsprobleme auftreten, böte sich die Möglichkeit, die kombinierte Wirkung der gezielten Feuchtezufuhr auf das Schwindverhalten der Böden und auf die Erhaltung des Baumbestandes hin zu überprüfen. Mittlerweile konnten

erste ausgewählte Kirchengebäude mit markanter, bislang nicht zugeordneter Rissbildung begutachtet werden und eine wissenschaftliche Aufarbeitung möglicher klimabedingter Schadensprozesse mit entsprechenden Arbeitspaketen und beteiligten Fachkreisen zu einem Forschungsvorhaben gebündelt werden.