

# KERES

Kulturgüter vor Extremklimaereignissen schützen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



## Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

Martin-Luther-Ring 13, 04109 Leipzig  
[www.imw.fraunhofer.de](http://www.imw.fraunhofer.de)

Telefon +49 341 231039-125  
Telefax +49 341 231039-9125  
[uta.pollmer@imw.fraunhofer.de](mailto:uta.pollmer@imw.fraunhofer.de)

Herausgeberin: Uta Pollmer  
Redaktionsschluss: Dezember 2023

### Bildrechte:

**Cover:** Blick auf Schloss Charlottenhof © SPSG/Hans Bach;  
**Inhaltsverzeichnis:** Park Sanssouci © SPSG/Leo Seidel; **Einleitung:** Köln, Dom, Innenraum ohne Gestühl, Ansicht nach Osten, Gesamtansicht © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte/Matz und Schenk; **Kapitel 1:** Hamburg, Chilehaus © WorldInMyEyes über Pixabay; **Kapitel 2:** Frauenberg-Kapelle Sufferloh © Fraunhofer IMW/Uta Pollmer; **Kapitel 3:** Park Sanssouci, Sturmfolgen 17.02.22 © SPSG/Katharina Matheja; **Kapitel 4:** Kölner Dom, Südseite, Strebebogen mit Spuren der Verwitterung © Hohe Domkirche Köln/Jennifer Rumbach; **Kapitel 5:** Freilichtmuseum Bad Windsheim, Hochwasser Juli 2021 © FFM/Herbert May; **Zusammenfassung:** Kloster Benediktbeuern nach Hagelsturm © Fraunhofer IBP/Ralf Kilian; **Danksagung:** KERES-Abschlussveranstaltung 05.10.23 Potsdam © SPSG/Daniel Lindner

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung der RG-Bau im RKW Kompetenzzentrum und des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen. Alle in diesem Werk genannten DIN-Normen sind wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Normen ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Fraunhofer IRB | Verlag



# Inhalt

## Inhalt

Inhalt .....	3
Einleitung .....	5
<b>Kapitel 1</b>	
Regionale Relevanz von Extremwetterereignissen und Naturkatastrophen .....	10
<b>Kapitel 2</b>	
KERES-Methodik zur Bewertung der Vulnerabilität .....	24
<b>Kapitel 3</b>	
Vulnerabilität von Kulturerbe .....	36
3.1 Vulnerabilität historischer Bauten .....	37
3.2 Vulnerabilität historischer Gärten .....	46
<b>Kapitel 4</b>	
Prävention und Anpassung .....	52
4.1 Fall-Analysen, Entwicklung von Präventions- und Anpassungsstrategien .....	53
4.2 Prävention und Anpassung für historische Gärten .....	69
<b>Kapitel 5</b>	
Operatives Krisenmanagement für Kulturerbe .....	73
5.1 Die KERES-Plattform .....	74
5.2 Organisations- und Kommunikationsstrukturen für die Notfallplanung und -bewältigung .....	83
<b>Kapitel 6</b>	
Zusammenfassung: Herausforderungen für die Kulturerbegemeinschaft und Lösungsansätze .....	87
Danksagung .....	92

Diese Broschüre richtet sich an ein breites Spektrum von Agierenden: angefangen bei Amts- und Entscheidungsträgern und -trägerinnen auf lokaler, regionaler, nationaler und europäischer Ebene über Verwaltungen von Kulturerbeeinrichtungen bis hin zur Gesellschaft als Ganzes.



# Einleitung

**BMBF-Verbundvorhaben KERES –  
Kulturgüter vor Extremklimaereignissen schützen und  
Resilienz erhöhen 2020-2023**

## Präambel

Der rasant fortschreitende Klimawandel befeuert die Zunahme und Häufigkeit von Extremklimaereignissen, die ein erhebliches Sicherheitsrisiko für Menschen und ihre Lebensgrundlagen darstellen. Dies wurde gerade in Dubai auf der Weltklimakonferenz COP28 intensiv diskutiert. Zu den Lebensgrundlagen gehören auch sozio-kulturelle Infrastrukturen wie Kulturgüter, die sowohl die gebaute Umwelt als auch die kunstvoll-funktional gestalteten historischen Gärten und Kulturlandschaften umfassen. Die Kulturgüter sind nicht nur Pfeiler unserer Identität, sie liefern auch mit ihrem eingebetteten, traditionellen Wissen Grundlagen und Lösungen zur Anpassung an den Klimawandel. Dies sind zum Beispiel traditionelle kohlenstoffneutrale Bauweisen, innovative Techniken des Bodenschutzes und des Wassermanagements zur Stärkung der Widerstandskraft der Vegetation, Beiträge zur Aufrechterhaltung der Biodiversität in geschützten Kulturlandschaften oder die wichtige Funktion der historischen Parklandschaften für die Gesunderhaltung der Menschen, was sich während der Coronapandemie eindrucksvoll zeigte.

Doch diese Kulturgüter selbst sind in einem nie gekanntem Ausmaß vom Klimawandel bedroht, wie es im 2022 erschienenen Bericht der OMK-Expertengruppe der EU-Mitgliedstaaten eindrücklich beschrieben ist [European Commission 2022]. Die Expertengruppe formulierte 10 Empfehlungen für die EU und ihre Mitgliedstaaten: Insbesondere auf nationaler Ebene muss mehr in die Forschung zu Auswirkungen des Klimawandels investiert werden, um effektive Präventionsmaßnahmen und geeignete Anpassungsstrategien entwickeln zu können. Das Thema Klimawandel und Kulturgüterschutz wurde auch im Ideenlauf im Wissenschaftsjahr 2022 angesprochen. Dort haben Bürgerinnen und Bürger 14.439 Fragen für die Wissenschaft gestellt. Im Ergebnisbericht des BMBF wird der Wunsch der Öffentlichkeit aufgeführt, dass sich die Forschung mit dem Thema beschäftigt, wie wir unser Kulturerbe vor den Auswirkungen des Klimawandels schützen können. Ministerin Stark-Watzinger kommentierte: „Diese Impulse sind wertvolle Inspiration für Wissenschaft und Forschungspolitik, für zukünftige Innovationen und für neue Chancen für unser Land.“ [Bundesministerium für Bildung und Forschung 2022]. Das BMBF-Projekt „KERES – Kulturgüter vor Extremklimaereignissen schützen und Resilienz erhöhen“ ist ein wichtiger Beitrag zu den vorhergenannten Forderungen.



Prof. Dr. Michael Rohde,  
Gartendirektor, Stiftung  
Preußische Schlösser und  
Gärten Berlin-Brandenburg  
© privat



Dr. Johanna Leissner,  
Projektleiterin KERES,  
Wissenschaftliche Repräsentantin,  
Fraunhofer-Büro Brüssel  
© Fraunhofer ISC

## Erstes deutsches Forschungsprojekt zu Klimawandel und Kulturgüterschutz

Forscherinnen und Forscher aus der Fraunhofer-Gesellschaft, dem German Climate Service Center und der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg untersuchten im bisher einzigen nationalen Forschungsprojekt erstmals modellhaft an fünf Fallbeispielen die Auswirkungen zukünftiger Extremklimaereignisse auf das kulturelle Erbe. Ebenfalls Neuland wurde mit dem multidisziplinär zusammengesetzten Konsortium betreten. Erstmals entwickelten Kulturerbe- und Naturerbe-Expertinnen und -Experten in einem gemeinsamen Forschungsprojekt zusammen mit Forschenden der Klimawissenschaften sowie Feuerwehr und THW Lösungen und Strategien, um unser Kulturerbe in Zeiten zunehmender Klimakatastrophen zu schützen und resilienter zu machen. Doch wie genau sieht die Zukunft aus? Welche Extremklimaereignisse kommen auf das Kulturerbe in Deutschland zu? Und wie kann es vor schädigenden Klimaauswirkungen geschützt werden? Diesen Fragen hat sich das KERES-Konsortium während der Projektlaufzeit (2020–2023) gewidmet.

## Dringlichkeit: Extremwetter – ein Sicherheitsrisiko für gebaute Kulturgüter

Gebaute Kulturgüter sind in einem hohen Maß vulnerabel, was die Wirkung von Extremwetterereignissen betrifft. Die meisten Gebäudeschäden stehen in Zusammenhang mit Starkregen und Feuchtigkeit. Insbesondere Fachwerkgelände, die in Deutschland wesentlich die Identität unserer Städte und Dörfer mitprägen, sind hier aufgrund ihrer Konstruktion schadensanfällig und daher ein Gebäudetypus, der besonderer Aufmerksamkeit bedarf. Doch Schlagregen und Stürme beschädigen auch besonders exponierte Gebäude im Voralpenland oder sehr hohe Bauwerke, beispielsweise reich mit filigranen Natursteinornamenten geschmückte Kathedralen wie den Hohen Dom zu Köln. Hier ist neben der Erosion durch windgetragene Partikel die Sicherheitsgefährdung für Personen durch herabfallende Steine gegeben. Auch sommerliche Hitze stellt Kulturgüter vor Herausforderungen. In sehr heißen und trockenen Sommern sinkt die relative Luftfeuchte in historischen Gebäuden stark ab, was zu Schäden an der Ausstattung und den Sammlungen führen kann. Die hohen Temperaturen bedrohen nicht nur Kunstwerke, sondern sind auch eine gesundheitliche Belastung für Besucherinnen und Besucher, sodass in Zukunft immer öfter kulturelle Bauten im Sommer nicht mehr zugänglich sein werden.

Die Dringlichkeit und Aktualität des im KERES-Projekt behandelten Themas zeigt sich an den in den letzten Jahren vermehrt eingetretenen Extremereignissen und den damit verbundenen erheblichen Sicherheitsrisiken für gebaute Kulturgüter und ihre Besucherinnen und Besucher. So traten allein während der Projektlaufzeit vom Dezember 2020 bis zum November 2023 drei verheerende Extremwetterereignisse auf:

- eine Jahrhundertflut in Bad Windsheim (9. Juli 2021), die die frisch restaurierten, historisch wertvollen Fachwerkhäuser im größten Freilandmuseum Deutschlands massiv beschädigt hat,
- die verheerende Flutkatastrophe im Ahrtal und in Nordrhein-Westfalen (15. Juli 2021), die neben den vielen Menschenleben auch historische Dörfer und Städte in nie gekanntem Ausmaß zerstört hat,
- sowie ein 10-minütiger Hagelsturm (26. August 2023), der das älteste Kloster Deutschlands, Benediktbeuern, sowie das sich darin befindende Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege und die historische Glashütte Joseph von Fraunhofer stark beschädigt hat. Dabei wurden nicht nur die Dächer und barocken Fenster vollständig zerstört, sondern es traten auch erhebliche Sicherheitsrisiken auf, so dass das Kloster für längere Zeit nicht zugänglich war. Die Schadenserhebung und Schätzung der Kosten sind noch nicht abgeschlossen, sie werden aber im Bereich von mehreren Millionen liegen.

Diese Ereignisse belegen, dass dem Katastrophenschutz und der Planung von Sicherheitsvorkehrungen im Bereich des Kulturerbes vermehrt Rechnung getragen werden muss. Aber auch die Post-Katastrophenmaßnahmen müssen schnell, nachhaltig und denkmalverträglich durchgeführt und wissenschaftlich untersucht und begleitet werden, um Fehlanpassungen zu vermeiden und die Resilienz zu erhöhen.

## Dringlichkeit: Extremwetter – ein Sicherheitsrisiko für historische Gärten als „lebende Kulturgüter“

Historische Gärten, Parks und Kulturlandschaften stellen als überwiegend lebende Denkmale im Gegensatz zu Bau- oder Kunstwerken aus fester Materie wie Schlössern, Skulpturen, Möbeln oder Gemälden einzigartige Kunstwerke mit besonderem Denkmalcharakter dar. Sie sind in hohem Maße umweltabhängig und unterliegen aufgrund steigender Besucherfrequenzen zusätzlich wesensfremden Fehlnutzungen und Schädigungen. Wie keine andere Kunstgattung sind historische Gärten und Parks jedoch als lebendige, dynamische Kulturdenkmale weltweit seit mehr als zehn Jahren von zunehmenden Wetterextremen des menschlich verursachten Klimawandels betroffen. Damit erhöht sich in den öffentlich zugänglichen Anlagen auch das Sicherheitsrisiko für Besucherinnen und Besucher, insbesondere durch Astbruchgefahren oder verkehrsunsichere Parkwege.

Das Projekt KERES fasst bedeutsame Erfahrungen in Theorie und Praxis zusammen. Es zeigt die zunehmenden Gefährdungen und Sicherheitsrisiken auf, bündelt Erkenntnisse bedrohlicher Klimaprognosen und bietet auf der Grundlage vielfältigen Expertenwissens notwendige und modellhafte Lösungsansätze zur Entwicklung und Optimierung von Anpassungsmaßnahmen sowie zur Förderung der Resilienz historischer Gärten.

Für die historischen Gärten, Parks und Kulturlandschaften sind aktuelle wissenschaftliche Daten und Erkenntnisse angewandter Forschungen am Beispiel der Potsdam-Berliner Kulturlandschaft, seit 30 Jahren als „hervorragendes Beispiel von Architekturschöpfungen und Landschaftsgestaltungen“ UNESCO-Weltkulturerbe, mit dem vielfältigen Erfahrungswissen der Praxis verknüpft worden. Im Ergebnis werden erstmals Klimamodellierungen, Sensormessungen und Simulationen zu Hitzephasen und Sturmereignissen bereitgestellt. Auf dieser Basis sind modellhafte Klimaanpassungsmaßnahmen aufgezeigt worden: zum Beispiel die nachhaltigen Verbesserungen für den Erosionsschutz von Parkwegen oder experimentelle Entwicklungsflächen mit Einbringung von Bodensubstraten für notwendige Nachpflanzungen. Die hier erarbeiteten Ergebnisse, bereitgestellt über eine umfassende Wissensplattform (Wissenstransfer), dienen nicht allein der wissenschaftlichen und technischen Ergebnisverwertung und sind damit für die

Institute ein wichtiger Zwischenschritt auf dem Weg von grundlagenorientierten Arbeiten zur konkreten Umsetzung in die Praxis (Technologietransfer).

## KERES-Ergebnisse sind Neuland für Kulturgüterschutz

Die wichtigsten Forschungsergebnisse des Projekts KERES zur Wirkung von Extremwetterereignissen auf Kulturgüter wurden auf der Abschlussveranstaltung am 5. Oktober 2023 im Orangerieschloss Sanssouci in Potsdam einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Die erzielten Ergebnisse stellen für den Kulturgüterschutz in Deutschland dringend benötigte Innovationen dar und sind wichtige Bausteine auf dem Weg zur Klimaresilienz und zu einem besseren Katastrophenschutz. Folgende Forschungsergebnisse wurden erzielt:

- Vorhersage von zukünftigen Extremklimaereignissen erstmals mit Hilfe hochaufgelöster regionaler Klimamodellierung basierend auf einem Ensemble von 10 Klimamodellen,
- erstmalige Erstellung von sogenannten Climate Fact Sheets für die 5 ausgewählten Fallstudienorte (Hamburg – UNESCO-Welterbe Speicherstadt und Chilehaus, Potsdam – UNESCO-Welterbestätten Park Sanssouci mit Schloss Charlottenhof und Park Babelsberg, Köln – UNESCO-Welterbe Kölner Dom, Freilandmuseum Bad Windsheim und die Frauenbergkapelle in Sufferloh in Südbayern)
- erstmalige Entwicklung einer ontologiebasierten Datenplattform zur Integration und Bereitstellung von Daten aus verschiedensten Quellen als eine Art Frühwarnsystem für Sicherheit und Katastrophenschutz,
- erstmalige Entwicklung einer Software für die Erstellung von Laufkarten zur Bergung von Kulturgütern für die Feuerwehr (WALKER),
- Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Modellierung von hochaufgelösten Stadtklimata und Windwurfereignissen,

- erstmalige Erstellung von Klimasteckbriefen für vulnerable historische Gebäude,
- Analyse innovativer Methoden für die Erhöhung der Resilienz von Bäumen und Pflanzen sowie von Wegedecken in Kulturlandschaften zur Verminderung von Sicherheitsrisiken für Besucherinnen und Besucher,
- Entwicklung und Durchführung von 2 Planspielen in Form einer Zukunftswerkstatt für Kulturerbeeinrichtungen zur Anpassung an Extremklimaereignisse und Erhöhung der Resilienz,
- erstmalige Etablierung eines multidisziplinären Expertengremiums bestehend aus Kulturerbeeinrichtungen deutschlandweit, der Feuerwehr, dem THW sowie weiteren Einrichtungen wie Universitäten und Behörden.

## Beiträge von KERES zur Gesellschaft und Politik

Die über 70 Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Abschlussveranstaltung haben betont, dass das KERES-Projekt eine Vorreiterrolle für den Kulturgüterschutz in Deutschland in Zeiten des Klimawandels mit zunehmenden Extremklimaereignissen einnimmt. Denkmalschutz und Denkmalpflege tragen zum Klimaschutz bei, erfordern jedoch zur Bewahrung und Nutzbarkeit eine Vielfalt innovativer Klimaanpassungsmaßnahmen. Das KERES-Projekt hat dazu beigetragen, dass im Kulturerbebereich und darüber hinaus auch in anderen Sektoren erkannt wurde, dass Extremklimaereignisse eine Bedrohung und ein Sicherheitsrisiko für das Kulturerbe darstellen und es weitere Forschung braucht, um geeignete Präventionsstrategien und Schutzmaßnahmen zu entwickeln.

Die bisher im Projekt erzielten Ergebnisse müssen im Anschluss erfolgreich in die Praxis überführt und weiterentwickelt werden. Dazu gehören zum Beispiel die Climate Fact Sheets, die ontologische Datenplattform, die Laufkarten-Software WALKER, ein neu entwickeltes Fachwerkfassadenschutzsystem und die Zukunftswerkstatt. Allen Resultaten gemeinsam sind ihr hoher Innovationsgrad und ihr großes Potenzial, die Resilienz der Kulturgütergemeinschaft auf nachhaltige und klimagerechte Weise zu stärken und die zivile Sicherheit zu verbessern. Damit werden die Anwenderinnen und Anwender aus dem Kulturerbebereich in die Lage

versetzt, zukünftige Extremklimaereignisse mit praktikablen Lösungen effizient zu meistern.

Das KERES-Projekt leistet einen wichtigen Beitrag zu den Forderungen der OMK-Expertengruppe der EU-Mitgliedstaaten und den Erwartungen der Bürgerinnen und Bürger, die sich im Ideenlauf zum Wissenschaftsjahr 2022 geäußert haben. Das Projekt hat zudem die Diskussion befördert, die UNESCO-Welterbestätten in die Deutsche Anpassungsstrategie Klimawandel aufzunehmen.

## Quellen

Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF (2022). **IDEENLAUF. Gesellschaftliche Impulse für Wissenschaft und Forschungspolitik.** <https://www.wissenschaftsjahr.de/2022/ideenlauf.html#Downloads>

European Commission, Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture (2022). **Stärkung der Resilienz des Kulturerbes gegen den Klimawandel: Der europäische Grüne Deal trifft Kulturerbe.** <https://data.europa.eu/doi/10.2766/604948>

# Kapitel 1

## Regionale Relevanz von Extremwetterereignissen und Naturkatastrophen

Lola Kotova, Ksenia Gorges

### Einführung

Obwohl bereits wissenschaftliche Informationen zum Klimawandel in Deutschland vorliegen [Brasseur et al. 2017, Pfeifer et al. 2020], gibt es so gut wie keine Forschung und belastbaren Daten zu den Sicherheitsrisiken und Auswirkungen zukünftiger Extremwetterereignisse auf die Erhaltung unserer Kulturgüter. Da dem Kulturerbesektor eine wichtige Rolle in der Gesellschaft und der Wirtschaft zukommt, sind die grundlegenden Untersuchungen zur regionalen Relevanz von Extremwetterereignissen und Naturkatastrophen und zur Vulnerabilität schützenswerter Kulturgüter von besonderer Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund war ein Ziel des KERES-Projekts, die physikalischen Hauptklimatreiber zu identifizieren, die sowohl das gebaute Kulturerbe wie auch historische Gärten und Kulturlandschaften beeinflussen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Extraktion robuster Informationen über die Wahrscheinlichkeit, Größe und Dimension der zukünftigen Extremereignisse, vor allem von langandauernden Hitzeperioden, von Extremniederschlägen und Trockenperioden. Diese Informationen wurden in die Erstellung einer Ontologie und Wissensplattform integriert, die als eine Art Frühwarnsystem dienen soll (siehe Kapitel 5.1).

### Klimamodellierung – ein Überblick

Um die mögliche Klimaänderung in der Zukunft zu projizieren, werden Erdsystemklimamodelle (ESMs) verwendet. Ein vollständiges ESM berücksichtigt die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Erdsystems, einschließlich der Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Biosphäre und Landoberfläche. Damit liefern ESMs dreidimensionale Klimavariablen, u.a. Temperatur, Niederschlag und Wind, sowohl für die Vergangenheit als auch für die Zukunft. Aufgrund der Komplexität des Klimasystems, der mathematisch-physikalischen Gleichungen der Modelle und der natürlichen Variabilität des Klimas sind die Ergebnisse des ESM keine exakten Vorhersagen, sondern Klimaprojektionen. Die neuesten Daten über zukünftige Klimaänderungen wurden mit Hilfe von ESMs im Rahmen des WCRP Coupled Model Intercomparison Project [Phase 5 und 6 (CMIP5 & CMIP6)] berechnet [Taylor et al. 2012, IPCC 2013, Eyring et al. 2016]. Die Gitterstruktur eines

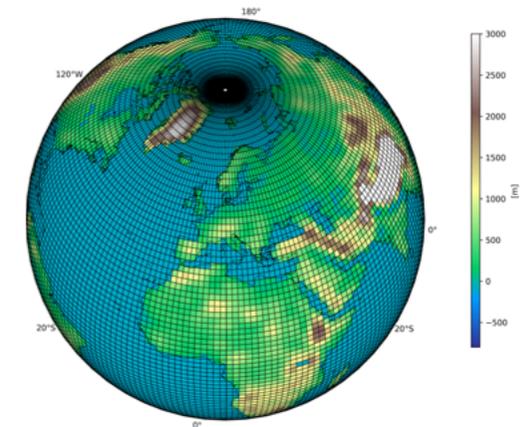


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Modellgitter des ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI-ESM-LR). Die Auflösung der Atmosphäre beträgt 1,8°. Die Beschriftungsleiste zeigt die Orographie des ESM.

ESM ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Der Abstand der Gitterboxen zueinander bestimmt die räumliche Auflösung des Klimamodells.

Die Abschätzung der Bandbreite zukünftiger Klimaänderungen erfordert Szenarien über mögliche gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklungen. Diese Szenarien werden vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [IPCC 2013] entwickelt, um die zu erwartenden Veränderungen der Landnutzung und der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre in den nächsten Jahrzehnten abzuschätzen. Die in CMIP5 verwendeten Szenarien sind repräsentative Konzentrationspfade (Representative Concentration Pathways, RCPs), die die unterschiedlichen sozioökonomischen Entwicklungen und die damit verbundenen unterschiedlichen Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt der Erde berücksichtigen [Taylor et al. 2012]. Im Mittelpunkt stehen drei Klimaszenarien, die im Wesentlichen auf unterschiedlichen zukünftigen Veränderungen der Treibhausgasemissionen beruhen: RCP2.6 setzt die Pariser Klimaziele um, RCP4.5 beinhaltet eine moderate Umsetzung der Klimaziele und RCP8.5 ist der Pfad ohne Klimaschutz (Abb. 2).

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf lokaler Ebene zu verstehen, sind jedoch räumlich hochaufgelöste Informationen zum Klimawandel erforderlich. Die wurden im Rahmen der Europäischen Initiative EURO-CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment for Europe) [Jacob et al. 2014] mit dynamischen regionalen Klimamodellen für Europa erstellt. Zudem wurden im Projekt ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) die Klimaänderungssignale zum Ende des 21. Jahrhunderts für Deutschland und die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete untersucht.

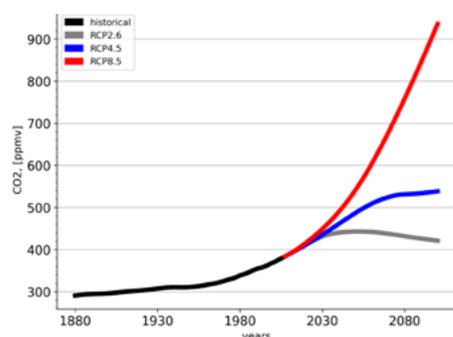


Abbildung 2: Historische und zukünftige jährliche atmosphärische CO<sub>2</sub>-Äquivalentkonzentrationen der RCP-Szenarien

### Das KERES-Ensemble

Diese Datensätze bilden den wissenschaftlichen Hintergrund des Projektes KERES und wurden in einer Datenbank für fünf Kulturerbestätten erstellt:

- Schloss Charlottenhof und Park Sanssouci in Potsdam (im Folgenden Charlottenhof),
- Frauenbergkapelle in Sufferloh im Alpenvorland in Bayern (im Folgenden Sufferloh),
- Kölner Dom,
- Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim (im Folgenden Bad Windsheim) sowie
- Chilehaus in Hamburg.

Für die Datenbank wurden die globalen Projektionen von acht ESMs verwendet. Eine Übersicht der ESMs findet sich in Tabelle 1. Diese ESMs wurden mit dem Regionalklimamodell REMO [Jacob et al. 1997] mit einer räumlichen Auflösung von 12 km (0,11°) für Europa regionalisiert im Rahmen von EURO-CORDEX und ReKliEs-DE (Abb. 3).

Für das Modell des Max-Planck-Instituts für Meteorologie wurden zusätzlich drei Simulationen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen durchgeführt. Aus diesem Grund enthält die KERES-Datenbank insgesamt zehn Kombinationen aus dem Regionalmodell REMO und aus acht verschiedenen globalen Modellen (im Folgenden ESM-REMO-Kombinationen). Nachfolgend wird für diese zehn ESM-REMO-Kombinationen die Bezeichnung „KERES-Ensemble“ verwendet.

Die Klimaprojektionen für fünf Kulturerbestätten und alle zehn ESM-REMO-Kombinationen für den Zeitraum von 1971 bis 2100 mit stündlicher Auflösung sind in der KERES-Datenbank gespeichert. Für die Untersuchung der zukünftigen

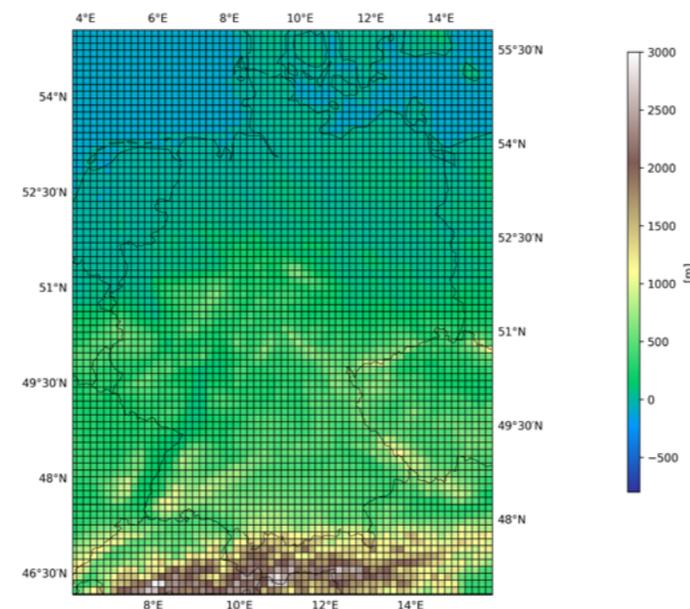


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Modellgitter des Regionalklimamodells REMO. Die Auflösung der Atmosphäre beträgt 12 km. Die Beschriftungsleiste zeigt die Orographie des REMO.

Erdsystemklimamodell	Entwicklung
CCCma-CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	National Centre for Meteorological Research, Météo-France, and CNRS laboratory, France
ICHEC-EC-EARTH	Irish Centre for High-End Computing
IPSL-IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace, France
MIROC-MIROC5	University of Tokyo, Centre for Climate System Research, Japan
MOHC-HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre, UK
MPI-M-MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany
NCC-NorESM1-M	Norwegian Climate Consortium

Tabelle 1: Überblick über die verwendeten Erdsystemklimamodelle.

Extremwetterereignisse zum Ende des 21. Jahrhunderts wurde in KERES das Szenario RCP8.5, „kein Klimaschutz“, verwendet. RCP8.5 ist gekennzeichnet durch ein hohes Niveau an Treibhausgaskonzentrationen, darunter 1.370 ppm Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Äquivalent im Jahr 2100 [Taylor et al. 2012].

Die Anwendung des KERES-Ensembles erlaubt es, die verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten der zukünftigen Extremwetterereignisse zu erfassen. Außerdem kann bei Verwendung des KERES-Ensembles die Qualität der Klimainformationen für die Zukunft abgeleitet werden, insbesondere die Robustheit der Klimaprojektionen, die die damit verbundenen Unsicherheiten erfasst.

### Evaluierung des KERES-Ensembles

Um die Fähigkeit von Klimamodellen zu beurteilen, das heutige Klima in einer bestimmten Region zu reproduzieren, werden die Mittelwerte verschiedener Parameter mit den Mittelwerten der Beobachtungsdaten verglichen. Die Größe dieser Abweichung ist der „Bias“. Im Projekt KERES wurden drei Beobachtungsdatensätze verwendet. Es handelt sich um die Datensätze des Deutschen Wetterdienstes (im Folgenden DWD) in Potsdam, die Messungen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (im Folgenden Fraunhofer IBP) in Holzkirchen und einen viel genutzten globalen atmosphärischen Datensatz vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage [Simmons et al. 2007] (im Folgenden ERA-Interim).

In Abbildung 4 sind die von ESM-REMO-Kombinationen simulierten Mittelwerte der klimatologischen Jahresgänge der bodennahen Lufttemperatur (links) und des Niederschlags (rechts) von 1996 bis 2005 im Vergleich mit den Beobachtungsdaten für Charlottenhof und Sufferloh dargestellt.

Was die Temperatur angeht, sind die Unterschiede für Charlottenhof zwischen den DWD-Messungen (schwarze Linie) und der REMO-Kombination mit ERA-Interim (rote Linie) gering. Im Winter zeigen die meisten ESM-REMO-Kombinationen einen Warm-Bias, mit Ausnahme der REMO-Kombination mit MOHC-HadGEM2-ES und mit MIROC-MIROC5, die einen deutlichen Kalt-Bias aufweisen. In den Sommermonaten (Juni bis August) liegen die Ergebnisse eng zusammen. Die REMO-Kombination mit IPSL-IPSL-CMA5-MR zeigt im Frühjahr einen relativ großen Kalt-Bias.

Auch für Sufferloh gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen dem KERES-Ensemble und den Beobachtungen des Fraunhofer IBP (schwarze Linie). Die REMO-Kombination mit ERA-Interim ergibt die beste Übereinstimmung. Mit Ausnahme der MIROC-MIROC5-REMO-Kombination zeigt das KERES-Ensemble einen Warm-Bias für den Winterzeitraum von Dezember bis Februar. Der größte Warm-Bias ist in den REMO-Kombinationen mit MOHC-HadGEM2-ES und mit NCC-NorESM1-M zu sehen. Die Analyse ergibt einen Kalt-Bias im Frühjahr von März bis Mai für das gesamte KERES-Ensemble. Die größte Überschätzung ist bei der MIROC-MIROC5-REMO-Kombination im Juli zu erkennen. Im Herbst, von September bis Oktober, liegen alle ESM-REMO-Kombinationen relativ nahe am Beobachtungsdatensatz.

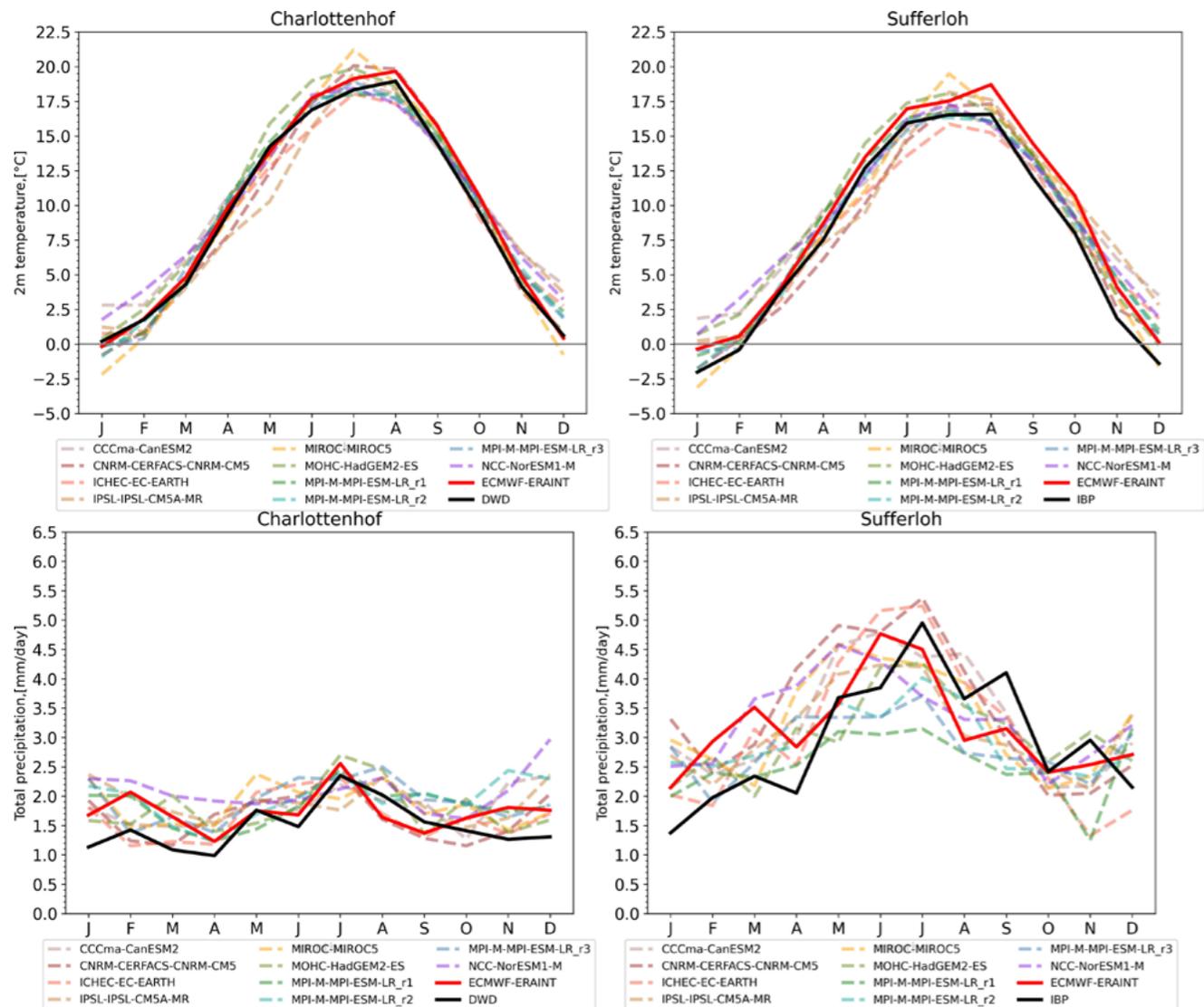


Abbildung 4: Jahresgänge der 2m-Temperatur [°C] (links) und des Niederschlags [mm/Tag] (rechts) für den Zeitraum von 1996 bis 2005. Die Beobachtungen sind in schwarzer Farbe dargestellt; die REMO-Kombination mit ERA-Interim ist in Rot dargestellt; verschiedene Farben stehen für verschiedene ESM-REMO-Kombinationen. © hereon/GERICS

Hinsichtlich des Niederschlags lässt sich erkennen, dass beobachteter und simulierter Niederschlag für Charlottenhof eng zusammen liegen, insbesondere für die ERA-Interim-REMO-Kombination. Beim KERES-Ensemble insgesamt ist dagegen eine deutliche Differenz zwischen den Beobachtungs- und simulierten Datensätzen zu sehen. Tendenziell zeigt das KERES-Ensemble eine zu hohe Feuchte für Charlottenhof. Der Feucht-Bias ist in den Wintermonaten (Dezember bis Februar) stärker als im Sommer (Juni bis August). Die Überschätzung des Niederschlags ist auch für Sufferloh zu erkennen. Das KERES-Ensemble simuliert vor allem in den Monaten von Januar bis Mai viel Niederschlag. In den meisten Simulationen im Sommer und Herbst, insbesondere im August und September, ist ein Trocken-Bias zu erkennen. Weitere Informationen zur Auswertung des KERES-Ensembles sind ausführlich in Kotova et al. 2023 dargestellt. An den Ergebnissen der Modellevaluierung des KERES-Ensembles zeigen sich die Vorteile des Ensemble-Ansatzes für die Bewertung regionaler Klimaänderungen, die eine Erfassung der Unsicherheiten ermöglichen. Außerdem bestätigt unsere Forschung, dass die Punktgenauigkeit der Interpolation von einem Modellgitter auf einen bestimmten Standort eines Kulturerbes berücksichtigt werden sollte. Dies ist besonders wichtig für die Analyse der extremen Niederschlagsereignisse, da diese oft recht kleinräumig sind.

## Methodischer Ansatz

### Ensemblebetrachtungen

Regionale Klimaprojektionen liefern keine Vorhersagen, sondern projizieren verschiedene Möglichkeiten des anthropogenen Klimawandels in die Zukunft. Um die damit verbundenen Unsicherheiten abzuschätzen, wird in der Klima- und Klimafolgenforschung häufig ein Ensemble-Ansatz verwendet [Bonazza et al. 2021]. Wie bereits erwähnt, besteht das Ensemble in KERES aus zehn ESM-REMO-Kombinationen und entspricht dem aktuellen Stand der Klimamodellierung [Vautard et al. 2021].

### Interpolationsverfahren

Wie in Abbildung 1 und 3 dargestellt, unterteilen globale und regionale Klimamodelle die Erdoberfläche mithilfe eines Gitters, um den Zustand des Klimasystems zu berechnen. Da die aus einem Klimamodell gewonnenen Informationen nicht vollständig

punktspezifisch sind, werden die Datensätze der neun Gitterboxen analysiert, die um die ausgewählte Kulturerbestätte liegen. Abbildung 5 zeigt die Gitterboxen des regionalen Klimamodells REMO, die für die Fallstudie Charlottenhof (exemplarisch) ausgewählt wurden. Der rote Punkt zeigt die geografische Lage von Charlottenhof. Die Größe der Gitterbox entspricht 12,5 km × 12,5 km.

### Statistische Verfahren

Um belastbare Informationen über die zukünftig zu erwartenden Klimaänderungen zu erhalten, wurde die Robustheit der projizierten Änderungen des KERES-Ensembles nach der Methode von Pfeifer et al. 2015 bestimmt. Pfeifer et al. definieren die Robustheit über die Übereinstimmung der Klimasimulationen in der Richtung der projizierten Änderungen sowie über den Anteil der Klimasimulationen, die statistisch signifikante Änderungen projizieren. Es wurde berechnet, ob eine systematische Änderung erkennbar ist. Dazu wird der sogenannte Mann-Kendall-Test verwendet, der den Unterschied zwischen der ausgewählten Zukunftsperiode und der Referenzperiode 1971 bis 2000 testet. Ein Klimaunterschied wird als signifikant definiert, wenn er mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5 % durch zufällige Schwankungen erklärt werden kann. Zusätzlich sollten mindestens 2/3 der Zunahme/Abnahme und mindestens 50 % der Simulationen des KERES-Ensembles eine signifikante Zunahme/Abnahme zeigen. Auf den Deutschlandkarten sind die Gitterzellen mit „robusten“ Änderungen schraffiert dargestellt.

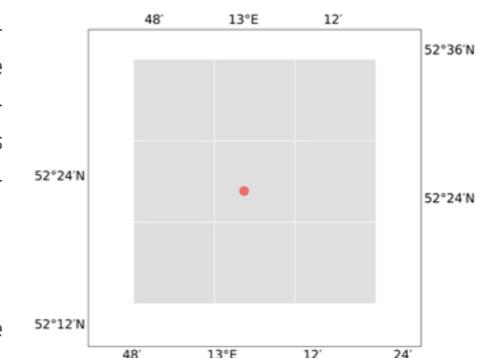


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Gitterboxen des REMO-Modells. Der rote Punkt zeigt die geografische Lage von Charlottenhof. © hereon/GERICS

## Zukünftige Extremwetterereignisse für Deutschland

In der Klimaforschung ist es gängige Praxis, Veränderungen in 30-Jahres-Perioden miteinander zu vergleichen. Um die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen für die KERES-Fallstudien zu erleichtern, wurden die Bandbreiten der simulierten Änderungen für zwei 30-Jahres-Perioden jeweils im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 dargestellt:

- 2036–2065 als Zeitperiode „zur Mitte des 21. Jahrhunderts“ und
- 2069–2098 als Zeitperiode „zum Ende des 21. Jahrhunderts“.

In einem ersten Schritt wurde eine deutschlandweite Übersicht der extremen Wetterereignisse erstellt, die einen Einfluss auf das Kulturerbe haben können. Für die Referenzperiode 1971 bis 2000 werden die absoluten Werte angegeben. Für zukünftige Zeiträume werden die projizierten Änderungen im Median dargestellt. Die Ergebnisse werden für alle zehn ESM-REMO-Kombinationen berücksichtigt. Hier werden die Ergebnisse sowohl für Temperaturextreme in Form von heißen und Frosttagen als auch für Niederschlagsextreme in Form von Trockentagen im Sommer und Tagen mit mehr als 20 mm Niederschlag dargestellt.

Der Vergleich der Temperaturkennwerte der Referenzperiode 1971 bis 2000 mit den Ergebnissen des Szenarios RCP8.5 zeigt eine deutliche Veränderung. Die Anzahl der heißen Tage, d. h. der Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mehr als 30 °C, könnte sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in Teilen Süddeutschlands verdoppeln (Abb. 6). Zur Mitte des 21. Jahrhunderts ist dieser Trend noch nicht so deutlich ausgeprägt, obwohl eine Verschiebung hin zu mehr heißen Tagen vor allem im Osten und Süden bereits deutlich erkennbar ist. Diese Veränderungen sind in ganz Deutschland signifikant. Es lässt sich allgemein feststellen, dass die Anzahl der Frosttage, d. h. der Tage mit einer Tagesminimumtemperatur unter 0 °C, im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000 abnimmt (Abb. 7). So wird es in Zukunft überall in Deutschland weniger Tage geben, an denen die Minimumtemperatur unter dem Gefrierpunkt liegt. Die projizierten Änderungen sind gegen Ende des 21. Jahrhunderts ausgeprägter als in der Mitte des 21. Jahrhunderts.

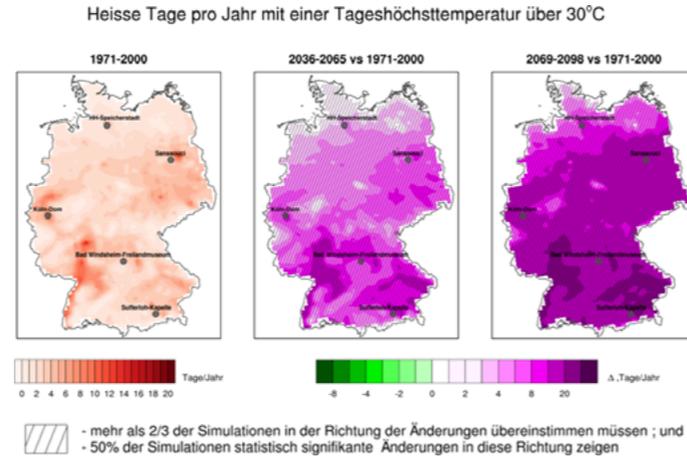


Abbildung 6: Anzahl der heißen Tage pro Jahr mit einer Tageshöchsttemperatur über 30 °C für die Referenzperiode 1971-2000 (links) und projizierte Änderung der heißen Tage im Gebietsmittel Deutschlands für 2036-2065 (Mitte) und 2069-2098 (rechts) im Vergleich zu 1971-2000. Gitterzellen in der Deutschlandkarte mit robusten Änderungen sind schraffiert dargestellt. © hereon/GERICS

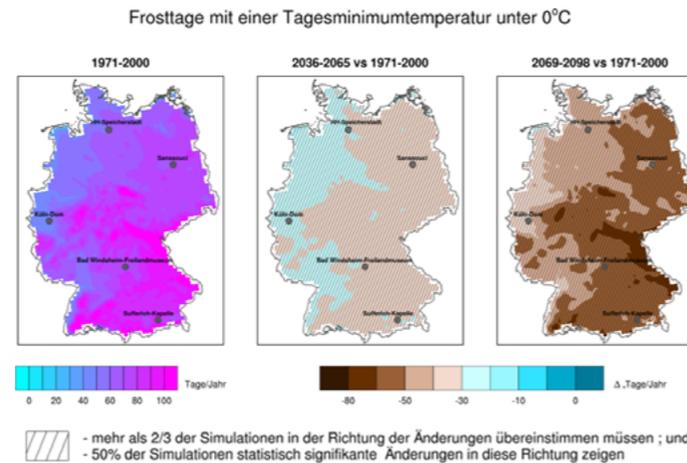


Abbildung 7: Anzahl der Frosttage mit einer Tagesminimumtemperatur unter 0 °C für die Referenzperiode 1971-2000 (links) und projizierte Änderung der Frosttage im Gebietsmittel Deutschlands für 2036-2065 (Mitte) und 2069-2098 (rechts) im Vergleich zu 1971-2000. Gitterzellen in der Deutschlandkarte mit signifikanten Änderungen sind schraffiert dargestellt. © hereon/GERICS

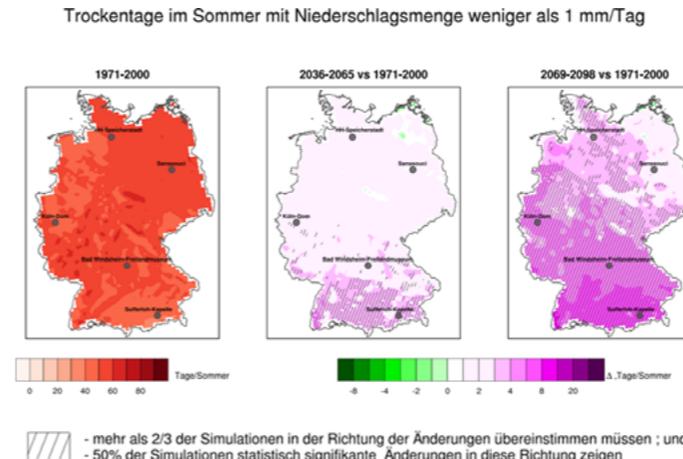


Abbildung 8: Anzahl der Trockentage mit Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) weniger als 1 mm/Tag im Sommer (Juni, Juli, August) für die Referenzperiode 1971-2000 (links) und projizierte Änderung der Trockentage im Gebietsmittel Deutschlands für 2036-2065 (Mitte) und 2069-2098 (rechts) im Vergleich zu 1971-2000. Gitterzellen in der Deutschlandkarte mit signifikanten Änderungen sind schraffiert dargestellt. © hereon/GERICS

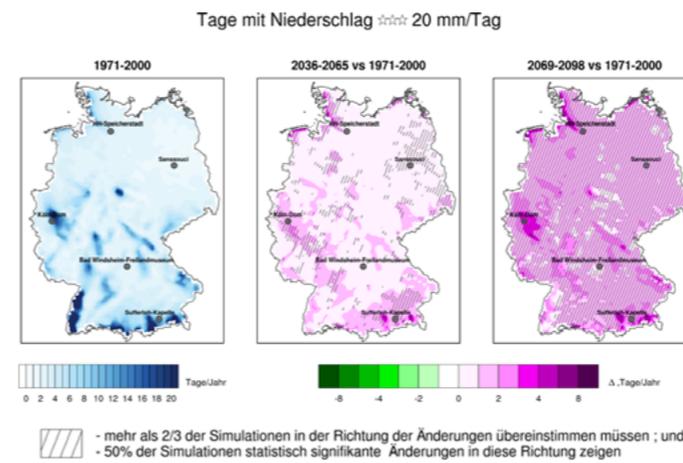


Abbildung 9: Anzahl der Tage mit einer Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) von mehr als 20 mm/Tag für die Referenzperiode 1971-2000 (links) und projizierte Änderung im Gebietsmittel Deutschlands für 2036-2065 (Mitte) und 2069-2098 (rechts) im Vergleich zu 1971-2000. Gitterzellen in der Deutschlandkarte mit signifikanten Änderungen sind schraffiert dargestellt. © hereon/GERICS

Auch bei den niederschlagsbasierten Kennwerten zeigen sich deutliche Veränderungen. Bei der Anzahl der Trockentage, d. h. der Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) weniger als 1 mm beträgt, zeigt sich im Sommer eine Tendenz zur Zunahme (Abb. 8). Vor allem in Süddeutschland sind die Änderungen robust. Die projizierten Änderungen sind zum Ende des 21. Jahrhunderts stärker ausgeprägt als noch zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Auch bei der Anzahl der Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) 20 mm oder mehr beträgt, ist eine Verschiebung hin zu mehr Tagen zu beobachten (Abb. 9). Der Trend für die Anzahl der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag ist in der Mitte des 21. Jahrhunderts noch nicht so deutlich ausgeprägt wie am Ende des 21. Jahrhunderts.

## Zukünftige Extremwetterereignisse für die Fallstudien

Im Folgenden wird die Verteilung der Extremwerte zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2036–2065) und zum Ende des 21. Jahrhunderts (2069–2098) für alle fünf Fallstudien des Projekts im Vergleich zu 1971–2000 dargestellt. Die Ergebnisse werden für Minimum, Median und Maximum des KERES-Ensembles angezeigt. Für die Referenzperiode 1971 bis 2000 werden die absoluten Werte angegeben, für zukünftige Zeiträume die projizierten Änderungen abgebildet. Die Ergebnisse werden für 90 verschiedene Klimaprojektionen dargestellt unter Berücksichtigung aller zehn ESM-REMO-Kombinationen. Zusätzlich wird jedes der neun in der Abbildung 5 dargestellten Gitter untersucht. Die Ergebnisse werden sowohl für Temperaturextreme in Form von heißen und Frosttagen als auch für Niederschlagsextreme in Form von Trockentagen im Sommer und Tagen mit mehr als 20 mm Niederschlag dargestellt. Alle Kennwerte, die in Einheiten von Tagen angegeben sind, wurden auf ganze Tage gerundet.

## Heiße Tage

### Modellierte historische Klimabedingungen: 1971-2000

Auf der Grundlage der Modellierung mit Hilfe des KERES-Ensembles traten heiße Tage, d. h. Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mehr als 30 °C, im Zeitraum 1971 bis 2000 für alle KERES-Fallstudien auf (Abb. 10). Das Minimum des KERES-Ensembles zeigt jedoch für Bad Windsheim, Charlottenhof und Sufferloh keine heißen Tage in der Vergangenheit. Der höchste Wert des KERES-Ensembles liegt für den Kölner Dom mit 18 Tagen pro Jahr vor.

### Zukünftige projizierte Änderungen für RCP8.5

Zum Ende des 21. Jahrhunderts ist eine robuste Zunahme der heißen Tage zu erwarten (Abb. 11). Diese Zunahme betrifft alle KERES-Fallstudien. Die maximale Zunahme von 49 Tagen wird für Sufferloh am Ende des 21. Jahrhunderts erwartet. In der Mitte des 21. Jahrhunderts ist dieser Anstieg noch nicht so stark ausgeprägt. Es wird erwartet, dass die Anzahl der heißen Tage bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts im Median um etwa sechs (Charlottenhof) bis acht Tage (Sufferloh) pro Jahr zunehmen wird. Am Ende des 21. Jahrhunderts reicht die Spanne der ESM-REMO-Kombinationen von kaum einer Änderung bis zu einer Verdreifachung der Anzahl der heißen Tage gegenüber der Referenzperiode 1971 bis 2000.

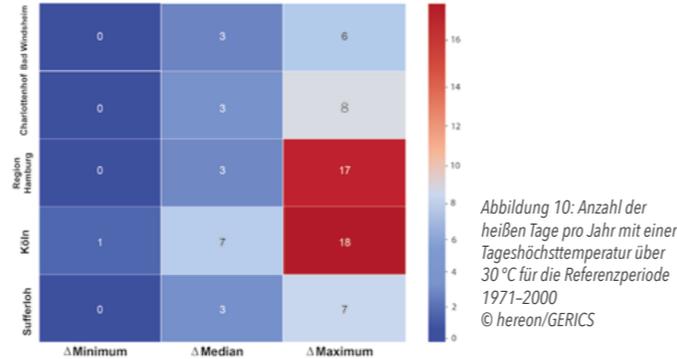


Abbildung 10: Anzahl der heißen Tage pro Jahr mit einer Tageshöchsttemperatur über 30 °C für die Referenzperiode 1971-2000 © hereon/GERICS

## Frosttage

### Modellierte historische Klimabedingungen: 1971-2000

Auf der Grundlage der Modellierung mit Hilfe des KERES-Ensembles liegt der höchste Wert für Frosttage, d. h. Tage mit einer Tagesminimumtemperatur unter 0 °C, im Zeitraum 1971 bis 2000 für Sufferloh bei 166 pro Jahr. Das Minimum des KERES-Ensembles liegt für den Kölner Dom bei 23 Tagen. Die Spanne des Mittelwertes des KERES-Ensembles für 1971 bis 2000 reicht von 50 Tagen pro Jahr für den Kölner Dom bis 85 Tagen pro Jahr für Sufferloh.

### Zukünftige projizierte Änderungen für RCP8.5

Es zeigt sich eine robuste Abnahme der Anzahl der Frosttage zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts. Diese Abnahme verteilt sich auf alle KERES-Fallstudien. Die projizierten Änderungen verstärken sich deutlich zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Die maximale Abnahme von etwa 68 Tagen pro Jahr wird am Ende des 21. Jahrhunderts für Charlottenhof erwartet. Die Spanne der Änderungen des Medians des KERES-Ensembles reicht von 23 Tagen pro Jahr für den Kölner Dom bis zu 33 Tagen pro Jahr für Charlottenhof zur Mitte des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000.

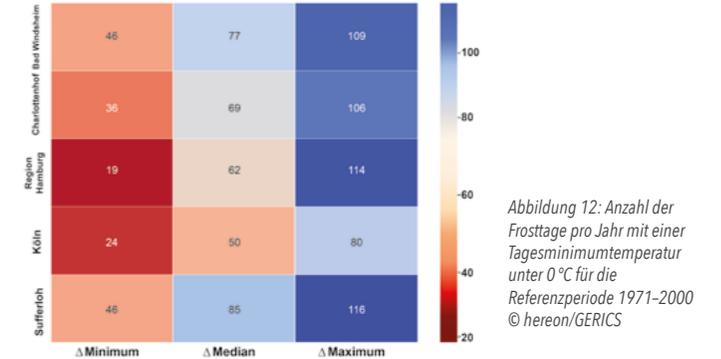


Abbildung 12: Anzahl der Frosttage pro Jahr mit einer Tagesminimumtemperatur unter 0 °C für die Referenzperiode 1971-2000 © hereon/GERICS



Abbildung 11: Projizierte Änderung der Anzahl der heißen Tage mit einer Tagesmaximumtemperatur über 30 °C relativ zu 1971-2000 für alle KERES-Fallstudien © hereon/GERICS

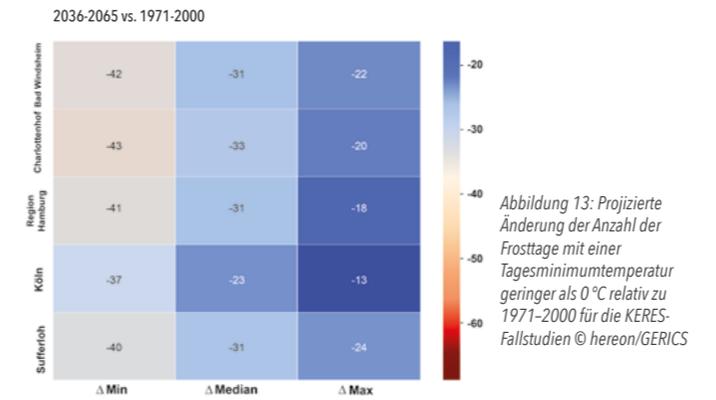
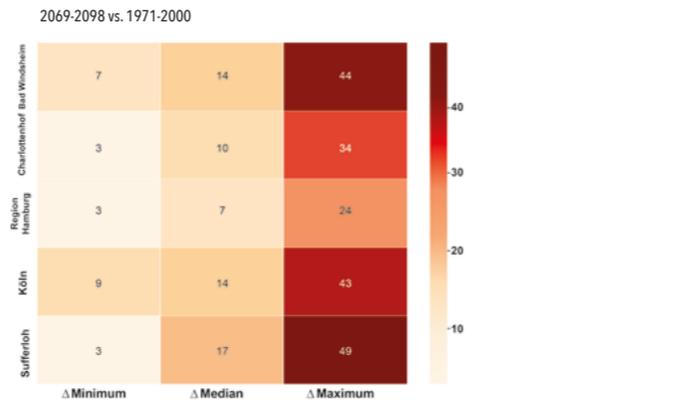
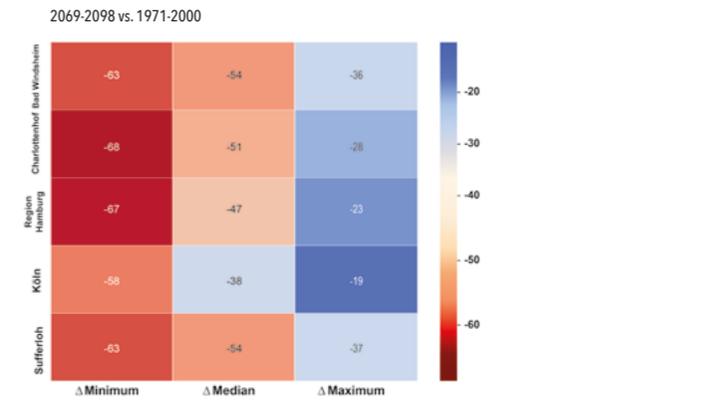


Abbildung 13: Projizierte Änderung der Anzahl der Frosttage mit einer Tagesminimumtemperatur geringer als 0 °C relativ zu 1971-2000 für die KERES-Fallstudien © hereon/GERICS



## Trockentage im Sommer

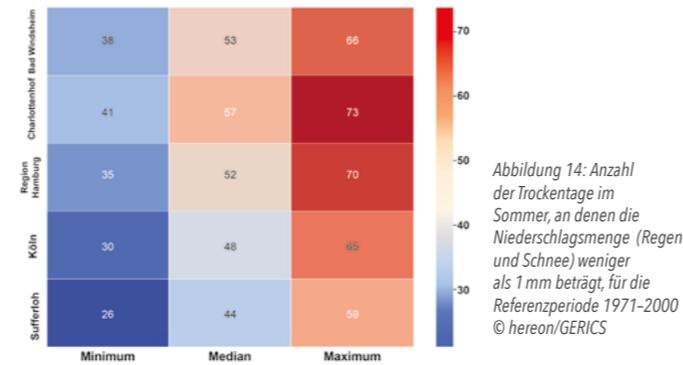
### Modellierte historische Klimabedingungen: 1971-2000

Auf der Grundlage der Modellierung mit Hilfe des KERES-Ensembles traten Trockentage, an denen die Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) weniger als 1 mm beträgt, im Sommer im Zeitraum 1971 bis 2000 für alle KERES-Fallstudien auf. Das Minimum des KERES-Ensembles liegt für Sufferloh bei 26 Tagen in der Vergangenheit. Der höchste Wert des KERES-Ensembles liegt für Charlottenhof mit 73 Tagen vor. Die Spanne des Mittelwertes des KERES-Ensembles für 1971 bis 2000 reicht von 44 Tagen für Sufferloh bis zu 57 Tagen für Charlottenhof.

### Zukünftige projizierte Änderungen für RCP8.5

Bei der Anzahl der Trockentage zeigt sich für Charlottenhof, den Kölner Dom und Bad Windsheim eine tendenzielle Zunahme im Sommer (Juni bis August) bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Die Zunahme der sommerlichen Trockentage für Sufferloh ist robust. Die maximale Zunahme von etwa 7 Tagen pro Jahr bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird für Bad Windsheim und den Kölner Dom projiziert. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts zeigt sich für alle KERES-Fallstudien mit Ausnahme von Charlottenhof eine robuste Zunahme der Trockentage.

Die maximale Zunahme von etwa 11 Tagen pro Jahr wird zum Ende des 21. Jahrhunderts für Sufferloh erwartet. Die Spanne der Änderungen des Medians des KERES-Ensembles reicht von 2 Tagen pro Jahr für Charlottenhof bis zu 6 Tagen pro Jahr für Sufferloh am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000.



## Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag

### Modellierte historische Klimabedingungen: 1971-2000

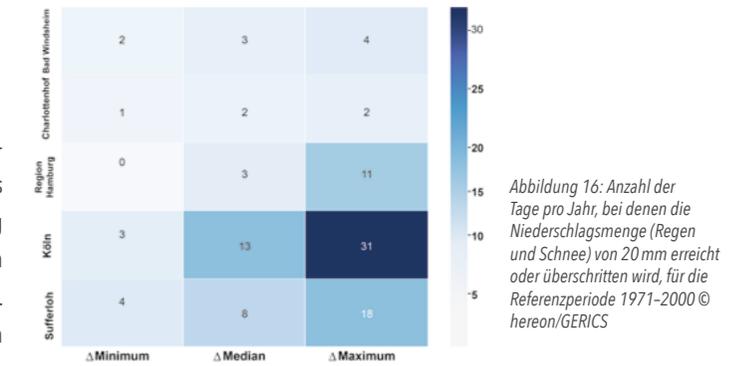
Auf der Grundlage der Modellierung mit Hilfe des KERES-Ensembles traten Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag im Zeitraum 1971 bis 2000 für alle KERES-Fallstudien auf. Das Minimum des KERES-Ensembles liegt in Hamburg mit 0 Tagen pro Jahr und in Charlottenhof mit 1 Tag pro Jahr in der Vergangenheit. Der höchste Wert des KERES-Ensembles liegt am Kölner Dom mit 31 Tagen pro Jahr vor. Die Spanne des Medians des KERES-Ensembles für 1971 bis 2000 reicht von 2 Tagen pro Jahr für Charlottenhof bis zu 13 Tagen pro Jahr am Kölner Dom.

### Zukünftige projizierte Änderungen für RCP8.5

Bei der Anzahl der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag deutet sich eine tendenzielle Zunahme für Sufferloh, Kölner Dom und Bad Windsheim zur Mitte des 21. Jahrhunderts an. Die Zunahme der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag für Charlottenhof ist jedoch robust. Die maximale Zunahme von etwa 6 Tagen pro Jahr bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird für den Kölner Dom projiziert. Gleichzeitig sagt das Minimum des KERES-Ensembles keine Zunahme der starken

Niederschläge in Sufferloh voraus und sogar eine Abnahme der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag am Kölner Dom, Hamburg und Bad Windsheim.

Zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigt sich eine robuste Zunahme der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag für alle Fallstudien von KERES. Die maximale Zunahme von etwa 9 Tagen pro Jahr wird zum Ende des 21. Jahrhunderts am Kölner Dom erwartet. Die Spanne der Änderungen des Medians des KERES-Ensembles reicht von 1 Tag pro Jahr für Charlottenhof und Bad Windsheim bis zu 3 Tagen pro Jahr am Kölner Dom am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000.



2036-2065 vs. 1971-2000

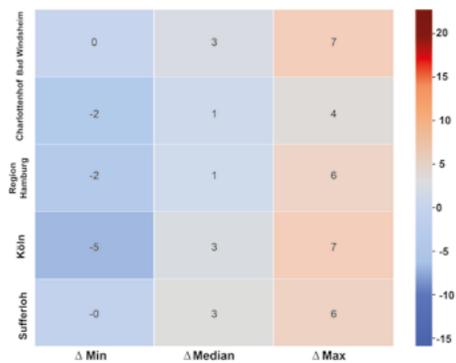
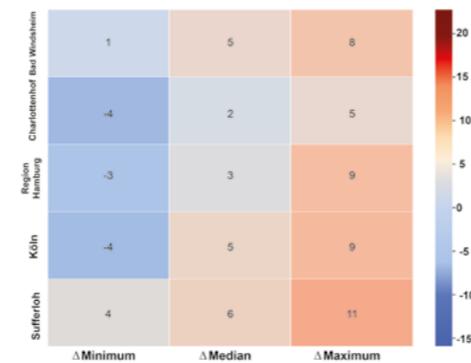


Abbildung 15: Projizierte Änderung der Anzahl der Trockentage, an denen die Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) weniger als 1 mm beträgt, relativ zu 1971-2000 für die KERES-Fallstudien © hereon/GERICS

2069-2098 vs. 1971-2000



2036-2065 vs. 1971-2000

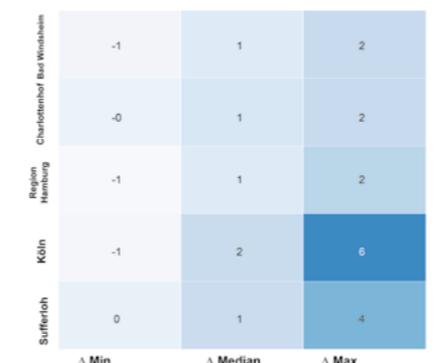
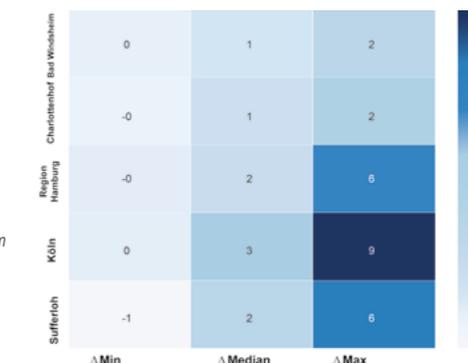


Abbildung 17: Projizierte Änderung der Tage, an denen die Niederschlagsmenge (Regen und Schnee) von 20 mm überschritten wird, relativ zu 1971-2000 für die Fallstudien von KERES © hereon/GERICS

2069-2098 vs. 1971-2000



## Fazit

Die Auswertung des KERES-Ensembles für das Klimaszenario RCP8.5 ohne Klimaschutz für die fünf Fallstudien von KERES zeigt die Veränderung im Auftreten von Extremwetterereignissen, die zu einer Schädigung von Kulturerbe führen können.

Die Entwicklung der temperaturbasierten Extreme zeigt eine erkennbare Zunahme, die gegen Ende des 21. Jahrhunderts besonders ausgeprägt ist. Am stärksten betroffen sind Charlottenhof, Sufferloh und Bad Windsheim. Auf der anderen Seite ist zu erwarten, dass die Anzahl der Frosttage an allen Standorten der Fallstudien abnimmt. Die projizierten Änderungen nehmen zum Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zur Mitte des 21. Jahrhunderts weiter zu. Die maximale Abnahme wird am Ende des 21. Jahrhunderts für Sufferloh und Bad Windsheim erwartet.

Die Ergebnisse des KERES-Ensembles für niederschlagsbedingte Extreme zeigen zunächst nur die tendenzielle Veränderung bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts. Die maximale Zunahme der Trockentage wird am Ende des 21. Jahrhunderts für Sufferloh erwartet. Hinsichtlich der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag zeigt sich zur Mitte des 21. Jahrhunderts ein potentieller Zunahmetrend für Sufferloh, Kölner Dom und Bad Windsheim. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts ist für alle KERES-Fallstudien von einer Zunahme der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag auszugehen. Die maximale Zunahme wird zum Ende des 21. Jahrhunderts am Kölner Dom erwartet.

Unsere Ergebnisse geben Hinweise darauf, wie ein Ensemble von Klimamodellen genutzt werden kann, um die Risiken des Klimawandels für das Kulturerbe zu bewerten. In weiteren Studien könnten andere Simulationsaspekte untersucht werden, wie z. B. die Anwendung einer vollständigen Reihe von EURO-CORDEX-Modellen, bei denen die Robustheit der Ergebnisse in Bezug auf den Klimawandel besser erforscht werden kann.

## Quellen

Bonazza, A., Sardella, A., Kaiser, A., Cacciotti, R., De Nuntiis, P., Hanus, C., Maxwell, I., Drdácák, T. & Drdácák, M. (2021). **Safeguarding cultural heritage from climate change related hydrometeorological hazards in Central Europe**. In: International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 63(19). [https://www.researchgate.net/publication/353133989\\_Safeguarding\\_cultural\\_heritage\\_from\\_climate\\_change\\_related\\_hydrometeorological\\_hazards\\_in\\_Central\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/353133989_Safeguarding_cultural_heritage_from_climate_change_related_hydrometeorological_hazards_in_Central_Europe)

Brasseur, G. P., Jacob, D. & Schuck-Zöller, S. (Hrsg., 2017). **Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven**. [https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/34663/1/bok\\_978-3-662-50397-3.pdf](https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/34663/1/bok_978-3-662-50397-3.pdf)

EURO-CORDEX <https://euro-cordex.net/index.php.en>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. & Taylor, K. E. (2016). **Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization**. In: Geoscientific Model Development 9, S. 1937-1958. <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/gmd-9-1937-2016.pdf>

IPCC (2013). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2013-the-physical-science-basis/BE9453E500DEF3640B383BADDC332C3E>

Jacob, D. & Podzun, R. (1997). **Sensitivity studies with the regional climate model REMO**. In: Meteorology and Atmospheric Physics 63, S. 119-129. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01025368>

Jacob, D., Petersen, J. & Eggert, B. et al. (2014). **EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research**. In: Regional Environmental Change 14(2), S. 563-578. [https://www.researchgate.net/publication/257480835\\_EURO-CORDEX\\_New\\_high-resolution\\_climate\\_change\\_projections\\_for\\_European\\_impact\\_research](https://www.researchgate.net/publication/257480835_EURO-CORDEX_New_high-resolution_climate_change_projections_for_European_impact_research)

Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O. B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K. & Wulfmeyer, V. (2014). **Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble**. In: Geoscientific Model Development 7, S. 1297-1333. <https://gmd.copernicus.org/articles/7/1297/2014/gmd-7-1297-2014-metrics.html>

Kotova, L., Leissner, J., Winkler, M., Kilian, R., Bichlmair, St., Antretter, F., Moßgraber, J., Reuter, J., Hellmund, T., Matheja, K., Rohde, M. & Mikolajewicz, U. (2023). **Making use of climate information for sustainable preservation of cultural heritage: applications to the KERES project**. In: Heritage Science 11(1), 18. [https://www.researchgate.net/publication/367432660\\_Making\\_use\\_of\\_climate\\_information\\_for\\_sustainable\\_preservation\\_of\\_cultural\\_heritage\\_applications\\_to\\_the KERES\\_project](https://www.researchgate.net/publication/367432660_Making_use_of_climate_information_for_sustainable_preservation_of_cultural_heritage_applications_to_the KERES_project)

Meinshausen, M., Smith, S. J. & Calvin, K. et al. (2011). **The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300**. In: Climatic Change 109, 213. [https://www.researchgate.net/publication/229032271\\_The\\_RCP\\_greenhouse\\_gas\\_concentrations\\_and\\_their\\_extensions\\_from\\_1765\\_to\\_2300](https://www.researchgate.net/publication/229032271_The_RCP_greenhouse_gas_concentrations_and_their_extensions_from_1765_to_2300)

Moss, R., Edmonds, J.A., Hibbard, K. & Manning, M. (2010). **The next generation of scenarios for climate change research and assessment**. In: Nature 463, S. 747-756. [https://www.researchgate.net/publication/41422439\\_The\\_Next\\_Generation\\_of\\_Scenarios\\_for\\_Climate\\_Change\\_Research\\_and\\_Assessment](https://www.researchgate.net/publication/41422439_The_Next_Generation_of_Scenarios_for_Climate_Change_Research_and_Assessment)

Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänsler, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C. & Jacob, D. (2015). **Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany**. In: Atmosphere 6(5), S. 677-698. [https://www.researchgate.net/publication/276526596\\_Robustness\\_of\\_Ensemble\\_Climate\\_Projections\\_Analyzed\\_with\\_Climate\\_Signal\\_Maps\\_Seasonal\\_and\\_Extreme\\_Precipitation\\_for\\_Germany](https://www.researchgate.net/publication/276526596_Robustness_of_Ensemble_Climate_Projections_Analyzed_with_Climate_Signal_Maps_Seasonal_and_Extreme_Precipitation_for_Germany)

Pfeifer S., Rechid, D. & Bathiany, S. (2020). **Klimaausblick Deutschland**. [https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/projekte/klimasignalkarten/gerics\\_klimaausblick\\_germany\\_version1.2\\_deutsch.pdf](https://www.gerics.de/imperia/md/content/csc/projekte/klimasignalkarten/gerics_klimaausblick_germany_version1.2_deutsch.pdf)

ReKlIES <http://reklies.hlnug.de/home>

Simmons, A. J., Uppala, S. S., Dee, D. P. & Kobayashi, S. (2007). **ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards**. In: ECMWF Newsletter 110, S. 26-35. [https://www.researchgate.net/publication/255267047\\_ERAInterim\\_New\\_ECMWF\\_reanalysis\\_products\\_from\\_1989\\_onwards](https://www.researchgate.net/publication/255267047_ERAInterim_New_ECMWF_reanalysis_products_from_1989_onwards)

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. & Meehl, G.A. (2012). **An overview of CMIP5 and the experiment design**. In: Bulletin of the American Meteorological Society 93(4), S. 485-498. [https://www.researchgate.net/publication/235793806\\_An\\_overview\\_of\\_CMIP5\\_and\\_the\\_Experiment\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/235793806_An_overview_of_CMIP5_and_the_Experiment_Design)

Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, Fz., Buonomo, E., Bülow, K., Coppola, E., Corre, L., van Meijgaard, E., Nogherotto, R., Sandstad, M., Schwingshackl, C., Somot, S., Aalbers, E., Christensen, O. B., Ciarlo, J. M., Demory, M.-E., Giorgi, F., Jacob, D., Jones, R. G., Keuler, K., Kjellström, E., Lenderink, G. & Levassasseur, G., Nikulin, G., Sillmann, J., Solidoro, C., Sørland, S. L., Steger, C., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K. & Wulfmeyer, V. (2021). **Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble**. In: Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 125 (2021) 172169-897X. [https://www.hereon.de/imperia/md/content/gkss/zentrale\\_einrichtungen/bibliothek/journals/2021/vautard\\_39348.pdf](https://www.hereon.de/imperia/md/content/gkss/zentrale_einrichtungen/bibliothek/journals/2021/vautard_39348.pdf)

# Kapitel 2

## KERES-Methodik zur Bewertung der Vulnerabilität

Matthias Winkler, Stefan Bichlmair, Sebastian Stadler, Johanna Henning, Julian Fetoski

Im vorangegangenen Kapitel wurde die regionale Relevanz von Extremwetterereignissen und damit verbundenen Naturkatastrophen auf Grundlage detaillierter Klimaprognosen aus hochaufgelösten regionalen Klimamodellen für IPCC Klimaszenario RCP8.5 beschrieben. Darauf aufbauend wurden in KERES tieferegehende interdisziplinäre Analysen durchgeführt, um die Vulnerabilität schützenswerter Kulturgüter (Gebäude, Monumente in Kulturlandschaften, historische Gärten und Parklandschaften) bezogen auf Extremwetterereignisse zu untersuchen.

Um das künftige Verhalten der Kulturgüter und deren Schadensbilder erfassen und bewerten zu können, wurden in KERES verschiedene digitale Simulationsmodelle genutzt und in diesen die realen Fallbeispiele des Projekts abgebildet (Abb. 1). Nachfolgend werden die eingesetzten Simulationsmodelle und -techniken vorgestellt, mit denen die Einflüsse von Extremwetterereignissen auf historische Parkanlagen sowie das Umfeld, die Bausubstanz und den Innenraum von historischen Gebäuden quantifiziert wurden. Da die genutzten Simulationsmodelle auf verschiedenen Zeit-, Skalen- und Komplexitätsebenen arbeiten, wird ebenfalls erläutert, wie die mithilfe des KERES-Ensembles bereitgestellten Klimadaten Eingang in die Simulationen fanden.

Die Simulationsmodelle der Fallbeispiele wurden anhand von Messwerten kalibriert, um sicher zu stellen, dass die simulierten Daten die Realität abbilden und die Modelle belastbar sind. Die im Rahmen von KERES durchgeführten Messkampagnen sowie zusätzlich verwendete Messdaten werden am Ende dieses Kapitels beschrieben.

### Hygrothermische Bauteilsimulation mit WUFI®

Die erste Ebene der Interaktion von Gebäuden mit dem Außenklima stellt die Gebäudehülle dar, welche die Funktion hat, das Gebäudeinnere dauerhaft vor den Witterungseinflüssen wie zum Beispiel Niederschlag, Wind, Solarstrahlung und Außentemperatur zu schützen. Diese Einflüsse können jedoch auch in der bestehenden Bausubstanz zu Schädigungen führen. Eine besonders empfindliche Gebäudegruppe stellen hier die in zahlreichen Regionen Deutschlands vorkommenden Fachwerkbauten dar, die auf Grund ihrer Bauweise empfindlich

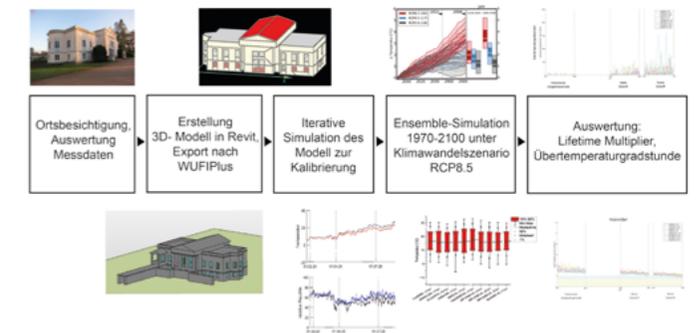


Abbildung 1: Ablauf einer hygrothermischen Gebäudesimulation unter Nutzung der Ensemble-Klimaprojektionen und Bewertung der Ergebnisse am Beispiel von Schloss Charlottenhof, Potsdam © Fraunhofer IBP

auf eindringendes Wasser und Schlagregen reagieren und leicht Schaden nehmen können.

Mit Hilfe von hygrothermischen Bauteilsimulationsmodellen kann der Wärme- und Feuchtehaushalt von mehrschichtigen Baukonstruktionen und somit eine Schädigung, z. B. infolge von Schlagregen, bewertet werden. Im Rahmen von KERES wurden die Untersuchungen zur Beurteilung des Feuchteschutzes der Gebäudehülle mit dem am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahren WUFI® zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen durchgeführt [Künzel 1994]. Das Programm WUFI® entspricht vollständig den Anforderungen der neuen europäischen Norm DIN EN 15026 für hygrothermische Simulationen. Dabei wird das instationäre hygrothermische Verhalten von mehrschichtigen Bauteilen unter realen Klimabedingungen mit Berücksichtigung von Baufeuchte, Schlagregen, Sonnenstrahlung, langwelliger Abstrahlung und Kapillartransport berechnet. Eingesetzt wurden dabei sowohl die Simulationssoftware WUFI® Pro, die die eindimensionale Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen im Regelquerschnitt erlaubt, als auch WUFI® 2D, welches der Analyse eine weitere Dimension hinzufügt und somit auch komplexere Geometrien wie z.B. Gebäudeecken, Fensteranschlüsse, Sockelpunkte aber auch Fachwerkkonstruktionen beurteilbar macht, die mit einer eindimensionalen Beurteilung nicht erfasst werden können.

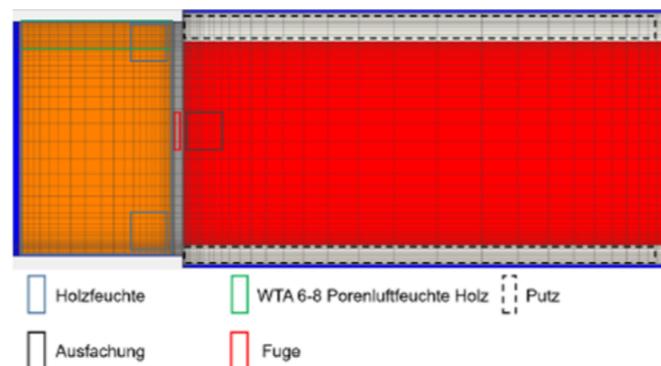
Als klimatische Randbedingungen für die hygrothermische Simulation werden mindestens einjährige, stündlich aufgelöste Datensätze typischer Außenklimadaten (Temperatur, relative Feuchte, direkte und diffuse Solarstrahlung, Niederschlag und Windrichtung) benötigt. Das in KERES verwendete Ensemble wurde dabei so ausgewählt, dass die für die Simulation notwendigen Daten in stündlicher Auflösung für jeweils drei 30-Jahres-Periodenvorlagen vorlagen (historische Vergleichsperiode 1971 bis 2000, Mitte des 21. Jahrhunderts 2036 bis 2065 und Ende des 21. Jahrhunderts 2069 bis 2098). Vor Durchführung der hygrothermischen Simulationen wurden die Klimadaten der historischen Vergleichsperiode aus dem KERES-Klimadatenensemble (Kapitel 1, im Folgenden KERES-Ensemble) mit Messdaten nahegelegener DWD-Wetterstationen verglichen, um mögliche Abweichungen zu identifizieren und diese für die Auswertung berücksichtigen zu können. Konkret eingesetzt wurde die hygrothermische Bauteilsimulation für die Untersuchung schlagregeninduzierter Schäden an historischen Fachwerkkonstruktionen am im Jahre 1588 erbauten Amtshaus Obernbreit, welches Teil der Fallstudie „Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim“ ist (Abb. 2). Die Fachwerkkonstruktion wurde dabei als zweidimensionaler Querschnitt in WUFI® 2D abgebildet und das Simulationsmodell anhand von parallel im Rahmen von KERES durchgeführten Holzfeuchtemessungen kalibriert. Bewertet wurden die Simulationen hinsichtlich der Schadensmechanismen Frost-Tau-Wechsel und erhöhte Holzfeuchte. Um die



Abbildung 2: Westansicht des Amtshauses Obernbreit (links) und Abbildung der Fachwerkkonstruktion in WUFI® 2D mit Markierung der ausgewerteten Monitorpositionen (rechts) © Martin Göpfert

für die Untersuchung relevanten Klimadaten auszuwählen, wurde das KERES-Ensemble für Bad Windsheim vorab auf die für Schlagregen relevanten Parameter Niederschlag und Wind ausgewertet. Da sich die charakteristischen Winddaten im KERES-Ensemble nicht signifikant unterschieden, wurden für die Auswahl die kumulativen Niederschlagssummen über den Jahresverlauf als ausschlaggebendes Kriterium herangezogen. Nach Abgleich mit Messdaten aus nahegelegenen DWD-Wetterstationen wurde auf dieser Grundlage das Ensemble auf fünf für den Niederschlag typische Modelle reduziert: Minimale, maximale und zwei mittlere Niederschlagssummen sowie das Modell mit höchstem Niederschlag im Herbst. Mit diesen fünf ausgewählten langjährigen Projektionen aus RCP8.5-Klimamodellen wurden schließlich die Veränderungen der Schadensmechanismen Frost-Tau-Wechsel und erhöhte Holzfeuchte für die zwei Untersuchungszeiträume „Mitte des 21. Jahrhunderts“ und „Ende des 21. Jahrhunderts“ berechnet.

Die Frauenbergkapelle in Sufferloh bei Holzkirchen als zweite Fallstudie zeigte in der Vergangenheit immer wieder starke Feuchteschäden an der Westwand, deren Ursache jedoch nicht eindeutig zugeordnet werden konnte. Daher wurde die hygrothermische Bauteilsimulation eingesetzt, um Feuchte aufgrund von Schlagregen von aufsteigender Feuchte aus dem Bodenuntergrund unterscheiden zu können und somit zu beweisen, inwieweit es sich bei den vorgefundenen Schäden um schlagregeninduzierte Schäden handelt. Die Westwand wurde dabei als



zweidimensionaler Querschnitt in WUFI® 2D abgebildet (Abb. 3). Die rechnerischen Untersuchungen und die Validierung der Simulationen erfolgten mehrstufig. Zunächst wurden in einer eindimensionalen Betrachtung der Außenwand geeignete Materialien aus der WUFI®-Datenbank ausgewählt, deren feuchtetechnische Kennwerte an die Zusammensetzung des historischen Wandaufbaus angepasst und das Simulationsmodell anhand von genommenen Wassergehaltsproben kalibriert. Im nächsten Schritt erfolgte die zweidimensionale Betrachtung der Wand. Bewertet wurden die Simulationen anhand der Wassergehaltsverläufe des Mauerwerksquerschnittes in verschiedenen Höhelagen, um daraus Instandsetzungsempfehlungen abzuleiten. Die Auswirkungen des Feuchtegehaltes des Mauerwerks auf das Raumklima wurden mithilfe der hygrothermischen Gebäudesimulation untersucht.



Abbildung 3: Südansicht der Frauenbergkapelle Sufferloh (links) mit schematisch eingetragenen Bauteilbereich für die Simulation (rote Linien) und Abbildung des Bauteilaufbaus mit angrenzendem Erdreich in WUFI® 2D (rechts) © Fraunhofer IBP

## Hygrothermische Gebäudesimulation mit WUFI® Plus

Für komplexere Fragestellungen, die über die Betrachtung einzelner Bauteile oder Anschlussdetails hinausgehen und zusätzlich die Bewertung des Raumklimas und/ oder des Energiebedarfs erfordern, bietet sich die Verwendung von hygrothermischen Gebäudesimulationsmodellen an. WUFI® Plus ist das umfassendste Werkzeug der WUFI®-Familie [Holm et al. 2004, Lengsfeld & Holm 2007]: Es simuliert neben den hygrothermischen Bedingungen im Bauteil auch das Raumklima

und ist somit zusätzlich für Fragestellungen hinsichtlich Komfort und Energiebedarf geeignet. In Abhängigkeit vom Außenklima sowie von der Nutzung und den Lüftungs- und Klimatisierungsgegebenheiten wird eine situationsabhängige Quantifizierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse sowohl im Gebäude als auch in den Bauteilen ermöglicht. Die Simulation der Interaktion von Gebäude, Nutzer/ Nutzung und Anlagentechnik erlaubt die integrale Beurteilung von Raumklima, hygienischen Bedingungen, thermischem Komfort, Raumluftqualität sowie der Schadensfreiheit aller Bauteile in Abhängigkeit von der dafür notwendigen Heiz- und Kühlenergie sowie vom Be- und Entfeuchtungsaufwand. Angebundene Modelle zur dynamischen Berechnung dreidimensionaler Wärmebrücken [Antretter et al. 2013] und zur Berechnung des Luftaustauschs zwischen den Zonen und außen [Pazold & Antretter 2013] erweitern die Beurteilungsmöglichkeiten durch WUFI® Plus. Die hygrothermische Gebäudesimulation benötigt dieselben klimatischen Randbedingungen wie die hygrothermische Bauteilsimulation. Vor Verwendung des KERES-Ensembles für die hygrothermische Gebäudesimulation wurden die Klimadaten mit Messdaten nahegelegener Wetterstationen abgeglichen. Für die Fallstudie Sufferloh wurden die Daten der Wetterstation des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP zum Vergleich verwendet, für die Fallstudie Charlottenhof die der DWD-Wetterstation Potsdam.

Für die Fallstudie Charlottenhof wurde mittels hygrothermischer Gebäudesimulation untersucht, wie sich künftig dessen Innenraumklima verändert. Der Fokus wurde dabei auf die Hitzebeanspruchung sowie damit verbundene Schädigungsprozesse des Interieurs und deren Auswirkungen auf die menschliche Behaglichkeit gesetzt. Dazu wurde das Schloss als mehrzonales Gebäudesimulationsmodell in WUFI® Plus abgebildet (Abb. 4), welches anhand von bestehenden und in KERES durchgeführten Raumklimamessungen kalibriert wurde. Das kalibrierte Simulationsmodell wurde anschließend genutzt, um zusammen mit dem vollständigen KERES-Ensemble die drei 30-Jahres-Perioden (historische Vergleichsperiode 1971 bis 2000, Mitte des 21. Jahrhunderts 2036 bis 2065 und Ende des 21. Jahrhunderts 2069 bis 2098) zu simulieren. Bei der Ergebnisauswertung lag der Fokus auf den chemischen Schadensprozessen unter Betrachtung des sogenannten Lifetime Multipliers für unterschiedliche Materialien sowie generellen Hitzeeffekten anhand der Auswertung der Übertemperaturgradstunden.

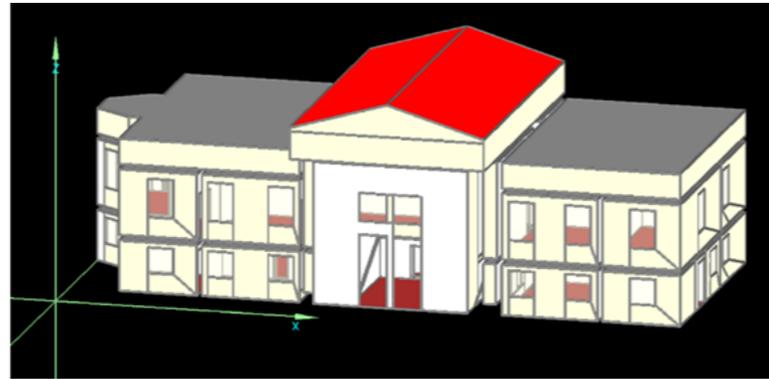


Abbildung 4: Nord-West-Ansicht des Schlosses Charlottenhof (links) und Abbildung als hygrothermisches Gebäudesimulationsmodell in WUFI® Plus (rechts) © Arne Thalmann

Für die Fallstudie Sufferloh wurde mittels hygrothermischer Gebäudesimulation untersucht, wie sich die Schlagregenbelastung auf das Innenraumklima der Kapelle auswirkt. Der Fokus wurde dabei auf die Feuchtebeanspruchung und die damit verbundenen Schädigungsprozesse der Bausubstanz und des Interieurs gesetzt. Dazu wurde die Kapelle als Gebäudesimulationsmodell in WUFI® Plus abgebildet (Abb. 5) und anhand von bestehenden und in KERES durchgeführten Raumklimamessungen kalibriert. Mit diesem Modell wurden die Auswirkungen der Feuchteabgabe des schlagregenbelasteten Mauerwerks an die Raumluft ermittelt und die

zukünftige Entwicklung des Raumklimas untersucht. Zur Untersuchung der Resilienz gegen Schlagregen und Klimawandelszenarien wurden unterschiedliche Parameter variiert und deren Auswirkungen beschrieben. Weiter wurden verschiedene Klimatisierungstechniken in das Modell implementiert und deren Auswirkungen auf das Raumklima und den Energieverbrauch untersucht. Diese Modelle wurden mit ausgewählten KERES-Klimadatensätzen für die drei 30-Jahres-Perioden (historische Vergleichsperiode 1971 bis 2000, Mitte des 21. Jahrhunderts 2036 bis 2065 und Ende des 21. Jahrhunderts 2069 bis



Abbildung 5: Südostansicht der Frauenbergkapelle Sufferloh (links) und vereinfachtes Simulationsmodell der Kapelle in WUFI® Plus (rechts) © Fraunhofer IBP

2098) berechnet. Bei der Ergebnisauswertung lag der Fokus auf einem konservativ geeigneten Raumklima mit Betrachtung der biologischen Schadensprozesse wie Schimmelpilzwachstum sowie Veränderungen der Jahresmittelwerte der relativen Feuchte des Raumklimas und deren kurzfristigen Schwankungen.

### Simulation von Hitzebelastung in Außenräumen mit dem Stadtklimamodell PALM-4U

Neben der Untersuchung von Baudenkmalern und Schadensfällen an deren Bausubstanz und dem Gebäudeinnenraum beschäftigte sich das KERES-Projekt auch mit Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf das Gebäudeumfeld sowie die historischen Gärten und Parkanlagen. Konkret wurden dabei die Auswirkungen von extremen Hitzeperioden und Sturmereignissen mit Hilfe dreidimensionaler Mikroklima-Simulationsmodelle für die zwei Fallstudien Sanssouci sowie Kölner Dom untersucht. Für die Modellierungen wurde das im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Stadtklima im Wandel“ entwickelte Stadtklimamodell PALM-4U eingesetzt [Maronga et al. 2020], welches hochaufgelöste Analysen zur Bewertung des Mikroklimas erlaubt und unter anderem ein Teilmodul besitzt, welches die Bewertung der Hitzebelastung im Außenbereich über biometeorologische Indizes ermöglicht. Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in thermischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet, welche die einzelnen meteorologischen Elemente wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwellige Strahlungsflüsse in ihrer Wirkung auf den Menschen beschreiben [VDI/DIN-KRdL 2022]. Für die Bewertung der Hitzebelastung in KERES wurde der Universal Thermal Climate Index (UTCI, Universeller thermischer Klimaindex) genutzt. Die in KERES mit PALM-4U durchgeführten Simulationen zur Hitzebelastung bilden jeweils einen typischen Sommertag mit hoher Hitzebelastung ab. Diese Tage entstehen vornehmlich bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen, die durch einen ausgeprägten Tagesgang von Strahlung, Temperatur, Luftfeuchtigkeit sowie geringen Windgeschwindigkeiten und geringem Bewölkungsgrad bestimmt sind, sogenannte autochthone Wetterlagen. Die für die KERES-Simulationen zur

Hitzebelastung verwendeten Simulationsrandbedingungen folgen den Empfehlungen zur Simulation des thermischen Komforts mit PALM-4U [Burmeister et al. 2023] und wurden auf die lokalklimatischen Gegebenheiten der Fallstudien angepasst. Dazu wurden aus dem gesamten in KERES verwendeten Klimadatenensemble alle heißen Tage (Maximum der Lufttemperatur  $\geq 30^\circ\text{C}$ ) mit einer autochthonen Wetterlage gefiltert und daraus jeweils gemittelte Tagesgänge der drei in KERES betrachteten Zeitperioden (historische Vergleichsperiode 1971 bis 2000, Mitte des 21. Jahrhunderts 2036 bis 2065 und Ende des 21. Jahrhunderts 2069 bis 2098) gebildet. Aus diesen wurden jeweils die Startbedingungen für die PALM-4U-Simulationen (bodennahe Lufttemperatur und Feuchte sowie Windanströmung) abgeleitet.

Die Hitzebelastung in Außenräumen wurde für zwei Fallstudien mit PALM-4U untersucht: Für den Schlosspark Sanssouci in Potsdam sowie für die Kölner Innenstadt, um dort die Hitzebelastung im nahen Umfeld der Fallstudie Kölner Dom zu bewerten. Für beide Fallstudien wurde zuerst jeweils ein dreidimensionales Modell des simulierten Gebiets erstellt, welches Informationen zur Topografie, zu den Landoberflächen, den Gebäuden sowie der dreidimensionalen Vegetation (Bäume und Sträucher) enthält. Die Modelle wurden auf Grundlage öffentlich frei verfügbarer Geodaten des Geoportals Brandenburg sowie des Geoportals Nordrhein-Westfalen erstellt. Gemessene Wetterdaten aus nahegelegenen DWD-Wetterstationen wurden genutzt, um die daraus ermittelten typischen heißen Tage mit denen aus dem KERES-Ensemble der historischen Vergleichsperiode abzugleichen. Für die Analyse der Simulationen wurden jeweils die Hitzebelastung am Tag sowie in der Nacht herangezogen und die Veränderungen über die drei in KERES betrachteten Zeitperioden bewertet. Abbildung 6 zeigt als Beispiel dazu die Hitzebelastung für die Fallstudie Schlosspark Sanssouci.

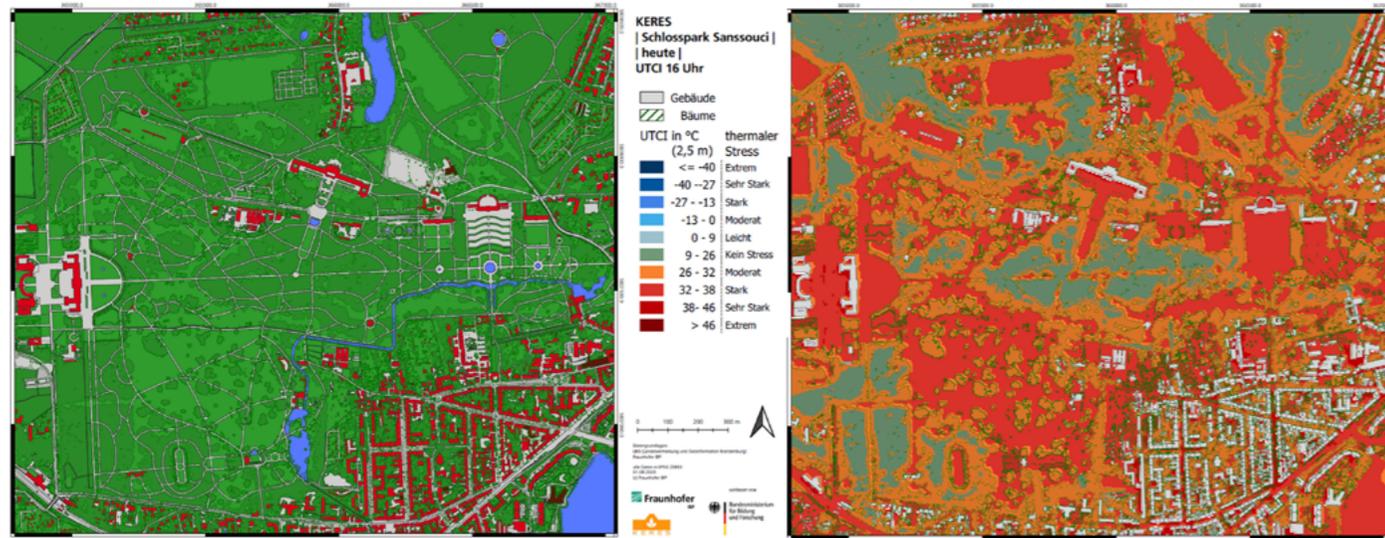


Abbildung 6: Karte des Schlossparks Sanssouci mit Darstellung der Eingangsdaten für die PALM-4U-Simulation (links) und simulierte Ergebniskarte der Hitzebelastung an einem heißen Sommertag um 16:00 Uhr unter aktuell typischen klimatischen Bedingungen (rechts) © Fraunhofer IBP

## Simulation von Sturmschäden in Außenräumen und an Gebäuden mit PALM-4U

Eine weitere in KERES genutzte Anwendungsmöglichkeit des Stadtklimamodells PALM-4U ist die Simulation von Starkwindereignissen in Außenräumen und die Ableitung von windinduzierten Schäden an Gebäudefassaden oder auch an Bäumen. Eine Besonderheit des Modells PALM-4U ist, dass es die Simulationstechnik LES (Large-Eddy-Simulation) nutzt, welche die Turbulenz der Windströmung und somit auch die dabei auftretenden Böen und Verwirbelungen direkt simuliert und es so ermöglicht diese auszuwerten.

Die in KERES durchgeführten Simulationen zur Bewertung von Starkwindereignissen bilden diese mit einer konstanten Windanströmung ab. Das vertikale Profil dieser Windanströmung basiert dabei auf realen Messdaten von Starkwindereignissen sowie der Rauigkeit des Simulationsgebietes. Das Windprofil wird an den Rändern des Simulationsgebietes angesetzt und durchströmt dann das

Modellgebiet für einen genügend langen Zeitraum, um die initialen Bedingungen aufzulösen und eine aussagekräftige Statistik bezüglich mittlerer Windgeschwindigkeit, Böen und Turbulenz bilden zu können. Thermische Effekte werden dabei nicht gesondert mit berücksichtigt.

Um die meteorologischen Randbedingungen für die Simulationen, also die Stärke und Richtung der Starkwindereignisse, zu ermitteln, wurden sowohl für repräsentative Messdaten als auch für das KERES-Ensemble Windstatistiken erstellt und nach entsprechenden Windereignissen gefiltert. Als Starkwindereignis wurden dabei alle Windereignisse mit einer mittleren Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe von mindestens 17,2 m/s definiert. Dies entspricht dem Beaufortgrad 8, ab welchem mit dem Abbrechen von Ästen erste Schädigungen an Bäumen und damit einhergehend Sicherheitsrisiken für Menschen auftreten können [Deutscher Wetterdienst 2023]. Da sich bei den Analysen der lokalen Messdaten und des KERES-Ensembles für beide Fallstudien keine signifikanten Änderungen der Starkwindereignisse ergab, sowohl in der Hauptwindrichtung als auch bei den Windgeschwindigkeiten,

wurden die Simulationen nur für einen Zeitpunkt durchgeführt und die historischen Wetterdaten (Zeitraum 2010 bis 2020) aus den lokalen Messungen für den Ansatz der meteorologischen Randbedingungen verwendet.

Die Untersuchung von Sturmschäden wurde für zwei KERES-Fallstudien durchgeführt: Für den Schlosspark Sanssouci wurde die Auswirkung eines extremen Sturmereignisses auf den Baumbestand untersucht. Als meteorologische Randbedingungen diente dafür das Sturmtief Xavier vom 5. Oktober 2017, welches im ausgewerteten Zeitraum der historischen Wetterdaten der nahen DWD-Wetterstation Potsdam (2010 bis 2020) das stärkste Sturmereignis darstellte. Aus den Simulationsergebnissen konnten die räumliche Verteilung der Windfelder sowie Orte mit hohen mittleren Windgeschwindigkeiten und hohen Böenwindgeschwindigkeiten ermittelt werden, woraus sich eine Karte mit Schädigungspotentialen für die Bäume des historischen Gartens ableiten ließ.

Für die Fallstudie Kölner Dom wurden Simulationen zur Windumströmung des Gebäudes durchgeführt, um einen Zusammenhang zwischen lokal auftretender Steinverwitterung in Form von Alveolenbildung und den gebäudenahen Windfeldern zu untersuchen. Dazu wurde auf Basis eines von der Dombauhütte bereitgestellten 3D-Modells des Doms ein hochaufgelöstes Simulationsmodell erstellt. Die Simulationen wurden auf Grundlage von Messdaten auf der Nordturmspitze und der im Rahmen von KERES durchgeführten Windmessung am Balkon der Südseite des Doms kalibriert. Aus den Simulationsergebnissen konnten die Windgeschwindigkeiten direkt an der Fassade sowie die turbulente Umströmung des Doms ausgewertet und daraus eine Kartierung von Orten mit hoher Windbelastung abgeleitet werden (Abb. 7).

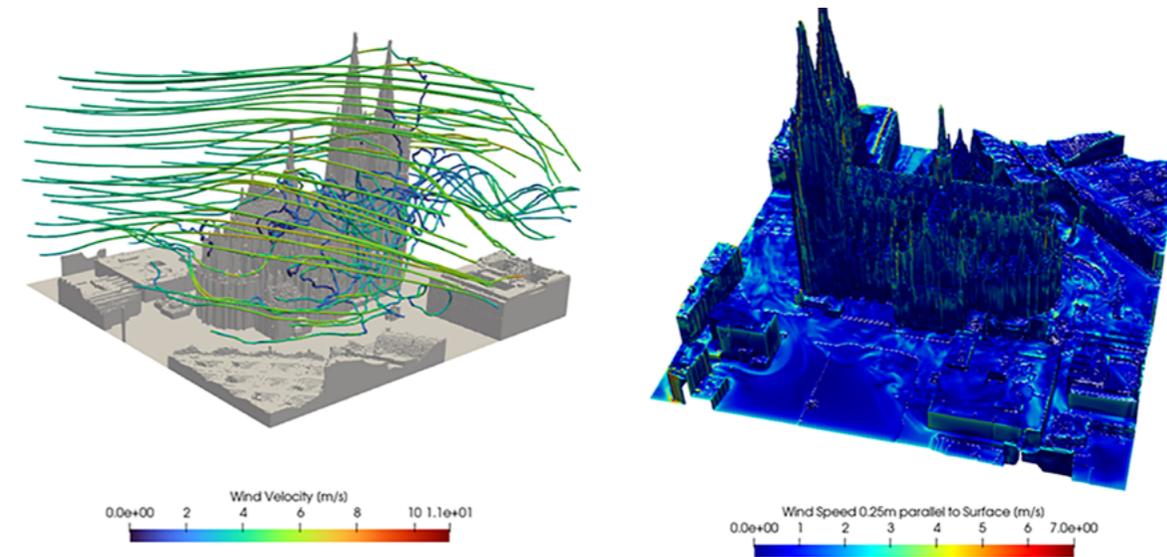


Abbildung 7: Windumströmung des Kölner Doms aus der Hauptwindrichtung (Südost). Darstellung der turbulenten Gebäudeumströmung (links) sowie der oberflächennahen Windgeschwindigkeiten (rechts) © Fraunhofer IBP

## Messdaten

Die Simulationsmodelle wurden anhand bestehender Messdaten validiert. Dazu wurden die nachfolgend dargestellten Messdaten für die Fallstudien herangezogen:

### Bad Windsheim

Für den Abgleich der Simulation des Fachwerks mit WUFI® 2D wurden Holzfeuchtemessungen an ausgewählten Stellen an den Holzbauteilen des Fachwerks sowie Raumklimamessungen durchgeführt. Exemplarisch sind nachfolgend die Messungen in der Küche des Amtshauses abgebildet (Abb. 8). Die Holzfeuchte hat einen ausgeprägten saisonalen Verlauf mit den niedrigsten Holzfeuchten Anfang August 2022 (linkes Diagramm). Die niedrigen Holzfeuchten treten in den Zeiten mit den niedrigsten relativen Raumluftfeuchten und höchsten Raumtemperaturen auf (rechtes Diagramm). Die höchsten Holzfeuchten treten im saisonalen Verlauf gegen Ende des Winters auf.

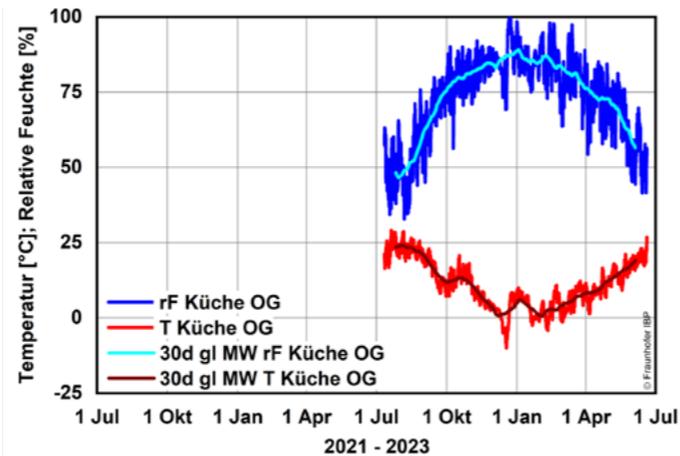
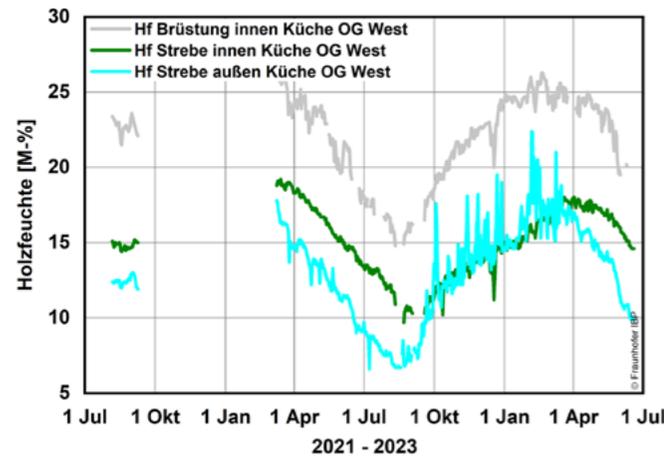


Abbildung 8: Holzfeuchtemessung an drei unterschiedlichen Positionen der mit Schlagregen belasteten westseitigen Wand auf der Außen- und Innenseite der Außenwand (links) sowie das gemessene Raumklima mit relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur in dem Raum mit der Holzfeuchtemessung (rechts) im Messzeitraum vom 6.8.2021 bis 19.6.2023 (Messausfall Holzfeuchtemessung vom 8.9.2021 bis 9.3.2022) © Fraunhofer IBP

### Schloss Charlottenhof

Zum Abgleich und zur Kalibrierung des Gebäudesimulationsmodells von Schloss Charlottenhof wurden umfassende Messungen des Raumklimas durchgeführt. Dabei wurde eine bereits bestehende Sensorik im Schloss erweitert, wodurch in Summe 10 Messstellen betrieben wurden: Eine im Dach, fünf im Obergeschoss, drei im Untergeschoss und eine im Außenbereich. Die Messzeiträume erstreckten sich teilweise über ein paar Monate bis hin zu knapp zwei Jahren (2020 bis 2021). Gemessen wurden jeweils die Temperatur und die relative Luftfeuchte. Zusätzlich wurden Außenklimadaten von der nahegelegenen Wetterstation Potsdam des Deutschen Wetterdiensts hinzugezogen.

## Kapelle Sufferloh

Wegen hoher Durchfeuchtung und einem extrem feuchten Raumklima wurden die Außenwände der Kapelle in früheren Messungen bereits eingehender auf deren Wasseraufnahme-Koeffizienten und Feuchtegehalt untersucht. Mit mehreren Kernbohrungen wurden insbesondere auf der westseitigen Außenwand in verschiedenen Höhen Materialproben entnommen. Die Materialproben wurden in unterschiedliche Schichten unterteilt und deren Wassergehalt gravimetrisch ermittelt. Im Ergebnis liegt eine gemessene Wassergehaltsverteilung über den Wandquerschnitt an zwei unterschiedlichen Höhen vor (Abb. 9), die eindeutig auf eine Durchfeuchtung durch Schlagregen schließen lässt. Die Daten wurden für die Kalibrierung bzw. Validierung der Simulation bzw. Anpassung der feuchtetechnischen Kennwerte der gewählten Materialien zur Nachstellung des historischen Mauerwerks verwendet. Zusätzlich erfolgten im Rahmen von KERES zu bestehenden früheren Raumklimamessungen weitere Messungen zum aktuellen Raumklima (Abb. 10). Die gemessenen Raumklimadaten mit relativer Feuchte und Temperatur wurden zur Bewertung des Sanierungserfolgs sowie für die Kalibrierung bzw. Validierung der Gebäudesimulation verwendet.

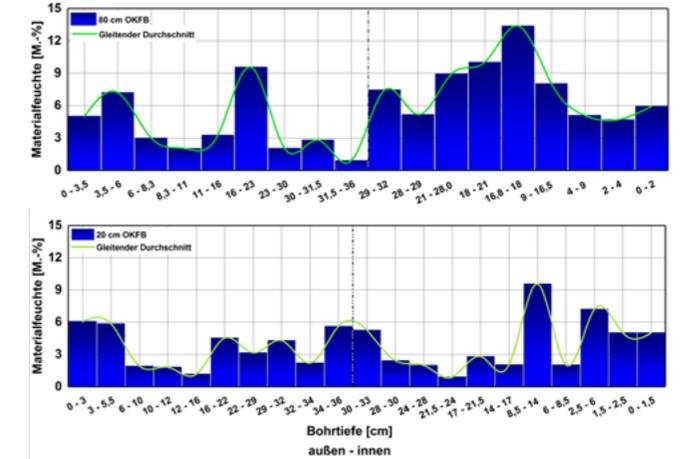


Abbildung 9: Gemessenes Wassergehaltsprofil der westseitigen Außenwand der Kapelle in Sufferloh in 80 cm Höhe (Diagramm oben) und in 20 cm Höhe (Diagramm unten) © Fraunhofer IBP

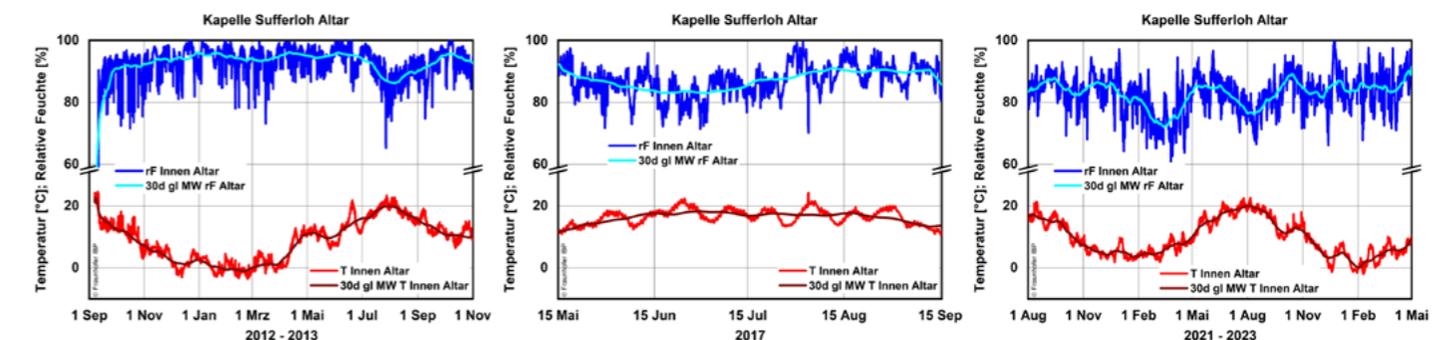


Abbildung 10: Gemessenes Raumklima in der Kapelle Sufferloh vor der Sanierung der Fassade für den Zeitraum 7.9.2012 bis 1.11.2013 (Diagramm links) und 15.5. bis 15.9.2017 (Diagramm Mitte) sowie nach Sanierung der Fassade und Einbau einer Bauteiltemperierung für den aktuellen Zeitraum vom 1.8.2021 bis 1.5.2023 (Diagramm rechts). Die relative Luftfeuchte ist nach der Sanierung deutlich niedriger. © Fraunhofer IBP

## Kölner Dom

Die in KERES durchgeführten Untersuchungen der Fallstudie am Kölner Dom beschäftigen sich vor allem mit Fragestellungen von Starkwindereignissen. Zum einen mit der Identifizierung von Wetterereignissen, die mit starken Winden an der Domfassade in Verbindung stehen, die zum Absturz von Teilen der dekorativen Naturstein-Elemente führen können. Ein weiteres Schadensbild, das mit Windanströmung in Zusammenhang steht, ist lokal auftretende und windinduzierte Alveolenbildung, also eine Form der Rückwitterung des Steins an der Fassade und insbesondere am freistehenden Strebewerk. Die Windrichtung – auch Abwinde – hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf Phänomene der Gesteinsverwitterung. Dazu wurden punktuell Messdaten erhoben: An der Nordturmspitze

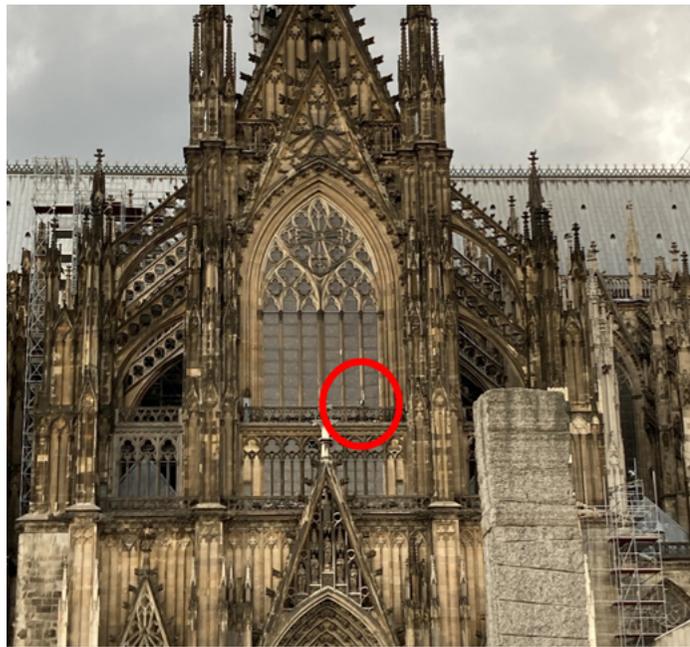


Abbildung 11: Positionierung des Messaufbaus an der Südfassade des Kölner Doms (links) und Detailsicht (rechts) der Wetterstation (vorn im Bild) sowie des 3D-Anemometers (hinten) in 1,5m Abstand zur Fassade © Fraunhofer IBP

des Doms befindet sich in 157 m Höhe seit 2011 eine Wetterstation, die kontinuierlich Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie den Luftdruck aufzeichnet. Eine zusätzliche, im Rahmen von KERES angebrachte temporäre Messeinrichtung an der Südfassade besteht aus einer Luft WS700 Wetterstation sowie einem Thies Ultrasonic Anemometer 3D, welches in 1,5 m Abstand zur Fassade die Windströmung dreidimensional und hochfrequent misst. Der Messaufbau ist in Abbildung 11 dargestellt. Die gemessenen Klimadaten wurden genutzt, um die berichteten Abwinde erstmalig messtechnisch nachzuweisen und eine mögliche Systematik für deren Auftreten abzuleiten (Abb. 12). Dabei zeigte sich, dass der Wind am Messpunkt vor der Fassade vor allem in vertikaler und nur untergeordnet in horizontaler Richtung abgelenkt wird. Betrachtet man die Windgeschwindigkeiten, so treten bei den vertikal nach unten gerichteten Abwinden

höhere Geschwindigkeiten auf als bei den Aufwinden. Für die weitere Analyse wurde durch Berücksichtigung der Messdaten der DWD-Wetterstation Köln/Bonn auch die großräumige Wetterlage mit einbezogen. Darüber hinaus wurden die gemessenen Winddaten an den beiden Messpositionen des Doms genutzt, um das Simulationsmodell für die Windumströmung des Doms zu kalibrieren.

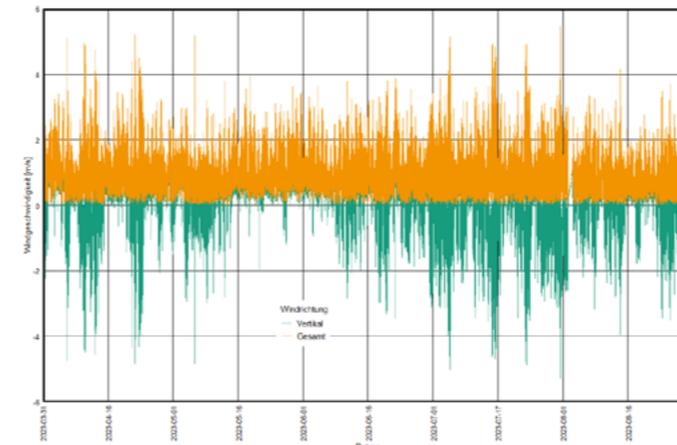


Abbildung 12: Messaufzeichnung des 3D-Windsensors in 1,5 m Abstand zur Südfassade des Kölner Doms. Dargestellt ist die resultierende Windgeschwindigkeit (orange) sowie die Vertikalkomponente des Windes (grün). Abwinde sind durch negative Windgeschwindigkeiten der Vertikalkomponente ersichtlich. Die Horizontalkomponente ist zur besseren Übersicht nicht visualisiert. © Fraunhofer IBP

## Quellen

Antretter, F., Pazold, M., Radon, J. & Künzle, H. (2013). **Kopplung von dynamischer Wärmebrückenberechnung mit hygrothermischer Gebäudesimulation**. In: Bauphysik, 35: 181-192. <https://wufi.de/literatur/Antretter.%20Pazold%20et%20al%202013%20-%20Kopplung%20von%20dynamischer%20W%3%A4rmebr%3%Bcckenberechnung.pdf>

Burmeister, C. et al. (2023). **Evaluationsbericht zur Praxistauglichkeit. Grundlagen für die Operationalisierung von PALM-4U – Praktikabilität und Versteigerungsstrategie (ProPolis)**. [UC]² – Stadtklima im Wandel – Phase 2 // Modul C. [https://www.uc2-propolis.de/imperia/md/assets/propolis/images/palm-4u\\_anwendungskatalog\\_april\\_2023.pdf](https://www.uc2-propolis.de/imperia/md/assets/propolis/images/palm-4u_anwendungskatalog_april_2023.pdf)

Deutscher Wetterdienst (2023). **Wetter- und Klimalexikon – Beaufort-Skala**. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=100310&lv3=100390>

Holm, A., Radon, J., Künzle, H. M. & Sedlbauer, K. (2004). **Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen**. In: WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81-94. ISBN 3-937066-01-2

Künzle, H.M. (1994). **Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten**. Dissertation, Universität Stuttgart. <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzle%201994%20-%20Verfahren%20zur%20ein-%20und%20zweidimensionalen.pdf>

Lengsfeld, K. & Holm, A. (2007). **Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI® Plus**. In: Bauphysik 29 (2007), H. 3, S. 178-186. <https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2014/11/Lengsfeld-Holm-2007-Entwicklung-und-Validierung-einer-hygrothermischen.pdf>

Maronga, B. et al. (2020). **Overview of the PALM model system 6.0**. In: Geoscientific Model Development, Vol. 13, S. 1335-1372. <https://gmd.copernicus.org/articles/13/1335/2020/gmd-13-1335-2020.pdf>

Pazold, M. & Antretter, F. (2013). **Hygrothermische Gebäudesimulation mit Multizonen-Gebäudedurchströmungsmodell**. In: Bauphysik 35 (2013), H. 2, S. 86-92. [https://wufi.de/literatur/Pazold.%20Antretter%20\(Hg\)%202013%20-%20Hygrothermische%20Gebäudesimulation%20mit%20Multizonen-Gebäudedurchströmungsmodell.pdf](https://wufi.de/literatur/Pazold.%20Antretter%20(Hg)%202013%20-%20Hygrothermische%20Gebäudesimulation%20mit%20Multizonen-Gebäudedurchströmungsmodell.pdf)

VDI/DIN- KRdL (2022). VDI 3787, Blatt 2 (02/2022). **Umweltmeteorologie – Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung Teil I: Klima**.



# Kapitel 3

## Vulnerabilität von Kulturerbe

### 3.1 Vulnerabilität historischer Bauten

Ralf Kilian, Julia Tammert, Franziska Prell, Wolfgang Zillig

#### Einleitung – Gefahren und Schadensrisiken für historische Gebäude

Das Klima der Erde wird heißer und extremer – Wissenschaftler sprechen nicht mehr vom Klimawandel, sondern von der Klimakrise. Mit der fortschreitenden Erwärmung werden auch Extremklimaereignisse immer häufiger und schneller auftreten, diese Zusammenhänge konnte die Attributionsforschung an Hand der jüngsten Flutkatastrophen aufzeigen. Vor allem Stürme gepaart mit Starkregen, Hagel und Überschwemmungen haben eine hohe Zerstörungskraft und fügen dem gebauten Kulturerbe und den darin befindlichen Sammlungen große Schäden zu. Aber auch zunehmende Hitze- und Trockenperioden führen zu vermehrten Schäden in Form von Grundbruch oder Deformationsschäden durch Schwinden (Rissbildung etc.). Als weiteres Schadensphänomen sind die verstärkte chemische und biologische Degradation durch die steigenden Temperaturen zu nennen.

#### Starkregen und Fluten

Die Zunahme von Starkregenereignissen und Fluten wird auf verschiedene Faktoren zurückgeführt. Verantwortlich hierfür sind:

1. Klimawandel: Der Klimawandel führt zu einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur, was wiederum zu einer erhöhten Verdunstung und Feuchtigkeit in der Atmosphäre führt. Dies resultiert in intensiveren Niederschlägen und Starkregenereignissen.
2. Veränderungen im Wasserkreislauf: Menschliche Aktivitäten wie Entwaldung, Versiegelung von Flächen und Bau von Entwässerungssystemen stören den natürlichen Wasserkreislauf. Dies führt dazu, dass Regenwasser schneller abfließt und sich in Flüssen und Bächen ansammelt, was zu Fluten führt.
3. Urbanisierung: Der zunehmende Ausbau von Städten und Siedlungen ist geprägt durch eine größere Flächenversiegelung. Dadurch versickert weniger Regenwasser im Boden, es fließt schnell oberflächlich ab und führt zu Überflutungen.
4. Infrastrukturprobleme: Veralterte oder unzureichende Entwässerungssysteme können bei starken Niederschlägen überlastet sein und das Wasser nicht schnell

genug ableiten. Die genannten Ursachen treten oft nicht einzeln auf, sondern interagieren und verstärken sich gegenseitig.

Das verheerendste Hochwasserereignis der letzten Jahrzehnte in Deutschland war die Überschwemmung im Juli 2021 im Ahrtal. Starke Regenfälle führten zu einem dramatischen Anstieg des Wasserstands der Ahr und ihrer Nebenflüsse um 8 bis 10 Meter. Die Überschwemmungen kosteten nahezu 200 Menschen das Leben und führten zu vielen Verletzten. Darüber hinaus entstanden schwere Schäden und Verwüstungen an Umwelt, Infrastruktur und Gebäuden bis hin zum Totalverlust. Die Flutwelle riss Autos, Häuser und Brücken mit sich und hinterließ eine Spur der Zerstörung. Das Hochwasser im Ahrtal hat die Notwendigkeit und Dringlichkeit einer verbesserten Hochwasservorsorge und -bewältigung deutlich gemacht, allem voran die Aufklärung der Menschen, was in solchen Krisensituationen zu tun ist.

Hochwasserereignisse können erhebliche Schäden an Gebäuden verursachen, sowohl in Bezug auf die strukturelle Integrität als auch auf die Innenausstattung. Das Eindringen von Wasser führt zu einer Durchfeuchtung und Verschmutzung der Bauteile, was zu einer Verringerung der Festigkeit und Stabilität führen kann. Dies wiederum verursacht Risse in den Wänden, Absackungen des Fundaments, und im schlimmsten Fall kann sogar das Gebäude einstürzen. Zusätzlich zur strukturellen Schädigung können auch elektrische Systeme und Geräte durch das Eindringen von Wasser beschädigt oder zerstört werden, was Stromausfälle, Kurzschlüsse oder Brände nach sich ziehen kann. Die Ausstattung wie Möbel, Teppiche oder Elektrogeräte kann ebenfalls stark in Mitleidenschaft gezogen werden. Darüber hinaus führt das feuchte Umfeld nach einem Hochwasser oftmals zu massivem Schimmelpilzwachstum, was sowohl die Gesundheit der Bewohner gefährdet als auch die Gebäudestruktur negativ beeinflussen kann.

Eine Woche vor dem Hochwasser im Ahrtal im Jahr 2021 wurde auch das Fränkische Freilandmuseum in Bad Windsheim von einer Jahrhundertflut überschwemmt. Der Fluss Aisch trat über die Ufer und flutete das ca. 45 Hektar große Gelände mit 125 historischen Gebäuden aus unterschiedlichen fränkischen Regionen, die in das Freilandmuseum Bad Windsheim transloziert wurden, um sie für die Nachwelt zu erhalten. Die aktive und passive Bautrocknung nach dem Hochwasser ist ein wichtiger Prozess bei der Erhaltung der Gebäude.

Langanhaltende Regenereignisse verbunden mit Schlagregen werden ebenso betrachtet, da sie die Gebäudehülle durchfeuchten können und dadurch Schädigungen wie Verfärbungen, Materialverlust, Schimmel oder Salzausblühungen hervorrufen wie nach einem Hochwasser.

### Stürme und Hagel

Am 26. August 2023 zerstörte ein 10-minütiger Hagelsturm in Benediktbeuern die Dächer der Klostergebäude sowie alle Fenster an der Westfassade des Hauptgebäudes. Die verursachten Hagelschäden und die damit verbundenen Sicherheitsrisiken in den historischen Gebäuden als auch in den modernen Einrichtungen des Klosters liegen im mehrstelligen Millionenbereich, und es wird mehrere Monate dauern bis die Klosteranlage wieder vollumfänglich für Besucher geöffnet werden kann.

Mehr als hundert Fenster, darunter auch wertvolle historische Butzen-Verglasungen, wurden durch den Hagel zerstört. Diese Fenster waren nicht nur ein wichtiger Bestandteil der historischen Architektur, sondern auch ein Zeugnis vergangener Handwerkskunst. Zusätzlich zur Zerstörung der Fenster sind rund 60 % der Gästezimmer des Klosters für längere Zeit nicht mehr bewohnbar, da sie komplett durchfeuchtet wurden und saniert werden müssen.

Auch die Klosterkirche und die historische Anastasia-Kapelle, die beide wichtige religiöse und kulturelle Stätten sind, wurden massiv beschädigt. Ebenso hat die historische Fraunhofer-Glashütte beträchtliche Schäden erlitten. Die Fassaden der Gebäude sind stark in Mitleidenschaft gezogen, und die Dächer vieler Gebäude wurden zerstört, wobei es bei einigen ohne Unterdach durch eindringendes Wasser



Abbildung 1: Ein Hagel-Ereignis am 26. August 2023 zerstörte Dächer und zahlreiche historische Fenster im barocken Kloster Benediktbeuern. Räume, Decken und Wände liefen voll Wasser, das Kloster ist für Monate für Besucherinnen und Besucher gesperrt. ©Fraunhofer IBP

zu weiteren Feuchteschäden im restlichen Gebäude kam. Der erhebliche Feuchteintrag in die Gebäude gefährdet historische Bausubstanz und Ausstattung.

Aufgrund der beträchtlichen Schäden an den Gebäuden und der Gefahr für die Sicherheit der Besucher und Gäste sah sich das Kloster Benediktbeuern gezwungen, alle Einrichtungen wie die Jugendherberge, das Aktionszentrum, das Zentrum Umwelt und Kultur und viele andere vorübergehend zu schließen. Darüber hinaus mussten alle geplanten Veranstaltungen abgesagt werden, was einen schweren Einschnitt in das kulturelle und spirituelle Leben des Klosters bedeutet. Der Hagelschauer am Kloster Benediktbeuern hat deutlich gemacht, wie empfindlich historische Gebäude und Einrichtungen gegenüber extremen Wetterlagen sein können. Die Wiederherstellung und Sanierung werden eine immense Aufgabe sein, um die Schätze und die Geschichte, die dieses Kloster verkörpert, für kommende Generationen zu bewahren.

### Lektionen aus Hagelschäden:

#### Vorsorge und Anpassung für eine unsichere Zukunft

Der Hagelschaden am Kloster Benediktbeuern hat nicht nur die unmittelbaren Auswirkungen dieses extremen Wetterereignisses aufgezeigt, sondern auch wichtige Erkenntnisse für den Umgang mit zukünftigen Extremwetterereignissen geliefert. Diese Erkenntnisse sind von grundlegender Bedeutung, da sie nicht nur die Erhaltung historischer Gebäude und Einrichtungen betreffen, sondern auch die Sicherheit von Menschen und Tieren sowie die Umwelt. Die finanziellen Kosten für Reparatur und Sanierung sind immens und betreffen neben historischen auch moderne Gebäude.

Eine sorgfältige Risikoabschätzung vor der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen, wie sie im Sicherheits-Leitfaden Kulturgut (SiLK) vorgesehen ist, kann helfen, die Widerstandsfähigkeit gegenüber Extremwetterereignissen zu erhöhen. Darüber hinaus ist es von entscheidender Bedeutung, Notfallvorbereitungen zu treffen, indem beispielsweise Folienwannen und Materialien in Notfall-Koffern bereitgehalten werden. Dies ermöglicht eine schnellere Reaktion im Falle von Schäden. Meteorologische Frühwarnsysteme, die auf die spezifischen Gegebenheiten und Risiken in der jeweiligen Region abgestimmt sind, sollten verstärkt genutzt werden, um auf Extremwetterereignisse frühzeitig angemessen zu reagieren.

Der Schutz vor Hagelschäden kann auch durch bauliche Maßnahmen wie z. B. durch den Einsatz von Unterdächern erhöht werden, die das Eindringen von Wasser in das Bauwerk nach Beschädigung der Dachdeckung verhindern. Auch die Anpassung der Ziegelstärke bei besonders wertvollen Gebäuden kann dazu beitragen, die Widerstandsfähigkeit gegenüber Hagelschäden zu erhöhen. Dabei können die Erfahrungen und Normen aus Ländern wie der Schweiz berücksichtigt werden, die solche Maßnahmen bereits umgesetzt haben.

Angesichts des sich rasant verändernden Klimas mit Zunahme von Extremwetterereignissen ist es notwendig, zusammen mit der Denkmalpflege zukunftsgerichtete, klimaverträgliche Lösungen und Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln, um historische Gebäude und Einrichtungen besser zu schützen und zu erhalten. Die Lehren aus dem Hagelschaden am Kloster Benediktbeuern können dazu dienen, die Anpassung und Vorsorge gegenüber zukünftigen Extremwetterereignissen zu verbessern und die langfristige Erhaltung unseres kulturellen Erbes und der Umwelt zu gewährleisten.

#### Dürrebedingte Schäden an Gebäuden – Grundbruch und Trockenheit im Innenraum

Eine oft übersehene Folge des Klimawandels sind Schäden an Gebäuden, die durch anhaltende Dürren verursacht werden, wie zum Beispiel Grundbrüche. Diese treten dann auf, wenn der Untergrund unter einem Gebäude aufgrund des Absinkens des Grundwasserspiegels austrocknet, schrumpft und Rissbildung im Boden auftritt. Dieses Schrumpfen des Bodens kann zu Setzungen führen, die das Fundament eines Gebäudes destabilisieren. Wenn das Fundament nicht ausreichend gestützt ist, kann es zu Rissen in den Wänden, Verformungen der Struktur und sogar zum Einsturz des Gebäudes kommen. Grundbruch ist ein ernsthaftes Problem, das die Sicherheit von Gebäuden gefährdet und erhebliche Reparatur- oder Sanierungskosten verursacht.

Trockenheit im Innenraum von Gebäuden ist ein weiteres Problem, das mit Dürren in Verbindung steht. Langanhaltende Trockenperioden können zu Rissen in den Wänden und Hölzern führen. Diese Risse können die Struktur des Gebäudes schwächen und bei anschließenden Regen- und Sturmperioden Feuchtigkeit eindringen lassen, was zu Schimmel- und Schädlingsbefall führen kann. Die Trockenheit im

Innenraum kann auch zur Austrocknung von Holzkonstruktionen und zur Schädigung von Gebäudekomponenten wie Dachstühlen und Fußböden führen.

Es ist wichtig zu betonen, dass dürrebedingte Schäden langfristige Auswirkungen auf die strukturelle Integrität von Gebäuden haben und die Kosten für Reparaturen und Instandhaltung erheblich erhöhen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, dass Bauherren, Eigentümer und an Planung und Bau Beteiligte sich der potenziellen Auswirkungen von Dürren bewusst sind und geeignete Maßnahmen ergreifen, um die Resilienz von Gebäuden gegenüber klimabedingten Schäden zu erhöhen.

Dies erfordert eine sorgfältige Planung und Konstruktion von Gebäuden, die in Gebieten mit Dürrefahrer errichtet werden, oder auch von Anpassungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden. Dazu gehören Maßnahmen wie die Verwendung von geeigneten Fundamenten, die Berücksichtigung des Grundwasserspiegels und die Verwendung von Baustoffen, die widerstandsfähig gegenüber Trockenheit und Feuchtigkeit sind. Darüber hinaus sind regelmäßige Inspektionen, Instandhaltung und Wartung unerlässlich, um mögliche Schäden frühzeitig zu erkennen und zu beheben und die Resilienz zu erhöhen.

In Anbetracht des zunehmenden Klimawandels und der damit verbundenen Dürrefahren ist es von größter Bedeutung, dass wir die Resilienz unserer Gebäude gegenüber diesen Herausforderungen stärken. Dies erfordert nicht nur technische Lösungen, sondern auch ein Bewusstsein für den nachhaltigen Umgang mit unseren Ressourcen und den Schutz unseres gebauten Erbes vor klimabedingten Schäden.

### **Erhöhung der Temperaturen – Biologische und chemische Degradation sowie Gefahren für die Besucherinnen und Besucher**

Höhere Temperaturen bringen verschiedene Gefahren für Kunst- und Kulturgut mit sich. Die Erhöhung der Temperatur begünstigt das Wachstum von Schimmelpilzen und Schadinsekten. Neue Arten aus anderen Regionen der Welt breiten sich aus und bedrohen Sammlungen und Gebäude. Auch schreitet die chemische Zersetzung von organischen Materialien bei höherer Temperatur schneller voran. Bei hohen Temperaturen und entsprechender Luftfeuchte außen steigt insbesondere in kalten, unbeheizten Räumen das Risiko von Sommerkondensation und damit

einhergehender Bildung von Schimmelpilzen oder Algen. Hohe Temperatur kann aber auch mit extremer Trockenheit einhergehen, die wiederum zu mechanischen Schäden an Artefakten führen kann. Nicht zuletzt sind auch die Besucherinnen und Besucher Leidtragende von sommerlicher Hitze. Steigen die Temperaturen zu weit an, müssen historische Gebäude ggf. temporär schließen und können nicht mehr besucht werden.

### **Vulnerabilität**

Der Begriff Vulnerabilität (eng. vulnerability) wird in verschiedenen Forschungsdisziplinen mit teils unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Er leitet sich vom lat. vulnus bzw. vulnerare (Wunde; verwunden) ab und kann mit Verwundbarkeit bzw. Verletzlichkeit übersetzt werden. Im Kontext der Klimafolgenforschung meint er das Ausmaß, in dem z. B. ein Objekt, ein System oder eine Gesellschaft von negativen Auswirkungen des Klimawandels „verwundet“ wird und nicht mehr in der Lage ist darauf zu reagieren, um sie abzuwenden bzw. zu bewältigen.

Vulnerabilität umfasst in der Regel weitere Konzepte wie Exposition (einem Einfluss ausgesetzt sein), Sensitivität (Empfindlichkeit), Resilienz (Robustheit) und Anpassungsfähigkeit. Bei Vulnerabilitätsanalysen werden diese Konzepte zunächst für den jeweiligen Betrachtungsraum definiert, zueinander in Beziehung gesetzt und ihre Wechselwirkungen untereinander betrachtet. Daraus ergibt sich ein Grad der Vulnerabilität für das zu betrachtende Objekt, welcher abhängig von einer Gefährdung für die Abschätzung des Risikos für einen eintretenden Schaden verwendet werden kann.

Im Rahmen des KERES-Projektes wurde die spezifische Vulnerabilität von historischen Bauwerken untersucht. Obwohl zur Vulnerabilität von Bauwerken schon verschiedene Einschätzungen vorliegen, so konzentrieren sich diese meist auf sehr allgemein gefasste Gebäudeschäden, welche die Nutzbarkeit von Gebäuden beeinträchtigen (z. B. Überhitzung des Innenraumes oder Sturmschäden). Bei einem historischen, denkmalgeschützten Bauwerk ist der Schadensbegriff jedoch erweitert zu definieren, da beispielsweise der Verlust einer bemalten Wandoberfläche für die Denkmalbedeutung dramatisch sein kann, für die Nutzbarkeit des Gebäudes jedoch von geringerer Bedeutung ist. Daraus ergibt sich, dass

Denkmäler empfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen und den Folgen des Klimawandels reagieren können. Die Anpassungskapazität von Baudenkmalen ist unter Umständen sehr gering, wenn sich durch Anpassungsmaßnahmen z. B. wichtige Gestaltungsmerkmale der Fassade verändern würden und die Aussagekraft des Denkmals darunter leiden würde. Andererseits haben zahlreiche Denkmäler bereits die Krisen und Veränderungen mehrerer Jahrhunderte überstanden, weshalb sie in mancherlei Hinsicht eine große Robustheit zeigen.

Bei einer Vulnerabilitätsbetrachtung denkmalgeschützter historischer Bauten gilt es folglich, sowohl die Einflüsse als auch die Eigenschaften und Potenziale der Gebäude zu definieren und den Rahmen für eine mögliche Anpassung aufzuzeigen. Um die ausschlaggebenden Eigenschaften und Einflüsse auszumachen, sind Wirkungsketten ein nützliches Werkzeug. Dabei werden Ursachen und Auswirkungen in Beziehung zueinander gesetzt. Beispielsweise kann ein Extremwetterereignis mit Hochwasser zu einer Durchfeuchtung der Wände führen. Beim Abtrocknen kann es zu Salzausblühungen und dem Ablösen der Putzoberfläche kommen. Je nach Eigenschaft der Wand und Wertigkeit der Oberfläche lässt sich daraus eine Vulnerabilität ableiten.

Bei diesen Betrachtungen bleibt die Vulnerabilität ein in die Zukunft gerichteter Wert, welcher sich abhängig von den anderen Faktoren verändern kann. Einem

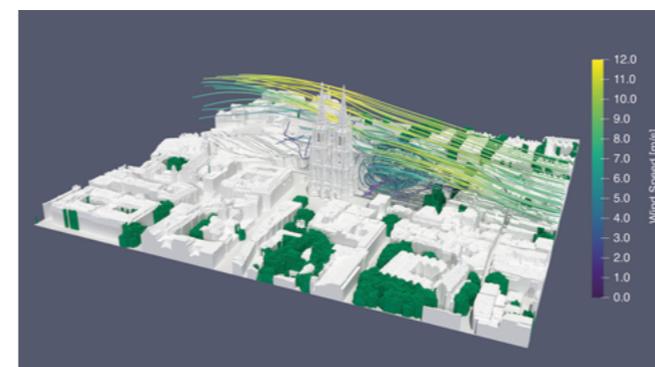


Abbildung 2: Kölner Dom – Windanströmung aus Süden. Dargestellt sind die Strömungslinien im Bereich des Doms, deutlich sichtbar die Abwinde im Bereich der Südfassade des Doms. © Fraunhofer IBP

größeren negativen Einfluss durch Klimafolgen kann durch eine Anpassung im Rahmen der Möglichkeiten begegnet werden, um die Vulnerabilität und damit die Auswirkungen zu verringern. Eine Fehlanpassung dagegen könnte das Ergebnis negativ beeinflussen. Vulnerabilität ist kein Wert, der mathematisch exakt berechnet werden kann. Eine Einschätzung darüber kann jedoch dabei helfen, sich auf Veränderungen einzustellen, eine Abwägung im Hinblick auf den Denkmalwert vorzunehmen und präventive Maßnahmen einzuleiten.

### **Gebäudetypologien**

Typologien helfen bei der Bewertung und Einordnung eines Gebäudebestandes hinsichtlich bestimmter Kriterien und Kategorien. Im Bereich des Bauwesens und der Architektur finden sich zum Beispiel Gruppierungen nach Nutzung, Baualter, Konstruktion oder Energieeffizienz. Bei der Betrachtung der Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf das gebaute Kulturerbe können Typologien auch dazu dienen, Gebäude hinsichtlich ihrer Vulnerabilität gegenüber Klimaveränderungen und Extremwetterereignissen einzuordnen. Um dabei verwertbare Ergebnisse zu erzielen ist es jedoch entscheidend, jene Merkmale der Gebäude zu identifizieren, die sie für Schäden durch Witterungseinflüsse tatsächlich anfällig machen.

Innerhalb des KERES-Projektes wurden Ideen zum Aufbau einer geeigneten Typologie entwickelt, welche die komplexen Wirkungsketten aus Klimaereignissen, ihrem Einfluss auf historische Bausubstanz und die dadurch entstehenden Schadensbilder nachverfolgt, um eine Gefährdungsbeurteilung vornehmen zu können. Dabei liegt der Fokus auf Gebäuden, die mit vorwiegend lokal vorhandenen Materialien in traditioneller Weise errichtet wurden. Einige davon wurden im Rahmen der Fallstudien näher untersucht und können wichtige Anhaltspunkte für relevante Wirkungsketten liefern.

Wie genau historische Gebäude auf Witterungseinflüsse reagieren, hängt von mehreren Faktoren und Eigenschaften ab. Um diese innerhalb einer Typologie greifbar zu machen, können sie zu Gruppen zusammengefasst werden, etwa nach Standort, Konstruktionsweise, Material und vorhandener Ausstattung. Um Wirkungsketten bis zu ihrer Ursache zurückzuvorführen, dienen die bereits heute zu beobachtenden Schadensbilder als Ausgangspunkt. So kann z. B. ein Braunfäulebefall an einem

Holzbalken auf anhaltende Durchfeuchtung zurückgeführt werden, verursacht durch langanhaltende Regenfälle. Hinzu kommen verstärkende Faktoren und spezifische Eigenschaften des Gebäudes: Wo am Gebäude befindet sich der Holzbalken? An der Fassade oder im Inneren, im Spritzwasserbereich oder im geschützten Bereich unterhalb eines Dachüberstandes? Anders gefragt: Besitzt das Gebäude durch seine Eigenheiten bereits einen gewissen Schutz gegen bestimmte Schadensbilder? Weist es zum Beispiel einen weiten Dachüberstand oder eine Verschalung an der Wetterseite auf, die eine starke Durchfeuchtung exponierter Holzbalken verhindern können? Oder besitzt es durch seine Konstruktionsweise viele der Witterung ausgesetzte Holzteile und ist daher besonders anfällig?

Wenn sich diese Schadensprozesse besser verstehen lassen, können auch Prognosen hinsichtlich einer zukünftigen Schadensanfälligkeit gewagt werden. Durch die Identifizierung jener Eigenschaften, die ein historisches Gebäude anfälliger oder resistenter gegenüber bestimmten Witterungseinflüssen machen, können anhand der Typologie regional auftretende Bautypen und Eigenheiten identifiziert werden. Da sich sowohl die Klimabedingungen und -veränderungen als auch die traditionellen Bauweisen je nach Region unterscheiden können, ergeben sich für verschiedene Regionen vor dem Hintergrund des Klimawandels unterschiedliche Bedrohungsszenarien für das Baukulturerbe. Mit Hilfe der hochauflösenden Klimaprognosen, welche innerhalb des KERES-Projekts entwickelt wurden, können für jede Region die zu erwartenden Veränderungen des Klimas und damit der Witterungseinflüsse auf Gebäude benannt werden. Mittels der Typologie lassen sich dann die zukünftige Vulnerabilität von Gebäuden im Hinblick auf bestimmte Klimafolgen abschätzen und möglicherweise sogar Hinweise auf vermehrt auftretende Schadensbilder an regional auftretenden Bautypen geben. Die Zusammenfassung von Einzelgebäuden zu Bautypen entsprechend ihrer Vulnerabilität und Resilienz gegenüber Witterungseinflüssen und Klimaveränderungen bietet ein wichtiges Werkzeug bei der Identifizierung besonders vulnerabler Gebäudegruppen und bei der Planung und Entwicklung von Lösungsstrategien. So können dringende Handlungsbedarfe besser erkannt werden, um den Verlust wertvoller Denkmalsubstanz zu verhindern. Präventive Maßnahmen können zielgerichtet eingesetzt werden, um zukünftige Schäden zu vermeiden, und denkmalgerechte Anpassungsmöglichkeiten für verschiedene Regionen und Bautypen aufgezeigt werden.

## Fachwerk als empfindlicher Bautypus

Materialverbund, Bauteilwechsel, Knotenpunkte – diese Merkmale kennzeichnen die nördlich der Alpen verbreiteten Holzbausysteme und charakterisieren zugleich ihre unverkennbare Konstruktionsweise. Jene sorgt nicht nur für die Spezifikation weiterer Untergruppen, wie beispielsweise des Block- oder Holzgerüstbaus, sondern birgt vor allem aus bauphysikalischer Sicht besondere Herausforderungen.

Ein Beispiel hierfür ist der Fachwerkbau. Die Mischbauweise setzt sich einerseits aus einem raumbildenden Holzgerüst zusammen, das sich in tragende Einzelbauteile, wie zum Beispiel Ständer oder Deckenbalken, in Aussteifungselemente wie Streben und Bänder, oder Elemente zur Unterteilung wie Riegel und Zwischenständer gliedert. Der Einbauort im Gesamtgefüge bestimmt die Verwendung verschiedener Holzarten aufgrund individueller mechanischer sowie physikalischer Baustoffeigenschaften. Der Zusammenschluss der Einzelhölzer erfolgt mithilfe zahlreicher zimmermannsmäßiger Verbindungen durch Verzapfung, An- bzw. Überblattung oder Verkämmung, die je nach Zug-, Druck- oder Biegebeanspruchung differieren. Zum anderen bilden sich innerhalb der Fachwerkhölzer Fächer aus, die sogenannten Gefache. Verfüllmaterialien können Natur- und Backsteine, Flechtwerke sowie Lehmstaken inklusive Wandabschlüsse auf Lehm- und Kalkbasis darstellen.

Bauwerke sind ihrer Umgebung direkt ausgesetzt, was die Notwendigkeit nach sich zieht, das bauliche Gefüge an den Außenraum anzupassen und potenziellen Schadensmechanismen vorzubeugen, die durch externe Einwirkungen induziert werden. Das Forschungsprojekt KERES setzte hierbei den Fokus auf die Beeinflussung durch klimatische Einwirkungen, insbesondere auf Extremwetterereignisse. Aus diesem Grund definiert sich der Vulnerabilitätsbegriff bei Fachwerkbauten in Bezug auf die klimatischen Gegebenheiten als baustoff- bzw. konstruktionsbezogene Anfälligkeiten.

Generelle Wetterphänomene, wie beispielsweise Regen, Wind und Sonneneinstrahlung, beanspruchen den Baustoffverbund des Fachwerkes. Aufgrund unterschiedlichster Materialeigenschaften reagieren die Einzelkomponenten teilweise divers oder sogar gegenläufig auf die einwirkenden Einflüsse.

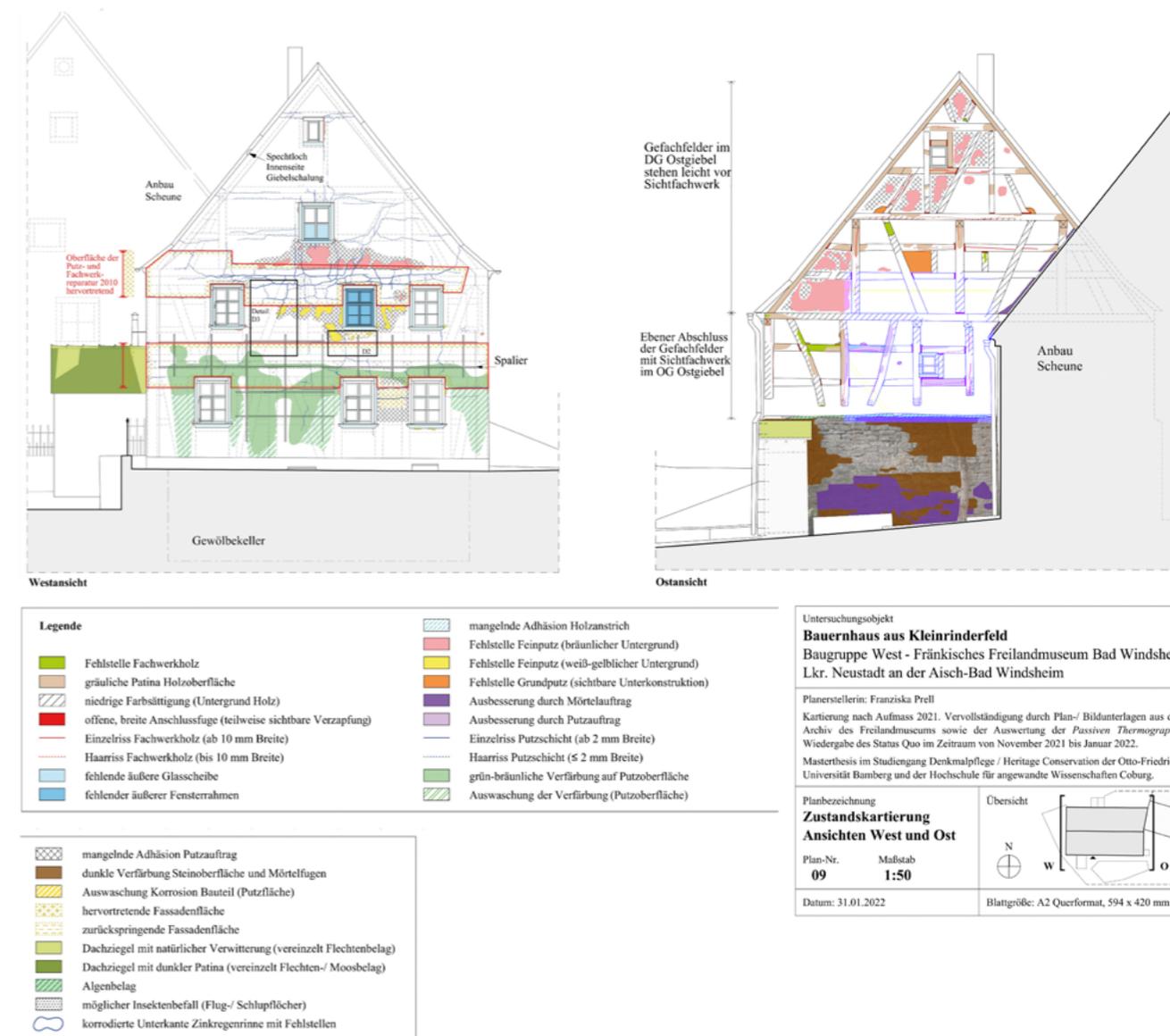


Abbildung 3: Schadenskartierung am Bauernhaus aus Kleinrinderfeld aus dem Jahr 1779. Das verputzte Fachwerk zeigt großflächige Putzschäden an der Fassade des exponierten Westgiebels. Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme und der bauhistorischen Forschung wurden in Form einer restauratorischen Kartierung dargestellt. Diese visualisiert die Ergebnisse und hilft bei der Identifikation von Bereichen, die besonderen Schutz erfordern. © Universität Bamberg, Franziska Prell

Die natürlichen Baustoffe gestalten sich insbesondere hinsichtlich indirekter Wasserbelastung, der Luftfeuchtigkeit sowie direkter Feuchteeinwirkung durch (Schlag-) Regen, Schnee, vom Erdreich aufsteigende Feuchte oder Leckagen als besonders vulnerabel. Außenelemente, z. B. aus Holz oder Kalkputz, besitzen aufgrund ihrer kapillaren Aufnahmefähigkeit feuchteregulierende Eigenschaften. Die offenporigen Baustoffe können einen bestimmten Grad an Quell- und Schwindprozessen kompensieren und eine natürliche Abtrocknung ermöglichen. Neben den aufragenden vertikalen Flächen lässt sich oftmals eine verstärkte Einwirkung auf horizontale Bereiche und Auskragungen feststellen, die sich in Kombination mit einer mangelhaften Wasserableitung schädigend auf die Bausubstanz auswirkt. Langanhaltende Feuchte sowie Wasseransammlungen können ein Quellen des Holzes sowie schwerwiegende Schadensprozesse, wie Vermorschung oder die vollständige Zersetzung der biologischen Struktur, induzieren.

Das Außenklima wirkt sich nicht nur unmittelbar auf die Fassadenbaustoffe aus, sondern begünstigt durch Vorbeschädigungen an den Fassadenflächen und extreme Wettereinwirkung ebenso Sekundärschäden an der Konstruktion und in den Innenräumen (siehe Abb. 2). Diese können verschiedenste Materialveränderungen in Form von Abplatzungen, Rissen und Hohlstellen sowie Schadensmechanismen wie Salzkristallisation, Frosteinwirkung oder mikrobiologischen Befall hervorrufen. Sich rapide ändernde Einwirkungen durch abwechselnde Wetterlagen, sich annähernde Frost-Tau-Zyklen oder eine kurzfristige Aufheizung aufgrund temporärer Nutzung können innere Spannungen im Bauteilgefüge hervorrufen. Diese Wechselbeeinflussung von Temperatur- und Feuchteschwankungen kann besonders an Bauteilanschlüssen zwischen Gefachen und Fachwerkhölzern Volumenveränderungen, Verformungen und letztendlich Substanzverlust bedingen. Ebenso verhalten sich nicht aufeinander abgestimmte Materialien, die im Verbund konträr zueinander reagieren.

Das Ausmaß der Beanspruchung der Konstruktionselemente durch das Außenklima ist stark abhängig vom Regionalklima, von der Beschaffenheit des Gebäudes sowie dessen Umgebungsparametern. Letztere beschreiben die örtlichen Gegebenheiten, z. B. eines angrenzenden Gebirges oder Flusses, sowie Nachbargebäude. Zur Gebäudebeschaffenheit zählen dessen Ausrichtung, Höhe, Neigung der Außenflächen oder Exponiertheit.

Zur Erfassung der örtlichen Gegebenheiten dienen Risikoanalysen, die Auskunft über potenzielle negative Auswirkungen für den individuellen Baukörper geben. Hierbei werden u. a. zerstörungsfreie Methoden, wie Be- und Zustandskartierung, Klimamonitoring oder Wärmebildkameras, angewandt. Regelmäßige Wartungs- und Pflegemaßnahmen können umfangreichen restauratorischen Ertüchtigungsarbeiten vorbeugen und stellen dem gegenüber lediglich einen Bruchteil der aufzuwendenden Kosten dar.

Bereits in der Vergangenheit wurde auf die vorhandenen Klimawirkungen mithilfe zahlreicher Schutzmaßnahmen reagiert. Diese lassen sich in konstruktive Baumaßnahmen, v. a. zur Vermeidung schädigender Feuchteinwirkungen, chemische Methoden hinsichtlich biologischer Beeinträchtigung und Oberflächenbehandlungen zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit anfälliger Bauteile unterteilen. Vorneweg stellt jedoch bereits die Wahl des geeigneten Bauholzes, bedingt durch die natürliche Resistenz, den ersten grundlegenden Schritt zur Gewährleistung der Beständigkeit dar.

Konstruktive Schutzmaßnahmen dienen dem Schutz vulnerabler Baustoffe, wie zum Beispiel der nachträgliche Ersatz der Fachwerkkonstruktion in gefährdeten erdberührten oder feuchten Bereichen, wie etwa in einem ins Wohnhaus integrierten Stall, durch eine beständigere Ausführung mit Stein. Eine weitere Möglichkeit zum Schutz vor Schlagregeneinfluss bietet eine vor der eigentlichen Wandfläche angebrachte Verkleidung aus Schieferplatten, Holzschindeln oder Tonziegeln. Einzelne, aus der Wandfläche vorspringende oder offenliegende Holzelemente, wie Balkenköpfe, Fensterbauteile oder horizontale Bestandteile, können mithilfe vorgesetzter verzierter Bretter inklusive Tropfkante vor dem direkten Feuchteindrang und somit vor Wasseransammlungen geschützt werden. Maßnahmen, wie die Installation von Regenrinnen sowie die gezielte Wasserabführung der Dach- und Freiflächen am baulichen Bestand, tragen zudem zur Minimierung der Feuchtebelastung bei. Neuzeitliche Maßnahmen, wie beispielsweise die Nachrüstung haustechnischer Anlagen, der Einbau von Temperierungssystemen, Be- und Entlüftungsanlagen, automatisierten Heizsystemen oder gezielte Maßnahmen zum Licht- und UV-Schutz, dienen der Herstellung eines optimierten, auf die Gegebenheiten abgestimmten Raumklimas, das Beschädigungen vorbeugt und den Erhalt der Ausstattung sowie des baulichen Gefüges priorisiert.

Die früher flächendeckende Verbreitung der Fachwerkkonstruktion trotz klimatischer Vulnerabilitäten lässt sich hauptsächlich mit der Flexibilität des Gerüstbaus hinsichtlich Umbauten, der Reparaturmöglichkeit sowie der Kostenersparnis aufgrund verfügbarer Baumaterialien begründen. Aus neuzeitiger Sicht kommen weitere Aspekte in Bezug auf die Nachhaltigkeit, wie die Verwendung nachwachsender Rohstoffe, die natürliche Feuchteregulierung und das damit einhergehende angenehme Innenraumklima sowie die Rückführung von Rohstoffen, wie Kalk oder Lehm, in den Stoffkreislauf hinzu.

Grundlage heutiger Diskussionen rund um den Erhalt des Bautyps Fachwerk bildet die erfolgreiche Überlieferung der historischen Substanz über die vergangenen Jahrhunderte, die mithilfe archäologischer Ausgrabungen bis ins 13. Jahrhundert zurückverfolgt werden kann. Das früheste, dendrochronologisch auf 1265/66 datierte Fachwerkhaus in Deutschland befindet sich im Markt 6 in Bad Wimpfen. Um den Erhalt der Fachwerkgebäude auch zukünftig sicher zu stellen, müssen die genannten Vulnerabilitäten nicht nur auf heutige Bedingungen abgestimmt werden, sondern sind ebenso anhand der zukünftigen Prognosen hinsichtlich der Klimakrise neu zu bewerten. Die Anpassung an künftige Klimawirkungen sowie die Ausarbeitung von Notfallplanungen im Falle von Extremwetterereignissen bieten das Potenzial, innerhalb gesamtheitlicher Strategien den Fortbestand unseres historischen Erbes zu sichern.

## Weiterführende Literatur

adelphi / PRC / EURAC (2015). **Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel.** In: Umweltbundesamt. Climate Change 24/2015 <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>

Bedal, K. (2007). **Häuser aus Franken. Museumshandbuch für das Fränkische Freilandmuseum in Bad Windsheim.** ISBN 978-3926834652

Birkmann, J., Böhm, H. R., Buchholz, F., Büscher, D., Daschkeit, A., Ebert, S., Fleischhauer, M., Frommer, B., Köhler, S., Kufeld, W., Lenz, S., Overbeck, G., Schanze, J., Schlipf, S., Sommerfeldt, P., Stock, M., Vollmer, M. & Walkenhorst, O. (2013). **Glossar Klimawandel und Raumentwicklung.** <https://d-nb.info/103111162X/34>

Buth, M., Kahlenborn, W., Greiving, S., Fleischhauer, M., Zebisch, M., Schneiderbauer, S. & Schausser, I. (2017). **Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung.** <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>

EiBing, Th. (2015). **FlöBerei.** In: Beratungsstelle für Handwerk und Denkmalpflege (2015). Johannesberger Arbeitsblätter.

EiBing, Th. et. al. (2012). **Vorindustrieller Holzbau in Südwestdeutschland und der deutschsprachigen Schweiz – Terminologie und Systematik.** In: Vereinigung für Bauforschung (VEBA) (2012). Südwestdeutsche Beiträge zur historischen Bauforschung, Sonderband. <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/swbhb/article/view/36297>

Großmann, U. G. & Michels, H. (2015). **Fachwerk als historische Bauweise. Ein Materialleitfaden und Ratgeber.** ISBN 978-3931824181

Großmann, U. G. (2004). **Der Fachwerkbau in Deutschland. Das historische Fachwerkhaus, seine Entstehung, Farbgebung, Nutzung und Restaurierung.** ISBN 978-3832174637

Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J.P., van der Linden, P. J. & Hanson, C. E. (Hrsg.) (2007). **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4\\_wg2\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf)

## 3.2 Vulnerabilität historischer Gärten

Katharina Matheja, Michael Rohde

### Hintergrund

Seit etwa fünf Jahren – beginnend mit dem besonders heißen und trockenen Jahr 2018 – sind die Auswirkungen der Klimaveränderung in den historischen Gärten und Parkanlagen besonders deutlich zu erkennen: Während der Gehölzbestand vor allem unter den langanhaltenden Dürreperioden leidet, werden die historischen Parkwege durch immer häufiger auftretende heftige Starkregenereignisse beschädigt. Damit einhergehend sind vermehrt Astabbrüche und Entwurzelung von ganzen Bäumen zu erwarten und stellen zusammen mit Überflutungen der Parkwege auch Sicherheitsrisiken für die Besucherinnen und Besucher dar. Entscheidend für den Zustand der Anlagen ist hier weniger die Jahresgesamtniederschlagsmenge als vielmehr deren Verteilung über das Jahr gesehen. Ausgetrocknete Böden können plötzlich anfallende Regenwassermassen kaum aufnehmen. In Folge werden große Mengen an Material und Nährstoffen ausgespült. Die für die historischen Gärten charakteristischen wassergebundenen Wege werden durch die extremen Wetterverhältnisse instabil. Für die Gehölze bedeutet dies insgesamt einen Verlust der Vitalität durch mangelhafte Wasser- und Nährstoffversorgung.

Da diese beiden Elemente – Wege und Gehölze – zum einen essentielle Gestaltungsstrukturen der Parkanlagen sind, zum anderen aber auch das größte Sicherheitsrisiko für die Menschen darstellen können, die sich in den Anlagen aufhalten, wurden im KERES-Projekt hier die Untersuchungsschwerpunkte gesetzt. Ziel war es zunächst, zukünftige Extremklimaereignisse zu eruieren und die daraus entstehenden Risiken und Schadensbilder zu identifizieren. Im weiteren Vorgehen wurden innovative Präventionsmaßnahmen getestet und Anpassungsstrategien entwickelt.

### Methodik

Im Rahmen von KERES wurden mehrere Untersuchungsräume in den Parkanlagen Sanssouci und Babelsberg ausgewählt, die ein möglichst breites Spektrum an Standortbedingungen repräsentieren, das für die Region Berlin-Brandenburg charakteristisch ist. Dadurch sollte die Übertragbarkeit auf andere historische

Gartenanlagen der Region gewährleistet werden. Standortfaktoren sind u. a. Topographie, Exposition, Gewässernähe und Bodenverhältnisse. So finden sich höher gelegene, südwestexponierte Bereiche, wie am Ruinenberg im Park Sanssouci oder auf dem Fontainenplateau im Park Babelsberg, die durch ein relativ starkes Gefälle geprägt sind, in der Auswahl. Aber auch grundwassernahe Areale in flachem Gelände, bspw. der Park Charlottenhof, wurden betrachtet. Ein weiterer Faktor, bei dem auf eine möglichst hohe Diversität geachtet wurde, ist die Gehölzstruktur. Das Spektrum reicht von vorwiegend offenen Bereichen mit vereinzelter Baumgruppen und Solitären über Heckenquartiere bis hin zu waldartigen Baumbeständen. Allen Standorten gemein ist eine relativ hohe Nutzungsintensität durch Besucherinnen und Besucher.

Während die Erfassung der klimabedingten Schadensbilder sich auf die gesamten Parkanlagen ausdehnte, konzentrierten sich die Maßnahmen zur Prävention (siehe Kapitel 4) auf die genannten Untersuchungsräume.

Im Projekt KERES wurden zunächst Schadensbilder an Gehölzen und Wegen erfasst, die mit der Änderung des Klimas korrelieren. Basierend auf den Klimamodellierungen mithilfe des KERES-Ensembles (siehe Kapitel 1) und den Simulationen von Sturmschäden (siehe Kapitel 2) wurden zu erwartende Schäden

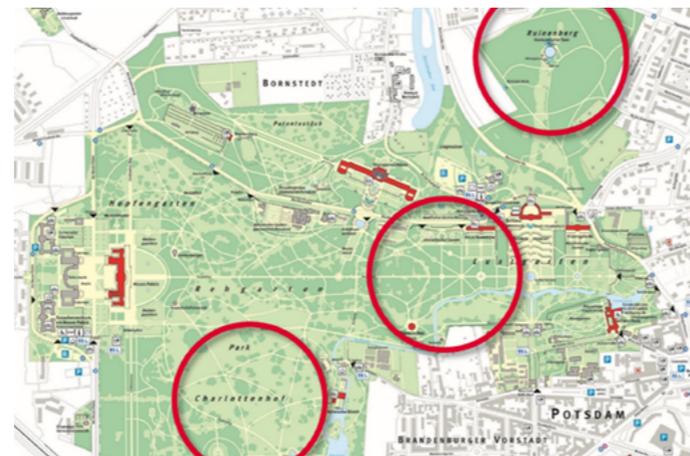


Abbildung 1: Kartendarstellung Untersuchungsräume im Park Sanssouci (von Nord nach Süd): Ruinenberg, Boskettbereich nahe des Parkgrabens, Park Charlottenhof © SPSG

und Veränderungen für die historischen Gärten skizziert sowie Ansätze für den (zukünftigen) Umgang mit diesen neuen Herausforderungen aufgezeigt, welche in Kapitel 4 weiter vertieft werden.



Abbildung 2: Kartendarstellung Untersuchungsräume im Park Babelsberg (von Nord nach Süd): Fürstenhöhe, Fontainenplateau nahe dem Eingang Sternwarte © SPSG

### Bereits beobachtete Schadensbilder

Viele der Schadensbilder an Gehölzen und Wegen sind neu, es treten aber auch bereits bekannte Schäden vermehrt und intensiver auf als bisher.

#### Wege

Der überwiegende Teil der Wege im Park Sanssouci ist nach historischem Vorbild in wassergebundener Bauweise hergestellt. Das bedeutet, es werden keine Bindemittel verwendet, um das Wegematerial zu stabilisieren. Bei einem gemäßigten Klima mit regelmäßigen Niederschlägen sind diese Wege durchaus stabil, selbst mit einer gewissen Steigung. Die Mittelüberhöhung, Entwässerungsrinnen entlang der Wegekanten, Querrinnen, die Niederschlagswasser in die angrenzende Vegetation leiten, oder Abläufe, die in unterirdische Sickerschächte münden, waren in der Vergangenheit meist ausreichend, um das anfallende Wasser von den Wegen abzuleiten.



Abbildung 3: Winderosion auf einer wassergebundenen Wegedecke im Park Babelsberg © SPSG, Katharina Matheja



Abbildung 4: Aufgeweichte Wegedecke nach Starkregenereignis im Park Sanssouci © SPSG, Heiko Muschick

In den vergangenen Jahren konnte jedoch eine Zunahme der Starkregenereignisse beobachtet werden, die in Kombination mit langanhaltenden Trockenphasen massive Schäden an den Wegekonstruktionen verursachten. Trocknet die obere Deckschicht stark aus, kann bereits stärkerer Wind zu Erosion führen (Abb. 3). Kommt es aber zu plötzlichen und heftigen Niederschlägen, werden teilweise auch die darunterliegenden Schichten ausgespült. Der Weg ist damit nicht mehr verkehrssicher und muss, zumindest in Abschnitten, für Besucherinnen und Besucher gesperrt werden (Abb. 4 und 5).



Abbildung 5: Durch Starkregen ausgespülte Wegekante im Park Babelsberg © SPSG, Anne-Grit Reichelt

## Gehölze

In Folge der zunehmenden Anzahl von wolkenlosen Tagen erhöht sich auch die UV-Einstrahlung, die vor allem bei Bäumen mit einer dünneren Rinde zu Sonnenbrandschäden führt. Desweiteren begünstigen Hitze und Trockenheit die durch Schwächeparasiten hervorgerufene Buchenrindennekrose. In den Parkanlagen Sanssouci und Babelsberg sind davon in erster Linie die Rotbuchen an den höher gelegenen Standorten betroffen. Die geschädigten Stammbereiche sind ein Einfallstor für Pilze, Bakterien und andere Schädlinge. Es konnte ein massiver Einbruch der Buchenbestände in den letzten Jahren verzeichnet werden, der mit der langanhaltenden Trockenheit 2018 und 2019 korreliert.



Abbildung 6: Sonnenbrand an einer Rotbuche auf dem Ruinenberg, Park Sanssouci © SPSG, Katharina Matheja



Abbildung 7: Abgestorbene Linden im Park Babelsberg © SPSG, Anne-Grit Reichelt



Abbildung 8: Fraßspuren des Heldbocks an einer alten Eiche, die einem Sturm zum Opfer gefallen ist, Park Sanssouci © SPSG, Katharina Matheja

Neue Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel und den damit verbundenen höheren Durchschnittstemperaturen stellen beispielsweise neue Schädlinge und erhöhte Reproduktionszyklen der Insekten dar. So wurde 2021 erstmals der Eichenprachtkäfer in den Potsdamer Parkanlagen nachgewiesen und hat sich seitdem stetig weiter verbreitet. Seine Larven fressen sich durch das Kambium von Eichen aller Altersstufen und unterbrechen damit die Wasser- und Nährstoffversorgung im Baum. Extreme und schnell wechselnde Witterungsbedingungen wie Dürre und Starkregen schwächen die Gehölze in einem nicht gekannten Ausmaß und begünstigen die Vermehrung des Käfers. Auch Pilze und Bakterien befallen bevorzugt Bäume, die bereits vorgeschädigt sind. In den meisten Fällen sind es daher sogenannte „Komplexkrankheiten“, die für die betroffenen Bäume ein Sterben auf Raten bedeuten.

Oftmals führen diese Schädigungen dazu, dass Kronenbereiche nicht mehr versorgt werden können, was wiederum unvorhergesehene Starkastabbrüche verursacht, die ein Sicherheitsrisiko für Besucherinnen und Besucher der Parkanlagen bedeuten. Für die Gewährleistung der Verkehrssicherheit muss das Totholz entnommen werden, die Baumkronen müssen eingekürzt oder ganze Bäume gefällt werden.

Sturmereignisse sind weitere Parameter, die zu Sicherheitsproblemen durch Astbruch oder Entwurzelung von Bäumen führen. Obwohl das KERES-Ensemble der verschiedenen Klimamodelle keine Hinweise für signifikante Steigerungen bei Windgeschwindigkeit oder Häufigkeit von Stürmen projiziert, fanden in den vergangenen Jahren dennoch Sturmereignisse statt, die Absperrungen aus Sicherheitsgründen zur Folge hatten. Deshalb wurden für die Windwurfsimulationen am Standort gemessene Daten von 2010–2020 verwendet, um das Sturmereignis von 2017 abzubilden und sein Schädigungspotential zu untersuchen.

## Zu erwartende Schäden und Veränderungen

Die Ergebnisse der Klimamodellierungen (siehe Kapitel 1) sowie der Simulationen zu Starkwindereignissen und Hitzebelastung im Park Sanssouci (siehe Kapitel 2) untermauern die sich bereits abzeichnenden Trends, dass diese sich in Zukunft verstärkt fortsetzen werden. Für den Untersuchungsraum rund um das Schloss Charlottenhof im Park Sanssouci steigen die Trockentage in den Sommermonaten tendenziell an, während die Starkregenereignisse sogar robust zunehmen werden. Für die Temperaturen lassen sich aus den Modellierungen eine robuste Zunahme der heißen Tage (Höchsttemperatur > 25 °C) sowie eine robuste Abnahme der Frosttage ableiten.

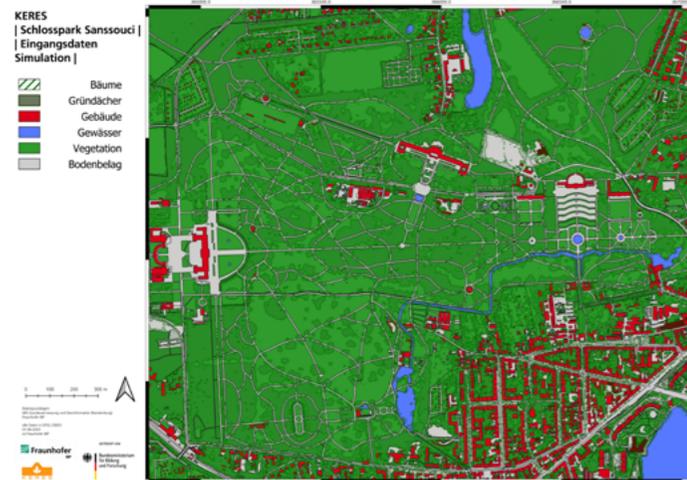


Abbildung 9: Darstellung der Flächentypen für den Park Sanssouci © Fraunhofer-IBP, Matthias Winkler

Sommerlich hohe Lufttemperaturen bergen für Mensch und Umwelt ein hohes Schädigungspotenzial. Der Klimawandel führt nachweislich vermehrt zu extremer Hitze am Tag und in der Nacht, wodurch sich die gesundheitlichen Risiken für bestimmte Personengruppen erhöhen können. Für die Gesundheit von besonderer Bedeutung sind Phasen mit mehrtägig anhaltender, extremer Hitze.

Die Simulationen für die Hitzebelastung im Park Sanssouci zeigen, dass Bereiche, die heute noch als kühle Orte an heißen Tagen dienen, in naher und ferner Zukunft bereits Temperaturen erreichen werden, die als moderat bis stark belastend empfunden werden. Eindeutig ablesbar ist der kühlende Effekt des Baumbestandes, wobei unbedingt berücksichtigt werden sollte, dass der fortschreitende Verlust der Gehölze noch nicht in die Simulation miteingeflossen ist.

Starkwindereignisse wirken vor allem aus westlicher Richtung auf den Park. Gefährdete Bereiche sind die gebäudenahen Flächen und offene Gartenteile, wie der

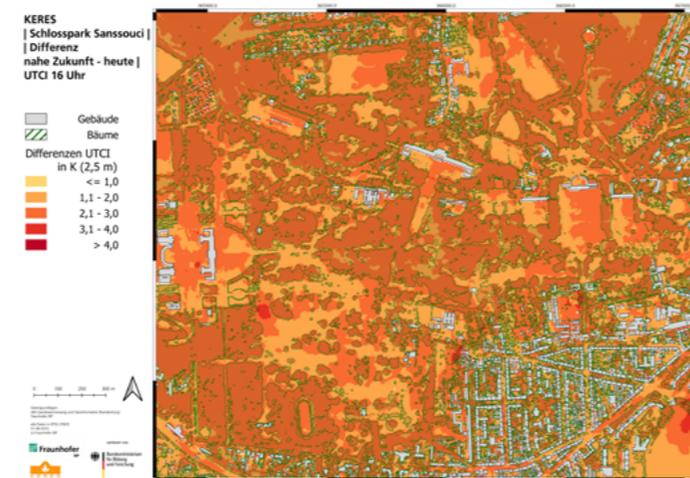


Abbildung 10: Darstellung der Veränderung der Hitzebelastung Mitte des 21. Jahrhunderts (2036-2065), ausgehend vom heutigen Stand. In sämtlichen Bereichen ist mit einer erhöhten Hitzebelastung zu rechnen, auch an baumbestandenen Standorten erhöht sich die Belastung um bis zu 3 °C. © Fraunhofer IBP

Park Charlottenhof oder die westliche Seite des Ruinenberges. Auch für die möglichen Schäden durch Wind sollte bedacht werden, dass die Gehölzstrukturen eine Schutzfunktion übernehmen, die in den kommenden Jahren in dem derzeitigen Ausmaß nicht mehr vorhanden sein wird. Das Schädigungspotenzial von Sturmereignissen wird daher ansteigen, auch wenn Intensität und Häufigkeit in etwa gleichbleiben.

## Wege

Da in einem Gartendenkmal nicht ohne weiteres auf alternative Wegebaumaterialien zurückgegriffen werden kann und mit einer weiteren Zunahme der genannten Extremwetterereignisse zu rechnen ist, muss zukünftig bei der Instandsetzung und Pflege der Parkwege besonderes Augenmerk auf die Entwässerung gelegt werden. Beispielhaft wurden bei der Instandsetzung des Bullenwieseweges Ringrigolen installiert, die anfallendes Wasser zusätzlich zu den bestehenden Abläufen aufnehmen können und dieses dann direkt in den Parkgraben ableiten.

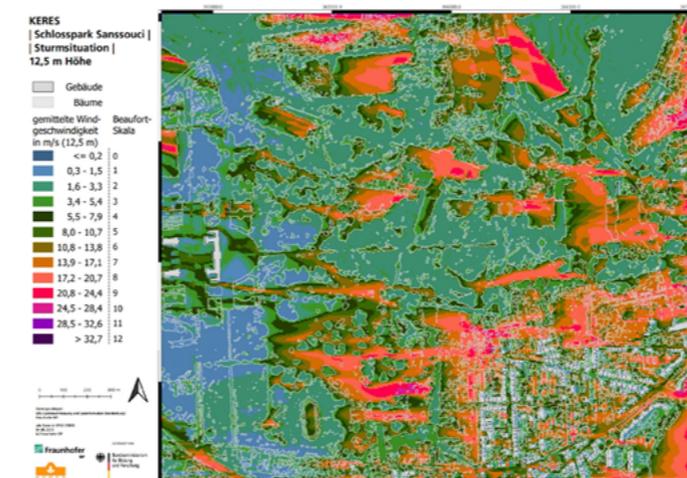


Abbildung 11: In einer Höhe von 12,5 m werden die Parkbereiche um das Schloss Charlottenhof, der Westhang des Ruinenberges sowie die gebäudenahen Flächen mit Windstärken zwischen 8 und 9 Bft. getroffen. Besonders große Schäden erleiden ungeschützte Solitäräume und die ersten Reihen der dichteren Bestände, wassergebundene Wegeflächen sind von Erosion betroffen. © Fraunhofer IBP

Bei dem 2023 sanierten Hauptweg auf den Ruinenberg, der stellenweise ein starkes Gefälle aufweist, wurden vermehrt Querrinnen eingebaut, die Regenwasser in die angrenzenden Vegetationsflächen leiten. Im Park Babelsberg, der über eine besonders bewegte Topographie verfügt, ist dies an vielen Stellen nicht möglich, da die Wege regelrecht in das Gelände eingeschnitten sind. Hier wurden bei der Instandsetzung mehrerer Fußwege die Längsrinnen entlang der Wegekanten

verdoppelt und die Mittelüberhöhung noch verstärkt. Das Wasser wird über Rohre teilweise unterirdisch, teilweise auch oberirdisch in Vegetationsflächen versickert. Bei allen Entwässerungskonstruktionen wird der Wasserrückhalt vor Ort bedacht, denn auch der Trend der langanhaltenden Trockenheit scheint sich in Zukunft fortzusetzen.

## Gehölze

Der Einbruch des Baumbestandes in den historischen Gärten birgt ein wachsendes Sicherheitsrisiko für die Menschen, die in den Parkanlagen unterwegs sind. Er verändert aber auch das Erscheinungsbild des Gartendenkmals erheblich. Bäume sind das strukturbildende Element des Gartenkunstwerks – Solitäre, Alleen, Baumgruppen oder waldartige Bereiche wurden zielgerichtet gepflanzt, um in Kombination mit der Wegeführung und den verschiedenen Ausstattungselementen ein bestimmtes Bild zu komponieren, welches dem Ideal der damaligen Zeit entspricht. Dieses Kunstwerk auch zukünftig zu erhalten, wird in Anbetracht des Klimawandels immer schwieriger und erfordert verschiedene Ansätze zur Bewältigung der neuen Herausforderungen. Neben der Erprobung von innovativen Methoden, wie dem Einsatz trockenheitsverträglicher Sorten oder der Revitalisierung von Altbäumen mit Huminstoffen, kann bei der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg dafür auch auf über Jahre gewachsenes Erfahrungswissen, z. B. bei der Bodenverbesserung durch Lehmzugaben und organische Dünger oder der Förderung der Naturverjüngung, zurückgegriffen werden.

Dennoch wird es für eine gewisse Zeitspanne sichtbare Veränderungen in den historischen Gärten Brandenburgs und Berlins geben. Altgehölze können zwar in den meisten Fällen durch Nachpflanzungen ersetzt werden – doch selbst wenn die jungen Gehölze unter den schwierigen Standortbedingungen anwachsen und sich gut entwickeln, dauert es mehrere Jahrzehnte, bis sie die entstandene Lücke wieder schließen können.



# Kapitel 4

## Prävention und Anpassung

### 4.1 Fall-Analysen, Entwicklung von Präventions- und Anpassungsstrategien

Ralf Kilian, Matthias Winkler, Stefan Bichlmair, Franziska Prell, Julia Tammert, Wolfgang Zillig

Um ein besseres Verständnis für die konkreten Schadenslagen für historische Gebäude und darin aufbewahrte Sammlungen in Hinblick auf Extremwetterereignisse zu bekommen, werden verschiedene Fallstudien aus dem Projekt KERES vorgestellt, die unterschiedliche Fragestellungen und Vulnerabilitäten aufweisen. Im Fränkischen Freilandmuseum Bad Windsheim befindet sich eine der größten Sammlungen von Fachwerkgebäuden in Deutschland. Hier wird insbesondere die vulnerable Konstruktion von Fachwerkgebäuden betrachtet. Am Kölner Dom werden Hitze im urbanen Umfeld und die Wirkungen von Stürmen auf die gotische Fassade der Kathedrale untersucht. Die kleine Kapelle auf dem Frauenberg bei Sufferloh im bayerischen Voralpenland leidet unter der Einwirkung von Schlagregen. In Hamburg sollen die Wirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Entwicklung von Sturmfluten und Tide betrachtet werden.

#### Bad Windsheim

Die geografischen und klimatischen Gegebenheiten der Region haben einen erheblichen Einfluss auf lokale Extremwetterereignisse wie Trockenheit, aber auch Starkregen und Hochwasserereignisse. Das Freilandmuseum Bad Windsheim ist eines der größten Freilandmuseen Deutschlands, es beherbergt einen wertvollen historischen Gebäudebestand, der mehrere Jahrhunderte umspannt und so einen guten Einblick in das frühere ländliche Leben gibt. Im Rahmen des Projektes wurde analysiert, wie diese Faktoren die Gebäude des Freilandmuseums beeinflussen. In der Folge wurden Maßnahmen entwickelt, wie historische Strukturen geschützt werden können.

Im Rahmen der Fallstudie wurden zwei historische Fachwerkgebäude im Freilandmuseum Bad Windsheim in eine umfassende Bestands- und Zustandsuntersuchung einbezogen unter Berücksichtigung der Museumskonzeption und der Nutzungsart der Gebäude sowie der geographischen und klimatischen

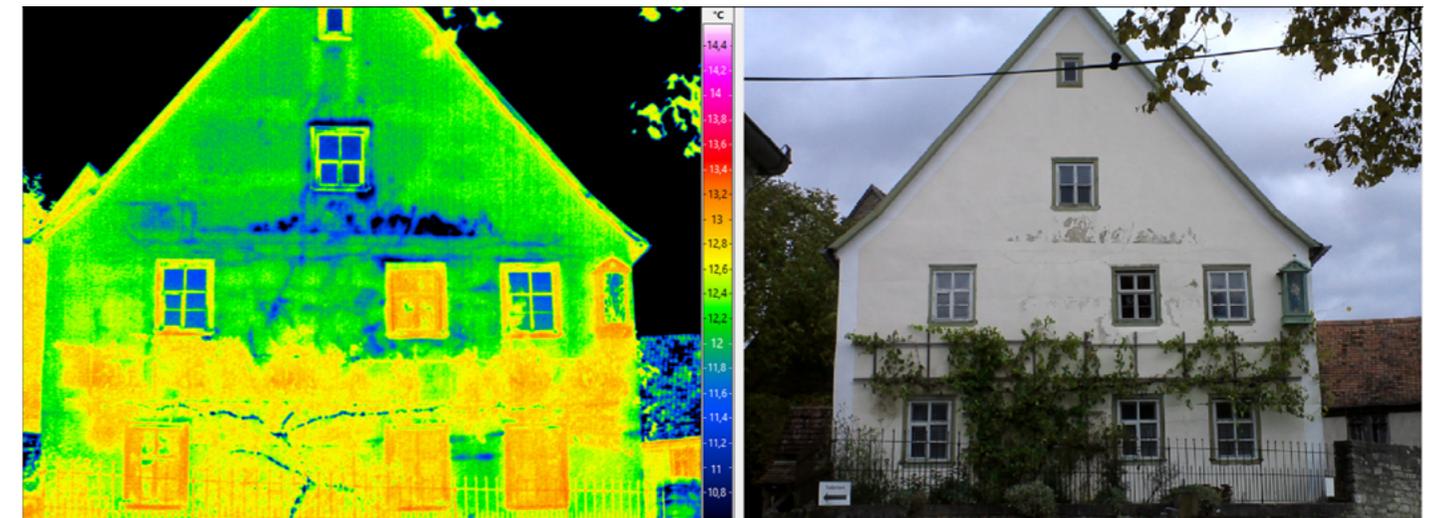


Abbildung 1: Die Thermographie (links) am Nordgiebel des Bauernhauses aus Kleinrinderfeld (rechts) zeigt die Durchfeuchtung der Fassade und das Eindringen des Wassers nach einem Regenereignis, das nach innen läuft und Schäden an der historischen Innenausstattung verursacht. © Universität Bamberg, Franziska Prell

Gegebenheiten der Region. Ziel dieser Untersuchung war es, die Schwachstellen der Fachwerkstrukturen gegenüber äußeren klimatischen Einflüssen zu identifizieren und präventive Schutzmöglichkeiten abzuleiten.

Die Untersuchung bestand aus einer umfassenden Anamnese zweier Gebäude, des Fachwerkhäuses Kleinrinderfeld und des Amtshauses aus Obernbreit. Dabei wurde nicht nur der Zustand erfasst, es wurden auch die bau- und nutzungsgeschichtlichen Zusammenhänge erforscht. Dies half, die Entwicklung der Gebäude über die Zeit nachzuvollziehen.

Einer der Schwerpunkte der Fallstudie im Fränkischen Freilandmuseum in Bad Windsheim liegt auf der Risikoabschätzung für historische Holzständerbauten. Fachwerkgebäude sind aufgrund ihrer Bauweise, einem Konglomerat aus verschiedenen Materialien mit differierenden Baustoffeigenschaften, an zahlreichen konstruktiven Schnittstellen besonders vulnerabel. So kommt es immer wieder zu Bauschäden und in der Folge zu Sanierungsmaßnahmen. Nach Aussage der Museumsmitarbeitenden konnten in den vergangenen Jahren vermehrt Schäden am Bestand beobachtet werden, die wahrscheinlich auf den fortschreitenden Klimawandel zurückzuführen sind.

Der Großteil der Gebäude im Fränkischen Freilandmuseum wurde aufgrund des durch Vernachlässigung und Leerstand verursachten baufälligen Zustands von ihrem ursprünglichen Standort auf das Museumsgelände transloziert. Die im Rahmen des KERES-Projektes veranlassten Untersuchungen zu klimatisch bedingten Schadensprozessen und möglichen Maßnahmen an den Fachwerkhäusern zum Schutz vor künftigen Extremwetterereignissen sind 2022 durch eine Masterarbeit im Bereich „Präventive Konservierung in der Baudenkmalpflege“ an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg ergänzt worden. Hierbei wurden Gebäude mit starken, sichtbaren Beschädigungen an den Außen- und Innenwandflächen ausgewählt, die in den rund 20 Jahren Standzeit auf dem Museumsgelände bereits mehrere Sanierungszyklen durchlaufen mussten (Abb. 1). Ziel der Arbeit war es, die materiellen und konstruktiven Anfälligkeiten der beiden Gebäude gegenüber den lokalen klimatischen Bedingungen sowie potenziellen Extremwetterereignissen modellhaft zu bewerten und zu vergleichen. Aspekte wie der Einbau einer Temperierung als Wandheizsystem zur lokalen Schadensvermeidung sowie die unterschiedliche Ausführung der Fachwerkstruktur mit sichtbaren oder verputzten

Holzbauteilen wurden mithilfe zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber klimatischen Einflüssen analysiert.

Neben dem Erhalt der historischen Gebäude wird im Fränkischen Freilandmuseum die Überlieferung regionaler, volkskundlicher sowie kulturgeschichtlicher Lebens- und Arbeitsverhältnisse im Erfassungsgebiet Franken gesichert und im Rahmen der didaktischen Bildungseinrichtung der Öffentlichkeit vermittelt. Damit leistet das Museum einen entscheidenden Beitrag zur Bewahrung des geistigen und kulturellen Erbes der Vergangenheit. Erkenntnisse über historische Konstruktionsweisen unter Verwendung regionaler Baumaterialien können als Wegbereiter dazu beitragen, langfristige Anpassungsstrategien individueller Bautypen im Umgang mit lokalen Gegebenheiten weiterzuentwickeln. Ressourcenschonung, Reparaturfähigkeit und Umnutzbarkeit spielten früher aufgrund der jeweiligen Lebensumstände, der regionalen Verfügbarkeit von Materialien oder des Ziels der Kostenersparnis eine wichtige Rolle, die heute unter dem Begriff Nachhaltigkeit wieder modern geworden sind. Es gilt, diese traditionellen Fähigkeiten und Kenntnisse im Umgang mit klimatischen Veränderungen weiter zu erforschen und diese aufrecht zu erhalten.

#### **Überprüfung der klimatischen Untersuchungen und Bewertung der individuellen Vulnerabilitäten der Gebäude**

Die im Zuge der Untersuchung durchgeführten klimatischen Messungen des Ist-Zustandes wurden sorgfältig überprüft, um sicherzustellen, dass die ermittelten Daten korrekt und verlässlich sind. Jedes Gebäude im Freilandmuseum wurde auf seine individuellen Schwachstellen und Verwundbarkeiten hin bewertet. Dies ermöglichte es, erweiterte Schutzmaßnahmen zu entwickeln, um die historischen Strukturen vor äußeren Einflüssen zu schützen.

#### **Überblick der identifizierten Vulnerabilitäten im Fränkischen Freilandmuseum Bad Windsheim**

##### **Material-/ Konstruktionsbedingt**

- Sichtbare, nach außen offenliegende Fachwerkhölzer
- Fugen zwischen Fachwerkholz und Gefachfüllung
- Luftundichtigkeit
- Aufsteigende Feuchte in bodennahen Bereichen
- Nicht intakte Überdeckungen an vulnerablen Konstruktionen (Fehlstellen an überdeckenden Putzen und Anstrichen)
- Mangelhafte Wasserabführung (Staubnässe)

##### **Nutzungsbedingt**

- Besucher\*innen (Abnutzung, Vandalismus, Diebstahl)
- Sicherstellung der Zugänglichkeit für Besucher\*innen: offenstehende Türen führen zu permanentem Luftaustausch mit der Außenluft
- Falsche Wartungs-/ Unterhaltungsmaßnahmen (Verwendung konventioneller Materialien)

##### **Standortbedingt**

- Angrenzender Lauf des Flusses Aisch
- Talebene/ Beckenlage
- Freigestellte Gebäude/ Exponierte Fassadenflächen

##### **Klimatisch bedingt**

- Kontinentalklima mit heißen und trockenen Sommern
- Grundbruch, statische Schäden und Risse in Folge von Trocknung der Böden
- Westwinde in Kombination mit Schlagregen
- Orkanartige Stürme
- Überschwemmungsgebiet durch Flusslauf der Aisch
- Holzschädlinge
- Mikroorganismen

#### **Risiko durch Hochwasser**

Kurz nach Projektstart wurden im Juli 2021 weite Teile des südlichen Museumsgeländes durch ein Hochwasser des angrenzenden Flusses Aisch aufgrund eines Starkregenereignisses überschwemmt (Abb. 2). Insbesondere die Gebäude der Baugruppe Mittelalter, in der einige der ältesten Häuser des Fränkischen Freilandmuseums vereint sind, trugen starke Beschädigungen davon, wie beispielsweise das gerade erst wiederaufgebaute Badhaus aus Wendelstein. Für die Trocknung der Wände des historischen Bauwerkes kam erstmalig in einem historischen Gebäude das innovative FastDry-System des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik IBP erfolgreich zum Einsatz (Abb. 3). Durch die punktgenaue Anbringung der Trocknungsmodule, die durch lokale Erwärmung mittels Heizdrähten die Oberflächen erhitzen und durch diffusionsoffene Paneele den Wasserdampf an die Raumluft überführen, lassen sich durchfeuchtete Bauteile gezielt und energieeffizient abtrocknen. Die Energieeinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Trocknungsverfahren liegt bei ca. 80 %.



Abbildung 2: Vom Aisch-Hochwasser im Juli 2021 betroffene historische Gebäude © Freilandmuseum Bad Windsheim

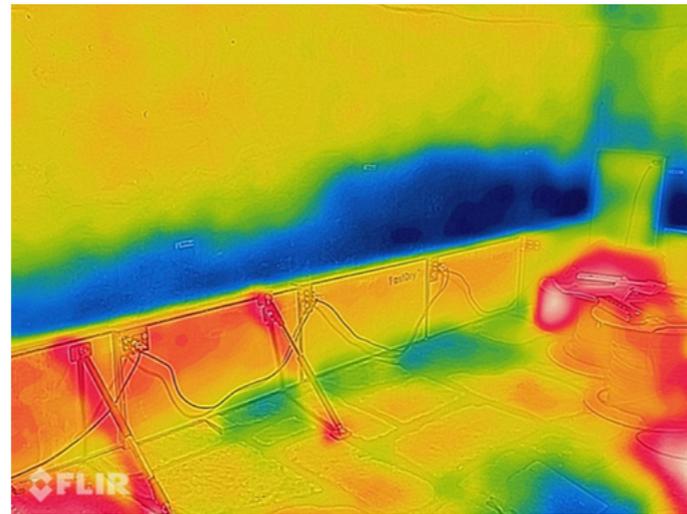


Abbildung 3: Nach der Flut im Juli 2021 wurde im Badhaus im Freilandmuseum Bad Windsheim erstmals FastDry, ein innovatives und energiesparendes Trocknungssystem des Fraunhofer IBP, in einem historischen Gebäude erfolgreich zum Einsatz gebracht (links). Die Thermographie (rechts) zeigt in Blau den Durchfeuchtungshorizont in den Wänden nach der Flut. © Fraunhofer IBP

## INFOBOX 1: Reaktive Maßnahmen

### Hausschwammbefall

- Ereignis: seit 2014 vermehrte Detektion von Hausschwammbefall  
 Ursache: ideale Lebensbedingungen durch dauerhafte Feuchtigkeit, möglicherweise Ansiedlung nicht heimischer Arten durch polwärtige Verschiebung der Biodiversität als Folge des Klimawandels  
 Folgen: Vermorschung von biologischen Materialien, Verfall der Holzstruktur, Verlust der historischen Substanz, zusätzliche Beschädigung durch langanhaltende Feuchte im Gebäude  
 Maßnahmen: Entfernung des mikrobiologischen Befalls, Abtrocknen der Bausubstanz, Ersatz beschädigter Materialien, Überprüfung der Standsicherheit.

### Sturmschäden an der Stroheindeckung

- Ereignis: Beschädigung an der Stroheckung historischer Gebäude in der Baugruppe Mittelalter  
 Ursache: starke Winde, Sturmereignisse  
 Folgen: Zerstörung und Teilabdeckung der intakten Dachhaut aus Stroh, sekundäre Folgen: Feuchteindrang in das Gebäudeinnere  
 Maßnahmen: Entfernung feuchter Bestandteile der Deckung, lokale bzw. komplette Erneuerung der beschädigten Strohdächer

### Tierische Einwirkungen – Specht

- Ereignis: tierische Einwirkung durch einen Specht  
 Ursache: vermutete Nahrungssuche/ Überwinterungsmöglichkeiten, möglicherweise verschobener Biorhythmus als Folge der Jahreszeitenverschiebung  
 Folgen: Fehlstellen an Fachwerkhölzern durch geöffnete Bereiche, vermehrter Feuchteindrang in die Holzstruktur, Förderung des Materialverfalls  
 Maßnahmen: Schließung der geöffneten Bereiche

### Tierische Einwirkungen – Insektenbefall

- Ereignis: Insektenbefall in hölzernen Gebäudeteilen (vermehrt seit 2014 zu beobachten)  
 Ursache: Feuchtigkeit gefolgt von langen Trockenperioden  
 Folgen: ideale Bedingungen für die Ausbreitung von Holzschädlingen, wie dem Hausbock (*Hylotrupes bajulus*), Beschädigung und Zerfall der Holzstruktur  
 Maßnahmen: Überprüfung der Standsicherheit, Einsatz von reaktiven Gasen, Ausbau und Ersatz beschädigter Holzbauteile

### Hochwasser

- Ereignis: Hochwasser 2021  
 Ursache: temporäres Starkregenereignis + über die Ufer getretenes Flusswasser  
 Folgen: überschwemmte Außenbereiche, Unterkellerungen, Erdgeschosse, Beispiel: Badhaus aus Wendelstein  
 Maßnahmen: Entfeuchtung und Entlüftung der hohen Raumluftfeuchten, Überprüfung der Standsicherheit (Gründungen), Verwendung von FastDry-Wänden zur punktuellen Abtrocknung nasser Wände

## INFOBOX 2: Präventive Schutzmaßnahmen

Die Bemühungen, das historische Erbe im Freilandmuseum Bad Windsheim zu schützen, basieren auf einer Reihe von präventiven Maßnahmen. Diese sind entscheidend, um die wertvollen Gebäude, Ausstattungsobjekte und Räume vor den Einwirkungen der Zeit und der Umwelt zu bewahren. Im Folgenden werden einige Schlüsselmaßnahmen vorgestellt, die vorgeschlagen oder bereits implementiert wurden.

### **Regelmäßige Wartungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen:**

Kontinuierliche Pflege und Instandhaltung sind unabdingbar, um den Zustand der Gebäude zu erhalten. Durch regelmäßige Inspektionen und Wartungsarbeiten wird sichergestellt, dass potenzielle Schäden frühzeitig erkannt und behoben werden.

### **Einbau von Abtropfkanten an Öffnungselementen:**

Der Einbau von Abtropfkanten an Türen und Fenstern verhindert das Eindringen von Feuchtigkeit in die Gebäude und schützt wertvolle Innenräume und Ausstattungsobjekte.

### **Sicherstellung der Wasserableitung an Gebäuden:**

Es wurden Maßnahmen ergriffen, um sicherzustellen, dass Wasser effektiv von den Gebäuden abgeleitet wird, um Schäden an den Fundamenten und Strukturen zu verhindern.

### **Schließen der Türen über besucherfreie Tage/Monate:**

Während der Zeiten, in denen das Museum für Besucherinnen und Besucher geschlossen ist, werden die Türen der Gebäude geschlossen, um die Innenräume vor unerwünschten Umwelteinflüssen zu schützen.

### **Einhausung vulnerabler Gebäudeteile über die Winterperiode:**

Um empfindliche Teile der Gebäude vor Schlagregen und extremer Kälte zu schützen, werden sie während der Wintermonate eingehaust.

### **Zugangsbeschränkung historischer Räume:**

Der Zugang zu historischen Räumen und wertvollen Ausstattungsobjekten wird beschränkt, um ihre Integrität und Erhaltung sicherzustellen. Besucherinnen und Besucher werden gezielt geleitet, um Schäden zu verhindern.

### **Einbau eines Temperierungs-Heizsystems:**

In ausgewählten Gebäuden wurde ein Temperierungs-Heizsystem installiert, um die Raumklimata zu kontrollieren und vor extremen Temperaturschwankungen zu schützen.

Die präventiven Schutzmaßnahmen sind von entscheidender Bedeutung, um die historischen Schätze im Freilandmuseum Bad Windsheim für kommende Generationen zu bewahren und zu schützen.

## INFOBOX 3: Generelle Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Zusätzlich zu diesen spezifischen Schutzmaßnahmen wurden generelle Maßnahmen und Handlungsempfehlungen entwickelt.

### **Kontinuierliches Klimamonitoring:**

Kontinuierliche Überwachung der Einwirkungen auf das Raumklima in vulnerablen Innenräumen und die historischen Ausstattungsobjekte. Dadurch kann rechtzeitig auf Veränderungen reagiert und es können angemessene Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

### **Innovativer Lösungsansatz für Außenfassaden:**

Als alternative Lösung zum Schutz verputzter Außenfassaden wurde die Verwendung von Putzträgermatten mit Entkopplungsschicht erforscht. Diese innovative Technik bietet einen effektiven Schutz gegen hohe Schlagregenbelastung an exponierten Fassadenflächen.

### **Beibehaltung von Schutzeinhausungen:**

Es ist geplant, die temporären Schutzeinhausungen für vulnerable Bautypen über die Winterperiode beizubehalten, um ihre Erhaltung und Sicherheit sicherzustellen.

## Sufferloh: Frauenberg-Kapelle

Die Wallfahrtskapelle im Landkreis Miesbach ist aufgrund ihrer exponierten Hügellage schon immer extremen Witterungsbedingungen ausgesetzt gewesen. Seit den 1980er-Jahren wurden umfangreiche Sanierungsarbeiten durchgeführt, die jedoch nicht zu einer nachhaltigen Verbesserung der Situation geführt haben (Abb. 4). Hohe Luftfeuchtigkeit und massives Algenwachstum im Innenraum führten 2013 zu vertieften Untersuchungen der Feuchtigkeitsverhältnisse im Mauerwerk. Forschende des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP bestimmten das Saugverhalten des Außenputzes vor Ort und maßen die Feuchtigkeitsgehalte des Mauerwerks im Labor. Dabei stellte sich heraus, dass der rekonstruierte, erst vor wenigen Jahren aufgetragene Kalkputz eine hohe Wasseraufnahme und sehr starkes Saugverhalten aufweist und damit keinen ausreichenden Feuchteschutz bei den extremen Wetterverhältnissen im Voralpenland bietet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Feuchtebelastung eindeutig auf eine erhöhte Schlagregenbelastung in Kombination mit Sommerkondensation zurückzuführen ist. Der Schlagregen führte dann zu einer extrem hohen relativen Luftfeuchte im Innenraum, die wiederum zu sekundären Beschädigungen an der historischen Ausstattung und großflächigem Mikroorganismenwachstum an den Wänden führte.

Im Jahr 2018 wurde daher erneut der Außen- und Innenputz saniert. Zunächst wurden schadhafte Putzstellen im Innenraum entfernt. Der Kalkputz auf der Fassade, der erst vor wenigen Jahren aufgebracht worden war, wurde komplett entfernt. Das aufgestellte Gerüst mit einem Schutzdach ermöglichte in der Folge, dass die Baustoffe abtrocknen konnte.

Als eine geeignete Lösung für die Frauenberg-Kapelle stellte sich wegen der extremen Belastung durch Schlagregen der Einsatz moderner Materialien dar. Es wurden ein wasserabweisender Sanierputz und ein hydrophobes Anstrichsystem an der Fassade zum Einsatz gebracht. Diese sind seit den 1950er Jahren auf dem Markt und stellen ein wissenschaftlich untersuchtes und erprobtes System dar (Abb. 5). Obwohl der Einsatz moderner Materialien aus Sicht der Denkmalpflege oft kritisch beurteilt wird, wurde diese bauliche Lösung aufgrund der besonders schwierigen Wetterbedingungen von den lokalen Denkmalbehörden unterstützt. Die hier eingesetzten wasserabweisenden Putz- und Anstrichsysteme sind seit fast 70 Jahren

erprobt und getestet und stehen damit im Einklang mit Artikel 10 der Charta von Venedig, einem Grundlagenpapier der Denkmalpflege aus dem Jahr 1964. Zusätzlich wurde im Sockelbereich innen eine elektrische Wandtemperierung installiert. Diese Maßnahme führte zu einem verbesserten und stabilen Raumklima sowie zu einem stark reduzierten Wachstum von Mikroorganismen, das derzeit nur noch sehr lokal begrenzt auftritt. Die Wandtemperierung wird derzeit elektrisch und mit einer einfachen Regelung betrieben. Ergänzend erfolgte der Einbau einer geregelten Lüftung, um feuchte Luft nach außen abzuführen. Als nächster Schritt wird die Frauenberg-Kapelle hinsichtlich alternativer Klimatisierungsstrategien in Kombination mit geregelter Lüftung und innovativen Regelalgorithmen weiter untersucht. Ziel ist es, passgenau zu klimatisieren und das System insgesamt energieeffizienter zu betreiben.



Abbildung 4: Die Frauenberg-Kapelle von Sufferloh in Oberbayern liegt exponiert auf einem Hügel im Voralpenland. Wenige Jahre nach einer umfassenden Sanierung tauchten erneut massive Schäden durch Feuchte an der Fassade und Algenwachstum im Innenraum auf, die dazu führten, dass die Kapelle nicht mehr genutzt werden konnte. © Fraunhofer IBP, 2017

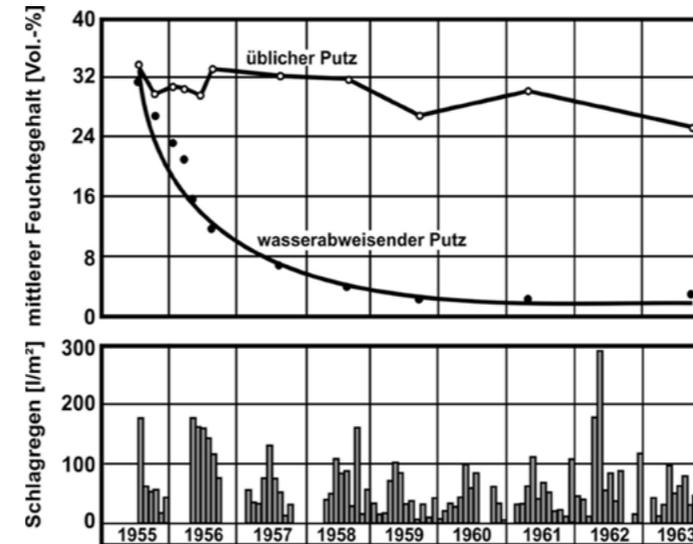


Abbildung 5: Die Abbildung zeigt frühe Untersuchungen auf der Freilandversuchsstelle des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen aus den Jahren 1955 bis 1963. Dabei wurden Wandelemente gravimetrisch auf ihr Trocknungsverhalten nach Schlagregenbelastung hin untersucht. Es zeigt sich, dass eine Wand mit einem Kalk-Zementputz mit hoher Wasseraufnahme feucht bleibt, während eine mit wasserabweisendem Putz bei gleicher Durchfeuchtung zu Beginn des Versuchs im Lauf von 2-3 Jahren austrocknet und dann trocken bleibt. Quelle: Künzel, H. (1986). Der Regenschutz von Außenwänden. In: Mauerwerk-Kalender 1986, S. 735-751

Nach Erkenntnissen aus der hygrothermischen Gebäudesimulation wird es noch etwa 2 bis 3 Jahre dauern, bis die Wände vollständig ausgetrocknet sind. In dieser Zeit und auch danach ist eine kontinuierliche Wartung und Pflege erforderlich, um die Kapelle vor neuen Schäden zu schützen und auftretende Feuchteschäden wie neuen Algenbewuchs während der Trocknung der Wände zu beheben. Algenbewuchs im Sockel kann durch Reinigung entfernt und die Oberflächen können mit einem neuen Kalkanstrich versehen werden.

Der neu aufgetragene wasserabweisende Außenputz mit hydrophobem Anstrich hat sich bisher als äußerst stabil gegenüber den örtlichen Belastungen durch Schlagregen erwiesen (Abb. 6). Gleichzeitig werden Konzepte für eine dauerhafte Wartung und Pflege des inneren Mauersockels entwickelt, der immer



Abbildung 6: Die Frauenberg-Kapelle 2 Jahre nach der erneuten Sanierung am Europäischen Tag der Restaurierung 2022 mit dem Thema Klimawandel und Kulturerbe. Links im Bild eine Wetterstation des Fraunhofer IBP zur Messung von Klimaparametern und Schlagregen. © Fraunhofer IBP, 2022

wieder von Algen bzw. Schimmelpilzwachstum betroffen ist. Das Ziel ist es, das Gebäude schadensfrei zu erhalten, ein langfristig gutes Raumklima sicherzustellen, hohe Betriebskosten zu vermeiden und Ressourcen zu schonen. Neben den zukünftigen Temperaturtrends ist insbesondere die Schlagregenbelastung der nächsten Jahrzehnte für den kleinen Barockbau von großer Bedeutung. Am Climate Service Center Germany in Hamburg wurden im Rahmen von KERES lokale Klimaentwicklungen bis zum Jahr 2085 für Sufferloh aus den globalen Klimamodellen berechnet. Mithilfe dieser Daten wurden Gebäudesimulationen der Kapelle erstellt, um die Auswirkungen zukünftiger Extremwetterereignisse und Klimaveränderungen auf das Gebäude und das Innenraumklima abzuschätzen und daraus Schutzkonzepte abzuleiten.

## Kölner Dom

### Bauschäden am Kölner Dom und ihre Bewältigung

Der Kölner Dom gehört zu den bedeutendsten Denkmälern in Deutschland mit über 6 Millionen Menschen, die jährlich das UNESCO-Welterbe besuchen. Um das Kölner Wahrzeichen der Nachwelt zu erhalten, bedarf es dauerhafter Restaurierungs- und Erhaltungsmaßnahmen. Seine Größe, sein Alter, die komplexen Bauformen, die verschiedenen Steinmaterialien sowie der Erhalt der historischen Glasfenster und Kunstwerke stellen für die etwa 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eine außerordentliche Herausforderung dar. Die Durchführung von Arbeiten erfordert eine sorgfältige Planung, regelmäßige Inspektionen und die Zusammenarbeit von Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Bereichen der Restaurierung und der Denkmalpflege.

Das KERES-Projekt trägt einerseits dazu bei, mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Schadensprozesse am Dom besser zu verstehen. Andererseits lassen sich Auswirkungen auf das Umfeld des Doms, wie beispielsweise Steinschlag durch geschädigte Natursteine oder Hitzebelastung im Sommer, besser einschätzen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Auswirkungen von Starkregen, Starkwindereignissen und Hitzeentwicklungen.

### Starkregen und Wasserschäden

In Zukunft ist mit der Zunahme von Starkregenereignissen zu rechnen, sodass die Wasserableitungssysteme der Dächer überlastet werden, was schwerwiegende Folgen nach sich ziehen kann. Die Auswirkungen von Wasserschäden sind vielschichtig und betreffen sowohl die strukturelle Integrität des Gebäudes als auch die wertvollen Kunstwerke im Inneren des Doms. Der Schutz vor Wassereintritten bei Starkregen (z. B. durch regelmäßige Wartung, Reinigung und Instandhaltung des Wasserleitsystems) und die schnelle Reaktion bei auftretenden Wasserschäden sind von höchster Wichtigkeit, um das historische Bauwerk und seine kostbare Ausstattung zu bewahren.



Abbildung 7: Ableitung und Ablauf des Regenwassers durch einen Wasserspeier des 19. Jahrhunderts als gewaltige Fontäne © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte

### Starkwinde und ihre Auswirkungen

Ein bedeutender Aspekt der Untersuchungen betrifft die Identifizierung von Wetterereignissen, die mit starken Winden an der Domfassade in Verbindung stehen. Diese starken Luftströmungen/Windböen können dazu führen, dass sich Teile der dekorativen Naturstein-Elemente aus ihren Verankerungen lösen, was die Notwendigkeit einer regelmäßigen Überwachung und Wartung hinsichtlich der Standfestigkeit unterstreicht.

Ein weiteres Phänomen, das mit der Windanströmung zusammenhängt, ist die lokale Alveolenbildung. Hierbei handelt es sich um das Entstehen von kleinen, vertieften Hohlräumen in den Gesteinsfassaden aufgrund physikalischer und chemischer Einflüsse. Solche Vertiefungen können sich im Laufe der Zeit bilden und sind das Ergebnis von Verwitterungsprozessen. Diese Schäden erfordern eine sorgfältige Analyse und Maßnahmen zur Erhaltung des Natursteins.

Starkwinde, Stürme oder Orkane können erhebliche Auswirkungen auf Bauwerke haben. Um diese Schadensursache besser zu verstehen, wurden umfangreiche Simulationen zur Windströmung um den Dom durchgeführt. Ziel war es, den Zusammenhang zwischen der Steinverwitterung in Form von Alveolenbildung und den Windfeldern in der unmittelbaren Umgebung des Doms zu erforschen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen ermöglichen die Identifizierung von Orten mit hoher Windbelastung oder ungewöhnlichen Windrichtungen und Windverwirbelungen an der Domfassade. Eine der Folgen solcher Starkwindereignisse ist die Lockerung bereits geschwächter Verbindungen der Bauteile. Dies erhöht die Gefahr von herabstürzenden Teilen erheblich. Darüber hinaus wird der Wartungsaufwand für schwer zugängliche Fassaden durch derartige Wetterbedingungen verstärkt. Es ist von größter Bedeutung, diese potenziellen Risiken zu erkennen und angemessene Maßnahmen zur Wartung und Sicherung der Bauwerke zu ergreifen, um die Sicherheit und Langlebigkeit zu gewährleisten.



Abbildung 8: Gewährung der Sicherheit von Passanten durch großräumige Absperrung um den Dom © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte

### Zunehmende Hitzeentwicklung

Ein weiterer Teil der KERES-Untersuchungen betrifft die Simulation der Hitzeentwicklung und der sogenannten Hitzeinseln im Stadtgebiet. Hierzu wurden umfangreiche Simulationsrechnungen zur Mikroklimaänderung durch den Klimawandel durchgeführt. Dies ermöglicht die Bewertung der Hitzebelastung im Außenbereich anhand biometeorologischer Indizes. Der Universal Thermal Climate Index (UTCI) wurde zur Bewertung der Hitzebelastung verwendet, wobei verschiedene meteorologische Parameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlungsflüsse berücksichtigt werden.

Die prognostizierte steigende Anzahl an Hitzetagen mit vermehrten Sonnenstunden (Abb. 9) heizt das Bauwerk außen wie innen künftig noch stärker auf. Zudem reagieren einige Gesteinsarten besonders empfindlich auf starke Temperaturunterschiede, die die Spannungen im Baumaterial erhöhen und zu vermehrten Bauschäden führen (Abb. 10).

Diese Untersuchungen tragen dazu bei, die Auswirkungen von Umweltfaktoren auf den Kölner Dom besser zu verstehen und Maßnahmen zur Erhaltung dieses historischen Wahrzeichens zu entwickeln.

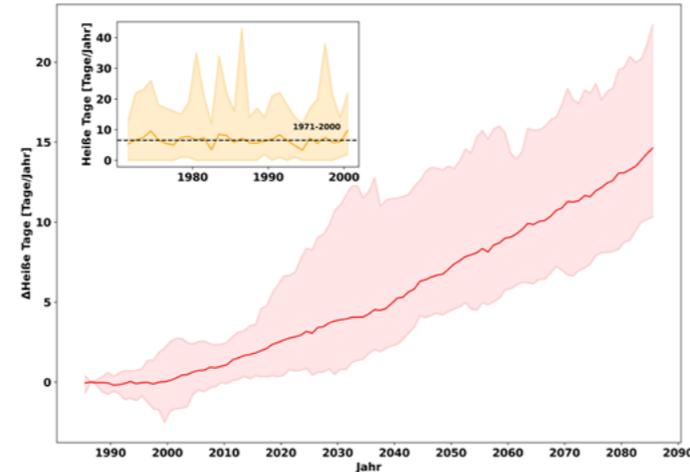


Abbildung 9: Aus Climate Fact Sheet – Kölner Dom 2023 © GERICS. Prognosen zur Entwicklung der heißen Tage (> 30 °C) pro Jahr bis 2020. Die historische Vergleichsperiode 1971-2000 ist in der kleinen Grafik dargestellt.

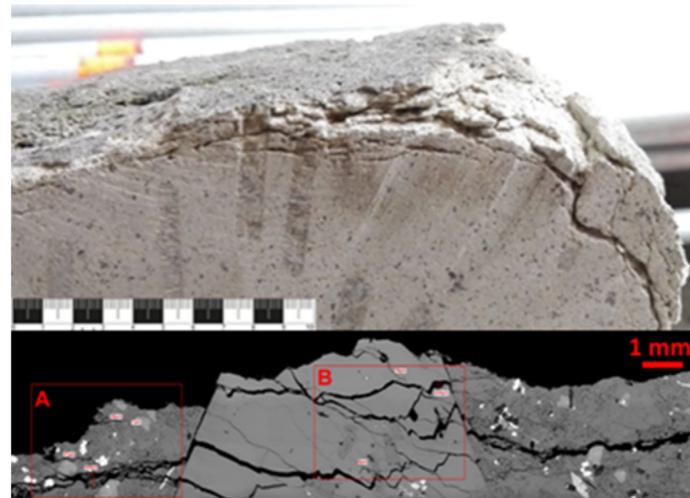


Abbildung 10: Schäden im Drachenfels Trachyt aufgrund von Spannungen im Material © Hohe Domkirche Köln, Dombauhütte sowie Universität für Angewandte Kunst in Wien, Mascha Weber

### Potsdam: Schloss Charlottenhof

Schloss Charlottenhof wurde im Auftrag des preußischen Kronprinzen Friedrich Wilhelm IV. erbaut und zwischen 1826 und 1829 nach Plänen des Architekten Karl Friedrich Schinkel im Stil des Klassizismus errichtet. Charlottenhof war ein Ort der kulturellen und geistigen Entfaltung und bietet eine beeindruckende Sammlung von Gemälden und Kunstwerken aus verschiedenen Epochen.

Die charakteristischen architektonischen Eigenheiten des Gebäudes stellen jedoch im Hinblick auf das Raumklima und die Erhaltung eine Herausforderung dar: Das Gebäude wurde in Massivbauweise aus Stein errichtet. Das Gebäude verfügt über einen hohen Außenluftwechsel und wird nicht beheizt, was zu einem dynamischen Raumklima führt. Durch den natürlichen Luftwechsel ergibt sich im Jahresverlauf eine starke Schwankung der relativen Feuchte und Temperatur. Diese Schwankungen können zum Quellen und Schwinden von Materialien führen und mechanische

Schäden verursachen. Die Auswirkungen des dynamischen Raumklimas machen sich in Form von Feuchteschäden am Gebäude sowie mechanisch bedingten Schäden an Einrichtungsgegenständen und musealen Ausstellungsobjekten bemerkbar. Ein weiteres Problem ist der wiederholte Schimmelbefall an Oberflächen, der durch die feuchte Umgebung begünstigt wird. Auch die immer häufiger auftretenden Trockenperioden und Starkregenereignisse beeinflussen das Raumklima und die Gebäudesubstanz negativ.

Die zunehmende Beliebtheit bei Besucherinnen und Besuchern erzeugt einen steigenden Nutzungsdruck, was eine sorgfältige Überwachung des Raumklimas, angemessene Schutzmaßnahmen und die Entwicklung von Strategien erfordert, um die Gebäudesubstanz und die Ausstellungsobjekte vor den Herausforderungen des dynamischen Raumklimas zu schützen.



Abbildung 11: Nord-West-Ansicht von Schloss Charlottenhof © Arne Thalmann, 2022

### Vulnerabilität und Herausforderungen in der Bewahrung

Das kontinentale Klima von Potsdam bringt spezifische Herausforderungen mit sich. Die Stadt verzeichnet teilweise sehr kalte Winter mit Frostereignissen und gleichzeitig heiße, trockene Sommer. Im Vergleich zu anderen deutschen Städten zeichnet sich Potsdam durch eine höhere Anzahl von Sonnenstunden aus. Das Schloss liegt am Rand des Parks Sanssouci, umgeben von Grünanlagen und Wasserstellen. Die schattenspendenden großen Bäume an der Nord- und Westseite wirken sich günstig auf das Raumklima aus. Dennoch besteht ein gewisses Risiko für Sturmschäden an den Bäumen, was das Gebäude gefährden könnte.

Die Vulnerabilität dieses historischen Gebäudes ist bedingt durch mehrere Faktoren: Die architektonische Substanz des Schlosses ist anfällig für wiederkehrenden Schimmelpilzbefall an einzelnen Oberflächen. Dieser wird begünstigt durch den hohen Luftwechsel und die damit einhergehenden starken Schwankungen des Raumklimas. Das hohe Besucheraufkommen in Schloss Charlottenhof bringt verschiedene Herausforderungen mit sich. Die Abnutzung, das Risiko von Vandalismus und Diebstahl sind reale Bedrohungen. Zusätzlich tragen die zahlreichen Besucherinnen und Besucher zur Erwärmung der Räume und zum Eintrag von Feuchtigkeit bei. Die Vulnerabilität von Schloss Charlottenhof erfordert eine sorgfältige Überwachung, Pflege und den Einsatz von Schutzmaßnahmen, um das Gebäude für zukünftige Generationen zu erhalten.

### Das Potenzial der Simulation

Die Nutzung von Simulationswerkzeugen bietet eine effektive Möglichkeit, verschiedene Anpassungsstrategien auf ihre Wirksamkeit und ihren Nutzen hin zu untersuchen. Mithilfe von hygrothermischen Gebäudesimulationen wird untersucht, inwieweit die baulichen Gegebenheiten das Raumklima beeinflussen. Dies umfasst Aspekte wie Undichtigkeiten und natürlichen Luftwechsel, thermische Speichermassen und die Feuchtepufferung der Ausstattung. Gleichzeitig wird analysiert, wie sich das prognostizierte Außenklima, basierend auf Klimawandel-szenarien regionaler Klimamodelle, auf das Raumklima und den Erhalt der musealen Objekte sowie die Raumausstattung auswirkt.

Ein Modell zur Berechnung des hygrothermischen Einflusses von Innenoberflächen und Einrichtungsgegenständen auf das Raumklima konnte erfolgreich entwickelt werden und kommt in Schloss Charlottenhof zur Anwendung (Kapitel 2). Dieses Modell wurde in einem iterativen Kalibrierungsprozess validiert, wobei die örtlichen Außenklimadaten für die Jahre 2020 und 2021 verwendet und mit Messwerten verglichen wurden.

Mittels des Gebäudesimulationsmodells wurde das zukünftige Innenraumklima in Bezug auf die prognostizierten Veränderungen des Außenklimas analysiert. Für Letzteres wurden das Emissionsszenario RCP8.5 des IPCC (Szenario »weiter wie bisher«) und das regionale Klimamodell REMO in Verbindung mit zehn globalen Klimamodellen verwendet (Kapitel 1).

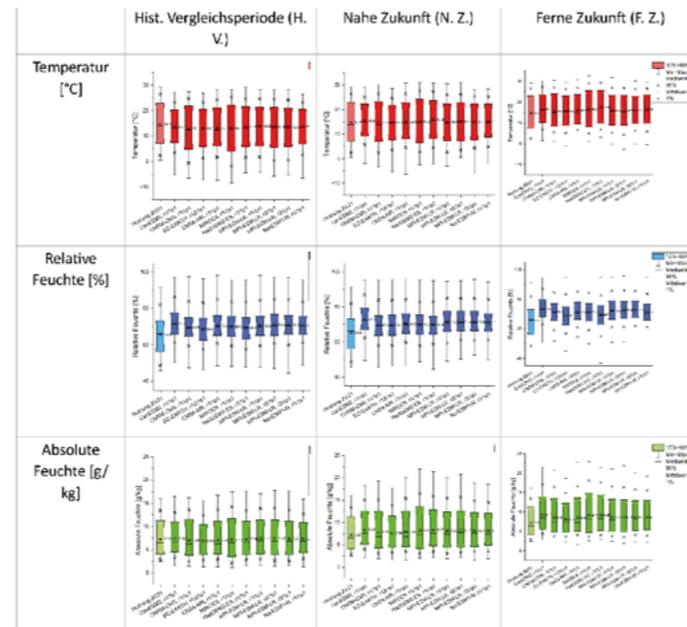


Abbildung 12: Ergebnisse für das Raumklima in Schloss Charlottenhof, simulierte Zone 3 „Norden“, Quelle: Thalmann 2022

Die Ergebnisse wurden auf chemische Schadensprozesse (sogenannter Lifetime Multiplier) und Hitzeeffekte hin analysiert. Damit konnte die vorhergesagte Lebensdauer der Exponate berechnet werden, die sich um einen Faktor 2 verringern wird, was zu höheren Restaurierungskosten führen wird.

Die Auswertung der Simulation zur Temperatur im Innenraum zeigt eine allgemeine Zunahme und Häufung von Extremjahren. Infolge des Klimawandels wird auch ein deutlicher Anstieg der absoluten Luftfeuchtigkeit in den Räumen prognostiziert, dessen Auswirkungen auf Schadensprozesse noch detailliert untersucht werden müssen.

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass Simulationen unterstützend bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien eingesetzt werden können, um den Schutz und die Bewahrung unseres kulturellen Erbes angesichts des sich wandelnden Klimas zu gewährleisten.

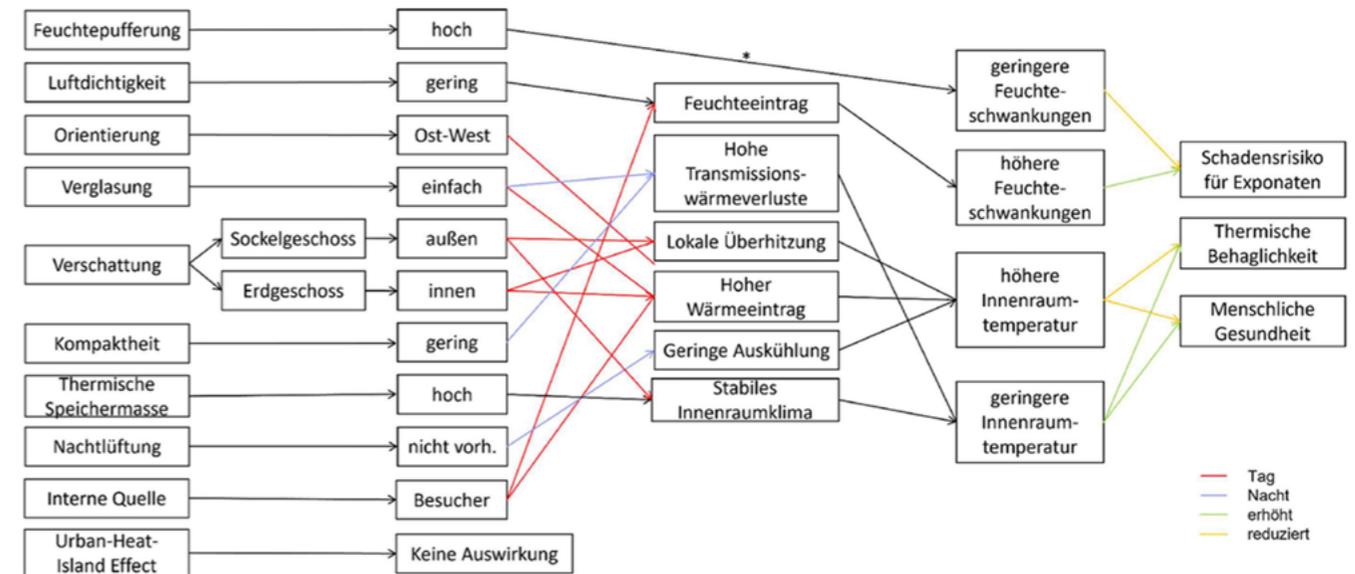


Abbildung 13: Bauphysikalische Auswirkung von Hitze und Dürre auf das Schloss Charlottenhof, Auswirkungen auf die Exponate und die Besucherinnen und Besucher, Quelle: Nibler 2021

### Zusammenfassung der Ergebnisse für Schloss Charlottenhof

Die Untersuchungen zu Schloss Charlottenhof verdeutlichen die herausfordernde Situation bei der Erhaltung dieses historischen Gebäudes. Das Raumklima wird durch bauliche Gegebenheiten, natürlichen Luftwechsel und das Außenklima beeinflusst. Die Entwicklung hygrothermischer Simulationsmodelle ermöglicht eine fundierte Evaluierung der Einflüsse auf Innenoberflächen und Einrichtungsgegenstände. Prognostizierte Klimaveränderungen zeigen, dass die zu erwartende Lebensdauer von Exponaten durch die steigenden Temperaturen voraussichtlich erheblich verkürzt wird, was zu höheren Restaurierungskosten führt. Die Zunahme von Übertemperaturgradstunden und eine steigende Luftfeuchtigkeit in den Räumen erfordern weitere detaillierte Untersuchungen zu Schadensprozessen. Diese Ergebnisse betonen die Notwendigkeit maßgeschneiderter Anpassungsstrategien, um Schloss Charlottenhof für zukünftige Generationen zu bewahren.

## Speicherstadt Hamburg

Die Hamburger Speicherstadt und das Kontorhausviertel sind wichtige Zeugnisse der Entwicklung der Hanse- und Hafenstadt und wurden 2015 in die UNESCO-Welterbeliste aufgenommen. Die Speichergebäude wurden zwischen 1883 und 1927 als Backsteingebäude auf Holzpfählen erbaut und befinden sich im Hafengebiet direkt an der Elbe.

Durch das Zusammenspiel aus der Fließgeschwindigkeit der Elbe in Richtung der Nordsee und den Gezeiten in der Deutschen Bucht ergeben sich im Hamburger Hafen über den Tagesverlauf unterschiedliche Wasserstände. Die Differenz zwischen Hoch- und Niedrigwasser, der Tidenhub, hat sich seit der Erbauungszeit der Speicherstadt stark vergrößert und ist allein in den letzten 10 Jahren um ca. 21 cm gestiegen, was u. a. auf einen Verlust von Retentionsräumen zurückzuführen ist. Diese Flächen können Wasser bei Flut aufnehmen und bei Ebbe langsamer wieder abgeben. Ohne sie erhöht sich jedoch die Fließgeschwindigkeit des Wassers in beide Richtungen. Dadurch fallen die Holzgründungen der Speichergebäude und Kaimauern über längere Intervalle trocken. Das flachere Niedrigwasser kann weniger Druck gegenüber den Pfählen bieten, wodurch der Landdruck stärker auf sie einwirkt und sie nach außen schiebt. Das Ausspülen von Sedimenten kann die Standsicherheit der Pfähle zusätzlich verringern. Kritisch sind aber vor allem die bakteriellen Abbauprozesse in den Bereichen, die bei Flut unter Wasser und bei Ebbe oberhalb des Wasserspiegels liegen. Diese zersetzen das Holz, und die Struktur der Pfähle wird geschwächt bis hin zum Verlust ihrer Standsicherheit. Der mittlere Pegel bei Niedrigwasser liegt heute um etwa 1,10 m niedriger als zur Erbauungszeit der Speicherstadt, daher fallen nun auch Bereiche trocken, die früher ständig von Wasser bedeckt waren.

Die Folge dieser Veränderungen, unter anderem bedingt durch menschliches Eingreifen in Naturräume und den steigenden Meeresspiegel, sind Setzungsrisse und statische Probleme an den Gebäuden und Kaimauern bis hin zum Abrutschen oder Einsturz der Strukturen.

Das andere Extrem, ein zu hoher Wasserspiegel durch Überflutungen, kann ebenfalls zu Schäden an der Gebäudesubstanz führen. Zahlreiche Bauten im Hafengebiet, insbesondere in der Speicherstadt, sind zwar so konstruiert, dass ihre

Keller- bzw. Erdgeschosse bei Hochwasser geflutet werden können, ohne dass ein Schaden eintritt. Extremwetterereignisse wie Sturmfluten treten jedoch häufiger und heftiger auf, sodass die vorhandenen Schutzeinrichtungen oft nicht mehr ausreichen und es zu Schäden an Gebäuden und ihrer Ausstattung kommen kann.

Die Anpassung der Fahrwinne an immer mächtigere Schiffe mit größerem Tiefgang, u. a. durch die Elbvertiefung, wird auch Auswirkungen auf den Erhalt der historischen Bebauung im Hafengebiet haben und ist daher kritisch zu hinterfragen. Aber auch die natürliche Veränderung des Elberaumes, verstärkt durch die Prozesse des Klimawandels, macht die Entwicklung von denkmalgerechten Anpassungsstrategien für die Speicherstadt dringend notwendig. Es wurde bereits damit begonnen, Flächen an den Nebenarmen der Elbe wieder zu Fluträumen umzuwidmen, jedoch werden diese nur einen Teil des überschüssigen Wassers aufnehmen können.

Um die Veränderungen am historischen Gebäudebestand zu verfolgen und kritische Schäden früh zu erkennen, kann ein Monitoring anhand moderner 3D-Modelle hilfreich sein. Gemeinsam mit dem EU-Projekt ARCH wurden bei Workshops und Expertenveranstaltungen im Rahmen von KERES erste Ideen zur Untersuchung von Schadensmechanismen und der Entwicklung von Anpassungsstrategien ausgetauscht.

## Quellen

Nibler, S. (2021). *Semi-systematischer Review zur Bewertung des thermischen Komforts, der Behaglichkeit und der menschlichen Gesundheit in Museen*. Technische Universität München, Bachelorthesis

Prell, F. (2022). *Vulnerabilität historischer Bauwerke aufgrund klimatischer Einflüsse. Restaurierungswissenschaftliche Untersuchung zweier Fachwerkhäuser im Fränkischen Freilandmuseum Bad Windsheim*. Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Masterarbeit

*Speicherstadt Hamburg, Entwicklungskonzept* (2012). <https://www.hamburg.de/contentblob/9375080/8849abeb33004e1d9212b2f03e866d4d/data/entwicklungskonzept-speicherstadt12akt14.pdf>

Thalmann, A. (2022). *Simulation des Schloss Charlottenhof in Potsdam unter Klimawandelszenarien*. Technische Universität München, Masterarbeit

## 4.2 Prävention und Anpassung für historische Gärten

Katharina Matheja, Michael Rohde

### Innovative Ansätze für den nachhaltigen Erhalt historischer Gärten und Parkanlagen

Im KERES-Projekt wurden erstmals Modellierungen der Klimaentwicklung sowie Simulationen zu Hitzebelastung und Starkwindereignissen für den Park Sanssouci erstellt (siehe Kapitel 1 und 2). Die Annahmen zu den Klimaänderungen für den Park Sanssouci sind auch auf den Park Babelsberg anwendbar, da die regionalen Bedingungen vergleichbar sind. Ergänzt werden die Daten durch Informationen aus Drohnenbefliegungen und Bodenfeuchtesensoren. In digitalen Katastern wird der Bestand an Wegen und Gehölzen dokumentiert. Basierend auf dieser lokalen Datengrundlage können Strategien für den zukünftigen Umgang mit dem Kulturgut entwickelt werden, die sowohl dessen Erhalt als auch die Sicherheit der Menschen, die sich im Park aufhalten, gewährleisten. Durch Verknüpfung des allgemeinen Trends der Klimaänderung mit den Simulationen wurden besonders vulnerable Bereiche im Park identifiziert, in denen prioritärer Handlungsbedarf besteht.

Als wichtigste Handlungsfelder für eine langfristige Sicherung der historischen Gärten in der Region um Potsdam zeichnen sich für Gehölze die Themen Bewässerung und Nachpflanzungen ab. Bereits in der Praxis angewandt werden bspw. ressourcenschonende Tropfbewässerungsanlagen und die gezielte Wasserversorgung von neugepflanzten Bäumen und wertvollen Altgehölzen. Im Rahmen von KERES wurden an unterschiedlichen Standorten in den Parkanlagen Sanssouci und Babelsberg sogenannte Entwicklungsflächen angelegt, auf denen verschiedene Ansätze der Nachpflanzung von Gehölzen erprobt werden. Zukünftig sollen auch parkeigene Baumschulen einen ausreichenden Vorrat an standortangepassten Gehölzen bereitstellen. Zunehmend spielt der Wasserrückhalt vor allem bei Starkregenereignissen eine wichtige Rolle bei den Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Es ist mit immer häufigeren langanhaltenden Trockenphasen zu rechnen, und verfügbares Wasser wird daher knapper. In Bezug auf die Wegeanpassung wurden bei Instandsetzungsmaßnahmen zusätzliche Entwässerungssysteme eingebaut oder die vorhandenen Konstruktionen erweitert, um größere anfallende Wassermengen aufzunehmen.

### Bereits praktizierte Maßnahmen

2014 fand in Potsdam die internationale Tagung „Historische Gärten im Klimawandel – Empfehlungen zur Bewahrung“ statt, auf der international führende Gartenexpertinnen und -experten den aktuellen Stand vorgetragen und diskutiert haben, welche Anpassungsstrategien denkbar sind. Die Ergebnisse der Tagung haben die SPSG dazu veranlasst, die Thematik der Anpassungsstrategien für historische Gärten in ihren Fokus zu stellen. In den Parkanlagen wurden und werden unterschiedlichste Ansätze erprobt, die auf langjährigem Erfahrungswissen aufbauen, wie die Resilienz der Welterbestätte erhöht werden kann. Wiederkehrende, langanhaltende Hitze- und Trockenphasen, wie sie seit 2018 auftreten, erfordern eine Intensivierung dieser Maßnahmen, darüber hinaus müssen innovative Lösungsstrategien gesucht werden.

### Wege

Um speziell wassergebundene Wege auf die zunehmenden Starkregenereignisse vorzubereiten, wurde in den vergangenen Jahren bereits an mehreren Stellen die Entwässerung ausgebaut. Einige Wegeabschnitte, die immer wieder von Ausspülungen durch Niederschläge betroffen waren, wurden gepflastert. Wo es möglich ist, wird das abgeleitete Niederschlagswasser in der angrenzenden Vegetation versickert oder über Sickerschächte dem Grundwasser wieder zugeführt. Auch Winderosion ist ein zunehmendes Problem auf wassergebundenen Wegedecken. Trocknen die Oberflächen stark aus, wird das Deckmaterial nicht mehr gebunden und bei Sturmereignissen weggeweht. Um dem vorzubeugen war es bisher Praxis, Wege in langanhaltenden Dürrephasen zu wässern – in Anbetracht der heute schon bestehenden Wasserknappheit ist dies jedoch keine zukunftsfähige Lösung. Hier muss über den Einsatz alternativer Materialien, beispielsweise natürlicher Bindemittel, zur Stabilisierung der Wege nachgedacht werden.

### Gehölze

Die Selektion und Kultivierung von Gehölzen, die sich aus der natürlichen Verjüngung der Altbäume im Park entwickeln (sogenannte Eigenwerbung), wird bereits traditionell in den Potsdamer historischen Gärten praktiziert. Die genetischen Informationen vitaler Bäume, die die Millionen Jahre alten Informationen über

die Anpassung an unterschiedlichste Klimabedingungen einschließlich an die des lokalen Standorts enthalten, werden auf diese Weise erhalten. Bisher erfolgt die Eigenwerbung in unterschiedlichen Bereichen im Park basierend auf den Beobachtungen der Fachbereichsleitungen. Teilweise wird der Gehölzaufwuchs im Bestand belassen, teilweise werden Setzlinge entnommen und in der Gärtnerei kultiviert, um sie dann an anderer Stelle wieder auszupflanzen. Die Jungbäume sind also von Beginn an mit den vorherrschenden Standortbedingungen (magerer Sandboden, lange Dürrezeiten) konfrontiert und entwickeln auf natürliche Weise eine Resilienz.

Abiotische Stressfaktoren wie Trockenheit oder Hitze können nicht nur junge Setzlinge sondern auch besonders alte Bäume langfristig schwächen und die Anfälligkeit gegenüber Schaderregern erhöhen. Dazu zählen unter anderem im Boden vorkommende Schädlinge, die das Wurzelnetz in Mitleidenschaft ziehen, wodurch der Baum weniger Wasser und Nährstoffe erschließen kann. Deshalb wurden in Potsdam zur Revitalisierung geschwächter Altbäume neuartige Maßnahmen ergriffen. In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Agrartechnik ATB wurde 2022 eine Rotbuche im Park Sanssouci mit Huminstoffen „geimpft“ (Projekt: Rette einen Baum in Sanssouci) [ATB Potsdam 2021], das heißt die Huminstoffe wurden



Abbildung 1: Partielle Pflasterung von besonders erosionsgefährdeten Wegeabschnitten im Park Babelsberg  
© SPSG, Katharina Matheja



Abbildung 2: Naturverjüngung einer alten Eiche im Park Charlottenhof, Park Sanssouci  
© SPSG, Katharina Matheja

in einem Wassergemisch direkt in den Wurzelbereich injiziert. Huminstoffe sind heterogene, komplexe Strukturen, die im Humus vorkommen und für die Gesundheit der Pflanzen wichtig sind. Sie haben eine sehr hohe Kationenaustauschkapazität, wodurch der pflanzenverfügbare Nährstoffvorrat des Bodens vorteilhaft beeinflusst wird. Bereits nach einem Jahr konnte eine Steigerung der Vitalität der Rotbuche beobachtet werden. Wie lange die Vitalitätssteigerung anhält und wie oft nachgeimpft werden muss, wird sich in den kommenden Jahren zeigen. Negative und positive Trends lassen sich oft schon in den ersten Lebensjahren der Bäume und in den ersten Jahren der Präventionsmaßnahmen ablesen, wirklich aussagekräftig sind Versuche mit Gehölzen (sowohl mit Nachpflanzungen als auch mit älteren Bäumen) allerdings erst nach mehreren Jahren. Umso wichtiger ist die frühzeitige Implementierung von Versuchsreihen – zukünftige Generationen können so von den Erkenntnissen profitieren und bewährte Ansätze weiterverfolgen.

## Erprobung von Präventionsmaßnahmen im Rahmen von KERES

Wie zuvor beschrieben, wurden auch schon vor Projektbeginn diverse Ansätze in den historischen Gärten verfolgt, die auf den langfristigen Erhalt dieser wertvollen, aber auch besonders vulnerablen Kulturgüter abzielen. Im Rahmen von KERES konnten diese Ansätze in eine Form überführt werden, die wissenschaftliche Analysen, Bewertungen und damit auch Rückschlüsse ermöglicht, die bisher nicht durchführbar waren oder nur rudimentär vorlagen.

### Gehölze

Für die Anlage der Gehölzentwicklungsflächen in den Parkanlagen Babelsberg und Sanssouci erfolgte zunächst eine detaillierte Beschreibung der ausgewählten Flächen (Lage, Exposition, Bodenverhältnisse und Vegetation). Darauf aufbauend wurden Entwicklungsziele wie Struktur, Hauptbaumarten und Erscheinungsbild des Areals formuliert und die durchgeführten Maßnahmen dokumentiert. Ein Parameter, der für Bäume, Gehölze und Pflanzen besonders wichtig ist, ist die Bodenfeuchte. Sie hat auch einen großen Einfluss auf die oberflächennahen Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit. Trockene Böden verstärken Extremereignisse wie Hitzewellen, weil die Pflanzen die Landoberfläche nicht wieder befeuchten und kühlen können. Daher wurden zur Messung der Bodenfeuchte und -temperatur Sensoren installiert, deren Daten in Echtzeit in die KERES-Wissensplattform integriert werden und von dort abrufbar sind. Am Beispiel Babelsberg wurde eine Vorlage für ein Monitoring-Tool



Abbildung 3: Entwicklungsfläche im Park Babelsberg, die mit Algen aus dem „Schwarzen Meer“, einem künstlichen Parkgewässer, gemulcht wurde  
© SPSG, Gesine Gründl



Abbildung 4: Verdoppelte Klinkerrinne zur Wegeentwässerung im Park Babelsberg  
© SPSG, Katharina Matheja

entwickelt, das eine einfache und damit praxistaugliche Dokumentation erlaubt. Im Anschluss soll das Tool daraufhin optimiert werden, dass auch die Übertragbarkeit auf andere Flächen und Standorte gewährleistet ist. Auf den Flächen selbst werden verschiedene Ansätze systematisch erprobt, dokumentiert und analysiert: Gehölze aus Eigenwerbung werden ebenso verwendet wie Forstbaumschulware. Teilweise wurden bei den Flächen vor der Pflanzung Bodenverbesserungsmaßnahmen bspw. durch Zugabe von organischem Dünger, der neben Stickstoff auch Phosphat und Mineralstoffe enthält, durchgeführt. Auf einer Fläche wurde der Einsatz von Algen als Mulchmaterial getestet. Auch unterschiedliche Bewässerungsintensitäten werden geprüft – von regelmäßigen Wassergaben in den ersten zwei Jahren bis hin zum kompletten Verzicht auf Bewässerung. Um die Bewässerung insgesamt ressourcenschonender und gezielter einzusetzen, werden in ebenen Parkbereichen immer häufiger Tropfbewässerungsanlagen installiert.

### Wege

Parkwege spielen für die Sicherheit der Besucherinnen und Besucher eine wichtige Rolle. Während des KERES-Projekts wurden mehrere Wege nachhaltig instandgesetzt und verschiedene Präventionsmaßnahmen getestet, die auch den historischen Charakter der Wege berücksichtigen. Im Park Babelsberg wurden bei dem Fußweg zwischen Küche und Schwarzem Meer, einem Weg mit besonders starkem Gefälle, die seitlichen Entwässerungsrinnen in ihrem Querschnitt erweitert. Um dem Gartendenkmal gerecht zu werden, wurde die vorhandene Klinkerrinne mit gleichem

Material verdoppelt. Die für wassergebundene Wege charakteristische Mittelüberhöhung wurde noch stärker ausgebildet, um den Abfluss aufkommenden Niederschlags an den Wegrand zu verbessern. Im Park Sanssouci wurde bei der Sanierung des Bullenwiesenweges eine zusätzliche Entwässerung eingebaut. Zwei Ringrigolen entwässern den Weg in den angrenzenden Parkgraben, das Wasser wird so dem Kreislauf aus künstlichen Gewässern und unterirdischen Wasserleitungen wieder zugeführt.

Die Simulationen zu Starkwindereignissen im Park Sanssouci, die im Keres-Projekt erstellt wurden, ermöglichen die Identifizierung besonders vulnerabler Bereiche. Sowohl Wege als auch Gehölzbestände, die vornehmlich betroffen sind, können so prioritär behandelt werden.

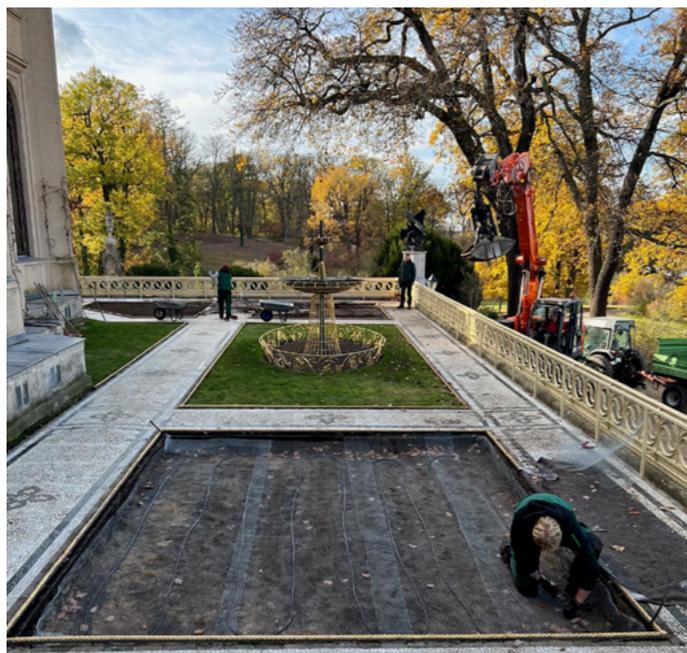


Abbildung 5: Verlegung einer unterirdischen Tropfbewässerung bei der Wiederherstellung der Terrassenanlage am Schloss Babelsberg  
© SPSPG, Katharina Matheja

## Weiterführende Literatur

- ATB Potsdam (2021). **Wissenschaft will Bäume in Sanssouci retten**. <https://www.atb-potsdam.de/de/aktuelles-und-presse/pressemitteilungen/pressemitteilungen-detailseite/wissenschaft-will-baeume-in-sanssouci-retten>
- Butenschön, S. (2014). **Parkbaumschulen – Zentren regional angepasster Gehölzvielfalt in Vergangenheit und Zukunft**. In: SPSPG (Hrsg.) (2014). Historische Gärten im Klimawandel, S. 210-213. ISBN 978-3361007000
- Erklärung von Sanssouci zum Erhalt von historischen Gärten und Kulturlandschaften** (2014), anlässlich „Historische Gärten im Klimawandel“ am 5. September 2014 in Potsdam unterzeichnet und verabschiedet vom International Council on Monuments and Sites (ICOMOS)/International Federation of Landscape Architects (IFLA), der Deutschen UNESCO-Kommission, der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), dem Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) und der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (SPSPG). <http://www.spsg.de/presse-foto-film/2014-09-05-erklaerung-von-sanssouci/>
- Hoffmann, Th. (2023). **Abschlussbericht für das Projekt „Rette einen Baum in Sanssouci“**.
- Kühn, N., Gillner, St. & Schmidt-Wiegand, A. (Hrsg.) (2017). **Gehölze in historischen Gärten im Klimawandel – Transdisziplinäre Ansätze zur Erhaltung eines Kulturguts**. ISBN 978-3798329584
- Ringbeck, B. (2020). **Historische Garten- und Parklandschaften und die Wertschätzung des »Grünen Erbes« aus der Perspektive der Welterbekonvention**. In: Historische Gärten und Gesellschaft. Kultur – Natur – Verantwortung, S. 143-145. ISBN 978-3795435356
- Rohde, M. (2021). **Herausforderungen für die Konservierungswissenschaften der Gärten. Klimaanpassungsstrategien für Gartendenkmale erfordern Forschungen**. In: DGGL (2021). Gärten im Klimawandel. Herausforderungen, Konzepte, Perspektiven, Themenheft 16, S. 64-69.
- Rohde, M. (2021). **Klimaeinwirkungen auf historische Gärten. Anpassungsstrategien am Beispiel der Preußischen Gärten**. In: Landesamt f. Denkmalpflege u. Archäologie Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (2017). Leopold III. Friedrich Franz – sein Gesamtkunstwerk nach 250 Jahren, S. 181-196. ISBN 978-3948618124
- Rohde, M. (2019). **Historische Gärten als Kulturaufgabe**. In: Hüttl, R., David, K. & Schneider, B.-U. (Hrsg.). Historische Gärten und Klimawandel – Eine Aufgabe für Gartendenkmalpflege, Wissenschaft und Gesellschaft, S. 31-51 und 413-414. ISBN 978-3110607482
- Rohde, M. (Hrsg.) (2008). **Pflege historischer Gärten – Theorie und Praxis**. In: Muskauer Schriften Bd. 6
- Rohde, M. et al (2019). **Wissenschaft und Forschung in den staatlichen Gartenverwaltungen**. 3. Positionspapier der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Schlösserverwaltungen, Fachgruppe Gärten, Deutscher Schlösserverwaltungen, Aumüller Druck GmbH & Co. KG, Regenburg 2019.
- SPSPG (Hrsg.) (2014). **Historische Gärten im Klimawandel – Empfehlungen zur Bewahrung**. ISBN 978-3361007000



# Kapitel 5

Operatives Krisenmanagement für Kulturerbe

## 5.1 Die KERES-Plattform

Jürgen Moßgraber, Tobias Hellmund, Jürgen Reuter

Extreme Wetterereignisse werden durch den fortschreitenden Klimawandel sehr viel öfter auftreten. Sie schädigen nicht nur die Natur, sondern rufen auch Schäden bei historischen Gebäuden und ihren Sammlungen sowie in historischen Gärten und Parkanlagen hervor. Die Einschätzung des Ausmaßes, in dem Kulturgüter von solchen Wetter- und Klimaereignissen bedroht sind, ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die die Zusammenarbeit von Expertinnen und Experten aus der Denkmalpflege und Restaurierung, der Klimaforschung, aus Natur- und Ingenieurwissenschaften, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften, Landschaftsarchitektur, Informatik und vielen mehr erfordert. Nicht zuletzt muss die Rettung von Kulturgut in Notfallsituationen wie Brand und Hochwasser berücksichtigt werden, weshalb Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) sowie deren Arbeitsvorgehen einbezogen werden müssen.

Aufgrund dieser Komplexität und der Vielzahl an verfügbaren Informationen sind moderne IT-Tools von entscheidender Bedeutung, um Entscheiderinnen und Entscheidern einen Überblick über den Zustand ihrer Liegenschaft zu verschaffen und mögliche zukünftige Veränderungen darzustellen. Diese IT-Tools können dabei helfen, leichter und schneller geeignete und nachhaltige Maßnahmen umzusetzen und so das Kulturgut besser zu schützen. Die in diesem Projekt entwickelten Werkzeuge werden von der KERES-Plattform zusammengefasst und miteinander kombiniert. Im Folgenden werden die einzelnen Teilbereiche der Plattform beschrieben. Die größte Herausforderung bei der Entwicklung der KERES-Plattform war die Integration und Aufbereitung der relevanten Daten. Aufgrund der Interdisziplinarität des Feldes und der Heterogenität der Daten wurde in KERES eine Anwendung geschaffen, die flexibel verschiedenste Daten integrieren und aufbereiten kann. So wurden in der Plattform beispielsweise

- (Live-)Sensordaten
- Unwetterrisikokarten,
- Klimaprognosen und -modelle,
- Expertenwissen,
- Bild- und Videomaterial und
- unstrukturierte Dokumente

integriert, um Nutzerinnen und Nutzern einen möglichst umfassenden Blick auf die eigenen Liegenschaften zu ermöglichen. Die Heterogenität spiegelt sich in der Vielzahl der Anwenderinnen und Anwender der Plattform wider, die sich unter anderem aus den Domänen Restaurierung, Kulturgutverwaltung, Bevölkerungs- und Katastrophenschutz, Politik, Gärtnereien und Forschung zusammensetzen.

Zur Ergänzung wurden flexible Anwendungen entwickelt, die es ermöglichen nur die für den Anwendungsfall relevanten Daten einzusehen, um potenziellen Überforderungen vorzubeugen und im Notfall Informationen an die Rettungskräfte und Feuerwehren weitergeben zu können.

Die KERES-Plattform integriert alle einzelnen Anwendungen, bietet Abfragemöglichkeiten der Ontologie und andere notwendige Funktionen, wie beispielsweise ein Nutzerverwaltungssystem. Letzteres basiert auf WebGenesis®, einem vom Fraunhofer IOSB entwickelten Informationsmanagementsystem, und ist zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung unter <https://keres.k3s.ilt-dmz.iosb.fraunhofer.de/> im Internet verfügbar. Abbildung 1 stellt einen Teil der Einstiegsseite dar, von wo aus die Nutzerinnen und Nutzer zu verschiedenen Unteranwendungen navigieren können.

## Das KERES-Projekt

Herzlich willkommen auf der Wissensplattform zum Projekt KERES.

Die Bewertung der Kritikalität und Vulnerabilität historischer Bauten, Sammlungen wie auch historischer Park- und Gartenanlagen in Hinblick auf Extremwetterereignisse ist eine stark interdisziplinäre Aufgabe, die die Zusammenarbeit von Historikern, Meteorologen, Denkmalpflegern, Restauratoren und Ingenieuren erfordert. Auf dieser Plattform wollen wir alle Informationen, die in unserem Projekt anfallen erklären und verständlich aufbereiten.

Für das Vorhaben KERES können die Forschenden auf zwei vorangegangenen EU-Projekten aufbauen – **Climate for Culture** und **Heraclides** – die sich beide mit den **Wirkungen des globalen Klimawandels auf das kulturelle Erbe** auseinandergesetzt haben. Der Fokus in dem neuen Vorhaben des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) wird auf die Zunahme von Extremklimaereignissen in Deutschland gelegt: Länger anhaltende Hitzewellen gepaart mit extremer Trockenheit, orkanartige Stürme, sintflutartige Regenfälle, Zunahme der Temperaturschwankungen und Meeresspiegelanstieg. Diese Ereignisse werden wesentlich öfter auftreten und damit auch die Schäden an Kulturgütern, die deshalb eines besonderen Schutzes bedürfen, um sie für nachfolgende Generationen zu erhalten. Im Vordergrund stehen dabei **historische Gebäude und Monumente** sowie die von Menschen gestalteten **historischen Gärten und Kulturlandschaften** mit Ihren einzigartigen Sammlungen von Nutz- und Zierpflanzen.



Bilder
Fallstudien (Suche)
KERES Fallstudien-Ontologie Die KERES Fallstudien-Ontologie.
Mobile Anwendung
UFZ-Dürremonitor
Die KERES-Fallstudien
Maßnahmenfinder
Das Expertengremium
Laufkartenerstellung mit Walker
Internet-Datenschutzerklärung
Impressum

### Inhalte

keres-case-studies.owl  
(830.38 KB)

Alle Dateien herunterladen

Abbildung 1: Der Einstieg in die KERES-Plattform  
© Fraunhofer IOSB

## Die KERES-Ontologie

Um der Datenvielfalt gerecht zu werden und den Endnutzerinnen und Endnutzern eine Schnittstelle zur Datenabfrage zu bieten, basiert die KERES-Plattform auf einer Ontologie, der KERES-Ontologie. Ontologien sind formale Darstellungen von Wissensbereichen, die Beziehungen zwischen Konzepten und Entitäten klar strukturieren. Sie erlauben es, das Wissen über den Kulturgutschutz und den Klimawandel in einer standardisierten und einheitlichen Weise zu modellieren. Dieser Wissensgraph ermöglicht es Informationen zu organisieren, abrufbar zu machen und die Kommunikation zwischen Fachleuten zu erleichtern. Durch die explizite Ausformulierung der Beziehungen der einzelnen Daten untereinander können Zusammenhänge und Wirkketten zwischen klimatischen Veränderungen und dem Kulturgut aufgedeckt werden. Entsprechend können Informationen, die zu einem Kulturgut gehören, auf andere Kulturgüter übertragen werden. Dies vereinfacht die Ableitung von Good-Practices und den Transfer von bereits berechneten Klimamodellen sowie die Wiederverwendung von Messdaten immens. Die Ontologie ist die technische Form der gespeicherten Informationen, auf die die KERES-Plattform zugreift, um diese nutzerfreundlich darzustellen.

Die KERES-Ontologie erweitert die HERACLES-Ontologie, die in einem Vorgängerprojekt – dem EU-Projekt HERACLES – entwickelt wurde, um die Teilbereiche Parkanlagen und Botanik sowie die Einbeziehung von Rettungskräften. Damit umfasst die KERES-Ontologie die Teilbereiche

- Kulturgut und Parkanlagen,
- Materialien,
- Stakeholder,
- Unwetterereignisse und Klimaauswirkungen,
- Schäden und Risiken,
- Technologien zur Erforschung der Erhaltung von Kulturgut und
- Katastrophen- und Zivilschutz.

Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Domänen der Ontologie auf. Die Ontologie wurde in OWL, der Web Ontology Language entwickelt. OWL ist eine World Wide Web Consortium (W3C) standardisierte semantische Beschreibungssprache, die speziell für die Modellierung und Darstellung von Ontologien entwickelt wurde. OWL ist eine formale Sprache, die es ermöglicht, Wissen aus verschiedenen Domänen auf strukturierte und logische Weise zu beschreiben.

Um der Öffentlichkeit die Verwendung der Daten zu ermöglichen, wurde eine Programmierschnittstelle entwickelt, die die strukturierte Abfrage der öffentlichen Daten ermöglicht. Die KERES-Ontologie selbst steht unter <https://github.com/FraunhoferIOSB/KERES/> als freie Software unter der Lizenz CC-BY-SA-4.0 zur Verfügung. Da der weit verbreitete Standard OWL verwendet wurde, kann die Ontologie in anderen Projekten weiterentwickelt und wiederverwendet werden. Eine entsprechende wissenschaftliche Publikation wurde unter dem Titel *The KERES Ontology: Protecting Cultural Heritage from Extreme Climate Events* im Magazin *heritage* veröffentlicht [Reuter et al. 2023]. Da im Kontext des Projekts auch sicherheitsrelevante Informationen erhoben wurden, enthält die oben beschriebene Ontologie nur das Datenmodell, mit dem die Informationen aus den entsprechenden Domänen beschrieben werden können. Andere Interessierte können so dieses Datenmodell verwenden und auf ihre eigenen Anwendungsfälle übertragen. Die Fallstudien, inklusive der sicherheitsrelevanten Informationen, werden mithilfe eines OWL-Imports integriert, damit diese nicht öffentlich einsehbar sind.

Der wesentliche Nutzen des Projekts ergibt sich aus der Verwendung der in der Ontologie strukturierten Daten und deren Kombination. Ontologien werden jedoch von nicht-technischen Personen oft als zu komplex wahrgenommen. Daher wurden im KERES-Projekt verschiedene Anwendungen entwickelt, um die Daten zu verwalten und einen niederschweligen Zugang zu ermöglichen. Entscheiderinnen und Entscheider werden dadurch eine Grundlage geboten, um fundierte Entscheidungen zum Schutz des Kulturguts zu treffen. Die Anwendungen können alle auf die in der Ontologie strukturierten Daten zugreifen und bieten eine Abstraktionsschicht, um nur die Daten zu verwenden, die relevant sind, und Nutzerinnen und Nutzer vor einem Informationsüberfluss zu schützen.

## Die KERES-Wissensbasis

Die Hauptanwendung innerhalb der KERES-Plattform ist die KERES-Wissensbasis. Diese bietet eine Ansicht, um durch den Datenbestand der Ontologie zu *browsen*. Die Anwendung bietet für die einzelnen Datensätze der Ontologie Einträge an, in denen die Inhalte entsprechend aufbereitet werden können. Ein Einstieg in die Ontologie ist beispielsweise über die folgende Inhaltsstruktur möglich, in der alle Teilbereiche der Ontologie (siehe Abb. 2) aufgeschlüsselt sind:



Abbildung 2: Die in der KERES-Ontologie integrierten Teilbereiche © Fraunhofer IOSB

## Konzepte

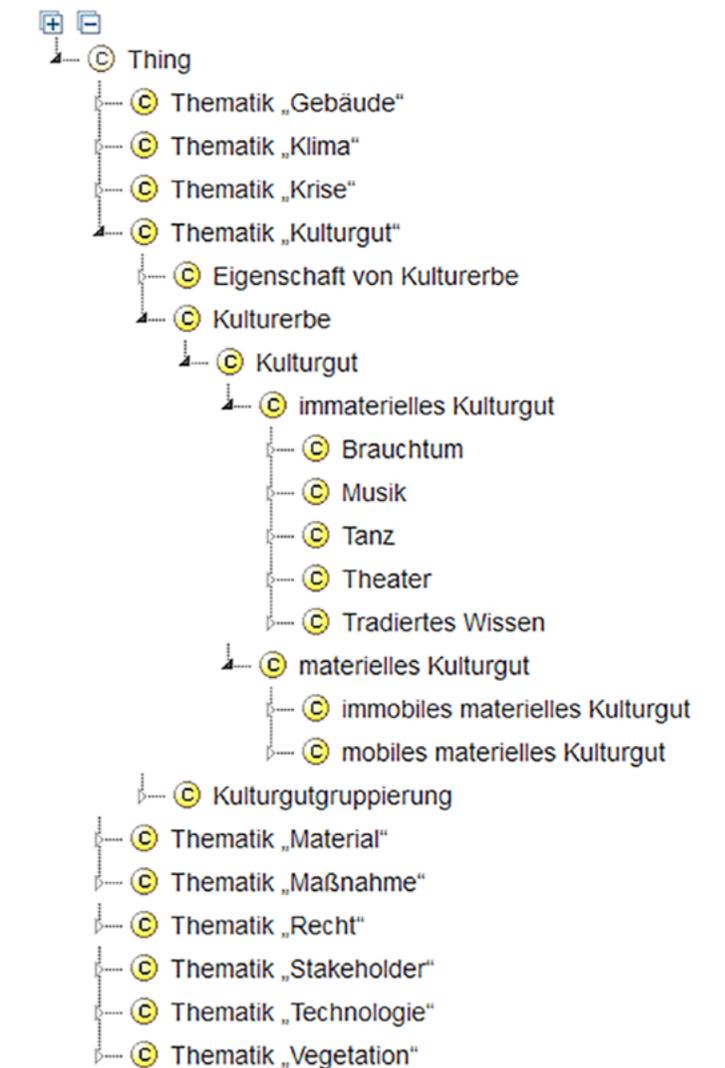


Abbildung 3: Darstellung der Inhalte der Ontologie als Baumstruktur © Fraunhofer IOSB

Eine weitere Möglichkeit zur Navigation der Inhalte ist die Erstellung und Verwendung von Wissensnetzen. Da die Inhalte der Elemente in einem Graphen strukturiert sind, können gewisse Inhalte der Ontologie als Netze dargestellt werden, um Zusammenhänge über mehrere Beziehungen hinweg aufzudecken. Diese Netzwerke können von den Nutzerinnen und Nutzern selbst erstellt und erweitert werden, um häufig verwendete Zusammenhänge schnell wiederzufinden und anzuzeigen. Abbildung 4 zeigt ein solches Netz, in dem die Strukturierung der Klasse *Kulturgut* in die Unterklassen materielles und immaterielles Kulturgut in grünen, abgerundeten Boxen dargestellt wird. Konkrete Fallstudien werden in eckigen türkisfarbenen Boxen dargestellt. Hier wird beispielhaft aufgezeigt, dass der *Temperatursensor Karlsruhe* das Kulturgut *Karlsruher Schloss* überwacht, welches gleichzeitig als *3D-Modell* verfügbar ist.

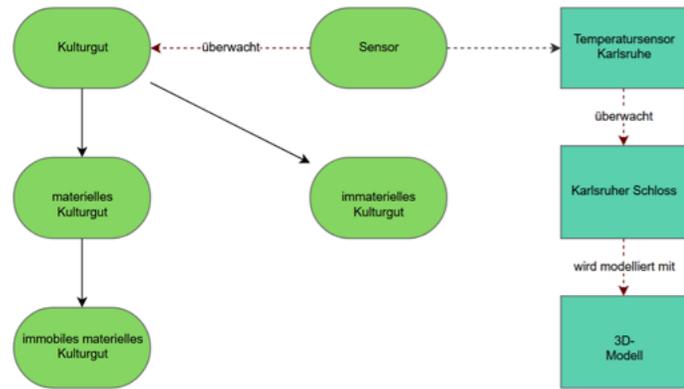


Abbildung 4: Wissensnetz aus der KERES-Wissensbasis © Fraunhofer IOSB

Jeder einzelne Eintrag in der KERES-Ontologie erhält einen automatisch generierten Eintrag in der KERES-Wissensbasis. Im Folgenden wird exemplarisch der Eintrag der KERES-Fallstudie *Schloss Charlottenhof* gezeigt. Auf der rechten Seite werden alle direkten Beziehungen innerhalb der Ontologie zum Schloss Charlottenhof aufgezeigt. So können hier Messsensoren, relevante Klimamodelle, potenzielle Gefahren oder auch wichtige Stakeholder beschrieben werden, um alle Informationen schnell navigieren zu können.

Weiterhin bietet die Wissensbasis eine Programmierschnittstelle, mithilfe derer die Inhalte der Datenbank abgefragt werden können. Die Schnittstelle erlaubt Abfragen in SPARQL, welches eine standardisierte Abfragesprache ist, um Daten aus OWL-Format abzufragen. Die Schnittstelle ist programmatisch ansprechbar und erlaubt die Integration und Entwicklung von weiteren Tools und Services sowie die Integration der Entwicklungen aus dem KERES-Projekt in weiteren relevanten Arbeiten.

### Schloss Charlottenhof

Südwestlich von Schloss Sanssouci liegt das kleine, im klassizistischen Stil erbaute Schloss Charlottenhof. Es bietet den architektonischen Mittelpunkt einer Gartenanlage, die den Park Sanssouci ab 1826 erweiterte.

Der Kronprinz und spätere König Friedrich Wilhelm IV. hatte das barocke Gutshaus 1825 von seinem Vater als Weihnachtsgeschenk erhalten. Er beauftragte den Architekten Karl Friedrich Schinkel und den Gartengestalter Peter Joseph Lenné, das Anwesen umzugestalten. Es entstand der Glanzpunkt ihres Wierens: Ein Gesamtwerk aus Architektur und Landschaft.

In seiner schlichten Formensprache ist das Schloss vom Geist der Antike durchdrungen und von römischen Villenbauten beeinflusst. Beeindruckt von den Ausgrabungen in Pompeji und Herculaneum legte Schinkel den Bauplan der Stützengliederung in dieser antiken Häuserarchitektur (Kügel) dem entspricht auch die bedeckene Gestaltung der bürgerlich anmutenden Innenräume, deren Mosaik Schinkel größtenteils selbst entwarf. Bemerkenswert ist die bunte Vielfalt der Räume in Bezug auf Material und Farbe.

Der halbbrüderliche Erker an der Nordseite, der Wasserlauf der Brunnenanlage durch das Haus hindurch, Parkten, Pergolen, Terrasse und Eredra vermitteln zwischen Innen- und Außenraum. Das berühmte blau-weiß gestreifte Eckzimmer trieb diesen Gedanken auf die Spitze. Es ist dem Inneren eines Zofens nachgebildet.

Schloss und Park Charlottenhof werden zu Recht als Herzstück des preussischen Arkadiens bezeichnet.

<https://www.spsg.de/de/themen/gartenanlagen/schloss-charlottenhof>

Schloss Charlottenhof  
URB

- Konzept**: Schloss oder Burg
- Setzt sich in**: Potsdam
- Inverse hat Schnelleinstiegspunkt**: KERES F abstruden
- Inverse ist NCU-Standort von**: Standort von Schloss Charlottenhof
- Inverse vermerkt auf**: Kontextes Lexikonschne, KERES; Fallstudie Schloss Charlottenhof

Abbildung 5: Der Eintrag zum Schloss Charlottenhof aus der KERES Wissensbasis © Fraunhofer IOSB

Neben der Darstellung der Informationen der Ontologie bietet die Wissensplattform die kartenbasierte Darstellung von Daten. Im Rahmen des Projekts wurden von der SPSP im Park Sanssouci Bodenfeuchtigkeitssensoren ausgebracht, die den Verlauf der Bodenfeuchtigkeit über einen längeren Zeitraum erfassen sollten. Diese Sensoren erlauben die Messung der Bodenfeuchtigkeit und der Bodentemperatur in einem Meter Tiefe. Insgesamt wurden zehn Sensoren an repräsentativen Stellen ausgebracht, um einen Einblick über den Wasserungsbedarf der Liegenschaft zu geben. Die Sensoren übermitteln ihre Daten über LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), eine drahtlose Kommunikationsart, bei der geringere Datenmengen zuverlässig über große Entfernungen mit wenig Energiebedarf übermittelt werden können. Bei der Weitläufigkeit der Fallstudie Park Sanssouci eignet sich dieses Vorgehen, da so die Sensoren an relevanten Orten ausgebracht werden können, ohne auf technische Gegebenheiten achten zu müssen.

Die erfassten Daten werden mithilfe eines FROST-Servers gespeichert, einem Open-Source-Softwareprojekt, das die Erfassung von Zeitreihendaten, inklusive ihrer Metadaten, ermöglicht. Der FROST-Server implementiert die Sensor Things API, einen Standard des Open Geospatial Consortiums, wodurch die Beschreibung von Sensordaten vereinheitlicht und deren Wiederverwendung vereinfacht werden soll. Zur Darstellung der erfassten Sensordaten wurde eine Kartenansicht entwickelt, die die Position der Sensoren und die Darstellung ihrer gemessenen Daten ermöglicht (Abb. 7).

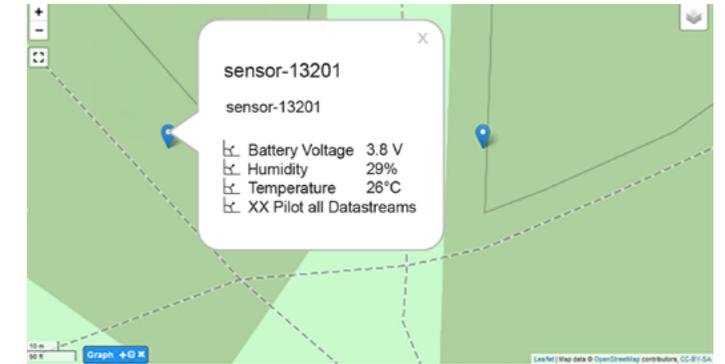


Abbildung 7: Kartendarstellung der ausgebrachten Messsensoren © Fraunhofer IOSB



Abbildung 6: Ausbringung eines Bodenfeuchtigkeitssensors © SPSP, Katharina Matheja



Abbildung 8: Graphische Darstellung der Messdaten © Fraunhofer IOSB



Abbildung 9: Mobile Darstellung der integrierten Karten ©Fraunhofer IOSB

Neben den Möglichkeiten zur Nutzung der Anwendung über einen Browser wurden zur Ergänzung der Wissensbasis separate Funktionen für mobile Endgeräte (Tablets, Smartphones) entwickelt, die zum einen die Abfrage auf kleineren Geräten ermöglichen, andererseits aber auch die Erhebung von Daten vereinfachen sollen.

Abbildung 10: Mobile Erfassung von Schäden im Park Sanssouci © Fraunhofer IOSB

Abbildung 9 zeigt die Darstellung einer Risikokarte aus der KERES-Wissensbasis. Abbildung 10 zeigt ein Formular, mit dessen Hilfe klimawandelbedingte Schäden im Park mit ihrer Position, Bildern und einer Kategorisierung des Schadens mit einem mobilen Gerät erfasst werden können.

## KERES FINDER

Zur Ergänzung der Navigationsmöglichkeiten durch die Wissensbasis wurde im Projekt das Tool FINDER entwickelt. FINDER ist eine Erweiterung für WebGenesis®, die es ermöglichen soll, bei konkreten Fragen Maßnahmen aus der KERES-Ontologie ableiten zu können. Insbesondere sollen Wiederherstellungs- und Schutzmaßnahmen gegen klimainduzierte Schadensereignisse an Kulturgütern vorgeschlagen werden. FINDER stellt dem Nutzer einige Fragen, beispielsweise um welche Art von Kulturgut oder welches Schadensbild es sich handelt. FINDER erstellt aus diesen Antworten SPARQL-Anfragen (siehe Abschnitt Die KERES-Wissensbasis), deren Ergebnisse dem Nutzer präsentiert werden. Als Ergänzungstool innerhalb der Plattform soll es Nutzerinnen und Nutzern einen einfacheren Zugang zu Informationen bieten, selbst wenn sie nicht wissen, dass es diese innerhalb der Plattform gibt.

In Abbildung 11 wird ein Schritt zur Abfrage der Daten innerhalb der Ontologie gezeigt. Die Anwendung ist in Form eines Wizards gebaut, sodass die nachfolgenden Fragen sich aus den vorher ausgewählten Antworten generieren.

Abbildung 11: Der KERES FINDER © Fraunhofer IOSB

## KERES WALKER

Im Katastrophenfall ist es für zur Hilfe eilende Rettungskräfte wichtig, schnell einen Überblick über die Lage vor Ort zu gewinnen und zu verstehen, wie am besten geholfen werden kann. Im Rahmen des Projekts KERES wurden viele Informationen erhoben, die auch für Rettungskräfte relevant sein können. Da die Informationen in Form einer Ontologie nicht für den schnellen Einsatz in Krisensituationen geeignet sind, wurde im Rahmen des Projekts KERES die Anwendung WALKER entwickelt, die die Erstellung von Laufkarten zur Evakuierung von Kulturgütern durch Feuerwehkräften ermöglicht. Aufgrund der Sensibilität der Daten befinden sich die Informationen in einem separaten Bereich der Plattform, um diese vor unbefugten Zugriffen zu schützen.

Laufkarten bieten Einsatzkräften eine strukturierte Orientierungshilfe in einem für sie bekannten Format. Damit können Einsätze effizienter gestaltet werden, und durch die Kartierung potenzieller Gefahrenbereiche wird die Sicherheit der Einsatzkräfte unterstützt. Die Vorstrukturierung der Informationen im Vorfeld ermöglicht die Schaffung einer Schnittstelle im Einsatzfall: wenn der Einsatzleitstab zur Ergänzung Informationen in einem bekannten Format in Form von Laufkarten erhält, kann die Feuerwehr reagieren und muss Einsatzkräfte nicht unnötig in Gefahr bringen.

Abbildung 12: Das WALKER Formular zur Erstellung von Laufkarten © Fraunhofer IOSB

WALKER ist in der Lage, Informationen aus einer Ontologie abzufragen und daraus automatisch Laufkarten zu generieren. Gleichwohl ist es möglich, innerhalb der Anwendung die benötigten Informationen händisch einzugeben und Bilder hochzuladen, um anschließend Laufkarten zu erstellen. Das Format der Laufkarten leitet sich vom Format der von der Feuerwehr München für die Liegenschaften der Bayerischen Schlösserverwaltung (BSV) verwendeten Laufkarten ab, um sicherzustellen, dass die Rettungskräfte ein vertrautes Format erhalten und die Informationen zügig erfassen können. Dabei wird angegeben, wie ein Kulturgut am besten schonend evakuiert werden kann. Dies umfasst beispielsweise die Frage nach der Anzahl von benötigten Personen oder eventuellem Werkzeug. Zusätzlich werden Informationen zur Unterbringung und Lagerung mit angegeben.

WALKER bietet zur automatischen Erstellung von Laufkarten eine Programmierschnittstelle, die Daten im JavaScript Object Notation-Format (JSON) entgegennehmen kann. JSON ist ein aus der Programmiersprache JavaScript abgeleitetes Datenformat, das zur strukturierten Darstellung und zum Austausch von Daten zwischen verschiedenen Anwendungen verwendet wird. Aus den so hochgeladenen Informationen können anschließend Laufkarten generiert werden. Die händische Erfassung der Informationen geschieht über ein Webformular, in dem die relevanten Informationen eingegeben werden können. Ein der Feuerwehr bekannter Satz Icons wird mit der Anwendung ausgeliefert, um entsprechende Darstellungen auf der Laufkarte zu ermöglichen. Das Webformular wird in Abbildung 12 dargestellt. Ein Beispiel einer solchen Laufkarte wird in Abbildung 13 gezeigt. Im oberen Teil der Laufkarte stehen Informationen zur Liegenschaft sowie zum Ersteller und dem Stand der Datei. Anschließend wird die Position des Objekts mithilfe eines Gebäudeplans dargestellt. Ein Bild soll der Rettungskraft die schnelle Identifizierung ermöglichen. Außerdem werden weitere wichtige Informationen, wie die Anzahl der benötigten Kräfte, beschrieben.

Die Anwendung befindet sich derzeit im Testbetrieb bei verschiedenen Mitgliedern des KERES-Expertengremiums.

SSG		Erstellt 03.08.2023	Bedeutendes Kulturgut
		Stand 03.08.2023	2
Ersteller Walker			
Ort Rastatt	Objekt/Gebäude Schloss Rastatt	Gebäude/Bauart II	Raumnummer II-5
Objekt: Vase			
Personen 1		Gewicht 1 kg	
		Maße 40 x 40 x 60 cm	
		Höhe über Boden 78 cm	
		Zwischenlagerung Notfalldepot I	
		Verbringungsort Stadtarchiv Rastatt	
Werkzeuge / Demontage / Handling		Verbringungsart	
Vorsichtig behandeln!			

Abbildung 13: Beispielhafte Laufkarte für ein fiktives Element © Fraunhofer IOSB

## Literatur

Reuter, J., Hellmund, T., Moßgraber, J. & Hertweck, Ph. (2023). **The KERES Ontology: Protecting Cultural Heritage from Extreme Climate Events.** In: Heritage 6 (5), S. 4015-4041. <https://doi.org/10.3390/heritage6050211>

## 5.2 Organisations- und Kommunikationsstrukturen für die Notfallplanung und -bewältigung

Uta Pollmer, Thomas Koutalidis

Eine gut ausgearbeitete Notfallplanung ist in Zeiten zunehmender Extremwetterereignisse wichtiger Bestandteil einer Präventionsstrategie und der Vorsorgemaßnahmen in den Kulturguteinrichtungen. Neben einer rein technischen Unterstützung wie der Bereitstellung von Informationen durch die KERES-Wissensplattform oder der standardisierten Erstellung von Laufkarten für die Feuerwehr durch die WALKER-Software ist vor allem die strukturelle Verankerung der verschiedenen Zuständigkeiten in den Kulturgut bewahrenden Einrichtungen ein wichtiger Faktor für die Rettung von Kulturgut in Krisensituationen. Daher wird dieses Thema auf der KERES-Wissensplattform gesondert berücksichtigt. Grundlage sind bereits vorhandene Leitfäden und Erfahrungsberichte sowie die Diskussionsergebnisse mit Mitgliedern des KERES-Expertengremiums. Daraus wurden drei Übersichtsgrafiken entwickelt, die



Abbildung 1: Ausarbeitung der Notfallplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bauernfeind et al. 2012, S.7, und Siegel et al. 2021) © Fraunhofer IMW

- den Prozess zur Ausarbeitung der Notfallplanung,
- die Rollen und Aufgaben in der Notfallplanung sowie
- die Kooperation bei der Notfallbewältigung darstellen.

Die Grafiken und die folgenden Erläuterungen unterstützen die Entwicklung einer Notfallplanung bzw. dienen dem Abgleich mit bereits existierenden Strukturen, um diese gegebenenfalls zu ergänzen.

### Ausarbeitung der Notfallplanung

Eine Notfallplanung beinhaltet verschiedene Schritte, die adressiert werden müssen. Diese sind in Abbildung 1 dargestellt und geben einen Überblick, welche Themen bei der Ausarbeitung der Notfallplanung berücksichtigt werden müssen. Die Grafik stellt keine zwingende zeitliche Abfolge dar.

Am Anfang der Ausarbeitung steht eine **Risikoanalyse**. Mithilfe der Expertise in den Fachabteilungen werden unter Berücksichtigung eigener Erfahrungen und aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse Risiken identifiziert sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit und die zu erwartenden Schäden bewertet, die sich aus verschiedenen Sachlagen ergeben. Dazu gehören neben den generellen Risiken wie Klima, Licht, Schädlingen/Schimmel, Schadstoffen, Abnutzung usw. Notfälle wie Havarien, Unfälle, Brand, Flut, Unwetter und Erdbeben, aber auch Ereignisse wie Diebstahl, Vandalismus und Gewalttaten [Siegel et al. 2021, S. 8]. Bisher nicht berücksichtigt sind jedoch neue, z. B. durch den Klimawandel bedingte Risiken. Daher ist es wichtig, die Risikoanalyse kontinuierlich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Als Unterstützung bei der Erstellung der Risikoanalyse bietet der Sicherheitsleitfaden Kulturgut (SiLK) einen strukturierten Überblick in Form eines Formulars [https://www.silk-tool.de/wp-content/uploads/2022/06/1.1\\_SiLK\\_Risikoanalyse.pdf](https://www.silk-tool.de/wp-content/uploads/2022/06/1.1_SiLK_Risikoanalyse.pdf) an. Zu den oben aufgelisteten Risiken gibt es außerdem interaktive Fragebögen <https://notfallverbund.de/risiken/praevention-und-evaluation-mit-dem-silk-sicherheitsleitfaden-kulturgut>, die auf der Basis der jeweiligen Antworten Handlungsempfehlungen für die eigene Notfallplanung liefern. Zur Risikoanalyse gehört auch eine Kritikalitätsanalyse, d. h. es werden Prozesse

identifiziert, die für die Funktionsfähigkeit der Einrichtung und die Sicherheit besonders relevant sind und daher geschützt werden müssen [Bdl 2011, S. 16].

Ein weiterer Schritt bei der Notfallplanung ist die Festlegung von Aufgaben und Zuständigkeiten sowie die **Festlegung von Verantwortlichkeiten**. Je nach den individuellen Gegebenheiten und der Größe der Einrichtung sind die Besetzung eines interdisziplinären Notfallteams und die Ernennung eines Notfallkoordinators/einer Notfallkordinatorin zu empfehlen, die im Krisenfall zum Einsatz kommen. Für die Kommunikation mit den verantwortlichen Einsatzkräften (Feuerwehr, THW, Polizei) muss eine Kontaktperson benannt werden. Die verantwortlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sollten entsprechend geschult sein. Ein weiterer Bestandteil der Notfallplanung ist die **Bestimmung von Auslagerungsorten** bzw. Ausweichräumen als Zwischenlager. Hier sind eine

Risikoanalyse und die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für den Transport und die Auslagerung des betroffenen Kulturguts zu empfehlen. Für die Ausarbeitung des Bergungs- bzw. Evakuierungsplans ist es notwendig, eine **Priorisierung der Sammlungsobjekte** vorzunehmen. D.h. mit der Einstufung der Objekte nach ihrer kulturellen und sammlungsbezogenen Bedeutung, ihrer Bergungsfähigkeit und Empfindlichkeit wird die Reihenfolge für die Bergung festgelegt. Hinweise zum Vorgehen bei der Priorisierung finden sich bei Bauernfeind et al. 2012, S. 12 ff, und im Sicherheitsleitfaden Kulturgut, S. 20–21 [Siegel et al. 2021]. Die in den vorherigen Schritten entwickelten Maßnahmen und die für die Feuerwehr relevanten Dokumente werden in einem **Notfallplan** zusammengefasst und in einem **Notfallordner** hinterlegt.

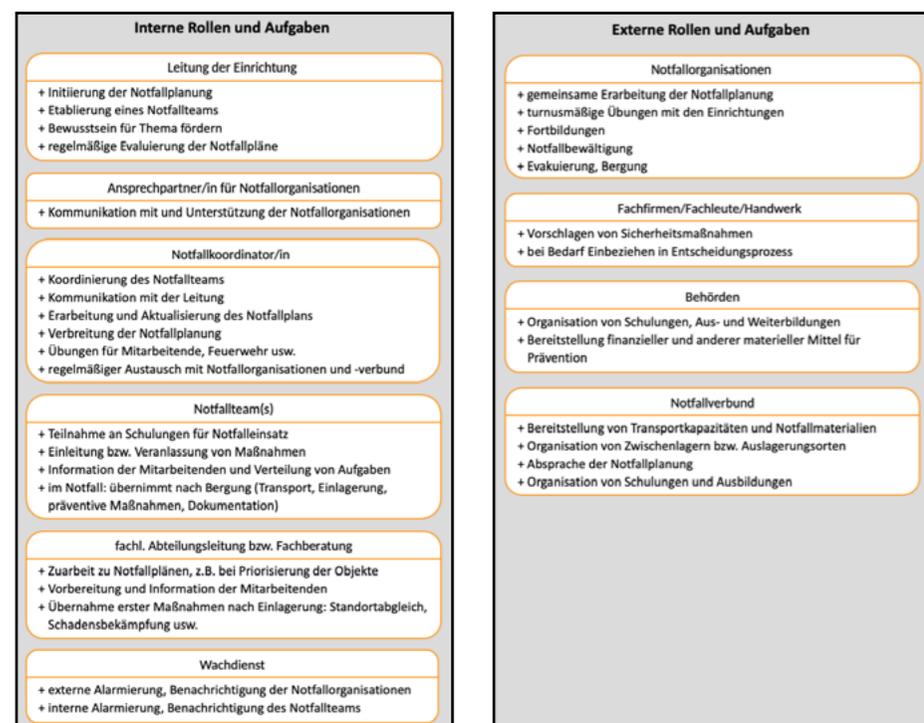


Abbildung 2: Rollen und Aufgaben in Notfallplanung und -bewältigung (eigene Darstellung in Anlehnung an Siegel et al. 2021, Bdl 2011, S. 24–26, und KERES-Expert/innen-Workshop vom 26.06.2023) © Fraunhofer IMW

Notfallordner enthalten in der Regel Alarmketten, Kontaktdaten des Notfallteams, Sammelpunkte, Laufkarten, technische Pläne, Standortpläne für Notfallkisten usw. [Bauernfeind et al. 2012, S. 11]. Der Notfallordner muss allerdings den Standards der Feuerwehr vor Ort entsprechen, daher empfiehlt es sich, diesen in gegenseitiger Abstimmung zu erarbeiten. Ein Beispiel für die Anforderungen an Feuerwehrpläne im Kulturgutbereich zeigt das Merkblatt der Berliner Feuerwehr 2023 [https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/VB/Merkblaetter/Anhang\\_D\\_-\\_Kulturgut\\_Gestaltungshinweise.pdf](https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/VB/Merkblaetter/Anhang_D_-_Kulturgut_Gestaltungshinweise.pdf). Je nach Rahmenbedingungen kann es sinnvoll sein, einen internen Notfallordner für die eigenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit zusätzlichen Informationen, z. B. Dokumentationslisten, bereitzustellen [ebd., S. 10].

In Ergänzung eigener Expertise und Kapazitäten sollten **Kontakte zu externen Helfern**, Dienstleistern oder beratenden Einrichtungen, wenn möglich zu einem **Notfallverbund** aufgebaut werden. Mitglieder von Notfallverbänden unterstützen sich gegenseitig bei der Notfallplanung z. B. durch Erfahrungsaustausch und Notfallübungen und im Ernstfall mit Personal, gemeinsamen Materiallagern und Zwischenlagerflächen. Eine Liste der Notfallverbände <https://notfallverbund.de/verbuende/liste-der-notfallverbuende-in-deutschland> und weitere Informationen zum Thema werden auf der Webseite [notfallverbund.de](https://notfallverbund.de) bereitgestellt. Hinweise zum Aufbau einer vernetzten Notfallvorsorge liefern Apelt et al. 2023, S. 23.

Ebenfalls zur Notfallplanung gehört die **Beschaffung von Notfallmaterialien**. Der Inhalt der Notfallkisten oder -boxen sollte alles Notwendige zur Absicherung einer Unfallstelle, zur sicheren Bergung und Erstversorgung betroffener Kulturgüter sowie zur Schadenseindämmung enthalten. Hinweise zur Ausstattung von Notfallkiste und Materiallager finden sich bei Bauernfeind et al. 2012, S. 22–23, Siegel et al. 2021, S. 21–22, und unter <https://notfallverbund.de/praxis/boxen>. Eine Inventarliste „Ausrüstungssatz Kulturgutschutz“ wurde vom Kulturrat Thüringen [1] veröffentlicht. Der Standort der Notfallkisten wird im Notfallordner vermerkt.

Die Notfallplanung inklusive aller Dokumente muss einer regelmäßigen Prüfung bzw. Aktualisierung unterzogen werden, und die **Informationen müssen verfügbar sein**. Es ist außerdem empfehlenswert, **regelmäßig Schulungen** und Übungen abzuhalten, im besten Fall gemeinsam mit den zuständigen Einsatzkräften, so dass Abläufe und Aufgabenverteilung im Ernstfall beiden Seiten geläufig sind und

die Schnittstelle zwischen der Einrichtung und den Einsatzkräften reibungslos funktioniert [Apelt et al. 2023, S. 18–21]. Eine Musternotfallplanung hat z. B. der Kulturrat Thüringen [2] veröffentlicht.

## Rollen und Aufgaben in Notfallplanung und -bewältigung

Für die Personalplanung ist es erforderlich, innerhalb der bestehenden Personalstruktur Rollen und Aufgaben zuzuweisen und bei Bedarf auch zusätzliche Stellen zu schaffen. Abbildung 2 zeigt eine mögliche Rollenverteilung mit den entsprechenden Aufgaben, die jeweils an die individuellen Rahmenbedingungen einer Einrichtung angepasst werden müssen. Gegebenenfalls kann eine Person auch mehrere Rollen übernehmen. Die Notfallplanung wird in der Regel von der **Leitung einer Einrichtung** initiiert, die anschließend für die Etablierung eines interdisziplinären Notfallteams und die regelmäßige Aktualisierung der Notfallpläne verantwortlich ist, ebenso wie für die Sensibilisierung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die Mitglieder des **Notfallteams** werden für den Notfalleinsatz geschult und sind für die Umsetzung der Notfallmaßnahmen zuständig.

Innerhalb des Notfallteams wird ein **Notfallkoordinator** bzw. eine **Notfallkordinatorin** ernannt, der/die im Ernstfall die Koordination des Notfallteams sowie die Kommunikation mit der Einrichtungsleitung übernimmt. Im Rahmen der Notfallplanung ist der/die Koordinator/in außerdem für die Erarbeitung und Aktualisierung des Notfallplans, für die Verbreitung des Notfallplans in der Belegschaft, für regelmäßige Übungen sowie den Austausch mit den externen Partnern (Notfallorganisationen, Notfallverbände usw.) zuständig. Während eines Einsatzes zur Notfallbewältigung wird zudem eine **Kontaktperson** der Einrichtung vor Ort benötigt, die neben den Koordinator/innen der Einsatzkräfte (Feuerwehr, THW usw.) Teil der Technischen Einsatzleitung ist (Abb. 3).

Die Gesamtleitung eines Notfalleinsatzes liegt immer bei der **Notfallorganisation**, die zuallererst Personen rettet. Die Bergung von Objekten erfolgt anschließend und ausschließlich durch Notfallkräfte wie Feuerwehr, das THW u. a. Während der Bergung hat das **Notfallteam** nur eine beratende Funktion. Alle weiteren Maßnahmen

wie Transport, Einlagerung, Sicherung, präventive Maßnahmen, Dokumentation usw. liegen jedoch in der Verantwortung der Einrichtung und damit beim Notfallteam und den **Fachabteilungen** bzw. Fachberatungen. Daher sollten letztere bereits aktiv in die Erarbeitung der Notfallplanung eingebunden werden, u. a. in Bezug auf die Priorisierung der Objekte, Schutz- und Sicherungsmaßnahmen nach der Bergung sowie die Dokumentation. Zusätzlich können **externe Helfer** in Form von Fachfirmen bzw. Fachleuten aus dem Handwerk oder aus dem Sicherheitsbereich zur Unterstützung hinzugezogen werden. **Notfallverbände** unterstützen bei der gemeinsamen Notfallplanung und im Ernstfall mit Transportkapazitäten, Notfallmaterialien und/oder Zwischenlagern bzw. Auslagerungsorten. Unterstützung für die Notfallplanung und -bewältigung in Form von Fortbildungen und Schulungen (Fachberatung Kulturgutschutz, Notfallkoordination o. ä.) wird auch vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, vom Deutschen Kulturrat bzw. den Bundeskulturverbänden und den Landesdenkmalämtern angeboten oder kann über den Notfallverbund organisiert werden.

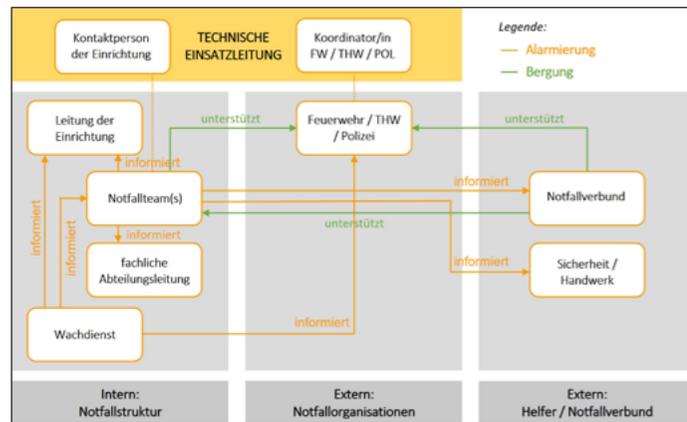


Abbildung 3: Organisationsstruktur für die Notfallbewältigung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bauernfeind et al. 2012, Siegel et al. 2021 und KERES-Expert/innen-Workshop vom 26.06.2023)  
© Fraunhofer IMW

## Quellen

Apelt, M., Berthod, O. & Breuer, C. (2023). **Organisatorische Voraussetzungen der Notfallvorsorge für Kulturgüter** (2. Auflage, Diskussion, Vol. 30).  
[https://doi.org/10.26164/leopoldina\\_03\\_00789](https://doi.org/10.26164/leopoldina_03_00789)

Bauernfeind, M., Herdin, M., Luber, K., Naumović, T. & Ribmann, S. (2017). **Umgang mit Kunst und Kulturgut im Notfall**.  
[https://www.schloesser.bayern.de/deutsch/ueberuns/rz/service/Notfall-Broschuere\\_MFGPK\\_2017-11-07.pdf](https://www.schloesser.bayern.de/deutsch/ueberuns/rz/service/Notfall-Broschuere_MFGPK_2017-11-07.pdf)

BdI/Bundesministerium des Innern (2011). **Schutz kritischer Infrastrukturen - Risiko- und Krisenmanagement. Leitfaden für Unternehmen und Behörden**.  
[https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/KRITIS/bmi-schutz-kritis-risiko-und-krisenmanagement.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=9](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/KRITIS/bmi-schutz-kritis-risiko-und-krisenmanagement.pdf?__blob=publicationFile&v=9)

Berliner Feuerwehr (2023). **Merkblatt Kulturgutschutz**.  
[https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/VB/Merkblaetter/Anhang\\_D\\_-\\_Kulturgut\\_Gestaltungshinweise.pdf](https://www.berliner-feuerwehr.de/fileadmin/bfw/dokumente/VB/Merkblaetter/Anhang_D_-_Kulturgut_Gestaltungshinweise.pdf)

Kulturrat Thüringen [1]. **Ausrüstungssatz Kulturgutschutz**.  
[https://www.kulturrat-thueringen.de/files/medien/downloads/notfallvorsorge/Ausruestungssatz\\_Kulturgutschutz.pdf](https://www.kulturrat-thueringen.de/files/medien/downloads/notfallvorsorge/Ausruestungssatz_Kulturgutschutz.pdf)

Kulturrat Thüringen [2]. **Kulturgutschutz in den Liegenschaften. Notfallplanung. Musterobjekt**.  
[https://www.kulturrat-thueringen.de/files/medien/downloads/notfallvorsorge/Muster\\_Notfallplanung\\_Kultureinrichtungen.pdf](https://www.kulturrat-thueringen.de/files/medien/downloads/notfallvorsorge/Muster_Notfallplanung_Kultureinrichtungen.pdf)

Siegel, A., Dohrmann, A. & Schöne, K. (2021). **SiLK – Sicherheitsleitfaden Kulturgut (SiLK)**. ISBN 978-3949117091  
[https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Kulturgutschutz/silk-sicherheitsleitfaden-kulturgut.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Kulturgutschutz/silk-sicherheitsleitfaden-kulturgut.pdf?__blob=publicationFile&v=2)



# Kapitel 6

**Zusammenfassung: Herausforderungen für die Kulturerbegemeinschaft und Lösungsansätze**

Im Vorfeld des KERES-Projekts wurde deutlich, dass das Thema Klimawandelauswirkungen in Deutschland noch nicht ausreichend bei Kulturerbeverantwortlichen angekommen ist. Zudem existierte bislang kein Gremium, das sich diesem Thema widmet und die Brücke zwischen Wissenschaft und Praxis bildet. Dank des KERES-Projekts konnte erstmals in Deutschland ein multidisziplinäres Expertengremium aus Vertreterinnen und Vertretern von Kulturerbeeinrichtungen, Feuerwehr, THW, Universitäten und Behörden etabliert werden. Die Untersuchungen und Befragungen zu den Themen Klimawandel und Extremereignisse haben bestätigt, dass es bei den Kulturerbeverantwortlichen einen großen Informationsbedarf gibt, welche Extremereignisse zukünftig wo und in welchem Ausmaß auftreten, was Klimawandel im Detail bedeutet und wie die Klimainformationen aus der Klimaforschung interpretiert werden können.

Im Rahmen des KERES-Projekts wurde eine Befragung von Kulturerbeverantwortlichen in 2 Wellen (2021/22 und 2023) mit je 40 Befragten aus dem KERES-Expertengremium und externen Fachleuten durchgeführt. Laut den Ergebnissen besteht in vielen Einrichtungen noch relativ wenig Sensibilität für klimawandelbedingte Risiken, obwohl 90% der Befragten das sich ändernde Klima als derzeit größte Herausforderung im Kulturgutschutz sehen. Festzustellen ist, dass es im Bereich Notfallmanagement noch Nachholbedarf gibt. Ein Drittel der Befragten gab an, dass es für ihre Einrichtung bzw. die Einrichtungen ihrer Region keine Notfallpläne zur Bergung und Sicherung von Objekten im akuten Schadensfall und keine mit den Rettungskräften abgestimmten Handlungsabläufe gibt. Wetterwarnsysteme sind nur bei gut der Hälfte der Befragten bekannt und werden nur etwa von einem Viertel genutzt, obwohl die Zunahme von Extremwetterereignissen wie häufigere starke Niederschläge und Stürme sowie langanhaltende Trockenheit und/oder Hitzeperioden als größte Bedrohung für historische Gebäude und Sammlungen wahrgenommen wird. Für die historischen Gärten und Parkanlagen wird langanhaltende Trockenheit mit Abstand als größtes Risiko angegeben, danach folgt die Zunahme von Stürmen und längeren Hitzeperioden.



Abbildung 1: Risiken für historische Gebäude und Sammlungen (KERES-Befragung der Kulturerbebegemeinschaft, bundesweit 40 Teilnehmende, Juli 2023) © Fraunhofer IMW

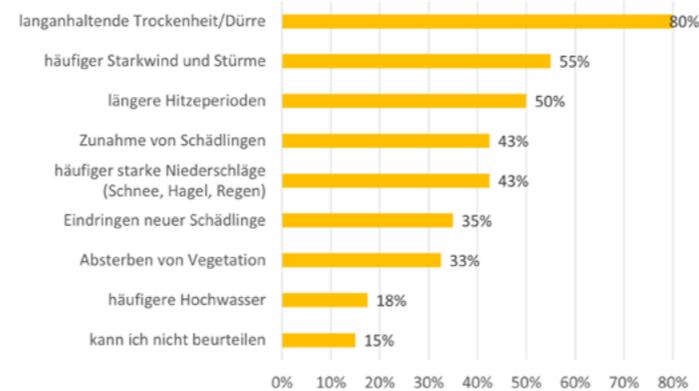


Abbildung 2: Risiken für historische Gärten und Parkanlagen (KERES-Befragung der Kulturerbebegemeinschaft, bundesweit 40 Teilnehmende, Juli 2023) © Fraunhofer IMW

Klimatische Veränderungen führen bereits heute zu wahrnehmbaren Schäden wie z. B. Setzungsrisse, Substanzverlust und Insektenbefall. Zum Schutz vor klimawandelbedingten Schäden werden als häufigste Maßnahmen Monitoring, Sonnenschutz und Mitarbeitersensibilisierung genannt. Speziell in Bezug auf den Schutz der Vegetation setzt man vor allem auf die Erprobung resilienter Nachpflanzungen und klimaresilienter Pflanzenarten gefolgt von der Revitalisierung von Altgehölzen. Ebenfalls festgestellt werden bereits zusätzliche Kosten für den Erhalt von Kulturerbe, darunter z.T. erhebliche Mehraufwendungen für Schadensbeseitigung nach Unwettern, für die Intensivierung bestimmter Unterhaltungsmaßnahmen sowie durch verkürzte Zyklen regelmäßiger Instandsetzungen. Die genaue Quantifizierung der Schäden und Kosten ist aufgrund fehlender Daten bisher kaum möglich.

## Der Klimawandel erfordert einen Wandel im Erhalt des Kulturerbes: Klimabedingte Schadensprozesse und Lösungen

Die Auswirkungen des Klimawandels auf unser Kulturerbe sind allgegenwärtig und erfordern innovative Ansätze zur Bewahrung historischer Gebäude und Sammlungen. Die Beschleunigung von Schadensprozessen aufgrund zusätzlicher oder verstärkter Stressfaktoren verkürzt die Wartungszyklen und verursacht damit einhergehend höhere Instandhaltungskosten. Damit wird die Erhaltung vor neue Herausforderungen gestellt. Historische Gebäude sind vielfältigen Schadensmechanismen ausgesetzt. Organische Materialien wie Holz und organische Bindemittel reagieren sensibel auf höhere Temperaturen und Feuchtigkeitsschwankungen, die zu beschleunigter Verwitterung, Schwind- und Quellprozessen, Rissbildung, Fäulnis, Vermorschen, mikrobiologischer Ansiedlung und Schädlingsbefall führen. Mineralische Materialien wie Naturstein, Ziegel, Lehm und Kalk sind anfällig für höheren Feuchteeintrag durch Stark- und Schlagregen, was in Auswaschung, Hohlstellen, Abplatzung, Frostsprengung, Salztransport und -kristallisation, Verlust der Adhäsions- und Kohäsionsfähigkeit sowie Instabilität und Zersetzung der Materialität resultiert.

Das äußere Klima spielt eine entscheidende Rolle. Sonnenstrahlung und Hitze, (Schlag-)Regen und Hochwasser sowie Frost-Tau-Zyklen sind Faktoren, die die Schädigungsprozesse beeinflussen. Moderne Technologien zur restaurierungswissenschaftlichen Bestands- und Zustandserfassung ermöglichen die Schadensdokumentation und Bauteilbewertung. Kontinuierliches Überwachen des Raum- und Außenklimas dokumentieren äußere klimatische Einflüsse auf Gebäudehülle und Innenräume. Mithilfe von Simulations-Werkzeugen wie WUFI® Plus kann man das hygrothermische Verhalten von Gebäuden und Bauteilen unter dem Einfluss des Klimas, einschließlich Hitze und Starkregen, simulieren. Dadurch können die klimatischen Auswirkungen auf ganze städtische Räume analysiert und Anpassungsstrategien entwickelt werden.

Doch auch die Sammlungen in historischen Räumen sind gefährdet. Viele der Kulturgüter bestehen aus Kompositmaterialien – aus Gestein, Holz, Metall, Pigmenten, Naturfasern, Glas oder Email – und zeigen Verfärbung, Rissbildung, Abplatzung, Schrumpf- und Dehnverhalten, Schädlingsbefall und vieles mehr. Das Raumklima beeinflusst die Schadensentstehung. Hohe oder niedrige Raumluftfeuchten und -temperaturen, Wechselbeanspruchungen durch Klimaschwankungen, Schädlingsbefall, Schadstoffbelastung, Luftqualität, Luftwechselrate, UV- und Strahleneinwirkung sowie die Beeinflussung durch Haustechnik sind Indikatoren für mögliche Schäden. Das Monitoring des Mikro-, Raum- und Außenklimas, bildgebende Verfahren und Schadstoff-Analytik ermöglichen die Überwachung und Bewertung von Schadensprozessen. Die Simulation des Innenraumklimas kann die Einschätzung klimatischer Vorgänge in historischen Gebäuden unter Berücksichtigung von Faktoren wie Nutzung, Gebäudevolumen und Haustechnik untersuchen. Dadurch können potenzielle Schadensprozesse durch äußere Einflüsse simuliert und bewertet werden, um passive und aktive Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Ziel ist es, das individuelle Gefahrenpotenzial für Kulturgüter zu bewerten und so die langfristige Erhaltung unseres kulturellen Erbes sicherzustellen.

Auch in historischen Gärten und Parkanlagen sind vermehrt Schadensbilder zu beobachten, die sich auf die Veränderung des Klimas zurückführen lassen. Langanhaltende Dürre wie sie in den Jahren 2018 bis 2023 wiederholt auftrat, schwächt den Gehölzbestand insgesamt. Altbäume verlieren an Vitalität und werden anfälliger für den Befall durch Pilze und Schadinsekten. Sie treiben im Frühjahr

weniger aus, bilden vermehrt Totholz und sterben oft vor Erreichen der eigentlichen Altersgrenze. Junge Gehölze bleiben teilweise in ihrer Entwicklung zurück, Neupflanzungen wachsen oftmals nicht an und haben einen erhöhten Wasserbedarf. Astbrüche nach Sturmereignissen, aber auch unvorhersehbar, treten häufiger auf und stellen ein erhöhtes Risiko dar. Starkregenereignisse führen besonders nach langer Trockenheit zu massiven Erosionsschäden. Das betrifft zum einen die Böden und deren Nährstoffgehalt, zum anderen werden aber auch viele Parkwege, die traditionell ohne Bindemittel hergestellt werden, soweit geschädigt, dass sie immer häufiger wiederhergestellt und aus Sicherheitsgründen für Besuchende gesperrt werden müssen.

## **Anpassungsstrategien für den Erhalt historischer Bauten und Parkanlagen**

Denkmalgeschützte Bauten und historische Parkanlagen sind ein wertvoller Teil unseres kulturellen Erbes. Angesichts der Klimaveränderungen sind maßgeschneiderte Anpassungsstrategien von entscheidender Bedeutung, um ihre Erhaltung zu gewährleisten. Klimaveränderungen führen zunehmend zur Überhitzung der Gebäude, begleitet von einem Risiko zu geringer relativer Feuchte. Dies erfordert eine gezielte Regulierung des Raumklimas. Die museale Nutzung historischer Gebäude bringt einen erhöhten Wärme- und Feuchteeintrag durch Besucher mit sich, was zusätzliche Anpassungsmaßnahmen erforderlich macht. Ein außenliegender Sonnenschutz, wie z. B. die historischen Fensterläden in Charlottenhof, bietet optimalen passiven Wärmeschutz für Gebäude und Sammlung. Ein außenliegender Sonnenschutz ist jedoch aus optischen Gründen oder aufgrund von Denkmalschutzvorgaben aktuell oft nicht möglich, obwohl er dringend erforderlich und deutlich effizienter wäre, deshalb sollten die Möglichkeiten zur Ergänzung eines innenliegenden Sonnenschutzes geprüft werden.

Der Konflikt zwischen der Nutzung historischer Gebäude und dem Erhalt von Exponaten muss angesichts der Klimakrise viel stärker lösungsorientiert diskutiert werden. Historische Bausubstanz und denkmalpflegerische Auflagen begrenzen die Möglichkeiten der Anpassung der Gebäudetechnik erheblich. Die energetische

Ertüchtigung der Fenster kann durch den Austausch von Einfachverglasungen, Abdichtung und möglicherweise den Einsatz von Kastenfenstern in Abstimmung mit der Denkmalpflege erfolgen. Eine verbesserte Lüftung, wie die Nachtlüftung, ist theoretisch sinnvoll, wird jedoch durch Einbruchschutz und fehlende Automatisierung erschwert. Der Einbau einer automatisierten Lüftung würde erhebliche bauliche Eingriffe in die historische Substanz erfordern, wodurch eine solche Maßnahme in der Regel schwer umzusetzen ist. Alternativ ist der Einsatz mobiler Kühlanlagen und Entfeuchter denkbar, dieser ist jedoch mit der Gefahr verbunden, dass Klimaschwankungen im Tagesverlauf verstärkt werden. Zudem entstünde ein höherer Energie- und Personalaufwand. Als letzte Möglichkeit bleibt die temporäre Schließung von Gebäuden in den Sommermonaten bei zu hohen Temperaturen im Innenraum, um Besucherinnen und Besucher vor gesundheitlichen Risiken durch die hohen Temperaturen zu bewahren.

In den historischen Parkanlagen werden verschiedene Strategien für die langfristige Anpassung an die Klimaveränderungen verfolgt. So werden Parkwege nachhaltig instandgesetzt, bspw. durch Verwendung stabilerer Materialien, die dennoch den Ansprüchen des Gartendenkmals gerecht werden. Zudem ist der Ausbau der Wegeentwässerungssysteme von großer Bedeutung, um Starkregenereignisse kompensieren zu können und gleichzeitig möglichst viel Wasser in Hinblick auf kommende Dürreperioden in der Fläche zurückzuhalten. Dies erfolgt zum einen über den Ausbau der bestehenden Systeme sowie über den Einbau zusätzlicher Schächte, Rigolen und Entwässerungsrinnen, die Wasser in die angrenzenden Vegetationsflächen leiten. Auch hier wird die Verträglichkeit mit dem Denkmal bei der Gestaltung und Planung berücksichtigt. Im Gehölzbestand werden Altbäume gezielt durch Bodenverbesserungsmaßnahmen (z. B. Huminstoffe, Kompost) gefördert. Parallel wird am Erhalt des gesamten Gehölzbestandes gearbeitet. Nachpflanzungen spielen hier eine entscheidende Rolle, und so wird auf mehreren Flächen in den Parkanlagen die Naturverjüngung gefördert, um resiliente Junggehölze aus dem eigenen Bestand zu entwickeln. Das Prinzip der Eigenwerbung wird inzwischen dem Einkauf von Gehölzen aus konventionellen Baumschulen vorgezogen, da die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, dass Bäume, die bereits unter schwierigen Bedingungen aufwachsen, größere Chancen auf eine erfolgreiche Entwicklung haben. In der Pflege der Parkanlagen wird daran gearbeitet

den Wasserverbrauch zu reduzieren und gleichzeitig den Rückhalt in den Flächen zu erhöhen. Maßnahmen sind bspw. die Anpassung des Bewässerungsregimes um Verdunstung zu reduzieren (in den Sommermonaten vorzugsweise in den frühen Morgenstunden), ressourcenschonende Tropfbewässerung und Bodenschutz durch Mulchen. Nicht alle Maßnahmen sind in allen Bereichen umsetzbar, und die Vereinbarung mit dem Denkmalstatus erfordert oft besondere Sensibilität, Kreativität sowie ausreichend gut ausgebildetes Personal. Dennoch scheinen die Ansätze vielversprechend, um den Erhalt der historischen Gärten für die zukünftigen Generationen zu gewährleisten.

Das KERES-Projekt hat erstmals in Deutschland die zukünftigen Extremklimaereignisse bis 2100 und ihre Auswirkungen auf das gebaute Kulturerbe und historische Gärten untersucht. Die Ergebnisse müssen nun genutzt werden, um so schnell wie möglich Maßnahmen zur Klimaadaptation der Kulturgüter zu entwickeln und umzusetzen. Weitere Forschung ist dringend nötig, um die Kulturgüter in Zeiten des Klimawandels nachhaltig für nächste Generationen zu erhalten.



## Danksagung

Unser Dank gilt den Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartnern aus den KERES-Fallstudien und dem KERES-Expertengremium, die das Projekt mit großem Engagement unterstützt haben und den Erfolg des Projekts erst ermöglicht haben. Im Besonderen (in alphabetischer Reihenfolge):

Wulf Eckermann, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg

Dieter Gottschalk, Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim

Antje Lachowicz, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg

Kathrin Lange, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg

Dr. Herbert May, Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim

Susanne Reißmann, Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen

Dr. Markus Rodenberg, Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim

Dr. Katrin Wittstadt, Dombauhütte Kölner Dom

### KERES-Fallstudien

Potsdam: UNESCO-Welterbe Park Sanssouci, Park Babelsberg und Schloss Charlottenhof

Köln: UNESCO-Welterbe Kölner Dom

Hamburg: UNESCO-Welterbe Speicherstadt und Chilehaus

Bad Windsheim: Fränkisches Freilandmuseum Bad Windsheim

Sufferloh: Frauenbergkapelle

### KERES-Expertengremium

#### Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

Brand- und Katastrophenschutzamt Landeshauptstadt Dresden

Bundesanstalt Technisches Hilfswerk, Bereich Strategie und Steuerung, Forschung

Landesfeuerwehrverband Bayern e.V.

#### Kulturerbeeinrichtungen

Generaldirektion Kulturelles Erbe, Rheinland-Pfalz

Staatliche Schlösser und Gärten, Baden-Württemberg

Römisch-Germanisches Zentralmuseum/Leibniz-Forschungsinstitut für Archäologie

Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen

Kulturstiftung Dessau-Wörlitz

Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement, Zwingerbauhütte

Westfälisches Landesmuseum für Industriekultur

Ephorate of Antiquities of Heraklion

### Verbände, Behörden u.a.

ICOMOS Deutschland

Deutsche Gesellschaft für Kulturgutschutz e.V.

SiLK – Sicherheitsleitfaden Kulturgut

Verband der Landesdenkmalpfleger

Kultur und Arbeit e.V.

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen

Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie, Landesmuseum

Landeshauptstadt Potsdam, Fachbereich Klima, Umwelt und Grünflächen

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

### Wissenschaft und Forschung

Max-Planck-Institut für Meteorologie

Universität Potsdam, Institut für Umweltwissenschaften und Geographie

Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung – IASS Potsdam

Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Institut für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte

Technische Universität Dresden, Institut für Forstbotanik und Forstzoologie

Freie Universität Berlin, Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin-Dahlem

Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Fachgebiet Waldschutz & Risikomanagement

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Vegetationstechnik und Pflanzenverwendung, Fakultät VI, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung

Helmholtz-Centre for Environmental Research UFZ/ Friedrich Schiller University

Jena, German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv)

Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

Ingenieurgemeinschaft „Ingenieure für das Bauwesen – Prof. Hillemeier & Knapp GmbH“/ Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte

Freie Universität Berlin, Fachbereich Geowissenschaften, Institut für Geo-

graphische Wissenschaften, Fernerkundung und Geoinformatik

Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum

### Autorinnen und Autoren

Dr. Stefan Bichlmair, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Julian Fetoski, ehem. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Dr. Ksenia Gorges, Climate Service Center Germany (GERICS)

Tobias Hellmund, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB

Johanna Henning, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Prof. Dr. Ralf Kilian, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Dr. Lola Kotova, Climate Service Center Germany (GERICS)

Thomas Koutalidis, ehem. Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

Dr. Johanna Leissner, Fraunhofer EU-Büro Brüssel

Katharina Matheja, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg

Dr. Jürgen Moßgraber, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB

Uta Pollmer, Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW

Franziska Prell, ehem. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Jürgen Reuter, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und

Bildauswertung IOSB

Prof. Dr. Michael Rohde, Stiftung Preußische Schlösser und Gärten

Berlin-Brandenburg

Sebastian Stadler, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Julia Tammert, ehem. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Matthias Winkler, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Wolfgang Zillig, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

44

*Es liegen hierzulande immer noch zu wenig belastbare Daten vor – zu den quantitativen Auswirkungen von zukünftigen Extremwetterereignissen auf die Erhaltung unserer Kulturgüter und zu der Frage, welche Sicherheitsrisiken sich daraus ergeben. ... Die Erkenntnisse der nun vorliegenden Forschungsergebnisse sind eine wesentliche Grundlage für den Schutz und die Resilienz unserer Kulturgüter.*

*Prof. Dr. Christoph Martin Vogtherr  
Generaldirektor der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg*

”

© Fraunhofer IRB Verlag, 2024

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 9 70 -25 00

Telefax +49 7 11 9 70 -25 08

[irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

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

Layout: Strange Designs UG, [www.strangedesigns.de](http://www.strangedesigns.de)

Druck: Esser printSolutions GmbH, Bretten

ISBN (Print): 978-3-7388-0863-6

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0864-3

Alle Rechte vorbehalten.