



Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht HAL 55 / 2018

**Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige
Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen
in Sachsen-Anhalt
- Abschlussbericht -**

Projektlaufzeit: 10.03.2015 - 20.12.2018

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projekt AZ 32576/01

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Berichterstattung:

Institut für Diagnostik und Konservierung
an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Dipl.-Min. Matthias Zötzl
Prof. Dr. Wolfgang Gossel
Dipl.-Arch. (FH) Susann Bähre
Prof. Dr. Jeannine Meinhardt

Anzahl der Seiten: 25

Anzahl der Anlagen: 5

Halle, den 09.08.2018



EVANGELISCHE KIRCHE
IN MITTELDEUTSCHLAND



MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Untersuchungsmethoden.....	8
2.1	Methoden der Voruntersuchungen am Bauwerk.....	8
2.2	Hydro- und ingenieurgeologische Vor-Ort- Untersuchungen.....	8
2.3	Laboruntersuchungen und erste Auswertungsmethoden.....	8
2.4	Modelluntersuchungen.....	9
3	Untersuchungsobjekte.....	9
4	Übersicht der Ergebnisse.....	12
4.1	Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen.....	12
4.1.1	Schäden.....	12
4.1.2	Putzmusterflächen.....	12
4.1.3	Vertikalsperren.....	13
4.2	Übersicht der hydrogeologischen Untersuchungen.....	14
4.3	Übersicht ingenieurgeologische Untersuchungen.....	15
5	Ergebnisse und Maßnahmeempfehlungen im Einzelnen.....	16
5.1	Kirche Sydow.....	16
5.2	Kirche Räbel.....	17
5.3	Kirche Gottesgnaden (Calbe).....	18
5.4	Kirche Ostrau (Elsteraue).....	19
5.5	Kirche Gruna (bei Laußig).....	20
5.6	Kirche Wölkau.....	20
5.7	Merseburg, Neumarktkirche.....	20
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	21
7	Öffentlichkeitsarbeit.....	22
8	Literatur.....	23
9	Danksagung.....	24
10	Autorenverzeichnis, Anschrift der Verfasser.....	24
11	Anlagen.....	25

Antragsteller

Landeskirchenamt der Evangelischen Kirche in Mitteldeutschland, Dienstort Magdeburg, Referat F3,
Am Dom 2, 39104 Magdeburg
Ansprechpartner: Dipl.-Arch. (FH) Susann Bähre
susann.baehre@ekm.de

Projektpartner

Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.
Domplatz 3
06108 Halle
Ansprechpartner: Dipl.-Min. Matthias Zötzl
zoetzl@idk-denkmal.de

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Geowissenschaften
Von-Seckendorff-Platz 3
06120 Halle
Ansprechpartner: Apl. Prof. Dr. Wolfgang Gossel,
wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt
Große Märkerstr.21/22
06108 Halle

Kurzfassung: In den letzten Jahren kam es in vielen Regionen Deutschlands, ausgelöst durch Starkregen und/ oder Dauerregenereignisse, häufiger zu Hochwassern. Die hohen Wasserstände in den Flüssen nehmen auf Grund hydrogeologischer Gesetzmäßigkeiten erheblichen Einfluss auf den Grundwasserspiegel. Vor diesem Hintergrund ergeben sich Probleme für historische Gebäude, auch wenn diese nicht direkt im Überflutungsbereich der Flüsse stehen. An sechs Kirchen aus dem Verantwortungsbereich der Evangelischen Kirche in Mitteldeutschland, die sich durch besondere Grundwasserhochstände während des Hochwassers 2013 auszeichnen, sind Grundwassermessstellen mit dem Ziel eingerichtet worden, die jeweiligen konkreten Zusammenhänge zwischen Grundwasser- und Oberflächenwasserständen zu untersuchen. Darüber hinaus erfolgten in den Kirchen umfassende Mauerwerksanalysen und Raumklimamessungen. Die Zusammenhänge zwischen hochwasserinduzierten Grundwasserhochständen, dem Raumklima und dem Zustand der Bausubstanz wurden ermittelt, Möglichkeiten der aktiven und passiven Beeinflussung des Grundwasserspiegels bei Grundwasserhochständen in Objektnähe eruiert. Die Eignung möglichst einfacher baulicher Maßnahmen zur Optimierung der Trocknung des Mauerwerks wurden untersucht und Effektivität der angewendeten Methoden überprüft und bewertet.

1 Einleitung

In der jüngeren Vergangenheit kam es in vielen Regionen Europas, ausgelöst durch Starkregenereignisse und/oder langandauernde Regenfälle, häufiger zu Hochwassern (Kundzewicz 2011, Min. f. Landw. u. Umwelt Sachsen-Anhalt 2013). Diese Entwicklung beruht nachweislich, zumindest anteilig, auf einer anthropogen verursachten Klimaveränderung (Kundzewicz 2011). Ereignisse, die man als Jahrhunderthochwasser (HQ 100) klassifiziert, folgten innerhalb nur weniger Jahre aufeinander (Kundzewicz 2011). Hochwasser in den Flüssen nehmen aufgrund hydrogeologischer Gesetzmäßigkeiten erheblichen Einfluss auf den Grundwasserspiegel. Vor diesem Hintergrund ergeben sich auch zunehmend Probleme für historische Gebäude, die zwar nicht direkt im Überflutungsbereich der Flüsse stehen, wohl aber durch Grundwasserhochstände betroffen sind, die ihrerseits zu Schäden führen können.

Der unmittelbare Einfluss beider Wasserkörper, Vorfluter und Grundwasser, aufeinander, ist in der Hydrogeologie Gegenstand der Forschung bzw. Stand des Wissens. In Abb. 1 ist die Abhängigkeit beider Wasserkörper voneinander dargestellt. Bei normalem Wasserstand im Vorfluter herrschen effluente Verhältnisse vor, da der Grundwasserspiegel in Flussnähe absinkt und Grundwasser aus dem Grundwasserleiter in die Vorflut abfließt. Durch Flutereignisse ist der Wasserspiegel im Vorfluter höher als das hydraulische Potenzial des Grundwassers. Das Wasser fließt in den Grundwasserleiter hinein. Man spricht von influenten Verhältnissen. Der Grundwasserstand steigt im gezeigten Fall in den Bereich des Fundaments (siehe türkisfarbene Linie in Abb. 1).

Feuchtigkeit gilt im Bereich der Baudenkmalpflege als Hauptschadensfaktor. In Form von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen setzt sie ihre Wirkung an den Baumaterialien um. Durch die Wasseraufnahme gelangen meist auch Salze in das Mauerwerk und führen ihrerseits zur Akkumulation von Feuchtigkeit (Hygroskopizität) und gefügezerstörenden Prozessen. Dies führt zur Schädigung von Fußboden, Putz und Mauerwerk in den Fundament- und Sockelbereichen. Aber auch, über eine Beeinflussung des Raumklimas, zu Schäden an höher liegenden Oberflächen mit historischen Fassungen (Wandmalereien) und Inventar. Bei starker Befeuchtung bestimmter Bodentypen sind Setzungen mit entsprechenden Schadbildern an den Objekten möglich. Schäden, die aus hohen Grundwasserständen resultieren, können ggf. durch kurzfristige und den Wasserhaushalt nur gering beeinflussende aktive Maßnahmen reduziert oder gar vermieden werden.

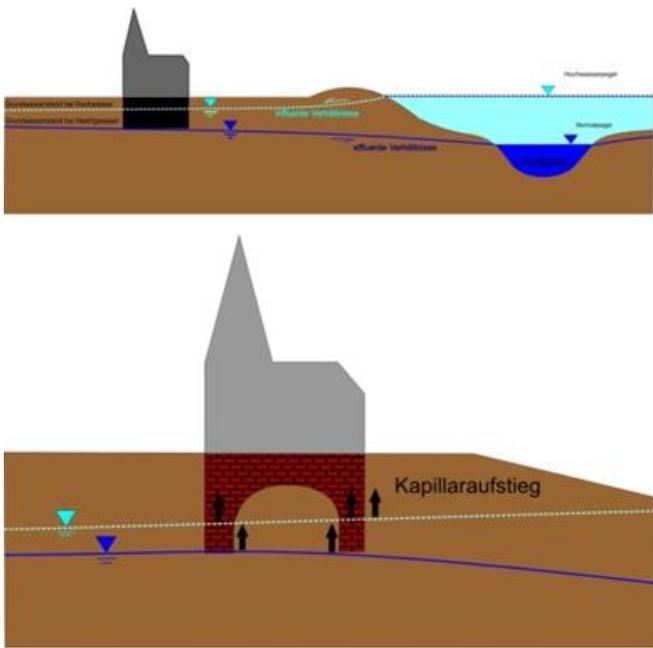


Abb. 1 Oben: Grundwasserspiegel in Abhängigkeit vom Oberflächenwasserspiegel. Unten: Mögliche Beeinflussung des Gebäudes durch steigenden Grundwasserdruck: Vernässung der Fundamente, Kapillaraufstieg innerhalb und außerhalb des Mauerwerks



Abb. 2 Untersuchungsobjekte und ihre Vorfluter: Räbel (bei Havelberg), Kirche - nah zur Elbe; Sydow (südl. Stendal bei Tangermünde), Kirche - weit entfernt von der Elbe; Gottesgnaden (bei Calbe), Kirche - nah zur Saale bzw. zum Graben, Gruna (bei Eilenburg), Kirche - nah zur Weißen Elster; Merseburg, Neumarktkirche - sehr nah zur Saale; Ostrau (Elsteraue), Kirche - nah zur Weißen Elster bzw. zum Graben

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützte Forschungsprojekt „Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt“ wurde unter Leitung des Landeskirchenamtes der Evangelischen Kirche Mitteldeutschlands (EKM), in Kooperation mit dem Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) und dem Institut für Geowissenschaften und Geographie, Fachgruppe Hydro- und Umweltgeologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU) im Zeitraum März 2015 bis Dezember 2018 bearbeitet. Im Zusammenhang mit dem Projekt wurden hydro- und ingenieurgeologische Fragestellungen in praxisnahen Bachelor- und Masterarbeiten an der MLU bearbeitet. Die Ergebnisse dieser fließen direkt in die Projektbearbeitung ein. Im Rahmen eines Abschlusskolloquiums am 8. März 2018, im großen Saal der Domgemeinde in Halle, wurden die Projektergebnisse durch die Projektpartner präsentiert. Der alle Projektergebnisse und Maßnahmenempfehlungen zusammenfassende Abschlussbericht wird Ende des Jahres 2018 veröffentlicht.

Die im Projekt erarbeiteten und in diesem Beitrag präsentierten Ergebnisse stellen eine Schlussbilanz dar und sollen zum Verständnis eines möglichen Einflusses hochwasserinduzierter Grundwasseranstiege auf die historische Bausubstanz beitragen, Maßnahmen zur Vermeidung möglicher Schäden vorstellen und die Eignung möglichst einfacher baulicher Maßnahmen zur Optimierung der Trocknung des Mauerwerks nach einer Beeinflussung empfehlen.

Forschungsgegenstand sind sechs Kirchen in Sachsen-Anhalt, da hier in Folge des Hochwassers im Jahr 2013 in den Flüssen Elbe, Saale und Mulde in besonderem Maße Schäden aufgetreten sind. Die EKM hat ca. 4000 Kirchen und noch einmal so viele Gemeinde- und Pfarrhäuser in Thüringen, Sachsen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt in ihrer Verantwortung. Die mittelalterlichen Kirchen wurden zumeist auf höher liegenden Standorten der Siedlungen errichtet, so dass eine Vielzahl der Bauwerke erfreulicherweise außerhalb des Einflussbereichs von Hoch- und Grundwasser liegen. Dennoch gibt es auch zahlreiche Kirchen, die im Einflussbereich der Gewässer liegen und somit immer wieder zumindest gefährdet sind, vom Hoch- und Grundwasser erreicht zu werden. Damit sind gegebenenfalls Schädigungen der Bausubstanz, aber auch der Ausstattung der Kirchen zu erwarten. Die EKM verfügt nur über begrenzte finanzielle Mittel, so dass Schäden durch Hochwasser- und Grundwasserhochstände stets eine zusätzliche Last zu den geplanten Baumaßnahmen bedeuten.

Vor diesem Hintergrund und vor allem im Sinne einer Vermeidung von feuchteinduzierten Schäden, besteht ein sehr großes Interesse an der Prozessanalyse und Maßnahmenableitung für die Sanierung/Restaurierung und Vorsorge vergangener und künftiger stark erhöhter Grundwasserstände.

Für die Analyse der Zusammenhänge zwischen Grundwasserständen, Wetterphänomenen und Oberflächenwasserständen wurden Vor-Ort-Untersuchungen, Laboranalysen und Modellierungen zur Hydrogeologie und Ingenieurgeologie durchgeführt. Basis der Untersuchungen bildeten Grundwassermessstellen, die an allen im Forschungsvorhaben berücksichtigten Kirchen im näheren Umfeld installiert und mit automatischen Messwertschreibern (Datenloggern) ausgestattet wurden. Der kontinuierlich gemessene Wasserspiegel wurde im Verhältnis zum Pegelstand des dazugehörigen Vorfluters betrachtet. Die statistische und analytische Auswertung der Messungen wird zur Ermittlung der für die weiteren Schritte notwendigen Parameter herangezogen. Mit Hilfe der Parameter können numerische Grundwasserströmungsmodelle erstellt und so Extremereignisse prognostiziert werden.

Darüber hinaus erfolgten in den Kirchen umfassende Mauerwerksanalysen und Raumklimamessungen. Die Zusammenhänge zwischen hochwasserinduzierten Grundwasserhochständen, dem Raumklima und dem Zustand der Bausubstanz wurden ermittelt, Möglichkeiten der aktiven und passiven Beeinflussung des Grundwasserspiegels bei Grundwasserhochständen in Objektnähe eruiert. Die Eignung möglichst einfacher baulicher Maßnahmen zur Optimierung der Trocknung des Mauerwerks wurden untersucht und die Effektivität der angewendeten Methoden überprüft und bewertet.

Übersicht der Projektziele

1. Darstellung der direkten Abhängigkeit des Grundwasserspiegels vom Niveau des Vorfluters bzw. des Hochwassers durch Installation von Grundwassermessstellen im näheren Umfeld der Kirchen.
2. Modellierung von Grundwasserströmungsmodellen
3. Prüfung einer aktiven Beeinflussung des Grundwasserspiegels am Objekt bei Grundwasserhochstand Vergleich verschiedener Maßnahmen wie z.B. Pumpszenarien, Abdichtungsmaßnahmen unter ökologischen und ökonomischen Kriterien
4. Ableitung von Handlungsempfehlungen (Zuarbeit zum Notfallplan), Reaktion auf die Pegelhöhe des Vorfluters (Fluss) bei Wasseranstieg: Empfehlung technischer Lösungen z.B. Einsatz von Pumpen zur Absenkung des Grundwasserspiegels am Objekt, Bohrung von Brunnen, Festlegungen zur Einleitung von Pumpwasser, Absprachen mit den Gemeinden
5. Untersuchungen der Schäden (Mauerwerksuntersuchungen)
6. Prüfung des Einsatzes möglichst einfacher baulicher Eingriffe zur Optimierung der Trocknung des Mauerwerkes und Fußbodens nach erfolgter Flutung. Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen, Anlage und Bewertung von Putzmusterflächen
7. Evaluierung der in den vergangenen 10-15 Jahren in der Baupraxis der Denkmalpflege verwendeten Materialien und Methoden der Vertikalabspernung im Fundamentbereich. Visuelle und ggf. messtechnische Nachbetrachtung der Effektivität und Dauerhaftigkeit.

2 Untersuchungsverfahren

Das generelle Untersuchungsprogramm sah für jede der Kirchen zunächst Vor-Ort-Untersuchungen zur Hydrogeologie mit Probenahmen, hydrochemische Laboruntersuchungen, ingenieurgeologische Auswertungen und anschließend hydro- und ingenieurgeologische Modellierungen vor. Parallel liefen die Untersuchungen zur Behebung der Schäden des letzten Hochwasserereignisses an Putzen, Mauerwerk, Böden und Inventar der Kirchen.

2.1 Methoden der Voruntersuchungen am Bauwerk

Der Einfluss ermittelter Grundwasserhochstände auf das Raumklima (über eine Befeuchtung der Fundamente und Wandflächen in den Sockelbereichen) der jeweiligen Kirche wurde betrachtet und in allen Kirchen Klimadatenlogger installiert. Die Ermittlung der Mauerwerksfeuchte- und Schadsalzbelastung erfolgte höhenabhängig mittels Bohrmehltiefenprofilen. Des Weiteren wurde der Einsatz möglichst einfacher baulicher Maßnahmen zur Optimierung der Trocknung des Mauerwerks und des Fußbodens an jeder Kirche überprüft, Putzmusterflächen angelegt und evaluiert sowie Empfehlungen zum baulich-restauratorischen Vorgehen gegeben. Die Funktion und Dauerhaftigkeit bestehender Vertikalsperren wurde an ausgewählten Kirchen überprüft.

2.2 Hydro- und ingenieurgeologische Vor-Ort- Untersuchungen

Die erste Aufgabe war die Gewinnung von Bodenproben und die Errichtung von Grundwassermessstellen zur kontinuierlichen Aufnahme der Grundwasserstände. Hierfür wurden in 80 mm Bohrungen 50 mm Rohre mit 1 m Filterstrecke eingesetzt, um den Grundwasserkontaktbereich und die oberste Grundwasserlamelle erfassen zu können. Die Rohroberkante wurde relativ zu den Türschwellen der Kirchen eingemessen, um die Beeinflussung der Fußböden und Fundamente bei Grundwasserspiegelanstiegen abschätzen zu können. Aufgrund der Verhältnisse vor Ort konnten leider nicht in allen Fällen zwei Grundwassermessstellen gebaut werden. An einer Kirche war der Abstand zur Vorflut so groß, dass eine Grundwassermessstelle auf halbem Weg an einer weiteren, höher gelegenen und vom letzten Hochwasser nicht betroffenen Kirche eingesetzt wurde. Die Oberflächenwasserstände wurden von der zuständigen amtlichen Seite (meist über Internet verfügbar) abgefragt. Weiterhin wurde eine Grundwasserprobe genommen, um mögliche chemische Beeinflussungen feststellen zu können. Aufbauend auf den Ergebnissen der Bohrungen wurden an zwei Kirchen Rammsondierungen durchgeführt, um die Auswirkungen von Hochwässern auf die Baugrundsituation besser einschätzen zu können. In den gesetzten Grundwassermessstellen wurden je nach Möglichkeit Slug&Bail Tests oder Kurzzeit-Pumpversuche durchgeführt. Hierdurch wurden die lokalen hydraulischen Durchlässigkeiten bestimmt.

2.3 Laboruntersuchungen und erste Auswertungsmethoden

Die nach den Geländearbeiten folgenden Laboruntersuchungen umfassten ionenchromatographische Analysen des Grundwasserchemismus und die ingenieurgeologischen Untersuchungen des erbohrten Bodenmaterials der Kirchen Gottesgnaden und Gruna in Form von Druck- und Scherversuchen, Dichte- und Porositätsbestimmungen.

Aufbauend auf den Wasserstandsganglinien wurden nach einem Jahr die großräumigen hydraulischen Durchlässigkeiten analytisch nach Langguth & Voigt (1980) bestimmt. Diese integrale Analyse gibt gleichzeitig erste Auskunft über die Reaktionszeiten zwischen einem Alarmwasserstand des nächsten sinnvollen Gewässerpegels und den einzuleitenden Maßnahmen zum Schutz der jeweiligen Kirche.

2.4 Modelluntersuchungen

Aus den Messdaten wurden numerische hydrogeologische Modelle erstellt, indem die Parameter aus den Feld- und Laboruntersuchungen und die Randbedingungen aus den Wasserständen der Oberflächengewässer übernommen wurden. Die Kalibrierung der instationären Modelle erfolgte auf Basis der Messwerte des Jahres. Das prognostische Szenario bezog sich auf die Hochwasserstände 2013.

Aus den numerischen Grundwassermodellen konnte dann eine Vielzahl praxisrelevanter Größen abgeleitet werden:

- Eignung verschiedener Schutzmaßnahmen.
- Umfang der Schutzmaßnahmen.
- Alarmpegel der Oberflächengewässer (am besten über Internet abrufbar).
- Reaktionszeiten vom Erreichen des Alarmpegels bis zur Aktivierung der Schutzmaßnahmen.
- Dauer der Aufrechterhaltung von Schutzmaßnahmen nach Rückgang des Hochwassers.

3 Untersuchungsobjekte

Die Grundlage für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes bilden insgesamt sechs Kirchen aus dem Verantwortungsbereich der EKM, die sich nach Aussage der Baureferenten durch wiederkehrende Grundwasserhochstände auszeichnen. Die Kirchen repräsentieren verschiedene Baustile bzw. Baumaterialien und zeigen unterschiedliche Entfernungen zum jeweiligen Vorfluter (Abb. 2). Darüber hinaus sind sie in verschiedenen geologischen Umgebungen gegründet, die einen entscheidenden Einfluss auf die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der Bausubstanz haben.

Nachfolgend werden die untersuchten Kirchen hinsichtlich ihrer Bausubstanz kurz charakterisiert.

Räbel, Kirche (bei Havelberg)

Die Kirche (Abb. 3) wurde in Backstein erbaut, sie besteht aus einem Saal mit polygonalem Chor (Ende 13. Jh.) (DIS-LSA). Die Backsteine (Schwachbrand) zeigen bereits deutliche Schäden. Die Kirche grenzt mit dem Chor direkt an den Deich zur Elbe bzw. bindet direkt darin ein. In Hochwassersituationen kommt es bereits aus dem Oberflächenwasser zu einer massiven Befeuchtung durch Sickerwasser im Deich.

Sydow, Kirche (bei Tangermünde)

Im Kern handelt es sich um eine spätromanische Backsteinkirche (Abb. 4) des vollständigen, vierteiligen Typs, bestehend aus Saal, eingezogenem überwölbtem Chor und halbrunder Apsis (um 1250). Der Chor wurde in der Renaissance (1616/17) stark umgebaut (DIS-LSA). Neuzeitlich wurde die Kirche mit einem Verputz versehen, der die architektonische Wirkung stark beschneidet. 2010 wurden im Bereich der Apsis und des Chores Mauerwerksanierungen durchgeführt. Die Kirche liegt weit vom Vorfluter Elbe entfernt (östlich der Elbe, ca. 10 km).

Gottesgnaden, Kirche St. Maria und St. Johannes (bei Calbe (Saale))

Es handelt sich um einen Bruchsteinbau, gesetzt in sulfathaltige Mörtel, mit gedrunenem Westquerturm, einem Schiff in Breite des Turmes und einem eingezogenen Chor. Die Kirche (Abb. 5) wurde nach 1207 als Kapelle des Hospitals des Klosters Gottesgnaden geweiht. Der Chor wurde gotisch und das Schiff 1710 überformt (DIS-LSA).

In unmittelbarer Nähe verläuft die Saale, die in bei Gottesgnaden durch eine Schleusenkammer geführt wird. Die Kirche ist umgeben von Hochwasserschutzdeichen.



Abb. 3 Räbel, Kirche, in unmittelbare Nähe zur Elbe, Chor bindet direkt in Deich ein



Abb. 4 Sydow, Kirche, ca. 10 km von der Elbe entfernt



Abb. 5 Gottesgnaden, Kirche St. Maria und Johannes



Abb. 6 Merseburg, Neumarktkirche, St. Thomae



Abb. 7 Gruna, Kirche



Abb. 8 Ostrau (Elsteraue), Dorfkirche



Abb. 9 Wölkau, Kirche



Abb. 10 Räbel, Kirche, erhebliche Schäden



Abb. 11 Sydow, Kirche, Schäden



Abb. 12 Gottesgnaden, Kirche, Schäden

Merseburg, Neumarktkirche St. Thomae

Die romanische Kreuzbasilika (Abb. 6) mit fehlendem nördlichen Seitenschiff wurde in einer Urkunde Kaiser Friedrichs I. Barbarossa 1188 erstmals erwähnt. 1991-95 wurde die Kirche umfassend saniert und der Fußboden, welcher als Ausgleich für den gestiegenen Saalespiegel angehoben wurde, auf sein ursprüngliches Niveau abgesenkt. Die Kirche ist durch unmittelbare Nähe zur Saale stark von durch Hoch- und Grundwasseranstiege betroffen.

Gruna, Kirche (bei Laußig)

Die barocke Chorturmkirche (Abb. 7) wurde 1715 als verputzter Backsteinbau errichtet (Dehio).

Wölkau, Kirche (bei Eilenburg)

Bei der Kirche Wölkau handelt sich um einen romanischen Sakralbau (Abb. 8), der offenbar nach 1300 um einen gotischen Polygonchor erweitert und im Barock insgesamt überformt wurde (DIS-LSA). Das Sandsteinmauerwerk, in Kalkmörtel gesetzt, steht im Außenmauerwerk unverputzt.

Ostrau, Kirche (Elsteraue)

Die spätgotische Dorfkirche (Abb. 9) erfuhr größere Veränderungen im 17. und 18. Jh. (DIS-LSA). Das Sandsteinmauerwerk, gesetzt in Dolomit-Kalkmörtel, ist verputzt. Die Kirche liegt in einem engen Bogen der Weißen Elster. In unmittelbarer Nähe fließen der Mühlgraben und der Umfluter Ostrau.

4 Übersicht der Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen

Wie aus den Objektbeschreibungen hervorgeht, repräsentieren die Kirchen einerseits Ziegelmauerwerk mit Ziegel unterschiedlicher Brennqualität, gesetzt in Kalkmörtel sowie Bruchsteinmauerwerk in sulfathaltigem Mörtel und Sandsteinmauerwerk im Verbund mit Dolomitmalkmörtel. Aus diesen verschiedenen baulichen Ausgangssituationen ergeben sich mit Hinblick auf die Verfügbarkeit löslicher, bauschädigender Bestandteile und dem kapillaren Saugvermögen im Kontakt mit Feuchtigkeit unterschiedliche Schadensprozesse.

4.1.1 Schäden

In allen sechs Kirchen wurden erhebliche Schäden der Bausubstanz in den Sockel- und Fußbodenbereichen festgestellt, die sich auf eine Feuchtebelastung zurückführen lassen (Abb. 10-12). Neben einer Schädigung durch Anreicherung bauschädigender Salze werden Vergrünungen festgestellt (Abb.10). Die in die Raumluft eingetragene Feuchte verändert das Raumklima, führt zusätzlich zur Kondensation, aber auch zu hygroskopischer Feuchte salzbelasteter Oberflächen. Dazu kommt es zu mikrobiellem Befall von Inventaroberflächen. Die eingetragene Feuchte wird neben der Fundamentbefeuchtung im Hochwasserfall auch zu einem Teil durch die Befeuchtung der Sockel- und Fundamentbereiche über unzureichend weggeleitetes Niederschlagswasser oder fehlende Dachentwässerungen verursacht. Die Ermittlung der Feuchte- und Salzbelastung zeigte in allen Fällen hohe Feuchtwerte in den Sockelzonen, zum Teil führte dies zur Anreicherung von Salzen und damit zu weiteren Schäden. Nach Auswertung der Voruntersuchungen konnten Empfehlungen zur Optimierung der Trocknung sowie flankierende Maßnahmen abgeleitet werden. Diese wurden teilweise im Rahmen der Baumaßnahmen umgesetzt.

4.1.2 Putzmusterflächen

Auf geschädigten Wandbereichen mit Feuchte- und Salzbelastungen erfolgte die Anlage von Putzmusterflächen (Abb. 13) mit unterschiedlichen Materialien. Ein Teil der angelegten Musterflächen wurde beprobt und bewertet. Auf dieser Grundlage konnten Putzsysteme mit passenden Eigenschaften für die Sanierung empfohlen werden, welche neben der Funktionalität auch die Ästhetik der Denkmale berücksichtigen.



Abb. 13 Merseburg, Neumarktkirche, Bewertung verschiedener Putzmuster bei stark durchfeuchtetem Mauerwerk

4.1.3 Vertikalsperren

Vertikalsperren, deren Funktion und Dauerhaftigkeit an ausgewählten Objekten im Projekt mit betrachtet wurden, eignen sich grundsätzlich nicht zur Verhinderung einer grundwasserinduzierten Fundamentbefeuchtung. Die hier aus bauphysikalischer Sicht notwendigen horizontalen Absperrungen des Mauerwerks sollten auf Grund des damit verbundenen massiven Eingriffs in die historische Bausubstanz vermieden werden. Zur Reduzierung des Feuchteintritts durch Schichten- und Niederschlagswasser ist eine Vertikalsperre vielfach zu empfehlen. Eine visuelle Abschätzung der Funktion und Dauerhaftigkeit von Vertikalsperren ist nicht ausreichend für ihre Bewertung. Entscheidend ist die Überprüfung der baulich korrekten Ausführung. Daher ist es notwendig, konkrete Untersuchungen vor Ort durchzuführen, Schürfe anzulegen, um den Einbau der Sperren zu begutachten sowie Materialfeuchten zu analysieren. Im Rahmen des Projekts konnten einige, sich auf die Funktionalität der Sperren auswirkende, Baufehler identifiziert werden. Im Folgenden werden dazu einige Beispiele vorgestellt. Die Abb. 14 zeigt einen Schurf mit freigelegter keilförmig eingebauter Vertikalsperre auf Kaolintonbasis. Der ungeschützte Fundamentbereich unterhalb der Sperre wird weiter durch Schichtenwasser über die leichte Hanglage beaufschlagt. Dies führt trotz Vertikalsperre weiterhin zu extremen Feuchteschäden am Mauerwerk, Putz und Inventar (Abb. 15).



Abb. 14 Schurf mit freigelegter Vertikalsperre: falscher Einbau dieser führt zur „Bewässerung“ des Fundaments durch Schichtenwasser



Abb. 15 Starke Feuchte- und Salzschäden sowie Vergrünungen im Innenbereich

Generell ist es wichtig, ein zum Objekt hinführendes Gefälle zu regulieren, um die Wasserzufuhr zum Objekt zu vermeiden. Um die Befeuchtung von Sockelbereichen zu vermindern, wurden in der Vergangenheit an vielen Objekten das über die Fundamentoberkante, über die Jahrhunderte angewachsene Erdreich abgegraben. Die dabei am Objekt entstandenen Mulden sammeln das über die Fassade abfließende Niederschlagswasser und das Wasser der Umgebung in Fundamentnähe, versickern es dort und führen so zu einer kontinuierlichen Befeuchtung des Fundament- und Sockelbereichs und verhindern einen Abfluss des Niederschlagswassers vom Objekt weg. Die Abb. 16 zeigt eine solche Mulde an der Nordseite der Kirche Sydow. In diesen Fällen ist oft die Anlage eines Sickergrabens, weit genug vom Objekt entfernt, eine gute Lösung. Ein weiterer wichtiger Punkt ist das fachgerechte Abdecken tonhaltiger Vertikalsperren. Es ist notwendig, um eine Befeuchtung und spätere Frostschäden zu vermeiden. In Abb. 17 ist eine unzureichend abgedeckte Vertikalsperre zu sehen. Die Betonplatten sollten direkt an den Sockel heranreichen, um eine kontinuierliche Befeuchtung des ca. 10 cm starken unabgedeckten Streifens über die Fassade und das Gesims mit Niederschlag zu verhindern.



Abb. 16 Mulde an der Nordseite der Kirche Sydow



Abb. 17 Unzureichend abgedeckte Vertikalsperre

4.2 Übersicht der hydrogeologischen Untersuchungen

Die Felduntersuchungen bestätigten in den meisten Fällen die Rechercheergebnisse mit vorwiegend sandigen Untergründen. Lediglich in Wölkau war die Datengrundlage der Recherche räumlich so schlecht, dass die Felduntersuchungen erheblich abweichende Ursachen für die Feuchteschäden hervorbrachte und das Objekt nach einer folgenden mehrmonatigen Messreihe aus der Beobachtung genommen wurde. Die Untergründe, insbesondere der beiden nördlichen Kirchen Räbel und Sydow sowie Ostrau sind unter dem Auelehm aus Sanden aufgebaut. Für Gottesgnaden (Calbe) und Gruna sind die Bohrergebnisse in Abb. 18 wiedergegeben. Die Einmessungen der Grundwassermessstellen relativ zu den Türschwellen zeigten, dass die Abstände zwischen Fußboden und Grundwasserspiegel aufgrund der niedrigen Oberflächenwasserstände so groß waren, dass eine ständige Beeinflussung durch das Grundwasser nicht zu erwarten war. Die Analysen der hydrogeologischen Zusammenhänge zwischen Grundwasser- und Oberflächenwasserständen erbrachten großräumige kf-Werte, die z.T. von den lokalen Werten abwichen. Aus dem Vergleich der Ganglinien von Oberflächen- und Grundwasser sind erste Anhaltspunkte zur Reaktionszeit und zur zu erwartenden Differenz der Wasserspiegel abzulesen (siehe Abb. 19).

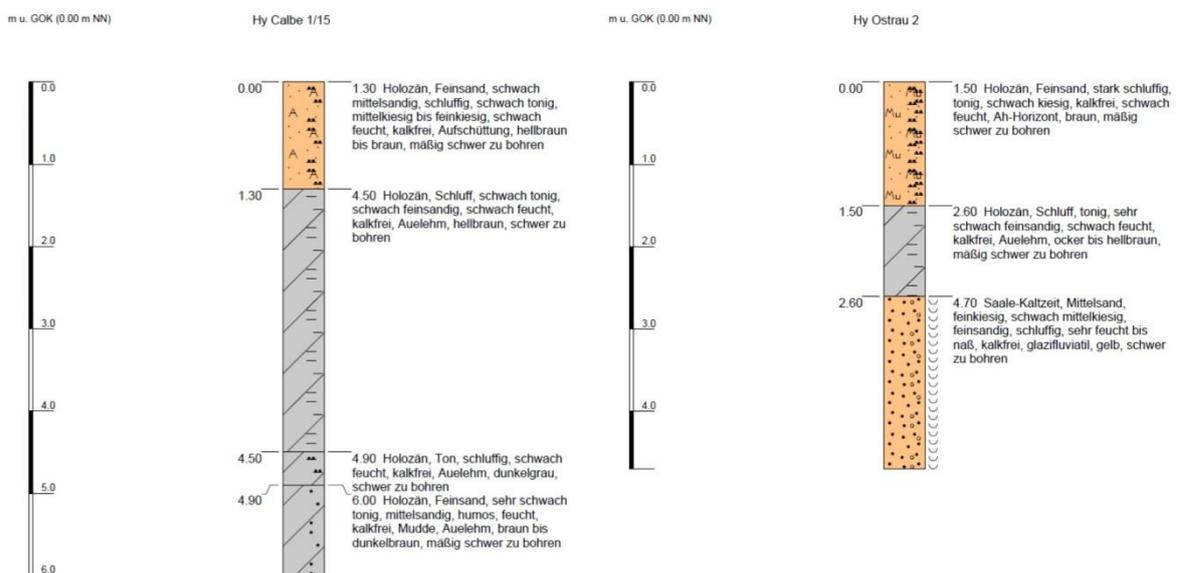


Abb. 18 Bohrerprofile der Standorte Gottesgnaden (links) und Ostrau (rechts)

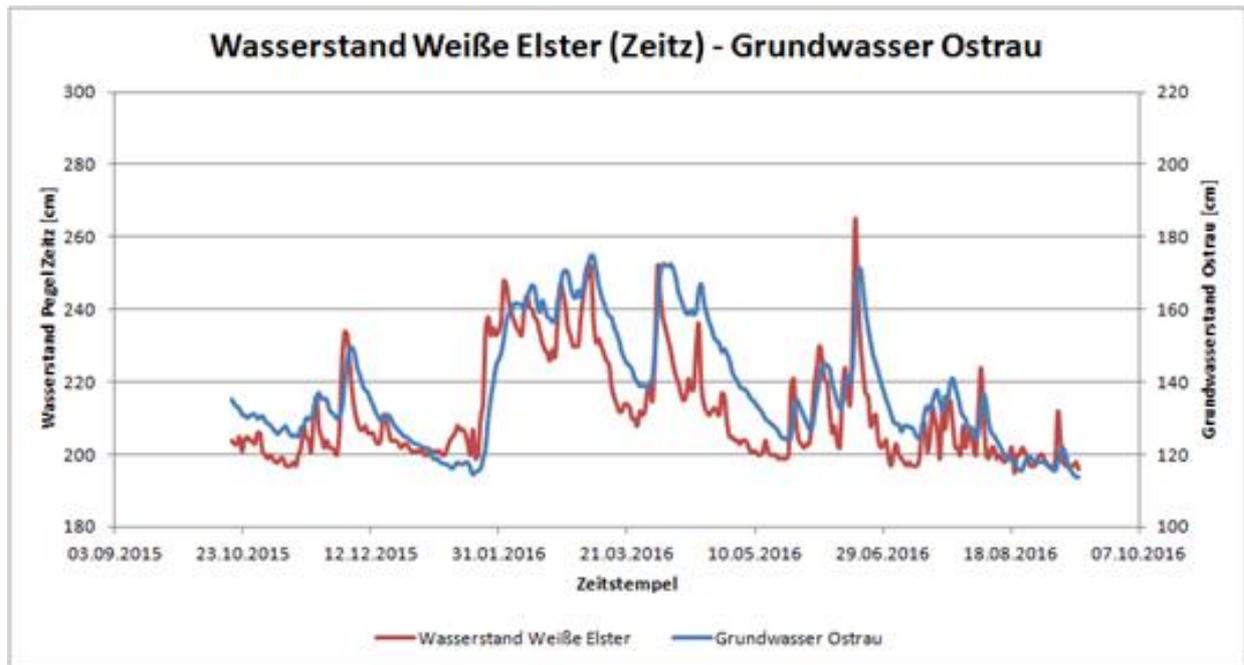


Abb. 19 Ganglinien des Oberflächenwassers der Weißen Elster (Pegel Zeit) und des Grundwassers an der Kirche Ostrau

Der Chemismus des Grundwassers war nur in der Kirche Gottesgnaden (Calbe) bedenklich hoch und wies insbesondere Natriumchlorid und Calciumsulfat auf, die beide geogen bedingt sind.

Ziel der Grundwasserströmungsmodellierung und die Modellierung des Sickerwassers in der ungesättigten Bodenzone zur Ermittlung von Kapillarwasseraufstiegen und Schichtenwasser für einige wenige Objekte sind objektadäquate Schutzmaßnahmen.

Die heterogene Geologie wirkt sich in unterschiedlichen Prozessen auf die Bauwerke aus, so dass auch die zu treffenden Maßnahmen gegen hochwasserbedingte Grundwasserschäden in jedem Einzelfall differenziert werden müssen. Hierfür sind die Grundwasserströmungsmodelle eine unerlässliche Grundlage.

4.3 Übersicht ingenieurgeologische Untersuchungen

Die Rammsondierungen in Gottesgnaden und Gruna zeigten z.T. erschreckende Ergebnisse. Während in Gottesgnaden genügend Probematerial gewonnen werden konnte, war dies in Gruna aufgrund der Versiegelung und deichnahen Lage nicht möglich. Die ingenieurgeologischen Untersuchungen in Gottesgnaden und Gruna wiesen eindeutig nach, dass der Untergrund dieser beiden Kirchen jeweils stark setzungsgefährdet ist. Bei Hochwasser sind die Konsistenzveränderungen so groß, dass die beobachteten Bauwerksschäden (Risse) nahezu eindeutig darauf zurückzuführen sind. Während in Gottesgnaden dies auch in der Vergangenheit häufiger aufgetreten sein müsste, ist in Gruna eine Beeinflussung nur aus sehr hohen Hochwässern möglich.

5 Ergebnisse und Maßnahmeempfehlungen im Einzelnen

5.1 Kirche Sydow

Im Zusammenhang mit dem Elbehochwasser 2013 bzw. dem Deichbruch bei Fischbeck gab es u.a. lange währende Grundwasserhochstände, die einen erheblichen Einfluss auf die Kirche in Sydow genommen haben. Auch wenn das Hochwasser als Oberflächenwasser die Kirche nicht erreichte, kam es durch das hohe Grundwasser zur Durchfeuchtung des Baugrundes und offensichtlich auch des Fundamentmauerwerks. Auch unter Normalbedingungen liegt der Grundwasserspiegel in Sydow nur ca. 80 cm unterhalb der Fundamente. Zu den negativen Einflussfaktoren auf die Kirche gehört allerdings vor allem auch die bislang fehlende Dachentwässerung. Das Regenwasser versickert aktuell noch einfach am Fuß der Außenwand und trägt so erheblich zur Befeuchtung des Mauerwerks bei. Die Modellierungen haben ergeben, dass der Abstand der gut möglichen Regenwasserversickerung vom Mauerwerk von etwa 2 m eingehalten werden muss, um dieses nicht zu schädigen (Abb. 20).

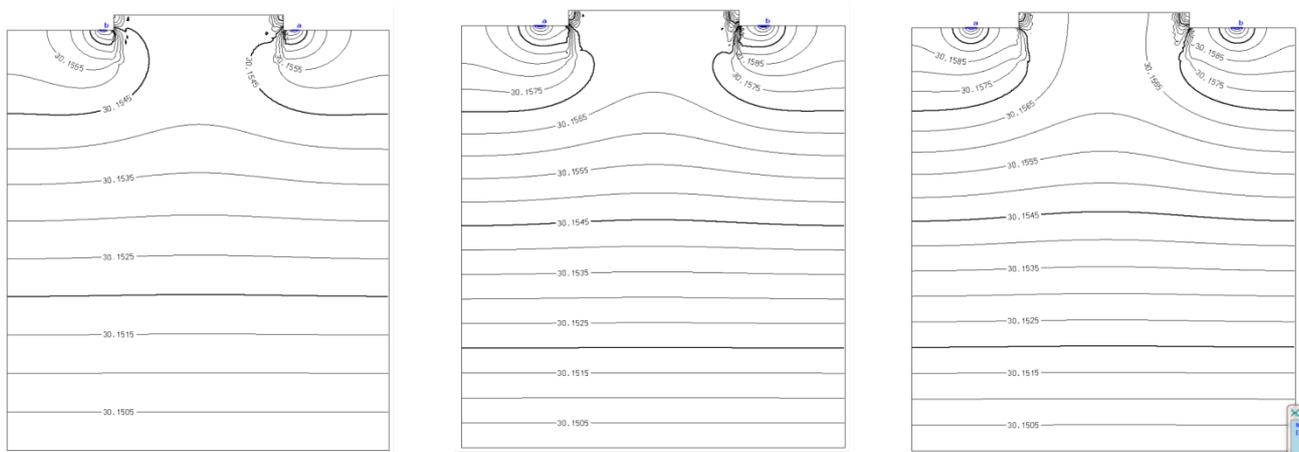


Abb. 20 Sydow, Modelle der Regenwasserversickerung mit Abständen von 0,7 m, 1 m und 2 m vom Objekt

In Sydow ergibt sich eine starke Abhängigkeit der Grundwasserstände von dem umliegenden Grabensystem. Die Abhängigkeit von den großen Vorflutern Elbe und Havel ist jedoch aus den Grundwasserganglinien nicht erkennbar. Die sandigen, gut hydraulisch leitenden Gesteine (k_f -Wert $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s) sorgen für einen guten und schnellen Austausch zwischen Grund- und Oberflächenwasser. Grundwassergeringleiter sind bis in Tiefen von 5 m zu vernachlässigen. Als vorsorgende Maßnahme ist daher unbedingt die Pflege der Entwässerungsgräben und die Gewährleistung des Abflusses während eines Hochwassers zu nennen. Weitere hydraulische Maßnahmen brauchen nicht eingeleitet zu werden.

Die Mauerwerksfeuchten sind insbesondere in den bodennahen Profilen durchgehend sehr hoch, besonders im nördlichen Teil der Kirche und der Apsis. Die Fußbodenziegel liegen in nassem Sand. Chor und Apsis zeigen in verschiedenen Mauerwerkshöhen keine relevanten Salzbelastungen, die Nordwand des Kirchenschiffes dagegen bodennah eine hohe und auch tiefreichende Belastung mit löslichen Bestandteilen an. Oberflächennah werden Nitrate und Chloride nachgewiesen. Die oberflächennahe Salzkonzentration konnte durch Abnahme des Putzes vor einigen Jahren bereits effektiv reduziert werden und die Abtrocknung begünstigen.

Eine um das Gebäude umlaufende Mulde, entstanden durch das Abgraben des Geländeniveaus, behindert das Wegführen des Niederschlagswassers und führt dadurch zusätzlich zu einer Bewässerung des Fundamentbereiches. Neben dem Anbau einer Dachentwässerung mit entsprechender Versickerung (die Einleitung in die Kanalisation ist nicht möglich) wird hier eine Geländeregulierung mit Ausbildung eines Gefälles zur Wasserabführung notwendig. Um die Trocknung des Fußbodens zu

verbessern, sollte der Fußboden diffusionsoffen auf einer kapillarbrechenden Schicht eingebracht werden. Nach Auswertung der Putzmuster wird, auf Grund der Vorgaben durch den Bestand, auf ein differenziertes Putzsystem orientiert. Auf Grund eines möglichen Alkalieintrags durch Bindemittel wurde empfohlen, nur alkaliarme Baustoffe anzuwenden. Nach Auswertung der Klimamessungen besteht die Gefahr mikrobiologischer Aktivität, insbesondere in den Sommermonaten mit Schimmel und Algenbildung. Es wurde empfohlen, nach Realisierung der Maßnahmen zur Trocknung, erneut das Raumklima zu überprüfen, um ggf. weitere Schritte zu prüfen.

5.2 Kirche Räbel

An der Kirche Räbel sind zwei Prozesse ursächlich für Feuchteschäden im Mauerwerk: Der Einbau der Apsis in den Deich wird derzeit durch einen Deichumbau aufgehoben. Eine Spundwand soll für die Freisetzung der Kirche sorgen. Die Beeinflussung durch Hochwasser ist der zweite Prozess, der in geeigneter Weise vorsorgend angegangen werden muss. Hier zeigt sich, dass die gut durchlässigen, mächtigen Sande (kf-Wert ca. $1\text{-}3 \cdot 10^{-3}$ m/s) eine größere Amplitude der Grundwasserstände zulassen. Die Modellierung mit dem weiten Deichvorland zeigte, dass nur aktive Maßnahmen während eines Hochwassers geeignet sind, die Kirche trocken zu halten. Tief einbindende Spundwände oder Dichtungsmaßnahmen sind durch die Mächtigkeit des obersten Grundwasserleiters nicht nur sehr aufwändig, sondern werden auch wegen der hohen hydraulischen Durchlässigkeiten schnell umflutet. Die in zwei Brunnen zu fördernden Wassermengen sind aufgrund der hohen Durchlässigkeiten auch sehr hoch und ihre Ableitung über den Deich in die fließende Welle nicht unproblematisch. Andere Ableitungsmöglichkeiten sind jedoch nicht verfügbar. Die kurzen Reaktionszeiten und die zu fassenden Wassermengen sowie die dazu nötigen Brunnenausbaudaten konnten mit Hilfe des numerischen Grundwassermodells abgeleitet werden.

Die Mauerwerksuntersuchungen weisen in bodennahen Tiefenprofilen bzw. in allen Bereichen, die unterhalb des anstehenden Erdreichs liegen, über die gesamte Tiefe hohe Feuchten auf. Im Bereich des Chores, der direkt in den Deich einbindet, sind in größeren Mauerwerkstiefen extreme Feuchten zu verzeichnen. Der Fußbodenaufbau ist ebenfalls feucht. Die Ergebnisse der Salzanalysen zeigen keine kritische Salzbelastung in den untersuchten Bereichen. Durch Abnahme des bereits stark geschädigten Sockelputzes kann die Abtrocknung des Mauerwerks begünstigt werden.

Anfallendes Wasser sollte geregelt, über eine Drainage vor der Spundwand bzw. landseitig des Deiches abgeleitet werden. Da keine Einleitung der Regenentwässerung in die Kanalisation möglich ist, kann im Gelände (Südseite) versickert werden. Mit der Trennung der Kirche vom Deichkörper ist eine eindeutige Verbesserung der Feuchtigkeitssituation zu erwarten. Auf Grund des angeschütteten Geländes erfolgt die Befeuchtung auch über die sich anschließenden Wandbereiche in den Turm- und Seitenschiffbereichen. Ein Abgraben des Geländes ist nicht zielführend, da dies zur Muldenbildung am Gebäude führt. Eine weiträumige Geländeregulierung ist nicht möglich. Eine umlaufende Vertikal Sperre, wenigstens an Nord- und Südseite und an der Apsis wird empfohlen, um den seitlichen Feuchtezutritt über das Ziegelmauerwerk zu behindern. Das Wegführen des Wassers kann über eine Drainage, die mit ausreichendem Abstand zum Gebäude installiert wird, erfolgen. Der Fußboden sollte diffusionsoffen auf einer kapillarbrechenden Schicht eingebracht werden. Eine zusätzliche Drainage unterhalb des Fußbodenaufbaus wurde nicht als notwendig erachtet. Die Applikation eines Salzspeicherputzes ist nach Feststellung der geringen Salzbelastung im Mauerwerk nicht notwendig. Es wird ein farblich-strukturell an den Bestand angepasster Putz empfohlen, auch auf Grund der geringen Bestandsputzstärke. Dazu kann ein natürlicher, regionaler Sand in einer Baustellenmischung mit einem NHL-Kalk Verwendung finden. Vor Ausführung des Neuputzes wurde empfohlen, der Kirche nach Entkopplung vom Deichkörper, Zeit zur Trocknung zu geben.

Nach den Klimamessungen ist trotz starkem Luftaustausch mit der Außenluft mit einem erhöhten Risiko mikrobiologischer Aktivität, die Schimmel- oder Algenbildung auslösen kann, auszugehen. Im Kirchenraum wurden im Aufzeichnungszeitraum wiederholt Kondensationsfälle oder kondensationsnahe Bedingungen beobachtet. Diese traten ausschließlich in den Wintermonaten auf. Es wurde empfohlen, nach Realisierung der Maßnahmen zur Trocknung, erneut das Raumklima zu überprüfen.

5.3 Kirche Gottesgnaden (Calbe)

Die Lage der Kirche zwischen der Saale und dem in den 1930er Jahren gebauten Schleusenkanal erleichtert zwar die Modellierung, hat jedoch deutliche Folgen für die Kirche. Etwa 5 m mächtige gering durchlässige Auelehme und -tone im Untergrund unterscheiden zudem diesen Standort von den anderen Kirchen. Neben den Feuchteschäden durch das Hochwasser 2013, dessen Eindringen in die Kirche nur mit Sandsäcken verhindert werden konnte, sind auch große Risse im Mauerwerk zu verzeichnen gewesen, die auf Setzungen im Untergrund hinweisen (s. Kap. 4.3). Die hydrogeologische Situation mit stark gespannten Grundwasserdrücken macht eine Förderung von Wasser über einen existierenden Brunnen in einen nahegelegenen Graben sehr leicht realisierbar. Die Regenwasserentsorgung der Kirche wurde über ein Rigolensystem installiert, das zwar für Starkregenereignisse insbesondere im Hochwasserfall nicht fachgerecht angelegt wurde, aber es besteht die Möglichkeit, über eine Fassung des Wassers in einem nur etwa 1,5 m tiefen Brunnen eine Entlastung zu installieren. Hierfür wurden ähnlich wie für Sydow Modellberechnungen für die ungesättigte Zone zusätzlich zu den eigentlichen Grundwassermodellierungen durchgeführt. Alarmpegel der nahegelegenen Schleuse und Reaktionszeiten (hier sehr kurz, wenige Stunden) konnten problemlos festgelegt werden.

Das Mauerwerk war zum Zeitpunkt der Voruntersuchungen größtenteils erheblich durchfeuchtet. Die bodennahen angelegten Tiefenprofile zeigten über die gesamte Tiefe extreme und hohe Feuchtwerte auf. Die höher gelegenen Profile an der Südseite waren mit mittleren bis geringen Feuchten deutlich trockener. Die Feuchteverteilung an der Nordseite deutet jedoch auf einen Feuchteeintrag hin, der auch bis in 70 cm Höhe noch zu extremen Feuchtwerten führt. Dies wurde mit einer ungenügenden Ableitung der Dachentwässerung in Verbindung gebracht, deren Optimierung empfohlen und bei der Ausführung berücksichtigt wurde. Einen Einfluss auf die Feuchtegehalte im Mauerwerk hat erfahrungsgemäß auch von außen anstehendes Erdreich. Da an der Südseite der Kirche das Außenniveau 30 cm über dem Innenniveau liegt, wurden hier entsprechende Maßnahmen der Geländeregulierung empfohlen und bei der Ausführung berücksichtigt. Neben hohen Sulfationenwerten (geogene Gehalte im Grundwasser) sind z.T. extreme Nitratgehalte festzustellen. An der Nordwand sind geringere Belastungen des Putzes detektiert worden, obgleich auch hier stellenweise starke Salzausblühungen (Natriumsulfat) zu beobachten waren. Das Mauerwerk wurde mit NHL- und HSNA-basierten Mörteln instandgesetzt und eine Vertikalsperre aus Sperrputz und Dichtschlämme installiert. Der dichte Fußboden (mit kapillarbrechender Schüttung und Geotextilabkopplung zum unterliegenden Erdreich), aus vermörtelten Bodenplatten wurde auf Empfehlung im Seitenbereich aufgenommen und in einem Seitenstreifen Ziegel mit Lüftungsschlitzen in Grobsplitt verlegt, um die in das Mauerwerk aufsteigende Feuchte zu vermindern (Abb. 21). Die Anlage der Putzmuster erfolgte im Zusammenhang mit der Applikation eines NHL-basierten Sockelputzes auf Basis einer Baustellenmischung mit einem regionalen Sand. Das Raumklima liegt auch im Sommerhalbjahr im klimatischen Gefahrenbereich für mikrobiologische Aktivität und damit für Schimmel- und Algenbildung. Eine Kontrolle wird weiter für notwendig erachtet.



Abb. 21 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordwand mit neu eingebautem Lüftungstreifen



Abb. 22 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordwand mit neu eingebautem Lüftungstreifen

5.4 Kirche Ostrau (Elsteraue)

Die Kirche in Ostrau ist auf Sande (kf-Wert $3 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-4}$ m/s) und nur sehr geringmächtige Schluffe und Tone gebaut, so dass eine direkte Befeuchtung bei einem Hochwasserereignis anzunehmen ist, was im Jahr 2013 auch eingetreten ist. Die Gradienten des Grundwasserdruckspiegels weisen aus, dass dauerhaft influente Verhältnisse vorliegen. Der Hochwassereinfluss wird hierdurch deutlich verstärkt. Das infiltrierte Wasser fließt über ein nahegelegenes Grabensystem ab. Die Notfallmaßnahmen sehen eine Grundwasserförderung über zwei Brunnen vor, von denen einer bereits existiert und ausreichend dimensioniert ist. Die Pumpen sollten so vorgehalten werden, dass sie innerhalb eines Tages nach Erreichen des Alarmpegels in Zeit installiert und in Betrieb genommen werden können. Auch der Nachlauf der Pumpen nach Unterschreiten des Alarmpegels beim Hochwasserrückgang kann mit 3-5 Tagen gut eingegrenzt werden.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden oberflächennah partiell hohe Sulfat- und mittlere Nitratbelastungen ermittelt. In der Tiefe der Bohrmehlprofile werden unkritische Gehalte registriert. Eine Ausblühsalzanalyse ergab das stark bauschädigende Salz Epsomit (Magnesiumsulfathydrat). Die Herkunft der Magnesiumionen geht auf die Verwendung von Dolomitmalk als Setzmörtel zurück.

Während im Kirchenschiff geringe Mauerwerksfeuchten gemessen werden, zeigen die Bohrmehltiefenprofile im Turm im Bodenbereich hohe Feuchten bis in eine Tiefe von 40 cm. Hydrogeologische Untersuchungen weisen auf die Möglichkeit eines Feuchteintrages in das Mauerwerk durch Schichtenwasser hin, das auf bindigen und gering wasserdurchlässigen Schichten nach längeren Regenperioden auftreten kann, das wieder an die Kirche geführt wird. Im Zusammenhang mit stärkeren Regenereignissen wurde die Anlage einer Vertikalsperre und eines Drainagesystems allerdings Abhilfe schaffen. Der bestehende Kiesstreifen führt eher zu einer Ansammlung von Feuchte und einer Befeuchtung des Mauerwerks.

Im Projektzeitraum wurde der salzgesättigte Sockelputz im Innen- und Außenbereich abgenommen und damit die Salzbelastung abgereichert und die Abtrocknung begünstigt. Ersetzt wurde der Sockelputz durch einen Sanierputz. Flankierend erfolgte im Außenbereich des Fundaments die Applikation eines Sperrputzes und einer Dichtschlämme sowie die Anlage einer Drainage mit Betonsohle und Gefälle zu einem Sammelschacht. Da kein Anschluss an das Abwassersystem realisierbar ist, erfolgt die Einleitung der Dachentwässerung in die Drainage. Die Auswirkung der eingesetzten Trocknungsmaßnahmen auf das Raumklima sollten in Zukunft kontrolliert werden.

5.5 Kirche Gruna (bei Laußig)

Wesentliche geologische Informationen wurden in der Einleitung bereits gegeben. Der nächste Oberflächenwasserpegel liegt etwa 10 km stromabwärts, was die Reaktionszeiten sehr kurz hält. Innerhalb von 1-2 Stunden muss hier auf den Alarmpegel in Bad Döben reagiert werden, um Feuchteschäden zu vermeiden. Auch hier konnten Standorte, Brunnenparameter und Pumpenförderraten festgelegt werden. Ähnlich wie für Rabel empfohlen, sollte das Wasser in diesem Notfall über den angrenzenden Deich in die fließende Welle gepumpt werden, da kein ausreichender Vorfluter in der Nähe zur Verfügung steht. Aufgrund der oberflächlich anstehenden bindigen Schichten, die einen kapillaren Aufstieg begünstigen, wurde der Einbau einer kapillarbrechenden Schicht unter dem Fußboden und, soweit möglich, im Bereich der Fundamente empfohlen.

Die Mauerwerkuntersuchungen zeigten hohe Feuchten an der Nord- und Südseite des Turmes, jedoch keine problematischen Salzgehalte im Wandaufbau. Aus den Untersuchungsergebnissen resultierten weitere Empfehlungen zur Anlage von Putzmustern, zur Entfernung des deichseitig umlaufenden Betonsockels und zum Einbau einer Vertikalsperre.

5.6 Kirche Wölkau

An der Kirche Wölkau wurde nach mehrmonatigen hydrogeologischen Messungen festgestellt, dass Grundwasserhochstände auf Grund der Höhenlage der Kirche nicht Schadensursache sein können. Viel mehr konnte Schichtenwasser (nach Regenereignissen) als Feuchtequelle identifiziert werden. Daher wurde im weiteren Projektlauf auf hydrogeologische Modellrechnungen verzichtet, jedoch in Ableitung aus den Ergebnissen der naturwissenschaftlichen Mauerwerksuntersuchungen, Maßnahmenempfehlungen gegeben.

5.7 Merseburg, Neumarktkirche

Die Kirche ist in Auelehm gegründet. Das umliegende Erdreich wurde im Laufe der Jahre um ca. 1,80 m aufgefüllt. Der Grundwasserleiter beginnt bei 3,70 m unter GOK. Bei 3,30 m wurde es beim Abteufen einer Bohrung auf der Ostseite der Kirche bereits feucht. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters ist bis in eine Tiefe von 5 m erbohrt worden. Vermutlich wird das Fundament bereits bei Normalwasserständen der Saale durch die Kapillarität des Auelehms befeuchtet. Die Reaktionszeit im Hochwasserfall beträgt ca. 24 h. Eine tiefliegende Drainage mit Pumpschacht auf der Westseite der Kirche besteht bereits.

Die Anfang 2015 durchgeführten Feuchte- und Salzanalysen zeigten ein insgesamt sehr stark durchfeuchtetes Mauerwerk, besonders in tiefer liegenden Bereichen mit von außen anstehendem Erdreich, das eine Abtrocknung behindert. Die im Herbst 2016 und März 2017 umlaufend angelegten Schürfe zeigen in den 1990er Jahren eingebaute Tonabdichtungen mit Stärken von mindestens 40 cm (zum Teil bis > 70 cm). Diese basiert auf einem Kaolinton, der auf Grund eines zugeführten Feuchtegehaltes bildsam ist und sich an das Fundamentmauerwerk anschmiegt und dieses so abdichtet. Die Tonabdichtung sichert bei Hochwasser Fundament und Wandbereiche und schützt diese auf der Nordseite vor über das Gelände in die hier entstandene Mulde einfließende Niederschläge. Die heutige Außenwand des nördlichen Schiffes zeigt keine Tonabdichtung. Hier sind die Feuchteschäden jedoch am stärksten ausgebildet. Aufgrund der hoch anstehenden Tonabdichtung kann ein Abtrocknen der Wandflächen nur zum Innenraum hin erfolgen. Der Einsatz einer Lüftung und ein für die hohe Feuchtelast geeigneter Putz wurden nach Bemusterung der Putzmusterflächen empfohlen. Die Umsetzung der Maßnahmen erfolgte bereits. Mit einem Monitoring wird die Abtrocknung weiter analytisch begleitet und das Raumklima überprüft. Die bestehende Drainage, die als mögliche Befeuhtungsquelle des Mauerwerks vermutet wurde, ist inklusive Pumpschacht nach einer erfolgten Befahrung als funktionstüchtig befunden worden. Auf der Nordseite wurde der Einbau einer vertikalen Dichtung inklusive einer Geländeregulierung und Niederschlagswasserabführung empfohlen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der für alle untersuchten Denkmale gleiche Projektablauf hat sich bewährt. Feld- und Laboruntersuchungen liefern die Datengrundlagen für die notwendige Grundwasserströmungsmodellierung. Da diese auf die Berechnung der Szenarien zielgerichtet entwickelt wurden, konnten die für die Notfallpläne entscheidenden Größen wie Alarmpegel der Oberflächengewässer, Reaktionszeiten und vorsorgende Baumaßnahmen hieraus abgeleitet werden. Im Ergebnis können längerfristige Eingriffe in den lokalen Wasserhaushalt, mit Ausnahme der Graben-Instandhaltung in Sydow, ausgeschlossen werden bzw. sie werden nicht für notwendig erachtet. Die Eingriffe können weitgehend auf den Hochwasserzeitraum eingegrenzt werden und stellen gleichzeitig keine schwerwiegenden finanziellen Anforderungen. Technische Anforderung (Pflege, Wartung, Ablaufpläne für den Notfall) sind sehr einfach gehalten, so dass sie auch in vielen Jahren noch genutzt werden können.

Auch für die Planung der zielgerichteten Ableitung bzw. Versickerung des Regenwassers konnten die Grundwasserströmungsmodelle und ergänzend Vertikalmodelle der ungesättigten Bodenzone genutzt werden.

Aus den Ergebnissen der Mauerwerksuntersuchungen und Raumklimamessungen konnten Empfehlungen zur Optimierung der Trocknung sowie flankierende Maßnahmen abgeleitet werden. Diese wurden bereits teilweise im Rahmen der Baumaßnahmen umgesetzt. Auf Grundlage von Putzmusterflächen konnten Putzsysteme mit passenden Eigenschaften für die Sanierung der Kirchen empfohlen werden, welche neben der Funktionalität auch die Ästhetik der Denkmale berücksichtigen.

Über die Projektdauer hinaus wird ein Monitoring weiter die im Projekt umgesetzten baulichen Maßnahmen und angelegten Putzmuster evaluieren.

Eine visuelle Nachbetrachtung der Funktion und Dauerhaftigkeit von Vertikalsperren mit den in den letzten 15 Jahren in der Baupraxis der Denkmalpflege verwendeten Materialien, ist nicht ausreichend bei der Bewertung dieser. Entscheidend ist, bei Beobachtung von wiederholten Feuchteschäden in den Sockelbereichen der evaluierten Objekte, die Überprüfung der baulich korrekten Ausführung. Es wurden konkrete Untersuchungen vor Ort durchgeführt, Schürfe angelegt, um den Einbau der Sperren zu begutachten sowie Feuchteuntersuchungen durchzuführen. Im Rahmen des Projekts konnten einige, sich auf die Funktionalität der Sperren auswirkende, Baufehler identifiziert und benannt werden, deren Vermeidung in Zukunft mehr Beachtung finden sollte.

Eine Entscheidungshilfe, welches Material unter welchen bestehenden Bedingungen Anwendung finden sollte, kann jedoch nicht gegeben werden (was auch nicht Projektziel war). Hier besteht Forschungsbedarf, auch im Sinne der EKM, die die Klärung dieser Fragestellung in einem Folgeprojekt unterstützt. In diesem Projekt konnten, durch zielgerichtete Untersuchung an Musterflächen die aufgeworfenen Fragen geklärt werden.

Aus den Maßnahmeempfehlungen zu den einzelnen Kirchen konnten Hinweise zu Maßnahmen im Falle eines Notfalls abgeleitet werden. Diese fließen in den durch die Kirchengemeinde zu erstellenden Notfallplan ein. Die Evangelische Kirche in Mitteldeutschland hat hierzu nach dem 2013 stattgefundenen Hochwasserereignis eine Handreichung für den Katastrophenfall, insbesondere Hochwasser, für die Kirchengemeinden erarbeitet. Auf dieser Grundlage konnte unter Hinzuziehung der aus dem DBU-Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse ein erster objektbezogener Notfallplan für die Kirche in Gottesgnaden erarbeitet werden. Es ist geplant, dies auch bei den anderen betrachteten Kirchen schrittweise zu realisieren. Somit konnte das Forschungsprojekt einen wertvollen Beitrag zum aktiven Hochwasserschutz denkmalgeschützter historisch wertvoller Kirchen der EKM leisten.

7 Öffentlichkeitsarbeit

Im Rahmen eines Abschlusskolloquiums am 8. März 2018, im großen Saal der Domgemeinde in Halle, wurden die Projektergebnisse durch die Projektpartner präsentiert. Es erfolgte eine Pressemitteilung über DPA. Die Presse berichtete über die Abschlusstagung und Projektinhalte. Ein die Projektergebnisse zusammenfassender Vortrag informierte die Kirchbaupfleger der Sächsischen Landeskirche am 15. März. Der alle Projektergebnisse und Maßnahmenempfehlungen zusammenfassende Abschlussbericht wird Ende des Jahres 2018 veröffentlicht.

Durch die folgenden Fachvorträge konnten die Projektergebnisse unmittelbar während der Projektlaufzeit dem interessierten Publikum vorgestellt werden.

MEINHARDT, J., GOSEL, W., BÄHRE, S.: Einfluss des Grundwassers auf Objekte des Kulturellen Erbes, 20 Jahre IDK, Vortrag im Rahmen der Fachtagung „Interdisziplinäre Forschung in der Denkmalpflege“, 31.05.2016, Dresden

ZÖTZL, M., GOSEL, W., BÄHRE, S.: Hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt, DBU-Projekt (AZ 32576/01), Vortrag zu den bisherigen Projektergebnissen, Frühjahrstreffen der AG Bautechnik der VdL 2017, vom 4.-5. Mai 2017 in Halle an der Saale, Vortrag zu den bisherigen Projektergebnissen, 04.05.2017, Halle, LDA

ZÖTZL, M., GOSEL, W., BÄHRE, S.: Hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt, DBU-Projekt (AZ 32576/01), Vortrag im Rahmen der großen Dienstberatung wissenschaftlicher Mitarbeiter, 30. August 2017, Halle, Säulensaal, LDA

ZÖTZL, M., GOSEL, W., BÄHRE, S.: Kirche Ostrau, Empfehlungen zur Optimierung der Trocknung sowie baulicher Maßnahmen. Projekttreffen im Rahmen des DBU-Projektes (AZ 32576/01), Vortrag mit Vorstellung abschließender Ergebnisse und Maßnahmen, Ostrau, 02.03.2017

ZÖTZL, M.: Kirche Gruna, Empfehlungen zur Optimierung der Trocknung sowie baulicher Maßnahmen. Projekttreffen im Rahmen des DBU-Projektes (AZ 32576/01), Vortrag mit Vorstellung abschließender Ergebnisse und Maßnahmen, Gruna, 02.03.2017

ZÖTZL, M.: Kirche Gottesgnaden, Empfehlungen zur Optimierung der Trocknung sowie baulicher Maßnahmen. Projekttreffen im Rahmen des DBU-Projektes (AZ 32576/01), Vortrag mit Vorstellung abschließender Ergebnisse und Maßnahmen, Gottesgnaden, 24.04.2017

ZÖTZL, M.: Kirchen Räbel und Sydow, Empfehlungen zur Optimierung der Trocknung sowie baulicher Maßnahmen. Projekttreffen im Rahmen des DBU-Projektes (AZ 32576/01), Vortrag mit Vorstellung abschließender Ergebnisse und Maßnahmen, Stendal, EKM, 26.04.2017

8 Literatur

- Dehio, G. (1998): Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler, Deutscher Kunstverlag.
- DIS-LSA: Denkmalinformationssystem des Landes Sachsen-Anhalt.
- Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Räbel bei Werben im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt". 15 S.
- Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Sydow bei Wust im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt". 15 S.
- Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gottesgnaden im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt". 16 S.
- Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Ostrau im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt". 12 S.
- Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gruna bei Laußig im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt". 16 S.
- Hebig, J., Wigger, H. (2008): Tragverhalten von Natursteinmauerwerk mit Gipsmörtel unter dem Einfluss von Feuchtigkeit, In: Gipsmörtel im historischen Mauerwerk und an den Fassaden, WTA-Schriftenreihe, Heft 30 Auras, M. & Zier, H.-W. (Hrsg.): 165-186.
- IBB (1978): Der Baustoff Gips – Stoffliche Grundlagen, Herstellung und Anwendung von Gipsbauelementen. Institut für Baustoffe der Bauakademie der DDR, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Kundzewicz, Z.W. (2011): Intense Precipitation and High Floods – Observations and Projections, In: In Extremis Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology. Kropp, J., Schellenhuber, H. J. (ed.), Springer, Berlin 2011: 130-142.
- Künzel, H. (2009): Bauphysik und Denkmalpflege, 2. erweiterte Auflage, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.
- Meinhardt, J., Drdácý. M., Siedel, H. (2011): Vulnerability of Cultural Heritage. In: CHEF – Cultural Heritage Protection Against Flood, Drdácý, M. et al (ed.) Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Prague: 39 – 43.
- Min. f. Landw. U. Umwelt Sachsen-Anhalt (2013): Aktualisierung der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel

Meinhardt, J, Gossel, W., Bähre, S.. (2016) Einfluss des Grundwassers auf Objekte des Kulturellen Erbes. In: Interdisziplinäre Forschung in der Denkmalpflege – 20 Jahre IDK – Beiträge zur Fachtagung am 31. Mai 2016. Hrsg.: Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern e.V., 59 - 70

Zötzl, M. (2017) Räbel, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 50/2017. 32 S.

Zötzl, M. (2017) Sydow, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 51/2017. 37 S.

Zötzl, M. (2017) Gottesgnaden, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 59/2017. 52 S.

Zötzl, M. (2017) Ostrau, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 72/2017. 32 S.

Zötzl, M. (2017) Gruna, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 79/2017. 31 S.

9 Danksagung

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU AZ 32576/01_45 wird für die Förderung gedankt.

10 Autorenverzeichnis

Susann Bähre, Landeskirchenamt der Evangelischen Kirche in Mitteldeutschland, Dienstort Magdeburg, Referat F3, Am Dom 2, 39104 Magdeburg, susann.baehre@ekm.de

Apl. Prof. Dr. Wolfgang Gossel, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 3, 06120 Halle, wolfgang.gossel@geo.uni-halle.de

Prof. Dr. Jeannine Meinhardt, FH Potsdam, Konservierung und Restaurierung an Objekten aus Stein, Kiepenheuerallee 5, 14469 Potsdam, mein-hardt@fh-potsdam.de

Matthias Zötzl, Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Domplatz 3, 06108 Halle, zoetzl@idk-denkmal.de

11 Anlagen

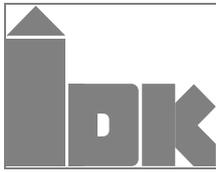
Zötzl, M. (2017) Räbel, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 50/2017. 32 S.

Zötzl, M. (2017) Sydow, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 51/2017. 37 S.

Zötzl, M. (2017) Gottesgnaden, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 59/2017. 52 S.

Zötzl, M. (2017) Ostrau, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 72/2017. 32 S.

Zötzl, M. (2017) Gruna, Kirche, Grundwasserprojekt, Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht. IDK-Untersuchungsbericht HAL 79/2017. 31 S.



Institut für Diagnostik
und Konservierung an Denkmalen
in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Bericht HAL 50/2017

Grundwasserprojekt (DBU)

Räbel, Kirche

Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht

Beauftragt durch: Evangelische Kirchengemeinde Räbel

Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Anzahl der Seiten: 17

Anlage: Abschlussbericht der Hydrogeologischen Untersuchungen
„Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten
Kirche Räbel bei Werben“, GOSSEL (2017)

Halle, 18.08.2017

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351-48435-100

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax.: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 203 140 15097

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Voruntersuchungen (Bericht HAL 13/2016 (MEINHARDT, 2016)).....	3
2.1	Probenahme.....	3
2.2	Quantitative Salzanalyse.....	7
2.3	Feuchtebestimmung mit der Darrmethode.....	7
2.4	Ergebnisse der Quantitativen Salzanalyse.....	7
2.5	Ergebnisse der Feuchtebestimmung.....	10
3	Empfehlungen (Bericht HAL 13/2016 (MEINHARDT, 2016)).....	11
4	Resultierende Empfehlungen nach Projektberatung am 05.07.2016.....	13
5	Aktualisierte Empfehlungen nach Projekttreffen am 24.11.2016	14
6	Aktualisierte Empfehlungen nach Projekttreffen am 26.04.2017 in Stendal	15
7	Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 52/2017, KALISCH, 2017).....	16
8	Literatur	17



Abb. 1: Kirche in Räbel. Sie bindet mit dem Chor direkt in den angrenzenden Hochwasserschutzwall ein

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasser“, wurden im Bericht HAL 13/2016 (MEINHARDT, 2016) zu den Mauerwerksuntersuchungen (Erfassung der Feuchte- und auch Salzbelastung im Mauerwerk, siehe Punkt 1) unter Punkt 2 beschriebene Empfehlungen gegeben.

Eine weitere Aktualisierung der Maßnahmenempfehlungen erfolgte unter Einbeziehung der Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, HAERTER, 2016) am 05.07.2016 (siehe Punkt 3).

Zum Projekttreffen am 24.11.2016 konnten die bisherigen Empfehlungen aktualisiert und präzisiert werden (siehe Punkt 4).

Eine weitere Präzisierung erfolgte im Rahmen des Projekttreffens „Räbel-Sydow“ am 26.04.2017 in Stendal.

2 Voruntersuchungen (Bericht HAL 13/2016 (MEINHARDT, 2016))

Im Rahmen des Forschungsprojektes der DBU „Grundwasser“ sind zur Erfassung der aktuellen Feuchte- und auch Salzbelastung des Mauerwerkes Tiefenprofile zur Bohrmehlentnahme angelegt worden. Die Messungen sind auch im Zusammenhang mit den hydrologischen Untersuchungen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zu sehen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen dienen einerseits als Bewertungsgrundlage für die Maßnahmen, die ggf. im Versuch an den Objekten zur Optimierung der Trocknung durchgeführt werden sollen, und um den tatsächlichen Einfluss des Grundwassers (Grundwasserstellen Hydrogeologie) auf das Mauerwerk und das Raumklima zu eruieren.

Die Kirche steht unterschiedlich tief im Erdreich. Das Mauerwerk weist in den außen von Erdreich begrenzten Bereichen offensichtlich eine massive Feuchte auf, die sich u.a. in mikrobiellem Bewuchs äußert. Die Putz sind größtenteils schadhaft oder abgängig. Mit dem Chor bindet die Kirche in den Deich zum Schutz vor Elbehochwasser ein (siehe Abb. 1). Im Hochwasserfall steht die Elbe sozusagen direkt gegenüber der Kirche, auf der anderen Seite des Deiches an. Sickerwasser führt dabei zu massiven Feuchteinträgen in das Mauerwerk der Kirche.

2.1 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am 21. Juli 2015. Insgesamt sind dabei 6 Tiefenprofile angelegt worden (siehe Abb. 1-6). Im mittleren Bereich des Kirchenschiffs wurden tiefenabhängig unterhalb des Fußbodenziegels Bodenproben entnommen (siehe Abb. 7). In Tabelle 1 sind die entnommenen Proben charakterisiert bzw. verortet.

	<p>Abb. 2: Tiefenprofile 1 und 2 an der Nordseite des Chores</p>
	<p>Abb. 3: Tiefenprofil 3 an der Nordseite des Chores</p>
	<p>Abb. 4: Tiefenprofil 4 im Scheitelpunkt des Chores</p>
	<p>Abb. 5: Tiefenprofil 5 an der südlichen Außenfassade des Kirchenschiffs</p>



Abb. 6: Tiefenprofil 6 am Chor außen



Abb. 7: Entnahmestelle der Fußbodenproben in der Mitte des Kirchenschiffs



Tab. 1: Verzeichnis der Bohrmehl- und Bodenproben (Die Tiefenprofile wurden in Fugen angelegt.)

Probe	Entnahmetiefe	Lokalisierung
RÄB_K_TP1		Südseite des Kirchenschiffs, bodennah
RÄB_K_TP1/1	0-2	
RÄB_K_TP1/2	2-5	
RÄB_K_TP1/3	5-10	
RÄB_K_TP1/4	10-20	
RÄB_K_TP1/5	20-30	
RÄB_K_TP1/6	30-40	
RÄB_K_TP2		Südseite des Kirchenschiffs, 55 cm Höhe
RÄB_K_TP2/1	0-2	
RÄB_K_TP2/2	2-5	
RÄB_K_TP2/3	5-10	
RÄB_K_TP2/4	10-20	
RÄB_K_TP2/5	20-30	
RÄB_K_TP2/6	30-40	
RÄB_K_TP3		Chor, südlicher Bereich, bodennah
RÄB_K_TP3/1	0-2	
RÄB_K_TP3/2	2-5	
RÄB_K_TP3/3	5-10	
RÄB_K_TP3/4	10-20	
RÄB_K_TP3/5	20-30	
RÄB_K_TP3/6	30-40	
RÄB_K_TP4		Chor, Mitte, unterhalb des Fensters, in Putzfehlstelle
RÄB_K_TP4/1	0-2	
RÄB_K_TP4/2	2-5	
RÄB_K_TP4/3	5-10	
RÄB_K_TP4/4	10-20	
RÄB_K_TP4/5	20-30	
RÄB_K_TP4/6	30-40	
RÄB_K_TP5		Südwand, außen, oberhalb Erdreich
RÄB_K_TP5/1	0-2	
RÄB_K_TP5/2	2-5	
RÄB_K_TP5/3	5-10	
RÄB_K_TP5/4	10-20	
RÄB_K_TP5/5	20-30	
RÄB_K_TP6		außen, Chor, Mitte, oberhalb Erdreich, ungefähr gegenüber TP 4
RÄB_K_TP6/1	0-5	
RÄB_K_TP6/3	5-10	
RÄB_K_TP6/4	10-20	
RÄB_K_TP6/5	20-30	
RÄB_K_TP6/6	30-40	
Proben Fußboden, Tiefenprofil		Mittelgang Kirchenschiff
RÄB_K_FB1	0-3 cm	

RÄB_K_FB2	3-6 cm	
RÄB_K_FB3	6-9 cm	

2.2 Quantitative Salzanalyse

Aus den Proben werden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgt eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial. Von den Extrakten wird mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sension 2.

Die Analyseergebnisse der Salzuntersuchungen werden in M.-% angegeben und bewertet. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus der Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

2.3 Feuchtebestimmung mit der Darrmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der Bohrmehlproben wird durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt.

2.4 Ergebnisse der Quantitativen Salzanalyse

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von einigen der Bohrmehlproben eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle (3) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (2) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 2: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	Gering			mittel			hoch		
		<0,5	<0,1	>0,024	0,5-1,5	0,1-0,5	>0,077	>1,5	>0,5	<0,77
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5-1,5	0,1-0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1-0,3	0,05-0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
Chlorid [M.-%]	< 0,008	<0,2	<0,05	>0,008 <0,026	0,2-0,5	0,05-0,5	>0,026 <0,08	>0,5	>0,5	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben des Tiefenprofils (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entsprechend Tabelle 2.

Tab. 3: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben der Tiefenprofile TP 1-6 und Fußbodenproben

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasserlösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
RÄB_K_TP1/1	0,26	0,063	0,016	0,005	<0,005	0,063	<0,01	<0,01
RÄB_K_TP1/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP1/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP1/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP1/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP1/6	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP2/1	0,14	0,045	0,025	0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
RÄB_K_TP2/2	0,16	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP2/3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP2/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP2/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP2/6	0,13	0,045	<0,005	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
RÄB_K_TP3/1	0,32	0,055	0,025	0,013	<0,005	0,090	<0,01	0,031
RÄB_K_TP3/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP3/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP3/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP3/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP3/6	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP4/1	0,63	0,132	0,066	0,025	<0,005	0,264	<0,01	0,064
RÄB_K_TP4/2	0,15	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP4/3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP4/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP4/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP4/6	0,27	0,046	0,138	0,023	<0,005	<0,01	0,011	0,010
RÄB_K_TP5/1	0,15	0,050	0,010	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
RÄB_K_TP5/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP5/3	0,13	0,055	0,010	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
RÄB_K_TP5/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP5/5	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP6/1	0,34	0,179	0,021	0,019	<0,005	0,137	<0,01	0,019
RÄB_K_TP6/3	0,24	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP6/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP6/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_TP6/6	0,68	0,216	0,144	0,043	<0,005	<0,01	0,036	0,032
RÄB_K_FB1	0,53	0,121	0,020	0,016	<0,005	0,272	0,027	0,051
RÄB_K_FB2	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
RÄB_K_FB3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Die Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen deutlich, dass es keine kritische Salzbelastung in den untersuchten Bereichen gibt. Da die Tiefenprofile dort angelegt worden sind, wo der Putz bereits abgängig war, ist davon auszugehen, dass im Putz höhere Gehalte an löslichen Bestandteilen enthalten waren und eine wesentliche Reduzierung durch die Putzabnahme erzielt werden kann. Zusätzliche salzreduzierende Maßnahmen (Kompressen) sind nicht notwendig. Es wurden die oberflächennahen Proben und die Bohrmehlproben aus der Tiefe der Profile hinsichtlich deren Gehalte an löslichen Bestandteilen und ggf. bezüglich der konkreten qualitativen Ionenzusammensetzung untersucht.

- Bei TP 1 (bodennah) kann man nach einem leicht erhöhten Gehalt an löslichen Bestandteilen in der vordersten Probe einen deutlichen Abfall zu größeren Tiefen ablesen. In 40 cm Tiefe liegen ebenfalls keine relevanten Gehalte an löslichen Bestandteilen vor.
- TP 2 scheint durchgängig von der Oberfläche in die Tiefe eine recht niedrige Belastung aufzuweisen. Allerdings sind die Proben zwischen 10 und 30 cm nicht näher analysiert worden.

Viel eher wird die Applikation eines feuchtetoleranten Putzes mit größerem Porenraum für die Erneuerungen im Kircheninnenraum empfohlen.

- TP 3 (bodennah) weist die gleichen Bedingungen wie TP 1 auf.
- TP 4 unterhalb des Fensters im Chor zeigt auch nur oberflächennah einen deutlichen Gehalt an löslichen Bestandteilen, der sich allerdings ab 5 cm Mauerwerkstiefe zu vollkommen unkritischen Gehalten reduziert. In der Tiefe (30-40 cm) sind die Gehalte auch unproblematisch.
- TP 5 (außen, Südwand) ist durchweg als unkritisch zu bewerten.
- TP 6 liegt i außen, oberhalb des anstehenden Erdreiches. Hier ist als einziges Tiefenprofil eine Steigerung der Gehalte an löslichen Bestandteilen in großer Tiefe zu verzeichnen (30-40 cm).

Allerdings ist anzumerken, dass die detektierten Gehalte an relevanten Anionen in allen Fällen nur gering bis sehr gering sind. Eine Salzproblematik (nach Abnahme des aktuellen Putzes) besteht nicht.

2.5 Ergebnisse der Feuchtebestimmung

In der nachfolgenden Tabelle (4) sind die Ergebnisse der Darrfeuchtebestimmung an den Proben der Tiefenprofile dargestellt. Die farbige Markierung geben eine Orientierung bei der Bewertung des Feuchtegehaltes (ohne Markierung = sehr gering, grün = gering, türkis = mittel, rot = hoch, lila= extrem).

Tab. 4: Feuchtegehalte der Bohrmehlproben [M.-%] der Tiefenprofile 1-6 und der Bodenproben

Probe	Feuchtegehalt [M.-%]
RÄB_K_TP1/1	7,97
RÄB_K_TP1/2	9,43
RÄB_K_TP1/3	9,34
RÄB_K_TP1/4	7,83
RÄB_K_TP1/5	8,67
RÄB_K_TP1/6	8,18
RÄB_K_TP2/1	6,57
RÄB_K_TP2/2	8,13
RÄB_K_TP2/3	8,34
RÄB_K_TP2/4	7,38
RÄB_K_TP2/5	7,33
RÄB_K_TP2/6	4,97
RÄB_K_TP3/1	8,61
RÄB_K_TP3/2	12,51
RÄB_K_TP3/3	12,80
RÄB_K_TP3/4	17,80
RÄB_K_TP3/5	18,91
RÄB_K_TP3/6	16,24
RÄB_K_TP4/1	9,21
RÄB_K_TP4/2	9,55
RÄB_K_TP4/3	33,47
RÄB_K_TP4/4	7,84
RÄB_K_TP4/5	7,41
RÄB_K_TP4/6	12,20
RÄB_K_TP5/1	1,62
RÄB_K_TP5/2	2,54
RÄB_K_TP5/3	2,59
RÄB_K_TP5/4	6,26
RÄB_K_TP5/5	2,25
RÄB_K_TP6/1	11,26
RÄB_K_TP6/3	8,55
RÄB_K_TP6/4	8,51
RÄB_K_TP6/5	6,69
RÄB_K_TP6/6	8,91
RÄB_K_FB1	6,64
RÄB_K_FB2	6,91
RÄB_K_FB3	15,21

Bereits auf den ersten Blick wird aus den Ergebnissen in Tabelle 4 deutlich, dass das Mauerwerk der Kirche in Räbel ein erhebliches Feuchteproblem hat. Die Tiefenprofile TP 1 und 3 liegen jeweils bodennah und weisen über die gesamte Tiefe hohe Feuchten auf. Im TP 3, das im Chor liegt, also näher zum Deich, sind in größeren Mauerwerkstiefen sogar extreme Feuchten ermittelt worden. Das Profil TP 2 liegt oberhalb von TP 1, allerdings noch immer innerhalb des Bereichs des von außen anstehenden Erdreichs. Dieses Profil ist oberflächennah ebenfalls durch hohe Feuchtegehalte charakterisiert. Sie reduzieren sich hin zu größeren Mauerwerkstiefen auf mittlere Feuchten, zumindest als einziges durchweg trocken. Das Erdreich wirkt hier offensichtlich nicht als feuchtespeichernde Kompressen. TP 4 liegt im Chor, kurz unterhalb des von außen anstehenden Erdreichs. Die Feuchtwerte liegen hier extrem hoch. TP 5 wurde von außen, an der südlichen Wand angelegt und befindet sich oberhalb des anstehenden Erdreichs. Es ist als einziges Profil durchweg trocken. TP 6 befindet sich außen, ebenfalls oberhalb des anstehenden Erdreichs. Der Chorbereich ist offensichtlich deutlich stärker von Infiltration betroffen bzw. wirkt der mächtige Deichkörper viel nachhaltiger als Feuchtekompressen. Obwohl die Probe von einer Zone oberhalb des Erdreiches stammt, sind die entsprechenden Bohrmehlproben nahezu durchgehend durch hohe Feuchten charakterisiert.

Den Feuchtwerten des Tiefenprofils im Boden ist deutlich zu entnehmen, dass die Feuchte nach unten ansteigt. Der Eintrag über tiefer liegende Bereiche ist offensichtlich.

3 Empfehlungen (Bericht HAL 13/2016 (MEINHARDT, 2016))

Zusammenfassend hat sich durch die Analysen gezeigt, dass erwartungsgemäß eine hohe Feuchte im Mauerwerk vorliegt. Das betrifft im Wesentlichen die Bereiche, die unterhalb des anstehenden Erdreichs liegen. Am Chor wirkt sich der Feuchteeintrag sogar bis oberhalb des Erdreichs aus. Inwieweit es möglich sein wird, den Deich derartig zu modifizieren, dass Sickerströmungen durch den Erdkörper direkt ins Mauerwerk unterbunden werden können, muss durch die Fachleute des Deichbaus geklärt werden. Von Vorteil für den Fortbestand der Kirche und die darin auszuführenden Instandsetzungsmaßnahmen wäre eine Abkopplung auf jeden Fall. Wie geschildert, ist der Fußboden bzw. dessen Unterlage feucht und ein Nachschub an Feuchte ist gegeben. Von der ersten Auslesung der Grundwassermessstelle durch die Hydrogeologen wurde deutlich, dass es starke Schwankungen im Grundwasser im Umfeld der Kirche gibt. Für den untersuchten Zeitraum konnte eine Schwankung von 1,40 m festgestellt werden. Im Januar/Anfang Februar 2016 sind Grundwasserhochstände detektiert worden, die mit Sicherheit auch für die Kirche von Relevanz sind. Eine umfassende Auswertung, auch mit Bezug auf die Auswirkungen auf das Fundament der Kirche, wird, wie bei Installation der Messstellen angegeben, nach einem Jahr Standzeit, im Sommer 2016, zur Verfügung gestellt. Es wird empfohlen, den Fußboden aufzunehmen und eine kapillarbrechende Schicht einzubringen. Das Wasser im Bodenbereich sollte durch eine Drainage im Fußboden abgeführt werden. Mit Hinblick auf den Feuchteeintrag über die Wandflächen wäre darüber hinaus die Einrichtung einer vertikalen Absperrung von Vorteil. Nach Reparatur des z.T. defekten Fugennetzes könnte in Folge des Aufbringens eines dünnen Putzes (als Trennschicht mit Hinblick auf die Reversibilität) die vertikale Absperrung über eine Dickbeschichtung erreicht werden. Auch ist die Vertikalsperre als Derton-Tonabdichtung möglich. Allerdings wird der Dickbeschichtung aus Sicht der Autorin der Vorrang gegeben. Ein Problem bildet der Chorbereich. Aufgrund des geringen Abstandes zwischen Außenwand des Chores und der Eingrenzung des Friedhofes im Bereich des Damms kann das Mauerwerk an dieser Stelle für eine Vertikalsperre nicht freigestellt werden. In einer vergleichbaren Situation hat man sich am Pantheon des Wörlitzer Parks für eine Acrylatinjektage vom Inneren des Kellers entschieden. Allerdings hat sich dieses Verfahren nicht bewährt. Die Schadensentwicklung bzw. der Feuchteeintrag

konnte nicht unterbunden werden. Zum einen geht das Injektageverfahren mit einem erheblichen Eingriff in das historische Mauerwerk einher. Zum anderen ist die Verteilung des Acrylharzes an der Außenwand unklar. Die Beschaffenheit des von außen anstehenden Erdreichs (Verdichtung) hat entscheidenden Einfluss, ob sich das Acrylat an der Wand als Schleier etabliert oder ob es in das Erdreich sickert. Ein ungestörter Acrylatschleier ist unter realen Bedingungen sicherlich nur sehr schwer herzustellen. Eine Vertikalsperre, die eine Unterbrechung aufweist, ist nur eingeschränkt effektiv bzw. verstärkt sich der Wassereintrag an den „Leckagen“ deutlich. Wenn die Vertikalsperre daher nur am Kirchenschiff inkl. Turm ausgeführt werden würde, besteht die Gefahr der seitlichen Hinterwanderung der Vertikalsperre an den Rändern. Eine theoretische Alternative wäre es eventuell, die Vertikalsperre zumindest bis zu den beiden Pfeilern zu führen, die außen nördlich und südlich den Chor begrenzen. Dort könnte am Anschluss senkrecht zur Wand eine Sperre in das Erdreich eingebracht werden. Damit könnte der Wasserstrom von Osten auf den Rand der Vertikalsperre eingeschränkt werden.

Folgende Putzempfehlungen werden für den Innenputz gegeben. Vorteilhaft wäre es, die Eignung für die Kirche in Räbel zunächst in Musterflächen für ein Jahr (mindestens jedoch 6 Monate) zu prüfen.

1. Otterbein Porenputz, der entweder zweilagig aufgebracht wird oder in Kombination mit einer auflagernden Putzschicht normalem NHL für eine noch bessere optische Denkmalverträglichkeit
2. Keim Seccopor Feuchteregulierungsputz
3. Micropor Feuchteregulierungsputz

Wie im Kapitel zur Salzbelastung bereits erläutert, ist die Salzbelastung des Ziegelmauerwerks unterhalb des Putzes nicht kritisch. Eine Salzreduzierung zusätzlich zur Abnahme des aktuellen Putzes (mit Ausräumen der Fugen) wird für nicht erforderlich erachtet.

4 Resultierende Empfehlungen nach Projektberatung am 05.07.2016

Das durch den Deich im Hochwasserfall dringende Dränwasser ist Hauptverursacher des Schadensbildes. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, muss festgestellt werden, dass der Grundwasserfluss nicht hauptsächlich vom Elbeflusslauf gesteuert wird, sondern stärker aus dem landseitigen Zustrom auf die Kirche beeinflusst wird. Durch die zu planende Spundwand könnte der Grundwasserabfluss zur Elbe hin empfindlich gestört werden. Daher ist dies bei der Ausführung zu berücksichtigen.

Die Spundwand ist nur bis in die unbedingt erforderliche Tiefe zu gründen. Die Gründung kann ohne Probleme bis in 5 m Tiefe erfolgen. Sollten tiefere Gründungen notwendig werden, ist die Spundwand wasserdurchlässig auszuführen.

Die Spundwand soll wie in der Planung vorgeschlagen über die gesamte Deichlänge des Grundstücks geführt werden. Jedoch nur soweit in der Tiefe gegründet werden, wie statisch erforderlich.

Die Abstimmung zwischen der Martin-Luther-Universität und den Planern soll während der Ausführungsplanung auf direktem Wege erfolgen.

Mit der Spundwand wird dem grundsätzlichen Problem der Kirche, dem anstehenden Erdreich am Chor und dem anstehenden Drainwasser während des Elbehochstandes, entgegengewirkt.

Bei funktionierender Spundwand mit der geforderten Durchlässigkeit stellt das ansteigende Grundwasser kein Problem an der Kirche dar.

Versalzungen sind ebenfalls nicht massiv, so dass hier keine besonderen Maßnahmen (Kompressenentsalzung) erforderlich werden. Aufgrund des anstehenden Erdreiches wird eine Vertikalsperre in Ton bzw. in Dickbeschichtung empfohlen. Es ist zu überprüfen, ob hier in Abstimmung mit dem Landesdenkmalamt und dem IDK eine denkmalverträgliche Dickbeschichtung eingebaut werden soll.

Als erste Maßnahme sollen im Kircheninnenraum, wie vom IDK vorgeschlagen, vier Musterflächen 1 m breit, an der Südseite im Bereich der erdberührenden Flächen und der darüber liegenden trockenen Bereiche, angebracht und mindestens 9 Monate beobachtet werden. Anschließend wird das am besten geeignete Putzmaterial für die Arbeiten im gesamten Kirchenschiff ausgewählt. Es ist davon auszugehen, dass auch nach Freistellung des Chores ein langfristiger Austrocknungsprozess am Chormauerwerk gegeben sein wird. Auf diese Situation muss der Putz reagieren können.

Folgende Putze sollen in den Musterflächen berücksichtigt werden:

1. Otterbeiner Porenputz, zweilagig aufgebracht
2. Otterbeiner Porenputz in Kombination mit einer auflagernden Putzschicht aus normalem NHL (optische Denkmalverträglichkeit)
3. Romanzement, Firma ROCEM - zwei Flächen mit unterschiedlichen Gehalten an Romanzement

5 Aktualisierte Empfehlungen nach Projekttreffen am 24.11.2016

Bauliche Maßnahmen

Die Ergebnisse der Modellierung sollten abgewartet werden! Sie werden durch Herrn Gossel im März/April 2017 vorgestellt.

Im Vorfeld ist durch das Anlegen eines Schurfs die Fundamenttiefe zu ermitteln. Der Schurf wird nicht für die Modellierung selbst benötigt, sondern für die Frage, inwiefern das Mauerwerk Grundwasseranschluss hat. Er sollte jedoch zeitnah ausgeführt werden. Das IDK ist beim Aushub des Schurfs anwesend und führt sofort nach Aushub Feuchtemessungen im Fundamentbereich durch.

Maßnahmen:

- Einbringen der Spundwand bis in eine Tiefe von ca. 5 Meter über die gesamte Grundstücksbreite
Im Vorfeld sollte zur Prüfung der Standssicherheit einer solchen Spundwand eine kleine Bohrung bis in gleiche Tiefe abgeteuft werden.
- Unterhalb der Spundwand muss Abfluss des Wassers in den Vorfluter erfolgen können.
- Zusätzlich wurde eine Durchlässigkeit der Spundwand empfohlen, um den Rückfluss im HW-Fall zu gewährleisten.
- Das Grundwasser steht bei Mittelwasser der Elbe bei etwa 3,60 m unter Flur. Der Grundwasserleiter beginnt aber bereits bei 2,50 m unter Flur.

Es wird auf die Notwendigkeit einer Drainage vor der Spundwand hingewiesen. Anfallendes Wasser ist geregelt abzuleiten. Dies sollte über die Einleitung in die Kanalisation erfolgen. Falls dies nicht möglich ist, könnte im Gelände (Südseite) ein Sickerrohr mit einer im Bedarfsfall einsetzenden Tauchpumpe für die Entwässerung der Drainage der Spundwand sorgen.

- Vertikalsperren umlaufend, wenigstens an Nord- und Südseite und an der Apsis werden empfohlen
- An der Apsis wird eine Dachentwässerung empfohlen, diese sollte ebenfalls über die Kanalisation entwässern.

Anlage von Putzmustern

Die Vorgaben für die Putzmuster wurden um „denkmalgerechte“ Lösungen erweitert, da auf Grund der geringen Bestandputzstärke nur eine geringe Auftragsstärke möglich ist. Die Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit von Funktionsputzen dadurch wird berücksichtigt.

1. Fläche (Referenz): Baustellenmischung: Otterbein Calcidur NHL3,5 (1 RT), Sand regional, ungewaschen bis 2 mm (3 RT)
2. Fläche: Baustellenmischung (Salzspeicher): Otterbein Calcidur NHL3,5 (1 RT), Sand regional, ungewaschen bis 2 mm (2,5 RT), Bims 1-2 mm (0,5 RT)
3. Fläche: MC-Bauchemie, Exzellent historic Feinputz, Feuchteregulierungsputz mit Romanzementanteil
4. Fläche: MC-Bauchemie, Oxal NHL 3 historic, NHL und Romanzementanteil
5. Fläche: Otterbein „Histocal“ Porenputz fein
6. Fläche: KEIM Seccopor-Grosso

6 Aktualisierte Empfehlungen nach Projekttreffen am 26.04.2017 in Stendal

Maßnahmen

Die Ergebnisse der Modellierung wurden durch Herrn Gossel vorgestellt und am 01.08.2017 mit der Übergabe des Abschlussberichtes präzisiert.

Durch das Anlegen eines Schurfs ist die Fundamenttiefe zu ermitteln. Der Schurf wird nicht für die Modellierung selbst benötigt, sondern für die Frage, inwiefern das Mauerwerk Grundwasseranschluss hat. Er sollte jedoch zeitnah ausgeführt werden. Das IDK ist beim Aushub des Schurfs anwesend und führt sofort nach Aushub Feuchtemessungen im Fundamentbereich durch.

Aktive und passive Maßnahmen:

Die Modellierungsergebnisse (siehe GOSSEL, 2017) haben gezeigt, dass die aus statischer Sicht für den Deichbau notwendige Spundwand sich nur geringfügig auf die Grundwasserstände auswirken wird. Damit fällt diese passive Lösung aus. Die Erstellung von Brunnen und die Absenkung des Grundwassers im Hochwasserfall ist eine aktive Lösung mit dem gewünschten Erfolg. Zwei Brunnen mit einer Pumprate von 30-50 m³/h können hierfür eingebaut werden. Eine weitere Möglichkeit mit großer Wirkung stellt eine Drainage landseitig des Deiches auf 26 mNN dar. Die modellierten abzuführenden Wassermengen von etwa 50 m³/d sind recht gering, weshalb diese Lösung als bevorzugte Variante angesehen werden kann.

Konkrete Angaben können dem Abschlussbericht „Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Räbel bei Werben“ der Hydrogeologischen Untersuchungen, GOSSEL (2017), entnommen werden.

Bauliche Maßnahmen

Dränage vor der Spundwand bzw. landseitig des Deiches: Anfallendes Wasser ist geregelt abzuleiten. Da keine Einleitung in die Kanalisation möglich ist, kann im Gelände (Südseite) versickert werden (siehe GOSSEL, 2017).

Die Regenentwässerung kann aufgrund des guten Versickerungsverhaltens des Bodens auf dem Gelände der Kirche erfolgen (siehe GOSSEL, 2017).

Der Grundwasserleiter beginnt bereits bei 2,50 m unter Flur und hat eine Mächtigkeit bis zu 50 Meter im Urstromtal der Elbe. Im Nighthochwasserfall sind keine gravierenden Feuchteprobleme durch Grundwasser zu erwarten, so dass das vorgefundene Schadensbild auf den Hochwasserfall zurückzuführen ist, sowie der bestehende Feuchtigkeitshorizont mit einer Befeuchtung über den anstehenden Deich in Verbindung steht. Mit der Trennung der Kirche vom Deichkörper ist eine eindeutige Verbesserung der Feuchtigkeitssituation zu erwarten. Auf Grund des angeschütteten Geländes erfolgt die Befeuchtung auch über die sich anschließenden Wandbereiche in den Turm- und Seitenschiffbereichen. Ein Abgraben des Geländes ist nicht zielführend, da dies zur Muldenbildung am Gebäude führt. Eine weiträumige Geländeregulierung ist nicht möglich. Eine umlaufende Vertikalsperre, wenigstens an Nord- und Südseite und an der Apsis wird empfohlen, um den seitlichen Feuchtezutritt über das Ziegelmauerwerk zu behindern. Das Wegführen des Wassers kann über eine Drainage, die mit ausreichendem Abstand zum Gebäude installiert wird, erfolgen. Der Fußboden sollte diffusionsoffen auf einer kapillarbrechenden Schicht eingebracht werden. Eine zusätzliche Drainage unterhalb des Fußbodenaufbaus wird nicht als notwendig erachtet.

Die Anlage von Putzmusterflächen ist auf Grund der fortgeschrittenen Projektzeit nicht mehr sinnvoll. Die Applikation eines Salzspeicherputzes ist nach Feststellung der geringen Salzbelastung im Mauerwerk nicht notwendig. Es wird ein farblich-strukturell an den Bestand angepasster Putz empfohlen, auch auf Grund der geringen Bestandputzstärke. Dazu kann ein natürlicher Sand in einer Baustellenmischung mit einem NHL-Kalk Verwendung finden. Vor Ausführung des Neuputzes wird empfohlen, der Kirche nach Entkopplung vom Deichkörper, Zeit zur Trocknung zu geben.

7 Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 52/2017, KALISCH, 2017)

Die Raumklimamessungen erfolgten im Zeitraum 17.10.2015 bis 08.08.2017. Die Kirche in Räbel weist sehr starke Schwankungen der relativen Raumluftfeuchte auf. Im Aufzeichnungszeitraum schwankten die Werte der relativen Raumluftfeuchte zwischen minimal 42,3% und 99,9% rel. F. um einen Mittelwert von 77,42% rel. Feuchte (siehe Bericht HAL 52/2017, Diagramm 2). Es ist von einem starken Luftaustausch mit der Außenluft auszugehen und dennoch mit einem erhöhten Risiko mikrobiologischer Aktivität, die Schimmel- oder Algenbildung auslösen kann. Im Kirchenraum wurden im Aufzeichnungszeitraum wiederholt Kondensationsfälle oder kondensationsnahe Bedingungen beobachtet. Diese traten ausschließlich in den Wintermonaten auf. Eine tendenzielle Veränderung des Niveaus der relativen Raumluftfeuchte, unabhängig von den jahreszeitlichen Schwankungen, ist nicht nachweisbar.

Hinsichtlich der Nutzung des Kirchenraumes sind dringend Maßnahmen zu empfehlen, die zur Feuchtigkeitsreduzierung im Bauwerk beitragen (siehe oben). Es ist zu empfehlen, dass nach dem Abschluss der vorgesehenen Arbeiten eine erneute Überprüfung des Raumklimas erfolgt. Sollte kein befriedigender Effekt eingetreten sein, wäre als nächster Schritt die Erprobung einer luftfeuchtegeregelten Zwangsbelüftung des Raumes zu empfehlen. Hierbei wird die absolute Luftfeuchte (Gramm Feuchtigkeit pro Kubikmeter trockener Luft) der Außenluft und der Raumluft automatisch verglichen. Bei einer höheren absoluten Luftfeuchte im Kirchenraum würde dann ein Ventilator in einem Fenster eingeschaltet. Sollte die absolute Raumluft der absoluten Außenluftfeuchte entsprechen oder niedriger sein, wird die Zwangsbelüftung durch den Ventilator abgeschaltet.

Im Winterhalbjahr sollte im Interesse einer nicht zu hohen Auskühlung des Raumes auf eine Zwangsbelüftung verzichtet werden und dafür mit einer leichten Raumlufttemperierung mit einer geringen um 3 bis 4 K (oC) erhöhten Raumlufttemperatur gearbeitet werden.

8 Literatur

- Arendt, C.& Seele, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.
- Grassegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S..
- Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Räbel bei Werben im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", 15. S., Übergabe am 27.04.2017, aktualisierte Version vom 02.08.2017
- Gossel, W., Härter, J. (2016) Vortrag aktueller Ergebnisse im Projekt "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt" am 24.11.2016
- Meinhardt, J. (2016) Räbel, Kirche - Mauerwerksuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 13/2016, 11 S.
- Protokoll zum Projekttreffen in Halle am 24.11.2016
- Protokoll zur Projektberatung am 05.07.2016
- Protokoll zur Projektberatung am 27.04.2017
- Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.
- WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik“
- Kalisch, U., Kersten, H., Zötzl, M. (2017) Raumklimauntersuchungen in den Kirchen in Gottesgnaden, Räbel und Sydow - im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 52/2017, 11 S.
- Zötzl, M. (2017) Räbel, Kirche, Erweiterte Maßnahmenempfehlung - im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 05/2017, 7 S.

Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Räbel bei Werben

im Rahmen des Projekts

"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"



Auftraggeber: Evangelische Kirche Mitteldeutschland

Auftragnehmer: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Projektauftrag.....	4
1.2	Hintergrund des Projektes	4
1.3	Ziel des Projektes Räbel	4
1.4	Arbeitsablauf	5
2	Datengrundlagen.....	7
2.1	Geologische und hydrogeologische Übersicht.....	7
2.2	Hydrologische Übersicht	8
3	Auswertung der Messergebnisse.....	10
3.1	Bohrgutansprache.....	10
3.2	Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten	10
3.3	Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität.....	11
4	Modellierungswerkzeug	11
5	Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung.....	11
5.1	Randbedingungen.....	11
5.2	Parameter	11
5.3	Kalibrierung.....	12
5.4	Szenarien.....	14
6	Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse.....	14
6.1	Aktive Grundwasserbeeinflussungen.....	14
6.2	Passive Maßnahmen	15
7	Zusammenfassung.....	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche Räbel	6
Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte HK50 1 : 50 000, unmaßstäbliche Vergrößerung der Karte des W1n- Horizontes (Weichsel1-Nachschüttsande).	8
Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände Elbe, Pegel Sandau mit den Grundwasserständen Kirche Räbel.....	9
Abbildung 4: Bohrprofile der beiden Grundwassermessstellen an der Kirche Räbel. Die Bohransatzhöhen liegen bei etwa 27,6 mNN.	10
Abbildung 5: Grundwassergleichen des Grundwasserleiters mit Mittelwasserstand (Pegel Sandau 25,79 mNN) und Hochwasserstand Juni 2013 (Pegel Sandau 30,71 mNN).	13
Abbildung 6: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy SDL 1/15 (Kirche Räbel).....	13

1 Einleitung

1.1 Projektauftrag

Der Auftrag zur hydrogeologischen Bewertung von Hochwassereinflüssen auf ausgewählte Kirchen in Sachsen-Anhalt sowie Ausarbeitungen von Strategien zur Vermeidung von Schäden bei künftigen Hochwasserereignissen wurde gemäß Angebot am 27.07.2015 vergeben. In diesem Auftrag ist vorgesehen, Grundwassermessstellen einzurichten, regelmäßig Grundwasserstände zu messen, die Messungen auszuwerten und die hydrogeologische Situation zur Ableitung von Präventionsmaßnahmen numerisch zu modellieren. Hierfür wurden zunächst die verfügbaren Schichtenverzeichnisse und hydrogeologischen Karten des Landesamtes für Geologie und Bergwesen sowie die Hochwasserkarten des Landesbetriebs für Hochwasserschutz genutzt. Der vorliegende Modellierungsbericht zur denkmalgeschützten Kirche Räbel umfasst die Modellierungsergebnisse der numerischen Modellen auf der Basis der Erstauswertung der Grundwasserstandsmessungen von Oktober 2015 bis September 2016.

1.2 Hintergrund des Projektes

In den Bundesländern Sachsen und Sachsen-Anhalt sind an einigen denkmalgeschützten Kirchen nach dem Hochwasser 2013 Wasserschäden aufgetreten, die nicht direkt auf den Einfluss von Oberflächenwasser zurückgeführt werden können. Dies sind einerseits witterungsbedingte Schäden, die im vorliegenden Projekt nur eine untergeordnete Rolle spielen, und andererseits Schäden, die auf Grundwasseranstiege zurückzuführen sind. Die Beziehung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser an den betroffenen Denkmälern soll daher in diesem Projekt genauer untersucht und Möglichkeiten der Vermeidung durch Modellierung verschiedener möglicher Präventionsmaßnahmen gefunden werden. Eine der sechs untersuchten Kirchen liegt in Räbel. Das Charakteristische bei dieser Kirche sind hydrogeologisch sehr mächtige Sande und technisch die Lage direkt am Deich der Elbe. Dies führt im Hochwasserfall zu einem Grundwasseranstieg in den Bereich der Gründungsfundamente und z.T. des Fußbodens. Das Projekt dieser Kirche hat insofern Modellcharakter, als diese hydrogeologische Situation an mehreren denkmalgeschützten Bauten auftreten kann, obwohl eine solch deichnahe Lage sehr ungewöhnlich ist.

1.3 Ziel des Projektes Räbel

Die Grundwasseruntersuchungen sind auf die Beobachtung, Analyse und Modellierung der Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung ausgerichtet. Die Schäden hochwasserbedingter Grundwasseranstiege an den ausgewählten Denkmälern sollen künftig vermieden werden. Hierfür sollen sowohl passive als auch aktive Maßnahmen zur Grundwasserstandsregulierung untersucht werden, wobei die Nachhaltigkeit der Maßnahmen unter mehreren Aspekten betrachtet werden soll. Die Kirche in Räbel ist hierfür aufgrund der geologischen und hydrodynamischen Gegebenheiten gut geeignet. Das Ziel ist, möglichst wartungsarme und mit geringem technischem Aufwand durchzuführende Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen auszuarbeiten.

1.4 Arbeitsablauf

Basierend auf den zunächst notwendigen Recherchen beim Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt wurden zunächst die Geländearbeiten zur Bestimmung der lokalen geologischen Verhältnisse, zur Einrichtung einer Grundwassermessstelle und zur quasikontinuierlichen Messung von Grundwasserständen durchgeführt.

Auf Grundlage der Grundwasserstandmessungen von Oktober 2015 bis September 2016 konnten die Analysen der Oberflächenwasser - Grundwasser - Interaktion die erforderlichen hydraulischen Parameter für die numerische Grundwassermodellierung liefern. Auf Basis der Ergebnisse aus Grundwasserstandsmessungen und der Parameterbestimmungen vor Ort wurde ein Modell erstellt, das den Zusammenhang zum Wasserstand der Elbe nutzt. Als Überblick ist in Abbildung 1 der Arbeitsablauf für die Untersuchungen an der Kirche in Räbel dargestellt.

Arbeitsplan zum Projekt													
"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiegen am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"													
Kirche Räbel													
	2015				2016				2017				2018
Arbeitsaufgabe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
Messung der Abhängigkeiten Grundwasserstand-Oberflächenwasserstand													
Erfassung der hydrologischen und geologischen Verhältnisse auf Basis von Karten und Aktenmaterial (Historische Untersuchung)	X												
Einholung von Genehmigungen zum Abteufen von Kleinrammbohrungen 80 mm und Einbau von Grundwassermessstellen 50 mm		X											
Erstellung von zwei Grundwassermessstellen im direkten Umfeld der Kirche		X	X										
Kurzzeit-Pumpversuch zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters							X						
Erstellung und Einbau automatischer Datenlogger zur stündlichen Erfassung von Grundwasserständen			X										
Messung der Grundwasserstände				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Statistische Analyse der Abhängigkeiten des Grundwasserstandes von meteorologischen und hydrologischen Einflüssen							X				X		
Ansätze zur analytischen Prozessmodellierung							X						
Zwischenbericht Messstellenaufbau, Geologie und Hydrochemie					X								
Zwischenbericht statistische Analysen und analytische Prozessmodellierung								X					X
Aufbau standortbezogener numerischer Grundwassermodelle													
Abgrenzung des Modellgebiets anhand plausibler hydrologischer Randbedingungen									X				
Aufbau der Grundwasserleiter-/geringleiter-Strukturen									X				
Diskretisierung der Modellgebiete unter numerischen Stabilitätskriterien									X				
Stationäre Modellkalibrierung für mittlere Strömungsverhältnisse									X			X	
Instationäre Modellkalibrierung anhand der Grundwasserstandsmessungen									X			X	
Entwicklung von Hochwasserszenarien für den Standort Sydow						X			X				
Instationäre Berechnung der Hochwasserszenarien 3D Strömungsmodelle						X			X				
Zwischenbericht Modellierungsergebnisse							X		X				
Ableitung standortbezogener hydraulischer Vorsorgemaßnahmen													
Modellierung mit passiven Vorsorgemaßnahmen zur Reduktion von Hochwassereinflüssen									X				
Modellierung mit aktiven Vorsorgemaßnahmen zur temporären Regulierung des Grundwasserstandes									X				
Optimierung der standortbezogenen Maßnahmen auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse											X	X	
Abschlussbericht												X	X

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche Räbel

2 Datengrundlagen

Die numerischen Grundwassermodelle wurden auf der Basis folgender Unterlagen erstellt:

1. Alle Karten des Hydrogeologischen Kartenwerks 1 : 50 000 (HK50) des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Blätter Wittenberge 0705-1/2, Glöwen 0706-1/2, Havelberg 0706-3/4, Rochau 0705-3/4 (Grundwassergleichen, Parameter mehrerer Grundwasserleiter, Grundwassergefährdung).
2. Wasserstandsmessungen an den Oberflächengewässern: 15-minütige Wasserstandsdaten des etwa 10 km südlich an der Elbe gelegenen Pegels Sandau liegen für den gesamten relevanten Zeitraum 2015-2016 vor und konnten bei der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung berücksichtigt werden.
4. Bohrungen, Grundwasserstandsmessungen und Kurzzeit-Pumpversuche vor Ort haben erstens den lokalen Bodenaufbau gegenüber den Kartenwerken konkretisiert, zweitens erforderliche Daten für die Modellierung geliefert und drittens auch bei der Beurteilung von Baumaßnahmen und Planung für anstehende Baumaßnahmen geholfen.

2.1 Geologische und hydrogeologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet Sydow liegt aus strukturgeologischer Sicht im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Schollengebiets (HENNINGSEN & KATZUNG 2006, BACHMANN & SCHWAB 2008). Der in größerer Tiefe anstehende Festgesteinsuntergrund spielt für die Untersuchungen nur eine untergeordnete Rolle und wird hier nicht weiter berücksichtigt.

Über dem Festgestein wird im HK50 die Grundwasserleiter/-geringleiterstruktur mit (insgesamt 10-50 m) mächtigen Sanden und Kiesen der Elster- und der Weichsel-Eiszeit sowie des Holozäns beschrieben. Die Grundwasserverhältnisse sind ungespannt, was sich bei den lokalen Untersuchungen als zutreffend herausgestellt hat (s. Abbildung 2). Die hydraulischen Durchlässigkeiten werden mit $80 - >100 \cdot 10^{-5}$ m/s (also 0,8 bis $1 \cdot 10^{-3}$ m/s) angegeben. Der mittlere Grundwasserstand liegt nach dieser Karte bei etwas über 23 - 24 mNN.

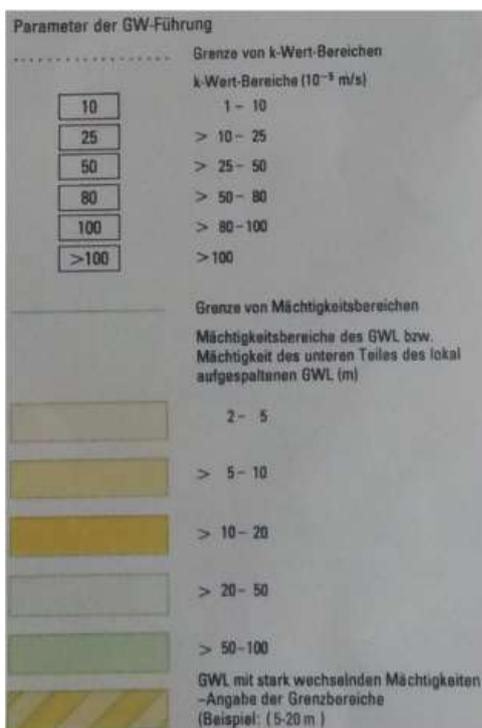


Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte HK50 1 : 50 000, unmaßstäbliche Vergrößerung der Karte des W1n- Horizontes (Weichsel1-Nachschüttssande).

2.2 Hydrologische Übersicht

Die Hydrologie der direkt am Deich der Elbe gelegenen Kirche wird dominiert von der Elbe zwischen Sandau und Havelmündung. Der Wasserstand der Elbe in Sandau liegt etwa auf demselben Niveau wie der Grundwasserstand in Räbel, der Grundwasserabfluss ist laut Karte von der Elbe weg in Richtung Westen gerichtet. Die Ortschaft Räbel wird insgesamt durch einen Deich so geschützt, dass sie bei einem 200-jährigen Hochwasser nicht geflutet

wird, allerdings müssen hierfür die Deiche auch standfest genug sein, was in diesem Flussabschnitt derzeit verbessert wird. Das Gelände liegt mit 28-29 mNN etwa 2,2 m über dem Mittelwasserstand der Elbe (25,83 mNN in Sandau). Bei Hochwasser von 5 m ü. MW ergibt sich eine deutlich Flutung des Gebiets, wenn der Deich unberücksichtigt bleibt.

Die Grundwasserneubildung spielt für das Strömungsgeschehen in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Die jährliche Grundwasserneubildungsrate liegt bei etwa 50-100 mm/a, was insbesondere an den geringen Grundwasserflurabständen und der dadurch erhöhten Verdunstung liegt. Das meiste oberirdisch abfließende Wasser wird über Gräben und die Kanalisation gefasst.

In der Abbildung 3 ist der Zusammenhang zwischen den Oberflächen- und Grundwasserständen nur undeutlich zu sehen, was an der Überprägung der Grundwasserganglinie durch von der Landseite abfließendes Grundwasser liegt.

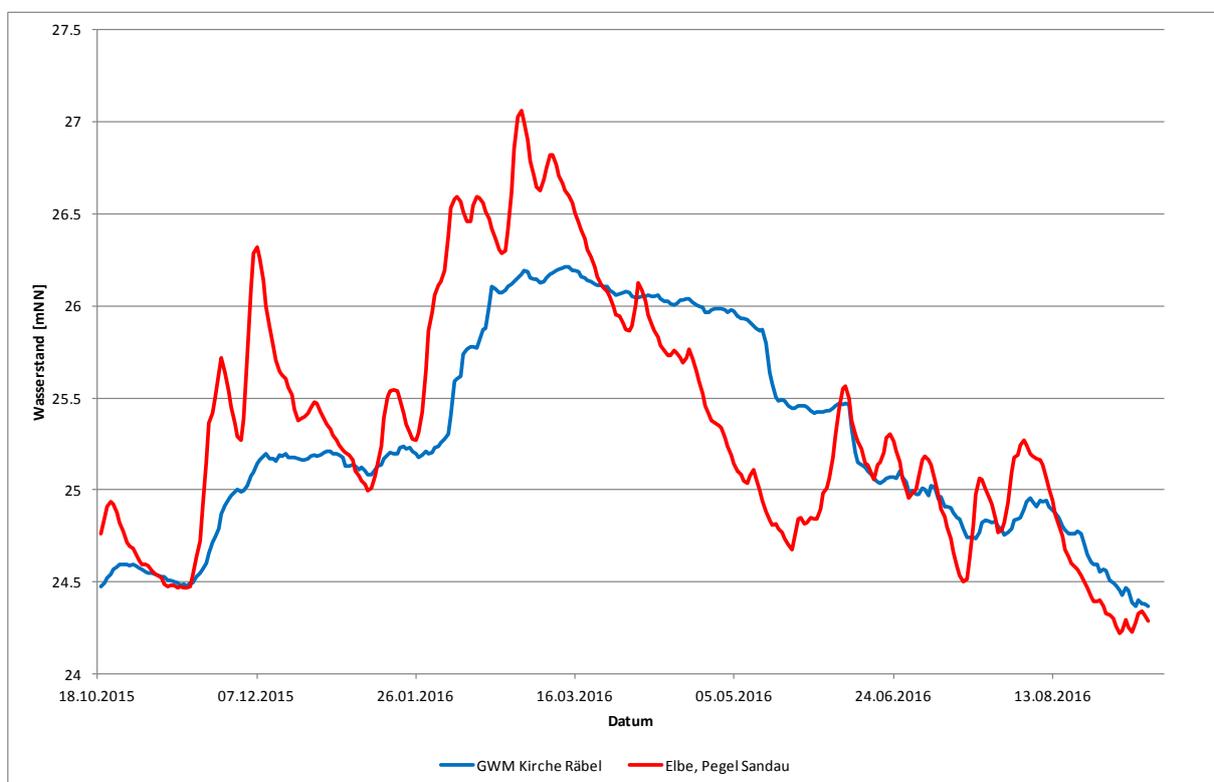


Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände Elbe, Pegel Sandau mit den Grundwasserständen Kirche Räbel.

Die Zeitverschiebung zwischen den Oberflächenwasserständen und den Grundwasserständen konnte zur Identifikation der hydraulischen Leitfähigkeit und der Transmissivität genutzt werden.

3 Auswertung der Messergebnisse

Zur Auswertung der Messergebnisse wurden mehrere Verfahren eingesetzt: Das Bohrgut wurde in Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit ausgewertet, und es wurden Kurzzeit-Pumpversuche durchgeführt.

3.1 Bohrgutansprache

Die bedeckende, nur wenige dm mächtige Bodenschicht aus Feinsand wird als mäßig durchlässig mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von etwa $5 \cdot 10^{-5}$ m/s angesehen (s. Abbildung 4). Insgesamt dominieren Mittel- und Grobsand den Bodenaufbau. Diese Sande sind gute Grundwasserleiter (geschätzter k_f -Wert $5 \cdot 10^{-4}$ m/s), im Falle eines Hochwassers auf jeden Fall strömungswirksam. Hierdurch kommt es im Hochwasserfall zu einem Vordringen eines erhöhten Grundwasserdruckspiegels und auch zu einer Durchfeuchtung der Fundamente. Die Schluff- und Tonschicht in 1,10 m - 2,50 m Tiefe führt nicht zu einer Destabilisierung der Fundamente im Hochwasserfall, da sie nicht flächendeckend vorhanden ist. Die im Kartenwerk angegebenen sehr hohen Durchlässigkeiten von etwa $8 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-3}$ m/s sind für diesen Bereich sicher zutreffend.

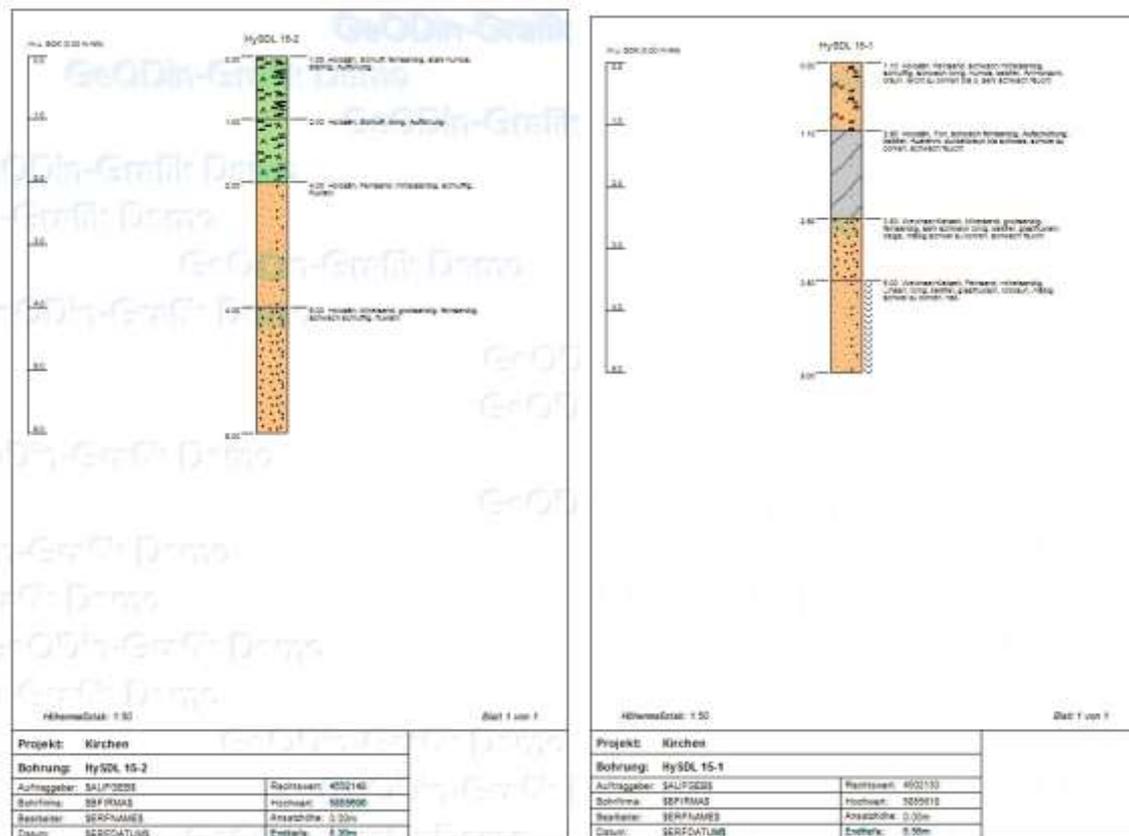


Abbildung 4: Bohrprofile der beiden Grundwassermessstellen an der Kirche Räbel. Die Bohrersatzhöhen liegen bei etwa 27,6 mNN.

3.2 Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten

Der Grundwasserleiter ist ungespannt, wobei der Wasserstand maßgeblich von der Elbe, aber mittelbar von auch den westlich liegenden Gräben und der Grundwasserneubildung dominiert werden. Das Grundwasser ist aufgrund der Flurabstände mittelmäßig gegen Schadstoffeinträge geschützt. Die Speicherkoeffizienten für den Sand werden auf etwa 0,1 bis 0,15 geschätzt.

3.3 Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität

Die hydraulische Durchlässigkeit sowie die Transmissivität wurden über Kurzzeit-Pumpversuche bestimmt, was lediglich die lokalen Werte angibt.

Hydraulische Durchlässigkeit: ca. $7 \cdot 10^{-4}$ m/s

Transmissivität: ca. $1 \cdot 10^{-2}$ m²/s

Auch die Berechnung über den Vergleich zwischen Grundwasser- und Oberflächenwasserganglinie haben diese Ergebnisse bestätigt. Die Ergebnisse liegen im Bereich der Schätzungen nach Bohrgutansprache und des Kartenwerks und sind daher plausibel. Da die Sohle des Grundwasserleiters nicht erbohrt wurde, wurde die Mächtigkeit pauschal mit 20 m angenommen.

4 Modellierungswerkzeug

Die Erstellung des beschriebenen Modells wurde mit dem Werkzeug Feflow (R) durchgeführt.

Das Werkzeug Feflow(R) (Diersch 2014) ist ein universelles Werkzeug zur Modellierung der Grundwasserströmung und des Transports von gelösten Stoffen im Grundwasser. Auf die Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden. Das Werkzeug ist in vielen Projekten weltweit getestet worden und wird vom Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie seit Jahrzehnten für ähnlich gelagerte Fragestellungen eingesetzt. Leider ist das Werkzeug nicht OpenSource, so dass die erstellten Modelle nur mit vorhandener Lizenz verarbeitet werden können.

5 Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung

5.1 Randbedingungen

Die hydrologischen Randbedingungen für dieses Grundwassermodell sind recht gut zu fassen: Die Elbe und ein Grabensystem im Westen von Räbel können als Dirichlet-Randbedingungen ins Modell übernommen werden. Leider liegen für die lokalen Gräben keine Ganglinien vor. Eine Übernahme der mittleren Wasserstände ist jedoch zweckmäßig und plausibel. Da keine Informationen über Brunnen vorliegen und die gemessene Grundwasserganglinie keine Einflüsse von Grundwasserentnahmen zeigt, wurden keine weiteren Randbedingungen festgelegt.

Das resultierende Grundwasserströmungsmodell sollte daher die hydrogeologischen Verhältnisse in weiten Teilen richtig wiedergeben.

Ein größeres Problem für das Grundwassermodell stellt das weite Deichvorland dar, das bei jedem mittleren Hochwasser bereits in unterschiedlichem Ausmaß geflutet wird. Hierfür sind besondere Modellierungsverfahren notwendig, um das Verhalten des Grundwassers hinter dem Deich richtig wiedergeben zu können.

5.2 Parameter

Die hydrogeologischen Parameter sind über das betrachtete Objekt hinaus mit Hilfe des Kartenwerks festgelegt worden, jedoch mit ihrer oberen Grenze. Für die Sand-Grundwasserleiter wurden global zunächst $1 \cdot 10^{-3}$ m/s eingesetzt. Damit liegen sie über den lokal gemessenen Werten und entsprechen den Werten der Kartenwerke.

5.3 Kalibrierung

Wegen der detaillierten Grundwasser- und Oberflächenwasserstandsmessungen konnte das Modell gut kalibriert werden, denn die Abhängigkeiten insbesondere in Hinblick auf die zu berechnenden Szenarien sind eindeutig. Die mittleren Grundwasserstände konnten auf wenige cm genau modelliert werden. Die Dynamik wird etwas schlechter wiedergegeben, aber zeigt denselben Wertebereich und weicht nur in der zeitlichen Achse etwas von den gemessenen Werten ab.

Es wurde der Zeitabschnitt 19.10.2015 bis 12.9.2016 kalibriert, um eine Grundlage für die Szenarienberechnung im Hochwasserfall zu gewinnen. Damit wurden die höchsten Wasserstände des hydrologischen Jahres von Oktober 2015 bis Oktober 2016 erfasst. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung für einen mittleren Wasserstand sowie die Grundwasserdruckspiegel für ein Hochwasser gleichen Ablaufs wie Anfang Juni 2013. Die Grundwasserganglinien der Messungen und des kalibrierten Modells sind in Abbildung 6 zum Vergleich einander gegenübergestellt. Hierzu ist anzumerken, dass keinerlei Wetterdaten mit eingeflossen sind, die sich zusätzlich zu den Oberflächenwasserständen auf die Dynamik auswirken. Der Einfluss wird aufgrund der ansonsten deutlich wiedergegebenen Wasserstandsganglinie vernachlässigt. Im Hochwasserfall steht das Grundwasser nach dem Modell wie 2013 beobachtet nur etwa 0,2 m bis 0,3 m unter Flur, d.h. die beobachteten Schäden sind nachvollziehbar auf die hochwasserinduzierten Grundwasserstände zurückzuführen.

Die Parameterbelegung im kalibrierten Modell gestaltet sich wie folgt:

Durchlässigkeit Grundwasserleiter: $1,2 \cdot 10^{-3}$ m/s

Speicherkoeffizient: 0,2

Ungespannte Grundwasserverhältnisse.

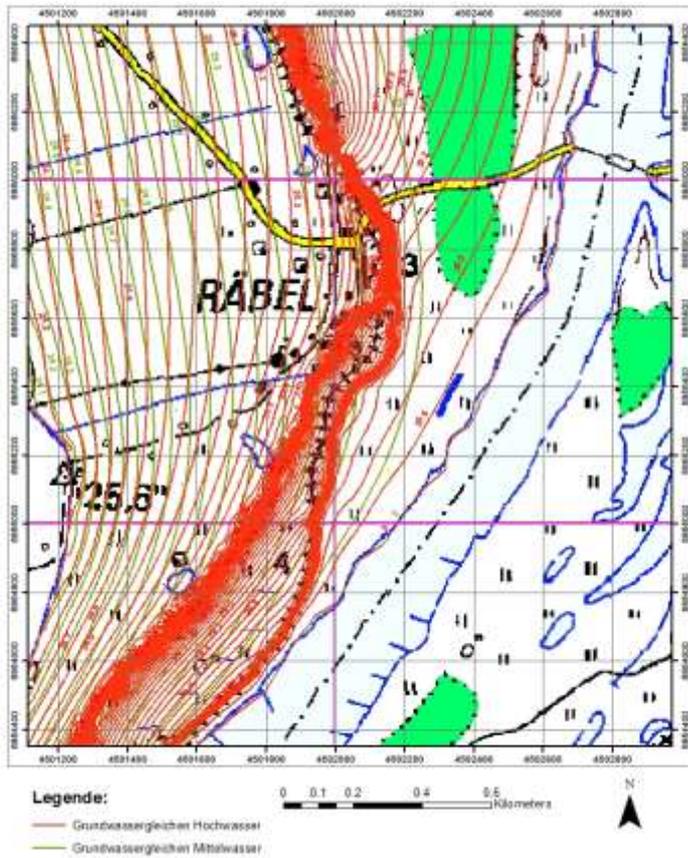


Abbildung 5: Grundwassergleichen des Grundwasserleiters mit Mittelwasserstand (Pegel Sandau 25,79 mNN) und Hochwasserstand Juni 2013 (Pegel Sandau 30,71 mNN).

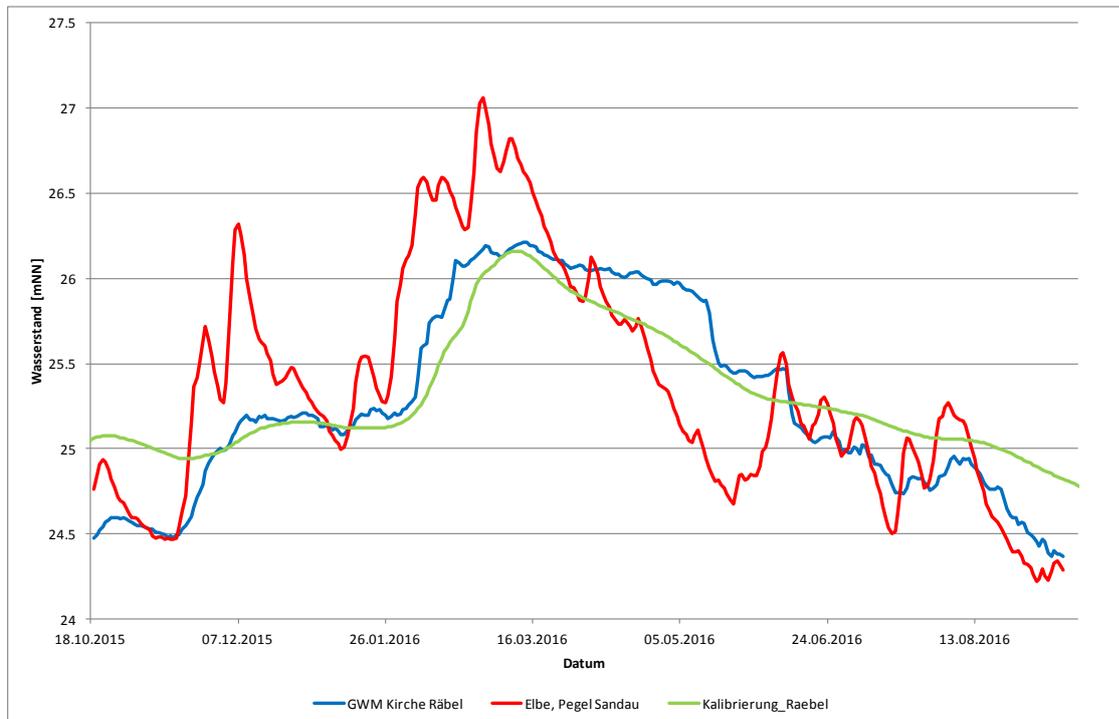


Abbildung 6: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy SDL 1/15 (Kirche Räbel)

5.4 Szenarien

Die wichtigste Fragestellung für dieses Denkmal ist die Wirkung des Deiches und seiner Gründung mit Hilfe einer Spundwand: Wie wirkt sich die Spundwand auf den Abfluss zur Elbe hin aus und wie wirkt sie im Hochwasserfall. Ein reduzierter Abfluss wird durch sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten simuliert. Im Falle des normalen Abflussregimes kann die Spundwand zu erhöhten Grundwasserständen führen, im Hochwasserfall zu verringertem Qualmwasseranfall und reduzierten Grundwasserständen. Diese Vermutung wird durch zwei Szenarien getestet. Das zweite Szenario geht auf die Möglichkeit einer Drainage ein und soll ihre Entnahmemenge größenordnungsmäßig feststellen. Auch die Entnahme über Brunnen soll der Vollständigkeit halber in einem dritten Szenario getestet werden.

6 Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse

6.1 Aktive Grundwasserbeeinflussungen

Die Beeinflussung des Grundwasserstände durch eine Drainage auf 26 mNN, die nur im Hochwasserfall wirksam wird, bringt die Wasserstände auf das erforderliche Niveau. Hierfür müssen allerdings Wassermengen von etwa 50 m³/h über mehrere Tage über den Deich gepumpt werden.

Der Einbau von Pumpen in zwei neu zu errichtende Brunnen ist technisch machbar. Es müsste ein Brunnen an der Nord- und einer an der Südseite erstellt werden, um mit den Absenkungstrichtern das ganze Gebäude zu erfassen. Bei einer Pumprate von 30-50 m³/h an jedem der beiden Brunnen bleiben die maximalen Wasserstände zwischen 26,5 und 27,0 mNN, so dass die Fundamente und der Fußboden nicht gefährdet sind.

Das Wasser müsste über die Deichkrone gefördert werden.

Die Rohrtouren sind aufgrund der Bohrerergebnisse wie folgt anzusetzen:

0-3 m Vollrohr DN 150 mm

3-7 m Filterrohr DN 150 mm

Kein Schlammfang

Der oberirdische Ausbau kann über Flur erfolgen, was im Hochwasserfall bei den zu erwartenden geringen Grundwasserflurabständen von Vorteil sein kann. Allerdings sind die Auflagen des Denkmalschutzes zu berücksichtigen. Eine Anpassung der Rohrtouren aufgrund der Bohrerergebnisse kann notwendig werden.

Nach Erstellung des oder der Brunnen sollten diese unbedingt freigespült/"entsandet" werden. Die Freispülung sollte alle 2-5 Jahre wiederholt werden, um zu gewährleisten, dass die Verockerung nicht die Funktion gefährdet.

Die Brunnen können auch als Versickerungsbrunnen für Regenwasser genutzt werden. Hierfür muss allerdings der Abstand zur Kirche optimiert werden, damit nicht bei Starkniederschlägen oder bei Hochwasser (unterhalb des Alarmpegels) die Kirchenfundamente nass werden.

6.2 Passive Maßnahmen

Die Spundwand wurde mit einer Eindringtiefe von 20 m einbezogen, was in der Realität schon einen großen technischen Aufwand bedeuten würde. Dennoch werden die Grundwasserstände nur unwesentlich reduziert, so dass sich kein positiver Effekt im Hochwasserfall einstellt. Für das normale Abflussregime vom Grundwasser in die Elbe ändern sich die Werte allerdings auch nicht, so dass diese aus ingenieurtechnischer Sicht notwendige Maßnahme durchgeführt werden kann.

6.3 Empfehlungen für einen Alarmplan

Der Alarmpegel in Sandau ist bei etwa 28 mNN erreicht. Ab dem Zeitpunkt des Erreichens des Alarmpegels steht maximal 1 Tag (besser innerhalb 12 Stunden) bis zum Einsetzen und Inbetriebnahme der Pumpen in den beiden Brunnen zur Verfügung. Je nach Hochwasserscheitel braucht die Pumpleistung nicht auf die vollen 50 m³/h gefahren zu werden, aber für einen Hochwasserfall wie im Juni 2013 sollte eine solche Pumpenleistung vorgehalten werden. Die elektrisch zu betreibenden Unterwasserpumpen (keine Saugpumpen, da die Förderhöhe zum Erreichen des Radius der Absenktrichter möglicherweise zu groß werden könnte) sollten entweder über ein Notstromaggregat (400V Drehstrom/Dreiphasenwechselstrom) oder eine entsprechende Leitung von einem höher gelegenen Stromkasten aus bedient werden, wobei bei Betrieb mit Notstromaggregat(en) zu beachten ist, dass diese trocken stehen müssen.

Bei Einbau einer Drainage muss diese routinemäßig gewartet werden, d.h. in regelmäßigen Abständen von max. 1 Jahr freigespült werden. Wenn der Einbau ohne weitere Bepflanzung direkt zwischen Kirche und Spundwand/Deich geschieht, reduziert sich der Wartungsaufwand. In diesem Fall muss nur eine Schmutzwasserpumpe mit der entsprechenden Kapazität (ca. 50 m³/h) vorgehalten werden. Auch für diesen Fall muss eine entsprechend ausgelegte Stromversorgung verfügbar sein.

7 Zusammenfassung

Die Modellierungsergebnisse haben gezeigt, dass die aus statischer Sicht für den Deichbau notwendige Spundwand sich nur geringfügig auf die Grundwasserstände auswirken wird. Damit fällt diese passive Lösung aus. Die Erstellung von Brunnen und die Absenkung des Grundwassers im Hochwasserfall ist eine aktive Lösung mit dem gewünschten Erfolg. Zwei Brunnen mit einer Pumprate von 30-50 m³/h können hierfür eingebaut werden. Eine weitere Möglichkeit mit großer Wirkung stellt eine Drainage landseitig des Deiches auf 26 mNN dar. Die modellierten abzuführenden Wassermengen von etwa 50 m³/d sind recht gering, weshalb diese Lösung als bevorzugte Variante angesehen werden kann.



Bericht HAL 51/2017

Grundwasserprojekt (DBU)

Sydow, Kirche

Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht

Beauftragt durch: Evangelische Kirchengemeinde Sydow

Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Anzahl der Seiten: 22

Anlage: Abschlussbericht der Hydrogeologischen Untersuchungen
„Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Sydow“,
GOSSEL (2017) vom 25.08.17

Halle, 18.08.2017

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351-48435-100

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 203 140 15097

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Voruntersuchungen (Bericht HAL 52/2015 (MEINHARDT, 2015))	4
2.1	Einleitung.....	4
2.2	Probenahme.....	4
2.3	Methodik.....	7
2.4	Quantitative Salzanalyse	7
2.5	Feuchtebestimmung mit der Darmmethode.....	7
2.6	Ergebnisse der Quantitativen Salzanalyse.....	8
2.7	Feuchtebestimmung	9
2.8	Schlussfolgerung.....	11
3	Aktualisierte Empfehlungen zu Putzmusterflächen am 07.10.2017	12
4	Feuchteuntersuchungen im Fundamentbereich (Bericht HAL 06/2015 (ZÖTZL, 2017))..	13
4.1	Probenahme und Vorgehensweise	13
4.2	Methodik und Analytik.....	17
4.3	Qualitative und quantitative Salzanalyse	17
4.4	Ergebnisse	17
4.5	Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen	17
4.6	Fazit - Feuchteuntersuchungen im Fundamentbereich	19
5	Aktualisierte Empfehlungen nach Projekttreffen am 26.04.2017 in Stendal	20
6	Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 52/2017, KALISCH, 2017).....	21
7	Literatur	22



Abb.: Sydow, Kirche (Südeseite), Aufnahme am 14.12.2016

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasser“, wurden im Bericht HAL 52/2015 (MEINHARDT, 2015) zu den Mauerwerksuntersuchungen (Erfassung der Feuchte- und auch Salzbelastung im Mauerwerk) unter Punkt 2 beschriebene Empfehlungen gegeben.

Eine weitere Aktualisierung der Maßnahmenempfehlungen erfolgte unter Einbeziehung der Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2016) am 05.07.2016 und im Januar 2017 (HAL 06/2017, ZÖTZL, 2017) nach Feuchteuntersuchungen im Fundamentbereich am 14.12.2016 vor Ort (Punkt 3).

Zum Projekttreffen am 24.11.2016 konnten die bisherigen Empfehlungen aktualisiert und präzisiert werden. Eine weitere Präzisierung erfolgte im Rahmen des Projekttreffens „Räbel-Sydow“ am 26.04.2017 in Stendal.

2 Voruntersuchungen (Bericht HAL 52/2015 (MEINHARDT, 2015))

2.1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes der DBU „Grundwasser“ sind zur Erfassung der aktuellen Feuchte- und auch Salzbelastung des Mauerwerkes Tiefenprofile zur Bohrmehlentnahme angelegt worden. Die Messungen sind auch im Zusammenhang mit den hydrologischen Untersuchungen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zu sehen. Die Ergebnisse dieser Messungen liegen zusammen mit den Modellierungen im August 2016, nach einjähriger Laufzeit vor. In dem Zusammenhang wird auch die Klimadatenerfassung ausgewertet werden. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen am Mauerwerk dienen einerseits als Bewertungsgrundlage für die Maßnahmen, die an dem Objekt zur Optimierung der Trocknung durchgeführt werden sollen und, um den tatsächlichen Einfluss des Grundwassers (Grundwasser-messtellen Hydrogeologie) auf das Mauerwerk und das Raumklima zu eruieren.

Die Kirche in Sydow zeigt vor allem auf der Nordseite eine massive und dauerhafte Durchfeuchtung. Es geht einerseits um die Klärung des Feuchteintrages und darüber hinaus die Ableitung von Empfehlungen, die die Trocknung des Mauerwerks befördern bzw. zukünftig den Feuchteintrag vermindern und unterbinden.

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am 21. Juli 2015. Insgesamt sind dabei 5 Tiefenprofile angelegt worden (siehe Abb. 1-3). Im Chor (Nordseite) wurden tiefenabhängig Bodenproben entnommen (siehe Abb. 4). In Tabelle 1 sind die entnommenen Proben hinsichtlich ihrer Herkunft beschrieben.

	<p>Abb. 1: Tiefenprofile 1 und 2 an der Nordseite des Chores</p>
	<p>Abb. 2: Tiefenprofile 3 und 4 an der Nordseite der Apsis</p>



Abb. 3: Tiefenprofil 5 an der Nordseite des
Kirchenschiffs



Abb. 4: Entnahmestelle der Fußbodenproben (Tiefenprofil), sehr feucht

Tab. 1: Verzeichnis der Bohrmehl- und Bodenproben. Die Tiefenprofile wurden in Fugen angelegt.)

Probe	Lokalisierung	Entnahmetiefe
SYD_K_TP1	Nordwand, 12 cm Höhe	
SYD_K_TP1/1		0-2
SYD_K_TP1/2		2-5
SYD_K_TP1/3		5-10
SYD_K_TP1/4		10-20
SYD_K_TP1/5		20-30
SYD_K_TP1/6		30-40
SYD_K_TP2	Nordwand, 45 cm Höhe	
SYD_K_TP2/1		0-2
SYD_K_TP2/2		2-5
SYD_K_TP2/3		5-10
SYD_K_TP2/4alt		10-20
SYD_K_TP2/4		10-20
SYD_K_TP2/5alt		20-30
SYD_K_TP3	Apsis, mittig, bodennah	
SYD_K_TP3/1		0-2
SYD_K_TP3/2		2-5
SYD_K_TP3/3		5-10
SYD_K_TP3/4		10-20
SYD_K_TP3/5		20-30
SYD_K_TP4	Apsis, mittig, 45 cm Höhe	
SYD_K_TP4/1		0-2
SYD_K_TP4/2		2-5
SYD_K_TP4/3		5-10
SYD_K_TP4/4		10-20
SYD_K_TP4/5		20-30
SYD_K_TP5	Südwand, bodennah	
SYD_K_TP5/1		0-2
SYD_K_TP5/2		2-5
SYD_K_TP5/3		5-10
SYD_K_TP5/4		10-20
SYD_K_TP5/5		20-30
Bodenproben	Nordwand, Nähe TP 1	
SYD_K_FB1		-7
SYD_K_FB2		-13
SYD_K_FB3		-24
SYD_K_FB4		-30

Weiterhin wurde ein Klimadatenlogger installiert, um die Entwicklungen des Raumklimas in Abhängigkeit vom Grundwasserspiegel und auch vom Außenklima betrachten zu können. Das Gerät wurde an der Nordseite des Chores, oberhalb der Tiefenprofile 1 und 2 angebracht (siehe Abb. 5).



Abb. 5: Lokalisierung des Klimadatenloggers an der Nordseite des Kirchenschiffes, im Chorbereich, oberhalb der Profile TP 1 und 2

2.3 Methodik

2.4 Quantitative Salzanalyse

Aus den Proben werden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgt eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial. Von den Extrakten wird mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sension 2.

Die Analysenergebnisse der Salzuntersuchungen werden in M.-% angegeben und bewertet. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Äquivalentkonzentrationen, die sich aus der Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

2.5 Feuchtebestimmung mit der Darrmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der Bohrmehlproben wird durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt.

2.6 Ergebnisse der Quantitativen Salzanalyse

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von einigen der Bohrmehlproben eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle (3) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (2) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 2: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	Gering			mitte			hoch		
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5- 1,5	0,1- 0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1- 0,3	0,05- 0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
Chlorid [M.-%]	< 0,008	<0,2	<0,05	>0,008 <0,026	0,2- 0,5	0,05- 0,5	>0,026 <0,08	>0,5	>0,5	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben des Tiefenprofils (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entsprechend Tabelle 2.

Tab. 3: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben der Tiefenprofile TP 1-5 und der Bodenproben

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
SYD_K_TP1/1	0,13	0,066	0,006	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
SYD_K_TP1/2	0,18	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP1/3	0,23	0,034	0,014	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
SYD_K_TP1/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP1/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP1/6	0,38	0,151	0,076	0,019	0,006	<0,01	0,019	0,017
SYD_K_TP2/1	0,18	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP2/2	0,17	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP2/3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP2/4alt	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP2/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP2/5alt	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP3/1	0,94	0,150	0,025	0,021	<0,005	0,017	0,060	0,168
SYD_K_TP3/2	0,40	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP3/3	0,15	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP3/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP3/5	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP4/1	0,27	0,070	0,010	0,026	<0,005	0,100	<0,01	<0,01
SYD_K_TP4/2	0,15	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP4/3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP4/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP4/5	0,31	0,203	0,087	0,015	<0,005	<0,01	0,017	<0,01
SYD_K_TP5/1	2,76	0,468	0,008	0,029	0,007	0,068	0,196	1,230
SYD_K_TP5/2	2,30	0,363	0,027	0,020	<0,005	0,018	0,217	0,825
SYD_K_TP5/3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP5/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_TP5/5	0,55	0,085	0,017	0,025	<0,005	0,017	0,048	0,097
SYD_K_FB1	0,12	<0,01	0,015	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
SYD_K_FB2	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_FB3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
SYD_K_FB4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Wie man an den Ergebnissen in Tabelle 3 erkennen kann, ist im Bereich der Tiefenprofil 1 und 2 keine relevante Salzbelastung festgestellt worden. Das Tiefenprofil 3, das bodennah im Apsisbereich angelegt wurde, liegt oberflächennah eine mittlere Nitratbelastung vor, die sich, wie anhand der Summen der löslichen Bestandteile nachvollzogen werden kann, nicht in größeren Tiefen fortsetzt. Die feuchten Flecken vor der Apsiswand (siehe Abb. 6, rechts) könnten auch auf hygroskopisch Feuchte aus dieser oberflächennahen Versalzung zurückgehen. Das darüber liegende Tiefenprofil (4) ist offensichtlich auch unkritisch. Tiefenprofil 5, das an der Nordwand des Kirchenschiffs bodennah in der Fuge angelegt worden ist, zeigt eine hohe und auch tiefreichende Belastung mit löslichen Bestandteilen an. Hier spielen vor allem Nitrate eine wesentliche Rolle (hohe bis extreme Nitratgehalte, Calcium- und Kaliumnitrat). Aber auch Chloride (Calciumchlorid) sind in relevanten Gehalten vorhanden. Die oberflächennahe Bodenprobe wurde auch quantitativ auf vorhandene Salze geprüft. Es liegt in diesem Bereiche keine Belastung vor.

2.7 Feuchtebestimmung

In der nachfolgenden Tabelle (4) sind die Ergebnisse der Darrfeuchtebestimmung an den Proben der Tiefenprofile dargestellt. Die farbige Markierung geben eine Orientierung bei der Bewertung des Feuchtegehaltes (ohne Markierung = sehr gering, grün = gering, türkis = mittel, rot = hoch, lila= extrem).

Tab. 4: Feuchtegehalte der Bohrmehlproben [M.-%] der Tiefenprofile TP 1-5 und der Bodenproben

Probe	Feuchtegehalt [M.-%]
SYD_K_TP1/1	8,56
SYD_K_TP1/2	8,64
SYD_K_TP1/3	8,87
SYD_K_TP1/4	8,59
SYD_K_TP1/5	7,25
SYD_K_TP1/6	8,54
SYD_K_TP2/1	7,40
SYD_K_TP2/2	6,76
SYD_K_TP2/3	5,79
SYD_K_TP2/4alt	10,68
SYD_K_TP2/4	5,96
SYD_K_TP2/5alt	5,75
SYD_K_TP3/1	5,88
SYD_K_TP3/2	6,21
SYD_K_TP3/3	6,02
SYD_K_TP3/4	5,93
SYD_K_TP3/5	5,31
SYD_K_TP4/1	6,95
SYD_K_TP4/2	7,49
SYD_K_TP4/3	5,83
SYD_K_TP4/4	5,74
SYD_K_TP4/5	0,75
SYD_K_TP5/1	8,96
SYD_K_TP5/2	17,16
SYD_K_TP5/3	18,31
SYD_K_TP5/4	26,63
SYD_K_TP5/5	23,09
SYD_K_FB1	6,20
SYD_K_FB2	14,55
SYD_K_FB3	8,15
SYD_K_FB4	8,76

2006 wurde das Gelände um die Kirche abgetragen, um so den Feuchteeintrag in das Mauerwerk zu reduzieren. In dem Zusammenhang ist auch im Inneren, im Sockelbereich der zementhaltige Putz abgenommen worden. Durch den dichten Putz wurde der Feuchteaufstieg im Mauerwerk noch befördert bzw. die Austrocknung behindert.

Im Zusammenhang mit dem Elbehochwasser 2013 bzw. dem Deichbruch bei Fischbeck gab es u.a. lange währende Grundwasserhochstände, die einen erheblichen Einfluss auf die Kirche in Sydow genommen haben. Auch wenn das Hochwasser als Oberflächenwasser die Kirche nicht erreichte, kam es durch das hohe Grundwasser zur Durchfeuchtung des Baugrundes und offensichtlich auch des Mauerwerks. Auch unter Normalbedingungen liegt der Grundwasserspiegel in Sydow nur ca. 80 cm unterhalb der Geländeoberkante (Auskunft Hydrogeologie, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Dr. W. Gossel). Zu den negativen Einflussfaktoren auf die Kirche gehört allerdings vor allem auch die bislang fehlende Dachentwässerung. Das Regenwasser versickert aktuell noch einfach am Fuß der Außenwand und trägt so erheblich zur Befeuchtung des Mauerwerks bei. Hier muss im Rahmen der Instandsetzung unbedingt eine Optimierung der Wasserableitung angestrebt werden (Einleitung des Regenwassers in die Kanalisation). Weiterhin liegt der Fußboden nachweislich in feuchtem bzw. nassem Sand. Das Einbringen einer kapillar brechenden Schicht im Fußboden wäre auf dem Weg der Optimierung der Trocknung der Kirche bzw. der Wandflächen ebenfalls zu empfehlen. Mit Hinblick auf die Konzentrierung der Feuchtigkeit auf den nördlichen Teil der Kirche und die Apsis, zumindest sind nur dort feuchte Bereiche auffällig und entsprechende Messungen belegen bodennah eine extreme Befeuchtung (siehe Abb. 6), könnte eventuell auch eine differenzierte Herangehensweise (Teilbereich des Fußbodens) ausreichen. Generell ist aber ein ganzheitlicher Ansatz zu bevorzugen.



Abb. 6: Feuchte Bereiche in der Kirche

Die Installation einer Vertikalsperre, ob als Lehm oder als Dickbeschichtung ausgeführt, wird nicht zwangsläufig als vorrangig angesehen, da das hochstehende Grundwasserniveau immer auch die Gründung der Kirche bzw. den Fundamentbereich erreichen wird. Mit Hinblick darauf wäre eine vertikale Absperrung nicht wirksam. Für die Abwehr von Oberflächenwasser wären die Installation von Dachrinnen und die ordentliche Ableitung des Wassers hingegen absolut vorrangig.

2.8 Schlussfolgerung

Die Feuchtesituation der Kirche erfordert eine Optimierung der Abtrocknung des Mauerwerks bzw. der Vermeidung des Feuchteintrages. Hier spielt vor allem Niederschlagswasser eine große Rolle. Die Installation einer funktionierenden Dachentwässerung ist unbedingt erforderlich. Da dem Feuchteintrag, der sich theoretisch durch Grundwasserhochstände ergeben kann, keine effektive Maßnahme entgegnet werden kann, bzw. um die Trocknung generell zu optimieren, muss der betroffenen Bereich durch geeignete Putze längerfristig geschützt werden. Der Fußboden zeigt sich zumindest im Bereich der Probeöffnung als sehr nass. Es handelt sich bei dem Unterlager der Bodenziegel um sehr feuchten Sand. Eine Trocknung kann durch die Installation einer kapillarbrechenden Schicht im Boden verbessert werden bzw. wird dadurch auch der Feuchtigkeitseintrag unterbunden. Auch die Installation einer Drainage wird als vorteilhaft bewertet. Die Einbringung einer Vertikalsperre wird nicht unbedingt als erforderlich angesehen. Die Abnahme des Putzes im Innenraum hat mit Sicherheit bereits zur Reduktion vorhandener Salze geführt. Allerdings haben die Untersuchungen an der Nordwand des Kirchenschiffs gezeigt, dass noch erhebliche Salzgehalte (vor allem Nitrate) bis in große Tiefen vorliegen. Diesem Potential muss mit einem Salzspeicherpotential im neu aufzubringenden Putz begegnet werden, um dessen längeren Erhalt zu gewährleisten und so die Kosten für die Gemeinde auf längere Sicht zu reduzieren. Auch die Eignung des Putzmaterials für feuchte Untergründe soll gewährleistet sein.

Folgende Putzempfehlungen werden für den Innenputz gegeben. Vorteilhaft wäre es, die Eignung für die Kirche in Sydow zunächst in Musterflächen für mindestens 6 Monate zu prüfen.

1. Otterbein Porenputz, der entweder zweilagig aufgebracht wird oder in Kombination mit einer auflagernden Putzschicht aus normalem NHL für eine noch bessere optische Denkmalverträglichkeit
2. Keim Seccopor Feuchteregulierungsputz

Das Außenmauerwerk muss in einigen Bereichen unbedingt in Stand gesetzt werden. Hier gibt es Ausbrüche von Ziegelsteinen (siehe Abb. 7), die unbedingt repariert werden müssen, um ein Fortschreiten der Schäden zu vermeiden.



Abb. 7: Schäden am Mauerwerk der Kirche (Apsis und nördliche Chorwand)

3 Aktualisierte Empfehlungen zu Putzmusterflächen am 07.10.2017

Anlage von Putzmustern

Die Vorgaben für die Putzmuster wurden um „denkmalgerechte“ Lösungen erweitert, da auf Grund der geringen Bestandputzstärken (zwischen 5 mm und 10 mm mit Korngrößen bis max. 2 mm) nur eine geringe Auftragsstärke möglich ist. Allein im nördlichen Chorbereich betragen diese bis ca. 2,5 cm (Aussage Herr Dr. Richter, Putz war bei Termin vor Ort bereits abgeschlagen). Die Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit von Funktionsputzen dadurch wird berücksichtigt.

Auf Grund eines möglichen Alkalieintrags wird versucht, möglichst „keine“ zement- oder trasshaltigen Putze anzuwenden. Zementbestandteile sollten alkaliarm und hochsulfatbeständig sein. Bewusst ist, dass auch NHL oder Romazement Alkalien mitbringen, jedoch allgemein weniger.

1. Fläche (Referenz): Baustellenmischung: Otterbein Calcidur NHL3,5 (1 RT), Sand regional, ungewaschen bis 2 mm (3 RT)
2. Fläche: Baustellenmischung (Salzspeicher): Otterbein Calcidur NHL3,5 (1 RT), Sand regional, ungewaschen bis 2 mm (2,5 RT), Bims 1-2 mm (0,5 RT)
3. Fläche: MC-Bauchemie, Exzellent historic Feinputz, Feuchteregulierungsputz mit Romanzementanteil
4. Fläche: MC-Bauchemie, Oxal NHL 3 historic, NHL und Romanzementanteil
5. Fläche: Otterbein „Histocal“ Porenputz fein
6. Fläche: KEIM Seccopor-Grosso

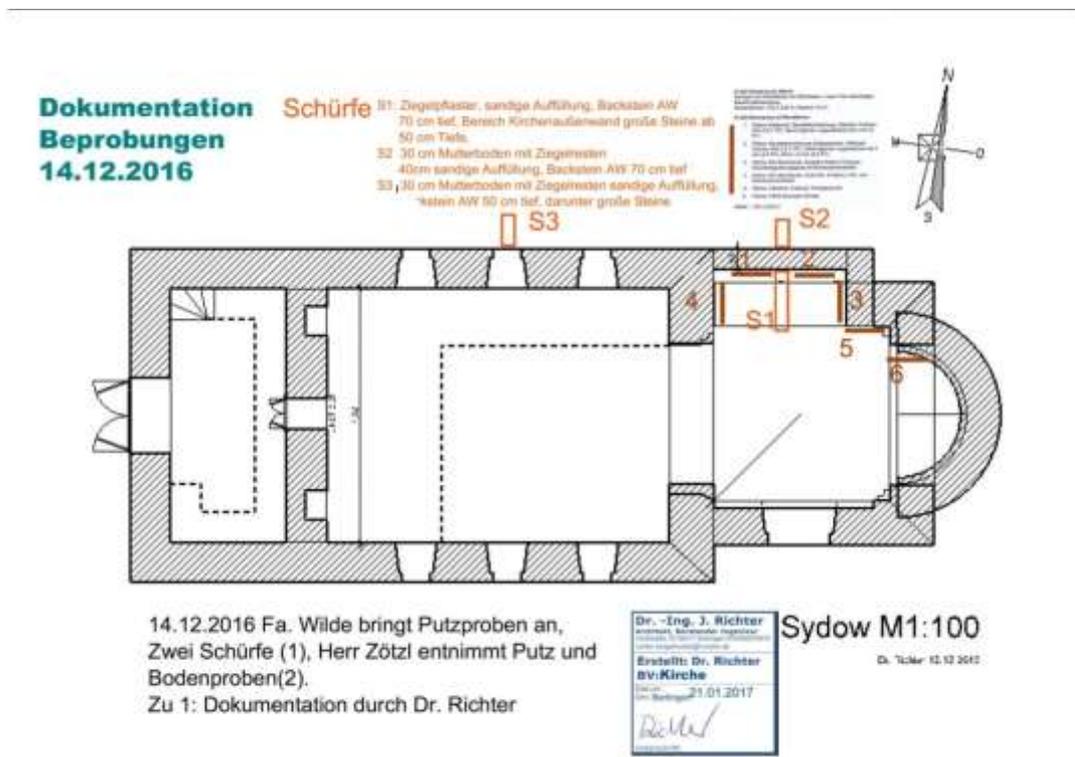


Abb. 1: Sydow, Kirche, Zeichnung, **Anlage der Putzmusterflächen 1-6 am 14.12.2014**; sowie der Schürfe (Zeichnung und Dokumentation Dr. Richter)

4 Feuchteuntersuchungen im Fundamentbereich (Bericht HAL 06/2015 (ZÖTZL, 2017))

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasser“, wurden Feuchteuntersuchungen im Fundamentmauerwerk durchgeführt. Dazu wurden auf Veranlassung des Planers, Herrn Dr. Richter, durch eine Baufirma Schürfe im Innen- und Außenbereich, auf der Nordseite der Kirche Sydow, angelegt. Die Untersuchungen dienen der Beurteilung der Feuchtesituation im Fundamentbereich sowie zur Bestimmung der Fundamenttiefen. Die Werte werden für die Bewertung der Modellierungsergebnisse der Hydrogeologie (MLU, Prof. Gossel) in Hinblick auf den Grundwasseranschluss des Mauerwerks benötigt.

Der Bericht beinhaltet die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und daraus resultierende Empfehlungen zum baulichen Vorgehen.

4.1 Probenahme und Vorgehensweise

Die Probenahme und Anlage der Schürfe erfolgte am 14.12.2016 vor Ort. Für die Untersuchungen zur Feuchte wurden Bohrmehlhöhen- und -tiefenprofile angelegt. Die Tab.1 informiert über die Probenahme und die Art der durchgeführten Untersuchungen. Die Abb. 1 bis Abb. 8 dokumentieren die Probenahme.

Tab. 1 Probenübersicht und Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen

Probennummer	Entnahmeort	Bemerkungen	Analyse
Sy_SI_TP1	Nordseite, <u>Schürfe innen</u> , Probenahmepunkt SI, 40 cm unter GOK 0-5 cm	Fuge	Feuchte
Sy_SI_TP2	5-15 cm		Feuchte
Sy_SI_TP3	15-25 cm		Feuchte
Sy_SI_TP_uL	Sand/Material in Schürfe in 40 cm Tiefe	Sand	Feuchte
Sy_SI_TP_uZ	Sand/Material in Schürfe unterhalb Ziegelfußboden, ca. 8 cm Tiefe	Sand	Feuchte
Sy_SA_TP1	Nordseite, <u>Schürfe II außen</u> , Probenahmepunkt SA, 40 cm unter GOK 0-5 cm	Fuge	Feuchte
Sy_SA_TP2	5-15 cm		Feuchte
Sy_SA_TP3	15-25 cm		Feuchte
Sy_SA_TP_Boden	Bodenmaterial in Schürfe ca. 25 cm unter GOK	Boden	Feuchte
Sy_SA_TP_Tiefe	Sand/Material in Schürfe unterhalb Fundament, ca. 80 cm Tiefe	Sand/Boden Fundamenttiefe: ca. 50 cm	Feuchte
Sy_SAgI_TP1	Nordseite, <u>Schürfe I außen</u> , gegenüber Schürfe I innen, Probenahmepunkt SAgI, 45 cm unter GOK 0-5 cm	Fuge	Feuchte
Sy_SAgI_TP2	5-15 cm		Feuchte
Sy_SAgI_TP3	15-25 cm		Feuchte
Sy_SAgI_TP_Boden	Bodenmaterial in Schürfe in Höhe der Bohrung ca. 25 cm unter GOK	Boden	Feuchte
Sy_SAgI_TP_Tiefe	Sand/Material in Schürfe unterhalb Fundament, ca. 80 cm Tiefe	Sand/Boden Fundamenttiefe: ca. 70 cm	Feuchte

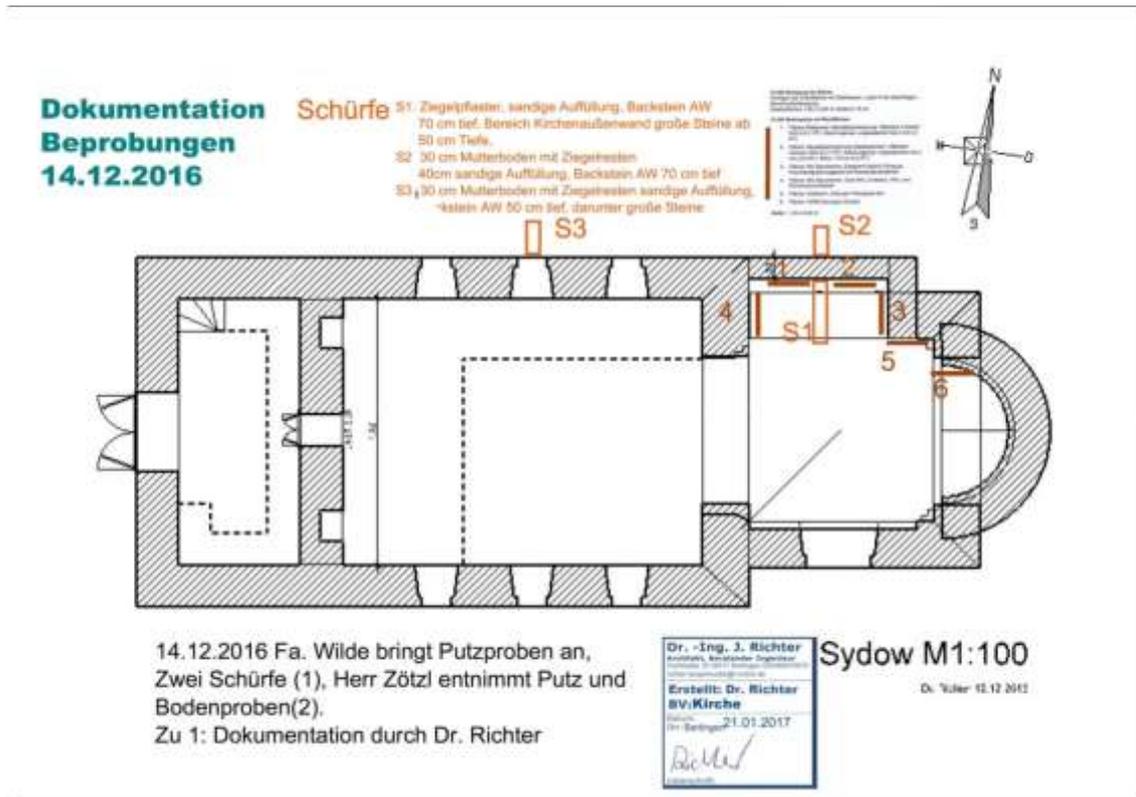


Abb. 1: Sydow, Kirche, Zeichnung, Anlage der Schürfe und Probenahmepunkte: roter Pfeil = Schürfe I innen und außen, blauer Pfeil = Schürfe II außen (Zeichnung und Dokumentation Dr. Richter)



Abb. 2 Sydow, Kirche, Nordseite



Abb. 3 Sydow, Kirche, Skizze, Anlage der Schürfe und Probenahmepunkte: roter Pfeil = Schürfe I innen und außen, blauer Pfeil = Schürfe II außen



Abb. 4 Nordseite, Schürfe I außen, gegenüber Schürfe I innen, **Fundamenttiefe: ca. 70 cm**



Abb. 5 Nordseite, Schürfe I außen, gegenüber Schürfe I innen, Probenahmepunkt SAgl, 45 cm unter GOK



Abb. 6 Nordseite, Schürfe II außen, **Fundamenttiefe: ca. 50 cm**



Abb. 7 Nordseite, Schürfe II außen, Probenahmepunkt SA, 40 cm unter GOK



Abb. 8 Nordseite, Schürfe II außen, vorgesetztes Fundament



Abb. 9 Geländeunebenheiten führen zur Bewässerung der Fundamente



Abb. 10 Geländeunebenheiten im Bereich der Tropfkante
führen zur Bewässerung der Fundamente

4.2 Methodik und Analytik

4.3 Qualitative und quantitative Salzanalyse

Für die chemischen Analysen wurden Probenahmen vor Ort durch das IDK durchgeführt. Mit einem Spiralbohrer ($\varnothing = 14 \text{ mm}$) wurde aus definierten Tiefenstufen Bohrmehl entnommen und in luftdichten Schnappdeckelbehältern aufgefangen. Die Feuchtebestimmung erfolgt mittels Darmmethode (WTA 1999).

4.4 Ergebnisse

4.5 Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen

In der Tab. 2 sind die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen an den Bohrmehlproben dargestellt. Die Abb. 1 bis Abb. 16 veranschaulichen diese. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt im Fazit.

Tab. 2 Probenübersicht und Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen

Probennummer	Entnahmeort	Bemerkungen	Feuchte [Ma.-%]
Sy_SI_TP1	Nordseite, <u>Schürfe innen</u> , Probenahmepunkt SI, 40 cm unter GOK 0-5 cm	Fuge	20,20
Sy_SI_TP2	5-15 cm		16,56
Sy_SI_TP3	15-25 cm		14,11
Sy_SI_TP_uL	Sand/Material in Schürfe in 40 cm Tiefe	Sand	7,52
Sy_SI_TP_uZ	Sand/Material in Schürfe unterhalb Ziegelfußboden, ca. 8 cm Tiefe	Sand	9,03
Sy_SA_TP1	Nordseite, <u>Schürfe II außen</u> , Probenahmepunkt SA, 40 cm unter GOK 0-5 cm	Fuge	25,21
Sy_SA_TP2	5-15 cm		14,42
Sy_SA_TP3	15-25 cm		14,45
Sy_SA_TP_Boden	Bodenmaterial in Schürfe ca. 25 cm unter GOK	Boden	11,73
Sy_SA_TP_Tiefe	Sand/Material in Schürfe unterhalb Fundament, ca. 80 cm Tiefe	Sand/Boden	8,03
Sy_SAgI_TP1	Nordseite, <u>Schürfe I außen</u> , gegenüber Schürfe I innen, Probenahmepunkt SAgI, 45 cm unter GOK 0-5 cm	Fuge	14,96
Sy_SAgI_TP2	5-15 cm		14,62
Sy_SAgI_TP3	15-25 cm		13,26
Sy_SAgI_TP_Boden	Bodenmaterial in Schürfe in Höhe der Bohrung ca. 25 cm unter GOK	Boden	18,78
Sy_SAgI_TP_Tiefe	Sand/Material in Schürfe unterhalb Fundament, ca. 80 cm Tiefe	Sand/Boden	9,56

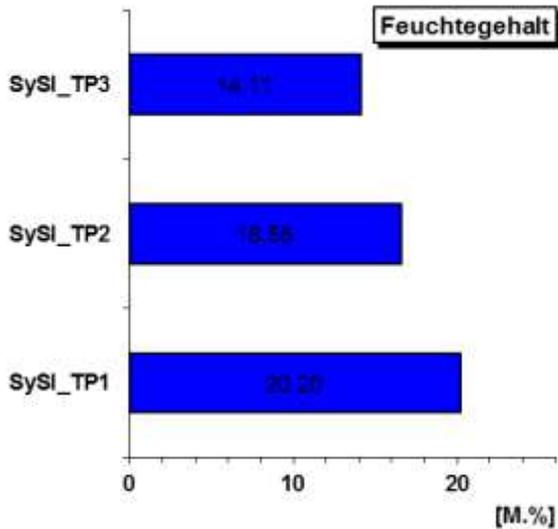


Abb. 1 Feuchteverteilung im Mauerwerk (Schüfe I, Innenbereich), in einer Tiefe von 40 cm unter GOK

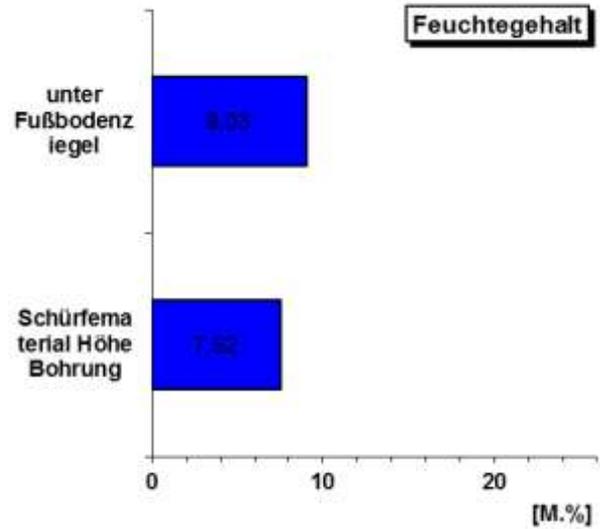


Abb. 2 Feuchteverteilung in der Schüfe I (Innenbereich), unterhalb des Ziegelfußbodens und in der Schüfe auf Höhe der Bohrung

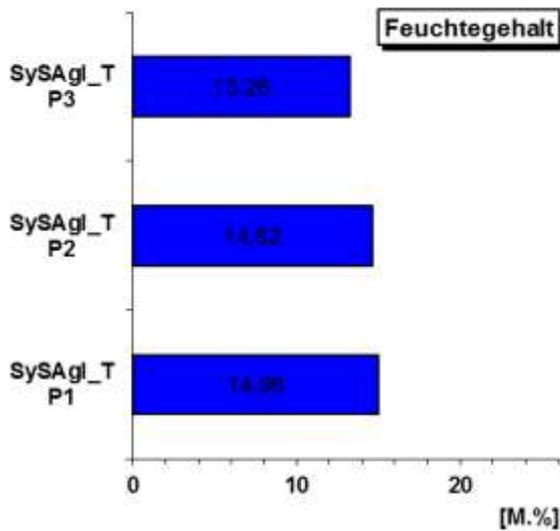


Abb. 3 Feuchteverteilung im Mauerwerk (Schüfe I, Außenbereich), in einer Tiefe von 40 cm unter GOK

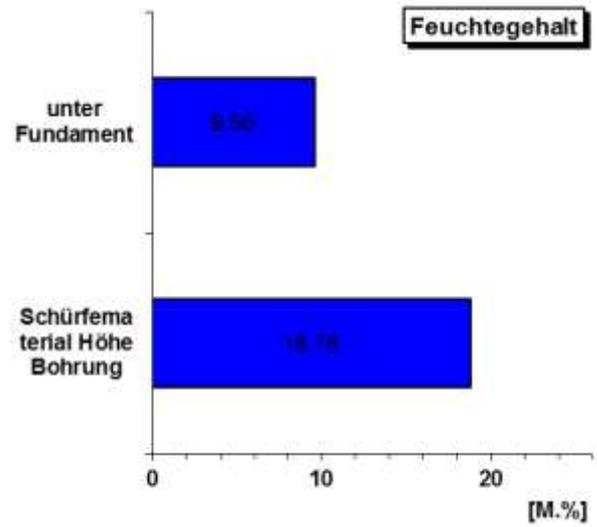


Abb. 4 Feuchteverteilung in der Schüfe I (Außenbereich), Material in der Schüfe unter Fundament und auf Höhe der Bohrung

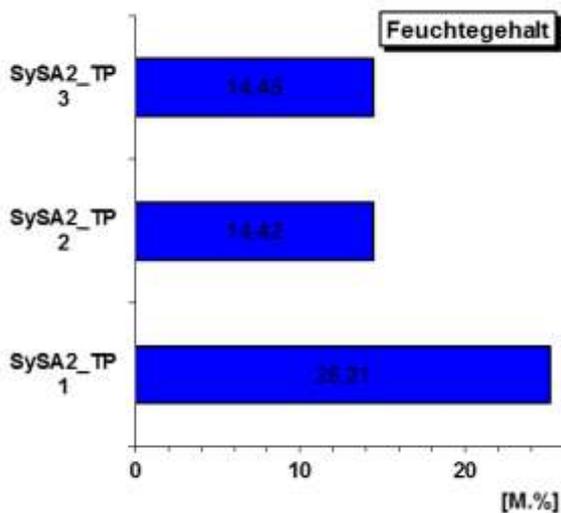


Abb. 5 Feuchteverteilung im Mauerwerk (Schüfe II, Außenbereich), in einer Tiefe von 40 cm unter GOK

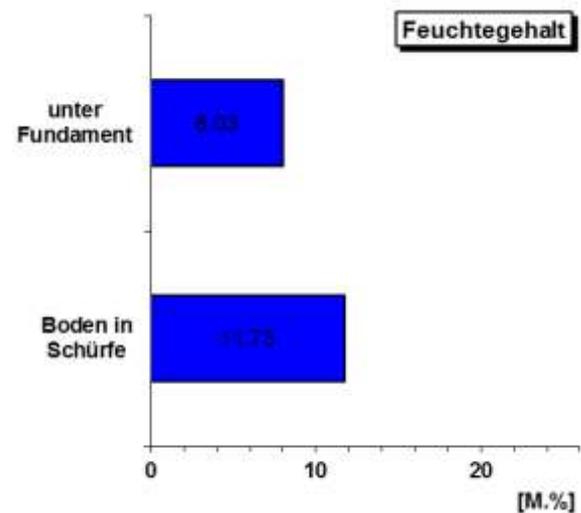


Abb. 6 Feuchteverteilung in der Schüfe I (Außenbereich), Material in der Schüfe unter Fundament und auf Höhe der Bohrung

4.6 Fazit - Feuchteuntersuchungen im Fundamentbereich

Es wurden Feuchteuntersuchungen im Fundamentmauerwerk der Kirche in Sydow durchgeführt. Dazu wurden am 14.12.2016 auf Veranlassung des Planers, Herrn Dr. Richter, durch eine Baufirma Schürfe im Innen- und Außenbereich, auf der Nordseite der Kirche Sydow, angelegt. Die Untersuchungen dienen der Beurteilung der Feuchtesituation im Fundamentbereich sowie zur Bestimmung der Fundamenttiefen. Die Werte werden für die Bewertung der Modellierungsergebnisse der Hydrogeologie (MLU, Prof. Gossel) in Hinblick auf den Grundwasseranschluss des Mauerwerks benötigt.

Die Untersuchungen im Fundamentmauerwerk zeigen extreme Feuchtebelastungen bis zu 25 Ma.-%. Vergleichende Untersuchungen von Bodenmaterial aus der Schürfe, in Höhe der Fundamentbohrung und unterhalb des Fundaments entnommen, zeigen eine deutliche Differenz von ca. 3 bis zu 9 Ma.-% Materialfeuchte.

Damit kann nachgewiesen werden, dass die hohe Feuchtebelastung des Mauerwerks hauptsächlich auf eine Bewässerung der Fundament- und Sockelzone über das Dach und über die Fassade zurückzuführen ist. Eine um das Gebäude umlaufende Mulde, entstanden durch das Abgraben des Geländeniveaus, behindert das Wegführen des Niederschlagswassers und führt dadurch zusätzlich zu einer Bewässerung des Fundamentbereiches.

Die Feuchtwerte von 8 bis 9 Ma.-%, die unterhalb des Fundaments gemessen wurden, zeigen allerdings auch in diesen tiefen Bereichen hohe Feuchten des Sandbodens, die zu einer Befeuchtung des Mauerwerks von unten führt.

Mit Anstieg des Grundwasserspiegels im Hochwasserfall (Flurabstand ca. 1,20 bis 1,50 m) kommt es zu einer zusätzlichen starken Befeuchtung des Fundaments und zum kapillaren Aufstieg der Feuchte im Ziegelmauerwerk.

Es werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Anbau einer Dachentwässerung!

- Ableitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation!
- Geländeregulierung: Entfernung der Mulde am Objekt, Ausbildung Gefälle zur Wasserabführung
- Ausbildung einer Sickermulde in ausreichendem Abstand zur Kirche (Abstand zum Objekt berechnet Hydrogeologie)

Die Empfehlungen werden durch die hydrogeologischen Untersuchungen unterstützt. Der Einbau einer Vertikalsperre und einer Rigole wird auf Grund der hohen Durchlässigkeit des Bodenmaterials nicht empfohlen.

5 Aktualisierte Empfehlungen nach Projekttreffen am 26.04.2017 in Stendal

Durch Rückstau im unmittelbaren Vorfluter (Grabensystem) kam es im Hochwasserfall zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels (Grundwasserflurabstand ca. 2,0 bis 2,5 m) und damit zu einer starken Befeuchtung des Fundaments und zum kapillaren Aufstieg der Feuchte im Ziegelmauerwerk.

Nach Ergebnissen der Modellierung (GOSSEL, 2017) führt ein Anstieg um 1,50 m im Grabensystem zur Befeuchtung der Fundamentbereiche der Kirche.

Eine direkte Abhängigkeit des Grundwassers von Hochwasserständen der entfernt liegenden Elbe oder Havel wird nicht nachgewiesen.

Die Feuchteuntersuchungen im Fundamentmauerwerk zeigen eine Abnahme der Feuchtwerte mit der Fundamenttiefe. Damit wird nachgewiesen, dass die zum Teil extreme Feuchtebelastung des Mauerwerks hauptsächlich auf eine Bewässerung der Fundament- und Sockelzone über das Dach und über die Fassade zurückzuführen ist. Eine um das Gebäude umlaufende Mulde, entstanden durch das Abgraben des Geländeneiveaus, behindert das Wegführen des Niederschlagswassers und führt dadurch zusätzlich zu einer Bewässerung des Fundamentbereiches. Hohe Feuchten werden auch unterhalb des Fundaments im Sandboden gemessen, die zu einer Befeuchtung des Mauerwerks von unten führen.

Aktive und passive Maßnahmen

Als Maßnahme wird empfohlen, die Grabensysteme der Region instanzzuhalten und für den Notfall eine Absperirmaßnahme zu installieren. Mit dieser Kenntnis sollte der Kontakt zum LHW und der Unteren Wasserbehörde aufgenommen werden.

Bauliche Maßnahmen

- Anbau einer Dachentwässerung!

- Ableitung des Niederschlagswassers in die Kanalisation ist nicht möglich! Es wird empfohlen, eine Ableitung zum nahegelegenen Graben zu realisieren (siehe GOSSEL, 2017).

- Geländeregulierung: Entfernung der Mulde am Objekt, Ausbildung Gefälle zur Wasserabführung

- Ausbildung einer Sickermulde in ausreichendem Abstand zur Kirche (Abstand zum Objekt wird von der Hydrogeologie vorgegeben)

Die Empfehlungen werden durch die hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2017) unterstützt. Der Einbau einer Vertikalsperre und einer Rigole wird auf Grund der hohen Durchlässigkeit des Bodenmaterials nicht empfohlen.

Maßnahmen Außenfassade

Instandsetzung Außenmauerwerk: Das Außenmauerwerk muss in einigen Sockelbereichen in Stand gesetzt werden. Ausbrüche von Ziegelsteinen sind zu schließen, um ein Fortschreiten der Schäden zu vermeiden. Der Sockelputz sollte erneuert werden.

Maßnahmen Innenraum

Um die Trocknung des Fußbodens zu verbessern, sollte der Fußboden diffusionsoffen auf einer kapillarbrechenden Schicht eingebracht werden. Der Teppich (Läufer) sollte entfernt werden.

Nach Auswertung der Putzmuster wird auf Grund der Vorgaben durch den Bestand ein differenziertes Putzsystem orientiert. Auf Grund eines möglichen Alkalieintrags wird versucht, möglichst keine zement- oder trasshaltigen Putze anzuwenden.

Sockelbereich: Unterputz: Baustellenmischung (Salzspeicher): Otterbein NHL5 (1 RT), Sand regional, ungewaschen bis 4 mm (2,5 RT), Bims 2-4 mm (0,5 RT)

Erweiterter Sockelbereich: Baustellenmischung: Otterbein NHL3,5 (1 RT), Sand regional, ungewaschen bis 2 mm (3 RT)

6 Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 52/2017, KALISCH, 2017)

Die Raumklimamessungen erfolgten im Zeitraum 17.10.2015 bis 08.08.2017.

Der Verlauf der relativen Raumlufffeuchte in der Kirche in Sydow weicht deutlich von den Kurvenverläufen in den Kirchen von Gottesgnaden und Räbel ab. Die kurz- und mittelfristigen Schwankungen der relativen Raumlufffeuchte sind vergleichsweise geringer bewegen sich aber auf deutlich höherem Niveau. Die Werte der relativen Raumlufffeuchte schwanken zwischen minimal 67,1% und maximal 96,6% rel. F. um einen Mittelwert von 82,94% rel. Feuchte (siehe Bericht HAL 52/2017, Diagramm 3). Erfahrungsgemäß schwankt der Mittelwert der absoluten Außenluftfeuchte zwischen 7 g/m³ bis 8 g/m³ der Mittelwert der absoluten Raumlufffeuchte liegt an der Obergrenze dieser Schwankungsbreite bei 7,91 g/m³ und lässt ebenfalls auf einen eingeschränkten Luftaustausch mit der Außenluft schließen (siehe Diagramm 3.1). Übersteigt der Mittelwert der absoluten Raumlufffeuchte den Wert der mittleren absoluten Außenluftfeuchte ist von einer Feuchtigkeitsquelle im Raum auszugehen. Dieser Verdacht liegt in Sydow ebenfalls sehr nahe.

Auch in der Kirche in Sydow ist keine tendenzielle Veränderung des Niveaus der relativen Raumlufffeuchte erkennbar. Kondensationsfälle mussten im Aufzeichnungszeitraum nicht beobachtet werden, aber wie auch bei den beiden anderen Kirchen wurden in den Wintermonaten kondensationsnahe Bedingungen mit Werten der relativen Raumlufffeuchte um 95% rel. Feuchte dokumentiert. In der Kirche in Sydow besteht ebenfalls die Gefahr mikrobiologischer Aktivität insbesondere in den Sommermonaten mit Schimmel und Algenbildung.

Hinsichtlich der Nutzung des Kirchenraumes sind dringend Maßnahmen zu empfehlen, die zur Feuchtigkeitsreduzierung im Bauwerk beitragen (siehe oben). Es ist zu empfehlen, dass nach dem Abschluss der vorgesehenen Arbeiten eine erneute Überprüfung des Raumklimas erfolgt. Sollte kein befriedigender Effekt eingetreten sein, wäre als nächster Schritt die Erprobung einer luftfeuchtegeregelten Zwangsbelüftung des Raumes zu empfehlen. Hierbei wird die absolute Luftfeuchte (Gramm Feuchtigkeit pro Kubikmeter trockener Luft) der Außenluft und der Raumluff automatisch verglichen. Bei einer höheren absoluten Luftfeuchte im Kirchenraum würde dann ein Ventilator in einem Fenster eingeschaltet. Sollte die absolute Raumluff der absoluten Außenluftfeuchte entsprechen oder niedriger sein, wird die Zwangsbelüftung durch den Ventilator abgeschaltet.

Im Winterhalbjahr sollte im Interesse einer nicht zu hohen Auskühlung des Raumes auf eine Zwangsbelüftung verzichtet werden und dafür mit einer leichten Raumlufftemperierung mit einer geringen um 3 bis 4 K (°C) erhöhten Raumlufftemperatur gearbeitet werden.

7 Literatur

Arendt, C.& Seele, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.

Grassegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S..

Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Sydow im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", 16. S., aktualisierte Version vom 25.08.2017

Gossel, W., Härter, J. (2016) "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", Vortrag über aktuelle Projektergebnisse am 24.11.2016

Meinhardt, J. (2016) Sydow, Kirche - Mauerwerksuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 52/2016, 10 S.

Protokoll zum Projekttreffen in Halle am 24.11.2016

Protokoll zur Projektberatung am 05.07.2016

Protokoll zur Projektberatung am 27.04.2017

Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998): Salze in Naturstein-mauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.

WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik“

Zötzl, M. (2016) Sydow, Kirche, Feuchteuntersuchungen im Fundamentbereich - im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 06/2017, 7 S.

Kalisch, U., Kersten, H., Zötzl, M. (2017) Raumklimauntersuchungen in den Kirchen in Gottesgnaden, Räbel und Sydow - im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 52/2017, 11 S.

**Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Sydow bei Wust
im Rahmen des Projekts
"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"**



Auftraggeber: Evangelische Kirche Mitteldeutschland

Auftragnehmer: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Projektauftrag.....	4
1.2	Hintergrund des Projektes	4
1.3	Ziel des Projektes Sydow.....	4
1.4	Arbeitsablauf	5
2	Datengrundlagen.....	7
2.1	Geologische und hydrogeologische Übersicht.....	7
2.2	Hydrologische Übersicht	8
3	Auswertung der Messergebnisse.....	10
3.1	Bohrgutansprache.....	10
3.2	Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten	11
3.3	Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität.....	11
4	Modellierungswerkzeug	11
5	Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung.....	11
5.1	Randbedingungen.....	11
5.2	Parameter	12
5.3	Kalibrierung.....	12
5.4	Szenarien.....	13
6	Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse.....	14
6.1	Aktive Grundwasserbeeinflussungen.....	14
6.2	Passive Maßnahmen	15
7	Zusammenfassung.....	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche Sydow	6
Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte HK50 1 : 50 000, unmaßstäbliche Vergrößerung der Karte des W1n-Ho-Horizontes (Weichsel1-Nachschüttsande, Holozän).	8
Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände Elbe, Pegel Tangermünde mit den Grundwasserständen Kirche Sydow.	9
Abbildung 4: Bohrprofil der Grundwassermessstelle an der Kirche Sydow. Die Bohransatzhöhe muss auf 32,35 mNN korrigiert werden.....	10
Abbildung 5: Grundwassergleichen des Grundwasserleiters mit Mittelwasserstand (Median) und Hochwasserstand Juni 2013.	13
Abbildung 6: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy JL 1/15 (Kirche Sydow)	13

1 Einleitung

1.1 Projektauftrag

Der Auftrag zur hydrogeologischen Bewertung von Hochwassereinflüssen auf ausgewählte Kirchen in Sachsen-Anhalt sowie Ausarbeitungen von Strategien zur Vermeidung von Schäden bei künftigen Hochwasserereignissen wurde gemäß Angebot am 27.07.2015 vergeben. In diesem Auftrag ist vorgesehen, Grundwassermessstellen einzurichten, regelmäßig Grundwasserstände zu messen, die Messungen auszuwerten und die hydrogeologische Situation zur Ableitung von Präventionsmaßnahmen numerisch zu modellieren. Hierfür wurden zunächst die verfügbaren Schichtenverzeichnisse und hydrogeologischen Karten des Landesamtes für Geologie und Bergwesen sowie die Hochwasserkarten des Landesbetriebs für Hochwasserschutz genutzt. Der vorliegende Modellierungsbericht zur denkmalgeschützten Kirche Sydow umfasst die Modellierungsergebnisse der numerischen Modellen auf der Basis der Erstauswertung der Grundwasserstandsmessungen von Oktober 2015 bis September 2016.

1.2 Hintergrund des Projektes

In den Bundesländern Sachsen und Sachsen-Anhalt sind an einigen denkmalgeschützten Kirchen nach dem Hochwasser 2013 Wasserschäden aufgetreten, die nicht direkt auf den Einfluss von Oberflächenwasser zurückgeführt werden können. Dies sind einerseits witterungsbedingte Schäden, die im vorliegenden Projekt nur eine untergeordnete Rolle spielen, und andererseits Schäden, die auf Grundwasseranstiege zurückzuführen sind. Die Beziehung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser an den betroffenen Denkmälern soll daher in diesem Projekt genauer untersucht und Möglichkeiten der Vermeidung durch Modellierung verschiedener möglicher Präventionsmaßnahmen gefunden werden. Eine der sechs untersuchten Kirchen liegt in Sydow, und das Charakteristische bei dieser Kirche sind sehr mächtige Sande, die im Hochwasserfall zu einem Grundwasseranstieg bis knapp in den Bereich der Gründungsfundamente hinein führen. Das Projekt dieser Kirche hat insofern Modellcharakter, als diese hydrogeologische Situation an mehreren denkmalgeschützten Bauten auftreten kann, jedoch nur selten in dem hier sichtbaren Ausmaß zu Schäden führt.

1.3 Ziel des Projektes Sydow

Die Grundwasseruntersuchungen sind auf die Beobachtung, Analyse und Modellierung der Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung ausgerichtet. Die Schäden hochwasserbedingter Grundwasseranstiege an den ausgewählten Denkmälern sollen künftig vermieden werden. Hierfür sollen sowohl passive als auch aktive Maßnahmen zur Grundwasserstandsregulierung untersucht werden, wobei die Nachhaltigkeit der Maßnahmen unter mehreren Aspekten betrachtet werden soll. Die Kirche in Sydow ist hierfür aufgrund der geologischen und hydrodynamischen Gegebenheiten gut geeignet. Das Ziel ist, möglichst wartungsarme und mit geringem technischem Aufwand durchzuführende Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen auszuarbeiten. In Sydow kommt hinzu, dass auch das Umfeld der Kirche berücksichtigt werden sollte.

1.4 Arbeitsablauf

Basierend auf den zunächst notwendigen Recherchen beim Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt wurden zunächst die Geländearbeiten zur Bestimmung der lokalen geologischen Verhältnisse, zur Einrichtung einer Grundwassermessstelle und zur quasikontinuierlichen Messung von Grundwasserständen durchgeführt.

Auf Grundlage der Grundwasserstandmessungen von Oktober 2015 bis September 2016 mit einer durch technischen Ausfall bedingten Lücke 26.10.2015 - 06.01.2016 konnten die Analysen der Oberflächenwasser - Grundwasser - Interaktion nicht die erforderlichen hydraulischen Parameter für die numerische Grundwassermodellierung liefern, denn die Entfernung zur Universität Halle hat sich für häufigere Wartungen als zu groß erwiesen. Auf Basis der Ergebnisse aus Grundwasserstandsmessungen und Parameterbestimmungen vor Ort wurde ein sehr großräumiges Modell erstellt, da der Zusammenhang zum Wasserstand der großen Flüsse Elbe und Havel nur in sehr untergeordnetem Maße gegeben ist, diese aber als Randbedingungen benötigt werden. Wesentlicher als die Wasserstände der genannten Flüsse sind die u.U. davon abzuleitenden Wasserstände der Grabensysteme, die in der Nähe der Kirche das Grundwasser abziehen. Insofern ergab sich ein anderer Arbeitsablauf als bei anderen Objekten im gleichen Projekt.

Die Entsorgung des Regenwassers hat sich im Verlauf des Projektes als wesentliche Fragestellung für die nachhaltige Beseitigung der Feuchteschäden erwiesen. Diese Aufgabe wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes durch eine kleinräumige Modellierung (Detailmodellierung) aufgenommen.

Als Überblick ist in Abbildung 1 der Arbeitsablauf für dieses Objekt dargestellt.

Arbeitsplan zum Projekt													
"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiegen am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"													
Kirche Sydow													
Arbeitsaufgabe	2015				2016				2017				2018
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
Messung der Abhängigkeiten Grundwasserstand-Oberflächenwasserstand													
Erfassung der hydrologischen und geologischen Verhältnisse auf Basis von Karten und Aktenmaterial (Historische Untersuchung)	X												
Einholung von Genehmigungen zum Abteufen von Kleinrammbohrungen 80 mm und Einbau von Grundwassermessstellen 50 mm		X											
Erstellung von einer Grundwassermessstelle im direkten Umfeld der Kirche und einer Grundwassermessstelle in Kleinmangelsdorf		X	X										
Kurzzeit-Pumpversuch zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters		X	X										
Erstellung und Einbau automatischer Datenlogger zur stündlichen Erfassung von Grundwasserständen		X	X										
Messung der Grundwasserstände		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Statistische Analyse der Abhängigkeiten des Grundwasserstandes von meteorologischen und hydrologischen Einflüssen							X				X		
Ansätze zur analytischen Prozessmodellierung							X						
Zwischenbericht Messstellenaufbau, Geologie und Hydrochemie					X								
Zwischenbericht statistische Analysen und analytische Prozessmodellierung								X					X
Aufbau standortbezogener numerischer Grundwassermodelle													
Abgrenzung des Modellgebiets anhand plausibler hydrologischer Randbedingungen				X									
Aufbau der Grundwasserleiter-/geringleiter-Strukturen				X	(X)								
Diskretisierung der Modellgebiete unter numerischen Stabilitätskriterien					X								
Stationäre Modellkalibrierung für mittlere Strömungsverhältnisse						X							X
Instationäre Modellkalibrierung anhand der Grundwasserstandsmessungen								X					X
Entwicklung von Hochwasserszenarien für den Standort Sydow						X			X				
Instationäre Berechnung der Hochwasserszenarien 3D Strömungsmodelle						X			X				
Zwischenbericht Modellierungsergebnisse							X						
Ableitung standortbezogener hydraulischer Vorsorgemaßnahmen													
Modellierung mit passiven Vorsorgemaßnahmen zur Reduktion von Hochwassereinflüssen											X		
Modellierung mit aktiven Vorsorgemaßnahmen zur temporären Regulierung des Grundwasserstandes											X		
Optimierung der standortbezogenen Maßnahmen auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse											X	X	
Abschlussbericht													X
													X

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche Sydow

2 Datengrundlagen

Die numerischen Grundwassermodelle wurden auf der Basis folgender Unterlagen erstellt:

1. Alle Karten des Hydrogeologischen Kartenwerks 1 : 50 000 des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Blatt Schönhausen 0806-1/2 (Grundwassergleichen, Parameter mehrerer Grundwasserleiter, Grundwassergefährdung).
2. Wasserstandsmessungen an den Oberflächengewässern: 15-minütige Wasserstandsdaten der etwa 10 km westlich gelegenen Elbe, Pegel Tangermünde liegen für den gesamten relevanten Zeitraum 2015-2016 vor und konnten bei der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung berücksichtigt werden. Der östlich und stromabwärts gelegene Havel-Pegel Rathenow ist nochmals wesentlich weiter als Tangermünde entfernt und spielt damit eine wesentlich geringere Rolle.
4. Bohrungen, Grundwasserstandsmessungen und Kurzzeit-Pumpversuche vor Ort haben erstens den lokalen Bodenaufbau gegenüber den Kartenwerken konkretisiert, zweitens die erforderlichen Daten für die Modellierung geliefert und drittens auch bei der Beurteilung von Baumaßnahmen und Planung für anstehende Baumaßnahmen geholfen. Zudem sind die angelegten Schürfe zur Feststellung der Fundamenttiefe unerlässlich gewesen.

2.1 Geologische und hydrogeologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet Sydow liegt aus strukturgeologischer Sicht im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Schollengebiets (HENNINGSEN & KATZUNG 2006, BACHMANN & SCHWAB 2008). Der in größerer Tiefe anstehende Festgesteinsuntergrund spielt für die Untersuchungen nur eine untergeordnete Rolle und wird hier nicht weiter berücksichtigt.

Über dem Festgestein wird im HK50 die Grundwasserleiter/-geringleiterstruktur mit (insgesamt 20-50 m) mächtigen Sanden und Kiesen der Elster- und der Weichsel-Eiszeit sowie des Holozäns beschrieben. Die Grundwasserverhältnisse sind ungespannt, was sich bei den lokalen Untersuchungen als zutreffend herausgestellt hat (s. Abbildung 2). Die hydraulischen Durchlässigkeiten werden mit $>100 \cdot 10^{-5}$ m/s (also $1 \cdot 10^{-3}$ m/s) angegeben. Der mittlere Grundwasserstand liegt nach dieser Karte bei etwas über 30 mNN.

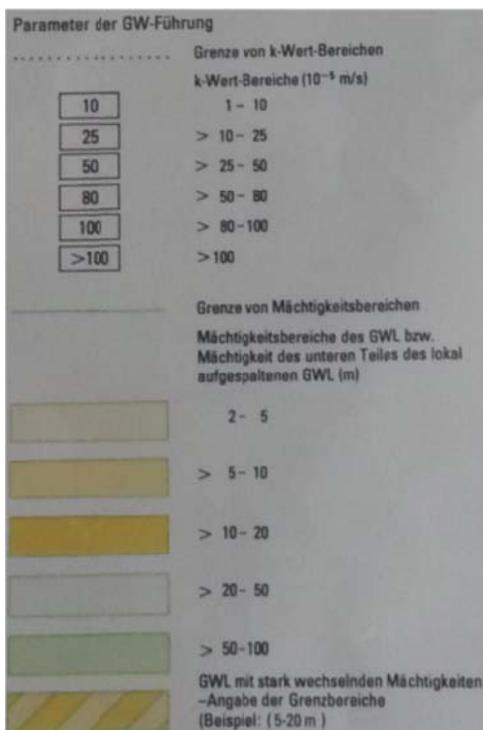
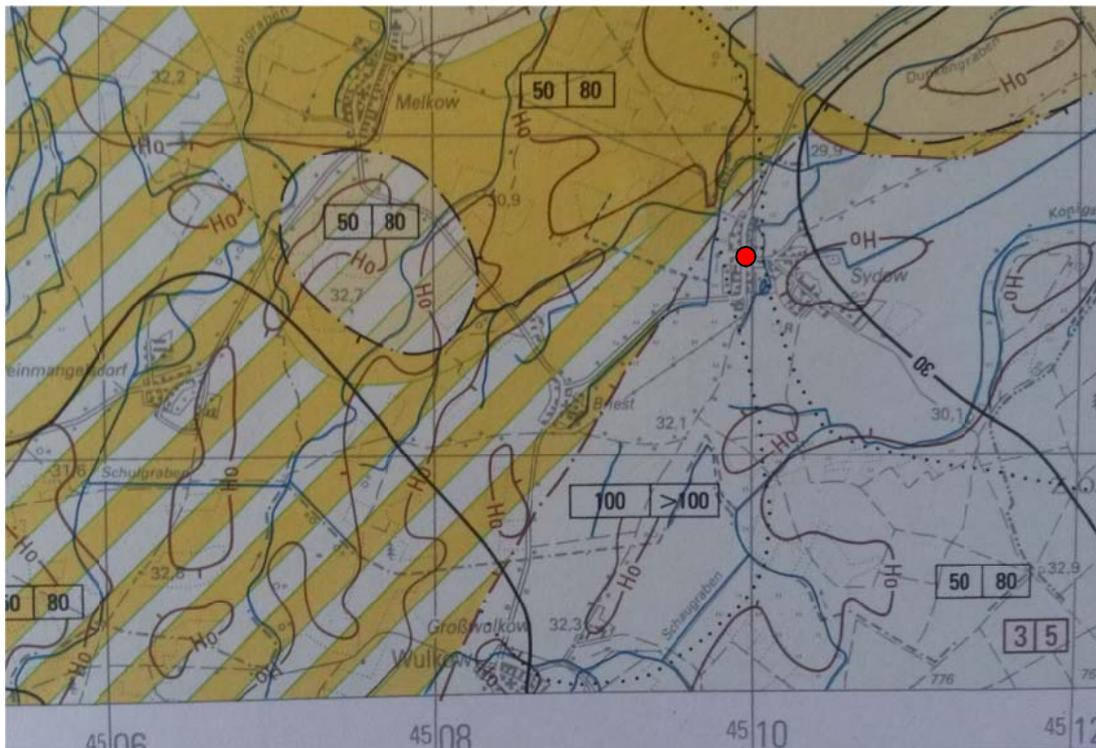


Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte HK50 1 : 50 000, unmaßstäbliche Vergrößerung der Karte des W1n-Ho-Horizontes (Weichsel1-Nachschüttungsde, Holozän).

2.2 Hydrologische Übersicht

Die Hydrologie der in großer Entfernung zu den dominierenden Flüssen Havel und Elbe gelegenen Kirche wird stark beeinflusst von dem lokalen Grabensystem und den meteorologischen Einflüssen. Der Wasserstand der Elbe in Tangermünde liegt etwa 0,2

Meter über dem Grundwasserstand in Sydow, die Havel in Rathenow liegt etwa 4 Meter tiefer. Die Ortschaft liegt insgesamt so weit von den Flüssen entfernt, dass sie durch höher liegendes Gelände auch bei einem 200-jährigen Hochwasser nicht geflutet wird, allerdings muss auch die Wirkung des Grabensystems sehr genau betrachtet werden. Das Gelände liegt mit 32,5 mNN nur etwa 2,5 m über dem Mittelwasserstand der Elbe, was bei Hochwasser von 5 m ü. MW theoretisch zu einer Flutung führen könnte.

Die Grundwasserneubildung spielt für das Strömungsgeschehen in diesem Fall eine wesentliche Rolle. Die jährliche Grundwasserneubildungsrate liegt bei etwa 50-100 mm/a, was insbesondere an den geringen Grundwasserflurabständen und der dadurch erhöhten Verdunstung liegt. Das meiste oberirdisch abfließende Wasser wird über Gräben und die Kanalisation gefasst.

In der Abbildung 3 ist der fehlende Zusammenhang zwischen den Oberflächen- und Grundwasserständen deutlich zu sehen.

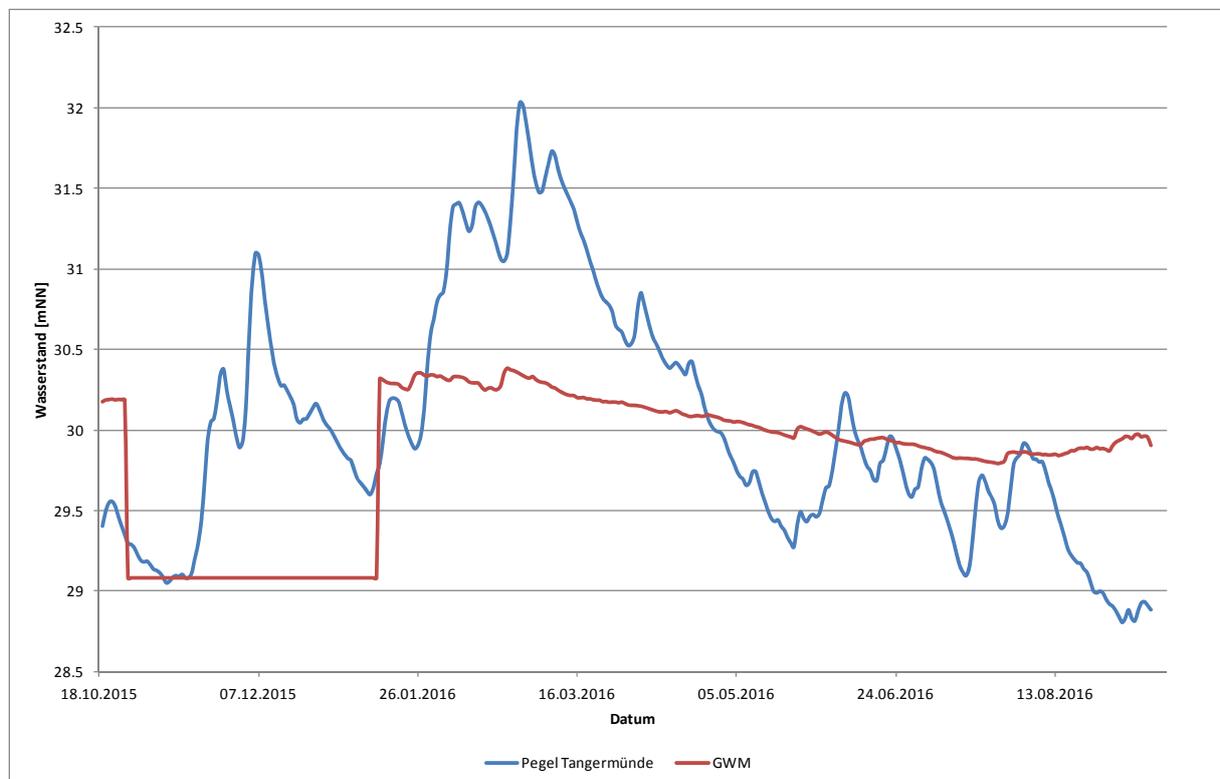


Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände Elbe, Pegel Tangermünde mit den Grundwasserständen Kirche Sydow.

Die Zeitverschiebung zwischen den Oberflächenwasserständen und den Grundwasserständen konnte nicht zur Identifikation der hydraulischen Leitfähigkeit und der Transmissivität genutzt werden, da statistisch kein Zusammenhang gegeben ist.

3 Auswertung der Messergebnisse

Zur Auswertung der Messergebnisse wurden mehrere Verfahren eingesetzt: Das Bohrgut wurde in Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit ausgewertet, und es wurden Kurzzeit-Pumpversuche durchgeführt.

3.1 Bohrgutansprache

Die bedeckende, nur wenige dm mächtige Bodenschicht wird als mäßig durchlässig mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von etwa 10^{-5} m/s angesehen (s. Abbildung 4). Insgesamt dominiert ein Feinsand den Bodenaufbau. Dieser Feinsand ist ein mäßig guter Grundwasserleiter (geschätzter k_f -Wert 10^{-4} m/s), im Falle eines Hochwassers in den Gräben jedoch strömungswirksam. Hierdurch kommt es im Hochwasserfall zu einem Vordringen eines erhöhten Grundwasserdruckspiegels und auch zu einer Durchfeuchtung der Fundamente. Die geringmächtige Tonschicht in 2,70 m - 3,10 m Tiefe führt nicht zu einer Destabilisierung der Fundamente im Hochwasserfall. Der unter diesem Ton liegende Grundwasserleiter besteht aus Mittelsanden und Kiesen, die k_f -Werte im Bereich 10^{-4} - 10^{-3} m/s aufweisen. Die im Kartenwerk angegebene sehr hohe Durchlässigkeit von $> 10^{-3}$ m/s muss für den oberen Bereich nach unten korrigiert werden.

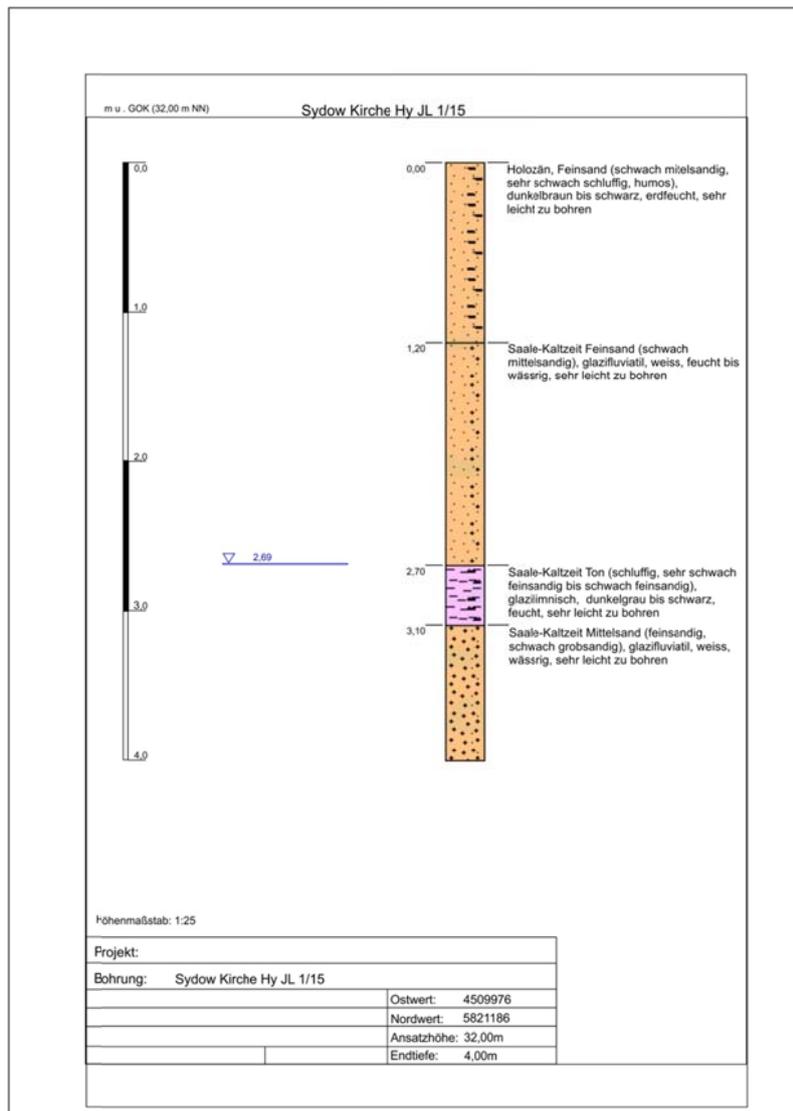


Abbildung 4: Bohrprofil der Grundwassermessstelle an der Kirche Sydow. Die Bohransatzhöhe muss auf 32,35 mNN korrigiert werden.

3.2 Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten

Der Grundwasserleiter ist ungespannt, wobei der Wasserstand maßgeblich von den nahegelegenen Gräben, aber mittelbar auch den von Westen kommenden Grundwasserzuflüssen und der Grundwasserneubildung dominiert werden. Die Speicherkoeffizienten für den Feinsand werden auf etwa 0,1 geschätzt, der Mittelsand dürfte etwas darüber liegen.

3.3 Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität

Die hydraulische Durchlässigkeit sowie die Transmissivität wurden über Kurzzeit-Pumpversuche bestimmt, was lediglich die lokalen Werte angibt.

Hydraulische Durchlässigkeit: $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s

Transmissivität: ca. $2,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s

Die Ergebnisse liegen im Bereich der Schätzungen nach Bohrgutansprache und sind daher plausibel. Da die Sohle des Grundwasserleiters nicht erbohrt wurde, wurde die Mächtigkeit pauschal mit 20 m angenommen.

4 Modellierungswerkzeug

Die Erstellung des beschriebenen Modells wurde mit dem Werkzeug Feflow (R) durchgeführt.

Das Werkzeug Feflow(R) (Diersch 2014) ist ein universelles Werkzeug zur Modellierung der Grundwasserströmung und des Transports von gelösten Stoffen im Grundwasser. Auf die Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden. Das Werkzeug ist in vielen Projekten weltweit getestet worden und wird vom Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie seit Jahrzehnten für ähnlich gelagerte Fragestellungen eingesetzt. Leider ist das Werkzeug nicht OpenSource, so dass die erstellten Modell nur mit vorhandener Lizenz verarbeitet werden können.

5 Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung

5.1 Randbedingungen

Die hydrologischen Randbedingungen für dieses große Grundwassermodell sind schlecht zu fassen: Die Elbe und die Havel können als Dirichlet-Randbedingungen ins Modell übernommen werden, aber die Ganglinien der lokal dominierenden Gräben sind nicht erfasst. Eine Übernahme der mittleren Wasserstände dient lediglich der Ermittlung der mittleren Fließverhältnisse, was aber auf die Grundwasserdruckspiegel, wie sie im Hochwasserfall Anfang Juni 2013 geherrscht haben, nicht übertragen werden kann. Da keine Informationen über Brunnen vorliegen und die gemessene Grundwasserganglinie keine Einflüsse von Grundwasserentnahmen zeigt, wurden keine weiteren Randbedingungen festgelegt.

Das resultierende Grundwasserströmungsmodell muss daher als generisches Modell aufgefasst werden, das die hydrogeologischen Verhältnisse zwar in weiten Teilen richtig wiedergibt, dessen Aussage andererseits aber in Hinblick auf die Hochwasserbeeinflussung der Grundwasserstände vor Ort recht eingeschränkt ist.

Insbesondere die Hochwassersituation im Juni 2013 mit einem Deichbruch an der Elbe und den daraus resultierenden Überflutungen, dem Aufstau/Rückstau der Gräben und der reduzierten Entfernung zu den Randbedingungen konnte aufgrund der fehlenden Daten nur in Ansätzen modelliert werden.

5.2 Parameter

Die hydrogeologischen Parameter sind über das betrachtete Objekt hinaus mit Hilfe des Kartenwerks festgelegt worden, jedoch mit ihrer unteren Grenze. Für die Sand-Grundwasserleiter wurden global $5 \cdot 10^{-4}$ m/s eingesetzt. Damit liegen sie über den lokal gemessenen Werten und unter den Werten der Kartenwerke.

5.3 Kalibrierung

Trotz der detaillierten Grundwasser- und Oberflächenwasserstandsmessungen, die die Differenzen zwischen beiden zeigen und die Schwierigkeiten der Modellierung evident machen, konnte das Modell gut kalibriert werden, denn die Abhängigkeiten insbesondere in Hinblick auf die zu berechnenden Szenarien sind eindeutig. Die Grundwasserstände weichen nur wenige Zentimeter von den gemessenen Werten ab. Die Dynamik kann nur mäßig wiedergegeben werden, da das Grabensystem deutlich hydraulisch wirksam ist, s. Szenarien und Ergebnisse. Insgesamt spielen sich die Grundwasserspiegelschwankungen gemessen wie modelliert im Bereich weniger Zentimeter ab.

Es wurde der Zeitabschnitt 19.10.2015 bis 12.9.2016 kalibriert, um eine Grundlage für die Szenarienberechnung im Hochwasserfall zu gewinnen. Damit wurden die höchsten Wasserstände des Jahres Oktober 2015 bis Oktober 2016 erfasst. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung für einen mittleren Wasserstand (Median). Das Hochwasser Anfang Juni 2013 wirkt sich im Grundwassermodell nicht bis Sydow aus, da der Deichbruch nicht adäquat modelliert werden kann. Die Grundwasserganglinien der Messungen und des kalibrierten Modells sind in Abbildung 6 zum Vergleich einander gegenübergestellt. Hierzu ist anzumerken, dass keinerlei Wetterdaten mit eingeflossen sind, die sich zusätzlich zu den Oberflächenwasserständen auf die Dynamik auswirken. Der Einfluss wird aufgrund der ansonsten deutlich wiedergegebenen Wasserstandsganglinie vernachlässigt.

Die Parameterbelegung im kalibrierten Modell gestaltet sich wie folgt:

Durchlässigkeit Grundwasserleiter: $15 \cdot 10^{-4}$ m/s

Speicherkoeffizient: 0,2

Ungespannte Grundwasserverhältnisse.

Elbewasserstände mit Ganglinie, Havel mit Mittelwasserstand 27,5 mNN und Ganglinie (etwa Bereich Premnitz).

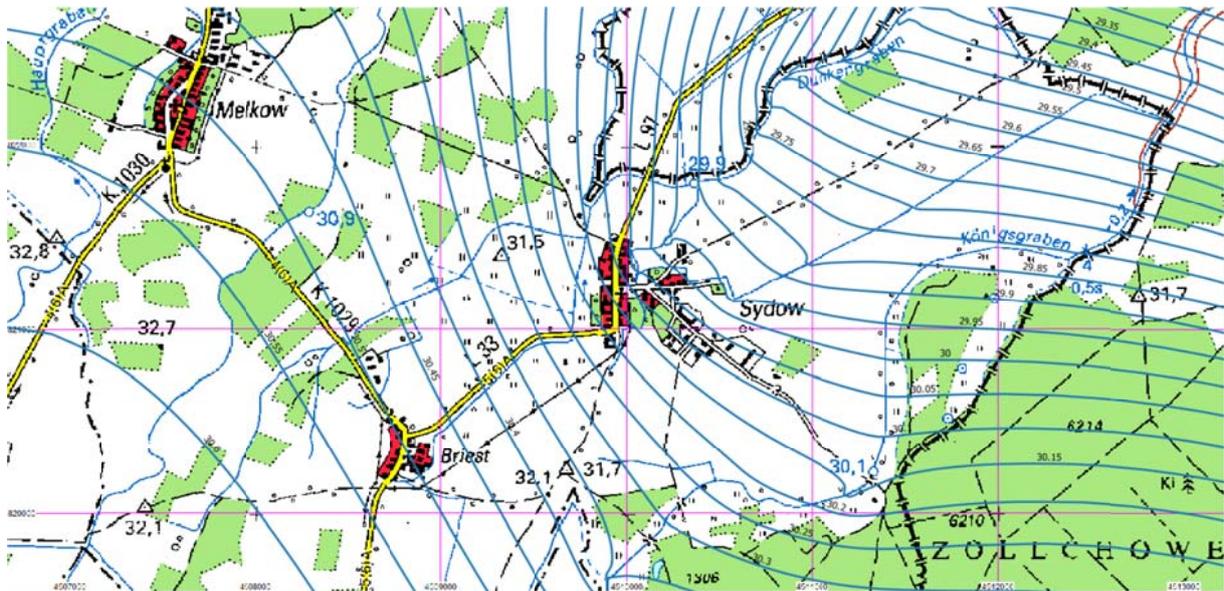


Abbildung 5: Grundwassergleichen des Grundwasserleiters mit Mittelwasserstand (Median) und Hochwasserstand Juni 2013.

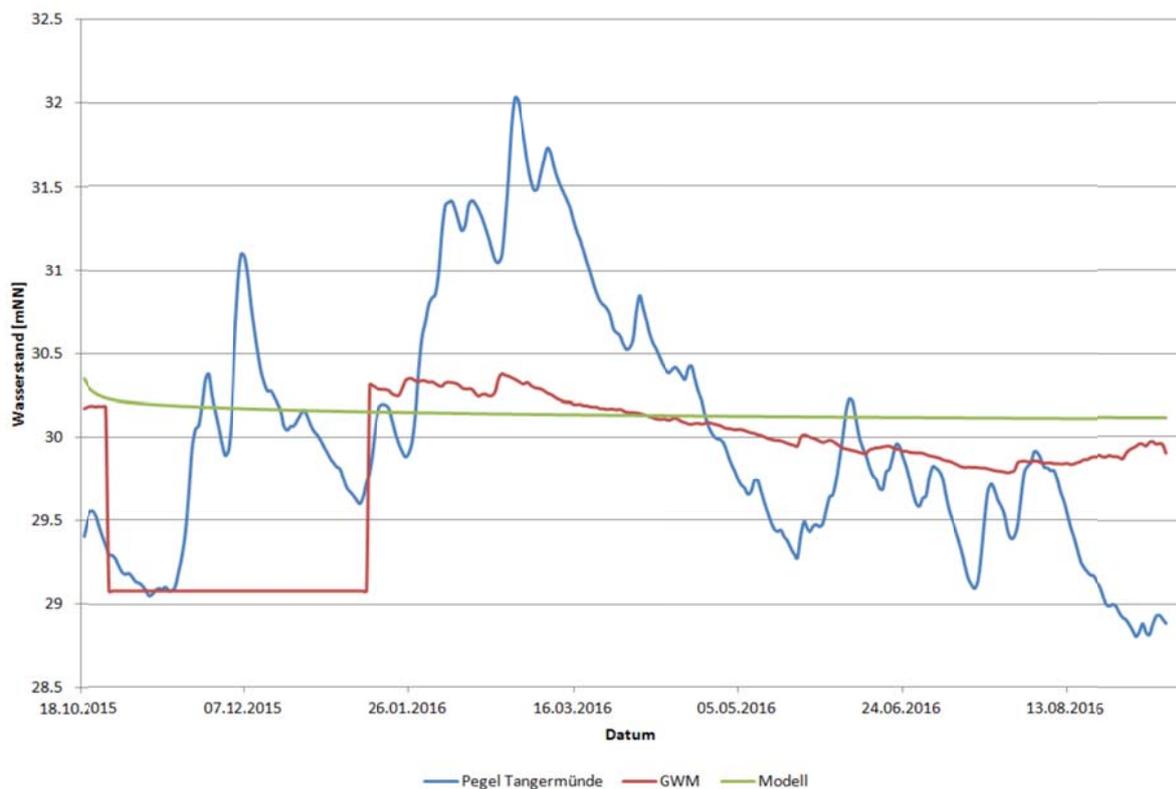


Abbildung 6: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy JL 1/15 (Kirche Sydow)

5.4 Szenarien

Die wichtigste Fragestellung für dieses Denkmal ist der Einfluss des Grabensystems. Die Frage der Wirksamkeit kann am besten über die Leakage-Faktoren der Gräben geprüft werden: Ein reduzierter Abfluss, z.B. durch Verkrautung und/oder falsche Wartung von Wehren bzw. Schützen wird durch sehr geringe Leakage-Koeffizienten simuliert. Im Falle einer guten Wartung sollten die Gräben in der Lage sein, das Grundwasser bei hohen

Wasserständen effizient abzuführen und den Wasserstand auf dem mittleren Niveau zu halten. Diese Vermutung wird durch zwei Szenarien getestet. Weiteres Szenarien gehen auf die Möglichkeit einer Drainage ein um ihre Entnahmemenge größenordnungsmäßig festzustellen. Auch die Entnahme über Brunnen soll der Vollständigkeit halber getestet werden.

Die Regenwasserentsorgung wurde mit einem vertikalen Profilschnittmodell bearbeitet. Ein Starkregenereignis wurde laut KOSTRA-Atlas mit 15-20 mm innerhalb von 15 Minuten angesetzt. Bei einer Grundfläche der Kirche von etwa 250-300 m² ergibt sich daraus ein zu versickerndes Wasservolumen von insgesamt 6000 Litern bzw. 3000 l nördlich und südlich des Kirchenschiffs. Aufgrund der gut durchlässigen Böden kann das Wasser in einer leichten Mulde versickert werden, deren Abstand von der Kirche optimiert werden soll.

6 Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse

6.1 Aktive Grundwasserbeeinflussungen

Die Beeinflussung des Grundwasserstande durch das bestehende Grabensystem erweist sich in den Modellergebnissen als recht effektiv. Durch Instandhaltungsmaßnahmen und ggf. Pumpen am Grabenauslass zur Havel im Hochwasserfall kann der Wasserstand gut reguliert werden. Diese Maßnahme wird daher favorisiert, insbesondere, da sie nicht nur zum Schutz eines einzelnen Denkmals dient sondern über die Ortschaft Sydow hinaus auch weitere östlich (graben-abwärts) gelegene Ortschaften. Das Hochwasser wird sich bei einem intakten und gewarteten Grabensystem nur wenige Zentimeter auf den Grundwasserstand des Denkmals auswirken. Bei nicht gewartetem Grabensystem wird der um etwa 0,5 - 1 m höher liegende Grundwasserstand noch einmal um etwa 0,1 m steigen, so dass er deutlich in den Bereich der Fundamente, allerdings noch nicht an die Oberfläche reicht. Der Grundwasserflurabstand liegt dann bei etwa 0,4-0,5 m. Dies gilt auch für Deichbrüche, wie das Hochwasser 2013 gezeigt hat.

Der Einbau einer Pumpe ist technisch machbar. Es müsste ein Brunnen an der Ostseite erstellt werden, um das ganze Gebäude zu erfassen. Bei einer Pumprate von 30 m³/h ergibt sich ein Absenkungstrichter von etwa 0,3 m Tiefe. Alternativ können zwei Brunnen mit der halben Pumpleistung im Norden und Süden des Kirchenschiffs die gleiche Wirkung erzielen. Diese Absenkung würde ausreichen, um auch im Hochwasserfall die Fundamente trocken zu halten. Das Wasser müsste in die Kanalisation oder in das Grabensystem entsorgt werden, wobei die Kanalisation für diesen Ernstfall zu bevorzugen ist. Diese Variante ist jedoch nicht von den vielen Vorteilen eines intakten Grabensystems begleitet.

Die Rohrtouren sind aufgrund der Bohrerergebnisse wie folgt anzusetzen:

0-3 m Vollrohr DN 150 mm

3-5 m Filterrohr DN 150 mm

Kein Schlammfang

Der oberirdische Ausbau kann über Flur erfolgen, was im Hochwasserfall bei den zu erwartenden geringen Grundwasserflurabständen von Vorteil sein kann. Allerdings sind die Auflagen des Denkmalschutzes zu berücksichtigen. Eine Anpassung der Rohrtouren aufgrund der Bohrerergebnisse kann notwendig werden.

Nach Erstellung des oder der Brunnen sollten diese unbedingt freigespült/"entsandet" werden. Die Freispülung sollte alle 2-5 Jahre wiederholt werden, um zu gewährleisten, dass die Verockerung nicht die Funktion gefährdet.

Eine Drainage wirkt sich ebenfalls direkt auf die Grundwasserstände aus. Ihr Einbau sollte in einer Tiefe von etwa 1 m vorgesehen werden, wobei das technisch notwendige Gefälle einzuhalten ist. Außerdem muss die Drainage routinemäßig gewartet werden, d.h. in regelmäßigen Abständen von max. 1 Jahr freigespült werden. Bei diesen geringen Tiefen können je nach Ausführung Wurzeln die Drainage gefährden. Die im Hochwasserfall zu erwartende abzuführende Wassermenge liegt bei etwa 50 m³/h.

6.2 Passive Maßnahmen

Aus der Modellierung ergeben sich keine Möglichkeiten für den Einsatz passiver Maßnahmen. Die Errichtung von Spundwänden wäre nicht nur unwirtschaftlich sondern wäre mit einer Einbindetiefe von über 20 m bis max. 50 m auch nur schwerlich technisch durchzuführen.

6.3 Regenwasserversickerung

Die Modellierung in einem Profilschnitt zeigt, dass die Mulde nicht zu nah an das Kirchengebäude heran gelegt werden sollte. Während die Grundwasserstandsaufhöhung nur wenige mm beträgt und damit vernachlässigbar ist, wirkt sich bei zu naher Positionierung der Versickerungsmulde am Mauerwerk das versickerte Wasser noch mehrere Stunden direkt auf die Fundamente aus, wodurch es nach oben zieht und den Putz durchfeuchtet. Ein Abstand von 2 m wäre einzuhalten, um Schäden vorzubeugen. Ein Vergleich der Ausbreitung des Wasserdrucks bei einem Abstand von 0,7 m, 1 m und 2 m in

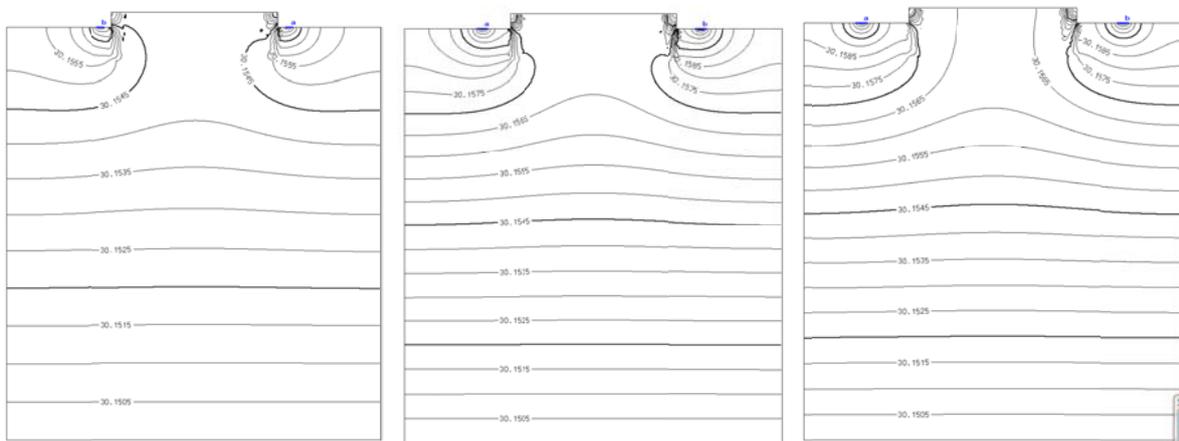


Abbildung 7: Vergleich zur Regenwasserversickerung mit einem Abstand von 0,7 m, 1 m und 2 m vom Gebäude und seinen Fundamenten

7 Zusammenfassung

Die Geländeuntersuchungen und die Modellierung haben gezeigt, dass die nachweisbaren Gebäudeschäden durch hoch anstehendes Grundwasser z.T. durch das Oberflächenwassersystem bedingt sind. Ein Hochwasser in Elbe und Havel wirkt sich jedoch auf diese Entfernung und unter den gegebenen hydrogeologischen Verhältnissen nur im Bereich weniger Zentimeter aus. Wesentlich deutlicher sind die hydrologischen Zusammenhänge mit den näher gelegenen Gräben, deren Abfluss und Wasserstand mittelbar mit der Dynamik der beiden großen Vorfluter in Verbindung zu sehen sind. Allein die Pflege oder Vernachlässigung dieser Grabensysteme kann zu Grundwasserstandsänderungen im Bereich des Denkmals von über 1 m führen. Sehr lokale Maßnahmen können schädigende Einflüsse mindern, indem das Grundwasser über eine Drainage oder über einen Brunnen gefasst wird. Die hierfür berechneten Entnahmemengen sind auch nicht besonders hoch. Das Wasser muss jedoch unmittelbar und ohne Re-Infiltration ins Grundwasser vom Gelände entsorgt werden, um die Fundamente trocken zu halten. Die Anstrengungen zur Aufrechterhaltung und Pflege des Grabensystems sind jedoch deutlich wirksamer und wirtschaftlich nachhaltiger, denn bei fehlender Pflege wird auch ohne Hochwassereinfluss die Gefahr einer Vernässung des Mauerwerks durch hohe Grundwasserstände bestehen bleiben.



Bericht HAL 59/2017

Grundwasserprojekt (DBU)

Gottesgnaden, Kirche

Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht

Beauftragt durch: Evangelische Kirchengemeinde Gottesgnaden
Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl
Anzahl der Seiten: 35

Anlage: Abschlussbericht der Hydrogeologischen Untersuchungen
 „Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche
 Gottesgnaden“, GOSSEL (2017) vom 25.08.2017

Halle, 05.12.2017

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351-48435-100

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax.: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 203 140 15097

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Voruntersuchungen (Bericht HAL 51/2015 (MEINHARDT, 2015)).....	5
2.1	Einleitung	5
2.2	Probenahme.....	6
2.3	Methodik.....	9
2.3.1	Quantitative Salzanalyse.....	9
2.3.2	Feuchtebestimmung mit der Darmmethode.....	9
2.3.3	Mörtelanalyse	9
2.4	Ergebnisse	11
2.4.1	Quantitative Salzanalyse.....	11
2.4.2	Röntgenanalysen	13
2.4.3	Feuchtebestimmung.....	14
2.4.4	Mörtelanalyse	16
2.5	Grundwassermessungen	18
2.6	Schlussfolgerung.....	19
3	Feuchteuntersuchungen im Fußbodenbereich (Bericht HAL 16/2017 (ZÖTZL & KERSTEN, 2017)).....	21
4	Probenahme und Vorgehensweise	21
5	Ergebnisse und Fazit	23
6	Aktualisierte Empfehlungen bei der Bauberatung im Juni 2016 in Aschersleben	24
7	Aktualisierte Empfehlungen nach Bauberatung, 24.03.2017 vor Ort (Protokoll vom 29.03.2017).....	24
8	Monitoring Rigole am 07.02. und 08.08.2017	32
9	Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 52/2017, KALISCH, 2017, siehe Anlage).....	33
9	Bericht zu den hydrogeologischen Untersuchungen (Gossel, 2017)	33
9.1	Zusammenfassung.....	33
9.2	Hinweise zum Notfallplan.....	34
10	Literatur	35



Abb.: Gottesgnaden, Kirche, Nordostansicht, Brunnen im Grundwasserleiter = roter Pfeil, Aufnahme am 07.02.2017

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasserprojekt“, wurden folgende Untersuchungsberichte und Maßnahmenempfehlungen erarbeitet und vorgelegt.

- Voruntersuchungen: Erfassung der Feuchte- und Salzbelastung im Mauerwerk, Mörtelanalysen, Empfehlungen zum baulichen Vorgehen, Bericht HAL 52/2015, MEINHARDT, 2015
-
- Zum Projekttreffen am 24.11.2016 konnten die bisherigen Empfehlungen aktualisiert und präzisiert werden.
-
- Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2016)
-
- Aktualisierte Empfehlungen nach Bauberatung im Juni 2016 in Aschersleben
-
- Feuchteuntersuchungen im Fußbodenbereich, Bericht HAL 16/2017, ZÖTZL & KERSTEN, 2017
-
- Raumklimauntersuchungen und Empfehlungen zur Lüftung, Bericht HAL 52/2017, KALISCH, KERSTEN & ZÖTZL, 2017
-
- Leitfähigkeitsmessungen im Fußbodenbereich, Bericht HAL 70/2017, KERSTEN & ZÖTZL, 2017)
-
- Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen, Empfehlungen (GOSSEL, 2017)
-
- Bewertung der Maßnahmen im Rahmen des Projektabschlusstreffens am 24.03.2017 in Gottesgnaden, Protokoll vom 29.03.2017

Der vorliegende Abschlussbericht zitiert die im Projektzeitraum entstandenen Einzelberichte und zeigt an Hand dieser eine Entwicklung auf. Die Einzelergebnisse aus den Gliederungspunkten sind Grundlage der Handlungsempfehlung.

2 Voruntersuchungen (Bericht HAL 51/2015 (MEINHARDT, 2015))

2.1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes der DBU „Grundwasser“ sind zur Erfassung der aktuellen Feuchte- und auch Salzbelastung des Mauerwerkes Tiefenprofile zur Bohrmehlentnahme angelegt worden. Die Messungen sind auch im Zusammenhang mit den hydrologischen Untersuchungen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zu sehen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen dienen einerseits als Bewertungsgrundlage für die Maßnahmen, die ggf. im Versuch an den Objekten zur Optimierung der Trocknung durchgeführt werden sollen, und, um den tatsächlichen Einfluss des Grundwassers (Grundwassermessstellen Hydrogeologie) auf das Mauerwerk und das Raumklima zu eruieren.

Der bis zum Sommer auf den Wandflächen liegende Putz auf der Nord- und Südseite des Kirchenschiffs zeigte zum Zeitpunkt der Messungen stellenweise massive Schäden, die auf einen Feuchte- und Salzeinfluss hinweisen (siehe Abb. 1). Auch im Vorraum sind Putzschäden, vor allem auf der Nordseite, zu beobachten gewesen.



Abb. 1: Putzschäden auf der Nord- und Südseite des Kirchenschiffs

Der Fußboden in der Kirche wurde vor einigen Jahren neu verlegt. Über den Unterbau ist der Autorin nichts Konkretes bekannt, allerdings ist der Boden sehr dicht (siehe Abb. 2), wodurch der Feuchteeintrag in die Wandflächen wahrscheinlich befördert wird. Der Boden unter dem Teppich vor dem Altar, der gegenüber dem Kirchenschiff um zwei Stufen erhöht liegt, zeigt keinerlei Feuchtigkeitsansammlung.



Abb. 2: Fußboden in der Kirche, der einen dichten Abschluss zum Untergrund schafft.

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am 25. Juni 2015. Insgesamt sind dabei 6 Tiefenprofile angelegt worden (siehe Abb. 3-5). Darüber hinaus wurden zwei Ausblühproben entnommen, um daran die konkret vorliegenden Salze ermitteln zu können. (siehe Abb. 6). Am Außenmauerwerk (Turm, Südseite) erfolgt die Entnahme einer Mörtelprobe (siehe Abb. 7). In Tabelle 1 sind die entnommenen Proben charakterisiert bzw. verortet.

Das Erdreich steht an der Südseite 30 cm oberhalb des Innenniveaus an.

	Abb. 3: Tiefenprofile 1 und 2
	Abb. 4: Tiefenprofile 3 und 4
	Abb. 5: Tiefenprofil 5 und 6



Abb. 6: Entnahmestelle der Salzausblühungen a) westlich des Epitaphs an der Südwand (25 cm Höhe) b) und benachbart zu TP 5 (40 cm Höhe) an der Nordwand.



Abb. 7: Entnahmestelle der Setzmörtelprobe an der Nordseite des Turmes

Zur Aufzeichnung des Klimas ist auf dem Gesims des westlichen Fensters der Nordseite des Kirchenschiffs ein Datenlogger (Nr. 11) aufgestellt worden (siehe Abb. 8). Zu bemerken sei an dieser Stelle, dass die Kirchentür tagsüber oft offen steht.



Abb. 8: Position des Klimadatenloggers (Pfeil)

Tab. 1: Verzeichnis der Bohrmehl- und Bodenproben

Probe	Lokalisierung	Entnahmetiefe
GG_K_TP1	Südwand (innen), unterhalb des mittleren Fensters, 15 cm Höhe, Fuge; Von außen steht Erdreich in der Höhe an.	
GG_K_TP1/1		0-2 cm (Putz, der mit Plastikgewebe armiert ist)
GG_K_TP1/2		2-5 cm
GG_K_TP1/3		5-10 cm (mit Hohlräumen) , sehr feucht
GG_K_TP1/4		10-20 cm (mit Hohlräumen) , sehr feucht
GG_K_TP1/5		20-30 cm (mit Hohlräumen), sehr feucht
GG_K_TP1/6		30-40 cm
GG_K_TP2	Südwand (innen), unterhalb des mittleren Fensters, 1 m Höhe (oberhalb TP 1), Fuge	
GG_K_TP2/1		0-2 cm (Putz, der mit Plastikgewebe armiert ist)
GG_K_TP2/2		2-5 cm
GG_K_TP2/3		5-10 cm
GG_K_TP2/4		10-20 cm (15-25 cm Hohlräume)
GG_K_TP2/5		20-30 cm (15-25 cm Hohlräume)
GG_K_TP3	Südwand (außen), Fortsetzung TP 1 – 30 cm oberhalb TP 1, bodennah, Fuge	
GG_K_TP3/1		0-2 cm
GG_K_TP3/2		2-5 cm
GG_K_TP3/3		5-10 cm
GG_K_TP3/4		10-20 cm
GG_K_TP3/5		20-30 cm
GG_K_TP4	Südwand (außen), Fortsetzung TP 2, ca. 1 m Höhe, Fuge	
GG_K_TP4/1		0-2 cm
GG_K_TP4/2		2-5 cm
GG_K_TP4/3		5-10 cm
GG_K_TP4/4		10-20 cm
GG_K_TP4/5		20-30 cm
GG_K_TP5	Nordwand (innen), hinter dem Taufstein, starke Schäden im Putz (Salzausblühungen , Feuchteränder), größere Mauerwerksstärke als auf Südseite, 15 cm Höhe, Fuge	
GG_K_TP5/1		0-2 cm (Putz, der mit Plastikgewebe armiert ist)
GG_K_TP5/2		2-5 cm, sehr feucht
GG_K_TP5/3		5-10 cm, sehr feucht
GG_K_TP5/4		10-20 cm , sehr feucht
GG_K_TP5/5		20-30 cm, feucht
GG_K_TP5/6		30-40 cm, feucht
GG_K_TP6	Nordwand (innen), hinter dem Taufstein, starke Schäden im Putz (Salzausblühungen , Feuchteränder), oberhalb TP 5, 70 cm Höhe, Fuge	
GG_K_TP6/1		0-2 cm (Putz, der mit Plastikgewebe armiert ist)
GG_K_TP6/2		2-5 cm
GG_K_TP6/3		5-10 cm
GG_K_TP6/4	zu größeren Tiefen folgt Stein	10-20 cm

2.3 Methodik

2.3.1 Quantitative Salzanalyse

Aus den Proben werden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Eluationsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgt eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial. Von den Extrakten wird mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH SenSi-on 2.

Die Analysenergebnisse der Salzuntersuchungen werden in Ma.-% angegeben und bewertet. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus der Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

2.3.2 Feuchtebestimmung mit der Darrmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der Bohrmehlproben wird durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt.

2.3.3 Mörtelanalyse

An einer Probe wurde eine nasschemische Mörtelanalyse durchgeführt. Die Analyse der in Salzsäure löslichen Kieselsäure lässt Rückschlüsse auf den Gehalt von hydraulischen Bindemitteln im untersuchten Mörtel zu. Durch den Ammoniumchlorid – Aufschluss der Proben werden die Calciumsilikathydrate der hydraulischen Bindemittel aufgelöst und das SiO_2 in einem zweiten Analysenschritt durch Natriumkarbonat in Lösung gebracht. Durch Differenzbildung vor und nach diesem zweiten Arbeitsgang wird der Gehalt an löslicher Kieselsäure bestimmt. Entsprechend dem Gehalt hydraulischer Bindemittel, wie z.B. Zement, hydraulischem Kalk oder Trass steigt der Anteil HCL-löslicher Kieselsäure.

Das HCl-unlösliche gilt als Zuschlagstoffanteil im Mörtel, wenn dieser Anteil als inert gegenüber Salzsäure anzusehen ist. Dazu erfolgt eine mikroskopische Untersuchung der Mörtelprobe auf Karbonatanteile im Zuschlagstoff. Die prozentuale Differenz zu 100 % wird bei der Mörtelanalyse in der Regel als Bindemittelanteil gerechnet, so dass aus der Kenntnis des HCL-unlöslichen das Bindemittel / Zuschlagstoff – Verhältnis hervorgeht.

Die Metallionen werden bis auf die Erdalkali- und Alkalielemente als Hydroxyde abgetrennt. Im Ergebnis der Analyse werden die Metallionen in Form der Summe an Metalloxid (Me_2O_3) angegeben. Die Bestimmung der Summe der Metallionen lässt ebenfalls Rückschlüsse auf den Gehalt von Zement zu. Im Wesentlichen lässt er sich bei Zementen auf den Aufschluss von Aluminat- und Ferratphasen zurückführen. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass auch Bestandteile der Zuschlagstoffe sowie Verunreinigungen anderer Bindemittel zu erhöhten Metallionengehalten führen können.

Als Hauptbestandteile von Gips-, Kalk- und Zementbindemitteln ist die Bestimmung von CaO und MgO von grundlegender Bedeutung. Auf ihr beruht die quantitative Rückrechnung auf Bindemittelgemische, wie z. B. Kalk-Gipsmischungen sowie die Überprüfung der Summe der aufgeschlossenen Bindemittelbestandteile. Die Bestimmung dieser Elemente erfolgt chelatometrisch gegen Murexid und Erio-chromschwarz T.

Die Bestimmung des nicht durch Karbonat-, Sulfat- oder Hydroxydverbindungen abgedeckten Calciumanteiles gibt im Vergleich mit der löslichen Kieselsäure ebenfalls einen Hinweis auf hydraulische Bindemittelbestandteile.

Die Bestimmung des Sulfatgehaltes erfolgt gravimetrisch durch Fällung mit Bariumchlorid.

Die Ermittlung des Kohlendioxidgehaltes durch einen Salzsäureaufschluss erlaubt einen rechnerischen Rückschluss auf den reinen Karbonatgehalt der Probe. In Verbindung mit der Calcium-, Magnesium- und Sulfatbestimmung ergibt sich ein Hinweis auf nicht karbonatisch oder sulfatisch gebundene Calcium- und Magnesiumionen, die aus hydraulischen Mörtelbestandteilen (z.B. Calciumsilikathydrat) stammen könnten. Dazu ist der Ausschluss von Calciumhydroxydverbindungen eine wesentliche Voraussetzung.

Die Bestimmung des Karbonatgehaltes erfolgt durch die volumetrische Bestimmung des abschließbaren Kohlendioxids.

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Quantitative Salzanalyse

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von einigen der Bohrmehlproben eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle (3) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (2) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 2: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	gering			mittel			hoch		
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5- 1,5	0,1- 0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1- 0,3	0,05- 0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
Chlorid [M.-%]	< 0,008	<0,2	<0,05	>0,008 <0,026	0,2- 0,5	0,05- 0,5	>0,026 <0,08	>0,5	>0,5	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben des Tiefenprofils (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entsprechend Tabelle 2.

Tab. 3: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben der Tiefenprofile TP 1-6

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasserlösli. Bestandteile	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
GG_K_TP1/1	1,28	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP1/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP1/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP1/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP1/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP1/6	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP2/1	1,43	0,219	0,036	0,242	0,062	0,433	0,186	0,013
GG_K_TP2/2	0,36	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP2/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP2/4	0,15	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP2/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP3/1	1,40	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP3/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP3/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP3/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP3/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP4/1	5,24	0,769	0,091	0,314	0,071	1,886	0,109	1,250
GG_K_TP4/2	6,28	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP4/3	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP4/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP4/5	2,78	0,551	0,034	0,051	0,011	1,498	0,035	0,156
GG_K_TP5/1	0,44	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP5/2	0,63	0,121	0,006	0,024	<0,005	0,297	<0,01	0,019
GG_K_TP5/3	0,32	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP5/4	0,22	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP5/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP5/6	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP6/1	0,16	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP6/2	0,29	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP6/3	0,17	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
GG_K_TP6/4	0,19	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Bohrmehlanalysen verzeichnet. Anhand der Spalte zu den Gesamtgehalten der wasserlöslichen Bestandteile kann abgelesen werden, dass die Belastungen in den verschiedenen Tiefenprofilen unterschiedlich sind. In TP 1, 2 (innen, Südwand) und TP 3 (außen, Südwand) konnte oberflächennah die höchste Konzentration detektiert werden. Hin zu größeren Tiefen reduzieren sich die Gehalte drastisch. Bei den beiden Profilen TP 1 und 2 liegt der stark belastete Bereich im Putz, der ohnehin mittlerweile abgenommen worden ist. An der südlichen Außenwand fällt auf, dass das Mauerwerk stellenweise erhebliche Fugenauswitterungen und auch beschädigte Mauersteine aufweist. Die Verwitterung der Fugen ist gut in der Belastungssituation von TP 4 abzulesen. Ausgehend von der Oberfläche mit einer sehr hohen Belastung durch lösliche Bestandteile bis in 30 cm Tiefe (dazwischen 2 Proben nicht analysiert) sind relevante Gehalte an bauschädlichen Salzen zu detektieren. Neben hohen Sulfatgehalten (Bindemittelanteil) sind extreme Nitratgehalte festzustellen, die sich bis in 30 cm Tiefe hin zu mittleren Gehalten entwickelten. Im TP 3, das an der Außenwand bodennah angelegt ist, weist die Fuge offensichtlich nur oberflächennah höhere Gehalte an löslichen Bestandteilen auf, die in dem Fall nicht näher analysiert worden sind. Die Profile 5 und 6 an der Nordwand weisen im Vergleich zu den Innenraumprofilen der Südseite (1 und 2) eine geringer Belastung des Putzes auf, obgleich auch hier stellenweise starke Salzausblühungen zu beobachten waren. Allerdings setzen sich an der Nordseite die moderaten Gehalte an löslichen Bestandteilen auch in

größere Tiefen fort. Es wird allerdings vermutet, dass diese im Wesentlichen auf den Sulfatgehalt im Setzmörtel zurückgeht.

Es wurde bereits im Vorfeld des Ortstermins abgemacht, dass der Putz im Innenraum der Kirche nach erfolgter Probenahme abgenommen werden kann. Das ist bereits erfolgt.

2.4.2 Röntgenanalysen

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Röntgenanalysen der beiden Ausblühproben dargestellt (siehe Abb. 9 und 10). Die eine Probe wurde rechts neben dem Epitaph, an der Südseite des Kirchenschiffes entnommen. Entsprechende der Analyse handelt es sich bei der Ausblühung hauptsächlich um das bauschädliche Natriumsulfat. Die anderen detektierten Phasen sind unkritisch und sind dem Putz zuzuordnen.

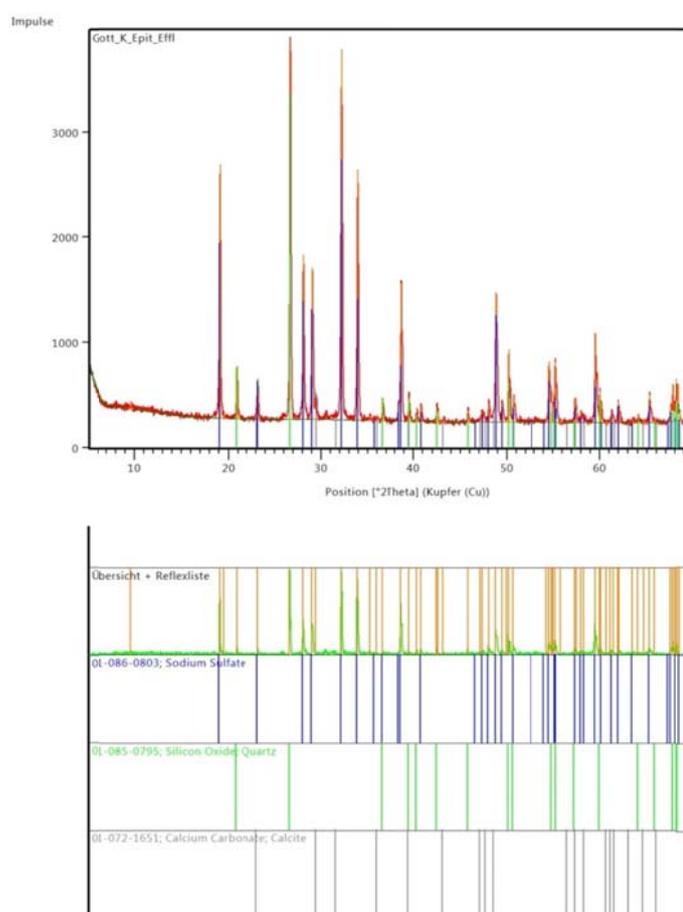


Abb. 9: Röntgendiagramm der Ausblühung westlich des Epitaphs an der Südwand des Kirchenschiffs.

Die Freistellung des Epitaphs an der Südwand ist für vorteilhaft für dessen Erhaltung angesehen und bereits besprochen worden. Die Autorin geht davon aus, dass diese Maßnahme bereits umgesetzt worden ist. Eine Reduzierung vorhandenen löslicher Bestandteile kann mit Hilfe von Kompressen erfolgen.

An der Nordwand wurde benachbart zu TP 5, hinter dem Taufstein, in 40 cm Höhe eine weitere Ausblühung vom Putz abgenommen. Im Röntgendiagramm ist zu erkennen, dass als relevante Phase auch hier Natriumsulfat vorliegt.

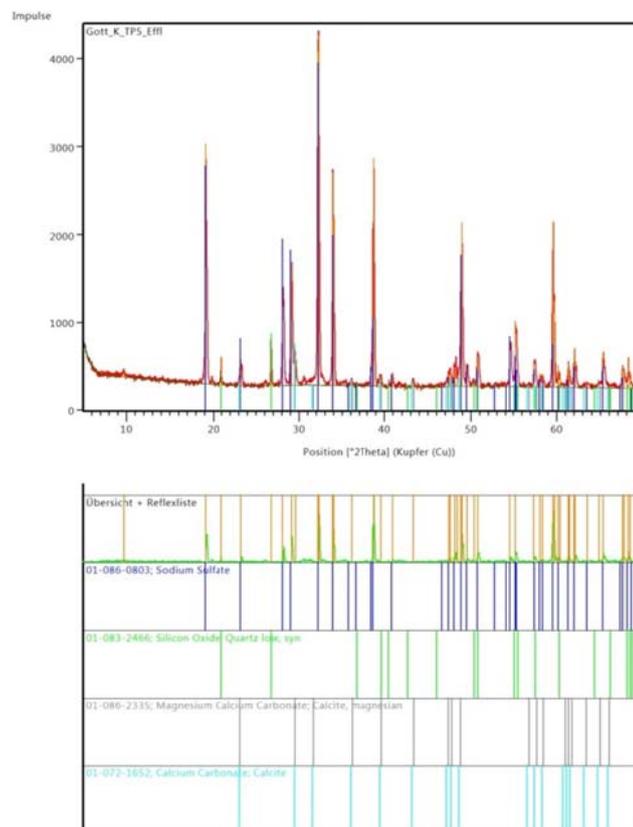


Abb. 10: Röntgendiagramm der Ausblühung benachbart zu TP 5 an der Nordwand des Kirchenschiffs.

2.4.3 Feuchtebestimmung

In der nachfolgenden Tabelle (4) sind die Ergebnisse der Darrfeuchtebestimmung an den Proben der Tiefenprofile dargestellt. Die farbige Markierung geben eine Orientierung bei der Bewertung des Feuchtegehaltes (ohne Markierung = sehr gering, grün = gering, türkis = mittel, rot = hoch, lila= extrem).

Bereits aus der Verteilung der Farben in Tabelle 4 wird deutlich, dass das Mauerwerk zum Zeitpunkt der Messungen größtenteils erheblich durchfeuchtet war. Die bodennahen Profile (1, 3 und 5) weisen über die gesamte Tiefe extreme und hohe Feuchtwerte auf (ermittelt in den Fugen). Die höher gelegenen Profile an der Südseite (2 und 4) sind mit mittleren bis geringen Feuchten deutlich trockener, wenn auch nicht unkritisch (TP 2). Die Feuchteverteilung an der

Nordwand deutet jedoch auf einen Feuchteeintrag hin, der auch bis in 70 cm (TP 6) zu extremen Feuchtwerten führt. Es wird vermutet, dass hier die Wasserableitung nicht intakt sein könnte. An der Südseite ist genau in diesem Bereich eine Regenrinne angebracht. Sollte die Ableitung symmetrisch angelegt sein, wäre die Regenrinne hier zu prüfen. Es wurde leider von dieser Stelle kein Photo aufgenommen, so dass es nachträglich nicht geprüft werden konnte. Einen Einfluss auf die Feuchtegehalte im Mauerwerk hat erfahrungsgemäß auch von außen anstehendes Erdreich. Da an der Südseite der Kirche das Außenniveau 30 cm über dem Innenniveau liegt, sollte das im Rahmen der Maßnahmen berücksichtigt werden.

Tab. 4: Feuchtegehalte der Bohrmehlproben [M.-%] der Tiefenprofile 1-6. Die oberflächennahe Probe wurde nur bei den Profile 3 und 4 analysiert. Bei den übrigen handelte es sich hier um den auflagernden Putz.

Probe	Feuchtegehalt [M.-%]
GG_K_TP1/1	-
GG_K_TP1/2	9,18
GG_K_TP1/3	12,73
GG_K_TP1/4	17,70
GG_K_TP1/5	13,76
GG_K_TP1/6	6,58
GG_K_TP2/1	-
GG_K_TP2/2	2,29
GG_K_TP2/3	5,45
GG_K_TP2/4	5,41
GG_K_TP2/5	7,36
GG_K_TP3/1	8,79
GG_K_TP3/2	12,89
GG_K_TP3/3	7,32
GG_K_TP3/4	9,21
GG_K_TP3/5	14,25
GG_K_TP4/1	1,97
GG_K_TP4/2	2,17
GG_K_TP4/3	2,29
GG_K_TP4/4	2,95
GG_K_TP4/5	3,80
GG_K_TP5/1	-
GG_K_TP5/2	18,72
GG_K_TP5/3	19,27
GG_K_TP5/4	17,30
GG_K_TP5/5	11,51
GG_K_TP5/6	7,97
GG_K_TP6/1	-
GG_K_TP6/2	14,91
GG_K_TP6/3	14,75
GG_K_TP6/4	13,00

2.4.4 Mörtelanalyse

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass es sich bei der Setzmörtelprobe um ein gipshaltiges Bindemittel handelt (Kalk-Gips-Mörtel) (siehe Tab. 5-8). Auch der Magnesiumgehalt der Probe liegt mit nahezu 5 % am Bindemittel relativ hoch (Calcium-Magnesium-Karbonat, Dolomitanteil am karbonatischen Bindemittel). Der Sulfatanteil am Setzmörtel kann sicherlich zur Erklärung der sulfathaltigen (Natriumsulfat) Ausblühungen an den Innenwänden der Kirche herangezogen werden. Entsprechendes gilt sicherlich auch für den Dolomitanteil in der Ausblühung nahe TP 5). Die Bindemittelanteile können durch die hohe Durchfeuchtung des Mauerwerks mobilisiert werden.

Im Zusammenhang mit Sanierungsmaßnahmen am Außenmauerwerk muss unbedingt Rücksicht auf den detektierten Sulfatanteil im Mörtel genommen werden, um Folgeschäden zu vermeiden (WTA-Merkblatt 2-11-2007/D).

Die Sieblinie bzw. das Diagramm der Korngrößenanalyse sind in den nachfolgenden Abbildungen 11 und 12 verzeichnet.

Tab. 5: Ergebnisse der chemischen Analyse

Probe Nr.:	Glühverlust bei 1100°C Ma%	HCL-un-lösl. + lösl. SiO ₂ Ma%	HCL-unlösl. Ma%	HCL-lösl. SiO ₂ Ma%	Me ₂ O ₃ Ma%	CaO Ma%	MgO Ma%	CO ₂ Ma%	SO ₃ Ma%
GG_SM	19,34	61,93	57,15	4,78	1,90	13,37	1,96	10,56	2,21

Tab. 6: Berechnung der salzsäurelöslichen Bestandteile und des Glühverlustes auf die Summe aller salzsäurelöslichen Probenbestandteile

Probe Nr.:	Glühverlust bei 1100°C Ma%	HCL-lösl. SiO ₂ Ma%	Me ₂ O ₃ Ma%	CaO Ma%	MgO Ma%	CO ₂ Ma%	SO ₃ Ma%	CaO / SiO ₂ Ma%	CaO freies Ma%
GG_SM	45,13	11,16	4,43	31,20	4,57	24,64	5,16	2,80	2,63

Tab. 7: Thermische Zersetzung der Proben in Ma %

Probe Nr.:	Temperaturstufen in °C							
	Angaben der Probenwerte in Ma %							
	150	300	450	600	700	800	900	1050
GG_SM	3,62	1,45	1,56	2,31	6,02	1,49	0,51	0,63

Tab. 8: Thermische Zersetzung der Proben in Ma % bezogen auf den Bindemittelgehalt der Proben

Probe Nr.:	Temperaturstufen in °C							
	Angaben der Probenwerte in Ma %							
	150	300	450	600	700	800	900	1050
GG_SM	8,45	3,38	3,64	5,39	14,05	3,48	1,19	1,47

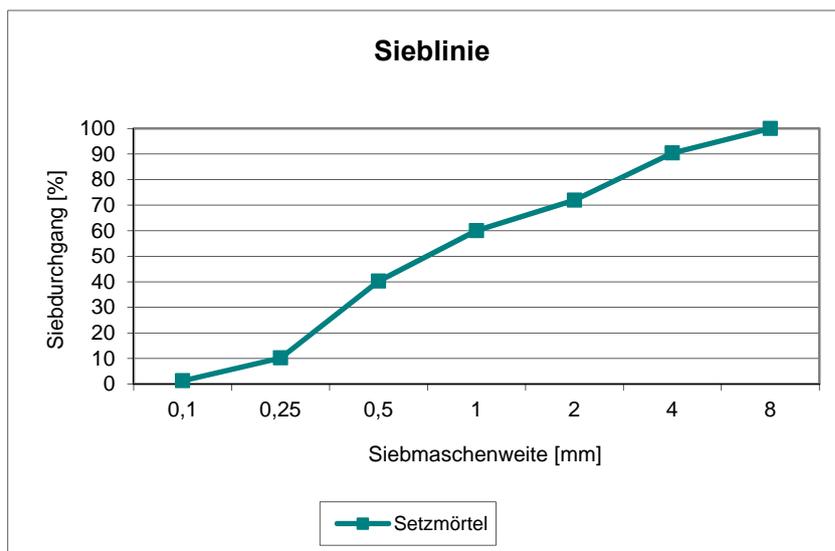


Abb. 11: Sieblinie der Setzmörtelprobe

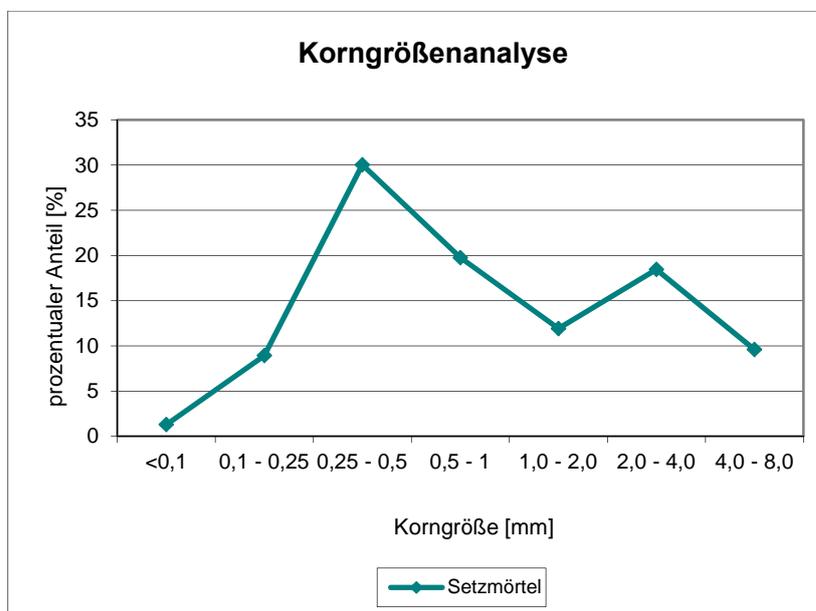


Abb. 12: Korngrößenanalyse der Setzmörtelprobe

Die einzelnen Kornfraktionen setzen sich folgendermaßen zusammen:

4-8mm	Milchquarz, z.T. bläulich, rötliche Quarze, vereinzelt Flint Rundungsgrad: eckig mit beginnender Kantenrundung - angerundet (2-3)
2-4mm	Milchquarz, zahlreiche rötliche Quarze, zahlreiche Gesteinsbruchstücke, Kieselschiefer, vereinzelt Flint, vereinzelt klare Quarze, einzelne Feldspäte, Rundungsgrad: eckig bis angerundet (1-3)
1-2mm	eher klare Quarze, zahlreiche Milchquarze, rötliche Quarze, Gesteinsbruchstücke, vereinzelt Feldspäte, Kieselschiefer, sehr vereinzelt Flint, Rundungsgrad: eckig - angerundet (1-3)
0,5-1mm	eher klare Quarze, zahlreiche rötliche Quarze, zahlreiche Milchquarze, vereinzelt Kieselschiefer, Gesteinsbruchstücke, sehr vereinzelt Feldspäte, Flint, Rundungsgrad: eckig mit beginnender Kantenrundung - gerundet (2-4)
0,25-0,5mm	eher klare Quarze, zahlreiche rötliche Quarze, einzelne Milchquarze, vereinzelt Amethyst, vereinzelt Kieselschiefer, Rundungsgrad: angerundet - gerundet (3-4)
0,125-0,25mm	eher klare Quarze, zahlreiche rötliche Quarze, einzelne Milchquarze, vereinzelt Amethyst, vereinzelt Kieselschiefer, Rundungsgrad: angerundet - gerundet (3-4)
<0,125mm	eher klare Quarze, zahlreiche rötliche Quarze, vereinzelt Kieselschiefer, Rundungsgrad: eckig bis angerundet (1-3)

2.5 Grundwassermessungen

Im näheren Umfeld der Kirche sind zwei Grundwassermessstellen installiert und mit automatischen Messwertschreibern (Datenloggern) ausgestattet worden. Der kontinuierlich ermittelte Wasserspiegel wird im Verhältnis zum Pegelstand des dazugehörigen Vorfluters betrachtet. Die statistische und analytische Auswertung der Messungen wird zur Ermittlung der für die weiteren Schritte notwendigen Parameter herangezogen. Der erforderliche Betrachtungszeitraum für eine solide Aussage liegt erfahrungsgemäß bei mindestens 12 Monaten. Insbesondere auch der Einfluss eines Grundwasserhochstandes auf das Raumklima wird im Rahmen der Betrachtung mit eruiert.

Die hydrogeologischen Untersuchungen gliedern sich in drei Abschnitte: In der ersten Phase werden mit gezielten, langfristigen Geländeuntersuchungen die Zusammenhänge zwischen Grundwasser- und Oberflächenwasserständen untersucht. Nach einer ersten Messphase werden die ersten Ergebnisse zur Ermittlung von Parametern für die zweite Untersuchungsphase genutzt, die Grundwasserströmungsmodellierung und die Modellierung des Sickerwassers in der ungesättigten Bodenzone zur Ermittlung von Kapillarwasseraufstiegen und Schichtenwasser. Die während der Erstellung der Modelle weiter laufenden Grundwasserstandsmessungen werden zur Kalibrierung der Modelle genutzt. In der dritten Phase werden objektadäquate Schutzmaßnahmen modelliert.

Die Kirche in Gottesgnaden ist komplett in bindigen Schichten gegründet (siehe Abb. 13).

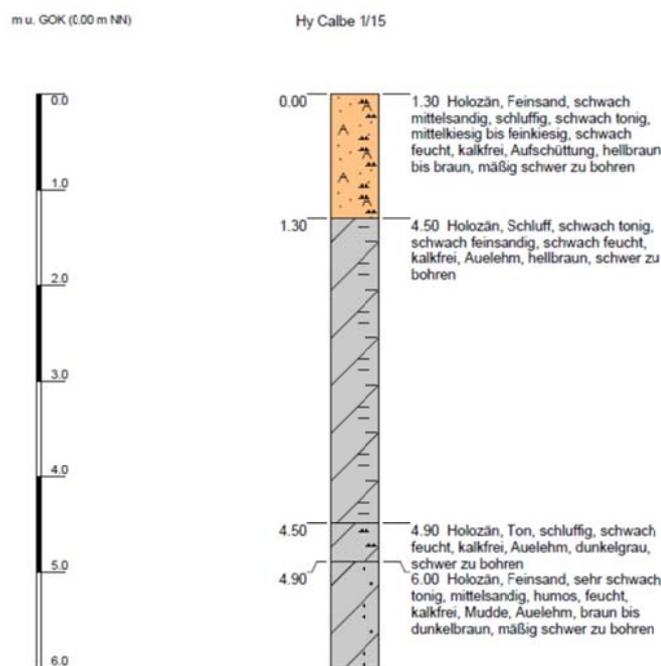


Abb. 13: Bohrprofil am Standort Gottesgnaden, Kirche (MLU Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Fachgruppe Hydrogeologie)

2.6 Schlussfolgerung

Durch Abnahme des Putzes im Innenraum, die bereits nach dem Sommer 2015 erfolgte, sind Gehalte an löslichen Bestandteilen wesentlich reduziert worden. Im Innenraum sind keine kritischen Gehalte - außer den Sulfaten aus dem Bindemittel des Setzmörtels - zu erwarten. Grundvoraussetzung für eine Vermeidung einer weiterschreitenden Lösung der Sulfate aus dem Setzmörtel wäre die Vermeidung der Durchfeuchtung. Bei dem angenommenen Einfluss des Grundwassers ist das nur schwer zu realisieren. Daher muss mit geeigneten Putzsystemen die Dauerhaftigkeit der Putzflächen angestrebt werden. Einen Beitrag zur besseren Trocknung der Wandflächen bzw. zur Reduzierung des dortigen Belastungsschwerpunktes kann durch eine minder dichte Ausführung des Fußbodens erreicht werden. Steine und Fugen sind offensichtlich so dicht, dass eine Trocknung von unten eingetragener Feuchtigkeit nahezu nicht möglich ist. Diese Prozesse laufen über den Sockelbereich der Wandflächen des Kirchenschiffs ab. Der Chorbereich, der erhöht liegt, weist keine entsprechenden Schäden auf. Auch wenn durch den Neubau des Hochwasserschutzdeiches die Hochwassergefahr der Kirche eingedämmt sein wird, so sind dessen Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel nicht von erheblicher Relevanz. Weiterhin ist zu prüfen, ob die Wasserableitung überall intakt ist.

Folgende Putzempfehlungen werden für den Innenputz gegeben. Vorteilhaft wäre es, die Eignung für die Kirche in Gottesgnaden zunächst in Musterflächen für mindestens 6 Monate zu prüfen.

1. Otterbein Porenputz, der entweder zweilagig aufgebracht wird oder in Kombination mit einer auflagernden Putzschicht aus normalem NHL für eine noch bessere optische Denkmalverträglichkeit
2. Keim Seccopor Feuchteregulierungsputz
3. Micropor Feuchteregulierungsputz

Das Außenmauerwerk, im Sockelbereich, sollte instandgesetzt werden, da über die z.T. desolaten Fugen (siehe Abb. 14) ein erhöhter Feuchteintrag ermöglicht wird. In dem Zusammenhang sind die mürben Fugen zurückzuarbeiten, was sich ebenfalls mit einer Reduzierung der vorhandenen Salze verbinden würde. Ein NHL 5 wird als geeignet für die Neuverfugung erachtet (z.B. Otterbein). Nach Instandsetzung des Mauerwerks wird das Eindringen von Wasser unterbunden und Lösungsprozesse aus dem sulfathaltigen Setzmörtel werden deutlich reduziert.



Abb. 14: Außenmauerwerk an der Südfassade der Kirche in Gottesgnaden mit z.T. desolaten Fugen im Sockelbereich

3 Feuchteuntersuchungen im Fußbodenbereich (Bericht HAL 16/2017 (ZÖTZL & KERSTEN, 2017))

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasser“, wurden Feuchteuntersuchungen im Fußbodenaufbau durchgeführt. Dazu wurden zwei Tiefenprofile im Fußboden angelegt. Die Untersuchungen dienen der Beurteilung der Feuchtesituation im Fußbodenbereich. Der Bericht beinhaltet die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und daraus resultierende Empfehlungen zum baulichen Vorgehen.

4 Probenahme und Vorgehensweise

Die Probenahme erfolgte am 07.02.2017 vor Ort. Für die Untersuchungen zur Feuchte wurden Bohrmehltiefenprofile im Fußbodenaufbau angelegt. Mit einem Spiralbohrer ($\varnothing = 14 \text{ mm}$) wurde aus definierten Tiefenstufen Bohrmehl entnommen und in luftdichten Schnappdeckelbehältern aufgefangen. Die Feuchtebestimmung erfolgt mittels Darmmethode (WTA 1999). Die Tab.1 informiert über die Probenahme und die Art der durchgeführten Untersuchungen.

Tab. 1 Probenübersicht und Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen

Probennummer	Entnahmeort / Tiefe unter FOK	Material	Analyse
GG_T_SCH_1	Direkt unterhalb Treppe zum Altar 12 cm	Lehm, Stückprobe	Feuchte
GG_AT_TP1/1	12-20 cm	Lehm	Feuchte
GG_AT_TP1/2	20-30 cm	Lehm	Feuchte
GG_AT_TP1/3	30-40 cm	Lehm	Feuchte
GG_F_TP1/1	Südseite, Mitte 0-2 cm	Fuge / Estrich	Feuchte
GG_F_TP1/2	2-5 cm	Schüttung	Feuchte
GG_F_TP1/3	5-15 cm	Schüttung	Feuchte
GG_F_TP1/4	40-41 cm	Lehm unter Schüttung	Feuchte



Abb. 1 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Blickrichtung Altar, Probenahmepunkt TP_AT



Abb. 2 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Blickrichtung Nordwand, Probenahmepunkt TP_FTP1



Abb. 3 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Blickrichtung Nordwand, Probenahmepunkt TP_FTP1



Abb. 4 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Probenahmepunkt TP_FTP1



Abb. 5 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Blickrichtung Altar, Probenahmepunkt TP_AT



Abb. 6 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Blickrichtung Altar, Probenahmepunkt TP_AT



Abb. 7 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordwand mit neu eingebautem Lüftungstreifen



Abb. 8 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordwand mit neu eingebautem Lüftungstreifen

5 Ergebnisse und Fazit

In der Tab. 2 sind die Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen an den Bohrmehlproben dargestellt. Die Abb. 9 und Abb. 10 veranschaulichen diese.

Damit werden im Bereich der Altartreppe sehr hohe Feuchtwerte zwischen 31 und 13 Ma.-% gemessen, die in Verbindung mit der hier fehlenden kapillarbrechenden Schicht stehen. Die anliegende hohe Feuchte führt zu Feuchtflecken im Bereich der Treppe. Hier sollten Maßnahmen (Einbau der kapillarbrechenden Schicht) ergriffen werden. Die im Tiefenprofil F erbohrten Feuchten im Fußbodenaufbau, der bis in eine Tiefe von 40 cm reicht, sind mit ca. 4 bis 5 Ma.-% leicht erhöht. Auch im Herbst 2016 an zwei Stellen entnommene Schüttungsproben zeigen Werte in Höhe von ca. 4 Ma.-%. Diese wenig veränderten Werte zeigen auch die installierten Leitfähigkeitsmessungen im Herbst 2016 und im Februar 2017.

Unterhalb des Fußbodenaufbaus werden schlagartig Feuchten von ca. 13 Ma.-% gemessen. Damit wird die Funktionsfähigkeit des Fußbodenaufbaus belegt. Im Randbereich wurden auf Empfehlung von Frau Dr. Meinhardt Belüftungsmöglichkeiten geschaffen, die den kapillaren Aufstieg der Feuchte im Mauerwerk reduzieren soll.

Tab. 2 Probenübersicht und Ergebnisse der Feuchteuntersuchungen

Probennummer	Entnahmeort	Bemerkungen	Analyse
GG_T_SCH_1	unterhalb der Treppe zum Altar 12 cm	Lehm, Stückprobe	30,91
GG_AT_TP1/1	12-20 cm	Lehm	17,49
GG_AT_TP1/2	20-30 cm	Lehm	19,13
GG_AT_TP1/3	30-40 cm	Lehm	13,14
GG_F_TP1/1	Südseite, Mitte 0-2 cm	Fuge / Estrich	3,55
GG_F_TP1/2	2-5 cm	Schüttung	5,04
GG_F_TP1/3	5-15 cm	Schüttung	5,12
GG_F_TP1/4	40-41 cm	Schüttung / Lehm unter Schüttung	12,88

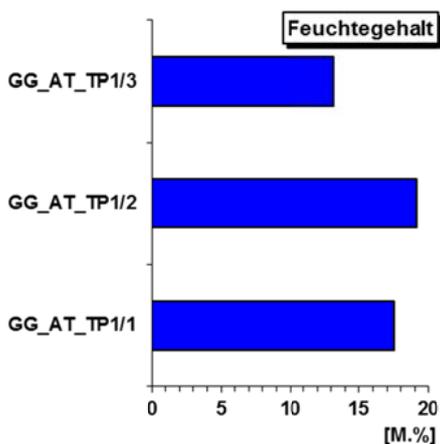


Abb. 9 Feuchteverteilung GG_AT_TP1

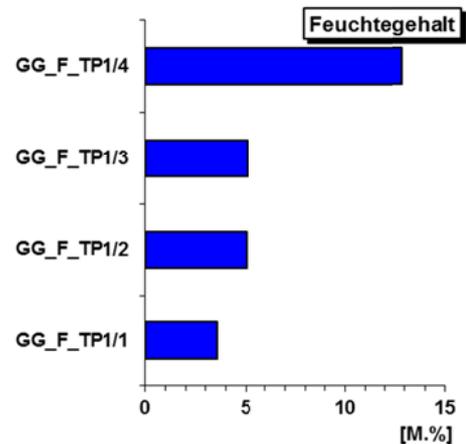


Abb. 10 Feuchteverteilung in GG_F_TP1

6 Aktualisierte Empfehlungen bei der Bauberatung im Juni 2016 in Aschersleben

Informationsaustausch vor Anlage der Rigolen

Die Baugrund- und Grundwassersituation wurde bei der Bauberatung im Juni 2016 in Aschersleben von Frau Dr. Meinhardt dem Planer, Herrn Dr. Heinecke, vorgestellt. Die Maßnahmen sollten aus der Modellierung des Grundwassermodells abgeleitet werden. Es wurde auch eine direkte Absprache auszuführender Maßnahmen des Planers mit Herrn Prof. Dr. Gossel festgelegt. Die Rigolen wurden ohne vorherige Abstimmung mit Herrn Gossel oder einer konkreten Rückfrage beim IDK angelegt.

7 Aktualisierte Empfehlungen nach Bauberatung, 24.03.2017 vor Ort (Protokoll vom 29.03.2017)

Im Projektzeitraum ausgeführte bauliche Maßnahmen im Außenbereich

Die Arbeiten wurden von der Bauhütte Naumburg ausgeführt.

Fugensanierung in Sockelbereich, umlaufend

Die sehr gut und denkmalgerecht ausgeführte Fugensanierung erfolgte auf Empfehlung des IDK und nach Rezepturvorgaben von Prof. Sobott (Bericht 21/2016) auf Basis eines NHL 5 der Firma Otterbein unter Zugabe von Sulfadur-HSNA-Zement. Eine genaue Angabe der verwendeten Materialien wurde von Herrn Birke (Bauhütte Naumburg) zugearbeitet:

Material für Fugensanierung im Sockelbereich, umlaufend:

Zum Einsatz gelangte ein Sand-/ Kiesgemisch 0/8 (Kies- u. Steinwerk Börner GmbH & Co. KG, 39240 Calbe OT Schwarz), Natürlicher Hydr. Kalk NHL 5 (Fa. Otterbein, Hydradur), HS- Zement (Fa. Dyckerhoff, Werk Lengerich, Sulfadur doppel HS) als baustellengemischter Mörtel.

Es erfolgte ebenfalls ein Steinaustausch mit Bernburger Sandstein.

Geländeregulierung

Die Geländeregulierung erfolgte durch ein Abgraben des Außenniveaus um ca. 30 cm und die Beseitigung von Mulden mit zum Gebäude hin führenden Gefällen mit einem Abstand bis 2,5 bis 3 m vom Mauerwerk entfernt. Das Gefälle führt jetzt vom Gebäude weg zu einer im Abstand 2,5 bis 3 m ausgeführten Rigole, die bei Niederschlägen, neben der Dachentwässerung, das Oberflächenwasser aufnehmen kann.

Anlage einer Vertikalsperre

Die Anlage einer vertikalen Absperrung im Spritzwasserbereich wurde konventionell in Sperrputz, Dichtschlämme, Geo-Vlies ausgeführt. Genaue Angaben der verwendeten Materialien wurden von Herrn Birke zugearbeitet.

Material für das Anlegen einer Vertikalsperre:

Material Sperrputz: Material wie für Fugensanierung, jedoch höherer Anteil an Komponente HS-Zement

Material Dichtschlämme: Zementäre Dichtschlämme, Mapei Idrosilex Pronto grau

Material Geo-Vlies: Straßenbauvlies, Secutex 151 GRK 3 C

Material Noppenbahn: Noppenbahn Typ 500 schwarz.

Die Dichtschlämme wurde bis in eine Höhe von ca. 30 cm über Oberfläche als Spritzwasserschutz appliziert. Die vertikale Abdichtung ist mit einer Tiefe von 50 cm zu wenig tief ausgeführt. Unterhalb dieser kommt es weiter zur direkten Befeuchtung des Fundamentmauerwerks über die Kapillarität des Auelehms, die nach Anlage der Rigole, im Starkregenfall erhöht wird. Die Fundamenttiefen wurden im Zuge der Anlage eines Schurfs ermittelt und durch den Planer, Herrn Dr. Heinecke, zur Verfügung gestellt.



Abb. 11 Anlage der Vertikalsperre, die wurde Noppenbahn durch ein 2-lagig verlegtes Geotextil ersetzt (Foto: Buchmann)



Abb. 12 Anlage der Rigole (Foto: Buchmann)



Abb. 13 Überkorn für Schüttung im Traufbereich (Foto: Buchmann)

Anlage von Rigolen auf der Nord- und Südseite

Die Rigolen wurden zum Auffangen und Versickern des Niederschlagswassers (des Oberflächenwassers und des Wassers aus der Dachentwässerung) im Abstand 2,5 bis 3 m vom Objekt angelegt. Genaue Maße der Rigolen wurden durch Herrn Birke zur Verfügung gestellt.

Die Maße der Rigolen sind wie folgt:

Südseite: 10,20 m x 0,60 m x 0,60 m,

Nordseite: 11,50 m x 0,60 m x 0,60 m.

Das Abgraben des Auelehms durch Ausheben der Rigole ist ein Eingriff (Verringerung der Schichtmächtigkeit) in den Grundwasserstauer, der den Zustrom des unterhalb anstehenden (drückenden) Grundwassers im Grundwasserleiter vermindert.

Um eine Entlastung der Rigolen zu erzielen wird das Anlegen von Brunnen (Bohren) im Rigolensickerschacht empfohlen, um im Falle eines Pegelhochstands das Wasser abpumpen zu können und eine zusätzliche Befeuchtung der Kirchenfundamente zu vermindern.

Um den Wasserstand und das Versickerungsverhalten in der Rigole zu monitoren und bei Extremwasserbeaufschlagung durch Hochwasserstände (und dadurch erhöhte Grundwasserpegelstände) oder starke Niederschläge den rechtzeitigen Einsatz der Pumpen sicher zu stellen, kann ein Datenlogger in den anzulegenden Brunnen in den Rigolenschacht eingesetzt werden, der den gegebenen Wasserstand permanent misst und aufzeichnet.

Ein Senden der Daten sollte diskutiert werden, um eine rechtzeitige Reaktionsmöglichkeit zu erzielen.

Dieser Messwert kann nicht direkt vom Messpegel des Brunnens im Osten der Kirche abgeleitet werden.

Dachentwässerung, Einbindung in die Rigolen

Auf Grund der hohen Laublast und ständiger Verstopfung der Dachrinnen wurde ein Pflegevertrag mit der Gemeinde zur Bereinigung der Dachrinnen vereinbart.

Die Wasserableitungsrohre an den Fallrohren sind zu kurz ausgebildet. Bei starken Niederschlägen kommt es hauptsächlich am östlichen Fallrohr am gepflasterten Übergang zur Rigole weiterhin zu einer Bewässerung des Sockel- und Fundamentbereichs. Am südlichen Schiff, am westlichen Fallrohr, ist die Wasserableitung zu überarbeiten.

Alle Einläufe in die Rigolen über ausgeschnittene Betonpflanzsteine wurden bei der Probenahme am 07.02.2017 mit Laub und Astwerk verstopft vorgefunden (siehe Anlage Fotodokumentation). Ein direktes Einbinden des Ableitungsrohrs in den Rigoleneinlauf wird allerdings auf Grund einer häufigen Verstopfung durch Laub nicht in Erwägung gezogen. Hier wird der Einbau eines herausnehmbaren Gitters empfohlen. Damit ist auch das Reinigen des Einlaufs in die Rigole möglich.

Im Projektzeitraum ausgeführte bauliche Maßnahmen im Innenbereich

Die Seitenstreifen im Fußboden wurden aufgenommen und Ziegel mit Lüftungsschlitzen in Grobsplitt verlegt. Dadurch Verringerung aufsteigender Feuchte im Mauerwerk und Feuchteableitung in die Raumluft.



Abb. 14 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordwand mit neu eingebautem Lüftungstreifen



Abb. 15 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordwand mit neu eingebautem Lüftungstreifen

Der Epitaph wurde aus dem Wandmauerwerk herausgenommen und auf einem Betonsockel auf den Fußbodenaufbau (mit kapillARBrechender Schicht) vor das Mauerwerk gestellt und damit von einer kapillaren Befeuchtung abgekoppelt.

Anlage von Putzmusterflächen

Die Putzmusterflächen wurden am 15. und 16.11.2016 in den neu applizierten Putz (Baustellenmischung mit Otterbein NHL und regionalem Sand) im Schiff integriert und die Anlage dieser ausführlich dokumentiert. Von jedem Musterputz wurden Mörtelprismen angefertigt und an das IDK übergeben. Ein Bericht zu den Untersuchungen der Prismen erfolgt durch das IDK. Hierbei geht es neben Materialkennwerten hauptsächlich um die Feststellung der in den Putzmörtelprodukten enthaltenen Alkalien mit Hinblick auf die permanent in das Mauerwerk eingetragenen sulfathaltigen Grundwässer (siehe Wasseranalyse Bericht MLU).

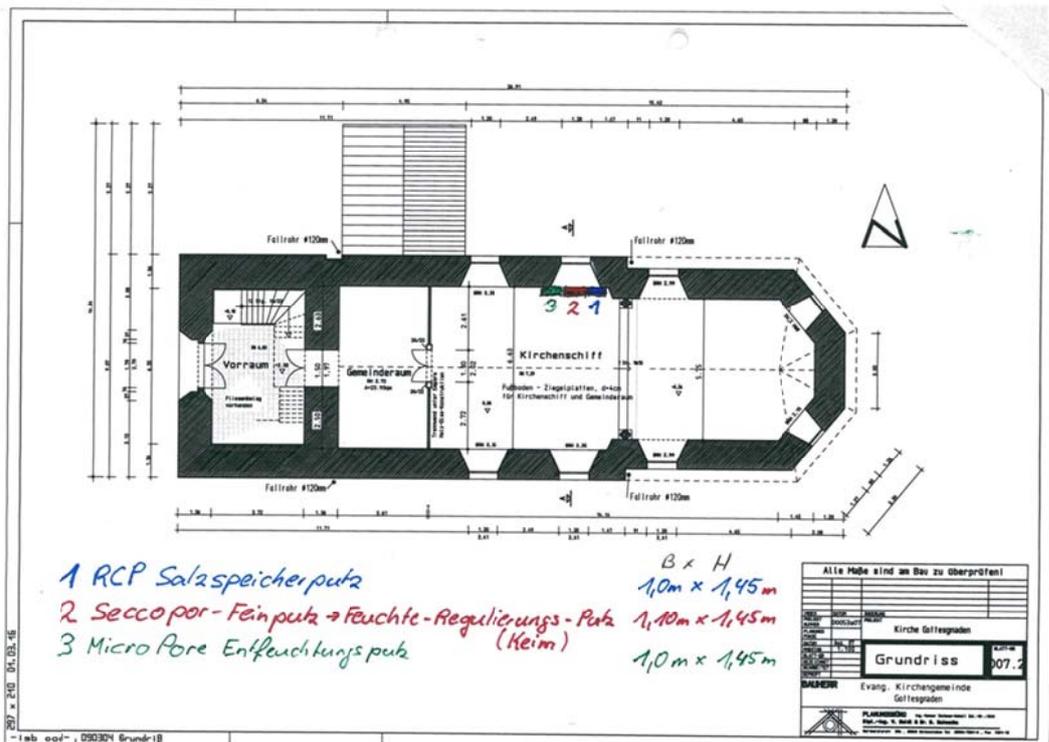


Abb. 1: Anlage der Putzmusterflächen 1-6 am 14.12.2014 (Skizze modifiziert durch Herrn Birke)



Abb. 1: Anlage der Putzmusterflächen 1-6 (Foto: Herr Birke)

Feuchteuntersuchungen im Fußbodenbereich

Im Herbst 2016 und im Februar 2017 erfolgten Darrfeuchteuntersuchungen an zwei Stellen im Fußbodenaufbau des Kirchenschiffs. Die Ergebnisse wurden bei der Bauberatung vorgestellt (Bericht HAL-16/2017 in der Anlage der E-Mail). Die Feuchtesituation im Fußbodenaufbau, der eine kapillARBrechende Schüttung enthält, ist mit ca. 5 Ma.-% moderat. Unterhalb des durch ein Geovlies (Drainagevlies) abgekoppelten Aufbaus kommt es im Übergang Schüttung/Auelehm zu einer Verdoppelung der Feuchtwerte. Damit ist die Funktion des Fußbodenaufbaus im Schiff gewährleistet.

Auf der Geo-Vlies-Oberfläche unterhalb der kapillARBrechenden Schicht wurden Gipskrusten festgestellt, die nach dem Versickern des eingedrungenen Grundwassers im Fußbodenaufbau auskristallisierten. Die Sulfate wurden durch das hoch mit Sulfatgehalten beaufschlagte Grundwasser eingetragen. Eine Reaktion mit Calciumionen aus dem mineralischen Fußbodenaufbau führte zur Gipsbildung.

Feuchteflecken und Salzausblühungen werden an und um die Sandsteintreppe zum Altar festgestellt. Feuchteuntersuchungen unterhalb der Treppe zeigten Werte von 32 Ma.-% Materialfeuchte. Es existiert hier eine direkte Ankoppelung der Treppe zum Altar an den unterliegenden Auelehm und eine Befeuchtung der Raumluft über die Treppe. Im Bericht und in der Diskussion vorgeschlagene bauliche Maßnahmen, um die hier über den Auelehm in die Sandsteintreppe eindringende Feuchte durch den Einbau einer kapillARbrechenden Schicht zu unterbinden, wurden zur Kenntnis genommen. Die von Herrn Birke vorgeschlagene Öffnung durch Schlitze in den anliegenden Keramikplatten würden die Feuchtesituation nur geringfügig entlasten, und zusätzlich zu einer geringfügigen Befeuchtung der Raumluft führen. Im Altarbereich wurden keine Untersuchungen im Fußbodenbereich durchgeführt, da zum Zeitpunkt der Probenahme keine größeren Feuchteflecken auf den Fußbodenplatten festgestellt wurden. Es wurde von der Existenz einer Schüttung, wie im Schiff vorgefunden, ausgegangen. Herr Dr. Heinecke hat sich bereit erklärt, den Fußbodenaufbau hier zu recherchieren, da er an der damaligen Planung/Ausführung beteiligt war.

Leitfähigkeitsmessungen im Fußbodenbereich

Um die Feuchtesituation im Fußbodenaufbau zerstörungsfrei in Abhängigkeit von den klimatisch beeinflussten Umgebungsbedingungen untersuchen zu können, wurden am 04.08.2016 Feuchtemessfühler installiert. Die Installation von Edelstahl Elektroden zur Leitfähigkeitsmessung erfolgte in der Schüttung, direkt unterhalb des vorhandenen Geotextils, im Bereich der Treppe vor dem Altar und an der Nordwand im Kirchenschiff. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit wurden die Feuchtemesswerte in einem dimensionslosen Feuchteindex erfasst. Dadurch können Veränderungen der Feuchte exakt dokumentiert werden. Die Korrelation der Messwerte erfolgte an Hand der Ergebnisse der Darrfeuchtemessungen. Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass durch das Geotextil eine Entkopplung des Fußbodens vom unterlagernden Erdreich gegeben ist. Nach den baulichen Maßnahmen im letzten Jahr ist eine leichte Abtrocknung unterhalb des Fußbodens erfolgt. Bei der Messung am 08.08.2017 ist ein sehr geringer Anstieg der Feuchte unterhalb im Fußbodenaufbau um ca. 1,5 Ma.-% zu verzeichnen. Ein Zusammenhang mit erhöhten Niederschlägen ist möglich, kann aber anhand der geringen Änderung der Messwerte nicht nachgewiesen werden. Die Messungen werden fortgeführt.



Abb. 16 Installation der Messfühler unterhalb des Fußbodens an der Treppe



Abb. 17 Installation der Messfühler im Fußboden an der Nordwand

Tab. 3 Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen

Einstellung Messgerät		Messung am 04.08.2016			Messung am 24.11.2016		
		Messung Treppe	Messung Nordwand	Messung Treppe/ Nordwand	Messung Treppe	Messung Nordwand	Messung Treppe/ Nordwand
2/1	0-Wert	17,5	17,5	17,5	12,6	12,6	12,6
	Messwert	156,0	150,0	195,0	146,4	133,9	184,0
	korrigierter Messwert	138,5	132,5	177,5	133,8	121,3	171,4
8/1	0-Wert	11,6	11,6	11,6	8,2	8,2	8,2
	Messwert	102,6	97,0	126,0	94,3	86,4	118,3
	korrigierter Messwert	91,0	85,4	114,4	86,1	78,2	110,1
	Darrfeuchte	4,23 M%	3,65 M%				
	korrelierte Feuchten			5,5 M%	4,0 M%	3,5 M%	5,0 M%

Tab. 4 Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen

Einstellung Messgerät		Messung am 07.02.2017			Messung am 08.08.2017		
		Messung Treppe	Messung Nordwand	Messung Treppe/ Nordwand	Messung Treppe	Messung Nordwand	Messung Treppe/ Nordwand
2/1	0-Wert	7,3	7,3	7,3	10,5	10,5	10,5
	Messwert	140,8	146,1	183,4	170,7	154,5	>199,9
	korrigierter Messwert	133,5	138,8	176,1	160,2	144,0	>189,4
8/1	0-Wert	4,8	4,8	4,8	8,3	8,3	8,3
	Messwert	91,3	94,3	118,5	107,2	99,8	130,8
	korrigierter Messwert	86,5	89,5	113,7	98,9	91,5	122,5
	Darrfeuchte			5,12 M%			
	korrelierte Feuchten	4,0 M%	4,0 M%		4,5 M%	4,0 M%	6,5 M%



Abb. 18 Installation der Messfühler unterhalb des Fußbodens an der Treppe; Salzausblühungen auf der Oberfläche des Geotextils

8 Monitoring Rigole am 07.02. und 08.08.2017



Abb. 19 Gottesgnaden, Kirche, Südfassade, Blickrichtung Ost, Rigole (Aufnahme am 07.02.2017)



Abb. 20 Gottesgnaden, Kirche, Südfassade, Blickrichtung West, Rigole (Aufnahme am 07.02.2017)



Abb. 21 Gottesgnaden, Kirche, Südfassade, Blickrichtung Ost, Ableitung des Regenwassers in die Rigole, (Aufnahme am 07.02.2017)



Abb. 22 Gottesgnaden, Kirche, Südfassade, Blickrichtung West, Ableitung des Regenwassers in die Rigole, „Verstopfung“ (Aufnahme am 07.02.2017)

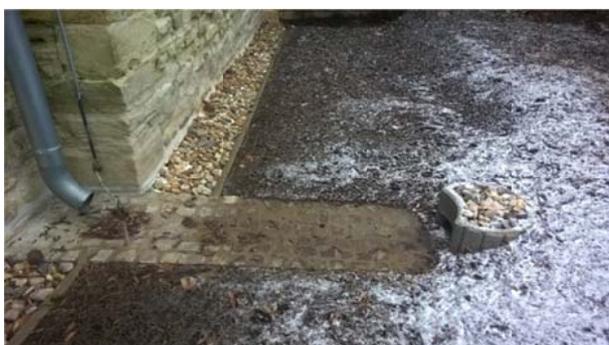


Abb. 23 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Nordfassade, Blickrichtung West, Ableitung des Regenwassers in die Rigole, (Aufnahme am 07.02.2017)



Abb. 24 Gottesgnaden, Kirche, Südfassade, Blickrichtung Ost, Rigole (Aufnahme am 08.08.2017)



Abb. 25 Gottesgnaden, Kirche, Schiff, Einlauf in die Rigole, „Verstopfung“ (Aufnahme am 08.08.2017)



Abb. 26 Gottesgnaden, Kirche, Einlauf in die Rigole, „Verstopfung“ (Aufnahme am 08.08.2017)

9 Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 52/2017, KALISCH, 2017, siehe Anlage)

Die Raumklimamessungen erfolgten im Zeitraum 17.10.2015 bis 08.08.2017.

Die Werte der relativen Raumluftfeuchte schwankten im Verlauf der Aufzeichnung zwischen minimal 53,7% und maximal 99,9% rel. Feuchte um einen Mittelwert von 76,01% rel. Feuchte (siehe Diagramm 1). Im dokumentierten Messzeitraum traten am 21.11.2016 Kondensationsbedingungen auf. Der Werteverlauf der relativen Raumluftfeuchte ist geprägt durch häufige und starke Schwankungen, die auf einen starken Außenklimateinfluss und damit einen guten Luftaustausch des Raumes mit der Außenluft schließen lassen. Dennoch liegen die Werte der relativen Raumluftfeuchte auch im Sommerhalbjahr bei Raumlufttemperaturen um 20°C deutlich über 70% rel. Feuchte und damit im klimatischen Gefahrenbereich für mikrobiologische Aktivität und damit Schimmel- und Algenbildung.

Bis auf die jahreszeitlichen Schwankungen des Niveaus der relativen Luftfeuchte sowie der Raumlufttemperatur ist bisher keine tendenzielle Veränderung des Niveaus der relativen Luftfeuchte ablesbar.

Hinsichtlich der Nutzung des Kirchenraumes sind dringend Maßnahmen zu empfehlen, die zur Feuchtigkeitsreduzierung im Bauwerk beitragen.

Es ist zu empfehlen, dass nach dem Abschluss der vorgesehenen Arbeiten eine erneute Überprüfung des Raumklimas erfolgt. Sollte kein befriedigender Effekt eingetreten sein, wäre als nächster Schritt die Erprobung einer luftfeuchtegeregelten Zwangsbelüftung des Raumes zu erproben. Hierbei wird die absolute Luftfeuchte (Gramm Feuchtigkeit pro Kubikmeter trockener Luft) der Außenluft und der Raumluft automatisch verglichen. Bei einer höheren absoluten Luftfeuchte im Kirchenraum würde dann ein Ventilator in einem Fenster eingeschaltet. Sollte die absolute Raumluft der absoluten Außenluftfeuchte entsprechen oder niedriger sein, wird die Zwangsbelüftung durch den Ventilator abgeschaltet.

Im Winterhalbjahr sollte im Interesse einer nicht zu hohen Auskühlung des Raumes auf eine Zwangsbelüftung verzichtet werden und dafür mit einer leichten Raumlufttemperierung mit einer geringen um 3 bis 4 K (°C) erhöhten Raumlufttemperatur gearbeitet werden.

9 Bericht zu den hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2017)

9.1 Zusammenfassung (Auszug)

Für die Aufgabenstellung einer weitgehenden Trockenlegung der Kirche "Gottesgnaden" bei Calbe und die Abschätzung von Folgen eines nochmaligen Hochwassers im Ausmaß des Fluteignisses 2013 haben sich die Modellierungen bewährt. Die Grundwasserstände können in ihrer Dynamik abgebildet und Szenarien für präventive Maßnahmen und Sanierungen getestet werden.

Auf der Grundlage der Modellergebnisse sind einzelne passive und aktive Maßnahmen bewertet worden. Es zeigt sich, dass die passiven Maßnahmen deutlich bessere Wirkungen erzielen können als aktive Maßnahmen zur Grundwasserhaltung. Der Einbau kapillarbrechender Schichten führt bei den mächtigen bindigen Böden vor Ort zu einer wirksamen Unterbrechung des kapillaren Wasserflusses. Eine Reduzierung des Grundwasserdruckspiegels durch aktive Grundwasserentnahmen könnte dagegen nur zu einer temporären Entspannung der Situation beitragen.

9.2 Hinweise zum Notfallplan (Auszug)

Die Hinweise beziehen sich ausschließlich auf den Hochwasserfall ohne direkten Oberflächenwasserzutritt (z.B. durch Deichbruch).

Die längs des Kirchenschiffs (nördlich und südlich) der Kirche Gottesgnaden eingebauten Rigo-
len können im Hochwasserfall zu einer Absenkung des Druckspiegels verwendet werden, auch,
wenn sie nicht in den Grundwasserleiter direkt eingreifen. Dies führt zu einer leichten Entspan-
nung (der gespannten Druckverhältnisse).

Im Falle ohne Regenwasseranfall wird hier bereits mit kleinen Saugpumpen (ca. 2 m³/h) der
Wasserandrang an die Fundamente und Mauern so reduziert sein, dass es zu keinen Schäden
kommt.

Die hohen Wasserdrücke im Grundwasser führen wahrscheinlich auch zu einer Dekonsolidie-
rung der mächtigen Auelehm- und -tonschichten, was lediglich durch aktive Reduzierung des
Wasserdrucks im tief liegenden Grundwasserleiter verhindert werden kann.

Zur Reduzierung des Wasserdrucks im Grundwasserleiter kann durch eine Pumpe im vorhan-
denen Friedhofsbrunnen eine Wasserentnahme in der Größenordnung von etwa 20 m³/h vor-
gesehen werden. Das Wasser ist in den Graben östlich der Kirche abzuführen, der in das Un-
terwasser des Schleusenkanals mündet.

Die Reaktionszeit auf einen Hochwasserstand > 750 cm (Schleuse Calbe UP, Elektronischer
Wasserstrassen Informationsservice elwis) beträgt aufgrund der hohen Durchlässigkeit der
Grundwasserleiter und der geringen Entfernung zum Schleusenkanal nur max. 5 Stunden.
Nach Rückgang des Hochwassers auf unter 750 cm braucht die Pumpe nur max. 12 Stunden
weiter betrieben zu werden.

10 Literatur

Arendt, C.& Seele, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.

Grassegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S..

Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gottesgnaden im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt",

Gossel, W., Härter, J. (2016) "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", Vortrag über aktuelle Projektergebnisse am 24.11.2016

MEINHARDT, J. (2016) Gottesgnaden, Kirche St. Maria und Johannes - Mauerwerksuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 51/2015, 16 S.

Protokoll zum Projekttreffen in Halle am 24.11.2016

Protokoll zur Projektberatung am 24.03.2017

Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.

WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik“

Zötzl, M. (2016) Gottesgnaden, Kirche, Feuchteuntersuchungen im Fußbodenbereich - im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 16/2017, 6 S.

Kalisch, U., Kersten, H., Zötzl, M. (2017) Raumklimauntersuchungen in den Kirchen in Gottesgnaden, Räbel und Sydow - im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 52/2017, 11 S.

HAL 70/2017 Gottesgnaden, Kirche – Grundwasserprojekt, Leitfähigkeitsmessungen im Fußbodenbereich – KERSTEN, ZÖTZL

Prof. Sobott (Bericht 21/2016)

**Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gottesgnaden
im Rahmen des Projekts
" Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt "**



Auftraggeber: Evangelische Kirche Mitteldeutschland

Auftragnehmer: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Projektauftrag	4
1.2	Hintergrund des Projektes	4
1.3	Ziel des Projektes "Gottesgnaden"	4
1.4	Arbeitsablauf	5
2	Datengrundlagen	8
2.1	Geologische und hydrogeologische Übersicht	8
2.2	Hydrologische Übersicht	9
3	Auswertung der Messergebnisse	10
3.1	Bohrgutansprache	10
3.2	Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten	10
3.3	Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität	11
4	Modellierungswerkzeuge	11
4.1	Feflow(R)	11
4.2	Hydrus1D	11
5	Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung	11
5.1	Randbedingungen	11
5.2	Parameter	12
5.3	Kalibrierung	12
5.4	Szenarien	13
6	Zweidimensionale Modellierung als Profilschnitt mit ungesättigter Zone	15
6.1	Randbedingungen	15
6.2	Parameter	15
6.3	Plausibilitätsprüfung	15
7	Zusammenfassung und Ausblick	15
8	Literatur	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche "Gottesgnaden" (Calbe)	7
Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte des Hydrogeologischen Kartenwerks der DDR 1 : 50 000, unmaßstäbliche Vergrößerung, ohne Legende. Der untere braune Balken markiert einen elsterglazialen Geschiebemergel als Basis zum Tertiär und Festgestein, darüber folgt dann erst wieder der spätsaale- und weichselglaziale Grundwasserleiter sowie darüber (gestrichelt blau markiert) der holozäne Auelehm.....	9
Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände UP Schleuse Calbe mit den Grundwasserständen Kirche Gottesgnaden (Skalierung zur besseren Vergleichbarkeit angepasst)	10
Abbildung 4: Grundwassergleichen des Grundwasserleiters und darüber liegenden Geringleiters mit Mittelwasserstand (Median) und Hochwasserstand Juni 2013.	12
Abbildung 5: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy Calbe 1/15.....	13
Abbildung 6: Modellierte Wasserdrücke im Falle eines Starkregens bei Mittelwasser (oben) und Hochwasser (unten) in der ungesättigten Zone.....	14
Abbildung 7: Berechnete Druckspiegel (links) und Wassergehalt (rechts) für einen Beobachtungspunkt in Höhe der Oberfläche des Grundwasserleiters (blau) und in Höhe der Fundamentsohle (schwarz) im eindimensionalen vertikalen Modell.....	16

1 Einleitung

1.1 Projektauftrag

Der Auftrag zur hydrogeologischen Bewertung von Hochwassereinflüssen auf ausgewählte Kirchen in Sachsen-Anhalt sowie Ausarbeitungen von Strategien zur Vermeidung von Schäden bei künftigen Hochwasserereignissen wurde gemäß Angebot am 27.07.2015 vergeben. In diesem Auftrag ist vorgesehen, Grundwassermessstellen einzurichten, regelmäßig Grundwasserstände zu messen, die Messungen auszuwerten und die hydrogeologische Situation zur Ableitung von Präventionsmaßnahmen numerisch zu modellieren. Hierfür wurden zunächst die verfügbaren Schichtenverzeichnisse und hydrogeologischen Karten des Landesamtes für Geologie und Bergwesen sowie die Hochwasserkarten des Landesbetriebs für Hochwasserschutz genutzt. Der vorliegende Modellierungsbericht zur denkmalgeschützten Kirche Gottesgnaden bei Calbe umfasst die Modellierungsergebnisse von drei numerischen Modellen auf der Basis der Erstauswertung der Grundwasserstandsmessungen von Oktober 2015 bis Oktober 2016.

1.2 Hintergrund des Projektes

Im Land Sachsen-Anhalt sind an einigen denkmalgeschützten Kirchen nach dem Hochwasser 2013 Wasserschäden aufgetreten, die nicht direkt auf den Einfluss von Oberflächenwasser zurückgeführt werden können. Dies sind einerseits witterungsbedingte Schäden, die in diesem Projekt nur eine untergeordnete Rolle spielen, und andererseits Schäden, die auf Grundwasseranstiege zurückzuführen sind. Die Beziehung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser an den betroffenen Denkmälern soll daher in diesem Projekt genauer untersucht und Möglichkeiten der Vermeidung durch Modellierung verschiedener möglicher Präventionsmaßnahmen gefunden werden. Eine der sechs untersuchten Kirchen liegt bei Calbe (Kirche "Gottesgnaden") und das Charakteristische bei dieser Kirche sind mächtige Auelehme und -tone, die zu einem kapillaren Aufstieg aufgrund der hochwasserinduzierten hohen Druckspiegel bis weit in den Bereich der Gründungsfundamente hinein führen. Das Projekt dieser Kirche hat insofern Modellcharakter, als diese hydrogeologische Situation an mehreren denkmalgeschützten Bauten auftreten kann, jedoch nur selten in dem hier sichtbaren Ausmaß zu Schäden führt.

1.3 Ziel des Projektes "Gottesgnaden"

Die Grundwasseruntersuchungen sind auf die Beobachtung, Analyse und Modellierung der Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung ausgerichtet. Die Schäden hochwasserbedingter Grundwasseranstiege an den ausgewählten Denkmälern sollen künftig vermieden werden. Hierfür sollen sowohl passive als auch aktive Maßnahmen zur Grundwasserstandsregulierung untersucht werden, wobei die Nachhaltigkeit der Maßnahmen unter mehreren Aspekten betrachtet werden soll. Die Kirche "Gottesgnaden" ist hierfür in besonderer Weise aufgrund der geologischen und hydrodynamischen Gegebenheiten geeignet. Das Ziel ist, möglichst wartungsarme und mit geringem technischem Aufwand durchzuführende Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen auszuarbeiten.

1.4 Arbeitsablauf

Basierend auf den zunächst notwendigen Recherchen beim Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt und dem Landesbetrieb für Hochwasserschutz sowie einer Begehung vor Ort mit den Verantwortlichen des Baudezernats und der Kirchengemeinde wurden zunächst die Geländearbeiten zur Bestimmung der lokalen geologischen Verhältnisse, zur Einrichtung zweier Grundwassermessstellen, zur quasikontinuierlichen Messung von Grundwasserständen und zur Bestimmung des Grundwasserchemismus durchgeführt.

Auf Grundlage der Grundwasserstandmessungen von Oktober 2015 bis Oktober 2016 konnten die Analysen der Oberflächenwasser - Grundwasser - Interaktion die erforderlichen hydraulischen Parameter für die numerische Grundwassermodellierung liefern. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden drei unterschiedliche Modelle erstellt:

1. Ein dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell, das die Druckhöhen der lokalen Grundwasserspiegel im Hochwasserfall Anfang Juni 2013 lieferte.
2. Ein zweidimensionales Profilschnittmodell der ungesättigten und gesättigten Zone, das die Auswirkungen des erhöhten Druckspiegels auf den kapillaren Aufstieg zeigen sollte.
3. Ein eindimensionales Modell der ungesättigten Zone, das die Möglichkeiten der Sanierung und der präventiven Maßnahmen untersuchen soll.

Als Überblick ist in Abbildung 1 der Arbeitsablauf für dieses Objekt dargestellt.

Arbeitsplan zum Projekt														
"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiegen am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"														
Kirche Gottesgnaden bei Calbe														
	2015				2016				2017				2018	
Arbeitsaufgabe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	
Messung der Abhängigkeiten Grundwasserstand-Oberflächenwasserstand														
Erfassung der hydrologischen und geologischen Verhältnisse auf Basis von Karten und Aktenmaterial (Historische Untersuchung)	X													
Einholung von Genehmigungen zum Abteufen von Kleinrammbohrungen 80 mm und Einbau von Grundwassermessstellen 50 mm		X												
Erstellung von 1-3 Grundwassermessstellen im direkten Umfeld der Kirchen		X	X											
Slug&Bail Tests zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters		X	X											
Erstellung und Einbau automatischer Datenlogger zur stündlichen Erfassung von Grundwasserständen (evtl. mit Datenfernübertragung)		X	X											
Messung der Grundwasserstände		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Grundwasserprobenahme und Analyse der Hauptinhaltsstoffe des Grundwassers		X	X											
Statische Analyse der Abhängigkeiten des Grundwasserstandes von meteorologischen und hydrologischen Einflüssen							X				X			
Ansätze zur analytischen Prozessmodellierung							X							
Zwischenbericht Messstellenaufbau, Geologie und Hydrochemie					X									
Zwischenbericht statistische Analysen und analytische Prozessmodellierung								X					X	
Aufbau standortbezogener numerischer Grundwassermodelle														
Abgrenzung der 6 Modellgebiete anhand plausibler hydrologischer Randbedingungen				X										
Aufbau der Grundwasserleiter-/geringleiter-Strukturen				X	(X)									
Selektion von Standorten, an denen eine 2D-Vertikalschnittmodellierung für die ungesättigte Zone notwendig ist				X	X									
Diskretisierung der Modellgebiete unter numerischen Stabilitätskriterien					X									
Stationäre Modellkalibrierung für mittlere Strömungsverhältnisse						X							X	
Instationäre Modellkalibrierung anhand der Grundwasserstandsmessungen								X					X	
Entwicklung von Hochwasserszenarien für die einzelnen Standorte						X			X					
Instationäre Berechnung der Hochwasserszenarien 3D Strömungsmodelle						X			X					
Instationäre Berechnung von Hochwasserszenarien Vertikalmodelle							X			X				
Zwischenbericht Modellierungsergebnisse							X							
Ableitung standortbezogener hydraulischer Vorsorgemaßnahmen														
Modellierung mit passiven Vorsorgemaßnahmen zur Reduktion von Hochwassereinflüssen											X			
Modellierung mit aktiven Vorsorgemaßnahmen zur temporären Regulierung des Grundwasserstandes											X			
Optimierung der standortbezogenen Maßnahmen auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse											X	X		
Abschlussbericht													X	X

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche "Gottesgnaden" (Calbe)

2 Datengrundlagen

Die drei Modelle wurden auf der Basis folgender Unterlagen erstellt:

1. Kartengrundlagen des Hydrogeologischen Kartenwerks der DDR 1 : 50 000 (HK50) und des Lithofazieskartenwerks Quartär der DDR 1 : 50 000 (LKQ50). Diese Karten dienten als Planungsgrundlage für die lokal zu erhebenden (hydro-)geologischen Daten und die Grundwasserstands.
2. Vom Baugrundbüro Heinemann Klemm Wackernagel konnten Auszüge des Projekts "Sanierung Kirche Gottesgnaden" genutzt werden.
3. Wasserstandsmessungen an den Oberflächengewässern: 15-minütige Wasserstandsdaten der nahegelegenen Schleuse Calbe liegen für den gesamten relevanten Zeitraum 2013-2016 vor und konnten bei der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung berücksichtigt werden.
4. Bohrungen, Grundwasserstandsmessungen und Grundwasserprobenahme vor Ort haben erstens den lokalen Bodenaufbau gegenüber den Kartenwerken konkretisiert, zweitens die erforderlichen Daten für die Modellierung geliefert und drittens auch bei der Beurteilung von Baumaßnahmen und Planung für anstehende Baumaßnahmen geholfen.

2.1 Geologische und hydrogeologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet "Gottesgnaden" (Calbe) liegt aus struktureller Sicht im östlichen Teil des Mitteleuro-päischen Schollengebiets (HENNINGSEN & KATZUNG 2006, BACHMANN & SCHWAB 2008). Der in größerer Tiefe anstehende Festgesteinsuntergrund spielt nur für die Hydrochemie insofern eine Rolle, als hoch mineralisierte Zechsteinwässer bis in den oberen Grundwasserleiter aufdringen und zu einer erhöhten Sulfatfracht im Untersuchungsgebiet führen. Tabelle 1 enthält die Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe. Sie zeigt, dass lediglich Sulfat in die Expositionsklasse XA1 nach DIN 1045-2 fällt und damit als nur "schwach angreifend" zu klassifizieren.

Tabelle 1: Konzentrationen der Hauptinhaltsstoffe des Grundwassers in "Gottesgnaden" (Calbe) in [mg/l]

Chlorid	522.21
Nitrat	8.68
Sulfat	289.61
Natrium	222.00
Kalium	9.88
Magnesium	32.20
Calcium	281.04

Im Weiteren wird das Festgestein nicht weiter berücksichtigt. Über dem Festgestein wird im HK50 ein Grundwassergeringleiter verzeichnet, worüber direkt der saale- und weichselglaziale Grundwasserleiter mit einer Mächtigkeit von 5-10 m und der holozäne Grundwassergeringleiter dargestellt werden (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte des Hydrogeologischen Kartenwerks der DDR 1 : 50 000, unmaßstäbliche Vergrößerung, ohne Legende. Der untere braune Balken markiert einen elsterglazialen Geschiebemergel als Basis zum Tertiär und Festgestein, darüber folgt dann erst wieder der spätsaale- und weichselglaziale Grundwasserleiter sowie darüber (gestrichelt blau markiert) der holozäne Auelehm.

2.2 Hydrologische Übersicht

Die Hydrologie der auf einer Flussinsel gelegenen Kirche zwischen Saale und Schleusenkanal wird dominiert von dem Wehr in Calbe und der Schleusung. Während das Unterwasser der Schleuse eine sehr hohe Wasserstandsdynamik aufweist, bleibt das Oberwasser sehr konstant. Die niederen Bereiche der Insel werden wegen der bindigen Deckschichten nicht bei jedem Hochwasser über den Grundwasserleiter geflutet, obwohl Teile niedriger liegen als der Wasserspiegel.

Die Grundwasserneubildung spielt für das Strömungsgeschehen eine deutlich untergeordnete Rolle. Die jährliche Grundwasserneubildungsrate auf der Insel liegt bei etwa 50-100 mm/a, was insbesondere an den gering durchlässigen Deckschichten liegt. Das meiste oberirdisch abfließende Wasser wird über straßenparallele Gräben gefasst.

In der Abbildung 3 ist der beschriebene Zusammenhang zwischen den Oberflächen- und Grundwasserständen deutlich zu sehen.

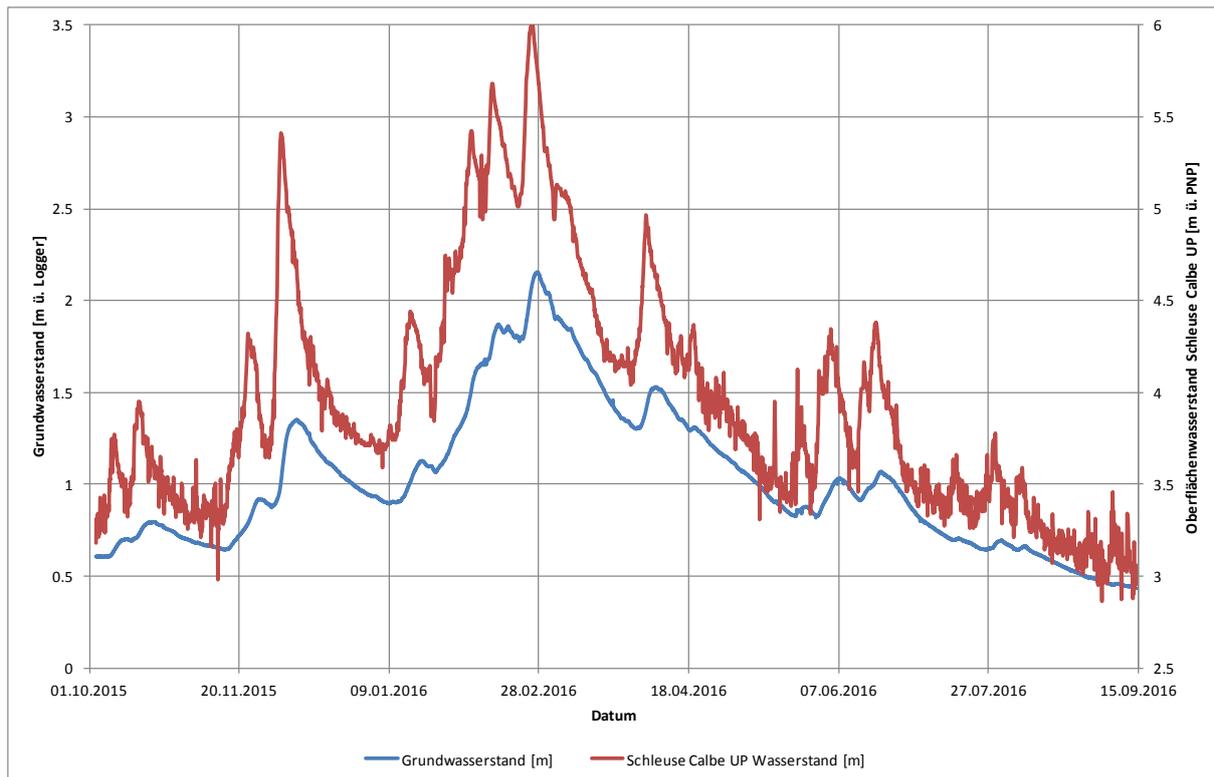


Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände UP Schleuse Calbe mit den Grundwasserständen Kirche Gottesgnaden (Skalierung zur besseren Vergleichbarkeit angepasst)

Die Zeitverschiebung zwischen den Oberflächenwasserständen und den Grundwasserständen konnte zur Identifikation der hydraulischen Leitfähigkeit und der Transmissivität genutzt werden.

3 Auswertung der Messergebnisse

Zur Auswertung der Messergebnisse wurden mehrere Verfahren eingesetzt: Das Bohrgut wurde in Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit ausgewertet, die Druckverhältnisse im Grundwasser gaben Anhaltspunkte über den Speicherkoeffizienten und die Grundwasser- und Oberflächenwasserganglinie konnten zur genaueren Eingrenzung der hydraulischen Durchlässigkeit eingesetzt werden. In Gottesgnaden wurden weder Kurzzeit-Pumpversuche noch Slug&Bail-Tests durchgeführt.

3.1 Bohrgutansprache

Der bedeckende Grundwassergeringleiter wird als sehr gering durchlässig mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von etwa 10^{-7} m/s angesehen. Der darunter liegende Grundwasserleiter besteht aus Feinsanden, die k_f -Werte im Bereich 10^{-4} m/s aufweisen.

3.2 Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten

Der Grundwasserleiter steht deutlich unter Druck (gespannte Verhältnisse), wobei natürlich die Drücke abhängig vom nahegelegenen Schleusengraben dominiert werden. Die schnelle Reaktion zwischen Oberflächen- und Grundwasserspiegel zeigt zudem an, dass die Speicherkoeffizienten sehr gering sind. Üblicherweise liegen die Speicherkoeffizienten hier bei $3 \cdot 10^{-3}$.

3.3 Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität

Die hydraulische Durchlässigkeit sowie die Transmissivität wurden über die Auswertung der Ganglinien von Grund- und Oberflächenwasser großräumig bestimmt. Dies ermöglicht eine wesentlich weitreichendere Parameteridentifikation als die Kurzzeit-Pumpversuche oder die Slug&Bail-Tests.

Hydraulische Durchlässigkeit: $5,6 \cdot 10^{-5}$ m/s

Transmissivität: $1,8 \cdot 10^{-4}$ m²/s

Die Ergebnisse liegen im Bereich der Bohrgutansprache und sind daher als plausibel einzuschätzen.

4 Modellierungswerkzeuge

Die Erstellung der drei beschriebenen Modelle wurde mit zwei unterschiedlichen Werkzeugen durchgeführt: Die dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung und das zweidimensionale Modell mit ungesättigter Zone wurde in Feflow(R) umgesetzt, die eindimensionale Modellierung der ungesättigten Zone einschließlich Szenarien mit Hilfe von Hydrus1D.

4.1 Feflow(R)

Das Werkzeug Feflow(R) (Diersch 2014) ist ein universelles Werkzeug zur Modellierung der Grundwasserströmung und des Transports von gelösten Stoffen im Grundwasser. Auf die Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden. Das Werkzeug ist in vielen Projekten weltweit getestet worden und wird vom Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie seit Jahrzehnten für ähnlich gelagerte Fragestellungen eingesetzt. Leider ist das Werkzeug nicht OpenSource, so dass die erstellten Modell nur mit vorhandener Lizenz verarbeitet werden können.

4.2 Hydrus1D

Das Werkzeug Hydrus1D (Simunek 2012) ist ein OpenSource-Werkzeug zur Modellierung von Strömung und Transport in der ungesättigten Zone. Auch hier soll auf die Grundlagen nicht weiter eingegangen werden. Auch dieses Werkzeug wird weltweit (und auch im Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie) seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt.

5 Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung

5.1 Randbedingungen

Die hydrologischen Randbedingungen für dieses kleine Grundwassermodell sind schnell beschrieben: Die Insel wird umgeben von Saale und Schleusengraben, die als Dirichlet-Randbedingungen ins Modell übernommen werden. Eine generische Wasserstandsganglinie dient der Ermittlung der Grundwasserdruckspiegel, wie sie im Hochwasserfall Anfang Juni 2013 geherrscht haben. Da keine Informationen über Brunnen vorliegen und die gemessene Grundwasserganglinie keine Einflüsse von Grundwasserentnahmen zeigt, wurden keine weiteren Randbedingungen festgelegt.

5.2 Parameter

Die hydrogeologischen Parameter sind ebenfalls recht leicht zu beschreiben. Das HK50 weist nur einen Grundwasserleiter aus, der von den Bohrungen auf dem Kirchengelände in einer Tiefe von etwa 4,50 m erfasst wurde. Die Mächtigkeit wird mit 5-10 m angegeben, was plausibel ist, aber im Rahmen der Untersuchungen nicht verifiziert werden konnte. Weiterhin gibt das HK50 eine Durchlässigkeit von etwa $1 \cdot 10^{-3}$ m/s an, was durch die Bohransprachen des oberen Teils des Grundwasserleiters sowie über die Ganglinienauswertung korrigiert werden musste. Als Speicherkoeffizient wurde $3 \cdot 10^{-3}$ angenommen.

5.3 Kalibrierung

Aufgrund der detaillierten Grundwasser- und Oberflächenwasserstandsmessungen konnte das Modell gut kalibriert werden. Es wurde der gesamte Zeitabschnitt Oktober 2015 bis Oktober 2016 kalibriert, um eine solide Grundlage für die Szenarienberechnung im Hochwasserfall zu gewinnen. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung für einen mittleren Wasserstand (Median) sowie die Grundwasserdruckspiegel für das Hochwasser Anfang Juni 2013. Die Grundwasserganglinien der Messungen und des kalibrierten Modells sind in Abbildung 5 zum Vergleich einander gegenübergestellt. Hierzu ist anzumerken, dass keinerlei Wetterdaten mit eingeflossen sind, die sich zusätzlich zu den Oberflächenwasserständen auf die Dynamik auswirken. Der Einfluss wird aufgrund der ansonsten deutlich wiedergegebenen Wasserstandsganglinie vernachlässigt.

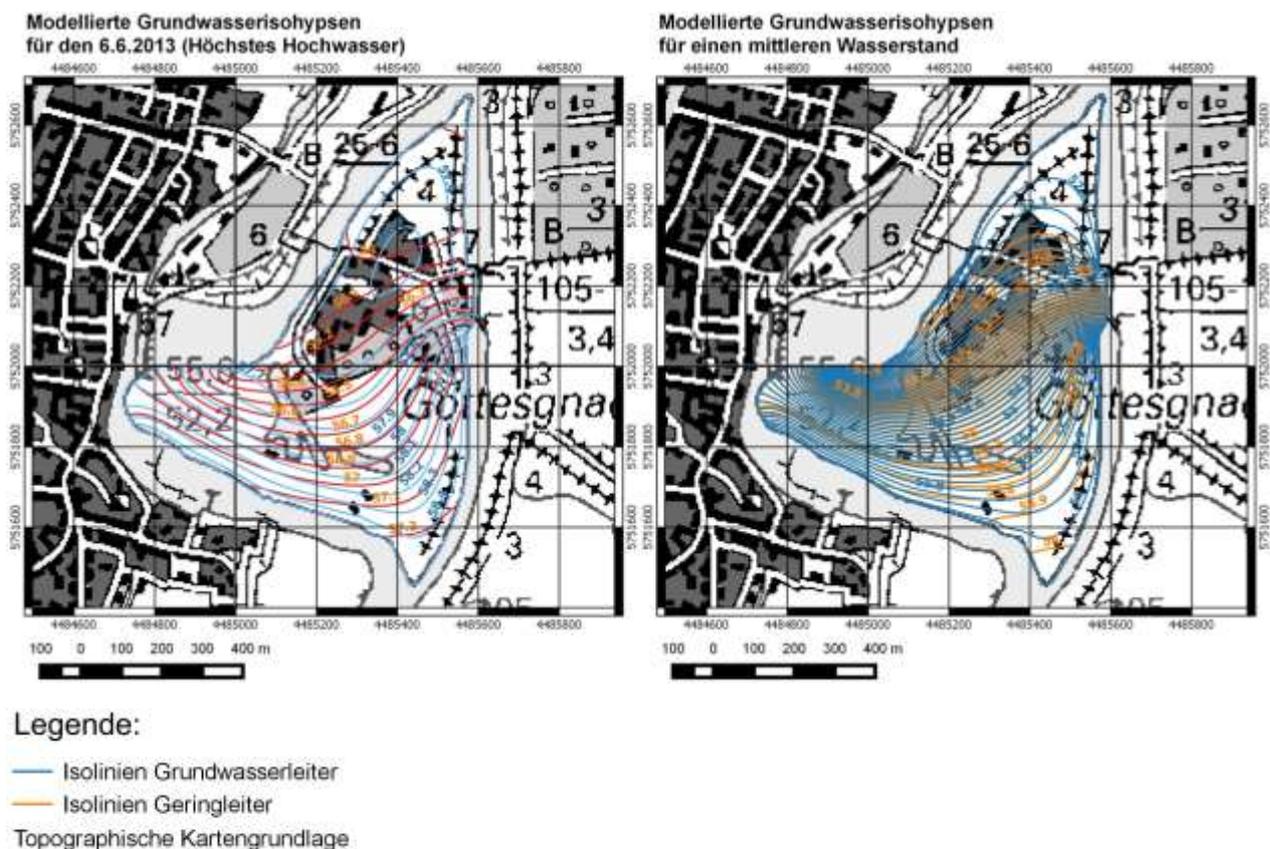


Abbildung 4: Grundwassergleichen des Grundwasserleiters und darüber liegenden Geringleiters mit Mittelwasserstand (Median) und Hochwasserstand Juni 2013.

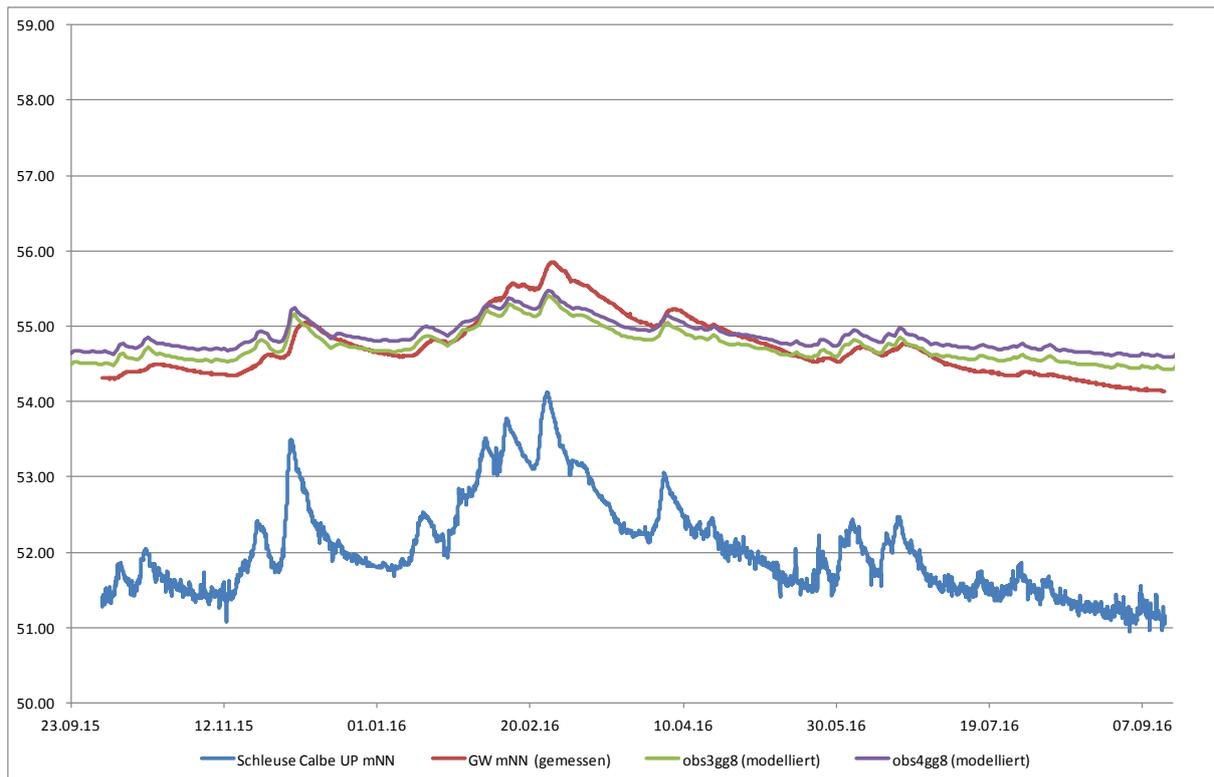


Abbildung 5: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy Calbe 1/15

5.4 Szenarien

Das wichtigste Szenario war der Hochwasserfall Juni 2013, für den auch die Messwerte für die Randbedingungen vorlagen. Hieraus ergibt sich, dass der Grundwasserdruckspiegel nur wenige cm unter Flur lag. Dieser Druckspiegel stellt durch die Bedeckung des Grundwasserleiters in Form der etwa 4,5 m mächtigen Schluff- und Tonschicht nicht die Grundwasseroberfläche dar, die weiterhin in einer Tiefe von etwa 4,5 m liegt. Dennoch führt die starke Druckspannung zu einem verstärkten kapillaren Aufstieg. Eine Absenkung des Druckspiegels durch aktive Maßnahmen im Hochwasserfall ist zwar aufgrund der starken Spannung unmittelbar wirksam und es werden größere Absenktrichter als im ungespannten Fall erzeugt. Dennoch ist es fraglich, ob solche Maßnahmen hier erfolgreich eingesetzt werden können, denn die abgepumpten Wassermengen müssen entsorgt werden.

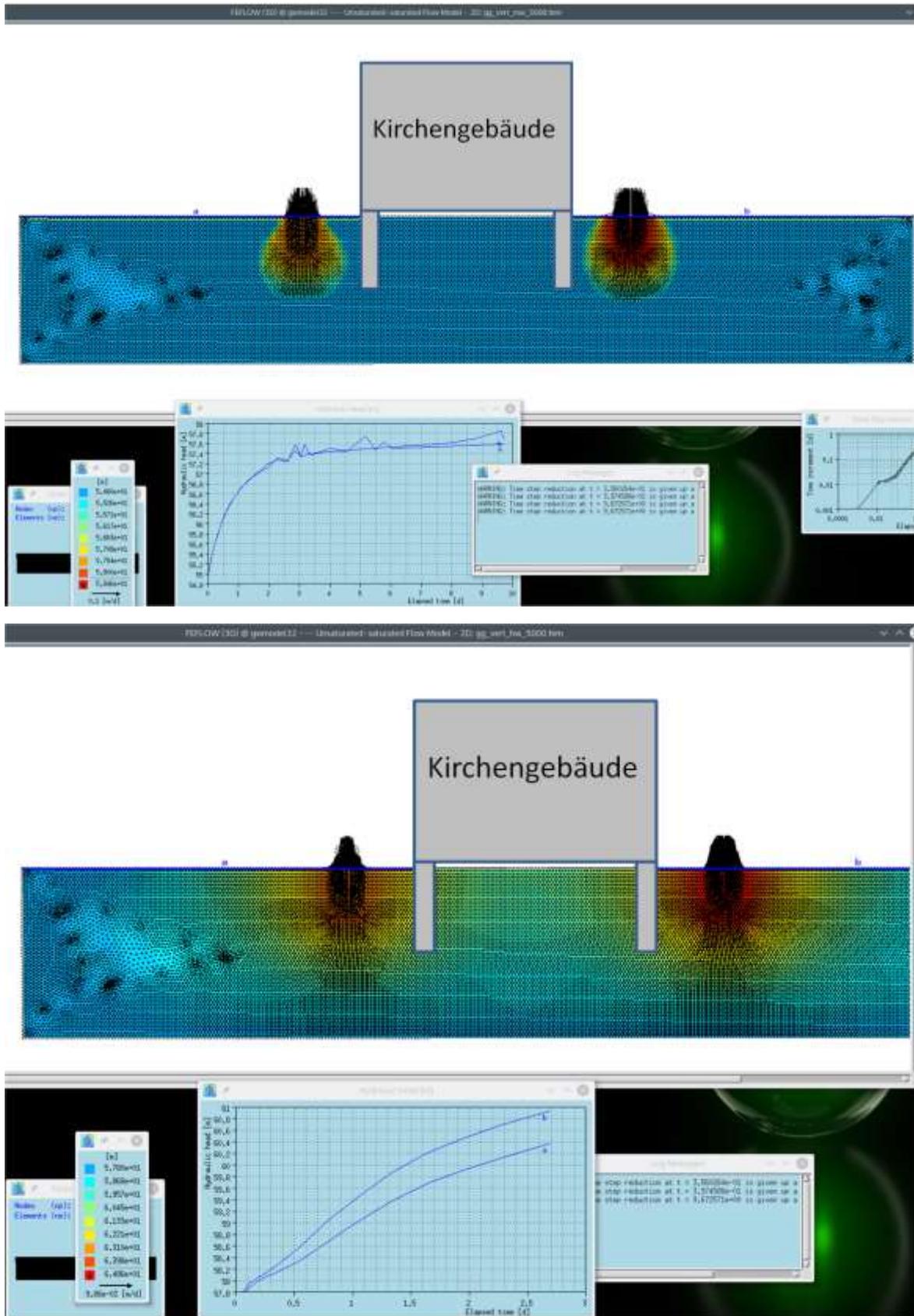


Abbildung 6: Modellerte Wasserdrücke im Falle eines Starkregens bei Mittelwasser (oben) und Hochwasser (unten) in der ungesättigten Zone

6 Zweidimensionale Modellierung als Profilschnitt mit ungesättigter Zone

6.1 Randbedingungen

Der Modellausschnitt wurde hier so gewählt, dass er durch die hydrologischen Randbedingungen des Schleusengrabens und der Saale unterhalb des Wehres Calbe begrenzt wird. Beide Randbedingungen wurden gleichläufig nur für den Grundwasserleiter gesetzt.

6.2 Parameter

Für die Berechnungen der ungesättigten Zone sind eine Reihe von Parametern zu setzen, die aus den Standard-Parametersätzen des Modellierungswerkzeugs generiert wurden. Gleichzeitig erfolgte ein Abgleich mit den Werten im Modellierungswerkzeug Hydrus1D.

6.3 Plausibilitätsprüfung

Eine detaillierte Kalibrierung des Modells konnte nicht durchgeführt werden, da dies eine lange Zeitreihe von einer Vielzahl bodenkundlicher Messgrößen erfordert hätte. Der Einbau von TDR-Sonden zur Messung der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen einschl. Datenloggern zur Erfassung der zeitlichen Variabilität war finanziell und organisatorisch (Überwachung der Messeinrichtungen) aus dem Projekt heraus nicht leistbar. Das Modell wurde daher nur auf Plausibilität geprüft.

6.4 Szenarien

Das Modell wurde genutzt, um die Wirkung der beiden Rigolen bei einem Starkregen zu prüfen. Hierbei zeigt sich, dass der erhöhte Wasseranfall in den Rigolen sich nach zwei bis drei Tagen auf das Mauerwerk der Kirche so auswirkt, dass es bis in Oberflächennähe nass wird. im Hochwasserfall ist der Wasserdruck so hoch, dass massive Schäden auch für den Fußboden im Kircheninneren befürchtet werden müssen. Beide Strömungszustände (Mittelwasser und Hochwasser) sind in dargestellt.

7 Eindimensionale Modellierung des Bodenwasserhaushalts, ungesättigte Zone

7.1 Randbedingungen

Es wurde lediglich an der Modellbasis die Randbedingung aus dem dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodell übernommen. Da die Grundwasserneubildung nur eine sehr untergeordnete Rolle spielt wurde sie nicht modelliert. Für eine Simulation der Mulden-Rigolenversickerung von Niederschlagswasser kann das Modell um die entsprechenden Randbedingungen erweitert werden. Der Aufwand richtet sich nach den Anforderungen der zeitlichen Auflösung.

7.2 Parameter

Auch bei den eindimensionalen Modellierungen mit Hydrus1D wurden die Standardparameter für die verschiedenen Bodenschichten entsprechen dem Bodenaufbau

dem Softwarewerkzeug entnommen. In Hydrus1D sind jedoch wesentlich mehr Parameter zu setzen als in Feflow(R), was aber nach einem kurzen Literaturvergleich und aufgrund der guten Erfahrungen in vergangenen Projekten problemlos machbar war. In Abbildung 7 sind die Parameterbereiche dargestellt, wie sie sich aus dem Bohrunterlagen und Kartenwerken ergeben.

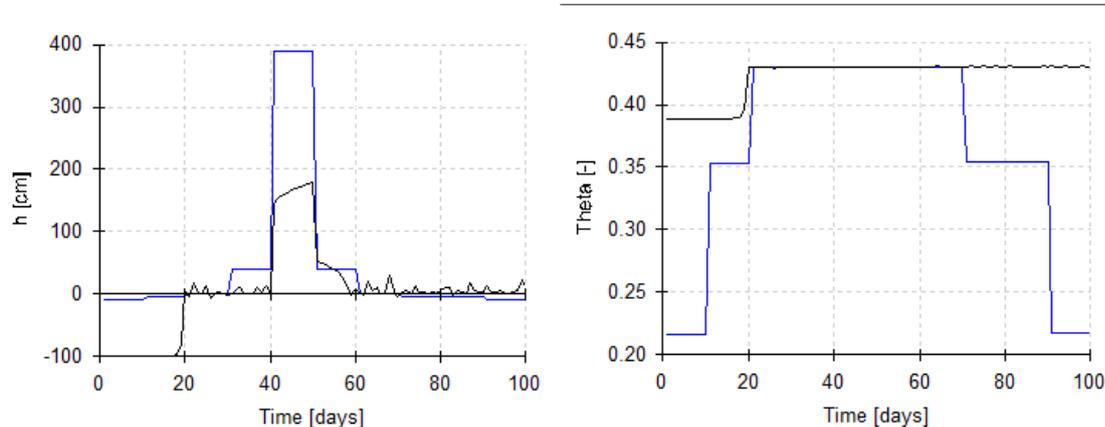


Abbildung 7: Berechnete Druckspiegel (links) und Wassergehalt (rechts) für einen Beobachtungspunkt in Höhe der Oberfläche des Grundwasserleiters (blau) und in Höhe der Fundamentsohle (schwarz) im eindimensionalen vertikalen Modell.

7.3 Plausibilitätsprüfung

Da auch für die eindimensionale Modellierung Messungen vor Ort fehlen, wurden auch bei diesem Modell lediglich Plausibilitätsprüfungen durchgeführt.

7.4 Szenarien

Das Modell eignet sich gut für die Ausarbeitung verschiedener Szenarien. Die Wirkung kapillarbrechender Schichten kann genauso untersucht werden wie die Reduktion des Grundwasserdruckspiegels. Ein weiteres Szenario ist die Pflanzung mehrjähriger immergrüner Pflanzen.

8 Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse

8.1 Aktive Grundwasserbeeinflussungen

Der Einbau einer Pumpe wäre technisch ohne Probleme machbar. Mit dem Brunnen an der Apsis der Kirche wäre ein großkalibrier Grundwasseraufschluss vorhanden, dessen Absenkungstrichter auch die gesamte Kirche umfassen könnte. Die Entnahmemengen müssten jedoch im Bereich einiger 10er m^3/h liegen, so dass sich die Frage nach der Entsorgung des geförderten Wassers stellt. Gleichzeitig ist der Grundwasserzustrom aus dem Schleusenkanal sehr hoch, was wiederum erhöhte Anforderungen an die Pumpenleistung stellen würde. Im Baugrundgutachten des Baugrundbüros HKW werden die bindigen Schichten als ein möglicher Grund für die Setzungen des Turms ausgewiesen. Die Problematik bindiger Schichten im Untergrund wird durch starke Grundwasserspannungen des darunter befindlichen Grundwasserleiters noch verstärkt, so dass auch die ingenieurgeologische Situation für eine Regulierung bei einem solch hohen Hochwasser wie im Juni 2013 spricht. Diese Fragestellung, die nicht im Forschungsprojekt vereinbart war,

wird von der MLU in künftigen Abschlussarbeiten bearbeitet werden, kann aber zum jetzigen Zeitpunkt nur angerissen werden.

8.2 Passive Maßnahmen

Aus der eindimensionalen Modellierung ergibt sich, dass die kapillarbrechende Schicht eine deutliche Verbesserung der Situation am Kirchenboden ergeben würde. Gerade die wahrscheinlich vorhandene gestampfte Lehmschicht wirkt kontraproduktiv und führt bei den hohen Grundwasserdruckspiegeln im Hochwasserfall zu deutlichem Wasserandrang.

An den Seiten des Kirchenschiffs würden wahrscheinlich ähnliche Maßnahmen sehr wirksam eingesetzt werden können. Den Einbau einer entsprechenden Schicht könnte man mit einer Drainage und/oder Horizontalsperre verbessern, wobei Letzteres durch das IDK geprüft werden muss, da hierzu keine Modellierungen durchgeführt werden können. Die Drainage ist keine unbedingt notwendige Maßnahme, denn es muss nicht mit einem mengenmäßig großen Wasserandrang gerechnet werden sondern mit einem sehr lang andauernden.

Die Nutzung von Pflanzen wäre ebenfalls in Erwägung zu ziehen. Es sollten immergrüne Pflanzen sein, damit auch im Winter Wasser verdunstet wird, und die Pflanzen sollten so dicht sein, dass die dahinter liegende Wand auch vor Niederschlagswasser geschützt wird. Näheres müssen spezialisierte Gartenbaubetriebe festlegen.

Das bereits angelegte Mulden-Rigolen-System ist leider recht nah an der Kirche positioniert worden. Die Begründungen hierfür sind selbstverständlich einsichtig (Friedhof), aber zum Schutz der Kirche vor Nässe bedarf es hier noch einer Verbesserung. Die Empfehlungen des Arbeitsblatts der DWA zur dezentralen Regenwasserentsorgung (Arbeitsblatt DWA A 138) wurde bei der Planung und Bauausführung nicht berücksichtigt, sollte bei weiteren Baumaßnahmen zur Regenwasserentsorgung und bei den Vorsorgemaßnahmen für den Hochwasserfall im hier skizzierten Ausmaß angewandt werden. Es wäre unbedingt sinnvoll, die Rigole mit einem Brunnen auszustatten, der im Bedarfsfall Wasser von der Kirche weg transportiert.

9 Zusammenfassung

Für die Aufgabenstellung einer weitgehenden Trockenlegung der Kirche "Gottesgnaden" bei Calbe und die Abschätzung von Folgen eines nochmaligen Hochwassers im Ausmaß des Flutereignisses 2013 haben sich die Modellierungen bewährt. Die Grundwasserstände können in ihrer Dynamik abgebildet und Szenarien für präventive Maßnahmen und Sanierungen getestet werden.

Auf der Grundlage der Modellergebnisse sind einzelne passive und aktive Maßnahmen bewertet worden. Es zeigt sich, dass die passiven Maßnahmen deutlich bessere Wirkungen erzielen können als aktive Maßnahmen zur Grundwasserhaltung. Der Einbau kapillarbrechender Schichten führt bei den mächtigen bindigen Böden vor Ort zu einer wirksamen Unterbrechung des kapillaren Wasserflusses. Eine Reduzierung des Grundwasserdruckspiegels durch aktive Grundwasserentnahmen könnte dagegen nur zu einer temporären Entspannung der Situation beitragen.

Hinweise zum Notfallplan

Die Hinweise beziehen sich ausschließlich auf den Hochwasserfall ohne direkten Oberflächenwasserzutritt (z.B. durch Deichbruch).

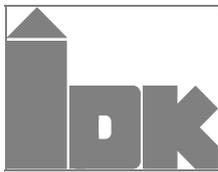
Die längs des Kirchenschiffs (nördlich und südlich) der Kirche Gottesgnaden eingebauten Rigolen können im Hochwasserfall zu einer Absenkung des Druckspiegels verwendet werden, auch, wenn sie nicht in den Grundwasserleiter direkt eingreifen. Dies führt zu einer leichten Entspannung (der gespannten Druckverhältnisse).

Im Falle ohne Regenwasseranfall wird hier bereits mit kleinen Saugpumpen (ca. 2 m³/h) der Wasserandrang an die Fundamente und Mauern so reduziert sein, dass es zu keinen Schäden kommt.

Die hohen Wasserdrücke im Grundwasser führen wahrscheinlich auch zu einer Dekonsolidierung der mächtigen Auelehm- und -tonschichten, was lediglich durch aktive Reduzierung des Wasserdrucks im tief liegenden Grundwasserleiter verhindert werden kann.

Zur Reduzierung des Wasserdrucks im Grundwasserleiter kann durch eine Pumpe im vorhandenen Friedhofsbrunnen eine Wasserentnahme in der Größenordnung von etwa 20 m³/h vorgesehen werden. Das Wasser ist in den Graben östlich der Kirche abzuführen, der in das Unterwasser des Schleusenkanals mündet.

Die Reaktionszeit auf einen Hochwasserstand > 750 cm (Schleuse Calbe UP, Elektronischer Wasserstrassen Informationsservice elwis) beträgt aufgrund der hohen Durchlässigkeit der Grundwasserleiter und der geringen Entfernung zum Schleusenkanal nur max. 5 Stunden. Nach Rückgang des Hochwassers auf unter 750 cm braucht die Pumpe nur max. 12 Stunden weiter betrieben zu werden.



Bericht HAL 72/2017

Grundwasserprojekt (DBU)

Ostrau, Kirche

Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht

Beauftragt durch: Evangelisches Kirchspiel Reuden
Leipziger Straße 32
06729 Elsteraue

Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Anzahl der Seiten: 20

Anlage: Abschlussbericht der Hydrogeologischen Untersuchungen
„Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche
Ostrau“, GOSSEL (2017) vom 25.08.2017

Halle, 11.12.2017

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351-48435-100

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax.: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 203 140 15097

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Voruntersuchungen (Bericht HAL 15/2016 (MEINHARDT, 2016)).....	4
2.1	Einleitung	4
2.2	Probenahme.....	4
2.3	Methodik.....	9
2.4	Ergebnisse	10
2.4.1	Quantitative Salzanalyse.....	10
2.4.2	Feuchtebestimmung.....	12
2.4.3	Empfehlungen	14
3	Aktualisierte Empfehlungen nach Bauberatung, 02.03.2017 vor Ort (Protokoll vom 07.03.2017).....	16
4	Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 73/2017, KALISCH, 2017, siehe Anlage) .	17
5	Bericht zu den hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2017).....	18
5.1	Empfehlung auf Basis der Modellergebnisse	18
5.2	Zusammenfassung (Auszug)	18
5.3	Hinweise zum Notfallplan (Auszug).....	19
6	Literatur	20



Abb.: Ostrau, Kirche, Innenbereich

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasserprojekt“, wurden folgende Untersuchungsberichte und Maßnahmenempfehlungen erarbeitet und vorgelegt.

- Voruntersuchungen: Erfassung der Feuchte- und Salzbelastung im Mauerwerk, Mörtelanalysen, Empfehlungen zum baulichen Vorgehen, Bericht HAL 15/2016, MEINHARDT, 2016
-
- Zum Projekttreffen am 24.11.2016 konnten die bisherigen Empfehlungen aktualisiert und präzisiert werden.
-
- Bewertung der Maßnahmen im Rahmen des Projektabschlusstreffens am 02.03.2017 in Ostrau, Protokoll vom 07.03.2017
-
- Raumklimateaufzeichnungen im Zeitraum 10.02.2016 bis 06.12.2017 und Empfehlungen, Bericht HAL 73/2017, KALISCH, U. (2017)
-
- Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen, Empfehlungen (GOSSEL, 2017)
-

Der vorliegende Abschlussbericht zitiert die im Projektzeitraum entstandenen Einzelberichte und zeigt an Hand dieser eine Entwicklung auf. Die Einzelergebnisse aus den Gliederungspunkten sind Grundlage der Handlungsempfehlung.

2 Voruntersuchungen (Bericht HAL 15/2016 (MEINHARDT, 2016))

2.1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes der DBU „Grundwasser“ sind zur Erfassung der aktuellen Feuchte- und auch Salzbelastung des Mauerwerkes Tiefenprofile zur Bohrmehlentnahme angelegt worden. Die Messungen sind auch im Zusammenhang mit den hydrologischen Untersuchungen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zu sehen. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen dienen einerseits als Bewertungsgrundlage für die Maßnahmen, die ggf. im Versuch an den Objekten zur Optimierung der Trocknung durchgeführt werden sollen, und um den tatsächlichen Einfluss des Grundwassers (Grundwassermessstellen Hydrogeologie) auf das Mauerwerk und das Raumklima, das ebenfalls erfasst wird, zu eruieren. In dem Zusammenhang stehen auch die Messungen der Holzfeuchte. In der Kirche in Ostrau steht darüber hinaus auch der Umgang mit zwei Epitaphen im Fokus der Handlungsempfehlungen.



Abb. 1: Kirche in Ostrau, Innenraum: Rechts und links sind die Holzeinbauten für die Sitzplätze zu erkennen, an denen u.a. Holzfeuchtemessungen ausgeführt worden sind.

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am 14. Juli 2015. Insgesamt sind dabei 5 Tiefenprofile angelegt worden (siehe Abb. 2-5). In Tabelle 1 sind die entnommenen Proben charakterisiert bzw. verortet.



Abb. 2: Tiefenprofile 1 und 2 an der Südseite des Kirchschiffs



Abb. 3: Tiefenprofil 3 an der Südseite
des Kirchenschiffs, außen, als
Weiterführung von TP 1



Abb. 4: Tiefenprofil 4 an der
Nordseite, innen, Turmbereich, links
neben dem Epitaph



Abb. 5: Tiefenprofil 5 an der
Ostwand, links neben dem Epitaph

Das Innen- und Außenniveau der Kirche ist annähernd gleich. Es besteht demnach nicht die Gefahr des Feuchteintrages durch außen anstehendes Erdreich. Die Putzschäden im Kirchenschiff sind an der Südseite stärker und reichen bis in ca. 30 cm Höhe. Auf der Nordseite sind sie weniger stark ausgeprägt. Eine Ausnahme bildet die nordwestliche Ecke, wo die Schäden bis über einen Meter Höhe reichen. Auch die Pfeiler am Übergang vom Kirchenschiff in den Turmbereich weisen beidseitig Putzschäden bis in 40-50 cm Höhe auf. Östlich dieses Pfeilers auf der Nordseite des Turmes (innen) befindet sich das Epitaph, neben dem TP 4 angelegt worden ist. Dessen rückwärtige Steinplatte ist im Mauerwerk eingelassen, wodurch eine direkte Verbindung zur dort anliegenden Feuchte und den darin gelösten Substanzen besteht. Die Sicherung dieses Epitaphs liegt im Fokus der Gemeinde. Im dahinterliegenden Mauerwerk verläuft ein von

außen deutlich wahrnehmbarer Riss, über den die Einleitung von Feuchte in das Mauerwerk sehr wahrscheinlich ist (siehe Abb. 6).



Abb. 6: Epitaph und Riss im angrenzenden Außenmauerwerk des Turmes.

Dort sind bereits bei der Probenahme durch das IDK ältere Probenahmestellen zu erkennen gewesen. Die Ergebnisse liegen dem IDK nicht vor. Entsprechendes gilt für das Epitaph an der Ostwand.

Auch an der Ostwand der Kirche ist ein Epitaph in die Wand eingelassen, das in Bereichen durch eine massive Salzbelastung und entsprechende Schäden charakterisiert ist (siehe Abb. 7). Auch dieses Epitaph soll gesichert und restauriert werden. Die Ausblühungen sind beprobt worden (siehe Abb. 7, rechts), um sie einer Röntgenanalyse zuzuführen.



Abb. 7: Epitaph an der Ostwand der Kirche (Turm) mit massiven Salzkrusten im oberen Bereich (Probenahme)

Tab. 1: Verzeichnis der Bohrmehlproben der Tiefenprofile 1-5 (Die Tiefenprofile wurden in Fugen angelegt.)

Probe	Entnahmetiefe	Lokalisierung und Anmerkungen
OST_K_TP1		Südwand (Wandstärke ca. 90 cm), 10 cm über Holzfußboden
OST_K_TP1/1	0-2	Putz
OST_K_TP1/2	2-5	
OST_K_TP1/3	5-10	
OST_K_TP1/4	10-20	
OST_K_TP1/5	20-30	
OST_K_TP1/6	30-35	
OST_K_TP2		Südwand, 55 cm über Holzfußboden, über TP 1
OST_K_TP2/1	0-2	Putz
OST_K_TP2/2	2-5	
OST_K_TP2/3	5-10	
OST_K_TP2/4	10-20	
OST_K_TP2/5	20-30	
OST_K_TP2/6	30-35	
OST_K_TP3		Südwand außen (Wandstärke ca. 90 cm), bodennah, Weiterführung TP 1
OST_K_TP3/1	0-2	
OST_K_TP3/2	2-5	
OST_K_TP3/3	5-10	
OST_K_TP3/4	10-20	
OST_K_TP3/5	20-30	
OST_K_TP3/6	30-40	
OST_K_TP4		Nordwand, innen, Turmbereich, links neben dem Sockel des Epitaphs
OST_K_TP4/1	0-2	Putz
OST_K_TP4/2	2-5	
OST_K_TP4/3	5-10	
OST_K_TP4/4	10-20	
OST_K_TP4/5	20-25	kein tieferes Bohren möglich, feucht, aber durch Bohrprozess getrocknet
OST_K_TP5		Ostwand, innen, links neben dem Epitaph, bodennah
OST_K_TP5/1	0-2	Putz
OST_K_TP5/2	2-5	
OST_K_TP5/3	5-10	
OST_K_TP5/4	10-20	mit Hohlräumen, > 20 cm Stein, trocken

Der Fußbodenaufbau zeigt keinen Sand oder Lockermaterial (kapillarbrechend), sondern festen Mörtel. Zusätzlich zur Probenahme wurde an verschiedenen Stellen auch die Holzfeuchte gemessen. Ein Messpunkt liegt an einem Holzbalken im Boden, im Bereich des Turmes, an der Trennwand zu dem kleinen Raum im Osten, und ein anderer Messbereich im Holzboden des seitlichen Gestühls (Südseite) (siehe Abb. 8).



Abb. 8: Messstellen der Holzfeuchte

Es wurde das Klimadatenlogger R 16 an der südlichen Empore installiert (siehe Abb. 9).



Abb. 9: Position des Klimadatenloggers an der südlichen Empore

Im Eingangsbereich der Kirche sind zwei weitere Epitaphe z.T. direkt in das Mauerwerk eingelassen (siehe Abb. 10). Sie weisen deutliche Schäden auf und sollen im Zusammenhang mit den Maßnahmen in der Kirche auch gesichert werden.



Abb. 10: Epitaphe im Vorraum, die aufgrund des festen Verbundes zu den Wandflächen Schäden aufweisen bzw. gefährdet sind.

2.3 Methodik

Quantitative Salzanalyse

Aus den Proben werden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgt eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial. Von den Extrakten wird mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sensi-on 2.

Die Analysenergebnisse der Salzuntersuchungen werden in M.-% angegeben und bewertet. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus der Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

Feuchtebestimmung mit der Darmmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der Bohrmehlproben wird durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt.

Holzfeuchtemessungen

Die Holzfeuchte wurde mit dem Messgerät hygrottest 6500 von testo ermittelt. Das Messprinzip beruht auf der elektrischen Leitfähigkeit. Die elektrische Leitfähigkeit eines feuchten Stoffes ist abhängig vom Wassergehalt und von der Art des Stoffes. Aus diesem Grund ist es für die Einstellungen am Gerät wichtig, die vorliegende Holzart richtig zu bestimmen. Es wurde sowohl mit Einstellung 3 und auch mit 4 gemessen, da nicht genau festgestellt werden konnte, um welche Holzart es sich handelt. Aus diesem Grund sind in der Tabelle 5 jeweils zwei Messwerte angegeben. Es besteht auch eine geringe Abhängigkeit der Messung von der Stofftemperatur. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die elektrische Leitfähigkeit zu. Die Messungen wurden mit der Stechsonde durchgeführt (siehe Abb. 8).

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Quantitative Salzanalyse

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von einigen der Bohrmehlproben eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle (3) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (2) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 2: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	Gering			mittel			hoch		
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5- 1,5	0,1- 0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1- 0,3	0,05- 0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
Chlorid [M.-%]	< 0,008	<0,2	<0,05	>0,008 <0,026	0,2- 0,5	0,05- 0,5	>0,026 <0,08	>0,5	>0,5	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben des Tiefenprofils (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entsprechend Tabelle 2.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Salzanalysen dargestellt. Da der Fokus des Projektes vor allem auch der Feuchtebelastung liegt, sind nicht alle Proben der Salzanalyse zugeführt worden sind. Von den Proben, an denen die Summe der löslichen Bestandteile ermittelt worden sind, sind nur an ausgewählten Einzelanalysen der Ionen erfolgt. Die höchsten Belastungen liegen erwartungsgemäß im Putz. Eine Abnahme des Putzes führt daher zu einer massiven Reduktion der vorhandenen Salze. TP 1 an der Südwand (innen, bodennah) weist oberflächennah eine hohe Sulfatbelastung auf. Ansonsten ist die Probe unkritisch. Wie an der Entwicklung der löslichen Bestandteile hin zu größeren Tiefen erkennen kann, reduziert sich die Belastung erheblich. Entsprechendes gilt auch für das Profil TP 2. Allerdings weist der Putz hier nur einen ganz geringen Sulfatgehalt auf. TP 3 wird von außen TP 1, in entsprechender Höhe, entgegengeführt. Hin zu größeren Tiefen ist der Gehalt an löslichen Bestandteilen gänzlich unkritisch. Oberflächennah (0-5cm) kann eine mittlere Nitratbelastung festgestellt werden. Die Bohrprofile (TP 4 und 5), die benachbart zu den beiden Epitaphen im Turm angelegt wurden, weisen keine kritische Salzbelastung auf.

Die Analyse der Ausblühprobe ergab im Wesentlichen das bauschädliche Salz Magnesiumsulfat (Epsomit). Darüber hinaus sind Ca-Mg-Karbonat und Calciumkarbonat ermittelt worden (siehe Abb. 11).

Tab. 3: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben der Tiefenprofile TP 1-5

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
OST_K_TP1/1	3,93	0,091	0,394	0,048	0,034	1,542	0,072	0,078
OST_K_TP1/2	0,16	0,045	0,025	0,009	<0,005	0,015	<0,01	<0,01
OST_K_TP1/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP1/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP1/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP1/6	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP2/1	0,90	0,137	0,038	0,060	0,012	0,383	0,062	0,034
OST_K_TP2/2	0,21	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP2/3	0,22	0,055	0,010	0,022	<0,005	0,050	0,014	0,011
OST_K_TP2/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP2/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP2/6	0,15	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP3/1	0,93	0,070	0,040	0,015	0,069	0,295	0,037	0,163
OST_K_TP3/2	1,87	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP3/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP3/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP3/5	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP3/6	0,14	0,035	0,030	0,010	<0,005	0,010	<0,01	<0,01
OST_K_TP4/1	0,21	0,030	0,020	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
OST_K_TP4/2	0,22	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP4/3	0,28	0,038	0,030	0,006	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
OST_K_TP4/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP4/5	0,28	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP5/1	0,14	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP5/2	<0,12	0,045	0,015	<0,005	<0,005	<0,01	<0,01	<0,01
OST_K_TP5/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
OST_K_TP5/4	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

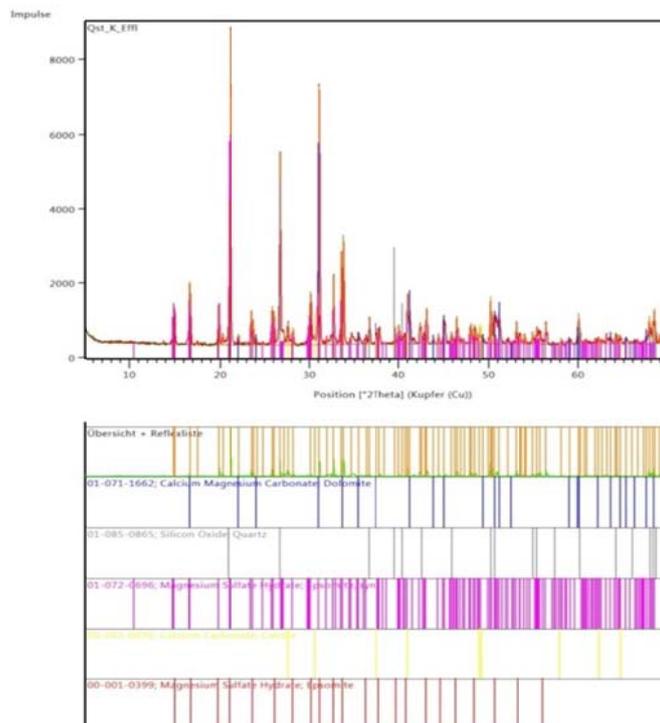


Abb. 11: Ergebnis der RDA-Analyse der Salzkruste am Epitaph an der Ostwand der Kirche (Turm)

2.4.2 Feuchtebestimmung

In der nachfolgenden Tabelle (4) sind die Ergebnisse der Darrfeuchtebestimmung an den Proben der Tiefenprofile dargestellt. Die farbige Markierung geben eine Orientierung bei der Bewertung des Feuchtegehaltes (ohne Markierung = sehr gering, grün = gering, türkis = mittel, rot = hoch, lila= extrem).

Tab. 4: Feuchtegehalte der Bohrmehlproben [M.-%] der Tiefenprofile 1-5 (Die Putzproben wurden nicht bestimmt.)

Probe	Feuchtegehalt [M.-%]
OST_K_TP1/1	-
OST_K_TP1/2	4,62
OST_K_TP1/3	4,84
OST_K_TP1/4	2,76
OST_K_TP1/5	3,73
OST_K_TP1/6	3,92
OST_K_TP2/1	-
OST_K_TP2/2	1,26
OST_K_TP2/3	1,90
OST_K_TP2/4	2,41
OST_K_TP2/5	2,28
OST_K_TP2/6	2,73
OST_K_TP3/1	-
OST_K_TP3/2	-
OST_K_TP3/3	3,41
OST_K_TP3/4	2,85
OST_K_TP3/5	4,48
OST_K_TP3/6	4,88
OST_K_TP4/1	-
OST_K_TP4/2	9,46
OST_K_TP4/3	13,17
OST_K_TP4/4	8,64
OST_K_TP4/5	9,32
OST_K_TP5/1	-
OST_K_TP5/2	10,25
OST_K_TP5/3	11,78
OST_K_TP5/4	9,70

Bereits auf den ersten Blick wird aus den Ergebnissen in Tabelle 4 deutlich, dass die Darrfeuchten der Messungen des Mauerwerks im südlichen Kirchenschiff einen unkritischen Zustand wiedergeben. Allerdings wurde in TP 1 eine Feuchtelanze eingeführt. Nach ca. einer halben Stunde wurde in dem Bohrloch eine Ausgleichsfeuchte von 99% liegt. Damit liegen hier auch überhygroskopische Verhältnisse vor.

Deutlich anders ist es im Turmbereich, wo jeweils flankierend zu den Epitaphen bodennah Proben angelegt worden sind. Hier ist über die gesamte Tiefe beider Profile eine hohe Mauerwerksfeuchte detektiert worden. Probe 4/5 (20-25 cm Tiefe) ist sicherlich in der Realität noch feuchter, da durch den erschwerten Bohrprozess die Probe eine gewisse Trocknung erfahren hat. Die Fugen im Außenmauerwerk sind z.T. sehr desolat und die Oberfläche ist nur unzureichend durch einen Putz geschützt (unterer Bereich). Wassereintrag ist sehr gut möglich,

noch dazu befördert an der Südseite des Turmes durch den massiven Riss. Darüber hinaus verfügt der Turm über keine Regenrinne. Das ablaufende Wasser läuft entweder an der Fassade ab bzw. trifft es durch den Dachabstand im Umfeld des Turmes auf. Aus der Installation der Grundwassermessstellen ist bekannt, dass in Ostrau Gefahr eines Feuchteintrages in das Mauerwerk durch Schichtenwasser besteht, das auf bindigen und gering wasserdurchlässigen Schichten nach längeren Regenperioden auftreten kann. Die Kirche in Ostrau ist fast vollständig in sandigen und kiesigen Flusssedimenten oder eiszeitlichen Ablagerungen gegründet. Zur Veranschaulichung dessen ist das Bohrprofil von Ostrau dargestellt (siehe Abb. 12). Mit Hinblick auf die hydrogeologischen Verhältnisse ist also davon auszugehen, dass ablaufendes Regenwasser als Schichtenwasser wieder an die Kirche geführt wird. Der Kiessaum um die Kirche ist knapp unterhalb der Oberfläche deutlich feucht und daher in der vorliegenden Form als nicht geeignet zu bewerten.

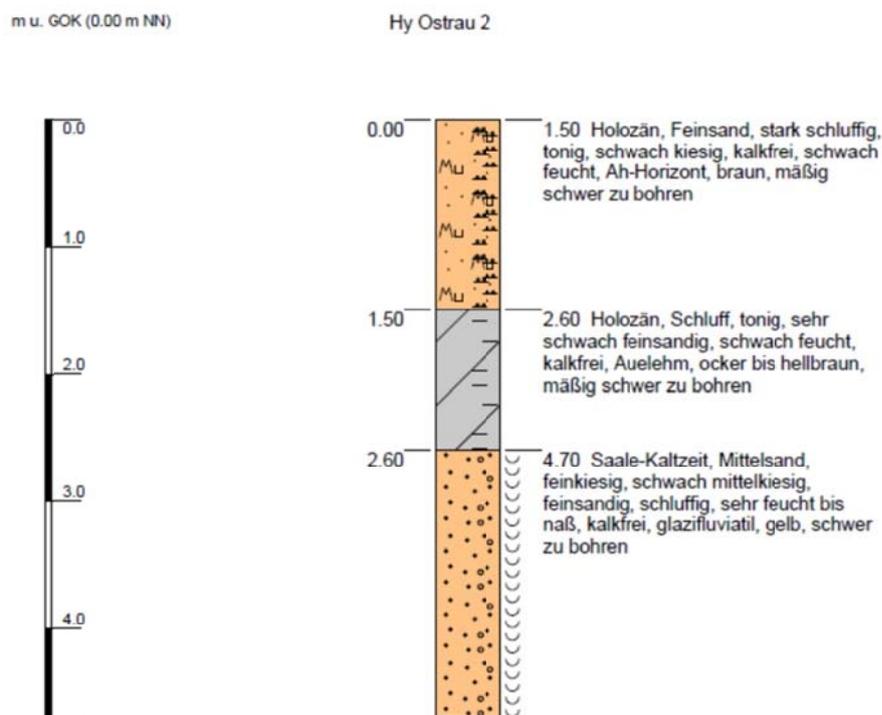


Abb. 12: Bohrprofil am Standort Ostrau, Kirche (MLU Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Fachgruppe Hydrogeologie)

Die Messungen der Holzfeuchte sind in Tabelle 5 verzeichnet.

Tab. 5: Feuchtegehalte im Holz [M.-%] an den beiden Messpunkten

Messpunkt	Feuchtegehalt [M.-%]
Gestühl Südseite Kirchenschiff	16,6 und 19,1
Balken hinter Altar, im Turm	18,7 und 21,6

Es ist geplant, im Rahmen eines Ortstermins im März 2016 das Monitoring der Holzfeuchte fortzuführen.

2.4.3 Empfehlungen

Bisherige Empfehlungen zu den geplanten Maßnahmen an der Winterkirche, die auf Anfrage von Herrn Zitzmann bereits im Vorfeld des Berichts durch das IDK gegeben worden sind:

An der Südwand der Kirche, in dem bodennahen und dem höheren Tiefenprofil, wurden nur geringe Feuchtegehalte ermittelt. Anders verhält es sich auf der Nord- und Ostseite des Turmes aus (Nähe kniender Ritter und Epitaph). Hier sind 10-13 M.-% ermittelt worden, auch bis in 30-40 cm Mauerwerkstiefe. In diesem Zusammenhang sollte unbedingt die Auswertung der Hydrologie abgewartet werden, eh man konkrete Maßnahmen plant. Das betrifft die Mauerwerksarbeiten am Turm, nach denen Sie sich ja in Ihrem Schreiben auch erkundigt hatten. Hinsichtlich der Fensterstürze sehe ich keine Veranlassung zu warten. Diese können gern schon repariert werden. Auch wenn statische Sicherungen der Risse für notwendig erachtet worden sind, dann könnten die auch schon miterledigt werden. Hier zu warten, macht wenig Sinn. Sind die Risse in Ostrau denn schon systematisch beobachtet worden und weiß man, wie sehr bzw. ob sie sich bewegen? Falls dahingehend noch keine Erfassung erfolgt ist, könnten Sie noch einen Rissmessfühler über den Zeitraum der Beobachtung des Grundwassers installieren und sich erst auf dieser Grundlage für eine geeignete Instandsetzungsmaßnahme entscheiden. Wenn sich an den Rissen allerdings länger nichts getan hat, dann wäre eine kraftschlüssige Sicherung sicherlich auch jetzt schon in Ordnung.

Ich nehme an, dass die ermittelten Feuchteverhältnisse der Südwand auch repräsentativ für die Wandflächen der Winterkirche sind. Beim Ortstermin im Juli 2015 sind mir, bis auf das Podest in der Heizungsniße, auch keine besonderen Schadbereiche aufgefallen. Der Putz kann aus meiner Sicht daher entsprechend Ihres Vorschlages ausgeführt werden.

Eine weitere Anfrage durch Herrn Zitzmann bezog sich auf den Umgang mit dem Epitaph an der Ostwand des Chors und denen die im Eingangsbereich der Kirche angebracht sind.

1. Epitaph mit Darstellung eines Geistlichen, Standort : viereckiger gotischer Chor im Osten-Wandinnenseite

Empfehlungen IDK: Das Epitaph muss unbedingt von der Salzfracht befreit werden, die sich aus der direkten Verbauung in der Wand ergibt. Die Salze werden bei Vorhandensein von Feuchtigkeit mobilisiert und sind somit neben dem Einfluss der relativen Luftfeuchte auch im Zusammenhang mit den Flutereignissen zu sehen. Das Epitaph ist auch ohne die Flut von einer Salzlast betroffen. Die Salzreduzierung sollte, vor dem Hintergrund der offensichtlich vorliegenden Belastung, bevorzugt im Wasserbad erfolgen. Das Epitaph sollte aus dem Wandverbund gelöst werden. Auch muss zuvor eine Sicherung der losen Bereiche erfolgen. Hier muss der Restaurator genau sehen, was nötig ist. Durch die Salzreduzierung lösen sich ggf. Bereiche, die eigentlich nur noch durch das Salz miteinander verbunden sind bzw. führt der lange Wasserkontakt im Zusammenhang mit der Salzreduzierung zur Lockerung des Sandsteins. Daher ggf. Vorfestigung. Vor der Wasserbadentsalzung müssen die dicken Salzaufgaben zunächst mechanisch gedünnt bzw. abgenommen werden. Die nachträgliche Restaurierung des Epitaphs sieht sicherlich Schalenhinterfüllungen und eine weitere Festigung vor (Restaurator). Antragungen spielen sicherlich keine Rolle.

2. Epitaph in der Vorhalle Westfassade an der Westwand d. Kirchenschiffes: Hier kann theoretisch auch ein denkmalpflegerischer Mehraufwand begründet werden, insbesondere bei dem linken Epitaph, das ja ins das nördlichen Mauerwerk einbindet. Hier ist es theoretisch im Zusammenhang mit dem Hochwasser oder eben auch mit immer wieder hohem Grundwasser

durch Feuchteinträge zur Salzbefrachtung des Sandsteines gekommen sein. Das möchte man zukünftig unterbinden, so dass das Epitaph aus dem seitlichen Verbund mit dem Mauerwerk zu lösen ist. Vorfestigung des geschädigten Bereiches (Einschätzung Restaurator) und dann Kompressenentsalzung mit anschließender Restaurierung. Ich sehe für beide Epitaphe auch eine Trennung vom Untergrund, um hier eine wiederholende Befeuchtung von unten auszuschließen (Prävention).

Vor dem Hintergrund des postulierten Wassereintrages durch Schichtenwasser im Zusammenhang mit stärkeren Regenereignissen sollte eine Vertikalsperre der Kirche erwogen werden. Der Kiesstreifen, der aktuell die Kirche umgibt, ist in diesem Zusammenhang nicht zielführend. Eine Umwandlung in ein Drainagesystem könnte allerdings Abhilfe schaffen. Es kommt aktuell eher zu einer Heranführung und Konservierung der Feuchtigkeit in den Nahbereich des Mauerwerks unter der Geländeoberkante.

Sollte angestrebt werden, den Putz im Innenraum zumindest im Sockelbereich zu erneuern, werden folgende Putzempfehlungen gegeben. Vorteilhaft wäre es, die Eignung für die Kirche in Ostrau zunächst in Musterflächen für ein Jahr (mindestens jedoch 6 Monate) zu prüfen.

1. Otterbein Porenputz, der entweder zweilagig aufgebracht wird oder in Kombination mit einer auflagernden Putzschicht aus normalem NHL für eine noch bessere optische Denkmalverträglichkeit
2. Keim Seccopor Feuchteregulierungsputz

3 Aktualisierte Empfehlungen nach Bauberatung, 02.03.2017 vor Ort (Protokoll vom 07.03.2017)

Im Projektzeitraum ausgeführte bauliche Maßnahmen im Innen- und Außenbereich

Planung: Frau Heinichen (Evangelisches Kirchspiel Reuden), Herr Zitzmann (Beauftragter Bauleiter für die Arbeiten zur Beseitigung der Hochwasserschäden)

- Erneuerung Sockelputz im Innen- und Außenbereich mit einem Sanierputz (Maxit). Materialentscheidung ist gewährleistungsbezogen.
- Anlage einer Vertikalsperre: Fundamentverputz mit Sperrputz und Dichtschlämme (Fa. Heck) bis in eine Tiefe von 40 cm
- Anlage einer Drainage mit Betonsohle, Gefälle zum Brunnen (Zisterne ohne Anschluss an Grundwasserleiter)
- Einleitung der Dachentwässerung am Kirchenschiff in die Drainage, da kein Anschluss an Abwassersystem möglich ist.
- Sanierung des Fußbodens, Applikation eines Putzes im Innenbereich
- Anlage von Putzmusterflächen im bisher noch nicht sanierten Turmbereich

Erneute Empfehlung der Installation einer Dachrinne am Turm.

Vorstellung der Empfehlungen passiver und aktiver Maßnahmen für den HW-Fall

Herr Gossel, Herr Härter (MLU Halle-Wittenberg)

Es gibt kaum eine andere Möglichkeit, die Vernässung der Kirche im Hochwasserfall zu verhindern als durch Pumpen, da der Untergrund bis auf eine geringmächtige und wahrscheinlich sehr lokale Tonlinse sandig aufgebaut ist.

Durch eine Grundwasserentnahme von ca. 25-30 m³/h (abhängig vom Hochwasserstand), aufgeteilt möglichst auf zwei Brunnen kann ein Absenktrichter geschaffen werden, der die Fundamente der Kirche weitgehend trocken hält. Bei einer Aufteilung auf 2 Brunnen (der bestehende Brunnen kann genutzt werden, ein weiterer müsste auf der Ost- oder Westseite geschaffen werden) können wahrscheinlich 220 V-Pumpen und Notstromaggregate genutzt werden (je ca. 15 m³/h). Der große Durchmesser des bestehenden Brunnens erlaubt wahrscheinlich den Einbau einer günstigen und robusten Abwasserpumpe. Die beiden Grundwassermessstellen haben einen zu geringen Durchmesser, so dass die aufgrund der Lithologie zu erwartenden Wassermengen über sie nicht zu fassen wären. Über einen C-Schlauch müsste das Wasser geeignet eingeleitet werden, möglicherweise in den Niederungsbereich südöstlich Ostrau oder in den Mühlgraben. Der genaue Einleitort ist von der Gemeinde zu klären. Die Pumpzeit ist sehr stark vom Verlauf der Hochwasserwelle abhängig und kann pauschal nicht angegeben werden.

Die Reaktionszeit zwischen Anstieg des Elsterpegels in Zeitz bis zum Grundwasseranstieg in Ostrau beträgt nach den Messungen und der abgeleiteten Modellierung etwa 1 bis 2 Tage. Da die Daten des Pegels Zeitz im Internet abrufbar sind, ist die Datenlage recht gut. Ein Alarmpegel kann erst nach Einmessung auf mNN festgelegt werden.

Verabredet wurde, dass die Berechnungen annehmen sollten, die Fundamenttiefe liege bei 1 m u. GOK.

Die vorgeschlagenen aktiven Maßnahmen zur Prävention der Kirche sollen Feuerwehr und Gemeinde am Tag des Offenen Denkmals durch die MLU und das IDK vorgestellt werden.

4 Raumklimamessungen, Empfehlungen (HAL 73/2017, KALISCH, 2017, siehe Anlage)

Die Raumklimabedingungen im Aufzeichnungszeitraum vom 10.02. 2016 bis zum 06.12.2017 entsprechen den Erfahrungswerten aus einer Vielzahl kleiner Dorfkirchen. Hinweise auf akute Grundwassereinflüsse lassen sich allein aus der Raumklimamessung nicht ableiten. Der Jahresmittelwert der absoluten Raumluftfeuchte liegt bei $7,56\text{g/m}^3$ (Gramm Feuchtigkeit pro Kubikmeter trockene Luft), was in der Größenordnung dem mittleren Außenluftwert entspricht). Aus diesem Wert lässt sich nicht auf einen akuten Feuchtigkeitseintrag durch Verdunstungsprozesse aus den Wänden oder dem Fußboden schließen, zumal keine Hinweise auf einen sehr starken Luftaustausch der Raumluft mit der Außenluft vorliegen.



Abb. 1: Position des Klimadatenloggers an der südlichen Empore

Die relative Luftfeuchte schwankt zwischen minimal 50,7% rel. F. und maximal 83,6% rel. Feuchte um einen Jahresmittelwert von 69,45% rel. Feuchte. In den Winterhalbjahren bewegt sich die relative Raumluftfeuchte im Wertebereich zwischen 70% und 80% rel. Feuchte. In diesem Luftfeuchtebereich besteht bei erhöhten Temperaturen insbesondere im Spätherbst sowie im zeitigen Frühjahr die Gefahr der Algen- und Schimmelbildung. Es ist positiv zu bewerten, dass das Raumklima bis auf den Zeitraum November und Dezember 2017 keinen starken kurz- oder mittelfristigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte ausgesetzt war. Es wäre von Interesse, ob natürliche- oder nutzungsbedingte Einflüsse im November und Dezember 2017 bekannt sind, die zu der Verstärkung der Luftfeuchteschwankung beigetragen haben. Diese Einflüsse sollten in Zukunft soweit wie möglich wieder abgedämpft oder abgestellt werden. Der Verlauf der Raumlufttemperatur folgte sehr stark gedämpft dem Außentemperaturverlauf und bewegte sich zwischen minimal $-2,5^{\circ}\text{C}$ und maximal $24,3^{\circ}\text{C}$ um einen Jahresmittelwert von $12,5^{\circ}\text{C}$. Bereits aus den statistischen Daten wie auch aus dem Kurvenverlauf der Lufttemperatur wird erkennbar, dass im Kirchenschiff der Gefrierpunkt im Winter über mehrere Tage hinweg unterschritten wurde.

Abschließend ist zu empfehlen, regelmäßige Kontrollen hinsichtlich einer möglichen Algen oder Schimmelbildung durchzuführen. Sollte diese auftreten muss über weiterführende Maßnahmen zur Reduzierung der relativen Raumluftfeuchte diskutiert werden. Eine effektive Absenkung der relativen Raumluftfeuchte ist aber in der Regel nur durch eine technische Luftentfeuchtung mit entsprechenden Betriebskosten sicherzustellen. Aus diesem Grund sollte die gegenwärtige Situation erst einmal dahingehend beobachtet werden, ob die Trocknung des Baukörpers im Ergebnis der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen fortschreitet. Diese Beurteilung könnte auch durch einer vergleichenden Wiederholungsmessung des Raumklimas in ein bis zwei Jahren unterstützt werden.

5 Bericht zu den hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2017)

5.1 Empfehlung auf Basis der Modellergebnisse

Der Einbau zweier Pumpen wäre keine große technische Herausforderung. Auf der Südseite der Kirche könnte der bereits vorhandene Brunnen genutzt werden. Im Hochwasserfall müsste dort eine entsprechende Pumpe eingehängt werden. Als problematisch könnte sich die Entsorgung der geförderten Wassermengen darstellen. Hier gilt es eine entsprechende Lösung zu finden. Eine Möglichkeit wäre die Einleitung in den nahe gelegenen Mühlgraben. Bei der Pumpenleistung ergab das Modell für eine optimale Grundwasserbeeinflussung einen Umfang von 25-30 m³/h. Beobachtet werden, müsste für einen effektiven Schutz der Flusspegel „Zeit“. Stündliche Werte können jederzeit online oder telefonisch beim LHW abgefragt werden. Sobald am Pegel die kritische Marke erreicht wird, verbleiben ca. 48h zur Inbetriebnahme der Pumpen. Dieser Zeitraum sollte aber auf keinen Fall ausgereizt werden. Die Einleitung der Schutzmaßnahmen sollten möglichst frühzeitig eingeleitet werden. Als kritische Marke wird eine Pegelangabe am Pegel „Zeit“ von 4m (400cm) angesehen. Des Weiteren zeigt das Modell auf, dass die Pumpen im Hochwasserfall auch bei fallendem Oberflächenwasserpegel trotzdem noch für einige weitere Tage in Betrieb bleiben müssen. Im Falle des Hochwassers von 2013 stieg der Grundwasserpegel nach dem Pegelhöchstpunkt im Modell noch zwei weitere Tage im Aquifer an. Das bedeutet, dass im Falle der unmittelbaren Pumpenabschaltung als Reaktion auf einen fallenden Oberflächenwasserspiegel, das Grundwasser durchaus noch einmal steigen kann und zu Vernässungsschäden am Bauwerk führen kann. Empfehlenswert ist es daher, die Pumpen mit beginnendem fallendem Pegel noch für mindestens 3 - 5 Tage, je nach weiterem Wasserstandsverlauf des Oberflächengewässers, in Betrieb oder auf Abruf zu halten.

5.2 Zusammenfassung (Auszug)

Für die Aufgabenstellung einer weitgehenden Trockenlegung der Kirche „Ostrau“ der Gemeinde Elsteraue und die Abschätzung der Folgen eines nochmaligen Hochwassers in der Größenordnung der Ereignisse vom Juli 2013 hat sich das Modell bewährt. Die Grundwasserstände können in ihrer Dynamik abgebildet und Szenarien für Präventive Maßnahmen und Sanierungen getestet werden.

Auf Grundlage der Modellergebnisse sind vor allem aktive Maßnahmen bewertet worden. Es zeigt sich, dass die aktiven Maßnahmen sehr gute Wirkungen erzielen können und zur Sicherung der Kirche vor Vernässungsschäden durch hohe Grundwässer gut geeignet sind. Der Einbau zweier Pumpenanlagen im Süden und Norden der Kirche ist vor allem im Bereich des bereits existierenden Brunnens technisch sehr einfach zu leisten. Im Hochwasserfall könnten die Pumpen den Grundwasserpegel ausreichend niedrig halten um einen effektiven Schutz zu gewährleisten.

5.3 Hinweise zum Notfallplan (Auszug)

Die Hinweise beziehen sich ausschließlich auf den Hochwasserfall ohne direkten Oberflächenwasserzutritt (z.B. durch Deichbruch).

Die aktiven Maßnahmen zur Grundwasserregulierung im Hochwasserfall sind für den Erhalt der Kirche sinnvoll und z.T. notwendig.

Zur Reduzierung des Wasserdrucks im Grundwasserleiter kann durch Pumpen in den beiden Brunnen (einer ist neu zu errichten s.o.) eine Wasserentnahme in der Größenordnung von je etwa 25-30 m³/h vorgesehen werden. Das Wasser ist in den nordwestlich der Kirche gelegenen und in die Weiße Elster entwässernden Graben abzuleiten.

Die Reaktionszeit auf einen Hochwasserstand > 400 cm am Pegel Zeitz beträgt aufgrund der Lage des Pegels oberstromig zum Ort Ostrau etwa 48 Stunden. Nach Rückgang des Hochwassers auf unter 400 cm am Pegel Zeitz sollten die beiden Pumpen noch mind. 3-5 Tage weiter betrieben werden.

6 Literatur

Arendt, C.& Seele, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.

Grassegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S..

Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gottesgnaden im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt",

Gossel, W., Härter, J. (2016) "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", Vortrag über aktuelle Projektergebnisse am 24.11.2016

MEINHARDT, J. (2015) Ostrau, Kirche - Mauerwerksuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 15/2016, 14 S.

Protokoll zum Projekttreffen in Halle am 24.11.2016

Protokoll zur Projektberatung am 02.03.2017

Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probennahme, Messung und Interpretation. In R. Snethlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.

WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik“

Kalisch, U. (2017) Ostrau, Kirche, Raumklimateaufzeichnungen im Zeitraum 10.02.2016 bis 06.12.2017, IDK-Untersuchungsbericht HAL 73/2017, 3 S.

Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche „Ostrau“

im Rahmen des Projekts

**" Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von
Schäden durch hochwasserabhängige Grundwas-
seranstiege am Beispiel national bedeutender
Kirchen in Sachsen-Anhalt "**



Auftraggeber:

Evangelische Kirche Mitteldeutschland

Auftragnehmer:

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg,

Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie

1 a ° #

1 Einleitung	3
1.1 Projektauftrag	3
1.2. Hintergrund des Projekts	3
1.3 Ziel des Projektes „Ostrau“	3
1.4 Arbeitsablauf	3
2 Datengrundlage	4
2.1 Geologischen und hydrologische Übersicht	4
2.2 Hydrologische Übersicht	5
3 Auswertung der Messergebnisse	6
3.1 Bohrgutansprache	6
3.2 Siebung	6
3.3 Pumpversuch	6
3.4 Zeit-Abstand-Verfahren	6
4 Modellierungswerkzeuge	7
4.1 Modflow	7
4.1.1 ModelMuse	7
5 Dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell	8
5.1 Randbedingungen	8
5.2 Parameter	8
5.3 Kalibrierung	9
5.4 Szenarien	9
8 Empfehlung auf Basis der Modellergebnisse	10
9 Zusammenfassung	11

1 Einleitung

1.1 Projektauftrag

Der Auftrag zur hydrogeologischen Bewertung von Hochwassereinflüssen auf ausgewählte Kirchen in Sachsen-Anhalt sowie Ausarbeitungen von Strategien zur Vermeidung von Schäden bei künftigen Hochwasserereignissen wurde gemäß dem Angebot vom 27.07.2015 vergeben. In diesem Auftrag ist vorgesehen, Grundwassermessstellen einzurichten, regelmäßige Messungen der Grundwasserstände, die Auswertung dieser Messungen und die hydrogeologische Situation zur Ableitung von Präventionsmaßnahmen numerisch zu modellieren. Hierfür wurden zunächst die verfügbaren Schichtenverzeichnisse und hydrogeologischen Karten des Landesbetriebs für Hochwasser (LHW) und des Landesamtes für Geologie und Bergwesen (LAGB) sowie die Hochwasserkarten des Landesbetriebes für Hochwasserschutz genutzt. Der vorliegende Modellierungsbericht zur Ortskirche Ostrau (Gemeinde Elsteraue) umfasst die Modellierungsergebnisse eines numerischen Modells auf der Basis der Erstauswertungen der Grundwasserstandsmessungen von Oktober 2015 bis Oktober 2016 sowie der Erkenntnisse aus dem Hochwasser im Juni 2013.

1.2. Hintergrund des Projekts

Im Land Sachsen-Anhalt sind an einigen denkmalgeschützten Kirchen nach dem Hochwasser 2013 Wasserschäden aufgetreten, die nicht direkt auf den Einfluss von Oberflächenwasser zurückgeführt werden können. Dies sind einerseits witterungsbedingte Schäden, die in diesem Projekt nur eine untergeordnete Rolle spielen, und andererseits Schäden, die auf Grundwasseranstiege zurückzuführen sind. Die Beziehung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser an den betroffenen Denkmälern soll daher in diesem Projekt genauer untersucht und Möglichkeiten der Vermeidung durch Modellierung verschiedener möglicher Präventionsmaßnahmen gefunden werden. Eine der sechs untersuchten Kirchen ist die evangelische Kirche der Ortschaft Ostrau (Gemeinde Elsteraue). Hier traten im Verlauf des Hochwassers 2013 Nässeschäden im Bereich des Mauerwerks auf, die durch die starke Infiltration von Flusswasser in den Grundwasserleiter und damit verbundenen Anstieg des Grundwassers in Verbindung zu setzen sind. Durch die daraus resultierende starke Verringerung des Grundwasserflurabstandes konnte Feuchtigkeit durch den Boden in die Bausubstanz aufsteigen.

1.3 Ziel des Projektes „Ostrau“

Die Grundwasseruntersuchungen sind auf die Beobachtung, Analyse und Modellierung der Oberflächen-Grundwasser-Wechselwirkung ausgerichtet. Die Schäden hochwasserbedingter Grundwasseranstiege an den ausgewählten Denkmälern sollen künftig vermieden werden. Hierfür sollen vor allem aktive Maßnahmen zur Grundwasserstandsregulierung untersucht werden, wobei die Nachhaltigkeit der Maßnahmen unter mehreren Aspekten betrachtet werden soll. Das Ziel ist möglichst wartungsarme und mit geringem technischem Aufwand durchzuführende Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen auszuarbeiten.

1.4 Arbeitsablauf

Basierend auf den zunächst notwendigen Recherchen beim LAGB Sachsen-Anhalt und dem LHW sowie einer Begehung vor Ort mit den Verantwortlichen des Baudezernats und der Kirchengemeinde, wurden zunächst die Geländearbeiten zur Bestimmung der lokalen geologischen Verhältnisse, zur Einrichtung zweier Grundwassermessstellen, zur quasikontinuierlichen Messung von Grundwasserständen durchgeführt.

Auf Grundlage der Grundwasserstandmessungen von Oktober 2015 bis Oktober 2016 konnten die Analysen der Oberflächenwasser-Grundwasser-Interaktion die erforderlichen hydraulischen Parameter für die numerische Grundwassermodellierung liefern. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell erstellt, das die Druckhöhen der lokalen Grundwasserspiegel im Hochwasserfall Anfang Juni 2013 lieferte.

2 Datengrundlage

Das Modell wurde auf der Basis folgender Unterlagen erstellt.

1. Hydrogeologisches Kartenwerk der DDR 1 : 50.000 (HK50)

Diese Karte diente vor allem als Planungsgrundlage für die lokal zu erhebenden hydrologischen und geologischen Daten.

2. Die stündlichen Wasserstandsmessungen am Oberflächengewässer (Weiße Elster) des Pegels „Zeit“ über den relevanten Zeitraum von 2013 bis 2016.

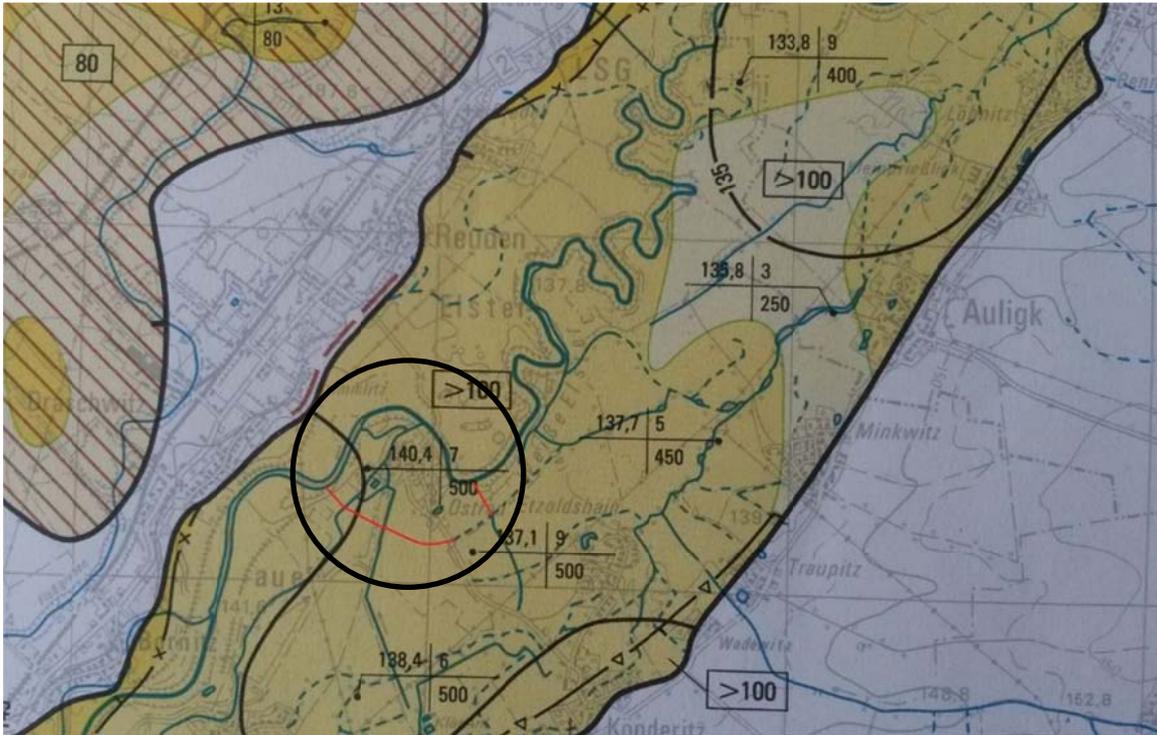
Bereitgestellt vom LHW Sachsen-Anhalt.

3. Das Bodenprofil der beiden durchgeführten Bohrungen „Hy Ostrau 1/15“ und „Hy Ostrau 2/15“ zur Detailanalyse des Schichtenaufbaus im Bereich der Kirche „Ostrau“.

4. Die stündlichen Grundwasserstandsmessungen des in der Bohrung „Hy Ostrau 1/15“ eingebauten Datenloggers zur genauen Verfolgung der örtlichen Veränderung des Grundwasserstandes. Die Daten von 2. und 4. Dienten außerdem zur Erkennung des Zusammenhangs und der Interaktion zwischen dem Oberflächengewässers „Weiße Elster“ und dem lokalen Grundwassersystems.

2.1 Geologischen und hydrologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet „Ostrau“ (Abb.1) liegt aus struktureologischer Sicht im Saxothuringikum, das großtektonisch ein Teil des Mitteleuropäischen Schollengebietes ist. Regionalgeologisch befindet sich die Ortschaft Ostrau südlich der Elstertalstörung. Typischerweise finden sich hier elstereiszeitliche Sande und Kiese, die in der Regel von bis zu mehr als 1m mächtigen Auelehmen bedeckt sind. Im Untersuchungsgebiet ist diese glaziale Abfolge anzutreffen. Allerdings erreicht der Auenlehm nur Mächtigkeiten die geringer als 1m sind. Das Festgestein wird im Bericht nicht weiter berücksichtigt. Nach der HK50 hat der Grundwasserleiter eine Mächtigkeit von 5-10 m. Anhand der Landesborhdatenbank des LAGB und der HK50 konnte die Mächtigkeit auf ca. 7m eingegrenzt werden. Beim Grundwasserleiter handelt es sich um einen glazialen, kiesigen Mittelsand. Darüber befindet sich ein geringmächtiger Grundwassergeringleiter.



„, Abb. 1: Untersuchungsgebiet

Im Norden befindet sich die Weiße Elster, im Süden markiert die rote Linie die Grenze des Untersuchungsgebietes
 Unmaßstäblicher Ausschnitt aus der Hydrogeologischen Karte der DDR 1:50000

2.2 Hydrologische Übersicht

Die Kirche „Ostrau“ ist in einer Flussschleife der Weißen Elster gelegen. Entgegen der ursprünglichen Annahme ist der Grundwasserstand durchgängig unterhalb des Flusspegels gelegen. Das heißt, dass im Untersuchungsgebiet (Abb.1) permanent influente Verhältnisse vorzufinden sind. Die Grundwasserströmungsrichtung ist somit vom Fluss weg nach Südosten ausgerichtet.

Abbildung 2 stellt den Zusammenhang zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser im Untersuchungsgebiet grafisch dar. Die Korrelation zwischen beiden Systemen ist an den markierten Punkten besonders markant.

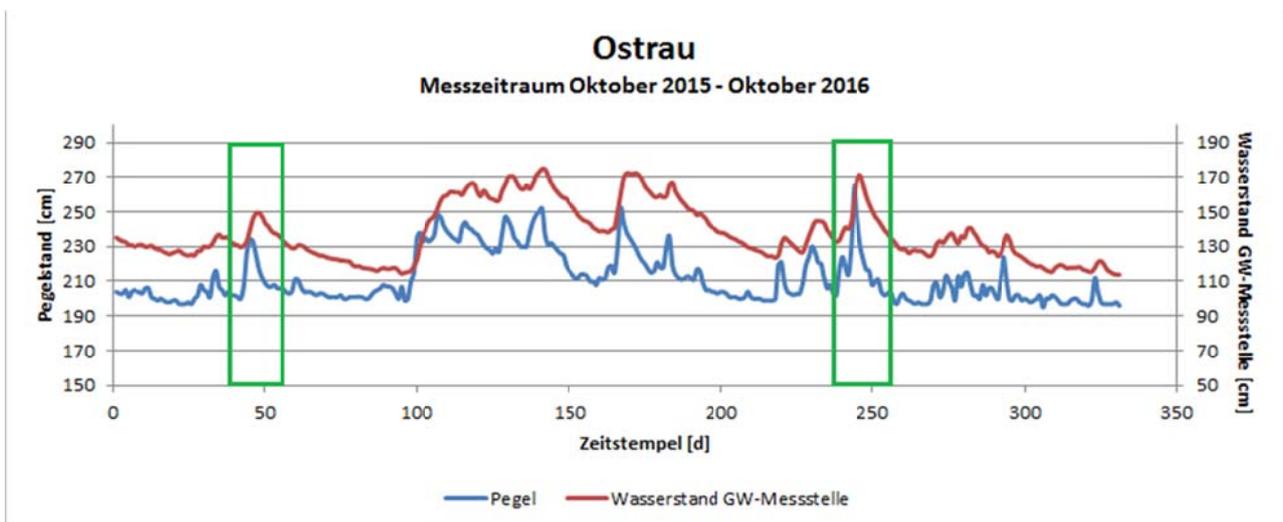


Abb.2: Zusammenhang zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser

Die Zeitverschiebung zwischen den gemessenen Werten am Pegel „Zeit“ und deren Einfluss auf das Aquifersystem im Bereich Ostrau liegt bei ca. 2 Tagen. Dieser Zeitraum ist vor Allem für die Maßnahmenbetrachtung von großer Bedeutung.

Die Grundwasserneubildung liegt im betrachteten Gebiet bei 60-100 mm/a. Sie ist aber nicht maßgeblich beeinflussend für das Strömungsverhalten des Grundwassers.

3 Auswertung der Messergebnisse

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen wurden verschiedene Auswerteverfahren angewendet. Dazu wurden sowohl Bohrgut als auch Messdaten ausgewertet um Erkenntnisse über die hydrologischen Eigenschaften des Untergrundes und über das Verhalten des Grundwassers zu erlangen.

3.1 Bohrgutansprache

Der über dem Aquifer anzutreffende Grundwassergeringleiter hat eine geringe Durchlässigkeit. Seine hydraulische Leitfähigkeit wird mit Werten im Bereich von 10^{-8} m/s angenommen. Das darunter liegende Aquifermaterial wird aufgrund seiner Haupt- und Nebenbestandteile mit hydraulischen Leitfähigkeiten im Bereich von 10^{-4} m/s beziffert.

3.2 Siebung

Zur genaueren Einschätzung des Aquifermaterials wurde an diesem eine Siebung vorgenommen. Die daraus resultierende Hydraulische Leitfähigkeit liegt bei rund 3×10^{-4} m/s. Das Ergebnis liegt im für das Material angenommenen Bereich und ist somit als schlüssig anzusehen.

3.3 Pumpversuch

An der Kirche „Ostrau“ wurde außerdem ein Kurzzeitpumpversuch durchgeführt. Die Auswertung dieses Pumpversuches ergab eine hydraulische Leitfähigkeit von 3×10^{-4} . Auch dieses Ergebnis liegt im bei der Bohrgutansprache angenommenen Bereich.

3.4 Zeit-Abstand-Verfahren

Zusätzlich zur Materialanalyse und Vor-Ort-Untersuchungen wurde die hydraulische Leitfähigkeit über die Auswertung der Ganglinien des Oberflächenwassers und des Grundwassers bestimmt. Dazu wird die zeitliche Verzögerung, mit der das Grundwasser auf Veränderung im Oberflächenwasserpegel reagiert, betrachtet. Das Ergebnis hierfür ist eine hydraulische Leitfähigkeit von 5×10^{-4} m/s.

Insgesamt wurde die hydraulische Leitfähigkeit über drei unterschiedliche Verfahren bestimmt. Wie Bereits in den Einzelkapiteln erwähnt liegen alle Werte im Bereich von 10^{-4} m/s und stimmen mit der Bohrgutansprache überein. Aus den Einzelwerten wird schließlich ein Mittelwert gebildet, der als hydraulische Leitfähigkeit des Aquifers für die anschließende Modellierung herangezogen wird.

4 Modellierungswerkzeuge

Zur modellhaften Darstellung der Grundwassersituation an der Kirche „Ostrau“ wurde ein dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell erstellt. Das Modell wurde mit dem Werkzeug Modflow und der Anwenderoberfläche ModelMuse bearbeitet.

4.1 Modflow

Das Modellierwerkzeug Modflow ist eine OpenSource Software des United States Geological Survey (USGS). Es können sowohl stationäre und instationäre Strömungs- und Stofftransportmodelle erstellt werden. Das Programm erfährt weltweite Anwendung und bietet eine Alternative zum kostenpflichtigen Werkzeug Feflow®.

4.1.1 ModelMuse

ModelMuse ist eine von vielen Anwenderoberflächen für Modflow. Diese Oberflächen dienen zur vereinfachten und anwenderfreundlicheren Bedienung von Modflow. Der Vorteil der angewendeten Variante liegt in seinen umfangreichen Bearbeitungsmöglichkeiten. Des Weiteren ist auch diese Software ein kostenfreies Angebot des USGS.

5 Dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell

5.1 Randbedingungen

Als Randbedingungen wurden für dieses kleinräumige Modell die natürlichen hydrologischen Gegebenheiten genutzt. Das Untersuchungsgebiet mit der Kirche „Ostrau“ liegt in einer Flussschleife der Weißen Elster (Abb. 3). Das Modell wurde so angelegt, dass der Fluss die nördlichen und teilweise die östlichen und westlichen Randbedingungen ausmacht, da hier eine sichere Datengrundlage vorliegt. Außerdem zeigt die HK50 im Südosten des Gebietes ein Grabensystem auf. Dieses Grabensystem hat eine auf der Karte verzeichnete Druckspiegelhöhe, die hier als Randbedingung genutzt werden kann.

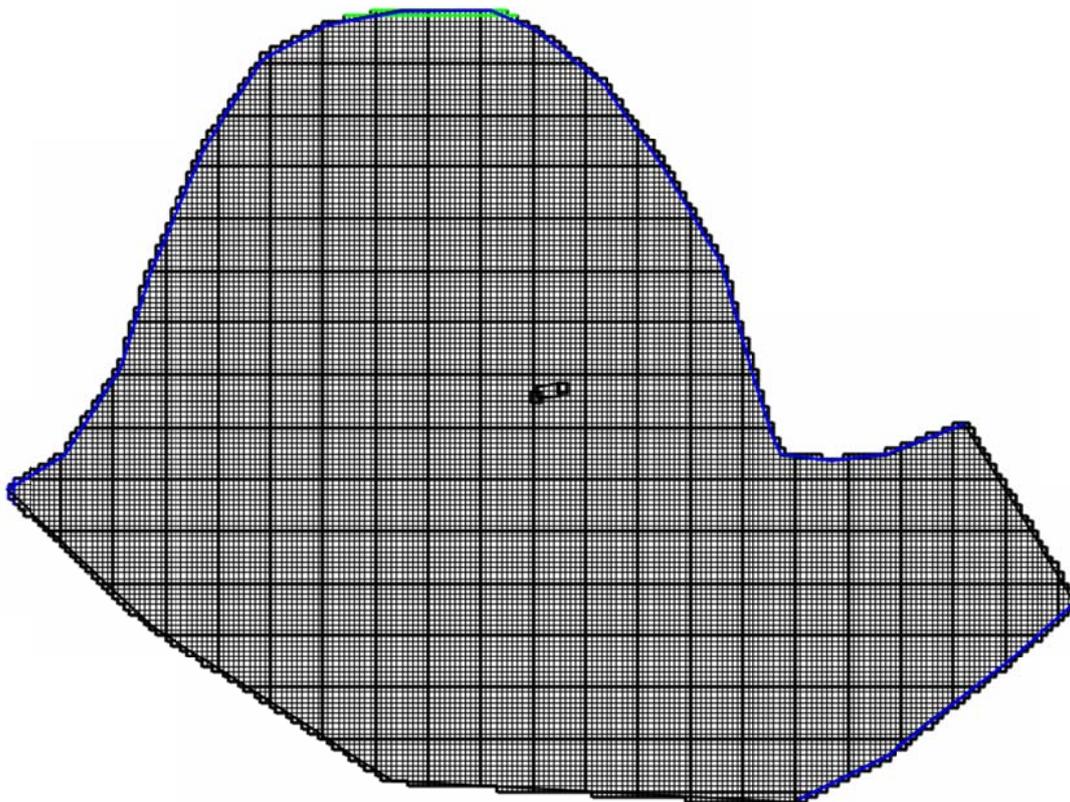


Abb. 3: Modellgebiet

Die blaue Linie im Norden kennzeichnet die Weiße Elster (Fluss-Randbedingung), die grüne Linie im Süden kennzeichnet das Grabensystem, das als südöstliche Randbedingung fungiert. Das schwarze Rechteck im Modellgebiet kennzeichnet die Position der Kirche „Ostrau“.

5.2 Parameter

Die hydrogeologischen Parameter sind recht kurz zu beschreiben. Mit der Bohrung an der Kirche „Ostrau“ wurde nach der HK50 nur ein Grundwasserleiter erbohrt. Dieser wurde in einer Tiefe von 2,50m erfasst. Außerdem ist laut HK50 mit einer Mächtigkeit von 5-10m zu rechnen. Aufgrund von Bohrungen aus der Landesbohrdatenbank des LAGB konnte die maximale Mächtigkeit des Aquifers auf 7m begrenzt werden. Die hydraulische Leitfähigkeit liegt wie bereits erwähnt bei 1×10^{-4} .

5.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung konnte anhand der umfangreichen Grundwasser- und Oberflächenwasserstandsmessungen vorgenommen werden. Zunächst wurde das Modell auf die mittleren Wasserstände im Zeitraum von Oktober 2015 bis Oktober 2016 kalibriert. Somit konnte ein funktionierendes Grundmodell für weitere Grundwasserszenarien erstellt werden. Neben den

Daten für Grundwasser und Oberflächenwasser wurden außerdem Werte für die Grundwasserneubildung in das Modell mit eingepflegt. Weitere Wetterdaten fanden keine Verwendung. Ihr Einfluss wird als nicht maßgeblich angenommen und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

5.4 Szenarien

Als zu bewertendes Hochwasserszenario wurde der Hochwasserfall von 2013 herangezogen. Bei diesem Hochwasserfall lag der Grundwasserdruckspiegel weniger als einen halben Meter unter der Geländeoberkante. Somit wird dieses Szenario als das meist ungünstigste angenommen. Schutzmaßnahmen müssen mindestens für einen solchen Fall konzipiert werden. Als sinnvollste Maßnahme wurde eine aktive Beeinflussung des Grundwasserspiegels angesehen. Deshalb wurden für das Modell zwei Brunnen mit einer Leistung von 25 - 30 m³/h simuliert. Ein Brunnen ist dabei an der Nordseite der Kirche angelegt, der zweite findet sich auf der Südseite der Kirche. Mit diesen Brunnen konnte im Modell eine hinreichende Absenkung des Grundwasserdruckspiegels sowie ein ausreichend großer Absenktrichter erreicht werden. Abb. 4 soll die Auswirkungen des Pumpeneinsatzes verdeutlichen.

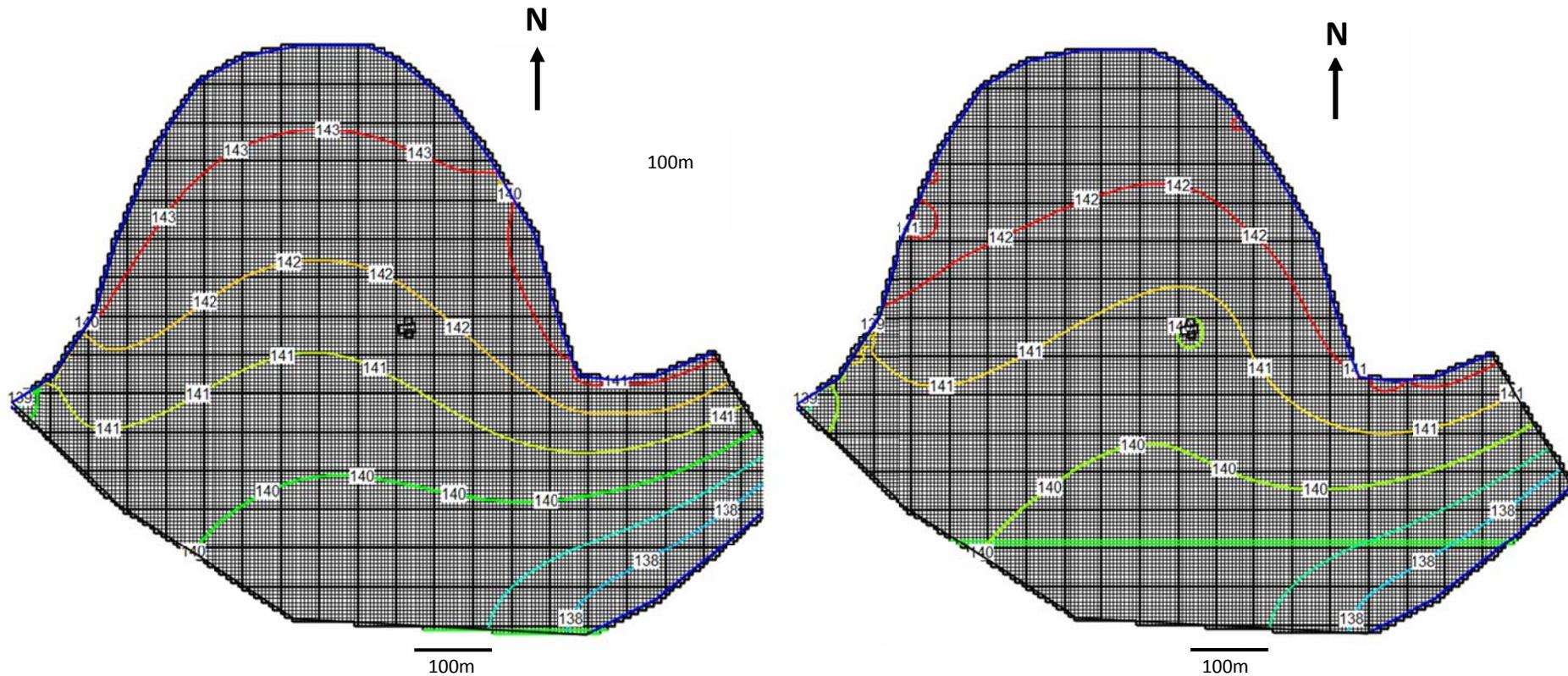


Abb. 4: Modellgebiet ohne und mit Pumpeneinsatz

Die Linien zeigen die Isohypsen des Grundwasserspiegels in Meter über NHN an. Links ist der Höchststand des Junihochwassers 2013 ohne den Einsatz von Pumpen zu sehen. Zu erkennen ist, dass hier der Grundwasserstand im Bereich der Kirche (schwarzes Rechteck) zwischen 142mNHN und 141mNHN liegt. Die Geländehöhe beträgt hier ca. 141,9mNHN. Im rechten Bild ist der gleiche Flusswasserpegel bei gleichzeitigem Einsatz der Pumpenanlage dargestellt. Im Bereich der Kirche konnte so im Modell der Grundwasserpegel unter 140mNHN gehalten werden und somit ein ausreichend großer Grundwasserflurabstand erreicht werden.

8 Empfehlung auf Basis der Modellergebnisse

Der Einbau zweier Pumpen wäre keine große technische Herausforderung. Auf der Südseite der Kirche könnte der bereits vorhandene Brunnen genutzt werden. Im Hochwasserfall müsste dort eine entsprechende Pumpe eingehängt werden. Als problematisch könnte sich die Entsorgung der geförderten Wassermengen darstellen. Hier gilt es eine entsprechende Lösung zu finden. Eine Möglichkeit wäre die Einleitung in den nahe gelegenen Mühlgraben. Bei der Pumpenleistung ergab das Modell für eine optimale Grundwasserbeeinflussung einen Umfang von 25-30 m³/h. Beobachtet werden, müsste für einen effektiven Schutz der Flusspegel „Zeit“ . Stündliche Werte können jederzeit online oder telefonisch beim LHW abgefragt werden. Sobald am Pegel die kritische Marke erreicht wird, verbleiben ca. 48h zur Inbetriebnahme der Pumpen. Dieser Zeitraum sollte aber auf keinen Fall ausgereizt werden. Die Einleitung der Schutzmaßnahmen sollten möglichst frühzeitig eingeleitet werden. Als kritische Marke wird eine Pegelangabe am Pegel „Zeit“ von 4m (400cm) angesehen. Des Weiteren zeigt das Modell auf, dass die Pumpen im Hochwasserfall auch bei fallendem Oberflächenwasserpegel trotzdem noch für einige weitere Tage in Betrieb bleiben müssen. Im Falle des Hochwassers von 2013 stieg der Grundwasserpegel nach dem Pegelhöchstpunkt im Modell noch zwei weitere Tage im Aquifer an. Das bedeutet, dass im Falle der unmittelbaren Pumpenabschaltung als Reaktion auf einen fallenden Oberflächenwasserspiegel, das Grundwasser durchaus noch einmal steigen kann und zu Vernässungsschäden am Bauwerk führen kann. Empfehlenswert ist es daher, die Pumpen mit beginnendem fallendem Pegel noch für mindestens 3 – 5 Tage, je nach weiterem Wasserstandsverlauf des Oberflächengewässers, in Betrieb oder auf Abruf zu halten.

9 Zusammenfassung

Für die Aufgabenstellung einer weitgehenden Trockenlegung der Kirche „Ostrau“ der Gemeinde Elsteraue und die Abschätzung der Folgen eines nochmaligen Hochwassers in der Größenordnung der Ereignisse vom Juli 2013 hat sich das Modell bewährt. Die Grundwasserstände können in ihrer Dynamik abgebildet und Szenarien für Präventive Maßnahmen und Sanierungen getestet werden.

Auf Grundlage der Modellergebnisse sind vor allem aktive Maßnahmen bewertet worden. Es zeigt sich, dass die aktiven Maßnahmen sehr gute Wirkungen erzielen können und zur Sicherung der Kirche vor Vernässungsschäden durch hohe Grundwässer gut geeignet sind. Der Einbau zweier Pumpenanlagen im Süden und Norden der Kirche ist vor allem im Bereich des bereits existierenden Brunnens technisch sehr einfach zu leisten. Im Hochwasserfall könnten die Pumpen den Grundwasserpegel ausreichend niedrig halten um einen effektiven Schutz zu gewährleisten.

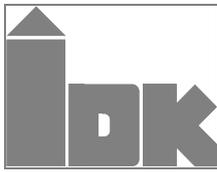
Hinweise zum Notfallplan

Die Hinweise beziehen sich ausschließlich auf den Hochwasserfall ohne direkten Oberflächenwasserzutritt (z.B. durch Deichbruch).

Die aktiven Maßnahmen zur Grundwasserregulierung im Hochwasserfall sind für den Erhalt der Kirche sinnvoll und z.T. notwendig.

Zur Reduzierung des Wasserdrucks im Grundwasserleiter kann durch Pumpen in den beiden Brunnen (einer ist neu zu errichten s.o.) eine Wasserentnahme in der Größenordnung von je etwa 25-30 m³/h vorgesehen werden. Das Wasser ist in den nordwestlich der Kirche gelegenen und in die Weiße Elster entwässernden Graben abzuleiten.

Die Reaktionszeit auf einen Hochwasserstand > 400 cm am Pegel Zeitz beträgt aufgrund der Lage des Pegels oberstromig zum Ort Ostrau etwa 48 Stunden. Nach Rückgang des Hochwassers auf unter 400 cm am Pegel Zeitz sollten die beiden Pumpen noch mind. 3-5 Tage weiter betrieben werden.



Bericht HAL 79/2017

Grundwasserprojekt (DBU)

Gruna, Kirche

Maßnahmenempfehlungen, Abschlussbericht

Beauftragt durch: Evangelische Kirchengemeinde Gruna

Bearbeiter: Dipl.-Min. Matthias Zötzl

Anzahl der Seiten: 15

Anlage: Abschlussbericht der Hydrogeologischen Untersuchungen
„Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche
Gruna“, GOSSEL (2017) vom 25.08.2017

Halle, 21.12.2017

Veröffentlichungen von Untersuchungsberichten, auch auszugsweise, und Hinweise auf Untersuchungsergebnisse zu Werbezwecken bedürfen in jedem Einzelfall der schriftlichen Einwilligung des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Arbeitsstellen in den Ländern:

Sachsen:

Schloßplatz 1
01067 Dresden

Tel.: 0351-48435-100

Internet: www.idk-denkmal.de

Sachsen-Anhalt:

Domplatz 3
06108 Halle

Tel.: 0345-472257-21/22/23
Fax.: 0345-472257-29

e-mail: info@idk-denkmal.de

Vorstand:

Prof. Stephan Pfefferkorn
Boje E. Hans Schmuhl
Ellen Schmid-Kamke

Geschäftsführer:

Dipl.-Ing. Uwe Kalisch

Registergericht Dresden: VR 2891

Bankverbindung:

Ostsächsische Sparkasse Dresden
Konto-Nr.: 3120 115 524
BLZ: 850 503 00

Steuer-Nr. 203 140 15097

Ust-ID: DE234216408

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Voruntersuchungen (Bericht HAL 20/2016 (MEINHARDT, 2016))	4
2.1	Einleitung	4
2.2	Probenahme	4
2.3	Methodik	6
2.3.1	Quantitative Salzanalyse	6
2.3.2	Feuchtebestimmung mit der Darmmethode	6
2.4	Ergebnisse	7
2.4.1	Quantitative Salzanalyse	7
2.4.2	Feuchtebestimmung	8
2.5	Schlussfolgerung	9
3	Aktualisierte Empfehlungen	11
3.1	Vorstellung bisher im Projektzeitraum ausgeführter Arbeiten	11
3.2	Vorstellung der Empfehlungen passiver und aktiver Maßnahmen für den HW-Fall	11
3.3	Weitere Ergebnisse	12
4	Raumklimamessungen	13
5	Hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2017), Auszug	13
5.1	Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse	13
5.1.1	Aktive Grundwasserbeeinflussungen	13
5.1.2	Passive Maßnahmen	13
5.1.3	Zusammenfassung	14
5.1.4	Hinweise zum Notfallplan	14
6	Literatur	15



Abb. 6: Außenansichten der Kirche Gruna

1 Einleitung

Im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt", kurz „Grundwasserprojekt“, wurden folgende Untersuchungsberichte und Maßnahmenempfehlungen erarbeitet und vorgelegt.

- Voruntersuchungen: Erfassung der Feuchte- und Salzbelastung im Mauerwerk, Mörtelanalysen, Empfehlungen zum baulichen Vorgehen, Bericht HAL 20/2016, MEINHARDT, 2016
- Zum Projekttreffen am 24.11.2016 konnten die bisherigen Empfehlungen aktualisiert und präzisiert werden.
- Bewertung der Maßnahmen im Rahmen des Projektabschlusstreffens am 02.03.2017 in Gruna, Protokoll vom 07.03.2017
- Ergebnisse der hydrogeologischen Untersuchungen, Empfehlungen (GOSSEL, 2017)

Der vorliegende Abschlussbericht zitiert die im Projektzeitraum entstandenen Einzelberichte und zeigt an Hand dieser eine Entwicklung auf. Die Einzelergebnisse aus den Gliederungspunkten sind Grundlage der Handlungsempfehlung.

2 Voruntersuchungen (Bericht HAL 20/2016 (MEINHARDT, 2016))

2.1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsprojektes der DBU „Grundwasser“ sind zur Erfassung der aktuellen Feuchte- und auch Salzbelastung des Mauerwerkes Tiefenprofile zur Bohrmehlentnahme angelegt worden. Die Messungen sind auch im Zusammenhang mit den hydrologischen Untersuchungen der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg zu sehen. Die Ergebnisse dieser Messungen liegen zusammen mit den Modellierungen im September 2016, nach einjähriger Laufzeit vor. In dem Zusammenhang wird auch die Klimadatenerfassung ausgewertet werden. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen am Mauerwerk dienen einerseits als Bewertungsgrundlage für die Maßnahmen, die an dem Objekt zur Optimierung der Trocknung durchgeführt werden sollen und, um den tatsächlichen Einfluss des Grundwassers (Grundwassermessstellen Hydrogeologie) auf das Mauerwerk und das Raumklima zu eruieren.

Die Kirche war vom Hochwasser 2013 betroffen bzw. geflutet. Nach Aussage des Polieres der Firma Bubnik, Herr Schmidt, ist die Gruft unterhalb des Chorbereiches zum Zeitpunkt der Messung wieder trocken. Ein akutes Feuchteproblem vom Untergrund her besteht demnach nicht. Im Herbst 2014 wurde der Putz im Inneren der Kirche bis unterhalb der Emporen abgeschlagen und durch einen Opferputz ersetzt. Anfang 2015 wurde dieser abgenommen und durch einen Luftkalk mit Leichtzuschlag ersetzt (Firma Bernd Bubnik) (siehe Abb. 1). Die Oberfläche wurde aufgekratzt, um vorhandenen Salzen die Migration an die Oberfläche zu ermöglichen.



Abb. 1: Aktueller Wandputz innen (in abgeschlagener Zone)

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte am 27. Oktober 2015. Insgesamt sind dabei 2 Tiefenprofile angelegt worden (siehe Abb. 2). Im Chor (Nordseite) wurden tiefenabhängig Bodenproben unterhalb einer unglasierten Fußbodenplatte (6 cm Stärke) entnommen (siehe Abb. 3).

In Tabelle 1 sind die entnommenen Proben hinsichtlich ihrer Herkunft beschrieben.



Abb. 2: Tiefenprofil 1 und 2



Abb. 3: Bodenproben unterhalb der unglasierten Bodenfliese im Mittelgang der Kirche

Tab. 1: Verzeichnis der Bohrmehl- und Bodenproben. (Die Tiefenprofile wurden in Fugen angelegt.)

Probe	Lokalisierung	Entnahmetiefe
Gru_K_TP1	Südseite, außen, hinter Oberkante Vertikalsperre (Tonplatte)	
Gru_K_TP1/1		0-5 cm
Gru_K_TP1/2		5-10 cm
Gru_K_TP1/3		10-20 cm
Gru_K_TP1/4		20-30 cm
Gru_K_TP2	Südseite, außen, oberhalb TP 1 und des Sockels, im Putz mit sichtbarem Schadenshorizont	
Gru_K_TP2/1		0-5 cm
Gru_K_TP2/2		5-10 cm
Gru_K_TP2/3		10-20 cm
Gru_K_TP2/4		20-30 cm
Bodenproben		
Gru_K_FB1		0 bis -2 cm unter unglasierter Bodenplatte, ziemlich trocken
Gru_K_FB2		-2 bis -5,5 cm unter unglasierter Bodenplatte, ziemlich trocken
Gru_K_FB3		-5,5 bis -9 cm unter unglasierter Bodenplatte, ziemlich trocken
Bis 5,5 cm Sandschüttung, dann Materialwechsel zu hellerem, feinerem Sand verdichtet oder mit Kalk etwas gebunden.		

Die Tonplatten, die als Vertikalsperre eingesetzt worden sind, sind nach Auskunft von Herrn Schmidt Rohlinge für Tonrohre, die bei Trocknung krümelig werden und zusammenfallen.

Ein Klimadatenlogger wurde durch das IDK nicht installiert, da bereits einer durch den Restaurator Wilfried Sitte an der Kanzel angebracht gewesen ist (siehe Abb. 4). Hier wird in Kooperation mit Herrn Sitte auf diese Daten zurückgegriffen.



Abb. 4: Klimadatenlogger von W. Sitte an der Kanzel

2.3 Methodik

2.3.1 Quantitative Salzanalyse

Aus den Proben werden für die quantitative Salzanalyse durch ein standardisiertes Elutionsverfahren wässrige Auszüge im Labor des IDK erstellt. Es erfolgt eine Bestimmung des Anteils der löslichen Bestandteile vom Probematerial. Von den Extrakten wird mittels ionenselektiver Methode von Natrium (Na^+) und mittels Photometrie von den Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) und den Anionen (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) die jeweiligen Konzentrationen bestimmt. Die quantitative Ionenbestimmung erfolgte mittels HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer; Natrium HACH Sensi-on 2.

Die Analysenergebnisse der Salzuntersuchungen werden in M.-% angegeben und bewertet. Die Darstellung im Diagramm erfolgt in molaren Equivalentkonzentrationen, die sich aus der Massenkonzentration unter Berücksichtigung der Atom- bzw. Molekülmassen und der Ladung errechnen. Durch diese Normierung aller Ionen auf Masse und Ladung lassen sich die Konzentrationen direkt miteinander vergleichen. Bei Schadsalzuntersuchungen ist in der Regel ein kleiner Kationenüberschuss zu verzeichnen, der u. a. damit erklärt wird, dass etwaige OH^- und CO_3^{2-} -Ionen in der Analyse nicht erfasst werden können (Steiger 1998).

2.3.2 Feuchtebestimmung mit der Darrmethode

Die Darrfeuchten bzw. Entnahmefeuchten der Bohrmehlproben wird durch Trocknung bei 60 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt.

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Quantitative Salzanalyse

Neben der Summe der löslichen Bestandteile wurde von einigen der Bohrmehlproben eine detaillierte Analyse der Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) und der Anionen (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) gemacht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle (3) erfasst.

Zur Interpretation der Salzbelastung von Baustoffen gibt es verschiedene Bewertungsskalen, von denen einige in der folgenden Tabelle (2) vergleichend dargestellt sind. Der Hauptunterschied zwischen den ersten beiden Skalen zu der dritten nach Arendt & Seele besteht darin, dass die Chlorid- und Nitratgehalte unterschiedlich bauschädlich eingestuft und die Grenzen der einzelnen Bereich unterschiedlich genau angegeben sind. In diesem Bericht wird die WTA-Skala angewendet.

Tab. 2: Bewertungsskalen für die Salzbelastung von Baustoffen

Anion	unbelastet	gering			mittel			hoch		
Sulfat [M.-%]	< 0,024	<0,5	<0,1	>0,024 <0,077	0,5- 1,5	0,1- 0,5	>0,077 <0,24	>1,5	>0,5	<0,77
Nitrat [M.-%]	< 0,016	<0,1	<0,05	>0,016 <0,050	0,1- 0,3	0,05- 0,15	>0,05 <0,18	>0,3	>0,15	<0,5
Chlorid [M.-%]	< 0,008	<0,2	<0,05	>0,008 <0,026	0,2- 0,5	0,05- 0,5	>0,026 <0,08	>0,5	>0,5	<0,28

Die Bewertung der detektierten Anionen-Gehalte in den relevanten Proben des Tiefenprofils (nach WTA-Merkblatt „Mauerwerksdiagnostik“) erfolgt durch farbige Markierungen entsprechend Tabelle 2.

Tab. 3: Ergebnisse der Salzanalyse der Proben der Tiefenprofile TP 1 und 2 und der Bodenproben. Die Tiefenprofile wurden in Fugen angelegt.

Probe	Anteile an löslichen Ionen in M.-%							
	Σ wasser-lösl. Bestandteile	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-
Gru_K_TP1/1	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_TP1/2	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_TP1/3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_TP1/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_TP2/1	1,19	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_TP2/2	0,27	0,070	0,010	0,010	<0,005	0,130	<0,01	<0,01
Gru_K_TP2/3	0,15	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_TP2/4	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_FB_1	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb
Gru_K_FB_2	0,18	0,035	0,010	<0,005	<0,005	0,015	<0,01	0,022
Gru_K_FB_3	<0,12	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb

Wie man an den Ergebnissen in Tabelle 3 erkennen kann, dass in dem untersuchten Mauerwerksbereich eigentlich keine relevante Belastung durch lösliche Bestandteile vorliegt. Im Tiefenprofil 1 sind die Gehalte der löslichen Bestandteile so gering gewesen, dass eine detaillierte Analyse der Ionen nicht sinnvoll gewesen wäre. Auch im Tiefenprofil 2 liegen keine kritischen Gehalte vor. In einer Tiefe von 5-10 cm gab es eine leichte Erhöhung der löslichen Bestandteile, die allerdings auch nicht mit einer relevanten Belastung durch bauschädliche Salze zu verbinden ist. Auch die Bodenproben sind als unbelastet zu klassifizieren. Die Probe aus 2-5,5 cm Tiefe weist minimale Nitratgehalte auf.

2.4.2 Feuchtebestimmung

In der nachfolgenden Tabelle (4) sind die Ergebnisse der Darrfeuchtebestimmung an den Proben der Tiefenprofile dargestellt. Die farbige Markierung geben eine Orientierung bei der Bewertung des Feuchtegehaltes (ohne Markierung = sehr gering, grün = gering, türkis = mittel, rot = hoch, lila= extrem).

Tab. 4: Feuchtegehalte der Bohrmehlproben [M.-%] der Tiefenprofile TP 1 und 2 und der Bodenproben

Probe	Feuchtegehalt [M.-%]
Gru_K_TP1/1	6,74
Gru_K_TP1/2	4,22
Gru_K_TP1/3	5,52
Gru_K_TP1/4	7,16
Gru_K_TP2/1	3,33
Gru_K_TP2/2	3,09
Gru_K_TP2/3	2,95
Gru_K_TP2/4	7,59
Gru_K_FB_1	1,10
Gru_K_FB_2	1,81
Gru_K_FB_3	1,41

Das Tiefenprofil 1 wurde in der Fuge, unterhalb des normalen Geländeniveaus angelegt. Der Wandfläche wurde eine Vertikalsperre in Form einer Tonplatte vorgestellt. Diese steht von der Wandfläche ab (siehe Abb. 5), was auch einen Feuchteeintrag zwischen Wand und Platte ermöglicht hat. Die Feuchtegehalte liegen durchschnittlich im mittleren Belastungsbereich. Das Tiefenprofil 2 liegt oberhalb des Sockels und ist bis 20 cm Tiefe als trocken zu charakterisieren. Allerdings konnte zwischen 20-30 cm Tiefe ein deutlicher Anstieg der Feuchte ermittelt werden. Demnach erfolgt auf der Südseite der Kirche eine tiefreichende Abtrocknung des Mauerwerks. Dieser Prozess ist jedoch bis in >20 cm Tiefe nicht wirksam.

Die Bodenproben aus dem Tiefenprofil im Mittelgang der Kirche sind trocken (siehe Tab. 4).



Abb. 5: Abstand der Tonplatte (Vertikalsperre) von der Wand, Südfassade

2.5 Schlussfolgerung

Nach den Beobachtungen vor Ort liegt an der Kirche eher ein Entwässerungsproblem als eine Grundwasserproblematik vor. Inwieweit sich diese noch zusätzlich zumindest theoretisch ergibt, werden die Ergebnisse der Grundwassermodellierung im Spätsommer 2016 zeigen. Der Turm hat keine Regenrinne. An der Nord- und Südseite des Turmes gibt es offensichtlich eine massive Feuchtelast. An der Südseite des Turmes liegt das Eichenlaub in der Regenrinne der Sakristei, wo eine Regenrinne angebracht ist (siehe Abb. 6, rechts).



Abb. 6: Außenansichten der Kirche

Der aktuelle Außenputz wurde 2002/03 angebracht. Als kritisch ist der Betonsockel zu bewerten. Aufgrund seiner Dichte wird offensichtlich in Zeiten mit höherem Feuchteangebot diese in den darüber liegenden Bereich geführt. Zumindest ist das aus den zahlreichen Feuchterändern oberhalb des Sockels zu vermuten (siehe Abb. 7).



Abb. 7: Fleckige und schadhafte Bereiche oberhalb des Betonsockels

Die L-Teile an der Nordseite der Kirche (siehe Abb. 8) sind möglicherweise verkehrtherum eingesetzt worden. Sie leiten im Überflutungsfall das Wasser zur Kirche hin. Auf dem Boden des „L“ ist ein Ziegelpflaster eingebracht. Auch an der Südseite der Kirche ist ein Ziegelpflaster, wodurch das Spritzaufkommen am Putz relativ hoch ist und somit dessen Dauerhaftigkeit eingeschränkt wird (siehe Abb. 9).



Abb. 8: L-Bauteile aus Beton mit eingelegtem Ziegelpflaster, worüber das Wasser in Richtung Osten abgeleitet wird.



Abb. 9: Ziegelpflaster auf der Südseite der Kirche, worüber das Wasser in Richtung Osten abgeleitet wird.

Die Feuchteableitung an der Kirche muss optimiert werden. In dem Zusammenhang sind vor allem die Dachrinne am Turm und auch das Ziegelpflaster im direkten Kirchenfeld zu benennen. Weiterhin wird der Betonsockel als problematisch eingeschätzt. Er sollte im Zusammenhang mit einer Putzerneruerung (bis über die Oberkante der aktuellen Schäden) abgenommen werden. Eine Salzproblematik kann aus den Messwerten nicht identifiziert werden.

3 Aktualisierte Empfehlungen

nach Bauberatung am 02.03.2017 vor Ort (Protokoll vom 07.03.2017)

3.1 Vorstellung bisher im Projektzeitraum ausgeführter Arbeiten

Herr Dipl.-Ing. Architekt, Andreas Rüdiger

- Erneuerung Sockelputz im Innenbereich ist geplant.
- Opferputz zur Salzminderung besteht seit April 2016.
- Anlage von Putzmusterflächen erfolgt in Frühjahr 2017. Zuarbeit Änderung zu bisherigen Mustervorschlägen / Zötzl
- Einbau einer umlaufenden Vertikalsperre auf Derton-Basis ist geplant. Diskutiert wird auch ein Einsatz im Innenbereich (?)
- Rissanker (Spannanker im oberen Wandbereich) wurden gesetzt.
- Fußbodenaufbau wird erneuert, eine auf Grund des kapillar-aktiven Auelehms notwendig werdende kapillarbrechende Schicht eingebaut, bisheriger Aufbau wird vorab untersucht.
- Ein separater Termin zum Thema Putzmusterflächen und Umgang mit der hochwasserbaulichen Anlage auf der Nordseite zwischen Damm und Kirche, vor Ort, mit Planer und IDK erfolgt noch im März. / Terminabsprache: Rüdiger und Zötzl
- Klärung Zustand und Weg der Regenwasserabführung an der Nordseite
- Maßnahmen sollen bis Ende 2018 beendet sein

3.2 Vorstellung der Empfehlungen passiver und aktiver Maßnahmen für den HW-Fall

Herr apl. Prof. Dr. Gossel, MLU

Die numerische Modellierung hat ergeben, dass der zunächst avisierte Plan einer passiven Abdichtung der Fundamente durch einen Dichtschiefer (leider) nicht den gewünschten Erfolg bringen wird. Daher sind aktive Maßnahmen durch Grundwasserpumpen notwendig.

Bei mittleren Wasserständen beträgt der Abstand des Grundwassers von den Fundamenten etwa 5,3 m, allerdings ist der kapillare Aufstieg im 2,2 m mächtigen Auelehm/-ton hier mit zu berücksichtigen.

- Leistung der Pumpen: Zusammen 30 bis 50 m³/h
- Empfehlung: Erstellung von zwei Entnahmebrunnen, DN 150, Anschaffung zweier Pumpen auf 220 V-Basis, je ca. 20 m³/h, und von zwei Notstromaggregaten
- Anschaffung eines passenden C-Schlauchs (ca. 50 m) mit einer entsprechenden Reichweite zur Einleitstelle
- Verzögerung vom Muldepegelanstieg zum Grundwasseranstieg: wird noch berechnet und geliefert.
- Ableitung des abgepumpten Wassers in den Vorfluter, ca. 30 - 40 m entfernt
- Anbindung des Grundwasseranstiegs Messstelle Gruna an den Pegel der Mulde in Bad Düben
- Daten sind im Internet abrufbar, händische Kontrollmessungen in der Messstelle Gruna (Messstelle Kirche) sind außerdem möglich.
- Eine genaue Angabe der konkreten Höhe des Alarmpegels der Mulde in Bad Düben wird durch MLU noch geliefert.

- Einsatz der Pumpen bei einer Erhöhung des Grundwasserpegels auf 1,80 m unter GOK (Fundamenttiefen der Kirche liegen bei ca. 120 cm unter GOK). Damit kann eine Berührung des Fundaments durch den Grundwasserpegel vermieden werden.
- Ein Richtwert für die Pumpzeit im Hochwasserfall mit Grundwasserstand 1,80 m unter GOK wird ebenfalls noch durch die MLU geliefert.
- Vorgeschlagene aktive Maßnahmen sollen Feuerwehr und Gemeinde vorgestellt werden.

- Erarbeitung einer Handlungsempfehlung für Notfälle (Notfallplan ist Auflage für Förderung)
- Bericht MLU wird nach Fertigstellung an Teilnehmer verteilt.

Die Risse am Bau entstanden wahrscheinlich durch Konsistenzänderung des Baugrunds (Auelehme/Tone) durch hochwasserbedingten Grundwasseranstieg. Daher ist die Installation einer aktiven Maßnahme zur Grundwasserabsenkung für das Bauwerk zusätzlich geeignet.

3.3 Weitere Ergebnisse

Herr apl. Prof. Dr. Gossel, MLU

Durchlässigkeiten

Die Durchlässigkeiten der erbohrten Schichten sind wie folgt:

"Oberer Auelehm" (0-2 m): $5 \cdot 10^{-6}$ m/s

"Feinsandhorizont im Auelehm" (2-3 m): $5 \cdot 10^{-5}$ m/s

"Unterer Auelehm" (3-3,7 m): $7 \cdot 10^{-6}$ m/s

"Sand-/Kies-Grundwasserleiter" (ab 3,70 m): $3 \cdot 10^{-4}$ m/s

Im Anhang der E-Mail finden Sie das Schichtenverzeichnis der Bohrung.

Zum Ausbau der beiden Brunnen (Südwest- und Südostseite der Kirche):

Die Rohrtouren sind aufgrund der Bohrerergebnisse wie folgt anzusetzen:

0-4 m Vollrohr DN 150 mm

4-6 m Filterrohr DN 150 mm

Kein Schlammfang

Oberirdischer Ausbau aufgrund der örtlichen Gegebenheiten am besten unter Flur mit quadratischem, befahrbarem Gusseisen-Deckel (ein Hydrantendeckel wird zu klein sein).

Eine Anpassung der Rohrtouren aufgrund der Bohrerergebnisse kann notwendig werden.

Die beiden Brunnen dürfen also nur im Bereich des Grundwasserleiters, also ab etwa 4 m u. GOK verfiltert werden, um Ausspülungseffekte zu vermeiden. Der Ringraum sollte nicht durch Bohrgut verfüllt werden sondern:

0-3,5 m Ton

3,5-4 m Filtersand (gewaschen)

ab 4 m Filterkies (gewaschen)

Nach Erstellung der beiden Brunnen sollten diese unbedingt freigespült/"entsandet" werden. Die Freispülung sollte alle 2-5 Jahre wiederholt werden, um zu gewährleisten, dass die Verockerung nicht die Funktion gefährdet.

Herr Dr. Liebau macht auf eine mögliche wasserrechtliche Fragestellung im Zusammenhang mit der Pumpstellung aufmerksam.

4 Raumklimamessungen

Die Raumklimamessungen erfolgen durch den Restaurator Herrn w. Sitte. Die Daten werden im Frühjahr 2018 ergänzt.

5 Hydrogeologischen Untersuchungen (GOSSEL, 2017), Auszug

5.1 Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse

5.1.1 Aktive Grundwasserbeeinflussungen

Der Einbau einer Pumpe ist technisch machbar. Es müssten zwei Brunnen erstellt werden, einer auf der Südost- und einer auf der Südwestseite.

Die Rohrtouren sind aufgrund der Bohrerergebnisse wie folgt anzusetzen:

0-4 m Vollrohr DN 150 mm

4-6 m Filterrohr DN 150 mm

Kein Schlammfang

Der oberirdische Ausbau sollte aufgrund der örtlichen Gegebenheiten am besten unter Flur mit quadratischem, befahrbarem Gusseisen-Deckel (ein Hydrantendeckel wird zu klein sein) gestaltet werden.

Eine Anpassung der Rohrtouren aufgrund der Bohrerergebnisse kann notwendig werden.

Die beiden Brunnen dürfen also nur im Bereich des Grundwasserleiters, also ab etwa 4 m u. GOK verfiltert werden, um Ausspülungseffekte zu vermeiden. Der Ringraum sollte nicht durch Bohrgut verfüllt werden sondern:

0-3,5 m Ton

3,5-4 m Filtersand (gewaschen)

ab 4 m Filterkies (gewaschen)

Nach Erstellung der beiden Brunnen sollten diese unbedingt freigespült/"entsandet" werden. Die Freispülung sollte alle 2-5 Jahre wiederholt werden, um zu gewährleisten, dass die Verockerung nicht die Funktion gefährdet.

Die bindigen Schichten werden als ein möglicher Grund für die Setzungen in einigen Teilen der Kirche angesehen. Die Problematik bindiger Schichten im Untergrund wird durch starke Grundwasserspannungen des darunter befindlichen Grundwasserleiters noch verstärkt, so dass auch die ingenieurgeologische Situation für eine Regulierung bei einem solch hohen Hochwasser wie im Juni 2013 spricht.

5.1.2 Passive Maßnahmen

Aus der eindimensionalen Modellierung ergibt sich, dass der Einbau einer kapillarbrechenden Schicht eine deutliche Verbesserung der Situation am Kirchenboden ergeben würde. Nach Auskunft des Architekten ist dies bereits geschehen.

5.1.3 Zusammenfassung

Die aktive Reduzierung des Grundwasserdruckspiegels im Hochwasserfall ist für die denkmalgeschützte Kirche in Gruna eine Maßnahme zur Vermeidung größerer Feuchtigkeitsschäden. Die Infrastruktur muss hierfür ausgebaut werden (Brunnen, Unterwasserpumpe und temporäre Ableitungsschläuche), aber sie ist nicht allzu aufwendig.

Passive Maßnahmen tragen wesentlich zu einer Verbesserung der gesamten Feuchtesituation in der Kirche bei, können jedoch die größeren Schäden im Hochwasserfall nicht vermeiden.

Aus ingenieurgeologischer Sicht ist die Untersuchung der Entkonsolidierung der bindigen Schichten im Untergrund im Hochwasserfall von Interesse. Obwohl dies nicht im Untersuchungsumfang des Forschungsprojekts enthalten ist, wird die MLU hier im Rahmen von Qualifikationsarbeiten weiter forschen. Die Ergebnisse sind jedoch erst in einigen Jahren zu erwarten. Sie werden aber auf die notwendigen Aktivitäten im Hochwasserfall keinen Einfluss haben.

5.1.4 Hinweise zum Notfallplan

Die Hinweise beziehen sich ausschließlich auf den Hochwasserfall ohne direkten Oberflächenwasserzutritt (z.B. durch Deichbruch).

Die aktiven Maßnahmen zur Grundwasserregulierung im Hochwasserfall sind für den Erhalt der Kirche sinnvoll und z.T. notwendig.

Zur Reduzierung des Wasserdrucks im Grundwasserleiter kann durch Pumpen in den beiden neu zu errichtenden Brunnen eine Wasserentnahme in der Größenordnung von je etwa 20-30 m³/h vorgesehen werden. Das Wasser ist über den an die Kirche angrenzenden Deich in die Mulde abzuleiten.

Die Reaktionszeit auf einen Hochwasserstand > 600 cm am Pegel Bad Düben beträgt aufgrund der Lage des Pegels unterstromig zum Ort Gruna nur max. 5 Stunden. Nach Rückgang des Hochwassers auf unter 600 cm am Pegel Bad Düben braucht die Pumpe nur max. 24 Stunden weiter betrieben zu werden.

6 Literatur

Arendt, C.& Seele, J. (2000): Feuchte und bauschädliche Salze an Gebäuden, Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinefelden-Echterdingen.

Grassegger, G. (1997): Die Verwitterung von Natursteinen an Bauten und Baudenkmalern, In: Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege, Hrsg. Berufsbildungswerk des Steinmetz und Bildhauerwerks e.V., Ebner Verlag Ulm, 53 S..

Gossel, W. (2017) Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gottesgnaden im Rahmen des Projekts "Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt",

MEINHARDT, J. (2016) Gruna, Kirche - Mauerwerksuntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Grundwasser“, IDK-Untersuchungsbericht HAL 20/2016, 9 S.

Protokoll zur Projektberatung am 02.03.2017

Steiger, M., Neumann, H.-H., Grodten, T., Wittenburg, C., Dannecker, W. (1998): Salze in Natursteinmauerwerk - Probenahme, Messung und Interpretation. In R. Sneathlage, Ed. Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II, Stuttgart, S. 61-91.

WTA-Merkblatt 4-5-99/D „Mauerwerksdiagnostik“

Bericht zur hydrogeologischen Modellierung der denkmalgeschützten Kirche Gruna bei Laußig (Sachsen)
im Rahmen des Projekts
"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiege am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"



Auftraggeber: Evangelische Kirche Mitteldeutschland

Auftragnehmer: Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Projektauftrag	4
1.2	Hintergrund des Projektes	4
1.3	Ziel des Projektes Gruna	4
1.4	Arbeitsablauf	5
2	Datengrundlagen	7
2.1	Geologische und hydrogeologische Übersicht	7
2.2	Hydrologische Übersicht	9
3	Auswertung der Messergebnisse	10
3.1	Bohrgutansprache	10
3.2	Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten	11
3.3	Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität	11
4	Modellierungswerkzeug	12
5	Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung	12
5.1	Randbedingungen	12
5.2	Parameter	12
5.3	Kalibrierung	12
5.4	Szenarien	13
6	Zweidimensionale Modellierung als Profilschnitt mit ungesättigter Zone	13
6.1	Randbedingungen	13
6.2	Parameter	14
6.3	Plausibilitätsprüfung	14
7	Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse	14
7.1	Aktive Grundwasserbeeinflussungen	14
7.2	Passive Maßnahmen	14
8	Zusammenfassung	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche Gruna	6
Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte HK400 1 : 400 000, unmaßstäbliche Vergrößerung.....	8
Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände UP Schleuse Calbe mit den Grundwasserständen Kirche Gottesgnaden (Skalierung zur besseren Vergleichbarkeit angepasst)	9
Abbildung 4: Bohrprofil der Grundwassermessstelle an der Kirche Gruna.....	11
Abbildung 5: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy TDO 1/15 (Kirche Gruna).....	13

1 Einleitung

1.1 Projektauftrag

Der Auftrag zur hydrogeologischen Bewertung von Hochwassereinflüssen auf ausgewählte Kirchen in Sachsen-Anhalt sowie Ausarbeitungen von Strategien zur Vermeidung von Schäden bei künftigen Hochwasserereignissen wurde gemäß Angebot am 27.07.2015 vergeben. In diesem Auftrag ist vorgesehen, Grundwassermessstellen einzurichten, regelmäßig Grundwasserstände zu messen, die Messungen auszuwerten und die hydrogeologische Situation zur Ableitung von Präventionsmaßnahmen numerisch zu modellieren. Hierfür wurden zunächst die verfügbaren Schichtenverzeichnisse und hydrogeologischen Karten des Landesamtes für Geologie und Bergwesen sowie die Hochwasserkarten des Landesbetriebs für Hochwasserschutz genutzt. Der vorliegende Modellierungsbericht zur denkmalgeschützten Kirche Gruna bei Laußig umfasst die Modellierungsergebnisse der numerischen Modellen auf der Basis der Erstauswertung der Grundwasserstandsmessungen von Oktober 2015 bis Oktober 2016.

1.2 Hintergrund des Projektes

In den Bundesländern Sachsen und Sachsen-Anhalt sind an einigen denkmalgeschützten Kirchen nach dem Hochwasser 2013 Wasserschäden aufgetreten, die nicht direkt auf den Einfluss von Oberflächenwasser zurückgeführt werden können. Dies sind einerseits witterungsbedingte Schäden, die im vorliegenden Projekt nur eine untergeordnete Rolle spielen, und andererseits Schäden, die auf Grundwasseranstiege zurückzuführen sind. Die Beziehung zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser an den betroffenen Denkmälern soll daher in diesem Projekt genauer untersucht und Möglichkeiten der Vermeidung durch Modellierung verschiedener möglicher Präventionsmaßnahmen gefunden werden. Eine der sechs untersuchten Kirchen liegt bei Laußig in Sachsen, die Kirche Gruna, und das Charakteristische bei dieser Kirche sind Wechsellagerungen von Auelehmen und -töne mit Sanden, die im Hochwasserfall zu einem kapillaren Aufstieg aufgrund der hochwasserinduzierten hohen Druckspiegel bis weit in den Bereich der Gründungsfundamente hinein führen. Das Projekt dieser Kirche hat insofern Modellcharakter, als diese hydrogeologische Situation an mehreren denkmalgeschützten Bauten auftreten kann, jedoch nur selten in dem hier sichtbaren Ausmaß zu Schäden führt.

1.3 Ziel des Projektes Gruna

Die Grundwasseruntersuchungen sind auf die Beobachtung, Analyse und Modellierung der Oberflächenwasser-Grundwasser-Wechselwirkung ausgerichtet. Die Schäden hochwasserbedingter Grundwasseranstiege an den ausgewählten Denkmälern sollen künftig vermieden werden. Hierfür sollen sowohl passive als auch aktive Maßnahmen zur Grundwasserstandsregulierung untersucht werden, wobei die Nachhaltigkeit der Maßnahmen unter mehreren Aspekten betrachtet werden soll. Die Kirche in Gruna ist hierfür aufgrund der geologischen und hydrodynamischen Gegebenheiten gut geeignet. Das Ziel ist, möglichst wartungsarme und mit geringem technischem Aufwand durchzuführende Sanierungs- und Präventionsmaßnahmen auszuarbeiten.

1.4 Arbeitsablauf

Basierend auf den zunächst notwendigen Recherchen beim Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt und den Daten des Landes Sachsen wurden zunächst die Geländearbeiten zur Bestimmung der lokalen geologischen Verhältnisse, zur Einrichtung einer Grundwassermessstelle und zur quasikontinuierlichen Messung von Grundwasserständen durchgeführt.

Auf Grundlage der Grundwasserstandmessungen von Oktober 2015 bis September 2016 mit einer durch technischen Ausfall bedingten Lücke 06.06.2016 - 06.07.2016 konnten die Analysen der Oberflächenwasser - Grundwasser - Interaktion die erforderlichen hydraulischen Parameter für die numerische Grundwassermodellierung liefern. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden zwei unterschiedliche Modelle erstellt:

1. Ein dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell, das die Druckhöhen der lokalen Grundwasserspiegel im Hochwasserfall Anfang Juni 2013 lieferte.
2. Ein zweidimensionales Profilschnittmodell der ungesättigten und gesättigten Zone, das die Auswirkungen des erhöhten Druckspiegels auf den kapillaren Aufstieg zeigen sollte.
3. Ein dreidimensionales Modell, das die Möglichkeiten der Sanierung und der präventiven Maßnahmen untersuchen soll.

Als Überblick ist in Abbildung 1 der Arbeitsablauf für dieses Objekt dargestellt.

Arbeitsplan zum Projekt												
"Evaluierung von Strategien zur Vermeidung von Schäden durch hochwasserabhängige Grundwasseranstiegen am Beispiel national bedeutender Kirchen in Sachsen-Anhalt"												
Kirche Gruna bei Laußig (Sachsen)												
	2015				2016				2017			
Arbeitsaufgabe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Messung der Abhängigkeiten Grundwasserstand-Oberflächenwasserstand												
Erfassung der hydrologischen und geologischen Verhältnisse auf Basis von Karten und Aktenmaterial (Historische Untersuchung)	X											
Einholung von Genehmigungen zum Abteufen von Kleinrammbohrungen 80 mm und Einbau von Grundwassermessstellen 50 mm		X										
Erstellung von 1-3 Grundwassermessstellen im direkten Umfeld der Kirchen		X	X									
Slug&Bail Tests zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters		X	X									
Erstellung und Einbau automatischer Datenlogger zur stündlichen Erfassung von Grundwasserständen (evtl. mit Datenfernübertragung)		X	X									
Messung der Grundwasserstände		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Grundwasserprobenahme und Analyse der Hauptinhaltsstoffe des Grundwassers		X	X									
Statistische Analyse der Abhängigkeiten des Grundwasserstandes von meteorologischen und hydrologischen Einflüssen							X				X	
Ansätze zur analytischen Prozessmodellierung							X					
Zwischenbericht Messstellenaufbau, Geologie und Hydrochemie					X							
Zwischenbericht statistische Analysen und analytische Prozessmodellierung								X				X
Aufbau standortbezogener numerischer Grundwassermodelle												
Abgrenzung der 6 Modellgebiete anhand plausibler hydrologischer Randbedingungen				X								
Aufbau der Grundwasserleiter-/geringleiter-Strukturen				X	(X)							
Selektion von Standorten, an denen eine 2D-Vertikalschnittmodellierung für die ungesättigte Zone notwendig ist				X	X							
Diskretisierung der Modellgebiete unter numerischen Stabilitätskriterien					X							
Stationäre Modellkalibrierung für mittlere Strömungsverhältnisse						X						X
Instationäre Modellkalibrierung anhand der Grundwasserstandsmessungen								X				X
Entwicklung von Hochwasserszenarien für die einzelnen Standorte						X			X			
Instationäre Berechnung der Hochwasserszenarien 3D Strömungsmodelle						X			X			
Instationäre Berechnung von Hochwasserszenarien Vertikalmodelle							X			X		
Zwischenbericht Modellierungsergebnisse							X					
Ableitung standortbezogener hydraulischer Vorsorgemaßnahmen												
Modellierung mit passiven Vorsorgemaßnahmen zur Reduktion von Hochwassereinflüssen											X	
Modellierung mit aktiven Vorsorgemaßnahmen zur temporären Regulierung des Grundwasserstandes											X	
Optimierung der standortbezogenen Maßnahmen auf der Grundlage der Modellierungsergebnisse											X	X
Abschlussbericht												X

Abbildung 1: Übersicht des Arbeitsablaufs Teilprojekt Kirche Gruna

2 Datengrundlagen

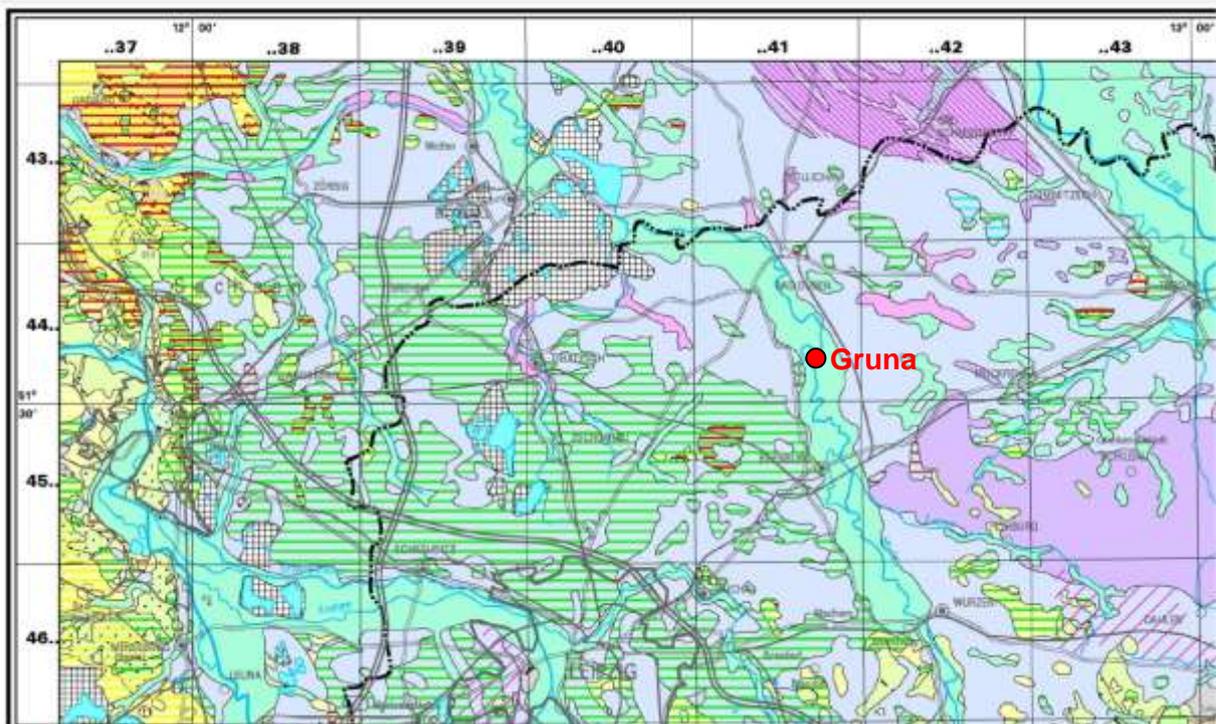
Die numerischen Grundwassermodelle wurden auf der Basis folgender Unterlagen erstellt:

1. Grundwassergefährdungskarte 1 : 50.000 des Sächsischen LfUG.
2. Wasserstandsmessungen an den Oberflächengewässern: 15-minütige Wasserstandsdaten des etwa 20 km stromabwärts gelegenen Pegels Bad Düben liegen für den gesamten relevanten Zeitraum 2013-2016 vor und konnten bei der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung berücksichtigt werden. Der stromaufwärts gelegene Pegel Golzern ist nochmals wesentlich weiter als Bad Düben entfernt.
4. Bohrungen, Grundwasserstandsmessungen und Grundwasserprobenahme vor Ort haben erstens den lokalen Bodenaufbau gegenüber den Kartenwerken konkretisiert, zweitens die erforderlichen Daten für die Modellierung geliefert und drittens auch bei der Beurteilung von Baumaßnahmen und Planung für anstehende Baumaßnahmen geholfen.

2.1 Geologische und hydrogeologische Übersicht

Das Untersuchungsgebiet Gruna liegt aus strukturgeologischer Sicht im östlichen Teil des Mitteleuropäischen Schollengebiets (HENNINGSEN & KATZUNG 2006, BACHMANN & SCHWAB 2008). Der in größerer Tiefe anstehende Festgesteinsuntergrund spielt für die Untersuchungen nur eine untergeordnete Rolle und wird hier nicht weiter berücksichtigt.

Über dem Festgestein wird im HK400 die Grundwasserleiter/-geringleiterstruktur mit Sanden und Kiesen der Flussauen - hier Mulde - unter Auenlehmbedeckung beschrieben. Die Grundwasserverhältnisse seien oft gespannt, was aber für die vorliegende Lokalität nur bedingt zutrifft (s. Abbildung 2).



Lockergesteine (Porengrundwasserleiter)

Quartäre Grundwasserleiter

- Sande und Kiese der Flussauen und Niederungen unter Auenlehmbedeckung, überwiegend gespannt
- Sande und Kiese der Flussauen und Niederungen, lokal mit Dünen sandbedeckung, ungespannt
- Schluffe und Sande der Endmoränen mit sehr wechselhaften hydrodynamischen Verhältnissen

Tertiäre Grundwasserleiter

- Schluffe, Sande und Kiese in Wechselagerung mit Braunkohleflözen, überwiegend ungespannt

Festgesteine (Kluftgrundwasserleiter)

- Grundwasserführung in Gesteinen mit mäßigen bis hohen Durchlässigkeiten (Grundwasserleiter)
- Grundwasserführung in Gesteinen mit meist geringen bis mäßigen oder örtlich stark wechselnden Durchlässigkeiten (Grundwasserleiter/Grundwasserleiter)
- Grundwasserführung in Gesteinen mit geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten (Grundwasserleiter)

Charakteristik der Deckschichten (> 2m)

Quartäre Deckschichten

- Gehängelehm/Hangeschutt
- Löss und Lösslehm
- Geschiebemergel bzw. -lehm
- Glazi-limnische Ablagerungen (Schluff, Ton, Sand)

Tertiäre Deckschichten

- Schluffe, Tone, Feinsande und Braunkohle

Impressum

Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie
 - Abteilung Boden und Angewandte Geologie
 Referat Hydrogeologie
 Postfach 10001 32, 01101 Dresden

Autorität: M. Hübner, R. Schöler, L. Anner, C. Heise

GIS: U. Gade

Verantwortlich: A. Dörmann-Gade

Textredaktion: M. Hübner, F. Höpfer

Druck und Vertrieb: Landesvermessungsamt Sachsen, Postfach 10002 33, 01002 Dresden

Hydrogeologische Besonderheiten für das Fließgeschehen

- Tagebaue/Devastierung
- Aufschüttungen/Deponien/Spülhalden
- Oberflächengewässer einschließlich Tagebaurestseen
- Nieder- und Hochmoore
- hydraulisch wirksamer Porenanteil mit untergeordneter Bedeutung für das Fließgeschehen
- hydraulisch wirksamer Porenanteil mit hoher Bedeutung für das Fließgeschehen ("Sächsische Kreide")
- Randpleistozän mit lokaler Bedeutung als Hauptgrundwasserleiter im Bereich von Hochflächen und Tälern, überwiegend ungespannt
- Randtertiär mit lokaler Bedeutung als Hauptgrundwasserleiter
- gestörte Hydrodynamik durch tiefgreifende glaziale Stauchungen
- gestörte Hydrodynamik durch untertägigen Bergbau/Tiefbau (anthropogene Kommunikationsbereiche)
- geologische Störung; sicher
- geologische Störung; vermutet

Abbildung 2: Ausschnitt der Übersichtskarte HK400 1 : 400 000, unmaßstäbliche Vergrößerung.

2.2 Hydrologische Übersicht

Die Hydrologie der in einer Flussschleife der Mulde gelegenen Kirche wird dominiert von der abstromig liegenden Schleuse Bad Düben. Der Kern der Flussschleife, auf dem auch Gruna liegt, liegt etwa 5,5 Meter über dem mittleren Wasserspiegel der Mulde. Hierdurch wird die Ortschaft auch bei einem 200-jährigen Hochwasser nicht vollständig geflutet, allerdings bleiben nach Modellierungen des Landes Sachsen nur wenige m² über dem modellierten Wasserstand.

Die Grundwasserneubildung spielt für das Strömungsgeschehen eine deutlich untergeordnete Rolle. Die jährliche Grundwasserneubildungsrate liegt bei etwa 50-100 mm/a, was insbesondere an den gering durchlässigen Deckschichten liegt. Das meiste oberirdisch abfließende Wasser wird über Gräben und die Kanalisation gefasst.

In der Abbildung 3 ist der Zusammenhang zwischen den Oberflächen- und Grundwasserständen deutlich zu sehen.

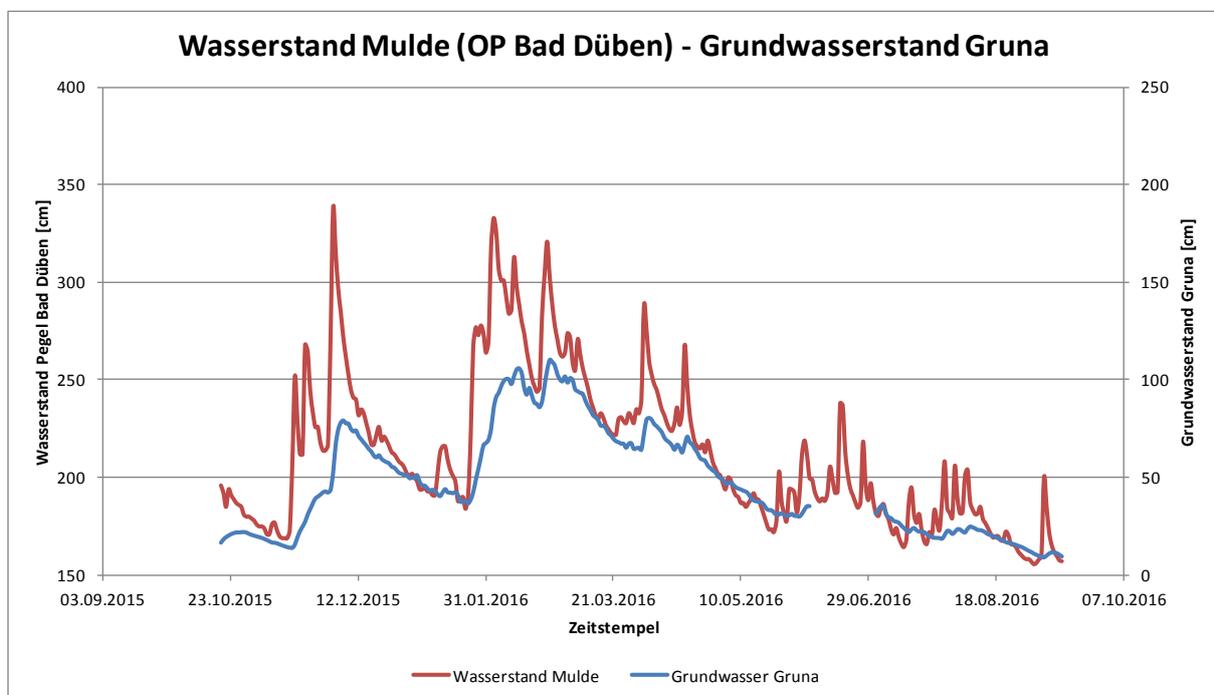


Abbildung 3: Vergleich der Oberflächenwasserstände UP Schleuse Calbe mit den Grundwasserständen Kirche Gottesgnaden (Skalierung zur besseren Vergleichbarkeit angepasst)

Die Zeitverschiebung zwischen den Oberflächenwasserständen und den Grundwasserständen konnte zur Identifikation der hydraulischen Leitfähigkeit und der Transmissivität genutzt werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass der Pegel Bad Düben ca. 20 km stromabwärts liegt. Der nächste Pegel stromaufwärts (Golzern) ist nicht nur noch weiter entfernt, sondern es sind von dort (ebenfalls) die Werte des Oberpegels im Internet zu finden, so dass diese Online-Information nicht für den Standort Gruna genutzt werden kann.

3 Auswertung der Messergebnisse

Zur Auswertung der Messergebnisse wurden mehrere Verfahren eingesetzt: Das Bohrgut wurde in Hinblick auf die hydraulische Durchlässigkeit ausgewertet, die Druckverhältnisse im Grundwasser gaben Anhaltspunkte über den Speicherkoeffizienten und die Grundwasser- und Oberflächenwasserganglinie konnten zur genaueren Eingrenzung der hydraulischen Durchlässigkeit eingesetzt werden. In Gottesgnaden wurden weder Kurzzeit-Pumpversuche noch Slug&Bail-Tests durchgeführt.

3.1 Bohrgutansprache

Der bedeckende, insgesamt 3,70 mächtige Grundwassergeringleiter wird als sehr gering durchlässig mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von etwa 10^{-6} m/s angesehen (s. Abbildung 4). Innerhalb dieser Schicht ist von 2 bis 3 m unter GOK ein feinsandiger Bereich eingeschaltet, der nur wenig unter der Fundamentsohle der Kirche lokalisiert ist. Dieser Sand ist ein mäßig guter Grundwasserleiter, im Falle eines Hochwassers jedoch strömungswirksam. Hierdurch kommt es zu einem starken Vordringen des Grundwasserdruckspiegels und über kapillaren Aufstieg auch im Falle geringer ausfallender Hochwässer zu einer Durchfeuchtung der Fundamente. Darüber hinaus bewirkt ein in diesen Sand eindringendes Hochwasser eine Destabilisierung der darüber liegenden Schluffe und Tone. Die Gründung des Gebäudes wird somit ebenfalls destabilisiert, was sich in Rissen äußert. Der unter einem weiteren 0,7 m mächtigen Ton liegende Grundwasserleiter besteht aus Sanden und Kiesen, die k_f -Werte im Bereich 10^{-4} - 10^{-3} m/s aufweisen.

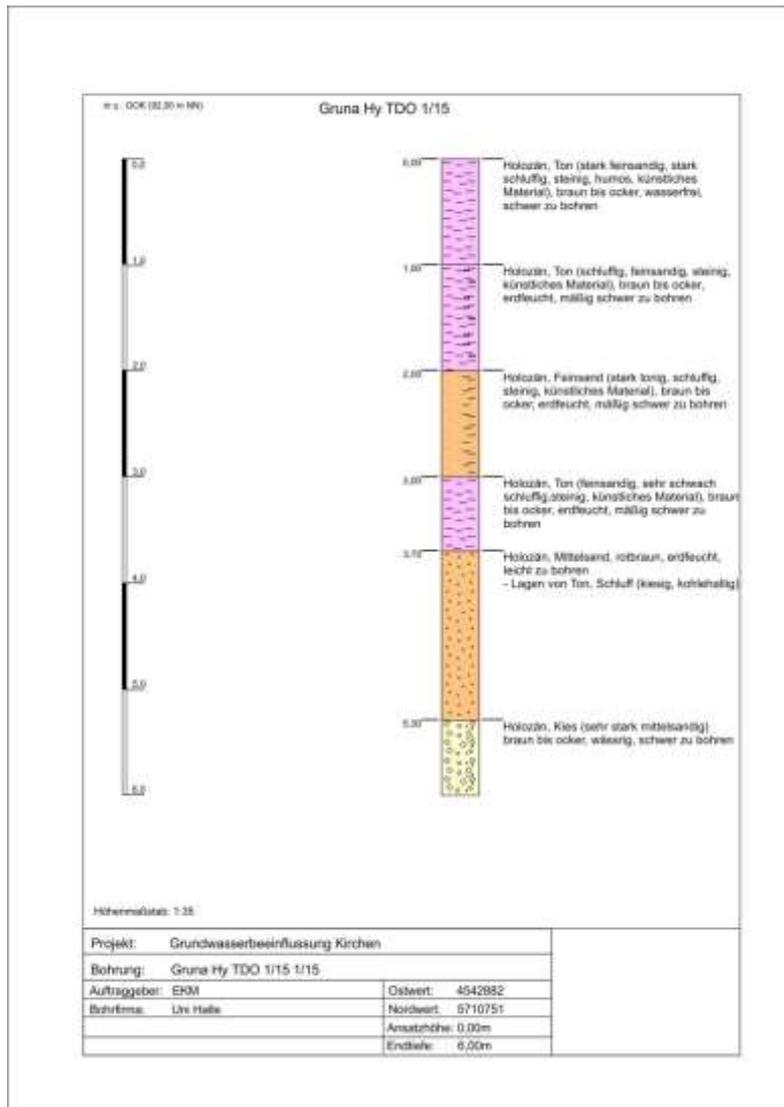


Abbildung 4: Bohrprofil der Grundwassermessstelle an der Kirche Gruna

3.2 Druckverhältnisse und Speicherkoeffizienten

Der Grundwasserleiter steht deutlich unter Druck (gespannte Verhältnisse), wobei natürlich die Drücke abhängig von der nahegelegenen Mulde, aber auch den von Osten kommenden Grundwasserzuflüssen dominiert werden. Die Reaktion zwischen Oberflächen- und Grundwasserspiegel zeigt zudem an, dass die Speicherkoeffizienten sehr gering sind. Üblicherweise liegen die Speicherkoeffizienten hier bei $3 \cdot 10^{-3}$.

3.3 Hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität

Die hydraulische Durchlässigkeit sowie die Transmissivität wurden über die Auswertung der Ganglinien von Grund- und Oberflächenwasser großräumig bestimmt. Dies ermöglicht eine wesentlich weitreichendere Parameteridentifikation als die Kurzzeit-Pumpversuche oder die Slug&Bail-Tests.

Hydraulische Durchlässigkeit: $5 \cdot 10^{-4}$ m/s

Transmissivität: $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s

Die Ergebnisse liegen im Bereich der Schätzungen nach Bohrgutansprache und sind daher plausibel. Da die Sohle des Grundwasserleiters nicht erbohrt wurde, wurde die Mächtigkeit pauschal mit 10 m angenommen.

4 Modellierungswerkzeug

Die Erstellung der drei beschriebenen Modelle wurde mit dem Werkzeug Feflow (R) durchgeführt: Sowohl für die dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung mit einer geringen vertikalen Auflösung als auch für das zweidimensionale Modell mit ungesättigter Zone konnte dieses Werkzeugs genutzt werden.

Das Werkzeug Feflow(R) (Diersch 2014) ist ein universelles Werkzeug zur Modellierung der Grundwasserströmung und des Transports von gelösten Stoffen im Grundwasser. Auf die Einzelheiten soll hier nicht eingegangen werden. Das Werkzeug ist in vielen Projekten weltweit getestet worden und wird vom Fachgebiet Hydro- und Umweltgeologie seit Jahrzehnten für ähnlich gelagerte Fragestellungen eingesetzt. Leider ist das Werkzeug nicht OpenSource, so dass die erstellten Modell nur mit vorhandener Lizenz verarbeitet werden können.

5 Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodellierung

5.1 Randbedingungen

Die hydrologischen Randbedingungen für dieses kleine Grundwassermodell sind schnell beschrieben: Die Ortschaft Gruna wird an drei Seiten umgeben von der Mulde, die als Dirichlet-Randbedingungen ins Modell übernommen wird. Eine generische Wasserstandsganglinie dient der Ermittlung der Grundwasserdruckspiegel, wie sie im Hochwasserfall Anfang Juni 2013 geherrscht hat. Im Osten wurde ein konstanter Grundwasserspiegel im Bereich der Niederung modelliert. Da keine Informationen über Brunnen vorliegen und die gemessene Grundwasserganglinie keine Einflüsse von Grundwasserentnahmen zeigt, wurden keine weiteren Randbedingungen festgelegt.

5.2 Parameter

Die hydrogeologischen Parameter sind ebenfalls recht leicht zu beschreiben. Für die Schluff-/Tonschichten wurden Durchlässigkeitsbeiwerte von $5 \cdot 10^{-6}$ m/s eingesetzt, für die Feinsandschicht $5 \cdot 10^{-5}$ m/s und für den Sand-/Kies-Grundwasserleiter $3 \cdot 10^{-4}$ m/s.

5.3 Kalibrierung

Aufgrund der detaillierten Grundwasser- und Oberflächenwasserstandsmessungen konnte das Modell gut kalibriert werden. Es wurde der Zeitabschnitt 20.10.2015 bis 17.2.2016 kalibriert, um eine Grundlage für die Szenarienberechnung im Hochwasserfall zu gewinnen. Damit wurden die höchsten Wasserstände des Jahres Oktober 2015 bis Oktober 2016 erfasst. Die Ergebnisse der Kalibrierung für einen mittleren Wasserstand (Median) sowie die Grundwasserdruckspiegel für das Hochwasser Anfang Juni 2013 zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Grundwasserganglinien der Messungen und des kalibrierten Modells sind in Abbildung 5 zum Vergleich einander gegenübergestellt. Hierzu ist anzumerken, dass keinerlei Wetterdaten mit eingeflossen sind, die sich zusätzlich zu den Oberflächenwasserständen auf die Dynamik auswirken. Der Einfluss wird aufgrund der ansonsten deutlich wiedergegebenen Wasserstandsganglinie vernachlässigt.

Die Parameterbelegung im kalibrierten Modell gestaltet sich wie folgt:

"Oberer Auelehm" (0-2 m): $5 \cdot 10^{-6}$ m/s

"Feinsandhorizont im Auelehm" (2-3 m): $5 \cdot 10^{-5}$ m/s

"Unterer Auelehm" (3-3,7 m): $7 \cdot 10^{-6}$ m/s

"Sand-/Kies-Grundwasserleiter" (ab 3,70 m): $3 \cdot 10^{-4}$ m/s
 Im Anhang finden Sie das Schichtenverzeichnis der Bohrung.

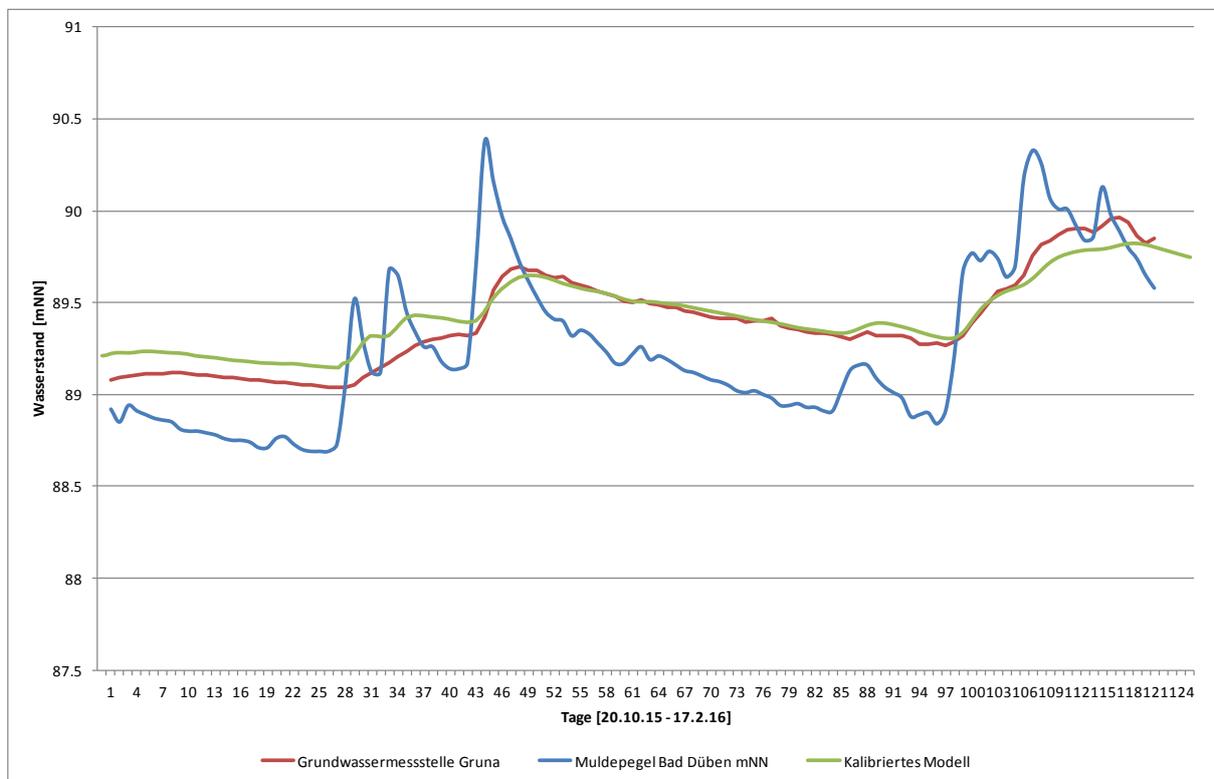


Abbildung 5: Gemessene und modellierte Grundwasserganglinien an der Grundwassermessstelle Hy TDO 1/15 (Kirche Gruna)

5.4 Szenarien

Das wichtigste Szenario war der Hochwasserfall Juni 2013, für den auch die Messwerte für die Randbedingungen vorlagen. Hieraus ergibt sich, dass der Grundwasserdruckspiegel nur wenige cm unter Flur lag. Dieser Druckspiegel gibt trotz der Bedeckung des Grundwasserleiters in Form der etwa 3,7 m mächtigen Schluff- und Tonschicht in etwa die Grundwasseroberfläche wieder. Die starke Druckspannung führt auf jeden Fall zu einem verstärkten kapillaren Aufstieg. Eine Absenkung des Druckspiegels durch aktive Maßnahmen im Hochwasserfall ist aufgrund der starken Spannung unmittelbar wirksam und es werden größere Absenktrichter als im ungespannten Fall erzeugt. Diese Maßnahme kann hier erfolversprechend eingesetzt werden, denn die abgepumpten Wassermengen können direkt über den Deich gepumpt werden.

6 Zweidimensionale Modellierung als Profilschnitt mit ungesättigter Zone

6.1 Randbedingungen

Der Modellausschnitt wurde hier so gewählt, dass er durch die hydrologischen Randbedingungen der Mulde begrenzt wird. Die Wasserstände am Pegel Bad Düben wurden mit einem dem mittleren Gefälle entsprechenden Zuschlag versehen und die Zeitverzögerung berücksichtigt.

6.2 Parameter

Für die Berechnungen der ungesättigten Zone sind eine Reihe von Parametern zu setzen, die aus den Standard-Parametersätzen des Modellierungswerkzeugs generiert wurden. Gleichzeitig erfolgte ein Abgleich mit den Werten im Modellierungswerkzeug Hydrus1D.

6.3 Plausibilitätsprüfung

Eine detaillierte Kalibrierung des Modells konnte nicht durchgeführt werden, da dies eine lange Zeitreihe von einer Vielzahl bodenkundlicher Messgrößen erfordert hätte. Der Einbau von TDR-Sonden zur Messung der Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen einschl. Datenloggern zur Erfassung der zeitlichen Variabilität war finanziell und organisatorisch (Überwachung der Messeinrichtungen) aus dem Projekt heraus nicht leistbar. Das Modell wurde daher nur auf Plausibilität geprüft.

7 Empfehlungen auf Basis der Modellergebnisse

7.1 Aktive Grundwasserbeeinflussungen

Der Einbau einer Pumpe ist technisch machbar. Es müssten zwei Brunnen erstellt werden, einer auf der Südost- und einer auf der Südwestseite.

Die Rohrtouren sind aufgrund der Bohrerergebnisse wie folgt anzusetzen:

0-4 m Vollrohr DN 150 mm

4-6 m Filterrohr DN 150 mm

Kein Schlammfang

Der oberirdische Ausbau sollte aufgrund der örtlichen Gegebenheiten am besten unter Flur mit quadratischem, befahrbarem Gusseisen-Deckel (ein Hydrantendeckel wird zu klein sein) gestaltet werden.

Eine Anpassung der Rohrtouren aufgrund der Bohrerergebnisse kann notwendig werden.

Die beiden Brunnen dürfen also nur im Bereich des Grundwasserleiters, also ab etwa 4 m u. GOK verfiltert werden, um Ausspülungseffekte zu vermeiden. Der Ringraum sollte nicht durch Bohrgut verfüllt werden sondern:

0-3,5 m Ton

3,5-4 m Filtersand (gewaschen)

ab 4 m Filterkies (gewaschen)

Nach Erstellung der beiden Brunnen sollten diese unbedingt freigespült/"entsandet" werden. Die Freispülung sollte alle 2-5 Jahre wiederholt werden, um zu gewährleisten, dass die Verockerung nicht die Funktion gefährdet.

Die bindigen Schichten werden als ein möglicher Grund für die Setzungen in einigen Teilen der Kirche angesehen. Die Problematik bindiger Schichten im Untergrund wird durch starke Grundwasserspannungen des darunter befindlichen Grundwasserleiters noch verstärkt, so dass auch die ingenieurgeologische Situation für eine Regulierung bei einem solch hohen Hochwasser wie im Juni 2013 spricht.

7.2 Passive Maßnahmen

Aus der eindimensionalen Modellierung ergibt sich, dass der Einbau einer kapillarbrechenden Schicht eine deutliche Verbesserung der Situation am Kirchenboden ergeben würde. Nach Auskunft des Architekten ist dies bereits geschehen.

8 Zusammenfassung

Die aktive Reduzierung des Grundwasserdruckspiegels im Hochwasserfall ist für die denkmalgeschützte Kirche in Gruna eine Maßnahme zur Vermeidung größerer Feuchtigkeitsschäden. Die Infrastruktur muss hierfür ausgebaut werden (Brunnen, Unterwasserpumpe und temporäre Ableitungsschläuche), aber sie ist nicht allzu aufwendig.

Passive Maßnahmen tragen wesentlich zu einer Verbesserung der gesamten Feuchtesituation in der Kirche bei, können jedoch die größeren Schäden im Hochwasserfall nicht vermeiden.

Aus ingenieurgeologischer Sicht ist die Untersuchung der Entkonsolidierung der bindigen Schichten im Untergrund im Hochwasserfall von Interesse. Obwohl dies nicht im Untersuchungsumfang des Forschungsprojekts enthalten ist, wird die MLU hier im Rahmen von Qualifikationsarbeiten weiter forschen. Die Ergebnisse sind jedoch erst in einigen Jahren zu erwarten. Sie werden aber auf die notwendigen Aktivitäten im Hochwasserfall keinen Einfluss haben.

Hinweise zum Notfallplan

Die Hinweise beziehen sich ausschließlich auf den Hochwasserfall ohne direkten Oberflächenwasserzutritt (z.B. durch Deichbruch).

Die aktiven Maßnahmen zur Grundwasserregulierung im Hochwasserfall sind für den Erhalt der Kirche sinnvoll und z.T. notwendig.

Zur Reduzierung des Wasserdrucks im Grundwasserleiter kann durch Pumpen in den beiden neu zu errichtenden Brunnen eine Wasserentnahme in der Größenordnung von je etwa 20-30 m³/h vorgesehen werden. Das Wasser ist über den an die Kirche angrenzenden Deich in die Mulde abzuleiten.

Die Reaktionszeit auf einen Hochwasserstand > 600 cm am Pegel Bad Düben beträgt aufgrund der Lage des Pegels unterstromig zum Ort Gruna nur max. 5 Stunden. Nach Rückgang des Hochwassers auf unter 600 cm am Pegel Bad Düben braucht die Pumpe nur max. 24 Stunden weiter betrieben zu werden.