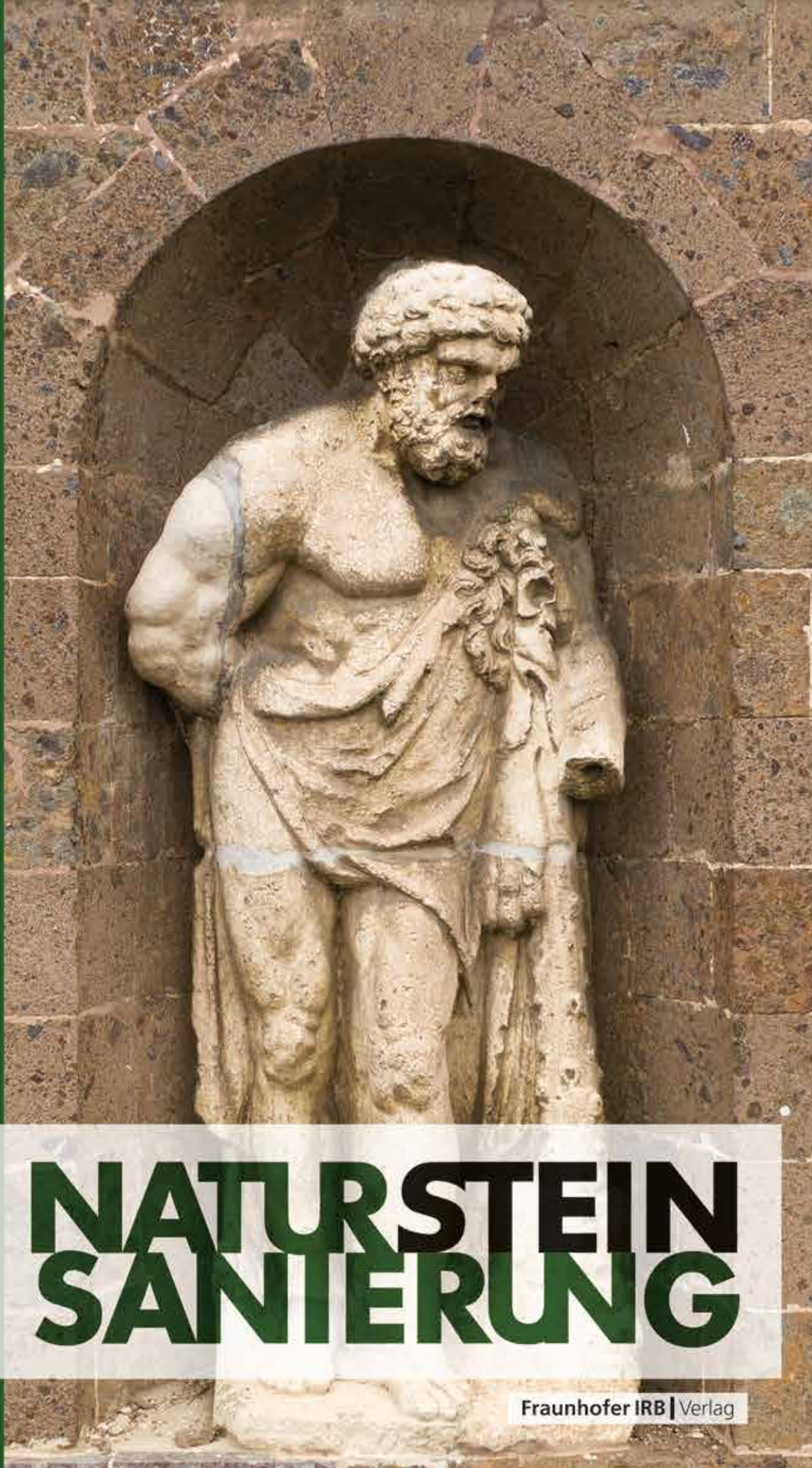


Tagung 11./12. März 2022 in Karlsruhe und Breisach/Rhein



**2022**

# **NATURSTEIN SANIERUNG**

Fraunhofer IRB | Verlag



Gabriele Patitz, Karin Schinken (Hrsg.)

# NATURSTEINSANIERUNG 2022

**Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse,  
messtechnische Erfassungen  
und Sanierungsbeispiele**

Tagung am 11./12. März 2022 in Karlsruhe/Breisach am Rhein

## **Herausgeber**

Dr.-Ing. Gabriele Patitz  
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe  
Telefon: (0721) 3 84 41 98  
E-Mail: info@natursteintagung.de  
www.natursteintagung.de

Karin Schinken, M.A.  
Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart  
Referat Spezialgebiete - Fachbereich Restaurierung  
Berliner Straße 12, 73728 Esslingen am Neckar  
Telefon: (0711) 90 44 54 28  
E-Mail: karin.schinken@rps.bwl.de

## **Lektorat**

Dr. Steffie Gawlik – Karlsruhe

## **Herstellung**

Angelika Schmid

## **Layout und Satz**

Manuela Gantner | Punkt, STRICH. – Karlsruhe

## **Druck und Bindung**

DCC Kästl e. K., Ostfildern

## **Einband**

Foto: © Christoph und Markus Steffen, Landesamt für Denkmalpflege im RP Stuttgart

## **1. Auflage**

2022 Fraunhofer IRB Verlag,  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de  
www.baufachinformation.de

ISBN (Print): 978-3-7388-0710-3

ISBN (E-Book): 978-3-7388-0711-0

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung von Frau Dr. Patitz und Frau Schinken unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Warenbezeichnungen, Handels- oder Gebrauchsnamen sind nicht als frei im Sinne der Markenschutz- und Warenzeichengesetze zu betrachten. Dies gilt auch dann, wenn sie nicht eigens als geschützte Bezeichnungen gekennzeichnet sind.

Für den Inhalt der Beiträge und die Rechte an den verwendeten Abbildungen sind die Autoren verantwortlich.

# Statische Sicherung der einsturzgefährdeten Friedhofsmauer und des Kirchturms St. Petronilla in Kiechlinsbergen



*Starke Rissbildungen im Bereich des Turms der Kirche St. Petronilla in Kiechlinsbergen und fortschreitende Verformungen der umgebenden Friedhofsmauer erforderten 2017 eine Kirchenschließung. Zur Ursachenfindung wurden messtechnische Beobachtungen und eine Baugrunderkundung durchgeführt. Rückrechnungen zur Standsicherheit des Kirchturms und der Friedhofsmauer haben ergeben, dass diese beiden Bauwerke in Interaktion stehen und einsturzgefährdet sind. Eine umfassende Sanierung musste erfolgen.*

Thomas Benz  
Michael Kaltenbach

## 1 Einführung

Die Kirche St. Petronilla in Kiechlinsbergen wurde vom Architekten Friedrich Arnold in den Jahren 1812 bis 1814 auf einer Anhöhe erbaut, umgeben von einer noch älteren, bis zu ca. 7 m hohen Friedhofsmauer (Bild 1). Nach Überlieferungen ist sie anstelle einer zuvor kleineren Kirche errichtet worden, allerdings hinsichtlich des Grundrisses in Längsrichtung um 90 Grad gedreht.

Die Friedhofsmauer aus Natursteinen besitzt einen zur Luftseite konvexen, d. h. nach außen gewölbten Verlauf (Bild 2). Die Kirche wie auch die Friedhofsmauer zeigten erhebliche Rissbildungen. Rückrechnungen zur Standsicherheit des Kirchturms und der Friedhofsmauer haben ergeben, dass diese beiden Bauwerke in Interaktion stehen und einsturzgefährdet sind. Eine umfassende Sanierung musste erfolgen.



**Bild 1**  
Kirche St. Petronilla,  
Kiechlinsbergen



**Bild 2** Blick auf Kirchturm und Friedhofsmauer

Ein Einsatz großer, schwerer Geräte musste dabei jedoch wegen des latenten Einsturzrisikos ausgeschlossen werden. Stattdessen ist eine schrittweise Sicherung mit kleinerem Gerät konzipiert worden. In einem ersten Schritt wurde nach vorangegangener statischer Dimensionierung 2018 die Friedhofsmauer mittels Bodennägeln und Drahtgeflechten so weit ertüchtigt, dass der Vorplatz vor dem Kirchturm überhaupt mit leichter Gerätschaft befahren werden konnte.

Wegen des latent drohenden Einsturzes des Kirchturms waren während der Sanierung einige umliegende Gebäude, deren Bewohner und die Hauptdurchfahrtsstraße stark gefährdet. Es ist deshalb ein umfangreicher Alarm- und Evakuierungsplan ausgearbeitet worden. Sämtliche Herstellungsschritte der Sanierung und damit verbundene kleinste Veränderungen am Kirchturm und der Friedhofsmauer wurden überwacht und laufend bewertet.

## 2 Kirchenchronik

Die Kirche samt Friedhofsmauer hat nach einer Chronik eine „bewegte“ Vergangenheit. Schon kurze Zeit nach der Errichtung 1813 hatten sich nach einem starken Erdbeben 1823 bereits zuvor vorhandene Risse verstärkt. Damals wurden Überlegungen angestellt, die Kirche nochmals vollkommen abzubauen. Es erfolgte dann aber 1828 eine umfangreiche Renovierung mit einer neubarocken Umgestaltung im Inneren.

Im Laufe der Jahre sind mehrfach erneute Rissbildungen und Teilsanierungen dokumentiert. 1911 ist das Fundament an der Nordwestecke mittels Beton ertüchtigt worden. Im Jahr 1965 war eine Sanierung der Stützmauer notwendig. 1980 bis 1982 wurde die Schiefstellung des Turms festgestellt, die Aufhängung der Glocken gedreht, Ringbalken eingebracht u. a. m. Weitere notwendige Fundamentsanierungen im Jahr 1988 waren auf generelle Gründungsmängel beim damaligen Kirchenbau zurückzuführen.

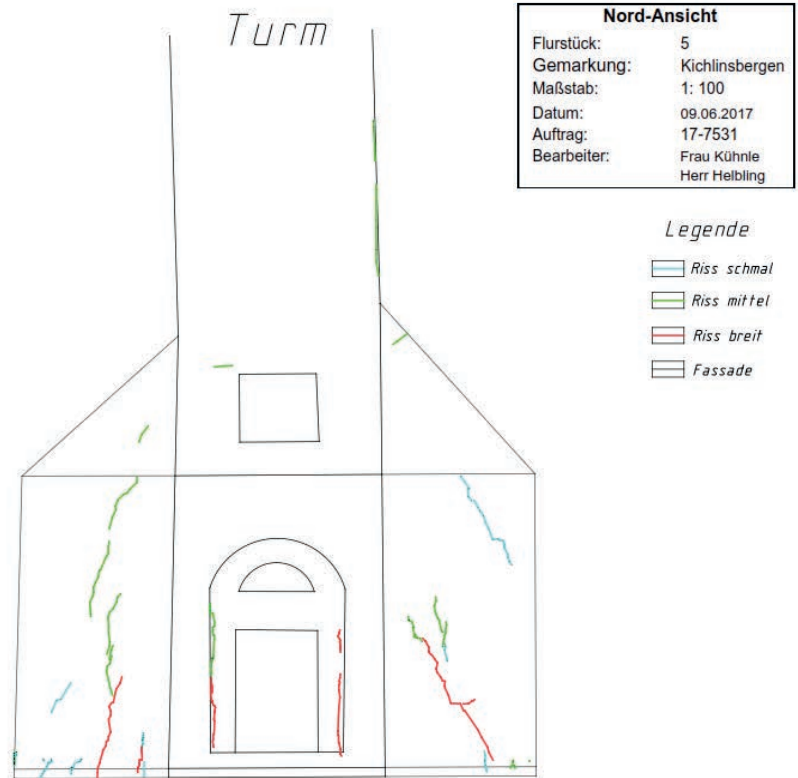
Insbesondere im Turmbereich im Norden der Kirche waren in jüngerer Zeit innen und außen erneut starke Risschäden aufgetreten. Diese wurden kartiert und mit Rissmonitoren versehen (Bilder 3 und 4).

## 3 Friedhofsstützmauer

Die Kirche wird von der ca. 7 m hohen Stützmauer (Friedhofsmauer) aus Natursteinen umgeben. Der Teil der Stützmauer, welcher den Kirchturm an der Nordseite umgibt, wurde in der Vergangenheit mehrfach ausgebessert. So wurden, soweit die schlechte Verzahnung mit der Mauer das vermuten lässt, offenbar erst nach der Errichtung nochmals Stützpfiler aus Natursteinmauerwerk zur Verstärkung der Stützmauer angebracht. Sie zeigten allerdings ebenfalls starke Schäden und Rissbildungen an den Kontaktflächen zur Stützwand.

Der Mörtel der Stützmauer war überwiegend stark angewittert.

Im Jahr 2013 wurden auf einer Länge von ca. 12 bis 13 m Wandverformungen an der Stützmauer zur Talseite von horizontal bis zu ca. 10 cm gemessen. Wegen akuter Einsturzgefahr musste konstruktiv



umgehend eine „Notsicherung“ ca. 2,5 m unter der Maueroberkante angeordnet werden. Zur Sicherung sind damals insgesamt 8 Mikropfähle Ischebeck-Titan 30/11 mit einem Bohr-Ø 80 mm orthogonal zur Friedhofsmauer und mit einer Neigung von 20° eingebaut worden. Über die Mikropfähle wurden Gurtungen aus Doppel U 300 mit jeweils 2,5 m Länge angeordnet (Bild 5).

In den Folgejahren traten jedoch weitere Verformungen und Veränderungen zutage. Die Stützmauer musste deshalb messtechnisch beobachtet werden.

Die gemessenen Horizontalverformungen an der Friedhofsmauer lagen im Messzeitraum 2015 bis 2017 in einer Größenordnung

- oben: 2 bis 5 cm
- Mitte: 1 bis 3 cm
- unten: 0 bis 2 cm

Erdeseitig der Stützmauer zeigten sich dadurch zunehmend Verformungen und Verwölbungen an der Geländeoberfläche (Bild 6).

#### 4 Bauradaruntersuchungen und Rammsondierungen

Im Februar 2017 erfolgten durch das Ingenieurbüro Dr.-Ing. Gabriele Patitz und die GGU mbH Untersuchungen mit einem Bauradar an der Stützmauer und dem angrenzenden Gelände vor dem Turm. Hierbei wurden im an die Friedhofsmauer anschließenden Bodenbereich starke bis sehr starke Reflexionen erfasst. Diese sind „als Auflockerungen in der Auffüllung, Verschiebungen, Hangrissen und erhöhte Wasserwegsamkeiten“ interpretiert worden. Die Grafik zum Georadar zeigt die Auflockerungen als helle Bereiche (Bild 7).

Zu Kalibrierungszwecken der Radarmessungen wurden kurzfristig durch das Ingenieurbüro für Geotechnik Henke und Partner GmbH (HuP) fünf mittelschwere Rammkernsondierungen (DPM nach DIN EN ISO 224762) zwischen der Kirche und der Friedhofsmauer niedergebracht. Die Rammsondierungen DPM1, DPM2 und DPM3 liegen in den im Radar auffälligen Bereichen. Bis in Tiefen von ca.

**Bild 3**  
Rissbildungen innerhalb der Kirche und Rissweitenvergrößerungen

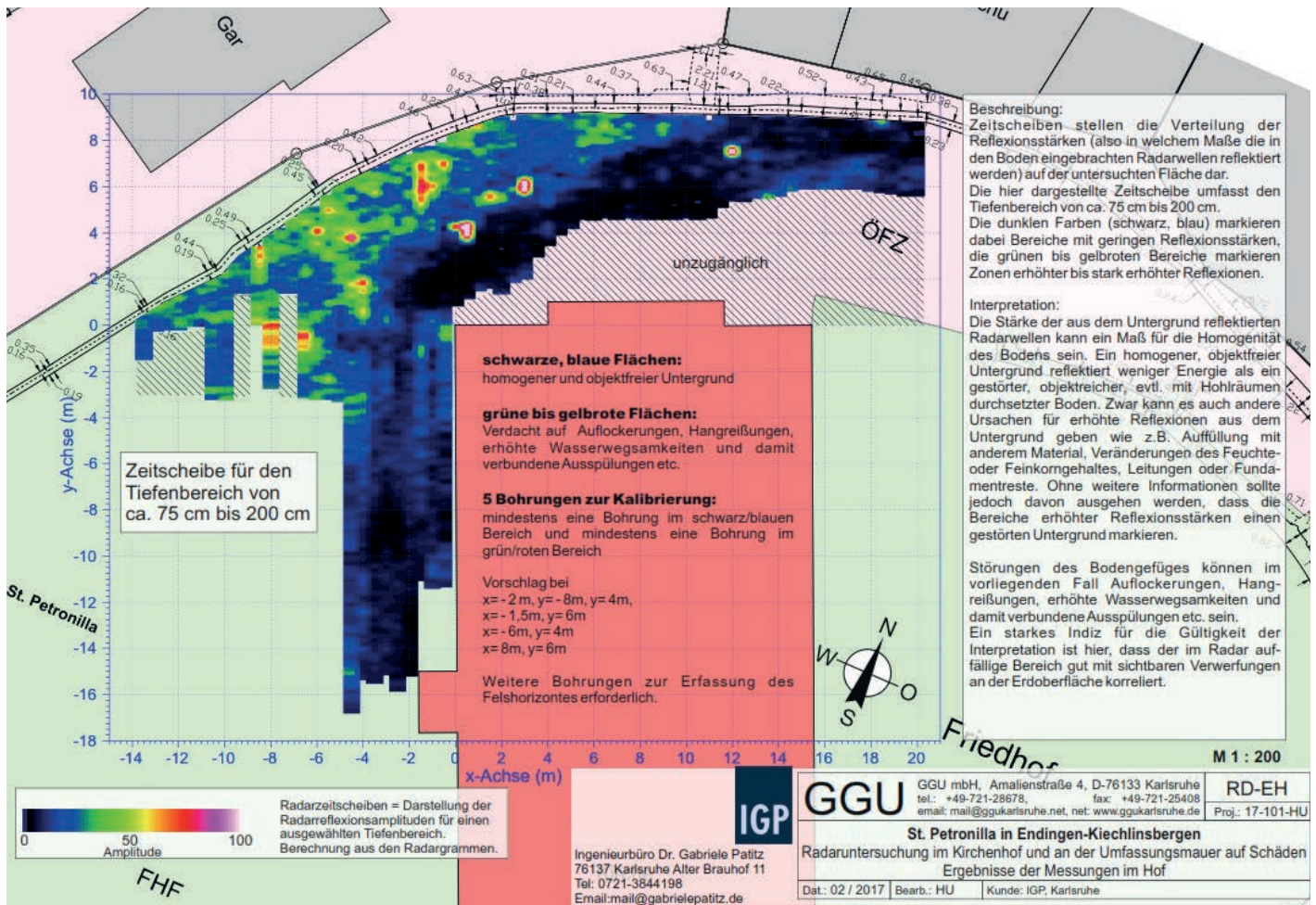
**Bild 4**  
Risskartierung Ansicht Kirchturm Nordseite durch Vermessungsbüro Markstein



**Bild 5** Ansicht Friedhofsmauer mit Notsicherungen (Ischebeck-Mikropfähle und Gurtungen) sowie Spritzbetonausbesserung nach Mauerwerksausbrüchen

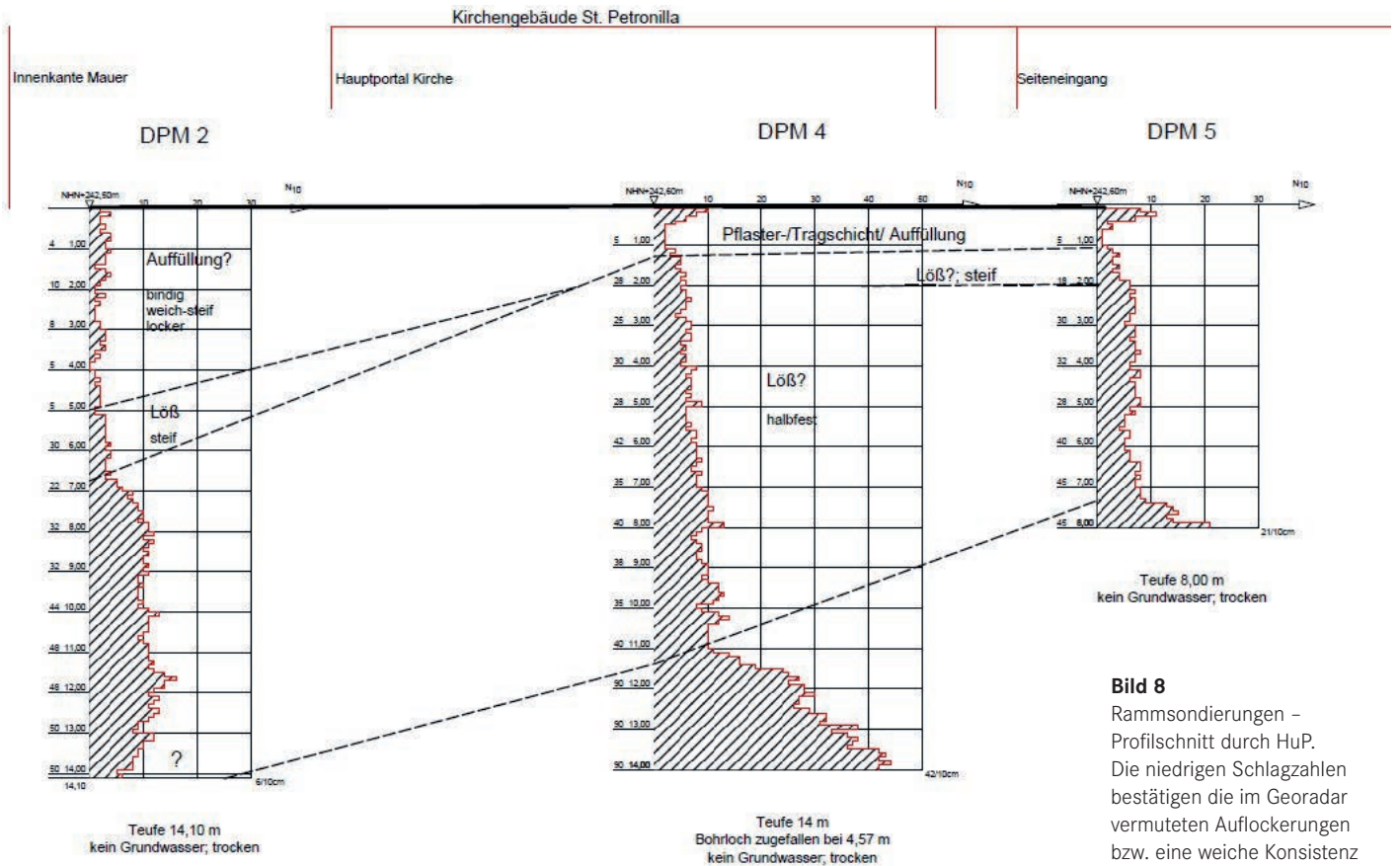


**Bild 6** Absenkungen hinter der Friedhofsmauer aufgrund Stützmauerverformungen



**Bild 7** Georadaruntersuchungen durch GGU mbH und Frau Dr. Gabriele Patitz





**Bild 8**  
Rammsondierungen – Profilschnitt durch HuP. Die niedrigen Schlagzahlen bestätigen die im Georadar vermuteten Auflockerungen bzw. eine weiche Konsistenz

4 m bis 7 m lassen die Charakteristika der Sondierprofile und niederen Schlagzahlen auf eine bindige, weich-steife bzw. eine nur lockere Auffüllung schließen (Bild 8).

## 5 Notwendige Entscheidungen

Anfang 2017 ließen durchgeführte geodätische Messungen auf fortschreitende Setzungen und ein Verkippen des Kirchturms sowie ein fortschreitendes Ausweichen der Friedhofsmauer nach Norden schließen. Die Rissbildungen nahmen weiter zu. Es bestand ein erhöhtes Risiko, dass Putzbrocken herabfallen und Kirchenbesucher gefährden. Sämtliche bisherige Sicherungsmaßnahmen waren offenbar unzureichend. Der Kirchturm und die umgebende Friedhofsmauer waren zunehmend als einsturzgefährdet einzustufen.

Die Kirche St. Petronilla musste deshalb im Jahr 2017 hinsichtlich des Kirchenbetriebs bis auf Weiteres geschlossen werden.

## 6 Intensivierung der Untersuchungen 2017 und beteiligte Partner

Für die Beurteilung der Schadensursache und Sanierung ist umgehend ein Planungsteam zusammengestellt worden:

Objektplanung/Tragwerksplanung  
Ingenieurgesellschaft für Bauwesen mbH  
Michael Kaltenbach, Edingen

Baugrunduntersuchung/Geologie  
Klipfel & Lenhardt Consult GmbH (KLC),  
Edingen

Vermessung  
Vermessungsbüro Markstein, Emmendingen

Geotechnik, Erdstatik  
Henke und Partner GmbH, Ingenieurbüro für  
Geotechnik (HuP), Stuttgart

Aufgrund der heiklen und in geotechnischer Hinsicht kritischen Situation wurde von HuP zu einer unabhängigen, geotechnischen Prüfung geraten.

Diese erfolgte durch

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Moormann  
 Ordinarius und Direktor des Institutes für  
 Geotechnik der Universität Stuttgart  
 Öffentlich bestellter und vereidigter Sach-  
 verständiger für Erdbau, Grundbau, Felsbau  
 sowie Spezialtiefbau

Der Baugrund setzt sich im Wesentlichen aus mächtigem, anstehendem Löss zusammen. Natürlich anstehend besitzt dieser meist eine steif-halb-feste Konsistenz. In größerer Tiefe war der Löss durch Lösskindel kiesig ausgebildet. Unter der Kirche und dem Kirchturm konnten bis ca. 4 m Tiefe aufgefüllter Lössboden bestimmt werden. Die Auffüllung nimmt an Mächtigkeit Richtung Friedhofsmauer auf bis zu ca. 7 m zu. An der Basis der mächtigen Auffüllungen hinter der Stützmauer wurde der anstehende Löss mit einer nur weichen Konsistenz aufgeschlossen. Der Profilschnitt in Bild 9 veranschaulicht die vorbeschriebene Situation.

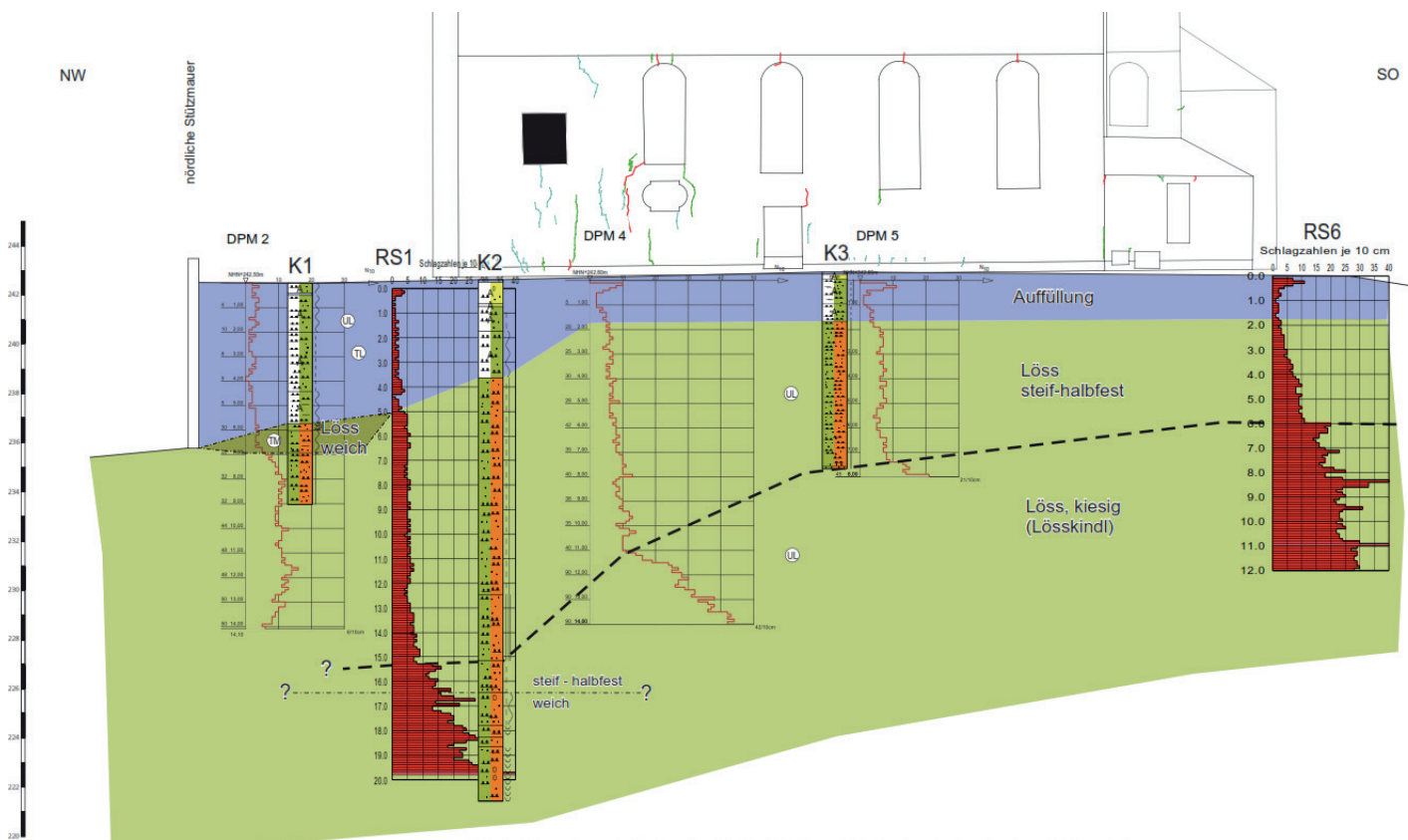
## 7 Baugrunduntersuchungen

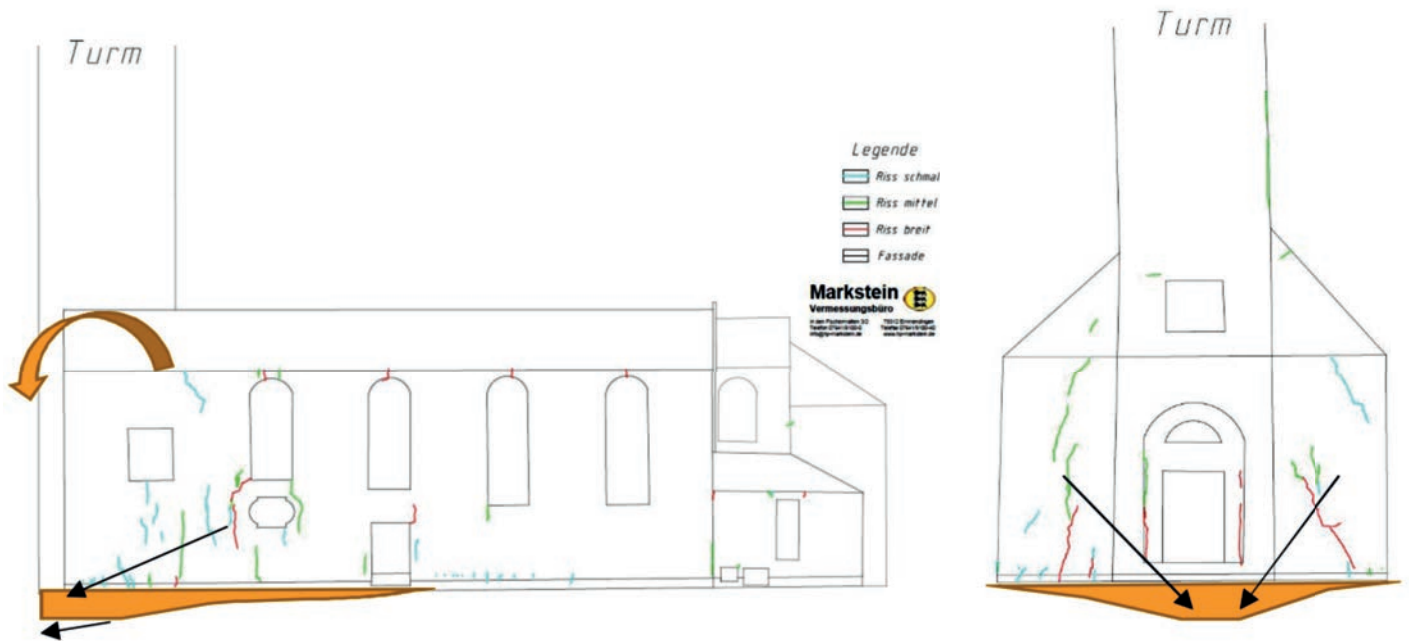
Zwischen den beiden geotechnischen Büros KLC und HuP musste das Untersuchungskonzept zur Baugrunderkundung abgestimmt werden.

Durch das Consultingbüro KLC sind die Geländeuntersuchungen im Frühjahr 2018 koordiniert worden. Es erfolgten bodenmechanische und geologische Aufnahmen der gewonnenen Bohrkerns und es wurden bodenmechanische Labvorversuche veranlasst. Das Geotechnische Gutachten Teil I „Baugrundbeurteilung“ lag am 12. August 2017 vor.

Die Böden sind nach eingehenden bodenmechanischen und bodenphysikalischen Laboruntersuchungen im Wesentlichen den Bodenarten TL/UL (leichtplastische Tone und Schluffe) zuzuordnen. Vor allem die Auffüllung aus Lössboden besitzt nur eine mäßige Scherfestigkeit und eine hohe Zusammendrückbarkeit.

**Bild 9**  
 Geologisches Profil aus der  
 Baugrunderkundung  
 Friedhofsmauer/Stützmauer  
 (links) und Kirche (rechts)





## 8 Geotechnische Berechnungen

Basierend auf den Baugrunduntersuchungsergebnissen wurden durch HuP Betrachtungen zum Rissbild und geotechnische Berechnungen zur Standsicherheit und zu Setzungen angestellt. Die Ergebnisse sind in einem Geotechnischen Gutachten Teil II „Bautechnische Beurteilung zur Schadensursache“ bewertet und sind am 12.09.2017 bekannt gegeben worden. Das Gutachten enthält Empfehlungen zur Sicherung der Umfassungsmauer und Ab- bzw. Unterfangung der Lasten aus dem Kirchturm.

Anhand der kartierten Risse ließen sich grob die Hauptspannungen und die für das Rissbild verantwortlichen Untergrundbewegungen ableiten (Bild 10).

Die Sohlspannungen unter dem Kirchturm sind enorm und betragen grob ca. 700 kN/m<sup>2</sup>. Rechnerisch wurden die unter diesen Sohlspannungen des Kirchturms zu erwartenden Gesamtsetzungen mit 10 cm bis 18 cm ermittelt (Bild 11).

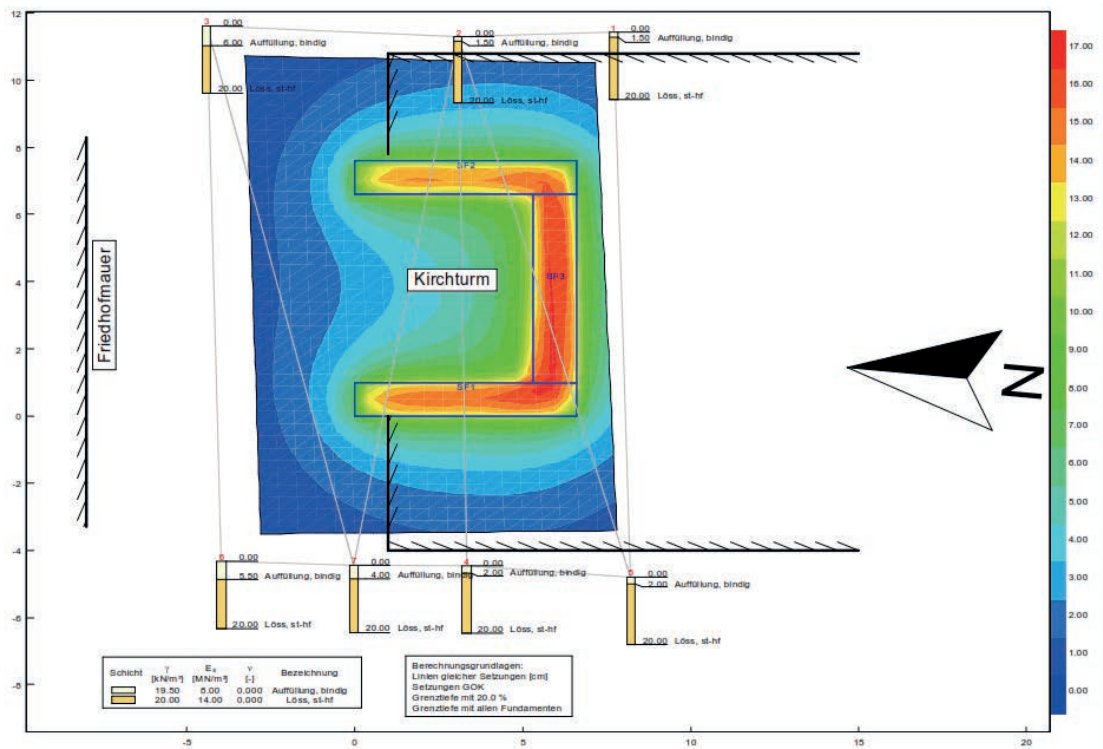
Durch eine verhältnismäßige langsame Bauweise der Kirche kann davon ausgegangen werden, dass bereits beim Bau größere Setzungsanteile (geschätzt ca. 50%) auftraten und hierbei nochmals etwas ausgeglichen werden konnten. Die Restsetzungen nach der Fertigstellung der Kirche dürften jedoch noch eine Größenordnung zwischen ca. 5 cm und 10 cm betragen haben.

Gegenüber einem kleineren Vorgängerbau wurde die neue Kirche größer und hinsichtlich des Grundrisses um 90° zur ehemaligen Kirche gedreht. Die Baugrunduntersuchung und deren Ergebnis der Setzungsberechnung legt die Vermutung nahe, dass bei der Drehung in Längsrichtung und bei den gewählten Kirchenabmessungen das Risiko nicht erkannt bzw. verkannt wurde. Die Kirche wurde im Norden mit dem Kirchturm auf mehrere Meter mächtigen, setzungsempfindlichen und hinsichtlich Scherkraftübertragung minderwertigeren Auffüllungen gegründet. Die aus der Historie früh bekannt gewordenen und aufgezeichneten Schäden an der Kirche lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf diese großen Setzungsbeträge und daraus resultierenden Setzungsdifferenzen zurückführen.

Die neuerlichen Verformungen und gemessenen Setzungen rühren nach über zwei Jahrhunderten seit dem Bau nicht mehr aus diesen lastbedingten Setzungen her. Neuere beobachteten Setzungen mussten daher auf andere Ursachen zurückgeführt werden.

Nach den Georadarmessungen ist die Stützwand oben nur ca. 0,8 m und unten 1,1 m dick. In einer weiteren Berechnung wurde die Standsicherheit der Friedhofsmauer mit den erkundeten Abmessungen untersucht (Bild 12).

**Bild 10**  
Ansicht West (links) und Ansicht Nord (rechts)



Die Berechnungen haben ergeben, dass selbst bei einer 4 m breiten Stützmauer noch eine rechnerische Überschreitung des zulässigen Ausnutzungsgrades gegeben ist. Die vorhandene Stützmauer ist demnach deutlich zu schlank für die Aufnahme von Erddrücken und Zusatzlasten aus der Kirche ausgebildet.

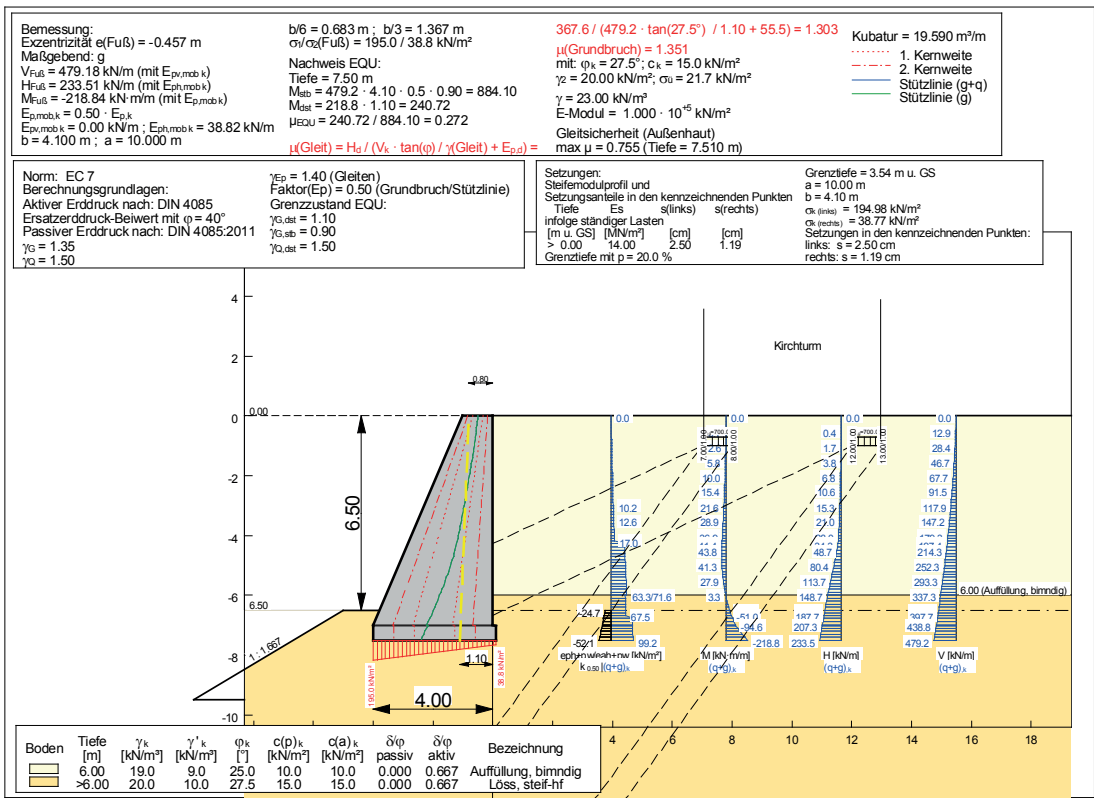
Abschließend wurden diverse Geländebruchberechnungen durchgeführt. Sämtliche Berechnungen ergaben deutliche Überschreitungen des Ausnutzungsgrades und damit erhebliche Standsicherheitsdefizite. Selbst unter Einrechnung und Berücksichtigung der bei der Notsicherung nachträglich eingebauten Ischebeck-Micro-Pfähle waren deutliche Überschreitungen des Ausnutzungsgrads gegeben (Bild 13).

Der überwiegende Lastabtrag der Ischebeck Micropfähle findet in den heterogenen und bereichsweise weichen Auffüllungen und in weichplastischem Löss statt. Die Sicherungsmittel (Micro-Pfähle) sind, wie die Berechnungen belegen, deutlich zu kurz ausgebildet und waren damit nachweislich nahezu unwirksam.

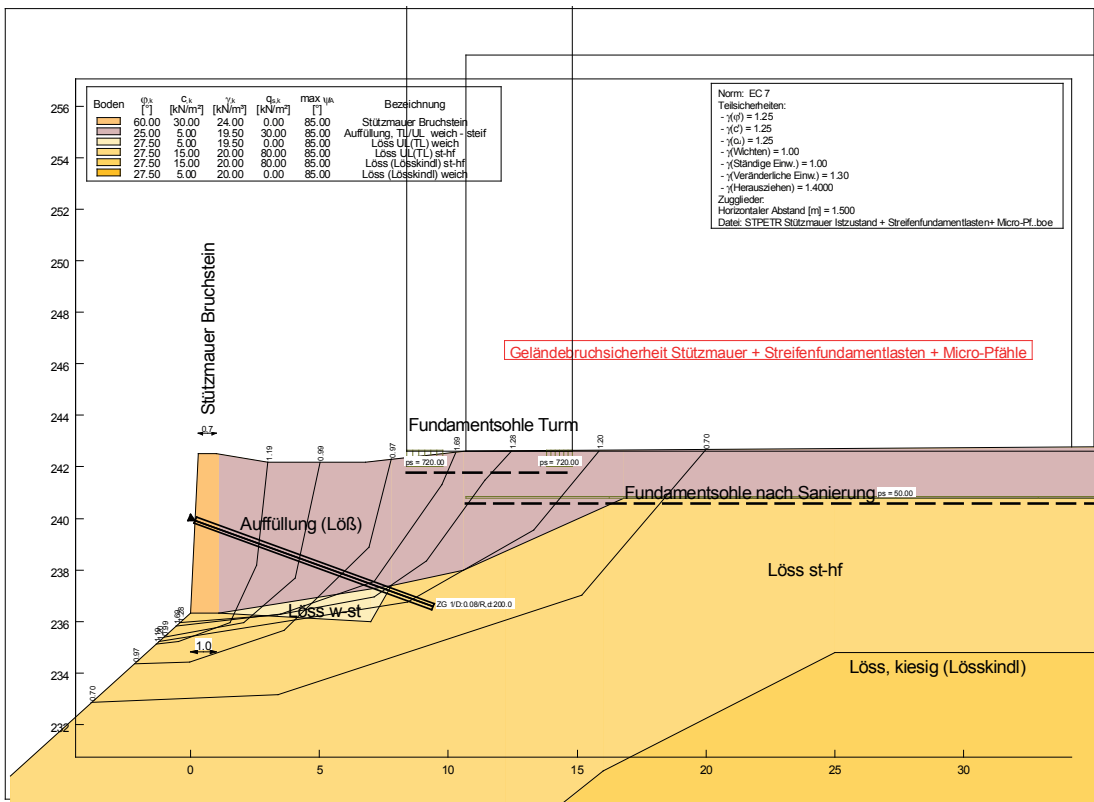
Zusammenfassend haben mehrere Ursachen zu den Schäden an der Kirche und Standsicherheits-

defiziten im Bereich des Kirchturms und der Stützmauer geführt:

- Die 90°-Drehung des Kirchenneubaus vor 200 Jahren führte dazu, dass der Norden der Kirche unbemerkt mit der Giebelseite und dem Kirchturm auf über mehrere Meter mächtigen Auffüllungen gegründet wurde. Dadurch entstanden sehr hohe Setzungen.
- Die Grundbruchsicherheit der Fundamente am Kirchturm ist massiv überschritten. Eine Fundamentverbreiterung oder Unterfangung ist nicht ohne vorausseilende Sicherung möglich.
- Die Standsicherheit der Friedhofsmauer als Schwergewichtsmauer ist in allen Belangen (Kipp-, Grundbruch- und Gleitsicherheit) deutlich überschritten. Die Schwergewichtsmauer ist deutlich zu schmal ausgebildet. Der konvexe Verlauf der Mauer um die Kirche ist geometrisch zudem sehr ungünstig und führt bei Verschiebungen zur Luftseite rasch zu Rissbildungen und großen Instabilitäten innerhalb der Mauer.
- Die Geländebruchsicherheit von Bruchkörpern (Gleitlinien) um die Stützmauer überschreitet bei Berücksichtigung der Lasteinwirkungen aus dem Kirchturm die zulässigen Ausnutzungsgrade um >70%.



**Bild 12**  
 Berechnungsgrafik zur Untersuchung Friedhofsmauer bzw. Standsicherheit als Schwerkraftsmauer



**Bild 13**  
 Geländebruchuntersuchungen unter Berücksichtigung der Notsicherung mit Ischebeck-Micropfählen

- Die Notsicherung durch den Einbau von 8 Mikropfählen hat nachweislich keine oder kaum eine Verbesserung bewirkt.

## 9 Sanierungskonzeption

Von Seiten HuP wurde empfohlen, die Friedhofsmauer durch eine Verbreiterung zu ertüchtigen und die Lasten des Kirchturms tiefer in den Baugrund abzuleiten. Die Sanierung sollte schrittweise als Kombination aus einer Bodenvernagelung und mittels des Düsenstrahlverfahrens erfolgen.

Zur Sicherung der Friedhofsmauer sollten in einem 1. Schritt Bodennägel eingebaut werden. Zur Übertragung der Punktlasten auf die Stützmauer konnten Krallplatten, Stahlseile und ein auf der Oberfläche der Stützmauer aufgebracht hochzugfestes Drahtgeflecht installiert werden.

Im Anschluss an die vorausseilende Sicherung der Friedhofsmauer sollten in einem zweiten Schritt der stark gefährdete Kirchturm und das seitlich angrenzende Kirchenschiff über ein „Düsenstrahl-Verfahren“ gesichert und auf diese Weise die Standsicherheit nachgewiesen werden.

Beim Düsenstrahl-Verfahren können mit einem Bohrgerät zwischen der Friedhofsmauer und der Kirche Bohrungen bis in größere Tiefen niedergebracht werden. Beim rotierenden Ziehen des Bohrgestänges wird der Boden über Düsen mit Hochdruck (ca. 200–400 bar) zylindrisch auf-

geschnitten. Die gleichzeitig zugegebene Zement-suspension vermischt sich dabei mit dem natürlichen Boden und verfestigt sich anschließend.

Begonnen werden sollte in einem weniger kritisch erscheinenden Randbereich. Die Arbeiten wurden dann im Schutz bereits verfestigter Körper schrittweise in Richtung des kritischeren zentralen Bereichs vor dem Kirchturm fortgesetzt. Durch das vorsichtige Vorgehen und dem geplanten Aneinanderreihen der einzelnen Düsenstrahl-Körper entstand nach und nach ein zusammenhängender, zementverfestigter und dadurch stützender Bodenkörper.

Nach Abschluss der Arbeiten zwischen Friedhofsmauer und Kirche sollten zuletzt einzelne Düsenstrahlsäulen unter dem Kirchturm und den Außenwänden des Kirchenschiffs zur Unterfangung und Lastenleitung der hohen Auflasten in den tragfähigeren Untergrund niedergebracht werden.

## 10 Messtechnische Beobachtung

Zur Kontrolle im Schadensfall wurde ein mögliches Einsturzscenario geplant. Die Gemeinde und insbesondere die direkt davon betroffenen Anwohner sind in einer Informationsveranstaltung in der Gemeindehalle über das Untersuchungsergebnis, das latente Risiko eines Einsturzes und im ungünstigen Fall eine dadurch notwendige Evakuierung unterrichtet worden (Bild 14).

Zur messtechnischen Beobachtung sind durch das Vermessungsbüro Markstein 26 Reflektoren am Kirchturm und der Friedhofsmauer angebracht und ein programmierbares automatisches Tachymeter-System mit sehr hoher Genauigkeit der Ablesung ( $\pm 3$  mm, unverbindlich meist  $\pm 1$  mm) installiert worden.

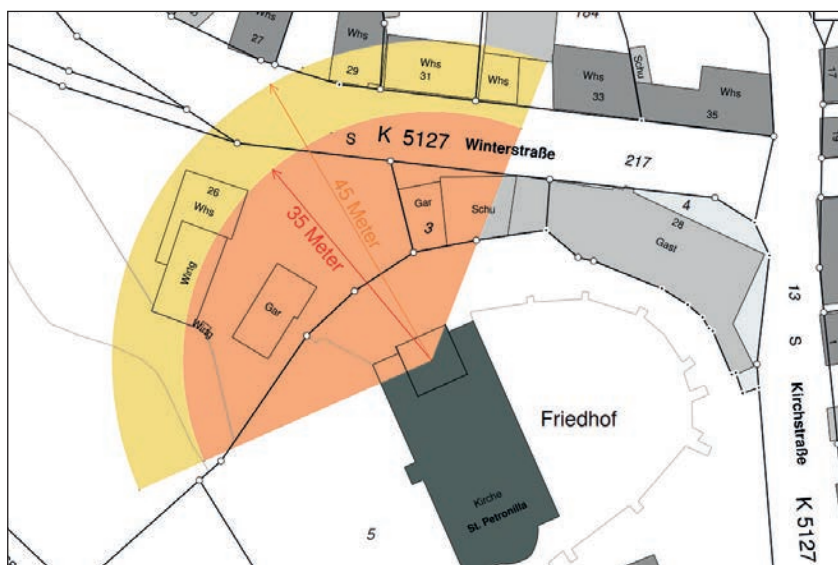
Die Reflektoren wurden vom Tachymeter halbstündlich automatisch gemessen. Die Messergebnisse werden auf einer von den Beteiligten zugänglichen Internetplattform aufgezeichnet.

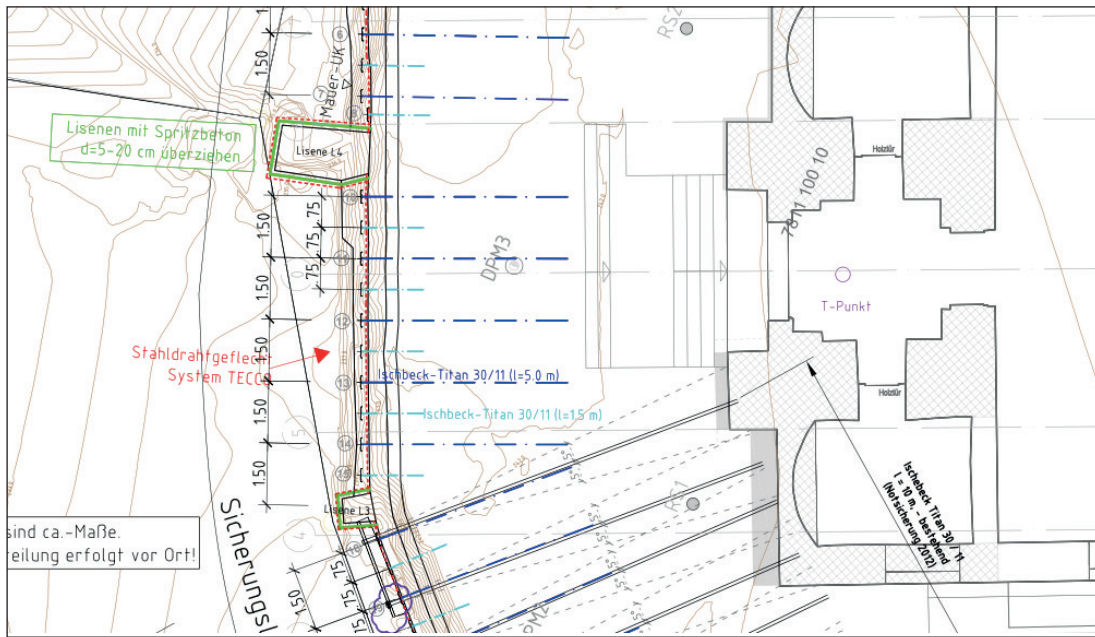
Festlegung von 3 Grenzwerten:

1. 5 mm (gelb)
2. 10 mm (orange)
3. 15 mm (rot)

**Bild 14**

Umsturzscenario mit dem zu erwartenden Trümmerschatten





**Bild 15**  
Ausschnitt aus Lageplan Bodenvernagelung/Netzisierung Friedhofsmauer (HuP)

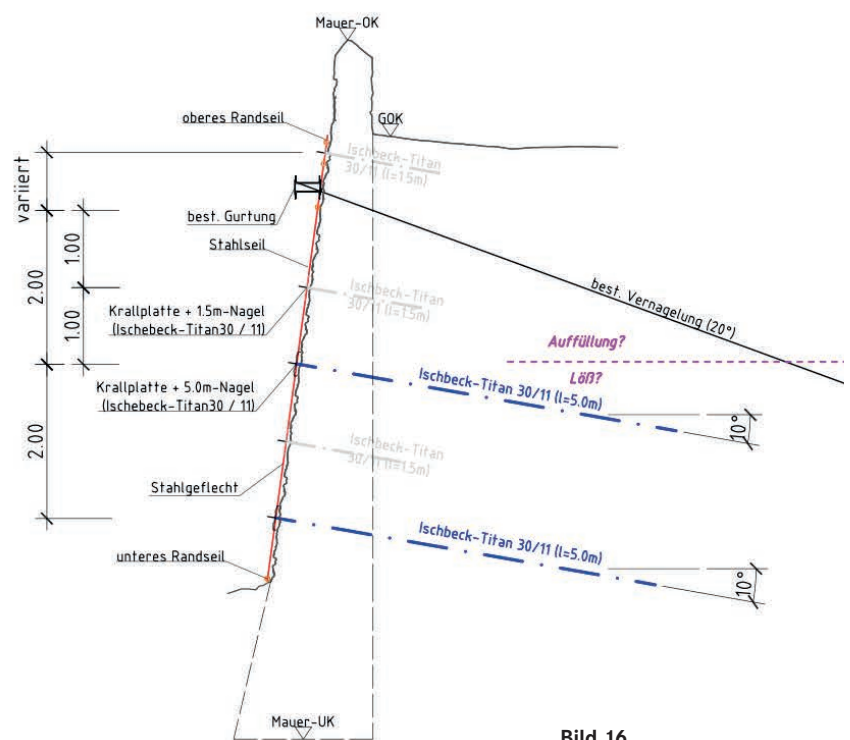
Bei Überschreitung des 1. Grenzwertes (gelb) wurde eine Nachricht per E-Mail an die Verantwortlichen des Planungsteams (Markstein, IB Kaltenbach, KLC und HuP) gesendet. Bei Überschreitung des 2. Grenzwertes (orange) erfolgte eine E-Mail + SMS an alle Verantwortlichen. Bei Überschreitung des 3. Grenzwertes (rot) erfolgte eine Benachrichtigung wie beim 2. Grenzwert, jedoch zusätzlich auch an die Feuerwehr zur Evakuierung der evtl. betroffenen Anwohner.

Falls Grenzwerte überschritten würden, war, sofern nicht innerhalb weniger Minuten eine Freigabe durch die Verantwortlichen z. B. mit einem Hinweis auf Fehlmessung erfolgte, direkt eine Evakuierung der von einem Umsturz der Kirche gefährdeten Personen in der Nachbarschaft durch die Feuerwehr, Polizei und Stadtverwaltung geplant.

## 11 Sicherungsmaßnahmen

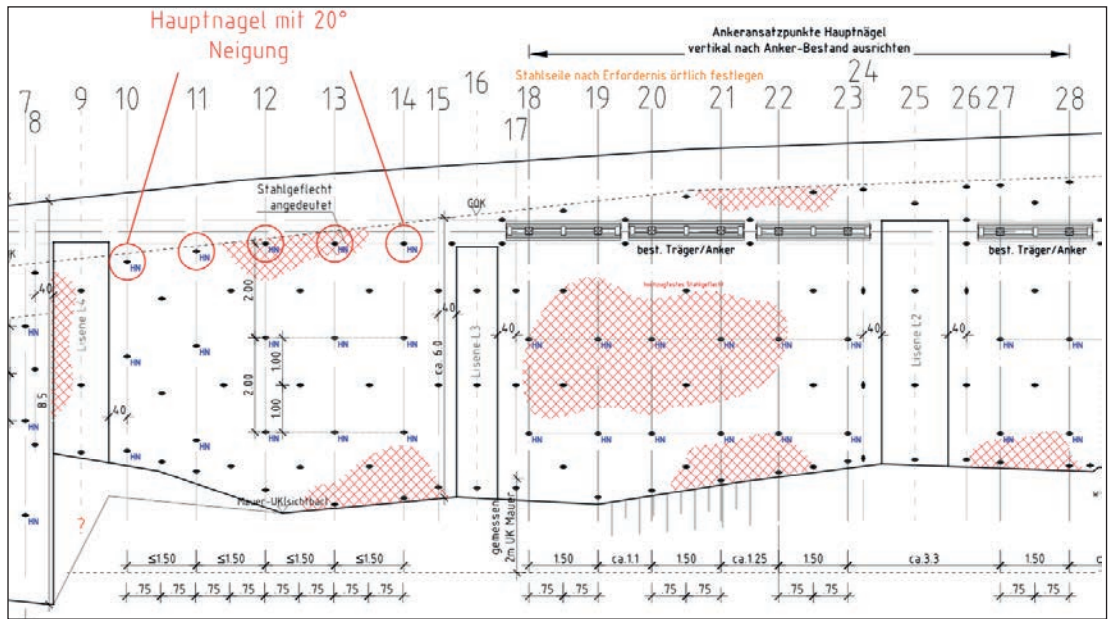
Die Planung der Sicherungsmaßnahmen an der Friedhofsmauer durch HuP sind in Ausschnitten aus den Bildern 15 bis 17 zu ersehen. Die Anordnung der Düsenstrahlsäulen ist in den Abbildungen 18 und 19 dargestellt. Die Bilder 20 bis 27 zeigen die Arbeitsschritte.

Die Sicherungs- und Sanierungsarbeiten wurden im Zeitraum September 2018/19 fertiggestellt.



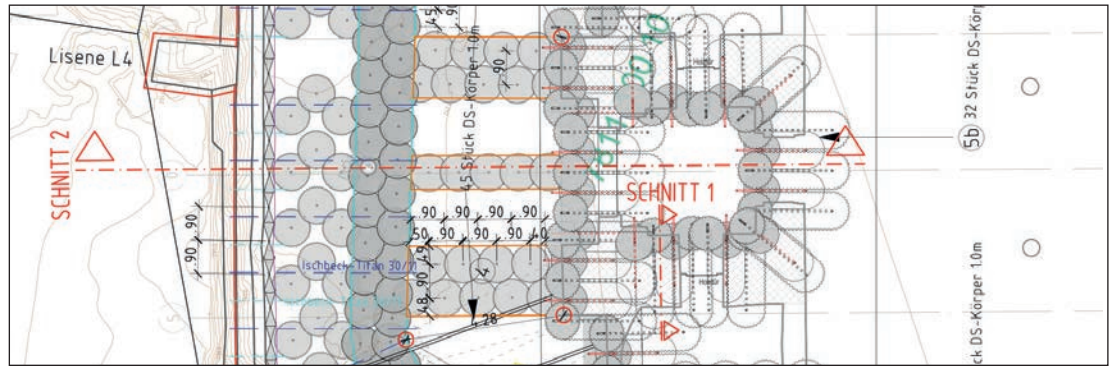
**Bild 16**  
Schematische Darstellung der Netzisierung im Schnitt Friedhofsmauer (HuP)

Die Kosten für die beiden Gewerke „Bodenvernagelung + Drahtnetz“ und „Düsenstrahlkörperherstellung“ sind mit netto ca. € 1,1 Mio. veranschlagt worden; auf Grund verschiedener Zusatzleistungen und Nachträge betrugen die Kosten am Ende netto € 1,3 Mio.



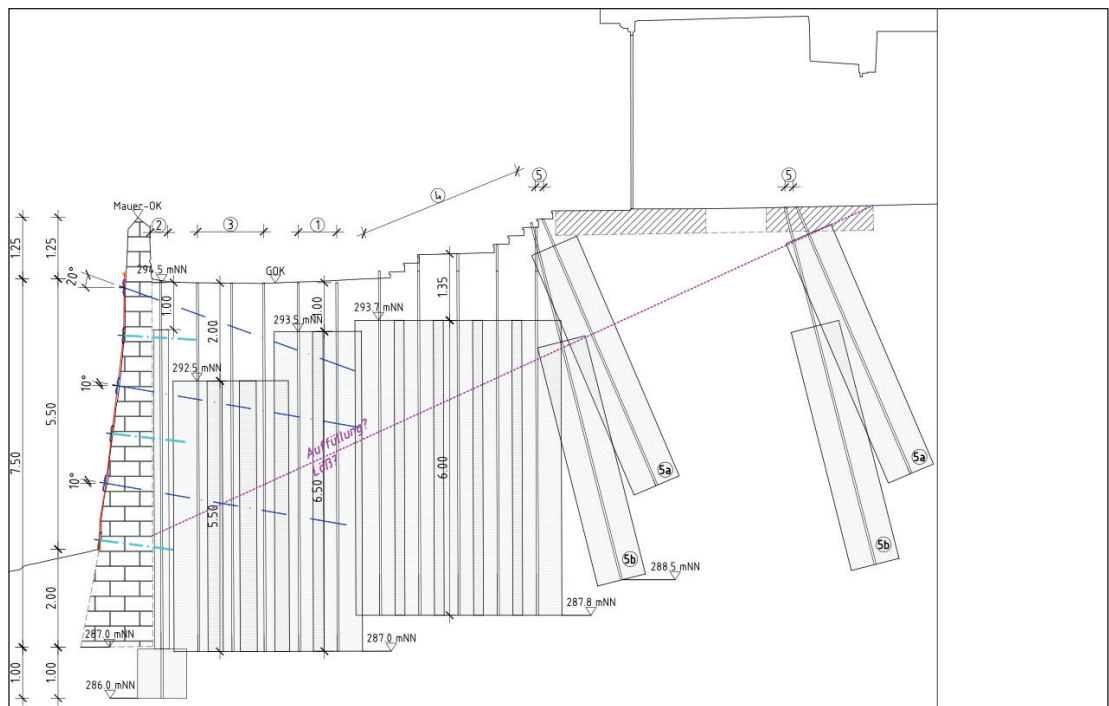
**Bild 17**

Anordnung der Bodennägel und Drahtnetz-sicherung an der Friedhofsmauer in der Ansicht (HuP)



**Bild 18**

Lageplanausschnitt mit Anordnung der Düsenstrahl-säulen im Grundriss (HuP)



**Bild 19**

Anordnung der Düsenstrahl-säulen im Schnitt 2-2 und Herstellreihenfolge (HuP)





**Bild 20** Einbringung der Bohrungen durch Friedhofsmauer zur Bodenvernagelung am 08.11.2018

**Bild 22** Netzaufbringung Friedhofsmauer

**Bild 24** Beginn Düsenstrahlverfahren, hier: Probesäulen am 09.01.2019

**Bild 21** Wie Bild 20, Bohrarbeiten am 03.12.2018

**Bild 23** Fertiggestellte Sicherung Friedhofsmauer. Bodenvernagelung mit Krallplatten und hochzugfestem Drahtnetz am 20.12.2018

**Bild 25** Baustelleneinrichtung auf gesperrter Hauptstraße



**Bild 26**

Beginn der Düsenstrahlunterfangung Kirche, 07.03.2019

**Bild 27**

Unterfangung Kirchturm  
09.05.2019



## 12 Rissanierung

Anschließend an die Düsenstrahlkörperherstellung zur Ab- und Unterfangung der Kirche begann die aufwändige Rissanierung an der ebenfalls stark vorgeschädigten Kirchenmauer.

**Bild 28**

Freigelegte Risse im Kirchenmauerwerk, Außenfassade – nordöstliche Gebäudeecke

Nachdem im Februar 2017 nach einer Begehung mit den Fachplanern die Schließung der Kirche auf



Grund der fortschreitenden Vergrößerung der Risse vereinbart wurde, ist im März 2017 ein Rissmonitoring mit 17 Rissmonitoren installiert und in der darauffolgenden Zeit in regelmäßigen Abständen eine Kontrollablesung vorgenommen worden (Bild 28 bis 30).

In Abstimmung mit dem Bauherrn und den Fachingenieuren wurde festgelegt, eine Rissanierung derzeit lediglich im Bereich der am ‚stärksten‘ geschädigten Bereiche (nordöstliche Gebäudeecke) durchzuführen. Die restlichen Bereiche [statisch nicht relevante Risse!] sollen erst nach einem Zeitraum von 2–3 Jahren geplant bzw. ausgeführt werden.

Nach Abnehmen der Putzhohlstellen sowie dem Öffnen der vorhandenen Risse in den genannten Bereichen kamen Rissweiten zum Vorschein, die selbst alle Beteiligten überraschten. Teilweise wurde bei früheren Sanierungsmaßnahmen über den Bestandsrissen lediglich ein Drahtgewebe sowie mehrlagiges Putzgewebe eingebaut, ohne jedoch die vorhandenen Risse fachgerecht zu schließen.

Das vorgefundene Bruchsteinmauerwerk besteht größtenteils aus kleinteiligem Tuffstein, Kalkstein und geringem Anteil an Sandsteinen. Vor Ausführung der Arbeiten erfolgten eine Probeentnahme



**Bild 29**  
Freigelegte Risse bis 8 cm –  
nordöstliche Gebäudeecke



**Bild 30**  
Freigelegte Risse bis 8 cm –  
nordöstliche Gebäudeecke

sowie Mörteluntersuchungen als Grundlage der zu verwendenden Mauermörtel.

Im ersten Arbeitsschritt wurden sämtliche Risse geöffnet und das lose Fugenmaterial bis zu einer Tiefe von bis zu 30 cm ausgeräumt sowie ausgeblasen. Teilweise waren temporäre Abstützmaßnahmen sowie ein Verkeilen von losen Steinen in den Randbereichen erforderlich. Größere Risse (bis 15 cm) sind mittels ‚Zwicksteine‘ ausgemauert sowie die Hohlräume mit Mauermörtel verfüllt worden. Ergänzend wurden in einzelnen Bereichen Sandsteinquader angepasst und eingesetzt, um wieder eine Verzahnung des Mauerwerks zu erreichen (Bilder 31 und 32).

Insgesamt mussten ca. 42 lfdm Mauerwerksrisse ‚vernäht‘ werden, bevor im nächsten Arbeitsschritt mit der Verfüllung bzw. Verpressung der Hohlräume begonnen werden konnte. Hierbei wurde in Abstimmung mit der ausführenden Fachfirma ein Raster für das Einbauen von Injektionsstutzen (ca. 390 Stück) festgelegt und im Anschluss die Verfüllung der Hohlräume ausgeführt (Bilder 33a+b). Sobald dies erfolgt ist, sollte in den verfüllten Bereichen eine Ankerstange mit Umlenkprofil in der nordöstlichen Gebäudeecke in vier Horizontallagen als Ringgurt eingebaut werden. Dafür war geplant,

mittels Trockenbohrung (Druckluft und Schraubbohrkrone) eine Horizontalbohrung in den ‚verpressten‘ Bereichen herzustellen. Auf Grund des vorgefundenen Vulkangesteins (Tuff) konnte die Bohrung nicht wie geplant durchgeführt werden, d. h. einzelne Mauersteine wurden aus dem Mauergefüge gerissen und verklemmten sich zwischen



**Bild 31**  
Vernähen der Risse und Einbau  
von Steinquadern



**Bild 32**  
Sicherung lose Steine



**Bild 33 a+b**  
Einbau von Injektionsstutzen



den Diamantsegmenten des Bohrkopfes. Bereits beim ersten Bohrversuch war kein Bohrfortschritt – auch nach mehrmaligem Austausch der Bohrkronen – zu verzeichnen. Ein Wechsel auf Nassbohrtechnik wurde auf Grund der sehr großen Wasserzugabe sowie Schädigung der bereits sanierten Bereiche verworfen.

Sämtliche Risse wurden nun durch V2A-Nadelanker gesichert; insgesamt mussten ca. 90 Bohrpunkte bzw. 90 lfdm Nadelanker zur Sicherung eingebaut werden (Bilder 34 und 35).

Im März 2020 konnten die Sanierungsarbeiten der Mauerwerksrisse abgeschlossen werden. Im An-



**Bild 34**  
Einbau von V2A- Nadelanker



**Bild 35**  
Einbau von V2A- Nadelanker



**Bild 36**  
Kirchenansicht Nord nach  
fertiggestellter Sanierung  
(20.11.2020)

schluss wurden die Kanalverlegungen zur Entwässerung, das Wiederherrichten der Hofflächen und Treppenanlage sowie die Putz-/Malerarbeiten ausgeführt, sodass im Dezember 2020 die Wiedereröffnung der Kirche stattfand. Die noch im Innenraum der Kirche installierten Rissmonitore zeigen seit Abschluss der Bauarbeiten bislang keine Ver-

änderungen, so dass die Standsicherheit der denkmalgeschützten Kirche St. Petronilla sowie der Kirchenmauer langfristig gesichert sein dürfte (Bild 36).

## Literatur

DIN EN ISO 224762-2-2005-04  
Geotechnische Erkundung und Untersuchung –  
Felduntersuchungen – Teil 2: Rammsondierungen

## Abbildungen

Bild 1: Johannes Vogel, Langgasse 16, 79346 Endingen  
Bilder 2, 3, 5, 6, 8, 10–13, 15–27: Henke und  
Partner GmbH, Emilienstr. 2, 70563 Stuttgart  
Bilder 4, 14: Vermessungsbüro Markstein,  
In den Fischermatten 3/2, 79312 Emmendingen  
Bild 7: Ingenieurbüro IGP Dr.-Ing. Gabriele Patitz,  
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe  
Bild 9: Klipfel & Lenhardt Consult GmbH,  
Bahlinger Weg 27, 79346 Endingen  
Bilder 28–36: Ingenieurgesellschaft für Bauwesen mbH  
Michael Kaltenbach, Albrechtstraße 15,  
79346 Endingen a.K.