



Herausgegeben von
Michael Raupach
Bernd Schwamborn
Lars Wolff



7. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken

**Fachtagung zur Beurteilung, Instandhaltung
und Instandsetzung von Bauwerken**

Tagungshandbuch 2021

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach
Hon. Prof. Dr.-Ing. Bernd Schwamborn
Dr.-Ing. Lars Wolff

7. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken

Fachtagung zur Beurteilung, Instandhaltung und Instandsetzung
von Bauwerken

Tagungshandbuch 2021

Medienpartner und Sponsor:



expert[›]

 Technische Akademie Esslingen
Ihr Partner für Weiterbildung

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Das vorliegende Werk wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Haftung für die Fehlerfreiheit, Aktualität und Vollständigkeit des Werkes und seiner elektronischen Bestandteile.

© 2021. Alle Rechte vorbehalten.

expert verlag GmbH

Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen
E-Mail: info@verlag.expert
Internet: www.expertverlag.de

Technische Akademie Esslingen e. V.

An der Akademie 5 · 73760 Ostfildern
E-Mail: bauwesen@tae.de
Internet: www.tae.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3524-7 (Print)
ISBN 978-3-8169-8524-2 (ePDF)

Vorwort

Die Erhaltung von Bauwerken hat bereits in vielen Bereichen eine größere Bedeutung als der Neubau. Die Individualität der Bauwerke hinsichtlich Tragkonstruktion, Bausubstanz, Bauablauf, bauliches Umfeld und Einwirkungen über die Bauteillebensdauer erlaubt hierbei keine Standardlösung, sondern erfordert meist objektindividuelle Lösungen.

Zudem sind die Aufgaben beim Bauen im Bestand vielfältig. Sie beinhalten die Bauwerksdiagnose, die Instandsetzungsplanung unter Berücksichtigung aktueller Regelwerke und Rechtsprechung, die Produktauswahl, die Ausführung und Qualitätssicherung sowie Aspekte des Bauwerksmanagements. Dies alles erfordert eine enge und frühzeitige Abstimmung zwischen Bauherren, Architekten, Fachplanern, Behörden und Bauunternehmen.

Ziel der Fachtagung zum Bauen im Bestand ist der Austausch aktueller Erkenntnisse auf dem Gebiet der Erhaltung von Bauwerken. Dabei sollen sowohl die Erfahrungen bei der Planung und Umsetzung von Instandsetzungsmaßnahmen als auch der Kenntnisstand bei der Entwicklung neuer Verfahren, Materialien und Untersuchungsmethoden kommuniziert werden.

Im Rahmen des 7. Kolloquiums „Erhaltung von Bauwerken“ werden etwa 80 Beiträge aus Forschung, Industrie und Praxis in vier parallelen Sessions zu folgenden Themenschwerpunkten präsentiert:

- Bauwerksdiagnostik
- Denkmalpflege: Tragwerksplanung, Fassade, Mörtel, Fallbeispiele
- Ingenieurbauwerke: Brücken, Wasserbauwerke
- Digitalisierung und BIM
- Ausführung
- Textilbeton
- Betonersatz
- Mauerwerk
- Oberflächenschutz
- Rissbehandlung
- Schadstoffe/Gefahrstoffe
- Dauerhaftigkeit
- Regelwerke
- Forschung und Entwicklung

Das vorliegende Tagungshandbuch enthält die vorab eingereichten Beiträge zu den Vorträgen und gibt einen Überblick über neue und innovative Verfahren, Methoden und Technologien für die Beurteilung, Instandhaltung und Instandsetzung von Bauwerken. Weitere Informationen unter: www.tae.de/go/bauwerk.

Inhaltsverzeichnis

0.0	Plenarvorträge	
0.1	Digitalisierung in der Bauwerkserhaltung Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach, Hendrik Morgenstern, M.Sc.	17
0.2	Neuzeitliche Infrastrukturprojekte versus Denkmalpflege? Eine diplomatische Herausforderung? Axel Dominik, Pascale Dominik	25
1.0	Bauwerksdiagnostik	
1.1	Interdisziplinäre Bestandserfassung und Bewertung von Injektionen des Schwarza-Witznaustollens mit Stollenradar Dr.-Ing. Gabriele Patitz, Dipl.-Ing. Robert Render, Dr.-Ing. Daniel Stolz	29
1.2	Zustandsaufnahme und -beurteilung von Tiefgaragen Dipl.Ing (FH) SIA Ralf Schoster	37
1.3	Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweiten Erfahrungen, Grenzen und Weiterentwicklung Prof. Dr.-Ing. Marc Gutermann, Dipl.-Ing. Werner Malgut	43
1.4	Korrosionsinspektion an Stahlbetonbauwerken: Potentialfeldmessung vs. Kelvinsonde * Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sylvia Keßler	
2.0	Denkmalpflege/Fallbeispiele	
2.1	Fachwerkbau, barock und bunt, wird Einkaufszentrum, Marktplatz 1 in Waiblingen Kurt Christian Ehinger	55
2.2	Burg Hohenzollern - Instandsetzung Festungskranz / Bastionsmauer Christopher Grohmann, Katharina Schaller, Dr. Anja Hoppe	59
2.3	Sanierungskonzept für die Mikwe in Worms Michael Auras	69
2.4	Langzeituntersuchungen zu thermischen und hygri-schen Verhältnissen im Baumberger Sandstein im Südturm des Münsteraner Paulus-Doms Jörg Harnisch	79

3.0	Digitalisierung/BIM	
3.1	DigiPark – Digitalisierung in der Bauwerksinstandsetzung Dr.-Ing. Christoph Blut, Dr.-Ing. Till Büttner, Dr.-Ing. Ralf Becker, Raymond Wollenberg, Baris Özcan, Heiner Stahl, Prof. Dr.-Ing. Jörg Blankenbach	91
3.2	Digitale Bestandsaufnahme mittels 3D Realitätserfassungstechnologien in der Bauwerkserhaltung am Beispiel von Parkbauten Cher Sze Tan, M.Eng., Sevket Ersan, M.Sc.	101
3.3	Intelligente Brücke: Living Labs und aktuelle Forschung Sarah Dabringhaus, Sonja Neumann, Yasser Alquasem, Peter Haardt	105
3.4	BIM in der Instandsetzungsplanung Marika Bornholdt, Matthias Petersen, Dr. Holle Goedeke	115
4.0	Regelwerke	
4.1	Aktueller Stand der Regelwerke für die Erhaltung von Betonbauwerken Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach	125
4.2	Aktuelle Entwicklungen der ZTV-ING für die Sachkundige Planung und Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen an Brücken- und Ingenieurbauwerken Eckhard Kempkens	131
4.3	Die Belange der Bauausführung in der aktuellen Regelwerkssituation für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen Dipl.-Ing. Heinrich Bastert	135
4.4	Grauzone Bauen – Insbesondere bei Berücksichtigung der Anerkannten Regeln der Bautechnik Holger Tebbe	141
5.0	Ingenieurbauwerke/Brücken	
5.1	Hochstraße Elbmarsch in Hamburg – Neubau von Megastützen unterhalb befahrener Brückenüberbauten Dipl.-Ing. Katharina Dawirs, Dr.-Ing. Sebastian Krohn	153
5.2	Sanierung von Brückenfahrbahnen und Gehwegen mit Stahl-Kunststoff-Verbundbauteilen Dipl. Ing. Thomas Stihl	159
5.3	Carbonbeton – Verstärkung der Brückenbauwerke A 648 UF Nidda – Erfahrungsbericht aus der Ausführung eines Pilotprojektes Rolf Spreemann	165

6.0	Denkmalpflege/Tragwerksplanung	
6.1	Wie Pech & Schwefel – Historische Klebstoffe und ihre Verwendung bei Natursteinreparaturen an historischen Baudenkmalern unter Betrachtung ihrer Rezeptur, Belastungsgrenzen, umweltschonenden Wirkung und Nachhaltigkeit	171
	Sophie Hoepner, Prof. Dr. Cordt Zollfrank	
6.2	Ansätze zur rechnerischen Erfassung des Tragverhaltens von Drahtputzgewölbedecken mithilfe der Finite-Elemente-Methode	179
	Jessica Klinkner, M.Eng., Dipl.-Ing. Axel Dominik	
6.3	Tragwerksplanung im Denkmal – Sonderlösungen in der Cadolzburg	189
	Dipl.-Ing. Hjalmar Schoch	
7.0	Ausführung	
7.1	Pflichten des Sachkundigen Planers bei der Bauüberwachung	197
	Dipl.-Ing. Rainer Braun	
7.2	Betoninstandsetzung von Trinkwasserspeichern unter besonderen hygienischen Randbedingungen	201
	Peter Sudermann, M.Eng., Prof. Dr.-Ing. Manfred Breitbach	
8.0	Rissbehandlung	
8.1	Planung als Voraussetzung zur dauerhaften Instandhaltung von Rissen mit Rissfüllstoffen	217
	Dr.-Ing. Angelika Eßer, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held	
8.2	Schäden an Betonbauteilen, Wasser in der Konstruktion	223
	Dipl.-Ing. Bodo Appel	
8.3	Fachgerechte Rissbehandlung als Bestandteil der Betoninstandsetzung	233
	Götz Tintelnot	

9.0	Textilbeton	
9.1	Verstärken mit Carbonbeton – von der Planung bis zur Ausführung Sebastian May, Alexander Schumann, Frank Schladitz	243
9.2	Dauerhaftigkeit von textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten unter zyklischer Belastung und rückseitigem Wasserdruck Cynthia Morales Cruz, Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach	*
9.3	Rissverteilende textilbewehrte Mörtel- und Betonschichten zur dauerhaften Instandsetzung von Bauwerksoberflächen Amir Rahimi, Andreas Westendarp, Cynthia Morales Cruz, Michael Raupach	249
9.4	Innovative Verstärkung von Bestandsbrücken Christian Dommies, Christian Knorrek, Josef Hegger	253
9.5	Dichtflächen für LAU-Anlagen auf Basis von Carbonbeton Detlef Koch, Björn Neuberger, M. Sc	*
9.6	Erhaltungs- und Instandsetzungsprojekte mit UHFB – Anwendungen und Erfahrungen aus der Praxis Philipp Truffer	261
9.7	Mobile Konzepte für die Sanierung von Betonbauwerken Simon Liebl, Björn Callsen	275
10.0	Denkmalpflege/Mörtel	
10.1	Weiterbauen – im ländlichen Raum Christian Kaiser	283
10.2	SalzTransportPutz – Stabilität durch die Porenstruktur? Dr. rer. nat. Andreas Zahn, Dr. rer. nat. Andreas König, Jonas Hallmann	285
10.3	War es dem Turm zu heiß? Brände als mögliche Ursache für Mauerwerksschäden an einem historischen Turm Prof. Dr.-Ing. Matthias Jagfeld	291
10.4	Erfahrungen zur Dauerhaftigkeit von historischen Mörteln und Betonen in feuchtebelasteten Bereichen Bernwart Jungermann	301

11.0	Dauerhaftigkeit	
11.1	Bedeutung der Restnutzungsdauer von Ingenieurbauwerken für die Erhaltungspraxis Joost Gulikers, Maria Teresa Alonso Junghanns	307
11.2	Leistungsbezogene Dauerhaftigkeitsbemessung und Analyse der Restnutzungsdauer von Bauwerken mit Einbezug von LIPS-Auswertungen Dr. Matthias Bernhard Lierenfeld, Nathan Metthez, Philipp Truffer	317
11.3	Monitoring von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen Iris Hindersmann, Peter Haardt	331
11.4	Stand sicherheitsmonitoring an weitgespannten Hallentragwerken mit AKR- und Korrosionsproblematik Prof. Dr.-Ing. Jörg Röder	339
12.0	Betonersatz	
12.1	Untersuchungen zum Tragverhalten der Verbundfugen bei Instandsetzungen von Betontragwerken Christian Knorrek, Christian Dommès, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger	351
12.2	Betonersatz und Oberflächenschutz mit hochfesten Betonen Grundlagen und Anwendung am Beispiel Tiefgarage Prof. Dr.-Ing. Stefan Linsel, Dieter Neff	361
12.3	Betoninstandsetzung auf Bestandsbetonen mit geringen physikalischen Leistungsdaten Olaf Kern, Eva-Maria Ladner, Björn Marucha, Markus Ehrhardt	363
12.4	Prüfung und Bewertung der Beständigkeit von Instandsetzungsmörteln bei chemischen Angriff auf Betonbauwerke Michael Berndt, Wolfram Kämpfer	367

13.0	Ingenieurbauwerke/Wasserbauwerke	
13.1	Anforderungsspezifische Zustandsnoten als unterstützende Kennzahlen für das Erhaltungsmanagement von Wasserbauwerken Annemarie Seiffert, M. Sc., Sarah Elting, M. Eng., François Marie Nyobeu Fangue, M. Sc. Lukas Weber, M. Sc.	377
13.2	Ein digitales Entscheidungstool für die Auswahl von Instandsetzungsverfahren am Beispiel Instandsetzung von Schleusenanlagen unter laufendem Betrieb Dominik Waleczko, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheno, Dipl.-Ing. Andreas Westendarp	383
13.3	Instandsetzung von Schleusenanlagen unter laufendem Betrieb mithilfe eines Modulbaukastens Anna Leicht, M.Sc., Dipl.-Ing. Marc Schmitz, Dipl.-Ing. Andreas Westendarp, Dominik Waleczko, M.Sc	397
13.4	Druck- und Zugfestigkeit massiver Wasserbauwerke im Bestand – Hintergründe zu Festlegungen im BAWMerkblatt TbW Frank Spörel	403
13.5	Sanierung Kulturwehr Breisach und Möhlinwehr Peter Gültner	411
13.6	Erfahrungen bei der Instandsetzung einer durch Alkali-Kieselsäurereaktion und chloridinduzierte Korrosion geschädigte Anlegerbrücke in der Nordsee Lars Wolff, Michael Bruns	419
14.0	Denkmalpflege/Fassade	
14.1	Betoninstandsetzungsmaßnahmen an denkmalgeschützten Bauwerken – Fallbeispiel für nicht regelwerkkonforme Instandsetzungslösungen Dr.-Ing. Michael Fiebrich	*
14.2	Kosmetische Betoninstandsetzung Haus der Berliner Festspiele in Berlin – Betoninstandsetzung mit Pfiff Markus Ehrhardt, M.Sc., Dipl.-Ing. Annegret Hofmann-Kuhnert, Reiner Hofmann	433
14.3	Sauber aber fleckig – Streitpunkt Fassadenreinigung – Möglichkeit, Grenzen und technische Rahmenbedingungen Wladislaus Metzger, Holger Tebbe	437

15.0	Forschung und Entwicklung	
15.1	Plasmagespritzte Aluminiumoxidschichten für den Schutz von Betonoberflächen	455
	Hendrik Morgenstern, M.Sc., Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach, Tobias Wessler, B.Eng.	
15.2	Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken – Textilbewehrte Mörtel- und Betonschichten mit mineralisch getränkter Bewehrung	463
	Martin Lenting, Jeanette Orłowsky	
15.3	Betoninnenwannen zur nachträglichen Abdichtung von Gebäuden – Systematik der Bauweisen und neue Möglichkeiten mit Textilbeton	473
	Dipl.-Ing. Georg Schäfer	
15.4	Alkalische Hydrogele als Ankoppelungsmaterial für den elektrochemischen Chloridentzug	481
	Dr. rer. nat. Univ. Prof. Oliver Weichold, Andre Jung, Armin Faulhaber	
15.5	Acrylatfreie Zweikomponentengele zur Rissverpressung	*
	Dr. rer. nat. Univ. Prof. Oliver Weichold	
15.6	Überwachung des Korrosionszustandes der Bewehrung an einem Kühlturm im Meerwasserbetrieb mittels polymerer Zulagekathoden	487
	Christian Helm	
16.0	Oberflächenschutz	
16.1	Kunstharzbeschichtungen auf feuchten Untergründen – Herausforderungen und Lösungen in der Praxis	497
	Eva-Maria Ladner, Patricia Gimeno, Dr. Stefan Kühner	
16.2	Blasen in Polymerbeschichtungen Erkennungsmerkmale, Ursachenanalyse und Entstehungsmechanismen	501
	Dr.- Ing. Robert Engelfried, Dipl.-Ing. Helena Eisenkrein-Kreksch	
16.3	Mit neuem Prüfverfahren (PAT) und innovativen Rohstoffen – der Weg zu beständigeren Parkhaus-Verschleißschichten	515
	Sandro La Spina, Dr. Stefan Kühner, Dr. Thomas Pusel	
16.4	Modular aufgebaute Qualitätssicherung bei der Ausführung einer Tiefenhydrophobierung als Oberflächenschutzsystem bei unterschiedlichen Anwendungsfällen	519
	Tobias Bürkle, Prof. Dr. Andreas Gerdes	
16.5	Freiflächenheizung im Dünnbelag für den Neubau und die Sanierung: Aufbau – Eigenschaften – Umsetzung	539
	Sebastian Lücke, M.Eng.	
16.6	Instandhaltung von Verkehrswegeflächen	551
	Karl-Heinz Lindenbauer, Götz Tintelnot	

17.0	Denkmalpflege/Mauerwerk	
17.1	Reparaturmörtel für gipshaltiges Mauerwerk Dr. Petra Egloffstein	559
17.2	Der Merkblattentwurf WTA 7-4 Ermittlung der Druckfestigkeit von Bestandsmauern aus künstlichen kleinformatigen Steinen Claudia Neuwald-Burg, Jonny Henkel	563
17.3	Was verrät uns der Mörtel aus Bestandsbauten über seine Eigenschaften? Dipl.-Ing. Axel Dominik, Andreas Schell B. Eng., Pascale Dominik M. Sc.	571
17.4	Bestandserkundungen als Basis für Sanierungen Dr.-Ing. Gabriele Patitz	589
17.5	Das Fugenbohrkernverfahren nach HELMERICH/HEIDEL bzw. UIC-Kodex 778-3 zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Bestandsmauerwerk Dipl.-Ing. Jonny Henkel, Dipl.-Ing. Claudia Neuwald-Burg	597
17.6	Nachträgliche Horizontalsperren und Feuchtetransportvorgänge Domenika von Kruedener, Axel Dominik	611
17.7	Überblick zur Durchführung von Versuchen am Bauwerk mit Injektionsankern in Mauerwerk Regelungen und Praxistipps Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Jürgen H. R. Küenzlen, M. A., Dipl.-Ing. (FH) Eckehard Scheller, Dipl.-Ing. Rainer Becker, Dipl.-Ing. Thomas Kuhn	619
18.0	Schadstoffe/Gefahrstoffe	
18.1	Gebäudeschadstoffe – Typische Einbausituationen und rechtssicherer Umgang bei Baumaßnahmen und Instandhaltung Diplom-Geoökologe Holger Andris	639
18.2	Gesundheitsgefahren bei der Sanierung von Bauwerken Klaus Kersting, Corinne Ziegler, Sabrina Schatzinger	651
18.3	Welche Möglichkeiten bietet die Digitalisierung im Straßenbau Dieter Licht	655

* Manuskript lag bei Redaktionsschluss nicht vor.



Plenarvorträge

Digitalisierung in der Bauwerkserhaltung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University, D-52062 Aachen, Deutschland

Hendrik Morgenstern, M.Sc.

Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University, D-52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Die Digitalisierung im Bauwesen schreitet weiter voran und eröffnet zusammen mit der zunehmenden Verbreitung und Weiterentwicklung von Hard- und Software stetig weitere Möglichkeiten für innovative Arbeitsweisen. Building Information Modeling (BIM) wird derzeit zum Standard für den Neubau, wurde jedoch noch nicht für die Verwendung bei Bestandsbauten optimiert. Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Innovationsnetzwerkes werden gemeinsam mit vier RWTH-Instituten und derzeit acht Industriepartnern am Institut für Baustoffforschung (ibac) der RWTH Aachen University neue Methoden und Möglichkeiten zur BIM-basierten Bauwerkserhaltung erforscht und bis zur Praxistauglichkeit entwickelt. In diesem Beitrag werden die Vision der digitalisierten Bauwerkserhaltung, die bisherigen Arbeitsstände sowie die geplanten weiteren Schritte vorgestellt. Die bisherigen Erkenntnisse zeigen, dass die Nutzbarmachung von BIM-Modellen über die Planungs- und Ausführungsphase hinaus ein essenzieller Schritt für die Digitalisierung der Bauwerkserhaltung ist und ein großes Potenzial für effektive Bauwerksdiagnosen und ein effizientes Lebensdauermanagement birgt.

1. Allgemeines

1.1 Digitalisierung im Bauwesen

Durch den Stufenplan Digitales Planen und Bauen des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) wurde 2015 die Digitalisierung des Bauwesens offiziell ausgerufen [1]. Die Digitalisierung wird dabei nicht nur von technologischem Fortschritt, sondern auch von Begriffen wie Internet of Things (IoT), Industrie 4.0, Smart Buildings und BIM (Building Information Modeling) begleitet. Im ersten Fortschrittsbericht des Umsetzungsplans des BMVI liegt dabei der Fokus deutlich auf der Verwendung von BIM als Instrument für die Planung, Baufortschrittskontrolle und Informationsbereitstellung [2]. Die öffentliche Hand nimmt bei der Realisierung der Digitalisierung im Bauwesen eine Vorreiterrolle ein. So zeigen beispielsweise die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) deutliche Ambitionen und beschreiben ein großes Potenzial in der Digitalisierung, für deren effektive Umsetzung jedoch noch eine entsprechende Kollaborationsinfrastruktur geschaffen werden müsse [3, 4]. Aufgrund fehlender systemübergreifender Strukturen und vieler Insellösungen konnten sich die meisten Digitalisierungsmaßnahmen noch nicht zum Standard durchsetzen. Das Building Information Mode-

ling jedoch wird zunehmend gefordert und angewandt, sodass dort eine weitverbreitete Implementierung in naher Zukunft absehbar ist.

1.2 Building Information Modeling (BIM)

Building Information Modeling ist eine computergestützte Methode zur Ausführung, Planung und Betrieb von Gebäuden. In entsprechenden BIM-Softwares können sämtliche Bauteile grafisch dargestellt und mit spezifischen Informationen versehen werden. Durch einen Klick auf das jeweilige Element werden somit Informationen über den Baustoff, die Geometrie und die Ausführung abrufbar. Bei der Nutzung dieses Bauwerksmodells wird zwischen Closed-BIM- und Open-BIM-Prozessen unterschieden. Bei Closed-BIM muss für die Zusammenarbeit eine bestimmte Software genutzt werden, die für den jeweiligen Zweck optimiert wurde und in der Regel lizenzpflichtig ist. Bei Open-BIM wird ein offenes Dateiformat gewählt, das die Arbeit mit verschiedenen Programmen erlaubt, sodass alle am Bauprozess Beteiligten Zugriff auf das Modell haben können. In der Regel wird bei Open-BIM-Prozessen das IFC-Format (Industry Foundation Classes) genutzt. Dieses ist der offene Standard im Bauwesen und wird durch das Kompetenznetzwerk buildingSMART e.V. definiert. Das IFC-Format ist auf Vereinheitlichung und Normierung ausgelegt, was jedoch zulasten der Komplexität geht.

Jedes BIM-Element trägt gewisse Informationen, sogenannte Merkmale, welche das Bauteil definieren oder die Spezifikationen beschreiben. Beim Übertrag in das offene IFC-Format kann es jedoch zu Informationsverlust kommen, wenn die Merkmale nicht in das IFC-Muster passen. Daher wird für eine einheitliche Datenkommunikation durch das buildingSMART Data Dictionary (bsDD) eine Art Wörterbuch für die gemeinsame Sprache in der BIM-gestützten Zusammenarbeit gegeben. Da auch das bsDD jedoch nicht alle nötigen Fälle abdeckt, wird die Verwendung eines (nationalen) Merkmalservers für die einheitliche Informationsübergabe vorgeschlagen [5]. Neben diesen derzeit noch bestehenden strukturellen Herausforderungen sollte beachtet werden, dass zwischen Modellierung und Realisierung stets eine gewisse Diskrepanz herrschen wird. So versteht die BAW trotz aller Möglichkeiten BIM in erster Linie als ein Werkzeug zur Optimierung des Planungsergebnisses [6]. Als ein solches findet es bis dato primär Anwendung in Neubau und Planung.

1.3 BIM-basierte Bauwerkserhaltung

Bei gründlicher Planung beschreiben BIM-Modelle den Soll-Zustand teils äußerst präzise. Der Ist-Zustand nach der Ausführung findet seinen Weg bislang jedoch nicht in das entsprechende Modell zurück. Entsprechend eignet sich das Modell primär für die Planung des Neubaus, weniger jedoch für die Planung einer später gegebenenfalls nötigen Instandsetzungsmaßnahme. Um dies zu ändern und somit den technischen Wertverlust des BIM-Modells nach der Bauphase zu vermeiden, forscht das Institut für Baustoffforschung (ibac) der RWTH Aachen University an Maßnahmen zur BIM-basierten Bauwerkserhaltung. Diese soll nach der Realisierungsphase u.a. folgende Bereiche umfassen:

- Zustandserfassung
- Instandsetzungsplanung
- Instandsetzungsausführung
- Sensorbasiertes Monitoring
- Probabilistische Dauerhaftigkeitsprognosen

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten ZIM-Projekt DigiPark werden die ersten Schritte hin zu einer BIM-basierten Bauwerkserhaltung erforscht. Ausgehend von diesem Projekt wurde mit insgesamt zwölf Partnern aus Industrie und Wissenschaft das ebenfalls BMWi-geförderte Innovationsnetzwerk (www.bim-xd.de) gegründet, das die Vision einer vollständigen Digitalisierung von Bestandsgebäuden und deren Instandhaltung verfolgt. Das Netzwerk vereint Kompetenzen der Bauwerksdiagnose, Instandsetzungsplanung und Bauausführung sowie aus den Bereichen der Soft- und Hardwareentwicklung, sodass alle

erforderlichen Entwicklungen innerhalb des Netzwerkes erarbeitet werden können.

In der Bauwerkserhaltung stellen die Komplexität und Individualität von Instandsetzungen im Vergleich zum Neubau eine besondere Herausforderung dar. Es gibt ebenso wenig die Standardlösung wie es den Standardschaden gibt. Entsprechend müssen die digitalisierten Methoden besonders anpassungsfähig und auf die verschiedensten Untersuchungsgegenstände anwendbar sein. Der erste Schritt zum BIM-basierten Erhalten ist dabei i.d.R. die nachträgliche Erstellung eines BIM-Modells.

2. Das digitale Bauwerksmodell

Durch die vergangenen Fortschritte in der Geodäsie ist die Erstellung von Punktwolken-Scans mittlerweile anwenderfreundlich und kosteneffizient geworden. Entsprechende Fachkräfte können mittels handgeführten oder stativgebundenen Laserscannern Gebäude binnen kurzer Zeit in baupraktisch ausreichender Genauigkeit vermessen. Aus der Punktwolke kann mit üblichen BIM-Softwares nachträglich ein BIM-Modell des Gebäudes erstellt werden. In Abbildung 1 ist oben die Punktwolke des im DigiPark-Projekt vermessenen Parkdecks und unten das daraus abgeleitete Modell gezeigt. Dieses Modell kann aus der proprietären Software in das IFC-Format exportiert werden, sodass alle Beteiligten auch mit kostenfreien BIM-Viewern das Modell betrachten und die gespeicherten Informationen abrufen können.

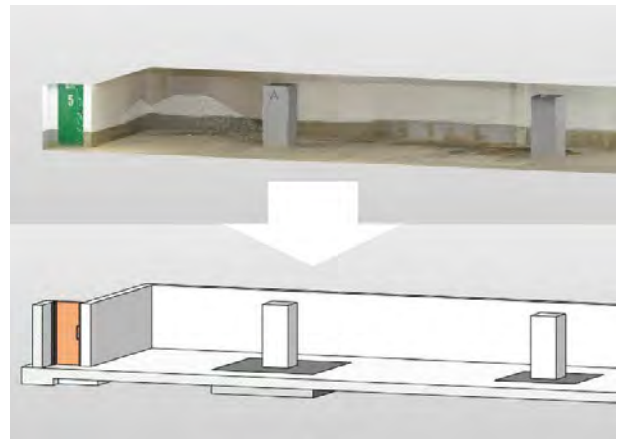


Abbildung 1: Punktwolke (oben) und abgeleitetes BIM-Modell (unten) eines Parkdecks

Das erstellte Modell enthält nach diesem Arbeitsschritt jedoch noch keine bauwerkserhaltungsrelevanten Informationen, es dient lediglich als 3D-Planunterlage für die folgenden Schritte. Sollte bereits ein BIM-Modell vorliegen, kann dieses mitsamt aller vorhandener Informationen verwendet werden. In beiden Fällen sind in den Modellen jedoch noch keine Informationen der Zustandserfassung enthalten und lediglich generische Bauteile simuliert.

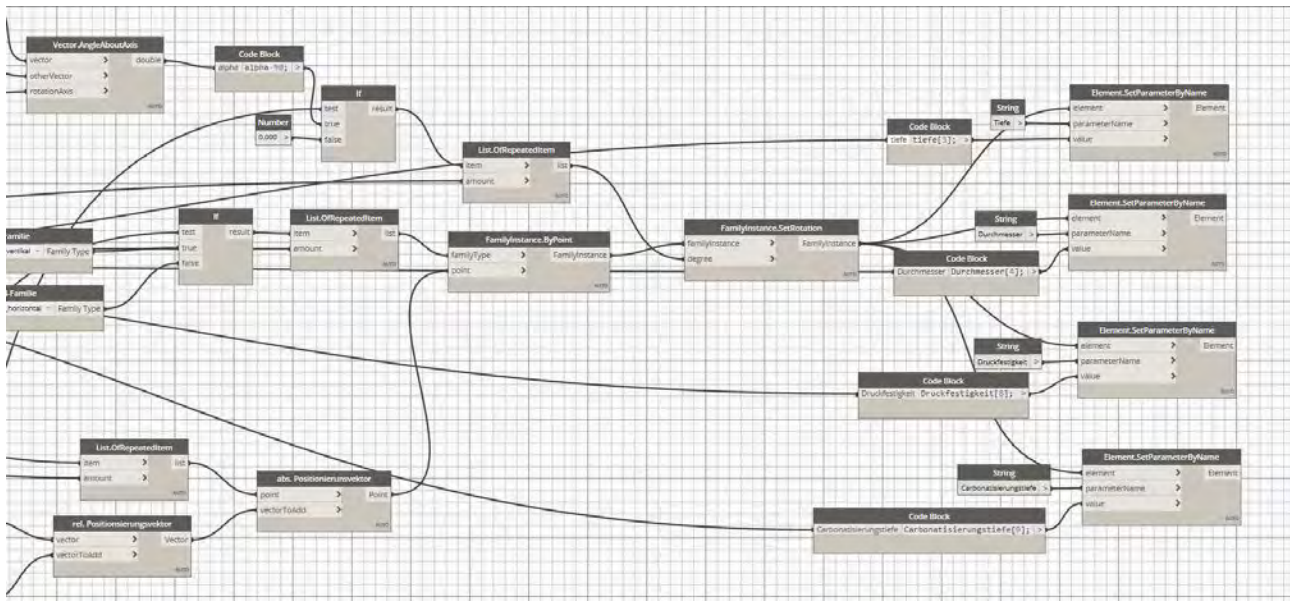


Abbildung 2: Visuelle Programmierung in Revit mit dem Plugin Dynamo

Das Hinzufügen von Informationen ist in den BIM-Modellen nur in einem gewissen Rahmen vorgesehen, der für die Bauwerkserhaltung derzeit nicht geeignet ist [7]. Entsprechend müssen alle Ergebnisse der Bauwerksuntersuchung jedem Element (Bauteil) einzeln hinzugefügt werden. Bei der Kartierung von dutzenden Prüfstellen, hunderten Rissen oder tausenden Werten eines Flächenscan-Rasters wäre eine manuelle Implementierung weder wirtschaftlich noch praxistauglich. Eine mögliche Lösung, die am ibac deshalb für die Dateneingabe verfolgt wird, nutzt die Visuelle Programmierung. Mit der BIM-Software Revit (Autodesk) kann das Open-Source Plugin Dynamo genutzt werden, um Elemente im Modell zu erstellen oder mit zusätzlichen Informationen zu versehen. Ein Auszug des Knotenplans der visuellen Programmierung zum Import von Bohrkern-Untersuchungen ist in Abbildung 2 gezeigt.

Auf diese Weise genügt es, die zu importierenden Informationen in einer Excel-Tabelle zur Verfügung zu stellen, und mit der Ausführung des Programmier-Skriptes werden die Daten (bspw. Untersuchungsergebnisse) dem jeweiligen Element im BIM-Modell hinzugefügt. Visuelle Programmierung ist zwar wesentlich intuitiver und einsteigerfreundlicher als die herkömmliche Arbeit mit Programmiersprachen, aber erfordert dennoch eine gewisse IT-Kompetenz. Für die praktische Anwendung genügt es allerdings, ein Skript ausführen zu können. Die Entwicklungsarbeit der jeweiligen Import-Skripte kann vollständig ausgelagert werden. Das Verorten bzw. Hinzufügen der jeweiligen Diagnoseergebnisse ist anschließend nicht schwieriger als die gewöhnliche Bedienung einer BIM-Software.

3. Zustandserfassung

Ziele der Bauwerksuntersuchung bzw. Zustandserfassung sind die Bewertung des Bauteiles und die Abschätzung der zu erwartenden Restnutzungsdauer bzw. der durchzuführenden Maßnahmen. In der statischen Bewertung von Bestandsbauwerken werden bereits zerstörungsfreie Prüfungen (zfP) und Diagnoseinformationen als Basis für vollprobabilistische Modelle genutzt [8]. Für ein strukturiertes und übersichtliches Informationsmanagement findet dort ebenfalls das Konzept des modellbasierten Prüfens unter Verwendung von BIM-Modellen Anwendung [9].

Aus den Bauwerksinformationen liegen womöglich Angaben über den verwendeten Beton oder sogar Prüfergebnisse an Referenzprüfkörpern vor. In vergleichenden Untersuchungen konnte jedoch gezeigt werden, dass in situ die bestimmten Druckfestigkeiten durchschnittlich 20 % geringer und die ermittelten Carbonatisierungs- bzw. Chloridmigrationskoeffizienten 40 bis 50 % höher als jene der separat hergestellten Vergleichsprobekörper sind [10]. Als Konsequenz daraus sollte also für eine zuverlässige Bewertung des Bauteilzustandes eine umfassende Diagnose durchgeführt werden. Neben invasiven Verfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit gibt es auch zerstörungsfreie Prüfungen, um bspw. Betondeckung oder Korrosionsaktivität zu prüfen (s. z.B. [11]). Im Idealfall liefert die Bauwerksdiagnose Angaben zu folgenden Bauteileigenschaften:

- Betondeckung
- Bewehrungslage
- Carbonatisierungstiefe
- Chloridgehalt (tiefengestaffelt)
- Korrosionspotenzial (flächig)
- Rissbild
- Schadstellen

Für eine effektive BIM-basierte Zustandserfassung und -bewertung müssen die verschiedenen Diagnoseergebnisse vollständig maschinenlesbar und orts aufgelöst in das Modell übertragen werden. Dazu müssen die Daten aus dem jeweiligen Messgerät mit der ggf. proprietären Software in ein gängiges Format wie bspw. Excel-Tabellen exportiert werden. Auf diese Weise werden die Diagnosedaten für eine kollaborative Weiterverarbeitung zur Verfügung gestellt. Anschließend erfolgt der Import wie bereits erläutert z.B. über Visuelle Programmierung in das BIM-Modell. Mit jedem Schritt dieser digitalisierten Arbeitsweise werden die Daten effektiver genutzt und die folgenden Analysen zunehmend effizienter gestaltet, wie in Abbildung 3 dargestellt.

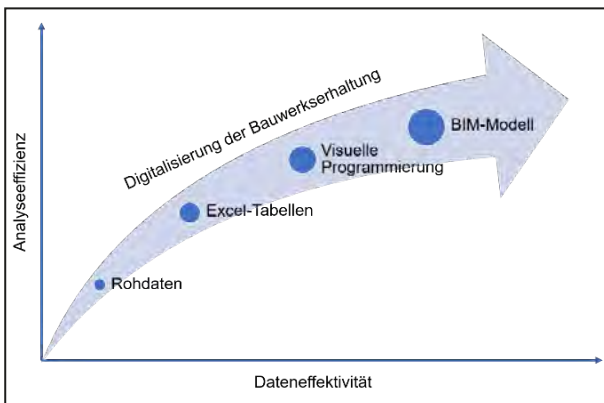


Abbildung 3: Nutzensteigerung von Diagnosedaten durch eine digitalisierte Arbeitsweise

Ein praktisches Beispiel der Datenimplementierung ist in Abbildung 4 dargestellt. In einer Excel-Tabelle wurden für mehrere Bohrkerne Daten aus einer beispielhaften Bauwerksuntersuchung zur relativen Lage, absoluten Tiefe und zum Bohrkerndurchmesser übermittelt und mittels weniger Mausklicks in das BIM-Modell übertragen. Durch einen Klick auf die Bohrkerne werden Untersuchungsergebnisse zur Druckfestigkeit, Geometrie und Carbonatisierungstiefe abrufbar.

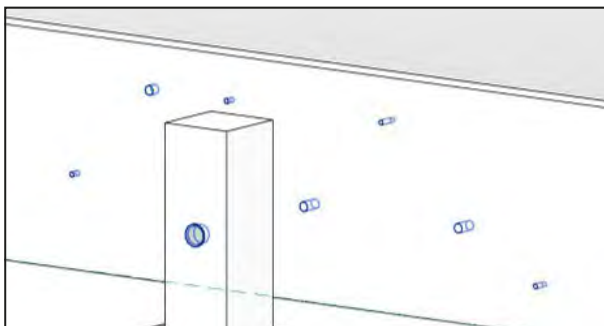


Abbildung 4: Bohrkerne in Wand und Stütze

4. Instandsetzungsplanung

Aufbauend auf der Zustandserfassung können die Bauteile nun effizient hinsichtlich ihrer Instandsetzungsbedürftigkeit bewertet werden. Die Diagnoseergebnisse können variabel ein- und ausgeblendet werden. Es können einzelne Eigenschaften oder auch ihre Kombinationen betrachtet werden. Flächige Scans können in übereinander liegenden Lagen angezeigt werden. Die Implementierung der Diagnoseergebnisse hängt vom verwendeten Skript ab und die Möglichkeiten werden lediglich durch die jeweilige Programmiersprache bzw. das Datenformat beschränkt. Die Darstellung erfolgt in Abhängigkeit des verwendeten BIM-Programmes und erlaubt auch relative Einfärbungen je nach Merkmalsausprägung, wie am Beispiel des BIM-Viewers BIMVision (Datacomp) in Abbildung 5 gezeigt. Die rot gefärbten Elemente weisen Carbonatisierungstiefen von über 45 mm auf und markieren somit neuralgische Punkte. Neben der Carbonatisierungstiefe kann auch jeder andere verfügbare Wert dargestellt werden, bspw. die Restnutzungsdauer oder auch ein quantifizierter Instandsetzungsbedarf.

Auf diese Weise können beispielsweise kritische Bereiche identifiziert werden, die anschließend mit Sensorik gezielt überwacht werden. Auf diese Weise kann effizient ein Korrosionsmonitoring wie in [12] vorgestellt implementiert werden, um Zustandsdaten zu sammeln und Prognosen zu validieren. Neben der Einfärbung und gegenüberstellenden Visualisierung der Diagnoseergebnisse wäre es auch denkbar, Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit der Zustände automatisiert zu generieren. Warnungsmeldungen könnten gefährliche Über- oder Unterschreitungen ankündigen und geeignete Gegenmaßnahmen aufführen. Die Analyse des Ist-Zustandes und die Planung der nötigen Instandsetzung kann auf diese Weise ideal unterstützt werden. Daneben erlaubt eine digitale Zustandserfassung ein nachhaltiges Datenmanagement, indem alle vorliegenden Informationen übersichtlich gebündelt und vollständig erhalten werden.

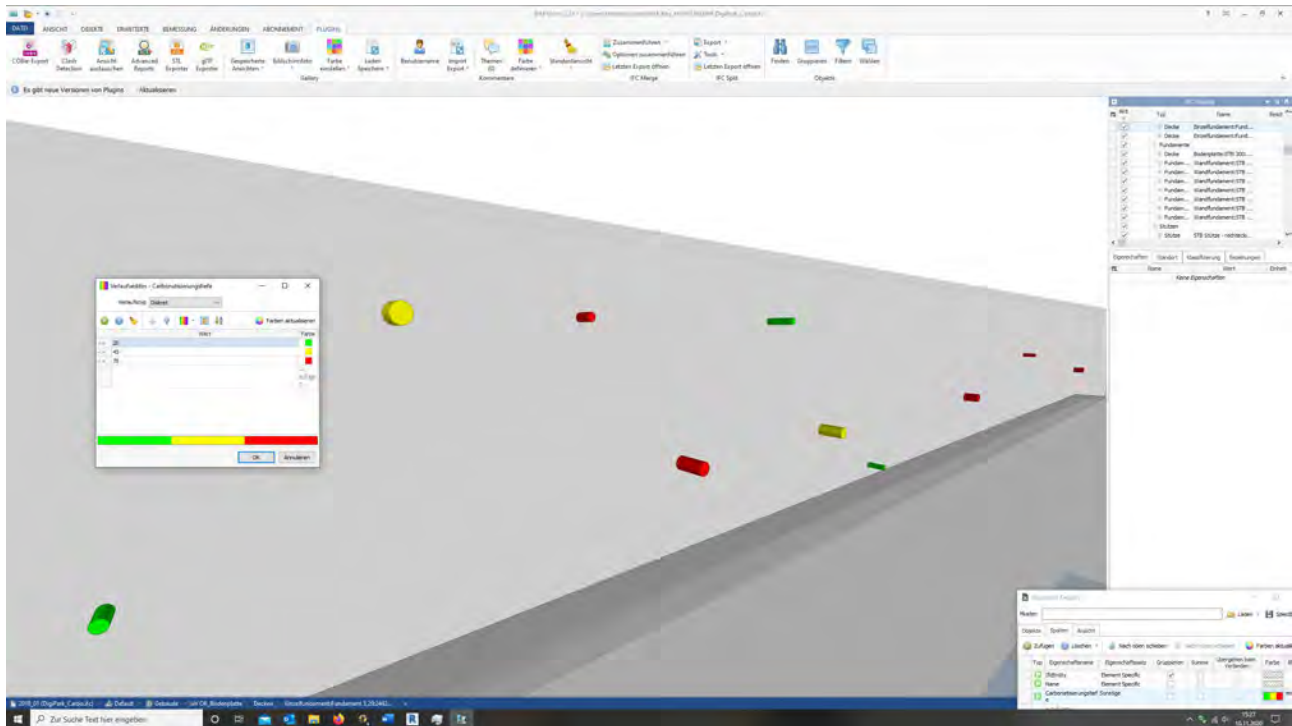


Abbildung 5: Farbige Darstellung der Carbonatisierungstiefe in diskreten Bereichen (grün ≤ 20 mm, gelb ≤ 45 mm, rot ≤ 70 mm)

5. Ausführung

Die BIM-basierte Ausführung arbeitet mit digitalen Planungsunterlagen und verbindet diese womöglich mit VR/AR-Technologie (Virtual bzw. Augmented Reality). Es ist denkbar und technisch möglich, dass beispielsweise die Abtragstiefe bis zum tragfähigen Beton über eine AR-Brille farblich markiert oder die tatsächliche Bewehrungslage sichtbar wird, um Sondierungsöffnungen zielsicher zu platzieren. In einem weiteren Schritt könnten Baumaschinen mit dem BIM-Modell verknüpft und automatisierte Kollisionsprüfungen durchgeführt werden, sodass ein Bagger selbstständig die Bewegung stoppt, bevor seine Schaufel eine Gasleitung oder ein Wasserrohr treffen würde. Es wird auch eine Kombination mit der Aufwandsermittlung bei Instandsetzungen angestrebt, sodass die laufenden Meter oder Flächen nicht manuell, sondern fotobasiert ermittelt und automatisch im BIM-Modell lokalisiert werden. Die nötige Hard- und Software für diese Arbeitsweisen ist bereits vorhanden, für die Anwendung

müssen jedoch geeignete BIM-Modelle und Infrastrukturen gegeben sein.

6. Sensorbasierte Dauerhaftigkeitsprognosen

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen ist ein elementarer Faktor für die Sicherheit und Nachhaltigkeit von Gebäuden. Neben deskriptiven Verfahren zur Dauerhaftigkeitsbemessung gewinnen probabilistische Verfahren und Modelle zunehmend an Bedeutung, um zuverlässige Prognosen und sinnvolle Anforderungen an dauerhaftigkeitsrelevante Parameter wie beispielsweise die Betondeckung zu stellen. Die gängigen Prognosemodelle benötigen jedoch als Input die den Modellparametern zugrundeliegenden statistischen Verteilungen. Die notwendigen Daten liegen oft nicht in geprüfter Form vor, sodass auf Literaturwerte zurückgegriffen wird. Die Verwendung von Literaturwerten ist jedoch kritisch für die Aussagekraft und Fehleranfälligkeit der Modelle, insbesondere weil manche schlecht zu überprüfenden Parameter besonders einflussreich sind [13].

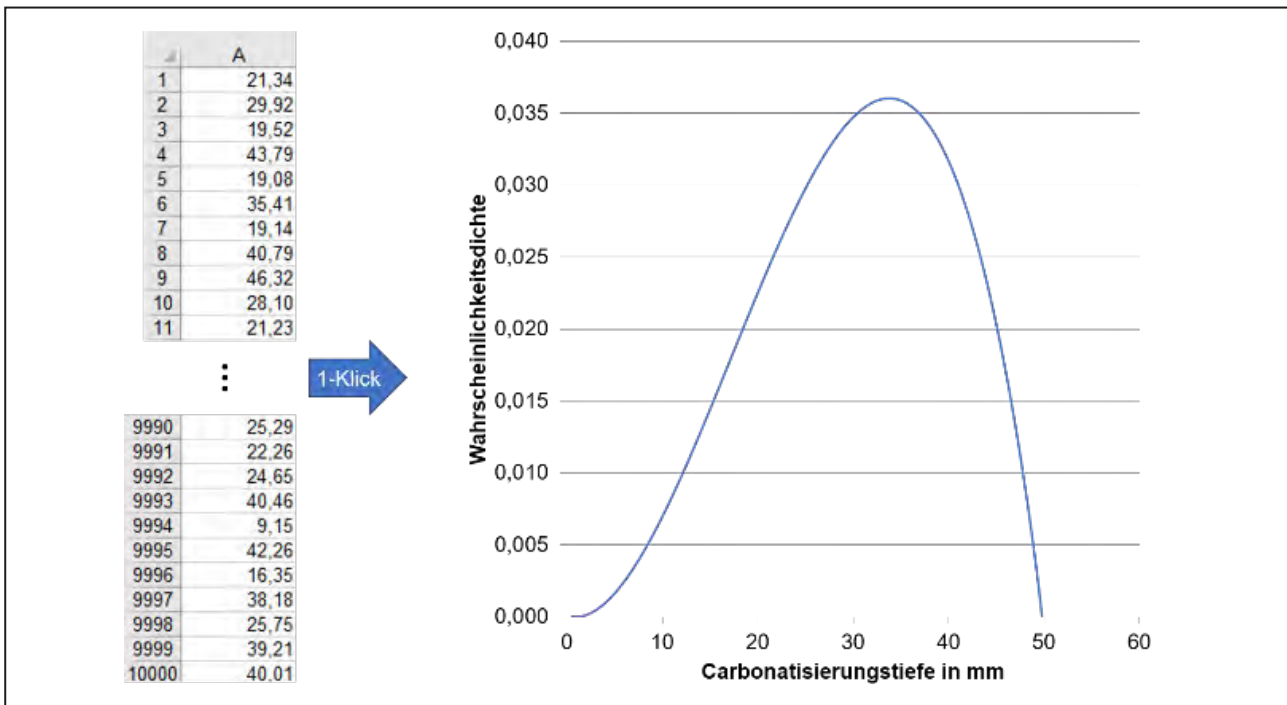


Abbildung 6: Ableiten von statistischen Verteilungen aus Sensordaten

Für eine belastbare Aussage der Prognosemodelle werden realistische Eingangsparameter benötigt, die durch Bauwerksprüfungen bestimmt werden [14]. Die Kalibrierung der Modelle auf das jeweilige Bauteil wird als vielversprechender betrachtet als die Verbesserung der Modelle selbst [15]. Darüber hinaus können die Modelle durch probabilistische Methoden wie beispielsweise das Bayes'sche Updating verbessert bzw. „angelernt“ werden. Der erforderliche Rechenaufwand war damals ein Hindernis, stellt jedoch bei den heutigen Computern kein Problem mehr dar [16]. Mittels Bayes'schem Updating können Defizite in der Verfügbarkeit gewisser Modellparameter kompensiert werden, sofern die Datengrundlage der anderen Parameter groß genug ist, was oft nicht der Fall ist [17]. Es gilt also, die durch die Bauwerksdiagnose und verbaute Sensorik gesammelte Daten nicht nur zu sammeln, sondern für lernfähige Lebensdauerprognosen zu nutzen. Aus den Rohdaten sollen statistische Verteilungen abgeleitet (vgl. Abbildung 6) und anschließend Zuverlässigkeitsindizes bestimmt werden. Die Ergebnisse können ebenfalls im BIM-Modell gespeichert und bauteilspezifisch abgerufen oder gegenübergestellt werden. Auf diese Weise wird nicht nur eine Bewertung des Ist-Zustandes BIM-basiert möglich, sondern auch der prognostizierten Zustände in der Zukunft.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das vorgestellte Konzept zur Digitalisierung der Bauwerkserhaltung baut auf den technischen Fortschritten der letzten Jahre auf und leitet eine modellzentrierte

Arbeitsweise ein. Daten sollen strukturiert aufbereitet, gesammelt und vernetzt werden. Mit automatisierten Auswertungen werden Handlungsmöglichkeiten vorgeschlagen und Bewertungen unterstützt. Mit einem vertretbaren Aufwand wächst über die Nutzungsdauer hinweg ein BIM-Modell, das nicht nur den Soll-Zustand, sondern auch den Ist-Zustand verlässlich wiedergibt. Aus dem bisherigen Arbeitsstand können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- BIM-visualisierte Diagnosen ermöglichen effiziente Analysen, indem örtliche Häufungen oder Streuungen sichtbar werden.
- Untersuchungsergebnisse, deren Verwendung bislang oft in einem Prüfbericht endete, bleiben maschinenlesbar erhalten und können für weitere Analysen genutzt werden (digitales Bauwerksbuch).
- Farbige „Ampel-Systeme“ erlauben die simple Ersteinschätzung des Bauteilzustandes.
- Digitalisierte Bauwerksdiagnosen ermöglichen effiziente Hightech-Instandsetzungen.
- Zuverlässige Prognosen ermöglichen zielgerechte Erhaltungsmaßnahmen.

Aktuell erfolgen weitere Bemühungen, um neben punktuellen und flächigen Bauwerksuntersuchungen auch komplexe Geometrien wie die tatsächliche Bewehrungslage aus diesen abzuleiten und automatisiert im BIM-Modell darzustellen. Es ist geplant, den Workflow mittelfristig cloudbasiert abzuwickeln und über diese mit Sensorik zu verknüpfen.

8. Literatur

- [1] Stufenplan Digitales Planen und Bauen - Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015.
- [2] Umsetzung des Stufenplans Digitales Planen und Bauen - Erster Fortschrittsbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017, p. 23.
- [3] C. Heinzlmann, J. Bödefeld, Z. Duric, Digitalisierung im Verkehrswasserbau, Bautechnik 97(6) (2020) 441-445.
- [4] Digitalisierung im Verkehrswasserbau, Bundesanstalt für Wasserbau, Hannover Congress Centrum, 2018.
- [5] G. Fröch, W. Gächter, A. Tautschnig, G. Specht, Merkmalsserver im Open-BIM-Prozess, Bautechnik 96(4) (2019) 338-347.
- [6] J.L. Bödefeld, Stefan, BIM - Hype, Risiken und Chancen, Neubau von Wasserbauwerken, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2019.
- [7] S. Kubens, J. Landis, C. Müller, R. Achenbach, BIM-basierte Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken, beton 12 (2019) 454-459.
- [8] S. Küttenbaum, S. Maack, T. Braml, A. Taffe, M. Haslbeck, Bewertung von Bestandsbauwerken mit gemessenen Daten, Beton- und Stahlbetonbau 114(6) (2019) 370-382.
- [9] H.G. Oltmanns, H. Oltmanns, A. Dirks, BIM-Modelle und die Bearbeitung durch Prüfeningenieure, Bautechnik (2019).
- [10] F. Jacobs, Dauerhaftigkeit von Beton im Bauteil, Beton- und Stahlbetonbau 114(6) (2019) 383-391.
- [11] S. Keßler, L.P. Emmenegger, A.A. Sagüés, Korrosionsdetektion an Stahlbetonbauwerken: konventionell und innovativ, Bautechnik 97(1) (2019) 11-20.
- [12] A. Holst, H. Budelmann, H.-J. Wichmann, Korrosionsmonitoring von Stahlbetonbauwerken als Element des Lebensdauermanagements, Beton- und Stahlbetonbau 105(12) (2010) 536-549.
- [13] M.G. Grantham, J. Gulikers, C. Mircea, Predicting residual service life of concrete infrastructure: a considerably controversial subject, MATEC Web of Conferences 289 (2019).
- [14] C. Boschmann Käthler, U.M. Angst, Der kritische Chloridgehalt – Bestimmung am Bauwerk und Einfluss auf die Lebensdauer, Bautechnik 97(1) (2019) 41-47.
- [15] U.M. Angst, Predicting the time to corrosion initiation in reinforced concrete structures exposed to chlorides, Cement and Concrete Research 115 (2019) 559–567.
- [16] D. Straub, I. Papaioannou, Bayesian Updating with Structural Reliability Methods, Journal of Engineering Mechanics 141(3) (2015).
- [17] B. Cai, X. Kong, Y. Liu, J. Lin, X. Yuan, H. Xu, R. Ji, Application of Bayesian Networks in Reliability Evaluation, IEEE Transactions on Industrial Informatics 15(4) (2019) 2146-2157.

Neuzeitliche Infrastrukturprojekte versus Denkmalpflege? Eine diplomatische Herausforderung?

Axel Dominik

Dominik Ingenieurbüro, Bornheim | Deutschland

Pascale Dominik

Dominik Ingenieurbüro, Bornheim | Deutschland

In dem Vortrag möchten wir anhand einiger Beispiele die Schwierigkeiten, aber auch die positiven Seiten schildern, die mit der restauratorischen Instandsetzung historischer Bauwerke verbunden sind.

Beispiel 1:

Eine historische Eisenbahnbrücke wurde im 18. Jahrhundert aus Natursteinmauerwerk errichtet, ist in großen Teilen schwer geschädigt und genügt nach Ansicht einiger Beteiligter nicht mehr den neuesten Infrastrukturanforderungen. Dies betrifft auch u. a. die Lasten, die zukünftig auf der Brücke transportiert werden sollen. Der Zustand der Brücke kann die heutigen Anforderungen nicht mehr erfüllen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Brücke vielfältige Alterserscheinungen aufweist. Die Naturwerksteine der Fassade sind teilweise gelöst, der Mörtel des Bruchsteinmauerwerks dahinter existiert in Teilbereichen nicht als Mörtel, sondern eher in einem sandigen Zustand.

Im Laufe der Untersuchungen entstand eine Faszination hinsichtlich der planerischen, aber auch der handwerklichen Leistungen, die an diesem Bauwerk mit den damaligen Mitteln des 18. Jahrhunderts und den Baustoffen aus der Region erbracht wurden. Für die Instandsetzung des Bauwerkes wurde nach Lösungen gesucht, die einerseits das traditionelle Bauwerk berücksichtigt, jedoch auch den heutigen Anforderungen entspricht.

Beispiel 2:

Ein historisches Bauwerk aus der Jahrhundertwende des 19. und 20. Jahrhunderts, welches seit vielen Jahrzehnten ungenutzt der Witterung frei ausgesetzt wurde und scheinbar keinen Nutzen mehr hat, gefährdet aufgrund seiner Bauqualität u. a. Passanten, die an dem Haus vorbeigehen.

Eine Wohnungsbaugesellschaft möchte aufgrund des großen Wohnungsbedarfs in den Städten auf dem Grundstück dieses denkmalgeschützten und vollkommen heruntergekommenen Bauwerkes ein mehrgeschossiges Wohnhaus nach dem neuesten Stand der Technik bauen. Das denkmalgeschützte Wohnhaus wurde mit den damaligen Baustoffen errichtet, weist feuchtebedingte

Schäden, einen biologischen Befall und nach den heutigen Anforderungen keinen ausreichenden Wärme- und Schallschutz auf und ist zudem nicht mehr tragsicher.

Beim näheren Hinsehen fasziniert jedoch diese verschmutzte Stuckfassade in Hinblick auf die handwerklichen Fähigkeiten, u. a. die der Stuckateure, der Schreiner und der Maurer.

Das Gebäude strahlt nicht nur das handwerkliche Können aus, sondern auch seine gesamte Geschichte.

Beispiel 3:

Eine Autobahnbrücke wurde während des 2. Weltkrieges aus Mauerziegel- und Natursteinmauerwerk errichtet.

Es ist faszinierend, mit welcher Präzision und in welcher kurzen Zeit dieses riesige Brückenbauwerk, welches viele Jahrzehnte dem Autobahnverkehr standgehalten hat, mit einfachen Baustoffen errichtet wurde. Die Baustoffe dieses Bauwerkes sind durch die Belastung aus dem Straßenverkehr und durch Umwelteinflüsse geschädigt, die Mörtelbestandteile sind infolge von Umwandlungsprozessen in ihren Eigenschaften stark verändert.

Eine nicht angepasste Ertüchtigung kann zu weiteren inneren Beanspruchungen und damit zu Schäden führen, wenn nicht neuzeitliche Instandsetzungsstoffe entwickelt werden, die mit diesen veränderten Baustoffen verträglich sind. Ziel ist es, das Bauwerk zu stabilisieren, die Tragfähigkeit zu erhöhen und somit das Bauwerk zu erhalten.

Es stellt sich die Frage, ob das Bauwerk auch nach der Instandsetzung den neuzeitlichen Infrastrukturanforderungen, die heute an ein solches Bauwerk gestellt werden, genügen.

Folgende Fragen stellen sich aufgrund der aufgezeigten Problematik:

„Dürfen diese denkmalgeschützten Gebäude für die Schaffung neuer Infrastrukturprojekte abgerissen werden?“

„Welchen Wert haben diese Gebäude heute noch für einen persönlich, seine Nutzer und gibt es Wege, sie für die Nachwelt zu erhalten?“

In dem Vortrag wird nicht nur auf historische Bauweisen und Baustoffe eingegangen, sondern auch auf die neuzeitlichen Forschungen und Entwicklungen, die mit der Planung und Instandsetzung solcher Bauwerke verbunden sind. Gerade im Baustoffsektor können uns diese Untersuchungen zukünftig von Nutzen sein, wenn es um Verträglichkeit, Alterung und Dauerhaftigkeit von Baustoffen geht.

An historischen Bauwerken lassen sich Wege für die Anwendung, aber auch für die Widerstandsfähigkeit von

Baustoffen finden, die auch für neuzeitliche Infrastrukturprojekte gelten können. Dabei ist die Einbeziehung der Denkmalpflege in die Forschungs- und Planungsaufgaben von großer Bedeutung. Sie besitzt die Erfahrung mit historischen Baustoffen sowie deren Anwendung und kann wichtige Hinweise auf die Instandsetzung der vielfältigen Bauwerke aus den vergangenen Jahrhunderten geben.



**Bauwerks-
diagnostik**

Interdisziplinäre Bestandserfassung und Bewertung von Injektionen des Schwarza-Witznaustollens mit Stollenradar

Dr.-Ing. Gabriele Patitz

Ingenieurbüro IGP Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten
Karlsruhe, Deutschland

Dipl.-Ing. Robert Render

Dr.-Ing. Daniel Stolz
Schluchseewerk AG
Asset Management Bautechnik
Laufenburg, Deutschland

Zusammenfassung

Der Zustand des unbewehrten Schwarza-Witznaustollens aus den Jahren 1929 – 1943 wurde im Rahmen eines Pilotprojektes mit zerstörungsfreien Erkundungsverfahren wie Orthofotos und Stollenradar in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Bauingenieuren, Geophysikern und Vermessungsingenieuren erfasst, dokumentiert und bewertet. Als Basis für die Entwicklung und Planung eines Sanierungskonzeptes erfolgte die Kontrolle der ausgeführten Probeinjektionen mit Stollenradar in einem ausgewählten Abschnitt. Durch identische Vorher-Nachher-Messungen konnten signifikante Veränderungen in den Datensätzen des Stollenradars abgestuft über verschiedene Bauteiltiefen analysiert und bewertet werden. Es ist naheliegend, dass diese auf die Injektion zurückzuführen sind. Das betrifft zum einen Injektionen innerhalb der Betonschale und den Grenzbereich Beton – Fels und zum anderen Veränderungen der anstehenden Wasserfront in der Stollenlängsrichtung und Stollenwandtiefe. Mittels gezielter kalibrierender Bohrungen wurden die physikalischen Messwerte des Stollenradars verifiziert.

1. Objektvorstellung

Der Schwarza-Witznaustollen gehört zur Schluchseewerk AG und ist mit einer Länge von rund 9.200 m ein Triebwasserstollen zwischen dem Schwarzabecken und dem KW Witznau im Südschwarzwald. Das Wasser läuft mit einem durchschnittlichen Gefälle von 1,2 % zwischen Schwarzabecken, dem Kraftwerk Witznau in Ühlingen-Birkendorf und schließlich dem Witznaubecken im Turbinenbetrieb hin und im Pumpbetrieb zurück. Abschnittsweise sind Gefälle- und Querschnittsveränderungen vorhanden.

In der Ausbaustufe I wurde der Stollen mit einer Länge von ca. 2930 m vom Schwarzabecken bis zum heutigen Fenster Oberes Eichholz gebaut. Baubeginn war August 1929 und Inbetriebnahme im Juni 1931. Geplant wurde ein Kreisquerschnitt mit Durchmesser 4,1 m. Aufgrund des eingesetzten Ausbruchverfahrens kam es jedoch zu einer ovalen Aufweitung des Profils über eine Strecke von ca. 500 m. Die Dicke der unbewehrten Tunnelschale schwankt zwischen einigen wenigen Zentimetern und bis zu ca. 50 cm. Aufgrund von lokalen Einbrüchen sind be-

wehrte und mit Ziegelsteinen hintermauerte Abschnitte vorhanden.

Durch die Nachwirkungen der Weltwirtschaftskrise und des folgenden zweiten Weltkrieges konnten die Arbeiten für die Ausbaustufe II erst 1939 wieder beginnen und wurden 1943 beendet. Dieser Stollenabschnitt hat eine Länge von etwa 6300 m mit einem Gefälle von ca. 1% und Durchmesser von ca. 4,5 m bis zur Einmündung des Mettmastollens. Ab dieser Einmündung erweitert sich der Durchmesser auf ca. 4,95 m und bleibt konstant bis zum Wasserschloss Berau. Von dort beträgt dann bei einem Durchmesser von ca. 5,0 m das Gefälle ca. 5 % auf 1000 m bis zur Panzerung. In dem ab 1939 gebauten Stollenabschnitt befindet sich eine ca. 2 – 5 cm dicke Putzschicht auf dem Stollenbeton.

2. Erfassung des Ist- Zustandes der Stollenwand- auskleidung

In regelmäßigen Abständen erfolgt zu Revisionszwecken eine Entleerung des Stollens. Es wird zunächst eine visuelle Besichtigung und Bewertung des Stollenbetons durchgeführt, kombiniert mit Abklopfen. Typische Scha-

denkbilder wie lokales Ausbrechen des Stollenbetons, Kiesnester, Hohllagen der Putzschicht bzw. des Stollenbetons, Risse in der Stollenwand und Wasseraustritte werden erfasst und ggf. repariert. Aufgrund des aktuellen Zustandes, bedingt durch die bisherige lange Lebens- und Nutzungszeit sowie die sehr unterschiedliche Qualität in der Bauausführung von 1929 – 1941 muss ein Sanierungskonzept unter Berücksichtigung der Dringlichkeit erarbeitet werden.

Dazu ist es erforderlich, möglichst gut und vollflächig den aktuellen Zustand der betonierten Stollenwandauskleidung zu kennen. Im Zuge einer turnusmäßigen Entleerung 2018 wurde daher der Zustand des Stollenbetons zum einen durch die Aufnahmen von hochauflösenden Orthofotos und zum anderen durch vollflächige zerstörungsfreie Untersuchungen mit Stollenradar mit einer Auswertetiefe von ca. 30 cm erfasst und dokumentiert. Versuchs- und Entwicklungsreihen aus den Jahren 2014 – 2018 ergaben, dass das Stollenradar prinzipiell geeignet ist, sowohl lokale Fehlstellen als auch größere Abschnitte unterschiedlicher Betonqualität aufzuzeigen. Die Gesamtergebnisse aus Orthofotos und Stollenradar sind stationengenau, übersichtlich, gut handhabbar und jederzeit fortschreibbar in einem pdf-Atlas digital dokumentiert.

3. Vorarbeiten für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes

Auf Basis der Ergebnisse aus den weitgehend vollflächigen Radarmessungen konnten stationierungsgenau Stollenabschnitte unterschiedlichen Schadensgrades und daraus ergebend mit unterschiedlichem Handlungsbedarf ausgewiesen werden. Es sind einerseits homogene und kompakte Betonabschnitte vorhanden und andererseits Abschnitte mit Wasserführung, Kiesnestern und zahlreichen Hohllagen. Kalibrierende Voll- und Kernbohrungen bestätigten die in den Radarergebnissen erkennbaren Verdachtsfälle unterschiedlicher Schäden und Schadensgrade.

Als Basis für die Erstellung eines Sanierungskonzeptes erfolgten im Zuge der planmäßigen Revisionsphase 2020 Probeinjektionen in einem ausgewählten und vergleichsweise gut zugänglichen Stollenabschnitt.

Um den Erfolg der Injektionen mit verschiedenen Materialien zu bewerten, wurden die injizierten Bereiche und unmittelbar angrenzende Stollenabschnitte mittels Stollenradar vollflächig untersucht werden. Durch den Einsatz identischer Geräte, Software und Datenverarbeitungsmodulare bei identischem Messraster aus dem Jahr 2018 mit der Ersterkundung und der Wiederholungsmessung im Juni 2020 ist auf Basis eines Datenvergleichs eine Erfolgskontrolle der Injektionen möglich.

4. Kontrolle des Injektionserfolges in der Stollenwand

Die Injektionskontrolle erfolgte zum einen durch einen direkten Vergleich der Radardaten aus 2018 und 2020. Zum anderen dienten Voll- und Kernbohrungen in Kombination mit Bohrlochvideos und Bohrlochbildern zur Kalibrierung der Radardaten und zur Injektionskontrolle. In einem Baustoffprüflabor wurden die entnommenen Bohrkern einer visuellen Ansprache hinsichtlich vorhandenem Injektionsmaterial und Hohlraumgehalt unterzogen.

5. Verfahrensbeschreibung Stollenradar

Vor Ort wurden die Radardaten (elektromagnetische Wellen) entlang von horizontalen Profillinien als Radargramme mit hochauflösenden 1,5 GHz Sensoren aufgenommen. Bei den Radargrammen handelt es sich um einen Schnitt in die Stollenwand entlang dieser Profillinie. Die Datenaufzeichnung erfolgte online während der Messung, kombiniert mit einer visuellen Qualitätskontrolle der Rohdaten hinsichtlich Eindringtiefe, Qualität, Störeinflüssen und Datenplausibilität.

Ist der Abstand zwischen den gemessenen parallelen Profilen hinreichend klein, können in mehreren Datenverarbeitungsschritten aussagekräftige Zeitscheiben berechnet werden. Das sind grundrissähnliche Darstellungen in ausgewählten und relevanten Tiefenbereichen. Die Lage und Anzahl der berechneten Tiefenbereiche hängen objektweise von der Fragestellung ab. Zeitscheiben bzw. Tiefenhorizonte werden immer dann berechnet, wenn große Flächen beurteilt werden müssen, da sich hier die auftretenden Reflexionen gut darstellen, erkennen und bewerten lassen. Bei dieser flächigen Ergebnisdarstellung werden die unterschiedlichen Reflexionsstärken farbcodiert wiedergegeben (Bild 1). Geringe Reflexionsstärken korrelieren hier mit einem homogenen und wenig hohlraumreichen Beton ohne anstehendes Wasser. Dies ist farbcodiert Blau / Schwarz.

Hohe bis sehr hohe Reflexionsstärken sind rot und gelb farbcodiert. Ursächlich sind Reflexionen der elektromagnetischen Wellen an Grenzen von Materialien unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit. Diese werden zum Beispiel durch eine Anhäufung von Hohlräumen oder einer Ablösung mit Luftspalt, durch anstehendes Wasser oder durch die Materialgrenze Beton – Fels verursacht. Wasser ist ebenso wie Luft für das Radarverfahren ein Kontrastmittel. Bei der Interpretation der stark reflektierend rot erscheinenden Stollenwandbereiche muss folglich als deren Ursache zwischen Wasser, Luftspalten, Grenze Beton – Fels und der Anhäufung von Hohlräumen unterschieden werden. Dazu sind Kalibrierungsbohrungen kombiniert mit Videoendoskopie in auffälligen hoch reflektiven und im Vergleich dazu in kaum reflektiven Bereichen unerlässlich. [1, 2]