

Einsatz des mobilen LIBS zur Qualitätssicherung bei der Instandsetzung

André MOLKENTHIN¹

¹ IPG INGENIEUR- UND PRÜFGESELLSCHAFT mbH, Berlin

Kontakt E-Mail: molkenthin@ipg-ingenieure.com

Kurzfassung

In Vorbereitung von Instandsetzungsprozessen an Beton- oder Stahlbetonbauwerken erfolgt, oft mit geringem Budget, lediglich eine stichprobenartige Untersuchung der Verdachtsbereiche. Die gewonnenen Untersuchungsergebnisse bilden zwar Grundlage für ein Instandsetzungskonzept, können aber noch keine genauen Aussagen zur Quantität der schadhaften Flächen beitragen.

Das tatsächliche Ausmaß und die Intensität der Schadensprozesse sind häufig erst nach einem flächigen Freilegen und Rückbau der geschädigten Bereiche zu erkennen. Inmitten solcher Aktivitäten ist es umso wichtiger, ein rasches und umfassendes Bild über die Belastungen mit schadensauslösenden Faktoren im Baustoff zu erlangen.

Ebenfalls im eher geringen Maß werden die neu entstandene baustoffliche Beschaffenheit und der unmittelbare Erfolg während einer Instandsetzung, etwa im Zuge einer Qualitätssicherung, überprüft.

Für die vorweg geschilderten Situationen liegen derzeit aber auch kaum geeignete Verfahren und Untersuchungsmethoden zur Verfügung, um direkt auf der Baustelle Elementkonzentrationen im Baustoff zu bestimmen und auszuwerten.

Die bislang angewendeten Verfahren, beispielhaft zur Chloridbestimmung in Beton- und Stahlbetonbauwerken, arbeiten klassisch über die Entnahme von Probenmaterial und dessen Analyse im Labor. Solche Methodiken erfordern Zeit und generieren erhöhte Aufwendungen. Prüfverfahren, die direkt und zuverlässig solche Untersuchungen am Bauteil oder Bauwerk vornehmen können, waren bislang nicht vorhanden oder ermöglichten nur bestenfalls eine grobe Bestimmung.

Die bereits bekannte Methode der Laser-induzierten Breakdown Spektroskopie wurde innerhalb eines aktuellen Forschungsvorhabens so weiter entwickelt, dass mit Hilfe eines neuartigen mobilen und kompakten Analysegerätes Elementkonzentrationen im Baustoff nun direkt und unmittelbar auf den Oberflächen bestimmt werden können.

Im vorliegenden Beitrag können nun bereits erste Beispiele einer erfolgreichen Anwendung dieses Verfahren und des entwickelten mobilen LIBS auf verschiedenen Instandsetzungsvorhaben mit unterschiedlichen Messaufgaben vorgestellt werden.

Einführung

In der Schadensanalytik von Beton- und Stahlbetonbauwerken sind für den sachkundigen Ingenieur und Planer neben physikalischen Parametern wie z.B. Druck- und Haftzugfestigkeiten vor allem chemisch-physikalische Aussagen zum IST-Zustand des Materials Beton von erheblicher Bedeutung.

Dies gilt sowohl für die Bauwerkserkundung im Vorfeld einer Instandsetzung als auch im operativen Instandsetzungsprozeß bei Auffälligkeiten und Abweichungen zum prognostizierten Zustand.

Durch das innerhalb eines Forschungsprojekts entwickelte mobile LIBS-Gerät erlangt nun ein Verfahren Praxisreife, mit dem direkt vor Ort und inmitten von Baustellenaktivitäten die Elementverteilung im Baustoff gemessen und sofort ermittelt werden kann.

Die noch heute allgemein angewendeten Methoden zur Chloridanalyse von Betonproben lassen sich im Heft 401 des DAfStb [1] finden. Darin enthalten sind jene quantitativen als auch halbquantitativen Analyseverfahren, die in fast allen einschlägigen Baustofflaboren verwendet werden. Neben der im Heft 401 beschriebenen potentiometrische Titration, der Photometrie und der Bestimmung mit ionensensitiven Elektroden haben sich in den letzten Jahrzehnten ebenfalls spektroskopische Verfahren der Ionenchromatografie und Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) am Markt etabliert.

In der Praxis kommt es allerdings bei Anwendung der vorgenannten Verfahren häufig vor, dass die Wartezeit auf die Ergebnisse von Chloriduntersuchungen mehrere Tage bis einige Wochen andauert. Inzwischen sind aber bereits wichtige Entscheidungen für den Fortgang der Instandsetzungsarbeiten zu treffen, ohne auf die Analysewerte zurückgreifen zu können. Die nachfolgenden Beispiele verdeutlichen demgegenüber, dass mit der Überführung der Methode der Laser-induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) auf ein mobiles, baustellentaugliches Analysegerät viele der zuvor zeitlich aufwendigen Messaufgaben direkt vor Ort vorgenommen werden können.

1. Chlorbestimmung mit Alkali-Kieselsäure-Reaktion in einer Tiefgarage

Innerhalb der Instandsetzung einer Tiefgarage in Norddeutschland mit schweren Schäden aus chloridinduzierter Bewehrungskorrosion in Verbindung mit einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), wurde das mobile LIBS während des Bauprozesses zur Bestimmung der



Abbildung 1: Aufbau des mobilen LIBS zur Messung der Chlorkonzentrationen



Abbildung 2: Messbedingungen in der Tiefgarage

Chlorkonzentrationen auf den jeweiligen Abtragstiefen eingesetzt. Auf einer der instand zu setzenden Parkebenen waren bereits die wesentlichen Stemm- und Abtragsarbeiten bis zur planerisch vorgegebenen Tiefe vorgenommen worden. Für die Bauüberwachung und das Instandsetzungsunternehmen kam es in dieser Situation darauf an zu erfahren, ob noch schadensauslösende Chloridkonzentrationen in diesen Tiefen bestanden. Aufgrund der zeitlichen Vorgaben für den Bauablauf war eine Sofortanalyse vor Ort erforderlich.

Innerhalb des Messeinsatzes konnten an einem Tag -mit vorheriger abendlicher Vorbereitung- bis zu 30 Messstellen am Boden und im Spritzwassersockel der aufgehenden Bauteile (Wände und Stützen) direkt gemessen und ausgewertet werden. Vor Ort wurden die Ergebnisse sofort generiert und an jedem Messpunkt ausgewiesen. Als Konsequenz dieser Überprüfung musste 5 Bereiche nachgearbeitet und tiefer abgetragen werden.

Ein wesentlicher aber auch erschwerender Aspekt bestand darin, dass die Instandsetzungsarbeiten während der Zeit der Messungen weiter liefen. Für die Baustelle war dies sicherlich ein Vorteil: somit traten keine Verzögerungen auf. Das mobile LIBS-Gerät und die Messvorgänge waren andererseits permanenten Erschütterungen und zum Teil erheblicher Staubbelastung ausgesetzt. Solche Randbedingungen führten aber zu keiner Zeit zum Ausfall des Gerätes oder zum Abbruch der Messvorgänge.

Nasschemische Untersuchungen an Bohrkernen und Rückstellproben bestätigten im Nachgang -ohne nennenswerte Abweichungen- die vor Ort festgestellten Konzentrationen

2. Instandsetzung Parkhausebene in Fertigteilbauweise

Ein im Jahre 1980 errichtetes Parkhaus im Südwesten Deutschlands ist Bestandteil eines innerstädtischen Einkaufszentrums. Insgesamt verfügt das Gebäude über sechs Ebenen, wobei die oberen drei Ebenen als Parkdecks (P1–P3) ausgeführt wurden.

Die massiven Betondecken der einzelnen Geschosse bestehen aus vorgespannten PI-Platten, die auf Stützen, Unterzügen und Konsolen aufgelagert sind. Die Stärke der schlaff bewehrten Fahrbahnplatte beträgt allerdings nur 10 cm. Die Spannglieder befinden sich als Biegezugglieder in den Stegen der PI-Platten und wurden unter Vorspannung mit sofortigem Verbund verbaut. Die zur Gebädestabilisierung erforderliche Scheibenwirkung der Deckenebenen erfolgte entsprechend der vorliegenden Bestandsplanung durch Einbauteile in den Fertigteildecken, die nach dem Verlegen untereinander verschweißt und mit Ortbeton vergossen wurden.

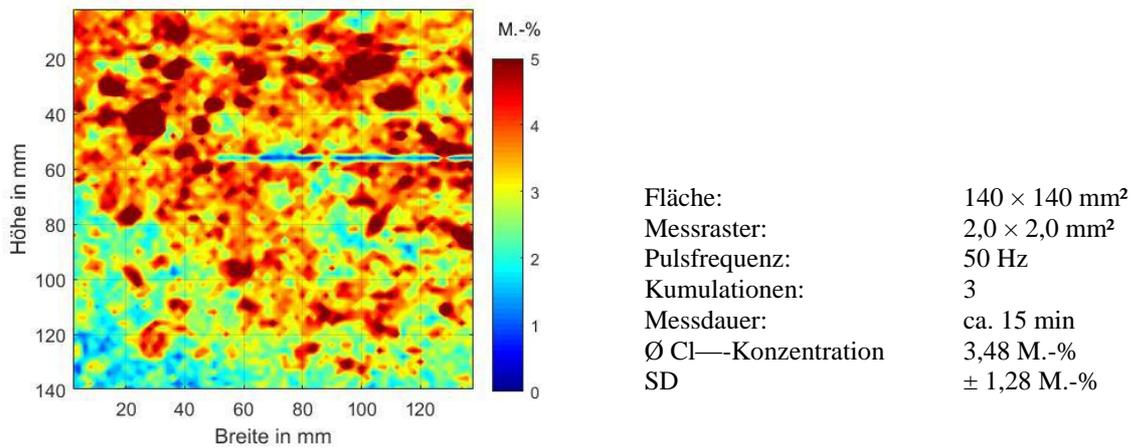


Abbildung 3: links die Chloridverteilung an der Oberfläche der Fahrbahnplatte, rechts die Messparameter

An insgesamt sieben Bereichen erfolgten Oberflächenmessungen mit LIBS. Die Messflächen mit einer Größe von je 140 mm × 140 mm wurden mit einer Auflösung von 2 × 2 mm abgescannt. Die Entnahme eines zusätzlichen Bohrkerns je Messfläche resultierte aus der Überlegung, auch vergleichend den Chloridgradienten in der Platte zu ermitteln. Bereits vor den Messungen hatte ein weiteres Labor Potentialfeldmessungen vorgenommen, um die korrosionsaktiven Bereichen einzuengen und für die nachfolgenden LIBS-Untersuchungen einzugrenzen.

Im Ergebnis der LIBS- Messungen konnten die bereits auf der Betonoberfläche vermuteten deutlich erhöhten Chloranlagerungen bestätigt werden. Dieses Depot war noch nicht in den Baustoff vorgedrungen, würde aber unter Zutritt von Feuchtigkeit für die Migration bereit stehen. An einem Messbereich konnten die oberen Betonschichten durch Strahlen abgetragen und so die oberen Bewehrungen sowie die Stahlschlüsse der Fertigteile freigelegt werden. Infolge der teils sehr hohen Chloridkonzentrationen von bis zu 3,48 M% bezogen auf den Bindemittelgehalt war festzustellen, dass der Korrosionsfort-

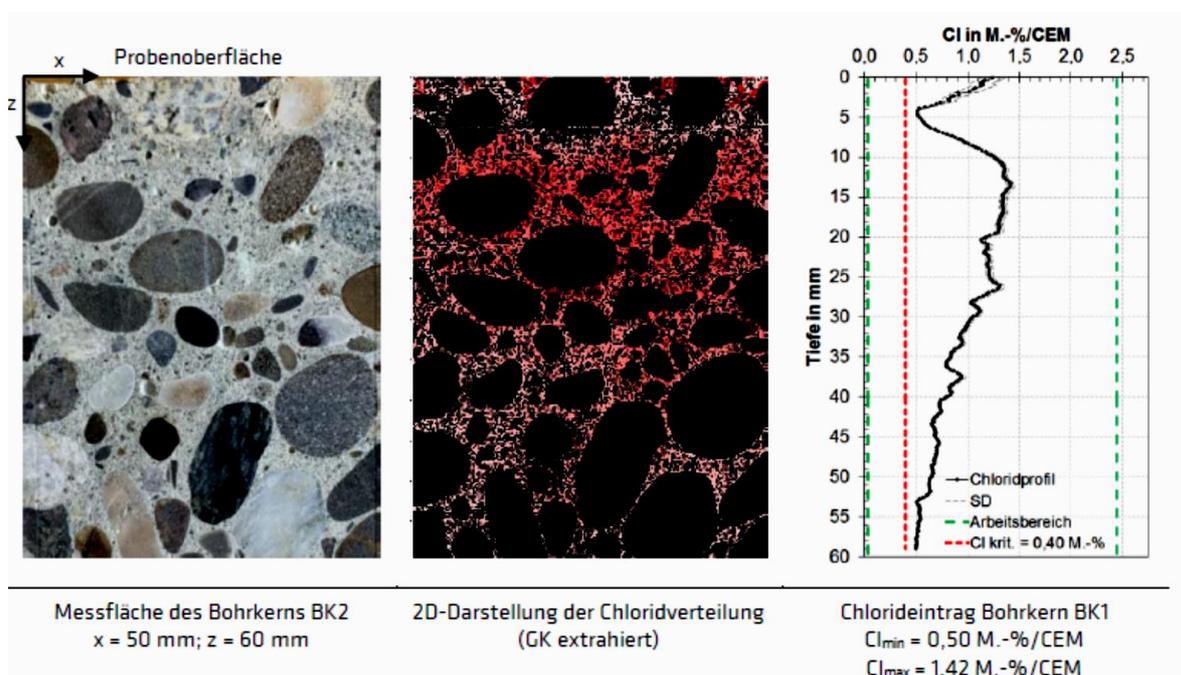


Abbildung 4: bildgebende Chlorverteilung und der Chloridgradient bis zur einer Tiefe von 60mm in der Platte

schritt sowohl an den oberen Bewehrungslagen als den Stahlbauteilen teils im erheblichen Umfang vorlag.

Im Zuge der Instandsetzung des am stärksten geschädigten Parkdecks P2 sollte vor Ort an ausgewählten Flächen die Chloridbelastung auf der Oberfläche bestimmt und auch das Eindringprofil ausgewiesen werden.

Als wesentlich für die Planer und den Bauherrn stellte sich nun die Frage, ob die 10 cm starke Stahlbetonplatte flächig entfernt werden muss. Dieser Eingriff hätte auch wesentliche Auswirkungen auf die vorgespannten Stege der Π -Platten zur Folge. Durch den Wegfall der Druckzone während der Instandsetzung könnten sich die noch verbleibenden vorgespannten Stege aufwölben und so eine unkontrollierte Verformung erfahren.

Mithilfe der LIBS- Messungen war es jedoch möglich, den maßgeblichen Chlorideintrag den Verbindungsfugen der Fertigteile untereinander zuzuordnen. Die anschließende Instandsetzung bezog sich daher im Wesentlichen auf den Abtrag der oberflächennahen Randzone (Betondeckung der oberen Lage) und dem Freilegen der Verbindungsbereiche der Fertigteilkonstruktionen.

3. Schwefelbestimmung in einer Biogasanlage

In einer 2009 errichtete Biogasanlage wird auf der Grundlage von landwirtschaftlichen Abfälle Biomethan produziert. Die Anlage besitzt u. a. neun in Stahlbetonbauweise errichtete Rundbehälter in zwei verschiedenen Größen. Es handelt sich dabei um fünf Gärproduktlager, drei Fermenter sowie einen Nachgärer. In der zwischenzeitlich achtjährigen Nutzungszeit waren auf den Außenwandflächen der Fermenter und der Gärproduktlager zahlreiche Risse erkennbar. Deren Ursprung liegen in Schwind- und Kriechvorgängen der etwa 12m hohen Behälter.

Aufgrund der schon von weitem deutlich sichtbaren Risse infolge schwarz-brauner Verfärbungen aus den durchtretenden Gärflüssigkeiten, entschloss sich der Betreiber 2015, nicht zuletzt im Zuge seiner Verkehrssicherungspflicht, zu umfangreichen äußeren Untersuchungen hinsichtlich aufgetretener Schädigungen und einer eventuell dadurch eingeschränkten Standsicherheit.

Über die Untersuchungen an den Außenseiten hinaus erfolgte zudem im Sommer 2016 die Leerung und Reinigung eines Fermenters, sodass für ein kurzes Zeitfenster auch lokale Untersuchungen auch auf der Innenseite eines Behälters möglich waren. Für die Begehung der Innenseite wurde der Fermenter vollständig geleert, entgast sowie anschließend unter Wasserdruck gereinigt. Mit Ausnahme einiger Randbereiche entlang des Wandkopfes waren dadurch die Wandflächen weitestgehend von Rückständen befreit (Abbildung 4).

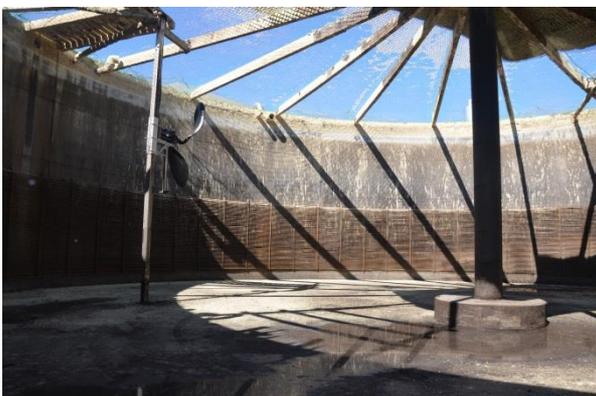


Abbildung 5: Innenansicht des Behälters



Abbildung 6: LIBS-Messungen auf der Behälterwand

Tabelle 1: Sulfatkonzentrationen in den oberen 20mm der Innenwand

Probe	Bauteil	Prüftiefe [mm]	Sulfatgehalt SO ₄ im Beton	
			[Masse-%]	[mg/kg]
2	Innenwand	0 – 10	0,84	8.383
		10 – 20	0,75	7.490
3	Innenwand	0 – 10	0,83	8.252
		10 – 20	0,82	8.193
4	Fermenterkopf	0 – 10	0,98	9.806
		10 - 20	0,81	8.147

Hiernach zeigten sich erkennbare Kraterbildungen auf dem oberen, unbeschichteten Wandabschnitt, der zugleich einen Teil des Gasraums bildet. Diese Bereiche wiesen darauf hin, dass bereits eine Materialauflösung des Zementsteins -wenn auch in geringem Umfang- vorlag. Die chemischen Analysen des Betreibers zeigten allerdings bei der Recherche, dass das Gärsubstrat einen neutralen pH-Wert von ca. 7 bis 8 besitzt. Es war daher im Vorfeld erkennbar, dass eine Gefährdung der Behälter durch einen flächigen chemischen Angriff infolge des Gärsubstrates als gering einzustufen ist.

Die Untersuchungen der Rissstrukturen auf der Behälteraußenseite bestätigten diese Annahmen. In keinem der Risse konnten Schäden an der Bewehrung und/oder dem Betongefüge festgestellt werden.

Demgegenüber kam allerdings als noch gefährdender Schadensprozess die biogene Schwefelsäure-Korrosion mit dem Angriff auf die Bindemittelmatrix und den Betonstahl in Betracht. Die infolge der mikrobiologischen Umsetzungen des Gärsubstrats in den Behältern entstehende Schwefelsäure (H₂SO₄) führt zum chemischen Angriff auf Betonoberflächen. Sulfatreduzierende sowie schwefeloxidierende Bakterien verwenden den im Gärsubstrat frei werdenden elementaren Schwefel energetisch in ihren verschiedenen Stoffwechselprozessen.

Das mobile LIBS-Gerät wurde während des Ortstermins auf der Innenseite der Behälterwand befestigt (Abbildung 5). In dieser wurden zwei Messbereiche mit unterschiedlicher Auflösung in situ untersucht.

Messfläche 1: 80 cm x 80 cm mit 3 Oberflächenmessungen

Messfläche 2: 10 cm x 10 cm mit 1 Oberflächenmessung

Für weitere Laboruntersuchungen mit dem LIBS-Verfahren wurden zwei Bohrkern

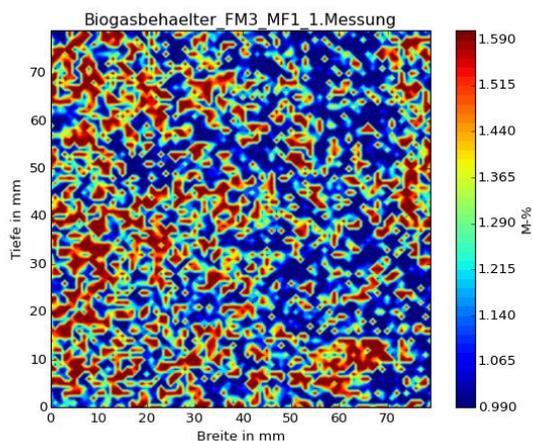


Abbildung 7: Oberflächenverteilung Schwefel

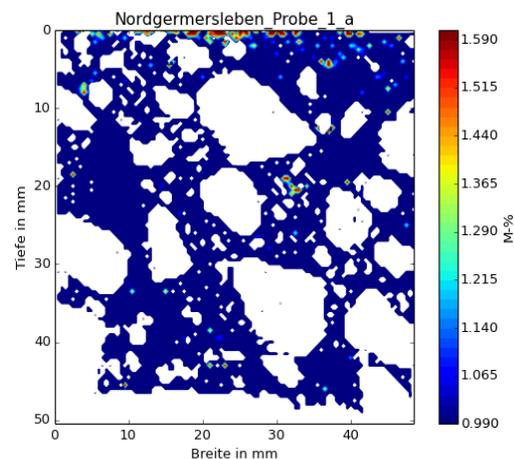


Abbildung 8: Schwefelprofil am Bohrkern 1

(Durchmesser 50 mm) entnommen: einer auf der Innenseite des Behälters im handnah erreichbaren Bereich sowie einer auf der horizontalen Fläche des Wandkopfes. Sowohl die Untersuchungen des Schwefelgehalts an der Oberfläche und auch die Messungen der Schwefelkonzentrationen im Profil (Bohrkerne) zeigten eine deutliche, jedoch nur auf die Oberfläche bezogene Belastung. Während die angelagerten Schwefelanteile auf der Innenwand eine durchaus auffällige Größenordnung aufwiesen, nahmen nach 1 bis 2 mm die Schwefelkonzentrationen soweit ab, dass kaum mehr Schwefelanteile nachzuweisen waren. Gemäß DIN EN 206 [6] konnte somit in Anlehnung an die Vorgaben für den chemischen Angriff aus Grundwasser ein mäßiger Angriff für die Betonoberflächen abgeleitet werden.

Für den Betreiber bedeuteten die Ergebnisse der Messungen, dass aufgrund der verhältnismäßig geringen Nutzungszeit der chemische Angriff ausschließlich auf die Betonoberflächen, sowohl im Gasraum als auch in der Flüssigphase des Behälters, eingesetzt hatte. Bei den kommenden Entleerungen solcher Behälter soll nun durch wiederkehrende Messungen die Zunahme der Schädigungen erfasst und bewertet werden.

Referenzen

- [1] HEFT 401 DAfStb: Teil 1 Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton / Teil 2 Schnellbestimmung des Chloridgehaltes von Beton/ Teil 3 Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton durch Direktpotentiometrie Beuth Verlag (1989)
- [2] MOLKENTHIN, A.: Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS) zur hochauflösenden Analyse der Ionenverteilung in zementgebundenen Feststoffen; Universität Duisburg-Essen 2008 und BAM Dissertationsreihe 42
- [3] BRUNS, M.; BALZER, H.; WILSCH, G.: Bildgebende Laseranalyse der Chlorid- und Sulfatverteilung im Beton, 3. Kolloquium Verkehrsbauten, Esslingen 2008
- [4] MOLKENTHIN, A.: Frühreaktionen beim Beschichten von Betonflächen mit Neigung zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion, 4. Kolloquium Verkehrsbauten, Esslingen 2010
- [5] MILLAR, S.; WILSCH, G.; EICHLER, T.; GOTTLIEB, C., WIGGENHAUSER, H.: Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen - automatisierte Baustoffanalyse, Beton- und Stahlbetonbau, , 110 (8), 501-510
- [6] DIN EN 206-1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; 2013/2016
- [7] MOLKENTHIN, A.; WILSCH, G.; GÜNTHER, T., MILLAR, S.: Sofortige Chloridbestimmung am Bauwerk mit LIBS; 8. Kolloquium Verkehrsbauten, Esslingen 2018