Drohnengestützte Korrosionsdetektion: Kontaktlose Potenzialfeldmessung und photogrammetrische Verortung

L. Bircher, F. Martinelli-Orlando, U. Angst

Korrosion der Bewehrung ist der massgebende Schadensprozess an Stahlbetonbauwerken. Sie beginnt im Bauteilinneren, lange bevor an der Oberfläche etwas sichtbar wird. Die Potenzialfeldmessung findet aktive Korrosion schon in dieser frühen Phase. Obwohl die Methode mit Blick auf die Korrosionsdetektion Stand der Technik ist, findet sie begrenzt Anwendung, vor allem nicht bei Routineinspektionen. Der Grund liegt nicht in der Messtechnik, sondern im Messaufwand: Die Elektrode muss manuell aufgesetzt werden, und der räumliche Bezug der Messwerte zum Bauwerk muss oft in aufwendiger Weise hergestellt werden. Beim hier vorgestellten Verfahren stellt ein feiner Wasserstrahl die leitende Verbindung aus einigen Zentimetern Abstand her. Das ermöglicht den Einsatz handelsüblicher Inspektionsdrohnen und damit die photogrammetrische Verortung der Messwerte. Im Feldeinsatz an einer Brücke wurden damit bis zu 200 m² pro Stunde erfasst, vollständig digital und georeferenziert.

La corrosion des armatures constitue le processus de dégradation déterminant des ouvrages en béton armé. Elle débute à l'intérieur du matériau, bien avant qu'un quelconque signe ne devienne visible en surface. La mesure du potentiel électrique permet de détecter une corrosion active dès cette phase précoce. Bien que cette méthode représente l'état de l'art en matière de détection de la corrosion, elle n'est que peu utilisée, notamment pas lors des inspections de routine. La raison n'est pas liée à la technique de mesure elle même, mais à l'effort nécessaire : l'électrode doit être appliquée manuellement, et la localisation spatiale des valeurs mesurées par rapport à l'ouvrage doit souvent être établie de manière laborieuse. Dans la méthode présentée ici, un fin jet d'eau assure la connexion conductrice à quelques centimètres de distance. Cela permet l'utilisation de drones pour l'inspection de l'ouvrage, et c'est la photogrammétrie qui permet de géoréférencer les mesures. Lors d'un essai sur le terrain, sur un pont, jusqu'à 200 m² par heure ont pu être relevés, de manière entièrement numérique et géoréférencée.

La corrosione delle armature rappresenta il principale processo di degrado delle strutture in cemento armato. Essa inizia all'interno dell'elemento strutturale, molto prima che qualcosa diventi visibile sulla superficie. La misurazione del campo di potenziale consente di individuare la corrosione attiva già in questa fase iniziale. Sebbene il metodo rappresenti lo stato dell'arte per la rilevazione della corrosione, trova un'applicazione limitata, soprattutto non nelle ispezioni di routine. La ragione non risiede nella tecnica di misura, bensì nell'impegno richiesto: l'elettrodo deve essere applicato manualmente e il riferimento spaziale dei valori misurati rispetto alla struttura deve spesso essere stabilito in modo laborioso. Con il procedimento qui presentato, un sottile getto d'acqua crea la connessione conduttiva da alcuni centimetri di distanza. Ciò permette l'impiego di droni d'ispezione commerciali e quindi la fotogrammetria per la georeferenziazione dei dati. Durante un'applicazione sul campo, su un ponte, è stato possibile rilevare fino a 200 m² all'ora, in modo completamente digitale e georeferenziato.

Die visuelle Inspektion ist das Rückgrat der Bauwerksprüfung. Sie erkennt sichtbare Anzeichen wie Risse, Abplatzungen und Rostfahnen, also Merkmale, die erst auftreten, wenn bereits Bewehrungsquerschnitt verloren ging. Bei chloridinduzierter Korrosion bleiben solche Anzeichen zudem lange aus, weil bei lokaler Korrosion kaum volumenvergrössernde Korrosionsprodukte entstehen. Wer erst auf sichtbare Anzeichen reagiert, hat die wirtschaftlich interessanten Handlungsspielräume bereits verloren.

Die Potenzialfeldmessung setzt früher an. Aktive Korrosion erzeugt ein elektrisches Feld im Beton. Über eine Referenzelektrode auf der Betonoberfläche lässt sich dieses Feld erfassen und so das Potenzial der elektrisch durchgängig verbundenen Bewehrung messen (Elsener et al. 1996). Aus der Verteilung der Messwerte, dem Potenzialfeld, lassen sich Bereiche mit aktiver Korrosion abgrenzen, je nach Überdeckung und Exposition mehrere Jahre, bevor ein Schaden sichtbar wird (Bertolini et al. 2013). Das Verfahren ist im Merkblatt SIA 4018 geregelt und liefert eine Korrosionswahrscheinlichkeit an einem bestimmten Ort, jedoch keine Korrosionsgeschwindigkeit und keinen Querschnittsverlust (Elsener et al. 1996).

Für begehbare Flächen wie Brückenplatten existieren rollende Elektrodensysteme (Elsener et al. 1996). Sobald die Fläche nicht mehr begehbar ist, bleibt die Anwendung aufwändig, aus zwei Gründen, die beide nichts mit der Messtechnik zu tun haben. Der erste ist der physische Zugang: Weil die Elektrode die Oberfläche mit Anpressdruck berühren muss, muss jeder Messpunkt erreichbar sein. An einer Brücke, wie sie hier als Beispiel dient, bedeutet dies die Notwendigkeit für ein Gerüst, eine Hebebühne oder ein Brückenuntersichtsgerät. Dazu kommen notwendige Vorlaufzeiten und Eingriffe in die Verkehrsführung. Der zweite Grund ist die fehlende Verortung: Aufgezeichnet werden nur die Messwerte, der Bezug zum Bauwerk entsteht erst nachträglich

durch Übertragen des Messrasters auf Pläne. Die Lageunsicherheit liegt danach im Dezimeter- bis Meterbereich; in einer Folgekampagne ist dieselbe Stelle nicht mehr sauber zu treffen, und die Vergleichbarkeit über die Zeit ist beeinträchtigt.
Beide Probleme lösen sich durch die Abkehr vom physischen Kontakt der Messelektrode zum Bauwerk: Das hier beschriebene Verfahren kombiniert eine kontaktlose Messung von einer Drohne aus mit der photogrammetrischen Verortung jedes einzelnen Messwerts. Untersuchen lässt sich damit jedes Stahlbetonbauwerk, von Brücken bis zu Kühltürmen. Entwickelt wurde es von den Gründern der TALPA-Inspection AG in der Forschungsgruppe Durability of Engineering Materials der ETH Zürich und in drei Schritten validiert: Labor, Laborflug, Feldeinsatz.

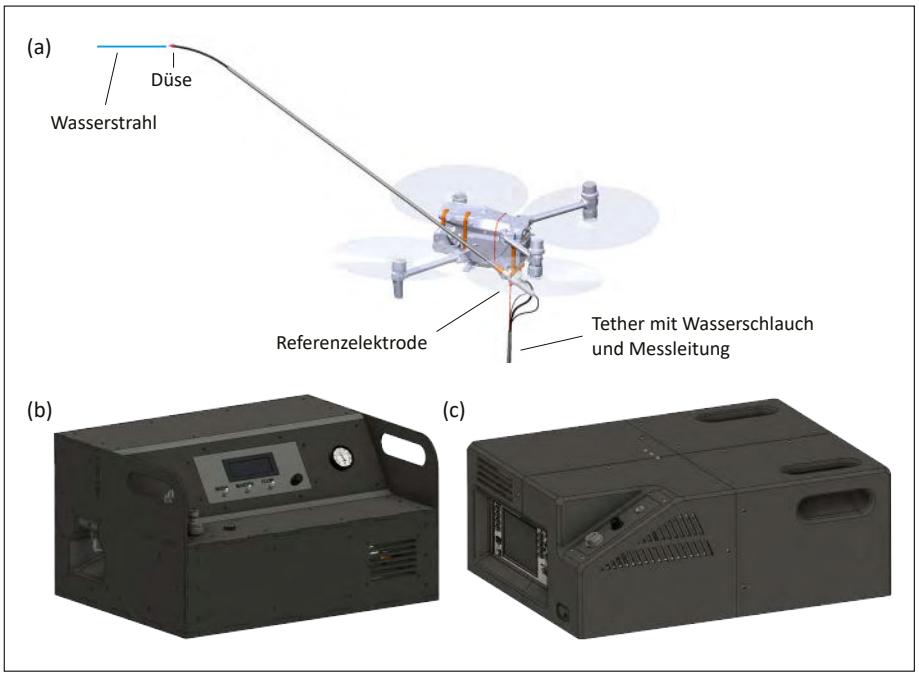


Abb. 1: Systemkomponenten: (a) Sensorsystem an der Drohne mit Düse, Wasserstrahl und Referenzelektrode sowie Tether mit Wasserschlauch und Messleitung, (b) Bodenstation für die Wasserzuführung, (c) Messsystem. Darstellung nach Martinelli-Orlando et al. (2026).

Methoden

Messprinzip

Der Messkreis besteht aus der Bewehrung, der Porenlösung im Beton, einer elektrolytischen Verbindung, der Referenzelektrode und einem hochohmigen Voltmeter. Konventionell übernimmt ein feuchter Schwamm an einer direkt aufgesetzten Stab- oder Radelektrode diese Verbindung. Genau dieser Kontakt ist der limitierende Schritt.
Beim vorgestellten Verfahren übernimmt ein feiner Wasserstrahl mit eingestellter Leitfähigkeit dieselbe Funktion. Er überbrückt einige Zentimeter Abstand, funktioniert auch über Kopf und macht das Abstützen des Sensors überflüssig. Das Messprinzip ist damit nicht an einen bestimmten Träger gebunden; hier kommt eine handelsübliche Inspektionsdrohne (DJI Matrice 30) zum Einsatz, an die das System nur geringe Anforderungen stellt. Eine ausführliche Darstellung des Messprinzips samt Laborvalidierung und Feldeinsatz findet sich in Martinelli-Orlando et al. (2026).

Systemaufbau

Das System besteht aus drei Teilen (Abb. 1). An der Drohne hängt nur das Sensorsystem mit Referenzelektrode und Düse. Die Bodenstation übernimmt die Wasserzuführung mit Pumpe und Durchflussregelung. Das Messsystem am Boden besteht aus einem hochohmigen Voltmeter, dessen einer Pol an der Referenzelektrode und dessen anderer an der Bewehrung liegt. Ein Tether führt Wasserschlauch und Messleitung zur Drohne, alles Schwere bleibt so am Boden. Unverändert bleiben der Anschluss an die Bewehrung samt Durchgängigkeitsprüfung, das Vornässen und die Auswertung nach SIA 4018.

Photogrammetrische Verortung

Die Verortung der Messwerte ist der zweite Kernbestandteil des Verfahrens. Aus Bild-Aufnahmen des Bauwerks wird ein massstäbliches 3D-Modell erzeugt. Durch eine spezifische Kombination die-



Abb. 2: Messung an einer Brückenuntersicht. Die Drohne hält Abstand zur Oberfläche, ein Kontakt findet nicht statt (bzw. nur über den Wasserstrahl).

ser Modelldaten mit den Messdaten des Wasserstrahls lässt sich jeder einzelne Messwert zentimetergenau auf der Bauwerksoberfläche referenzieren.
Massgebend ist dabei der Auftreffpunkt des Wasserstrahls am Bauwerk und nicht die Position der Drohne. Die Verortung bleibt damit unabhängig von der Flugnavigation: Der Flugweg kann frei an das Bauwerk und die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden; exakt vorgegebene Flugrouten sind nicht erforderlich.
Beim Referenzrahmen sind zwei Fragen zu trennen. Wo das Bauwerk im Landeskoordinatensystem liegt, wird mittels GNSS bestimmt (Satellitennavigation, etwa GPS). Seitlich und oberhalb der Brücke ist das Signal vorhanden, unter der Brücke fehlt es jedoch. Deshalb werden der Massstab und die Georeferenz aus den Aufnahmepositionen der Übersichtsbefliegung bestimmt und auf das Gesamtmodell übertragen, inklusive der Untersichten. Mit RTK-Korrektur (Echtzeitkorrektur aus einem Referenzstationsnetz) verbessert sich diese absolute Genauigkeit vom Dezimeter- in den Zentimeterbereich. Wo ein Messwert am Bauteil liegt, folgt dagegen allein aus der relativen Geometrie des Modells und ist von GNSS unabhängig. Ohne Signal, etwa in Innenräumen, bleibt deshalb nur der Bezug zum Landeskoordinatensystem offen; der Massstab kommt dann aus einer bekannten Referenzlänge.

Auswertung und Darstellung

Für die Visualisierung wird zusätzlich ein 3D-Modell mittels Gaussian Splatting berechnet. Es gibt die Oberfläche naturgetreuer wieder als ein texturiertes Netz und erhält dadurch mehr visuelle Information für die Zustandsbeurteilung. Die verorteten Einzelwerte werden als eigener Datenlayer mit dem Korrosionsrisiko, klassiert nach SIA 4018, über dieses fotorealistische Modell gelegt. Die massliche Genauigkeit bleibt dabei durch die photogrammetrische Rekonstruktion gewährleistet. Dazu kommt ein räumlich indexiertes Bildarchiv: Zu jeder Stelle am Bauwerk lässt sich das Originalbild aufrufen, und spätere Kampagnen lassen sich auf dasselbe 3D-Modell legen.

Ergebnisse und Diskussion

Laborvergleich mit der konventionellen Methode

Der erste Schritt betraf allein die Messtechnik: Zu zeigen war, dass der Wasserstrahl dieselben Werte liefert wie eine direkt aufgesetzte Stabelektrode mit Schwamm. Als Probekörper diente ein Betonbalken von 10 × 15 × 100 cm mit einem durchgehenden Bewehrungsstab bei 4 cm Überdeckung; ein mittlerer Abschnitt von 10 cm aus chloridhaltigem Mörtel erzeugte eine definierte korrodierende Zone.

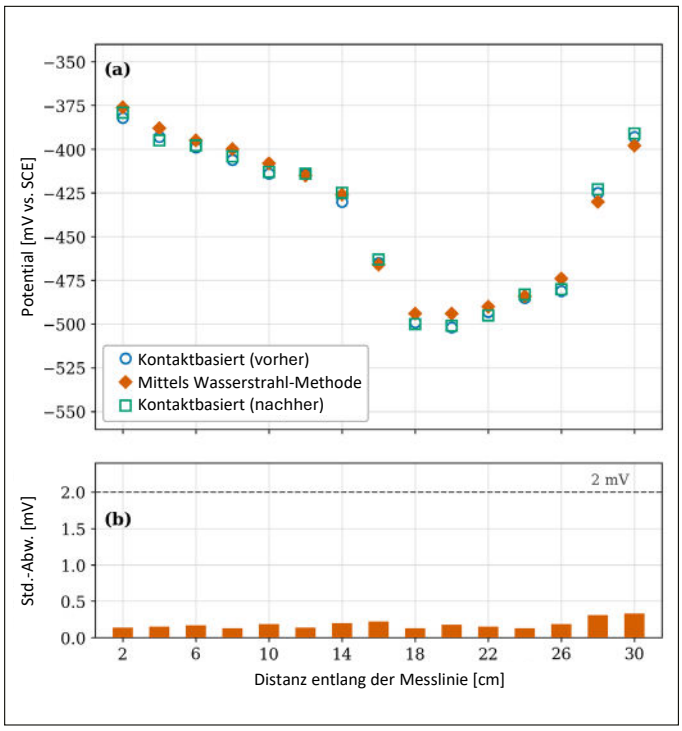


Abb. 3: Vergleich im Labor: (a) Potenziale der konventionellen Messung vor und nach dem Wasserstrahldurchgang sowie der kontaktlosen Messung, (b) Wiederholstreuung der kontaktlosen Messung über zehn Messungen je Punkt. Potenziale gegen gesättigte Kalomelelektrode (SCE). Daten nach Frangi (2025), Auswertung nach Martinelli-Orlando et al. (2026).



Abb. 4: Ergebnis des Laborflugs am Abbild des Probekörpers. Der Bereich erhöhter Korrosionswahrscheinlichkeit fällt mit der chloridhaltigen Zone zusammen.

Gemessen wurde auf einer Linie von 30 cm an 16 Punkten, zuerst konventionell, dann kontaktlos, dann nochmals konventionell.
Die Verläufe decken sich Punkt für Punkt (Abb. 3). Die mittlere Abweichung zwischen kontaktloser und konventioneller Messung liegt bei 4 bis 5 mV, während sich die beiden konventionellen Durchgänge untereinander im Mittel um rund 2 mV unterscheiden. Die Abweichung des neuen Verfahrens bewegt sich also in der Grössenordnung der Wiederholbarkeit der konventionellen Messung selbst. Bei der Stabilität liegt der Wasserstrahl sogar vorn: Die Wiederholstreuung über zehn Messungen am selben Punkt blieb überall unter 0,5 mV, während manuelle Punktmessungen durch Umsetzen und Anpressdruck um mehrere Millivolt streuen (Keßler et al. 2011). Beide Verfahren lösen zwischen chloridhaltiger und chloridfreier Zone einen Kontrast von rund 110 mV auf, womit sich die korrodierende Zone nach SIA 4018 klar abgrenzen lässt.

Laborflug: beide Verfahren kombiniert

Im zweiten Schritt wurde derselbe Balken auf einer 4 m hohen Leiter montiert. Die Drohne flog 15 Messpunkte und lieferte dasselbe Potenzialmuster wie der Handvergleich, nun aber am Bauteil verortet: Die chloridhaltige Zone erscheint als zusammenhängender Bereich erhöhten Korrosionsrisikos in der Balkenmitte (Abb. 4). Damit war der Nachweis erbracht, dass die gesamte Kette aus Messung, Rekonstruktion und Projektion auch aus der Luft funktioniert.

Feldeinsatz an einer Brücke

Der dritte Schritt fand an einer Strassenbrücke im Alpenraum statt, die im Winter regelmässig mit Tausalz beaufschlagt wird. Gemessen wurden Untersicht, Pfeiler und Widerlager, im üblichen Ablauf und mit Messung und Bildaufnahme in denselben Flügen.
Die Auswertung zeigt erhöhte Korrosionswahrscheinlichkeit genau dort, wo das Tausalz hinkommt: an den Widerlagern, an den Rändern der Untersicht (Abb. 5). Der Befund lässt sich damit aus der Exposition erklären. An ausgewählten Stellen wurde er destruktiv überprüft, die Ergebnisse stimmten überein.

Effizienz im Feld

Die Flächenleistung liegt unter optimalen Bedingungen bei bis zu 200 m² pro Stunde. An schwer zugänglichen Bauteilen (etwa Brückenuntersichten oder hohe Stützen) entfällt zudem der Aufwand, der eine konventionelle Untersuchung dominiert: Gerüst, Hebebühne oder Brückenuntersichtsgerät, Arbeit in der Höhe und Eingriffe in die Verkehrsführung. Die betrieblichen Randbedingungen entsprechen genau jenen der konventionellen Messung: Nicht gemessen wird bei Regen und bei Betontemperaturen unter 5 °C. Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann zudem der Drohneneinsatz beeinträchtigt sein.

Was das für die Praxis bedeutet

Der kontrollierte Wasserstrahl ersetzt Anpressdruck und Kontaktzeit durch definierte Parameter. Zusammen mit der photogrammetrischen Verortung wird nicht nur der einzelne Messwert reproduzierbar, sondern die Kampagne als Ganzes. Damit entsteht ein Erst-Datenset, auf dem Folgeinspektionen aufsetzen: Dieselbe Stelle lässt sich im nächsten Zyklus erneut messen und direkt vergleichen, und ob ein Befund neu ist oder zuvor übersehen wurde, lässt sich am Bild beantworten. Die Instandhaltungsplanung erhält damit deutlich bessere Entscheidungsgrundlagen.

Fazit und Ausblick

Die Potenzialfeldmessung über einen Wasserstrahl liefert Messwerte, die der konventionellen Kontaktmessung gleichwertig sind, bei geringerer Streuung. Zusammen mit der photogrammetrischen Verortung entsteht eine flächige, referenzierte Erfassung des Korrosionszustands, die früh genug ansetzt, um vorbeugend zu handeln. Die Prozesskette ist durchgehend digital, das manuelle Übertragen der Messraster auf Pläne entfällt. Damit ist der Prozess nicht nur effizienter, sondern auch weniger fehleranfällig als das herkömmliche Vorgehen.
Der praktische Gewinn liegt zudem im Zugang. Schwer zugängliche Bauteile wie Brückenuntersichten, hohe Stützen oder unzugängliche Widerlager lassen sich nun

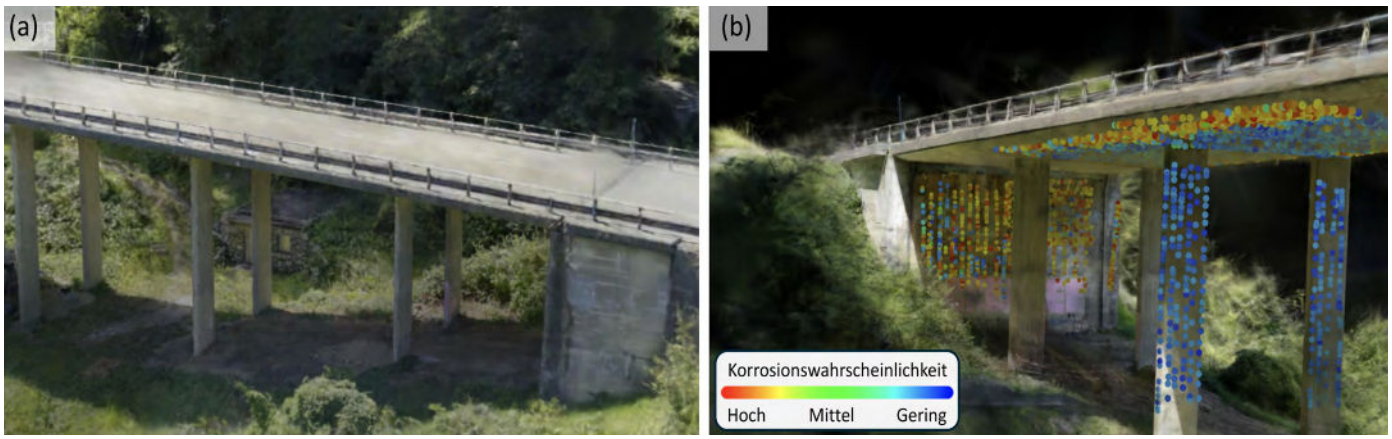


Abb. 5: Feldeinsatz: (a) referenziertes Abbild des Bauwerks, (b) Korrosionskarte an Untersicht und Pfeilern im 3D Modell.

drohnenbasiert inspizieren, ohne Arbeit in der Höhe und ohne Eingriff in den Verkehr. Weil Bilder und Messwerte in denselben Flügen entstehen, ist der Mehraufwand gegenüber einer rein visuellen Befliegung gering. Die Drohne ist dabei nur ein möglicher Sensor-Träger, denn ohne Anpressdruck stellt das Messprinzip kaum Anforderungen an ihn. Für Parkhäuser wird derzeit ein Bodenroboter erprobt. Auch ein handgeführtes Gerät ist möglich: Die Verortung erfolgt dann ebenfalls automatisch, und das Messraster muss nicht mehr vorgängig angelegt und von Hand auf Pläne übertragen werden. Der Sensor-Träger richtet sich nach der Zugänglichkeit, das Verfahren bleibt dasselbe. Damit wird eine früherkennende Zustandserfassung erstmals in einem Massstab machbar, der über Stichproben hinausgeht.

Dank

Die Arbeiten entstanden in der Forschungsgruppe Durability of Engineering Materials der ETH Zürich. Die Autoren danken den beteiligten Studierenden und Forschenden: Manila Frangi, Lia Frei, Maria-Christine Papadopoulos, Ola Berg Edseth, Gabriel Bühler, Raphael Schumacher und Dr. Patrick Pfändler. Dank gilt zudem dem Bundesamt für Strassen (ASTRA), insbesondere Dr. Dimitrios Papastergiou, Fachbereich Kunstbauten, für die Unterstützung des Projekts und den Zugang zum Bauwerk, ohne den der Feldeinsatz nicht möglich gewesen wäre. Autorenbeiträge: Konzeption, Systementwicklung und Validierung FMO und LB, Auswertung FMO, fachliche Begleitung UA, Manuskripterstellung LB.

Referenzen:

Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedeferri, P.; Redaelli, E.; Polder, R. B., 2013. Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis, Repair. 2. Auflage, Wiley-VCH.

Elsener, B.; Flückiger, D.; Wojtas, H.; Böhni, H., 1996. Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton. Forschungsauftrag 85/88 der Arbeitsgruppe für Brückenunterhaltsforschung, Bundesamt für Strassenbau, Zürich.

Frangi, M., 2025. Development of a contactless corrosion detection system. Bachelorarbeit, Institut für Baustoffe, ETH Zürich.

Keßler, S.; Gehlen, C.; Ebell, G.; Burkert, A., 2011. Die Aussagegenauigkeit der Potentialfeldmessung. Beton- und Stahlbetonbau 106, S. 481–489.

Martinelli-Orlando, F.; Bircher, L.; Angst, U., 2026. Contactless half-cell potential mapping with a drone-mounted system: from laboratory validation to field deployment for scalable corrosion assessment of reinforced concrete structures. Eingereicht zur Publikation.

SIA 4018, 2023. Planung, Durchführung und Interpretation der Potenzialmessung an Stahlbetonbauten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.

Lukas Bircher
Dr. Federico Martinelli-Orlando
TALPA-Inspection AG
c/o ETH Zürich, Institut für Baustoffe
Laura-Hezner-Weg 7
CH-8093 Zürich
lukas.bircher@talpainspection.ch
federico.martinelli@talpainspection.ch

Prof. Dr. Ueli Angst
Forschungsgruppe Durability of Engineering Materials
Institut für Baustoffe, ETH Zürich
Laura-Hezner-Weg 7
CH-8093 Zürich