

# Instandsetzung von Stahlbetonbauten : Potentialmessungen

Autor(en): [s.n.]

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **66 (1998)**

Heft 9

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153840>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Potentialmessung an Brückenunterseite.

Foto: Tobias Jakob, TFB

# Instandsetzung von Stahlbetonbauten: Potentialmessungen

**Potentialmessungen an Stahlbetonbauteilen erlauben in Verbindung mit anderen Untersuchungsmethoden zuverlässige Aussagen über den Korrosionszustand der Bewehrung.**

Unter den Methoden zur Erfassung des Korrosionszustands von Stahl in Beton bewährt sich die Potentialmessung seit längerer Zeit: Ursprünglich in den USA eingeführt, wird sie in der Schweiz seit etwa 1985 eingesetzt. Das dabei erarbeitete Know-how ist in verschiedenen Publikationen veröffentlicht worden. Einen guten Überblick über den gegenwärtigen Wissensstand geben:

- Merkblatt SIA 2006: «Durchführung und Interpretation von Potentialmessungen an Stahlbetonbauten» (Ausgabe Februar 1993) [1]

- Hunkeler, F., «Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten», VSS-Bericht Nr. 510, Mai 1994 [2]
  - SIA-Dokumentation D 0126: «Potentialmessung, ein wesentliches Instrument für die Beurteilung von Bauwerken» (1995) [3]
- Der vorliegende Artikel basiert grösstenteils auf Unterlagen zu einer TFB-

Fachveranstaltung in Wildeggen [4].

## Einfaches Verfahren

Potentialmessungen ergänzen die übrigen Verfahren und Methoden zur Zustandserfassung von Bauwerken. Der Einsatz dieser fast vollständig zerstörungsfreien Untersuchungsmethode ist für die folgenden Anwendungen sinnvoll:

- flächendeckende Aussagen bzgl.
  - Lage und Ausmass von Korrosionsherden
  - Korrosionszustand der Bewehrung
  - Chloridverseuchung des Betons
  - Karbonatisierung des Betons
  - Feuchtigkeitsverteilung im Bauteil (z.B. unter Abdichtungen)

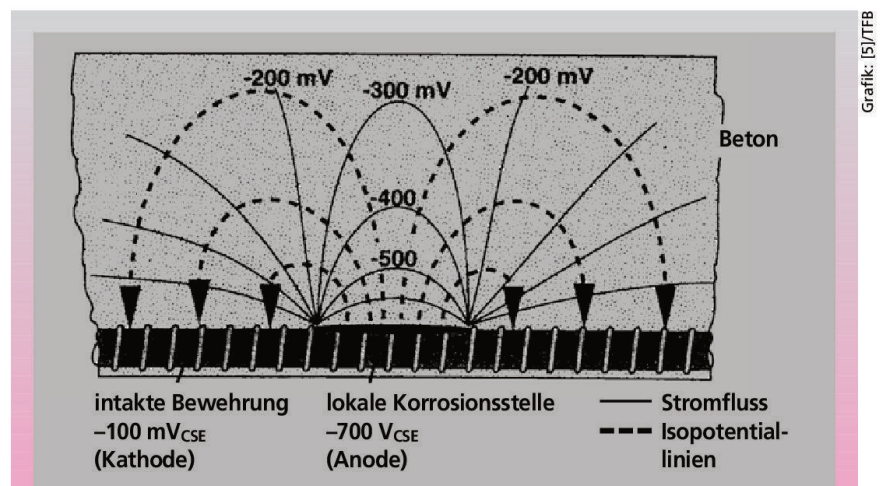


Abb. 1 Lokale Korrosion in Bewehrungsstahl infolge von Makroelementbildung [5].

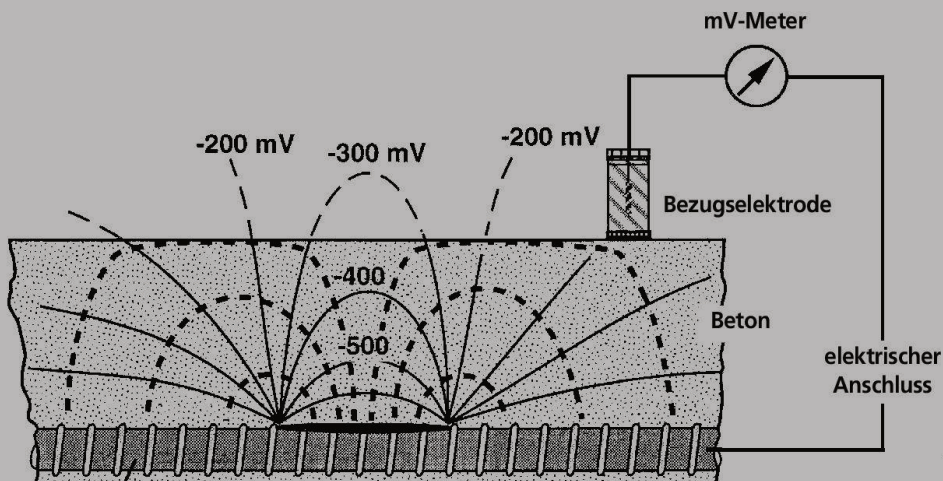


Abb. 2 Prinzip der Potentialmessung auf der Betonoberfläche [5].

Grafik: [5]/TFB

- Lieferung von Entscheidungsgrundlagen für den Umfang von Erhaltungs- und Erneuerungsmassnahmen
- Kontrolle des Erfolgs von Erhaltungs- und Erneuerungsmassnahmen

Im Vordergrund steht immer der Korrosionszustand der Bewehrung. Potentialmessungen sind mit den heute vorhandenen Ausrüstungen relativ einfach realisierbar. Die korrekte Durchführung von Untersuchungen sowie die Auswertung und Interpretation der Messresultate sind aber sehr anspruchsvoll. Sie erfordern beispielsweise fundierte Kenntnisse der elektrochemischen Grundlagen der Korrosion von Stahl und des physikalisch-chemischen Verhaltens von Beton.

### Korrosion von Stahl in Beton

Grundsätzlich ist Stahl in Beton vor Korrosion geschützt, denn unter der Einwirkung des stark alkalischen Porenwassers (pH 12,5 bis 13,5) bildet sich auf seiner Oberfläche spontan eine sehr dünne, lückenlose und fest haftende Schutzschicht. Allerdings ist diese Passivschicht aus Eisenoxiden in Anwesenheit von Chloriden oder bei pH-Werten  $\leq 11,5$  (pH-Erniedrigung durch Karbonatisierung) nicht mehr stabil; ein Korrosionsrisiko für die Bewehrung besteht

aber erst, wenn gleichzeitig Wasser und Sauerstoff vorhanden sind. Die Korrosion von Bewehrungsstahl (Abbildung 1) ist ein komplexer elektrochemischer Prozess. Eine Stelle mit zerstörter Passivschicht wirkt als lokale Anode, der sie umgebende nicht korrodierte Oberflächenbereich als Kathode; zusammen bilden sie ein kurzgeschlossenes galvanisches Element, ein Makroelement. Während des elektrochemischen Prozesses an der Anode (1) lösen sich

Eisenionen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) aus dem Gitterverband des Eisens heraus. Die freigesetzten Elektronen ( $e^-$ ) wandern im Eisen unter der Wirkung der sich aufbauenden Potentialdifferenz zur Kathode. Dort findet der kathodische Teilprozess (2) statt.



Zum Schliessen des Stromkreises wird ein Elektrolyt benötigt, in dem die gebildeten Ionen aufgelöst und transportiert werden können. In

Hauptinflüsse	Nebeneinflüsse
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korrosionszustand der Bewehrung</li> <li>- Chloridgehalt des Betons</li> <li>- Feuchtigkeit und Widerstand des Betons</li> <li>- Karbonatisierungstiefe des Betons (pH-Wert des Porenwassers)</li> <li>- Sauerstoffgehalt des Betons</li> <li>- Makroelemente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatur</li> <li>- Betoneigenschaften</li> <li>- Alter des Betons</li> <li>- Überdeckung und Anordnung der Bewehrung</li> <li>- Risse und Fugen</li> <li>- nicht vollständig mit Beton umhüllte Bewehrung</li> </ul>

Tab. 1 Haupt- und Nebeneinflüsse auf das Korrosionspotential der Bewehrung [1].

Tab. 2 Korrosionspotentiale von Metallen in Beton [1, 4].

Elektrode	Potential [V <sub>CSE</sub> ]
Betonstahl in	
- gesättigter $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung	$\geq -1,1$
- $\text{O}_2$ -freiem, wassergesättigtem Beton	$\geq -1,1$
- normalfeuchtem, chloridhaltigem Beton	$\geq -0,6$
- normalfeuchtem, chloridfreiem Beton	+0,1 bis -0,1
- normalfeuchtem, karbonatisiertem Beton	+0,1 bis -0,3
- trockenem, karbonatisiertem Beton	+0,2 bis 0
- trockenem Beton	+0,2 bis 0
Nichtrostender Stahl in	
- normalfeuchtem Beton	+0,1 bis -0,2
Kupfer in	
- normalfeuchtem Beton	+0,1 bis -0,2
Verzinkter Stahl in	
- nassem Beton	$\geq -1,1$
- normalfeuchtem, chloridhaltigem Beton	$\geq -0,8$
- normalfeuchtem, chloridfreiem Beton	ähnlich wie Betonstahl
- normalfeuchtem, karbonatisiertem Beton	+0,2 bis -0,1
- trockenem, karbonatisiertem Beton	ähnlich wie Betonstahl
- trockenem Beton	ähnlich wie Betonstahl

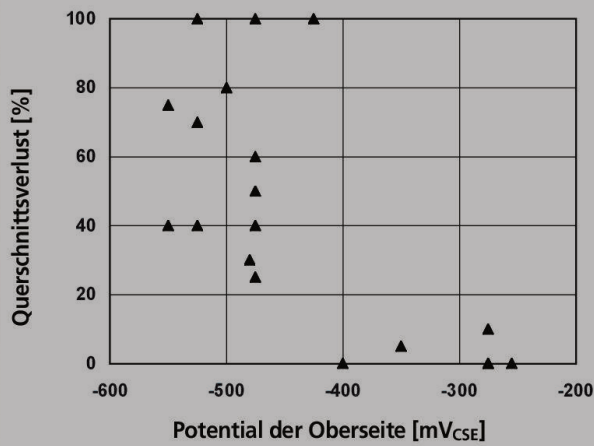


Abb. 3 Zusammenhang zwischen Querschnittsverlust der Bewehrung und Potential [4].

Grafik: TFBZSD

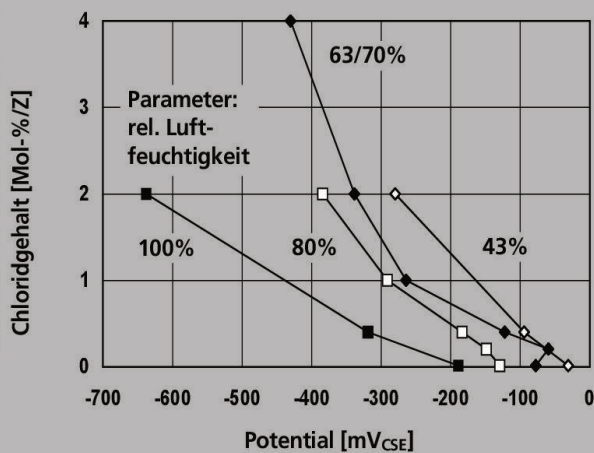
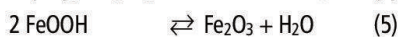
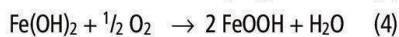
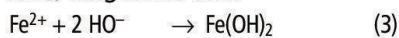


Abb. 4 Einfluss des Chloridgehalts und der Luft- bzw. Betonfeuchtigkeit auf das Korrosionspotential [4].

Grafik: TFBZSD

Stahlbeton ist dies die Porenlösung des Betons. Die im kathodischen Teilprozess (2) gebildeten Hydroxylionen ( $\text{HO}^-$ ) wandern in Richtung Anode und treffen dabei auf die Eisenionen; es bildet sich Eisenhydroxid, das durch Sauerstoff in Rost, eine Mischung aus  $\text{FeOOH}$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , umgesetzt wird:



Die Potentiale von korrodierenden und nicht korrodierenden (passiven) Bewehrungsstellen unterscheiden sich um mehrere 100 mV. Der daraus resultierende Stromfluss ist mit einem elektrischen Feld gekoppelt (siehe *Abbildung 1*). Dieses lässt sich auf der Betonoberfläche mittels der in *Abbildung 2* schematisch dargestellten Anordnung messen.

Als Referenzelektroden werden meistens Kupfer-/Kupfersulfatelektroden (CSE) eingesetzt, deren Standardpotential  $V_{\text{NHE}}$  bei 25 °C +318 mV beträgt. (Das Standardpotential der

Standardwasserstoffelektrode ist bei 25 °C definitionsgemäss 0,000 mV.) Bei Messungen mit der Kupfer-/Kupfersulfatelektrode werden die  $V_{\text{CSE}}$ -Werte abgelesen und auch in der Auswertung eingesetzt.

### Korrosionspotentiale von Stahl

Die Haupt- und Nebeneinflüsse auf die Korrosionspotentiale von Bewehrungen sind in *Tabelle 1* zusammengefasst. Bei Messungen sind zusätzlich zu berücksichtigen: Störeinflüsse wie Anstriche auf der Betonoberfläche oder Streuströme sowie Messfehler, die beispielsweise durch defekte Kabel verursacht werden (siehe Anhang II in [1]).

In *Tabelle 2* sind Potentialbereiche für Betonstahl unter verschiedenen Umgebungsbedingungen angegeben. Die wichtigsten korrosionsfördernden Einflüsse werden nachfolgend anhand von konkreten Beispielen kurz erläutert.

### Korrosionszustand der Bewehrung

Je höher die Korrosionsgeschwindigkeit und damit der Querschnittsverlust der Bewehrung im korrodierenden Bereich ist, desto tiefer ist das Korrosionspotential (*Abbildung 3*).

### Chlorid- und Feuchtigkeitsgehalt des Betons

Mit steigendem Chloridgehalt des Betons sinkt das Korrosionspotential. Mitentscheidend ist aber auch die Feuchtigkeit des Betons, die den Einfluss der Chlorionen um so mehr verstärkt, je höher sie ist (*Abbildung 4*).

### Karbonatisierungsgrad des Betons

Je stärker ein Beton karbonatisiert ist, desto niedriger ist der pH-Wert der Porenlösung. Bei sinkendem pH-Wert nimmt das Potential des Betonstahls zuerst zu, dann ab.

### Potentialmessungen am Objekt

Für Potentialmessungen ist im wesentlichen die folgende Ausrüstung notwendig:

- Anschluss an Bewehrung
  - Referenzelektrode (in der Regel Kupfer-/Kupfersulfatelektrode, CSE)
  - hochohmiges Spannungsmessgerät
  - isolierte Kupferkabel
- Kupfer-/Kupfersulfatelektroden haben zwischen 0 und 50 °C einen relativ niedrigen Temperaturko-

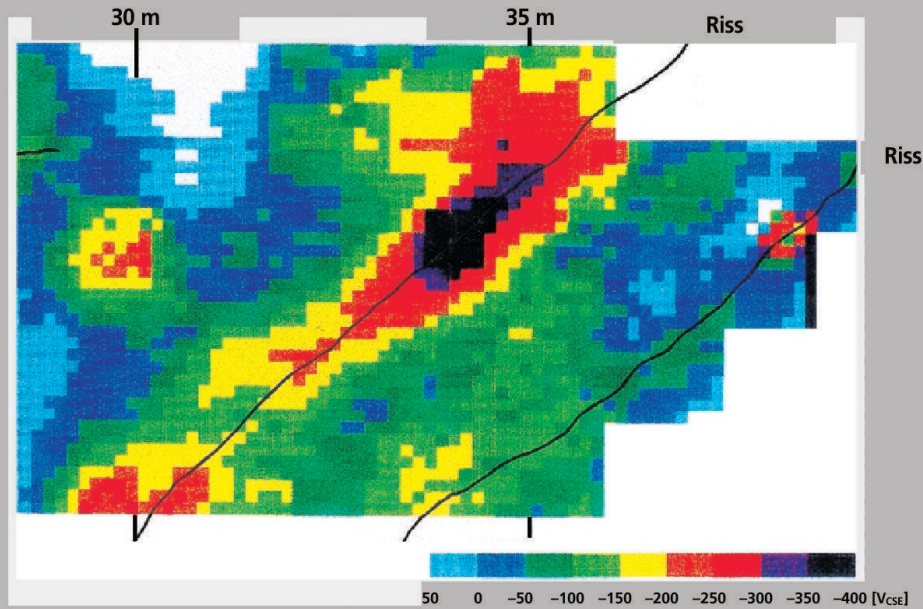


Abb. 5 Potentialfeld der gerissenen Decke eines Parkhauses mit verstärkter Korrosion in Rissbereichen.

Grafik: SGK, TFBZSD

effizienten von etwa  $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Grundsätzlich muss zwischen Potentialpunkt- und Potentialfeldmessungen unterschieden werden. *Potentialpunktmessungen* sind Messungen mit Einzelelektroden. Der übliche Messraster beträgt  $0,5 \times 0,5$  bis  $1,0 \times 2,0 \text{ m}$ , woraus  $0,1$  bis  $25 \text{ Messpunkte}/\text{m}^2$  resultieren. *Potentialfeldmessungen* werden mit Mehrelektrodensystemen durchgeführt. Der engmaschige Messraster ( $0,15 \times 0,15$  bis  $0,50 \times 0,50 \text{ m}$ ) liefert entsprechend viele Messpunkte (4 bis

$45/\text{m}^2$ ). Dies erlaubt – allerdings verbunden mit einem hohen messtechnischen Aufwand – die Darstellung von Potentialfeldern (Abbildung 5). In der Regel wird die universeller einsetzbare Potentialpunktmessung genügen, um den Potentialverlauf auf der Betonoberfläche ausreichend genau zu beschreiben. Auf die Durchführung von Messungen wird hier nicht eingegangen. Sie wird im Merkblatt SIA 2006 [1] ausführlich behandelt.

### Auswertung von Potentialmessungen

Die Resultate von Punktmessungen und von Messungen mit Einzelradialektroden lassen sich am besten tabellarisch zusammenstellen. Die Entscheidung, welche Bereiche korrosionsgefährdet sind, erfolgt anschliessend über eine statistische Auswertung in drei Schritten. Als Funktion des Potentials werden berechnet und dargestellt:

- Häufigkeitsverteilung (Abbildung 6a)
- Summenhäufigkeit (Abbildung 6b)
- Summenhäufigkeitsverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz (Abbildung 6c)

Das Vorgehen wird im folgenden stark vereinfacht an Potentialmessungen auf der Unterseite der

Fahrbahnplatte des San-Bernardino-Tunnels illustriert [4].

Die Häufigkeitsverteilung der Potentiale (Gruppen von  $10 \text{ mV}$  Grösse) ergibt das in *Abbildung 6a* dargestellte Bild. Eine Entscheidung darüber, ab welchem Potential mit Korrosion zu rechnen ist, ist damit nicht möglich.

Bereits mehr Informationen sind in *Abbildung 6b* enthalten, bei der Darstellung der Summenhäufigkeit der Potentiale.

Einzelnen Bereichen eindeutig zuzuordnen lassen sich Potentialwerte erst durch die Darstellung der Summenhäufigkeit im Wahrscheinlichkeitsnetz (*Abbildung 6c*): Grafisch können drei Geraden (Tangenten) definiert werden, deren Schnittpunkte  $U(K)$  und  $U(P)$  verschiedene Bereiche abgrenzen:

- $U(K)$  ist der Schnittpunkt zwischen der Geraden für den Bereich der Korrosion und der Tangente für den Übergangsbereich;  $U \leq U(K)$  bedeutet Korrosion (Wahrscheinlichkeit von 100 %)
- $U(P)$  ist der Schnittpunkt zwischen der Geraden für den Bereich der passiven Bewehrung und der Tangente für den Übergangsbereich;  $U \geq U(P)$  bedeutet mit 100 % Wahrscheinlichkeit keine Korrosion.
- Im Bereich zwischen  $U(P)$  und  $U(K)$

### Literatur

- [1] Merkblatt SIA 2006: «Durchführung und Interpretation von Potentialmessungen an Stahlbetonbauten» (Ausgabe Februar 1993).
- [2] Hunkeler, F., «Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten», VSS-Bericht Nr. 510, Mai 1994.
- [3] SIA-Dokumentation D 0126: «Potentialmessung, ein wesentliches Instrument für die Beurteilung von Bauwerken» (1995).
- [4] Hunkeler, F., «Zustandserfassung mittels Potentialmessung» in Unterlagen zur TFB-Fachveranstaltung «Instandsetzung von Stahlbetonbauten: Zustandserfassung» vom 3. März 1998 in Wildeggen.
- [5] Elsener, B., Flückiger, D., Wojtas, H., und Böhni, H., «Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton», VSS-Bericht 521, Februar 1996.
- [6] Hermann, K., «Kathodischer Korrosionsschutz», Cementbulletin 61 [20], 1–9 (1993).

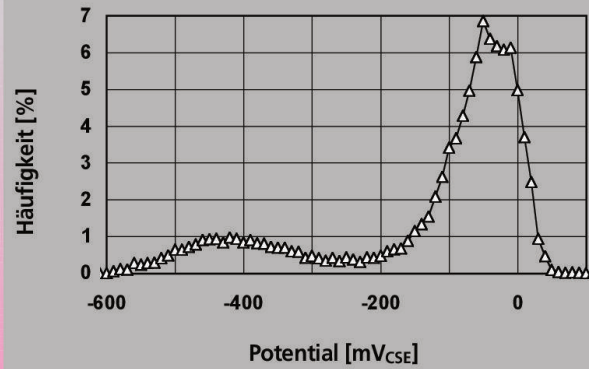


Abb. 6a Häufigkeitsverteilung der Potentialwerte der Unterseite der Fahrbahnplatte des San-Bernardino-Tunnels [2].

Grafik: TFB/ZSD

liegt die Korrosionswahrscheinlichkeit zwischen 0 und 100 %, wobei die Wahrscheinlichkeit bei  $U(\bar{u})$  (Wendepunkt der Summenhäufigkeitskurve) etwa 50 % beträgt. Für unser Beispiel folgt daraus (siehe Abbildung 6c):

- annähernd 100 % Korrosionswahrscheinlichkeit ( $U \leq -420 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ ) bei rund 9,5 % der Messstellen
- annähernd 100 % Wahrscheinlichkeit für Bewehrung im passiven Zustand ( $U \geq -50 \text{ mV}_{\text{CSE}}$ ) bei rund 38 % der Messstellen

Die kritischen Potentialwerte hängen sehr stark von den bereits erwähnten Einflussgrößen ab; sie müssen deshalb für jedes Bauteil neu bestimmt werden.

### Weitere Untersuchungen

Das Eingrenzen von Bereichen mit korrodierender bzw. wahrscheinlich korrodierender Bewehrung reicht in den meisten Fällen nicht aus für eine zuverlässige Aussage über den Korrosionszustand eines Bauteils. Vielmehr sollten weitere Untersuchungen vorgenommen werden, damit Korrelationen zwischen den Potentialwerten einerseits und dem Chloridgehalt, der Karbonatisierungstiefe, der Betonüberdeckung und dem Querschnittsverlust der Bewehrung andererseits hergeleitet werden können. Die dafür notwendigen

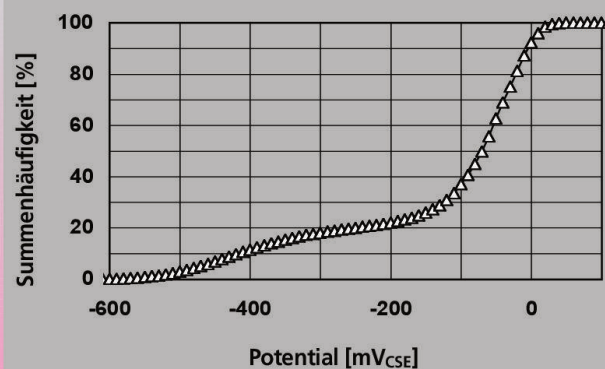


Abb. 6b Summenhäufigkeit der Potentialwerte der Unterseite der Fahrbahnplatte des San-Bernardino-Tunnels [2].

Grafik: TFB/ZSD

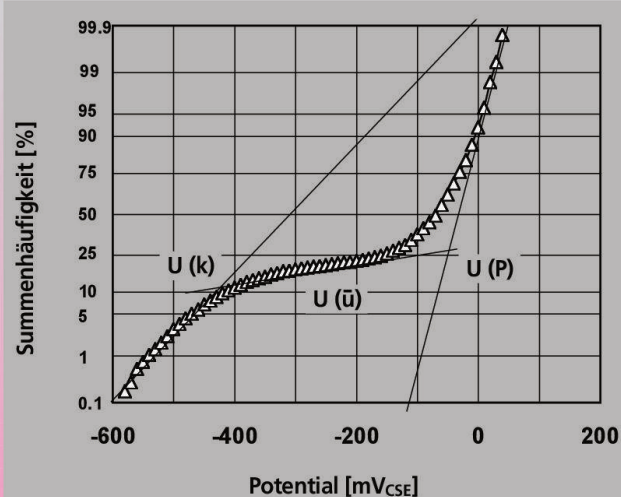


Abb. 6c Summenhäufigkeit der Potentialwerte der Unterseite der Fahrbahnplatte des San-Bernardino-Tunnels im Wahrscheinlichkeitsnetz [2].

Grafik: TFB/ZSD

Probenahmestellen und Sondieröffnungen werden selbstverständlich aufgrund der Ergebnisse der Potentialmessungen sorgfältig ausgewählt. Erfahrene Ingenieure können mit

diesen Daten Potentialgrenzwerte für Bereiche ohne Korrosion, Bereiche mit starker Korrosion oder Lochfrass ableiten; dazwischen liegt der Übergangsbereich mit leichter oder begin-