

Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion an U-Bahnbauwerken

M. Hennecke, M. Schöning

Zusammenfassung In dem Artikel wird über chloridinduzierte Schäden an U-Bahnbauwerken in München berichtet. Ausgehend von der Bauwerksprüfung wird am Beispiel U-Bahnhof Hauptbahnhof gezeigt, wie die Schäden festgestellt und instandgesetzt wurden. Der Bahnhof wurde in den 1970er Jahre in der Schlitzwand-Deckelbauweise errichtet. Ursächlich für die Schäden ist Oberflächenwasser, das Chloride infolge Taumitteinsatz mit sich führt und das an Arbeitsfugen in die Tragkonstruktion eindringt. Es wird beschrieben, welcher Aufwand derartige Schäden für die Bauwerksuntersuchung und Instandsetzung mit sich bringen.

Chloride-induced corrosion of reinforcement in underground structures

Abstract This paper reports the chloride-induced damages in Munich's underground structures. The maintenance project of the underground station at the Main Train Station is used to show how these damages are detected and the structures are repaired. The underground station from 1970s was constructed as a cut-and-cover tunnel with diaphragm walls. The chloride-induced damages occur at the construction joints, where chloride is transferred by the surface water containing de-icing salts. The efforts and complexities in structural inspection and maintenance for detecting and repairing these damages are discussed.

1 Bauwerksprüfung SWM

Die Prüfung der U-Bahnbauwerke wird seit Inbetriebnahme der U-Bahn 1971 durch die Prüfgruppe des Bauunterhalts durchgeführt. Die Prüfung erfolgte nach den Vorgaben der BOStrab [1]. Im Laufe der Jahrzehnte stellte sich jedoch heraus, dass in der BOStrab über die Art und den Umfang der durchzuführenden Prüfungen keine ausreichenden Regelungen vorhanden sind. Seit 1998 erfolgt daher die Bauwerksprüfung in Anlehnung an die DIN 1076 [2]. Die Abgrenzung erfolgt hier bei den Prüfrhythmen. Werden in der DIN 1076 die Hauptprüfungen alle 6 Jahre gefordert, spricht die BOStrab von planmäßigen Inspektionen der Tunnel und Haltestellenbauwerke sowie der sonstigen Bahnbauwerke von 10 Jahren, Bei Brückenbauwerken von 6 Jahren. Somit erfolgen

die alternierenden Haupt- bzw. Einfachprüfungen der Tunnelbauwerke und U-Bahnhöfe in der Regel in einem Abstand von 5 Jahren.

Die Prüfungen werden von einem Prüfenieur und einem Prüfmeister der Stadtwerke München GmbH, Unternehmensbereich Verkehr (SWM) hauptsächlich in der Betriebsruhe von ca. 1:30 bis ca. 4:00 Uhr früh durchgeführt. Da nicht alle Bauteile frei zugänglich sind, kommt in vielen Fällen ein Schienenfahrzeug mit Ruthmann-Steiger zum Einsatz.

Darüber hinaus müssen für eine handnahe Prüfung im Vorfeld der Bauwerksprüfung in der Mehrzahl der U-Bahnhöfe die vorgesetzten Wandverkleidungen und abgehängten Decken demontiert werden. Neben den einschlägig bekannten Prüfmethode werden zusätzlich nach Bedarf Bohrmehlproben zur Bestimmung der Chloridkonzentration entnommen. Die Zustandsbewertung des geprüften Bauwerkes erfolgt sodann nach der RI-EBW-PRÜF [3].

Die im zweiten Abschnitt beschriebenen Prüfungen am U-Bahnhof Hauptbahnhof zeigen auf, dass bei Tunnelbauwerken mit unzureichender Abdichtung weitreichendere Prüfungen, wie Probeschachtungen, von Nöten sind.

Die Ausführung von Probeschachtungen zur weiterführenden Bauwerksprüfung ist ein Ansatz den die SWM seit 2009 verfolgen. Die Planung und Umsetzung dieser Schachtungen, meistens im Straßenbereich, stellen ein Novum in der Bauwerksprüfung dar. Da diese weiteren umfangreichen Untersuchungen an vielen weiteren U-Bahnbauwerken durch die Bauwerksprüfgruppe aus Kapazitätsgründen nicht mehr zu bewerkstelligen war, wurde 2010 bei den Stadtwerken München GmbH, Unternehmensbereich Verkehr (SWM) das Fachteam Bauwerksdiagnostik ins Leben gerufen.

Das Fachteam Bauwerksdiagnostik hat die Aufgabe, die Erkenntnisse aus der Bauwerksprüfung zu vertiefen und den Schadensumfang mit Hilfe weiterer Untersuchungen zu verifizieren. Darüber hinaus werden durch Machbarkeitsstudien mögliche Sanierungskonzepte aufgezeigt und das geplante Projekt in einem ersten Step monetär bewertet. Im Zuge dieser Machbarkeitsstudien werden auch für die spätere Instandsetzung notwendige Verkehrsumlegungen des Individualverkehrs und des Öffentlichen Nahverkehrs, insbesondere des Trambahnverkehrs, näher untersucht.

Gerade der Betrieb des Öffentlichen Nahverkehrs an der Oberfläche und insbesondere des U-Bahnverkehrs, welcher durch die Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG), eine Tochter der SWM durchgeführt wird, stellt die Planer der SWM immer wieder vor neue Herausforderungen.

2 U-Bahnhof Hauptbahnhof

Um die betriebliche Komplexität der Örtlichkeit zu verdeutlichen, werden die Funktionen beschrieben, die durch das Objekt berührt werden.

Dipl.-Ing. (FH) Markus Schöning

SWM Stadtwerke München GmbH
UB Verkehr, Ressort Schiene U-Bahn
Emmy-Noether-Straße 2
80287 München
089/2191-2369

Dr.-Ing. Markus Hennecke

ZILCH + MÜLLER Ingenieure GmbH
Erika-Mann-Straße 63
80636 München
089 990 162 116

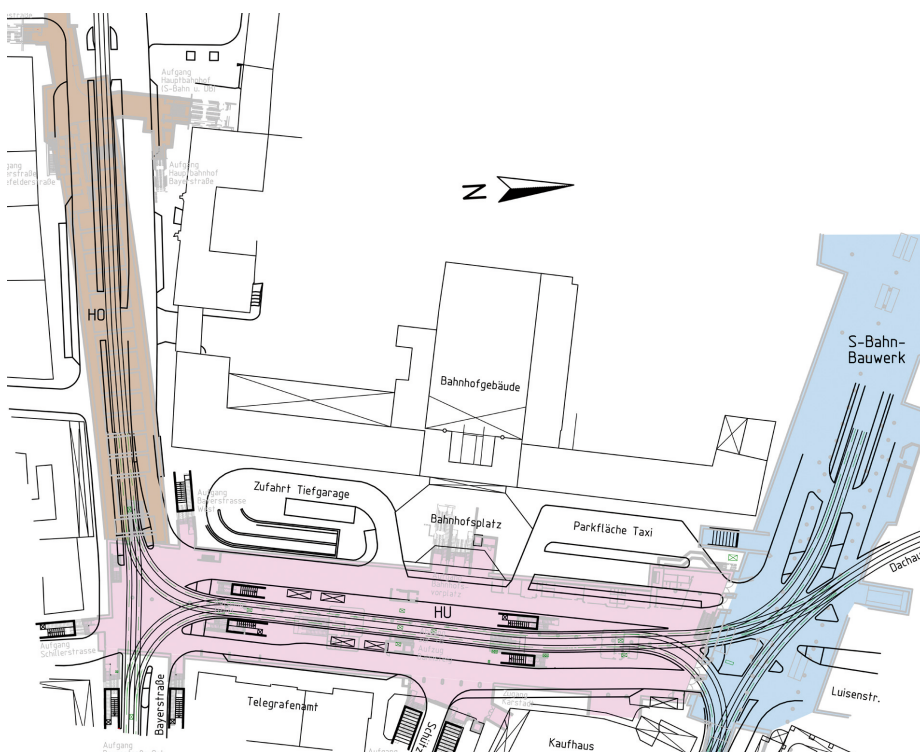


Bild 1. Übersicht Bahnhofplatz mit U-Bahnhof (Bauwerk HU und HO) und S-Bahnhof

Fig. 1. Plan view of the Bahnhofplatz with the stations of the underground (Structure HU und HO) and suburban trains

Der U-Bahnhof Hauptbahnhof in München liegt unterhalb des Bahnhofplatzes. In 1848 wurde unter der Leitung von Friedrich Bürklein der erste Bahnhof an dieser Stelle als Kopfbahnhof errichtet. Der heutige Hauptbahnhof wurde nach kriegsbedingten Zerstörungen in den 1950er Jahren wiederaufgebaut. Mit circa 350.000 Fahrgästen ist der Münchner Hauptbahnhof der am zweistärksten frequentierte Bahnhof in Deutschland nach dem Hauptbahnhof Hamburg. Die Gleise verlaufen in Ost-West-Richtung. Die Eingangshalle mit den angrenzenden Bürogebäuden schließt den Bahnhofsvorplatz in seiner ganzen Länge im Westen ab. Auf der Ostseite befinden sich ein großes Kaufhaus und das ehemalige Telegrafamt, in dem heute eine Postfiliale und Bank sowie Büroflächen untergebracht sind. An der Süd- und Nordseite des Platzes sind Hotels und Einzelhandelsläden zu finden (**Bild 1**).

Der Platz wird mit insgesamt acht Straßen erschlossen, die im Wesentlichen an dem nördlichen und südlichen Kopf des Platzes anschließen. Über den Platz verlaufen zwei Fahrstreifen in Richtung Süden und ein Fahrstreifen in Richtung Norden. Den Bahnhofplatz queren zurzeit sieben Trambahnlinien und eine Buslinie der MVG. Damit ist er für den oberflächlich geführten öffentlichen Personennahverkehr ein zentraler Punkt in München.

Die Gleise für die Trambahnen führen in nahezu alle Erschließungsstraßen. Aus diesen Verbindungen ergeben sich an den beiden Köpfen des Bahnhofplatzes komplizierte Gleiskreuzungen. Auf der Ostseite sind die Haltepunkte für die Busse der Stadtführung.

Der Platz ist stark frequentiert von Fußgängern, die die Nahverkehrsverbindungen aufsuchen oder in die nahe Innenstadt gehen. Für die Bedienung des Bahnhofs gibt es einen großen Taxenstellplatz.

Jede Funktion, die von dem Platz genommen wird, wenn auch nur temporär, berührt unmittelbar wirtschaftliche Interessen der jeweils Betroffenen oder verursacht hohe Kosten, wie zum Beispiel der Ausbau einer Gleiskreuzung.

Der U-Bahnhof Hauptbahnhof setzt sich aus zwei Bauwerken unterhalb der Geländeoberfläche zusammen. In der Nord-Südachse liegt das Bauwerk HU der U-Bahnlinie U 1/2. Das Haltestellenbauwerk HO der Linie U 4/5 schließt an der Südseite an und verläuft in Ost-West Richtung. Die beiden Bauwerke besitzen bis zu vier Untergeschosse und sind über Querungen miteinander verbunden. Des Weiteren befinden sich im Bauwerk HU der Linie U 1/2 eine Ladenpassage und der Übergang zur Haltestelle der S-Bahn (DB) im 1 UG, sowie eine öffentliche Tiefgarage und umfangreiche Betriebsräume der SWM.

Die beiden U-Bahnhof Bauwerke sind als Schlitzwand- Deckelbauweise errichtet worden. Die Schlitzwände sind nicht nur temporäre Bauhilfskonstruktionen zur Baugrubensicherung,

sondern dienen auch als endgültige Bauwerksaußenwand. Durch Bewehrungsanschlüsse in den Schlitzwänden, werden die Zwischendecken angebunden.

Das statische System ist ein Rahmen, in dem der Deckel als Riegel biegesteif an die Schlitzwände als Stiele verbunden ist. Da im Bauwerk HU zwei Bahnsteige mit vier Gleisen vorhanden sind, hat der Bahnsteigteil eine Breite von ca. 33,5 m. Eine Mittelstützenreihe ist angeordnet, um die Stützweite des Deckels auf ein verträgliches Maß anzupassen. Im Bauwerk HO mit einem Bahnsteig und zwei Gleisen sind keine Mittelstützen vorhanden.

Die oberste Tunneldecke ist über eine Rahmeneckbewehrung in die Schlitzwände statisch eingespannt. Die Bauwerke befinden sich größtenteils im Grundwasser mit einem Höchstgrundwasserstand (HHW) von 514,38m ü. NN. Somit steht bereits im ersten Untergeschoss, teilweise Grundwasser an.

Die beiden Bauwerke wurden im Zeitraum von 1975 –1980 im Rohbau erstellt. Die Inbetriebnahme des Bauwerks HU der Linie U1/2 erfolgte im Herbst 1980. Das Bauwerk HO der Linie U4/U5 wurde im Frühjahr 1984 in Betrieb genommen. Aus dem U-Bahnhof heraus gibt es Treppenanlagen in die Erschließungsstraßen und den Hauptbahnhof.

Das zweite Untergeschoss ist eine Tiefgarage mit 80 Stellplätzen. In dem Geschoss unterhalb der Tiefgarage befinden sich Betriebsräume der Stadtwerke mit Werkstätten und Lager, die über eine Rampe mit Lieferfahrzeugen angedient werden. Entlang der Außenkanten des Bahnhofsgebäudes verlaufen Sparten fast aller Versorgungsträger.

Die Schlitzwand-Deckelbauweise ist prädestiniert für unterirdische Bahnhöfe, da sie es ermöglicht, nach dem Bau relativ weniger Elemente (Schlitzwände und Deckel), das Bauwerk wieder seiner allgemeinen Nutzung zugänglich zu machen und die weiteren Arbeiten unter Tage fortzuführen.



Bild 2. Wassereintritt an der Schlitzwand und Korrosionsschäden an der Unterkonstruktion der Innenverkleidung
 Fig. 2. Water ingress on a diaphragm wall and the corrosion damages of the interior lining of the base structure



Bild 3. Korrodierte Fußplatte der Unterkonstruktion der Innenverkleidung
 Fig. 3. Corroded plate of the base structure of the interior lining

Erstmals wurde diese Bauweise in München 1967 für den Ausbau des Bahnhofs Marienplatz umgesetzt. Vor die Innenseite der Schlitzwand wurden im Ausbau Wandschalen gesetzt, mit einer Abdichtungsebene aus Bitumenschweißbahnen zwischen der Schlitzwand und der Innenschale. Das Bauverfahren wurde für das nahezu gleichzeitig erbaute Bauwerk unter dem Stachus modifiziert, indem auf die abgedichtete Innenschale verzichtet wurde. Zur Kontrolle der Dichtigkeit der Schlitzwand und zur Ausführung eventueller Wartungsarbeiten verlaufen in jedem Untergeschoss entlang der Schlitzwand etwa 80 cm breite Kontrollgänge. Der Deckel des Stachusbauwerks ist mit den Schlitzwänden nicht monolithisch verbunden, sondern lagert auf Lagern. Zur Weiterleitung der Steifenkräfte in den Deckel befinden sich auf der Innenseite Konsolen. Für den Hauptbahnhof wurde das System erneut weiterentwickelt. Die Schlitzwände bilden unmittelbar die Außenwände des Bauwerks und der Deckel ist monolithisch angeschlossen [4].

Die Schlitzwände binden in den Grundwasserstauer ein. Der U-Bahnhof Hauptbahnhof wird mit einer ständigen Wasserhaltung betrieben. Wasser, das sich zwischen den Schlitzwänden unter der Sohlplatte sammelt, wird über eine Drainierung abgeführt, um keinen Wasserdruck auf die Sohlplatte entstehen zu lassen.

Da die Schlitzwände als Lamellen hergestellt wurden, gibt es zwangsläufig vertikale Fugen zwischen den Lamellen. Beim U-Bahnhof Hauptbahnhof sind sie nicht mit einem Fugenband abgedichtet. Der Zutritt einer geringen Wassermenge war daher zu erwarten. Um das Wasser zu fassen und abzuleiten, ist die Oberseite der Sohlbalken, die oberhalb der Sohlplatte angeordnet sind, als Rinne ausgebildet. Als Vorflut für diese Rinnen ist die Gleisbettentwässerung vorgesehen. Auf den Rinnen steht die Unterkonstruktion der Innenverkleidung, die die Schlitzwände im Bahnhofsgeschoss verkleiden. Die Unterkonstruktion besteht im Bauwerk HU aus verzinkten Stahlprofilen und im Bauwerk HO aus Aluminiumprofilen.

Bei anderen U-Bahnhöfen in München wird der Boden zwischen den Schlitzwänden nicht drainiert, so dass sich ein Wasserdruck auf die Sohlplatte aufbaut. Die Sohlbalken sind in diesen Bauwerken zur Ableitung der nach oben gerichteten Auflagerkräfte in die Schlitzwand ausgebildet.

Im Zuge der Bauwerkshauptprüfung, die im Jahr 2008–2009 durch die Prüfrupps der SWM durchgeführt wurde, wurden erhebliche Schäden an der Tragkonstruktion der Bahnsteiginnenverkleidung der beiden Bauwerke im Bereich der Lamellenfugen festgestellt (Bild 2 und 3).

Zur Ursachenklärung wurden Bohrmehlproben zur Bestimmung des Chloridgehalts genommen. Die Untersuchungen ergaben, dass Chloridkonzentrationen der Bohrmehlproben bis über 4 Masse-% (jeweils Masseanteil bezogen auf den Zement) im Bereich des Sohlbalkens vorhanden waren. Es war auffallend, dass die Chloridkonzentrationen im Bereich der feuchten Lamellenfugen am höchsten ausfielen. Das Ergebnis war überraschend, da mit der Konstruktion zwar nicht ausgeschlossen werden konnte, dass Grundwasser ins Tunnelbauwerk eintritt. Aber Chloridspuren in dieser Größenordnung wurden nicht erwartet. Da der Transport einer relevanten Menge an Chloriden über die U-Bahnzüge ausgeschlossen werden kann, war es offensichtlich, dass Transportwege innerhalb des Bauwerks vorhanden sein mussten. Grundsätzlich können auch im Grundwasser Chloride vorhanden sein. Diese treten als Folge von Auswaschungen aus Gesteinen auf oder auch infolge menschlicher Nutzung. Der Einsatz von Streusalz ist eine dieser Quellen. Nationale und internationale Veröffentlichungen zeigen dies auf [5,6]. Der Chloridgehalt im Grundwasser wird meist vor dem Hintergrund der Gesundheitsgefährdung untersucht. Der Grenzwert ist durch die World Health Organisation mit 250 mg/l angegeben und spiegelt sich in den nationalen Verordnungen für Trinkwasser wieder [7].

Wasseranalysen am Sendlingertorplatz, ein weiterer zentraler Platz in München, zeigen sehr unterschiedliche Konzentrationen in Abhängigkeit von der Lage und Tiefe der Messstelle sowie der Jahreszeit der Entnahme. Die Spitzwerte in einer Entnahmetiefe von rd. 8 m erreichen die Werte, die für Trinkwasser als Grenzwert definiert sind.

Die eingangs dargestellte Annahme, dass Grundwasser in Bezug auf die Korrosion der Bewehrung unschädlich ist, kann, wenn Grundwasser mit derartigen Chloridkonzentrationen in einen Baukörper eindringt, nicht bestehen.

Aufgrund allgemeiner Erfahrungswerte wurde zunächst das über dem Bahnsteig liegende Parkdeck der öffentlichen Tiefgarage als Eintragungsort der Chloride angesehen. Mit

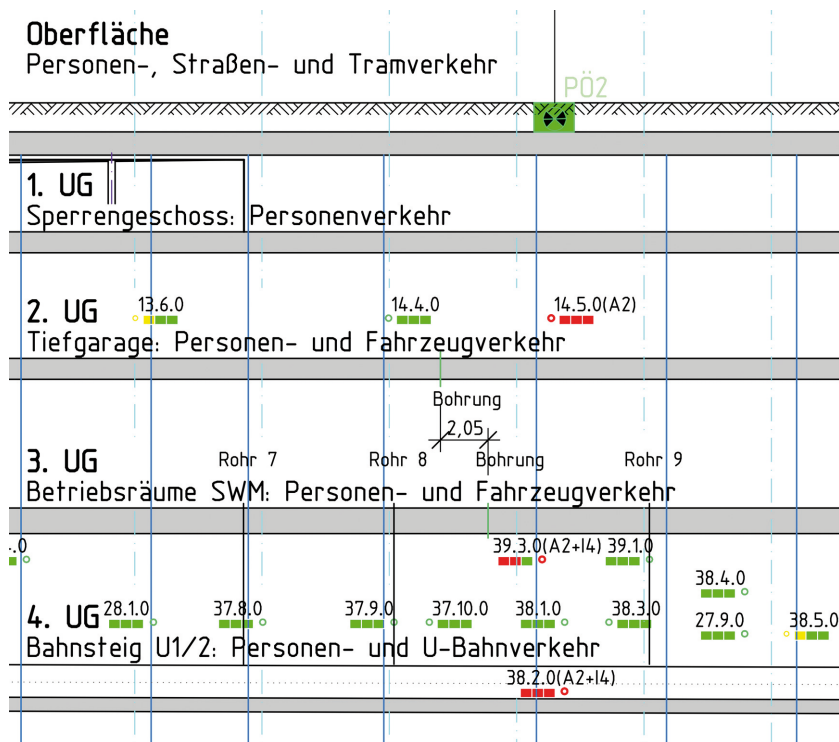


Bild 4. Ausschnitt aus dem Plan der Kartierung der Chloridproben (Schlitzwand West HU)
Fig. 4. Plan extract of the map of the locations of the chloride sampling cores (Diaphragm Wall West HU)

dieser anfänglichen Vermutung konnten jedoch aufgrund der räumlichen Zuordnung die Fundstellen der Bohrmehlproben in der Bahnsteigebene, mit denen die Chloridbelastung nachgewiesen wurde, nicht schlüssig erklärt werden. Weitergehende Untersuchungen, wie das chloridhaltige Wasser in das Bauwerk gelangt, mussten daher durchgeführt werden. Hierzu wurden Zilch + Müller Ingenieure mit eingeschaltet.

Es wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm initiiert, mit dem die Erkundung der Fließwege des chloridhaltigen Wassers auf den gesamten U-Bahnhof (HO und HU) ausgeweitet wurde. Dabei wurde festgelegt, dass neben der visuellen Erfassung von Feuchtstellen die Ergebnisse der Analysen der Bohrmehlproben als Fußabdruck zu nehmen sind.

In der Konzeption der objektspezifischen Schadensanalyse wurden verschiedene Transportwege definiert, die zielgerichtet untersucht wurden. Zur Darstellung der Ergebnisse und Ermittlung der möglichen Wege wurden Übersichtspläne erarbeitet. Für die Darstellung der Chloridbelastung gibt es ein „Ampelsymbol“.

Weg A1: Grundwasserzutritt

Aufgrund der Kenntnisse über Chloride im Grundwasser, die an andere Stelle in der Innenstadt nachgewiesen wurden, wurde der Zutritt von Grundwasser durch die Schlitzwandfugen näher untersucht. An Feuchtstellen wurden Bohrmehlproben entnommen. **Bild 4** zeigt einen Ausschnitt aus dem Plan, der für die Dokumentation der Untersuchungen an der westliche Schlitzwand im HU angefertigt wurde. Es ist zu erkennen, dass es sowohl Funde mit stark erhöhten Chloridkonzentrationen gibt als auch solche ohne nennenswerte Belastung. Insgesamt kann jedoch dieser hiermit untersuchte Zutritt als unkritisch angesehen werden.

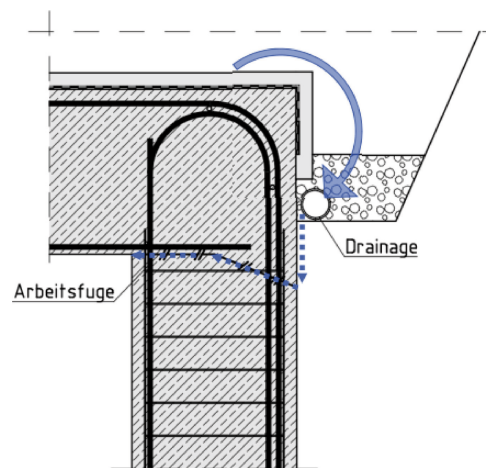


Bild 5. Rahmenecke zwischen Deckel und Schlitzwand
Fig. 5. Frame corner between the tunnel roof slab and diaphragm wall

Weg A2a: Oberflächenwasser über Deckel und Schlitzwand

Oberflächenwasser tritt über die Öffnungen und undichte Fugen in das Bauwerk ein. Dies sind die Blockfugen im Deckel, Arbeitsfugen zwischen Deckel und Schlitzwand und Fugen bei den Treppenanlagen. Aus der Einsicht der Bestandspläne wurde deutlich, dass die Abdichtung des Bahnhofsschalters nur geringfügig an den Seiten heruntergezogen war. Die Arbeitsfuge zwischen den Schlitzwänden und dem Deckel war nicht überdeckt. Es wurde daher vermutet, dass insbesondere in den Fugen zwischen Lamellen und dem Übergang zum Deckel Lücken sind, durch die Wasser eintritt. Da dieser Umstand bedeutend war für eine dauerhafte Lösung, wurden als nächste Schritte im Jahr 2009 drei Probeschachtungen und in 2010 vier Probeschachtungen, neben der Bauwerksaußenkante erstellt. Eine Probeschachtung ist ein vertikaler Schacht, um die zu untersuchende Stelle zu erreichen. Die Probeschächte werden teilweise so ausgebaut, dass ein dauerhafter Zugang möglich ist. Der Vorteil ist dann, dass die Herstellung des Schachtes und die weiterführenden Untersuchungen zeitlich getrennt werden können.

Probeschachtungen ermöglichen einen partiellen Zugang zu den Außenflächen der oberflächennahen, unterirdischen Bauwerke. Untersuchungsziel sind systematische Schäden. Singuläre Schäden können im Prinzip nicht erfasst werden. Da die oberirdische Fläche des Hauptbahnhofs, wie eingehend beschrieben, einer intensiven Nutzung unterliegt, ist für die Ausführung einer Probeschachtung ein relativ hoher planerischer Aufwand nötig. Dazu gehören nicht nur statisch konstruktive Betrachtungen sondern auch verkehrliche Planungen und intensive Abstimmungen mit Dritten. Die planerischen Angaben zur Führung der Abdichtung konnten im Wesentlichen bestätigt werden. Abweichend musste jedoch festgestellt werden, dass die in den Plänen dargestellte Drainage entlang des Deckels nicht verlegt war (**Bild 5**).

Neben der visuellen Begutachtung wurden Bohrmehlproben entnommen. In jeder Probeschachtung gab es Proben mit erhöhten Chloridkonzentrationen. Um die Ergebnisse weiter zu verifizieren, wurden Suchschlitze zur Bewehrung ausgeführt (**Bild 6**).



Bild 6. Korrodierte Schlitzwandbewehrung gesehen in der Probeschachtung
Fig. 6. Corroded reinforcement of the diaphragm wall discovered in the inspection pit

Überraschend wurden Korrosionsnarben an drei in vertikaler Richtung verlaufende Bewehrungsseisen (3 Stäbe Ø 28 mm) in einer Tiefe von 10 cm vorgefunden. Das vertikal verlaufende Montageeisen zeigte einen sehr hohen Querschnittsverlust. Obwohl der Umfang der Schäden aktuell als nicht standsicherheitsgefährdend einzustufen ist, ist der Befund alarmierend, da ein Prozess entdeckt wurde, bei dem statisch relevante Bewehrung geschädigt wird. Um diese Erkenntnisse zu vertiefen, wurde in einem weiteren Schritt in dem Schacht die Bewehrung großflächiger mit Hochdruckwasserstrahlen freigelegt. Es zeigte sich, dass Korrosionsschäden vorhanden sind, die eine Instandsetzung erfordern.

Weg A2b: Treppenanlagen

Eine bekannte Schwachstelle sind die Treppenanlagen, da Chloride über den Fußgängerverkehr eingetragen werden, insbesondere dann, wenn im Umfeld der Treppen zur Verkehrssicherheit verstärkt gestreut wird. Es wurden Bohrmehlproben in den Trockenlaufzonen der Treppenanlagen entnommen. Die Ergebnisse der Analysen zeigten zum Teil sehr erhöhte Chloridgehalte. Im Zuge der anstehenden Modernisierung des Sperrengeschosses werden diese Schäden behoben.

Weg A3: Oberflächenwasser über Schlitzwanddurchbrüche

Zur Schaffung der Wegverbindungen zwischen den zeitlich versetzt hergestellten Bahnhofsgebäuden und seitlicher Zugänge wurden die Schlitzwände durchbrochen. Die Übergänge zwischen den Bauwerken erweisen sich oft als Schwachstellen, da Fugenkonstruktionen nachträglich angeschlossen werden müssen, wodurch sie empfindlicher sind als originär hergestellte Fugenkonstruktionen. Gleichzeitig können zwischen verschiedenen Baukörpern größere Setzungsunterschiede auftreten. Die Folge sind Undichtigkeiten, durch die Oberflächenwasser eintritt, welches Chloride mit sich führt.

Weg A4: Wassereintrag durch Fahrzeuge

Im zweiten Untergeschoss befindet sich eine öffentliche Tiefgarage und im dritten Untergeschoss eine Anlieferungsfläche für die Werkstätten der SWM. Diese Flächen sind hervorgehobenen Flächen für Eintrag von Chlorid-Ionen in das Gebäude. Sie wurden intensiv beprobt und die Analysen wiesen oft hohe Werte aus. Die Parkdecks waren ohne Abdichtung ausgeführt. Auf der Rohdecke lag nur ein Estrich.

Der zweite Schritt war die Untersuchung der Fließwege im Gebäudeinneren. Nachdem Wasser in das Gebäude eingedrungen war, folgt es der Schwerkraft und verteilte sich weiter. Da hierbei Schäden an der Konstruktion entstehen konnten, war es notwendig die internen Fließwege zu untersuchen. Auch hierzu wurden zunächst mögliche Fließwege identifiziert und anschließend am Objekt verfolgt.

Weg I1: Übergang Deckenaufleger/Schlitzwand

Die Zwischendecken sind über Bewehrungsanschlüsse an die Decken angeschlossen. Die vertikalen Fugen sind infolge der äußeren horizontalen Einwirkungen aus Erd- und Wasserdruck durch Normalkräfte belastet, die günstig für das Schließen dieser Fugen wirken. Trotzdem können auch diese Arbeitsfugen lokal undicht sein. An der Einspannstelle öffnen sie sich an der obenliegenden Zugseite des Querschnitts, so dass Chloride angreifen können. Die Fugen liegen auf dem direkten Weg des Wassers von den oberen Eintrittsstellen in das untere Geschoss.

Weg I2: Entwässerungsrohre

Zu einem früheren Zeitpunkt wurde erkannt, dass Wasser an den Schlitzwänden herunterläuft. Um Wasseransammlungen in oberen Geschossen abzustellen, wurden entlang der Schlitzwände vertikale Entwässerungsrohre eingebaut, die auf den Sohlbalken im vierten Untergeschosses entwässern. An diesen Stellen fanden sich erhöhte Chloridkonzentrationen.

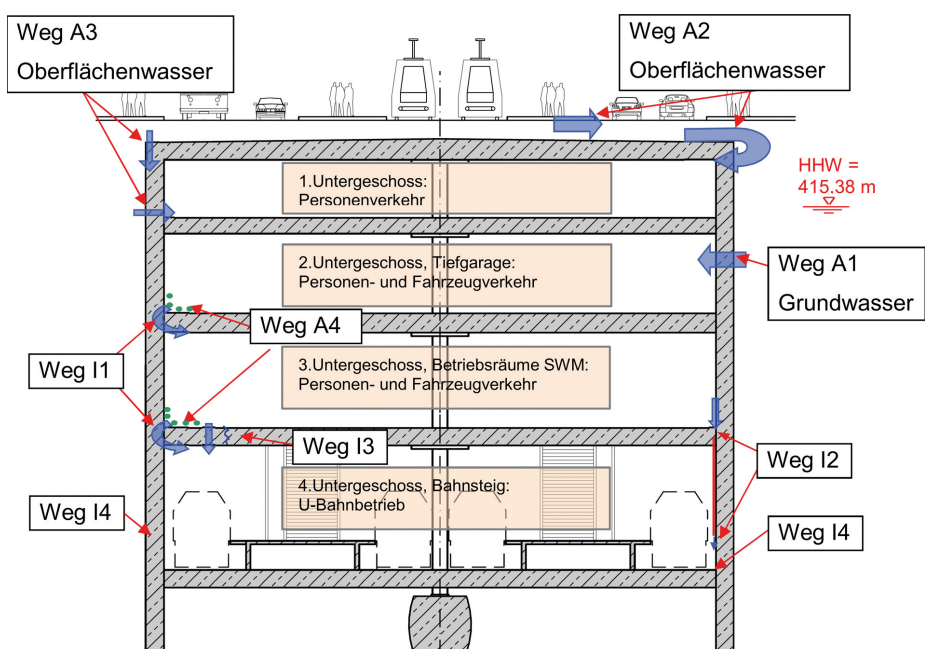


Bild 7. Querschnitt Bahnhof (Bahnhof HU) mit Darstellung der Fließwege des Wassers
Fig. 7. Cross section of HU underground station showing the flow paths of water

Vergleich der Temperaturen von September bis April

Gemittelt über den Zeitraum 1992/1993 bis 2008/2009

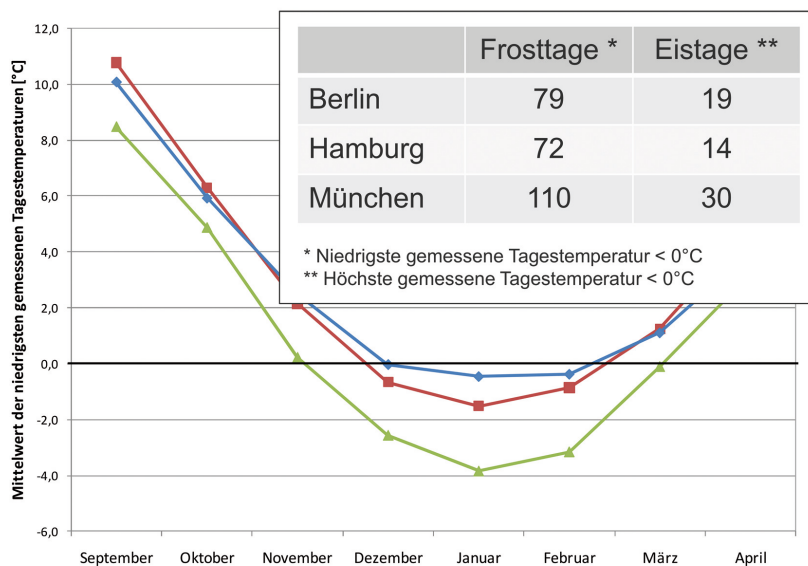


Bild 8. Auswertung der Mittelwerte der niedrigsten Tagestemperaturen [14]

Fig. 8. Reported average of the lowest day temperature [14]

Weg I3: Arbeitsfugen/Risse in Zwischendecken

Die Zwischendecken wurden in Blockabschnitten mit 16,50 m Länge hergestellt. Da in den Flächen keine diskreten Fugen geplant waren, haben sich parallel zur Spannrichtung Risse gebildet, durch die Wasser in die darunter liegenden, als Betriebsräume und Werkstätten genutzten Geschosse eingedrungen ist. Daraus folgend konnten auch hohe Chloridkonzentrationen an der Unterseite der Decken nachgewiesen werden. Eine abschließende Schadenskartierung im Bereich der Arbeitsfugen der aufgehenden Bauteile war wegen des Estrichs nicht möglich.

Weg 4: Schlitzwandfugen

Die Schlitzwandfugen wurden nachträglich auf der Innenseite mit einer Mörtelplombe verschlossen. Da diese Form der Abdichtung unzureichend ist, läuft das Wasser entlang der Schlitzwände herunter.

Mit den Untersuchungen am Bauwerk konnten verschiedene Wege aufgezeigt werden, über die Wasser in das Gebäude eindringt und sich verteilt. Mit dem Wasser gelangen Chloride in die Konstruktion und führen zu Schäden an der Bewehrung. Die Fließwege sind im Bild 7 zusammengefasst.

4 Schadensanalyse

Im Rahmen der intensiven Bauwerksuntersuchung wurden verschiedene Schäden identifiziert. Als der gravierendste muss die Korrosion der Bewehrung der Rahmenecke in der Höhe der Arbeitsfuge zwischen Schlitzwand und Deckel angesehen werden. Der Umfang der Schädigung ist zwar noch begrenzt, so dass akut die Standsicherheit nicht gefährdet ist. Aber aufgrund der Lage dieser Schadstellen ist die Zugänglichkeit für die Bauwerksprüfung stark eingeschränkt und nur möglich, wenn entsprechende bauliche Maßnahmen umgesetzt werden.

Als unmittelbare Ursache für die Schäden kann der Zutritt von chloridhaltigem Oberflächenwasser in die Arbeitsfuge angesehen

werden. In der nachfolgend durchgeführten Instandsetzung bestätigte es sich, dass der Bereich im größeren Umfang Schäden aufweist.

Im Oberflächenwasser sind Chloride infolge des Taumitteleinsatzes gelöst. Die Oberfläche des Bahnstreckendeckels ist bedingt durch die baulichen Einrichtungen, die Oberflächenbefestigung und die Trambahngleise nicht versiegelt. Wasser sickert ein und fließt über die Fläche zu den Rändern. Dort versickert das Oberflächenwasser in Richtung Grundwasser. Auf diesem Weg wird eine relativ große Fläche entwässert. Die Rahmenecke ist statisch hoch belastet, so dass die Arbeitsfuge zwischen Schlitzwand und Deckel, für die angenommen werden kann, dass die Zugfestigkeit geringer ist als im ungestörten Beton, sich öffnet.

Der Deckel des U-Bahnhofs hat eine Abdichtung, die jedoch abweichend

von zahlreichen technischen Regelungen nicht über die Arbeitsfuge geführt wurde.

Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton können erfolgreich ohne Abdichtungen ausgeführt werden. Für den Hoch- und Wirtschaftsbau gilt die DAfStb-Richtlinie (WU-Richtlinie) [8]. Der bedeutende Vorteil der WU-Konstruktionen ist, dass Stellen, durch die Wasser eindringt, von der Innenseite erkennbar sind und dass die Undichtigkeiten gezielt durch Rissinjektionen behoben werden können. Die Regelungen in der Richtlinie dienen ausschließlich der Wasserdichtigkeit. Weitere Schutzziele sind nicht definiert.

Im Straßentunnelbau werden vergleichbare Konstruktionen in der ZTV-ING als WUB-KO bezeichnet [9]. Für die offene Bauweise gilt diese Ausführung als Regelbauweise bei nicht drückendem Wasser. Ergänzend erhält der Deckel eine Kunststoffabdichtung auf Geotextil, die über die Arbeitsfuge gezogen wird.

Angesichts der Belastungen aus natürlichen und künstlichen Umwelteinflüssen, denen Ingenieurbauwerke ausgesetzt sind, haben Abdichtungssysteme jedoch auch die Funktion die Konstruktion zu schützen. Aufgrund einschlägiger Erfahrungen mit chloridinduzierten Schäden, sind im Brückenbau ausgereifte Abdichtungssysteme für die Fahrbahndecks entwickelt worden [9]. Für Parkhäuser gibt es vergleichbare Lösungen [10].

Über die Ausführung von Arbeitsfugen liegt ein umfangreicher Wissensstand vor, so dass diese so ausgeführt werden können, dass sie Eigenschaften wie monolithischer Beton haben [11]. In der Baupraxis sind jedoch oft Bedingungen vorhanden, die dazu führen, dass die Arbeitsfugen abweichende Eigenschaften haben. Es zeigt sich immer wieder bei

Tabelle 1. Auswertung des Tausalzeinsatzes in t/km [14]

Table 1. Record of the amount of used de-icing salt in t/km [14]

	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009
Hamburg *	8,96 t/km	11,70 t/km	3,04 t/km	2,02 t/km	4,46 t/km
München **	22,98 t/km	21,57 t/km	4,73 t/km	6,03 t/km	14,38 t/km

* Quelle: Stadtreinigung Hamburg ** Quelle: Statistisches Amt München

Bauwerksprüfungen oder in der Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen, dass gerade die Arbeitsfugen insbesondere zwischen horizontalen und vertikalen Flächen hervorgehobene Stellen sind, in denen chloridinduzierte Korrosion auftritt.

Bautechnische Lösungen mit innenliegenden Arbeitsfugenbänder oder -blechen sind nicht geeignet, das Schutzziel gegenüber chloridinduzierten Korrosion zu erreichen. Im DBV-Merkblatt Parkhäuser und Tiefgaragen sind Lösungen dargestellt, die diesen Punkt beachten [12,13].

Die Auswertung meteorologischer Messdaten zwischen 1992 und 2009 im **Bild 8** zeigt, dass München im Vergleich zu Berlin und Hamburg mehr Frosttage hat mit der Folge, dass häufiger gestreut wird. Demzufolge ist der Salzverbrauch der Landeshauptstadt München bezogen auf die Strecke im langjährigen Schnitt höher als in Hamburg; in manchen Winter mehr als das Dreifache (**Tabelle 1**) [14]. Hieraus ergeben sich folgerichtig regionale Unterschiede in Bezug auf mögliche Schäden an Gebäuden infolge Tausalz.

5 Weitere Veranlassung SWM

Dieser Schadensfall stellt leider keinen Einzelfall dar. Weitere Untersuchungen an U-Bahnbauwerken in München, die in vergleichbarer Bauweise erstellt worden sind, ergaben, dass auch hier erhebliche Korrosionsschäden an der Rahmeneckbewehrung, bei fehlender Abdichtung im Bereich des Wand-Decken-Anschlusses, vorhanden sind. Daher wurde die König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH, Dortmund am 11.02.2011 beauftragt, eine gutachterliche Stellungnahme zur Abdichtung der Decken der Münchner U-Bahn im Allgemeinen und der U-Bahnhöfe im Besonderen anzufertigen.

Die SWM München werden die betreffenden Bahnhöfe nun systematisch untersuchen. Aktuell wird eine Datenbank erstellt, die alle für die Problematik der Eckbewehrung relevanten Daten der Münchner U-Bahnbauwerke erfasst. Mit Hilfe der gesammelten Daten und einem Bewertungssystem wird daraus eine Entscheidungsmatrix entwickelt, nach der die Bauwerke für tiefergehende bauwerksdiagnostische Untersuchungen priorisiert werden können.

Die Datenbank umfasst u. a. folgende Punkte:

- Allgemeine Bauwerksdaten
(z. B. Bauwerksbuch, Jahr der Eröffnung)
- Bauweise (z. B. Schlitzwand-Deckelbauweise)
- Statisches System
(z. B. Rahmen=> Eckbewehrung vorhanden)
- [Ankündigungsverhalten
(Verformungsverhalten beim Schadensereignis)]
- Verkehrslage (erhöhter Tausalzeinsatz bei stark befahrenen Straßen, Vorabuntersuchungen bei Schnittstellen zur Trambahn)

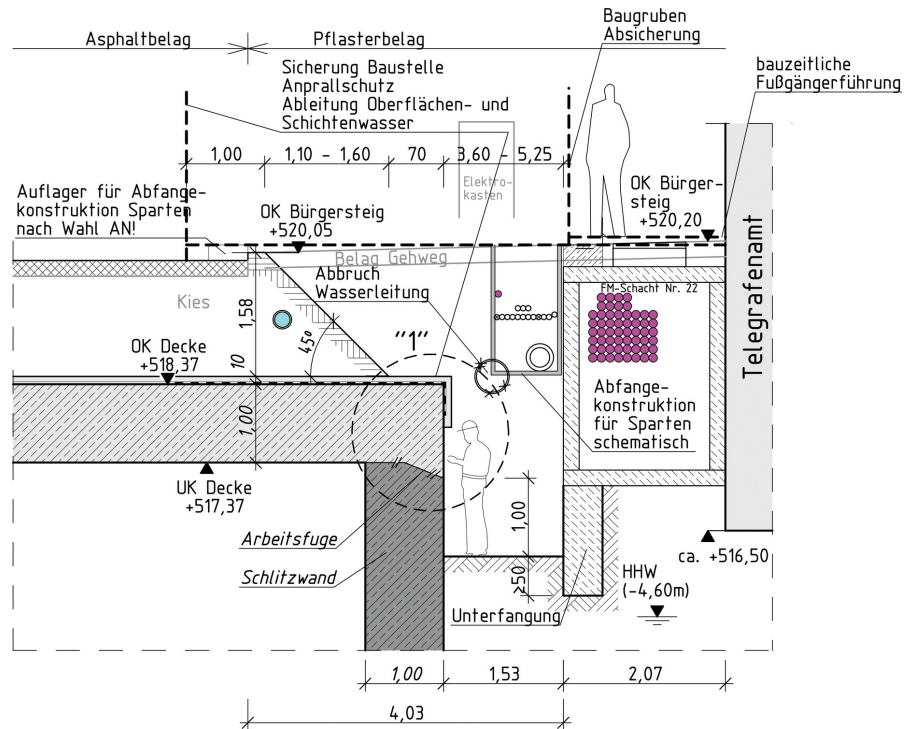


Bild 9. Arbeitsfläche für die Instandsetzung
Fig. 9. Work area for the repair interventions

- Abdichtungstechnik
(z. B. Fugenabdichtung oder umhüllende Abdichtung)
- Grundwasserstand

Die Datenbank wird mit dem Programmsystem Excel erstellt und bietet daher zur Auswertung die Möglichkeit nach verschiedenen Kriterien zu filtern

6 Instandsetzung U-Bahnhof Hauptbahnhof

Im Vorgriff auf die Umbaumaßnahmen zur Modernisierung des U-Bahnhofs wurden die notwendigen Instandsetzungen durchgeführt:

1. Abdichten der Fugen im Übergangsbereich U-Bahnhof Sperrengeschoss zum S-Bahnhof im Norden
2. Instandsetzung korrodierter Betonstahlbewehrung in den Ecken Schlitzwand – Deckel
3. Instandsetzung der Parkgarage inklusiv der Rampe
4. Instandsetzung der Treppenanlagen zur Oberfläche
5. Instandsetzung der Bewehrung der Decken im Sperrengeschoss

Die Instandsetzung der meisten Punkte erfolgte mit Standardmethoden, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Von Interesse ist die Instandsetzung der Bewehrung in der Ecke Schlitzwand – Deckel.

Die Instandsetzung der Rahmeneckbewehrung wird in mehreren Bauabschnitten durchgeführt, die sich im Gesamtplan der Modernisierung und Sanierung des U-Bahnhofs integrieren. Der Anfang wurde an der östlichen Seite gemacht. Für die Durchführung waren intensive Abstimmungen mit den Anrainern erforderlich, zumal die Baufläche durch die nahe Bebauung begrenzt war.

Anspruchsvoll war nicht nur die enge Durchsetzung des Arbeitsraums mit Sparten, sondern auch das Aufrechterhalten der Zugänge zu den Gebäuden, die auf Publikumsverkehr angewiesen sind. Hierzu wurden Kleinbrücken gebaut, an denen die Sparten aufgehängt wurden und die gleichzeitig

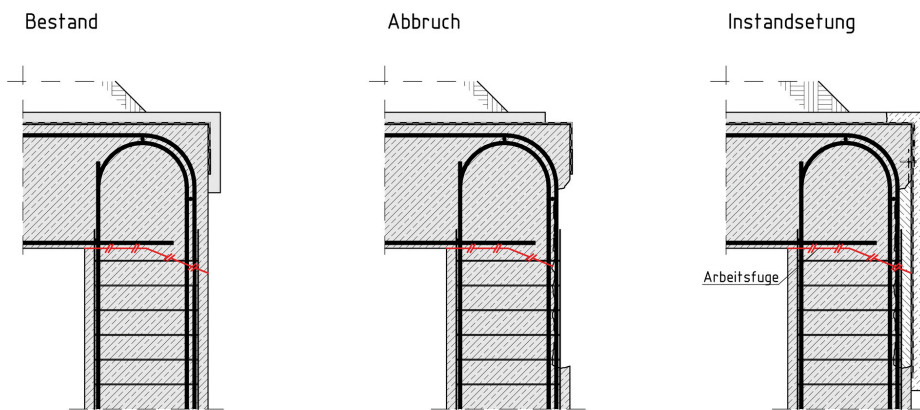


Bild 10. Instandsetzung der Rahmeneckebewehrung

Fig. 10. Stages for repair of the frame corner reinforcement



Bild 11. Instandsetzungsöffnungen Schlitzwand Ost

Fig. 11. Trench for the repair along the eastern diaphragm wall

als Zugang zu den Gebäuden dienten (Bild 9). Für den schonenden Aushub kamen Saugbagger zum Einsatz und die Verfüllung der Gruben nach Abschluss der Arbeiten erfolgte mit flüssigem Boden. Damit konnten mechanischen Arbeiten im Bereich der Sparten reduziert werden.

Der übliche Ansatz, korrodierte Bewehrung durch Freilegen einer angemessenen großen Fläche und Beilegen eines neuen Bewehrungsstabes mit entsprechender Übergreifungslänge, zu ersetzen, konnte in der Rahmenecke aufgrund der geometrischen Situation, der Standsicherheit und des Bewehrungsgehaltes nicht umgesetzt werden. Auch mechanische Verbindungen wie zum Beispiel Pressmuffen waren ausgeschlossen. Es verblieb der Ansatz, korrodierte Bewehrungsstäbe über einen Schweißverbindung zu heilen. Voraussetzung hierzu war eine schweißtechnische Unter-

suchung der Bewehrungsstäbe hinsichtlich der Schweißeignung.

Zur Instandsetzung wurde die Bewehrung in einem Streifen freigelegt. Die korrodierte Bewehrung dokumentiert und instandgesetzt, die Flächen verschlossen und eine Abdichtung mittels Klemmflansche über die Fläche gezogen (Bild 10 und 11). Diese umfangreiche Instandsetzung mit schwerwiegenden Eingriffen in die Belange Dritter wurde auf Grundlage der Funde in den Probeschachtungen geplant. Die Schäden, die an den Instandsetzungsflächen gefunden wurde, bestätigten die Notwendigkeit der Maßnahme. Bild 12 dokumentiert das Ausmaß der Schäden und die Instandsetzung.

7 Folgerungen

Die Korrosionsschäden an den Bewehrungsstäben in der Arbeitsfuge am U-Bahnhof Hauptbahnhof verdeutlichen, dass möglichen Korrosionsvorgängen an Bauteilen, die unterhalb der Oberfläche liegen, stärker in den Fokus rücken müssen. Betroffen sind insbesondere Bauwerke, die unterhalb von Verkehrsflächen liegen und auf denen im Winterdienst Tausalze eingesetzt werden. Eine vollständige Versiegelung der Flächen ist nicht vorhanden, so dass sich Wasser an den äußeren Gebäudeflächen sammelt und ins Grundwasser versickert.

Vor diesem Hintergrund sind Bauwerke mit wasserundurchlässigem Beton gesondert zu betrachten, da Arbeitsfugen und Risse, die sich im Selbstheilungsprozess schließen sollen, Chlorid-Ionen den Zutritt zur Bewehrung ermöglichen. Die Empfindlichkeit der Arbeitsfugen gegenüber Wassereintritt ist grundsätzlich bekannt. In heutigen Konstruktionen werden innenliegende Fugenbänder eingebaut, die baufertigungstechnisch Vorteile gegenüber außenliegenden Konstruktionen haben. Diese Konstruktionen gestatten jedoch, dass Wasser Zutritt zu den äußeren Bewehrungslagen hat. Es gibt Regelwerke, die darauf hinweisen, die Fugen von außen abzudichten. Auch wenn die Motivation für die Regelungen vorrangig darin liegt, ein wasserdichtes Bauwerk zu errichten, so ist diese Form der Konstruktion widerstandsfähiger gegenüber Chlorideintrag. Auch ein Nachweis der Wasserdichtigkeit über eine Mindesthöhe der Druckzone in einem Bemessungsquerschnitt lässt auf der gezogenen Seite des Querschnitts Risse zu, so dass Wasser an die Bewehrung



Bild 12. Dokumentation der Schäden an der Ostseite

Fig. 12. Map of the chloride-induced damages along the east side

gelangen kann. Allein in Bezug auf die Wasserdichtigkeit haben WU-Konstruktionen ohne Zweifel große Vorteile, da mögliche undichte Stellen erkannt und geheilt werden können.

In der ZTV-ING wird als Merkmal für die Anforderungen an die Ausbildung der Abdichtung die Überschüttungshöhe angesetzt. Unter einer Überschüttungshöhe von einem 1,0 m wird eine Abdichtung gemäß TZV-ING eingebaut entsprechend dem Brückenbau. Hinter dieser Regelung kann die Vorstellung vermutet werden, dass Chloride, im Boden weniger gefährlich sind. Dem gegenüber stehen Ergebnisse weltweiter Grundwasseranalysen, die erhöhte Chloridkonzentrationen ausweisen. Bevor die Chloride ins Grundwasser gelangen, sickert das Wasser entlang des Bauwerks.

Die Zuordnung zu den Expositionsklassen erfolgt heute unter dem Gesichtspunkt des Sprühnebel- oder Spritzwasserbereichs. In der ZTV-ING werden auch Gründungsbauteile der Expositionsklasse XD2 zugeordnet. Hier kommt die Erkenntnis möglicher Chloridbelastung im Boden zum Ausdruck.

Die Untersuchungen am U-Bahnhof Hauptbahnhof als auch an anderen U-Bahnhöfen der SWM zeigen, dass auch signifikante Expositionen gegenüber Chloriden im Innenbereich der Bahnhöfe auftreten können, die in der Regel nicht einer schädigenden Expositionsklasse zugeordnet würden. Es zeigt sich, dass durch Fußgängerverkehr große Mengen Chloride und Wasser in die Flächen transportiert werden. Als Konsequenz werden auch diese Flächen im Rahmen von Instandsetzungen mit einer Abdichtung versehen.

8 Fazit

Die öffentliche Wahrnehmung des Bauens ist sehr abhängig vom Ort der Tätigkeit. Diese offensichtliche Feststellung sollte Einfluss nehmen auf die Art und Weise der Konstruktion. Insbesondere bei Bauwerken, die mit ihrer Inbetriebnahme eine hohe gesellschaftliche Relevanz erfahren oder deren ordnungsgemäße und sichere Verfügbarkeit eine notwendige Voraussetzung für das Funktionieren weitere Systeme ist, sollten mit einem hohen Anspruch an die Dauerhaftigkeit konstruiert und gebaut werden. Ein typisches Beispiel sind unterirdische Bahnhöfe.

Im Rahmen einer umfangreichen Bauwerksprüfung, in der mit Probeschachtungen die Zugänglichkeit an unterirdischen Flächen geschaffen wurde, mussten von den SWM Korrosionsschäden an statisch relevanten Bewehrungseisen festgestellt werden. Ursache waren Chlorid-Ionen, die über Arbeitsfugen an die Bewehrungseisen gelangten. Die Arbeitsfugen waren von außen unzureichend abgedichtet. Die bautechnische Lösung konnte mit Standardlösungen erfolgen. Die Besonderheit in dieser Maßnahme war zum einen die organisatorische Umsetzung an dem hochfrequentierten Platz und die bis zum Öffnen der Flächen bestehende Unsicherheit, ob der singulär an Probeöffnung festgestellt Schaden so systematisch ist, dass der bauliche Eingriff gerechtfertigt ist. Dem Bauingenieur wächst in diesem Aufgabenfeld eine spezielle Verantwortung zu. Seine Verant-

wortung begrenzt sich nicht auf die korrekte und sichere Umsetzung einer technischen Aufgabe, sondern er wird verantwortlich dafür, zu entscheiden, ob die Maßnahmen mit allen Konsequenzen für Dritte notwendig und gerechtfertigt sind.

Die SWM haben im Nachgang zu den Feststellungen am Hauptbahnhof weitere Bahnhöfe untersucht und mussten ähnliche Schäden an weiteren Objekten beobachten. Gefährdet sich Schlitzwand-Deckelkonstruktionen unter Flächen, die mit Taumittel beaufschlagt werden.

Es besteht Bedarf, die Korrosionsvorgänge im Boden wissenschaftlich zu untersuchen. Von Interesse sind die Bedingungen, unter denen Korrosion im Boden abläuft.

Literatur

- [1] Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 8. November 2007 (BGBl. I S. 2569) geändert ist.
- [2] DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag. Berlin. November 1999
- [3] Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 (RI-EBW-Prüf). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 11/2007
- [4] Kriskke, A. und Weber, J.: Konstruieren und Bauen. In: Max Aicher GmbH & Co. et al. (Hrsg.). 25 Jahre U-Bahn-Bau in München. 1990
- [5] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Merkblatt Nr.3.2/1. Salzstreuen – Auswirkungen auf Gewässer. 09.09.1999
- [6] Mullaney, J.R., Lorenz, D.L. und Artson, A.D.: Chloride in Groundwater and Surface Water in Areas Underlain by the Glacial Aquifer System, Northern United States. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009–5086. 2009
- [7] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV 2011). November 2011
- [8] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU- Richtlinie). Beuth Verlag. Berlin. November 2003 + Berichtigung März 2006
- [9] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Bundesministerium für Straßenwesen. 03/2012
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Schutz und Instandsetzung von betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie). Teil 2: Bauprodukte und Anwendung. Oktober 2001
- [11] Lenz, P.: Beton-Beton-Verbund, Potenziale für Schubfugen. Dissertation Technische Universität München. 2012
- [12] Deutsche Beton- und Bautechnik-Verein E.V.: DBV-Merkblatt: Parkhäuser und Tiefgaragen, 2. Überarbeitete Ausgabe September 2010. Eigenverlag. Berlin. 2010
- [13] Krams, J.: Wartung und Instandsetzung von Parkbauten. In: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (Hrsg.): Parkhäuser und Tiefgaragen – Das neue DBV – Merkblatt. Eigenverlag. Berlin 2010.
- [14] Zilch, K; Dunkelberg, D.: Vorbereitete Diskussion zum DAfStb Workshop Parkdecks. Berlin 2009