



# Einfluss der Firstspaltverpressung auf zerstörungsfreie Schalendickenmessungen an Tunnelinnenschalen im Bereich von Bundesfernstraßen

Christian RODER, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach  
Dietmar MÄHNER, Fachhochschule Münster, Münster  
Michael WILLMES, Bilfinger Berger, Mannheim

**Kurzfassung.** Der Beitrag beschäftigt sich mit der Erfassung und dem Umgang von Fehlstellen im Firstbereich von Tunnelinnenschalen. Bei Auswertungen der zerstörungsfreien Schalendickenmessungen auf diversen Tunnelbaustellen stellte sich heraus, dass die Firstspaltverpressung messtechnisch nicht immer zweifelsfrei nachzuweisen ist. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wird zur Zeit dieser Fragestellung nachgegangen.

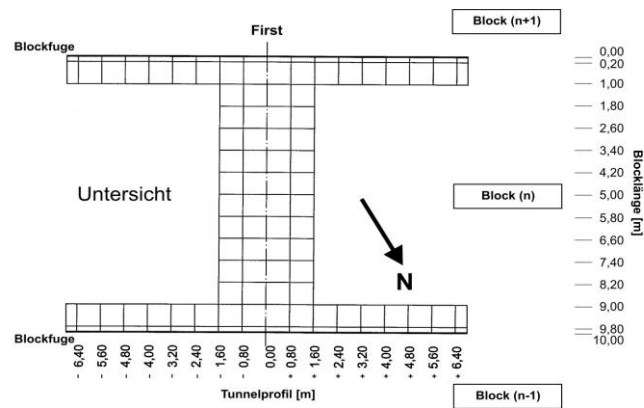
## 1. Allgemeines

Die Ausführungsqualität einer Tunnelinnenschale stellt bei Straßentunneln in geschlossener Bauweise eine wesentliche Grundlage für die Dauerhaftigkeit von Tunnelbauwerken dar. Straßentunnel in geschlossener Bauweise werden in der Regel als zweischalige Konstruktion mit einer Außenschale aus Spritzbeton sowie einer Innenschale aus Stahlbeton ausgeführt. Zwischen der Außenschale und der Innenschale wird häufig noch eine Kunststoffdichtungsbahn zur Abdichtung gegenüber anfallendem Bergwasser eingebaut.

Zur Sicherstellung der Ausführungsqualität der Tunnelinnenschale sowie zur Vermeidung umfangreicher Instandsetzungsarbeiten aufgrund von Undichtheiten im Abdichtungssystem ist, gemäß der Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung (RI-ZFP-TU) [2], der Nachweis einer ausreichenden Schalendicke für Tunnelinnenschalen zu erbringen. Die RI-ZFP-TU wurde erstmals in 2001 [1] eingeführt und in 2007 [2] aktualisiert.

Für die zerstörungsfreie Dickenbestimmung von Tunnelinnenschalen eignen sich aufgrund der einseitigen Zugänglichkeit nur Echo-Verfahren. Grundsätzlich können hier das Ultraschall-Echo-Verfahren und das Impakt-Echo-Verfahren eingesetzt werden [3, 4].

Zur flächenhaften Untersuchung von Tunnelinnenschalen wird ein Messraster von 80 cm x 80 cm angelegt. Das Messraster ist begrenzt auf den Bereich der Firste und entlang der Blockfugen („H-Profil“) Als zweckmäßig hat sich hierbei die blockweise Stationierung in Tunnellängsrichtung sowie eine Einteilung in Messlinien erwiesen. Bild 1 zeigt beispielhaft die Darstellung eines Messrasters.



**Bild 1** Beispiel für ein Messraster nach RI-ZFP-TU [2]

Die Messungen sollen nach der RI-ZFP-TU [2] grundsätzlich vor der Firstspaltverfüllung erfolgen, um ggf. zusätzliche Instandsetzungsmaßnahmen ergreifen zu können. In der RI-ZFP-TU von 2001 [1] hatte es keine Festlegung gegeben, ob vor oder nach der Firstspaltverfüllung zu messen ist. Eine Firstspaltverfüllung wird durchgeführt, weil sich durch Nachverdichten oder Wasserabsondern des Betons während der Betonage im oberen Bereich der Tunnelfirste ein Spalt bilden kann. Zu hohe Betonierdrücke durch die Betonpumpe beim Betonieren des Firstbereiches könnten andererseits die Stabilität des Schalwagens überschreiten und zum Versagen des Schalwagens führen.

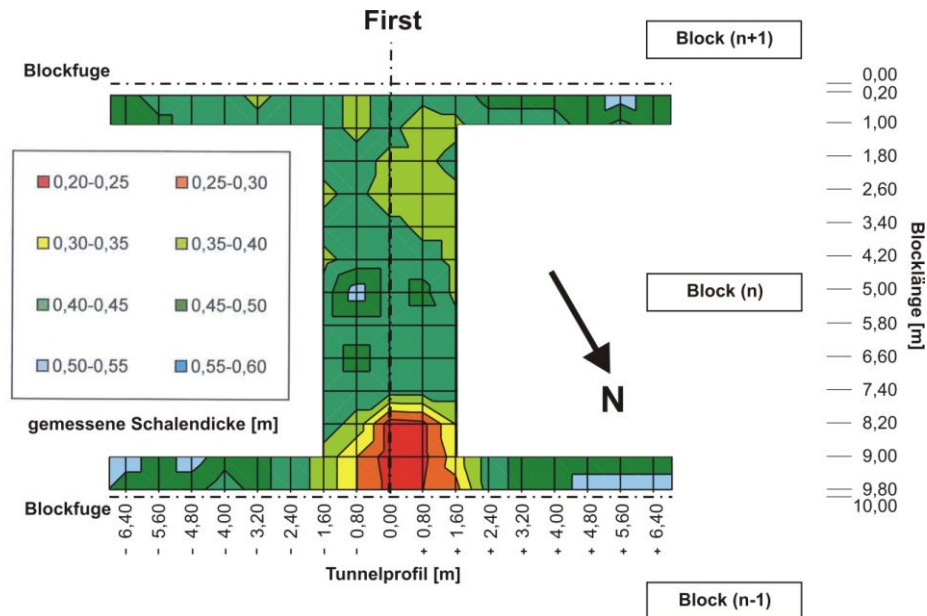
Es hat sich gezeigt, dass durch Probleme bzw. Schwierigkeiten bei der Betonage teilweise Hohlstellen vorliegen, bei denen die bergseitige Bewehrung frei liegt. In solchen Fällen sind erhöhte Anforderungen an die Güte des Verpressmörtels zu stellen (Dauerhaftigkeit, Druckfestigkeit, Passivierung der Bewehrung etc.).

Bild 2 stellt einige Fehlstellen im Firstbereich von Tunnelinnenschalen dar. Hierbei ist stellenweise die bergseitige Bewehrungslage nicht in den Konstruktionsbeton eingebettet. Neben der freiliegenden Bewehrung sind stellenweise auch Rauigkeiten und Absätze an der Betonoberfläche erkennbar. Bei den derzeitigen Arbeitsmethoden besteht während des Betoniervorgangs keine Möglichkeit, die Betonausbreitung und Verfüllung im Firstbereich gezielt zu kontrollieren. Die einzige Möglichkeit der visuellen Kontrolle ist ein Spionfenster in der Stirnschalung. Da dies jedoch kurz vor Betonierende geschlossen wird, gibt es keine ausreichende Möglichkeit den vollständigen Scheitelschluss zu kontrollieren. Entlang der Schalwagenfirste stehen zwar grundsätzlich 4-5 Spionrohre für die später durchzuführende Firstspaltverpressung zur Verfügung. Im Regelfall ergibt aber das bloße Herauslaufen von Zementschlempe oder einer homogenen Ausgangsmischung aus diesen Rohren keine Garantie, dass der unmittelbare Firstbereich entlang dieser Rohre vollständig ausbetoniert wurde. Hier hängt vieles vom Erfahrungsschatz und der Sorgfalt der Betoniermannschaft bzw. des Poliers ab. Weiterhin kann auch für Zwischenbereiche nicht ausreichend sichergestellt werden, dass die beabsichtigte Schalendicke eingehalten wird [5]. Weitere Einflussfaktoren im Hinblick auf die vollständige Scheitelfüllung der Firste sind u.a. das Längsgefälle des Tunnels, eine aufsteigende oder absteigende Betonierrichtung, die Betonkonsistenz sowie das Betonierkonzept.



**Bild 2** Fehlstellen mit freiliegender Bewehrung im Firstbereich von Tunnelinnenschalen

Nach erfolgter Schalendickenmessung sind gemäß der RI-ZFP-TU in einem Messbericht die innerhalb des Messrasters ermittelten Dicken grafisch darzustellen. Weiterhin sind die gemessenen Dicken der Tunnelinnenschalen für jeden Block in tabellarischer Form darzustellen. Bild 3 zeigt die Auswertung an einem Tunnelblock mit einer Sollschalendicke von 35 cm. Im Firstbereich zur Blockfuge ist ein flächenhafter Bereich mit einer Minderdicke von bis zu 22,3 cm ermittelt worden. In diesem Bereich ist die bergseitige Bewehrung der Innenschale nicht in den Beton eingebettet.



**Bild 3** Dickenbestimmung einer Tunnelinnenschale mit Impakt-Echo-Verfahren, Minderdicken im Firstbereich [6, 7]

Bei Vorliegen derartiger Fehlstellen muss eine der Firstspaltverpressung vorausgehende Instandsetzung bzw. Verfüllung des Hohlraumes und eine vollständige Einbettung der Bewehrung mit einem qualitativ hochwertigen Verpressgut erfolgen, um die Dauerhaftigkeit und Standsicherheit des Tunnels sicher zu stellen. Zur Firstspaltverpressung werden häufig Zementleime, Zementsuspensionen oder Verpressmörtel verwendet.

In Verbindung mit einer nicht ausreichenden oder unvollständigen Firstspaltverpressung, die zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt wird, besteht bei Tunneln mit Kunststoffdichtungsbahnen die Möglichkeit, dass aufgrund einer Wasserdruckbelastung die Kunststoffdichtungsbahn an der Bewehrung perforiert und somit die angestrebte Dichtfunktion außer Kraft gesetzt wird (Bild 4).



**Bild 4** Wassereintritte in einem Tunnel

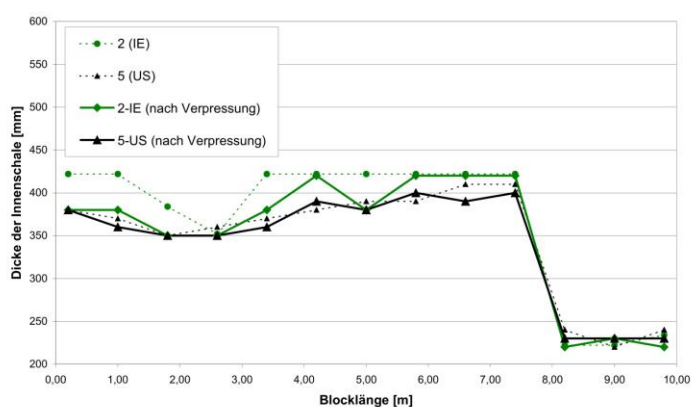
## 2. Bisherige Erkenntnisse zum Nachweis der Firstspaltverpressung

Beim Tunnel Burgholz in Wuppertal wurden an drei Tunnelblöcken umfangreiche Versuche und Messungen über den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethoden an Tunnelinnenschalen zur Bestimmung der Schalendicke durchgeführt [6, 7].

Die Messungen an der Tunnelinnenschale wurden dabei jeweils vor und nach der Firstspaltverpressung durchgeführt.

Bei diesen Bestimmungen der Schalendicken zeigte sich, dass der Erfolg der durchgeführten Firstspaltverpressung durch zerstörungsfreie Prüfmethoden nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte, obwohl an einzelnen Stellen durch Kernbohrungen ein Verpresserfolg und somit eine ausreichende Schalendicke belegt wurden. Bild 5 stellt die gemessene Schalendicke vor und nach der Firstspaltverpressung dar. Die Messungen wurden mit Ultraschall-Echo-Verfahren (US) und dem Impakt-Echo-Verfahren (IE) durchgeführt. Im Bereich einer Fehlstelle im Blockbereich von 8 bis 10 m konnte das Verpressgut messtechnisch nicht nachgewiesen werden. Der in diesem Bereich gezogene Bohrkern zeigt jedoch zweifelsfrei das Vorhandensein der Firstspaltverpressung. Im Übergang vom Beton der Innenschale zum Verpressgut ist jedoch eine bis zwei Millimeter tiefe pulvrige Schicht feststellbar, die wahrscheinlich durch den Entzug des Anmachwassers entstanden ist und messtechnisch wie eine Totalreflexion wirkt.

Es liegen jedoch auch Erkenntnisse anderer Baustellen vor, bei denen die Firstspaltverpressung messtechnisch nachgewiesen wurde.



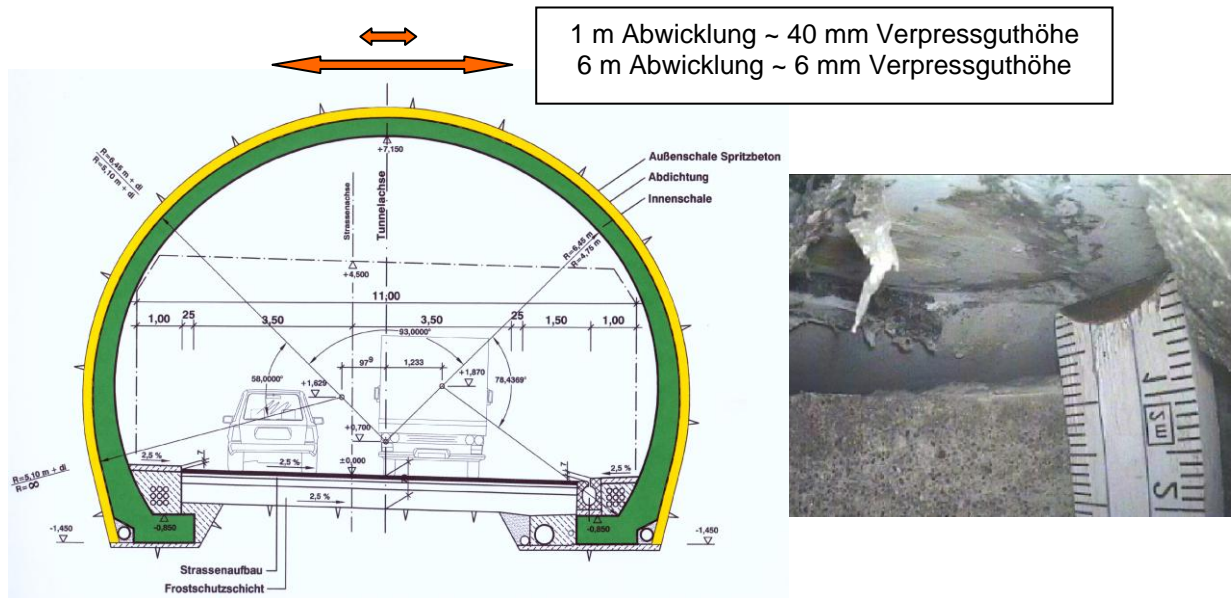
**Bild 5** links: Vergleich der Messungen im Firstbereich vor und nach der Firstspaltverpressung [7]  
rechts: Bohrkern mit Injektionsgut der Firstspaltverpressung

Zur Abklärung dieses Sachverhaltes an der Übergangsstelle zwischen Tunnelschale und Firstspaltverpressung sind somit weiterführende Untersuchungen und Analysen notwendig. Diese Problematik wird in einem Forschungsvorhaben der BAST - im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -, das zurzeit an der Fachhochschule Münster durchgeführt wird, näher untersucht.

Neben labortechnischen Versuchen an Probekörpern, über die in Kapitel 3 berichtet wird, wurden auch Erkenntnisse bisheriger Tunnelprojekte ausgewertet. Dafür wurden an einem Straßentunnel bei ca. 330 Blöcke die gesamten Verpressmengen für die Firstspaltverpressung ausgewertet. Pro Block ergab sich eine durchschnittliche Menge für die Firstspaltverpressung von ca. 340 Liter/Block. Die minimalen Verpressmengen für

einige Blöcke lagen bei ca. 100 Liter/Block, als Maximalwerte konnten bis zu ca. 1600 Liter/Block ermittelt werden.

In Abhängigkeit der möglichen Breitenausdehnung des Verpressgutes im Firstbereich kann bei einer angenommenen Verteilung des Verpressgutes im Firstbereich von 6 m Abwicklung eine durchschnittliche Höhe des Verpressgutes von ca. 6 mm ermittelt werden. Bei einer Breite von 1 m ergibt sich für das Verpressgut eine Höhe von ca. 4 cm. Bild 6 zeigt neben dieser Auswertung den vor Ort an einer Tunnelschale im Firstbereich ermittelten Hohlraum vor Ausbringung der Firstspaltverpressung. Hierbei wurde ein Firstspalt von ca. 8 mm gemessen.



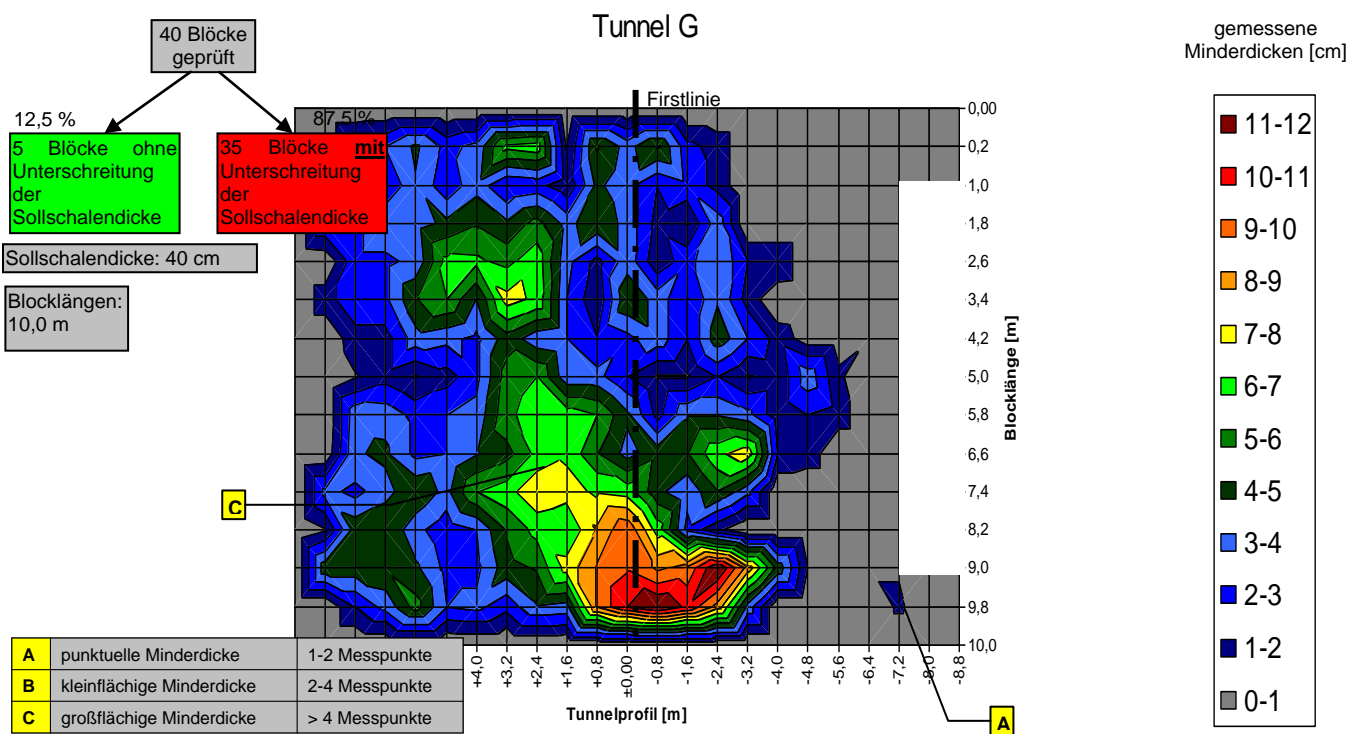
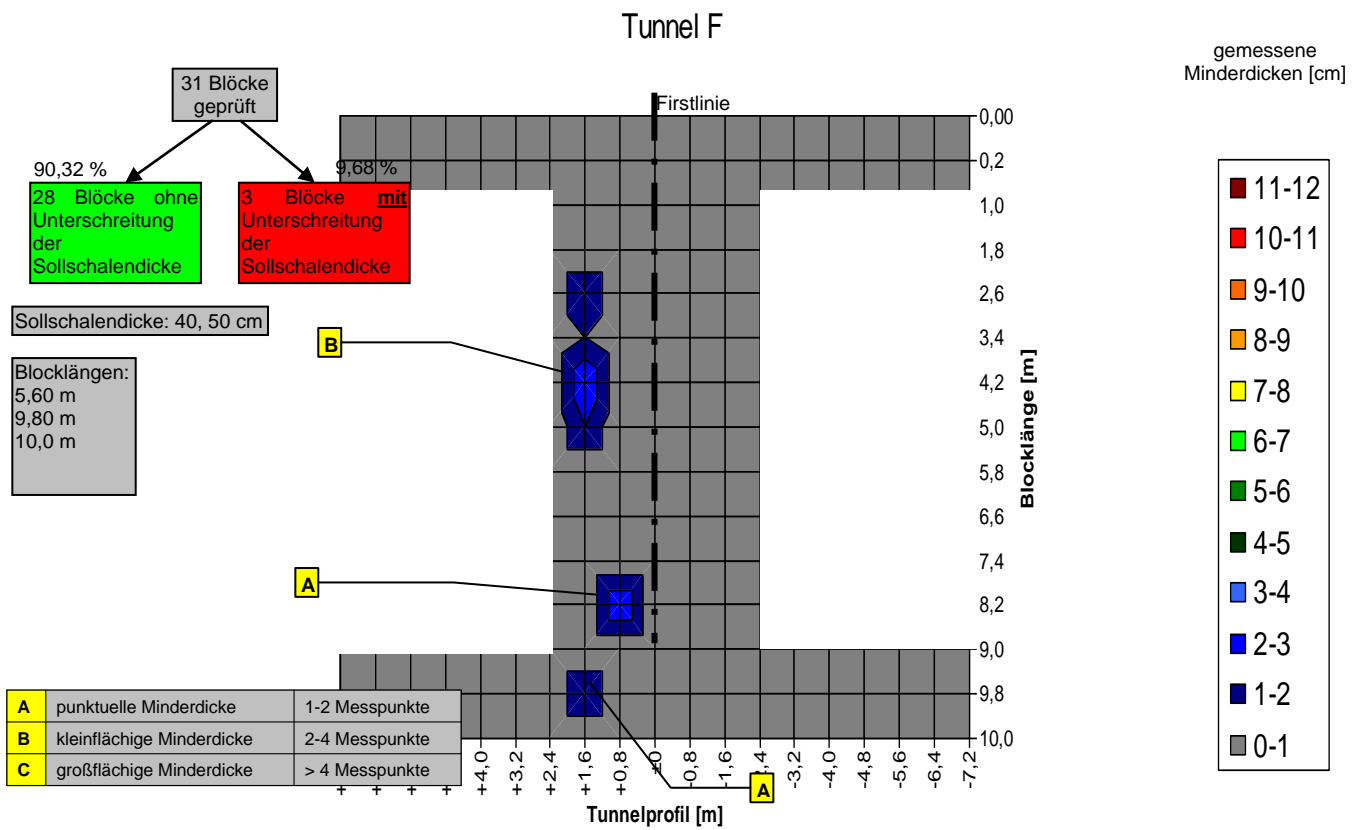
**Bild 6** links: Verteilung und Höhe des Verpressgutes, rechts: gemessener Firstspalt auf der Baustelle

In Bild 7 sind die Auswertungen von durchgeführten Schalendickenmessungen vor der Firstspaltverpressung an zwei unterschiedlichen Tunneln dargestellt. In der Darstellung sind sämtliche bei den Messungen an allen Blöcken festgestellten Minderdicken angegeben. Hierbei wurden jeweils die extremalen Unterschreitungen der Solldicke flächenhaft aufgetragen.

Gemäß der oberen Bilddarstellung wurden von den 31 überprüften Blöcken eines Tunnels nur 3 Blöcke mit einer Unterschreitung der Solldicke der Schale ermittelt. Hierbei handelt es sich auch nur um punktuelle Minderdicken mit einer Unterschreitung der Solldicke von maximal bis zu 3 cm.

Die Darstellung im unteren Bild zeigt, dass von den 40 überprüften Blöcken eines Tunnels 35 Blöcke mit einer Unterschreitung der Solldicke der Schale ermittelt wurden. Hierbei handelt es sich stellenweise auch um großflächige Minderdicken. Im Firstbereich konnte dabei eine Unterschreitung der Solldicke von maximal bis zu 12 cm ermittelt werden. Bei Vorliegen derartiger Randbedingungen ist davon auszugehen, dass die bergseitige Bewehrung nicht in den Beton der Innenschale eingebettet ist und freiliegt. Somit besteht bei derartigen Verhältnissen die Möglichkeit einer Perforation der Kunststoffdichtungsbahn.

Diese Darstellungen verdeutlichen, wie wichtig gerade im Bereich von Fehlstellen mit freiliegender Bewehrung eine Überprüfung der durchgeführten Firstspaltverpressung ist. Gleichermäßen bedeutsam ist das Erbringen eines messtechnischen Nachweises des Verpressgutes.



**Bild 7** Verteilung der Bereich mit ermittelten Minderdicken bei Tunnelinnenschalen an unterschiedlichen Baustellen

### **3. Konzeption labortechnischer Untersuchungen**

Zum Nachweis der Firstspaltverpressung mittels zerstörungsfreier Prüfmethode wird für weiterführende labortechnische Untersuchungen folgende Vorgehensweise gewählt:

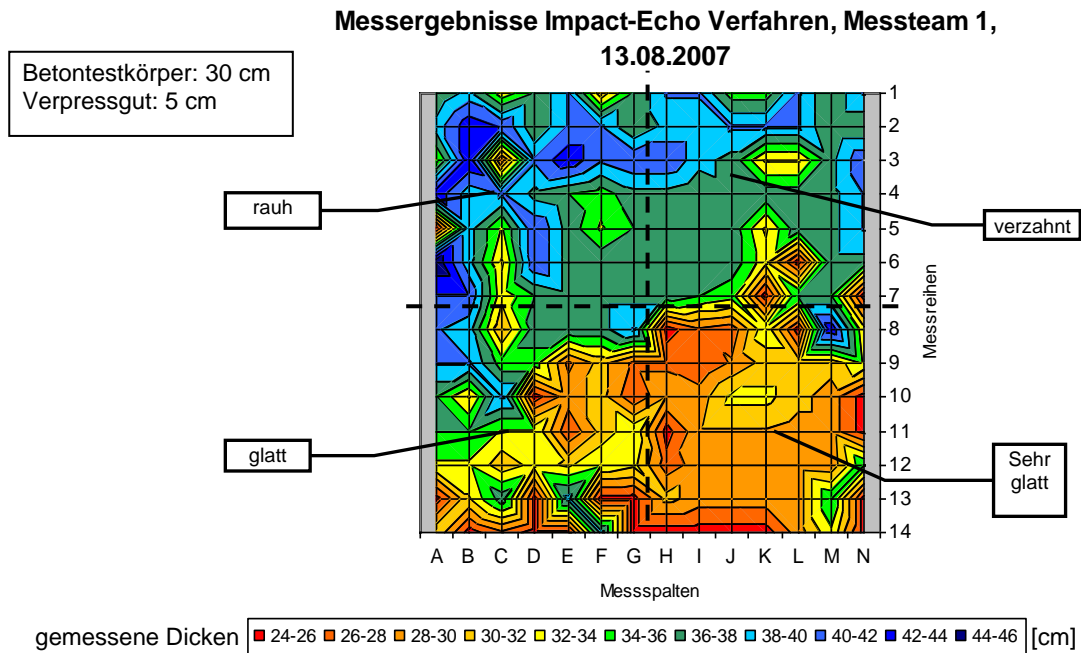
1. Herstellung von mehreren Betonprobekörpern mit einer tunneltypischen Betonmischung sowie unter tunnelbautypischen Randbedingungen. Die quadratischen Probekörper haben die Außenabmessung von 1,50 m und eine Dicke von 30 cm
2. Kalibrierung der Probekörper mittels zerstörungsfreier Prüfmethode (Impakt-Echo und Ultraschall-Echo-Verfahren)
3. Aufbringen einer Firstspaltverpressung auf die Probekörper. Hierbei werden unterschiedliche Parameter untersucht werden:
  - a. Aufbringen des Verpressgutes frisch in frisch
  - b. Aufbringen des Verpressgutes zu späteren Zeitpunkten (z.B. nach 28 Tagen)
  - c. Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Oberflächenrauigkeiten der Probekörper
  - d. Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Verpressgutmaterialien
  - e. Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Wasser-Feststoffwerte bzw. Wasser-Zement-Werte des Verpressgutes
  - f. Ermittlung des Einflusses von Vorbehandlungen (Vornässen)
4. Erneute zerstörungsfreie Bestimmung der Bauteildicke inklusive dem aufgetragten Verpressgut.
5. Die messtechnische Überprüfung im Vorher-Nacher-Vergleich wird durch mehrere Messteams durchgeführt. Hierbei kommen Impakt-Echo und Ultraschall-Echo-Verfahren zum Einsatz.

### **4. Zwischenergebnisse**

Bild 8 zeigt für den ersten Probekörper die Dickenbestimmung mittels Impakt-Echo-Verfahren. Unmittelbar nach dem Betonieren des Probekörpers aus Stahlbeton wurde ein Verpressgut (Zementleim, W/Z-Wert = 0,40) mit einer Dicke von 5 cm aufgebracht. Die Oberfläche des Probekörpers wurde zuvor in vier Feldern mechanisch bearbeitet. In einem Feld wurde das Korngerüst des Betons freigelegt, so dass nahezu eine Waschbetonoberfläche vorliegt. Ein weiteres Feld wurde mit einer Harke aufgeraut. Ein Feld blieb nach dem Verdichten unbehandelt. Das vierte Feld wurde mit einer Kelle zusätzlich geglättet.

Es ist eine Abhängigkeit der Messergebnisse von der Oberflächenausbildung des Probekörpers feststellbar. Der Zeitraum für die Messungen lag bei einem Monat nach der Betonage. In den Feldern mit freiliegendem Korngerüst oder der Aufrauung konnte das Verpressgut messtechnisch nachgewiesen werden. Im Bereich der glatten Oberfläche des Probekörpers bildete sich zum Verpressgut ein Spalt bzw. eine Ablösung. Messtechnisch konnte in diesem Bereich kein Verpressgut nachgewiesen werden.

Durch die unterschiedlichen Laufzeiten vom Beton des Probekörpers und dem Verpressgut konnte mittels der eingesetzten Messgeräte nicht die exakte Gesamtdicke des Prüfkörpers bestimmt werden.



**Bild 8** Versuchsergebnisse nach Aufbringen Verpressgut

### 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluss der Firstspaltverpressung auf die zerstörungsfreie Schalendickenmessung an Tunnelinnenschalen. Nach einer Vorstellung der bisherigen Erfahrungen im Umgang mit den zerstörungsfreien Prüfungen an Tunneln erfolgt eine Darstellung bisher durchgeführter Auswertungen im Firstbereich.

An einigen Tunneln konnten stellenweise Fehlstellen bzw. Minderdicken im Firstbereich ermittelt werden. In Messungen vor und nach der Firstspaltverpressung konnte das Verpressgut messtechnisch nicht immer zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Zur Abklärung dieser Problematik wird in einem derzeit laufenden Forschungsvorhaben dieser Fragestellung nachgegangen, erste Zwischenergebnisse werden hier vorgestellt.

Nach Auswertung der Laborergebnisse ist angedacht, die Erkenntnisse an mehreren Blöcken eines Tunnelbauwerkes praxisnah zu untersuchen.

### 6. Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen: Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU), Ausgabe 2001.
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Bundesanstalt für Straßenwesen, Sammlung Brücken- und Ingenieurbau, ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1, Anhang A, Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU), Ausgabe 2007.
- [3] Friebel, W.-D., Krieger, J.: Qualitätssicherung der Tunnelinnenschale und der Tunneldrainage, Taschenbuch für den Tunnelbau 2003, S. 353-382, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik.



- [4] Brameshuber, W.: Qualitätskontrolle von Tunnelinnenschalen mit zerstörungsfreien Prüfmethode, Forschung und Praxis, S. 126-129, 1998.
- [5] Mähner, D.: Fehlermöglichkeiten beim Herstellungsprozess von Tunnelinnenschalen, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 1, S. 33-43.
- [6] Rath, E., Berthold, G., Lähler, H.: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen mit Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZFP) gemäß der Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU), Mai 2005, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 54, Unterreihe-B (Brücken- und Ingenieurbau).
- [7] Mähner, D., Rath, E., Lange, D.: Bestimmung der Tunnelinnenschalendicke mit zerstörungsfreien Prüfmethode, Beton-und Stahlbetonbau (101) 2006, Heft 8, Seite 606 – 613.