
SPRITZBETONFESTIGKEITSMESSUNG MIT THERMOGRAFIE AM BEISPIEL DES TUNNELS OBERAU (B2)

STRENGTH MEASUREMENT USING THERMAL IMAGING (SMUTI) AT OBERAU TUNNEL (B2)

Hermann **Weiber**, matrices engineering GmbH, München, Deutschland
Katrin **Runtemund**, matrices engineering GmbH, München, Deutschland
Karsten **Läufer**, Marti GmbH Deutschland, Stuttgart, Deutschland
Robert **Heintz**, Marti GmbH Deutschland, Stuttgart, Deutschland

Strength Monitoring Using Thermal Imaging (abgekürzt SMUTI) ist ein neues Verfahren zur Überwachung der Frühfestigkeitsentwicklung von Spritzbeton. Durch Temperaturmessungen mit einer Wärmebildkamera kann die Festigkeit in Echtzeit berechnet und überwacht werden. Dies kann von einer sicheren Position aus erfolgen und ist so einfach wie die Aufnahme eines Fotos. Das Verfahren kann auch in Ergänzung zu den klassischen Prüfverfahren (z.B. Penetrationsnadelverfahren, Setzbolzenverfahren) verwendet werden, um die Aussagekraft dieser Prüfmethode sowie die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf die Spritzbetonschale zu bewerten und um ein besseres Verständnis für die Festigkeitsentwicklung zu erlangen.

Im Rahmen dieses Beitrages wird das Verfahren am Beispiel des Projektes Tunnel Oberau (B2, bei Garmisch-Partenkirchen) erläutert und diskutiert.

Strength Monitoring Using Thermal Imaging (SMUTI) is a new method which allows monitoring of the early strength of the shotcrete lining. A thermal imaging camera is used to measure the temperature distribution from which compressive strength may be calculated. This can be done from a safe position and is as simple as taking a picture. SMUTI can be used in parallel with existing methods (e.g. penetration needle method, stud driving method) in order to evaluate the local test results, to extrapolate the panel strengths to the lining and to get a better understanding of the strength development.

In this paper the method is explained, along with a case study calculation using real field data obtained at the Oberau Tunnel near Garmisch-Partenkirchen (Germany).

1. Einleitung

1.1 Zielsetzung

Eine ausreichende Frühfestigkeit des Spritzbetons ist für die Sicherung des Tunnelhohlraums maßgebend. Die Gefahr des Herunterfallens des jungen Spritzbetons ist hierbei zu beachten.

SMUTI (engl. Strength Monitoring Using Thermal Imaging) ist ein neuartiges Verfahren zum Festigkeitsmonitoring von Spritzbeton mit Hilfe von Thermografie [1]. Es ermöglicht die Festigkeitsentwicklung der gesamten Spritzbetonschale in Echtzeit aus sicherer Entfernung zu überwachen und bringt somit große Vorteile für Sicherheit, Qualitätskontrolle und Bauablauf.

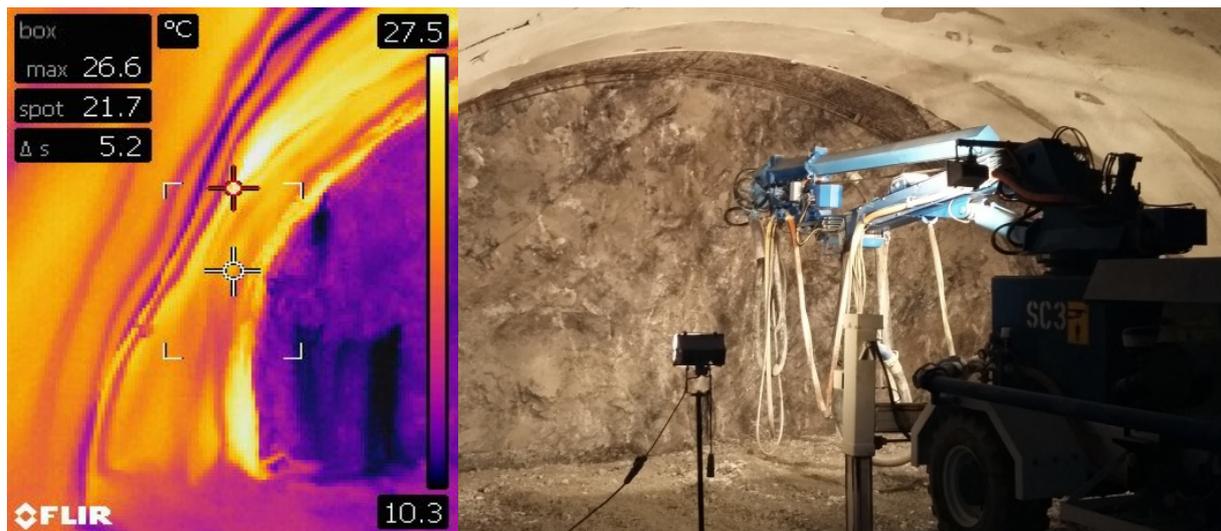


Bild 1: Thermisches und digitales Bild der Spritzbetonschale an der Ortsbrüst am Tunnel Oberau

Einflussgrößen wie z.B. die verwendete Betonrezeptur, aber auch das verwendete Spritzverfahren auf die Festigkeitsentwicklung werden mit Hilfe von Laboruntersuchungen sowie Kalibrierungsmessungen vor Ort erfasst. Mit Hilfe der kalibrierten Software kann dann auf Grundlage von Temperaturmessungen mit einer Wärmebildkamera die Festigkeitsentwicklung in Echtzeit berechnet und überwacht werden. Dies kann von einer sicheren Position aus erfolgen und ist so einfach wie die Aufnahme eines Fotos (siehe Bild 1).

Das Verfahren kann auch in Ergänzung zu den klassischen, i.d.R. an separaten Spritzbetonproben durchgeführten Methoden der Frühfestigkeitsbestimmung (z.B. Penetrationsnadelverfahren, Setzbolzenverfahren) verwendet werden, um die Aussagekraft dieser Prüfverfahren und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Spritzbetonschale zu bewerten bzw. um ein besseres Verständnis für die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons zu erlangen.

1.2 Projekt Tunnel Oberau (B2)

Das Verfahren wurde in Deutschland erstmals beim Bau des Tunnels Oberau angewendet.

Der Tunnel soll die Hauptdurchgangsstraße der Gemeinde Oberau entlasten und dem hohen Verkehrsaufkommen auf der Bundesstraße B2 zwischen dem Ende der Bundesautobahn 95 bei Eschenlohe und dem nördlichen Ortseingang von Garmisch-Partenkirchen begegnen (vgl. Bild 2).

In der viereinhalbjährigen Bauzeit wird der 2 x 2.800 m lange Tunnel in konventioneller Bauweise aufgeföhren und sämtliche Innenausbauarbeiten durchgeführt. Die Fertigstellung ist für Mai 2020 geplant.

Die Trasse verläuft zwischen der Anschlussstelle Oberau-Nord und Oberau-Süd unter dem Mühlberg, dem Gießenbachtal und dem Kirchbichl hindurch. Die geologischen und hydrologischen Verhältnisse sind z.T. schwierig: so werden im mittleren Bereich im Gießenbachtal stark wasserdurchlässige Lockergesteinsschichten mit einer minimalen Überdeckung von nur 7 m durchfahren.

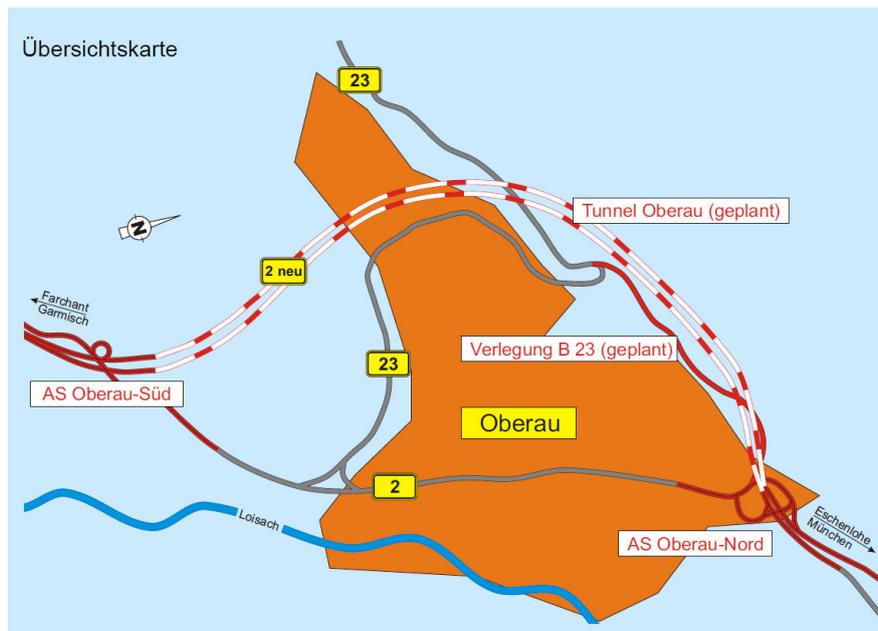


Bild 2: Übersichtskarte mit Lage des Straßentunnels Oberau im Straßennetz [2]

Zu Beginn der Baumaßnahme ergaben sich Probleme bei der Festigkeitsentwicklung des verwendeten Spritzbetons. So kam es zu einem Zwischenfall, bei dem nach Herstellung der Spritzbetonschale Teile der Spritzbetonschale herabfielen. Die Spritzbetonzusammensetzung wurde in der Folge optimiert und angepasst.

Das SMUTI-Verfahren kam in Ergänzung zu den Güteprüfungen an Spritzkisten gemäß EN 14488-2 (2006) als zusätzliche Maßnahme zur Überwachung der Frühfestigkeitsentwicklung (insbesondere auch der kaum zugänglichen Firstbereiche) zum Einsatz.

2. Theoretischer Hintergrund

Beton erhärtet aufgrund einer chemischen Reaktion des Zements mit Wasser. Dieser als Hydratation bezeichnete Vorgang ist ein exothermer Prozess bei dem Wärme freigesetzt wird. Die Druckfestigkeit des Betons steigt hierbei mit zunehmendem Hydratationsgrad linear an ([3], vgl. Bild 3). Wenn diese Beziehung für die verwendete Betonrezeptur bekannt ist, lässt sich die Druckfestigkeit f_c aus dem Hydratationsgrad ξ ermitteln.

Die Hydratationsgeschwindigkeit ($d\xi/dt$) und damit die Festigkeitsentwicklung des verwendeten Spritzbetons ist zu jedem Zeitpunkt alleine abhängig von der momentanen Temperatur und dem Hydratationsgrad. Die Beziehung zwischen Hydratationsrate, Temperatur und Hydratation lässt sich mit der sogenannten Arrhenius Gleichung [4] beschreiben. Es gilt:

$$d\xi/dt = A(\xi) \cdot \exp(-E_a/R \cdot T) \quad (1)$$

mit der normalisierten Affinität $A(\xi)$ [s^{-1}], der Aktivierungsenergie E_a [$J \cdot mol^{-1}$], der Gaskonstante R [$= 8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$] und der Temperatur T [K].

Als Faustregel gilt: eine Erhöhung der Temperatur um 10 K führt zu einer Verdoppelung der Hydratationsgeschwindigkeit.

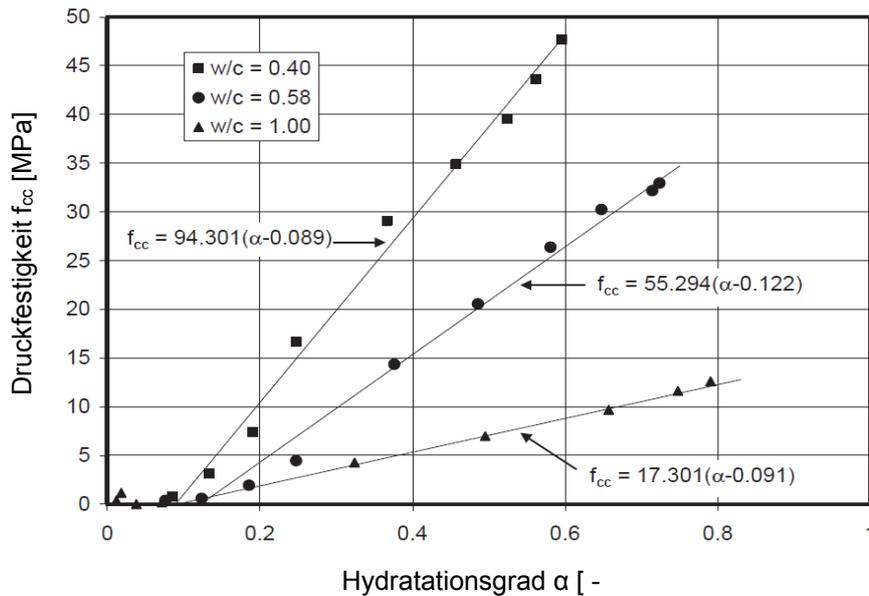


Bild 3: Beziehung zwischen Hydratationsgrad und Druckfestigkeit [3]

Die Aktivierungsenergie und die normalisierte Affinität sind vom Zementtyp, den chemischen Zusatzmitteln und -stoffen wie Hüttensand, Flugasche, Silikastaub oder natürliche Puzzolane abhängig und können für die verwendete Spritzbetonrezeptur mithilfe von Kalorimeterversuchen ermittelt werden.

3. Festigkeitsmonitoring mithilfe von Thermografie

Zur Überwachung der Frühfestigkeitsentwicklung von Spritzbeton innerhalb der ersten 24 Stunden werden in der Regel indirekte Messmethoden wie das Penetrationsnadelverfahren und das Setzbolzenverfahren gemäß EN 14488-2 (2006) verwendet.

Da die Messungen bei laufendem Spritzvorgang am direkt aufgetragenen Spritzbeton nicht sinnvoll ausgeführt werden können, werden sie meist an Spritzkisten, die parallel zur Applikation unter möglichst vergleichbaren Voraussetzungen gespritzt werden, durchgeführt.

Unter der Annahme, dass die Erhärtung des Spritzbetons der Tunnelschale und der Spritzkisten unter vergleichbaren thermischen Bedingungen erfolgt, lässt sich die Frühfestigkeit der Spritzbetonschale mithilfe dieser indirekten Festigkeitsprüfung bewerten. Sofern es aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen z.B. infolge abweichender Lagerbedingungen oder Einflüsse wie Wassereintritt zu Unterschieden bei der Temperaturentwicklung kommt, liefern die Messungen an den Spritzkisten lediglich eine Schätzung der Frühfestigkeit der Spritzbetonschale (vgl. Bild 4).

Das Verfahren SMUTI wurde an der Universität von Warwick durch Dr. Benoît Jones entwickelt und patentiert [5], [6]. Die Methode basiert auf Messungen der Temperaturentwicklung der Spritzbetonschale mithilfe von Thermografie. Mittels der erfassten Temperaturen und der Reifefunktion in Gleichung (1) lässt sich der Hydratationsgrad und damit die Druckfestigkeit des Spritzbetons schrittweise ermitteln.

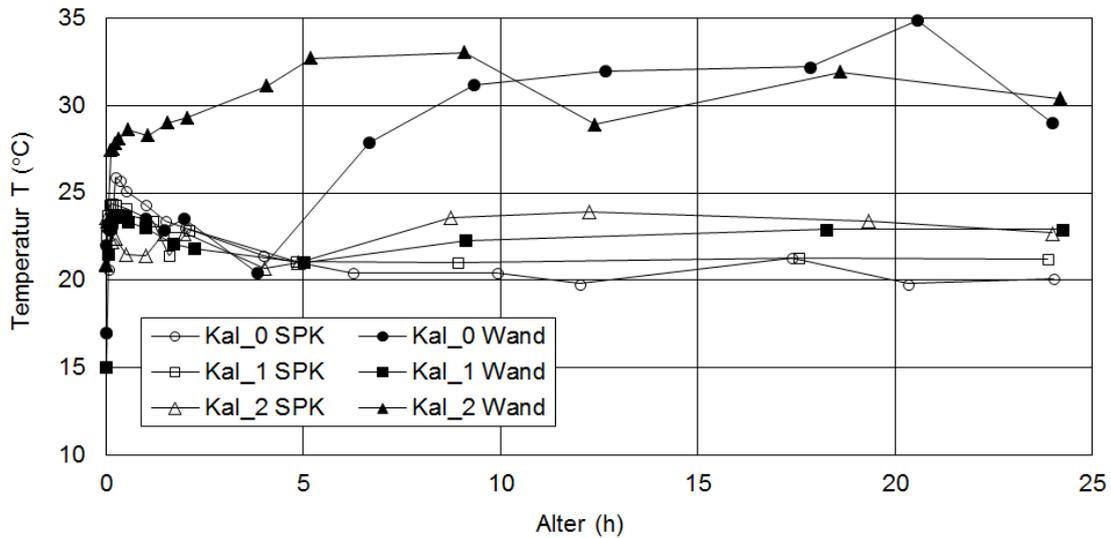


Bild 4: Vergleich des Temperaturverlaufs der Oberflächentemperatur von Spritzkiste und Spritzbetonschale

Das Verfahren umfasst folgende Schritte

- Laboruntersuchungen zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften der verwendeten Betonrezeptur, d.h. die normalisierte Affinität $A(\xi)$ und Aktivierungsenergie E_a , mithilfe isothermer Kalorimetrie
- Kalibrierung Vorort mithilfe von Spritzkisten zur Bestimmung der Beziehung zwischen Druckfestigkeit f_c und Hydratationsgrad ξ
- Anpassen der Software mit den gewonnenen thermischen Parametern sowie Schulung der Nutzer Vorort (Umgang Wärmebildkamera, Software)
- Ermittlung der Temperaturentwicklung der Spritzbetonschale durch Thermografie und Bestimmung der Festigkeit auf Basis des erfassten Temperaturverlaufs

4. Anwendung beim Tunnel Oberbau

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte des Verfahrens anhand der im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse erläutert.

4.1 Laboruntersuchungen

Ziel der Laboruntersuchung ist die Ermittlung der thermischen Eigenschaften der verwendeten Spritzbetonrezeptur, d.h. die normalisierte Affinität und die für die Hydratation erforderliche Aktivierungsenergie. Die normalisierte Affinität beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von den bereits gebildeten Hydratphasen. Die Aktivierungsenergie ist der temperatursensitive Parameter und beschreibt die für die Reaktion zwischen 1 mol Wasser und Zement erforderliche Energie. Die thermischen Parameter lassen sich durch isotherme Kalorimetrie ermitteln.

Zur Erfassung der Hydratationswärmeentwicklung werden hierbei Proben der verwendeten Frischbetonrezeptur unter isothermen Bedingungen gelagert, d.h. die während der Hydratation freigesetzte Wärmemenge wird abgeführt, so dass die Proben temperatur konstant bleibt [7]. Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden jeweils 4 Proben bei verschiedenen Temperaturen von 10°C, 20°C, 30°C und 40°C getestet.

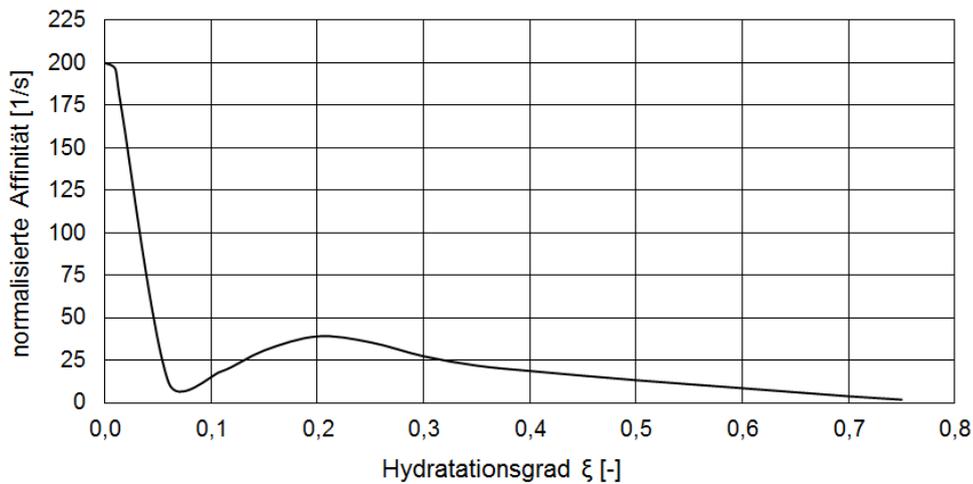


Bild 5: Normalisierte Affinität in Abhängigkeit des Hydratationsgrades ermittelt für eine Temperatur von 20°C mithilfe isothermer Kalorimetrie



Bild 6: Frühfestigkeitsprüfung (< 1h) mittels Penetrationsnadel an einer Spritzkiste (links) und Temperaturmessung mittels Thermografie an der Spritzbetonschale (rechts)

In Bild 5 ist die ermittelte normalisierte Affinität bei 20°C dargestellt. Der Beschleuniger führt insbesondere zu Beginn der Hydratation zu einer hohen Reaktionsgeschwindigkeit. Die Aktivierungsenergie beträgt 37,192 kJ/mol.

4.2 Kalibrierungsmessungen

Zur Ermittlung einer Beziehung zwischen Druckfestigkeit und Hydratationsgrad müssen Einflüsse aus dem Spritzverfahren selbst (Verdichtung, Pumprate, Dosierung des Beschleunigers) aber auch Einflüsse der groben Zuschläge, Stahlfasern, etc. auf die Festigkeitsentwicklung erfasst werden.

Im Rahmen der Kalibrierungsmessungen werden hierzu vor Ort Spritzkisten (40 cm x 40 cm x 12-15 cm) hergestellt und die Frühfestigkeitsentwicklung mithilfe der klassischen Prüfverfahren (Penetrationsnadelverfahren, Setzbolzenverfahren) gemäß EN 14488-2 (2006) erfasst. Der zugehörige Hydratationsgrad wird mithilfe von Temperaturmessungen ermittelt (Bild 6).

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten und Streuungen der Materialzusammensetzung und/oder der Prüfverfahren selbst zu erfassen, wurden drei Sätze von Probekörpern aus unterschiedlichen Spritzbetonchargen (d.h. mit ausreichendem zeitlichen Abstand) hergestellt und geprüft.

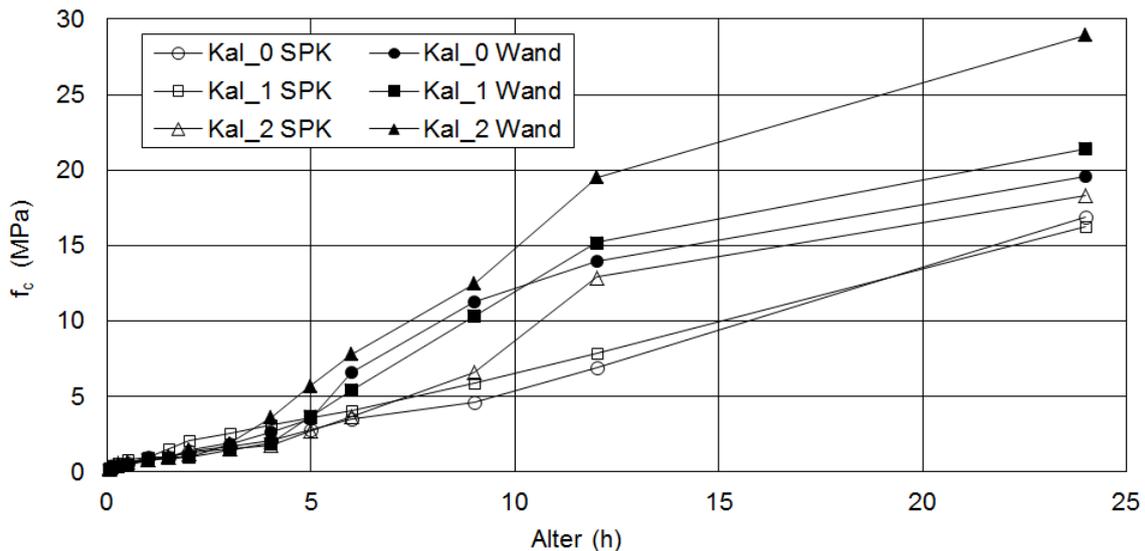


Bild 7: Vergleich der Festigkeitsentwicklung der getesteten Spritzkisten und der Spritzbetonschale

Zum Vergleich wurden gleichzeitig zu den Messungen an den Spritzkisten zusätzlich Messungen an der Spritzbetonschale durchgeführt. In Bild 4 ist die im Zuge der Kalibrierungsmessungen am Tunnel Oberau erfasste Temperaturentwicklung der Spritzbetonschale und der zugehörigen Spritzkisten dargestellt.

In Bild 7 sind die erfassten Frühfestigkeiten der Spritzkisten und der Spritzbetonschale gegenübergestellt. Die Frühfestigkeiten bis 1 MPa wurden mittels des Penetrationsnadelverfahrens und die übrigen Messungen mithilfe des Setzbolzenverfahrens erfasst.

Die Oberflächentemperaturen der Spritzbetonschale waren in diesem Fall wärmer als jene der Spritzkisten, was auf eine höhere Hydratationsgeschwindigkeit des Spritzbetons in der Tunnelschale zurückzuführen ist. Aufgrund des unterschiedlichen Temperaturverhaltens musste davon ausgegangen werden, dass auch die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons der Tunnelschale und der Spritzkisten deutlich unterschiedlich sind.

Wie erwartet, wurden im Vergleich zu den Spritzkisten bei den Frühfestigkeitsprüfungen an der Tunnelschale höhere Festigkeit erreicht. Dies muss nicht immer der Fall sein. So sind durchaus Situationen denkbar, bei denen sich bei den Spritzkisten höhere Temperaturen einstellen wie z.B. bei einer Kühlung der Tunnelschale durch den kühlen Fels, Wassereintritt, Ventilation, etc..

Die Spritzbetontemperatur ist ferner abhängig von der Wirksamkeit des Beschleunigers. Mithilfe einer Wärmebildkamera kann beispielsweise vor Ort die Festigkeitsentwicklung qualitativ bewertet werden, um Qualität und Sicherheit zu steigern. Hauptziel hierbei ist es sicherzustellen, dass die chemischen Reaktionen bei der Hydratation wie erwartet stattfinden. So kann eine Kältestelle z.B. auf Probleme bei der Dosierung des Beschleunigers und damit auf eine verzögerte Festigkeitsentwicklung hindeuten.

In Bild 8 ist das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad als Punktwolke dargestellt. Der Hydratationsgrad wurde auf Basis der Temperaturmessungen und der im Labor ermittelten thermischen Parameter mittels der Arrhenius Gleichung (1) ermittelt. Die lineare Beziehung zwischen Druckfestigkeit und Hydratationsgrad wurde durch lineare Regression der Messwerte ermittelt.

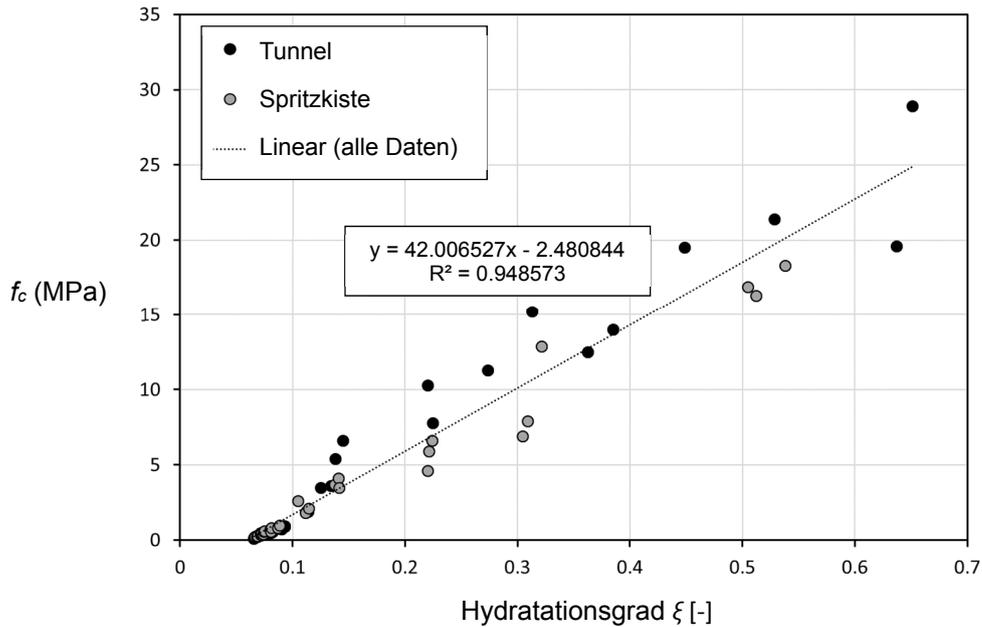


Bild 8: Ermittelter Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Hydratationsgrad

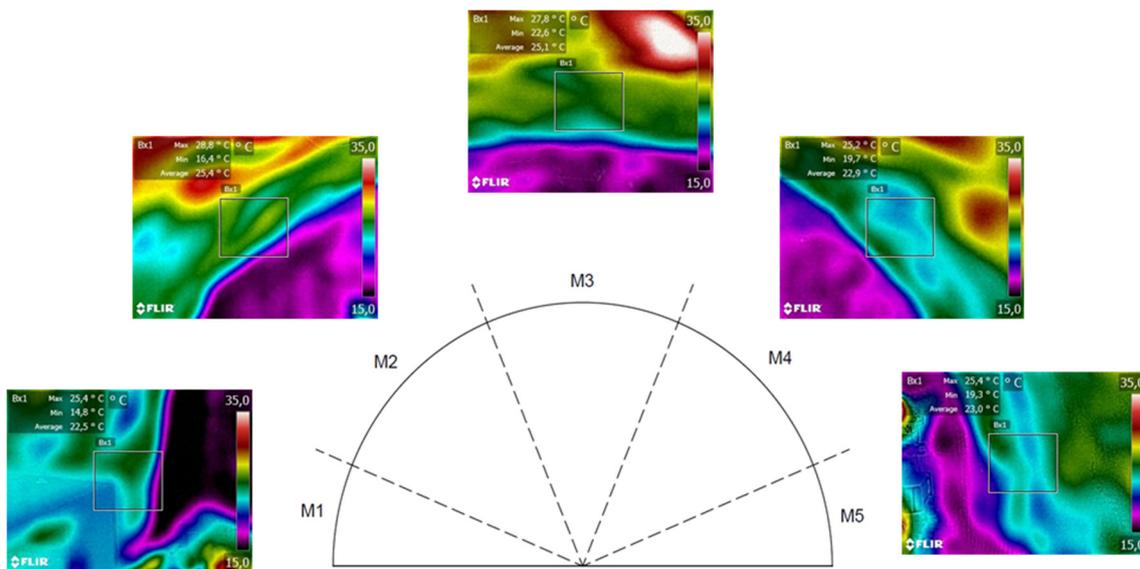


Bild 9: Messbereiche der Messpunkte MP1 bis MP5 zur Erfassung der Oberflächentemperatur der Spritzbetonschale

4.3 Ergebnisse des Festigkeitsmonitorings

Mithilfe der ermittelten Beziehung lässt sich nun die Festigkeitsentwicklung mittels thermischer Messungen überwachen. Hierzu werden fünf Messpunkte definiert. Bei Bedarf können jedoch beliebig viele weitere Messpunkte hinzugefügt werden, um beispielsweise die geringeren Festigkeiten im Bereich von Kältestellen bei Wassereintritt zu überwachen.

Bild 9 zeigt exemplarisch ein thermisches Bild der Spritzbetonschale der fünf Messbereiche. Der Temperaturbereich wurde auf 15°C (schwarz) bis 35°C (weiß) begrenzt. Aufgrund des lokalen Wassereintritts (blaue Bereiche) ergeben sich im unteren Bereich der Tunnelschale etwas geringere Temperaturen als im Firstbereich.

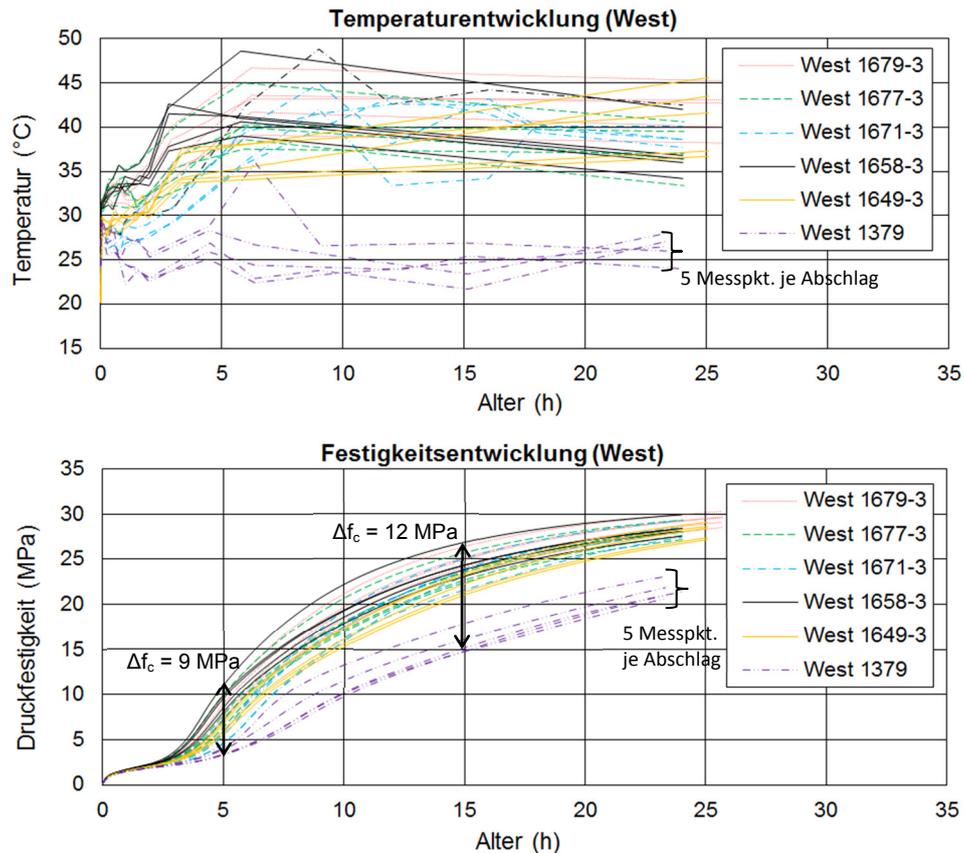


Bild 10: Temperaturmessungen und ermittelter Festigkeitsverlauf der Spritzbetonschale im Tunnel West im Zeitraum September 2016 bis Januar 2017

In Bild 10 sind exemplarisch die erfassten Temperaturverläufe (jeweils 5 Messpunkte je Abschlag) und die zugehörige Festigkeitsentwicklung für die Abschlüsse des westlichen Tunnels im Gießenbachtal (Lockergestein) im Zeitraum September 2016 bis Januar 2017 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Spritzbetontemperaturen stark streuen. So werden Temperaturen zwischen 20°C und 50°C erreicht. Ursache hierfür sind die z.T. geringen Frischbetontemperaturen bei kühler Winterung aber auch die Kühlung durch den z.T. signifikanten Wassereintritt während der Schlechtwetterphasen. Entsprechend groß schwanken die Festigkeiten der Spritzbetonschale für ein Betonalter von 5 h zwischen 3 und 12 MPa bzw. bei einem Alter von 15 h zwischen 15 und 27 MPa. Die Frühfestigkeiten lagen zu jedem Zeitpunkt dennoch deutlich oberhalb der Anforderung der Festigkeitsklasse J2 gemäß EN 14487-1.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrages wurde am Beispiel des Tunnel Oberau (B2) ein neuartiges, als SMUTI (engl. Strength Monitoring Using Thermal Imaging) bezeichnetes Verfahren, zur Überwachung der Frühfestigkeitsentwicklung der Spritzbetonschale mithilfe von Thermografie vorgestellt.

Mit einer Wärmebildkamera wird hierbei die Temperaturentwicklung des Spritzbetons erfasst und mithilfe der Arrhenius-Reifefunktion die Druckfestigkeit berechnet. Die Methode erlaubt die gesamte Oberfläche der Tunnelschale aus einer sicheren Position in Echtzeit zu scannen

und lokale Kältestellen mit verzögerter Festigkeitsentwicklung (z.B. in Folge von Wassereintritt, Ausfall des Beschleunigers) zu identifizieren.

Das Verfahren stellt einen richtungsweisenden Fortschritt in der Qualitätskontrolle von Spritzbeton im Tunnelbau dar. Es gibt ein besseres Verständnis für die Frühfestigkeitsentwicklung des jungen Betons. Mithilfe von Laboruntersuchungen können nützliche Informationen zum Mischentwurf erhalten werden (z.B. Vergleich von Zementen, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln). Mithilfe von Kalibrierungsmessungen können ferner Einflüsse des Spritzverfahrens auf die Festigkeitsentwicklung erfasst werden.

SMUTI muss nicht die klassischen Verfahren wie das Penetrationsnadelverfahren oder das Setzbolzenverfahren ersetzen. Es kann auch in Ergänzung verwendet werden, um die Aussagekraft dieser Prüfmethode sowie die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf die Spritzbetonschale zu bewerten. Zudem lassen sich Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons in der Spritzbetonschale erkennen.

6. Literatur

- [1] Jones, Benoit D.; Li, S.:
Strength monitoring using thermal imaging. In: Tunnelling Journal, December 2013/January 2014 issue, pp. 40-43.
- [2] Autobahndirektion Südbayern:
Informationen zu aktuellen Planungen: Bundesstraße B 2 München - Garmisch-Partenkirchen, Neubau / Ausbau zwischen Eschenlohe und Oberau-Süd, Stand Oktober 2011.
- [3] Byfors, Jan:
Plain concrete at early ages. In: CBI Forskning 3:80 (1980), 464, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- [4] Freiesleben Hansen, P.; Pedersen, J.:
Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete; In: Nordiska Betongförbundet (Hrsg.), Issue Nummer 1 (1977), 19-34.
- [5] Jones, Benoit D.; University of Warwick:
Apparatus & method for monitoring strength development of concrete, WO Patent App. PCT/GB2014/052,022, 08.01.2015.
- [6] Jones, Benoit D.; Li, S.; Ahuja, V.:
Early strength monitoring of sprayed concrete using thermal imaging. In: Beck et al (Eds.) Proc. 7th International Symposium Sprayed Concrete (2014), Sandefjord, Norway, Norwegian Concrete Association, TECNA.
- [7] Kada-Benameur, H.; Wirquin, E.; Duthoit, B.:
Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. In: Cement and Concrete Research 30 (2000), pp. 301-305.

Zu den Autoren

Dr.-Ing. Hermann Weiher

Studium des Bauingenieurwesens an der TU München. 2003 bis 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der TU München (Prof. Dr. K. Zilch). 2009 Gründung matrices engineering GmbH, seit 2010 geschäftsführender Gesellschafter.

weiher@matrics-engineering.com

Dr.-Ing. Katrin Runtemund

Studium des Baustoffingenieurwesens an der TU München. 2006 bis 2012 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Baumechanik der TU München (Prof. Dr. G. Müller). Seit 2013 Projektleiterin Brückenbau und Fachbereichsleiterin Monitoring bei matrices engineering GmbH.

runtemund@matrics-engineering.com

Dipl.-Ing. Karsten Läufer

Studium des Bauingenieurwesens an der TU München. 2004 bis 2006 Projektingenieur bei BUNG Ingenieure AG. 2007 bis 2015 Kalkulator bzw. Bauleiter bei Bilfinger Construction GmbH, Niederlassung Tunnelbau. Seit 2015 Projektleiter Tunnel Oberau bei Marti GmbH Deutschland.

karsten.laeufer@martiag.ch

Robert Heintz, M.Sc.

Studium der Ingenieur- und Hydrogeologie an LMU und TU München. 2012 bis 2014 Fachbauleitung Geotechnik und leitender Ingenieurgeologe bei Müller+Hereth, Ingenieurbüro für Tunnel- und Felsbau GmbH. Seit 2015 Bauleiter bei Marti GmbH Deutschland.

robert.heintz@martiag.ch