

Nachweisverfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln (NBM)

FA 8.166

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung (Prof. Dr.-Ing. P. Schießl)

Bearbeiter: Huber, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Mai 2004

1. Ziel und Vorgehensweise

Die Ermittlung von Kenngrößen, anhand derer eine Beurteilung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln (NBM) im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken möglich ist, war Ziel dieses Forschungsvorhabens.

Hierfür wurden Probekörper mit einer Höhe von 150 mm hergestellt, die auf Grund des Belassens in der Schalung oder des dampfdichten Abklebens der Seitenflächen und der Unterseite nur über die Oberseite austrocknen konnten. Bis auf die Probekörper für die Biegezugprüfung (150–150–700 mm³) wurden die Untersuchungen an Würfeln (150–150–150 mm³) durchgeführt.

Der verwendete Beton hatte einen Zementgehalt (CEM I 32,5 R) von 350 kg/m³ und einen w/z-Wert von 0,45. Die Gesteinskörnung setzte sich aus kalzitischem Sand 0/4 und Basaltsplitt (2/8 und 8/16) zusammen. Um den Einfluss des w/z-Wertes auf das Austrocknungsverhalten zu untersuchen, wurden orientierend zwei Serien mit w/z-Werten von 0,40 und 0,36 bei sonst gleicher Zusammensetzung untersucht.

Die Lagerung der Proben erfolgte in zwei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen – in Normklima bei 20 °C und 65 % r.F. und in einem trockenen und warmen Klima von 30 °C und 40 % r.F. Zusätzlich wurden einige der Proben im Klima 30 °C/40 % r.F. der Beanspruchung "Wind" (1 m/s) ausgesetzt.

Um ein möglichst breites Spektrum der flüssigen Film bildenden Nachbehandlungsmittel (NBM) abzudecken, kamen vier NBM unterschiedlicher Zusammensetzung und Wirksamkeit zum Einsatz. Das NBM KE, eine Kunstharzemulsion, erreichte bei der Fremdüberwachung nach den Technischen Lieferbedingungen für Nachbehandlungsmittel (TL NBM-StB) stets einen geringeren Sperrkoeffizienten als den vorgeschriebenen Wert von 75 %. Die NBM PE1 und PE2, beide Paraffinemulsionen, liefern üblicherweise Sperrkoeffizienten von etwas über 75 % (PE1) bzw. über 90 % (PE2). Zusätzlich wurde eine Kunstharzlösung (KL) untersucht. Die Auftragsmenge betrug stets 150 g/m² und lag damit im Bereich der von den Herstellern angegebenen und bei der Prüfung nach TL verwendeten Menge. Bis auf das Mittel KL, das sofort nach Herstellung aufgetragen wurde, wurden die NBM bei Eintreten der Mattfeuchte auf die Betonoberfläche aufgesprüht. Als Referenz und für die Beurteilung der Sperrwirkung diente in jedem Klima eine nicht-nachbehandelte Probe. Zusätzlich wurde die Auswirkung der Auftragsmenge (1,0-fache und 0,67-fache Menge), des Auftragszeitpunktes (Mattfeuchte und nach 10 Stunden "spät"), der Textur (Jutelängsstrich bzw. ohne Textur) und der Einfluss einer Unterwasserlagerung untersucht.

Am jungen Beton wurde jeweils der Wasserverlust in einem Zeitraum bis zu sieben Tagen nach Herstellung der Proben

gemessen. Hieraus wurden die Sperrkoeffizienten für die Nachbehandlungsmittel nach den Technischen Lieferbedingungen berechnet. Zusätzlich wurde ein den zeitlichen Verlauf des Wasserverlustes bzw. der Sperrwirkung berücksichtigender Kennwert IS eingeführt.

Gleichzeitig wurde der elektrolytische Widerstand des Betons mittels Multi-Ring-Elektroden in Abständen von 0,5 mm bis in eine Tiefe von 40 mm kontinuierlich bestimmt, was Rückschlüsse auf den Feuchtegradienten zulässt. In gesonderten Versuchen wurden Probekörper im Alter von 1 und 7 Tagen in unterschiedlichen Abständen parallel zur Oberseite gespalten und der Wassergehalt dieser Teilstücke durch Trocknung bei 105 °C und Wägung bestimmt. Somit konnte der absolute Wassergehalt ermittelt werden.

Nach 28 Tagen wurden an den Probekörpern mehrere mechanische Kennwerte bestimmt. Für die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurden die Probekörper mit der ausgetrockneten Seite (d. h. der Einfüllseite) nach unten in die Prüfmaschine eingebaut. So konnte der Einfluss des ausgetrockneten porösen Bereiches auf die Biegezugfestigkeit gemessen werden. Orientierend wurde an Würfeln die Druckfestigkeit bestimmt. Da die Porosität im oberflächennahen Bereich geringe Auswirkung auf die Druckfestigkeit eines Betonwürfels mit der Kantenlänge von 150 mm hat, wurde nach Abschleifen der Textur das elastische Verformungsverhalten des oberflächennahen Betons mit dem Rückprallhammer nach Schmidt als Kenngröße für die Festigkeitsbeeinflussung durch die Nachbehandlungsmittel NBM geprüft.

Nach 28 Tagen wurden die Probekörper für die Bestimmung der Gaspermeabilität nach Torrent als Maß für die Porosität des Betons vakuumgetrocknet und nach dem Entfernen des Oberflächenmörtels der Permeabilitätskoeffizient k_T bestimmt.

Um die Auswirkung der NBM auf die Griffigkeit und die Texturausbildung zu ermitteln, wurden Probekörper in einem Alter von 28 Tagen einer chemischen (saurer Regen), physikalischen (Frost) und mechanischen (Abrieb) Beanspruchung ausgesetzt, was die Praxisbeanspruchung einer Fahrbahnoberfläche simuliert. Nach einer Lagerung in einer Pufferlösung (pH-Wert von 4,5) wurden die Oberflächen für insgesamt 15 Minuten mit Gummikugeln, welche die Reifenbeanspruchung simulieren, beprallt. Anschließend wurden sie in Anlehnung an den CDF-Test sechs Frost-Taumittel-Wechseln ausgesetzt und dann nochmals mechanisch durch Beprallung beansprucht. Vor und nach diesem Zyklus wurden die mittlere Rautiefe mit dem Sandflächenverfahren und die Griffigkeit mit dem SRT-Pendel bestimmt. Zusätzlich wurde der Masseverlust nach der Frost- und Abriebbeanspruchung ermittelt und geometrische Kennwerte bezüglich der Mikro- und Makrorauheit aus dem Abtasten der Oberfläche mittels eines Laserscanners gemessen.

2. Ergebnisse

Mit der Reduzierung des w/z-Wertes wurden an den jeweiligen Betonen höhere Festigkeiten gemessen. Der Standard-Beton mit w/z = 0,45 erreichte im Mittel eine Druckfestigkeit von 44 N/mm², der Beton mit w/z = 0,40 eine Festigkeit von 54 N/mm² und der Beton mit dem geringsten w/z-Wert = 0,36 einen Wert von 58 N/mm². Geprüft wurden jeweils nicht-nachbehandelte Probekörper.

Sowohl bei der Ermittlung der Biegezugfestigkeiten als auch bei der Prüfung der Festigkeit der oberflächennahen Bereiche

zeigte sich der Effekt einer Nachbehandlung in geringer Ausprägung. Die Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen erhöhten sich abhängig vom verwendeten NBM im Verhältnis zu den nicht-nachbehandelten Probekörpern um maximal 20 %. Die unter Wasser gelagerten Probekörper erreichten im Vergleich eine 80 %-ige Erhöhung.

Bei der Prüfung der Oberflächenfestigkeiten wurden nur geringe Unterschiede festgestellt. Die Oberflächenfestigkeiten der mit NBM nachbehandelten Proben lagen in einem engen Bereich zwischen den nicht-nachbehandelten und den unter Wasser gelagerten Proben. Die Rückprallwerte der bei höherer Temperatur gelagerten Probekörper lagen reifebedingt etwas höher.

Bei den Untersuchungen zur Wasserverdunstung wurde festgestellt, dass die Wasserabgabe aus den Betonprobekörpern nach etwa einem Tag sehr stark zurückgeht. Dies ist auf die zeitabhängige Verfeinerung des Porensystems zurückzuführen, die den Wassertransport aus dem Kernbereich zur Oberfläche hin verlangsamt. Bei der Betrachtung der nachbehandelten (NBM) und nicht-nachbehandelten Probekörper wurde festgestellt, dass ab einem Alter von etwa 24 Stunden die nachbehandelten Proben mehr Wasser abgeben als die nicht-nachbehandelten, da durch die Wasserrückhaltung mehr freies Wasser im Probekörper zurückbleibt, das nach einem Tag verdunsten kann.

Eine Berechnung des Sperrkoeffizienten, der die Sperrwirkung eines NBM bezüglich des Wasserverlustes beschreibt, liefert nach diesem Zeitpunkt (ein Tag) somit keine zusätzlichen Informationen hinsichtlich der Auswirkungen auf den Festbeton. Zudem wird bei der Berechnung nach TL NBM-StB der Wasserverlust bis zum NBM-Auftrag nicht berücksichtigt. Durch die subjektive Beurteilung des Auftragszeitpunktes über den Zeitpunkt der Mattfeuchte der Betonoberfläche kommt diesem eine weitere Bedeutung zu. Je später ein NBM aufgetragen wird, desto geringer ist die Geschwindigkeit der Wasserverdunstung und umso höher ist die Sperrwirkung des NBM. So erreicht ein früher NBM-Auftrag nur eine geringe, ein später Auftrag eine hohe rechnerische Sperrwirkung. Der Sperrkoeffizient liefert also je nach Auftragszeitpunkt unterschiedliche Werte, absolut gesehen kann der Wasserverlust der entsprechenden Proben aber identisch sein, da die geringe Sperrwirkung über einen vergleichsweise längeren Zeitraum anhält. Um die Sperrwirkung zu definieren, sind also der Auftragszeitpunkt und die Menge des bis dahin verdunsteten Wassers zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde ein den zeitlichen Verlauf berücksichtigender Kennwert IS eingeführt, der zu einem optimalen Auftragszeitpunkt des NBM führt. Die Erhöhung der Auftragsmenge führte zu einer Erhöhung des Sperrkoeffizienten, eine Verminderung der Auftragsmenge zu einer Reduzierung. Insgesamt war die Sperrwirkung der verwendeten NBM ähnlich, die ermittelten Sperrkoeffizienten lagen versuchsbedingt zwischen 10 % und 64 %, erreichten also nie den in der TL geforderten Wert von 75 %. Eine Ausnahme bildet das NBM KL, das stets eine hohe Sperrwirkung aufwies. Die niedrigen Sperrkoeffizienten sind auf die Probekörperabmessungen und die darin enthaltene große Menge Wasser zurückzuführen.

Die Trocknung von Betonschichten aus unterschiedlichen Höhenlagen zeigte, dass sich bei trockener Lagerung (Klima 30 °C/40 % r.F.) bereits in einem Alter von einem Tag ein deutlicher Feuchtegradient, also ein tiefenabhängiger Unterschied im absoluten Wassergehalt, einstellt. Zudem konnte ein geringerer Wassergehalt im Kernbereich nachgewiesen werden. Dies ist auf die schnellere Hydratation und auf den höheren Anfangswasserverlust zurückzuführen. Die im Normklima 20 °C/65 % r.F. gelagerten Proben hingegen zeigten nach einem Tag kaum Unterschiede zum feucht-nachbehandelten Referenzprobekörper, erst nach sieben Tagen wurde auch hier ein Feuchtegradient festgestellt. Der Feuchtegehalt nahm insgesamt proportional zum Hydrationsfortschritt ab. Der Feuchtegradient konnte in den Untersuchungen des el. Widerstandes bestätigt werden. Dieser reichte bei den Proben im trockenen Klima 30 °C/40 % r.F. bis in eine Tiefe von etwa 30 mm, bei den Proben im Normklima 20 °C/65 % r.F. bis etwa 15 mm.

Zur Beurteilung der Porosität des oberflächennahen Betons wurde die Gaspermeabilität nach Torrent bestimmt. Hier zeigte sich eine Korrelation zwischen dem Wasserverlust nach 24 Stunden und dem Permeabilitätskoeffizienten k_T . Je mehr Wasser in diesem jungen Stadium verdunstet war, desto höher war die Durchlässigkeit des Betons.

Durch den Auftrag von NBM verändert sich die Textur und die Griffigkeit abhängig vom verwendeten NBM, die Texturen sind somit durch das "Verschwimmen" und Auswaschen von Gesteinskörnung untereinander nur bedingt vergleichbar. Nach einer längeren Liegezeit und Beanspruchung erreichen alle Oberflächen durch den Abtrag des NBM und des Oberflächenmörtels eine konstante Griffigkeit. Bei Verwendung von Kunstharzen ist die Griffigkeit u. U. durch das Anhaften des NBM beeinträchtigt.

Insgesamt lässt sich der Wasserverlust des jungen Betons über physikalische Kenngrößen des Betons, wie hier die Porosität, gut nachweisen. Der Wasserverlust wird durch die Nachbehandlung von Beton mit flüssigen Nachbehandlungsmitteln (NBM) begrenzt. Die diesbezügliche Wirkung der Nachbehandlungsmittel ist abhängig von verschiedenen Randbedingungen wie der Textur, der Auftragsmenge, dem Auftragszeitpunkt, den Frischbetoneigenschaften und der Art des NBM. Es existiert ein optimaler Auftragszeitpunkt für die Berechnung des Sperrkoeffizienten nach TL NBM-StB. Maßgebend für die Festbetoneigenschaften ist jedoch (in ausreichender Genauigkeit) der absolute Wasserverlust nach 24 Stunden ab Herstellung bzw. der Sperrkoeffizient nach einem Tag. Der Sperrkoeffizient berücksichtigt den Anfangswasserverlust bis zum NBM-Auftrag nicht und ist deshalb in Bezug auf die Anwendung in der Praxis kritisch zu betrachten, da sehr gute rechnerische Sperrwerte bei einem späten Auftrag ermittelt werden, zu dieser Zeit aber bereits Fröhschwindrisse auftreten können.

Es wird empfohlen, für eine nachzubehandelnde Betonfläche vorab Probekörper herzustellen und an diesen die Wirkung des Nachbehandlungsmittels in Bezug auf den Auftragszeitpunkt zu überprüfen; es ist ein minimaler Wasserverlust nach 24 Stunden anzustreben. Eine Erhöhung der Auftragsmenge gegenüber der geprüften Menge ist stets anzuraten. □