

Verbesserung der Präzision der Prüfung zur Bestimmung des Haftverhaltens zwischen groben Gesteinskörnungen und Bitumen

FA 6.088

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. F. Wellner)

Bearbeiter: Morgenstern, A. / Schulze, C. / Marschke, L.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Mai 2010

1 Aufgabenstellung

Als Prüfverfahren für den Haftverbund steht den Straßenbaulaboratorien ein Verfahren zur Verfügung, bei dem die Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen anhand mechanischer Beanspruchungen unter Vorhandensein von Wasser bestimmt werden kann. Beim Flaschen-Rollverfahren (Rolling-Bottle-Test) kommt es durch die mechanischen Belastungen unter Vorhandensein von Wasser zum Ablösen des Bitumens vom Gestein. Je besser die Affinität zwischen dem Gestein und dem Bitumen ist, desto geringer ist der Anteil des vom Gestein abgelösten Bitumens. Der Anteil an Gestein der nach dem Versuch noch mit Bitumen umhüllt ist (Umhüllungsgrad) dient als Bewertungsparameter für das Haftverhalten.

Der Umhüllungsgrad wird von zwei Prüfern per Augenschein unabhängig voneinander auf 5 % Genauigkeit gerundet bestimmt. Während die Probenvorbereitung, die im Verfahren zum Einsatz kommenden Geräte als auch die Versuchsdurchführung streng reglementiert sind, bestehen bei der Auswertung des Versuchs mitunter große Unsicherheiten infolge der subjektiven Beurteilung des Umhüllungsgrades durch die Prüfer.

Um die Subjektivität bei der Beurteilung des Umhüllungsgrades des Gesteins mit Bitumen zu mindern, sind im Schweizer Regelwerk Vorlagen zu finden, die dem Prüfer als Anhaltswerte dienen können. Trotz dieser bildhaften Vorlage sind jedoch nur subjektive Beurteilungen die Folge. Um die Auswertung des Flaschen-Rollverfahrens zu objektivieren, ist es unumgänglich entsprechende Datenverarbeitungsprogramme zu nutzen. Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Analyse-Software zur computergestützten, automatisierten bildanalytischen Erfassung des Umhüllungsgrades von Gesteinskörnern mit Bitumen. Die Software soll im Rahmen von Rolling-Bottle-Tests zur objektiven Bewertung des Haftverhaltens zwischen Gesteinskörnern und Bitumen eingesetzt werden. Validiert wurde dieses Verfahren anhand einer Methode, bei der mithilfe einer Leuchtdichtemesskamera entsprechende Leuchtdichtebilder erzeugt, segmentiert und bezüglich des Umhüllungsgrades mit der kameraspezifischen Software ausgewertet. Beide Verfahren wurden im Rahmen des Projekts an 10 verschiedenen Gesteinsarten und jeweils zwei unterschiedlichen Kornfraktionen getestet. Folgenden Anforderungen sollte das künftige Auswertverfahren entsprechen:

- einfache Durchführbarkeit,
- geringe zusätzliche Kosten der Versuchseinrichtung,
- Objektivität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Im Ergebnis der Forschungsarbeit wurde ein bestehendes Segmentierungsverfahren des Institute for Artificial Intelligence der Technischen Universität Dresden anforderungsorientiert weiterentwickelt und in einer Software implementiert. Dem Anwender steht somit ein einfach handhabbares Auswertprogramm zur Verfügung, dessen Informationsinput aus digitalen

Fotoaufnahmen mit möglichst wenig definierten Randbedingungen besteht.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Subjektiv (Laboranten)

Gemäß der Prüfvorschrift für die Affinitätsprüfung erfolgt die Bestimmung des Umhüllungsgrades von zwei unabhängig voneinander arbeitenden, entsprechend ausgebildeten Prüfern. Die Ergebnisse sind anschließend zu mitteln und auf 5 % Genauigkeit zu runden [1]. Als Hilfestellung zur Beurteilung stehen entsprechende Vorlagen zur Verfügung. Festzustellen ist jedoch, dass es bereits Abweichungen zwischen den Zahlenwerten und den Abbildungen in den Vorlagen gibt.

2.2 Objektiv - Informatik

2.2.1 Aufnahmebedingungen

Die Gesteinskörner wurden in einer Kristallisationsschale (\varnothing 20 cm) und mit entionisiertem Wasser bedeckt aufgenommen. Die Aufnahme in Wasser verringerte deutlich großflächige, störende Reflexionen, die bei trockenen Steinen auf den Bitumenoberflächen entstehen würden. Der Schattenwurf erwies sich als weitere Störquelle. Durch Aufnahme der Steine in einem Kunststoffbehälter, welcher durch Streuung des Lichts für eine diffusere Beleuchtung sorgt, konnten Schatten deutlich abgeschwächt werden. Eine Lagerung der Kristallisationsschale auf einen Kunststoffring von ca. 2 cm Höhe beseitigte restliche Verschattungen nahezu vollständig. Um Störungen durch Umgebungslicht (z. B. durch Reflexion auf der Wasseroberfläche) auszuschließen, wurde das System mit einem kegelförmigen Aufsatz mit einer kleinen Öffnung für das Kamera-Objektiv abgeschlossen.

Das System wurde seitlich von außen mit zwei Kaltlicht-Reflektorlampen beleuchtet (siehe Bild 1).



Bild 1: Darstellung des Aufnahmeplatzes

2.2.2 Verfahren zur Bestimmung der Umhüllungsgrade

Das entwickelte Verfahren beruht auf einem probabilistischen Segmentierungsansatz [2]. Die hier verwendete Klasse von Modellen ist in der Literatur als Klasse der Markov-Gibbs-Modelle bekannt [3].

Modell und Erkennungsaufgabe

Die zu verarbeitenden Eingabedaten liegen in Form einer Kollektion von digitalen Farbfotografien der Teilstichproben vor.

Hinzu kommen Aufnahmen von Gesteinskörnern im Rohzustand und mit vollständiger Bitumen-Umhüllung, sowie vom Hintergrund, welche für das automatische Lernen der Modellparameter benötigt werden. Die Gesamtheit dieser Bilder wird im Folgenden mit \bar{x} , ein einzelnes Bild daraus mit x^g (mit Bildindex g) bezeichnet.

Ist ein Modell für die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(\varphi | x^g)$ des Umhüllungsgrades φ bei festem Bild x^g gegeben, so kann mit dessen Hilfe eine Erkennungsaufgabe formuliert werden. Üblicherweise betrachtet man an dieser Stelle die Aufgabe der Minimierung des Bayesschen Risikos [4]:

$$\varphi^* = \arg \max_{\varphi} \sum_{\varphi'} C(\varphi, \varphi') \cdot P(\varphi' | x^g) \quad 1)$$

Wobei $C(\varphi, \varphi')$ die Kosten angibt, die zu zahlen sind, wenn man sich für den Umhüllungsgrad φ' statt für den wahren Umhüllungsgrad φ entschieden hat. Eine geeignete Kostenfunktion für diese Aufgabenstellung ist die quadratische Abweichung $C(\varphi, \varphi') = (\varphi - \varphi')^2$, welche folgende Entscheidungsstrategie liefert:

$$\varphi^* = \sum_{\varphi} \varphi \cdot P(\varphi | x^g) \quad 2)$$

Was nichts anderes darstellt als den Erwartungswert des Umhüllungsgrades. Zu einem Modell für $P(\varphi | x^g)$ gelangt man z.

B. durch Einführung von Segmentierungen s^g für zugehörige Bilder x^g . Die Segmentierung s^g ordnet jedem Pixel eine Segmentmarke aus folgender Menge zu: "Hintergrund", "Bitumen", "Stein" und "Übersteuerung". Die Kollektion aller Segmentierungen wird mit \bar{s} bezeichnet. Folgende Annahme wird für die Verbundwahrscheinlichkeit für \bar{x} und \bar{s} getroffen:

$$P(\bar{x}, \bar{s}) = \prod_g P(x^g, s^g) = \prod_g P(x^g | s^g) \cdot P(s^g) \quad 3)$$

Dies entspricht der Annahme, dass die Einzelaufnahmen statistisch unabhängig sind. Für die A-Priori-Wahrscheinlichkeit $P(s^g)$ einer Segmentierung s^g wird das Potts-Modell [3] eingesetzt, welches bewirkt, dass kompakte Segmentierungen wahrscheinlicher sind als weniger kompakte.

Die Wahrscheinlichkeit $P(x^g | s^g)$ wird als Erscheinungsmodell bezeichnet, da sie bei gegebener Segmentierung s^g die Wahrscheinlichkeit für ein Bild x^g angibt. Folgendes pixelweise bedingt unabhängiges Modell wurde für diese Wahrscheinlichkeit verwendet:

$$P(x^g | s^g) = \prod_r q(x_r^g | s_r^g) \quad 4)$$

Wobei mit r ein Pixel und mit x_r^g bzw. s_r^g der Wert, den das Bild bzw. die Segmentierung an diesem Pixel einnimmt, bezeichnet wird. D. h. für jede Segmentart k existiert ein Farbmodell $q(f | k)$, das angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Farbwert f (dreikomponentiger RGB-Vektor) der jeweiligen Segmentart zuzuordnen ist. Die Funktionen $q(f | k)$ werden als Mischungen multivariater Normalverteilungen modelliert. Der einer Segmentierung s^g zugeordnete Umhüllungsgrad $\varphi(s^g)$ kann durch Bildung folgenden Verhältnisses bestimmt werden:

$$\varphi(s^g) = \frac{N_{\text{Bitumen}}(s^g)}{N_{\text{Bitumen}}(s^g) + N_{\text{Stein}}(s^g)} \quad 5)$$

Wobei $N_{\text{Bitumen}}(s^g)$ bzw. $N_{\text{Stein}}(s^g)$ die Anzahl der Pixel angibt, denen in s^g die Segmentmarke "Bitumen" bzw. "Stein" zugewiesen wurde. Mittels dieser Beziehung kann aus $P(s^g | x^g)$ die Verteilung $P(\varphi | x^g)$ abgeleitet werden, die zur Bestimmung des Erwartungswertes des Umhüllungsgrades (Gl. 2) benötigt wird.

Da kein praktikables Verfahren zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten $P(s^g | x^g)$ existiert, wird auf ein Monte-Carlo-Verfahren ausgewichen, dem Gibbs-Sampler [3], welches Realisierungen s^g aus der Verteilung $P(s^g | x^g)$ zieht, wodurch eine näherungsweise Lösung der Aufgabe Gl. 2 ermöglicht wird.

Unüberwachtes Lernen der Modellparameter

In das Modell fließt eine Reihe von Parametern ein (z. B. die Parameter der Farbmodelle und des Potts-Modells). Dies macht ein unüberwachtes Lernen der Modellparameter möglich. "Unüberwacht" bedeutet, dass die Parameter allein anhand der vorliegenden Bilder, ohne Vorgabe einer Segmentierung, gelernt werden. Im Folgenden wird der Satz aller Parameter mit ρ bezeichnet.

Im Falle des unüberwachten Lernens ist der beste Parametersatz ρ^* für eine Kollektion von Bildern \bar{x} derjenige, der die Wahrscheinlichkeit der Bildkollektion $P(\bar{x}; \rho)$ maximiert [4]. Damit ist folgende Aufgabe zu lösen:

$$\rho^* = \arg \max_{\rho} P(\bar{x}; \rho) = \arg \max_{\rho} \sum_{\bar{s}} P(\bar{x}, \bar{s}; \rho) \quad 6)$$

Da eine geschlossene Lösung dieser Aufgabe nicht existiert, wird ein iteratives Verfahren, der Expectation-Maximization-Algorithmus [4] (kurz EM-Algorithmus), zur Lösung eingesetzt, welches eine lokal optimale Lösung liefert. Durch Einbettung der Iterationen des Gibbs-Samplers in die Iterationen des EM-Algorithmus entsteht ein kombinierter Erkennungs- und Lern-Algorithmus.

2.2.3 Zwischenergebnisse

In Bild 2 sind Beispiele für die erforderlichen Eingabebilder dargestellt. Durch den Nutzer muss zusätzlich eine Segmentierungsmaske vorgegeben werden (siehe Bild 2 (a)). Sie gibt den groben Bereich im Bild an, in dem die Gesteinskörner liegen und eliminiert störende Strukturen (z. B. Gefäßwand, Kunststoff, etc.). In Bild 3 sind Segmentierungsergebnisse von Ausschnitten der Bilder 2 (e) und (f) dargestellt.

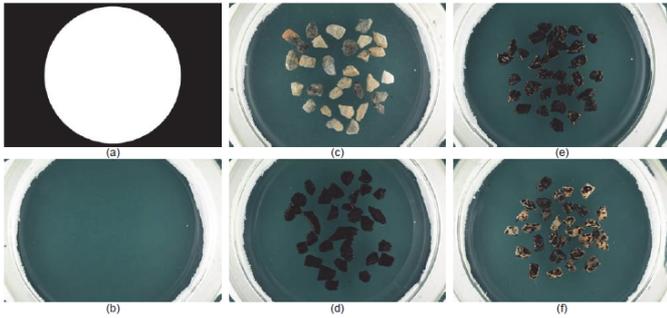


Bild 2: Beispiele für Eingabebilder (a) Segmentierungsmaske (b) Hintergrund mit Kristallisationsschale (c) Rohlinge (d) vollständig bitumentumhüllte Gesteinskörner (e) bzw. (f): Gesteinskörner nach 6 bzw. 24 Stunden des Rolling-Bottle-Versuchs

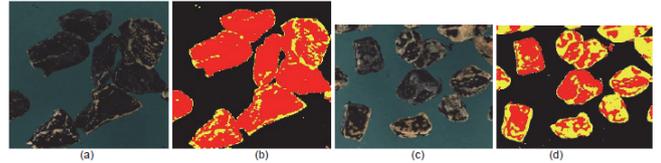


Bild 3: (a) bzw. (c): Ausschnitte aus Bild 2 (e) bzw. Bild 2 (f); (b) bzw. (d) Segmentierungen der Ausschnitte. Rot: Bitumen, Gelb: Stein. Schwarz: Hintergrund

Anzahl der benötigten Iterationen des EM-Algorithmus

In Bild 4 ist die Entwicklung des Umhüllungsgrades im Verlaufe des EM-Algorithmus am Beispiel von zwei Gesteinsarten Granit (Bild 4(a)) und Gneis (Bild 4(b)) dargestellt. Die Umhüllungsgrade stabilisieren sich jeweils nach ca. 500 Iterationen auf einen konstanten Wert.

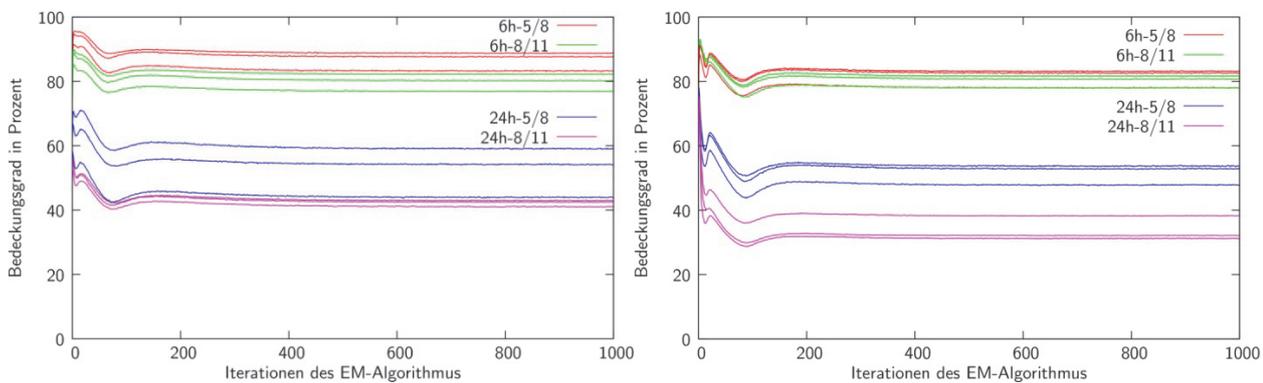


Bild 4: Entwicklung des Umhüllungsgrades im Verlaufe des EM-Algorithmus am Beispiel von zwei Gesteinsarten (a) Granit und (b) Gneis. Es sind jeweils die Verläufe nach 6 und nach 24 Stunden des Rolling-Bottle-Versuchs für beide Kornfraktionen 5/8 und 8/11 und für jeweils alle drei Teilproben dargestellt

2.2.4 Analyseprogramm

Das beschriebene Verfahren wurde in der Programmiersprache C++ implementiert und mit einer auf Qt 4.5 basierenden graphischen Oberfläche versehen. Das entstandene Analyseprogramm trägt den Namen "BitCover". Die Oberfläche ermöglicht die Eingabe aller zu untersuchenden Bilddaten, sowie die Justierung einiger Parameter. Insbesondere besteht die Möglichkeit zum Abspeichern von gelernten Farbmodellen, welche dann bei späterer erneuter Untersuchung der gleichen Gesteinsart wieder geladen werden können. Ist eine Bestimmung abgeschlossen, werden die ermittelten Umhüllungsgrade in einer Datei im CSV-Format abgespeichert, was die nachfolgende Weiterverarbeitung in einer Tabellenkalkulationssoftware ermöglicht.

2.3 Objektiv - Lichttechnik

2.3.1 Messansatz

Der hier dargestellte Ansatz realisierte die Bestimmung des Umhüllungsgrades auf Grundlage der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften von Gesteinskörnern und Bitumen [5]. Die Messungen dienen als Referenz für die Verfahrensentwicklung des oben beschriebenen Messansatzes und beanspruchen daher keine Praxistauglichkeit für die Verwendung in Straßenbaulaboratorien. Die Aufgabe besteht in der Bestimmung von Flächenanteilen, daher erfolgte die Messung ortsaufgelöster Leuchtdichtewerte anhand einer Leuchtdichtemesskamera LMK98-3 der Firma TechnoTeam [6] unter diffuser Beleuchtungsbedingung (Ulbrichtkugel).

Diffuse und konstante Beleuchtung ermöglicht die Verwendung fester Helligkeitsgrenzen für die gesamte Stichprobe. Das gewählte Verfahren weist inhaltliche Bezüge zum Näherungsverfahren zur Bestimmung des Reflexionsgrades ρ_{diff} gemäß DIN 5035 (Teil 6) [7] auf. Die Auswertungen erfolgten anhand der kameraeigenen Software. Die Messungen bestätigten deutliche Unterschiede zwischen den Reflexionsgraden der Gesteine (im Mittel $\rho = 0,27$, Werte zwischen $P=0,17$ und $0,38$) und des Bitumens (Mittelwert $\rho = 0,04$, keine bedeutsame Streuung) und belegen damit die Gültigkeit des Messansatzes.

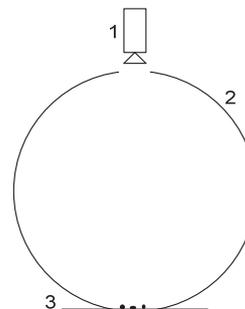


Bild 5: Messanordnung, 1-Leuchtdichtemesskamera, 2-Ulbrichtkugel, 3-Probenlagerung

Eine wichtige Frage im Rahmen des Messverfahrens betraf die erforderliche Stichprobengröße. Abzuwägen ist hier zwischen notwendiger Genauigkeit und Optimierung des Aufwandes. Hierzu wird zunächst der gleitende Mittelwert von

Einzelkörnern je Teilstichprobe verwendet. Es zeigte sich, dass obwohl die Einzelwerte in erheblichem Umfang streuen, stabile Mittelwerte nach 12 - 15, im günstigsten Fall bereits nach < 10 einzelnen Gesteinskörnchen erreicht werden. Als stabil wurde eine Mittelwertschwankung ± 1 Prozentpunkt angesehen. Betrachtet man die Ergebnisse derselben Teilstichprobe zudem bei unterschiedlicher Lagerung der Gesteinskörner (Mittelwert aus jeweils 15 Gesteinskörnern), können diese als angemessene Parallelstichproben gelten. Es zeigte sich eine nahezu perfekte Übereinstimmung der Messergebnisse (Abweichung ≤ 1 Prozentpunkt). Diese Ergebnisse können ebenfalls als Beleg der Verfahrensreliabilität im Sinne einer Wiederholgenauigkeit gewertet werden. Da die Testwiederholgenauigkeit nicht geringer sein kann, als die beobachtete Testgenauigkeit an parallelen Stichproben [8], ist für das leuchtdichtebasierte Verfahren von einer Wiederholgenauigkeit mindestens im Bereich $r = 0,99$ auszugehen (identische Gesteinsprobe vorausgesetzt). Als angemessen wurden daher Teilstichprobengrößen von 30 Gesteinskörnern festgelegt. Beim leuchtdichtebasierten Verfahren wurden diese in zwei verschiedenen Kornlagerungen vermessen, sodass die dabei erzeugten Mittelwerte jeder Teilstichprobe aus den Einzelwerten von jeweils 60 verschiedenen Gesteinskörnchenoberflächen gespeist werden.

2.3.2 Messung und Auswertung

Die Proben erreichen bereits separiert in Teilstichproben (Umfang je 30 Gesteinskörner) in Gefäßen gelagert, in Wasser die Messungen. Eine Teilstichprobe wird mittels Papierhandtuch und Kaltluftbeföhung (Labortemperatur 21 °C) getrocknet, anschließend vermessen und wieder der Wasserlagerung zugeführt. Da die untere Öffnung der Ulbrichtkugel die Anzahl gleichzeitig messbarer Gesteinskörner limitiert, werden jeweils 9 (8/11er Körnung) bzw. 16 (5/8er Körnung) Gesteinskörner gleichzeitig erfasst. Danach erfolgt die Umlagerung in eine zweite Orientierung, sodass ein weiterer Oberflächenabschnitt jedes Gesteinskorns erfasst wird. Entsprechend entstehen je Teilstichprobe 8 (8/11er Körnung) bzw. 4 (5/8er Körnung) Leuchtdichteaufnahmen. Zu jeder Probe werden ebenfalls Stichproben von Gesteinskörnern im Rohzustand sowie einigen Körnern mit vollständiger Umhüllung mit Bitumen vermessen. Sie dienen der Festlegung/Kontrolle von Helligkeitsgrenzwerten im Rahmen der Auswertungen. In den Versuchen hat sich die Verteilung der Helligkeitswerte für Bitumen als sehr konstant erwiesen. Schwankungen gibt es nur für die jeweiligen Gesteinsarten. Als sehr konstant sind auch die Helligkeitswerte des Hintergrundes (Kugellinnenbereich) anzusehen. Die Herausforderung bei der Auswertung besteht also in der Festlegung der Helligkeitsgrenzen des Gesteinsanteils. Zielstellung dabei ist die realitätsgetreue Abgrenzung von Gesteinskörnern zu Hintergrund und Bitumen. Um eine möglichst objektive Aussage im Sinne eines Referenzverfahrens treffen zu können, wurden die Helligkeitsgrenzen über alle Teilstichproben konstant gehalten, deren Gültigkeit aber jeweils kontrolliert.

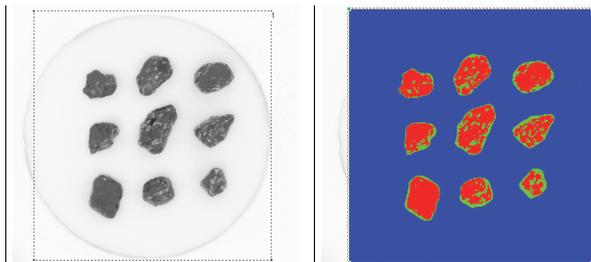


Bild 6: Links: Leuchtdichtebild einer Probe, Rechts: Zuordnung zu Helligkeitsklassen

Zur Auswertung werden bei festgelegten Helligkeitsgrenzen alle Pixel eines bestimmten Wertebereiches zu einer Klasse zusammengefasst (in Bild 6 visualisiert durch Blau-Hintergrund, Grün-Gestein und Rot-Bitumen). Die Ausgabe der Anzahl von Pixeln je Klasse erfolgt durch die Software. Es verbleibt die Bildung des Quotienten als fraglichem Anteilswert und damit Bedeckungsgrad. Die Ergebnisse je Bild werden zum Ergebnis der Teilstichprobe zusammengefasst, die ihrerseits wiederum gemeinsam den Probenmittelwert darstellen.

3 Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen der Forschungsarbeit konnten die subjektive Ermittlung des Umhüllungsgrades innerhalb des Rolling-Bottle-Versuchs mittels des entwickelten Auswertprogramms "BitCover" objektiviert werden. Sofern alle Randbedingungen eingehalten werden, liefert das Programm reproduzierbare Messergebnisse mit relativ einfachen Mitteln. Die Messmethode erscheint daher robust und für eine Praxisanwendung geeignet. In Bild 7 sind beispielhaft für die Gesteinsart Granit der Körnung 5/8 und 8/11 die Messergebnisse grafisch dargestellt.

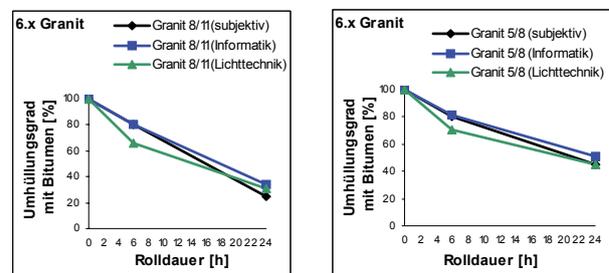


Bild 7: Ergebnisse Granit

Trägt man alle Ergebniswerte der untersuchten Gesteinsproben beider objektiven Messverfahren (Informatik und Lichttechnik) in einem Diagramm auf, ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0,93. Dies weist eine gute Übereinstimmung der beiden objektiven Verfahren zueinander aus. Dabei liegen die absoluten Werte des lichttechnischen Messverfahrens tendenziell unter denen des bildanalytischen der Informatik.

Der Einfluss von Kornumlagerungen auf das Messergebnis wurde für drei Gesteinsarten untersucht. Die Übereinstimmung der Probenergebniswerte ist sehr hoch. Daraus kann geschlossen werden, dass bei einem Stichprobenumfang von 30 Einzelsteinen ein repräsentatives Ergebnis bezogen auf den tatsächlichen Umhüllungsgrad vorausgesetzt werden kann. Ein bedeutsamer Zusammenhang wurde zwischen der Dichte der untersuchten Gesteinsarten und dem ermittelten Bedeckungsgrad beobachtet. Gesteine höherer Rohdichte weisen tendenziell höhere Bedeckungsgrade auf. Der Zusammenhang findet sich in gleicher Größenordnung ebenfalls bei Gesteinen der Körnung 8/11. Eine Korrelation zwischen Belichtungszeit und Messergebnis konnte nicht nachgewiesen werden. Der Umhüllungsgrad nimmt aber mit zunehmender Belichtungszeit systematisch ab. Die mögliche Ursache dieser systematischen Abweichung kann daran liegen, dass bei einer besseren Belichtung dunkleres Gestein leichter von Bitumen unterschieden werden kann.

4 Folgerungen für die Praxis

Ein objektives Messverfahren erscheint notwendig, um den subjektiven Einfluss der Auswertung zu reduzieren. Mittels computergestützter Auswertung lassen sich vergleichbare

sowie reproduzierbare (und damit auch dokumentierbare) Ergebnisse erzielen. Ringversuche an der TU Braunschweig und der LIST - Gesellschaft für Straßenwesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen mbH zeigen teilweise erhebliche Unterschiede bei Ergebnissen der Rolling-Bottle-Tests. Die Anwendung eines objektiven Messverfahrens ist daher notwendig. Um die Ergebnisse weiter zu verbessern ist auch die Versuchsdurchführung zu überprüfen. Die Eigenschaften des Wassers und die Umgebungsparameter während der Versuchsdurchführung können erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse zu haben.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2005): Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen.
- [2] Schlesinger, D.; Flach, B. (2008): A Probabilistic Segmentation Scheme, Pattern Recognition, In: LNCS 5096, S. 183 – 192.
- [3] Geman, S.; Geman, D. (1984): Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions, and the Bayesian Restoration of Images. Pattern Analysis and Machine Intelligence, In: IEEE Transactions on device and material reliability, 6(6), S. 721 - 741.
- [4] Schlesinger, M. I.; Hlaváč, V. (2002): Ten lectures on statistical and structural pattern recognition, (Computational Imaging and Vision ; 24).
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (1978): DIN 5036-1; Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Teil 1: Begriffe, Kennzahlen.
- [6] Schmidt, F.; Krüger, U.; Wolf, S. (2004): Applikationen der ortsaufgelösten Licht- und Farbmessung. Licht2004, Dortmund, 19.-22.09.2004.
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (2006): DIN 5035-6 ; Beleuchtung mit künstlichem Licht; Teil 6: Messung und Bewertung.
- [8] Steyer, R.; Eid, M. (2001): Messen und Testen. 2., korr. Auflage; Berlin.