

Sommerliches Überhitzen städtischer Strukturen – helle Betonflächen regulieren

DI Martin PEYERL und Mag.(FH) DI Dr. Stefan KRISPEL

Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZfi), Abteilung Beton, Wien

Die Erwärmung unseres Planeten ist mittlerweile nach jahrelangen Diskussionen ein unbestrittenes Faktum. Aufgrund der steigenden Emission von Treibhausgasen, allein in Österreich betrug der Anstieg der CO₂ Emission von 1999 bis 2004 18,6 %, ist mit einem merklichen Temperaturanstieg in den nächsten Jahrzehnten zu rechnen [8]. Gleichzeitig nimmt der Mensch immer mehr Flächen für Wohnraum und Industrie in Anspruch, wie am stetigen Wachstum der Ballungsräume ersichtlich ist. Aus diesem Grund kommt der Untersuchung des sich vom Umland abhebenden Stadtklimas eine große Bedeutung zu.

Eines der wichtigsten Phänomene der Stadtklimatologie ist die Ausprägung eines zusätzlichen Treibhauseffektes in Städten, so genannter urbaner Wärmeinseln oder Heat-Islands. Unter diesem Begriff versteht man, dass sich das Klima einer Stadt merklich von den großräumig bedingten Werten abhebt, ein Effekt der sich

besonders drastisch an heißen und windstillen Sommertagen zeigt [6]. Dadurch wird zusätzlich zu der allgemeinen Erwärmung das Temperaturniveau im urbanen Bereich nochmals erhöht. Diese Temperaturerhöhung an heißen Tagen führt neben einem vermehrten Kühlenergiebedarf zu einem beträchtliches Absinken des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit der Gesamtbevölkerung [5].

Die Veränderung des Klimas einer Stadt gegenüber dem Klima des Umlandes beruht auf einer Vielzahl von Faktoren. Neben allgemeinen Einflussparametern wie Lage, Stadtgestalt, Größe der Stadt sowie Bebauungsgeometrie und daraus resultierenden Strömungshindernissen spielen auch Faktoren wie die Wärmeemission von Gebäuden und die verwendeten Baumaterialien eine wesentliche Rolle auf die Ausprägung einer städtischen Wärmeinsel [1].

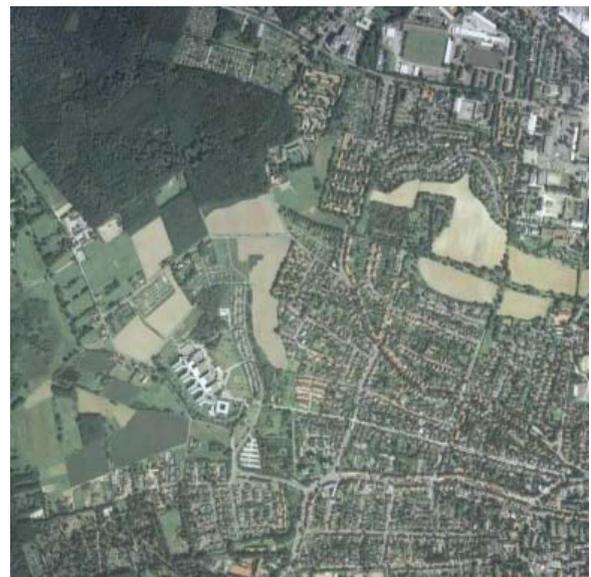


Abbildung 1: Thermalbild der Stadt Osnabrück (Stadtteil Westerberg) im Vergleich zu einem Satellitenbild, Thermalbild: [10] Tages-Satellitenbild: [2]

Großräumige Oberflächentemperaturmessung mittels Satellitenbildaufnahmen

Eine optische Darstellung von Oberflächentemperaturen, welche das Klima von Siedlungsgebieten maßgeblich beeinflussen, ist mit Thermalbildern möglich. Diese Aufnahmen erlauben die Darstellung von Bereichen unterschiedlicher Temperatur. Abbildung 1 zeigt ein Abend-Thermalbild eines Stadtteils von Osnabrück (Deutschland) mit einer Auflösung von einem Kelvin im Vergleich zu einer Tages-Satellitenbildaufnahme des gleichen Stadtteils [10]. Sehr deutlich ist zu erkennen, dass sich die Straßenflächen von den Grünflächen aber auch von den Siedlungsflächen durch deutlich höhere Oberflächentemperaturen abheben. Die Waldgebiete erscheinen durch die Kühlfunktion der Blätter und anschließend dem Abfließen der Luft in den Stammraum, was wiederum zum Nachfließen von warmer Luft führt, auf Thermalbildern als warm [5, 10].

Einflussfaktoren der Temperaturerhöhung in Städten

Einerseits leisten Wärmeemission von Gebäuden und Verbrennungsprozessen einen Beitrag zur Ausbildung einer urbanen Wärmeinsel (Heat-Island), der viel größere Wärmeintrag erfolgt jedoch durch die Strahlungswärme der Sonne. Durch diesen Strahlungseintrag der Sonne verursachen die, wie in Abbildung 1 deutlich sichtbaren, höheren Temperaturen der Straßenflächen einen nicht unerheblichen Teil der Temperaturerhöhung in urbanen Gebieten.

Generell kann der Energieeintrag der Sonne auf eine Fläche mittels der Energiebilanzgleichung einer Oberfläche (Gleichung I) beschrieben werden [11].

$$Q_{net} = Q + B + H + V \quad [I]$$

- Q_{net} Summe aller Energieeinträge an einer Oberfläche
- Q Strahlungsbilanz

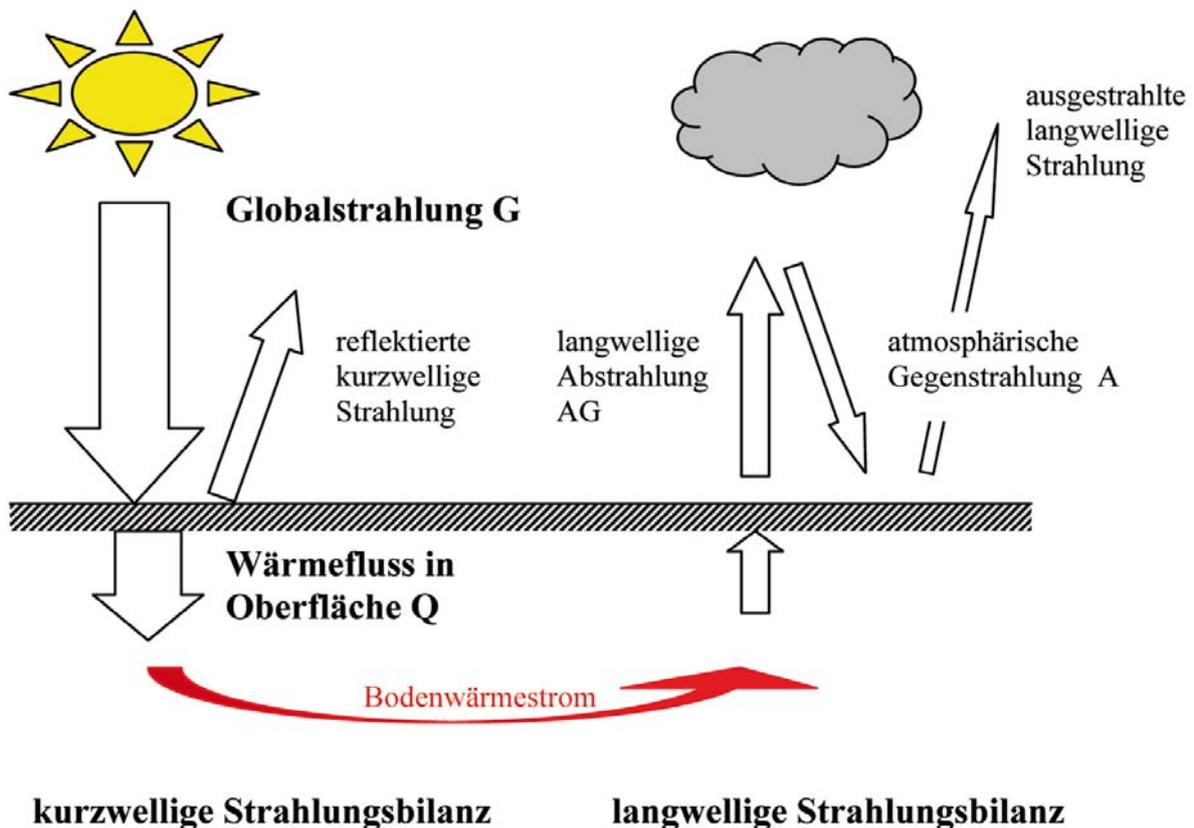


Abbildung 2: Strahlungsbilanz einer Oberfläche, Eigendarstellung nach [11]

- B Bodenwärmestrom (Wärmestrom in tiefer liegende Bodenschichten)
- H Strom fühlbarer Wärme (Ausgetauschte Wärmemenge zwischen Boden und Luft)
- V Strom latenter Wärme (Energiefluss zufolge Kondensations- und Verdunstungsvorgängen)

Den größten materialabhängigen Einfluss auf die in eine Oberfläche induzierte Energie weist von den oben aufgelisteten Termen der Anteil der Strahlungsbilanz auf. Deshalb ist die weitere Behandlung dieses Themas auf die Betrachtung des durch Gleichung II definierten bzw. Abbildung 2 dargestellten Terms Q fokussiert [5, 11].

$$Q = \underbrace{(1-\alpha) \cdot G}_{\text{kurzwellige Strahlungsbilanz}} + \underbrace{(AG-A)}_{\text{langwellige}} \quad \text{[II]}$$

- Q Strahlungsbilanz einer Oberfläche (Nettostrahlung)
- α Albedo einer Oberfläche
- G Globalstrahlung (Summe der auf eine Oberfläche auftreffender Sonnenstrahlung)
- AG Atmosphärische Gegenstrahlung
- A langwellige Ausstrahlung von der Erdoberfläche

Gleichung II lässt sich in eine kurz- und in eine langwellige Strahlungsbilanz aufspalten. Da die langwellige Strahlungsbilanz einen weit geringeren Einfluss auf die Erwärmung der betref-

fenden Oberfläche ausübt, wird auf eine genauere Erläuterung dieser Faktoren verzichtet und im Folgenden der Anteil der kurzwelligen Strahlungsbilanz genauer beschrieben [5].

Abbildung 2 zeigt, dass ein Teil der eintreffenden Globalstrahlung G an einer Oberfläche direkt als reflektierte kurzwellige Strahlung wieder an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Globalstrahlung als Summe der auf eine Oberfläche auftreffenden Sonnenstrahlung kann bei einem Vergleich verschiedener nebeneinander angeordneter Oberflächen als konstant angenommen werden.

Die Albedo einer Oberfläche α wird durch das Verhältnis zwischen kurzwelliger Ein- und Ausstrahlung (Albedo) definiert und ist materialabhängig. Sie wird mit einem Albedometer gemessen wobei sowohl die Globalstrahlung als auch die von einer Oberfläche reflektierte Strahlung mittels zweier getrennter Messeinheiten erfasst wird. Tabelle 1 liefert eine Zusammenstellung publizierter Albedowerte unterschiedlicher Materialien, die speziell in städtischen Gebieten vorherrschen [5].

Die in Tabelle 1 angegebenen Werte unterstreichen, dass sich die Wahl von unterschiedlichen Materialien aufgrund ihres Albedowerts auf die Strahlungsbilanz und somit auf die Erwärmung der jeweiligen Oberflächen auswirken. Deutlich erkennbar ist, dass Betonflächen im Mittel ein höheres Albedoniveau aufweisen als Asphaltflächen [11]. Das Albedoniveau von Beton kann durchaus mit dem einer Wiese verglichen wer-

Material	Kurzwelliges Albedo [%]		
	Nefzger et al 1997 [7]	Helbig et al 1999 [3] Matzarakis 2001 [6]	Fezer 1995 [1]
Asphalt gealtert trocken	19	5-20	10-20
Asphalt gealtert nass	13		
Asphalt neu trocken	10		
Asphalt neu nass	7		
Beton unterschiedl. Alters trocken	24	10-35	10-35
Beton unterschiedl. Alters nass	17		
Beton weiß		71	
Wiese		15-25	
Laubwald		15-20 (25)	

Tabelle 1: Albedowerte ausgewählter Materialien nach [1, 3, 6 und 7]

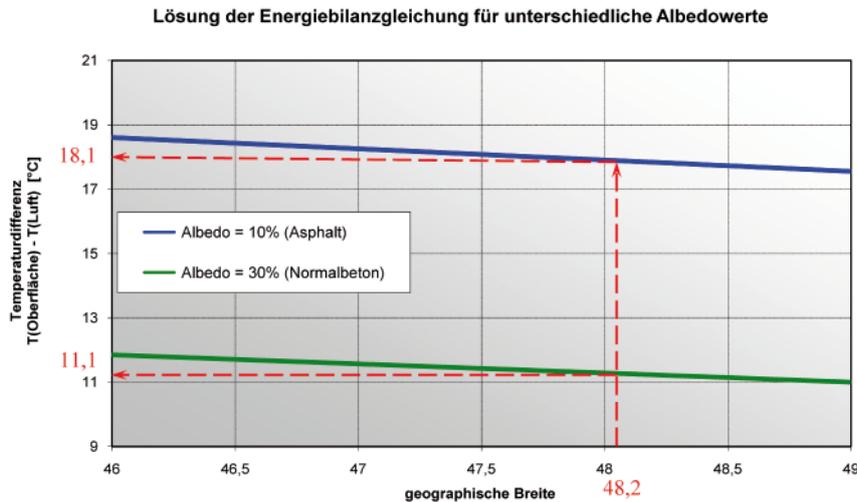


Abbildung 3: Ergebnisse der Lösung der Energiebilanzgleichung für Albedowerte von 10 % (Asphalt) und 30 % (Beton) bei einer Lufttemperatur von 30 °C, Eigendarstellung nach [11]

den, wobei besonders heller Beton noch bessere Werte erzielt. Bei Materialien mit niedriger Albedo kommt es in weiterer Folge besonders in den heißen Sommermonaten zu einem erhöhten Wärmeeintrag in die entsprechenden Bauteile und in weiterer Folge zu einer Erwärmung des gesamten Umfeldes [5].

Auswirkung unterschiedlicher Albedowerte auf Oberflächentemperaturen

Um den Einfluss der Reflexionseigenschaften von Oberflächen abschätzen zu können, wurde die in Gleichung I beschriebene Energiebilanzgleichung in Abhängigkeit von der in Österreich relevanten geografischen Breite für typische Albedowerte von Asphalt und Beton gelöst [11]. Die grafische Darstellung in Abbildung 3 zeigt diese Zusammenhänge für Asphalt und Beton.

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die Änderung der Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur durch eine Änderung der Albedos stark beeinflusst wird [11]. Deutlich wird dies beim Vergleich der Oberflächentemperaturen von Straßenbaustoffen mit unterschiedlichem Albedowert. Normalbeton weist im Mittel einen Albedowert von 30 % auf (grüne Linie in Abbildung 3) während Asphalt etwa ein Albedowert von 10 % zugeordnet werden kann (blaue Linie in Abbildung 3). In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Lösung der Energiebilanzgleichung für Albedowerte von 10 % (Asphalt) und 30 % (Normalbe-

ton) bei einer Lufttemperatur von 30 °C und der für die Stadt Wien zutreffenden geographischen Breite von 48,2 °N dargestellt. Die Differenz von Oberflächen- zu Lufttemperatur beträgt bei einem Albedowert von 30 % (Normalbeton) etwa 11,1 °C und bei einer Albedo von 10 % (Asphalt) etwa 18,1 °C. Daraus ergeben sich im hier angeführten Beispiel Oberflächentemperaturen von 41,1 °C bei Beton (30 °C Lufttemperatur und 11,1 °C Temperaturdifferenz) und 48,1 °C (30 °C Lufttemperatur und 18,1 °C Temperaturdifferenz) bei Asphalt. Dies bedeutet eine nicht unbeträchtliche Differenz der Oberflächentemperaturen der beiden untersuchten Baustoffe von 7 °C [5].

Messung des Erwärmungsverhaltens von Bauteiloberflächen

Seit August 2007 wurden vom Forschungsinstitut der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie (VÖZFI) Versuche über das unterschiedliche Erwärmungsverhalten der Baustoffe Asphalt (Bitumen) Normalbeton und besonders hellem Weißbeton durchgeführt. Hierzu erfolgte die Herstellung von Probekörpern mit den Abmessungen 40 cm * 40 cm * 20 cm, jeweils mit im innerstädtischen Straßenbau häufig verwendeten Rezepturen. Mit Hilfe von Temperaturfühlern an der Oberfläche und in unterschiedlichen Tiefen des Probekörpers sowie zwei zusätzlichen Fühlern zur Messung der Lufttemperatur unter direkter Sonnenbestrahlung bzw. zur Messung der Lufttemperatur im Schatten war es möglich,



Abbildung 4: Versuchskörper zur Messung des Erwärmungsverhaltens am Dach des Institutsgebäudes der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie [Foto VÖZFI]

das Erwärmungsverhalten der Versuchskörper zu untersuchen. Abbildung 4 zeigt die Lagerung der Probekörper sowie die Messeinrichtung zur Temperaturmessung.

Exemplarisch ist in Abbildung 5 der Verlauf der Oberflächentemperatur sowie der Lufttemperatur in der Sonne und im Schatten für den 27. Juli 2008 dargestellt. Beim Vergleich der Oberflächentemperaturkurven ist ein deutlicher Unterschied, speziell bei den Tageshöchstwerten dieser beiden Baustoffe erkennbar. Während Normalbeton um 16 Uhr eine Maximaltemperatur von 41 °C und Weißbeton von knapp 40 °C erreicht, klettert die Temperatur der Bitumenoberfläche auf knapp 48 °C. Ebenso wie in der in Abbildung 4 visualisierten Lösung der Energiebilanzgleichung beträgt auch bei den praktischen Versuchen, bei einer nahezu gleichen Lufttemperatur von 30 °C, die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Werkstoffen 7 °C.

Zusätzlich konnte durch die Temperaturmessungen gezeigt werden, dass dieselbe Temperaturdifferenz bis in eine Tiefe von 10 cm unter der Oberfläche auftritt, wobei an sehr heißen Tagen im August eine Differenz der beiden Oberflächentemperaturen von bis zu knapp 10 °C festgestellt

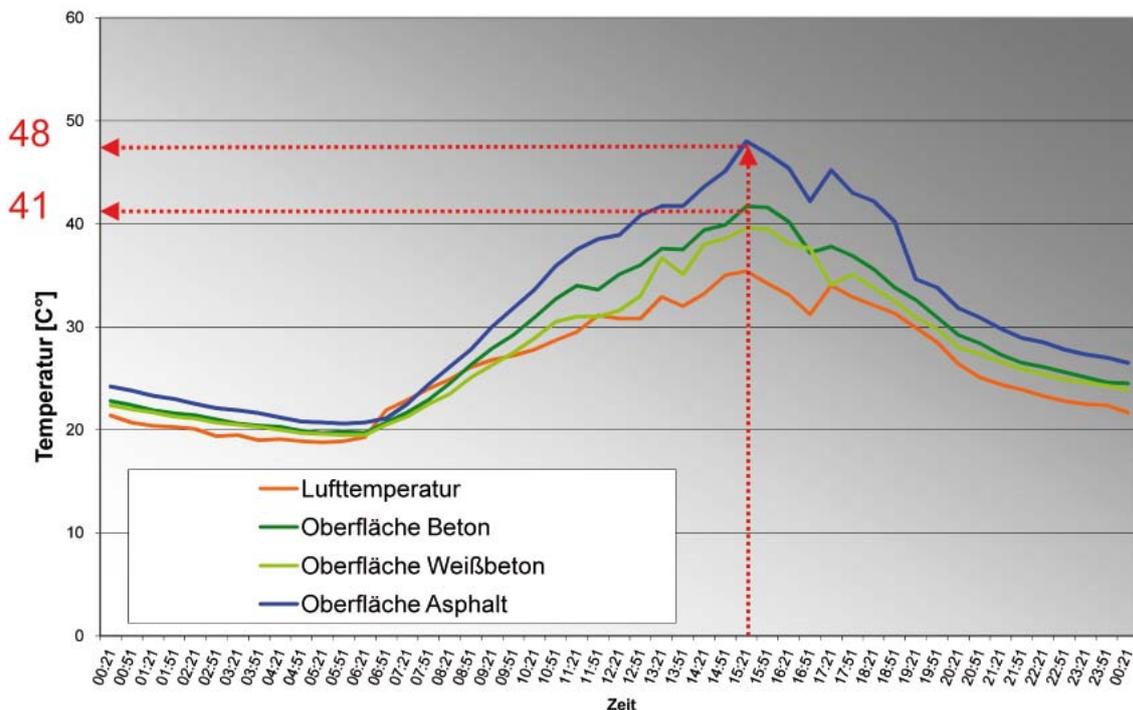


Abbildung 5: Oberflächen- und Lufttemperatur der Bitumen- sowie Normal- und Weißbeton-Probekörper 27.7.2008 [VÖZFI]



Abbildung 6: Optische Wirkung heller und dunkler Verkehrsflächen im Stadtgebiet [Fotos VÖZFI]

wurde. Gerade an heißen Sommertagen kommt es, wie die Versuche bestätigt haben, bei Materialien mit niedriger Albedo wie Bitumen oder Asphalt zu einer verstärkten Erwärmung der Bauteile. Dies verursacht wiederum eine Erwärmung des gesamten Umfeldes und führt zur Ausbildung von städtischen Wärmeinseln (Heat Islands). Gemäß den o. a. Darlegungen erscheint zur Verbesserung des urbanen Klimas der Einsatz von Beton, aufgrund seiner thermalen Eigenschaften, als Straßenbaustoff im Gegensatz zu bituminösen Deckschichten als äußerst zweckmäßig [5].

Optische Wirkung von hellen Oberflächen

Die Stadt Wien weist eine Gesamtfläche von 415 km² auf, davon entfallen 62 % auf Grünflächen, etwa 33 % auf Bauflächen bzw. sonstige Flächen und 5 % entfallen auf Gewässer [8]. Annähernd 10 % der Gesamtstadtfläche, also rund 40 km² sind als Verkehrsfläche ausgewiesen [9]. Dies unterstreicht die Bedeutung von hellen Oberflächenmaterialien im Straßenbau, d. h. den positiven Einfluss von Materialien mit hohen Albedo, auf das urbane Klima. Bei der Verwendung von Beton kann durch die, insbesondere im Sommer auftretenden deutlich geringeren Bauteiltemperaturen, die Umgebungstemperatur maßgeblich verringert werden, was wiederum zu einem niedrigerem Kühlenergiebedarf (Gebäudeklimaanlagen, etc.) führt. Sehr deutlich ist der

Unterschied der optischen Wirkung heller und dunkler Flächen im innerstädtischen Bereich in Abbildung 6 ersichtlich [5].

Zusätzlich zu der geringeren Erwärmung in den Sommermonaten wirken sich hellere Betonfahrbahnen generell positiv auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer aus. Speziell bei Regen und Dunkelheit kommt es durch bessere Sichtbarkeit zu einer Erhöhung der subjektiven und objektiven Sicherheit der Verkehrsteilnehmer. Der Haupteinflussfaktor für die Erzielung einer entsprechenden Helligkeit der Fahrbahnoberfläche ist neben der verwendeten Gesteinskörnung jedoch die unterschiedliche Matrix. Abbildung 7 stellt den Farbunterschied der Matrix zementgebundener und bituminöser Bindemittel bei Verwendung einer gleichartigen Gesteinskörnung dar [4].

Auch bei Verwendung von dunklen Gesteinskörnungen im Oberbeton von Straßen mit Waschbetonoberflächen kann ein annähernd gleich hohes Niveau an Helligkeit wie bei der Verwendung von hellen Gesteinskörnungen erreicht werden. Abbildung 7 und 8 zeigen eine Waschbetonoberfläche mit einer hellen Gesteinskörnung sowie eine Oberfläche mit dunkler Gesteinskörnung unter der Verwendung des Zusatzes Titandioxid. Die Betonmatrix mit der dunklen Gesteinskörnung erreicht zwar nicht die dieselbe Helligkeit wie die Matrix mit der hellen Gesteinskörnung ist aber noch immer, im Vergleich zum Asphalt signifikant heller [4].



Abbildung 7: Farbunterschied in der Matrix von Beton und Asphalt [Foto VÖZFI]



Abbildung 8: Waschbetonoberfläche mit heller Gesteinskörnung [Foto VÖZFI]



Abbildung 9: Waschbetonoberfläche mit dunkler Gesteinskörnung und der Verwendung von Titandioxid [Foto VÖZFI]

Ein weiterer positiver Effekt ist, dass bei Verwendung von helleren Fahrbahnoberflächen aus Beton die Straßenfläche energiesparender und optisch heller ausgeleuchtet werden kann. Dadurch wird das Sichtfeld gerade in der Nacht erweitert was speziell auf Schutz- und Gehwegen zu einer Erhöhung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer führt. Da die gleiche Ausleuchtung von hellen Betonverkehrsflächen mit einem geringeren Energieaufwand erreicht werden kann, ist auch mit einer Reduktion der Beleuchtungskosten zu rechnen [4].

Zusammenfassung

Mitbedingt durch das stetige Wachsen der Ballungsräume und die allgemeine globale Erwärmung kommt es an heißen Sommertagen zu äußerst hohen Lufttemperaturen im urbanen Bereich. Einen wichtigen Beitrag zur Reduktion dieser Temperaturmaxima würden Absenkungen der Oberflächentemperaturen liefern. Dies kann durch den Einsatz von Baumaterialien, welche ein höheres Reflexionsvermögen (Albedo) aufweisen, erzielt werden. Da Straßen etwa 10 % der Flächen eines Stadtgebietes in Anspruch nehmen und sich dieser Bereich durch Mehrfachreflexion an den Häuserfronten überdurchschnittlich erwärmt, ist hier die Wahl eines Baustoffes mit hoher Albedo besonders sinnvoll. Beton eignet sich aufgrund seiner im Vergleich zum Asphalt deutlich höheren Albedo sehr gut als Straßenbaustoff, da aufgrund dieser Eigenschaft die Oberflä-

chentemperaturen und damit die Temperaturen des gesamten Umfeldes in den Sommermonaten reduziert werden können. Bei der Verwendung von Beton bewirkt der niedrigere Kühlenergiebedarf durch geringere Umgebungstemperaturen sowie der reduzierte Energieaufwand bei der Ausleuchtung von helleren Oberflächen wiederum eine Reduktion des Kohlendioxidausstoßes womit ein nicht unerheblicher Beitrag zu den österreichischen Bemühungen zur Erreichung der Kyoto-Ziele geleistet wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Fezer, F.: Das Klima der Städte, Perthes Geographie Verlag, Gotha, 1995.
- [2] Google Earth.: Digitaler Satellitenbildatlas, Version 4, 20.02.2007 <http://earth.google.de/>.
- [3] Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M.J.: Stadtklima und Luftreinhaltung, 2. Aufl. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1999.
- [4] Krispel, St.: Increase of safety of concrete pavements – bright concrete pavements with dark aggregates, 10th International Symposium on Concrete Roads, Proceedings, 18.-22. September 2006, Brüssel, Belgien.
- [5] Krispel, St.; Peyerl M.: Erwärmungseffekte durch befestigte Flächen im städtischen Bereich, Zement & Beton, Heft 4, 2007.
- [6] Matzarakis, A.: Die thermische Komponente des Stadtklimas, Habilitation an der Universität Freiburg, Freiburg 2001.

- [7] Nefzger, H., Karipot A.: Einfluß von Strahlung und Mikroklima auf Straßenwetterprognosen, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1997.
- [8] Statistik Austria - Bundesanstalt Statistik Österreich, Luftschadstoffemissionen der österreichischen Wirtschaft – Gibt es eine positive Entwicklung?; Pressemitteilung 11.06.2007 http://www.statistik.at/web_de/dynamic/statistiken/energie_und_umwelt/umwelt/023946.
- [9] Straßen Wien (MA 28) – Zahlen und Fakten, Bezugsjahr 2005; 20.02.2007 <http://www.wien.gv.at/verkehr/strassen/fakten/zahlen.html>.
- [10] Wessels, K.; Stadtklimatologische Untersuchung der Stadt Osnabrück auf der Basis von Thermalscannerbefliegungen, Projekt im Auftrag der Stadt Osnabrück, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung Universität Osnabrück 1998, 20.02.2007 <http://www.igf.uni-osnabrueck.de/mitarbeiter/delange/projekte/sko/sko.html>.
- [11] Wistuba, M.; Litzka, J.; Blab, R.: Klimakenngrößen für den Straßenoberbau in Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung Heft 507, Wien 2001.