UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

UFZ-Bericht

UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht • UFZ-Bericht

Nr. 12/1996

Zwischenbericht zum Forschungsprojekt

Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen

Jürgen Breuste, Thomas Keidel,
Gotthard Meinel*, Birgit Münchow,
Maik Netzband*, Michael Schramm**

UFZ-Umweltforschungszentrum
Leipzig-Halle GmbH
*Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden
**Ingenieurgemeinschaft Wasser-Abfall-Boden,
Karlsruhe

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wird mit Mitteln des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung gefördert (Z-8802.3524/9).

ISSN 0948-9452

UFZ-Bericht Nr. 12/1996

Stadtökologische Forschungen Nr. 7

Zwischenbericht zum Forschungsprojekt

Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen

Jürgen Breuste, Thomas Keidel, Gotthard Meinel,
Birgit Münchow, Maik Netzband,
Michael Schramm

Ingenieurgemeinschaft Wasser-Abfall-Boden, Karlsruhe
Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Projektleitung: Jürgen Breuste

Projektbereich Urbane Landschaften

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wird mit Mitteln des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung gefördert (Z-8802.3524/9)
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung
Jürgen Breuste I

Literaturübersicht
Birgit Münchow II

Kennzeichnung von unterschiedlichen Flächenbefestigungen hinsichtlich ihrer hydraulisch-physikalischen Eigenschaften
Michael Schramm III

Erfassung der Bodenversiegelung in Stadtstrukturtypen
Birgit Münchow und Thomas Keidel IV

Erarbeitung von Übersichtskarten zur Versiegelungsintensität mit verschiedenen Fernerkundungsmethoden
Maik Netzband und Gotthardt Meinel V

I Eineitung

Jürgen Breuste

1. Einleitung

Die Bodencharta des Europarates aus dem Jahre 1979 zählt Böden zu den kostbarsten Gütern der Menschheit, die es zu schützen gilt (BLUME, 1992). Sie sind unersetzbare Grundlage des Lebens im Zusammenspiel mit Wasser und Luft sowie Flora und Fauna. Hierzulande, wo Versteppung und Versalzung keine große Rolle spielen, ist die radikalste ökologische Schädigung des Bodens die Überbauung. Hierdurch wird der Boden auf unabsehbare Zeit dem Naturkreislauf entzogen (LERSNER, 1989).

WESSOLEK (1988) nennt wichtige Konsequenzen der Bodenversiegelung, die zu einer Veränderung im System Atmosphäre - Boden - Grundwasser führen:

- Eingriff in den Wärmehaushalt
- Abtrag des humosen Oberbodens und Auftrag an anderer Stelle
- Verminderung der Filter-, Puffer- und Transformatoreigenschaften
- Zerstörung des Bodengefüges
- Veränderung des Wasser- und Nährstoffhaushalts
- Abnahme von Bodenfauna- und flora (Barriereeffekt sowie Verringerung der mikrobiellen Aktivität)

Aus den oben genannten Punkten lassen sich die vielfältigen ökologischen Folgewirkungen der Bodenversiegelung ableiten wie der Verlust von Lebensräumen für Flora und Fauna, die Zerschneidung ehemals zusammenhängender Vegetationsflächen (Verinselung), der Eintrag von Schadstoffen durch nutzungsspezifische Belastungen, die Verringerung der Grundwasserneubildung, die Erhöhung des Oberflächenabflusses, die Beeinflußung der klimatischen Verhältnisse in der Stadt, die Verminderung der Wohn- und der Lebensqualität.

Insbesondere in den neuen Bundesländer sind umfangreiche Versiegelungsmaßnahmen vor allem auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Flächen durchgeführt worden. Das Investitionserleichterungs- und Wohnbaulandgesetz fördert das Bauen im Außenbereich und setzt Signale für einen ungehemmten Bodenverbrauch. Zusätzlich ist ein Verlust von offenen Flächen in den bereits hoch verdichteten Kerngebieten zu verzeichnen. Angesichts der ständigen Zunahme des Anteils versiegelter Flächen und dem damit verbundenen Verlust wichtiger Bodenfunktionen ist deren Schutz und eine Begrenzung der Versiegelung erforderlich.

Vor diesem Hintergrund hat das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung, vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, den Projektbereich Urbane Landschaften des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle GmbH mit dem Forschungsvorhaben "Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen" beauftragt. Im vorliegenden Bericht werden ausgewählte Zwischenergebnisse des Projektes vorgestellt.

In Kapitel II wird einführend ein Literaturüberblick über die hier dargestellten Themenschwerpunkte des Projektes gegeben: Erhebungsmethoden zur Erfassung der Bodenversiegelung und Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von unterschiedlichen Flächenbefestigungen. Ein wichtiger Aspekt der Bodenversiegelung ist die negative Beeinflussung der natürlichen örtlichen Versickerung des Niederschlags, verbunden mit erhöhtem Oberflächenabfluß und beschleunigter Abflußkonzentration. Dieser Eingriff in die wichtigen Funktionen des Bodens bei der Regelung des Wasserhaushalts kann zur Verschärfung der Hochwassersituation an Fließgewässern beitragen und hat außerdem einen negativen Einfluß auf die Grundwasserneubildung. Um quantitative Aussagen über diesen Aspekt der Bodenversiegelung treffen zu können, wurden in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgemeinschaft Wasser-Abfall-Boden, Karlsruhe, Beregnungsversuche in situ zur Kennzeichnung hydraulisch-physikalischer Eigenschaften von unterschiedlichen Flächenbefestigungen durchgeführt. Diese Ergebnisse sind im Kapitel III dargestellt. Darauf aufbauend sollen Bewertungsansätze abgeleitet werden, die eine Beurteilung der Versickerungsleistung von unterschiedlichen Belägen erlauben. Die Erfassung und Bewertung des Ausmaßes der Versiegelung von Böden im urbanen Raum ist ein weiterer Forschungsschwerpunkt. In ausgewählten Stadtstrukturtypen wird über Detailkartierungen im Maßstab 1:500 die Bodenversiegelung erfaßt. In Kapitel IV wird diese Art der Bodenbeanspruchung in Wohnbebauungstypen in Leipzig und Dresden analysiert. Neben der terrestrischen Versiegelungskartierung werden verschiedene Fernerkundungsmethoden auf ihre Eignung zur Erhebung der Versiegelung vom Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden untersucht. In diesem Forschungsbericht wird im Kapitel V die Eignung verschiedener Sensoren für die Erstellung von Übersichtskarten zur Versiegelungsintensität aufgezeigt.

Literatur

BLUME, H.-P. (1992): Einführung .- In: Handbuch des Bodenschutzes. BLUME, H.-P.(Hrsg.), 1 - 3

LERSNER, H.v. (1989): Schutz des Bodens als umweltpolitische Aufgabe.- In: Bodenschutz - Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Boden, Landschaft und Grundwasser. ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., EINSELE, G. u. HARESS, H.-M. , 1988, Bd. 2, 3Lfg. V/89, 1 - 12, Berlin

WESSOLEK, G. (1988): Auswirkungen der Bodenversiegelung auf Boden und Wasser.- In: Bodenversiegelung im Siedlungsbereich (= Informationen zur Raumentwicklung, H. 8/9, 535 - 541)

II Literaturübersicht

Birgit Münchow

Inhalt

1. Begriffsbestimmung Bodenversiegelung 3
2. Erhebungsmethoden zur Erfassung der Bodenversiegelung 6
3. Untersuchungen zum Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Flächen 19
4. Literatur 39

Abbildungen

Abb. 1: Endinfiltrationsraten für verschiedene Befestigungsarten 29
Abb. 2: Jahresgang der Bodentemperaturen 1990-1992 in drei Tiefen bei unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung 36
Abb. 3: Jahresgang der Matrixpotentiale 1990-1992 in drei Tiefen bei unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung 36

Tabellen

Tab. 1: Versiegelungsfaktoren nach Meßtischblattsignaturen 7
Tab. 2: Übersicht über die Belagsklassen 9
Tab. 3: Durchschnittlicher Versiegelungsgrad, Bebauungsgrad undBelagsklassen-verteilung der unbebauten versiegelten Fläche nach Flächentypen 9
Tab. 4: Versiegelungstreue von Wohnbebauungen in Hamburg 11
Tab. 5: Versiegelungskategorien der Übersichtskartierung 12
Tab. 6: Versiegelungsarten unter hydrologischen Aspekten 13
Tab. 7: Übersicht der Versiegelungskategorien und -artenzahl sämtlicher Nutzungstypen 13
Tab. 8: Oberflächenversiegelung und -verdichtung städtischer Teilgebiete Erfurts 14
Tab. 9: Flächenanteile der versiegelten Fläche bezogen auf das Bruttowohnbauland 16
Tab. 10: Versiegelungstypen 17
Tab. 11: Durchschnittliche Gesamtversiegelungsgrade der Strukturtypen 18
Tab. 12: Ergebnisse der Laborversuche 20
Tab. 13: Versickerungsfreundlichkeit verschiedener Versuchsflächen unter Freilandbedingungen 21
Tab. 14: Ergebnisse des Langzeitversuches 22
Tab. 15: Zusammenfassung der Untersuchungen an verschiedenen Kleinpflastern 23
Tab. 16: Zusammenfassung der Untersuchungen an verschiedenen

Betonsteinpflastern 24
Tab. 17: Zusammenfassung der Untersuchungen an verschiedenen Grandbefestigungen 25
Tab. 18: Zusammenfassung der untersuchten Flächen nach Belag, Alter und Belastung 26
Tab. 19: Wasserdurchlässigkeit der untersuchten Beläge 27
Tab. 20: Ergebnisse der untersuchten Standorten 30
Tab. 21: Pflastereigenschaften 32
Tab. 22: Abflußkoeffizienten einer 30 Minuten Beregnung 32

1. Begriffsbestimmung Bodenversiegelung

Nach BÖCKER (1985) bedeutet Bodenversiegelung, daß offener Boden sehr stark verdichtet und mit impermeablen Substanzen wie Teer, Beton oder Gebäuden bedeckt wird. Die Austauschvorgänge zwischen Boden und Atmosphäre, die sowohl den abiotischen Bereich - wie Versickerung oder umgekehrt Verdunstung von Bodenwasser, Luftaustauschprozesse - als auch den biotischen Bereich betreffen, werden unterbunden. Anders als BÖCKER (1985), der die Bodenversiegelung ausschließlich als Vollversiegelung, d.h. mit impermeablen Substanzen gleichsetzt, werden von BURGHARDT (1993) drei Formen der Versiegelung unterschieden:

- Vollversiegelung, (horizontale und vertikale) z.B. durch Straßen, Plätze, Flughäfen, Gebäude, Kanäle, Decken auf Altstandorten und Altablagerungen,
- Teilversiegelung, z.B. durch Pflasterung, Gehwegplatten und Rasensteine,
- Unterflurversiegelung, z.B. durch Tiefgaragen, Straßentunnel, U-Bahntunnel, verschüttete Kellersohlen, Leitungsschächte, Sperrschichten über Deponien, Altstandorte mit Bodenüberdeckung, Friedhöfe bei dichter Belegung.

Das Vorliegen einer Vollversiegelung ist anhand ihrer Wirkung festzulegen. Als Orientierungswert wird eine Mindestbreite der versiegelten Fläche von 1 m vorgeschlagen. Eine Teilversiegelung liegt vor, wenn eine Fläche in kurzen Abständen durch durchlässige Bereiche unterteilt wird. Hierbei beträgt die Breite der durch Platten etc. versiegelten Flächen weniger als 1 m.

PIETSCH u. KAMIETH (1991, S. 119) schlagen eine operable Versiegelungsdefinition vor, welche auf hydrologischen und quantitativen Grenzwerten beruht: "Konstellation von Zuständen und Eigenschaften von Oberflächen (Böden) werden Versiegelung genannt, wenn sie während der Vegetationsperiode folgende Durchschnittswerte über- oder unterschreiten:

- Oberflächenabfluß > 30 % des Jahresniederschlags und abgeleitet in technisch geprägten Vorfluter,
- Evapotranspiration < als die von unbewachsenem Sandboden (ca. 25-30 %)
- Die „Versiegelung“ (betroffene Fläche) sei > 25 m^2 oder kleinere Teilflächen umfassen mehr als 2/3 einer Bezugseinheit."

Nach BERLEKAMP u. PRANZAS (1990, 1992) hat sich in der Praxis eine maßstabsorientierte Begriffsbestimmung der urbanen Versiegelung bewährt, die eine rein quantitativ-deskriptive Betrachtungsweise von Versiegelungsgraden (Flächenanteile versiegelter Oberflächen) mit einer qualitativ-funktionalen Sicht der Versiegelungsarten (Eigenschaften versiegelter Flächen und Räume) verbindet. Bodenversiegelung kann danach für kleinere Erhebungsmaßstäbe im Grundsatz definiert werden als eine - auch teilweise - Isolierung des Bodens (Pedosphäre) und gegebenenfalls auch des Festgesteins (Lithosphäre) von Atmo-, Hydro- und Biosphäre. Diese kann durch Ab- und Verdichtung, Aufschüttungen bzw. -füllungen sowie unterirdische Baukörper, die durch anthropogene, genauer bauliche oder im weiterem Sinne ver- und entsorgungstechnisch bedingte Eingriffe in die Erdoberfläche entstanden sein.

Auf größerer Maßstabsebene wird der Begriff der Bodenversiegelung aus funktionaler Sicht konkretisiert. Da unterschiedliche Baumaterialien und Konstruktionsweisen durch ihre materialspezifischen Merkmale wie Porosität, Fugenanteil, Farbe, Stoffbestand einerseits und nutzungsabhängige Einflüsse wie Verdichtungen, Emissionen andererseits den Grad der Isolierung des Bodens beeinflußen. Außerdem wird das Ausmaß der quantitativen und qualitativen Beeinträchtigungen der natürlichen Bodenfunktionen durch die obengenannten Faktoren bestimmt.

In Anlehnung an den in der Bodenkunde angewandten Begriff der Bodenform wird von MOHS u. MEINERS (1993) der Begriff der Versiegelungsform angeführt, welcher die Kombination aus Versiegelungsart (eingesetzte Baustoffe und bauliche Ausführungen) und spezifischer Nutzung bezeichnet.

In städtisch-industriellen Verdichtungsräumen werden versiegelte Böden von BLUME (1993) als Bodenform neben den veränderten Böden natürlicher Entwicklung und den Böden anthropogener Aufträge eingeordnet. Diese (Rest)Böden unter totaler Versiegelung (Gebäude, Teerstraßen) werden als fossiliert bezeichnet. Bei poröser Versiegelung (unter Pflaster, Schlacke) bleiben hingegen Atmosphärilien wirksam. Eine hohe Versiegelung städtischer Oberflächen wird aus bodenhydrologischer Sicht als anthropogene Krustenbildung aufgefaßt (RENGER, 1993).

In den Hermerobiestufen von SUKOPP u. BLUME (1976), die die Abstufungen verschiedener Landnutzungsformen nach dem Grad des Kultureinflusses auf Ökosysteme beschreiben, fallen teilversiegelte Flächen z.B. gepflasterte Wege, geschotterte Gleisanlagen in die Hemerobiestufe polyhemerob. Dies bedeutet, daß die Biozönosen stark dezimiert und die Biotope anhaltend stark verändert sind. Durch die anthropogene Einwirkungen sind der Streuabau, die Bioturbation, die Durchwurzelbarkeit und die Durchlüftung stark vermindert und es fehlt ein O- und Ah-Horizont. Die vollständig versiegelten Flächen z.B. Gebäude, Teerdecken werden als

metahemerob bezeichnet. Diese anthropogene Einwirkung bedeutet eine völlige Vernichtung der Biozönosen.

Eine Ausweitung des Entsiegelungsbegriffes fordert WIRTH (1988). Er verdeutlicht, daß alleine die Beschränkung des Ausmaßes der Versiegelung noch nicht sicherstellt, daß Ökosysteme in ihrer Vielfalt erhalten bleiben. Vielmehr muß die Entsiegelungsdiskussion erweitert werden auf die Diskussion um die Begrenzung der Nutzung von unversiegelten Böden selbst. Der Autor betont, daß durch die Zerstörung der Multifunktionalität des Bodens die Stabilität der Natur als System nicht mehr gewährleistet ist.

Im Zusammenhang mit dem Begriff Bodenversiegelung stehen die Termini Entsiegelungspotential und Belagsänderungspotential. Unter dem Entsiegelungspotential wird der Flächenanteil an der Bezugsfläche verstanden, der bei Beachtung der nutzungsbedingten Anforderungen entsiegelt werden kann. Das Belagsänderungspotentials entspricht dem Flächenanteil, der bei Beachtung der nutzungsbedingten Beanspruchung einen Austausch undurchlässiger Belagsarten durch weniger nachteilige Bodenbeläge zuläßt (GIESEKE et al. 1988).

2. Erhebungsmethoden zur Erfassung der Bodenversiegelung

Die Flächenstatistik der statistischen Jahrbücher kann die quantitative Dimension der Bodenversiegelung nur annäherungsweise erfassen. Diese differenziert nicht zwischen überbauter Grundstücksfläche und den versiegelten und unversiegelten Freiflächen auf Grundstücken (LOSCH, 1988). Die statistischen Daten geben aber einen allgemeinen Einblick in das Ausmaß der Flächeninanspruchnahme durch Siedlungs- und Verkehrsflächen.

Für 1993 wird der Anteil der Nutzungsarten für Siedlungs- und Verkehrsflächen an der Bodengesamtfläche mit 11,3 % angegeben. Für die alten Bundesländer wird ein Flächenanteil von 12,7 % und für die Neuen Länder und Ostberlin ein prozentualer Anteil von 7.9 % angegeben (*Statistisches Bundesamt*, 1995). Innerhalb eines halben Jahrhunderts, 1950 betrug der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche an der gesamten Bodenfläche 7,5 %, hat sich dieser Anteil in den alten Bundesländern fast verdoppelt (*Umweltbundesamt*, 1993). Im Freistaat Sachsen werden mehr als 11 % der Fläche für Siedlungs-, Industrie- und Gewerbeflächen sowie für Verkehrswege in Anspruch genommen (*Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen*, 1994).

Entwicklung der genehmigten Bauvorhaben je Gemeinde und Hektar dargestellt werden. Gerade für die neuen Bundesländer wird so die rasante Wachstumsrate für Siedlungszwecke sichtbar. Die räumlichen Schwerpunkte in der Entwicklung der Bautätigkeit lagen im Zeitraum von 1990 bis 1992 in Sachsen in den Großräumen Leipzig, Chemnitz, Zwickau und Plauen. Der Zuwachs an baulich genutzten Flächen ist in bisher ländlich geprägten Gebieten häufig größer als in den städtischen Zentren. In der Stadt Dresden betrug z.B. der Zuwachs an Die Flächeninanspruchnahme durch Bodenversiegelung kann auch durch die Beobachtung der bebauten Flächen bezogen auf bereits baulich genutzte Fläche 0.4 %. Für die Gemeinde Ullersdorf betrug dieser Anteil schon 72 % und für die Gemeinde Kesselsdorf über 416,7 %. Von den bisherigen Bauvorhaben wurden ca. 70 % auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen realisiert und nur ca. 14 % der Bauvorhaben wurden auf bereits zuvor baulich genutzten Flächen durchgeführt (*SMU*, 1994).

Für Baugrundstücke stehen auf Bundesebene Zahlen aus der Baugenehmigungsstatistik zur Verfügung (*Statistisches Bundesamt, 1995*). Neben der Gebäudeüberbauung werden weitere Grundstücksanteile versiegelt (LOSCH, 1988). Dies sind z.B. Stellplätze, Zufahrten, Erschließungswege, Garagen, Müllbehälterstellplätze oder Terrassen. Diese sogenannte Nachverdichtung erfolgt teilweise während der Bauphase und teilweise durch die allmähliche Nutzung des Grundstückes. Nach einer Auswertung von LOSCH (1988) der 1987 genehmigten Wohngebäude betrug die überbaute Fläche nur zwischen 19 und 25 % der gesamten Grundstücksflä-

che. Durch die Einbeziehung der Stellplätze, Nebenanlagen, Wege, Terrassen u.a. erhöhte sich der Versiegelungsgrad auf 40 - 61 %.

Für die flächendeckende Erfassung des Versiegelungszustandes großer Siedlungsräume sind in den letzten 10 Jahren eine Reihe von Versiegelungserhebungen durchgeführt worden. Die Bezugsebene für diese Versiegelungsaufnahmen sind häufig Nutzungs- oder Bebauungstypen (SCHOSS, 1977; BÖCKER, 1985; BÖHME, 1986; GISEKE et al., 1988; RANFT et al. 1991a; BERLEKAMP u. PRANZAS, 1990, 1992; HEBER u. LEHMANN, 1993). Die angeführten Untersuchungen unterscheiden sich durch die Erhebungsmethodik und die zugrundegelegte Bezugsfläche.

Für die Stadt Essen bestimmte SCHOSS (1977) in 12 Mustergebieten (Wohn- u. Gewerbegebiete) den Versiegelungsfaktor (Versiegelungsgrad) nach Meßtischblattsignaturen. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tab. 1: Versiegelungsfaktoren nach Meßtischblattsignaturen (SCHOSS, 1977, S. 138, verändert)

Mustergebiet	Versiegelungsfaktor
Stadtkern	0.976
Zeche	0.400
Kokerei	0.495
dichtes Wohngebiet	0.787
dichtes Wohn-Gewerbegebiet	0.806
Zeilenhäuser	0.407
Reihenhäuser	0.521
Reihenhäuser/Gruppenhäuser	0.534
Einfamilienhäuser, große Gärten	0.198
Einfamilienhäuser, mittelgroße Gärten	0.415
Einfamilienhäuser, kleine Gärten	0.495

Zu den am häufigsten verwendeten Methoden zur Erfassung der Bodenversiegelung gehört die Auswertung von Luft- und Satellitenbildern in Kombination mit einer Geländekartierung. Eine reine Luftbildauswertung beruht im allgemeinen auf einer Aufnahme der Anteile an versiegelter bzw. unversiegelter Fläche anhand von Infrarotluftbildern. In der Bodenversiegelungskarte von Berlin (BÖCKER, 1985) im Maßstab 1:75000 wurden die Mengenanteile von Bäumen, Rasenflächen, offenem Boden, Brachen und versiegelten Flächen auf der Ebene von Baublöcken ermittelt. Für ausgewählte Siedlungstypen wurden im Kartenmaßstab 1: 1000 bzw. 1: 4000 Kontrollerhebungen im Gelände durchgeführt, über die das Ergebnis der Schätzungen gesichert wurde. Anhand dieser Methode definierte BÖCKER (1985) fünf Versiegelungsstufen:

1. gering (0-15 %) versiegelt sind die Waldgebiete, Ackerflächen oder größere innerstädtische Grünanlagen. Gewässerflächen wurden nicht beurteilt,
2. mäßig (10-50 %) versiegelt sind vor allem große Einfamilienhaussiedlungen am Stadtrand, Kleingartengebiete oder auch Zeilenbausiedlungen,
3. mittel (45-75 %) versiegelt sind die Blockrandbebauungen oder die Nachkriegsneubaugebiete,
4. stark versiegelt (70-90 %) sind städtische Baugebiete mit Blockbebauung, die teilweise saniert oder wieder ergänzt wurden; ältere Industrieansiedlungen gehören ebenfalls in diese Kategorie,
5. sehr stark versiegelt (85-100 %) sind unzerstörte Blockbaugebiete der Innenstadtbezirke und Industrieflächen, die in jüngerer Zeit entstanden oder verändert wurden.

Diese Karte im Umweltatlas von Berlin wurde aktualisiert und erweitert. Die Versiegelungsdaten für den Ostteil der Stadt beruhen auf der Interpretation von CIR-Luftbildern. Die eingesetzte Methode für den Westteil der Stadt beruht nicht mehr nur auf der Interpretation von Luftbildern. Zur Bestimmung des Versiegelungsgrades der Bezugsflächen wurde eine Satellitenbildinterpretation von multispektralen Landsat TM Aufnahmen von 1985 bzw. 1988 vorgenommen. Anhand von Testflächen, deren Versiegelungsgrad aus Kartierungen vor Ort bestimmt wurde, erfolgte eine Kalibrierung des Satellitenbildes. Eine anschließende Klassifizierung ergab eine zehnstufige Skala von Versiegelungsklassen. Diese wurden für jeweils 30 x 30 m große Rasterflächen der digitalen Grundkarte überlagert. Die Anzahl der Bildpunkte wurden getrennt nach Versiegelungsklassen für jede Blockteilfläche ausgezählt und der Versiegelungsgrad in Prozent für jede Blockteilfläche berechnet (*Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*, 1993).

Das unterschiedliche Reflektionsverhalten von bebauten Gebieten, Vegetation oder Wasser, die sogenannte „spektrale Signatur", ist die Voraussetzung für eine digitale Klassifizierung der Bodenversiegelung mit Bildverarbeitungscomputern. Es ergeben sich aber Schwierigkeiten bei der Differenzierung und Berechnung der nicht überbauten Flächen, da zwischen vegetationsfreien unversiegelten und versiegelten Flächen nicht unterschieden werden kann. In solchen Fällen ist eine Nachbestimmung der unbebauten versiegelten Fläche erforderlich (*Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*, 1993) vgl. (MUNIER, 1988).

In der aktualisierten Karte im Umweltatlas von Berlin sind neben dem durchschnittlichen Versiegelungsgrad und dem Bebauungsgrad der verschiedenen Flächentypen auch die jeweils vorkommenden Arten von Oberflächenbelägen berücksichtigt (vgl. Tab. 3). Diese wurden im Rahmen der Datenerhebung aufgenommen. Die Oberflächenbeläge wurden zu vier Belagsklassen (Tab. 2) zusammengefaßt. Diese repräsentieren unterschiedliche Auswirkungen auf den Naturhaushalt. Die aufgestellten Kriterien für die Belagsarten sind nur für den Anteil der

unbebauten versiegelten Fläche gültig (*Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*, 1993).

Tab. 2: Übersicht über die Belagsklassen
(*Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*, 1993, S. 3)

Belagsklasse	**Einschätzung der Auswirkungen auf den Naturhaushalt**	**Belagsarten**
1	extrem	Asphalt, Beton, Pflaster mit Fugenverguß oder Betonunterbau, Kunstoffbeläge
2	hoch	Kunststein- u. Plattenbeläge (Kantenlänge > 8 cm), Betonverbundpflaster, Klinker, Mittel- und Großpflaster
3	mittel	Klein- und Mosaikpflaster (Kantenlänge < 8 cm)
4	gering	Rasengittersteine, wassergebundene Decke z.B. Schlacke, Kies-, Tennenbeläge), Schotterasen

Tab. 3: Durchschnittlicher Versiegelungsgrad, Bebauungsgrad und Belagsklassenverteilung der unbebauten versiegelten Fläche nach Flächentypen
(*Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*, 1993, S. 4).

Flächentyp	**Versiegelungsgrad %**	**bebaut versiegelte Fläche %**	**unbebaut versiegelte Fläche %**	**Belagsklasse der unbebaut versiegelten Fläche (%)**			
				1	**2**	**3**	**4**
Wohngebiete							
Hinterhof	82	52	30	56	22	3	19
Schmuck- und Gartenhof	60	37	23	62	27	10	1
Sanierungsgebiet	70	42	28	62	17	8	13
Schuppenhof	60	30	30	46	29	13	12
Nachkriegsblockrand	68	38	30	41	27	4	28
ungeordneter Wiederaufbau	70	38	32	45	28	13	14
Großsiedlung	46	21	25	15	67	7	11
Großhof	45	29	16	20	37	32	11
Zeilenbebauung der 50er Jahre	40	20	20	49	46	3	2
Reihengarten	27	15	12	25	65	3	7
Gartentyp	26	13	13	18	74	2	6
parkartiger Gartentyp	28	16	12	15	60	12	13
Gärten und halbprivate Umgrünung	32	18	14	20	64	4	12
Kerngebiete	77	40	37	50	34	9	7
Industrie-/Gewerbegebiete							
Mischgebiet Industrie und Gewerbe (bebaute Fläche < 50 %)	74	26	48	48	38	1	13
Mischgebiet 2/Industrie und Gewerbe (bebaute Fläche >=50 %)	89	55	34	74	20	1	5
Flächen der Ver- und Entsorgung	63	23	40	31	56	1	12
Gemeinbedarf							
Sicherheit und Ordnung	55	14	41	54	25	3	18
Post	83	36	47	54	25	3	18
Verwaltung	66	30	36	41	42	15	2
Kultur	66	29	37	41	42	15	2
Hochschule und Forschung	50	24	26	15	70	12	3
Krankenhaus	39	18	21	42	38	8	12

Fortsetzung Tab. 3: Durchschnittlicher Versiegelungsgrad, Bebauungsgrad und Belagsklassenverteilung der unbebauten versiegelten Fläche nach Flächentypen
(*Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz*, 1993, S. 4).

Flächentyp	Versiegelungsgrad %	bebaut versiegelte Fläche %	unbebaut versiegelte Fläche %	Belagsklasse der unbebaut versiegelten Fläche (%)			
				1	2	3	4
Schule	53	19	34	45	40	2	13
Sportanlage	48	6	42	18	28	1	53
Wassersport	35	16	19	36	29	13	13
Kirche	47	20	27	65	7	16	12
Kindertagesstätte	41	18	23	7	42	5	46
Spielplatz	40	1	39	14	29	3	56
Seniorenheim	47	24	23	4	62	18	16
Jugendfreizeitheim	26	10	16	4	62	18	16
Grün- und Freiflächen							
Kleingarten	21	11	10	5	31	4	60
Friedhof	16	2	14	14	27	5	54
Baumschule/Gartenbau	35	18	17	35	45	9	11
Grünanlage/Park	12	2	44	50	20	10	20
Stadtplatz/Promenade	46	2	44	50	20	10	20
Wald	46	2	44	50	20	10	20
Landwirtschaft	1	0	1	10	10	0	80
Ruderalfläche	7	0	7	20	10	0	80
Campingplatz	12	2	10	20	20	0	60
Wochenendhausgebiet	21	9	12	11	43	2	44
Verkehrsflächen							
Parkplatz	70	4	66	31	53	7	9
Bahnanlage	26	1	25	5	5	0	90
Flughafen	79	5	74	85	10	0	5
sonstige Verkehrsflächen	84	16	68	42	32	19	7

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des Versiegelungsgrades ist das sogenannte Eichverfahren (BERLEKAMP u. PRANZAS, 1990). Dieses Verfahren wurde für die Bodenversiegelungserhebung zum Landschaftsprogramm in Hamburg entwickelt. Mit Hilfe von Geländekartierungen im Maßstab 1: 5000 wurden in stichprobenhaft ausgewählten Testflächen für bestimmte Bebauungstypen spezifische Versiegelungsgrade ermittelt. Die Grundlage für die Testflächenauswahl war eine zum Zweck der Biotoptypenkartierung erstellte Nutzungstypen-Karte. Die ermittelten Versiegelungsgrade der insgesamt 13 untersuchten Wohn-Bebauungstypen (Tab. 4) wichen z.T. stark voneinander ab. Die verschiedenen Streubreiten des Versiegelungsgrades je Bebauungstyp wurden als Kriterium für die sogenannte Versiegelungstreue verwendet. Insgesamt sind drei Kategorien der Versiegelungstreue über die Anzahl der belegten Klassen (10 Klassen, je 10% Intervalle) definiert.

Tab. 4: Versiegelungstreue von Wohnbebauungen in Hamburg (BERLEKAMP u. PRANZAS, 1990, S. 5)

Wohnbebauung	Versiegelungsklassen**	Klassenanzahl
Kategorie I: Versiegelungstreue		
Randbebauung der 20er und 30er Jahre	6	1
Neue Randbebauung	6	1
Reihenhausbebauung	6	1
Atriumhäuser	7	1
Altstadt- und Stadtrandbebauung	8	1
Kategorie II: bedingte Versiegelungstreue		
Einzelhausbebauung	3 - 5	3
Stadthäuser	5 - 6	2
Zeilenbebauung der 20er Jahre	5 - 6	2
Neue Zeilenbebauung	5 - 7	3
Randbebauung der Gründerzeit	6 - 8	3
Blockbebauung mit vielen Neubauten	7 - 9	3
Blockbebauung der Gründerzeit	8 -10	3
Kategorie III: keine Versiegelungstreue		
Neubauten mit Hochhäusern	6 - 9	4

** Klasse 1 = 0-10% versiegelt, Klasse 2 = > 10-20%,..... Klasse 10 = > 90-100%

Anhand von Tabelle 4 wird ersichtlich, daß die Mehrzahl der Bebauungstypen der 2. Kategorie zuzuordnen sind. Als zusätzliche versiegelungssteuernde Faktoren wurden folgende lage- bzw. nutzungsspezifischen Merkmale ausgegliedert: Nähe zum Stadtkern, Straßenbreite, Blockform, Grundrißumfang, Größe der Gärten/Abstandsflächen, Tiefgaragen und Parkplätze. Die übrigen im Stadtgebiet von Hamburg vorkommenden Wohnnutzungen wurden mit einer Genauigkeit von +/- 5 % in die Versiegelungsklassen eingestuft. Dies geschah auf der Grundlage der Versiegelungstreuen geeichten Bebauungstypen und der Kenntnis der Einflußfaktoren und ihrer versiegelungsgradsteuernden Wirkung. Die sehr inhomogenen Versiegelungszusammensetzungen der Nutzungstypen Gemeinbedarf, Industrie, Gewerbe und Hochhausbebauung konnten nicht auf diese Weise definiert werden. Die übrigen Nutzungstypen wie Kleingärten, Friedhöfe, Sportanlagen und Campingplätze wurden nach dem gleichen Verfahren geeicht und flächendeckend innerhalb Hamburgs klassifiziert. Das hier vorgestellte Eichverfahren zur Erfassung der Bodenversiegelung konnte für die Hansestadt Bremen auf seine Eignung als grundsätzlich allgemeingültige Methode überprüft werden (BERLEKAMP u. PRANZAS, 1990).

In o.g. Untersuchungen steht der deskriptive Versiegelungsbegriff im Mittelpunkt, d.h. im Rahmen der Erhebung sind zunächst alle Versiegelungsarten als gleich eingestuft. Für eine funktionale Betrachtungsweise von Versiegelungen hinsichtlich ihrer umweltrelevanten Eigenschaften und Auswirkungen werden die versiegelten Flächen nach ihrer Erscheinungsform unterschiedlich differenziert (BERLEKAMP u. PRANZAS, 1990).

PRANZAS (1995) vgl. (BERLEKAMP u. PRANZAS, 1992) bewertete im Rahmen eines BMBF-Projektes die Einflüsse der Bodenversiegelung auf den urbanen Wasserhaushalt. Als Untersuchungsgebiet diente ein Gebiet von 12 km^2 Größe im östlichen Geestbereich Hamburgs. Dieser Transekt führte vom Zentrum bis in die Randbereiche und erfaßte typische Nutzungen und Überformungen. Für die Fragestellung reichte eine alleinige Erfassung der Gesamt-Versiegelung nicht mehr aus. Es mußte eine Differenzierung innerhalb der versiegelten Flächen vorgenommen werden, mit der die verschiedenen befestigten Flächen hinsichtlich ihrer Abfluß bzw. Versickerungswirkung beschrieben werden konnten. Bei einer Übersichtserhebung im Maßstab 1:5000 wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Versiegelungskategorien ausgegliedert, die weitgehend gleichartige Befestigungsarten in einer Gruppe zusammenfassen. Anhand dieser Gliederung war es möglich, alle Flächen mit einer künstlichen Bedeckung in eine Versiegelungskategorie einzuordnen.

Tab. 5: Versiegelungskategorien der Übersichtskartierung (PRANZAS, 1995, S. 244)

Versiegelungskategorie	Beispiel	Abflußbeiwert	Versickerungsbeispiel
Gebäude	Haus, Garage	0.9	0.0
begrünte Gebäude	Tiefgarage, Dachgrün	0.3 - 0.4	0.0
undurchlässig befestigte Freifläche	Asphalt, Beton	0.85 - 0.9	0.0
durchlässig befestigte Freifläche	Kunststeinplatte, Betonverbundsteine, Mosaikpflaster	0.5 - 0.7	0.25
nicht kanalisierte Versiegelung	Wege ohne Regeneinläufe	0.0	0.75
unversiegelte Fläche	Grünflächen, offener Boden	-	-

Im o.g. Forschungsvorhaben hat BERLEKAMP in BERLEKAMP u. PRANZAS (1992) einen sehr komplexen Kartierschlüssel unter hydrologischen Aspekten für eine Detailkartierung entwikkelt. Unter dem Gesichtspunkt ihrer hydrologischen Charakterisierung werden drei wesentliche Qualitäts-Merkmalsgruppen die Nutzungsart, die Belagsart und die Entwässerungsart unterschieden. Desweiteren wird über die Merkmalsgruppe Zusätze eine Präzisierung der ersten drei Merkmale bewirkt (Tab. 6). Anhand dieses Kartierungsschlüssels wird eine bestimmte, hinsichtlich der o.g. Merkmale homogene Teilfläche (Versiegelungsart) im Gelände eingestuft und in die Kartengrundlage eingetragen.

Tab. 6 : Versiegelungsarten unter hydrologischen Aspekten, Kartierschlüssel 1: 500 - 1:1000
(BERLEKAMP in BERLEKAMP u. PRANZAS, 1992, S. 66)

Ziffer A Nutzungsart	Ziffer B Versiegelungsart	Ziffer C Entwässerungsart	Ziffer D Zusätze
1 Dach, geneigt	1 gebundene Decken	0 keine Entwässerung	0 offene Überdachung
2 Dach, flach	2 Platten	1 Sielanschluß	1undurchlässiger Unterbau
3 Container	3 Betonverbundstein	2 bed. Sielanschluß	2 Fugen dicht
4 begangen	4 Großpflaster	3 Drainage	3 starker (Fugen)bewuchs
5 befahren	5 Klein- u. Mosaikpfl.	4 Grabenanschluß	4 hohe Durchlässigkeit
6 keine Nutzung	6 wassergeb. Decken	5 Entw. unklar	5 Fläche unter GOF
7 Wasserfläche	7 Lockermaterial	6 Gully ohne Anschluß	6 Fläche über GOF
8 Gleiskörper	8 Betongitterstein	7 Stauwasserbildung	7 Fläche ü./auf U-Bauwerk
9 Sonderfläche	9 vegetationsarm/ offener Boden	9 gezielte Versickerung	8 Fläche a. Bauw./Funda.
0 unversiegelt	0 vegtationsbedeckt	9 Muldenversickerung	9 starke Neigung

In dem Forschungsvorhaben erfolgte auch eine Erfassung der Versiegelungskategorien in verschiedenen Nutzungstypen. Als Bezugsflächensystematik wurde eine Boden Nutzungssytematik gewählt, welche auf der Grundlage der Systematik der Bodennutzung (SdB) des Statistischen Informationssystems zur Bodennutzung (STABIS) konzipiert worden ist. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Versiegelungskategorien und die Anzahl der Versiegelungsarten in den kartierten Nutzungstypen (BERLEKAMP u. PRANZAS, 1992).

Tab. 7: Übersicht der Versiegelungskategorien und - artenzahl sämtlicher Nutzungstypen
(BERLEKAMP u. PRANZAS, 1992, S. 54 im Anhang, verändert)

Nutzungstyp	Gesamt-fläche m²	unversiegelte Fläche m²	versiegelte Fläche m²	Vers. grad %	überbaute Fläche		versiegelte Freifläche		Ver-siegel. arten
					m²	%	m²	%	
Einzelhäuser	38112.91	24048.42	14064.49	36.90	8006.59	21.01	6057.90	15.89	115
Neue Zeilenbebauung	16769.80	7077.43	9692.37	57.80	4138.50	24.68	5553.87	33.12	29
Randbebauung 20/30er Jahre	32112.47	10220.69	21891.78	68.17	12473.07	38.84	9418.71	29.33	35
Hochhausbebauung	13149.41	9089.08	4060.33	30.88	2699.03	20.53	1361.30	10.35	23
Blockbeb. der Gründerzeit	24869.90	789.87	24080.03	96.82	18777.93	75.50	302.10	21.32	53
Hefefabrik	42158.22	10234.74	31923.48	75.72	14270.25	33.85	17653.23	41.87	64
Bildung u. Kultur	35568.10	13068.91	22499.19	63.26	10698.92	30.08	11800.26	33.87	61
Grundschule	9543.24	4046.23	5497.01	57.60	2504.71	26.26	2992.30	31.36	26
Gymnasium	7245.10	1226.14	6018.96	83.08	2696.78	37.22	3322.18	45.85	21
Gewerbeschule	9474.26	2733.50	6740.76	71.15	3703.28	39.09	3037.48	32.06	33
Sonderschule	5764.35	2517.62	3246.73	56.32	1419.06	24.62	1827.67	31.71	26
Altenheim	3541.21	2545.51	995.70	28.12	375.10	10.59	620.60	17.53	19
Aufschüttung	7006.56	0.00	7006.56	100.0	0.00	0.00	7006.56	100.56	1
Parkplatz	3866.32	1267.87	2598.45	67.21	0.00	0.00	2598.45	67.21	5
Schienen-/ Bahnbetr.-Fläche	36425.17	2299.91	34125.26	93.69	2414.06	6.63	31711.20	87.06	57
Sport-, Spiel und Freizeitfläche	30308.16	8635.60	21672.53	71.51	385.38	1.27	21787.09	70.24	30
Sportplatz	25580.38	6804.71	18775.67	73.40	351.83	1.38	18423.84	72.02	20
Spielplatz	4727.78	1830.92	2896.86	61.27	33.56	0.71	2863.30	60.56	18
Parkanlage	128581.13	92145.87	36435.26	28.34	1764.78	1.37	34670.48	26.96	79
Kleingartenanlage	52467.54	42956.88	9510.66	18.13	4022.56	7.67	5488.10	10.46	43
Friedhof	18072.39	13929.93	4142.46	22.92	269.78	1.49	3872.68	21.43	11
Wandsbeker Gehölz	73770.56	67102.07	6668.49	9.04	2.25	0.003	666.24	9.04	7
Industriebrache	33696.18	850.57	32845.61	97.48	7299.34	21.66	25546.27	75.81	44

In einer Untersuchung von BÖHME (1986) über städtische Teilgebiete der Stadt Erfurt wurden 26 Baugebietstypen ausgewählt. Die Grundlage für diese Auswahl waren die Karten der Flächennutzung und des Baualters des Generalbebauungsplans. In charakteristischen Quartieren wurde die Versiegelung aufgenommen. Die oberflächenbedeckenden Materialien (Tab. 8) wurden aus aeronomisch abgeleiteten Karten entnommen.

Tab. 8: Oberflächenversiegelung und -verdichtung städtischer Teilgebiete (%) Erfurts (BÖHME, 1986, S. 233, verändert)

Teilgebiet mit lfd. Nr.	Gebietscharakteristik	Bebauungsverhältnis	Beton Asphalt Bitumen Platten Bebaung	Pflaster	Schotter Kies Sand Hoffläche	Vegetation Wasser	Versiegelungsgrad	Flächenbilanzwert
Industrie 1	kompakt bebaut	54.4	81.0	4.1	11.3	3.6	84.3	-0.815
2	kompakt bebaut	48.9	73.8	4.1	20.1	2.0	77.1	-0.759
3	locker bebaut	14.8	70.8	4.1	24.1	1.0	74.1	-0.739
Zentrum 4	Altbau, vor 1870	61.7	79.8	7.5	5.3	7.4	85.8	-0.799
5	Neubau	21.2	72.1	3.2	2.6	22.1	74.7	-0.532
Wohn- 6 gebiete	Gründerzeit, offene Blockbebauung	31.4	50.5	14.6	8.5	26.4	62.2	-0.387
7	Gründerzeit, dichte Hofbebauung	39.8	69.2	11.8	3.8	15.2	78.6	-0.658
8	Gründerzeit, lockere Hofbebauung	38.8	64.0	11.8	6.9	17.3	73.4	-0.585
9	geschlossene Blockbebauung 20/30er Jahre	25.7	52.5	6.9	2.6	38.0	58.0	-0.214
10	Zeilenbebaung der 30er Jahre	21.4	43.4	3.9	7.1	46.6	46.5	-0.007
11	Doppelhausbebauung	14.8	38.3	9.5	7.4	44.8	45.9	-0.03
12	Zeilenbebauung der 60er Jahre	15.1	42.5	0.0	7.4	50.1	42.5	+0.076
13	Neubau der 70er Jahre	18.8	38.5	1.7	7.8	52.0	39.9	0.118
14	Doppel- u. Einfamilien-häuser	16.7	39.7	0.0	1.4	58.9	39.7	0.192
15	Villenviertel	15.0	27.6	9.0	22.2	41.2	34.8	0.04
16	ländliche Siedlung	21.6	25.2	7.4	13.8	53.6	31.1	0.21
17	Reihenhausbebauung	11.8	24.2	5.3	0.5	70.0	28.4	0.405
18	Siedlung der 30er Jahre	13.2	25.2	0.0	7.4	67.4	25.2	0.422
19	Einfamilienhäuser	7.6	16.0	0.4	10.9	72.7	16.3	0.563
öffent. 20 Einrichtung	Pädagogische Hochschule	14.8	37.5	1.3	3.7	57.5	38.5	0.187
Grün- 21 flächen 22	Gärtnerei „iga“	39.8 14.5	46.4 39.4	9.3 0.0	15.6 14.4	28.7 46.2	53.8 39.4	-0.270 0.068
23	Kleingartenanlage	5.3	11.0	1.8	5.7	81.5	12.4	0.687
24	Kleingartenanlage	4.9	4.9	2.9	10.6	81.6	7.2	0.738
25	Kleingartenanlage	3.7	4.1	0.0	9.5	86.4	4.1	0.823
Sportst. 26	Stadion	9.4	25.9	0.0	25.9	48.2	25.9	0.223

Der Oberflächenversiegelungsgrad ergibt sich aus dem Flächenanteil aller versiegelter Materialien an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes. In der Berechnung wird der Anteil der Pflasterung multipliziert mit einem Koeffizienten von 0.8. Hiermit wird nach BÖHME (1986) das Durchlaß- und Speichervermögen des Pflasters berücksichtigt. Für die Charakterisierung der potentiellen Leistungsfähigkeit der Vegetation wurde der Vegetationsflächenanteil herangezogen. Für eine überschlägige Beurteilung von Boden und Vegetation wurde der Flächenbilanzwert nach JAMBOR zit. in BÖHME (1986) ermittelt sowie der biologische Aktivitätswert nach JAMBOR für tiefergehende Aussagen.

In dem vom Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau veranlaßten Forschungsprojekt „Städtebauliche Lösungsansätze zur Verminderung der Bodenversiegelung als Beitrag des Bodenschutzes“ sollten durch die Versiegelungserhebungen der Umfang des Entsiegelungspotentials und des Belagsänderungspotentials bei unterschiedlichen Formen städtebaulicher Verdichtung ermittelt werden (GISEKE et al., 1988). Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in den Verdichtungsgebieten Berlin und München. Zusätzlich wurden in Freiburg Untersuchungen geringer verdichteter Wohngebiete im Außenbereich durchgeführt. Anhand von Testflächen in 8 Siedlungstypen wurden grundstücksscharfe Kartierungen durchgeführt. Der Straßenraum wurde in der Untersuchung gesondert betrachtet. Für jeden Siedlungstyp wurden zwei Beispielflächen ausgewählt. Um Aussagen über das Entsiegelungspotential und das Belagsänderungspotential zu treffen, wurden die Belagsarten in Anlehnung an SCHULZ et al. (1984) differenziert:

A: Asphalt, Beton, Pflaster mit Fugenverguß,
B: Betonverbundpflaster, Kunststein-, Plattenbeläge > 16 cm unverfugt, in Sand und Kiesbett,
C: Klinker,
D: Mittel-, Großpflaster, 8 -16 cm Kantenlänge, unverfugt,
E: Mosaikpflaster,
F: wassergebundene Decke (Schotterrasen, Schlacke, Kies-, Grand-, Tennenflächen), Rasengittersteine.

Die unversiegelte Fläche wurde in vegetationsbedeckt und vegetationsarm - offener Boden unterteilt. Zur Bestimmung des Entsiegelungspotentials diente der Gesamtversiegelungsgrad, der sich aus dem Überbauungsgrad und dem Anteil der versiegelten Freifläche an der Grundstücksfläche zusammensetzt sowie die disponible Fläche. Diese stellt den nicht mit baulichen Restriktionen wie Überdachungen, Unterkellerung, Tiefgaragen belegten und somit für die Entsiegelung zur Verfügung stehenden Teil der versiegelten Freifläche dar. Als methodische Hilfsgröße zur Ermittlung des Entsiegelungspotentials wurde der "Nutzungsbedingte Versiegelungsgrad" (VG-Nutz) eingeführt. Dieser spiegelt den für die Nutzung eines Grundstücks (Erschließungsweg, Stellfläche für Müllcontainer, Stellplätze für Kfz etc.) notwendigen Min-

destversiegelungsgrad wieder. Das Entsiegelungspotential eines Grundstücks ergibt sich somit aus der Differenz zwischen dem tatsächlichen Versiegelungsgrad und dem Nutzungsbedingten Versiegelungsgrad (GISEKE et al. 1988).

In einem vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben wurden von RANFT et al., (1991a, 1991b) Untersuchungen in unterschiedlichen Siedlungsformen zur Bodenbeanspruchung und zu bodenrelevanten Aspekten und Veränderungspotentiale (Tab. 9) durchgeführt.

Tab. 9: Flächenanteile der versiegelten Fläche bezogen auf das Bruttowohnbauland , in BUNZEL, 1992, S. 41)

Wohnsiedlungsform	bebaute Fläche	unbebaute versiegelte Fläche	Summe versiegelte Flächen
Freistehendes Einfamilienhaus	0.20	0.26	0.45
Stadtvilla, 2-6 Familienhaus	0.24	0.35	0.60
Kettenhaus, Doppelhaus	0.23	0.31	0.55
Reihenhaus	0.25	0.32	0.57
Atrium-, Teppichbebauung	0.43	0.30	0.73
Zeilenbebauung vor 1945	0.24	0.32	0.55
Zeilenbebauung nach 1945	0.21	0.31	0.52
Blockrandbebauung (ohne Bebauung im Blockinneren) 1900 - 1920	0.33	0.30	0.63
Blockrandbebauung (ohne Bebauung im Blockinneren) 1920 - 1945	0.29	0.38	0.67
Blockrandbebauung (ohne Bebauung im Blockinneren) nach 1945	0.41	0.37	0.78
Blockbebauung (mit Bebauung im Blockinneren 1900 - 1920)	0.43	0.43	0.86
Blockbebauung (mit Bebauung im Blockinneren nach 1920	0.50	0.40	0.90
Hochhausbebauung	0.23	0.33	0.56
Kleinstädtische Ortskerne	0.48	0.44	0.92
Dörfliche Ortskerne	0.27	0.42	0.68
Dörfliche und kleinstädtische Randzonen	0.19	0.26	0.45

In Tab. 9 sind die einzelnen Wohnsiedlungsformen und die Flächenanteile der versiegelten Fläche bezogen auf das Bruttowohnbauland aufgeführt. Die Studie basiert auf der Auswertung von 153 Siedlungen anhand von Luftbildern und von vorhandenen Daten aus 70 Siedlungen. Zur Bewertung des Ausmaßes der Bodenbeanspruchung von unterschiedlichen Wohnsiedlungsformen wurden Kennwerte entwickelt. Für die Planung und für die bodenschonende Entwicklung neuer Wohngebiete wurden Vorschläge (RANFT et al. 1991a, 1991b) erarbeitet

In einer Pilotstudie für die Stadt Osnabrück wurden von LIETH et al. (1989) eine ca. 11 km^2 große Teilfläche in der Stadt Osnabrück ausgewählt. Diese umfaßt alle für eine Stadt typischen Areale, die in Städten der alten Bundesländer zu finden sind. Die aufgenommenen Versiegelungstypen wurden anhand ihrer möglichen Wirkung auf den Wärme- und Wasserhaushalt der Stadt ausgewählt. Nach einer Flächeninspektion zu Beginn der Arbeiten wurden folgende Versiegelungen als Typen (Tab. 10) definiert:

Tab. 10: Versiegelungstypen (LIETH et al. 1989, S. 8, 18, verändert)

Versiegelungstyp	Ausprägung
A. Stark versiegelte Typen	
Gebäude	
Asphalt	- Straßen, keine Trennung nach Fahrbahn und Fußweg - asphaltierte Flächen
Hartplatz	- Fußball- und Tennisplatz
Beton	
Defekte Teerdecke	- z.T. mit Teer überzogenes Kopfsteinpflaster
Zement-, Beton-, Waschbetonpflaster	- mit geringer Fugenbreite
Kopfsteinpflaster	- Straßen, Gehwege getrennt - große und kleine Steine, Fugenbreite bis 2 cm
Schotter, Splitt, Kies	- kleinräumig unterschiedliche Durchlässigkeit durch Verdichtung des Untergrundes möglich (Parkplätze)
Eisenbahnanlagen	- eigentliche Gleisanlage (Schienen, Holz, Steine) - Zwischenflächen (Sand, Schotter, Bewuchs)
B. Wenig oder nicht versiegelte Typen	
Sand	- kleinräumig unterschiedliche Durchlässigkeit durch Verdichtung des Untergrundes möglich
Steinbruch	- nackter, anstehender Fels von Vegetation überwuchert
Ziergrünfläche (u. Brachfläche)	- Rand und Mittelstreifen von Fahrbahnen ohne landwirtschaftliche oder gartenbauliche Nutzung, z.T. von geringer Größe besonders zur Auflockerung von Industriegebieten
Garten	- Haus- und Schrebergarten, Botanischer Garten, Versuchsflächen im Universitätsbereich
Feld, Acker, Wiese	
Parkanlage	
Bahn- und Flußdamm, Wälle	
Wald	
Fließgewässer und Stehende Gewässer	
C. Sonstiges	
Schrottplatz	- durch Müll, Schrott, Schadstoffe etc. belastete Flächen ohne Beachtung des eigentlichen Untergrundes

Für die Versiegelungserhebung der Stadt Dresden von HEBER u. LEHMANN (1993) vgl. HEBER (1994) wurde das Stadtgebiet in 14 städtebauliche Strukturtypen eingeteilt. In einer Detailkartierung wurden in 28 ausgewählten Repräsentanten vor Ort die bebauten Flächen, die teilversiegelten Flächen (getrennt nach 5 Belagsarten) und die unversiegelten Freiflächen (getrennt nach vegetationsloser und Vegetationsfläche) mit integrierter Randverkehrsfläche aufgenommen. Zur Analyse und Bewertung der Flächen wurden verschiedene quantitative und qualitative Bewertungsverfahren hinsichtlich ihrer Spezifik verglichen. Für die anschließende Bewertung der Bodenversiegelung wurde die Bodenfunktionszahl ausgewählt. Anhand der Repräsentanten der Strukturtypen wurden theoretisch mögliche Entsiegelungsvorschläge unter der Berücksichtigung der Aspekte des ökologischen Stadtumbaus, der Wohnumfeldverbesserung und der Verkehrsberuhigung erarbeitet und stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten zur Diskussion gestellt.

Die Untersuchungsergebnisse der Repräsentanten wurden mittels Analogschluß auf die Gesamtstadt übertragen und sind in der Karte der Bodenversiegelung im Maßstab 1:10000 im Umweltbericht der Stadt Dresden (*Dezernat Umwelt*, 1994) dargestellt. In Tabelle 11 sind die durchschnittlichen Gesamtversiegelungsgrade der untersuchten Strukturtypen dargestellt.

Tab. 11: Durchschnittliche Gesamtversiegelungsgrade der Strukturtypen (HEBER u. LEHMANN, 1993, S. 11)

Strukturtyp	**Durchschnittlicher Versiegelungsgrad**
geschlossene Blockbebauung mit Hofüberbauung	89 %
offene Blockbebauung	74 %
mehrgeschossiger Wohnungsbau > 3 Geschosse	53 %
Siedlungen ≤ 3 Geschosse	51 %
Reihenhausbebauung	56 %
Einzelhausbebauung	39 %

3. Untersuchungen zum Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Flächen

Die dargestellten Untersuchungen zum Versickerungsverhalten von verschiedenen Flächenbefestigungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zielsetzung (Ermittlung der Grundwasserneubildung oder Ermittlung der Abflußminderung), ihrer Vorgehensweise (Labor- oder Versuche in situ) und ihrer Auftraggeber (öffentliche oder privat geförderte Forschungsarbeiten). Eine ausführliche Darstellung verschiedener Arbeiten auf dem Gebiet der Versickerungsleistung industriell gefertigter Oberflächenbeläge findet sich bei BISCHOFSBERGER et al., (1990).

Die wesentliche Bedeutung des FE- Vorhabens "Entwicklung von Methoden zur Aufrechterhaltung der natürlichen Versickerung von Wasser", welches von den Berliner Wasserwerken und der Technischen Universität Berlin bearbeitet wurde, liegt in der erstmalig durchgeführten Ermittlung der Grundlagen der Versickerung von Niederschlagswasser im Gehbahnbereich von innerstädtischen Straßen. Neben Laboruntersuchungen wurden auch verschiedene Pflasterflächen unter Freiraumbedingungen getestet. Bei den in situ Versuchen wurden auch die chemisch-physikalischen Parameter der Sickerwässer analysiert (NOBIS-WICHTERDING, 1993).

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse gehen auf die Ausführungen von KOWALEWSKI et al. (1984) und NOBIS-WICHTERDING (1993) zurück. In Laborversuchen wurde unter der Ausschaltung klimatischer Störgrößen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit das Versickerungsverhalten von Pflastermaterialien in Abhängigkeit von Fugenbreite und Neigung der Fläche bei unterschiedlichen Regenintensitäten von 5 bis 80 l/(s*ha) untersucht. Regenspenden bis 80 l/(s*ha) dienen in der Regel der Grundwasserneubildung, da sie ungefähr 93 % aller jährlichen Regenereignisse entsprechen. Für die Laborversuche wurde ein Prüfstand entwickelt. Die beregnete Lysimeterfläche betrug 4 x 2 m und die Neigung konnte zwischen 0 und 5 % variiert werden. Der Pflasterunterbau bestand aus handelsüblichem Pflastersand. Die Beregnung wurde mit einer fahrbaren Sprühvorrichtung vorgenommen. Die Laborergebnisse können der Tabelle 12 entnommen werden.

Die Laborergebnisse (Tab. 12) zeigten, daß die gesamte Regenmenge von 80 l/(s*ha) durch das neue Mosaikpflaster, das Kleinpflaster und die Kunststeinplatten im Oberstreifen mit dem Mosaikpflaster im Unterstreifen versickern kann. Diese Ergebnisse waren unabhängig von der vorhandenen Oberflächenneigung. Die gesamte Regenspende versickerte auch bei der Pflasterfläche aus Gummisteinen (Altreifen), wobei der Fugenanteil nur 8 % betrug. Einflüsse der Querneigung ergaben sich bei den Betonverbundpflastern (Fugenanteil 7 - 8 %) und den Klinkersteinen (Fugenanteil 11 %). Während bei einer Oberflächenneigung von 0 % die Oberflächenabflußspende erst bei 37 - 57 l/(s*ha) einsetzte, geschah dies bei einer Oberflä-

chenneigung von 5 % schon bei 18 - 42 l/(s*ha). Über die Kunststeinplatten versickern bei einem Fugenanteil von 1.5 % noch 3 - 5 l/(s*ha).

Tab. 12: Ergebnisse der Laborversuche (KOWALEWSKI et al., 1984, S. 122, verändert)

Pflasterart	Versickerungsfreundlichkeit
Betonverbundsteine, Knochenform	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %), hauptsächlich materialbedingt durch Pflasterporen
Betonverbundsteine, Noppenform	mittlere Versickerungsleistung (26 - 75 %)
Klinkersteine	mittlere Versickerungsleistung (26 - 75 %)
Gummisteine	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %), hauptsächlich materialbedingt durch Pflasterporen
Mosaiksteine (Bernburger)	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100%), hauptsächlich durch den Fugenanteil der Pflasterung
Kleinsteine (Granit)	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %), hauptsächlich materialbedingt durch Pflasterporen
Mosaikpflaster / Kunststeinplatten aus Granit im Oberstreifen	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %), hauptsächlich materialbedingt durch Pflasterporen
Kunssteinplatten	keine bzw. geringe Versickerungsfreundlichkeit (0 - 25 %)

Für die Freilandversuche wurden Messungen im nichtöffentlichen Bereich und im öffentlichen Straßenland durchgeführt. Für den nichtöffentlichen Raum wurde auf dem Werksgelände der Berliner Wasserwerke eine nicht wägbare Lysimeteranlage für 13 Versuchsflächen neu errichtet. Es wurden die im Straßenbau üblichen Pflasterunterbauten und verschiedene Pflasterungen eingebracht. Die Flächen wurden der Witterung aber keiner Belastung ausgesetzt. Für die Beurteilung der Meßergebnisse wurde die Wasserhaushaltsgleichung herangezogen. Die Niederschlagshöhe ergab sich aus den Aufzeichnungen des Regenschreibers. Der Oberflächenabfluß bzw. Versickerungabfluß gelangte über verschiedene Rohrleitungssystem in die zur Pflasterfläche gehörenden Sammelbehältern. Die Messung erfolgte nach jedem Regenereignis. Eine direkte Messung der Verdunstung konnte nicht erfolgen.

Mit den Lysimetern im öffentlichen Straßenland wurden die Einflüsse auf die Versickerung bei täglicher Beanspruchung durch Fußgänger ermittelt. Durch den Einbau von Sauglysimetern in unterschiedlichen Tiefen wurden Proben für chemische und physikalische Untersuchungen des Sickerwassers gewonnen. Um die Versickerungsleistung auch an bestehenden Pflasterungen zu erfassen, wurden Messungen mit einer Feuchte-Tiefensonde (Neutronensonde) an 18 Meßstellen im öffentlichen Straßenraum durchgeführt. Diese Messungen waren mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, so daß die Genauigkeit ca. 10 - 15 % beträgt. In Tabelle 13 sind die Mittelwerte der festgestellten Versickerungsfreundlichkeit für die untersuchten Gehbahnbefestigungen und für eine Rasenfläche sowie eine unbefestigte Sandfläche dargestellt.

Tab. 13 : Versickerungsfreundlichkeit verschiedener Versuchsflächen unter Freilandbedingungen (KOWALEWSKI et al., 1984, S. 123, verändert)

Pflasterart	Versickerungsfreundlichkeit
Betonverbundsteine, Knochenform	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26-75 %)
Betonverbundsteine, Knochenform, mit Sperrschicht	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %)
Betonverbundsteine, Noppenform	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26 - 75 %)
Klinkersteine	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26 - 75 %)
Gummisteine	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26 - 75 %)
Mosaiksteine (Bernburger)	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26 - 75 %)
Mosaiksteine (Granit) mit Sperrschicht	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %)
Mosaikpflaster (Granit) und Kunststeine im Oberstreifen	gute bis sehr gute Versickerungsfreundlichkeit (76 - 100 %)
Wasserdurchlässiger Asphalt	keine bis mittlere Versickerungsfreundlichkeit (0 - 75 %)
Rasengittersteine mit Raseneinsaat	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26 - 75 %)
Rollrasen	keine bzw. geringe Versickerungsfreundlichkeit (0 - 25 %)
Unbefestigte Sandfläche	mittlere Versickerungsfreundlichkeit (26 - 75 %)

Der höchste Versickerung wurde in der frostfreienzeit des Winterhalbjahres gemessen. Im Sommerhalbjahr wurden wesentlich geringere Versickerungswerte ermittelt. Die Verdunstung muß hier als wesentlicher Faktor gesehen werden. Im Sommerhalbjahr findet eine Austrocknung der Pflasterflächen und des Pflasterunterbaues statt. Bevor das Niederschlagswasser in den Untergrund gelangen kann, muß der Benetzungswiderstand des Fugenmaterials überwunden werden. Dies bedeutet, daß das hydraulische Potential des Bodens positiv werden muß. Hierdurch gelangt ein Großteil der Einzelniederschläge weder zum Oberflächenabfluß noch zur Versickerung. Die Vermeidung des kapillaren Aufstiegs von Bodenwasser aus tieferen Bodenschichten kann durch eine Sperrschicht aus grobkörnigen Sand unterhalb des Pflastersands verhindert werden.

Die oben angeführten Untersuchungen bezogen sich auf den Zeitraum von 1980-1983. Dieser Zeitraum reichte nicht aus, um Aussagen zutreffen über den Einfluß der Alterung auf das Versickerungsverhalten. Deshalb wurde nach Abschluß des F+E Vorhabens die vorhandene Freiraumversuchsanlage im nichtöffentlichen Bereich von den Berliner Wasserwerken für 5 Jahre weiter betrieben. Tabelle 14 gibt die Versickerungs- und Oberflächenablaufwerte für den Meßzeitraum von 1984 bis einschließlich 1990 wieder. Die Bandbreite der Werte ist insbesondere durch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen der Sommermonate zu erklären. In den Werten wird die Schwankungsbreite der Verdunstungshöhen innerhalb des Meßzeitraumes berücksichtigt.

Tab. 14: Ergebnisse des Langzeitversuches (NOBIS-WICHTERDING, 1993, Bild 8)

Nr.	Art der Pflasterfläche	Anteil (%) Versickerung	Anteil (%) Oberflächenabfluß
1	Kunststeinplatten im Oberstreifen, Bernburgermosaik im Untersterstreifen	55 - 63	12 - 14
2	Granitmosaik, Schlagung 4/6	48 - 55	12 - 14
3	Granitmosaik, Schlagung 4/6 mit Verdunstungssperr-schicht	48 - 55	9 - 10
4	Bernburger Mosaik, Schlagung 4/6 in neuem Pflastersand	40 - 46	11 - 13
5	Betonverbundsteine mit Verdunstungssperrschicht	69 - 79	14 - 16
6	Betonverbundsteine	62 - 71	17 - 20
7	Gummisteine	72 - 83	11 - 13
8	TRI-6-Steine (Noppenpflaster)	52 - 60	15 - 17
9	Wasserdurchlässiger Asphalt	67 - 77	17 - 20
10	Klinkerpflaster (Farb. Ravaton)	65 - 75	9 - 10
11	Rasengittersteine mit Raseneinsaat	55 - 63	6 - 8
12	Rollrasen	45 - 52	6 - 8
13	Sandfläche ohne Befestigung	42 - 48	5 - 6

Das Sickerwasser für die chemischen und physikalischen Untersuchungen wurde aus fünf verschiedenen Tiefenstufen gewonnen. Hierdurch war es möglich, den Abbau der Wasserinhaltsstoffe in Abhängigkeit von der Versickerungstiefe im Boden verfolgen zu können. Die gemessenen Werte wurden verschiedenen Werten von Grundwasserproben aus dem Stadtgebiet gegenübergestellt. Es zeigte sich, daß die Sickerwässer im Durchschnitt qualitativ nicht unbedingt schlechter als die anstehenden Grundwässer sind. Aus dieser Gegenüberstellung könnte der Schluß gezogen werden, daß das Niederschlagswasser aus Geh- und Parkplatzflächen vor Ort versickern kann. Da dies aber lediglich bedeutet, daß die Gefahren einer Verschmutzung aus anderen Quellen etwa ebenso groß sein kann, darf eine sorgfältige Prüfung des Niederschlagswassers auf Schadstoffe von diesen Flächen nicht vernachlässigt werden.

Im Auftrag des Tiefbauamtes in Hamburg wurden zur Erfassung der Versickerungsfähigkeit von Gehwegbefestigungen für ausgewählte Befestigungsarten Versickerungsversuche in situ durchgeführt (BINNEWIES u. SCHÜTZ, 1985). Die Untersuchung sollte eine vergleichende Bewertung des Versickerungsverhaltens von Hamburger Gehwegbefestigungen ermöglichen und Hinweise zur Ausführung versickerungsfreundlicher Gehwegbestigungen geben. Insbesondere wurden offene Grandbefestigungen (wassergebundene Decken) untersucht, da diese in Hamburg (Stadtrandgebiete) häufig auftreten. Ausgangspunkt für diese Untersuchungen waren die Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen der umfangreichen Laborversuche von FLOSS (1985) zit. in BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985). FLOSS untersuchte die Durchlässigkeit und Speicherfähigkeit von Baustoffen für Grandbefestigungen. In diesem Gutachten konnte zu den Versickerungseigenschaften der ungebundenen Mineralstoffe sowie offener Fugenbauweisen keine abschließende Beurteilung abgegeben werden. Aus den Ergebnissen ließ sich aber ableiten, daß die geprüften Mineralstoffe zwar mittelgroße Durchlässigkeiten aufweisen, jedoch bei den im Wegebau erforderlichen Verdichtungsanforderungen nur niedrige bis sehr niedrige

Durchlässigkeiten erreichen. Bei einer erhöhten Verdichtung ist mit einem abnehmenden Hohlraumgehalt und gleichzeitig geringer Durchlässigkeit zu rechnen. Bei einer solchen Verdichtung der Oberflächen (Kornverfeinerung, Fremdverschmutzung) kann nicht mehr uneingeschränkt von offener Bauweise gesprochen werden. Derartige Befestigungen sollten über eine Flächendränageschicht verfügen, die bis an die Vegetationsräume führt.

In dem Gutachten von BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985) wurden als Befestigungsarten Kleinpflaster, Verbundpflaster und Grand ausgewählt. Zur vergleichenden Feststellung der Altersproblematik wurde die Befestigungsart Kleinpflaster und Verbundpflaster sowohl im vorgefundenen Zustand (alt) als auch im neu verlegten Zustand (neu) untersucht. Die untersuchten Flächen weisen eine Querneigung von 0 - 1 % auf. Für die Feststellung der Versickerungsleistung wurde der Flüssigkeitsverlust in einem mit Wasser aufgestauten abgedichteten Rohr (Durchmesser 895 mm) gemessen. Nach Einfüllen eines definierten Wasservolumens wird mittels Stechpegel die eingesetzte Versickerungsrate zeitabhängig mit einer relativen Genauigkeit von 0.1 mm gemessen. Jede Befestigungsart wurde mit unterschiedlichen Einfüllvolumina (15 - 70 l) bzw. Ausgangsversickerungshöhe untersucht. Die Messungen erfolgten so lange, bis sich eine konstante Versickerungsrate ergab. Zur quantitativen Beurteilung der gemessenen Versickerungsspenden wurde die jährliche Niederschlagscharakteristik für Hamburg herangezogen. Neben den Versickerungsversuchen wurde die Kornverteilung und der Wassergehalt der Unterbauschichten der Standorte bestimmt. Im einzelnen wurden die in Tabelle 15 - 17 dargestellten Ergebnisse erzielt.

Tab. 15: Zusammfassung der Untersuchungen an verschiedenen Kleinpflastern
(BINNEWIES u. SCHÜTZ, 1985, S. 32 - 33 und Anhang Blatt 19, verändert)

Befestigungsart	**Kleinpflaster alt**	**Kleinpflaster neu**	**Kleinpflaster alt**
Standort	Bebelallee	Bebelallee	Stadthausbrücke
Steingröße (cm)	ca. 8/8	<-------	ca. 10/10
Fugengröße (mm)	ca. 9 - 11	<-------	ca. 14 - 16
Fugenanteil (%)	23 - 25	<-------	30 - 32
Pflasterbett	Pflastergrand	<-------	Sandbett
Tragschicht	Schlacke	<-------	Sandunterbau
Mittlere Versickerungsspende brutto l/s/ha	16.3 - 26.0	5.3 - 32.9	112.0 - 339.0
bezogen auf die Versickerungshöhe h=0 l/s/ha	10.6 - 23.0	4.3 - 26.6	87.0 - 280.0
jährlich erfaßte Hamburger Niederschlagshöhe %	69 - 74	67	98

Die Streuung der Untersuchungsergebnisse ist nach BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985) durch den sehr unterschiedlichen Aufbau der Befestigungen zu erklären. Das Kleinpflaster in der Bebelallee hebt sich durch eine kleinere Steingröße, eine kleinere Fugenbreite und damit einen kleineren Fugenanteil gegenüber dem Steinpflaster in der Stadthausbrücke hervor. Desweiteren weist das Fugenmaterial, die Bettungsschicht und die Tragschicht einen vergleichsweise

hohen Feinkornanteil auf. Insbesondere widersprechen die niedrigen Versickerungsspenden des neuverlegten Kleinpflasters, der Vorstellung einer Alterung der Pflasterbeläge. Es konnte aber festgestellt werden, daß das verwendete neue Fugen- und teilweise auch Bettungsmaterial schon vor seinem Einbau einen erhöhten Feinkornanteil besaß. Die Querneigung hatte, wie auch bei allen anderen Befestigungsarten, keinen Einfluß auf die Versuchsdurchführung. Die ausgewählten Kleinpflaster-Befestigungen, soweit sie die Bandbreite der vorhandenen Kleinpflasterflächen umfassen, besitzen somit ein mittleres bis gutes Versickerungsvermögen.

Die Schwankungsbreiten der Ergebnisse für das Verbundpflaster (Tab. 16) führen die Gutachter auf den unterschiedlichen Aufbau der Befestigung, insbesondere auf den Fugenanteil bzw. die Fugenbreite zurück. Die hohe Wasserdurchlässigkeit des neuverlegten Betonsteinpflasters ergibt sich aus dem nicht vollständigen Einschlämmen des Fugenmaterials nach dem Neuverlegen des Pflasters. Mit der Alterung der Flächen werden diese Fugenbereiche aber aufgefüllt und setzen sich im Laufe der Zeit zu. Das Verbundpflaster in der Hebebrandstraße verfügt über einen höheren Fugenanteil und das Fugenmaterial und die Bettungsschicht weisen weniger Feinkornanteile auf. Das Versickerungsvermögen hat offensichtlich durch Alterungserscheinungen kaum gelitten. Für das in Hamburg besonders für Radwege übliche Betonsteinpflaster mit engen Fugen wird ausgesagt, da es nur ein geringes Versickerungsvermögen aufweist. Eine größere Durchlässigkeit kann durch einen höheren Fugenanteil sowie Bettungs- und Unterbauschichten mit größerer Durchlässigkeit erzielt werden.

Tab. 16: Zusammfassung der Untersuchungen an verschiedenen Betonsteinpflastern (BINNEWIES u. SCHÜTZ, 1985, S. 35 - 37 u. Anhang Blatt 19, verändert)

Befestigungsart	**Verbundpflaster alt**	**Verbundpflaster neu**	**Verbundpflaster alt ca. 15 Jahre**
Standort	Bellevue	Bellevue	Hebebrandstraße
Steingröße (cm)	10/20	<-------	d= 10
Fugengröße (mm)	ca. 1	<-------	ca. 2
Fugenanteil (%)	1	<-------	3
Pflasterbett	Sand	<-------	Sandbett
Tragschicht	Schlacke	<-------	Sandunterbau
Mittlere Versickerungsspende brutto l/s/ha	1.7 - 4.5	54.0 - 72.0	52.0
bezogen auf die Versickerungshöhe h=0 l/s/ha	1.4	45.5 - 60.0	-
jährlich erfaßte Hamburger Niederschlagshöhe %	10 - 22	87 - 92	90

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse für die Grandbefestigungen dargestellt. Die Befestigung Grand Bellevue entspricht nach BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985) der in Hamburg üblichen Bauweise, die aus einer Tragschicht aus Schlacke und einer 2 cm dicken Deckschicht aus Grand besteht. Das Grandmaterial ist entsprechend den Untersuchungen von FLOSS (1985) zit. in BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985) nur gering wasserdurchlässig. Die Tragschicht aus Schlackenmaterial muß aufgrund der geringen Versickerungsleistung ebenfalls relativ undurchlässig sein. Die besseren Versickerungswerte der Grandbefestigung in der Hebebrandstraße lassen bei ähnlicher Kornverteilung des Grandmaterials auf eine geringere Verdichtung der Deckschicht schließen. Außerdem wurde als Unterbau eine Tragschicht aus Splitt anstatt der üblichen Schlacketragschicht eingesetzt. Für die Grandbefestigung mit Schlackenunterbau wird ein geringes Versickerungsvermögen angesetzt.

Tab. 17: Zusammfassung der Untersuchungen an verschiedenen Grandbefestigungen (BINNEWIES u. SCHÜTZ, 1985, S. 38 u. Anhang Blatt 19)

Befestigungsart	**Grand**	**Grand**
Standort	Bellevue	Bebelallee
Grand	Grand	Grand
Tragschicht	Schlacke	--
Unterbau 1	--	Splitt
Unterbau 2	--	Splitt
Mittlere Versickerungsspende brutto l/s/ha	2.5 - 6.9	14.0 - 30.4
bezogen auf die Versickerungshöhe h=0 l/s/ha	0.2 - 3.2	6.2 - 15.9
jährlich erfaßte Hamburger Niederschlagshöhe %	10 - 30	60 - 70

Nach BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985) lassen die gewonnenen Ergebnisse nicht den generellen Schluß zu, daß durch Einschwemmen von Feinstoffen eine maßgebliche Verringerung der Durchlässigkeit in überschaubaren Zeiträumen auftreten muß. Die Frage einer etwaigen Alterung ist von der Kornverteilung des Fugen-, Bettungs- und Unterbaumaterials, aber vor allem von der Fugenbreite abhängig.

Aufgrund der Ergebnisse von KOWALEWSKI et al. (1984) und dem Gutachten von BINNEWIES u. SCHÜTZ (1985) ging BORGWARDT (1992) der Frage nach, inwieweit eine nutzungsbedingte Veränderung des Fugensandes Auswirkungen auf die Versickerungsfähigkeit der Pflasterfugen hat. Ziel einer Voruntersuchung war es zu ermitteln, in welchen Ausmaß in den Fugen von Pflaster- und Plattenbelägen eine Anreicherung von mineralischen und organischen Feinteilen erfolgt. Außerdem sollte versucht werden, die Abhängigkeit von Fugenbreite und Art der Verkehrsbelastung aufzuzeigen. Untersucht wurden Pflaster- und Plattenbeläge von minderbelasteten Flächen, da hier Entsiegelungsmaßnahmen am ehesten möglich erscheinen (Tab. 18). Analysiert wurden das Material aus den obersten 2 cm der Pflasterfugen und der Pflasterunterbau.

Tab. 18: Zusammenstellung der untersuchten Flächen nach Belag, Alter und Belastung (BORGWARDT, 1992, S. 420, verändert)

Entnahme-stelle	Deckenbauweise	Belastungsklasse	Herstellungs-jahr	Fugenbreite
3	Mosaikpflaster (6*6*6)	Gehweg (RStO -)	1965	0.5 - 1 cm
4	Mosaikpflaster (6*6*6)	Gehweg (RStO -)	1965	0.5 - 1 cm
5	Mosaikpflaster (6*6*6)	Platz (RStO -)	1965	0.5 - 1 cm
6	Mosaikpflaster (6*6*6)	Parkfläche (RStO VI)	1955	0.5 - 1 cm
7	Mosaikpflaster (6*6*6)	Anlieferung (RStO VI)	1955	0.5 - 1 cm
11	Kleinpflaster (10*10*10)	Gehweg (RStO -)	1965	1- 1.5 cm
1	Kleinpflaster (10*10*10)	Parkfläche (RStO VI)	1965	0.5 - 1 cm
2	Kleinpflaster (10*10*10)	Parkfläche (RStO VI)	1965	0.5 - 1 cm
8	Kleinpflaster (10*10*10)	Parkfläche (RStO VI)	1965	1- 1.5 cm
9	Großpflaster (20*16*10)	Fahrbahn (RStO V)	1988	1 cm
15	Klinkerpflaster NF (24*11.5*7.1)	Gehweg (RStO -)	1985	0.5 cm
12	Betonrechteckpfl. (20*10*8)	Parkfläche (RStO VI)	1965	0.5 - 1 cm
13	Betonrechteckpfl. (20*10*8)	Parkfläche (RStO VI)	1965	0.5 cm
14	Betonverbundpfl. (20*10*10 UNI)	Parkfläche (RStO VI)	1985	0.2-0.5 cm
10	Betonplatten (50*25*4)	Gehweg (RStO -)	1965	0.5 cm

Der Gehalt an organischer Substanz ergab beim Fugensand einen Mittelwert von 3.8 %. Die Gehalte an abschlämmbaren Teilchen (d < 0.063 mm) lagen im Pflastersand im Mittel bei 2.4 % und im Fugensand bei 15.7 %. Der Einfluß von Einbaualter und Deckenbauweise war in den vorliegenden Ergebnissen nicht zu erkennen. Die Wasserdurchlässigkeit, die aufgrund der geringen Volumina des Fugenmaterials und der Störung der Proben nicht im Labor bestimmt werden konnte, wurde durch eine näherungsweise rechnerische Abschätzung aus der Korngrößenverteilungskurve nach BEYER (1964) bestimmt. Diese Methode ergab, daß der Fugensand im Mittel nur noch eine Wasserdurchlässigkeit von kf $3.7*10^{-5}$ m/s gegenüber einem mittleren kf-Wert beim Pflastersand von kf $7.2*10^{-4}$ m/s aufweist. Danach hat die Wasserleitfähigkeit des Fugensandes in Folge der Veränderung in der Korngrößenverteilung um mehr als das 10fache abgenommen. In der Untersuchung konnten signifikante und zum Teil hoch signifikante Unterschiede zwischen der Wasserleitfähigkeit der Ausgangsstoffe und den gealterten Stoffen festgestellt werden. Aufgrund des zu geringen Umfangs der Untersuchung konnten keine signifikanten Korrelationen bezüglich der Abhängigkeit der Abnahme der Wasserleitfähigkeit von Fugenausbildung, Alter und Verkehrsbelastung der Flächen hergestellt werden. Es wird aber vermutet, daß es mit zunehmendem Alter und dauerhafter Belastung zu einem Abrieb des mineralischen Körpers sowie zu einem Eintrag von Fremdstoffen kommt. Dies führt zu einer Abnahme des Porenvolumens in der Fuge (BORGWARDT,1992).

DELLWIG (1988) untersuchte verschiedene wasserdurchlässige Beläge auf Eignung, Funktion und Haltbarkeit für die Nutzung als Zufahrten für Sammelgaragen. Für die Experimente wurde ein repräsentativer Querschnitt von auf dem Markt erhältlichen Materialien ausgewählt, die laut Herstellerangabe mindestens teilweise wasserdurchlässig sein sollten. Die Wasserdurchlässigkeit wurde anhand eines Doppelring-Infiltrometers in situ gemessen. Bei diesem Verfahren wird die Versickerungsintensität durch die in einer Zeiteinheit je Flächeneinheit in den Boden eintretende Wassermenge ermittelt. Sie wird in Millimeter Wasserverlust je Sekunde angegeben (Tab. 19).

Tab. 19: Wasserdurchlässigkeit der untersuchten Beläge (DELLWIG, 1988, S. 461, verändert)

Belagsart	Standort	Alter (Jahre)	Basisrate (cm/s)
Schotterrasen	Gehweg (Spielplatz)	-	0.5
Kunststoffbelag	Tennisplatz	ca. 15	0.2
Rasenpflaster	Parkfläche	-	0.11
Rasengitterstein	Garagenzufahrt	ca. 8	0.03
Holzpflaster	Pausenhof	ca. 1	0.02
Rasen		-	0.01
Wassergebundene Decke	Fahrfläche (Sammelgarage)	ca. 15	0.006
HESA- Rasenziegel	Parkfläche	-	0.005

Die ermittelten Basisraten können nach DELLWIG (1988) zwar bedingt durch differenzierten Aufbau, Lage und Nutzung, bei gleichen, an anderer Stelle untersuchten Belägen etwas unterschiedlich sein, sie geben aber mit Sicherheit eine klare Tendenz an. Die hohe Basisrate des Schotterrasens ist auf die 15 cm stark aufgebrachte Schotterschicht zurüchzuführen, auf welche nur ein 5 cm dicker Oberboden aufgetragen wurde. Eine Nutzung dieser Befestigungsart als gelegentlich genutzte Parkflächen wird von DELLWIG (1988) aufgrund der hohen an den Belag gestellten Ansprüche (Sauberkeit, Begehbarkeit, Pflegeaufwand etc.) in Frage gestellt.

Die Infiltrationsrate der Rasengittersteine, der HESA- Rasenziegel und des Pflasterrasens hängt maßgeblich von dem Füllmaterial der Kammern ab. Die verhältnismäßige schlechte Durchlässigkeit des Rasenziegels ist einerseits auf das in den Waben befindliche Substrat (5 - 10 Vol.-% grobkörniges Material) zurückzuführen andererseits war der Untergrund bei den Versuchen wassergesättigt (hoher Grundwasserstand). Die guten Basiswerte der Rasengittersteine und des Rasenpflasters ergeben sich aus der Splitt/Oberbodenfüllung der Waben und aus der Fugenbreite von 3 - 4 cm. Zusätzlich verhindert die Lastaufnahme der Gittersteinenwaben eine Verdichtung durch die Fahrzeuge, wenn diese eine max. Größe von ca. 5 * 5 cm haben und das Wabensubstrat ca. 1 - 2 cm unter der Steinoberkante liegt. Der Einsatz dieser Deckenbauweise ist, nach Abstrichen bei dem Deckungsgrad der Grasnarbe und der Begehbarkeit, möglich. Ob die gute Durchlässigkeit des Rasenpflasters auf viele Jahre gesichert ist, bleibt abzuwarten. Das Holzpflaster besteht aus einem kesseldruckimprägnierten Fichtenholz (Durchmesser 8 -20 cm). Die Zwischenräume (Zwickel) sind mit 3 bis 5 mm Splitt ge-

füllt. Die ermittelte Basisrate von 0.02 cm/s ist sicherlich durch die formbedingten Zwickel und den Unterbau erreicht worden. Der in der DIN 18035 vorgeschriebene Infiltrationsrate von 0.1 cm/s wird von dem 15 Jahre alten Kunststoffbelag noch übertroffen. Es wird angeregt, diesen Belag auch für befahrbare und für Spielzwecke genutzte Bereiche zu testen (DELLWIG, 1988).

Für die wassergebundene Decke stellte sich heraus, daß sie nicht in dem vorgestellten Maße durchlässig ist. Die Basisrate betrug nur 0.006 cm/s. Durch die Benutzung mit dem Pkw kommt es zu einem Abrieb des Deckenmaterials. Durch die Ansammlung von Staub und das Walken der Reifen werden die Deckschichten derart verdichtet, daß die gewünschte Durchlässigkeit nicht mehr gegeben ist. Bei starken Niederschlägen weicht die Deckschicht auf, wodurch bei intensiver Nutzung Fahrzeuge an kritischen Punkten Löcher ausfahren. Durch die Pfützenbildung entsteht damit eine schlechte Begeh- und Befahrbarkeit, so daß eine ständige Unterhaltspflege notwendig ist, um diese Gegebenheiten zu unterbinden. Desweiteren fehlt nach langen Trockenzeiten die Bindung der Bestandteile durch das notwendige Wasser (DELLWIG, 1988).

Im Rahmen einer Untersuchung für das Hessische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Landesentwicklung wurde am Institut für Wasserbau, Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH Darmstadt ein Tropfinfiltrometer entwickelt. Für die Messungen mit dem Tropfinfiltrometer muß die Testfläche nicht verändert werden. Diese wird durch einen ca. 3 cm hohen Metallring (d = 54 cm) durch eine umlaufende Mörtelfuge gegen die umgebende Fläche abgedichtet. Die Beregnung erfaßt eine gesamt Fläche von 78 cm Durchmesser, so daß eine laterale Bewegung des auf der inneren Testfläche infiltrierten Wassers verhindert wird. Der Tropfinfiltrometer erzeugt nur einen Wasserfilm von wenigen Millimetern Höhe, welcher durch das Betropfen aufrecht erhalten bleibt. Die gleichmäßige Verteilung des Niederschlags über die Testfläche wird über einen 2 cm hohen quadratischen Plexiglaskasten (Fläche 80 * 80 cm) erreicht, welcher kreisförmig mit Injektionsnadeln bestückt ist (KRETZER u. RUID-RODRIGUEZ, 1992).

Das Meßsprogramm umfaßte herkömmliche Feldwege (Erd- und Grünwege), Wege aus Sand/Splitt- und Dränbeton-Tragschichten und drei verschiedene Verbundstein-Beläge (Verbund-Vollstein, poröser Verbundstein, Rasengitterstein). Es wurden je drei Versuche pro Belagart an verschiedenen Stellen durchgeführt. Bei den Verbundsteintypen wurde die Infiltration auf einer im Mai 1991 fertiggestellten Teststrecke im Neubauzustand und im darauf folgenden Jahr gemessen. Die Infiltrationsganglinien zeigten für fast alle Experimente eine typische Charakteristik. Am Anfang ist die Infiltration hoch und fällt je nach Art der Oberflächenbeschaffenheit innerhalb von 10 bis 30 Minuten ab, um sich asymptodisch einem konstanten Endwert zu nähern. Diese Endinfiltrationsrate konnte nach 60 bis 90 Minuten genau

bestimmt werden. Die Endinfiltrationsrate kann dem Durchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert) bei nahezu gesättigten Verhältnissen gleichgesetzt werden. In den Versuchen wurden kf-Werte im Bereich von $3*10^{-7}$ m/s bis $5*10^{-5}$ m/s erreicht (KRETZER u. RUID-RODRIGUEZ, 1992).

Die Mittelwerte und Spannweiten der Endinfiltrationsintensitäten sind in Abbildung 1 dargestellt. Für den Vollverbundstein und den Rasengitterstein konnte keine eindeutige Abnahme der Versickerungsfähigkeit mit dem Alter festgestellt werden. Der Beobachtungszeitraum von einem Jahr ist nach Ansicht der Autoren zu kurz. Für die extreme Abnahme der Endinfiltrationsraten für den porösen Verbundstein wird als mögliche Ursache die Zusammensetzung des Fugenmaterials und das Verfahren zum Einbringen dieses Materials angesehen. Der Fugensand wird flächig auf die porösen Steine aufgebracht, um anschließend eingekehrt zu werden. Der Rest wird durch den Niederschlag allmählich eingeschwemmt, so daß die Eigenporosität des Pflasters herabgesetzt wird. Die niedrigsten Infiltrationsraten weisen die vermeidlich gut durchlässigen Wegetypen wie Erd- und Grünweg sowie die Wege aus einer Sand/Splitt-Tragschicht auf. Für die Feldwegtypen Erd- und Grünweg wurde zudem eine verminderte Sickerfähigkeit vom Randstreifen über den Mittelstreifen zur Fahrspur hin beobachtet (KRETZER, u. RUID-RODRIGUEZ, 1992).

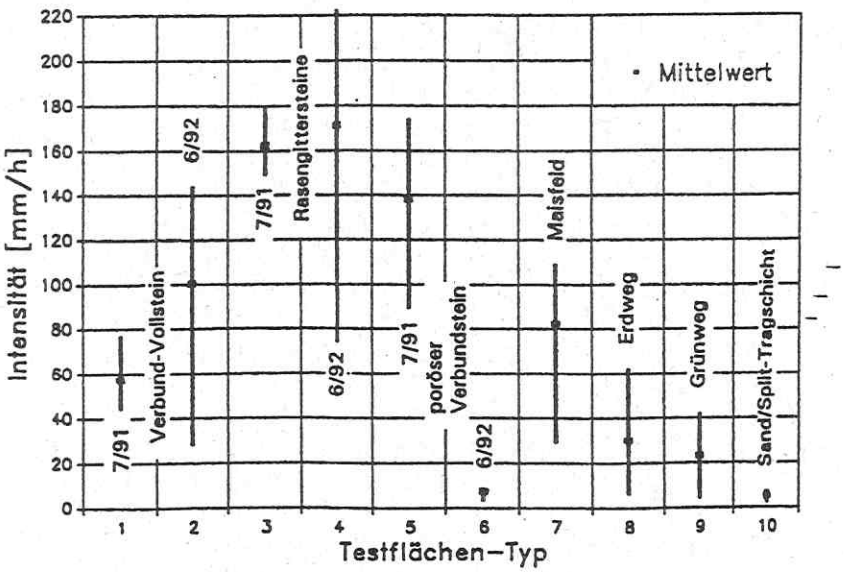


Abb. 1: Endinfiltrationsraten für verschiedene Befestigungsarten (KRETZER u. RUID-RODRGUEZ, 1992, S. 806)

Im Mittelpunkt einer Untersuchung von BORGWARDT (1994a, 1994b, 1995) steht der Vergleich der Versickerungsfähigkeit zwischen wassergebundenen Decken und Pflasterbelägen (Klinker- und Betonsteine, Fugenbreite ca. 1 cm) verschiedenen Alters. Um Vergleiche zu unversiegelten Standorten ziehen zu können, wurden auch im Bereich von Baumscheiben und im Traufbereichen frei stehender Bäume Messungen vorgenommen. Die Wasserdurchlässigkeit wurde vor Ort durch die Bestimmung der Infiltrationsrate gemessen. Für die Messungen wurde der erwähnte Tropfinfiltrometer des Institutes für Wasserbau an der TH Darmstadt eingesetzt. Neben den Infiltrationsmessungen erfolgte eine Siebanalyse zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der obersten Deck- bzw. Fugenschicht und die Ermittlung des Anteils an organischer Substanz durch Glühverlust. In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der untersuchten Standorte aufgeführt.

Tab. 20 : Ergebnisse der untersuchten Standorten (BORGWARDT, 1995, S. 14)

Standort	aufnehmbare Regenspende (r_{15} in l/s*ha)	Wasserdurchlässigkeit (kf in m/s)	Feinanteil < 0.063 mm (Massen-%)	Anteil an organischer Substanz (Massen-%)
Gruppe I (Pflasterbeläge)				
1	300	$2*10^{-6}$	17.9	6.1
2	70	$1*10^{-7}$	33.9	8.9
3	50	$1*10^{-6}$	46.1	11.2
4	10	$1*10^{-7}$	27.5	28.4
x	**70**	**$1*10^{-6}$**	**13.4**	**13.7**
Gruppe II (wassergebundene Beläge)				
1	40	$5*10^{-7}$	15.8	1.5
2	30	$2*10^{-6}$	22.1	2.7
3	50	$2*10^{-6}$	47.8	1.2
4	25	$2*10^{-6}$	15.9	0.8
5	10	$1*10^{-7}$	16.1	1.5
6	0	$1*10^{-7}$	15.5	1.9
x	**25**	**$1*10^{-7}$**	**22.2**	**1.6**
Gruppe III (Baumscheiben)				
1	400	$1*10^{-5}$	8.8	3.0
2	400	$1*10^{-5}$	9.9	1.3
3	105	$5*10^{-6}$	20.9	2.0
x	**155**	**$1*10^{-5}$**	**13.2**	**2.1**

Die Tabelle verdeutlicht, daß die wassergebundenen Decken trotz der ungepflasterten Oberfläche eine weitaus geringere Aufnahmekapazität besitzen als die verfugten Pflasterbeläge. Zwar liegen in diesen Gruppen die Durchlässigkeitsbeiwerte mit 10^{-6} bis 10^{-7} m/s relativ nah beieinander, doch die für das Ausmaß des Oberflächenabflusses maßgebliche aufnehmbare Regenspende innerhalb eines 15-Minuten-Regens zeigt doch gravierende Unterschiede. Die Werte für den Ton- und Schluffanteil liegen mit 22.2 Massen % und für den Anteil an organischer

Substanz mit 1.6 Massen % bei den wassergebundenen Bauweisen relativ niedrig. Der Umstand der geringen Infiltration ist daher eher durch die Kornabstufung und durch die Kornform bedingte dichte Lagerung zurückzuführen. Die nutzungsbedingte Beanspruchung führt durch die ungünstigere Lastverteilung gegenüber der druckausgleichenden Deckschicht aus Pflastersteinen zu einer Nachverdichtung der eingesetzten Mineralstoffe. Die statische Erschütterung durch die Begehung ist bei wassergebundenen Decken weitaus höher als bei Pflasterbelägen und führt zu einer hohen Lagerungsdichte des Mineralstoffes. Diese Feststellung erklärt auch die höheren Infiltrationsraten bei den unbelasteten Baumscheiben der Gruppe III bei ähnlichen Sieblinien. (BORGWARDT, 1994a, 1994b, 1995).

(BORGWARDT, 1994a, 1994b, 1995) betont, daß die Hauptwirkungen der Versiegelung im Bereich des Luft- und Wasserhaushaltes liegen. Die Wahl der Bauweise kann nur eine unterstützende Funktion haben. Sie hat keinen Einfluß auf das, wie auch immer zu quantifizierende Ausmaß der Versiegelung. Die Ergebnisse zeigen, daß eine Bewertung von Flächenversiegelung mit Hilfe von Punktsystemen oder ähnlichen nicht wissenschaftlich begründbar und damit nicht objektiv einsetzbar ist. Es stellt sich weniger die Frage nach der Art des Belages, sondern vielmehr nach der Menge des anfallenden Oberflächenabflußes bzw. nach der versikkerbaren Niederschlagsmenge. Eine Oberflächenbefestigung muß dauerhaft etwa 200 l/s*ha in einem 15-Minuten-Regen aufnehmen können (*ATV 183*, 1990). Dies leistet nach BORGWARDT (1994a, 1994b, 1995) keine im Moment auf dem Markt befindliche Bauweise und am allerwenigsten wassergebundene Decken. Eine umweltfreundliche Methode der Entsiegelung kann nur in der baurechtlich zu berücksichtigenden Versickerung in seitliche Vegetationszonen bestehen. Daher sollte im Zuge der Bauleitplanung als Ausgleich für jede Versiegelung eine zugeordnete Versickerungszone freigehalten werden.

In einer Untersuchung von HADE u. SMITH (1988) in den USA wurde der Abflußkoeffizient von Betonpflasterbelägen (Unidecor) ermittelt (Tab. 21). Die Experimente sollten einen Beitrag für die Dimensionierung von Abflußsystemen liefern. Es wurden mit einem tragbaren Regensimulator 118 in situ Versuche auf neun Flächen in Fußgängerzonen und auf drei Flächen an Straßenkreuzungen durchgeführt. Die Beläge waren in diesen Bereichen seit zehn Monaten im Gebrauch. Für die Beregnung wurden drei unterschiedliche Regenintensitäten angewandt, welche für den Osten der USA und damit für den Versuchsort (Muncie in Indiana) typisch sind. Sie repräsentieren durchschnittliche Unwetterereignisse, wo der Abfluß durch Infiltration mit derartigen durchlässigen Pflastern gemanagt werden kann.

Tab. 21: Pflastereigenschaften (HADE u. SMITH , 1988, S. 221, verändert)

Pflastereigenschaften	**Fußgängerzone**	**Straßenkreuzung**
Testfläche	1 m^2	1m^2
Steinstärke	60 mm	80 mm
durchschnittliche Fugenbreite	3.11 mm	größer 3.11 mm
Neigung der Testfläche	3.7 % - 4.9 %	0.7 % - 1.3 %
Sandbettstärke	50 mm	50 mm
Tragschichtstärke (Schotter)	100 - 150 mm	300 mm
Durchschnittliche Zeit zwischen den Versuchen	12 Stunden	22 Stunden
Austragung von Sand aus den Fugen	nein	ja, etwas
Anzahl der Kraftfahrzeuge	keine	15000 - 10000 +/ Tag

Beregnungsintensitäten:

- 0 - 7 mm/Stunde (0 - 20 l/s*ha)
- 7.1 - 15 mm/Stunde (bis 41 l/s*ha)
- 15.1 - 30 mm/Stunde (bis 83 l/s*ha)

In Tabelle 22 sind die Abflußkoeffizienten für die Beläge dargestellt. Ein Vergleich der Abflußkoeffizienten vermittelt den Eindruck, daß der Straßenverkehr zu einer Abflußminderung beiträgt. Die niedrigeren Werte werden auf die Pumpwirkung der Reifenprofilrillen zurückgeführt, welche bei einer Geschwindigkeit über 50 km/h die Pflasterfugen freisaugen.

Tab. 22: Abflußkoeffizienten einer 30 Minuten Beregnung (HADE u. SMITH, 1988, S.221, verändert)

Regenintensität mm/h	**Anzahl der Tests**	**Durchschnittlicher Koeffizient**	**Standard-abweichung**	**r^2 - Regression - Regenintensität und Abflußkoeffizient**
Fußgängerzone				
0 - 7	31	0.510	0.150	0.27
7.1 - 15	29	0.633	0.099	0.04
15.1 - 30	27	0.794	0.091	0.22
für alle Bereiche		0.639	0.120	0.54
Straßenkreuzung				
0 - 7	12	0.130	0.098	0.002
7.1 - 15	9	0.418	0.226	0.47
15.1 - 30	10	0.660	0.112	0.14
für alle Bereiche		0.385	0.145	0.73

Die Ergebnisse zeigen, daß für Betonpflaster kein konstanter Abflußkoeffizient angegeben werden kann, sondern daß die Regenintensität eine wichtige Rolle bei der Bemessung von Kanalsystemen spielen muß. Es wird deutlich, daß die Abflußkoeffizienten mit der Beregnungsintensität zunehmen. Das Betonpflastersteine kann aber zu einer Verminderung des „first-flush" Effektes, d. h. der Auswaschung von Schadstoffen mit dem Regen in das Kanalsystem während der ersten 30 Minuten eines Unwetters, beitragen (HADE u. SMITH, 1988).

Die Autoren vergleichen ihre Ergebnisse mit denen von CLARK (1985) zit. in HADE u. SMITH (1988), dessen Untersuchung die einzige vorausgehende Studie über die Wasserdurchlässigkeit von Betonpflastersteinen in den USA war. CLARK (1985) benutzte für sein Laborexperiment eine 3 m^2 große Wanne, in welcher sich ein neu verlegtes Betonpflaster befand. Die Flächen hatten eine Neigung zwischen 1 % und 2.5 %. Ein Vergleich beider Untersuchungsergebnisse zeigte, daß die Beregnungsintensitäten in CLARKS-Versuchen meistens höher als 30 mm/h lagen. Es stimmen einige seiner ermittelten Abflußkoeffizienten bei einer Beregnungsintensität zwischen 15 - 30 mm/h mit denen von HADE u. SMITH (1988) überein. Nach HADE u. SMITH (1988) sind die Ergebnisse von CLARK (1985) die logische Weiterführung der Entwicklung der Abflußkoeffizienten bei einer längeren Beregnungsdauer (48 - 90 Minuten gegen 30 Minuten). Für Regenintensitäten von 30 mm/h bis 50 mm/h kann somit ein Abflußkoeffizient von 0.8 angenommen werden. Dieser wird empfohlen für Betonpflaster mit einem Sandbett und einer Schottertragschicht.

In Japan untersuchten SUDA et. al., (1988) die Veränderung des Durchlässigkeitswertes von wasserdurchlässigen Pflastersteinen mit folgenden Eigenschaften: kf $=10^{-3}$ m/s bis 10^{-4} m/s = 10000 bis 1000 l/s*ha , Porenvolumen 12% und mehr. Die Untersuchungen wurden im Parkplatz- und Fußgängerbereich anhand von natürlichen Regenereignissen durchgeführt. Nach 18 Monaten lag der kf-Wert der Pflastersteine im Fußgängerbereich bei 10^{-4} m/s und war damit um eine 10er Potenz niedriger geworden. Der Durchlässigkeitsbeiwert der Pflastersteine im Parkplatzbereich verringerte sich nach ca. 2 Jahren von ursprünglich 10^{-3} m/s auf $5*10^{-5}$ m/s (500 l/s*ha). Ein ein weiteres Absinken der Wasserdurchlässigkeit zeichnet sich nicht ab.

In der Versuchsanstalt für Wasserbau der Fachhochschule Karlsruhe wurden vergleichende hydraulische Versuche mit sickerfähigem Verbundstein aus Beton durchgeführt. Untersucht wurde ein Verbundstein bestimmter Abmessung in zwei Varianten : Form A mit und Form B ohne Sickeröffnungen. Der Anteil der Gesamtsickerfläche bei Form A betrug (Fuge und Sikkeröffnungen) 10 % und bei Form B ca. 2.2 %. Die Versuche wurden im Labor in einer hydraulischen Wanne durchgeführt. Das Pflasterbett bestand aus Splitt 2/5 mm mit einer Mächtigkeit von 3.0 cm. Die Fugen und Sickeröffnungen wurden mit Sand 0/2 mm verfüllt. Laboruntersuchungen zum Durchlässigkeitsbeiwert des Fugensandes ergaben Werte von kf = $1.5*10^{-4}$ m/s bei dichtester Lagerung und kf- Werte von $4.2*10^{-4}$ m/s bei lockerster Lage-

rung. Die Beregnung wurde über eine Regneranlage ausgeführt, wobei das Wasser über 14 Verteilleitungen mit jeweils 16 Öffnungen auf die Versuchsfläche von etwa 2 m^2 aufgebracht wurde. In die Untersuchung wurden Regenspenden von 100/200/350/500 l/(s*ha) und zur Simulation des Langzeitverhaltens von 1000 l/(s*ha) aufgebracht. Diese ergab eine Belastungszeit von 10 Jahren. Die Regenspenden simulieren einen Regen mit kurzer Regendauer und großer Wiederholungszeitspanne. Sie entsprechen der geforderten Niederschlagsspende von 200 l/(s*ha) der ATV 138 (MUTH, 1989, 1990, 1994a, 1994b).

Die Messungen ergaben bei einer gefällosen Verlegung des Pflasters für Form A bis zu einer Regenspende von 200 l/(s*ha) keinen Oberflächenabfluß (Niederschlagswasser wird über die Sickeröffnungen abgeführt). Bei der Form B brachten bereits Regenspenden von 100 l/(s*ha) einen Oberflächenabfluß von 40 l/(s*ha). Regenspenden bis 300 l/(s*ha) verursachen bei Form A einen Abfluß von maximal 15 %. Größere Regenspenden treten nur selten auf und sind gleichzeitig von kurzer Dauer. Wenn ihre Niederschlagshöhe kleiner als 18 l/m^2 ist, kann sie in dem verfügbaren ermittelten Speicher von 16 l/m^2 der Speicheröffnungen von Form A zurückgehalten werden. Bei einem Gefälle von 2.5 % können von Form A nur noch Regenspenden von 100 l (s*ha) zur Versickerung gebracht werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß Pflaster mit Sickeröffnungen mehr Wasser zur Versickerung bringt als das vergleichsweise untersuchte Normalpflaster. Sickerfähige Pflasterdecken sollten gefällos verlegt werden. Das untersuchte Verbundpflaster Form A erfüllt die im Arbeitsblatt A138 (*ATV*, 1990) geforderten Bedingungen und kann darüber hinaus auch größere Regenspenden abführen oder speichern (MUTH, 1989, 1990, 1994a, 1994b).

In verschiedenen Modellversuch des *Leichtweiss-Institutes für Wasserbau, TU Braunschweig* (1989a, 1989b) wurden im Labor ein Rasenfugenpflaster und ein wasser- und luftdurchlässiger Betonstein auf ihre Durchlässigkeit hin untersucht. Die Pflastersteine wurden mir drei verschiedenen Pflasterbetten bzw. Fugenfüllmaterialien (Rundkorn, Splitt, Kombination aus Splitt im Pflastersand und Rundkorn in den Fugen) in einem Kasten verlegt. Für das Splittkorn ergab eine Messung der Wasserdurchlässigkeit einen kf- Wert von $2.7*10^{-2}$ m/s und für das Rundkorn einen kf-Wert von $2.4*10^{-2}$ m/s. Die Versuche wurden mit einer Beregnungsanlage durchgeführt. Die Beregnungsspenden betrugen bis zu 1500 l/(s*ha). Oberflächenverunreinigungen wurden durch das Aufbringen von Straßenkehricht (300, 500, 2000 g/m^2) und Schluffteilchen simuliert.

Das Rasenpflaster konnte bis zu einer Regenspende von 1500 l/(s*ha) den gesamten Niederschlag unabhängig von den verschiedenen Bettungs- bzw. Fugenmaterialien und der Verschmutzung zur Versickerung bringen. In der Versuchsreihe mit dem porösen Betonstein war bei fehlender Oberflächenverschmutzung bis zu einer Regenspende von 1500 l/(s*ha) kein Oberflächenabfluß zu beobachten. Bei einer Oberflächenverschmutzung von 500 g/m² setzte der Oberflächenabfluß bei 420 l/(s*ha) bzw. bei einer Verschmutzung von 2000 g/m² ab 60 l/(s*ha) ein (*Leichtweiss-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig,* 1989a, 1989b).

Um die Beeinflussung des Wärme-, Wasser- und Stoffhaushaltes von verschiedenen versiegelten Böden in situ systematisch zu untersuchen, werden seit 1990 im Stadtgebiet von Hannover neun stationäre Meßstellen betrieben (PAGEL et al., 1993). Ihre Anlage erfolgte auf Sandböden, ohne die langjährige gleichbleibende Nutzung zu beeinträchtigen. Folgende anthropogene Überprägungen wurden ausgewählt: Asphalt, Beton, Schotter, Asche, Rasengitter- und Betonverbundsteine sowie verschiedene Vegetationsbedeckungen (Parkrasen, Zierrasen, Gartenbaufläche). In sechs Tiefenstufen (30, 60, 90, 120, 150 und 200 cm) wurden wöchentlich mittels Einstichtensiometern die Matrixpotentiale und mittels Halbleiterelementen die Bodentemperaturen erfaßt. Bei den Varianten Rasengitterstein, Beton und Asphalt wurde wegen der zu erwartenden starken Effekte in Oberflächennähe noch die Tiefe 20 cm hinzu genommen. Die Gewinnung der Bodenlösung aus drei Tiefen (30-45, 90 und 190 cm) erfolgte für die besonders relevanten Standorte (Parkrasen, Gartenbaufläche, Asche, Schotter, Beton und Asphalt) über Saugkerzen mit einem Unterdruck von -650 hPa.

Die Auswertungen der Bodentemperaturdaten für die Beispiele Zierasen, Rasengitterstein, Asche und Asphalt für die Jahre 1990 bis 1992 (Abb. 2) ergab für den Zierrasen das typische Bild einer ganzjährig vegetationsbedeckten Fläche. Der parallele Verlauf der eingezeichneten Monatsmitteltemperaturen mit den Bodentemperaturen verdeutlicht den Einfluß des Witterungsgeschehens auf einzelne Phasen der Bodentemperatur im Jahresverlauf. Die Jahresamplitude verringert sich mit zunehmender Bodentiefe. Diese vergrößert sich mit zunehmender anthropogener Überprägung vom Zierrasen über Rasengitter, Asche bis zum Asphalt. Im Sommerhalbjahr kommt es aufgrund der erhöhten Strahlungsabsorption und des verminderten Wärmeverlustes wegen eingeschränkter Verdunstung zu einer starken Aufheizung des Bodens bis in tiefere Bodenschichten. Im Winterhalbjahr findet unabhängig von der Überformung eine Annäherung im Temperaturniveau statt. Folglich sind im Jahresmittel die Bodentemperaturen unter Versiegelung erhöht. Hierdurch bildet sich in der Stadtlandschaft eine tiefgründige Wärmeinsel aus (PAGEL et al., 1993).

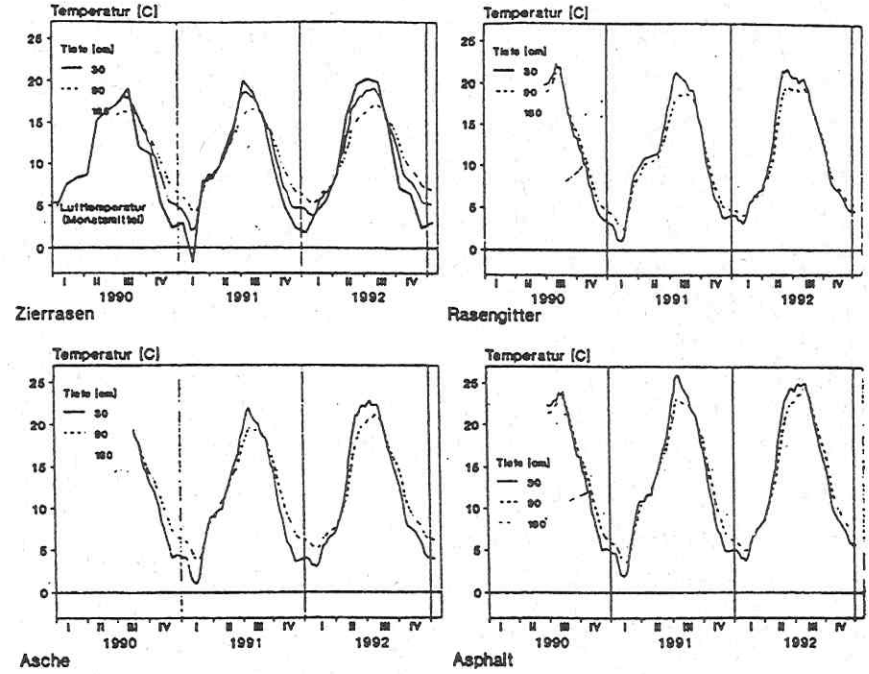


Abb. 2: Jahresgang der Bodentemperaturen 1990 - 1992 in drei Tiefen bei unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung (PAGEL et al., 1993, S. 1388)

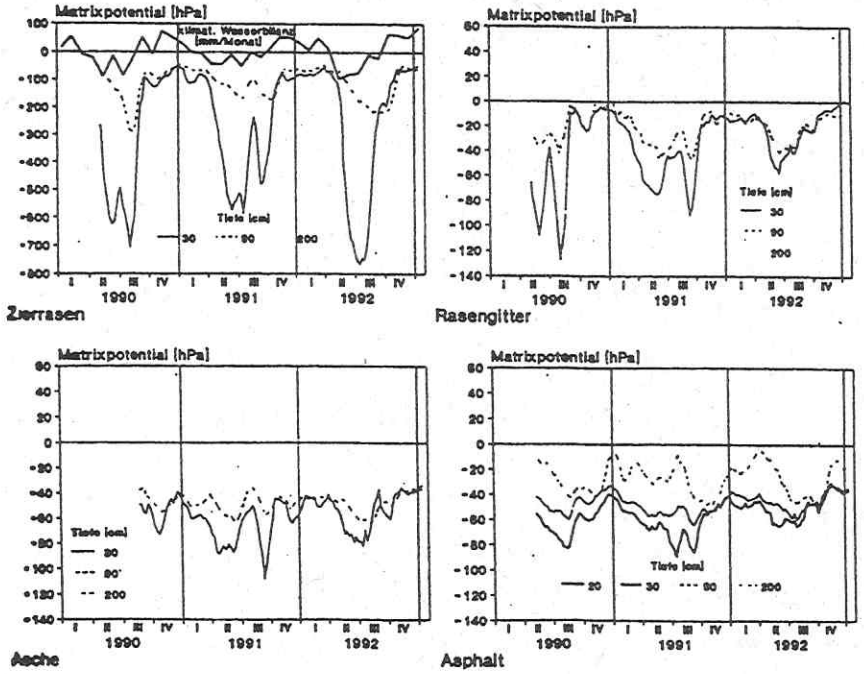


Abb. 3 : Jahresgang der Matrixpotentiale 1990 -19 92 in drei Tiefen bei unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung (PAGEL et al., 1993, S. 1389)

Für den Jahresgang der Bodenfeuchte, welche anhand der Matrixpoteniale (Abb. 3) bestimmt wurde, zeigt sich für den Zierrasen eine sommerliche Austrocknung und eine winterliche Wiederbefeuchtung. Mit zunehmender Tiefe ist eine Abschwächung dieser Prozesse und eine zeitliche Verzögerung sichtbar. Mit der steigender anthropogenen Überprägung erfolgt eine Dämpfung der Amplitude des Jahresganges der Bodenfeuchte. Für den Rasengitterstein bleibt jedoch der typische Jahresgang einer vegetationsbedeckten Fläche erhalten. Eine noch stärkere Dämpfung der Jahresamplitude ergibt sich aufgrund der fehlenden Transpiration und der Barrierewirkung der Abdeckschicht für die Aschedecke. Auch bei der Asphaltdecke als Vollversiegelung kommt es zu periodischen Änderungen des Matrixpotentials. Daraus ist zu schließen, daß eine Infiltration z.B. durch Risse möglich ist. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, daß es im Jahresverlauf mit zunehmender anthropogener Überprägung nicht mehr zum typischen Wechsel von Versickerung und kapillarem Aufstieg kommt, sondern eine ganzjährige Versickerung stattfindet (PAGEL et al., 1993).

In dem laufenden Forschungsvorhaben „Entsiegelungswirkung ausgewählter Oberbauarten für Verkehrsflächen in Abhängigkeit von Witterungsverlauf und Nutzung", durchgeführt durch die Kooperationspartner *Firma GaLaBau Emsland, Lingen; Stadt Lingen und FH Osnabrück - Labor für Technik-* (1995) werden folgende grundsätzlichen Fragestellungen bearbeitet:

- Welche Niederschlagsmenge gelangt durch direkten Oberflächenabfluß in die Vorflut?
- Wieviel Wasser wird an der Oberfläche gebunden und wieviel Wasser versickert in den Oberbau (Pflaster, Ausgleichsschicht, Tragschicht)?
- Welche Niederschlagsmenge dringt in den anstehenden Baugrund ein?
- Wieviel Prozent der versickerten Niederschlagsmenge kann letztlich noch der Grundwassererneuerung dienen?
- Welche Einflüsse hat der natürliche Witterungsverlauf und der künstlich erzeugte Stark-, Vor- und Nachregen auf das Abflußverhalten?
- Wie hoch ist die Verdunstungsrate von der Oberfläche und aus dem Oberbau anzusetzen?
- Wie groß ist der Schadstofftransfer durch Oberflächen- und Sickerwasser bei unterschiedlichen Bauweisen?
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Schichtenaufbauten auf das hydraulische Verhalten?
- Welche Einflüsse hat der Witterungsverlauf und die Nutzung auf die unterschiedlichen Oberbauvarianten?

Das Forschungsvorhaben hat sich zur Aufgabe gestellt, diese Fragen an einem Parkplatz (ca. 2000 m^2 groß) in Form eines Modellversuches mit zeitgleicher Aufnahme der Wetterdaten zu klären. Bei den zu untersuchenden Pflasterarten handelt es sich um Rechteck-Betonsteine mit 3 cm Fugen, 1 cm Fugen und fugenarm sowie um Drain-Einkornbetonsteine fugenarm und Drainbetonsteine mit 4 mm Fugen. Bei 38 gleichgroßen Versuchsflächen wird in zwei Horizonten zum einen der Oberflächenabfluß und zum anderen der Planungsabfluß gemessen. Dabei unterscheiden sich die meist jeweils gegenüberliegenden Versuchsflächen alleine in der Abdichtung zum Baugrund und nicht im Schichtenaufbau oder der jeweiligen Querneigung von 1 % oder 2.5 %. Die verschiedenen Versuchsfelder unterscheiden sich desweiteren durch den Aufbau der Tragschicht und der teilweisen Einsaat von Rasen in die Fugen. Zum Einsatz kommen Schotter 0/45, Recycling-Betonaufbruch 0/32 und ein Splitt-Schottergemisch. Die Ausgleichsschicht besteht aus Splitt 2/5 oder Grubensand.

Die Abflußwerte der unterschiedlichen Horizonte werden in 11 Schächten bis zu Kleinstmengen z.B. von 5 ml pro Tag mit Hilfe von Durchflußmengenmessern und Kippwippen erfaßt und an die Meßzentrale weitergeleitet. In dieser Zeit findet zeitgleich die Aufzeichnung der Meßdaten der eigenen meteorologischen Station statt. Neben den hydraulischen Daten sollen durch Probenahmen aus dem von den einzelnen Teilflächen abfließenden Wasser chemisch-qualitative Hinweise zum Schadstofftransfer gewonnen werden. Während der Bauphase und der Versuchsdurchführung sowie nach Beendigung der Messungen werden bodenmechanische Untersuchungen am Baugrund bzw. an den Baustoffen durchgeführt, um die hier auftretenden Veränderungen aufzuzeigen.

An der Technischen Universität Cottbus am Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik (*mündliche Mitteilung*, 1995) wird zur Zeit das Forschungsthema „Anforderungen an Wasserdurchlässigkeit und die erforderliche unterirdische Entwässerung von Befestigungen mit wasserdurchlässigen Pflaster- und Plattenbelägen“ (Kurztitel „Offene Straßenbeläge“) bearbeitet. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden Beregnungsversuche in situ mit einem Tropfinfiltrometer durchgeführt.

4. Literatur

ATV 138 (Abwassertechnische-Vereinigung, Hrsg.) (1990): Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigten Niederschlagswasser. - Arbeitsblatt A 138, St. Augustin

BERLEKAMP, L.-R. u. PRANZAS, N. (1990): Erhebung von Bodenversiegelung in Ballungsräumen.- In: Bodenschutz - Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Boden, Landschaft und Grundwasser. ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., EINSELE, G. u. HARRES, H.-M.(Hrsg.), 1 - 23, Berlin

BERLEKAMP, L.-R. u. PRANZAS, N. (1992): Erfassung und Bewertung von Bodenversiegelungen unter hydrologisch-stadtplanerischen Aspekten am Beispiel eines Teilraums von Hamburg.- Dissertation, Hamburg

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve.- Wasserwirtschaft/Wassertechnik, 14. H. 6, 165 - 168

BINNEWIES, W. u. SCHÜTZ, M. (1985): Gutachten über das Versickerungsverhalten Hamburger Gehwegbefestigungen.- (Baubehörde der Freien Hansestadt Hamburg)

BISCHOFSBERGER, W., PABST, M. u. SCHULZ, W. (1990): Versickerungsleistung industriell gefertigter Oberflächen.- (Prüfamt für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der Technischen Universität München)

BLUME, H.-P. (1992): Einführung .- In: Handbuch des Bodenschutzes. BLUME, H.-P. (Hrsg.), 1 - 3, Landsberg/Lech

BLUME, H.-P. (1993): Böden.- In: Stadtökologie. SUKOPP, H. u. WITTIG, R. (Hrsg.), 1993, 154 - 170, Stuttgart, Jena, New York

BÖCKER, R. (1985): Bodenversiegelung - Verlust vegetationsbedeckter Flächen in Ballungsräumen.- Landschaft + Stadt, 17, (2), 57 - 61

BÖHME, S. (1986): Zum Zusammenhang von Oberflächenversiegelung und Vegetationsvolumen städtischer Teilgebiete- dargestellt am Beispiel der Stadt Erfurt.- Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Reihe A: Jh. 32, 5/6, 232 - 236

BORGWARDT, S. (1992a): Entsiegeln im Straßenraum.- Das Gartenamt, 420 - 428

BORGWARDT, S. (1992): Wasserdurchlässigkeit von Pflasterfugen.- Straße + Autobahn, 10, 651 - 657

BORGWARDT, S. (1994a): Zur „Umweltfreundlichkeit" von Oberflächenbefestigungen.- Das Gartenamt, 4, 244 - 249

BORGWARDT, S. (1994b): Entsiegelung im Straßenraum.- Korrespondenz Abwasser, 41, 4, 530 - 540

BORGWARDT, S. (1995): Untersuchung der Durchlässigkeit von Bodenbelägen in wassergebundener Bauweise.- Wasser & Boden, 47, 11 - 16

BUNZEL, A. (1992): Begrenzung der Bodenversiegelung.- (=Difu-Beiträge zur Stadtforschung, 8), Berlin

BURGHARDT, W. (1993): Formen und Wirkung der Versiegelung .- In: Bodenschutz (=Zentrum für Umweltforschung der Westfälischen Wilhelms-Universität., 2, 111 - 125), Münster

CORDSEN, E. (1992): Bodenüberformung und -versiegelung.- In: Handbuch des Bodenschutzes. BLUME, H.-P.(Hrsg.), 131 - 153, Landsberg/Lech

DELLWIG, M. (1988): Untersuchungen an wasserdurchlässigen Belägen für Fahrbahnflächen, Teil 1.- Neue Landschaft, 33, 457 - 461

Dezernat für Umweltschutz der Stadt Dresden (1994): Umweltbericht 1993. .- Dresden

Firma GaLaBau Emsland, Stadt Lingen u. FH-Osanabrück -Labor für Technik-) (1995): Entsiegelungswirkung ausgewählter Oberbauarten für Verkehrsflächen in Abhängigkeit von Witterungsverlauf und Nutzung.- (Beschreibung des Forschungsvorhabens, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt), Osnabrück

GISEKE, U., HOLTMANN, K., HUCKE, J., LYNAR, W., MÜLLER, H., REINECKE, A. u. SANDER, R. (1988): Städtebauliche Lösungsansätze zur Verminderung der Bodenversiegelung als Beitrag zum Bodenschutz.- (=Schriftenreihe Forschung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, H. 456), Bonn-Bad Godesberg

HADE, J.-D. u. SMITH, D.-R. (1988): Permeability of concrete block pavements.- In: Third international conference of „Concrete Block Paving", Rom 1988, 217 -223

HEBER, B. (1994): Bodenversiegelung in der Stadt am Beispiel der Stadt Dresden.- In: Tagungsband 1. Leipziger Symposium „Stadtökologie in Sachsen". Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung (Hrsg.), 92 - 100, Dresden

HEBER, B. u. LEHMANN, I. (1993): Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten.- (=IÖR Schriften -Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden-, 05), Dresden

KOWALEWSKI, P. NOBIS-WICHTERDING, H., SIEGERT, G. u. KAMBACH, S. (1984): Entwicklung von Methoden zur Aufrechterhaltung der natürlichen Versickerung von Wasser.- (= Bundesministerium für Forschung und Technologie, Nr. T 84-274,) München

KRETZER, E. u. RUIZ-RODRIGUEZ, E. (1992): Tropfinfiltrometer für befestigte und unbefestigte Flächen.- Wasser + Boden, 12, 805 - 807

Leichtweiss Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (1989a): Modellversuch zur Ermittlung der Versickerung von Regenspenden für das ESKOO-Betonpflastersystem RIMA.- (=Bericht Nr. 675), Braunschweig

Leichtweiss-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (1989b): Modellversuch zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Betonpflastersteinen ESKOO-VANOTON.- (=Bericht Nr. 686), Braunschweig

LERSNER, H.v. (1989): Schutz des Bodens als umweltpolitische Aufgabe.- In: Bodenschutz - Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und

Sanierung von Boden, Landschaft und Grundwasser. ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., EINSELE, G. u. HARRES, H.-M. , 1988, Bd. 2, 3Lfg. V/89, 1 - 12, Berlin

LIETH, H., KRUSE, M., STEGMAN, S. u. MINTRUP, K. (1989): Untersuchungen über die Quantität und Qualität der Bodenversiegelung eines Teiles der Stadt Osnabrück.- (=Beiträge der Arbeitsgruppe Systemforschung der Universität Osnabrück, 5), Osnabrück

LOSCH, S. (1988): Sparsamer und schonender Umgang mit Grund und Boden in der Stadtplanung.- In: Bodenversiegelung im Siedlungsbereich (=Information zur Raumentwicklung., H. 8/9, 485 - 498), Bonn

MOHS, B. u. MEINERS, H.-G. (1993): Kriterien des Bodenschutzes bei der Ver- und Entsiegelung von Böden Untersuchungsprogramm Bodenver/-entsiegelung.- (=Umweltbundesamt ,Hrsg., Forschungsbericht: 10703007/16), Berlin

MUNIER, CH. (1988): Satellitenfernerkundung zur Erfassung der Bodenversiegelung Berlins.- Stadt + Umwelt, 88, 46

MUTH, W. (1989): Sickerfähige Beläge aus Betonpflaster.- Sonderdruck, Tiefbau, 6

MUTH, W. (1990): Sickerfähige Pflasterbeläge.- Neue Landschaft, 35, 613 - 625

MUTH, W. (1994a): Regenwasserversickerung von Verkehrsflächen.- Tiefbau-Ingineurbau-Straßenbau, 5, 28 - 44

MUTH, W. (1994b): Ökologische Flächenbefestigung mit Betonpflaster.- Betonwerk - Fertigteil - Technik, 5, 114 - 123

NOBIS-WICHTERDING, H. (1993): Versickerungsverhalten von Gehbahnbefestigungen- Ergebnisse eines Forschungsvorhabens .- (Manuskript zum Referat, anläßlich des Kongresses „Durchlässigkeit von Verkehrsflächen - Boden- und Grundwasserschutz - „)

PAGEL, R., BACHMANN, J. u. HARTGE, K.H. (1993): Auswirkung unterschiedlicher Nutzung und Versiegelung auf den Jahresgang von Temperatur und Feuchte in Stadtböden.- Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 72, 1387 - 1390

PIETSCH, P. u. KAMIETH, H. (1991): Stadtböden.- Taunusstein

PRANZAS, N. (1995): Beeinflussung des urbanen Wasserhaushalts durch Bodenversiegelung.- Korrespondenz Abwasser, 2, 242 - 247

RANFT, F., KREDER, H., KNIPPRATH, K., BRUNS, D., HÜBNER, B. u. PUSTAL, W. (1991a): Bodenbeanspruchung, Bodenrelevante Aspekte und Veränderungspotentiale unterschiedlicher Wohnsiedlungsformen.- (Bundesministerium für Forschung und Technologie (Hrsg.) Forschungsbericht 0339142A - Kurzfassung -)

RANFT, F., KREDER, H., KNIPPRATH, K., BRUNS, D., HÜBNER, B. u. PUSTAL, W. (1991b): Bodenbeanspruchung, Bodenrelevante Aspekte und Veränderungspotentiale unterschiedlicher Wohnsiedlungsformen.- In: Bodenschutz in der Bauleitplanung. BINE-Projekt-Service, 1992, Nr. 8

SCHOSS, H.-D. (1977): Die Bestimmung des Versiegelungsfaktors nach Meßtischblatt-Signaturen.- Wasser und Boden, 138 - 140

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz (Hrsg.) (1993): Erläuterungen zu der Karte Versiegelung.- In: Umweltatlas von Berlin, Karte 01.02, Bd. 1, Berlin

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz (Hrsg.) (1993): Reduzierung und Minimierung der Bodenversiegelung.- (= Umwelt- und Naturschutz für Berliner Gewässer, H. 13) Berlin

SMU (*Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung - Freistaat Sachsen*) (1994): Umweltbericht 1994.- Dresden

Statistisches Bundesamt (1995): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland.-

Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (1994): Statistisches Jahrbuch Sachen.-

SUDA, S., YAMANAKA, S., KODAMA, O., HATA, M. u. KUNIMURA, T. (1988): Development and application of permeable paving concrete block.- In: Third international conference of „Concrete Block Paving", Rom, 130 - 133

Umweltbundesamt (1993): Umweltdaten kurz gefaßt.- Berlin

WIRTH, W. (1988): Ökologische Grenzen der Versiegelung - Artenverdrängung auf unversiegelten Flächen.- In: Bodenversiegelung im Siedlungsbereich.
(=Information zur Raumentwicklung., 8/9, 523 - 527), Bonn

III Kennzeichnung von unterschiedlichen Flächenbefestigungen hinsichtlich ihrer hydraulisch-physikalischen Eigenschaften

Michael Schramm

Inhalt

1. Einleitung 4
2. Beregnungsversuche 6
2.1 Lage und Aufbau der Untersuchungsflächen 6
2.2 Probenahme und -analyse 7
2.3 Versuchseinrichtungen 13
2.4 Ergebnisse der Beregnungsversuche 18
3. Interpretation der Versuchsergebnisse 37
3.1 Ansatz zur rechnerische Ermittlung der Versickerungsleistung von befestigten Flächen 37
3.2 Bewertung der Baumuster 41
4. Zusammenfassung 48
5. Literatur 49

Anlage: Fotodokumentation zu den Untersuchungsstandorten

Abbildungen

Abb. 1: Gesamtansicht der Beregnungsanlage, der Meßflächenbegrenzung und der Abflußmeßeinrichtung 15
Abb. 2: Beregnungsmodul mit Versorgungsbehälter, schwenkbarer Beregnungsdüse und Versorgungsleitungen für Wasser und Druckluft 15
Abb. 3: Niederschlagsverteilungskurven für das Stadtgebiet von Leipzig 20
Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und neuem Verbundpflaster 20
Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei Rasengittersteinen 22
Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen 22
Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen 24

Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate $i(t)$ bei wassergebundenen und kunstharzgebundenen Decken 24

Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei gealterten Pflasterbelägen 28

Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei neuem Verbundpflaster 28

Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei wassergebundenen Decken mit geringem Anteil abschlämmbarer Korngrößen in Deck- und Tragschicht 29

Abb. 12: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei wassergebundenen Decken mit hohem Anteil abschlämmbarer Korngrößen in Deck- und Tragschicht 29

Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Rasengittersteinen mit geringer Bewuchsdichte 31

Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Verbundpflaster mit Sickeröffnungen (verschlämmt) 31

Abb. 15: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen (geringe Bewuchsdichte) 32

Abb. 16: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen (hohe Bewuchsdichte) 32

Abb. 17: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und neuem Verbundpflaster in Abhängigkeit der Intensität r und der Jährlichkeit T 34

Abb. 18: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und neuem Verbundpflaster in Abhängigkeit der Regendauer t und der Jährlichkeit T 34

Abb. 19: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Trockenlauf) in Abhängigkeit der Intensität r und der Jährlichkeit T 35

Abb. 20: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Trockenlauf) in Abhängigkeit der Regendauer t und der Jährlichkeit T 35

Abb. 21: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Naßlauf) in Abhängigkeit der Intensität r und der Jährlichkeit T 36

Abb. 22: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Naßlauf) in Abhängigkeit der Regendauer t und der Jährlichkeit T 36

Abb. 23: Vergleich der hydraulischen Leitfähigkeit k_f aus Beregnungs- und Laborversuchen mit den berechneten Werten nach BEYER (1964) und CAMPBELL (1985) 40

Abb. 24: Vergleich von Fugenanteil, Abflußbeginn t_A und mittlerer Endinfiltrationsrate i_E der untersuchten Flächenbefestigungen 45

Abb. 25: Vergleich der Simulationsergebnisse für die Gesamtinfiltration bei verschiedenen Starkregenereignissen 47

Tabellen

Tab. 1: Lage, Material der Deckschicht, Nutzung und Herstellungsjahr der untersuchten Flächenbefestigungen 8

Tab. 2: Schichtaufbau der untersuchten Flächenbefestigungen 9–10

Tab. 3: Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte *LD*, hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung k_f und Gehalt an organischer Substanz C_{org} 11–12

Tab. 4: Zusammenstellung der Platten- und Fugenmaße sowie des Fugenanteils *FA* für die untersuchten Flächenbefestigungen 17

Tab. 5: Zusammenstellung wichtiger Ergebnisse der Beregnungsversuche 42–43

1. Einleitung

Jede neue Bau- und Erschließungsmaßnahme in Siedlungs- oder Industriegebieten führt zu einem unerwünschten Eingriff in die vorhandenen mehr oder weniger natürlichen Bodenverhältnisse. Wichtige Bodenfunktionen wie Wasser-, Wärme-, Nährstoff-, und Schadstoffspeicherung, der Luftaustausch sowie der Lebensraum der Tiere und Pflanzen werden dadurch in der Regel negativ beeinflußt. Die Ressource Boden ist jedoch nur beschränkt verfügbar. Dies gilt damit auch für die Filter-, Puffer- und Transformationseigenschaften des Bodens.

Mit der zunehmenden Sensibilisierung der Bevölkerung für Umweltfragen und der weiteren Verknappung der Ressourcen Boden und Wasser wird der Forderung nach flächensparenden und bodenschonenden Bauweisen immer größere Bedeutung beigemessen. Trotz des großen Anteils befestigter Verkehrsflächen (Straßen, Gehwege, Parkflächen), Industrie- und Gewerbeflächen an der überbauten Siedlungsfläche gibt es nur wenige Untersuchungen, die die quantitative Bewertung durchlässig befestigter Flächen zum Gegenstand haben. Ein erstes großangelegtes Forschungsvorhaben wurde in den Jahren 1980-84 mit Mitteln des BMFT durch die Berliner Wasserwerke durchgeführt (KOWALEWSKI et al. 1984). Ein Gutachten über das Versickerungsverhalten von Gehwegsbefestigungen (BINNEWIES & SCHÜTZ 1985) wurde 1985 vom Tiefbauamt Hamburg, Hauptabteilung Stadtverkehr, in Auftrag gegeben. Erst in neuerer Zeit wird dem Problem der Flächenversiegelung durch Verkehrsflächen und der Bestimmung der Versickerungsrate wieder mehr Bedeutung beigemessen (z. B. BORGWARDT 1993, 1994; MUTH 1994; BEIER 1996). Für die neuen Bundesländer existieren solche Untersuchungen allerdings nicht. Hier ist die Situation einerseits gekennzeichnet durch sehr alte Beläge (Jahrhundertwende) und andererseits durch den rasanten Anstieg der Flächenversiegelung bei der Erschließung von Wohngebieten und Gewerbeflächen auf der „grünen Wiese" (BREUSTE et al. 1996).

Um die Übertragbarkeit hydraulisch-physikalischer Kenngrößen von versiegelten Flächen zu ermöglichen, sollte der Einfluß folgender Parameter auf das Entwässerungsvermögen von durchlässig befestigten Oberflächen untersucht werden:

- Aufbau von Deckschicht und Unterbau
- Alter des Belags
- hydraulische Leitfähigkeit des Fugenmaterials
- hydraulische Leitfähigkeit des Unterbaus
- Fugenanteil (Fugenfläche bezogen auf Gesamtfläche)
- Dichte des Fugenmaterials und des Unterbaus, Porengehalt, Verdichtungsgrad bzw. Lagerungsdichte
- Korngrößenzusammensetzung des Fugenmaterials und des Unterbaus
- Muldenrückhalt der Versiegelungsfläche

Dazu waren zunächst entsprechende Testmuster auszuwählen. Neben den typischen Belägen im öffentlichen Raum, sollten weitere charakteristische, großflächige Befestigungen im gewerblichen Bereich berücksichtigt werden. Hierzu zählen z. B. Parkplätze aus Verbund- und Betonsteinpflaster. Mit Blick auf eine zukünftige Entsiegelung befestigter Flächen war auch die Untersuchung alternativer Bauformen wie Rasengittersteine oder versickerungsfreundliche Pflastersysteme von Interesse.

Die wichtigste hydraulische Kenngröße zur Erfassung des Infiltrationsvermögens ist die hydraulische Leitfähigkeit bei wassergesättigtem Boden k_f . Wegen der unterschiedlichen Leitfähigkeiten des Unterbaus und der Fugen, muß k_f jeweils getrennt bestimmt werden. Die hydraulische Leitfähigkeit des Unterbaus kann an Stechzylindern im Labor ermittelt werden. Wegen der erforderlichen Probengröße ist dies für das Fugenmaterial nicht möglich. Deshalb wurden auf ausgewählten Baumustern Infiltrometerversuche durchgeführt. Bei Laboruntersuchungen wird in der Regel nur der Ausgangszustand bei Fertigstellung der Beläge erfaßt. Um die natürliche Alterung von Flächenbefestigungen berücksichtigen zu können, war es erforderlich, Freilandversuche an bestehenden Belägen durchzuführen. Der Eintrag von feinstrukturierter organischer Substanz und des Abriebs der mineralischen Substanz in das Fugenmaterial führt zu einer Erhöhung des Feinanteils und damit zu einer Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit.

Bei verschieden Untersuchungen (BINNEWIES & SCHÜTZ 1985; BORGWARDT 1994) wurden überstauende Verfahren zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit unter Freilandbedingungen eingesetzt. Diese Verfahren haben den Nachteil, daß bevorzugte Fließwege wie Makroporen oder Wurzelgänge stärker zur Gesamtinfiltration beitragen, als es bei natürlichen Niederschlagsereignissen der Fall ist. Aus diesem Grund wurde bei den Infiltrationsexperimenten der hier vorgestellten Untersuchung ein Sprinklerinfiltrometer eingesetzt. Mit der Niederschlagssimulation können die natürlichen Bedingungen bei einem Regenereignis besser nachgebildet werden als bei der Anwendung von überstauenden Verfahren. In der Regel ergeben sich bei Messungen mit Sprinklerinfiltrometern deutlich geringere Endinfiltrationsraten als bei den Überstauverfahren (SCHIFFLER 1992). Wird während der Beregnungsversuche ein konstanter Abfluß erreicht, kann davon ausgegangen werden, daß die ermittelte Endinfiltrationsrate i_E der hydraulischen Leitfähigkeit bei Wassersättigung k_f entspricht.

Die Dichtebestimmung erlaubt die Ableitung weiterer physikalischer Kenngrößen wie die Lagerungsdichte und das Porenvolumen. Aus den Körnungskurven sollte näherungsweise die Wasserleitfähigkeit k_f abgeschätzt (z. B. nach BEYER 1964, CAMPBELL 1985) und mit den Endinfiltrationsraten i_E aus den Beregnungsversuchen verglichen werden. Durch diesen Vergleich sollte untersucht werden, ob eine realistische Abschätzung des Infiltrationsvermögens des Fugenmaterials ohne die Durchführung von Beregnungsversuchen möglich ist.

Aus den dargestellten Ergebnissen sollte die Bedeutung der einzelnen Faktoren für das Versickerungsverhalten befestigter Flächen abgeleitet und eine Vorgehensweise zur Übertragung der gewonnen Erkenntnisse auf andere Standorte erarbeitet werden.

2. Beregnungsversuche

2.1 Lage und Aufbau der Untersuchungsflächen

Bei der Auswahl der Untersuchungsstandorte wurden zwei Kriterien berücksichtigt. Zum einen sollten möglichst typische und im Stadtgebiet von Leipzig häufig vorkommende Beläge in das Versuchsprogramm aufgenommen werde. Zum anderen sollte untersucht werden, ob moderne Beläge wie Rasengittersteine oder Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen Vorteile hinsichtlich des Infiltrationsvermögens gegenüber den klassischen Belägen mit Betonplatten, Verbundpflaster oder Natursteinpflaster haben.

Die Untersuchungsstandorte wurden in Zusammenarbeit mit dem UFZ ausgewählt und lagen, mit Ausnahme der Baumuster 9 und 21, im Stadtgebiet von Leipzig. Die genaue Lagebezeichnung kann der Tabelle 1 entnommen werden. Um die Variabilität des Infiltrationsverhaltens und unterschiedliche Belastungsstufen berücksichtigen zu können, wurden teilweise mehrere gleichwertige Befestigungsformen untersucht. Das Untersuchungsprogramm in Leipzig deckte die folgenden Belagarten ab: Kopfsteinpflaster (2 Baumuster), Mosaikpflaster (2 Baumuster), Betonverbundpflaster (2 Baumuster), Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen (4 Baumuster), Rasengittersteine (2 Baumuster), Betonplatten 30 x 30 cm² (1 Baumuster), Betonplatten 1,2 x 1,2 m² (1 Baumuster), Natursteinplatten (1 Baumuster), wassergebundene Decken (4 Baumuster). Zusätzlich wurden ein neu angelegter Radweg in Merschwitz/Elbe mit einer Fahrbahn aus einer kunstharzgebundenen Sanddeckschicht (Baumuster 9) und eine wassergebundene Decke mit Feinkiesabdeckung (Baumuster 21) in Dresden in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Beide Standorte sind durch die Anwendung neuartiger Bauformen gekennzeichnet.

Die untersuchten Baumuster weisen zum größten Teil die typische Schichtenfolge Deckschicht, Sandbett/Ausgleichsschicht, Tragschicht mit unterschiedlichen Stärken auf (siehe Tabelle 2). Bei den Baumustern 4, 5, 7 und 8 wurde statt der Bettung im Sand eine Feinkies- bzw. Splittschicht verwendet. Bei Baumuster 2 fehlt eine spezielle Tragschicht. Hier wurde das Sandbett direkt auf der Asphaltdecke eines alten Parkplatzes aufgebracht. Die Großformatplatten bei Baumuster 10 wurden auf einer 30 cm mächtigen Sandschicht über dem anstehenden Untergrund ebenfalls ohne eine gesonderte Tragschicht verlegt. Bei den wassergebundenen Decken

besteht die Tragschicht meist aus mehreren verdichteten Schichten aus schluffigem oder lehmigem Sand mit Kiesbeimischungen. Lediglich bei Baumuster 21 befindet sich unter der Tragschicht aus Sand eine Entwässerungsschicht aus Schotter. Bei dem durch eine kunstharzgebundene Sanddeckschicht befestigten Radweg (Baumuster 9) war eine Entfernung des Belags zur Aufnahme der Schichtenfolge nicht möglich.

Das Herstellungsjahr der Baumaßnahmen wurde durch das UFZ ermittelt und ist in der Tabelle 1 angegeben. Bei den Typen Mosaikpflaster, Kopfsteinpflaster und Natursteinplatten handelt es sich danach um recht alte Bauformen (teilweise Jahrhundertwende), die heute wegen des hohen Arbeitsaufwandes und der hohen Materialkosten bei der Verlegung nur noch im Zuge der Wiederherstellung historischer Befestigungen oder in hochwertigen Siedlungsbereichen (z. B. Fußgängerzonen) eingesetzt werden. Typisch für die Befestigungen von Wegen waren in den sechziger und siebziger Jahren die Betongehwegplatten der Größe 30 x 30 cm² (Baumuster 11) und in den Erschließungsgebieten an den Stadträndern die Großformatplatten 1,2 x 1,2 m² (Baumuster 10). Seit Anfang der neunziger Jahre werden Gehwege und Parkplätze bevorzugt mit Betonpflaster befestigt. Sonderformen von Parkplatzbelägen sind Rasengittersteine und Betonpflasterbeläge mit Sickeröffnungen, die überwiegend erst seit Anfang der neunziger Jahre eingesetzt werden. Alle untersuchten wassergebundenen Decken wurden mit Ausnahme des Baumusters 17 ebenfalls erst nach 1990 ausgeführt bzw. saniert.

2.2 Probenahme und -analyse

Nach Durchführung der Beregnungsversuche wurden bei den meisten Baumustern Erdproben aus dem Fugenbereich bzw. der Deckschicht in gestörter Form entnommen. Nach Entfernen der Beläge wurden in der Regel mehrere Stechzylinderproben aus den Bettungs- und Tragschichten entnommen, sofern dies aufgrund der Mächtigkeit, der Kornzusammensetzung und des Wassergehaltes möglich war. Zusätzlich wurden gestörte Proben aus den entsprechenden Schichten gewonnen. Die Beprobung der Tragschicht bei der kunstharzgebundenen Decke (Baumuster 9) war nicht möglich, da hierdurch die Deckschicht zerstört worden wäre.

Im Labor wurden die Korngrößenverteilung, die Lagerungsdichte *LD* und die hydraulische Leitfähigkeit bei Wassersättigung k_f sowie der Gehalt an organischer Substanz C_{org} bestimmt. In Tabelle 3 sind die wichtigsten Untersuchungsergebnisse zusammengestellt. Die Sandanteile überwiegen bei allen Baumustern mit Ausnahme des Füllmaterials bei Baumuster 6, bei dem es sich vermutlich um Mutterboden handelt. Der Skelettanteil ist bei den meisten Proben der Tragschichten und des Fugenmaterials größer als 25%. Bei der Tragschicht von Baumuster 21 liegt der Skelettanteil unter 1%.

Bau-muster	Material	Nutzung	Lage	Herstellungsjahr
neue Flächenbefestigungen				
1	Betonverbundpflaster, sand-verfugt	Parkplatz	IOM, Permoser Straße	1992
2	Rasengittersteine	Parkplatz	Volkspark Klein Zschocher, Antonienstraße	1990/91
3	Rasengittersteine	Parkplatz	Ringstraße	1990
4	Verbundpflaster, nicht verfugt	Fahrstreifen	Parkplatz Baumarkt Torgauer Straße	1993
5	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	Stellplatz	Parkplatz Baumarkt Torgauer Straße	1993
6	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	Stellplatz	Einkaufszentrum Ratzelbogen	1993
7	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	Stellplatz	Ärztezentrum Zschochersche Straße	Frühjahr 1994
8	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	Stellplatz	Ärztezentrum Zschochersche Straße	Frühjahr 1994
9	kunstharzgebundene Deck-schicht	Radweg	Merschwitz, Elbeufer	Juni 94
gealterte Flächenbefestigungen				
10	Großformatplatten	Gehweg	Alte Salzstraße (Grünau)	1977/78
11	Betongehwegplatten	Gehweg	Breitkopfstraße	50/60er Jahre
12	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	Fahrbahn, Nebenstraße	UFZ-Gelände, Permoser Straße	um 1944
13	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	Fahrbahn, Nebenstraße	UFZ-Gelände, Permoser Straße	um 1944
14	Mosaikpflaster	Gehweg	Holbeinstraße	um 1900
15	Mosaikpflaster	Gehweg	Gröpplerstraße	um 1900
16	Natursteinplatten (Granit)	Gehweg	Breitkopfstraße	um 1900
wassergebundene Decken				
17	wassergebundene Decke	Parkplatz	UFZ-Gelände, Permoser Straße	1975
18	wassergebundene Decke	Gehweg	Stephanienplatz	1991
19	wassergebundene Decke	Gehweg	Mariannenpark	1993
20	wassergebundene Decke	Gehweg	Mariannenpark	1993 saniert
21	wassergebundene Decke mit Deckschicht aus Feinkies	Rad- und Fußweg	Dresden, Pieschener Allee	1993

Tab. 1: Lage, Material der Deckschicht, Nutzung und Herstellungsjahr der untersuchten Flächenbefestigungen

Bau-muster	Deckschicht	Schichtaufbau		Bemerkungen
neue Flächenbefestigungen				
1	Betonverbundpflaster, sandverfugt	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-8 cm 10-15 cm >15 cm	Fugen vermoost
2	Rasengittersteine	Deckschicht: Sandtragschicht: Untergrund:	0-8 cm 8-20 cm >20 cm	Raseneinsaat, Bedeckung 90% Kiesbeimischungen
3	Rasengittersteine	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-8 cm 8-23 cm >23 cm	Spontanvegetation, Raseneinsaat nach Fertigstellung, Bedeckung 25%
4	Verbundpflaster, nicht verfugt	Deckschicht: Kiesbett: Schottertragschicht:	0-8 cm 8-11 cm >11 cm	Fugen nicht verfugt
5	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	Deckschicht: Kiesbett: Schottertragschicht:	0-8 cm 8-11 cm >11 cm	Sickeröffnungen mit Feinkies verfüllt Schotter mit Recyclingmaterial gemischt
6	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-8 cm 8-10 cm >10 cm	Sickeröffnungen nur teilweise verfüllt (Mutterboden), verschlämmt, teilweise Spontanvegetation
7	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	Deckschicht: Splittbett: Schottertragschicht:	0-10 cm 10-13 cm >13 cm	Raseneinsaat nicht aufgegangen, Bedeckung < 5%
8	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	Deckschicht: Splittbett: Schottertragschicht:	0-10 cm 10-13 cm >13 cm	Raseneinsaat (Gras, Weißklee), Bedeckung > 75%
9	kunstharzgebundene Decke	Deckschicht:	0-3 cm	
gealterte Flächenbefestigungen				
10	Großformatplatten	Deckschicht: Sandtragschicht: Unterbau:	0-10 cm 10-40 cm >40 cm	Fugenmaterial humos Schotterbeimischungen lehmig
11	Betongehwegplatten	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-4 cm 4-25 cm >25 cm	Fugenmaterial humos, vermoost
12	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-10 cm 10-16 cm >16 cm	Fugenmaterial stark humos
13	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	wie Baumuster 12		Fugenmaterial stark humos

Tab. 2: Schichtaufbau der untersuchten Flächenbefestigungen

Bau-muster	Deckschicht	Schichtaufbau		Bemerkungen
gealterte Flächenbefestigungen				
14	Mosaikpflaster	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-6 cm 0-16 cm >16 cm	Fugenmaterial stark humos, vermoost
15	Mosaikpflaster	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht: Unterbau:	0-6 cm 6-12 cm 12-22 cm >22 cm	Fugenmaterial stark humos, vermoost Kiesbeimischungen lehmig, Schuttbeimischungen
16	Natursteinplatten (Granit)	Deckschicht: Sandbett: Schottertragschicht:	0-20 cm 20-35 cm >35 cm	Fugenmaterial humos, vermoost
wassergebundene Decken				
17	wassergebundene Decke	Deckschicht: Tragschicht1: Tragschicht2: Schottertragschicht:	0-2 cm 2-4 cm 4-15 cm >15 cm	
18	wassergebundene Decke	Deckschicht: Tragschicht1: Tragschicht2: Tragschicht3:	0-1 cm 1-9 cm 9-14 cm >14 cm	
19	wassergebundene Decke	Deckschicht: Tragschicht1: Tragschicht2: Tragschicht3:	0-2 cm 2-6 cm 6-12 cm 12-24 cm	
20	wassergebundene Decke	Deckschicht: Tragschicht1: Tragschicht2: Tragschicht3:	0-2 cm 2-6 cm 6-12 cm >12 cm	
21	wassergebundene Decke mit Deckschicht aus Feinkies	Deckschicht: Tragschicht1: Schottertragschicht:	0-1 cm 1-3 cm >3 cm	Deckschicht aus Feinkies, zerfahren, verdichtet

Tab. 2 (Forts.): Schichtaufbau der untersuchten Flächenbefestigungen

Typisch für die wassergebundenen Decken ist der hohe Sand- und Skelettanteil in den Deckschichten, die in der Regel aus einem kiesigen Sand bis sandigem Feinkies bestehen. In den Tragschichten hingegen sind meist 10 - 20% Schluff enthalten, so daß man davon ausgehen kann, daß die Deckschichten durchlässiger als die verdichteten Tragschichten sind.

Bei den gealterten Platten- und Pflasterbelägen läßt sich eine deutliche Zunahme der Schlufffraktion im Fugensand gegenüber dem Sandbett feststellen, was die Untersuchungsergebnisse

Baumuster	Substrat	Korngrößenverteilung [Gew.-%]			Skelettanteil [Gew.-%]	Lagerungsdichte LD [g/cm³]	Leitfähigkeit bei Sättigung k_f [mm/h]	Gehalt an organischer Substanz C_{org} [Gew.-%]
		Sand	Schluff	Ton				
neue Flächenbefestigungen								
1	Fugenmaterial	89.80	8.23	1.97	31.6			0.09
	Sandbett	88.10	9.39	2.51	31.3	1.65	8320.2	0.08
2	Füllmaterial	50.87	38.73	10.40	24.7			1.96
	Sandtragschicht	97.21	1.92	0.86	31.7	1.67	5808.0	0.05
	Untergrund	75.80	15.82	8.39	42.3	1.69	4863.4	1.15
3	Füllmaterial	49.62	43.03	7.35	29.5			9.13
	Sandbett	84.84	10.63	4.53	29.1	1.56	5423.4	0.08
4	Unterbau	Feinbodenanteil zu gering für Körnungsanalyse			98.8			
5	Füllmaterial und Unterbau	wie bei Baumuster 4						
6	Füllmaterial	40.56	49.45	9.99	8.4			0.91
	Unterbau	92.98	5.20	1.82	35.5			0.03
7	oberes Fugenmaterial	59.50	30.09	10.40	20.2			2.34
	unteres Fugenmaterial	70.11	23.12	6.77	30.9			0.76
	Unterbau	66.81	25.27	7.92	88.0			
8	wie bei Baumuster 7							
9	Geolen-Sand-gemisch	keine Beprobung möglich						
gealterte Flächenbefestigungen								
10	Fugenmaterial	71.57	23.02	5.41	38.8			1.04
	Sandtragschicht	87.48	8.08	4.44	43.3	1.78	5502.6	0.06
	Untergrund	68.22	15.08	16.70	33.8			
11	Fugenmaterial	66.69	30.47	2.84	32.3			4.58
	Sandbett	95.75	2.36	1.88	27.2	1.64	5423.9	0.02
12	Fugenmaterial	67.54	24.98	7.48	36.3			2.24
	Sandbett	89.85	2.32	7.83	25.6	1.73	1327.2	0.06
13	Fugenmaterial	77.39	18.08	4.54	3.5			1.29
14	Fugenmaterial	78.91	14.29	6.80	34.3			5.52
	Sandbett	96.43	2.93	0.64	45.1	1.72	6569.9	0.21
15	Fugenmaterial	65.81	26.36	7.83	36.6			2.63
	Sandbett	94.73	2.54	2.73	37.7	1.71	6847.6	0.00

Tab. 3: Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte LD, hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung k_f (Mittelwerte aus Laboruntersuchungen) und Gehalt an organischer Substanz C_{org}

Baumuster	Substrat	Korngrößenverteilung [Gew.-%]			Skelettanteil [Gew.-%]	Lagerungsdichte LD [g/cm³]	Leitfähigkeit bei Sättigung k_f [mm/h]	Gehalt an organischer Substanz C_{org} [Gew.-%]
		Sand	Schluff	Ton				
gealterte Flächenbefestigungen								
16	Fugenmaterial	56.20	40.41	3.40	32.5			4.42
	Sandbett	83.34	10.95	5.71	37.6	1.53	8126.6	0.16
wassergebundene Decken								
17	Deckschicht	96.50	3.34	0.15	51.2			0.17
	Tragschicht1	74.75	21.96	3.29	36.2			0.11
	Tragschicht2	84.28	12.70	3.02	35.1	1.49	5667.4	0.29
18	Deckschicht	96.81	1.75	1.44	63.8			1.78
	Tragschicht1	83.78	11.62	4.60	44.8	1.67	8793.3	0.17
	Tragschicht2	77.16	16.15	6.69	33.0	1.76	5548.5	1.80
19	Deckschicht	98.36	1.09	0.55	28.8			0.04
	Tragschicht1	85.98	11.68	2.35	24.5			0.05
	Tragschicht2	84.42	10.55	5.03	52.3			0.09
20	Deckschicht	99.28	0.16	0.56	32.0			0.11
	Tragschicht1	73.02	21.76	5.22	29.5	1.66	2370.7	0.54
	Tragschicht2	74.83	19.39	5.78	30.8			0.69
21	Deckschicht	98.05	0.93	1.02	62.8			0.33
	Tragschicht	91.22	3.51	5.27	0.9			0.16

Tab. 3 (Forts.): Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte LD, hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung k_f (Mittelwerte aus Laboruntersuchungen) und Gehalt an organischer Substanz C_{org}

von BORGWARDT (1993) bestätigt. Dies gilt sowohl für das Mosaikpflaster und die Natursteinplatten der Jahrhundertwende (Baumuster 14 - 16), das Kopsteinpflaster (Baumuster 12, Herstellungsjahr 1944) als auch für die Betongehwegplatten der sechziger bis achtziger Jahre (Baumuster 10 und 11). Bei dem 1992 angelegten wenig belasteten Verbundpflaster (Baumuster 1) hingegen weisen Fugensand und Bettmaterial die gleiche Korngrößenverteilung auf, was bei einer neu angelegten Pflasterung zu erwarten ist. Abweichend hiervon weist das Füllmaterial des Baumusters 6 trotz des geringen Alters von 2 bis 3 Jahren einen sehr hohen Anteil von Feinmaterial auf. Hier liegt die Vermutung nahe, daß, wie auch bei den Baumustern 2, 3, 7 und 8, die Versickerungsbereiche mit Mutterboden verfüllt wurden, um die Einsaat von Rasen zu ermöglichen. Ein deutliches Zeichen für die Alterung des Fugenmaterials ist der erhöhte Gehalt an

organischer Substanz im Vergleich zu neuen Belägen. Hohe Gehalte an organischer Substanz wurden bei Betongehwegplatten (Baumuster 11), Mosaikpflaster (Baumuster 14) und Natursteinplatten (Baumuster 16) ermittelt.

Die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgte an Stechzylinderproben mit konstanter Druckhöhe. Die in Tabelle 3 zusammengestellten k_f - Werte ergeben sich aus der Bildung des arithmetischen Mittels aus Messungen an 2 bis 4 Stechzylinderproben. Die Leitfähigkeit ist hier mit der Einheit [mm/h] angegeben, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Beregnungsversuch zu ermöglichen (siehe Kapitel 3). Aus der Zusammenstellung läßt sich ableiten, daß der k_f - Wert maßgeblich durch den Anteil an Makroporen beeinflußt wird. Der Matrixporenfluß im Feinboden allein, der nach CARSEL et al. (1988) für Sand im Bereich von 300 mm/h bei einer Standardabweichung von c_V = 150 mm/h liegt, kann die hohen Leitfähigkeitswerte der Laboruntersuchung nicht erreichen.

2.3 Versuchseinrichtungen

Beregnungsanlage

Während für die Tragschichten die Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit an Stechzylinderproben im Labor erfolgen kann, ist dies für das Fugenmaterial nicht möglich. Laboruntersuchungen wären zwar auch für die Bestimmung des Infiltrationsvermögens der Deckschichten möglich, jedoch ohne Alterungsprozesse berücksichtigen zu können. Deshalb müssen zur Ermittlung von Infiltrationsraten Versuche an bestehenden Belägen durchgeführt werden. Interessieren dabei vor allem langsam ablaufende Prozesse wie z. B. die Grundwasseranreicherung unter durchlässig befestigten Flächen, so können Bodenfeuchtemessungen in bestimmten Zeitabständen durchgeführt werden (KOWALEWSKI et al. 1984). Da die Bodenfeuchtegehalte unter Belägen in der Regel eine große räumliche und zeitliche Variabilität aufweisen, ist eine ereignisbezogene quantitative Bestimmung des infiltrierten Niederschlags bei dieser Vorgehensweise jedoch nicht möglich. Eine häufig angewendete Methode zur Bestimmung der Infiltrationsrate ist der Einsatz eines Infiltrometers, bei der eine bestimmten Fläche durch eine zylinderförmige Umrandung abgegrenzt wird. In diesen Zylinder wird Wasser eingefüllt und die zeitliche Veränderung des Wasserstandes, bzw. bei konstantem Wasserstand die zugeführte Wassermenge pro Zeit aufgezeichnet. Beide Vorgehensweisen wurden bereits in früheren Untersuchungen (BINNEWIES & SCHÜTZ 1985, BORGWARDT 1994, 1995) auf Flächenbefestigungen eingesetzt. Wie bereits ausgeführt, ergeben sich auch bei geringen hydraulischen Gradienten bei den überstauenden Verfahren wegen der bevorzugten Beaufschlagung von Makroporen höhere Infiltrationsraten als bei natürlichen Regenereignissen. Besser lassen sich die Prozesse

durch den Einsatz eines Sprinklerinfiltrometers erfassen, da hiermit das Abfluß-Infiltrationsgeschehen auf den Flächen nachgebildet wird. Ein weiterer Vorteil der künstlichen Beregnung ist, daß größere Flächen erfaßt werden können, und damit der Einfluß der räumlichen Variabilität der Infiltrationsrate geringer wird.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein Beregnungselement der Großberegnungsanlage des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe eingesetzt und den Anforderungen der Infiltrationsversuche angepaßt. Der für die Infiltrationsversuche verwendete Regensimulator besteht aus einer 4,5 m langen Tragkonstruktion, auf der 3 Sprinklermodule im Abstand von 1,5 m angeordnet sind (siehe Abbildung 1). Ein Modul setzt sich zusammen aus dem Versorgungsbehälter mit Schwimmerventil, der Beregnungsdüse, der Steuereinrichtung zum Schwenken der Düse und den Sammelrinnen zur Rückführung überschüssigen Beregnungswassers, wenn die Düsen in den Umkehrpunkten der Schwenkeinrichtung verweilen (siehe Abbildung 2). Die Beregnungsdüsen vom Typ Veejet 80/100 der Fa. Spraying Systems stellen aufgrund der Vergleichbarkeit des Tropfenbildes und des Energiegehaltes mit natürlichen Niederschlägen einen Quasistandard für Regensimulatoren dar. Um eine gleichmäßige Niederschlagsverteilung zu erreichen, muß die Flachstrahldüse über der Beregnungsfläche bewegt werden. Die Düsen sind in einer Höhe von 3,0 m über der Beregnungsfläche angeordnet, welche eine maximale Breite von 2,0 m und eine Länge von 3,5 m aufweist.

Mit einer Kreiselpumpe werden die Versorgungsbehälter mit Wasser gefüllt. Die Erzeugung des erforderlichen Düsendrucks erfolgt mit einem Kleinkompressor, der einen bestimmten Luftdruck in den Versorgungsbehältern aufbaut. Über einen zentralen Druckminderer kann der Luftdruck in den Behältern reguliert und dadurch die Regenintensität variiert werden. Die Schwenkbewegungen der Getriebemotoren werden durch eine Steuereinrichtung kontrolliert. Durch Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit sowie der Verweilzeit in den Umkehrpunkten kann die Regenintensität zusätzlich über einen weiten Bereich variiert werden. In Voruntersuchungen wurde die Beregnungsanlage für unterschiedliche Druckstufen, Schwenkgeschwindigkeiten und Verweilzeiten in den Umkehrpunkten kalibriert. Ein Windschutz verhindert das Abdriften der Regentropfen. Die Anlage ist in SCHRAMM (1994) detailliert beschrieben.

Meßfläche

Die Untersuchungsflächen hatten eine Größe von 6,0 - 6,4 m² (siehe Tabelle 4). Lediglich bei Baumuster 19 war wegen der geringen Fahrspurbreite eine Halbierung der Meßfläche auf 3,2 m² erforderlich. Um ein Abströmen des Oberflächenabflusses von den Meßflächen zu verhindern, wurden diese mit verzinkten Stahlblechwinkeln abgegrenzt (siehe Abbildung 1). Der verbleiben-

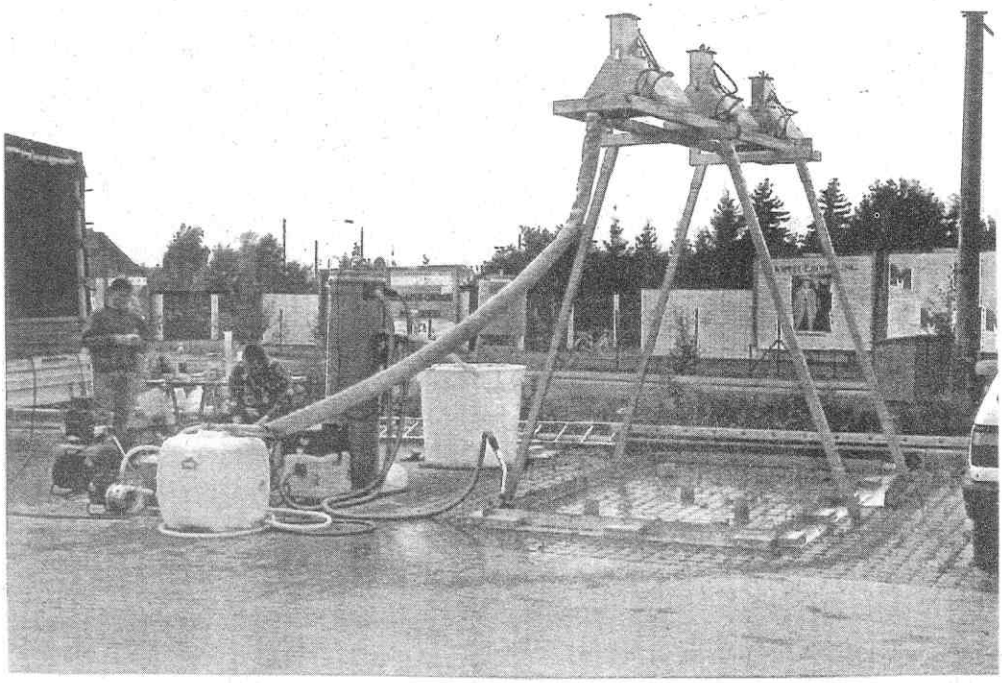


Abb. 1: Gesamtansicht der Beregnungsanlage, der Meßflächenbegrenzung und der Abflußmeßeinrichtung

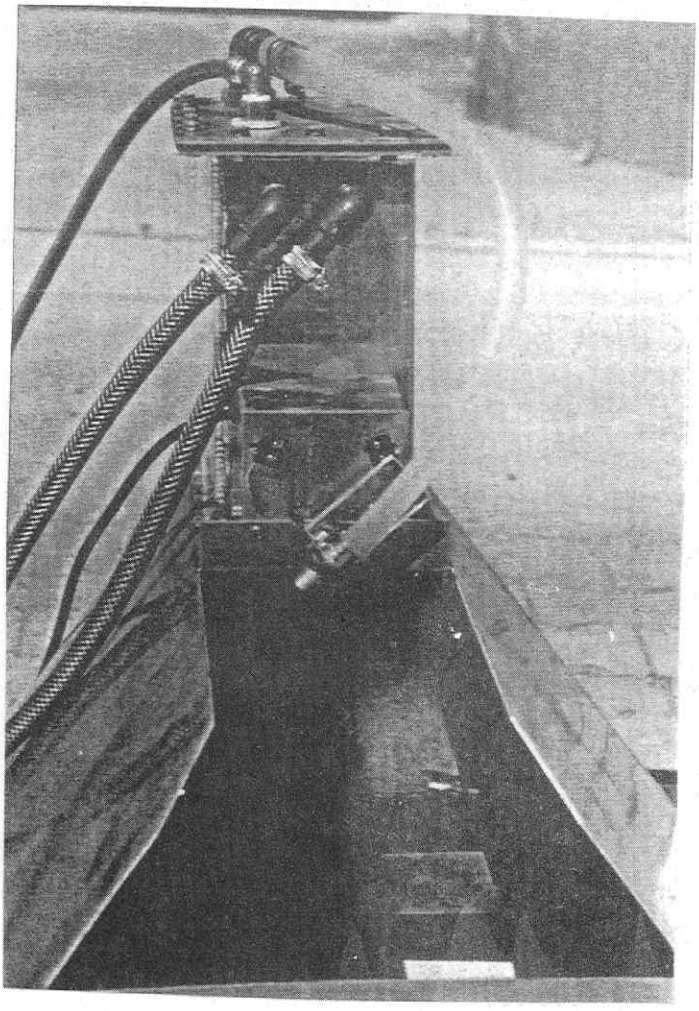


Abb. 2:
Beregnungsmodul mit Versorgungsbehälter, schwenkbarer Beregnungsdüse und Versorgungsleitungen für Wasser und Druckluft

de Spalt zwischen Belag und Blechwinkel wurde anschließend mit einer Dichtungsmasse verschlossen. Zur Überprüfung der in Vorversuchen im Labor bestimmten Niederschlagsverteilung und -höhe wurden jeweils 5 Totalisatoren auf der Meßfläche aufgestellt. Zur Minimierung von Randeffekten wurde die Untersuchungsfläche 20 - 30 cm über die Abgrenzung hinaus beregnet.

Die Abmessungen der Platten und Steine sowie der Fugen wurden durch die Mittelung mehrerer Messungen bestimmt und sind in der Tabelle 4 zusammengestellt. Darin ist A_S der mittlere Flächeninhalt eines einzelnen Steins oder einer einzelnen Platte und A_F der Flächeninhalt des zugehörigen Fugenanteils. Der Fugenanteil FA in Prozent der Gesamtfläche errechnet sich mit der Beziehung $FA = A_F / (A_S + A_F) * 100$ [%].

Abflußmeßeinrichtung

Der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate ergibt sich aus der Differenz zwischen der Beregnungsintensität r und der auf die Meßfläche bezogenen Oberflächenabflußrate q. Die Beregnungsintensität wird über die Regelelektronik der Beregnungsanlage vorgegeben. Somit ist die Oberflächenabflußrate die zu messende Größe. Üblicherweise wird der Abfluß entweder kontinuierlich mit einem Meßgerinne oder über das Abflußvolumen in einem bestimmten Zeitintervall durch Behältermessungen bestimmt. Wegen des geringen Gefälles der Meßflächen konnte ein Meßgerinne zur Abflußbestimmung jedoch nicht eingesetzt werden. Die Anlage eines Pumpensumpfes zur Sammlung des Oberflächenabflusses war aus technischen und genehmigungsrechtlichen Gründen nicht möglich. Deshalb war die Entwicklung einer neuen Abflußmeßeinrichtung erforderlich.

Bei dem neuen Meßsystem wird der Oberflächenabfluß am unteren Ende der Beregnungsparzelle abgesaugt und einem Meßzylinder zugeführt (siehe Abbildung 1). Dazu wird in dem geschlossenen Meßzylinder mit Hilfe eines leistungsstarken Industriesaugers ein ständiger Unterdruck erzeugt. Über eine zweite Saugleitung, die sich am oberen Ende des Meßzylinders befindet, kann das Wasser-Luft-Gemisch über eine Düse von der Meßfläche abgesaugt werden. Im Meßzylinder trennen sich Wasser und Luft. Bei bekanntem Innendurchmesser kann über ein Steigrohr die zeitliche Volumenänderung und damit der Abfluß für ein bestimmtes Zeitintervall ermittelt werden. Erreicht der Wasserstand im Meßzylinder einen Maximalwert, kann dieser über eine eingebaute Tauchpumpe gegen den Unterdruck entleert werden, so daß keine Unterbrechung bei der Ableitung des Oberflächenabflusses eintritt.

Baumuster	Deckschicht	Versuchsfläche [m²]	mittlere Kantenlänge [mm]	mittlere Fugenbreite [mm]	mittlere Steinfläche A_S [cm²]	mittlere Fugenfläche A_F [cm²]	Fugenanteil FA [%]
neue Flächenbefestigungen							
1	Betonverbundpflaster, sandverfugt	3.2 x 2.0	–	4.1	270	15.0	5.3
2	Rasengittersteine	3.2 x 2.0	–	–	65.3	25.0	27.7
3	Rasengittersteine	3.2 x 2.0	wie bei Baumuster 2				27.7
4	Verbundpflaster, nicht verfugt	3.2 x 2.0	–	3.1	200.0	9.6	4.6
5	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	3.2 x 2.0	–	–	116.6	9.9	7.8
6	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	3.0 x 2.0	–	–	225.4	21.9	8.9
7	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	3.1 x 1.9	210.0	29.0	441.0	130.1	22.8
8	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	3.1 x 1.9	wie bei Baumuster 7				22.8
9	kunstharzgebundene Decke	3.2 x 1.0	–	–	–	–	100.0
gealterte Flächenbefestigungen							
10	Großformatplatten	3.2 x 2.0	1200.0	10.1	14400.0	244.2	1.7
11	Betongehwegplatten	3.2 x 2.0	300.0	8.1	900.0	49.2	5.2
12	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	3.2 x 2.0	97.1	11.8	94.4	23.0	19.6
13	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	3.2 x 2.0	101.6	6.2	103.2	12.7	10.9
14	Mosaikpflaster	3.2 x 2.0	57.7	9.5	33.2	11.8	26.2
15	Mosaikpflaster	3.2 x 2.0	52.3	7.1	27.3	7.9	22.4
16	Natursteinplatten (Granit)	3.2 x 2.0	–	8.8	6238.1	147.9	2.3
wassergebundene Decken							
17	wassergebundene Decke	3.2 x 2.0	–	–	–	–	100.0
18	wassergebundene Decke	3.2 x 2.0	–	–	–	–	100.0
19	wassergebundene Decke	3.2 x 2.0	–	–	–	–	100.0
20	wassergebundene Decke	3.2 x 2.0	–	–	–	–	100.0
21	wassergebundene Decke mit Deckschicht aus Feinkies	3.0 x 2.0	–	–	–	–	100.0

Tab. 4: Zusammenstellung der Platten- und Fugenmaße sowie des Fugenanteils *FA* für die untersuchten Flächenbefestigungen

Der gesamte Oberflächenabfluß eines Versuchslaufs wird in einem Behälter gesammelt. Durch die Integration der kontinuierlichen Abflußmeßwerte über die Zeit ist dann ein Abgleich mit der Totalisatormessung möglich. Somit ist eine relativ genaue Bestimmung des Oberflächenabflusses auf der Untersuchungsfläche gewährleistet. Eine Abflußbeschleunigung aufgrund der Saugwirkung wurde nicht beobachtet, da die Saugdüse nie eingestaut war und somit das Wasser auch nur in unmittelbarer Nähe der Düse durch den Luftstrom mitgerissen werden konnte.

2.4 Ergebnisse der Beregnungsversuche

Infiltrationscharakteristik

Die Infiltrationsversuche wurden im Zeitraum August/September 1994 durchgeführt. Für die Versuche mußte zunächst die Meßfläche abgegrenzt und gegen seitlichen Zu- oder Abfluß abgedichtet werden. Anschließend wurde die in Einzelteilen transportierte Beregnungsanlage über der Meßfläche aufgestellt und ausgerichtet. Am unteren Ende der Meßfläche wurde eine Saugdüse so angeordnet, daß das abfließende Wasser der Düse zuströmte. Nach Einschalten der Meßeinrichtung wurde nach Erreichen eines ausreichenden Unterdrucks im Meßzylinder die Schwenkbewegung der Düsen gestartet. Der Abflußbeginn wurde durch Beobachtung bestimmt. Der Anstieg des Wasserstandes im Meßzylinder Δh wurde in diskreten Zeitschritten Δt ermittelt und protokolliert. Damit errechnet sich der flächenspezifische Abfluß zu

$$q = \frac{\Delta h}{\Delta t} \frac{A_{MZ}}{A_{MF}} \quad [\mathrm{L/T}]$$

mit A_{MZ} = Querschnittsfläche des Meßzylinders
A_{MF} = Meßfläche

und die Infiltrationsrate i zu

$$i = r - q \quad [\mathrm{L/T}]$$

mit r = Regenintensität [L/T]

Zunächst wurde jeder Standort mit einer konstanten Intensität von 30 - 35 mm/h über einen Zeitraum von etwa 60 min beregnet (Trockenlauf). Ziel der langen Beregnungsdauer war das Erreichen eines konstanten Abflusses zur Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit k_f des Fugenmaterials. Ein konstanter Abfluß wurde jedoch nicht bei allen Versuchen erreicht. Eine Stunde nach Ende des ersten Versuchs wurde ein zweiter mit höherer Intensität durchgeführt (Naßlauf). Bei nahezu allen Baumustern konnte dadurch nach einiger Zeit ein konstanter Abfluß

erzielt werden. Mit den Ergebnissen des ersten und zweiten Infiltrationsexperiments ist die Berechnung des Muldenrückhalts möglich (siehe Kapitel 3.2).

Wegen der hohen Intensitäten und langen Versuchsdauer entspricht der simulierte Niederschlag einem Starkregenereignis mit einer mehrjährigen Wiederholungszeitspanne. Aus den auf der Grundlage eines amtlichen meteorologischen Gutachtens des DWD erstellten Niederschlags-Häufigkeits-Dauerlinien für das Stadgebiet Leipzig (siehe Abbildung 3) ergibt sich für den Trockenlauf mit Intensitäten zwischen 30 und 35 mm/h bei einer Dauer von 60 min ein Wiederkehrintervall von 10 Jahren. Für den Naßlauf mit Intensitäten um 70 mm/h bei einer Dauer von 30 min ergibt sich ein Wiederkehrintervall von 25 - 30 Jahren. Unter der Annahme, daß der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate relativ unabhägig von der Niederschlagsintensität ist, können jedoch auch Aussagen über das Infiltrationsverhalten bei häufiger auftretenden Ereignissen (geringere Dauer, niedrigere Niederschlagsintensität) getroffen werden (siehe Kapitel 3). Bei allen Versuchen konnte der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* durch eine Exponentialfunktionen der Form

$$i(t) = i_E + a \exp\left(-\frac{t - t_0}{b} \right) \qquad (1)$$

approximiert werden. Hierin kann i_E als Endinfiltrationsrate interpretiert werden, da für große Werte von t die Infiltrationsrate $i(t)$ gegen diesen Wert strebt. Die weitere Auswertung erfolgte anhand dieser an die Versuchsergebnisse angepaßten Funktionen.

Im folgenden werden die einzelnen Infiltrationsexperimente kurz erläutert. Die entsprechenden Baumuster sind in der Fotodokumentation dargestellt.

Baumuster 1 (Abbildung 4)

Dieser Belag eines nichtöffentlichen Parkplatzes wurde 1992 hergestellt. Es handelt sich um ein im Sandbett verlegtes sandverfugtes Verbundpflaster über einer Schottertragschicht. Der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate ist mit dem des Baumusters 1 vergleichbar (siehe Abbildung 4). Der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate entspricht dem mittleren Verlauf bei den gealterten Flächenbefestigungen. Aufgrund des geringeren Feinanteils im Fugenmaterial ergab sich jedoch eine höherer Endinfiltrationsrate i_E.

Baumuster 2 (Abbildung 5)

Der Belag besteht aus Rasengittersteinen auf einer Sandschicht, die über einer alten Asphaltdecke aufgebracht wurde. Die Fläche gehört zu einem wenig genutzten Parkplatz. Dies erklärt die hohe Bodenbedeckung von über 90 %. Während des ersten Beregnungsversuchs konnte kein Oberflächenabfluß beobachtet werden. Beim zweiten Beregnungsversuch setzte der Abfluß erst

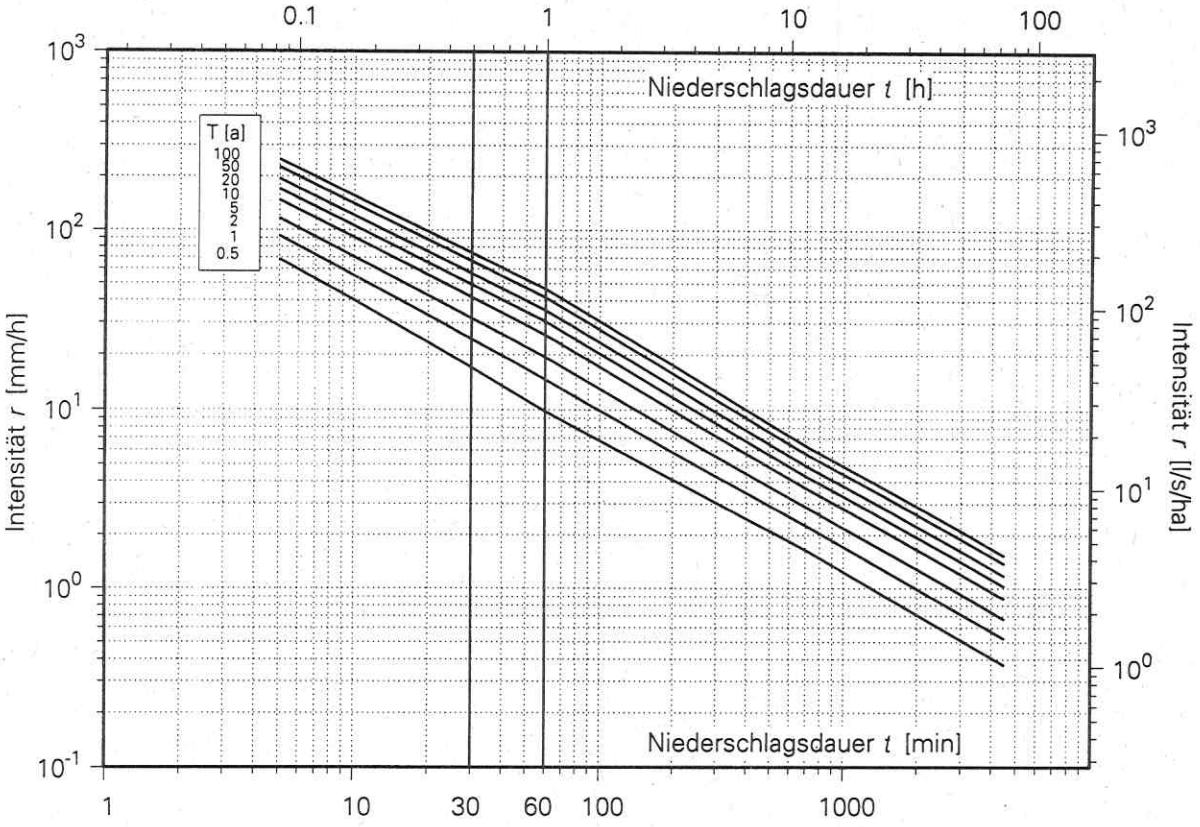


Abb. 3: Niederschlagsverteilungskurven für das Stadtgebiet von Leipzig

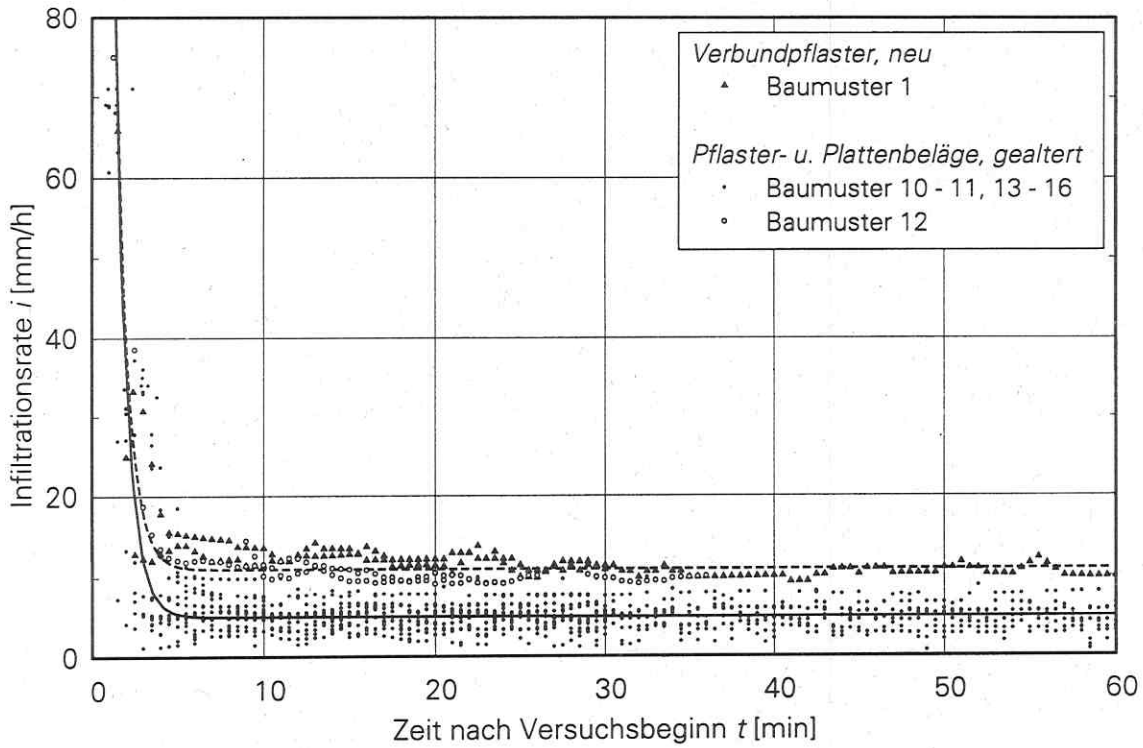


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und neuem Verbundpflaster

nach ca. 25 min ein und nahm nur allmählich zu. Die Endrate wurde nicht erreicht. Wie sich nach dem Entfernen des Belags zeigte, war die Sandschicht stark übersättigt. Das durch die Rasengittersteine versickernde Regenwasser konnte in der Entwässerungsschicht aufgrund der stauenden Wirkung der Asphaltdecke nur langsam horizontal abfließen. Die Abflußentstehung ist deshalb auf den Anstieg des Wasserstandes in der Sandschicht bis an die Oberfläche zurückzuführen.

Baumuster 3 (Abbildung 5)

Bei diesem Baumuster handelt es sich um einen Anwohnerparkplatz mit einem Belag aus Rasengittersteinen, der 1990 angelegt wurde. Wegen der intensiven Nutzung ist der Grünflächenanteil (Raseneinsaat bei Herstellung des Parkplatzes) mit 25 % wesentlich geringer als bei Baumuster 2. Beim ersten Beregnungsversuch konnte aufgrund des Flächenrückhaltes ein verzögerter Anstieg des Oberflächenabflusses festgestellt werden. Beim anschließenden zweiten Versuch wurde jedoch bereits kurz nach einsetzendem Oberflächenabfluß die Endinfiltrationsrate erreicht.

Baumuster 4 (Abbildung 4)

Die Befestigung der Fahrspuren dieses Parkplatzes besteht aus Verbundpflaster. Es wurde im Kiesbett verlegt und nicht verfugt. Beim ersten Beregnungsversuch fand kein Abfluß statt, beim zweiten nur ein sehr geringer.

Baumuster 5 (Abbildung 6)

Bei diesem Parkplatz sind die Stellplätze mit Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen befestigt. Die Sickeröffnungen sind mit Feinkies verfüllt. Die Bettungsschicht besteht ebenfalls aus Feinkies auf einer Tragschicht aus Recyclingmaterial. Bei beiden Beregnungsversuchen fand kein Abfluß statt.

Baumuster 6 (Abbildung 6)

Die Stellplätze dieses Parkplatzes wurden mit Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen, die nur teilweise mit Bodenmaterial verfüllt sind, befestigt. Rasen wurde jedoch nicht eingesät. Wegen des hohen Rückhaltevermögens der teilverfüllten Sickeröffnungen setzte der Abfluß beim ersten Versuch relativ spät ein. Der langsame Anstieg des Oberflächenabflusses ergab sich nicht aus der allmählichen Abnahme der Infiltrationsrate. Da der Abfluß nicht auf der Oberfläche, sondern zwischen den Sickeröffnungen stattfand, wurde er stark abgebremst und gelangte verzögert zu der Abflußmeßeinrichtung. Bei der höheren Intensität des zweiten Versuchs wurden zunächst alle Öffnungen aufgefüllt, so daß der Abfluß dann an der Oberfläche erfolgen konnte.

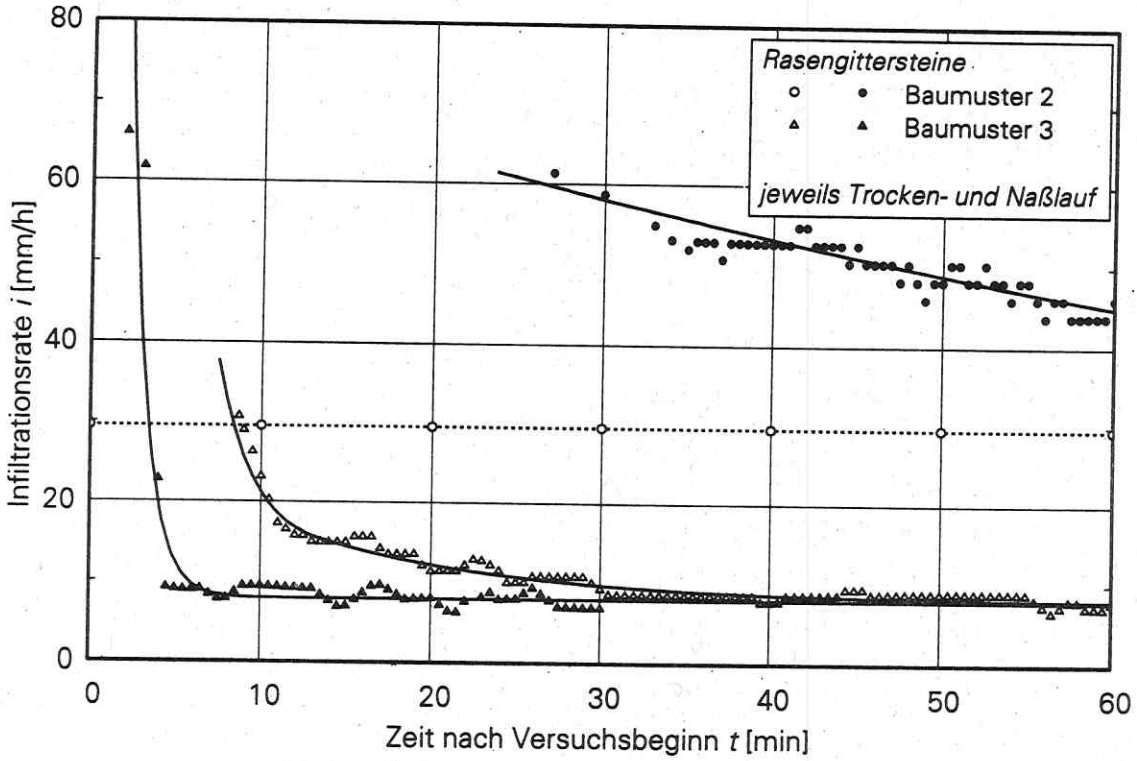


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei Rasengittersteinen

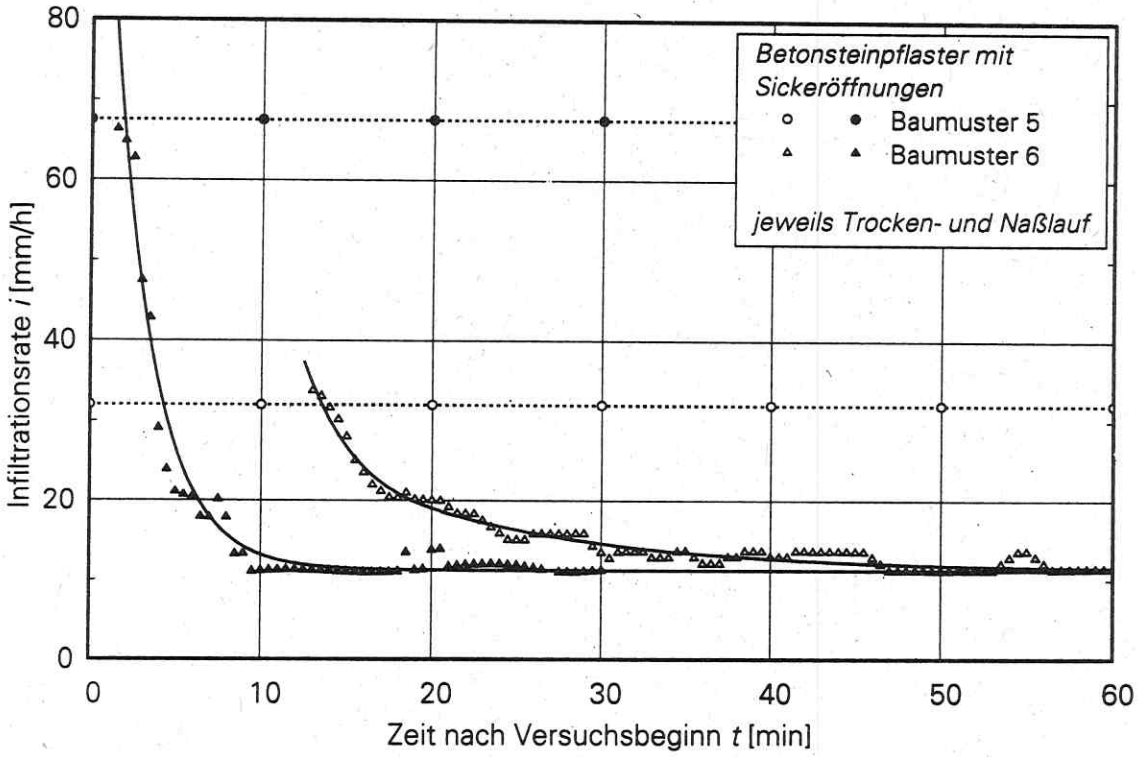


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen

Baumuster 7 und 8 (Abbildung 7)

Die Flächenbefestigung der Baumuster 7 und 8 besteht aus Betonsteinpflaster mit breiten Rasenfugen. Bei der Herstellung der Stellplätze wurde eine Mischung aus Gras und Weißklee eingesät. Bei Baumuster 7 ist die Einsaat nicht aufgegangen, so daß die Bedeckung unter 5 % lag. Bei Baumuster 8 betrug die Bedeckung dagegen etwa 75 %. Durch den unterschiedlichen Grünanteil ergaben sich auch große Unterschiede im Abflußverhalten. Bei Baumuster 7 setzte der Oberflächenabfluß bei beiden Versuchen relativ früh ein und stieg dann schnell an. Die Endinfiltrationsrate war wesentlich geringer als bei Baumuster 8. Bei den Versuchen mit hohem Rasenanteil stieg der Oberflächenabfluß langsamer an, eine Endrate wurde erst beim zweiten Versuch erreicht.

Baumuster 9 (Abbildung 8)

Dieser Belag besteht aus einer kunstharzgebundenen Decke, zu deren Herstellung ein lufttrocknendes Einkomponenten-Bindemittel (Geolen) mit trockenem Quarzsand (0,2/2,5) gemischt und auf einer Ausgleichsschicht aus Sand aufgebracht wird. Durch das Bindemittel werden die Einzelkörner über ihre Kontaktstellen miteinander verkittet, während der Porenraum unverfüllt bleibt. Die Untersuchungsfläche wurde auf dem Elberadweg Dresden/Hamburg bei Merschwitz eingerichtet. Eine Beprobung der Tragschicht konnte nicht durchgeführt werden, da hierbei die Deckschicht zerstört worden wäre. Während des ersten Beregnungsversuchs trat kein Oberflächenabfluß auf. Beim zweiten Versuch wurde die Infiltrationskapazität des Belags überschritten und es stellte sich schnell die Endinfiltrationsrate ein, die mit 45 mm/h jedoch sehr hoch war.

Baumuster 10 (Abbildung 4)

Diese Versuchsfläche besteht aus Betonplatten im Format 1,2 x 1,2 m², die 1977/78 verlegt wurden. Aufgrund der geringen Maßhaltigkeit haben die Platten zum Teil Fugenabstände von mehreren Zentimetern. Das Fugenmaterial ist aufgrund des Gehalts an organischer Substanz stark verfärbt. Bei beiden Beregnungsversuchen setzte der Oberflächenabfluß erwartungsgemäß früh ein und stieg dann schnell an. Das Infiltrationsverhalten entspricht dem gealterter Pflaster- und Plattenbeläge.

Baumuster 11 (Abbildung 4)

Gehwegbeläge wurden in den fünfziger und sechziger Jahren häufig mit den Betonplatten des Baumusters 11 hergestellt. Sie haben eine Größe von 30 x 30 cm². Das Fugenmaterial des Untersuchungsstandortes ist wegen der Lage unter Bäumen vermoost und stark verfärbt. In bezug auf das Abflußverhalten gelten die Aussagen des Baumusters 10.

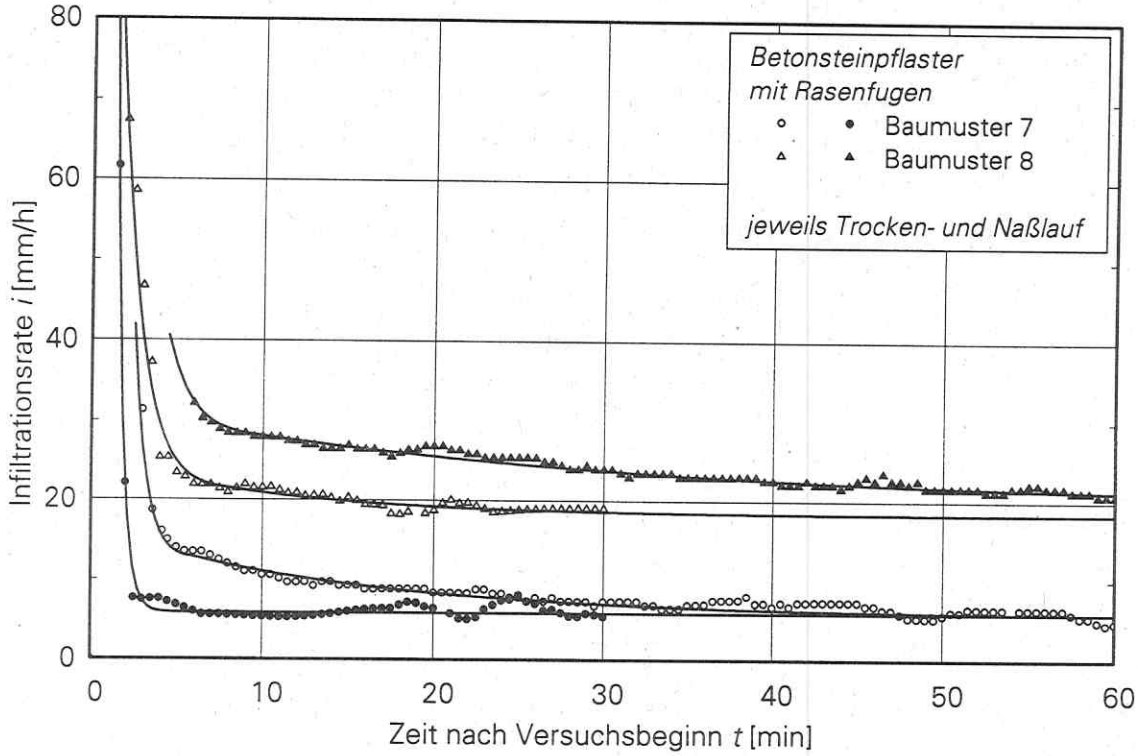


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen

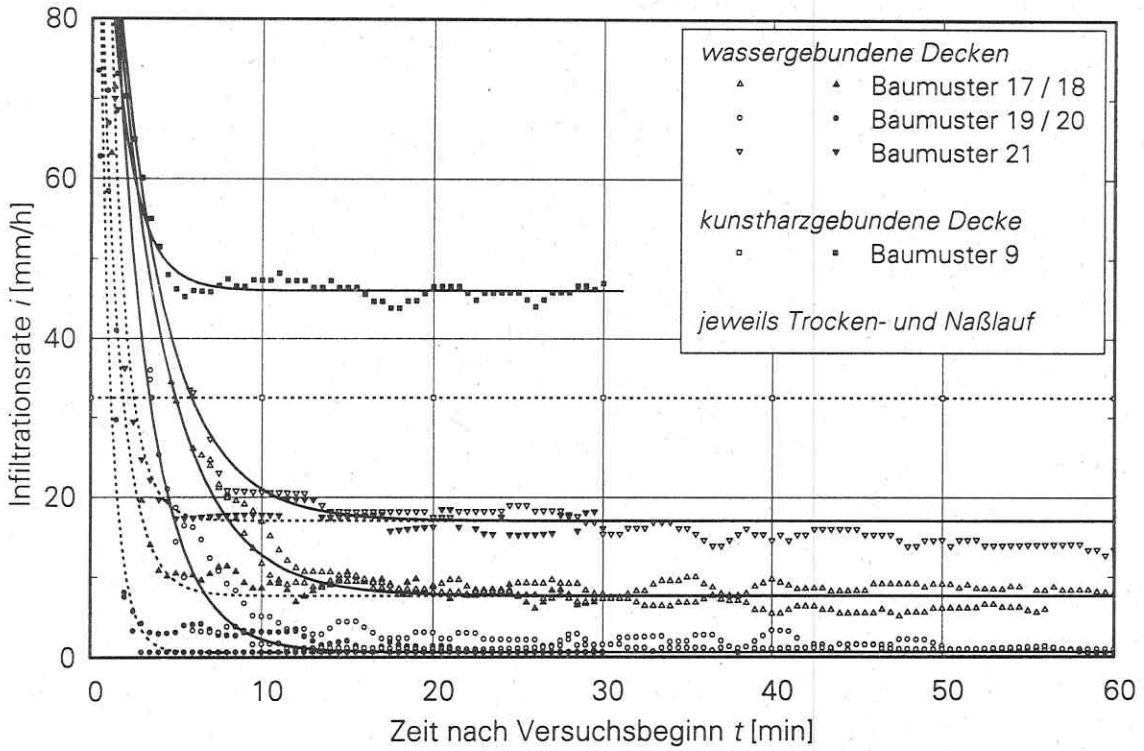


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei wassergebundenen und kunstharzgebundenen Decken

Baumuster 12 (Abbildung 4)

Bei diesem Belagtyp handelt es sich um Kopfsteinpflaster auf einer wenig genutzten nichtöffentlichen Nebenstraße, die um 1944 angelegt wurde. Aufgrund des Alters des Belags ist der Fugensand durch den Eintrag von organischem Material im oberen Bereich dunkel verfärbt, während tiefer liegende Fugenbereiche sowie das Sandbett kaum Verfärbungen aufweisen. Der Oberflächenabfluß erreichte bei beiden Versuchen bereits kurz nach Abflußbeginn einen konstanten Endwert. Der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate bei den Baumustern 1 und 12 stellt die maximal mögliche Infiltrationsleistung der untersuchten konventionellen Pflaster- und Plattenbeläge dar.

Baumuster 13 (Abbildung 4)

Auch bei diesem Belagtyp handelt es sich um Kopfsteinpflaster auf einer wenig genutzten nichtöffentlichen Straße, die um 1944 angelegt wurde. Da sich die Beregnungsfläche im Bereich einer Entwässerungsrinne befand, waren die Fugen und Pflastersteine teilweise mit angespültem Feinmaterial abgedeckt. Die Abflußcharakteristik entspricht der von Baumuster 12, jedoch bei deutlich geringerer Endinfiltrationsrate.

Baumuster 14 und 15 (Abbildung 4)

Bei den beiden Baumustern handelt es sich um Gehwege mit Mosaikpflaster die bereits um die Jahrhundertwende angelegt wurden. Das Fugenmaterial ist aufgrund des Eintrags von organischer Substanz und Abrieb stark verfärbt. Bei beiden Standorten setzte der Abfluß mit wenig Verzögerung ein. Bei allen Beregnungsversuchen wurde bereits nach wenigen Minuten ein konstanter Abfluß erreicht.

Baumuster 16 (Abbildung 4)

Die bei Baumuster 9 verlegten Natursteinplatten aus Granit wurden um 1900 für den Gehwegbau verwendet. Da die Untersuchungsfläche unter Bäumen lag, waren die Fugen vermoost. Zwischen den beiden Beregnungsversuchen gab es kaum Unterschiede bei Abflußbeginn und schnellem Abflußanstieg. Die Endinfiltrationsrate wurde selbst beim Trockenlauf bereits nach 3 - 4 min erreicht.

Baumuster 17 (Abbildung 8)

Der nichtöffentliche Parkplatz auf diesem Untersuchungsstandort mit einer wassergebundenen Decke wurde 1975 angelegt und intensiv genutzt. Trotzdem ist das Infiltrationsverhalten wesentlich günstiger als bei Baumuster 19 und 20. Im Gegensatz zu diesen ist bei Baumuster 17 eine Schotterschicht als Tragschicht eingebaut. Außerdem hat die Deckschicht einen höheren Skelett- und einen geringeren Feinanteil, so daß die Verschlämmungsneigung geringer als bei den Baumustern 19 und 20 ist.

Baumuster 18 (Abbildung 8)

Der Gehweg mit wassergebundener Decke wurde 1991 angelegt. Bei allen wassergebundenen Decken ergaben sich deutliche Unterschiede im zeitlichen Infiltrationsverlauf zwischen Trocken- und Naßlauf. Während beim ersten Versuch ein langsamerer Anstieg des Oberflächenabflusses beobachtet werden konnte, erreichte er beim zweiten Versuch bereits nach kurzer Zeit einen konstanten Endwert. Der langsamere Anstieg beim ersten Versuch ist darauf zurückzuführen, daß zunächst überwiegend die oberflächennahen Makroporen aufgefüllt wurden. Erst danach wird der Matrixporenfluß für das Infiltrationsvermögen des Bodens maßgebend. Da auch die Entwässerungsgeschwindigkeit der Makroporen durch den Matrixporenfluß bestimmt wird, waren diese zu Beginn des zweiten Versuchs noch nicht entleert. Deshalb setzt der Oberflächenabfluß schneller ein und erreicht schon nach kurzer Zeit den Endwert des ersten Versuchs.

Baumuster 19 und 20 (Abbildung 8)

Die Versuchsparzellen beider Baumuster lagen in einem Park. Die wassergebundenen Decken der beiden Gehwege zeigen ein ähnliches Infiltrationsverhalten: deutliche Unterschiede zwischen Trocken- und Naßlauf und sehr niedrige Endinfiltrationsraten (siehe Baumuster 18).

Baumuster 21 (Abbildung 8)

Bei diesem Rad- und Fußweg mit wassergebundener Decke besteht der Unterbau aus einer Sandschicht über einer Schottertragschicht und die Deckschicht aus einem sandigen Feinkies. Aufgrund der geringen Bindigkeit hat der Fahrradverkehr deutliche Fahrspuren in der Deckschicht hinterlassen. Nach einem schnellen Anstieg des Oberflächenabflusses beim ersten Versuch wurde ein konstanter Abfluß erst nach 50 - 60 min erreicht. Beim zweiten Beregnungsversuch setzte der Abfluß kurz nach Beregnungsbeginn ein, und bereits nach 5 min war ein konstanter Abfluß festzustellen. Die Endinfiltrationsrate war deutlich höher als bei den Baumustern 19 und 20.

Abflußcharakteristik

Eine allgemeine Darstellung der Ergebnisse der Beregnungsversuche in Form des zeitlichen Verlaufs der Gesamtabflußbeiwerte $\phi(t)$ ermöglicht eine Übertragung auf andere Standorte. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, daß die zeitliche Entwicklung der Infiltrationsrate, wie sie in den Abbildungen 4 - 8 wiedergegeben ist, unabhängig von der Niederschlagsintensität ist. Diese Annahme ist gerechtfertigt, wenn sich Oberflächenabfluß einstellt und die gesamte Fugenfläche zur Versickerung beiträgt. Verschlämmungseffekte, die bei natürlich gelagerten Böden durch Niederschläge höherer Intensität gefördert werden, sind bei den wassergebundenen Decken und den Belägen von untergeordneter Bedeutung. Bei bekanntem Verlauf der Infil-

trationsrate $i(t)$ kann der zeitliche Verlauf des Gesamtabflußbeiwertes $\phi_j(t)$ für die Intensitätsstufe r_j nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\phi_j(t) = \begin{cases} 1 - \dfrac{r_j t_A + \int_{t_A}^{t} i(t)\,dt}{r_j t} & \text{wenn } i(t) \le r_j \\ 0 & \text{wenn } i(t) > r_j \end{cases} \qquad (2)$$

In den folgenden Abbildungen ist der zeiliche Verlauf des mittleren Abflußbeiwertes für verschiedene Intensitätsstufen aufgetragen.

Die Kurven für gealterte Pflaster- und Plattenbeläge und neues Verbundpflaster (siehe Abbildung 9 und 10) weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Bereits nach einer Regendauer von etwa 10 min steigt der Gesamtabflußbeiwert $\phi(t)$ nur noch langsam an. Das Rückhaltevermögen ist erschöpft, und das Infiltrationsverhalten wird nur noch durch die gesättigte Leitfähigkeit des Fugenmaterials beeinflußt. Ein signifikanter Unterschied zwischen Trocken- und Naßlauf bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Infiltrationsrate konnte nicht festgestellt werden.

Bei den wassergebundenen Decken (siehe Abbildung 11 und 12) gibt es deutliche Unterschiede in der zeitlichen Entwicklung des Abflußbeiwerts sowohl zwischen Trocken- und Naßlauf als auch bei unterschiedlichen Sand-/Skelettanteilen bzw. Anteilen abschlämmbarer Korngrößen in der Deck- und Tragschicht. Beim Trockenlauf ergibt sich aufgrund des Flächenrückhalts ein langsamerer Anstieg des Abflußbeiwerts, während der Anstieg beim Naßlauf mit dem der Pflaster- und Plattenbeläge vergleichbar ist. Der höhere Anfangsrückhalt bei den wassergebundenen Decken ist zum einen auf die im Vergleich zu den Pflaster- und Plattenbelägen höhere Oberflächenrauhigkeit und zum anderen auf den höheren Anteil von Makroporen zurückzuführen. Je nach Ausführung der Deck- und Tragschichten ergeben sich deutlich niedrigere oder deutlich höhere Abflußbeiwerte gegenüber den Pflaster- und Plattenbelägen. Bei geringem Skelettanteil und hohem Anteil abschlämmbarer Korngrößen führen selbst Niederschläge mit geringer Intensität zu einem deutlichen Oberflächenabfluß, während bei höheren Intensitäten kein Unterschied zu den Pflaster- und Plattenbelägen besteht. Bei hohem Skelettanteil und geringem Anteil abschlämmbarer Korngrößen konnte sowohl beim Trocken- als auch beim Naßlauf erst bei Intensitäten über 20 mm/h ein Oberflächenabfluß beobachtet werden, wodurch sich bei den mittleren Intensitäten deutlich geringere Abflußbeiwerte als bei den Pflasterbelägen ergaben. Bei hohen Intensitäten ist der Unterschied jedoch gering.

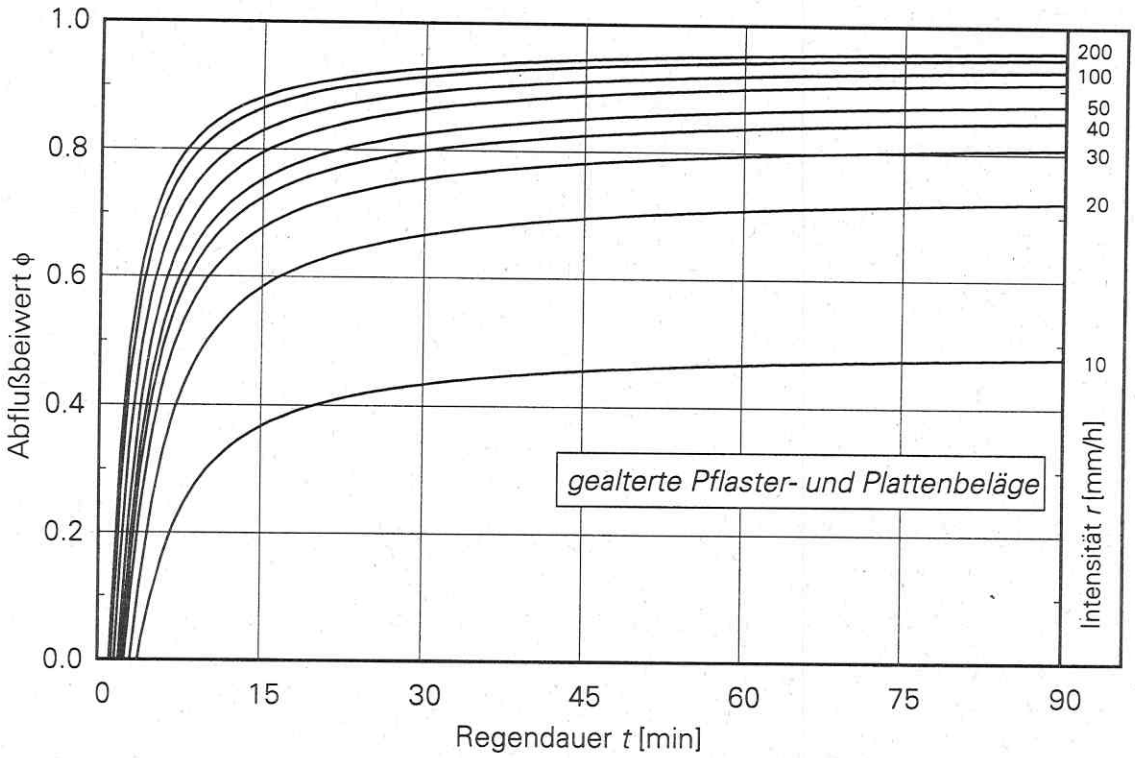


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei gealterten Pflasterbelägen

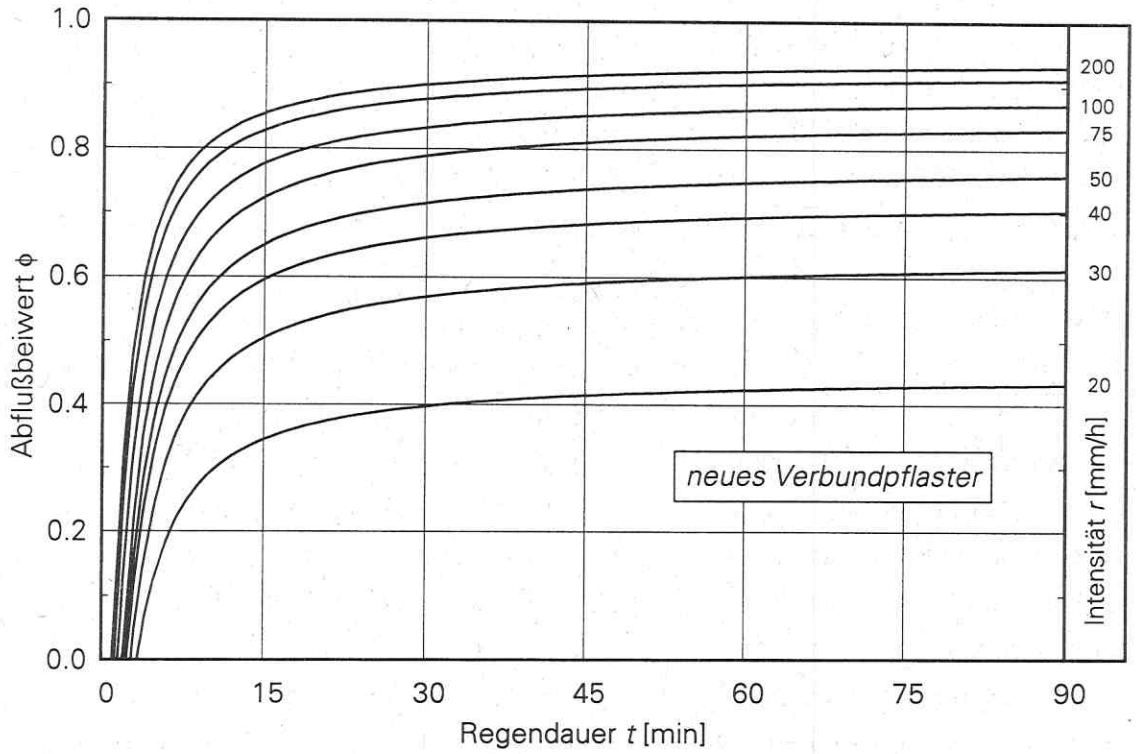


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei neuem Verbundpflaster

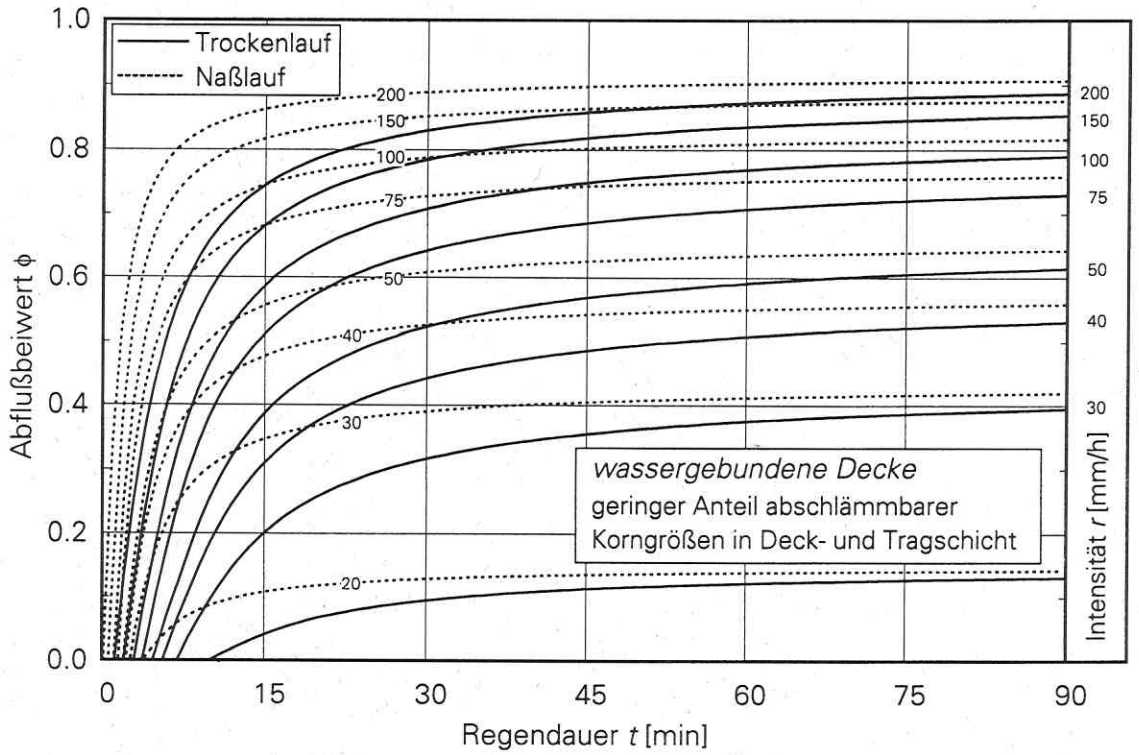


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei wassergebundenen Decken mit geringem Anteil abschlämmbarer Korngrößen in Deck- und Tragschicht

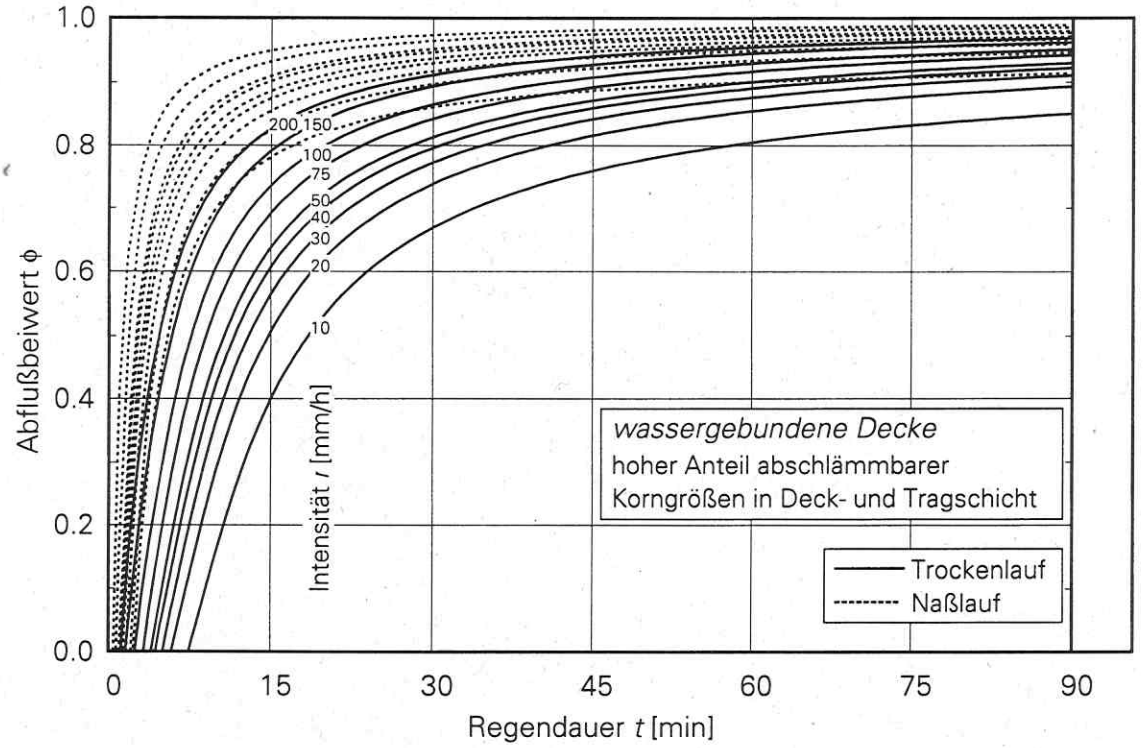


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei wassergebundenen Decken mit hohem Anteil abschlämmbarer Korngrößen in Deck- und Tragschicht

Bei den Rasengittersteinen wurde nur der zeitliche Verlauf des Abflußbeiwerts für das Baumuster 3 bestimmt (siehe Abbildung 13), da bei den Rasengittersteinen mit dichtem Bewuchs kein Abfluß gemessen werden konnte. Trotz des schlechten Zustandes der Meßfläche konnte, insbesondere beim Trockenlauf, ein deutlicher Flächenrückhalt beobachtet werden, was sich in der langsamen Zunahme des Abflußbeiwertes bemerkbar macht. Bei zunehmender Regenintensität und -dauer ist dieser günstige Anfangseffekt gegenüber den Pflasterbelägen und den wassergebundenen Decken jedoch nur von geringer Bedeutung.

Deutliche Unterschiede bestehen zwischen den Gesamtabflußbeiwerten des Trocken- und Naßlaufs bei dem verschlämmten Verbundpflaster des Baumusters 6 (siehe Abbildung 14). Aufgrund des hohen Anfangsverlustes steigt der Abflußbeiwert nur langsam an. Dabei ist zu beachten, daß die Rückhaltewirkung nicht auf den Sickeröffnungen basiert, sondern auf der Aufnahmefähigkeit des Füllmaterials. Dies wird durch den wesentlich schnelleren Anstieg des Gesamtabflußbeiwerts beim Naßlauf bestätigt. Bei trockenen Anfangsbedingungen ist der Infitrationsverlauf aufgrund des größeren Fugenanteils günstiger als bei normalem Verbundpflaster, selbst bei der hier nicht fachgerechten Verlegung. Beim Naßlauf hingegen ist der Unterschied zwischen beiden Belagstypen geringer. Bei einem ähnlichen Betonsteinpflaster, bei dem die Sickeröffnungen mit Feinkies verfüllt wurden (Baumuster 5), konnte kein Abfluß beobachtet werden.

Bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen lassen sich deutliche Unterschiede im zeitlichen Verlauf des Gesamtabflußbeiwertes $\phi(t)$ bei geringer und hoher Bewuchsdichte feststellen (siehe Abbildung 15 und 16). Der Anfangsrückhalt bei diesem Belagstyp ist gering, wodurch sich ein schneller Anstieg des Abflußbeiwerts sowohl bei trockenen wie auch bei nassen Anfangsbedingungen einstellt. Bei geringem Bewuchs und feuchten Anfangsbedingungen weist der Belag mit niedriger Bewuchsdichte nur ein geringfügig besseres Infiltrationsvermögen als die konventionellen Pflaster- und Plattenbeläge auf. Bei hoher Bewuchsdichte hingegen ist die Endinfiltrationsrate aufgrund des gut durchwurzelten Fugenbereichs deutlich höher und der Anstieg des Abflußbeiwertes bei den niedrigen bis mittleren Intensitäten wesentlich geringer. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Bedeutung der fachgerechten Ausführung und Pflege von versickerungswirksamen Flächenbefestigungen mit hohem Grünanteil.

Für Planungsaufgaben in der Ingenieurpraxis werden häufig Entwurfsniederschläge bestimmter Jährlichkeit T und Dauer t angesetzt. Zum Beispiel wird nach ATV, Arbeitsblatt A 138, 1990 als Bemessungsgrundlage für den Entwurf von Versickerungsanlagen ein Bemessungsregen mit einer Überschreitungshäufigkeit von $n = 1/T = 0.2$ und einer Dauer von 10 min, bzw. 15 min bei großen und flachgeneigten Anschlußflächen, empfohlen. Liegen für ein Gebiet langjährige Niederschlagsdaten vor, kann daraus mit statistischen Methoden die Niederschlagsverteilung ab-

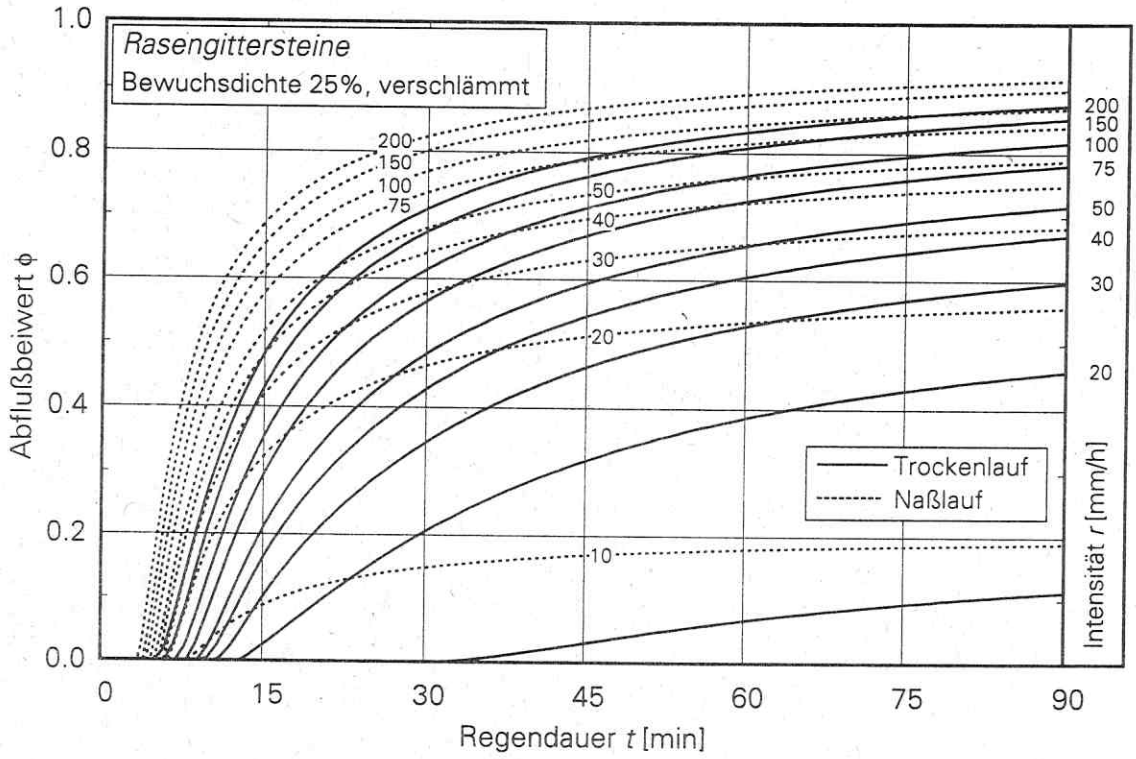


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Rasengittersteinen mit geringer Bewuchsdichte

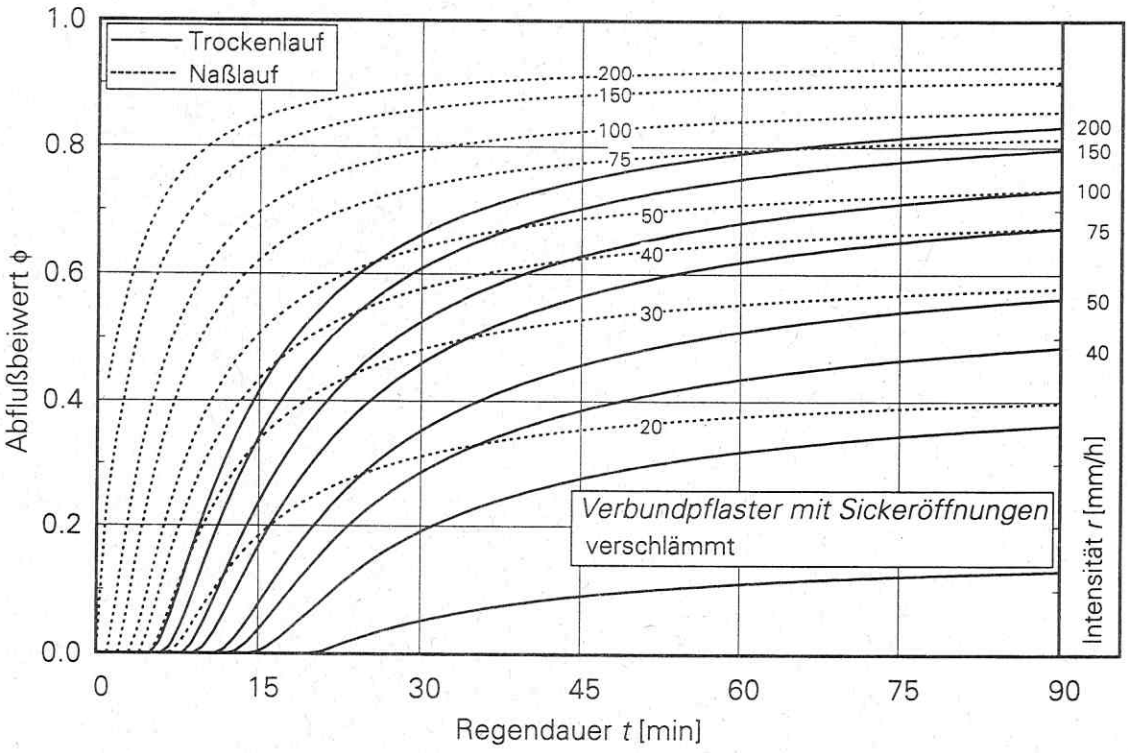


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Verbundpflaster mit Sickeröffnungen (verschlämmt)

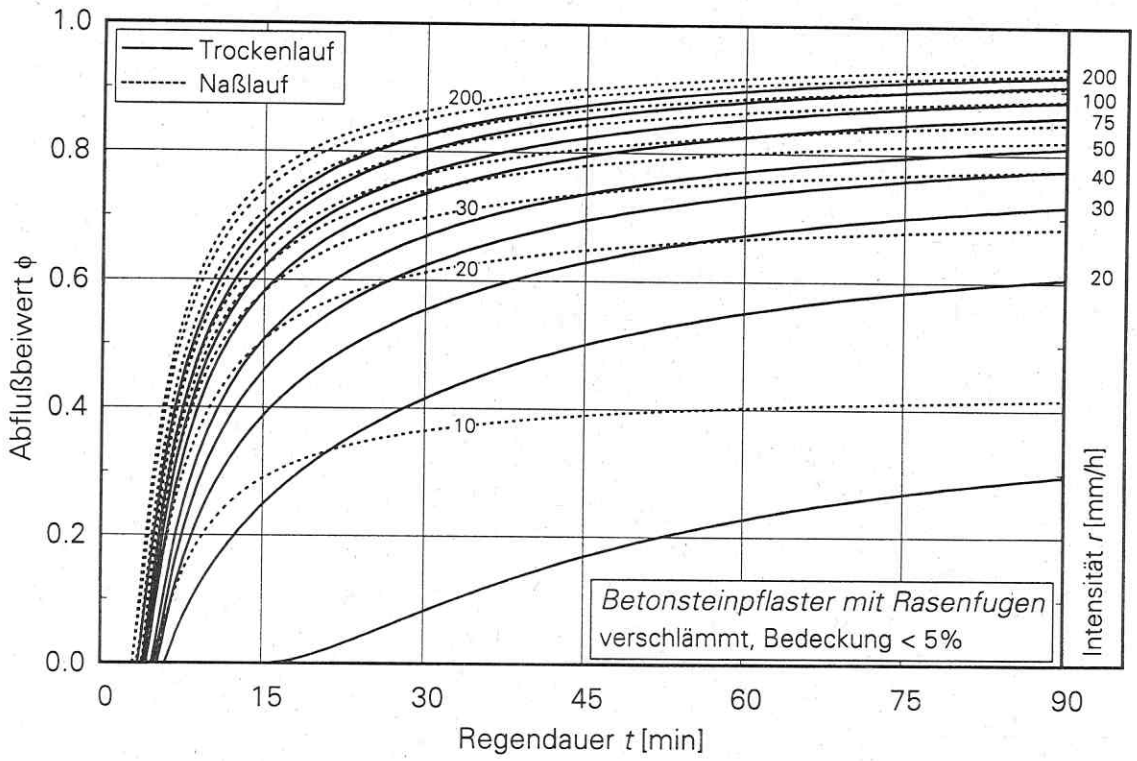


Abb. 15: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen (geringe Bewuchsdichte)

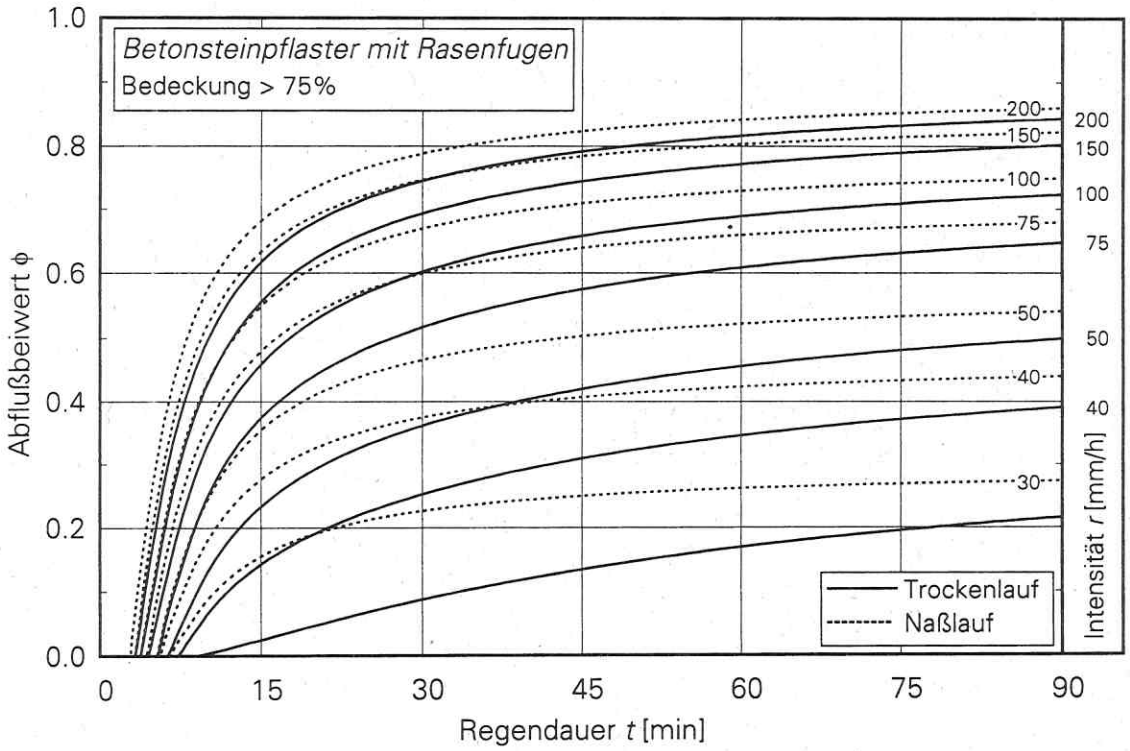


Abb. 16: Zeitlicher Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts $\phi(t)$ für verschiedene Intensitätsstufen r_j bei Betonsteinpflaster mit Rasenfugen (hohe Bewuchsdichte)

geleitet werden. Bei kurzen Beobachtungszeiträumen werden häufig durch einen Regonalisierungsansatz die Ergebnisse vergleichbarer Gebiete auf das Planungsgebiet übertragen. Im Auftrag des UFZ wurde vom Deutschen Wetterdienst in einem Gutachten die Niederschlagsverteilung für das Stadtgebiet von Leipzig bestimmt. Die graphische Auswertung der Ergebnisdaten ist in Abbildung 3 dargestellt. Über den funktionalen Zusammenhang $r = f(t, T)$ kann der Gesamtabflußbeiwert in Abhängigkeit der Jährlichkeit und Dauer bzw. der Jährlichkeit und Intensität dargestellt werden.

In den folgenden Abbildungen ist exemplarisch der Verlauf des Gesamtabflußbeiwerts ϕ für verschiedene Jährlichkeiten T in Abhängigkeit von der Regenintensität r und der Regendauer t für gealterte Pflaster- und Plattenbeläge, neues Verbundpflaster und wassergebundene Decken aufgetragen. Die Darstellung in zwei Diagrammen wurde gewählt, um eine bessere Auflösung zu erreichen. Da die Intensität bei gleicher Jährlichkeit mit abnehmender Niederschlagsdauer überproportional ansteigt ist ein hohe Auflösung bei der Dauer wünschenswert. Auf der anderen Seite sollen bei niedrigen Intensitäten möglichst große Zeitintervalle dargestellt werden können. Durch die Aufteilung in zwei Diagramme werden durch die Darstellung $\phi(r,T)$ Ereignisse hoher Intensität und geringer Dauer und durch die Darstellung $\phi(t,T)$ Ereignisse hoher Dauer und geringer Intensität besser aufgelöst.

Für die gealterten Pflaster- und Plattenbeläge (siehe Abbildung 17 und 18) ändert sich der Abflußbeiwert bei Intensitäten über 50 mm/h für die jeweiligen Überschreitungshäufigkeiten nur noch geringfügig, während bei neuem Verbundpflaster wegen der höheren Endinfiltrationsrate der Gesamtabflußbeiwert langsamer ansteigt. Die höchsten Abflußbeiwerte ergeben sich bei den gealterten Pflaster- und Plattenbelägen bei einer Regendauer von etwa 15 min. Mit abnehmender Regendauer nimmt zwar die Intensität überproportional zu, jedoch wird der Anteil des Anfangsrückhalts am Gesamtrückhalt immer größer. Als Folge davon nimmt der Gesamtabflußbeiwert wieder ab. Je größer die Niederschlagsdauer ist, desto stärker macht sich der Einfluß der Jährlichkeit auf den Abflußbeiwert bemerkbar. Da mit Zunahme der Dauer bei gleicher Jährlichkeit die Intensität abnimmt, steigt der Anteil des Rückhalts durch die Endinfiltrationsrate am Gesamtrückhalt überproportional an. Somit nimmt auch der Gesamtabflußbeiwert überproportional ab.

Bei den wassergebundenen Decken muß, wie bereits ausgeführt, zwischen verschiedenen Skelett- und Feinanteilen in Deck- und Tragschichten und dem Anfangswassergehalt unterschieden werden (siehe Abbildung 19 - 22). Beim Trockenlauf ergeben sich deutliche Unterschiede in der Tendenz der Abflußbeiwerte. Während sich bei der durchlässigeren Decke eine Zunahme mit zunehmender Regenintensität ergibt, nimmt der Abflußbeiwert bei der weniger durchlässigen Decke ab. Da die Endinfiltrationsrate bei der wassergebundenen Decke mit hohem

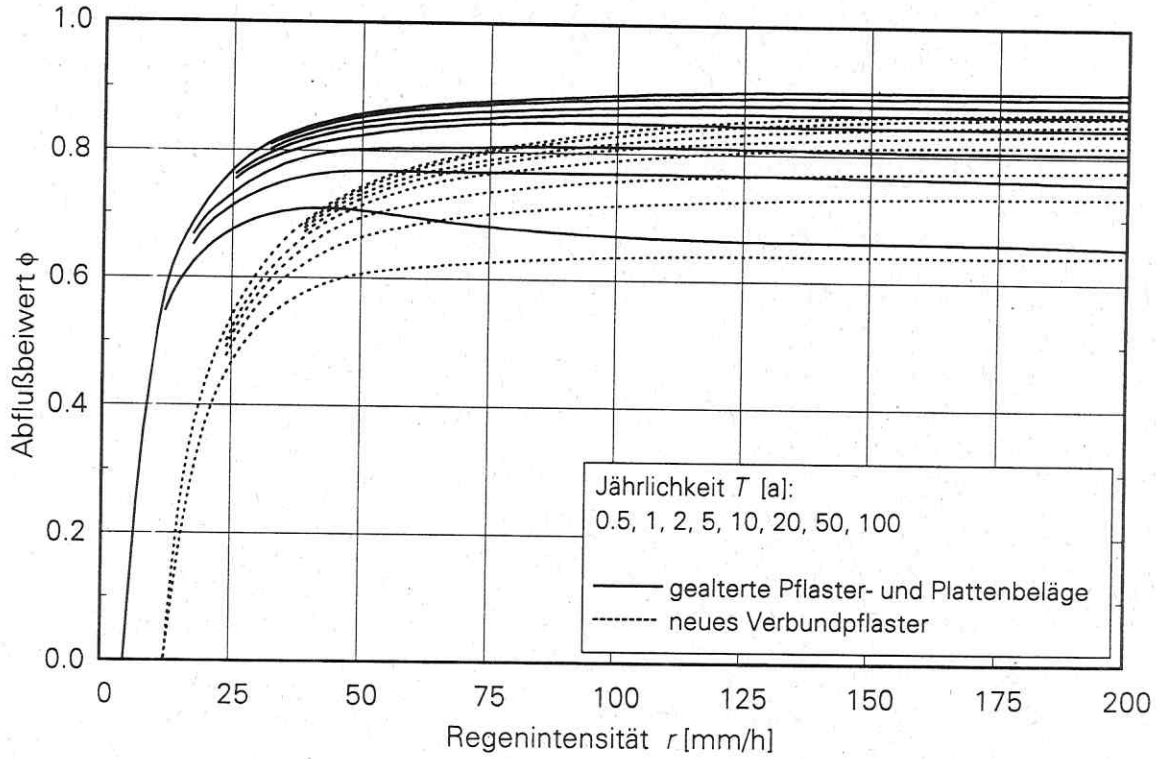


Abb. 17: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und neuem Verbundpflaster in Abhängigkeit der Intensität r und der Jährlichkeit T

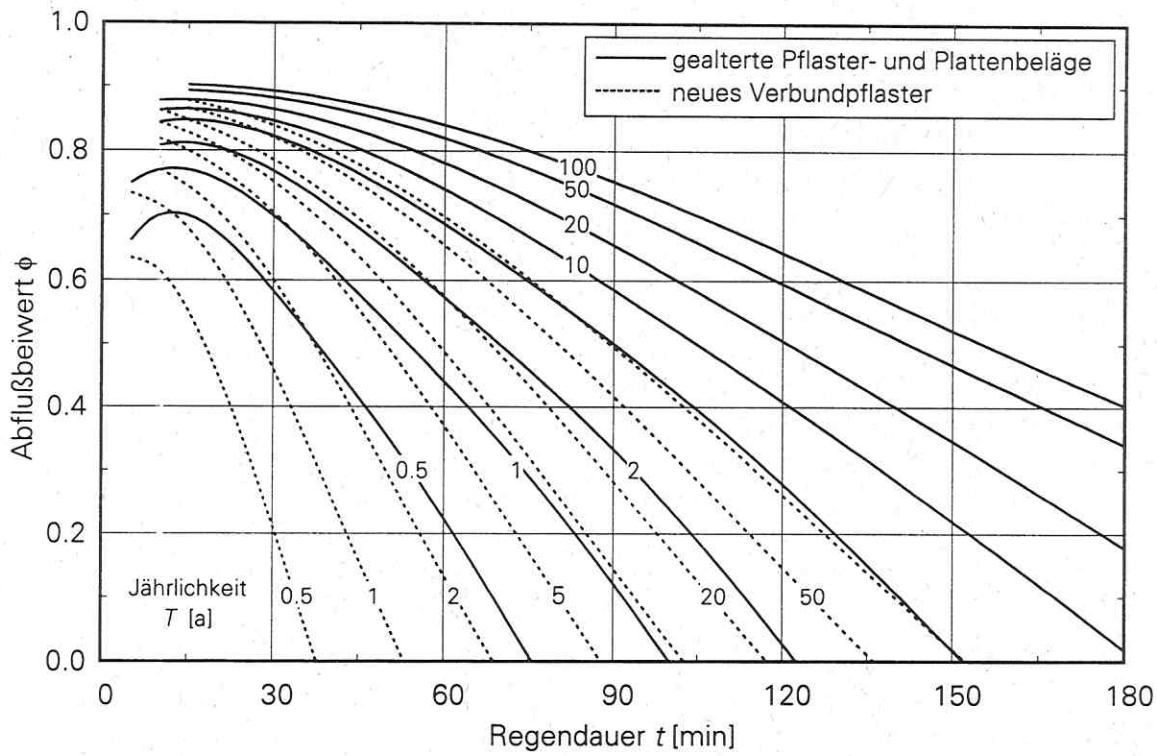


Abb. 18: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und neuem Verbundpflaster in Abhängigkeit der Regendauer t und der Jährlichkeit T

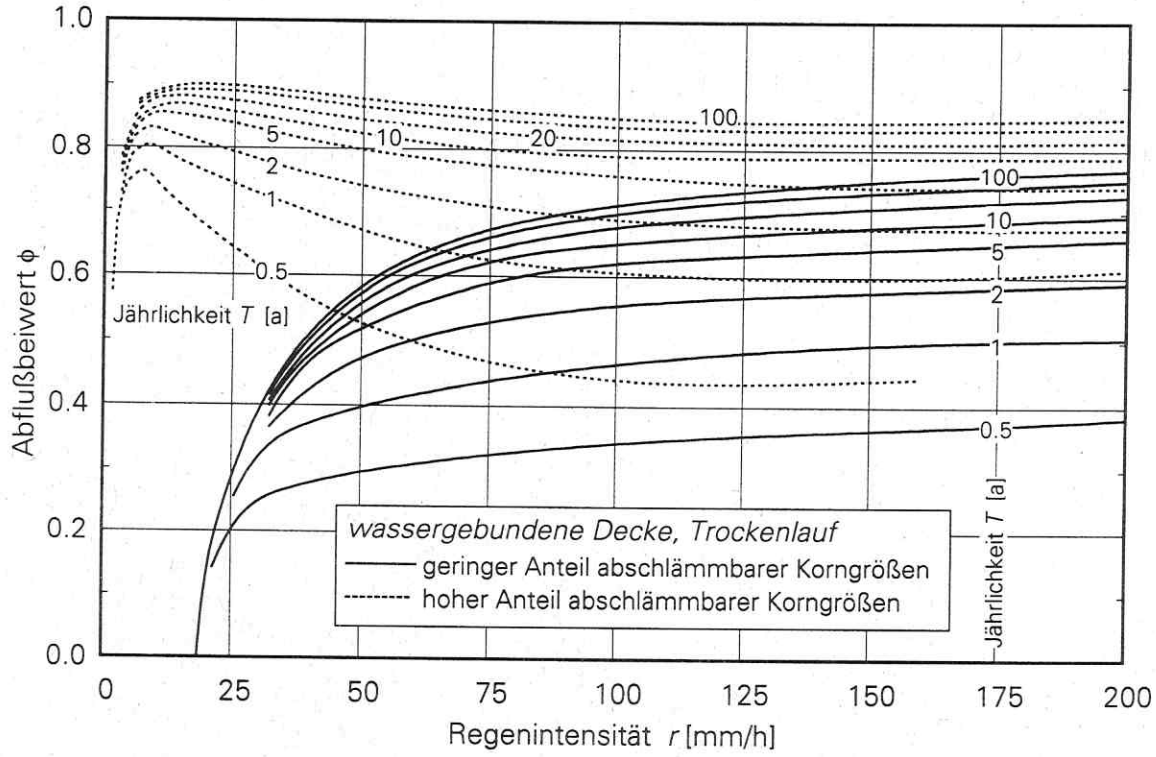


Abb. 19: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Trockenlauf) in Abhängigkeit der Intensität r und der Jährlichkeit T

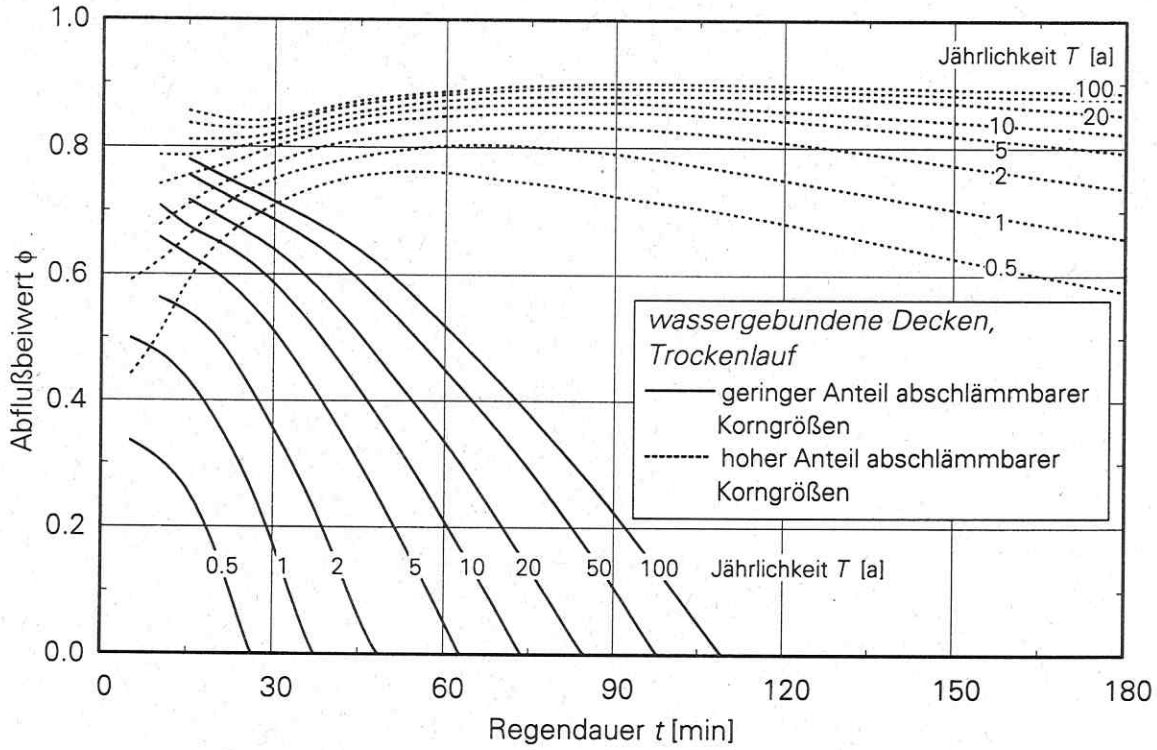


Abb. 20: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Trockenlauf) in Abhängigkeit der Regendauer t und der Jährlichkeit T

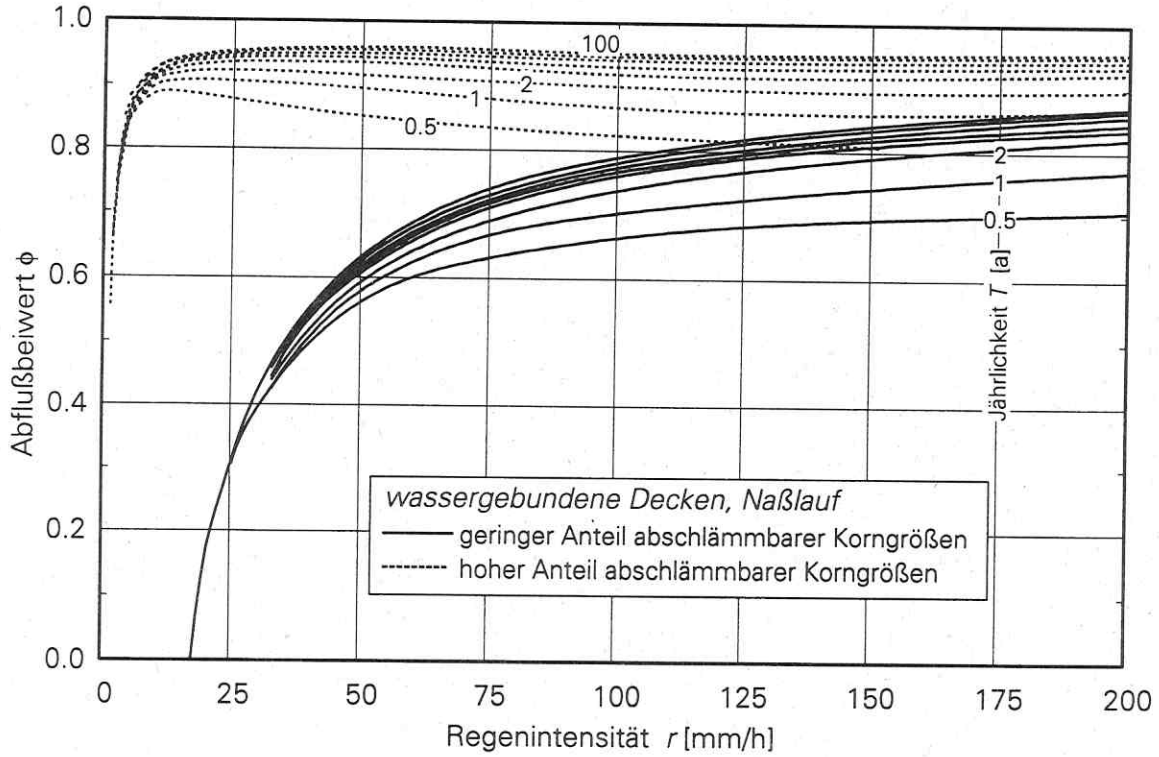


Abb. 21: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Naßlauf) in Abhängigkeit der Intensität r und der Jährlichkeit T

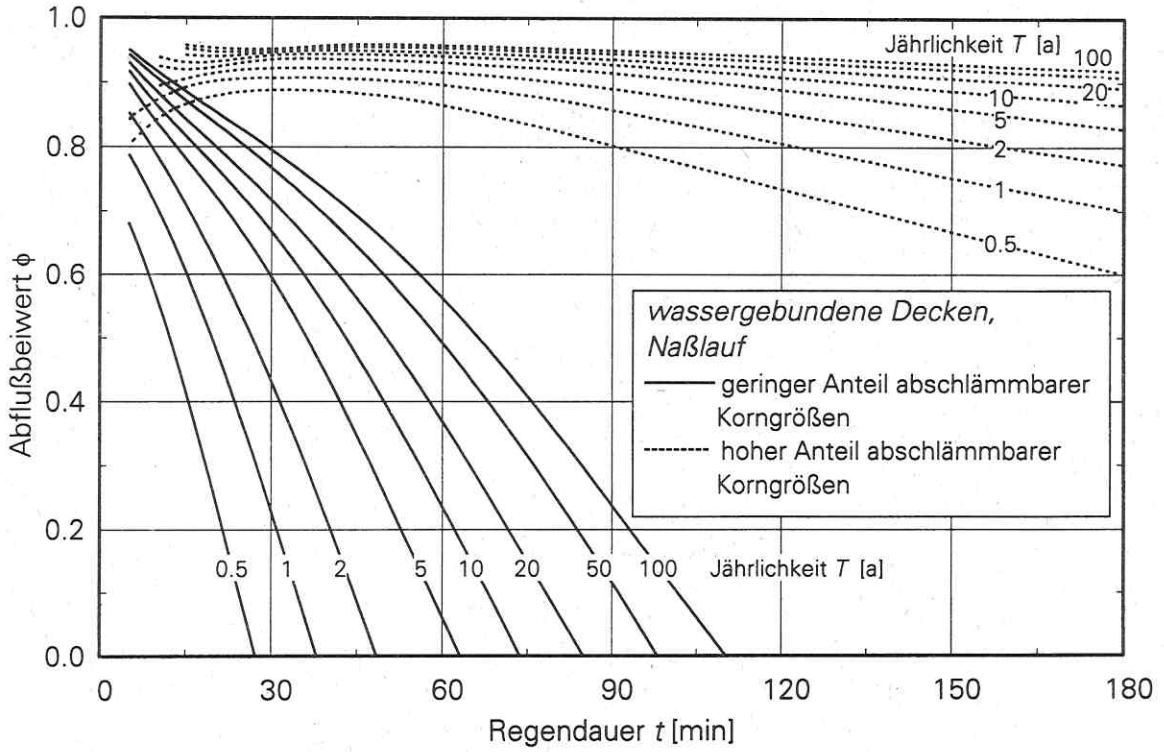


Abb. 22: Gesamtabflußbeiwert ϕ bei wassergebundenen Decken (Naßlauf) in Abhängigkeit der Regendauer t und der Jährlichkeit T

Anteil abschlämmbarer Korngrößen gering ist, wird der Flächenrückhalt nur durch den konstanten Anfangsrückhalt *AR* bestimmt. Mit abnehmender Intensität nimmt bei gleicher Jährlichkeit die Niederschlagshöhe *R* zu und wegen $\phi = 1 - AR/R$ der Ablußbeiwert ebenfalls. Bei der durchlässigeren Decke nimmt der Rückhalt mit abnehmender Intensität und der damit verbundenen längeren Regendauer um den Wert $i_E * t$ zu und damit der Abflußbeiwert ab. Bei hohen Niederschlagsdauern mit geringen Intensitäten (siehe Abbildung 20 und 22) nimmt der Abflußbeiwert bei der wassergebundenen Decke mit geringem Anteil abschlämmbarer Korngrößen wegen der hohen Endinfiltrationsrate sehr schnell ab, während bei der wenig durchlässigen Befestigung zunächst ein Anstieg aufgrund des geringen Anteils des Infiltrationsrückhaltes erfolgt. Erst bei länger andauernden Ereignissen mit geringerer Intensität bewirkt die niedrige Infiltrationsrate einen allmählichen Rückgang des Abflußbeiwerts. Da beim Naßlauf der Anfangsrückhalt wesentlich geringer ist, machen sich die hier beschriebenen Effekte weniger deutlich bemerkbar (siehe Abbildung 21 und 22).

3. Interpretation der Versuchsergebnisse

3.1 Ansatz zur rechnerische Ermittlung der Versickerungsleistung von befestigten Flächen

Bisher wurden nur Parameter berücksichtigt die aus den Beregnungsversuchen bestimmt wurden. In diesem Kapitel soll untersucht werden, ob eine Abschätzung der Infiltrationsleistung aus einfachen bodenphysikalischen Untersuchungen möglich ist. Der zeitliche Verlauf der Infiltrationsrate *i(t)* bei einem homogenen Boden wird durch die eindimensional-vertikale Bewegungsgleichung

$$i(t) = K(\Psi)\left(\frac{d\Psi}{dz} - 1\right) \qquad (3)$$

mit $i(t)$ = zeitlicher Verlauf der Infiltrationsrate [L/T]
Ψ = Saugspannung [L]
K = hydraulische Leitfähigkeit [L/T]
z = vertikale Koordinate (↑+)

beschrieben. Die Lösung dieser Differentialgleichung ist nur mit numerischen Verfahren möglich. Zur Modellierung der Wasserbewegung werden deshalb häufig Näherungsverfahren eingesetzt, die die physikalischen Prozesse vereinfacht abbilden. Ein häufig verwendeter Infiltrationsansatz ist die Beziehung nach GREEN & AMPT (1911)

$$i = \frac{k_f \, (z_{\ddot{U}} + S_f + z_f)}{z_f} \tag{4}$$

mit k_f = gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [L/T]
$z_{\ddot{U}}$ = Höhe der überstauenden Wasserschicht [L]
z_f = Eindringtiefe der Feuchtefront [L]
S_f = effektive Saugspannung an der Feuchtefront [L]

Diesem Ansatz liegen die im folgenden aufgeführten Annahmen zugrunde. Das infiltrierte Wasser dringt kolbenförmig in den Boden ein. Die Feuchtefront ist eine scharfe Abgrenzung, die den Wassergehalt des unterhalb liegenden Bodens θ_i vom oberhalb liegenden wassergesättigten Boden mit einem Wassergehalt θ_S abtrennt. Die Feuchtefront ist bis zu einer Tiefe z_f in der Zeit t nach Infiltrationsbeginn in den Boden eingedrungen. Mit der Vereinfachung $z_{\ddot{U}} \cong 0$ ergibt sich

$$i = k_f \left(\frac{S_f}{z_f} + 1 \right) \tag{5}$$

Wegen $f = \frac{dF}{dt}$ und der Beziehung $z_f = \frac{F}{\Delta\theta}$ erhält man durch Integration

$$F(t) = k_f t + S_f \Delta\theta \ln\left(1 + \frac{F(t)}{S_f \Delta\theta} \right) \tag{6}$$

mit $F(t)$ = infiltriertes Wasservolumen pro Fläche [L]
$\Delta\theta = \theta_S - \theta_i$
θ_S = Wassergehalt bei Sättigung [–]
θ_i = Anfangswassergehalt [–]

$F(t)$ kann mit Gleichung (6) iterativ gelöst und z_f in Gleichung (5) eingesetzt werden. Gleichung (6) enthält Variablen, die entweder direkt gemessen werden können (θ) oder über Schätzverfahren aus bekannten Größen (Korngrößenverteilung, Gehalt an organischer Substanz) abgeleitet werden können (k_f , S_f). Die effektive Saugspannung an der Feuchtefront wird üblicherweise nach einem Ansatz von MEIN & LARSON (1973) bestimmt oder aus Tabellen in Abhängigkeit der Bodenart entnommen (z. B. in RAWLS et al. 1983). Eine genaue Beschreibung der Verfahren kann der Fachliteratur entnommen werden.

Zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit können ebenfalls tabellarische Aufstellungen herangezogen werden, bei denen der k_f-Wert meist in Abhängigkeit der Bodenart angegeben

wird. Aus den zahlreichen empirischen Ansätzen zur Bestimmung von k_f aus der Kornverteilung sollen hier zwei Verfahren vorgestellt und die Rechenergebnisse mit den Versuchsergebnissen verglichen werden. BEYER (1964) entwickelte eine Methode, die die Berechnung der hydraulischen Leifähigkeit in Abhängigkeit eines charakteristischen Korndurchmessers und des Porengehalts erlaubt. Die Anpassung an Meßdaten führte zu folgender Beziehung:

$$k_f = 3.6\, C\, d_{10}^2 \quad \left[\frac{mm}{h}\right] \tag{7}$$

mit $C = 0.12\, U^{-0.206}$

$U = d_{60}/d_{10} = 1.0....20.0$

$d_{10} = 0.06....0.6$ mm

Da die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in erster Linie von der Lagerungsdichte und der Bodentextur abhängt, konnte CAMPELL (1985) folgende Näherungsformel ableiten:

$$k_f = 4 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1.3}{LD}\right)^{1.3b} \exp(-0.069T - 0.037U)\, \frac{g}{\rho_W} \quad \left[\frac{mm}{h}\right] \tag{8}$$

mit LD = Lagerungsdichte [kg/m^3]

T = Tongehalt [kg/kg]

U = Schluffgehalt [kg/kg]

g = Erdbeschleunigung [m/s^2]

ρ_W = Dichte von Wasser [kg/m^3]

Der Exponent b berücksichtigt indirekt die Ungleichförmigkeit über die Standardabweichung der Partikeldurchmesser σ_P vom mittleren Durchmesser d_{50}:

$$b = \frac{1}{\sqrt{d_{50}}} + 0.2\, \sigma_P \tag{9}$$

Mit Hilfe der Gleichungen (7) und (8) wurden die k_f-Werte für das Fugenmaterial und die Tragschichten berechnet, sofern Proben genommen wurden. Ein Vergleich der berechneten mit den aus Labor- und Beregnungsversuchen bestimmten k_f-Werte kann anhand der Abbildung 23 durchgeführt werden. Man erkennt zunächst, daß alle gemessenen Endinfiltrationsraten i_E größer als die gemessenen hydraulischen Leitfähigkeitswerte k_f der Tragschichten sind. Das bedeutet, daß der zeitliche Infiltrationsverlauf durch die Eigenschaften des Fugenmaterials und nicht der Tragschichten bestimmt wird. Betrachtet man die Endinfiltrationsraten, so fällt auf, daß die Be-

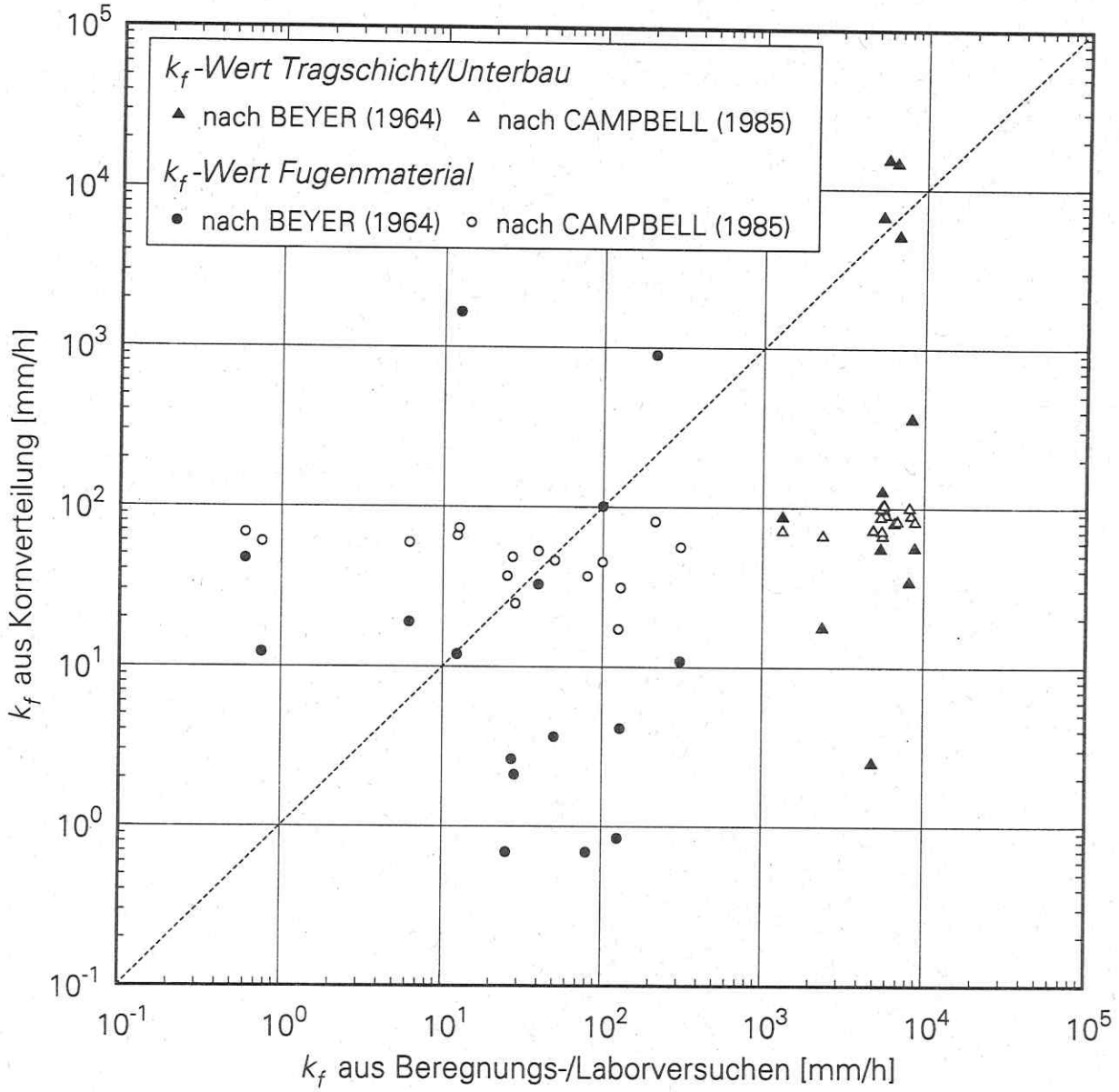


Abb. 23: Vergleich der hydraulischen Leitfähigkeit k_f aus Beregnungs- und Laborversuchen mit den berechneten Werten nach BEYER (1964) und CAMPBELL (1985)

rechnungsergebnisse nach Gleichung (8) nur im Bereich von 10 - 100 mm/h liegen, während die Meßergebnisse den Bereich von 1 - 500 mm/h abdecken. Wesentlich größer ist die Streuung der Ergebnisse nach Gleichung (7). Hiermit ergeben sich für wassergebundene Decken insgesamt zu hohe Werte (bis zu 300-fach) und für fast alle Beläge zu geringe Werte (bis zu 200-fach). Gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung ergeben sich nur bei Betongehwegplatten (Baumuster 11), Kopfsteinpflaster (Baumuster 13) und Mosaikpflaster (Baumuster 14). Die Überschätzung der Leitfähigkeiten der wassergebundenen Decken rührt vermutlich daher, daß die Berechnungsansätze, die für natürlich gelagerte Böden entwickelt wurden, die spezielle Struktur der Deck- und Tragschichten nicht berücksichtigen können. Durch den nassen Einbau

des Materials und die hohe Verdichtung werden Aggregate zerstört, die Feinanteile in das Gefüge eingeschlämmt und dadurch die Versickerungsleistung beeinträchtigt. Zu geringe Berechnungswerte bei den Pflasterbelägen lassen sich vor allem durch die Nichtberücksichtigung von Makroporen oder bevorzugter Fließbahnen zwischen Fugenmaterial und Steinflanken erklären. Bei den k_f-Werten des Unterbaus läßt sich feststellen, daß sich mit den Berechnungsansätzen in der Regel zu niedrige Werte ergeben, die außerdem, wie bei Gleichung (7), über einen weiten Bereich streuen. Bei den Berechnungswerten nach Gleichung (8) entspricht die Bandbreite der Werte zwar der der Messungen, jedoch bei 100 bis 200-fach geringeren Werten. Abschließend läßt sich feststellen, daß sich das Infiltrationsverhalten wegen der Komplexität der Prozesse nur ungenügend vohersagen läßt und für eine zuverlässige Modellierung weitergehende Untersuchungen notwendig sind.

3.2 Bewertung der Baumuster

Aus dem zeitlichen Verlauf der Infiltrationsrate lassen sich verschiedene Parameter zur Bewertung der untersuchten Baumuster ableiten. Zur Bestimmung dieser Parameter wurden die in Kapitel 2.4 beschriebenen an die Meßwerte angepaßten Exponentialfunktionen herangezogen. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle 5 zusammengestellt und werden im folgenden kurz erläutert.

Der Abflußbeginn t_A wurde während der Versuche durch Beobachtung bestimmt. Der Kurvenverlauf der Näherungsfunktionen wurde auf diesen Wert abgestimmt. Die Niederschlagsintensität r und die Beregnungsdauer T sind Eingangsgrößen. Die Gesamtinfiltration I ergibt sich aus der Differenz zwischen dem aufgebrachten Niederschlag R und dem Gesamtabflußvolumen V_Q.

Ein Bewertungskriterium für Flächenbefestigungen ist der Anfangsrückhalt AR. Er ergibt sich aus dem Produkt von Regenintensität r und dem Abflußbeginn t_A:

$$AR = r * t_A \qquad [L]$$

Der Anfangsrückhalt ist die Summe von Muldenrückhalt und Anfangsinfiltration. Er hängt vom Anfangswassergehalt des Bett- und Fugenmaterials ab und ist somit kein zeitlich konstanter Wert. Der Anfangsrückhalt ist bei allen Belägen sehr klein (wenige Millimeter). Besonders geringe Werte weisen die gealterten Beläge (Mosaikpflaster, Natursteinplatten, Betonplatten) auf. Hohe Werte ergeben sich naturgemäß bei den Belägen, bei denen kein oder nur ein geringer Oberflächenabfluß auftrat. Die Alterungseffekte konnten bei diesen relativ neuen Belägen allerdings nicht erfaßt werden.

Baumuster/ Versuch	Deckschicht	Abflußbeginn t_A [min]	Intensität r [mm/h]	Versuchsdauer T [min]	Gesamtinfiltration I [mm]	Gesamtregen R [mm]	Infiltrationsverhältnis I/R [–]	Anfangsrückhalt AR [mm]	Endinfiltrationsrate i_E [mm/h]	Endinfiltrationsrate i_E [l/(s*ha)]	Muldenrückhalt MR [mm]
neue Flächenbefestigungen											
1.1	Betonverbundpflaster, sandverfugt	2.2	34.5	60.0	12.1	34.5	0.35	1.3	11.6	32.1	
1.2		1.4	70.0	30.0	5.6	35.0	0.16	1.7	10.9	30.1	1.4
2.1	Rasengittersteine	0.0	29.5	60.0	29.5	29.5	1.00	29.5	kein Abfluß		
2.2		24.6	61.5	65.0	33.8	66.6	0.51	25.2	–	–	–
3.1	Rasengittersteine	7.9	32.5	61.0	9.9	33.0	0.30	4.3	7.9	22.0	
3.2		3.0	66.0	30.0	4.2	33.0	0.13	3.2	7.9	21.8	2.9
4.1	Verbundpflaster, nicht verfugt	0.0	31.5	60.0	31.5	31.5	1.00	31.5	kein Abfluß		
4.2		0.0	72.5	30.0	36.0	36.2	0.99	36.0	71.8	199.4	–
5.1	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	0.0	32.0	60.0	32.0	32.0	1.00	32.0	kein Abfluß		
5.2		0.0	67.5	50.0	56.3	56.3	1.00	56.3	kein Abfluß		
6.1	Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen	12.8	34.5	60.0	12.0	34.5	0.35	7.3	11.2	31.1	
6.2		1.5	67.0	30.0	7.6	33.5	0.23	1.7	11.2	31.1	1.4
7.1	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	2.8	32.5	60.0	7.7	32.5	0.24	1.5	5.6	15.7	
7.2		1.4	69.5	30.0	3.3	34.8	0.09	1.7	5.9	16.3	1.5
8.1	Betonsteinpflaster mit Rasenfugen	5.9	32.5	21.7	60.0	32.5	0.67	3.2	20.0	55.6	
8.2		1.9	68.0	10.7	30.0	34.0	0.31	2.2	18.3	50.9	1.5
9.1	kunstharzgebundene Decke	0.0	32.5	60.0	32.5	32.5	1.00	32.5	kein Abfluß		
9.2		1.3	74.5	30.0	22.7	37.3	0.61	1.7	45.9	127.5	–
gealterte Flächenbefestigungen											
10.1	Großformatplatten	3.3	34.0	60.0	6.0	34.0	0.18	1.9	4.9	13.6	
10.2		0.8	69.0	30.0	3.3	34.5	0.10	0.9	5.4	15.0	0.9
11.1	Betongehwegplatten	3.0	35.0	61.0	5.5	35.6	0.15	1.7	5.5	15.3	
11.2		1.5	71.0	30.0	2.7	35.5	0.08	1.7	4.8	13.4	1.6

Tab. 5: Zusammenstellung wichtiger Ergebnisse der Beregnungsversuche

Baumuster/ Versuch	Deckschicht	Abflußbeginn t_A [min]	Intensität r [mm/h]	Versuchsdauer T [min]	Gesamtinfiltration I [mm]	Gesamtregen R [mm]	Infiltrationsverhältnis I/R [–]	Anfangsrückhalt AR [mm]	Endinfiltrationsrate i_E [mm/h]	Endinfiltrationsrate i_E [l/(s*ha)]	Muldenrückhalt MR [mm]
gealterte Flächenbefestigungen											
12.1	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	7.6	35.0	24.0	2.9	14.0	0.21	4.4	9.5	26.5	
12.2		2.1	69.0	36.0	6.2	41.4	0.15	2.5	10.2	28.3	2.1
13.1	Kopfsteinpflaster, sandverfugt	3.8	32.5	60.0	4.8	32.5	0.15	2.1	3.8	10.4	
13.2		2.4	71.0	30.0	2.6	35.5	0.07	2.8	4.9	13.6	2.7
14.1	Mosaikpflaster	2.9	34.0	60.0	4.2	34.0	0.12	1.6	3.5	9.7	
14.2		1.4	68.0	30.0	2.0	34.0	0.06	1.5	3.0	8.3	1.5
15.1	Mosaikpflaster	3.0	36.0	60.0	6.3	36.0	0.18	1.8	6.1	16.9	
15.2		1.5	69.0	30.0	3.4	34.5	0.10	1.7	6.2	17.1	1.5
16.1	Natursteinplatten (Granit)	1.9	33.5	60.0	4.1	33.5	0.12	1.1	3.0	8.3	
16.2		1.0	71.0	30.0	1.7	35.5	0.05	1.1	3.0	8.4	1.1
wassergebundene Decken											
17.1	wassergebundene Decke	6.0	26.0	56.0	7.1	24.3	0.29	2.6	6.2	17.2	–
18.1	wassergebundene Decke	4.7	34.5	60.0	9.2	34.5	0.27	2.7	8.4	23.2	
18.2		2.4	71.0	30.0	4.4	35.5	0.12	2.8	8.3	23.1	2.5
19.1	wassergebundene Decke	4.3	35.0	60.0	3.0	35.0	0.08	2.5	1.0	2.6	
19.2		1.0	71.0	30.0	1.5	35.5	0.04	1.1	0.6	1.7	1.1
20.1	wassergebundene Decke	3.5	36.0	60.0	1.6	36.0	0.05	2.1	0.9	2.6	
20.2		0.4	73.5	30.0	1.1	36.8	0.03	0.5	0.6	1.6	0.5
21.1	wassergebundene Decke mit Deckschicht aus Feinkies	5.8	33.5	60.0	14.1	33.5	0.42	3.2	12.5	34.7	
21.2		1.3	70.0	30.0	7.2	35.0	0.20	1.6	12.8	35.6	1.3

Tab. 5 (Forts.): Zusammenstellung wichtiger Ergebnisse der Beregnungsversuche

Der Muldenrückhalt MR läßt sich bestimmen, wenn beim ersten Beregnungsversuch eine Endinfiltrationsrate i_{E1} erreicht wurde. Der Muldenrückhalt ist dann der Anfangsrückhalt AR_2 des Naßlaufs abzüglich des bis zum Abflußbeginn t_{A2} versickerten Niederschlags:

$$MR = AR_2 - i_{E1} * t_{A2} \qquad [L]$$

Wie man aus der Aufstellung in der Tabelle 5 sehen kann, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Belagarten nur gering. Die Großformatplatten (Baumuster 10), die Natursteinplatten (Baumuster 16) und die wassergebundenen Decken (Baumuster 19 und 20) weisen die niedrigsten Werte auf.

Ein Vergleich des Versickerungspotentials der untersuchten Flächenbefestigungen kann anhand von hydraulisch-physikalischen Parametern oder anhand von Simulationsrechnungen für verschiedene Modellregen durchgeführt werden. Das Infiltrationsverhalten kann beispielsweise über den Abflußbeginn t_A und die Endinfiltrationsrate i_E charakterisiert werden. Der Abflußbeginn ist der Zeitpunkt, bei dem bei einem vorgegebenen Regenereignis die Rückhaltewirkung der Fläche erschöpft ist und Oberflächenabfluß entsteht. Der Abflußbeginn ist ein Maß für den Anfangsverlust, der sich überwiegend aus dem Muldenverlust, dem Makroporengehalt und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ergibt. Der Abflußbeginn ist abhängig von den Anfangsbedingungen, insbesondere vom Wassergehalt der Deckschichten und des Fugenmaterials bei Regenbeginn, und der Niederschlagsintensität. Die Endinfiltrationsrate i_E kennzeichnet die Versickerungseigenschaften der Flächenbefestigungen unabhängig von den Anfangsbedingungen. Theoretisch entspricht die auf den versickerungswirksamen Flächenanteil bezogene Endinfiltrationsrate der hydraulischen Leitfähigkeit bei Wassersättigung k_f.

In Abbildung 24 sind die durch die Beregnungsversuche bestimmten Werte für den Abflußbeginn und die mittlere Endinfiltrationsrate zusammengefaßt. Wie zu erwarten, setzt der Oberflächenabfluß bei allen Belägen beim Naßlauf früher als beim Trockenlauf ein. Die Unterschiede sind bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen jedoch gering. Bei den wassergebundenen Decken, deren Deckschichten über ein größeres Grobporenvolumen verfügen, ist der Unterschied größer, da zu Beginn des Naßlaufs die Makroporen nicht vollständig entleert waren. Wie bereits ausgeführt, ist der Anfangsrückhalt bei Baumuster 6 nicht auf die Rückhaltewirkung der Sickeröffnungen, sondern auf die des Füllmaterials zurückzuführen, weshalb der Oberflächenabfluß bei feuchten Anfangsbedingungen wesentlich schneller einsetzt als bei trockenen. Hinsichtlich der Endinfiltrationsraten bestehen im Mittel kaum Unterschiede zwischen gealterten Pflaster- und Plattenbelägen und wassergebundenen Decken. Die Endraten bei den nicht fachgerecht ausgeführten versickerungsaktiven Pflastersystemen (Baumuster 3, 6, 7) sind sogar niedriger als die bei neuem Betonverbundpflaster (Baumuster 1).

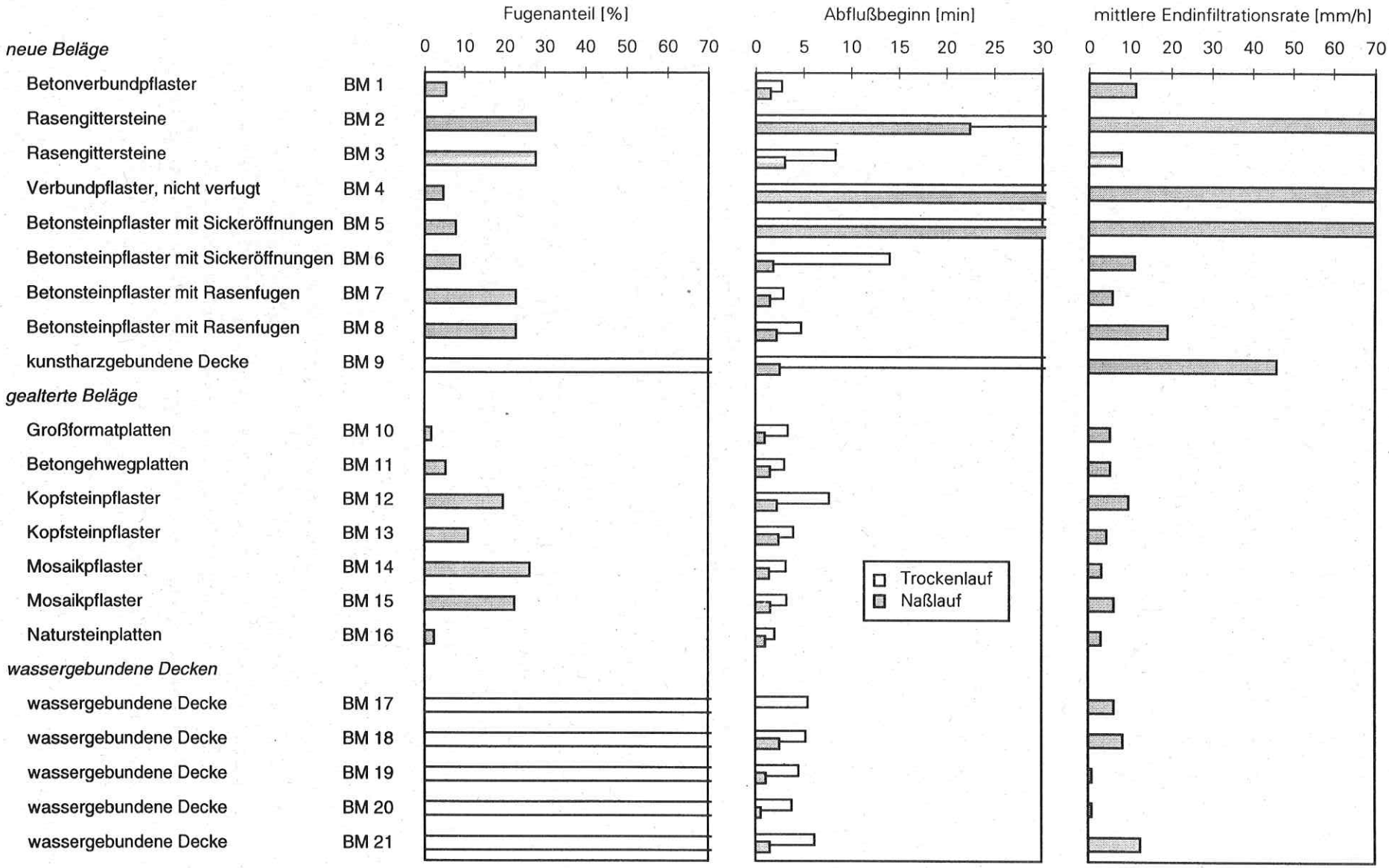


Abb. 24: Vergleich von Fugenanteil, Abflußbeginn t_A und mittlerer Endinfiltrationsrate i_E der untersuchten Flächenbefestigungen

In Abbildung 24 ist zusätzlich als einfach zu bestimmende Größe zur Charakterisierung des Versickerungspotentials der Fugenanteil der untersuchten Flächenbefestigungen eingetragen. Man erkennt jedoch, daß kein signifikanter Zusammenhang zwischen Fugenanteil und Rückhaltewirkung bzw. Endinfiltrationsrate besteht. Ein Zusammenhang kann zwar bei neuverlegtem Pflaster erwartet werden, jedoch wird aufgrund der Alterung der Einfluß des Fugenanteils durch die Veränderung des Füllmaterials weniger signifikant.

Die Gesamtinfiltration in Prozent der Gesamtregenmenge ist für verschiedene Intensitätsstufen in Abbildung 25 dargestellt. Für die Simulationsrechnung wurde eine einheitliche Regendauer von 30 min und eine niedrige, mittlere und hohe Intensitätsstufe (r = 10 / 30 / 60 mm/h) angenommen. Für das Untersuchungsgebiet haben die Modellniederschläge Jährlichkeiten von < 0,5 bei der niedrigen Intensitätsstufe, 5 bei der mittleren und 30 bei der hohen.

Bei der niedrigen Intensität infiltriert bei den versickerungsfreundlichen Pflastersystemen und dem neuen Verbundpflaster sowohl bei geringen als auch bei hohen Anfangswassergehalten der Gesamtniederschlag nahezu vollständig. Bei den gealterten Belägen hingegen führt bereits die niedrige Intensität zu einer Abflußbildung. Es besteht nur eine geringe Differenz zwischen trockenen und feuchten Anfangsbedingungen. Sehr unterschiedlich ist das Ergebnis bei den wassergebundenen Decken sowohl zwischen den einzelnen Baumustern als auch zwischen Trocken- und Naßlauf. Nur bei bestimmten Korngrößenzusammensetzungen verfügen die wassergebundenen Decken über eine Versickerungsleistung, die höher als die gealterter Beläge ist.

Bei der Intensitätsstufe r = 30 mm/h können nur die Belagstypen Rasengittersteine, Betonverbundpflaster mit Sickeröffnungen und kunstharzgebundene Decke den Gesamtniederschlag zurückhalten. Bei den nicht fachgerecht ausgeführten versickerungsfreundlichen Pflastersystemen (Baumuster 3, 6, 7) kann im ungünstigsten Fall nur 30 % der Niederschlagsmenge versickern. In diesem Bereich liegt auch die Versickerungsleistung der gealterten Platten- und Pflasterbeläge.

In Abbildung 25 ist als Extremfall die Gesamtinfiltration bei einer Intensität von r = 60 mm/h und feuchten Anfangsbedingungen dargestellt. Selbst bei diesen Extrembedingungen versickert bei Rasengittersteinen mit hoher Bewuchsdichte und Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen der gesamte Niederschlag. Bei der kunstharzgebundenen Decke werden noch ca. 80 % zurückgehalten. Bei allen anderen untersuchten Flächenbefestigungen, mit Ausnahme von Baumuster 8, liegt die Gesamtinfiltration unter 30%.

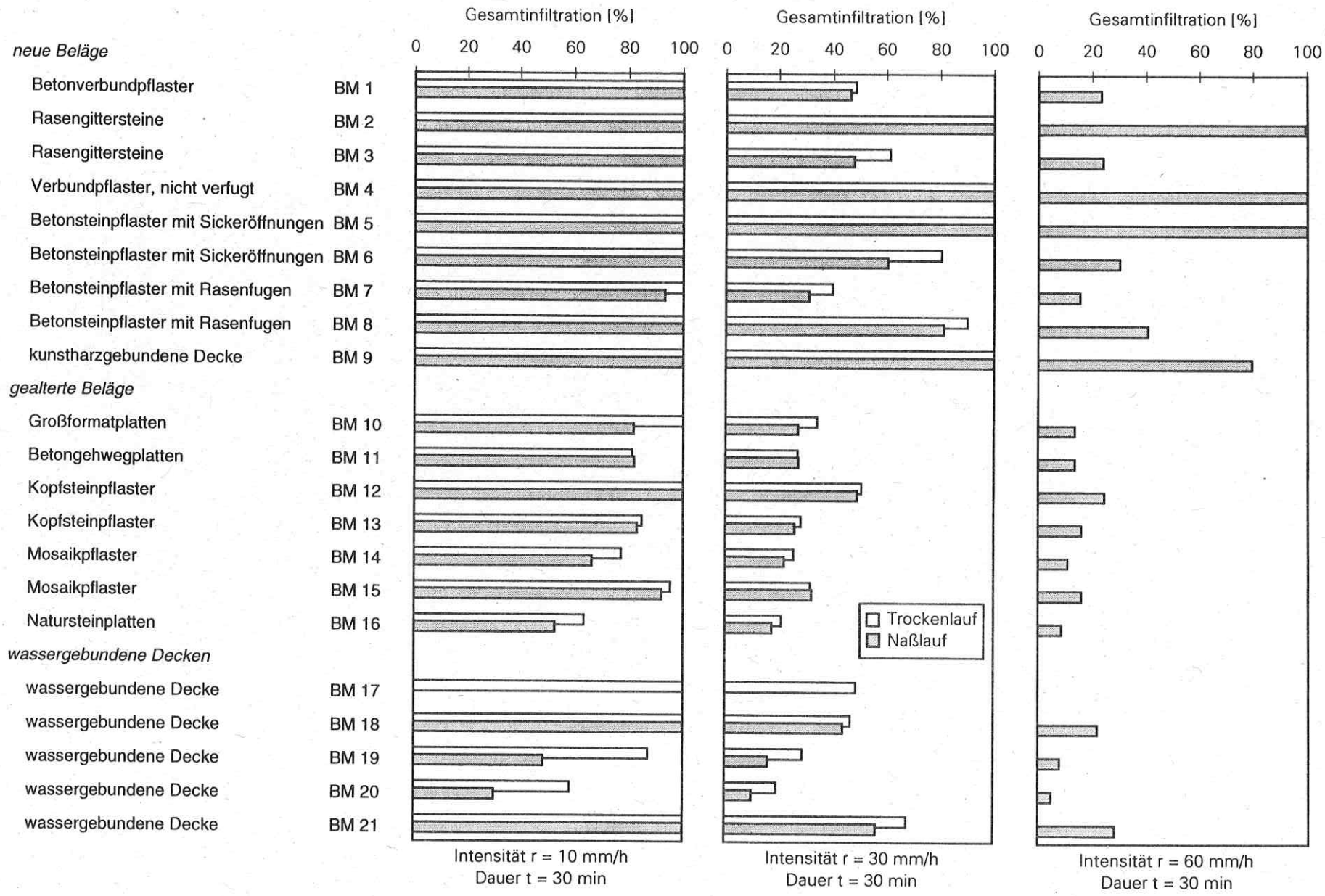


Abb. 25: Vergleich der Simulationsergebnisse für die Gesamtinfiltration bei verschiedenen Starkregenereignissen

Zusammenfassung

Im Rahmen eines vom Umweltforschungszentrum Leipzig–Halle GmbH durchgeführten Forschungsvorhabens zur Bodenversiegelung wurden die hydraulisch-physikalischen Eigenschaften von neuen und gealterten Flächenbefestigungen ermittelt. Dazu wurden im Stadtgebiet von Leipzig 19 typische Baumuster ausgewählt, ergänzt um je eine Fläche in Merschwitz/Elbe und Dresden. Zu den erfaßten Belagstypen zählen neue und gealterte Pflasterbeläge, wassergebundene Decken, Rasengittersteine und versickerungsfreundliche Pflastersysteme.

Eine Typisierung von Oberflächenbefestigungen hinsichtlich ihrer hydrologischen Eigenschaften ist durch einfach zu bestimmende Parameter wie z. B. Fugenanteil oder Korngrößenverteilung meist nicht möglich. Kenngrößen zur Charakterisierung von Versickerungseigenschaften befestigter Flächen müssen deshalb aus Feld- oder Laborversuchen abgeleitet werden. Untersuchungen an bestehenden Belägen haben gegenüber Laborversuchen den Vorteil, daß Alterungsprozesse wie Setzungen und der Eintrag von mineralischen und organischen Feinanteilen erfaßt werden können. Zur Bestimmung des Versickerungsverhaltens der Deckschichten wurden Beregnungsversuche durchgeführt. Die natürlichen Infiltrationsprozesse werden durch den simulierten Niederschlag besser nachgebildet als bei den üblicherweise angewendeten überstauenden Verfahren, bei denen zum einen ein höheres hydraulisches Gefälle erzeugt wird, zum anderen bevorzugte Fließwege wie Makroporen und Grenzflächen zwischen Fugenmaterial und Platten stärker zur Gesamtinfiltration beitragen. Die hohe zeitliche Auflösung der Datenerfassung ermöglichte die Ermittlung der zeitlichen Entwicklung des Infiltrationsverlaufs. Daraus konnte der zeitliche Verlauf des Abflußbeiwerts für verschiedene Intensitätsstufen abgeleitet werden.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß durch Auswahl geeigneter Bauweisen auch auf befestigten Flächen hohe Versickerungsraten erzielt werden können. Die Versickerungsleistung konventioneller Platten- und Pflasterbeläge wird durch Alterungsprozesse deutlich verringert. Nur so läßt sich zum Beispiel die geringe Endinfiltrationsrate von Mosaikpflaster erklären, das immerhin einen Fugenanteil von etwa 25 % aufweist. Bei Endinfiltrationsraten von deutlich unter 10 mm/h führen auch Niederschlagsereignisse mit geringer Intensität bei gealterten Pflaster- und Plattenbelägen zu einer Abflußbildung. Die niedrigsten Endinfiltrationsraten der Versuchsreihe wurden bei zwei wassergebundenen Decken gemessen. Dies bestätigt die Ergebnisse anderer Untersuchungen (BORGWARDT 1994, BINNEWIES & SCHÜTZ 1985). Die Versickerungsleistung wassergebundener Decken hängt stark von der Kornverteilung in den Deck- und Tragschichten ab. Bei hohem Sand-/Skelettanteil und geringem Anteil abschlämmbarer Korngrößen sind wassergebundene Decken mit konventionellen Pflaster- und Plattenbelägen vergleichbar.

Die höchsten Endraten wurden bei Rasengittersteinen mit geringer Verkehrsbelastung, Rasenfugenpflaster mit hoher Bewuchsdichte, Betonpflaster mit Sickeröffnungen, die mit Feinkies verfüllt sind, und bei einer kunstharzgebundenen Sanddecke gemessen. Versickerungsfreundliche Pflastersysteme müssen fachgerecht ausgeführt werden, um die erwartete Versickerungsleistung zu erreichen. Bei Einsaat muß darauf geachtet werden, daß ein ausreichender Bewuchs besteht, bevor die Fläche belastet wird. Sickeröffnungen müssen mit geeignetem Material verfüllt werden. Bei nicht fachgerechter Ausführung verlieren die versickerungsfreundlichen Pflastersysteme schnell ihre positiven Eigenschaften. Ob bei den versickerungsfreundlichen Pflastersystemen eine Verringerung der Versickerungsleistung aufgrund der Alterung eintritt, kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Man kann jedoch davon ausgehen, daß ein hoher Grünanteil bzw. ein hoher Grobporenanteil einer Verschlämmung entgegenwirkt.

5. Literatur

ATV (1990): Bau und Bemessung von Anlagen der dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser. Arbeitsblatt A138.

BEIER, H.-E. (1996): Untersuchung durchlässiger Pflastersteinsysteme – Versuchsaufbau und erste Ergebnisse eines Forschungsvorhabens der FH Osnabrück. Tagungsband zum FLL-Symp. „Entsiegelung und Oberflächenwasserversickerung mit durchlässigen Platten- und Pflasterbelägen" am 30. Nov. 1995 in Pforzheim.

BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. Wasserwirtschaft–Wassertechnik 14, H. 6, 165-168.

BINNEWIES, W., M. SCHÜTZ (1985): Gutachten über das Versickerungsverhalten hamburger Gehwegbefestigungen. Auftraggeber: Baubehörde – Tiefbauamt, Hauptabteilung Stadtverkehr, unveröff.

BORGWARTH, S. (1993): Versickerung auf durchlässig befestigten Oberflächen. Wasser und Boden 45(1), 38-41.

BORGWARTH, S. (1994): Zur "Umweltfreundlichkeit" von Oberflächenbefestigungen – Vergleich der Wasserdurchlässigkeit von Pflasterbelägen und wassergebundener Bauweise. Das Gartenamt 4/94, 244-249.

BORGWARTH, S. (1995): Die Versickerung auf Pflasterflächen als Methode der Entwässerung von minderbelasteten Verkehrsflächen. Beiträge zur räumlichen Planung, Heft 41, Inst. f. Grünplanung u. Gartenarchitektur, Universität Hannover.

BREUSTE, J., B. MÜNCHOW, M. SCHRAMM, TH. KEIDEL (1996): Beeinflussung von Bodenfunktionen durch städtische Bodenversiegelung. Sächs. Staatsministerium für Umwelt und Landesentwicklung (Hrsg.): 1. Sächsische Bodenschutztage 1995, Tagungsband.

CAMPBELL, G. S. (1985): Soil physics with BASIC. Transport models for soil - plant systems.

CARSEL, R. S., R. S. PARRISH (1988): Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, Vol. 24, 5.

GREEN, W. H., G. A. AMPT (1911): Studies of soil physics. 1–The flow of air and water through soils. J. Agric. Sci. 4, 1-24.

KOWALEWSKI, P., H. NOBIS-WICHERDING, G. SIEGERT, S. KAMBACH (1984): Entwicklung von Methoden zur Aufrechterhaltung der natürlichen Versickerung von Wasser. Berliner Wasserwerke, BMFT–Forschungsbericht T 84-274.

MEIN, R. G., C. L. LARSON (1973): Modelling infiltration during a steady rain. Water Resour. Res. 9(2).

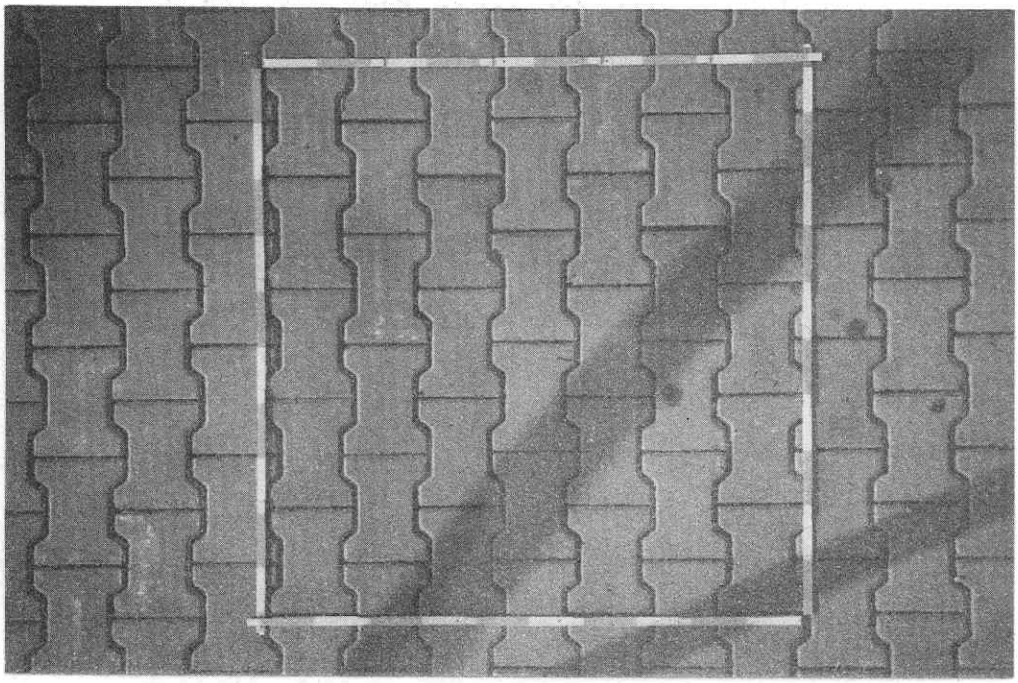
MUTH, W. (1994): Regenwasserversickerung von Verkehrsflächen. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 5/94, 28-44.

RAWLS, W. J., D. L. BRAKENSIEK, N. MILLER (1983): Green-Ampt infiltration parameters from soils data. J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 109, No. 1.

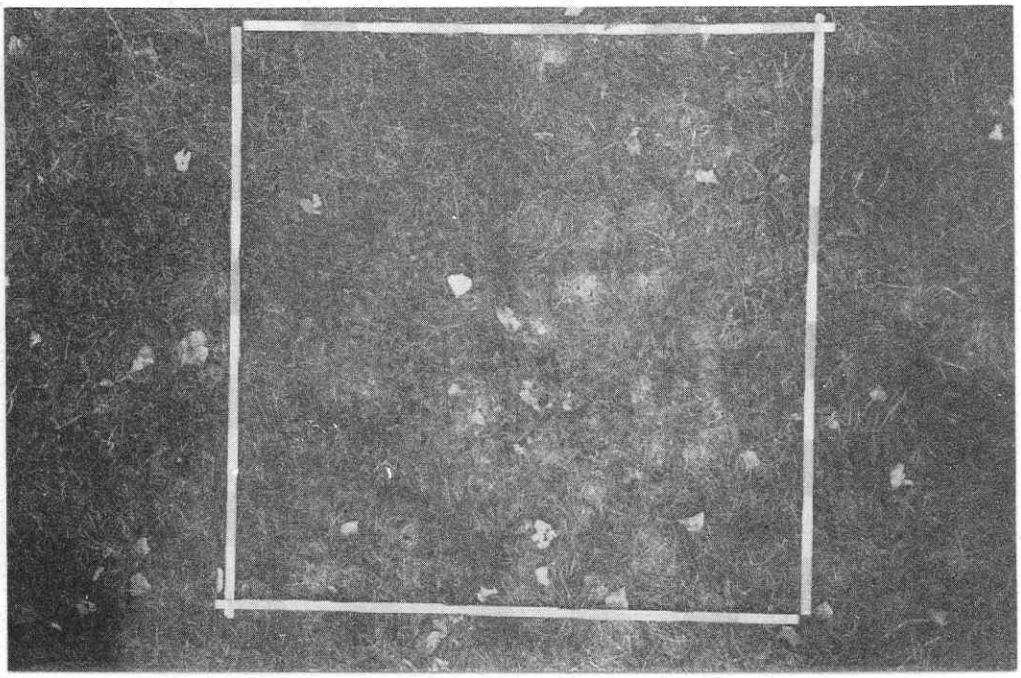
SCHIFFLER, G. R. (1992): Experimentelle Erfassung und Modellierung der Infiltration stärkerer Niederschläge unter realen Feldbedingungen. Mitt. des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 40.

SCHRAMM, M. (1994): Ein Erosionsmodell mit räumlich und zeitlich veränderlicher Rillenmorphologie. Mitt. des Instituts für Wasserbau und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe, Heft 190.

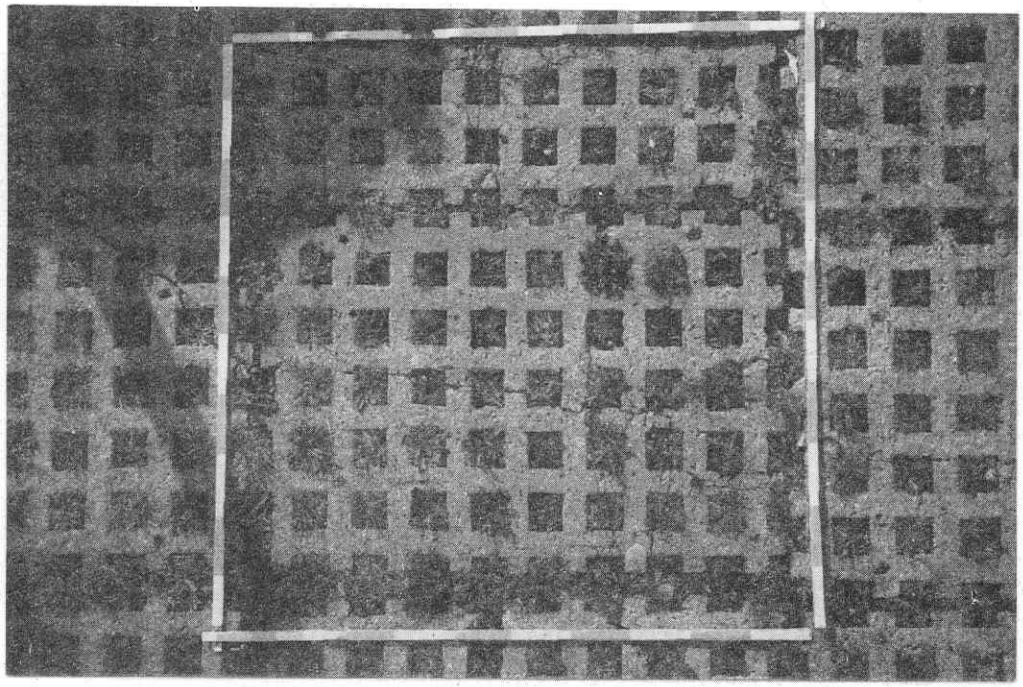
Anlage: Fotodokumentation zu den Untersuchungsstandorten



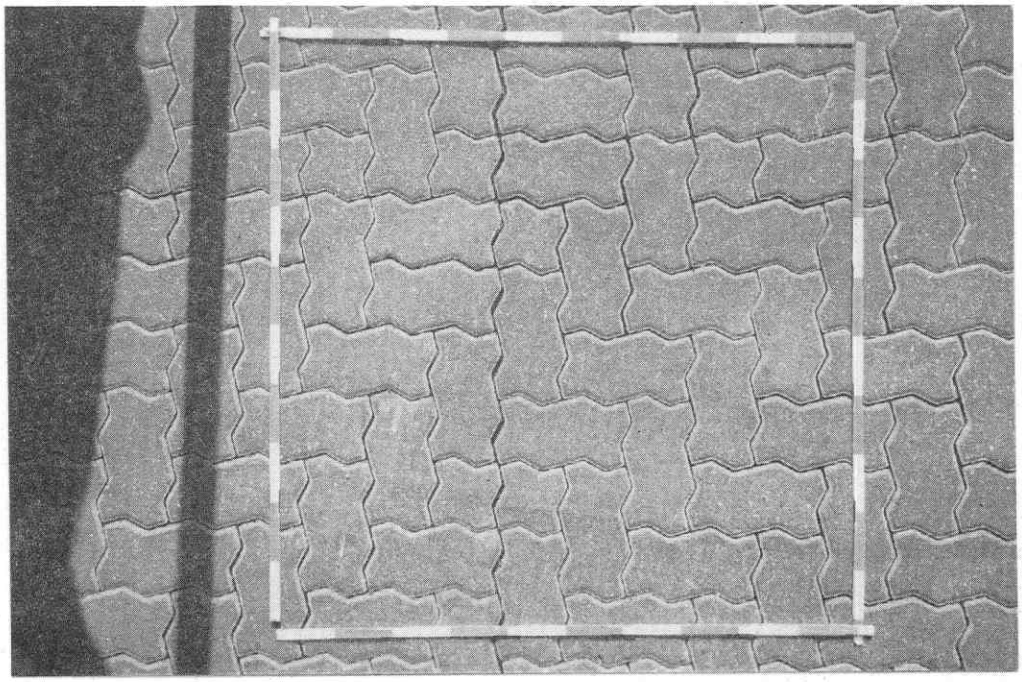
Baumuster 1: Parkplatz mit Betonverbundpflaster, sandverfugt, Herstellung 1992
Leipzig, IOM, Permoser Straße



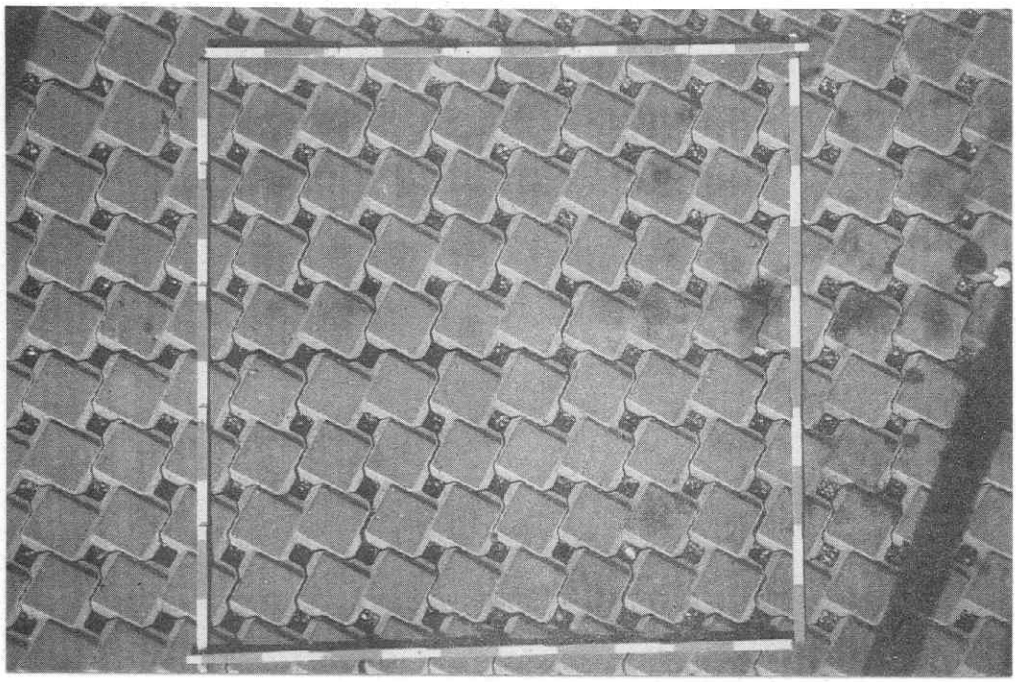
Baumuster 2: Parkplatz mit Rasengittersteinen, extensive Nutzung, Herstellung 1990/91
Leipzig, Volkspark Klein Zschocher, Antonienstraße



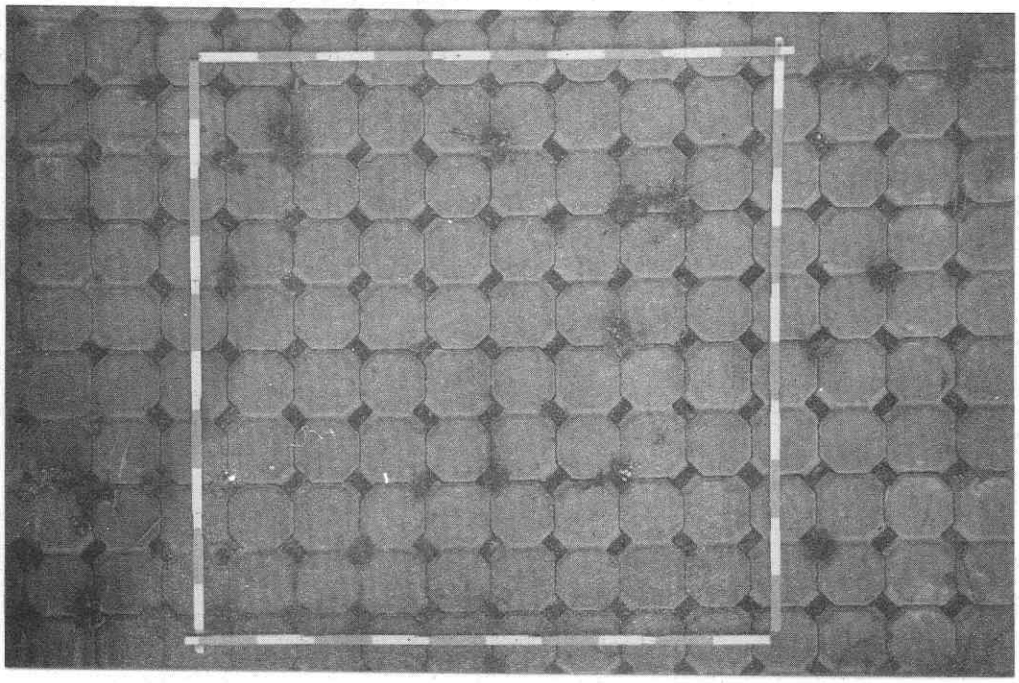
Baumuster 3: Parkplatz mit Rasengittersteinen, Herstellung 1990
Leipzig Grünau, Ringstraße



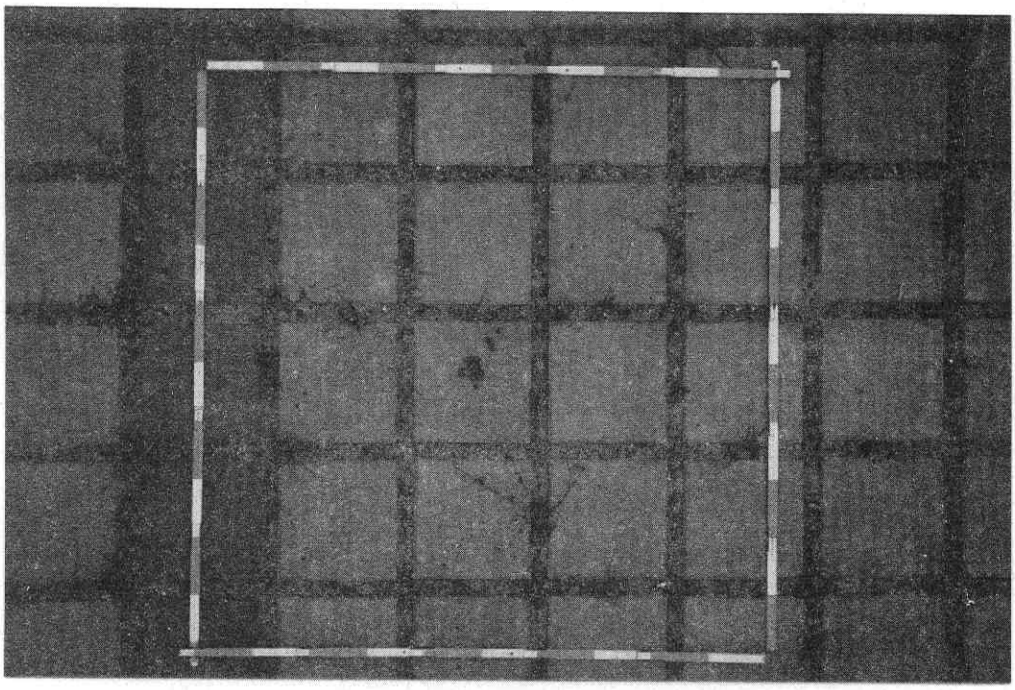
Baumuster 4: Fahrspur auf Parkplatz, Betonverbundpflaster nicht verfugt, Herstellung 1993
Leipzig, Torgauer Straße



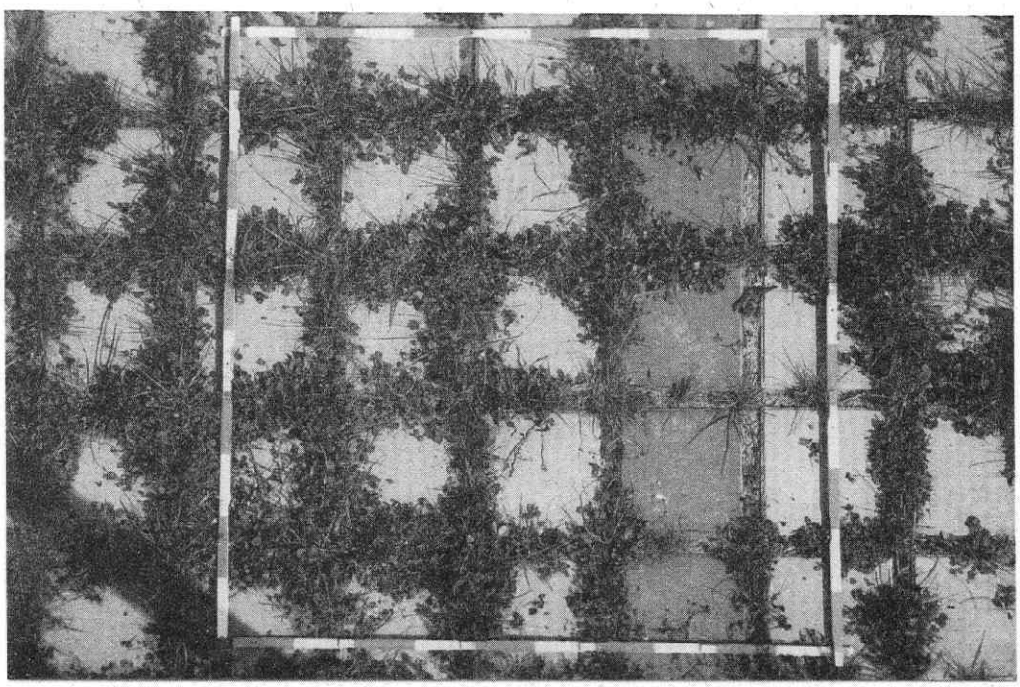
Baumuster 5: Stellplatz, Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen, Herstellung 1993
Leipzig, Torgauer Straße



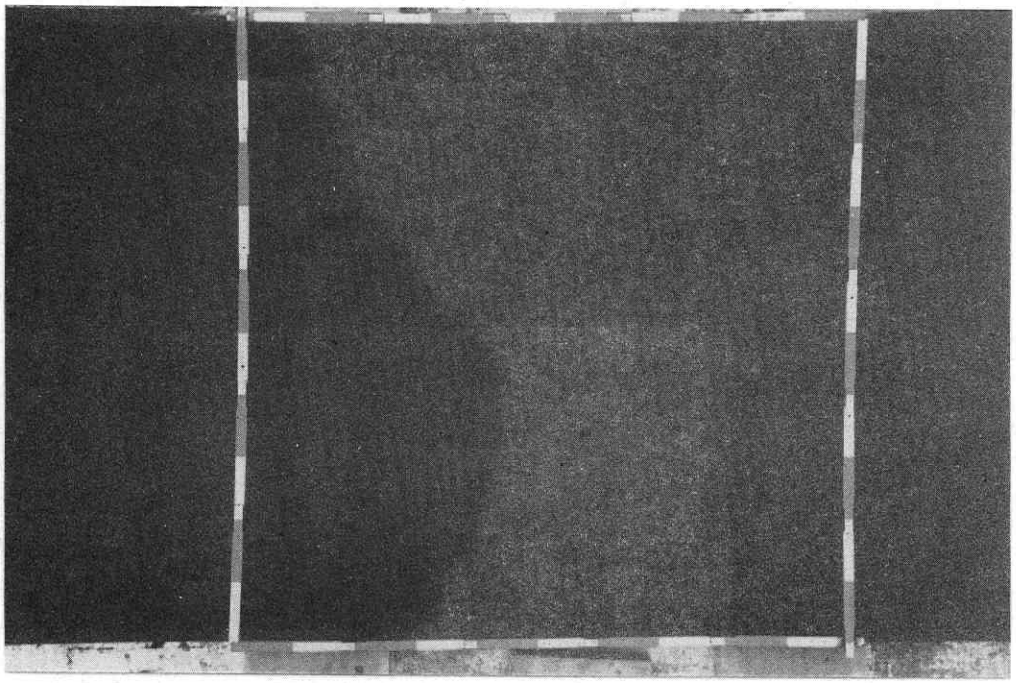
Baumuster 6: Stellplatz, Betonsteinpflaster mit Sickeröffnungen, verschlämmt, ohne Bewuchs
Leipzig, Parkplatz Einkaufszentrum Ratzelbogen



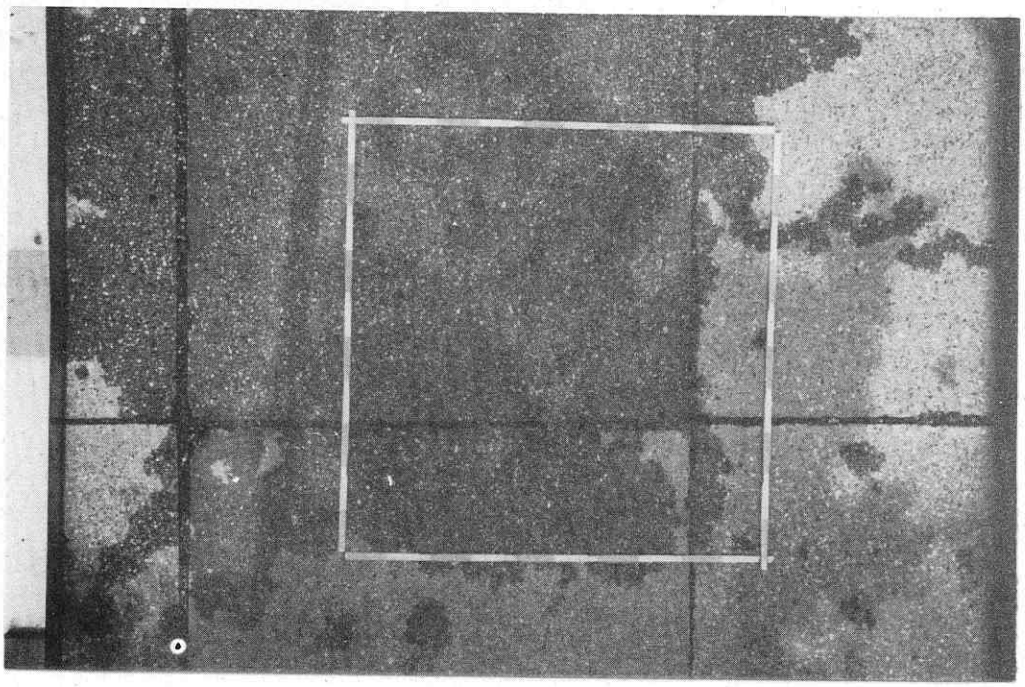
Baumuster 7: Stellplatz, Betonsteinpflaster mit Rasenfugen, Bedeckung <5%, Herstellung 1994
Leipzig, Parkplatz Ärtzezentrum Zschochersche Straße



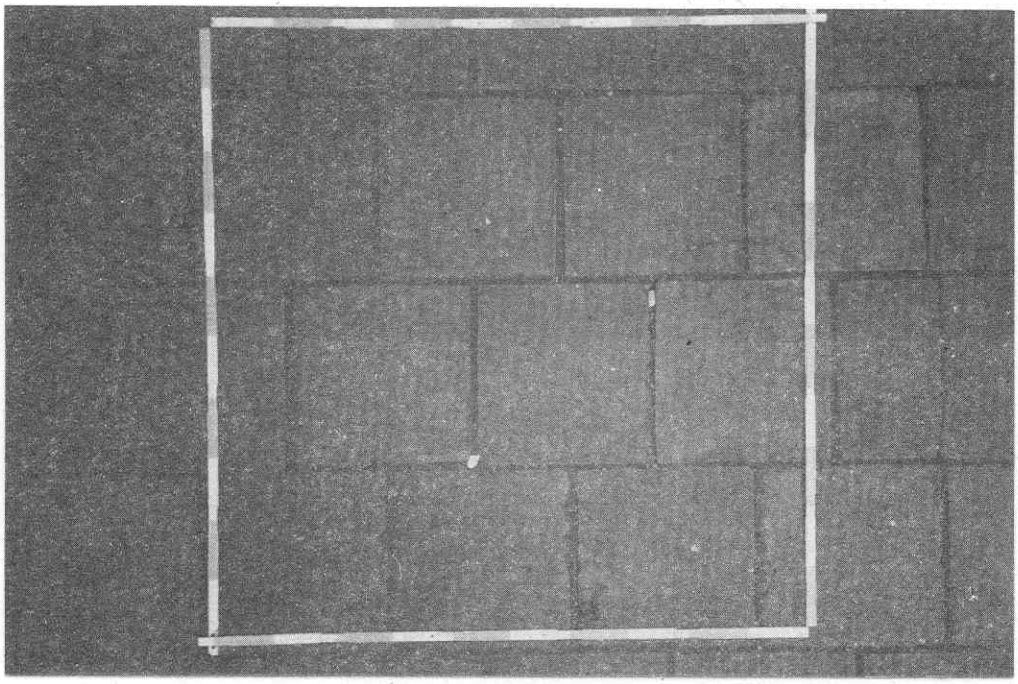
Baumuster 8: Stellplatz, Betonsteinpflaster mit Rasenfugen, Bedeckung >75%, Herstellung 1994
Leipzig, Parkplatz Ärtzezentrum Zschochersche Straße



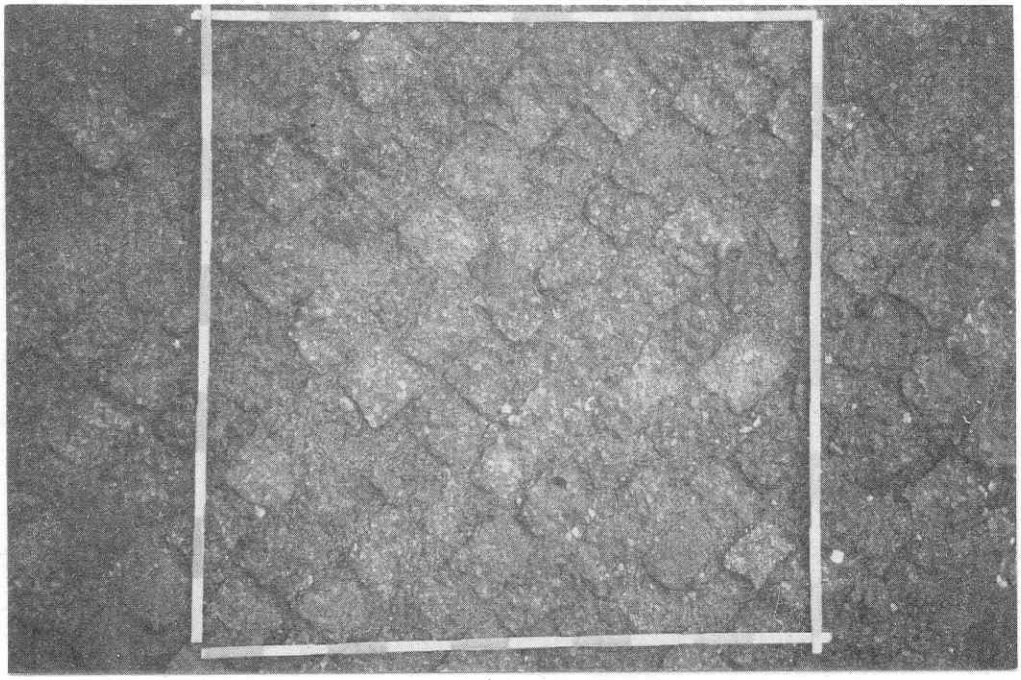
Baumuster 9: Radweg mit kunstharzgebundener Decke, Herstellung 1994
Merschwitz, Elbufer



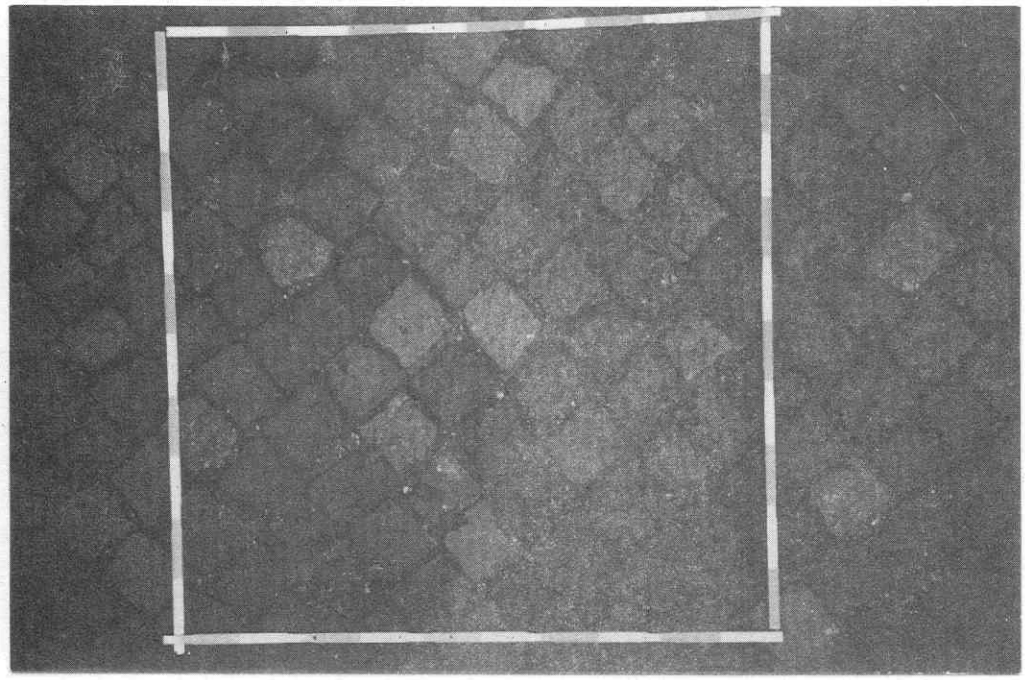
Baumuster 10: Gehweg mit Großformatplatten 1,2 x 1,2 m², Herstellung 1977/78
Leipzig Grünau, Alte Salzstraße



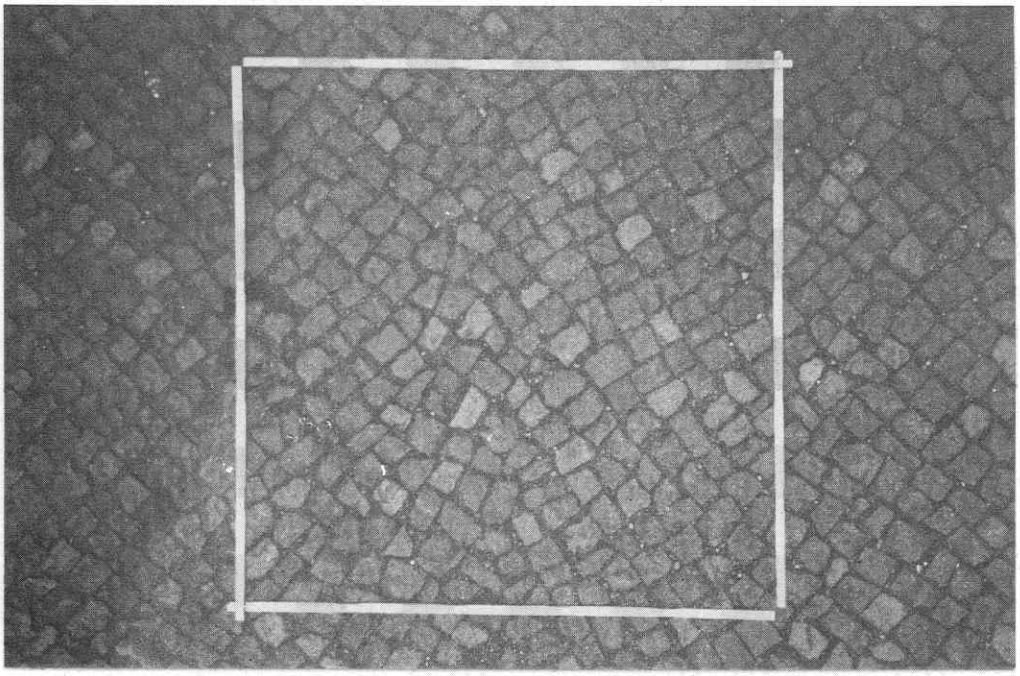
Baumuster 11: Gehweg mit Betonplatten 30 x 30 cm², Herstellung 50/60er Jahre
Leipzig, Breitkopfstraße



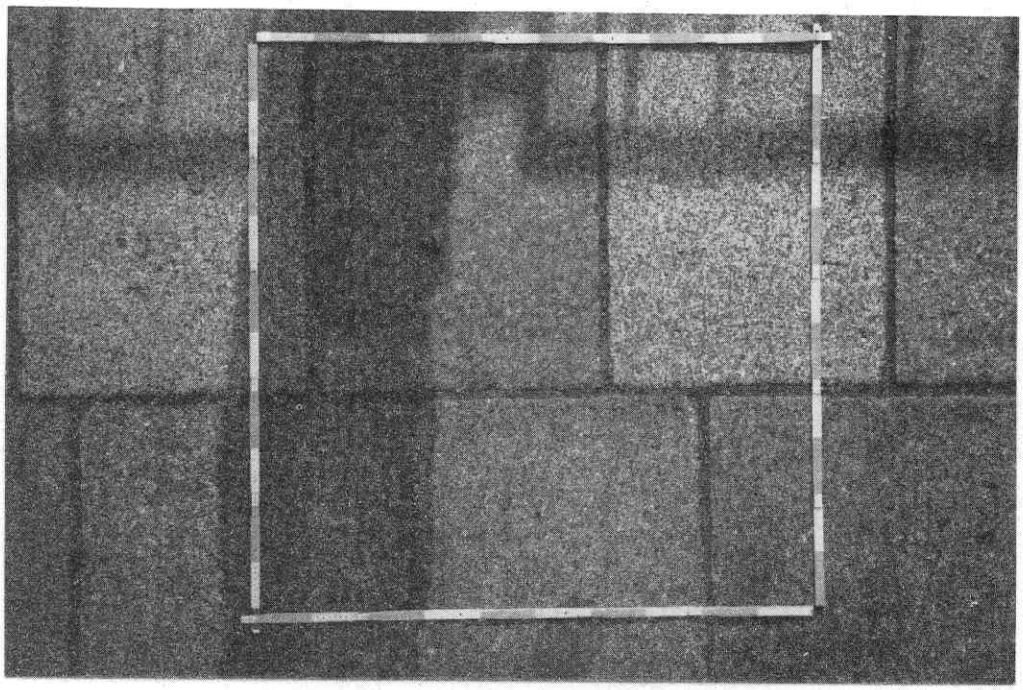
Baumuster 12: Fahrbahn mit Kopfsteinpflaster, Herstellung um 1944
Leipzig, UFZ-Gelände, Permoser Straße



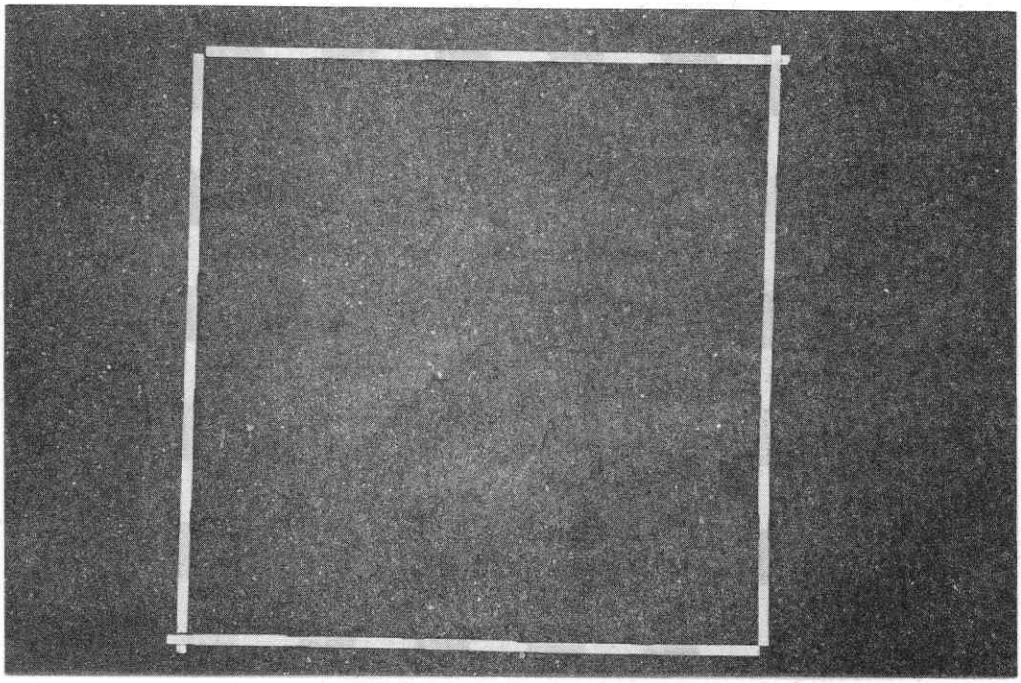
Baumuster 13: Fahrbahn mit Kopfsteinpflaster, Herstellung um 1944
Leipzig, UFZ-Gelände, Permoser Straße



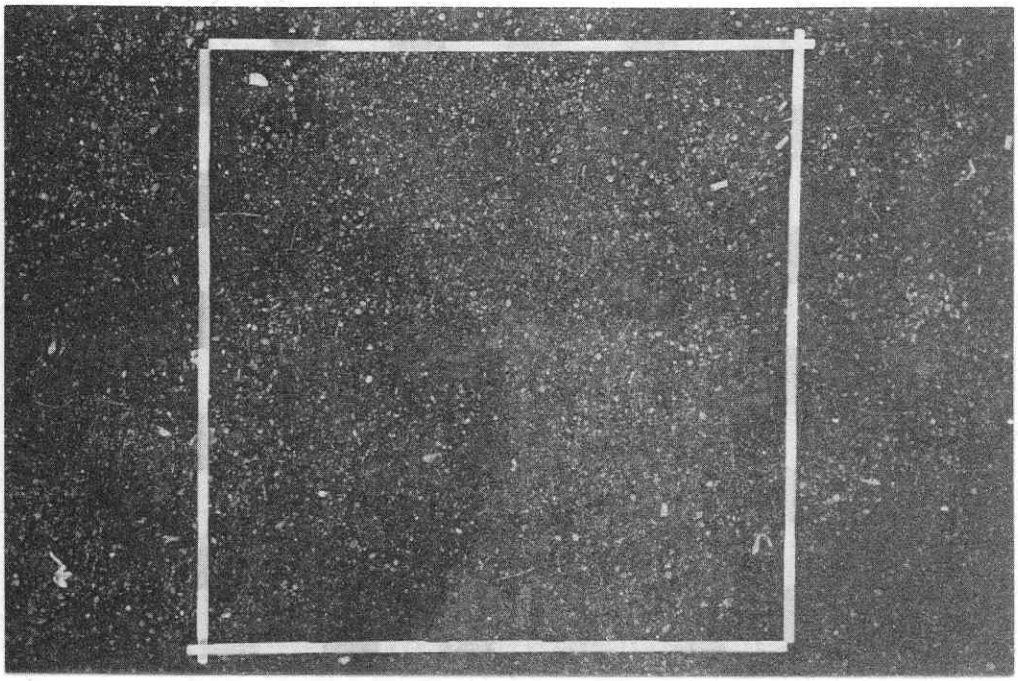
Baumuster 14/15: Gehweg mit Mosaikpflaster, Herstellung um 1900
Leipzig, Holbeinstraße bzw. Gröpplerstraße



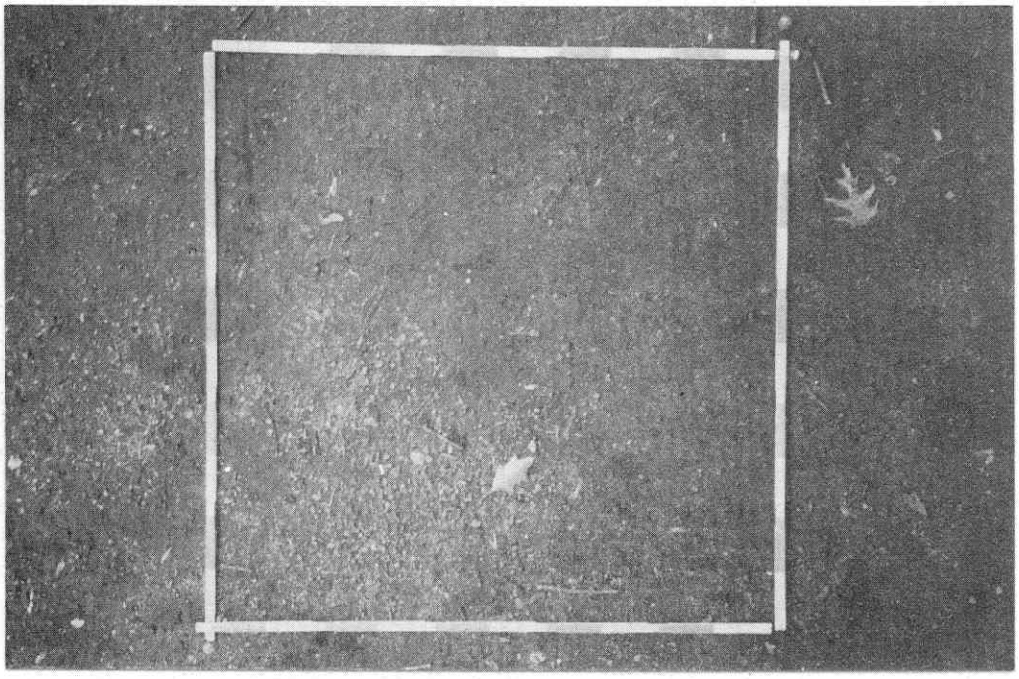
Baumuster 16: Gehweg mit Natursteinplatten, Herstellung um 1900
Leipzig, Breitkopfstraße



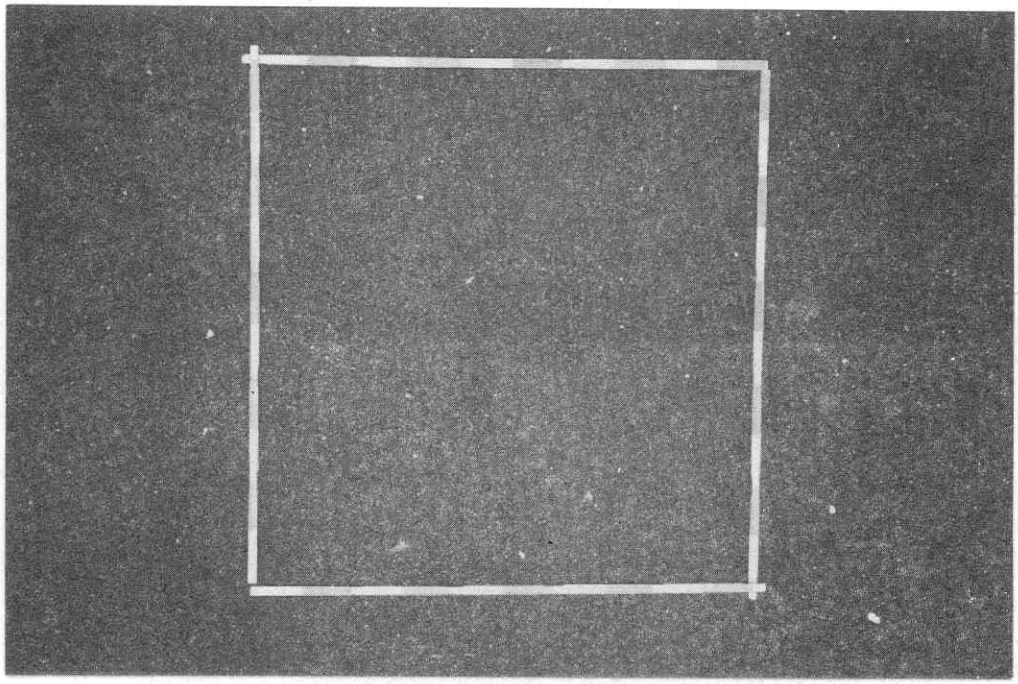
Baumuster 17: Parkplatz mit wassergebundener Decke, Herstellung 1975
Leipzig, UFZ-Gelände, Permoser Straße



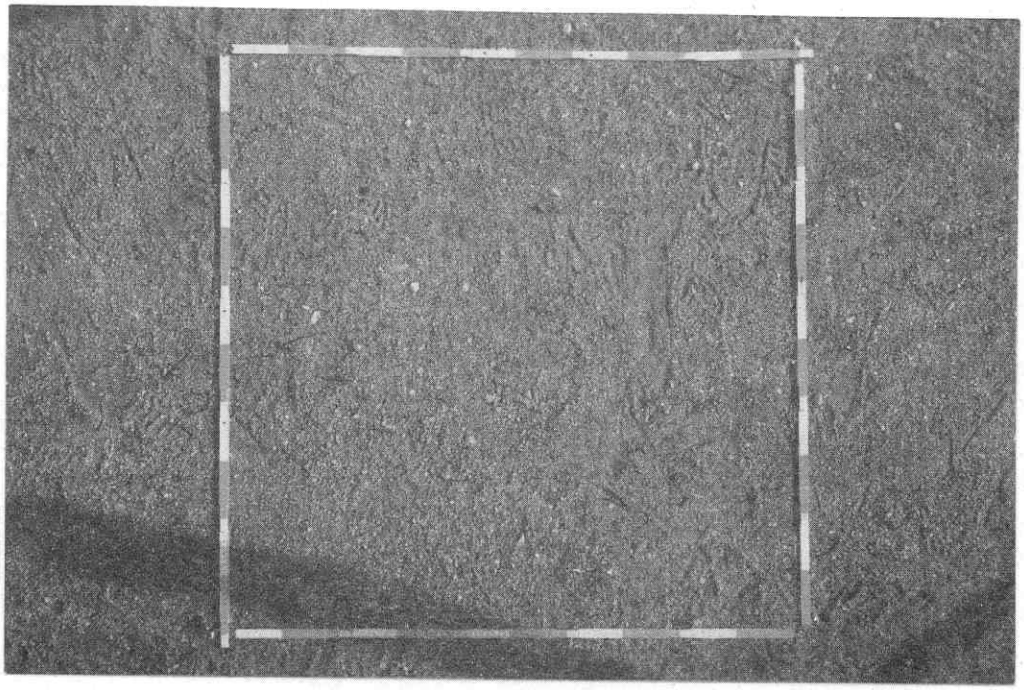
Baumuster 18: Gehweg mit wassergebundener Decke, Herstellung 1990/91
Leipzig, Stephanienplatz



Baumuster 19: Gehweg mit wassergebundener Decke, Herstellung 1993
Leipzig, Mariannenpark



Baumuster 20: Gehweg mit wassergebundener Decke, 1993 saniert
Leipzig, Mariannenpark



Baumuster 21: Rad- und Fußweg mit wassergebundener Decke, Deckschicht aus sandigem Feinkies, Herstellung 1993, Dresden, Pieschener Allee (Elbufer)

IV Erfassung der Bodenversiegelung in Stadtstrukturtypen

Birgit Münchow und Thomas Keidel

Inhalt

1 Detailkartierung 3
1.1 Stadtstrukturtypen 3
1.2 Methodik 10
1.3 Ergebnisse der Kartierung in Leipzig 11
1.4 Ergebnisse der Kartierung in Dresden 19
1.5 Zusammenfassung 27
1.6 Literatur 28

Abbildungen

Abb. 1: Ausmaß der Bodenversiegelung in den Stadtstrukturtypen in Leipzig 13
Abb. 2: Prozentualer Anteil ausgewählter Nutzungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig 14
Abb. 3: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig 16
Abb. 4: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig 16
Abb. 5: Prozentualer Anteil ausgewählter Entwässerungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig 18
Abb. 6: Ausmaß der Bodenversiegelung in den Stadtstrukturtypen in Dresden 19
Abb. 7: Prozentualer Anteil ausgewählter Nutzungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden 23
Abb. 8: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden 24
Abb. 9: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden 25
Abb. 10:Prozentualer Anteil ausgewählter Entwässerungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden 26

Tabellen

Tab. 1: Ausgewählte Stadtstrukturtypen für die Detailkartierung 3
Tab. 2: Kartierungsschlüssel 10
Tab. 3: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche in den Untersuchungsgebieten in Leipzig 12

Tab. 4: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche in den Untersuchungsgebieten in Dresden 20
Tab. 5: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche für die Stadtstrukturtypen in Dresden (bezogen auf die Blockfläche) 21
Tab. 6: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche für die Stadtstrukturtypen in Leipzig (bezogen auf die Blockfläche) 22
Tab. 7: Vergleich der durchschnittlichen Versiegelungsgrade verschiedener Stadtstrukturtypen in Dresden 22

Photodokumentation:

Photo 1: Stadtzentrum 4
Photo 2: Gründerzeitliche Blockbebauung 5
Photo 3: Gründerzeitliche Blockrandbebauung 5
Photo 4: Randbebauung der 20/30er Jahre 6
Photo 5: Villen 6
Photo 6: Zeilenbebauung der 50/60er Jahre 7
Photo 7: Großwohnsiedlung der 70/80er Jahre 7
Photo 8: Wohnpark der 90er Jahre 8
Photo 9: Wohnpark der 90er Jahre 8
Photo 10: Gründerzeitliches Industrie- und Gewerbegebiet 9
Photo 11: Einkaufszentrum 9

Anlage: Versiegelungskarten

Karte 1: Blockbebaung in Leipzig, Wigandstraße
Karte 2: Blockrandbebauung in Dresden, Österreicher Straße
Karte 3: Randbebauung der 20/30er Jahre in Leipzig, Zschochersche Straße Westteil
Karte 4: Villen/Stadthäuser in Leipzig, Wasserturmstraße
Karte 5: Zeilenbebauung der 50/60er Jahre in Leipzig, Permoserstraße
Karte 6: Großwohnsiedlung der 70/80er Jahre in Leipzig, Borsdorfer Straße
Karte 7: Wohnpark der 90er Jahre in Dresden, Salzburger Straße

1 Detailkartierung

1.1 Stadtstrukturtypen

In den Städten Leipzig und Dresden werden zur Kennzeichnung des Ausmaßes der Bodenbeanspruchung durch Versiegelungsmaßnahmen Kartierungen durchgeführt. Die Erhebung der Bodenversiegelung erfolgt in verschiedenen Stadtstrukturtypen. Diese Raumstrukturen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Nutzung, ihrer Baustruktur, ihrer Baualtersklasse, ihrer Baudichte und ihrer Freiraumgestaltung.

Tab. 1: Ausgewählte Stadtstrukturtypen für die Detailkartierung

Stadtstrukturtypen	
Stadtzentrum	Wohnparks/Wohnanlagen
Gründerzeitliche Blockbebauung (offen u. geschlossen)	Villen/Stadthäuser
Gründerzeitliche Blockrandbebauung	Ein- und Zweifamilienhausbebauung
Randbebauung der 20/30er Jahre	Altindustrieflächen
Zeilenbebauung der 50/60er Jahre	Neue Gewerbe- und Industrieansiedlungen
Großwohnsiedlungen der 70/80er Jahre	

Charakteristisch für die untersuchten Städte sind vor allem Wohn- und Mischgebiete aus der Gründerzeit. Ihr Anteil an der gesamten Baustruktur Leipzigs beträgt zum Beispiel 40 % (*Stadt Leipzig*, 1994). Eine Differenzierung der in den Jahren 1870-1914 erbauten Gebäude erfolgt nach ihrer Baukörperstruktur. Die geschlossene Blockbebauung zeichnet sich durch eine Bebauung des Grundstücks mit 3 - 5 geschossigen Vorderhäusern, Hinterhäusern und Nebengebäuden aus. Durch die Bebauung der Blockinnenbereiche sind die vorhandenen Hofflächen sehr klein. Die einzelnen Vorderhäuser umschließen ein Straßengeviert lückenlos. Hingegen sind die Vorderhäuser bei der offenen Blockbebauung durch die nicht überbauten Hofzufahrten voneinander getrennt. Der große begrünte Innenhof ist das typische Merkmal der Blockrandbebauung. Auch bei diesem Stadtstrukturtyp ist die Blockfläche geschlossen umbaut, aber der Blockinnenbereich unterliegt keiner Bebauung. Der im Zentrum gelegene Innenhof ist auch das Kennzeichen der Randbebauung der 20/30er Jahre. Im Unterschied zu der gründerzeitlichen Blockrandbebauung unterliegt die Freifläche aber einer gemeinschaflichen Nutzung. Es existiert keine Grundstücksparzellierung. Bei der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre sind die mehrgeschossigen Wohnhäuser in Reihen angeordnet. Die Zeilen sind durch Grünflächen (Abstandsgrün) voneinander getrennt. Bei den Großwohnsiedlungen handelt es sich um mehr- und vielgeschossige Wohnungen, die in den 70/80er Jahren in Plattenbauweise errichtet wurden. Die Gebäude sind zum größten Teil um einen zentralen Innenhof angeordnet. Als Wohnbebauungstyp der 90er Jahre wurde der Wohnpark bzw. die Wohnanlage ausgegliedert. Dieser Stadtstrukturtyp entsteht verstärkt in den Stadtrandbereichen von Leipzig und Dresden. Die Wohngebäude umschließen auch hier häufig einen Innenhof, wo

Leipzig und Dresden. Die Wohngebäude umschließen auch hier häufig einen Innenhof, wo oftmalig eine Tiefgarage angelegt ist. Die untersuchten Villenviertel sind um die Jahrhundertwende entstanden. Es sind größtenteils zweigeschossige freistehende Gebäude, die sich durch großflächige Gärten auszeichnen. Bei der Doppelhausbebauung handelt es sich um eine Einfamilienhausbebauung, wobei jeweils zwei Häuser miteinander verbunden sind. Speziell in Leipzig befinden sich in den obengenannten gründerzeitlichen Mischgebieten eine Vielzahl von Altgewerbe- und Industriestandorten. Im Gegensatz dazu entstehen neue Industrie-, Gewerbeparks und Einkaufscenter am Stadtrand. Auf den folgenden Photos sind ausgewählte Stadtstrukturtypen dargestellt.

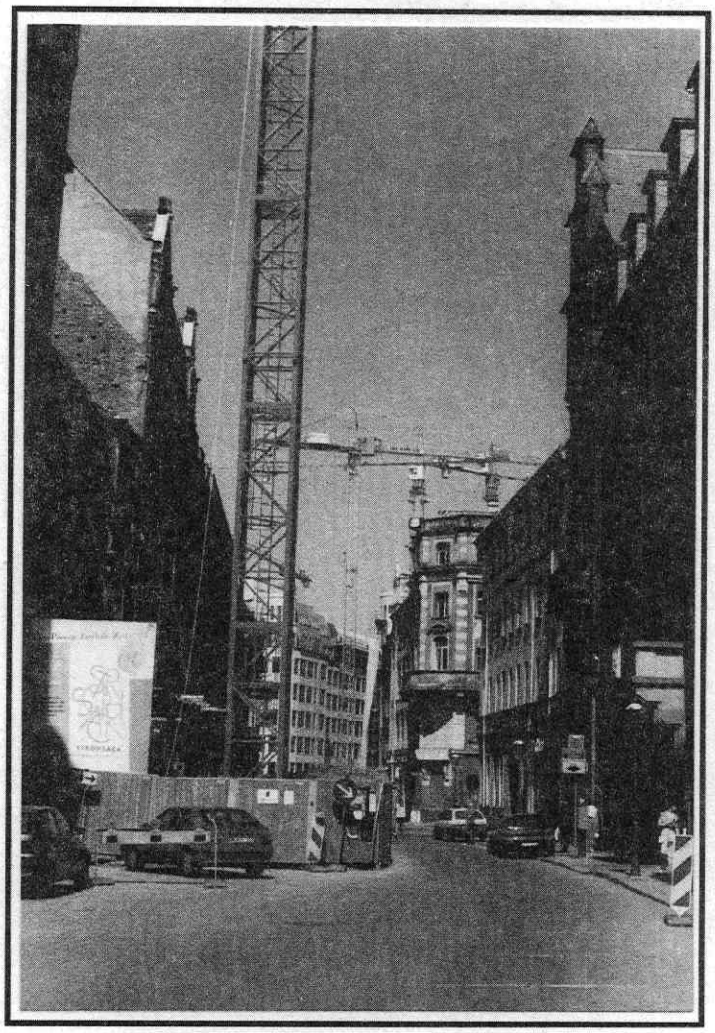


Photo 1: Stadtzentrum

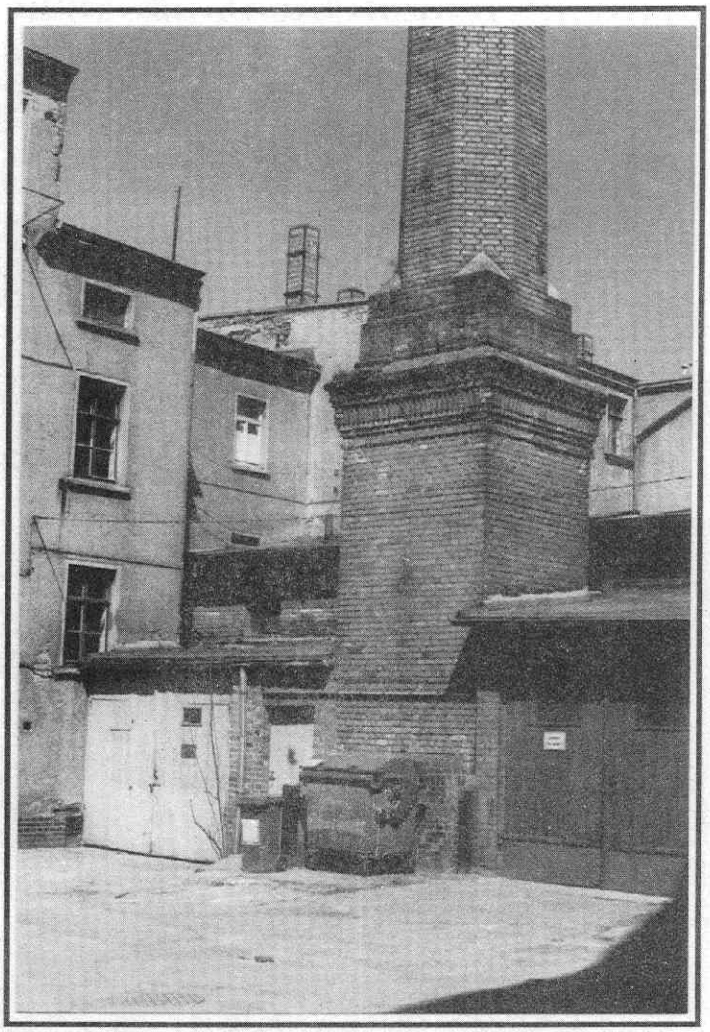


Photo 2: Gründerzeitliche Blockbebauung

Photo 3: Gründerzeitliche Blockrandbebauung

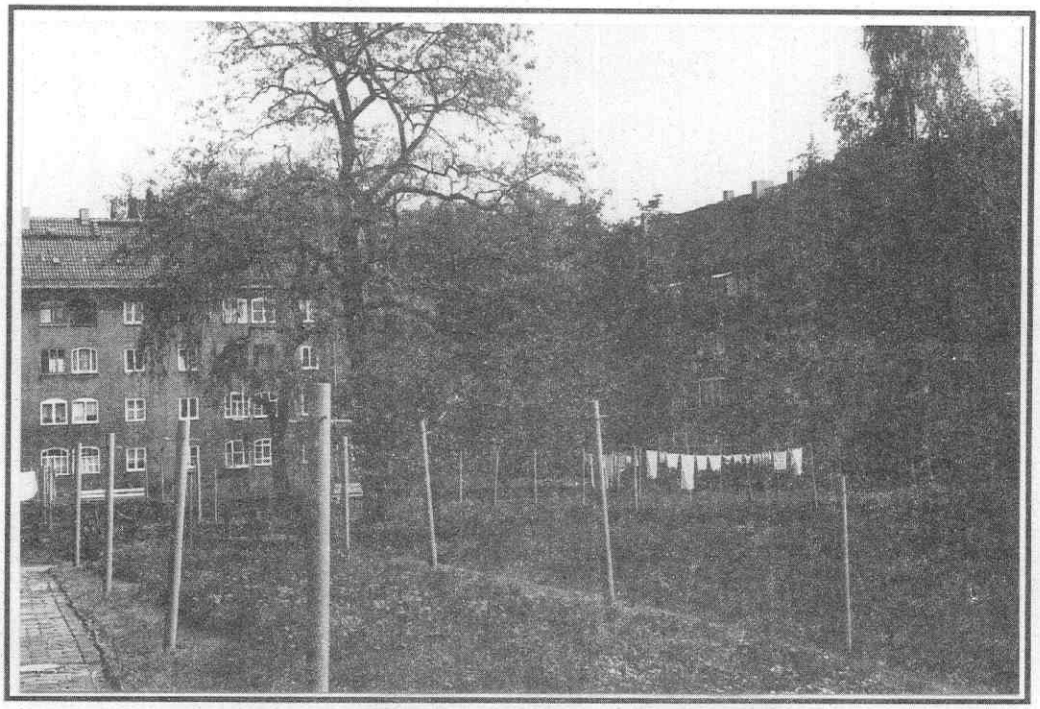


Photo 4: Randbebauung der 20/30er Jahre

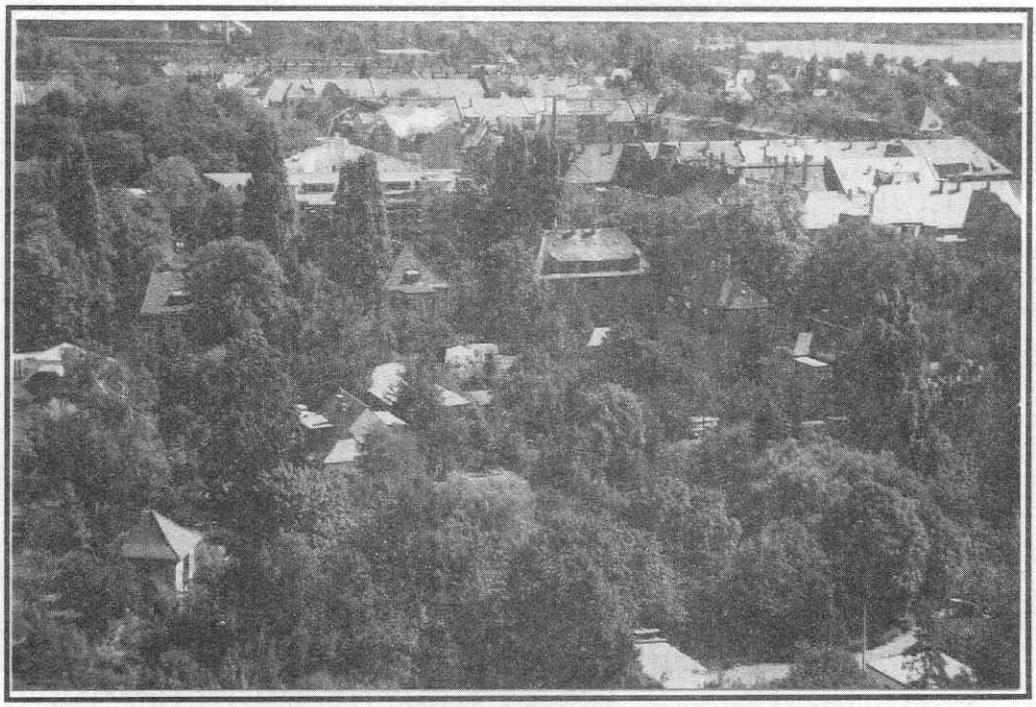


Photo 5: Villen

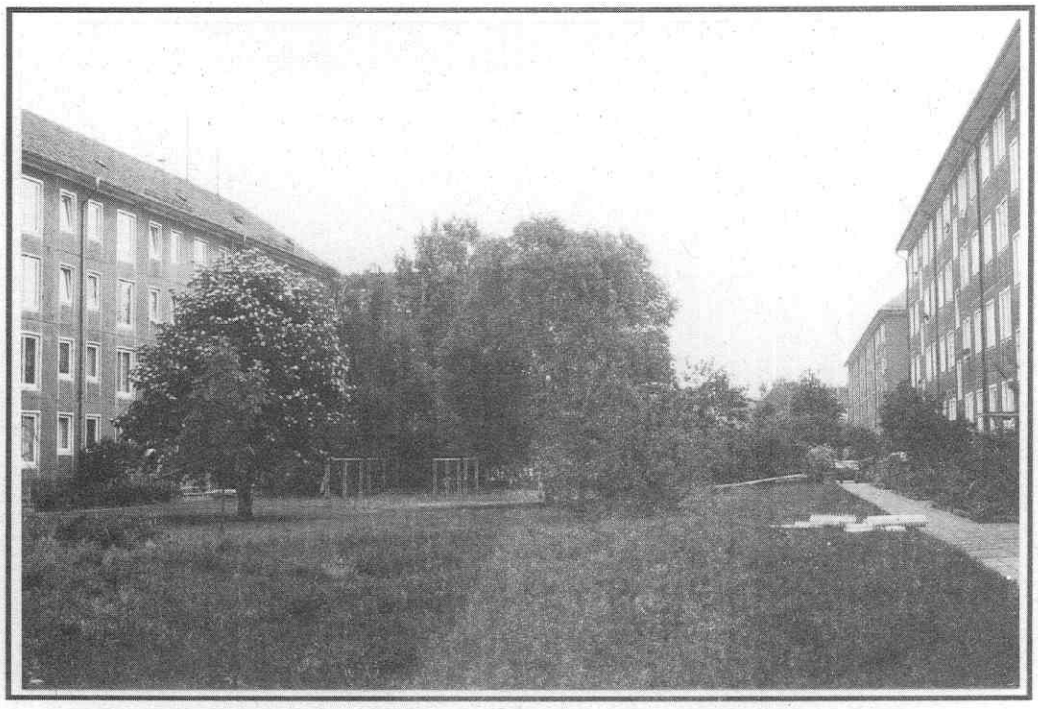


Photo 6: Zeilenbebauung der 50/60er Jahre

Photo 7: Großwohnsiedlung der 70/80er Jahre

Photo 8:
Wohnpark der 90er Jahre

Photo 9: Wohnpark der 90er Jahre

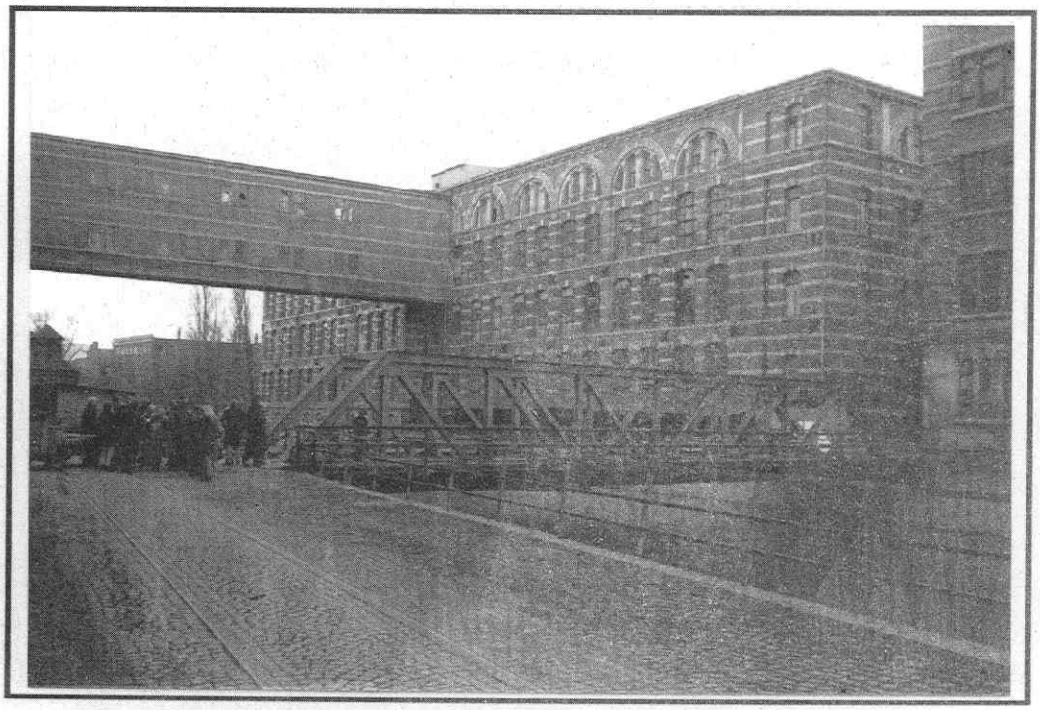


Photo 10: Gründerzeitliches Industrie- und Gewerbegebiet

Photo 11: Einkaufszentrum

1.2 Methodik

Als Erhebungsmethode wird ein modifizierter von BERLEKAMP (zit. in BERLEKAMP u. PRANZAS 1990, 1992) entwickelter Kartierungsschlüssel angewendet. Aufgenommen werden die Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart. Eine weitere Differenzierung der Flächen erfolgt über die Kartierung von bestimmten Zusätzen. Mit Hilfe des Kartierungsschlüssels wird eine bestimmte, hinsichtlich der o.g. Merkmale homogene Teilfläche im Gelände eingestuft. Die Kartierungsgrundlagen sind Katasterkarten im Maßstab 1:500. Die Bezugsflächen bestehen bei den Bebauungsstrukturen aus ganzen Baublöcken (Straßengevierte). Diese setzten sich bei den gründerzeitlichen Stadtstrukturtypen, den Villen/Stadthäusern und den Doppelhäusern aus mehreren Grundstücken zusammen. Durch die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten (vgl. Tab. 2) ist eine Erfassung aller Teilflächen eines Stadtstrukturtyps möglich. Dieser Kartierungsschlüssel wurde für das vorliegende Forschungsprojekt um einige Aufnahmepunkte ergänzt. In der Merkmalsgruppe Nutzungsart wurde als Flächeninanspruchnahme der ruhende Verkehr (Parkplätze) und in der Gruppe Belagsart wurden die für ostdeutsche Städte typischen Befestigungsarten Großform- und Natursteinplatten aufgenommen. Desweiteren wurde diese Merkmalsgruppe um den Punkt bewachsene Böden erweitert.

Tab. 2: Kartierungsschlüssel nach BERLEKAMP (zit. in BERLEKAMP u. PRANZAS 1992), modifiziert

Versiegelungskennziffer A Nutzung	**Versiegelungskennziffer B Belag**	**Versiegelungskennziffer C Entwässerung**	**Versiegelungskennziffer D ergänzende Merkmale**
Gebäude, geneigtes Dach	Gebundene Decke	Kanalanschluß	undurchlässiger Unterbau
Gebäude, flaches Dach	Großformatplatten	bedingter Kanalanschluß	Fugen vergossen
Container	Natursteinplatten	Drainangen	starke (Fugen-) Vegetation
Freifläche, begangen	Plattenbelag	Grabenanschluß	stärker durchlässig
Freifläche, befahren	Betonverbundsteine/ Klinkersteine	Stauwasser	Fläche unter Geländeoberfläche
Freifläche, ruhender Verkehr	Groß- und Mittelpflaster	Entwässerung unklar	Fläche über Geländeoberfläche
Freifläche, keine Nutzung	Klein- und Mosaikpflaster	technische Versickerung	Fläche über/auf Untergrund-Bauwerk
Wasserfläche	Ungebundene Decken	natürliche Versickerung	Fläche auf Bauwerk
Gleiskörper	Lockermaterialien		starkes Gefälle
Sonderfläche	Betonsickerpflaster		offene Überdachung
Freifläche, unversiegelt	vegetationslose Böden		
	bewachsene Böden		
	flächendeckende Vegetation		

Anhand der Auswertung von Echtfarben- und Infrarotluftbildern im Maßstab 1:5000, der Flächennutzungskarte von Leipzig im Maßstab 1:25000, des Ortsteilkatalogs der *Stadt Leipzig* (1993) und Geländebegehungen wurden die Untersuchungsgebiete in den Stadtstrukturtypen Leipzigs festgelegt. Die Auswahl der Testflächen in Dresden beruht auf der Stadtstrukturtypeneinteilung von HEBER u. LEHMANN (1993). Aufgrund des hohen Kartierungsaufwandes liegt der Schwerpunkt der Versiegelungserhebungen im Stadtgebiet von Leipzig.

Für die Auswertung des Ausmaßes der Bodenversiegelung in den Stadtstrukturtypen werden die ermittelten Kennwerte der Untersuchungsgebiete miteinander verglichen. Als allgemeine Kennwerte wären hier der Versiegelungsgrad, der prozentuale Anteil der Gebäude-, der versiegelten Frei- und der nicht versiegelten Freiflächen zunennen. In dieser Untersuchung werden alle befestigten Flächen zur versiegelten Freifläche gezählt. Die Analyse der Untersuchungsergebnisse wird einerseits nur für die Blockflächen und andererseits für die Blockflächen mit integrierten Verkehrsflächen vorgenommen. Unter der Verkehrsfläche wird die halbe Straßenbreite, die Fuß- und Radwege, das Verkehrsbegleitgrün und die Parkflächen im Straßenraum eines Baublocks verstanden. Die weitergehende Auswertung des Kartierungsschlüssels bezieht sich auf die Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart der versiegelten Freifläche. Diese bezieht sich nur auf die Blockflächen. Zur Veranschaulichung der Kartierungsergebnisse sind für ausgewählte Stadtstrukturtypen Versiegelungskarten mit dem geografischen Informationssystem Arcinfo erarbeitet worden.

1.3 Ergebnisse der Kartierung in Leipzig

In Tabelle 3 sind die allgemeinen Kennwerte für die bisher kartierten Stadtstrukturtypen aufgeführt. Es zeigt sich, daß sich die Gesamtversiegelungsgrade bei Einbeziehung der Verkehrsfläche um durchschnittlich 10 % erhöhen. Bei einer Ausklammerung der Verkehrsfläche wird der Einfluß der Baumasse auf den Versiegelungsgrad deutlicher (Abb 1.) Am höchsten versiegelt sind die Grundstücke der gründerzeitlichen Blockbebauung, was sowohl auf den hohen Überbauungsgrad als auch auf den hohen Anteil an versiegelter Freifläche zurückzuführen ist. In diesem Stadtstrukturtyp nehmen die Nebengebäude ca. 20 % der Gebäudefläche ein, so daß durch die Erschließung dieser Hinterhäuser, Lagerschuppen, Werkstätten etc. ein Großteil der Freiflächen versiegelt ist (Karte 1). Der Einfluß der Innenhofbebauung auf den Versiegelungsgrad wird auch bei der offenen Blockbebauung sichtbar. Aufgrund der geringeren Wohngebäudeflächen und dem größeren Anteil unversiegelter Böden wird aber ein Versiegelungsgrad von 66 % erreicht. Die Untersuchungsgebiete der Blockrandbebauung und der Randbebauung der 20/30er Jahre (Karte 3) sind aufgrund der größeren Grünflächen in den Innenhofbereichen mit einem durchschnittlichen Versiegelungsgrad von 67 bzw 60 % gekennzeichnet (Abb. 1). Aus Tabelle 3 wird deutlich, daß insbesondere in der Randbebauung der 20/30er Jahre der Versiegelungsgrad stark schwankt. In diesem Stadtstrukturtyp (Tab. 3, Nr. 15, 16, 17) und auch in der Blockrandbebauung (Tab. 3, Nr. 11, 12) können hohe Versie-

Tab. 3: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche in den Untersuchungsgebieten in Leipzig - **Fettdruck** = Untersuchungsfläche **ohne** Verkehrsfläche (halbe Straßenbreite, Bürgersteig, Verkehrsgrün, Parkplätze)

Nr.	Versiegelungs-grad %		Gebäude-fläche %		Wohngebäude %		Nebengebäude %		versiegelte Freifläche %		unversiegelte Freifläche %	
Blockbebauung												
1	84.60	**79.50**	43.00	**57.20**	36.30	**48.30**	6.70	**8.90**	41.60	**22.30**	15.40	**20.50**
2	70.30	**62.70**	39.10	**49.20**	33.70	**42.40**	5.40	**6.80**	31.20	**13.50**	29.70	**37.30**
3	89.30	**84.40**	39.70	**58.10**	30.70	**44.90**	9.00	**13.20**	49.60	**26.30**	10.70	**15.60**
4	90.90	**88.20**	42.30	**59.20**	29.50	**41.30**	12.80	**17.90**	48.60	**29.00**	9.10	**11.80**
5	94.58	**92.88**	47.31	**62.21**	30.31	**39.86**	17.00	**22.35**	47.27	**30.67**	5.42	**7.12**
6	83.52	**78.10**	41.40	**55.01**	33.86	**44.99**	7.54	**10.02**	42.12	**23.10**	16.48	**21.90**
offene Blockbebauung												
7	74.40	**66.50**	34.70	**45.60**	25.10	**33.00**	9.60	**12.60**	39.70	**20.90**	25.60	**33.50**
8	75.20	**67.00**	35.00	**46.60**	29.50	**39.30**	5.50	**7.30**	40.20	**20.40**	24.80	**33.00**
Blockrandbebauung												
9	74.30	**64.20**	33.40	**46.50**	32.70	**45.60**	0.70	**0.90**	40.90	**17.70**	25.70	**35.80**
10	69.50	**59.20**	32.50	**43.30**	30.10	**40.10**	2.40	**3.20**	37.00	**15.90**	30.50	**40.80**
11	78.10	**70.90**	40.40	**54.40**	39.20	**52.70**	1.20	**1.70**	37.70	**16.50**	21.90	**29.10**
12	81.90	**75.80**	42.30	**57.40**	40.40	**54.80**	1.90	**2.60**	39.60	**18.40**	18.10	**24.20**
13	76.80	**69.70**	36.40	**49.40**	32.40	**43.90**	4.00	**5.50**	40.40	**20.30**	23.20	**30.30**
Randbebauung der 20/30er Jahre												
14	71.00	**62.70**	33.70	**43.40**	31.50	**40.50**	2.20	**2.90**	37.30	**19.30**	29.00	**37.30**
15	80.50	**72.10**	35.40	**50.80**	32.30	**46.40**	3.10	**4.40**	45.10	**21.30**	19.50	**27.90**
16	77.40	**68.80**	36.70	**50.60**	35.30	**48.70**	1.40	**1.90**	40.70	**18.20**	22.60	**31.20**
17	81.00	**72.20**	36.90	**54.00**	36.90	**54.00**	0.00	**0.00**	44.10	**18.20**	19.00	**27.80**
18	66.90	**54.90**	29.30	**40.00**	29.20	**39.80**	0.10	**0.20**	37.60	**14.90**	33.10	**45.10**
19	69.70	**58.80**	32.00	**43.50**	32.00	**43.50**	0.00	**0.00**	37.70	**15.30**	30.30	**41.20**
20	51.20	**39.90**	21.30	**26.40**	21.20	**26.30**	0.10	**0.10**	29.90	**13.50**	48.80	**60.10**
21	65.23	**54.27**	26.97	**35.90**	24.65	**32.81**	2.32	**3.09**	38.75	**18.37**	34.77	**45.73**
22	62.11	**52.40**	27.36	**34.37**	24.29	**30.52**	3.07	**3.85**	34.75	**18.03**	37.89	**47.60**
Zeilenbebauung der 50/60er Jahre												
23	31.50	**25.90**	14.30	**15.90**	14.30	**15.90**	0.00	**0.00**	17.20	**10.00**	68.50	**74.10**
24	38.00	**28.30**	12.10	**14.00**	12.00	**13.80**	0.10	**0.20**	25.90	**14.30**	62.00	**71.70**
Villen/Stadthäuser												
25	56.70	**40.90**	19.30	**26.40**	16.60	**22.70**	2.70	**3.70**	37.40	**14.50**	43.30	**59.10**
26	46.70	**31.60**	15.80	**21.80**	14.00	**19.30**	1.80	**2.50**	30.90	**9.80**	53.30	**68.40**
Doppelhäuser												
27	52.00	**42.90**	21.20	**25.30**	16.90	**20.20**	4.30	**5.10**	30.80	**17.60**	48.00	**57.10**
Großwohnsiedlung												
28	62.60	**55.90**	25.10	**36.10**	25.00	**35.90**	0.10	**0.20**	37.50	**19.80**	37.40	**44.10**
29	58.70	**53.30**	20.60	**33.00**	20.60	**33.00**	0.00	**0.00**	38.10	**20.30**	41.30	**46.70**
30	60.80	**50.50**	24.90	**34.60**	24.90	**34.60**	0.00	**0.00**	35.90	**15.90**	39.20	**49.50**
31	57.00	**46.20**	24.50	**33.50**	24.50	**33.50**	0.00	**0.00**	32.50	**12.70**	43.00	**53.80**
32	56.10	**45.90**	25.30	**35.50**	25.10	**35.20**	0.20	**0.30**	30.80	**10.40**	43.90	**54.10**
33	52.40	**44.10**	25.90	**34.10**	25.90	**34.10**	0.00	**0.00**	26.50	**10.00**	47.60	**55.90**

gelungsgrade erzeilt werden, wenn eine kleine unversiegelte Innenfläche bei einer gleichzeitigen hohen Baumasse vorliegt. Der Stadtstrukturtyp Zeilenbebauung der 50/60er Jahre besitzt mit 72 % (Abb. 1) den höchsten prozentualen Anteil an unversiegelten Böden und weist mit 12 % den geringsten Anteil versiegelter Freifläche auf (Karte 5). Der durchschnittliche Versiegelungsgrad von 27 % wird durch die großen Grünflächen zwischen den Zeilen erreicht. Einen durchschnittlichen Versiegelungsgrad von 49 % weist die Großwohnsiedlung auf. Bei einem Freiflächenanteil von 50 % betragen die Anteile der versiegelten Freifläche 15 %. Dieser Bebauungstyp ist wie auch die Zeilenbebauung der 50/60er Jahre durch eine Homogenität in der Bebauungsstruktur, den Erschließungsflächen, der Größe und der Aufteilung der Freiflächen gekennzeichnet (Karte 6). Die Villen/Stadthäuser (Karte 4) haben mit 63 % den zweit höchsten Anteil an unversiegelten Freiflächen. Dieser ergibt sich aus dem niedrigen Überbauungsgrad (24 %) und dem niedrigen Anteil versiegelter Freifläche (12.15 %). Die prozentualen Anteile der unversiegelten Freifläche der Doppelhäuser liegt bei 57 %. Bei diesem Stadtstrukturtyp nehmen die Nebengebäude (Garagen, Schuppen etc.) ca. 20 % der Gebäudefläche ein.

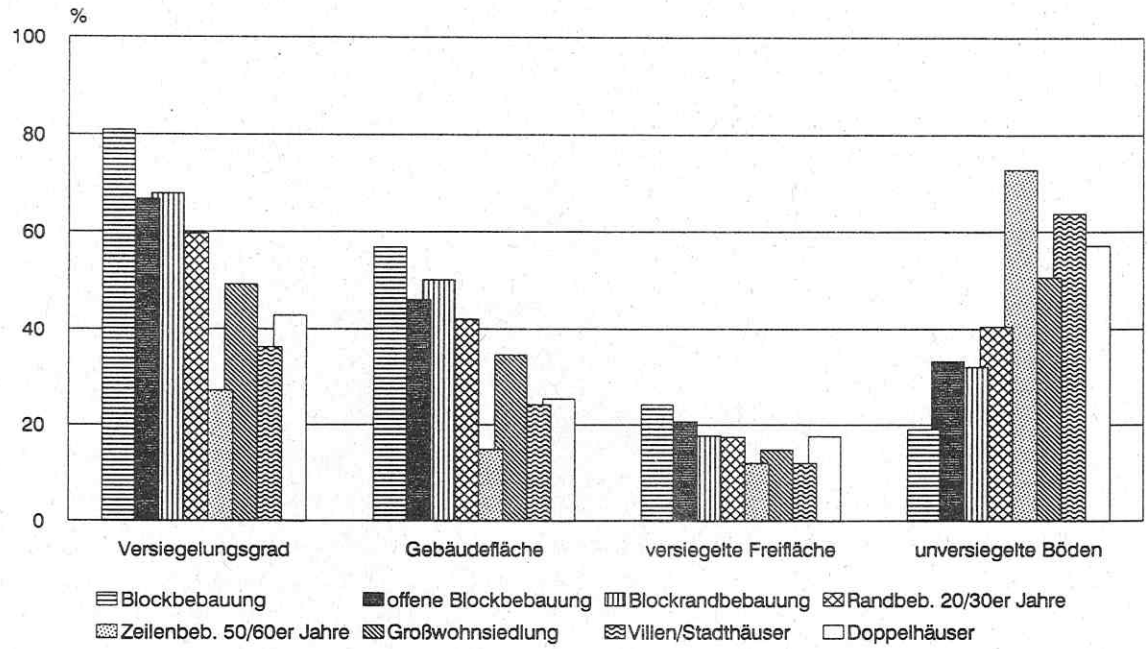


Abb. 1: Ausmaß der Bodenversiegelung in den Stadtstrukturtypen in Leipzig (Mittelwerte)

Versiegelungsarten-Kennziffer A (Nutzung)

In Abbildung 2 sind die Mittelwerte der verschiedenen Nutzungsarten bezogen auf die versiegelte Freifläche in den Stadtstrukturtypen dargestellt. Es wird deutlich, daß in allen Stadtstrukturtypen der überwiegende Teil der versiegelten Freiflächen begangen werden. In der Blockrandbebaung, der offenen Blockbebauung, der Randbebauung der 20/30er Jahre (Karte 2) und der Großwohnsiedlung (Karte 6) sind fast 80 % der versiegelten Freifläche als Fußwege oder Plätze gestaltet. Über 80 % nehmen die begangenen Flächen sogar in der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre ein (Karte 5). Dementsprechend gering sind die Anteile der befahrenen Flächen in diesen Stadtstrukturtypen. In der Doppelhausbebauung und den Villen/Stadthäusern wird fast die Hälfte der versiegelten Freifläche in der Regel als Zufahrten und zwischen 50 und 60 % als Fußwege genutzt (Karte 4). Für die Blockbebauung ergeben sich durchschnittliche Werte von 54 % für die begangenen und von 37 % für die befahrenen Flächen.

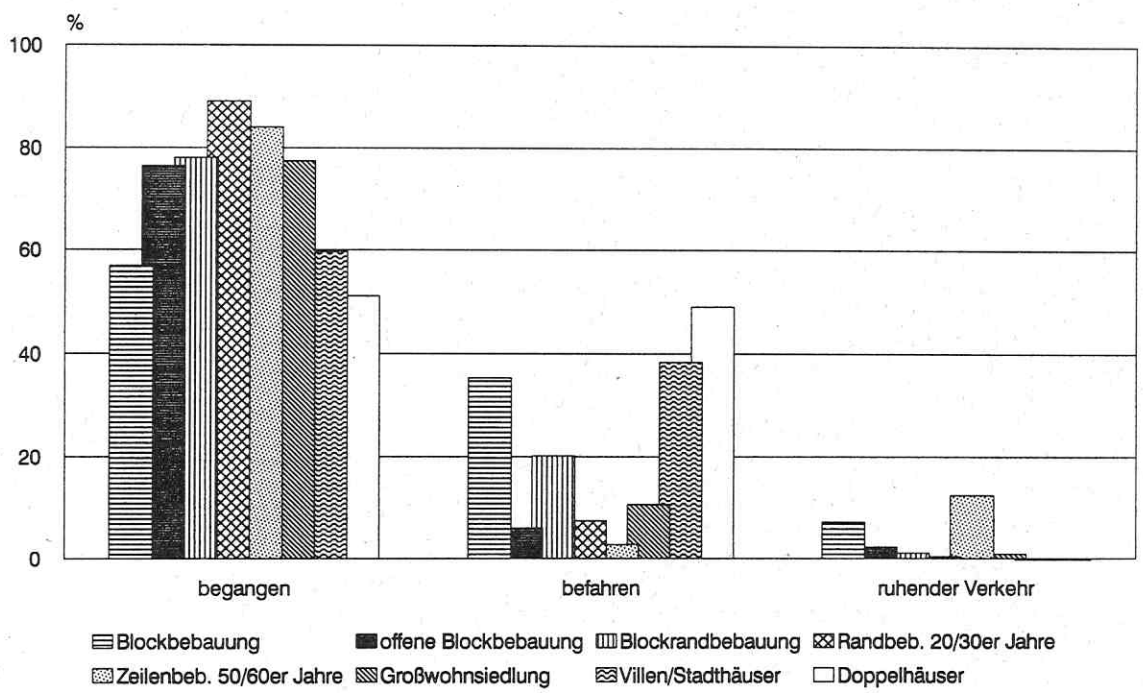


Abb. 2: Prozentualer Anteil ausgewählter Nutzungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig (Mittelwerte)

Der für den ruhenden Verkehr in Anspruch genommene Flächenanteil ist in allen Stadtstrukturtypen annähernd gleich. Die höchsten Werte werden mit 10 bzw. 12 % in der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre (Karte 5) bzw. in der Blockbebauung erreicht. In der Blockbebauung (Karte 1) werden die befahrenen Flächen auch gleichzeitig als Stellplätze genutzt. Das Vorkommen nicht genutzter versiegelter Freiflächen ist in allen Stadtstrukturtypen sehr gering. Nicht dargestellt ist die Nutzung als Sonderfläche. Beispiele dafür sind in der Großwohnsiedlung die Sandspielflächen mit 9 % und in der offenen Blockbebauung die Baustellen mit 7 %.

Versiegelungsarten - Kennziffer B (Belagsart)

In Abbildung 3 sind die mittleren prozentualen Anteile der einzelnen Belagsarten an der versiegelten Freifläche in den Stadtstrukturtypen dargestellt. Die höchsten Werte für die gebundenen Decken werden in der Doppelhausbebauung (25 %) erreicht. Die Werte in den übrigen Stadtstrukturtypen schwanken zwischen 5 und 14 %. Für die Großformatplatten (120 x 120 cm) ergibt sich ein eindeutiges Bild. Diese Belagsart ist typisch für die Großwohnsiedlung (Karte 6) und nimmt dort fast 70 % der gesamten versiegelten Flächen ein und unterscheidet sich somit von allen anderen Stadtstrukturtypen. In der Blockbebauung, der Randbebauung der 20/30er Jahre, der Blockrandbebauung und den Villen/Stadthäusern tritt diese Belagsart überhaupt nicht in Erscheinung und nur sehr untergeordnet in der offenen Blockbebauung, der Blockrandbebauung und der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre. Im letztgenannten Stadtstrukturtyp sind die Flächen überwiegend mit Plattenbelägen (30 x 30 cm) befestigt. Sie nehmen dort durchschnittlich 36 % der befestigten Freiflächen ein (Karte 5).

Für die Gruppe der Betonverbund- und Klinkersteine ergibt sich ein Maximum in der Blockrandbebauung. Über 75 % der versiegelten Freiflächen sind mit Klinkersteinen befestigt. Diese sind als Umrandung, um den zentralen Innenhof angeordnet. Bei den Villen/Stadthäusern (Karte 4) sind es vor allem die Zufahrten und Wege, die bis zu 68 % mit Betonverbundpflaster befestigt sind. Diese Befestigungsarten nehmen noch ca. 40 % der versiegelten Freiflächen in der Blockbebauung (Karte 1), der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre und der Randbebauung der 20/30er Jahre (Karte 3) ein. In der Großwohnsiedlung und den bisher ausgewerteten Beispielsflächen der Doppelhausbebauung und der offenen Blockbebauung treten diese Beläge nur untergeordnet auf. Die hohen Werte in der Zeilenbebauung wurden durch einen Belagswechsel bei der Sanierung der Gebäude hervorgerufen. Die typischen Plattenbeläge sind durch Betonverbundsteine ersetzt worden.

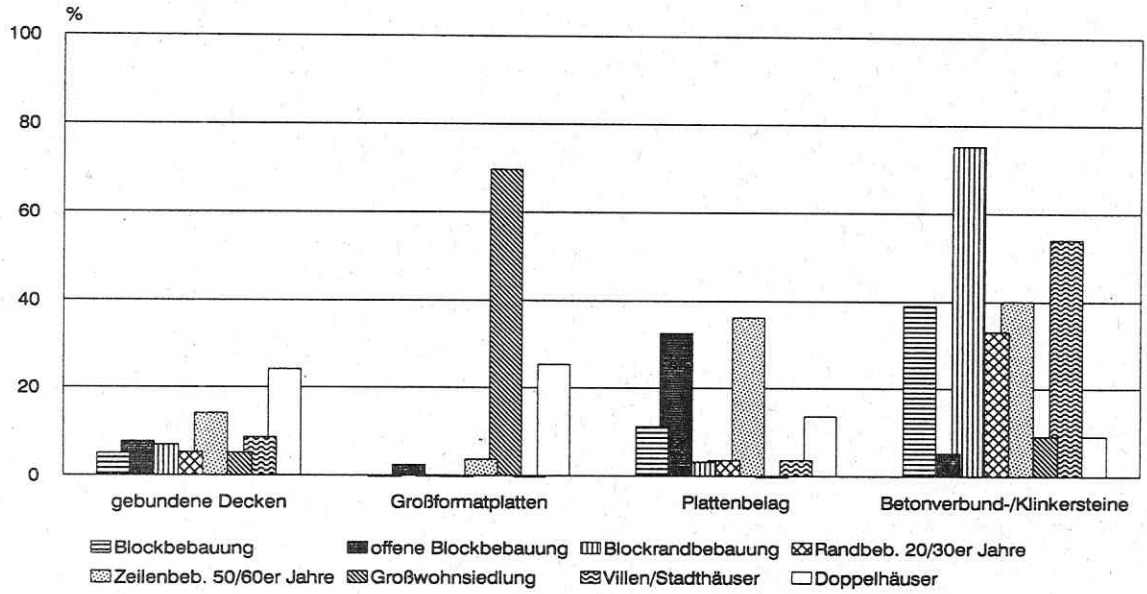


Abb. 3: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig (Mittelwerte)

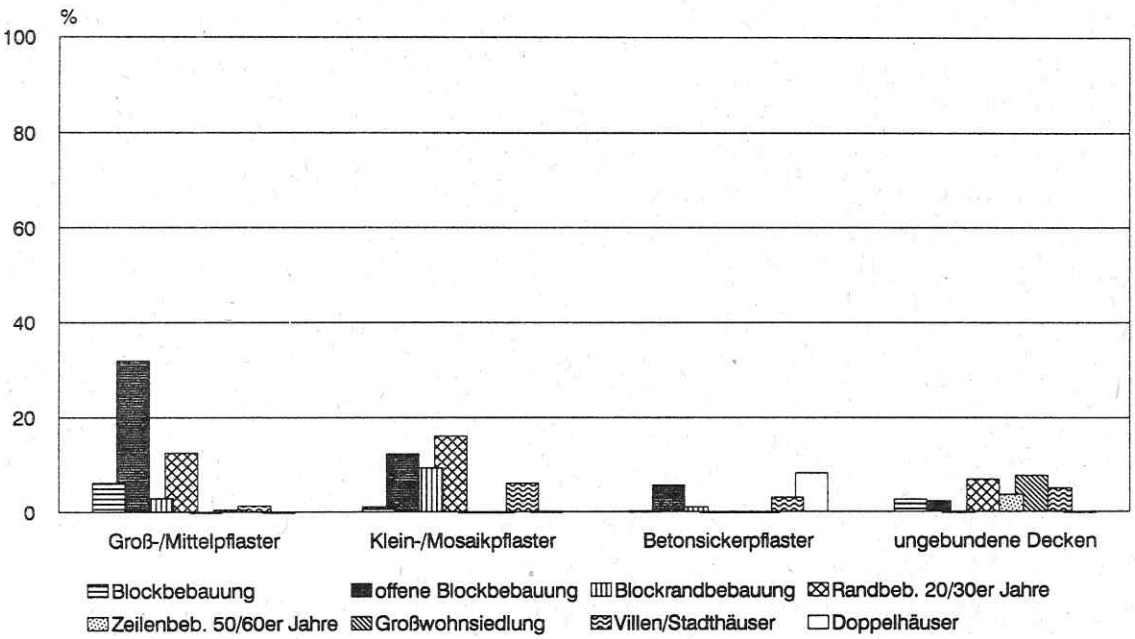


Abb. 4: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig (Mittelwerte)

In der offenen Blockbebauung sind vor allem die Hofzufahrten mit Groß- und Mittelpflaster (31 %) befestigt. Abbildung 4 verdeutlicht, daß diese Belagsarten nicht so häufig innerhalb von Wohnstrukturen zufinden sind, sondern ihren Verbreitungsschwerpunkt als Straßenbefestigung in den gründerzeitlichen Quartieren haben. In der Randbebauung der 20/30er Jahre (Karte 3) werden die höchsten Werte für das Klein- u. Mosaikpflaster (20 %) erreicht. Auch diese Beläge wurden häufig für die Gehwegbefestigungen (Karte 1) verwendet.

Die Gruppe der neueren Betonsickerpflaster (Betongittersteine, Betonpflaster mit Sickeröffnungen u. a.) ist nur sehr schwach in den Stadtstrukturtypen vertreten. Die höchsten Werte erreichen diese Beläge in der Doppelhausbebauung und der offenen Blockbebauung. In diesen Stadtstrukturtypen sind es die Zufahrten und Stellplätze die überwiegend mit Betonsikkerpflaster befestigt sind. In den gründerzeitlichen Stadtstrukturtypen tritt im Zuge von Sanierungsmaßnahmen stellenweise eine Flächennutzungsänderung ein. Die entkernten Höfe oder vormals unversiegelten Böden werden häufig zu Parkplätzen umgenutzt und mit Betonverbundpflaster, seltener durch Betongittersteinen oder durch Betonpflaster mit Sickeröffnungen befestigt (Karte 1).

Die ungebundenen Decken erreichen mit 8 bzw. 9 % in der Randbebauung der 20/30er Jahre (Karte 3) bzw. in den Großwohnsiedlungen (Karte 6) die höchsten Werte. Die Gruppe der Lockermaterialien (nicht dargestellt) ist nur sehr schwach in den untersuchten Stadtstrukturtypen vertreten. Die höchsten Werte werden in der Großwohnsiedlung mit 7 % erreicht. Hier kommen vor allem die großen Sandspielflächen zum Tragen (Karte 6).

Versiegelungsarten - Kennziffer C (Entwässerung)

In Abbildung 5 sind die durchschnittlichen prozentualen Anteile der Entwässerungsarten der versiegelten Freiflächen dargestellt. Es zeigt sich, daß in der Blockbebauung (Karte 1) und der Blockrandbebauung über 80 % der Flächen über einen Kanalanschluß verfügen und die Flächen der offenen Blockbebauung und der Randbebauung der 20/30er Jahre (Karte 3) zu 70 bzw. 60 % an das Kanalsystem angeschlossen sind. Die Doppelhäuser sind durch den höchsten Anteil von Flächen gekennzeichnet, die über einen bedingten Kanalanschluß verfügen (54 %). Dies bedeutet, daß eine nicht an die Kanalisation angeschlossene Fläche ihr Niederschlagswasser über eine benachbarte an das Kanalnetz angeschlossene Fläche entwässert. Die Doppelhäuser unterscheiden sich damit von den Stadtstrukturtypen der Gründerzeit, der Randbebauung der 20/30er Jahre, der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre und der Großwohnsiedlung der 70/80er Jahre. Das Niederschlagswasser der versiegelten Freiflächen der Großwohnsiedlung (Karte 6) und der Zeilenbebauung der 50/60er Jahre (Karte 5) versickert zu 85 bzw. 71 % über die Fugen oder in benachbarte unversiegelte Böden. Die Villen/Stadthäuser erreichen mit 37 % den nächst höheren Wert (Karte 4).

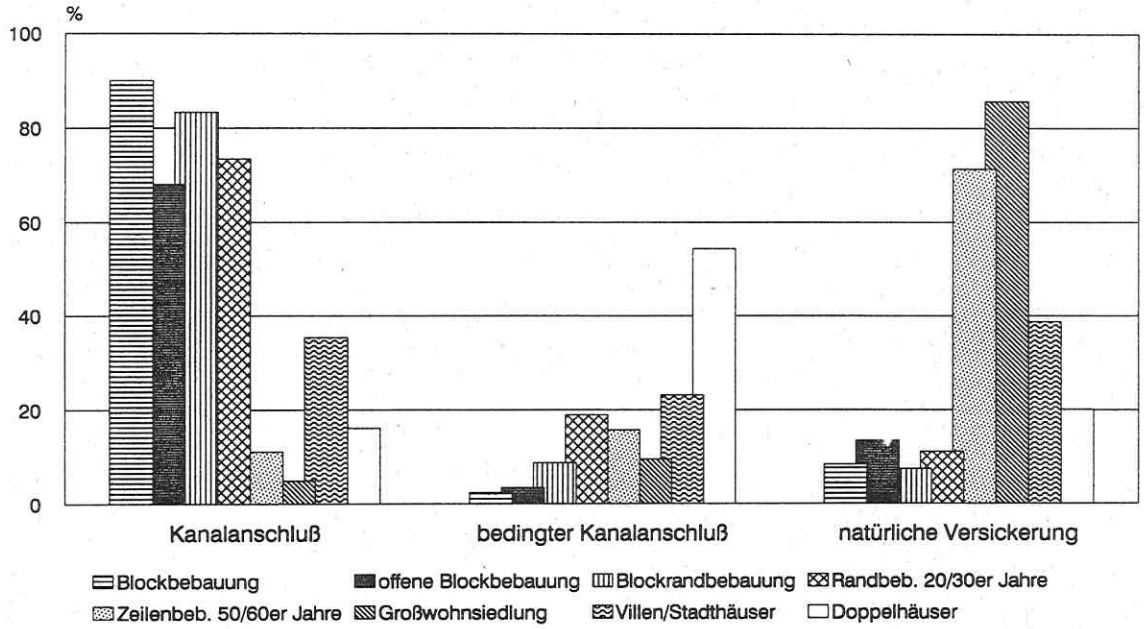


Abb. 5: Prozentualer Anteil ausgewählter Entwässerungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Leipzig (Mittelwerte)

1.4 Ergebnisse der Kartierung in Dresden

Im Stadtgebiet von Dresden wurden in 17 Untersuchungsgebieten Detailkartierungen zur Kennzeichnung des Ausmaßes der Bodenversiegelung durchgeführt. In Tab. 4 sind die Ergebnisse der Kartierung bezogen auf den Versiegelungsgrad, den prozentualen Anteil der überbauten Fläche, der versiegelten Freifläche und der unversiegelten Fläche aufgeführt. In Abbildung 6 sind die angeführten Werte bezogen auf die Blockfläche als Mittelwerte für die unterschiedlichen Stadtstrukturtypen dargestellt. Erwartungsgemäß liegt der Versiegelungsgrad in der gründerzeitlichen Blockbebauung sehr hoch. In diesem Stadtstrukturtyp sind bis zu 100 % der Flächen versiegelt. Einen hohen Anteil bis zu 80 % am Versiegelungsgrad nimmt die überbaute Fläche ein. Dementsprechend gering ist der Anteil der versiegelten Freiflächen bzw. der unversiegelten Böden. Die Schwankungsbreite des Versiegelungsgrades in diesem Bebauungstyp ist minimal. Gleichermaßen hohe Werte an versiegelter Fläche werden in der offenen Blockbebauung eingenommen. Hier bedingen die überbaute Fläche und die versiegelte Freifläche zu gleichen Anteilen einen Versiegelungsgrad von 68.41 %.

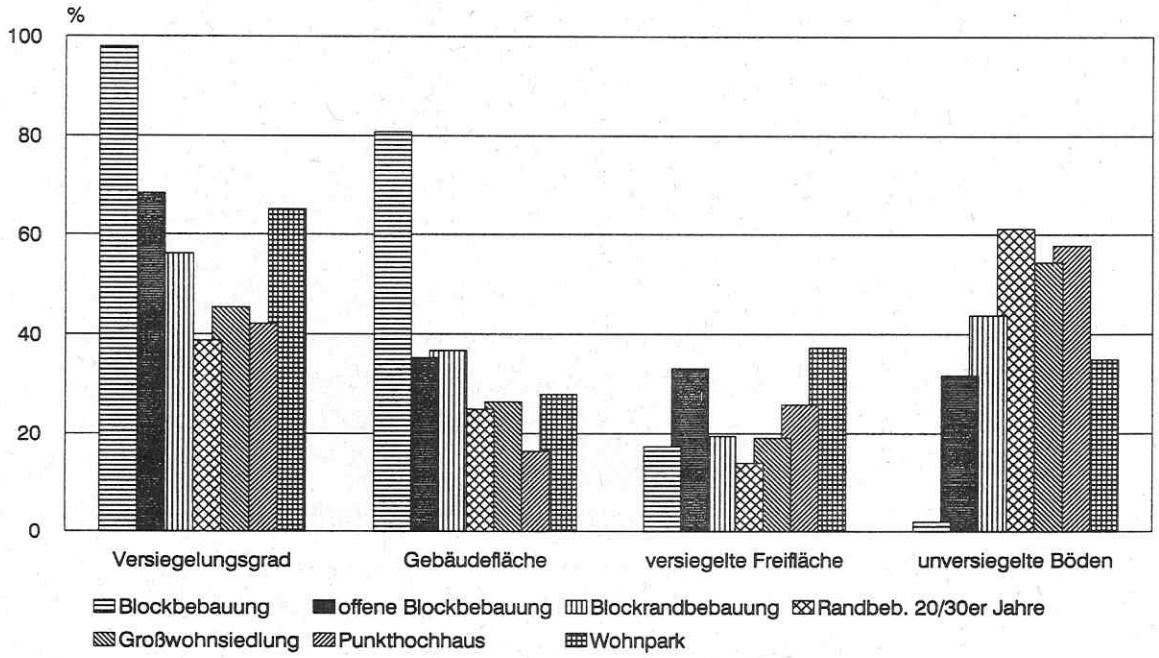


Abb. 6: Ausmaß der Bodenversiegelung in den Stadtstrukturtypen in Dresden (Mittelwerte)

Tab. 4: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche in den Untersuchungsgebieten in Dresden - **Fettdruck** = Untersuchungsfläche **ohne** Verkehrsfläche (halbe Straßenbreite, Bürgersteig, Verkehrsgrün, Parkplätze)

Nr.	Versiegelungs-grad %		Gebäude-fläche %		Wohngebäude %		Nebengebäude %		versiegelte Freifläche %		unversiegelte Freifläche %	
Blockbebauung												
1	100.00	**100.00**	53.70	**90.59**	47.21	**79.63**	6.50	**10.96**	46.30	**9.41**	0.00	**0.00**
2	96.25	**94.29**	49.28	**74.99**	46.24	**70.36**	3.04	**4.63**	46.97	**19.30**	3.75	**5.71**
3	99.93	**99.90**	55.98	**76.74**	49.36	**67.67**	6.62	**9.07**	43.95	**23.16**	0.07	**0.10**
offene Blockbebauung												
4	77.75	**71.34**	26.12	**33.63**	24.72	**31.84**	1.40	**1.79**	51.63	**37.71**	22.25	**28.66**
5	72.79	**65.47**	28.82	**36.94**	25.06	**32.12**	3.76	**4.82**	43.97	**28.53**	27.21	**34.53**
Blockrandbebauung												
6	66.16	**56.16**	28.30	**36.68**	27.85	**36.09**	0.45	**0.58**	37.86	**19.48**	33.84	**43.84**
Randbebauung der 20/30er Jahre												
7	56.85	**45.88**	23.11	**28.98**	21.28	**26.68**	1.83	**2.30**	33.74	**16.90**	43.15	**54.12**
8	45.18	**32.94**	17.63	**21.57**	17.63	**21.57**	0.00	**0.00**	27.55	**11.37**	54.82	**67.06**
9	40.73	**32.38**	18.32	**20.90**	18.32	**20.90**	0.00	**0.00**	22.41	**11.48**	59.27	**67.62**
10	53.15	**44.00**	23.70	**28.32**	23.62	**28.22**	0.08	**0.10**	29.45	**15.68**	46.86	**56.00**
Großwohnsiedlung												
11	55.46	**48.23**	23.52	**27.34**	23.32	**27.11**	0.20	**0.23**	31.94	**20.89**	44.54	**51.77**
12	54.67	**43.70**	20.37	**25.29**	20.20	**25.09**	0.16	**0.20**	34.30	**18.41**	45.33	**56.30**
13	53.44	**44.59**	22.35	**26.71**	22.35	**26.71**	0.00	**0.00**	31.09	**17.88**	46.56	**55.41**
Punkthochhausbebauung												
14	56.09	**42.16**	12.38	**16.31**	11.65	**15.35**	0.73	**0.96**	43.71	**25.85**	43.91	**57.84**
Wohnpark												
15	57.64	**56.27**	21.56	**22.26**	21.37	**22.07**	0.19	**0.19**	36.08	**34.01**	42.36	**43.73**
16	79.53	**75.92**	28.51	**33.54**	27.34	**32.16**	1.17	**1.38**	51.02	**42.38**	20.47	**24.08**
17	68.23	**63.21**	24.05	**27.86**	23.76	**27.53**	0.29	**0.33**	44.18	**35.35**	31.77	**36.79**

Der Wohnpark als relativ neuer Stadtstrukturtyp zeichnet sich durch einenVersiegelungsgrad von 65 % aus. Insbesondere fällt im Untersuchungsgebiet 16 (Karte 7) der hohe Anteil an versiegelter Freifläche auf. Bei diesem Bebauungstyp tritt als neues bauliches Merkmal die Tiefgarage auf. Was an der Oberfläche als Grünfläche anmutet, stellt sich unter Einbeziehung des Untergrundes als Versiegelung dar. Daher wurde diese Unterflurversiegelung mit zur versiegelten Freifläche gezählt. In seiner Bauform gleicht dieser Bebauungstyp der gründerzeitlichen Blockrandbebauung (Karte 2) oder der Randbebauung der 20/30er Jahre. In diesem Wohnpark wird durch die Integration der Tiefgarage in den Innenhofbereich zwar flächensparend gebaut aber der Eingriff in den Boden ist intensiver. Die Auswertung der Kartierung ergab für die Großwohnsiedlung und die Punkthochhausbebauung mittlere Versiegelungsgrade zwischen 42 und 45 %. Aufgrund der homogenen versiegelungssteuernden Faktoren (Grundrißumfang, Bauform, Größe der Freiflächen) ist auch im Stadtstrukturtyp Großwohnsiedlung die Schwankungsbreite der ermittelten Versiegelungsgrade gering. Die Punkthochhausbebauung ist gekennzeichnet durch einen geringen Anteil an Gebäudefläche (16,31 %). Die Betrachtung des Anteils an unversiegelter Freifläche dokumentiert

aber, daß die siebzehngeschossigen Gebäude gegenüber den drei bis fünf Geschossen der Randbebauung der 20/30er Jahre oder der Blockrandbebauung nur einen geringen Zuwachs an Grünfläche bringen. Hinzu kommt der Flächenverbrauch für die Erschließung solcher Wohnformen (Straßenbau, Wohnumfeld u.a.). In der Randbebauung der 20/30er Jahre sind durchschnittlich 61 % der Fläche unversiegelt. Der gemittelte Versiegelungsgrad von 38,8 % wird vor allem durch die Gebäudeüberbauung erzielt. Der Anteil an versiegelter Freifläche ist mit 13 % der geringste aller untersuchten Stadtstrukturtypen.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Untersuchung in Leipzig (Tab. 5 und 6) zeigt, daß in bezug auf den Versiegelungsgrad ähnliche Werte in der Großwohnsiedlung, der Blockrandbebauung und der offenen Blockbebauung ermittelt wurden. Für die Blockbebauung ergaben die Auswertungen für die Dresdener Gebiete etwas höhere Werte. Deutliche Abweichungen existieren für die Randbebauung der 20/30er Jahre. Bei einer näheren Betrachtung der Untersuchungen wird deutlich, daß der Anteil der überbauten Fläche an der Gesamtfläche in Leipzig fast doppelt so hoch ist wie in Dresden, so daß sich der höhere Versiegelungsgrad ergibt.

Tab. 5: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche für die Strukturypen in Dresden (bezogen auf die Blockfläche)

Versiegelungs-grad %	**Gebäude-fläche** %	**Wohngebäude** %	**Nebengebäude** %	**versiegelte Freifläche** %	**unversiegelte Freifläche** %
Blockbebauung n = 2					
98.06	**80.77**	**72.55**	**8.22**	**17.29**	**1.94**
offene Blockbebauung n = 2					
68.41	**35.29**	**31.98**	**3.31**	**33.12**	**31.60**
Blockrandbebauung n = 1					
56.16	**36.68**	**36.09**	**0.58**	**19.48**	**43.84**
Randbebauung der 20/30er Jahre n = 4					
38.80	**24.94**	**25.90**	**0.60**	**13.86**	**61.20**
Großwohnsiedlung n = 3					
45.50	**26.44**	**26.30**	**0.14**	**19.06**	**54.49**
Punkthochhausbebauung n = 1					
42.16	**16.31**	**15.35**	**0.96**	**25.85**	**57.84**
Wohnpark n = 3					
65.13	**27.89**	**27.25**	**0.63**	**37.24**	**34.87**

Tab. 6: Versiegelungsgrad und prozentualer Anteil der einzelnen Flächennutzungen an der Gesamtfläche für die Stadtstrukturtypen in Leipzig (bezogen auf die Blockfläche)

Versiegelungs-grad %	Gebäude-Fläche %	Wohngebäude %	Nebengebäude %	versiegelte Freifläche %	unversiegelte Freifläche %
Blockbebauung n = 6					
80.96	**56.82**	**43.63**	**13.19**	**24.14**	**19.03**
offene Blockbebauung n = 2					
66.75	**46.10**	**36.15**	**9.95**	**20.65**	**33.25**
Blockrandbebauung n = 5					
67.96	**50.20**	**47.42**	**2.78**	**17.76**	**32.04**
Randbebauung der 20/30er Jahre n = 9					
59.56	**42.10**	**40.28**	**1.82**	**17.45**	**40.43**
Zeilenbebauung der 50/60er Jahre n = 2					
27.10	**14.95**	**14.85**	**0.10**	**7.06**	**72.90**
Villen/Stadthäuser n = 2					
36.25	**24.10**	**21.00**	**3.10**	**12.15**	**63.75**
Doppelhäuser n = 1					
42.90	**25.30**	**20.20**	**5.10**	**17.60**	**57.10**
Großwohnsiedlung n = 6					
49.32	**34.50**	**34.38**	**0.08**	**14.85**	**50.68**

Eine Gegenüberstellung der gemittelten Versiegelungsgrade (zuzüglich integrierter halber Straßenfläche) mit der Untersuchung von HEBER u. LEHMANN (1993) in Dresden (Tab. 7) zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Tab. 7: Vergleich der durchschnittlichen Versiegelungsgrade verschiedener Stadtstrukturtypen in Dresden

	Durchschnittlicher Versiegelungsgrad	
	HEBER u. LEHMANN	Forschungsvorhaben
geschlossene Blockbebauung	89	98
offene Blockbebauung	74	75
mehrgeschossiger Wohnnungsbau bzw. Großwohn.	53	54
Siedlungen < 3 Geschosse bzw. Randb. 20/30er Jahre	51	49

Versiegelungsarten-Kennziffer A (Nutzung)

Abbildung 7 verdeutlicht, daß in den Stadtstrukturtypen Randbebauung der 20/30er Jahre und der Blockrandbebauung (Karte 2) der Autoverkehr völlig aus der Flächennutzung ausgegrenzt ist. Hiermit heben sich diese Bebauungstypen deutlich von den übrigen ab. Nicht dargestellt ist für die Blockrandbebauung die Nutzung der versiegelten Freifläche als Sonderfläche (50 %), so daß sich für die begangene Fläche kein Wert von 100 % ergeben kann. In den gründerzeitlichen Strukturtypen, der Großwohnsiedlung und der Punkthochhausbebauung werden über 50 % der Flächen durch Fußgänger genutzt. In der offenen Blockbebauung werden ca. 43 % der versiegelten Freifläche als Zufahrten verwendet. Hierdurch unterscheidet sich dieser Bebauungstyp deutlich von den anderen Stadtstrukturtypen. Der ruhende Verkehr nimmt in den relativ jüngeren Stadtstrukturtypen Großwohnsiedlung, Punkthochhausbebauung und Wohnpark einen ca. 10 %igen Anteil an der versiegelten Freifläche ein. In den gründerzeitlichen Quartieren ist dieser Anteil verschwindend klein bzw. nimmt überhaupt keinen Raum ein. In den Wohnparks tritt als neue Nutzungsart die Tiefgarage auf (Karte 7). Die einen prozentualen Anteil von ca. 32 % an der versiegelten Freifläche einnimmt.

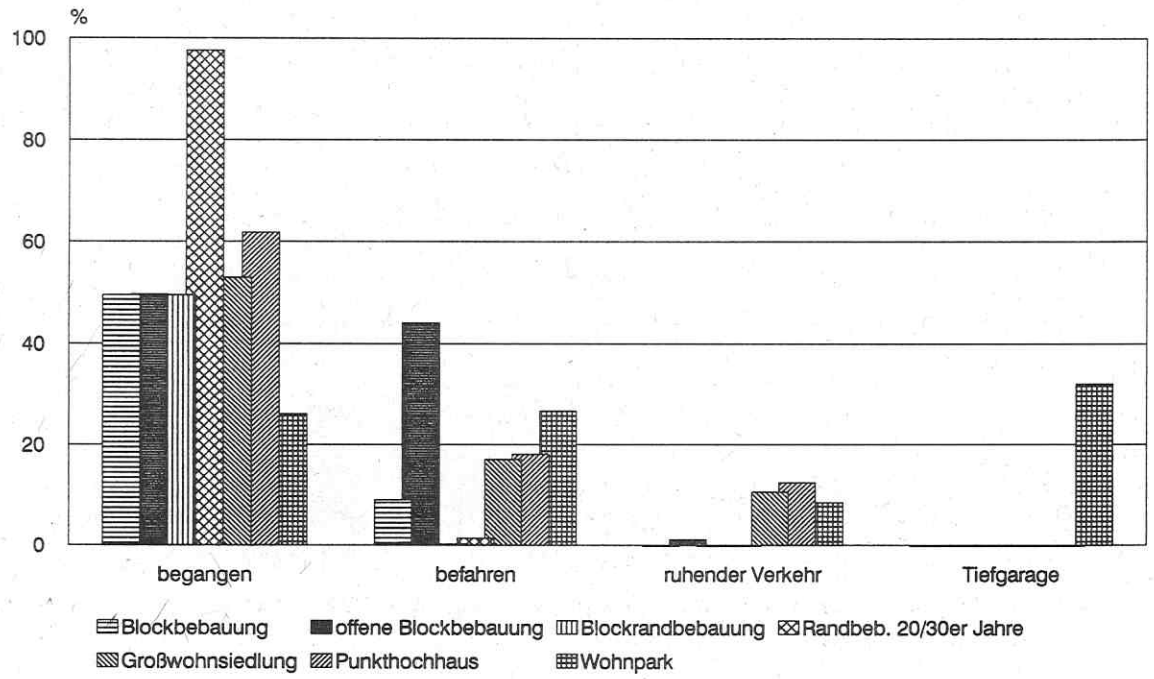


Abb. 7: Prozentualer Anteil ausgewählter Nutzungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden (Mittelwerte)

Versiegelungsarten-Kennziffer B (Belagsart)

In den Abbildungen 8 und 9 sind die mittleren prozentualen Anteile von ausgewählten Belagsarten an der versiegelten Freifläche dargestellt. In der Großwohnsiedlung und der Punkthochhausbebauung sind über ¼ der Flächen mit gebundenen Decken befestigt und noch ca. 20 % werden in der gründerzeitlichen Blockbebauung erreicht. In den übrigen Stadtstrukturtypen nimmt diese Belagsart eine untergeordnete Rolle ein. Für die Großformatplatten ergibt sich ein Maximum in der Großwohnsiedlung. Gegenüber den Untersuchungsgebieten in Leipzig fällt dieses aber nicht so eindeutig aus. In den älteren Stadtstrukturtypen tritt diese Belagsart nur auf, wenn Baumaßnahmen durchgeführt wurden. Demzufolge ergeben sich Werte zwischen 11 und 0 %. Plattenbeläge kommen nur in einigen Bebauungstypen vor und nehmen einen geringen Anteil an der versiegelten Freifläche ein. Die Gruppe der Betonverbund-/Klinkersteine tritt verstärkt in der offenen Blockbebauung und dem Wohnpark auf. In der offenen Blockbebauung sind es vor allem die Klinkersteine, die für die Befestigung der Gehwege Anwendung fanden und in den Wohnparks (Karte 7) sind es die Betonverbundsteine.

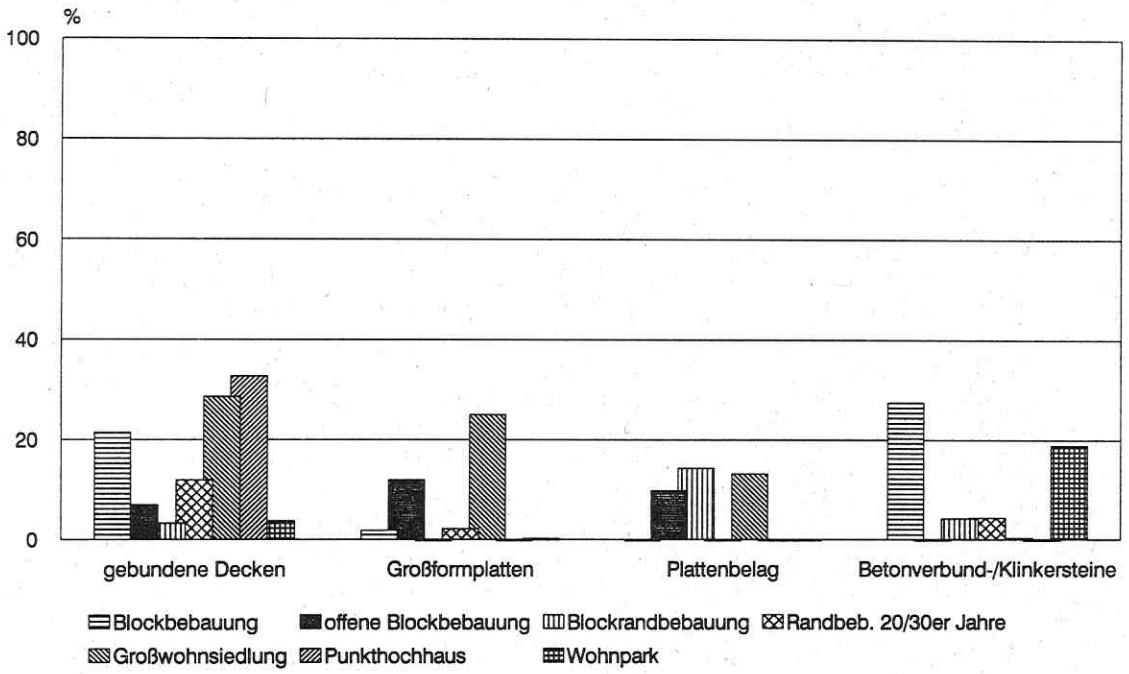


Abb. 8: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden (Mittelwerte)

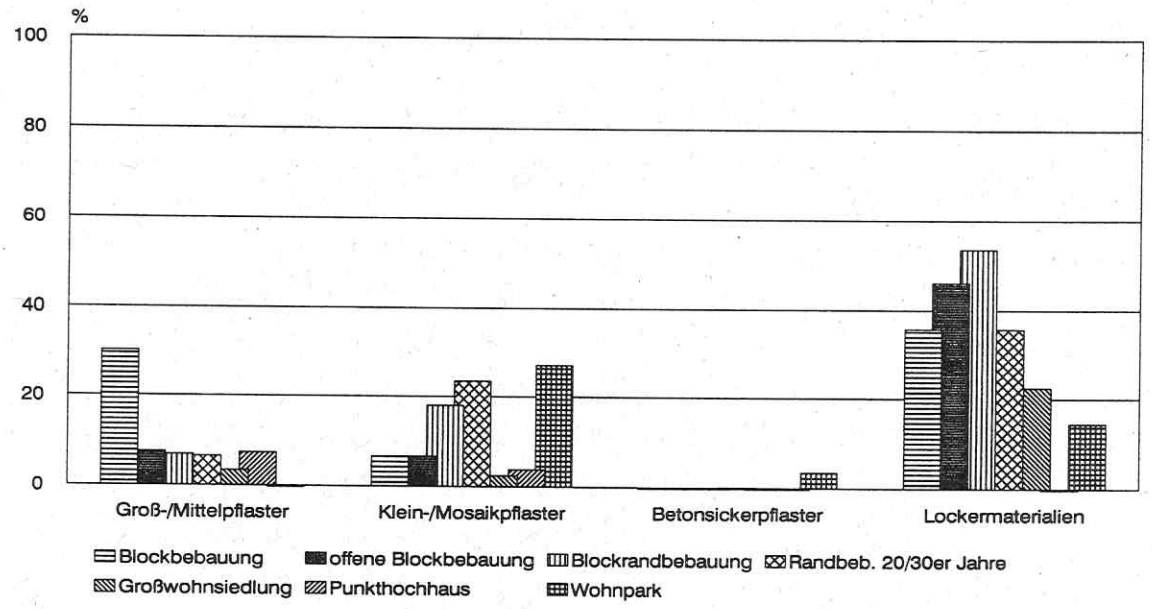


Abb. 9: Prozentualer Anteil ausgewählter Belagsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden (Mittelwerte)

Im Bebauungstyp gründerzeitliche Blockbebauung sind 30 % der Böden mit Groß-/Mittelpflaster versiegelt. In den übrigen Stadtstrukturtypen sind diese Pflasterarten nur untergeordnet (< 10 %) für die Befestigung der Freiflächen verwendet worden. Die Kartierung der Oberflächenmaterialien ergab für das Klein- und Mosaikpflaster einen ca. 20 %igen Anteil in der Blockrandbebauung (Karte 2) und der Randbebauung der 20/30er Jahre. In dem Bebauungstyp Wohnpark (Karte 7) sind über ¼ der versiegelten Freifläche mit Klein-/oder Mosaikpflaster befestigt. Die neueren Befestigungsarten wie Betongittersteine, Betonpflaster mit Sickeröffnungen oder Rasenfugen treten mit 3,5 % nur im Wohnpark auf. Die relativ hohen Anteile der Lockermaterialien in der gründerzeitlichen Blockbebauung, der Blockrandbebauung (Karte 2), der offenen Blockbebauung, der Großwohnsiedlung und dem Wohnpark resultieren aus dem Vorhandensein von Sonderflächen (Baustellen, Spielflächen). In dem Bebauungstyp Randbebauung der 20/30er Jahre sind es vor allem die Gehwege, die mit Lockermaterialien (Sanden, Kiesen) befestigt sind. Die wassergebundenen Decken nehmen in allen Stadtstrukturtypen nur verschwindend kleine Anteile bis 1,8 % an der versiegelten Freifläche ein.

Versiegelungsarten-Kennziffer C (Entwässerungsart)

In Abbildung 10 sind die Entwässerungsarten der versiegelten Freiflächen dargestellt. Es zeigt sich, daß in der Blockrandbebauung und der Großwohnsiedlung über 50 % der befestigten Fläche über keinen Kanalanschluß verfügen, sondern das Niederschlagswasser über die Fugen oder in randliche unversiegelte Flächen versickern kann. In der Blockbebauung und der offenen Blockbebauung versickern nur 38 bzw. 22 % des Niederschlagswasser auf diesen Wegen. Für die Regenwasserversickerung der versiegelten Freiflächen in der Randbebauung der 20/30er Jahre und der Punkthochhausbebauung ergeben sich ungünstige Werte. Insbesondere in der Randbebauung der 20/30er Jahre wäre eine Niederschlagsversickerung in unversiegelte Böden möglich, da dieser Stadtstrukturtyp über einen hohen Anteil an nicht befestigten Freiflächen verfügt. Im Stadtstrukturtyp Wohnpark werden durch die Anlage der Tiefgarage ca. 50 % der versiegelten Freiflächen durch eine Drainage entwässert.

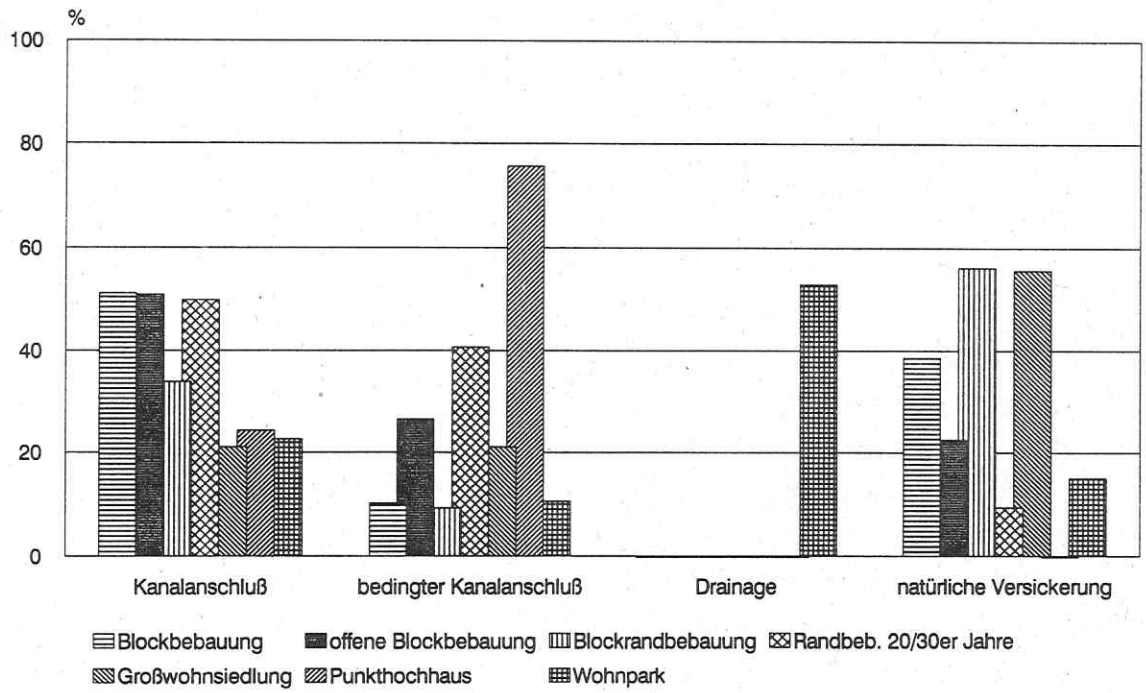


Abb. 10: Prozentualer Anteil ausgewählter Entwässerungsarten der versiegelten Freiflächen in den Stadtstrukturtypen in Dresden (Mittelwerte)

1.5 Zusammenfassung

Diese erste Bestandsanalyse des Ausmaßes der Bodenversiegelung in ausgewählten Stadtstrukturtypen zeigt, daß die Grundstücke der gründerzeitlichen Blockbebauung am stärksten von Versiegelungsmaßnahmen betroffen sind. Der hohe Versiegelungsgrad wird durch die Hofüberbauung und die damit verbundene Versiegelung der Erschließungsflächen hervorgerufen. Erwartungsgemäß sind nur wenige Bereiche in der Blockbebauung unversiegelt, so daß kaum Raum für die Niederschlagsversickerung vorhanden ist. Ferner verfügen die befestigten Flächen größtenteils über einen Kanalanschluß. Im Hinblick auf Sanierungsmaßnahmen in Form von Hofentkernungen könnte das hohe Ausmaß der Bodenversiegelung vermindert werden. Durch den Rückbau der Nebengebäude würde der Versiegelungsgrad im Durchschnitt um ca. 10% gesenkt werden. Eine weitere Verringerung läßt sich über den Rückbau von Erschließungswegen realisieren. Die so gewonnenen unversiegelten Freiflächen sollten als vielgestalterische Grünflächen genutzt werden. Eine Nutzung als Stellplatzfläche sollte unterbunden werden. Hierdurch wird nicht nur der Wiedererlangung von Bodenfunktionen durch Flächenentsiegelung der Vorrang gegeben, sondern auch die Entstehung von Schallemissionen verhindert und eine mikroklimatische Verbesserung des Innenhofklimas erzielt. Zusätzlich würden Flächen für die Versickerung des Regenwassers zur Verfügung stehen. Findet keine Hofentkernung statt, kann versucht werden durch eine kleinräumige Hofumgestaltung einen Rückbau der versiegelten Flächen zu erzielen. Spezielle Programme zur Wohnumfeldverbesserung können Anreize geben, Maßnahmen zur Entsiegelung und Begrünung durchzuführen. In den Stadtstrukturtypen Zeilenbebauung der 50/60er Jahre, Randbebauung der 20/30er Jahre, den Großwohnsiedlungen der 70/80er Jahre, den Villen/Stadthäusern, den Doppelhäusern und auch den Wohnanlagen der 90er Jahre könnten die Niederschlagsmengen von den Dächern in die vorhandenen unversiegelten Böden versickern. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, daß vor allem in den Stadtstrukturtypen Randbebauung der 20/30er Jahre, der Blockrandbebauung und auch der Doppelhausbebauung der Hauptanteil der befestigten Flächen über einen Kanalanschluß verfügen und nur von geringen Anteilen dieser Flächen das Niederschlagswasser in randliche unversiegelte Böden entwässert wird. Bei einem ausreichenden Gefälle wäre eine Abkopplung dieser Flächen von der Kanalisation möglich. Die Auswertung der Belagsarten hat gezeigt, daß vornehmlich die gründerzeitlichen Strukturtypen und die Großwohnsiedlungen der 70/80er Jahre durch die Beläge (Klinkersteine bzw. Großformatplatten) geprägt sind, die zur jeweiligen Bauzeit vorhanden waren. In den neueren Wohnbebauungstypen ist eine größere Variationsbreite der Beläge vorhanden. Eine Belagänderung tritt vor allem im Zusammenhang mit Sanierungsmaßnahmen in den verschiedenen Stadtstrukturtypen auf.

1.6 Literatur

BERLEKAMP, L.-R. u. PRANZAS, N. (1990): Erhebung von Bodenversiegelung in Ballungsräumen.- In: Bodenschutz - Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Boden, Landschaft und Grundwasser. ROSENKRANZ, D., BACHMANN, G., EINSELE, G. u. HARRES, H.-M., 1988, Bd. 1, 1 - 23, Berlin

BERLEKAMP, L.-R. u. PRANZAS, N (1992): Erfassung und Bewertung von Bodenversiegelung unter hydrologisch-stadtplanerischen Aspekten am Beispiel eines Teilraums von Hamburg.- Dissertation, Hamburg

HEBER, H. u. LEHMANN, I (1993): Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten.- (= IÖR Schriften, H. 5), Dresden

Stadt Leipzig -Hrsg- (1993): Ortsteilkatalog der Stadt Leipzig.- Leipzig

Stadt Leipzig -Hrsg- (1994): Flächennutzungsplan der Stadt Leipzig.- Leipzig

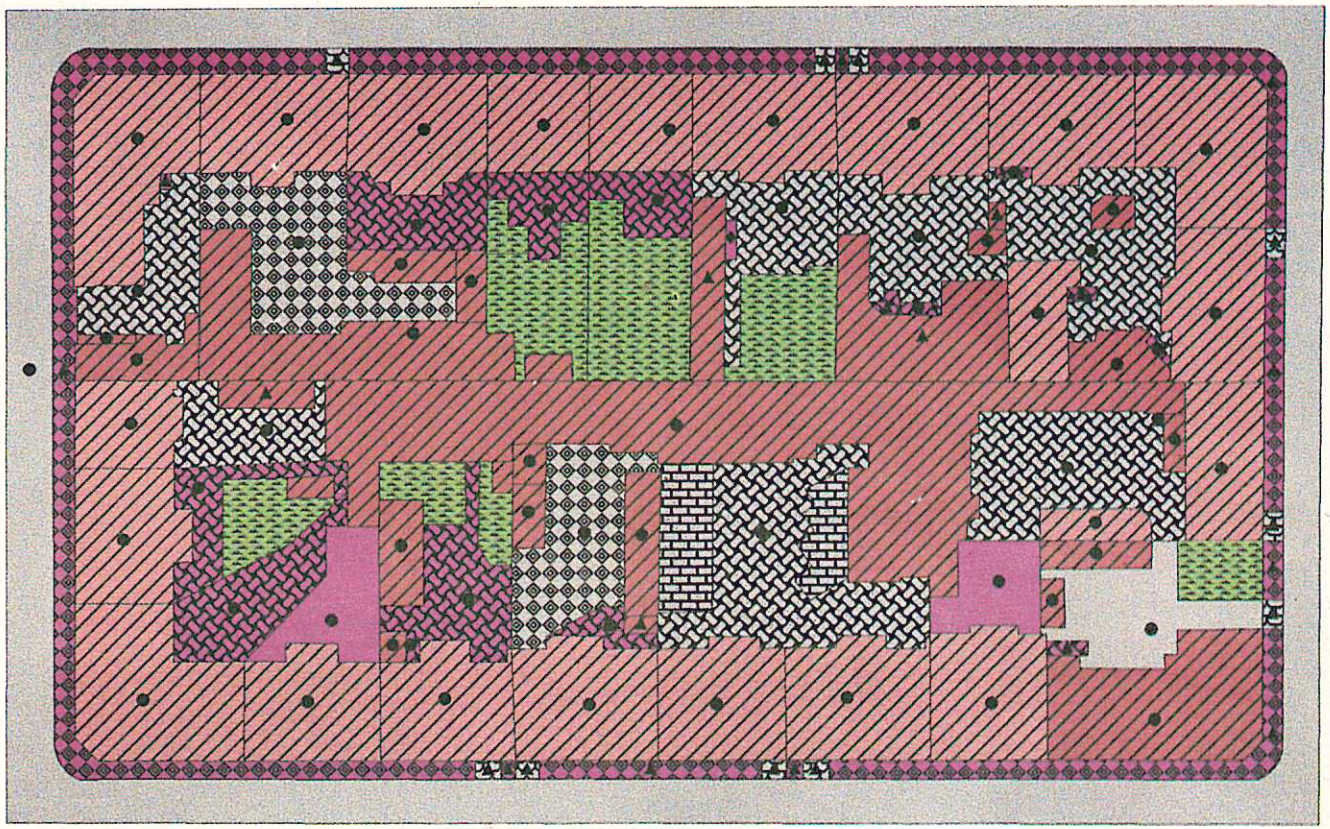
Anlage

Karte 1

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Blockbebauung in Leipzig, Wigandstraße

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



N

Meter

0 10 20

Belagsart

- gebundene Decken
- Betonverbund/Klinkerst.
- Groß-/Mittelpflaster
- Klein-/Mosaikpflaster
- Betonsickerpflaster
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Nutzungsart

- geneigte Dächer
- Flachdächer
- begangen
- befahren
- unversiegelt

Entwässerung

- Kanalanschluß
- bedingter Kanalanschl.
- Drainagen

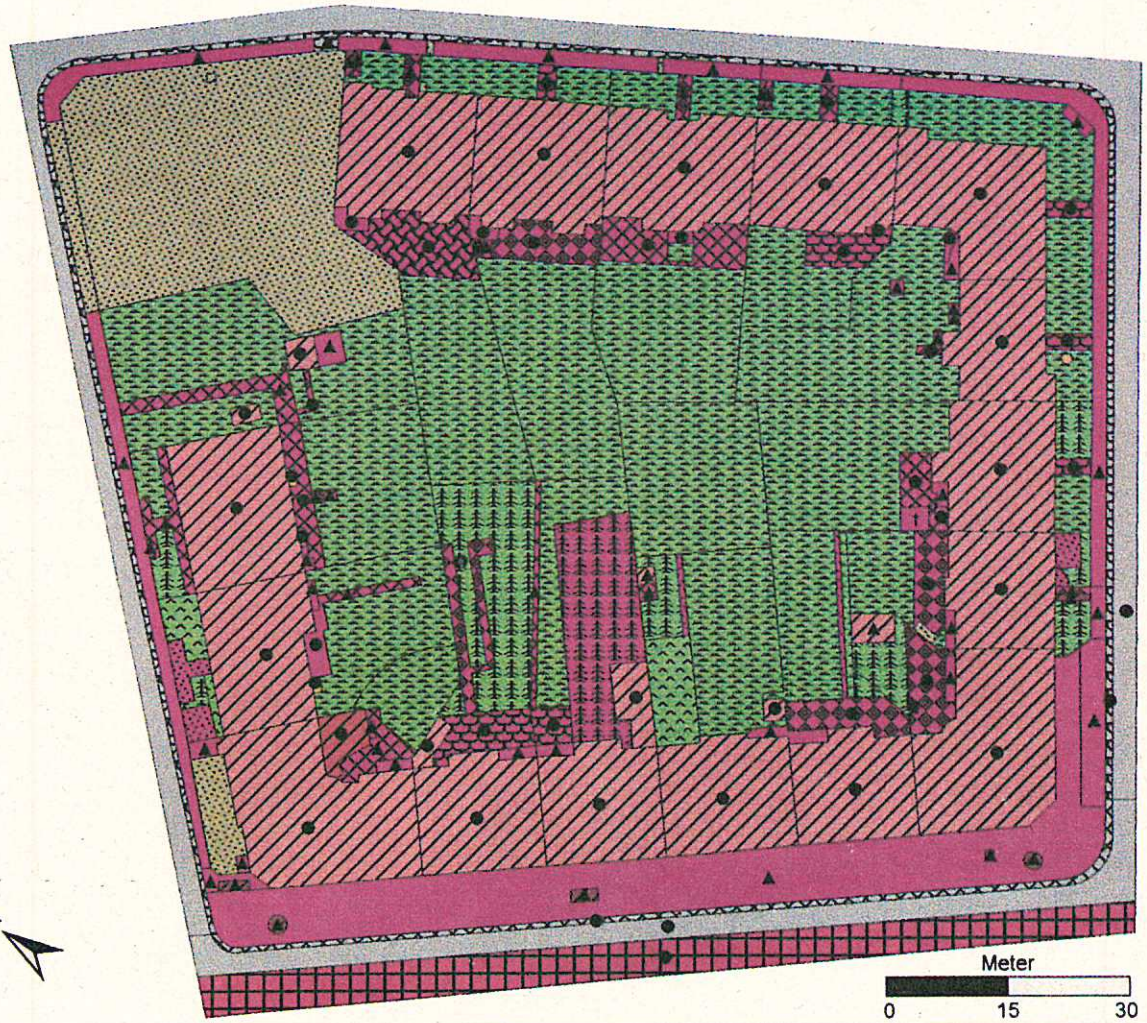
Entwurf: T. Keidel, B. Münchow
Kartographie: T. Keidel

Karte 2

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Blockrandbebauung in Dresden, Österreicher Straße

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



Nutzungsart

- geneigte Dächer
- Flachdächer
- Container
- begangen
- befahren
- keine Nutzung
- Wasserfläche
- Gleiskörper
- Sonderfläche
- unversiegelt

Belagsart

- gebundene Decken
- Großformplatten
- Plattenbelag
- Betonverbund/Klinkerst.
- Groß-/Mittelpflaster
- Klein-/Mosaikpflaster
- Lockermaterialien
- vegetationslose Böden
- bewachsene Böden
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Entwässerung

- Kanalanschluß
- bedingter Kanalanschluß
- Stauwasser
- Entwässerung unklar

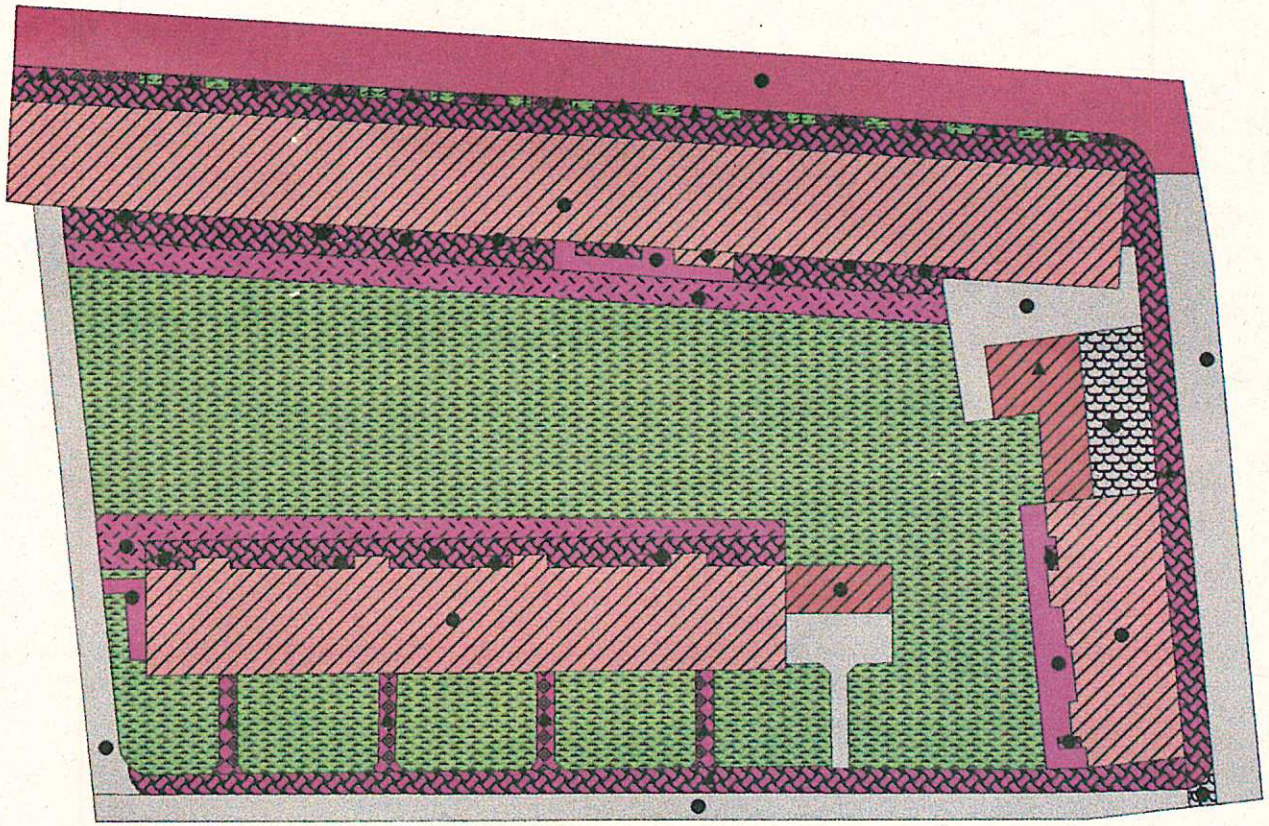
Entwurf: T. Keidel; B. Münchow
Kartographie: T. Keidel

Karte 3

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Randbebauung 20/30er Jahre in Leipzig, Zschochersche Straße Westteil

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



Meter
0 15 30

N

Nutzungsart

- geneigte Dächer
- Flachdächer
- begangen
- befahren
- Gleiskörper
- unversiegelt

Belagsart

- gebundene Decken
- Betonverbund/Klinkerst.
- Groß-/Mittelpflaster
- Klein-/Mosaikpflaster
- ungebundene Decken
- bewachsene Böden
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Entwässerung

- Kanalanschluß
- bedingter Kanalanschluß

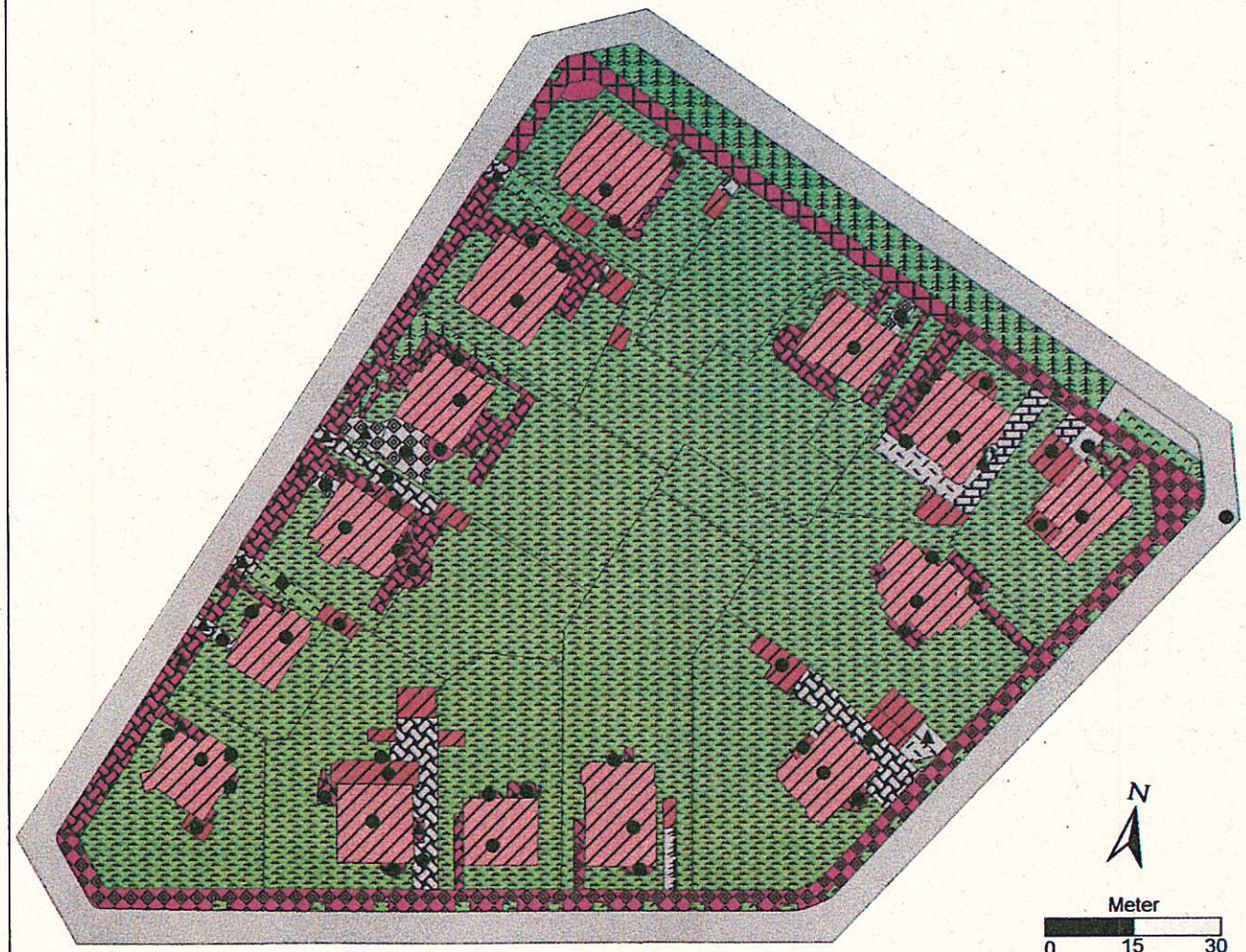
Entwurf: T. Keidel; B. Münchow
Kartographie: T. Keidel

Karte 4

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Villen/Stadthäuser in Leipzig, Wasserturmstraße

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



N

Meter

0 15 30

Nutzungsart

- geneigte Dächer
- Flachdächer
- Container
- begangen
- befahren
- unversiegelt

Belagsart

- gebundene Decken
- Großformplatten
- Natursteinplatten
- Plattenbelag
- Betonverbund/Klinkerst.
- Groß-/Mittelpflaster
- Klein-/Mosaikpflaster
- ungebundene Decken
- Betonsickerpflaster
- vegetationslose Böden
- bewachsene Böden
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Entwässerung

- Kanalanschluß
- bedingter Kanalanschluß
- Stauwasser

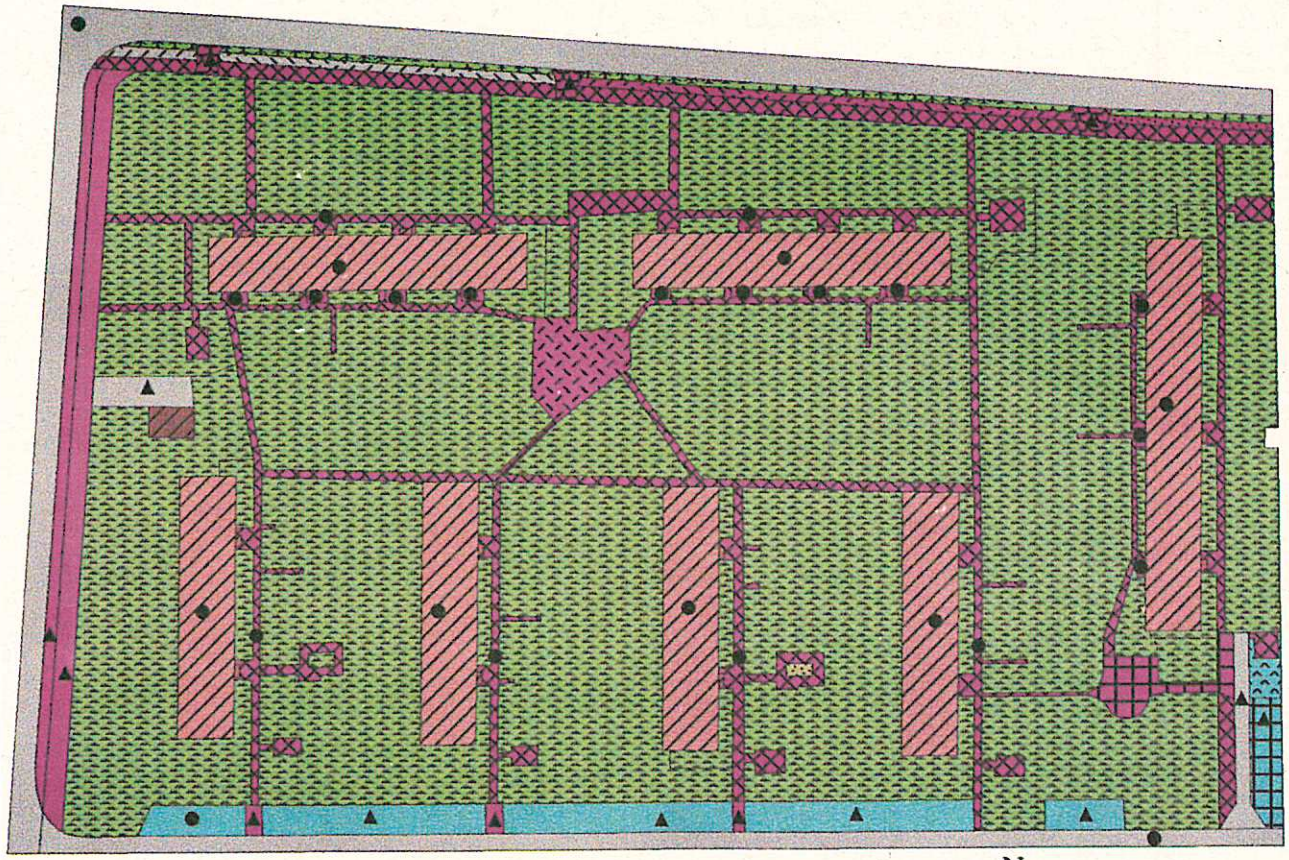
Entwurf: T. Keidel; B. Münchow
Kartographie: T. Keidel

Karte 5

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Zeilenbebauung der 50/60er Jahre in Leipzig, Permoserstraße

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



N

Meter

0 15 30

Nutzungsart

- geneigte Dächer
- Flachdächer
- Container
- begangen
- befahren
- ruhender Verkehr
- Sonderfläche
- unversiegelt

Belagsart

- gebundene Decken
- Großformplatten
- Plattenbelag
- Groß-/Mittelpflaster
- ungebundene Decken
- Lockermaterialien
- vegetationslose Böden
- bewachsene Böden
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Entwässerung

- ● Kanalanschluß
- ▲ bedingter Kanalanschluß

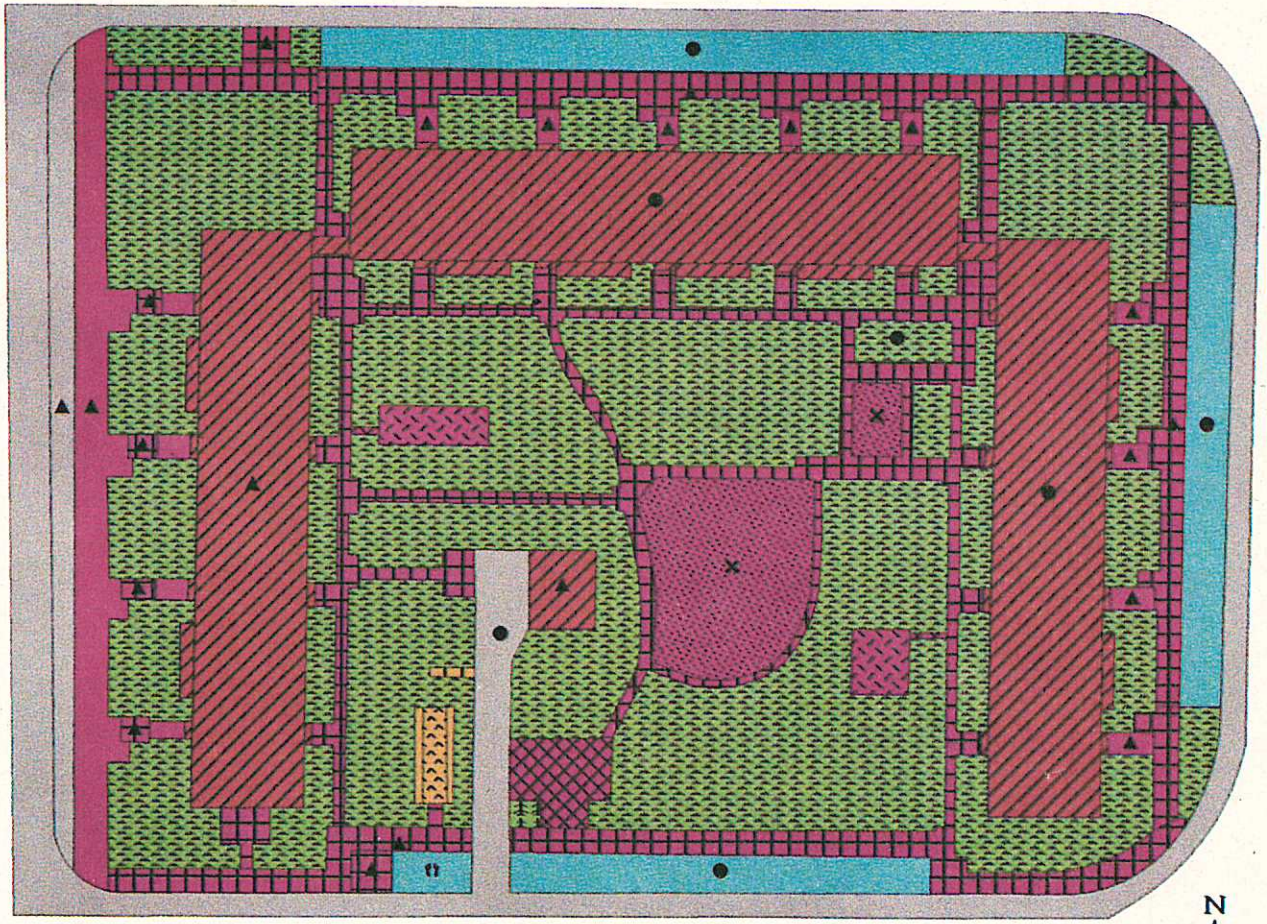
Entwurf: T. Keidel; B. Münchow
Kartographie: T. Keidel

Karte 6

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Großsiedlung in Leipzig, Borsdorfer Straße

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



Meter
0 15 30

N

Nutzungsart
- Flachdächer
- begangen
- befahren
- ruhender Verkehr
- keine Nutzung
- unversiegelt

Belagsart
- gebundene Decken
- Großformplatten
- Plattenbelag
- ungebundene Decken
- Lockermaterialien
- vegetationslose Böden
- bewachsene Böden
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Entwässerung
- ● Kanalanschluß
- ▲ bedingter Kanalanschluß
- ⇅ Stauwasser
- × technische Entwässerung

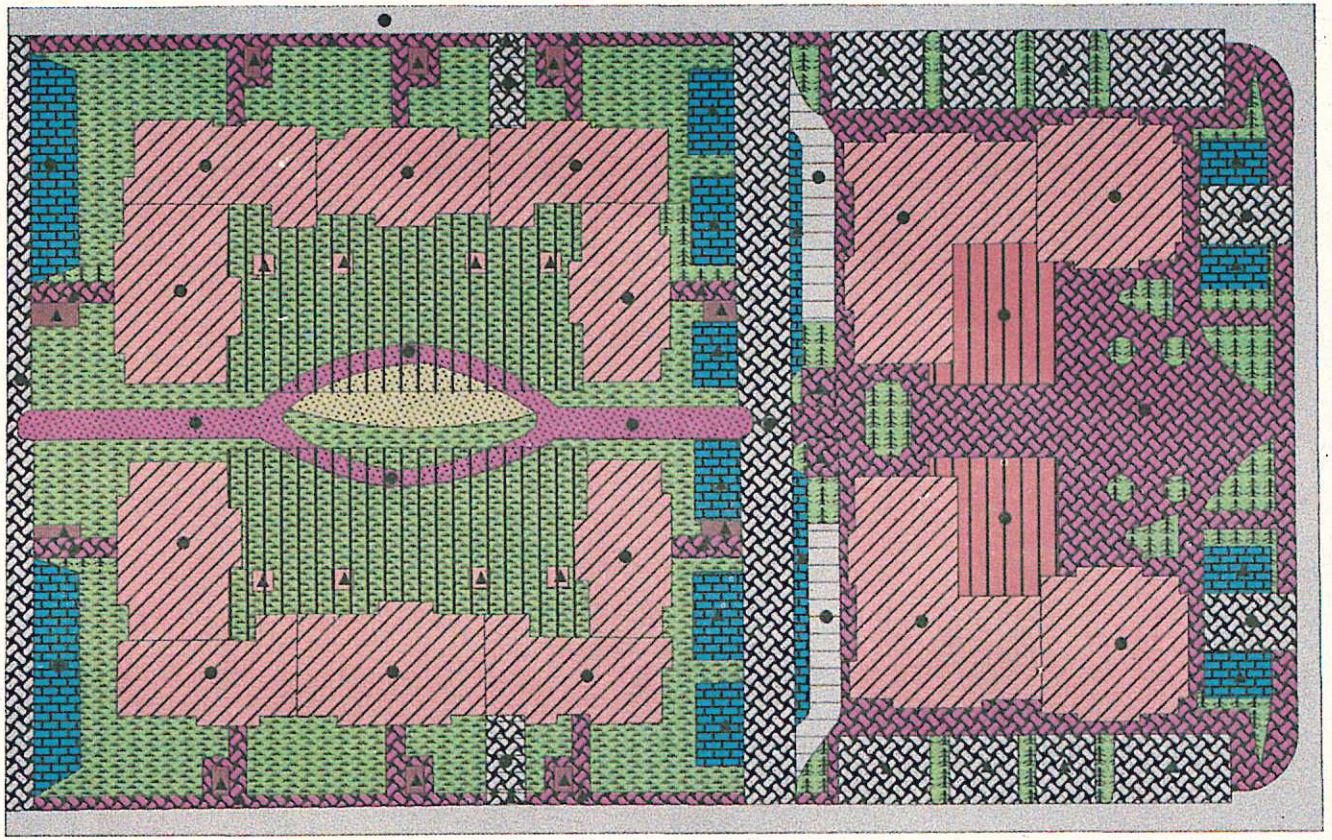
Entwurf: T. Keidel; B. Münchow
Kartographie: T. Keidel

Karte 7

Bodenversiegelung im Stadtbereich

Wohnpark der 90er Jahre in Dresden, Salzburger Straße

Nutzungs-, Belags- und Entwässerungsart



Nutzungsart

- geneigte Dächer
- Flachdächer
- Container
- begangen
- befahren
- ruhender Verkehr
- Sonderfläche
- unversiegelt

Belagsart

- gebundene Decken
- Betonverbund/Klinkerst.
- Lockermaterialien
- Betonsickerpflaster
- bewachsene Böden
- flächendeck. Vegetation
- Dachbeläge

Differenzierungen

- Tiefgarage
- Garagenzufahrt

Entwässerung

- Kanalanschluß
- bedingter Kanalanschl.

N

Meter

0 15 30

Entwurf: T. Keidel, B. Münchow

Kartographie: T. Keidel

V Erarbeitung von Übersichtskarten zur Versiegelungsintensität mit verschiedenen Fernerkundungsmethoden

Maik Netzband und Gotthard Meinel

Inhaltsverzeichnis

1	Einordnung des Forschungsprojekts	V-4
2	Darstellung der Versiegelungsproblematik	V-4
2.1	Parameter der Versiegelung	V-5
2.2	Terrestrische Versiegelungserhebung	V-6
2.3	Fernerkundliche Versiegelungserhebung	V-8
3	Theoretische Überlegungen zur Fernerkundungsnutzung	V-10
3.1	Auflösung/Maßstab	V-10
3.2	Verfahren der Bildauswertung	V-12
3.2.1	Visuelle Interpretation photographischer Bilder	V-12
3.3.2	Klassifikation	V-12
3.2.3	Mustererkennung	V-13
3.3	Bestimmbarkeit von Oberflächenbedeckungen	V-13
3.4	Verdeckungsproblematik	V-15
3.5	Beschattungsproblematik	V-15
3.6	Sensitivität fernerkundlicher Versiegelungserhebungen über den NDVI	V-16
4	Charakterisierung der Aufnahmesysteme der Fernerkundung	V-16
4.1	Landsat-Thematic Mapper	V-16
4.1.1	Aufnahmeparameter	V-17
4.1.2	Eignung für Versiegelungserhebungen	V-17
4.1.3	Kostenabschätzung	V-18
4.2	SPOT (multispektral und panchromatisch)	V-19
4.2.1	Aufnahmeparameter	V-19
4.2.2	Eignung für Versiegelungserhebungen	V-19
4.2.3	Kostenabschätzung	V-20
4.3	Colorinfrarotluftbilder	V-20
4.3.1	Aufnahmeparameter	V-20
4.3.2	Eignung für Versiegelungserhebungen	V-21
4.3.3	Kostenabschätzung	V-22
4.4	Airborne Thematic Mapper	V-23
4.4.1	Aufnahmeparameter	V-23
4.4.2	Eignung für Versiegelungserhebungen	V-24
4.4.3	Kostenabschätzung	V-25
4.5	KWR 1000 (DD 5)	V-25
4.5.1	Aufnahmeparameter	V-26

4.5.2	Eignung für Versiegelungserhebungen	V-26
4.5.3	Kostenabschätzung	V-27
4.6	KFA 1000	V-27
4.6.1	Aufnahmeparameter	V-28
4.6.2	Eignung für Versiegelungserhebungen	V-28
4.6.3	Kostenabschätzung	V-30
5	Datenmaterial und Auswerteverfahren	V-30
5.1	Datenmaterial	V-30
5.1.1	Terrestrisches Datenmaterial	V-30
5.1.1.1	Terrestrische Untersuchungsdaten von Dresden	V-30
5.1.1.2	Terrestrische Untersuchungsdaten von Leipzig	V-31
5.1.2	Fernerkundliches Datenmaterial	V-33
5.2	Auswerteverfahren	V-34
5.2.1	Grundlagen des Auswerteverfahrens	V-34
5.2.2	Übersicht und Erläuterung des Verfahrens	V-36
5.2.2.1	Kalibrierung mit terrestrischen Referenzdaten	V-38
5.2.2.2	Kalibrierung ohne terrestrische Referenzdaten	V-38
5.3	Kartographische Ausgabe	V-39
6	Landsat-TM-Satellitendaten zur Versiegelungserhebung	V-40
6.1	Datenauswahl und Georeferenzierung	V-40
6.1.1	Untersuchungsgebiet Dresden	V-40
6.1.2	Untersuchungsgebiet Leipzig	V-41
6.2	Berechnung der Vegetationsindexbilder und Diskussion	V-41
6.3	Korrelation zwischen NDVI und Bodendaten der Versiegelung	V-45
6.4	Bestimmungsgenauigkeit des Erhebungsverfahrens	V-46
6.4.1	Bestimmungsgenauigkeit der Verfahren mit und ohne Bodendaten	V-46
6.4.2	Vergleich verschiedener Landsat-Datensätze	V-47
6.4.3	Vergleich verschiedener Sensoren (Landsat-SPOT)	V-49
7	SPOT-Satellitendaten zur Versiegelungserhebung	V-51
7.1	Datenauswahl und Georeferenzierung	V-51
7.2	Berechnung des Vegetationsindexbildes	V-51
7.3	Korrelation zwischen NDVI und Bodendaten der Versiegelung	V-53
8	Zusammenfassung und Ausblick	V-55

Verzeichnis der Tabellen V-56

Verzeichnis der Abbildungen V-57

Verzeichnis der Karten V-57

Verzeichnis der Anlagen V-58

Literaturverzeichnis V-59

1 Einordnung des Forschungsprojekts

Dem Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. Dresden wurde die Bearbeitung eines Teilprojekts übertragen, welches die Möglichkeiten der Fernerkundung zur Versiegelungserhebung zum Forschungsgegenstand hat. Die Projektarbeit wurde im Februar 1995 aufgenommen und wird voraussichtlich im April 1997 abgeschlossen.
Das Projekt ist in drei Teile gegliedert. In einem ersten Arbeitsschritt wurden Versiegelungskarten auf Basis der Satellitensysteme Landsat und SPOT erarbeitet. Im zweiten werden die Daten einer ATM-Scannerbefliegung analysiert, in dem diese Daten einer Landnutzungsklassifikation, einer Vegetationsindexberechnung mit anschließender Transformation auf Versiegelungswerte und einer Thermalauswertung unterzogen werden. Im abschließenden dritten Teil werden weitere fernerkundliche Datenquellen hinsichtlich ihres Aussagegehalts zur Versiegelung geprüft und ein abschließender Methodenvergleich durchgeführt. Bestandteil dieses Zwischenberichts ist die Darstellung der Ergebnisse des ersten Projektteils.

2 Darstellung der Versiegelungsproblematik

Die negativen ökologischen Wirkungen von Versiegelungen sind umfangreich untersucht und in der Literatur beschrieben. Es werden Wirkungen auf die Bereiche Meso- und Mikroklima, Boden, Wasser, Flora, Fauna und Stadthygiene ausgeübt.
Im folgenden wird unter Versiegelung sowohl die Über- bzw. Unterbauung als auch die Versiegelung von Freiflächen, in der Literatur oft auch als Teilversiegelung bezeichnet, verstanden. Diese Vereinfachung soll zur Textkürzung beitragen und ist auch darum gerechtfertigt, da eine Trennung von Überbauung, voll- bzw. teilversiegelten Freiflächen in den in vorliegender Arbeit untersuchten Satellitenbildern ohnehin in den wenigsten Fällen möglich ist.
In vielen Untersuchungen waren mit dem Thema Versiegelung vorwiegend die negativen Auswirkungen auf die Hydrologie gesehen und quantitativ beschrieben worden (verminderte Grundwasserneubildung, Regenwasserversickerung und Oberflächenwasserabfluß). Im Zuge stadtökologischer Betrachtungen werden zunehmend auch andere Wirkungen der Versiegelung untersucht und über Bewertungskriterien mit denen unversiegelter natürlicher Flächen verglichen. Als Bewertungskriterien werden dabei meist die für versiegelte Flächen relevanten Parameter benutzt. Will man zu ganzheitlichen ökologischen Zahlen der Qualität von Oberflächenbedeckungen kommen, die für planerische Zwecke sehr wichtig wären, müssen als Bewertungskriterien auch die positiven Effekte natürlicher Flächen einbezogen werden. So stellen die ökologischen Leistungen der Vegetation, wie Sauerstoffproduzent und Kohlendioxid-

immitent, sowohl global als auch lokal eine überaus wichtige Rolle dar, die in zukünftigen Bewertungen Berücksichtigung finden muß. Selbst die wichtige Rolle, die Stadtgrün für das menschliche Wohlbefinden spielt (sozial- und psychohygienische Aspekte), sollte in solche Betrachtungen einbezogen werden.
Auch die alleinige Bewertung der unmittelbaren Bodendeckschicht zur Bestimmung von Versiegelungsparametern müßte überprüft werden. So würde z. B. die vom reinen Standpunkt der Bodenaufnahme negativ bewertete Versiegelung unter einem Baum durch dessen positive ökologische Effekte stark relativiert.

2.1 Parameter der Versiegelung

In Abhängigkeit davon, welche Wirkungen der Oberflächenbedeckung und in welcher Differenzierung diese betrachtet werden, sind verschiedene Versiegelungsparameter in der Literatur definiert:
Versiegelungsgrad (VSG): prozentualer Anteil der versiegelten Fläche ohne Differenzierung der Versiegelungsart
Versiegelungszahl (VSZ): differenzierte Bewertung des Abflußbeiwertes einschließlich des Unterbaues (kanalisiert/nicht kanalisiert)
Bodenfunktionszahl (BFZ): differenzierte Bewertung der Versickerungsfähigkeit und der klimatischen Wirkung von Dachbegrünung und Wasserflächen
Biotopflächenfaktor (BFF): prozentualer Anteil der Biotopfläche mit folgender Differenzierung: Biotopflächen mit Anschluß an gewachsenen Boden, Biotopflächen ohne Anschluß an gewachsenen Boden, befestigte halboffene Flächen und versiegelte Flächen
Öko-Wert (ÖKO): Mittelwert aus Temperaturverhalten, Staubbindevermögen, Schadstoffrückhaltung, Durchlässigkeit, anthropogene Überformung, Oberflächenabfluß, Grundwasserneubildung, Regenwasserversickerung und Biotopausbildung
Klimatisch-Ökologisch-Hygienischer Wert (KÖH): Verhältnis von Gunstflächen, wie sie Vegetationsflächen darstellen (Temperatur- und Einstrahlungsminderung, Erhöhung Luftfeuchte, Windberuhigung, Luftzirkulationsbildung, Filterwirkung, Lärmminderung, Kaltluftproduktion, Frischluftzufuhr), zu Ungunstflächen (Versiegelungen)
Klimaökologisch-Pedologischer Kennwert (KÖP): Durchschnitt des Bodenfunktionswertes (Versickerungsverhalten), gewichteter Bau- und Vegetationsmassenwerte und des Klimatopwertes (nächtliche Abkühlung, nächtliche Oberflächentemperatur)

Die Versiegelungsparameter sind bezüglich ihrer Meß- bzw. Einflußparameter in Tabelle 1 aufgelistet.

Tab. 1: Berücksichtigte Einflußgrößen und deren Differenzierung in den Berechnungsverfahren der Versiegelungsparameter

Parameter	Klassen-zahl	Hydro-logie	Versiege-lung	unversiegelter Boden/ Vegetation	Klima	Luft	sozialhygienisch, psychohygienisch, ästhetische Aspekte
Versiegelungs-grad	2	+	+(1)	0(1)	0	0	0
Versiegelungs-zahl	13	+++	+++(13)	+(2)	+	+	+
Boden-funktionszahl	8	+++	+(8)	0(0)	0	0	0
Biotop-flächenfaktor	4	+	+(2)	++(2)	0	0	0
Öko-Wert	9	++	+(5)	0(6)	+	+	0
Klimaökologisch-Hygienischer Wert (KÖH)	77	+	+(11)	+++(66)	+	+	0
Klimaökologisch-Pedologischer Wert (KÖP)	33	+	+(9)	++(12)	+++(13)		+

Wertung: +++ ausschließliche Bewertung, ++ starke Bewertung, + Bewertung, 0 keine Bewertung

Die Komplexität der Betrachtungsweise steigt innerhalb der Tabelle nach unten an. Mit wachsender Komplexität steigen notwendigerweise auch die Aufwendungen sowohl für die im Rahmen der Grundlagenforschung zu bestimmenden Maßzahlen und Wichtungsfaktoren für die einzelnen Belagsarten und Objekte als auch für spätere flächenhafte Bestimmungen der Parameter im Rahmen von Planungsprozessen. Der KÖH- und KÖP-Wert sind durch die differenzierte Bewertung einzelner Oberflächenbedeckungen bzw. Objekte für prinzipielle Erkenntnisse auf dem Gebiet der Stadtökologie sehr gut einsetzbar, aufgrund des Erhebungsaufwandes aber für flächenhafte Aufnahmen im Rahmen der Planung weniger geeignet.
Zentrale Forschungsaufgabe war nun die Prüfung der Aufnahme dieser Parameter durch fernerkundliche Methoden, bzw. die Feststellung möglicher Korrelationen zwischen definierten (und meßbaren!) FE-Parametern mit definierten Versiegelungsparametern.

2.2 Terrestrische Versiegelungserhebung

Die Oberflächenbedeckung kann durch Vermessung vor Ort sowohl hinsichtlich der Flächentreue als auch bezüglich der Differenzierung der Bedeckungsarten konkurrenzlos präzise aufgenommen werden. Durch Digitalisierung von aktuellen Bestandsplänen im Maßstab 1 : 500 bzw. 1 : 1 000 kann ebenfalls eine sehr genaue Flächenaufnahme erfolgen.

Die Auswahl der Bodenbedeckungsarten ist in der Literatur relativ einheitlich. Im Bereich der anthropogen überformten Flächen werden unterschieden:

- Gebäude (überbaute Flächen)
- Asphalt/Beton (vollversiegelte Freiflächen)
- Platten (teilversiegelte Freiflächen)
- Kleinpflaster (teilversiegelte Freiflächen)
- Wassergebundene Decken (teilversiegelte Freiflächen)
- Rasengittersteine
- Dachbegrünung
- Fassadenbegrünung
- Tiefgaragen

Im Bereich der natürlichen Oberflächen werden unterschieden:

- Offener Boden/Acker (wasserdurchlässige Flächen)
- Bäume (Baumreihen, -gruppen)
- Sträucher (Hecken, kleine Bäume)
- Stauden
- Wiesen (Grünland)
- natürliche Wasserflächen (künstlich angelegte Wasserflächen)

Die Versiegelungsparameter werden aus experimentell ermittelten Einzelgrößen der Bedeckungsart und dem Flächenanteil berechnet. Für verschiedene Parameter, wie z. B. den KÖH-Wert, werden die einzelnen Oberflächenbedeckungen noch mit Wichtungsfaktoren wie Höhenwerten, Vegetationsschädigungen oder klimatischer Gunst versehen. Das erfordert natürlich die genaue Bewertung der einzelnen Flächen.
Während verschiedene Kriterien visuell durch Vorortbegehung oder Luftbildinterpretation leicht gewonnen werden können, ist die exakte Bestimmung hydrologischer Parameter wie Oberflächenabfluß, Regenwasserversickerung und Grundwasserneubildung nicht visuell bewertbar. Der unmittelbare Schluß von der Bedeckungsart (dichte bis durchlässige Beläge) auf die Bodendurchlässigkeit ist aufgrund des unterschiedlichen Aufbaues, Alters und der Verdichtung nicht möglich. Beregnungsversuche im Rahmen des Forschungsthemas haben dieses nachdrücklich belegt.

Wenn auch die unmittelbare Bodenaufnahme mit höchster Genauigkeit möglich ist, so ist es auch das arbeits- und damit kostenintensivste Aufnahmeverfahren. Es kann darum nur für einzelne Baublöcke oder Quartiere benutzt werden. Sollen größere Areale erhoben werden, so bietet sich die Aufnahme einzelner, häufiger Stadtstrukturtypen an, deren mittlere Versiegelungs-

werte auf die gleichen Strukturtypen extrapoliert werden. Bei diesem Verfahren geht allerdings die hohe Präzision der direkten Datenaufnahme verloren, da die Schwankungsbreite der Versiegelung innerhalb eines Strukturtyps hoch sein kann.
Selbst das Repräsentantenverfahren ist sehr aufwendig für flächendeckende Versiegelungsaufnahmen und angesichts des hohen Kostendrucks durch immer knappere öffentliche Kassen selten durchführbar. Auch ist die hohe Genauigkeit des Verfahrens - zumindest für Versiegelungskartierungen im mittelmaßstäbigen Bereich (1 : 10 000 - 1 : 100 000) - häufig nicht erforderlich.

2.3 Fernerkundliche Versiegelungserhebung

Im Maßstabsbereich 1 : 10 000 - 1 : 100 000 bietet sich die Fernerkundung als Aufnahmeverfahren an. Zu fernerkundlichen Aufnahmetechniken zählen dabei Luftbild-, Scanner- und Satellitenaufnahmen. Die wichtigsten fernerkundlichen Datenquellen seien im folgenden kurz genannt:
Colorinfrarotluftbild: Photographische Aufnahme auf Farbfilm, der empfindlich im Infrarotbereich ist. Durch die starke Reflexion der Vegetation im Infrarotspektralbereich ist eine sehr gute Erkennung und Differenzierung der Vegetation einschließlich der Beurteilung von Vegetationsschäden möglich. Durch die Wahl der Flughöhe und der Meßkammerkonstante sind Bildmaßstäbe von 1 : 500 bis 1 : 20 000 möglich.
ATM-Scannerdaten: Flugzeuggestützte digitale Aufnahmen mit hoher geometrischer und spektrometrischer Auflösung. Die Spektralbänder werden in der Regel entsprechend der Landsat-TM-Bänder ausgewählt. Besonders wichtig für viele Untersuchungen ist der Thermalkanal. Der Auswerteaufwand ist sehr hoch (geometrische Entzerrung, Thermalkalibierung, Kartierung/Klassifikation).
Photographische Satellitendaten: Photographische Aufnahme der Erdoberfläche auf großformatigen Spezialfilm (S/W-Film bei KWR 1000, Spektrozonalfilm bei KFA 1000). Gekennzeichnet sind die Aufnahmen z. T. durch ausgezeichnete geometrische Auflösung, die der digitaler Satellitendaten weit überlegen ist (z. B. KWR 1000). Der Zugriff auf die zum größten Teil russischen Daten ist zur Zeit aufgrund fehlender Recherchemöglichkeiten sehr schwierig und langwierig. Auch die regelmäßige Aufnahme ist nicht gesichert, da Missionen zum notwendigen Filmtransport unregelmäßig stattfinden.
Digitale Satellitendaten: Hierzu zählen, als wichtigste Vertreter, der amerikanische Erderkundungssatellit Landsat und das französische SPOT-Programm. Die Daten werden durch einen optischen Scanner erhoben und sofort digitalisiert zu den Bodenempfangsstationen gesendet. Regelmäßige Aufnahmen sind dadurch gesichert. Die Parameter der Daten sind unter 4.1 und 4.2 aufgelistet.

Tabelle 2 zeigt wichtige Parameter der FE-Quellen im Vergleich:

Tab. 2: Vergleich von FE-Quellen bezüglich wichtiger Paramater der Versiegelungsaufnahme

FE-Methode	geometrische Auflösung in m	möglicher Maßstab	Spektrometrische Auflösung (Kanalzahl)	Flächendeckung pro Aufnahme in km	Wiederholungsrate	Kosten in DM/km²
Colorinfrarotbefliegung	0,5 ... 5,0	1 : 2 000 - 1 : 20 000	3	5 * 5	prinzipiell wählbar, Standard 5 Jahre	6,2
Scannerbefliegung	1,0 ... 5,0	1 : 2 000 - 1 : 20 000	11	Streifen von 1 - 5 km Breite	prinzipiell wählbar, selten Wiederholung, da Forschungsfeld	20,0
KWR 1000	0,75 ... 3,0	1 : 2 000 - 1 : 10 000	1	20 * 20	10 - 15 Missionen/a	3,2
KFA 1000	5,0 ... 8,0	1 : 25 000	2	80 * 80 (Film 30 * 30 cm)	2 - 3 Missionen/a	0,1
SPOT (P) (panchromatisch)	10	1 : 25 000	1	60 * 60 bzw. 80 * 80	26 Tage	1,1
SPOT (XS) (multispektral)	20	1 : 50 000 - 1 : 100 000	3	60 * 60	26 Tage	0,9
Landsat	30	1 : 50 000 - 1 : 100 000	7	170 * 185	16 Tage	0,2

Tabelle 3 gibt eine Übersicht der Eignung von Fernerkundungsverfahren zur Erhebung bekannter Versiegelungsmaßzahlen im mittelmaßstäbigen Bereich.

Tab. 3: Eignung der Fernerkundung zur Parametererhebung

Parameter	Eignung	Verfahren	Probleme	Aufwand
Versiegelungsgrad	++	CIR, ATM, SAT	Trennung von vegetationslosem Acker und offenen Böden von Versiegelungen	niedrig
Bodenfunktionszahl	-	CIR, ATM	keine Differenzierung versiegelter Freiflächen möglich	niedrig
Versiegelungszahl	--		da nur Differenzierung von Versiegelungsflächen z. T. in Verbindung mit Untergrund keine Aufnahmemöglichkeit	
Biotopflächenfaktor	+	CIR, ATM, SAT	begrünte Flächen ohne Bodenschluß z. T. nicht sichtbar	mittel
Klimaökologisch-Hygienischer Wert (KÖH)	0	CIR (1 : 3 000)	notwendige Baumassenbestimmung sehr aufwendig, da stereoskopische Auswertung erforderlich	sehr hoch
Klimaökologisch-Pedologischer Wert (KÖP)	0	ATM (1 : 3 000)	sehr aufwendige Temperaturauswertungen, Ortsdaten zusätzlich erforderlich	sehr hoch

Wertung: ++ sehr gut geeignet, + gut geeignet, 0 geeignet, - weniger geeignet, -- ungeeignet
FE-Verfahren: CIR-Colorinfrarot, ATM-Airborne Thematic Mapper, SAT-Satellitenaufnahme

3 Theoretische Überlegungen zur Fernerkundungsnutzung

3.1 Auflösung/Maßstab

Wie Tabelle 2 zeigt, sind durch CIR- und Scannerbefliegung Bodenauflösungen bis 1 m möglich. Höhere Auflösungen werden durch die Mindestflughöhe von 600 m über Siedlungsgebiet begrenzt. Mit Sondergenehmigungen und speziellen Aufnahmesystemen (Hubschrauber, stationäre Aufnahme von exponierten Stellen) können in Ausnahmefällen noch höhere Auflösungen erreicht werden.

Bei der Bodenauflösung muß nun zwischen analoger oder digitaler Bildaufnahme unterschieden werden. Da automatisierte Auswertungen, wie sie für kostenminimale Erhebungen notwendig sind, nur auf digitaler Basis erfolgen können (siehe 3.2.2), wird im folgenden nur die digitale Auflösung besprochen. Eine digitale Bodenauflösung von einem Meter bedeutet, daß die kleinste Bildeinheit (das Pixel) über diese Bodenfläche integriert und einen mittleren Reflexionswert verwendet. Eine Differenzierung innerhalb dieser Fläche ist unmöglich. Allerdings setzt sich das Pixel bei Aufnahme der Reflexion in verschiedenen spektralen Kanälen aus je einem Wert pro Spektralkanal zusammen. Mit einer Bodenauflösung von 1 m ist die Unterscheidung verschiedener Pflasterarten oder Plattenbeläge bzw. die Unterscheidung von vollversiegelten Flächen (Asphalt, Beton) nicht möglich. Einzig Großplatten mit unterschiedlicher farblicher Gestaltung sind zum Teil zu unterscheiden. Derartige Beläge sind aber Ausnahmen (z. B. Eingangsbereich Prager Straße im Stadtzentrum Dresdens) und verallgemeinernde Aussagen zur Identifizierbarkeit von Belägen daraus nicht ableitbar. Durch das digitale Abtastraster kommt es in Abhängigkeit von der Auflösung zu einer Vermischung verschiedener Oberflächendeckschichten (Mischpixel). Der Anteil Mischpixel erhöht sich mit Verringerung der Auflösung. Neben der geometrischen Sensorauflösung ist der Mischpixelanteil natürlich von der mittleren Größe der Oberflächenbedeckungsarten abhängig.

Für den Zusammenhang zwischen Bild- (m_b) und Kartenmaßstab (m_k) kann aus langjähriger Erfahrung folgende Beziehung genutzt werden:

$$m_b = k * \sqrt{m_k}$$

Für k muß, je nach Anforderung, ein Wert zwischen 200 und 300 eingesetzt werden. Das ergibt folgenden Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab für übliche Kartenmaßstäbe.

Tab. 4: Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab

Kartenmaßstab m_k	Originalbildmaßstab m_b
1 : 1 000	6 300 - 9 500
1 : 2 500	10 000 - 15 000
1 : 5 000	14 000 - 21 000
1 : 10 000	20 000 - 30 000
1 : 25 000	32 000 - 47 000
1 : 50 000	45 000 - 67 000
1 : 100 000	63 000 - 95 000

Weiterhin ist zu bedenken, daß sich photographische Aufnahmen ohne Qualitätsverlust um den Faktor 3 bis 5 vergrößern lassen. Für kartographische und photographische Folgeprodukte digitaler Bilddaten sollte die Bildelementgröße zwischen 0,2 mm (KRAUS, 1988) und 0,3 mm (ALBERTZ, 1988) liegen. In diesem Fall ist die sich sonst störend auswirkende Pixelstruktur nicht mehr sichtbar. Damit ergeben sich die in Tabelle 5 wiedergegebenen Zusammenhänge zwischen Fernerkundungssensor und Kartenmaßstab.

Tab. 5 : Mögliche Kartenmaßstäbe der verschiedenen Fernerkundungssensoren

Sensor	Originalbildmaßstab/Bodenauflösung im Original	Kartenmaßstab
Landsat-TM	30 m	1 : 100 000
SPOT-XS	20 m	1 : 50 000 - 1 : 100 000
SPOT-PAN	10 m	1 : 25 000 - 1 : 50 000
KFA 1000	1 : 280 000	1 : 25 000 - 1 : 50 000
KWR 1000	2,5 m	1 : 5 000 - 1 : 10 000
Luftbild	1 : 3 000 - 1 : 30 000	1 : 500 - 1 : 10 000
Scannerdaten	1,0 - 10,0 m (in Abhängigkeit von der Flughöhe)	1 : 1 000 - 1 : 10 000

Im Einzelfall kann aber die Wahl eines größeren Kartenmaßstabes durchaus sinnvoll sein, wenn durch interpolierte Darstellung oder zusätzlich glättende Filter die hochfrequente Bildinformation der Pixelkanten vermieden wird.

3.2 Verfahren der Bildauswertung

3.2.1 Visuelle Interpretation photographischer Bilder

Besonders im großmaßstäbigem Bereich ist die Leistungsfähigkeit des menschlichen Erkennungssystems dem der automatisierten Bildverarbeitung noch weit überlegen. So werden durch den visuellen Interpreten neben der Intensitätsinformation (Farb-/Grauwertabstufung) auch Textur-, Struktur-, Größen- und Forminformationen sowie Umgebungs-, Lage- und Hintergrundinformationen genutzt. Die Interpretationsgüte kann durch stereoskopische Betrachtung gesteigert werden.
Die visuelle Interpretation ist ein sehr aufwendiges Verfahren. Vor der Interpretation muß ein Interpretationsschlüssel erarbeitet und ein Erkennungstraining durchgeführt werden. Man unterscheidet Flächen- und Einzelobjektinterpretation. Für die Bestimmung der meisten Versiegelungsparameter wird eine Flächeninterpretation, also die Abgrenzung von Polygonen mit gleichen Merkmalen, ausreichen. Für die Bestimmung des KÖH- bzw. KÖP-Wertes wird jedoch häufig eine Einzelobjektinterpretation notwendig sein, da hier zum Beispiel der Vitalitätszustand einzelner Bäume eingeschätzt werden muß. Da bei KÖH- und KÖP-Bestimmungen auch Gebäude- und Baumhöhen eine Rolle spielen, muß stereoskopisch ausgewertet werden.
Um den sehr hohen Interpretationsaufwand zu mindern, können Stichproben- oder Rastermethode Anwendung finden. Die Stichprobenmethode könnte im Rahmen der Bestimmung von Versiegelungen genutzt werden, in dem die Versiegelungsaufnahme nur innerhalb ausgewählter Stadtstrukturtypen erfolgt. Bei der Rastermethode wird über das Luftbild ein Raster gelegt und nur zufällig ausgewählte Rasterfelder interpretiert. Diese Methode ist für stark differenzierte Oberflächenstrukturen, wie sie Siedlungsgebiete darstellen, generell ungeeignet.
Die Grenzen der Gebiete gleicher Merkmale müssen mit Hilfe einfacher Spiegelstereoskope oder teurer analytischer Auswertegeräte aufgezeichnet werden.

3.2.2 Klassifikation

Eine visuelle Interpretation ist ein sehr arbeitsaufwendiges Unterfangen. Darum begann schon sehr früh die Suche nach Möglichkeiten, die Interpretation bzw. Klassifikation Computern zu übertragen. Standardverfahren der Klassifikation ist derzeit noch die alleinige Verwendung der multispektralen Informationen des Bildsignals. Während bei der überwachten Klassifikation die Statistik von Trainingsgebieten zur Trennung der Bildinformationen benutzt wird, wird bei einer unüberwachten Klassifikation das multispektrale Bildsignal in eine wählbare Anzahl von

Klassen geteilt, die im mehrdimensionalen Spektralraum maximalen Abstand voneinander haben. Da der visuelle Interpret weitaus mehr als nur die Farbinformation zur Bewertung benutzt, sind die rein multispektralen Klassifikatoren in ihrer Klassifikations- und Erkennungsgüte beschränkt. Darum wird intensiv nach Verfahren gesucht, neben der Spektralinformation noch Nachbarschaftsbeziehungen, Texturinformationen und Hintergrundwissen (z. B. ATKIS-Daten) in die Klassifikation einzubeziehen.

3.2.3 Mustererkennung

Die Mustererkennung (Pattern Recognition) nutzt weniger die spektralen Informationen als vielmehr die Form bestimmter vorgewählter Objekte, die dann in der Bildszene gesucht werden. Während die Mustererkennung in der Automatisierungstechnik, der Mikroskopbildanalyse und im maschinellen Sehen schon sehr weit fortgeschritten ist und ausgezeichnete Arbeitsergebnisse liefert, steht sie in der Luft- und Satellitenbildauswertung erst am Anfang. Grund hierfür ist in der enormen Vielgestaltigkeit der natürlichen als auch der anthropogen überformten Gebiete zu suchen. Die einzelnen Objekte sind so verschieden, daß sie sich kaum in wenigen Mustern fassen lassen. Mustererkennung spielt nur bei hochauflösendem FE-Material (CIR, ATM, KWR) eine Rolle, da nur hier eine Einzelobjektabbildung erfolgt und damit die Voraussetzungen für eine Unterscheidung gegeben sind.

3.3 Bestimmbarkeit von Oberflächenbedeckungen

Fernerkundliche Versiegelungserhebungen können prinzipiell auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Entweder wird durch visuelle Interpretation oder automatische Klassifikation die Oberflächenbedeckung bestimmt und über bekannte Maßzahlen für diese Bedeckungsarten der Versiegelungsgrad errechnet, oder es wird auf eine direkte Bestimmung und Unterscheidung der Oberflächenbedeckung verzichtet, in dem für jeden Bildpunkt ein quantitatives Maß bestimmt wird, welches mit der Versiegelung korreliert. Dieses quantitative Maß kann nur der Vegetationsanteil pro Bildpunkt sein. Dieser ist mit Hilfe des Vegetationsindizes bestimmbar. Die Bestimmung und damit Unterscheidung von Deckschichten ist durch die geometrische, spektrometrische und radiometrische Auflösung der FE-Systeme begrenzt.
Für die qualitative Unterscheidung von Bedeckungsarten ist vor allem die geometrische Auflösung bestimmend, für die quantitative die gute Trennung zwischen Infrarot- und Rotkanal (z. B. Vegetationsindex).
Tab.6 zeigt für hochauflösende CIR-Luftbilder, dem FE-Bildmaterial mit der höchsten

geometrischen Auflösung, die Erkennbarkeit der wichtigsten Bedeckungsarten für Versiegelungsberechnungen.

Tab. 6: Erkennbarkeit städtischer Oberflächenbedeckungen im CIR-Luftbild

	visuelle Interpretation	automatische Erkennung	Probleme
Gebäude	++	0	Visuell gut abgrenzbar aufgrund regelmäßiger Gebäudeformen und -reihung, automatische Erkennung bei alleiniger Verwendung der Spektralinformation unmöglich aufgrund sehr differenter Dachbeläge, die sich zum Teil nicht von versiegelten Freiflächen unterscheiden.
Asphalt/Beton	0	--	Die Versiegelungsmaterialien Asphalt, Beton, Platten und Kleinpflaster sind sowohl visuell als auch automatisch nicht unterscheidbar. Im visuell interpretierten Luftbild sind nur Straßen, Plätze usw. erkennbar.
Platten	-	--	
Kleinpflaster	--	--	
Wassergebundene Decken	0	--	Sowohl visuell als auch automatisiert nicht von versiegelter Freifläche zu unterscheiden.
Rasengittersteine	-	0	Rasengittersteine sind visuell nicht eindeutig erkennbar, nur indirekt über das Grünvolumen. Ist der Rasenanteil zu klein, kann keine Trennung von versiegelter Freifläche erfolgen, ist er zu groß, ist keine Trennung von Rasenflächen möglich.
Offener Boden/ Acker	++	-	Im Luftbild gut sicht- und abgrenzbar. Automatisierte Auswertungen aufgrund der Spektralinformationen sind schwierig bzw. unmöglich, da vegetationsfreier Acker versiegelten Freiflächen und vegetationsbestandener Acker Wiesen ähnelt.
Rasen	++	+	Gut visuell erkenn- und abgrenzbar.
Bäume/ Sträucher	++	+	Sehr gut visuell erkenn- und abgrenzbar, selbst Vegetationsschäden sind gut sichtbar. Automatische Klassifikation über Vegetationsindex möglich.
Stauden	0	--	Stauden sind schwer von Rasen und Wiese unterscheidbar, automatisierte Trennung unmöglich.
Wiese	+	0	Visuell gut abgrenzbar, z. T. schwer von vegetationsbestandenen Feldern trennbar.
Natürliche Wasserflächen	+	+	Sowohl visuell als auch durch Klassifikation gut abgrenzbar. Unterscheidung zwischen natürlichen und künstlichen Wasserflächen nur visuell und nur bei geometrisch streng regelmäßigen Formen.

Wertung: ++ sehr gute Erkennung, + gute Erkennung, 0 teilweise Erkennung, - schlechte Erkennung, -- Erkennung unmöglich

Die Erkennbarkeit der Oberflächenbedeckung im Satellitenbild ist im Vergleich zum Luftbild aufgrund der geringeren geometrischen Auflösung stark eingeschränkt. So sind bei einer Pixelgröße von 30 * 30 m kaum Bildpunkte vorhanden, die nur eine Oberflächenbedeckung zeigen. Meist sind Anteile verschiedener Oberflächen in einem Pixel vereint und werden dort spektral gemischt. Tabelle 7 gibt Aufschluß über die Erkennbarkeit typischer städtischer Bedeckungsarten im Satellitenbild, die für die Versiegelung eine Rolle spielen.

Tab. 7: Erkennbarkeit städtischer Oberflächenbedeckungen im Satellitenbild

	Visuelle Interpretation	Automatische Klassifikation	Probleme
Gebäude	-	0	Nur sehr große Blöcke erkennbar, spektral nicht von anderer Versiegelung unterscheidbar.
Asphalt/Beton	-	0	Keine direkte Erkennbarkeit des Materials, nur indirekt durch Abbildung von breiten Straßen. Keine spektrale Trennung von Versiegelung möglich.
Platten	-	0	Nicht erkennbar.
Kleinpflaster	--	--	Nicht erkennbar.
Wassergebundene Decken	-	-	Flächen meist zu klein, bei genügend großen Flächen keine Unterscheidung von Versiegelung möglich.
Rasengittersteine	--	--	Flächen zu klein und Grünanteil zu gering, keine Trennung von Versiegelung möglich.
Offener Boden/ Acker	++	+	Gut erkennbar, schwer und aufwendig klassifizierbar durch verschiedene Reifezustände der Vegetation.
Rasen	+	+	Gut erkenn- und klassifizierbar.
Bäume/Sträucher	-	-	Objekte zu klein, vermischen sich mit Untergrund.
Stauden	--	--	Nicht erkennbar, Flächen zu klein, selbst bei großen Flächen durch gleiche spektrale Signatur nicht von Wiese trennbar.
Wiesen	+	0	Gut erkenn- und klassifizierbar. Trennung von vegetationsbestandenen Ackerflächen schwierig.
Natürliche Wasserflächen	+	+	Gut erkennbar und klassifizierbar, Trennung zwischen künstlicher und natürlicher Wasserfläche unmöglich.

Wertung: s. Tab. 6

3.4 Verdeckungsproblematik

Allen Fernerkundungsaufnahmesystemen ist gemeinsam, daß sie die Erdoberfläche aus der Höhe sehen. Da bei passiven Sensorsystemen, wie sie auch die optischen Systeme darstellen, keinerlei Materiedurchdringung gegeben ist, kommt es zu einer Verdeckung aller tieferliegenden Schichten. (Einzig aktive Sensorsysteme, wie der Radar, vermögen eine Durchdringung in Abhängigkeit vom Material, diese Systeme spielen aber für die Versiegelungserhebung keine Rolle). So sind Versiegelungen unter Baumkronen in der Vegetationszeit, Tiefgaragen unter Grünflächen oder Gebäude unter Dachbegrünungen nicht sichtbar. Da eine Vegetationsbedekkung über versiegelten Oberflächen durchaus ökologisch positiv wirkt (positive klimatische, stadthygienische, luftverbessernde Effekte im Verhältnis zu unbegrünten versiegelten Flächen), werden die Fehler durch die Verdeckung relativiert.

3.5 Beschattungsproblematik

In Abhängigkeit vom Tages- und saisonalen Zeitpunkt der Bildaquisition ist jedes optische fernerkundliche Bildmaterial in der Interpretation mit dem Problem des Sonnenschattens konfrontiert. Um die Schattenfläche so gering wie möglich zu halten, sollten Aufnahmen im Juni zu Sonnenhöchststand aufgenommen werden. Während der Zeitpunkt für flugzeuggestützte Aufnahmen in der Regel nur vom Wetter abhängt, in die Hochsommerzeit und für optische Aufnahmen auch in die Mittagszeit zum Sonnenhöchststand gelegt werden kann, läßt sich der Aufnahmezeitpunkt von Satellitenaufnahmen nicht beeinflußen. So sieht z. B. der Landsat-Satellit unsere geographische Position immer um ca. 10:30 Uhr, der SPOT-Satellit um ca. 11:10 Uhr.
In Deutschland ist bei Satellitenaufnahmen im Durchschnitt nur mit einer Sonnenhöhe von 40 - 60° zu rechnen. Verdeckungen durch Schatten wirken sich natürlich insbesondere in Gebieten mit hohen Objekten, wie sie z. B. Hochhausbauten darstellen, aus. Gemittelt über größere Flächen ist die Schattenfläche mit einem maximalen Anteil von 5 % an der Gesamtfläche beteiligt. Erste Untersuchungen an hochauflösenden Scannerdaten erbrachten, daß zwar die visuelle Bewertung der Schattenfläche unabhängig vom gewählten Kanalkomposit stark eingeschränkt, meist sogar unmöglich ist, der Vegetationsindex aber nur relativ gering in Schattenflächen sinkt. Dieser wird durch den starken Rückgang der Reflexion in dem sichtbaren roten und dem infraroten Spektralkanal durch die Differenzbildung wenig beeinflußt.

3.6 Sensitivität fernerkundlicher Versiegelungserhebungen über den NDVI

Über die Sensitivität fernerkundlicher Versiegelungserhebungen über die Methode der qualitativen Oberflächenerhebung ist indirekt schon im Abschnitt 3.3 einiges ausgesagt. Hier soll nur die quantitative Erhebung über den Vegetationsindex beleuchtet werden.
Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird durch folgende Faktoren beeinflußt und beeinträchtigt:

- verschiedene Versiegelungsmaterialien werden im NDVI nicht differenziert
- Grünflächen werden in Abhängigkeit von der Biomasse stark differenziert
- offener, vegetationsloser Boden wird als Versiegelung bewertet
- Überdeckungen von Versiegelungen durch Baumkronen werden als unversiegelte Flächen ausgewiesen.

Auf diese einzelnen Faktoren wird in den Abschnitten 5.2.1 und 5.2 noch detailliert eingegangen.

4 Charakterisierung der Aufnahmesysteme der Fernerkundung

4.1 Landsat-Thematic Mapper

4.1.1 Aufnahmeparameter

Flughöhe:	705 km
Bahn:	polar, sonnensynchron
Inklination:	98,2°
Bildfeld:	185 * 185 km
Umlaufzeit:	99 Min.
Repititionsrate:	16 Tage
Field of View (FOV):	14,8°
Instantaneous Field of View (IFOV):	0,042 mrad (K1-K4); 0,044 mrad (K5,K7); 0,170 mrad (K6)
Datenverfügbarkeit:	seit 1972

Das Landsat-Programm wird in der folgenden Tabelle beschrieben.

Tab. 8: Übersicht des amerikanischen Landsat-Satellitenprogramms

	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 6	Landsat 7
Start	23.07.1972	22.01.1975	05.03.1978	16.07.1982	10.03.1984	gescheitert	1999
Geometrische Bodenauflösung	79 * 56 m 240 * 240 m (K7)	79 * 56 m 240 * 240 m (K7)	30 * 30 m 240 * 240 m (K7)	30 * 30 m 120 * 120 m (K7)	30 * 30 m 120 * 120 m (K7)	-	15 * 15 m 60 * 60 m (K7)
Spektrometrische Auflösung (µm)							
Kanal 1	0,45 - 0,52	0,45 - 0,52	0,45 - 0,52	0,45 - 0,52	0,45 - 0,52	-	0,45 - 0,52
Kanal 2				0,52 - 0,60	0,52 - 0,60		0,52 - 0,60
Kanal 3				0,60 - 0,69	0,60 - 0,69		0,63 - 0,69
Kanal 4				0,76 - 0,90	0,76 - 0,90		0,76 - 0,90
Kanal 5			1,55 - 1,75	1,55 - 1,75	1,55 - 1,75		1,55 - 1,75
Kanal 6			2,08 - 2,35	2,08 - 2,35	2,08 - 2,35		2,08 - 2,35
Kanal 7			10,4 - 12,5	10,4 - 12,5	10,4 - 12,5		10,4 - 12,5

4.1.2 Eignung für Versiegelungserhebungen

Der Landsat-Thematic Mapper ist nach wie vor der wichtigste Sensor für Flächennutzungsinventuren. Das hat folgende Gründe:

- Landsat verfügt über ein ausgezeichnetes spektrometrisches Auflösungsvermögen, daß auf die

Probleme der Landnutzungsklassifikation zugeschnitten ist.

- Das radiometrische Auflösungsvermögen ist ebenfalls im Vergleich zu SPOT-Aufnahmen als gut einzuschätzen.
- Die Datenrecherchierbarkeit und -verfügbarkeit ist ausgezeichnet. In Deutschland gibt es mehrere leistungsstarke Distributoren (u. a. DFD, GAF, Dornier). Die Preise sind fallend.
- Landsat ist das Satellitenprogramm mit der längsten Geschichte. Landsat-Daten sind ab 1972 verfügbar. Das ist für retrospektive Auswertungen sehr wichtig.
- Das geometrische Auflösungsvermögen ist mit 30 m Aufzeichnungen im Maßstab 1 : 100 000 angepaßt.

Für städtische Versiegelungsaufnahmen sind die Landsat-Daten prinzipiell geeignet. Das wird im Kapitel 6 der vorliegenden Arbeit nachgewiesen. Aufgrund der Bodenauflösung von 30 m sind Landsat-Aufnahmen nur für die Erstellung von Versiegelungskarten im Maßstab 1 : 50 000 bzw. 1 : 100 000 geeignet. Durch die begrenzte Auflösung ist keine Differenzierung von Versiegelungsmaterialien möglich. Durch die getrennte Aufzeichnung von Rot- und Infrarotkanal ist eine sehr gute Vegetationserkennung möglich. Damit bietet sich eine indirekte Versiegelungsaufnahme an, die davon ausgeht, das alle Vegetationsflächen unversiegelt und alle vegetationsfreien Flächen versiegelt sind. Sollte die Landsat-Mission 7 gelingen, so wird die Bodenauflösung halbiert und Kartenmaßstäbe von 1 : 25 000 und 1 : 50 000 möglich werden. Weitere Vorteile der Verwendung von Landsat-Daten sind die gute Verfüg- und Recherchierbarkeit. Im Mittel kann in unseren Breiten mit 1 - 3 qualitativ hochwertigen (wolken- und dunstfreien) Aufnahmen pro Jahr gerechnet werden.

4.1.3 Kostenabschätzung

Für die Erstellung von Übersichtskarten städtischer Versiegelung ist in der Regel eine Miniszene von 50 * 50 km ausreichend. Die Szenen können entweder nur systemkorrigiert (ca. 3 000 DM) oder zusätzlich noch geokodiert (ca. 6 000 DM) beschafft werden.

Tab. 9: Kostenabschätzung für operationelle Erstellung von Versiegelungskarten aus Landsat-TM-Daten

Arbeitsstufe	Einzelarbeiten	Arbeitszeit	Kosten
Datenbeschaffung	Recherche und Auswahl	1 Tag	ca. 3 000 DM
Datenvorverarbeitung	Georeferenzierung ev. Atmosphärenkorrektur	3 Tage	
Datenprozessierung	Berechnung Vegetationsindex ;Kalibrierung; Editierung Wasser, offene Böden	5 Tage	
Kartographische Ausgabe	Kartenrahmen, Legende, etc.	2 Tage	

4.2 SPOT (multispektral und panchromatisch)

4.2.1 Aufnahmeparameter

Es werden derzeit zwei SPOT-Satelliten mit identischer Instrumentierung betrieben. Der erste wurde am 22.02.1986, der zweite am 22.02.1990, gestartet. Beide sind durch folgende Parameter bestimmt:

Flughöhe:	832 km
Bahn:	polar, sonnensynchron
Inklination:	98,7°
Bildfeld:	60 * 60 km
Umlaufzeit:	101,4 Min.
Repititionsrate:	26 Tage (Nadiraufnahme)
	1 - 5 Tage (bestellte Schrägaufnahmen)
Field of View (FOV):	4,13°
Aufnahmewinkel:	+/- 27° (in 45 Stufen)
Öffnungswinkel:	0,024 mrad (XS)
	0,012 mrad (P)
Spektralbereich (XS):	500 - 590 nm
	610 - 680 nm
	790 - 890 nm
Bodenauflösung (XS):	20 m
Spektralbereich (pan):	510 - 730 nm
Bodenauflösung (pan):	10 m
Datenverfügbarkeit:	seit 1986

Die SPOT-Satelliten sind mit je zwei High Resolution Visible-Sensoren (HRV) ausgerüstet, die unabhängig voneinander im panchromatischen Mode (P) oder im multispektralen Mode (XS) betrieben werden können.
Für 1999 ist der Start von SPOT 5 geplant, der eine geometrische Auflösung im multispektralen Modus von 10 m und im panchromatischen von 5 m haben soll.

4.2.2 Eignung für Versiegelungserhebungen

SPOT ist neben Landsat der wichtigste Datenlieferant für die Erdbeobachtung. Das wird auch für

die nächsten Jahre so bleiben.
Die multispektrale Auflösung von 20 m ist zwar geringfügig besser als die von Landsat-TM, erreicht aber noch nicht den Wert von 5 m, der für die Auflösung der kleinteiligen städtischen Oberflächenbedeckung notwendig ist. Seine spektrale Auflösung gestattet die Berechnung des Vegetationsindex und damit eine indirekte Möglichkeit der Versiegelungserhebung. Die Berechnung von Versiegelungskarten aus SPOT-Daten ist Bestandteil des Forschungsprogramms und wird in Kapitel 7 dargestellt.
Für eine visuelle Interpretation könnte sich ein Farbkomposit aus SPOT- und KWR-Daten eignen. So würde die gute Trennbarkeit von Vegetation und vegetationslosen Gebieten in SPOT-Aufnahmen mit der hohen geometrischen Auflösung von KWR-Aufnahmen verbunden werden.

4.2.3 Kostenabschätzung

Für die Kostenabschätzung kann hier auf den Abschnitt zu den Landsat-Daten (4.1.3) verwiesen werden. Methodisch ist das Vorgehen völlig identisch, so daß die gleichen Arbeiten anfallen. Auch in der Datenbeschaffung sind Landsat- und SPOT-Daten vergleichbar. Für die Erstellung von Versiegelungskarten wird das Datenprodukt SPOT View Basic empfohlen (ca. 4 000 DM, Szenengröße ca. 22 * 22 km).

4.3 Colorinfrarotluftbilder

4.3.1 Aufnahmeparameter

Sollen Colorinfrarotbilder zur Versiegelungserhebung benutzt werden, so ist zuerst zu klären, ob eventuell aktuelle CIR-Bilder vom Untersuchungsgebiet zur Verfügung stehen. Von den jeweiligen Landesvermessungsämtern werden im fünfjährigen Turnus Befliegungen durchgeführt. Diese dienen zur Fortführung der Kartenwerke und werden in der Regel mit Colorinfrarotfilm durchgeführt. Außerdem wurden gerade in den neuen Ländern aufgrund der schlechten Datenlage in den letzten 5 Jahren von den städtischen Vermessungsämtern oder von Umweltbehörden (z. B. im Rahmen der Biotopkartierung) zusätzliche Befliegungen durchgeführt.
Sollten keine Daten oder nur ungenügend aktuelle zur Verfügung stehen, so muß eine Befliegung durchgeführt werden. Folgendes ist bei der Flugplanung zu bedenken:

- *gewünschter Bildmaßstab:*

Dieser sollte einerseits klein sein, um möglichst große Bereiche auf einem Bild zu erfassen und damit den Auswerteaufwand gering zu halten, andererseits sollte er groß sein, um ausreichende geometrische Genauigkeit für die Auswertung zu erhalten. Der Zusammenhang zwischen Bildmaßstab (m), Kammerkonstante (c) und Flughöhe (h) wird beschrieben durch:

$m = h/c.$

Für eine detaillierte objektbezogene Versiegelungsauswertung sollte ein Bildmaßstab von 1 : 3 000 angestrebt werden. Dann sind bei einer geometrischen Auflösung von 25 Lp/mm, wie er im Gesamtprozeß der Filmaufnahme realistisch ist, noch Objektdetails bis ca. 6 cm bei sehr großem Objekt/Untergrundkontrast und bis ca. 50 cm bei geringem Objekt/Untergrundkontrast sichtbar. Ein Bildmaßstab 1 : 3 000 wird bei einer Flughöhe von 450 m bei einer Meßkammerkonstanten von 153 mm erreicht. Für Übersichtskarten ist ein Bildmaßstab von 1 : 20 000, resultierend in einer Objektauflösung von 40 cm, bei höchstem Objektkontrast ausreichend (Flughöhe 3 000 m bei einer Meßkammerkonstanten von 153 mm). Die objektbezogene Auswertung solchen Bildmaterials ist sehr aufwendig. Oft wird ein automatisiertes Verfahren auf Basis der Auswertung des Vegetationsindex ausreichen.

- *Filmtyp:*

Da für die Versiegelungserhebung die Trennung von Vegetation und vegetationsloser Fläche grundlegend ist, muß unbedingt ein Colorinfrarotfilm Verwendung finden. Die Verwendung folgender Filme ist üblich und wird empfohlen:

Tab. 10: Übersicht gebräuchlicher CIR-Filme

Filmbezeichnung	Empfindlichkeit (EAFS)	Auflösung (L/mm)		RMS (Körnigkeit)
		Objektkontrast 1 000 : 1	Objektkontrast 1,6 : 1	
Aerochrome Infrared 2443 (Standard)	40	63	32	17
High Definition Aerochrome Infrared SO-131	6	160	50	9
High Definition Aerochrome Infrared SO-130	6	160	50	9

Abbildung 1 zeigt die relative spektrale Empfindlichkeit des Standardfilms für CIR-Befliegungen.

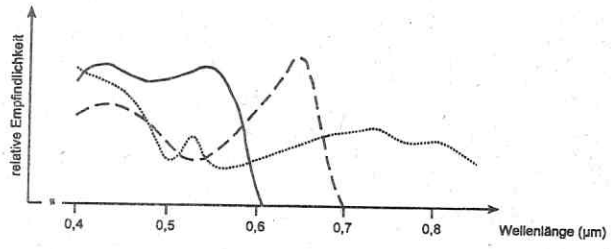


Abb. 1: Relative spektrale Empfindlichkeit des Aerochrome Infrared 2443 von Kodak

- *Festlegung der Größe des Fluggebietes:*
  Das Fluggebiet ist natürlich abhängig von der Aufgabenstellung. Für die Aufnahme städtischer Versiegelung sollte aus zwei Gründen das städtische Umland mit aufgenommen werden. Zum einen ist dieses Gebiet potentielles Siedlungsgebiet und steht dann für Zeitvergleiche mit späteren Aufnahmen zur Verfügung. Zum zweiten steigen die Kosten einer Befliegung nur sehr unwesentlich mit der Größe des Gebietes.

- *Festlegung Überdeckungsgrad:*
  In der Regel sollte ein Überdeckungsgrad der Aufnahmen in Flugrichtung von 30 % und 60 % zwischen den Flugstreifen gewählt werden. Damit sind eventuell spätere stereoskopische Auswertungen möglich, wie sie z. B. für die Bestimmung des KÖH- bzw. KÖP-Wertes notwendig sind.

4.3.2 Eignung für Versiegelungserhebungen

CIR-Aufnahmen eignen sich ausgezeichnet für die Versiegelungserhebung. Der Bildmaßstab kann zwischen 1 : 3 000 und 1 : 20 000 gewählt werden. Es ist bei großem Bildmaßstab sowohl eine objektorientierte Auswertung (Digitalisierung der einzelnen Oberflächenbedeckungen) als auch eine automatisierte über den Vegetationsindex möglich. Kleinere Bildmaßstäbe sind ob der verringerten Detailsichtbarkeit und des Arbeitsaufwandes nur noch automatisiert auswertbar. Voraussetzungen für eine automatisierte Auswertung ist die hochgenaue Farbabtastung der Luftbilder. Diese muß sich, wenn Auflösungsverluste durch die Digitalisierung vermieden werden sollen, nach der Filmauflösung richten. Damit ist bei dem häufig eingesetzten Colorinfrarotfilm Aerochrome 2443 (Tab. 10), der eine Linienpaarauflösung von 63 Lp/mm hat, eine Scanauflösung von ca. 8,0 µm (3 175 dpi) erforderlich. Nicht zu unterschätzen sind die resultierenden Anforderungen an die Speicherkapazität (Filegröße bis 2,5 GB!) und letztlich die Leistungsfähigkeit der verwendeten Computertechnik, die solche Datenmengen prozessieren muß.

Sehr nachteilig wirkt sich die Teilung der Untersuchungsfläche in sehr viele einzelne Luftbilder aus. Luftbildserien von 1 000 Bildern sind keine Seltenheit. Diese können nach Digitalisierung und Entzerrung durch Mosaikierung prinzipiell zusammengesetzt werden. Durch die enormen Bildgrößen und den Arbeitsaufwand sind diesem Prozeß aber trotz modernster digitaler Technik schnell Grenzen gesetzt. Dann muß mit gröberen Bildmatrizen gerechnet werden, was für eine reine Bildausgabe auch vertretbar ist.
Selbst komplexe Versiegelungsparameter wie der KÖH- und KÖP-Wert sind bei stereometrischer Auswertung solch hochauflösenden Bildmaterials berechenbar.

4.3.3 Kostenabschätzung

Datenerhebung durch Meßflug:	ca. 15 000 - 30 000 DM (in Abhängigkeit von Gebietsgröße)
Datenauswertung:	ca. 2 Tage pro Luftbild (in Abhängigkeit von Aufgabenstellung)
Kartographische Aufarbeitung:	ca. 1 Tag pro Luftbild

4.4 Airborne Thematic Mapper

4.4.1 Aufnahmeparameter

Der Airborne Multispectral-Scanner (AMS) der Firma Daedalus (AADS 1268), der das Standardgerät darstellt, verfügt über folgende Leistungsparameter:

IFOV (Instantaneous Field of View):	2,5 mrad (1,25 mrad möglich)
Gesamtöffnungswinkel:	86° (95,5 gon)
Abtastfrequenz:	100, 50, 25 oder 12,5 Zeilen/s
Digitalisierungsgenauigkeit:	8 oder 12 Bit
Spektrale Auflösung:	11 Kanäle

Tab. 11: Spektrale Auflösung des Daedalus-Scanner

ATM-Kanal	Spektralbereich [µm]	Band	Landsat-TM-Kanal
Kanal 1	0,42 - 0,45	sichtbares Blau (unterer Bereich)	
Kanal 2	0,45 - 0,52	sichtbares Blau (oberer Bereich)	Kanal 1
Kanal 3	0,52 - 0,60	sichtbares Grün	Kanal 2
Kanal 4	0,605 - 0,625	sichtbares Rot (unterer Bereich)	Kanal 3
Kanal 5	0,63 - 0,69	sichtbares Rot (oberer Bereich)	
Kanal 6	0,695 - 0,75	nahes Infrarot	
Kanal 7	0,76 - 0,90	nahes Infrarot	Kanal 4
Kanal 8	0,91 - 1,05	nahes Infrarot	
Kanal 9	1,55 - 1,75	mittleres Infrarot	Kanal 5
Kanal 10	2,08 - 2,35	mittleres Infrarot	Kanal 7
Kanal 11	8,5 - 13,0	thermal	~Kanal 6 (10,4 - 12,5)

Die spektrometrische Auflösung des Scanners ist so gewählt, daß 7 der 11 Spektralkanäle identisch mit der Kanallage des Landsat-TM-Sensors liegen. Dadurch ist die Möglichkeit vergleichender Untersuchungen gegeben.

4.4.2 Eignung für Versiegelungserhebungen

Scannerdaten eignen sich im besonderen Maße für die Versiegelungserhebung. Sie verbinden bei niedriger Flughöhe hohe geometrische Auflösung mit höchster spektrometrischer Genauigkeit. Insbesondere der Thermalkanal bedingt wertvolle zusätzliche Informationen für die Versiegelungserhebung. Günstig ist die Kombination einer Scannerbefliegung mit einer CIR-Aufnahme. Solche CIR-Aufnahmen verursachen nur sehr unwesentliche Mehrkosten (ca. 5 000 DM) bei zusätzlichem Informationsgewinn durch die noch bessere geometrische Auflösung.
Die Meßflüge müssen bei windschwacher, austauscharmer Wetterlage erfolgen. Scanner sind durch ihre kontinuierliche Aufzeichnung höchst empfindlich gegenüber Bewegungen des Flugzeuges, verursacht durch Luftturbulenzen. Derartige Flugzeugbewegungen verursachen selbst bei kreiselstabilisierter Scankopfmontage Verzerrungen in der Scanneraufnahme. Diese erschweren die Paßpunktfindung für die geometrische Entzerrung und erhöhen die ohnehin hohe Zahl erforderlicher Paßpunkte weiter.
Mit Sondergenehmigung können Flughöhen bis 450 m über Siedlungsgebiet und damit Bodenauflösungen bis unter 1 m erreicht werden. Damit sind hochgenaue Versiegelungserhebungen sowohl durch visuelle Interpretation als auch - durch das multispektrale Signal - über die Vegetationsindexberechnung möglich. Eine dritte Auswertemöglichkeit besteht in der Nutzung des Thermalkanals. Aus dem Abkühlungsverhalten von Oberflächenbedeckungen,

bestimmbar durch zwei Meßflüge (einen nach Sonnenuntergang, einen vor Sonnenaufgang), sind Rückschlüsse auf den Versiegelungsanteil möglich.
Die Sensitivität des Verfahrens, unter Berücksichtigung möglicher Fehlerquellen, wie sie bei Thermalaufnahmen sehr vielfältig sind, soll im Projektteil 2 bestimmt werden. So ist die Wärmestrahlung nicht nur von der Oberflächentemperatur, sondern auch vom Emissionsvermögen der Oberfläche abhängig. Auch die Atmosphäre beeinflußt durch Absorption und Emission die Wärmestrahlung. Die Interpretation von Thermalbildern ist weiterhin durch die Mehrdeutigkeit der erfaßten Phänomene bestimmt (Albedo der Fläche, Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, Wassergehalt, Belüftung, Relief).

4.4.3 Kostenabschätzung

Dem sehr hohen Informationsgehalt von Scanneraufnahmen stehen folgende sehr hohe Kosten insbesondere im Bereich Datenauswertung gegenüber.

Datenaquisition (Meßflug):	ca. 25 000 - 50 000 DM in Abhängigkeit von Gebietgröße; bei mehrmaliger Befliegung erhöhen sich die Kosten nicht linear
Geometrische Entzerrung:	ca. 750 DM/km² (bei Bodenauflösung von 1 m)
Datenprozessierung:	ca. 1 Tage/km² (visuelle Interpretation) ca. 0,2 Tage/km² (Vegetationsindex) ca. 1,5 Tage/km² (thermale Auswertung)
Kartographische Aufbereitung:	ca. 5 Tage (von gewünschtem Kartenmaßstab und Größe des Untersuchungsgebietes abhängig)

4.5 KWR 1000 (DD 5)

4.5.1 Aufnahmeparameter

Trägersystem:	Kosmos (4. Generation)
Aufnahmedauer:	wenige Monate pro Mission
Flughöhe:	ca. 200 km
Bahn:	polar, sonnensynchron
Umlaufzeit:	98 Min.
Repititionsrate:	unregelmäßig

Sensor:	Kosmicheskij Fotoapparat
Betreiberland:	Rußland (Kosmosprogramm)
Spektralbereich:	panchromatisch
Kammerkonstante:	1 000 mm
Bildformat:	50 * 60 cm
Bildmaßstab:	1 : 50 000 - 1 : 120 000
Bildfeld:	20 * 20 km
Bodenauflösung:	(0,75) 2 - 5 m
Filmtyp:	höchstauflösender panchromatischer Film
Wiederholungsrate:	jährlich ca. 10 - 15 Missionen
Bezugsprodukt:	ausschließlich digital (DD5) mit Bodenauflösung von ca. 2,5 m
Datenverfügbarkeit:	seit 1975

4.5.2 Eignung für Versiegelungserhebungen

Die KWR-1000-Daten sind zur Zeit die Satellitenbilddaten mit der höchsten Auflösung. Sie verbinden die Vorteile einer hohen Flächendeckung pro Aufnahme mit einer hohen Bodenauflösung, die viele relevante Bodenbedeckungstypen differenzierbar darstellt. Aufgrund der panchromatischen Aufnahme ist die Nutzung von Klassifikatoren, die die spektrale Information auswerten, unmöglich.

KWR-Daten sind in der Regel nicht als Film erhältlich. Das dürfte in der geometrischen Auflösungsverschlechterung liegen, die aus militärstrategischen Gründen durchgeführt wird. Pro km² muß mit Kosten von ca. 20,00 DM gerechnet werden. Die radiometrische Auflösung muß als gering bewertet werden. So nutzt die für das Forschungsprojekt bezogene Aufnahme von Dresden nur etwa 40 % des möglichen Intensitätsbereichs. Dieses muß eventuell auf ungenügende Grauwertkalibrierung im Scanvorgang zurückgeführt werden.

Die Auswertung kann nur durch eine visuelle Interpretation erfolgen. Erste Ansätze zu einer teilweisen Bildsegmentierung durch Mustererkennung von Gebäuden und Straßen sind in der Literatur dargestellt. Eine automatisierte Auswertung des Bildmaterials hinsichtlich Versiegelungsparametern ist derzeit nicht möglich. Die Nutzung von KWR-1000-Daten wird auch durch die schlechte Verfüg- und Recherchierbarkeit stark beeinträchtigt. Die russischen Archive sollen in Zukunft für einen Zugriff geöffnet werden. Dazu baut derzeit die Firma NPO Planeta in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) in der DLR Fernerkundungsstation Neustrelitz eine Recherchedatenbank auf.

Folgende Nutzungsarten sind in dem Bildmaterial visuell unterscheidbar:

- einzelne Bäume einschließlich der Bestimmung des Baumkronendurchmessers

- einzelne Gebäude (auch kleinere)
- Straßen differenzierbar nach Straßenbreite
- Wege
- Wasserflächen.

Hausdächer können je nach Dachbelagsart eine schwarze bis weiße Darstellung erfahren. Eine Unterscheidung zwischen Dachbelag und Freiraum ist zum Teil schwierig und in einigen Fällen auch unmöglich. Große Probleme gibt es mit der Beurteilung von Flächen, die im Schatten liegen.

Eine Unterscheidung der Bedeckungsart im Freiraum ist durch die Grauwertdarstellung sehr schwierig. So unterscheidet sich der Grauwert für Rasenfläche wenig von dem versiegelter Flächen. Hier wäre eine Kombination mit multispektralem Bildmaterial sehr wünschenswert, da dann die Strukturinformation vom KWR und die bessere Grundflächeninformation vom multispektralem Bild genutzt werden könnte. Bildkomposite verschiedener Sensoren sind durch eine IHS-Transformation leicht herstellbar. Die geometrische Auflösung der Bildmaterialien sollte in der selben Größenordnung liegen. Darum ist die Kombination SPOT/KWR wahrscheinlich ein sehr informationsreiches Komposit zur visuellen Beurteilung der Versiegelung.

Es wurde ein 11,5 * 11,5 km großer Ausschnitt einer KWR-Szene vom Juni 1989, der das Stadtzentrum Dresdens darstellt, untersucht. Die Aufnahme verfügt über eine geometrische Auflösung von 2,6 m. Das Bild wurde auf Grundlage mehrerer TK10 entzerrt und kartographisch verarbeitet.

Insgesamt wird das KWR-1000-Bildmaterial als sehr informativ für Versiegelungserhebungen gewertet. Sein Gewinn liegt in der hohen geometrischen Auflösung, der zu einer Darstellung der meisten Gebäude führt. Verfahren zur automatischen Klassifikation von Gebäudeflächen sind derzeit noch nicht verfügbar. Größter Informationsgewinn ist in der Kombination von KWR- und SPOT-Daten zu erwarten, der zu einer kleinräumigen, allerdings manuellen Versiegelungserhebung führen könnte. Weitergehende Untersuchungen dazu sind im Projektteil 2 im Jahre 1996 geplant.

4.5.3 Kostenabschätzung

Datenbeschaffung:	20,00 DM/km²
Datenauswertung:	sehr aufwendig, da visuelle Interpretation nötig

4.6 KFA 1000

4.6.1 Aufnahmeparameter

Sensor:	Kosmicheskij Fotoapparat (KFA-1000)
Betreiberland:	Rußland (Kosmosprogramm)
Flughöhe:	240 - 350 km
Spektralbereich:	0,4 - 0,9 (panchromatisch)
	0,57 - 0,67 (spektrozonal)
	0,67 - 0,80 (spektrozonal)
Kammerkonstante:	1 000 mm
Bildformat:	30 * 30 cm
Bildmaßstab:	1 : 250 000 - 1 : 280 000
Bildfeld:	70 * 70 km bis 105 * 105 km
Bodenauflösung:	5 - 8 m
Filmtyp:	SN-10 (150 ASA, Spektrozonal-Colordiapositiv)
Filmauflösung:	145 - 160 Lp/mm
Wiederholungsrate:	jährlich ca. 2 - 3 Missionen
Datenverfügbarkeit:	seit 1973

4.6.2 Eignung für Versiegelungserhebungen

Die KFA-1000-Daten eignen sich nur bedingt für die Versiegelungserhebung. Die geometrische Auflösung ist mit 5 - 10 m (die untersuchte KFA-1000-Szene hat eine geometrische Auflösung von 8,5 m) besser als die von Landsat und SPOT, aber weitaus geringer als die der KWR-1000-Daten. Die spektrometrische Auflösung muß als gering eingeschätzt werden. Die Aufnahmen werden mit einem Spektrozonalfilm vom Typ SN-10 gemacht, der nur zwei Spektralbereiche auflöst. Die für die Vegetationsdetektion wichtige Trennung von sichtbarem und infrarotem Spektralkanal ist bei diesem Film nicht gegeben:

-KFA-Spektralbereich 1: 570 - 670 (oberer Grün- und unterer Rotbereich)

-KFA-Spektralbereich 2: 670 - 800 (oberer Rot- und unterster Infrarotbereich)

Der "Inverseffekt" zwischen rotem und infrarotem Spektralkanal ist nicht gegeben.

Für Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine KFA-1000-Aufnahme von Dresden und Umland beschafft (Detail siehe Tab. 14). Aus dem 30 * 30 cm großen Diapositiv wurde ein Ausschnitt von 8 * 10 cm mit dem Stadtgebiet Dresdens mit einer Auflösung von 8,5 µm (3 000 dpi) mit je 256 Intensitätswerten pro Farbkanal auf einem Vexel-Scanner abgetastet.

Durch Prescan wurde die Aussteuerung aller Farbkanäle und damit maximaler Bildkontrast erreicht. Die digitale geometrische Auflösung nach dem Scan wurde mit 2,6 m bestimmt. Das stimmt weitestgehend mit der theoretisch berechneten Auflösung von 2,4 m überein (Bildmaßstab 1 : 280 000/ 8,5 µm).

Da die genaue geometrische Filmauflösung nicht bekannt war und sehr stark schwanken kann, wurde mit höchstmöglicher Scandichte gearbeitet. Auflösungsuntersuchungen am gescannten Bild zeigten, daß ohne Informationsverlust die Daten um den Faktor 4 komprimiert werden konnten, da die analoge Auflösung bei 8,5 m liegt.

Die ungenügende Trennung zwischen Rot- und Infrarotbereich in KFA-Bildern wird durch die folgenden Korrelationskoeffizenten zwischen den einzelnen Bildkanälen bestätigt:

$r^2_{1,2} = 0,95$ (Korrelationskoeffizient zwischen Kanal Blau-Grün)
$r^2_{1,3} = 0,92$ (Korrelationskoeffizient zwischen Kanal Blau-Rot)
$r^2_{2,3} = 0,88$ (Korrelation zwischen Kanal Grün-Rot).

Das KFA-Bild wurde dann geometrisch auf Grundlage einer TK25 entzerrt und kartographisch aufgearbeitet.
Folgende Nutzungsarten können bei genügender Flächengröße unterschieden werden:

- größere Gebäude
- fast alle Wohnblöcke von Großwohnsiedlungen
- fast alle Straßen/Eisenbahnlinien
- größere Grünflächen in Wohngebieten/Blockbebauung
- Baumgruppen (keine Einzelbäume)
- Wiesenflächen
- Rasenflächen
- Wasserflächen.

Eine Differenzierung der Vegetation, z. B. Trennung von Rasen und Wiese ist oft unmöglich. Häuser in lockeren Siedlungsgebieten sind nicht erkennbar. Derartige Siedlungsgebiete werden ähnlich dargestellt, wie Flächen mit einem geringem Vegetationsanteil (z. B. Felder in Fruchreife, trockene kurzgeschnittene Rasenflächen).
Die Berechnung eines sinnvollen Vegetationsindexbildes auf Basis von KFA-1000-Datensätzen ist aufgrund der ungenügenden Trennung von Rot- und Infrarotkanal nicht möglich. (Eine Vegetationsindexberechnung führt gegenüber Vegetationsindexbildern von Landsat- und SPOT-Daten zu inversen Bildern.)

Insgesamt muß eingeschätzt werden, daß KFA-1000-Bildmaterial wenig für die Versiegelungserhebung geeignet ist. Weder die geometrische noch die spektrometrische Auflösung erschließen neue Informationen. Dazu kommt noch die Unregelmäßigkeit der Datenaufnahme und die zur Zeit sehr schwierige Recherchierbarkeit der Datenbestände.

4.6.3 Kostenabschätzung

Datenbeschaffung:	ca. 3 000,00 DM (Teilbilder nicht erhältlich, da photographisches Material)
Scanservice:	ca. 500,00 DM
Visuelle Auswertung:	ca. 1 Tag/km² bei flächendeckender Digitalisierung (ein km² bei optimaler Digitalisierung entsprechen ca. 15 000 Pixel)
GIS-Aufbereitung:	ca. 1 Tag/km²
Kartographische Aufarbeitung:	ca. 2 Tage

5 Datenmaterial und Auswerteverfahren

5.1 Datenmaterial

5.1.1 Terrestrisches Datenmaterial

Für vergleichende Untersuchungen standen die Daten terrestrisch erhobener Testgebiete in Dresden und Leipzig zur Verfügung. Von diesen waren sowohl ihre räumliche Abgrenzungen als auch der Anteil einzelner Bodenbelagsarten und der mittlere Versiegelungsgrad bekannt. Die Auswahl der Gebiete erfolgte auf Basis typischer städtebaulicher Strukturen. In die Berechnungen gingen jeweils an den Testgebietsgrenzen die halbe Straßenbreite ein.

5.1.1.1 Terrestrische Untersuchungsdaten von Dresden

Die Daten zu den Testgebieten in Dresden wurden innerhalb des Forschungsprojekts "Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung" im Jahre 1992 von Mitarbeitern des Institutes für ökologische Raumentwicklung e. V. erhoben. Neben dem Gesamtversiegelungsgrad der Fläche sind die Belagsarten überbaute Fläche, dichte Beläge, Platten, Pflaster und wasser-

gebundene Decken differenziert und vermessen worden. Außerdem wurde die Bodenfunktionszahl (s. Kap. 2.1) berechnet.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht der Testgebiete gegliedert nach Strukturtypen.

Tab. 12: Übersicht der terrestrisch erhobenen Testgebiete im Untersuchungsgebiet Dresden

Strukturtyp	Anzahl der Testgebiete	mittlere Größe der Testgebiete [ha]	mittlerer Versiegelungsgrad [%]	max. Versiegelungsgrad [%]	min. Versiegelungsgrad [%]
Geschlossene Blockbebauung	3	2,28	85,8	93,3	77,4
Offene Blockbebauung	8	1,86	68,0	88,6	52,7
Mehrgesch. Wohnungsbau (> 3 Geschosse)	10	5,52	50,2	61,9	36,6
Siedlungen (< 3 Geschosse)	6	1,83	50,3	52,6	37,1
Einzel- und Reihenhausbebauung (< 2 Geschosse)	5	1,53	44,0	55,6	33,1
Alte Ortskerne	4	3,06	40,6	49,1	29,8
Grünflächen	8	2,45	35,6	58,1	14,4
Industrieanlagen	9	3,21	79,6	95,3	56,1
Gesamt	53	156,28	56,8	95,3	14,4

Die gesamte untersuchte Fläche gliederte sich folgendermaßen:

Gesamtuntersuchungsfläche:	1 663 684,0 m²
Gebäudefläche:	342 008,0 m²
versiegelte Freifläche:	550 986,4 m²
unversiegelte Freifläche:	770 690,4 m²

Damit ergeben sich folgende Werte für die Flächenanteile:

Gesamtversiegelungsgrad:	53,7 %
Flächenanteil unversiegelter Böden:	46,3 %

5.1.1.2 Terrestrische Untersuchungsdaten von Leipzig

Die Daten der Leipziger Testgebiete wurden von Mitarbeitern des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle e. V., Projektbereich "Urbane Landschaften", aufgenommen. Hier wurde neben dem Gesamtversiegelungsgrad zwischen Gebäuden und versiegelten Freiflächen unterschieden, unter den Gebäuden nochmals zwischen Wohngebäuden und Nebengebäuden. Zusätzlich standen Daten für den Anteil der einzelnen Teilflächen in den versiegelten und teilversiegelten

Freiräumen zur Verfügung.
Außerdem wurden jeweils ein Versiegelungswert ohne die umgebenden Verkehrsflächen und ein zweiter einschließlich halber Straßenbreite erhoben. In den Vergleich mit den Satellitendaten floß der mittlere Versiegelungsgrad der Testgebiete in Dresden und Leipzig jeweils mit den berechneten Werten für die halbe Straßenbreite ein.

Tab. 13: Übersicht der terrestrisch erhobenen Testgebiete im Untersuchungsraum Leipzig

Strukturtyp	Anzahl der Testgebiete	mittlere Größe der Testgebiete [ha]	mittlerer Versiegelungsgrad [%]	max. Versiegelungsgrad [%]	min. Versiegelungsgrad [%]
Geschlossene Blockbebauung	4	1,3	83,8	90,9	70,3
Offene Blockbebauung	2	0,7	74,8	75,2	74,4
Blockrandbebauung	5	1,0	76,1	81,9	69,5
Randbebauung der 20/30er Jahre	7	0,9	71,1	81,0	51,2
Zeilenbebauung der 50/60er Jahre	2	2,5	34,8	38,0	31,5
Großwohnsiedlung	6	0,8	57,9	62,6	52,4
Doppelhäuser	1	1,0	52,0	-	-
Villen/Stadthäuser	2	1,0	51,7	56,7	46,7
Gesamt	29	30,1	62,4	90,9	30,4

Die gesamte untersuchte Fläche gliederte sich folgendermaßen:

Gesamtuntersuchungsfläche:	391 932,00 m²
Gebäudefläche:	110 844,50 m²
davon Hauptgebäude:	100 452,50 m²
davon Nebengebäude:	10 392,00 m²
versiegelte Freifläche:	137 757,00 m²
unversiegelte Freifläche:	143 331,00 m²
davon vegetationsloser Boden:	2 708,50 m²
davon teilweise Vegetationsbestand:	10 253,75 m²
davon 100 % Vegetation:	131 493,75 m²

Damit ergeben sich folgende Werte für die Flächenanteile:

Gesamtversiegelungsgrad:	60,78 %
Flächenanteil reiner Vegetationsflächen:	33,55 %
Flächenanteil Flächen mit Teilvegetation:	2,62 %
Flächenanteil vegetationsloser, unversiegelter Böden:	0,69 %

5.1.2 Fernerkundliches Datenmaterial

Im Rahmen des Teilprojektes "Erarbeitung von Übersichtskarten zur Versiegelungsintensität" stehen folgende Fernerkundungsdaten zur Verfügung:

Tab. 14: Übersicht der verwendeten Fernerkundungsdaten

Sensor	Bezug von	Stadtgebiet	Aufnahmedatum	Produktbezeichnung
Landsat-TM	GAF	Dresden	19.08.1992	verschobene Viertelszene 192_24
Landsat-TM	GAF	Dresden	30.07.1994	verschobene Viertelszene 192_24
SPOT-XS	Dornier	Dresden	21.04.1992	SPOT View Basic Precision
SPOT-PAN	Dornier	Dresden (Nord)	05.08.1995	Vollszene (PAN) 61-246
SPOT-PAN	Dornier	Dresden (Süd)	05.08.1995	Vollszene (PAN) 61-247
Landsat-TM	GAF	Leipzig	07.07.1989	Vollszene 193_24
Landsat-TM	GAF	Leipzig	21.07.1994	verschobene Viertelszene 193_24
SPOT-XS	Dornier	Leipzig	25.06.1994	Vollszene 58_246
Landsat-TM	GAF	Chemnitz	20.07.1993	verschobene Viertelszene 193_25
SPOT-XS	Dornier	Chemnitz	04.07.1994	Vollszene KJ 060-247
SPOT-PAN	Dornier	Chemnitz	10.09.1991	Vollszene KJ 060-247
KFA-1000	WIB	Dresden	27.05.1989	Filmnegativ / 30 x 30 cm; Originalmaßstab 1 : 280 000; gescannt mit 8,3 µm
KWR-1000	WIB	Dresden	Juni 1989	Ausschnitt einer Gesamtszene (digital); 11,5 x 11,5 km; im Bildmaßstab 1 : 65 000
CIR	LfUG	Dresden	1992	Flächendeckende Aufnahmen im Maßstab 1 : 10 000
CIR	IÖR	Dresden	10.08.1995	Teilgebiete Dresdens im Maßstab 1 : 3 000
ATM-Scanner	IÖR	Dresden	10. - 12.08.1995	Mittagsflug mit 11 Kanälen, Abend- und Morgenflug nur Thermalkanal

In der Beschaffung wurden möglichst aktuelle Satellitenbilddaten angestrebt. Dazu wurde eine umfassende Recherche durchgeführt. Aufgrund von Bewölkung oder schlechter Datenqualität mußte zum Teil auf ältere Satellitendaten zurückgegriffen werden. So stellt die SPOT-Aufnahme vom 21.04.92 für das Dresdner Stadtgebiet die jüngste SPOT-Aufnahme mit guter Datenqualität dar (Recherchezeitpunkt 10/94). Besonders schwierig war die Beschaffung der russischen Fernerkundungsdaten. Während bei den KFA-Daten das genaue Aufnahmedatum ermittelt werden konnte, war dieses bei den KWR-Daten nicht möglich (nur Angabe Juni 1989).
Neben den Satellitendaten stehen Color-Infrarot-Luftbilder vom Stadtgebiet Dresden aus den Jahren 1992 und 1995 zur Verfügung. Die Bildserie aus dem Jahr 1992 umfaßt ca. 330 Bilder und ist Bestandteil der flächendeckenden Befliegung Sachsens zur Kartierung der realen Landnutzung und zur Aufnahme der Naturraumausstattung. Das Stadtgebiet Dresdens liegt als

Farbkopie im Maßstab 1 : 10 000 vor.
Die Aufnahme der CIR-Bildserie aus dem Jahr 1995 war Bestandteil der Befliegung von Teilen des Dresdner Stadtgebietes vom 10. - 12. August 1995. Es wurden 210 Bilder im Bildmaßstab 1 : 3 000 aufgenommen. Die Längsüberdeckung betrug 60 %, die Querüberdeckung 40 %. Die Bildqualität ist sehr gut.

5.2 Auswerteverfahren

5.2.1 Grundlagen des Auswerteverfahrens

Alle optischen multispektralen Fernerkundungsdaten reagieren besonders sensibel auf Vegetation.
Grüne Pflanzen zeichnen sich durch ein sehr typisches Reflexionsverhalten in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung aus. Im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums reflektieren sie nur sehr gering, was durch die hohe Absorption innerhalb der Blätter zu erklären ist. Diese Absorption wird durch die Blattpigmente (hauptsächlich Chlorophyll) bedingt.
Im Spektralbereich um 0,7 µm, am Übergang zum nahen Infrarot, ist eine sehr starke Zunahme der reflektierten Strahlung zu verzeichnen. Im gesamten Infrarotbereich liegt der Reflexionsanteil zwischen 40 % und 50 %. Die Absorption in diesem Wellenlängenbereich durch die Blätter beträgt weniger als 10 %. Der Rest der Strahlung wird transmittiert. Absorption und Brechung sind abhängig von den Zellstrukturen der Pflanzen, wobei die Größe der Grenzfläche zwischen Zellwand und Interzellularen entscheidend ist, da die ankommende Strahlung hier mehrfach gespiegelt und zum großen Teil reflektiert wird (vgl. Abb. 2).
Die beschriebene Reflexionscharakteristik unterliegt weiterhin der Phänologie, dem Alter der Pflanzen und eventuellen Krankheitsbildern. Letztere können Ursache für Veränderungen von Pigmentgehalt, Wassergehalt oder Zellstruktur einer Pflanze sein.
Neben diesen, das einzelne Blatt beeinflussende Faktoren, spielen folgende weitere eine Rolle:

- der Blattflächenindex
- die prozentuale Bodenbedeckung
- die Geometrie der Vegetationsdecke
- die Zusammensetzung der Vegetationsdecke (Blätter, Stengel, Äste, Stämme, etc.) und die Reflexionseigenschaften der einzelnen Komponenten
- die Eigenschaften des Hintergrundes (Reflexionsverhalten des Bodens, Bedeckung mit Blattstreu, etc.)
- Sonnenhöhe und -azimuth

- Blickwinkel und Azimuth des Sensors.

Auf der Grundlage der beschriebenen Reflexionseigenschaften von Vegetation sind seit den siebziger Jahren verschiedene Rechenverfahren zur Bestimmung des Vegetationsanteils entwickelt worden. Die Mehrzahl dieser Indizes macht sich den starken Reflexionsunterschied zwischen sichtbarem Rot und nahem Infrarot zunutze, indem sie entweder eine Differenz oder/und einen Quotienten aus den Reflexionswerten der entsprechenden Kanäle bilden. Die Quotientenbildung wird vor allem deshalb durchgeführt, um den Einfluß des unterliegenden Bodens auf die Gesamtreflexion zu minimieren. Es wird davon ausgegangen, daß die Reflexion des Bodens relativ gleichmäßig vom sichtbaren Bereich zum nahen Infrarot ansteigt. Ein Quotient bleibt daher von Unterschieden des Bodentyps oder der Bodenfeuchte relativ unbeeinflußt und die entscheidende Größe bleibt der Anteil der Vegetation. Der Wert der Indizes nimmt mit steigendem Vegetationsanteil zu.

Der in dieser Untersuchung verwandte "Normalized Difference Vegetation Index" (NDVI) berechnet die Differenz zwischen sichtbarem Rot und nahem Infrarot und dividiert diese durch die Summe der beiden. Der NDVI zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität gegenüber störenden Einflüssen (beispielsweise durch Boden oder Atmosphäre) aus und hat daher die größte Verbreitung hinsichtlich der Aufnahme des Vegetationsanteils gefunden.
Entsprechend der Kanalverteilung des Sensors ergeben sich folgende Berechnungsgleichungen für den NDVI:

$$NDVI_{TM} = (\text{Kanal 4} - \text{Kanal 3}) / (\text{Kanal 4} + \text{Kanal 3})$$
$$NDVI_{SPOT} = (\text{Kanal 3} - \text{Kanal 2}) / (\text{Kanal 3} + \text{Kanal 2})$$

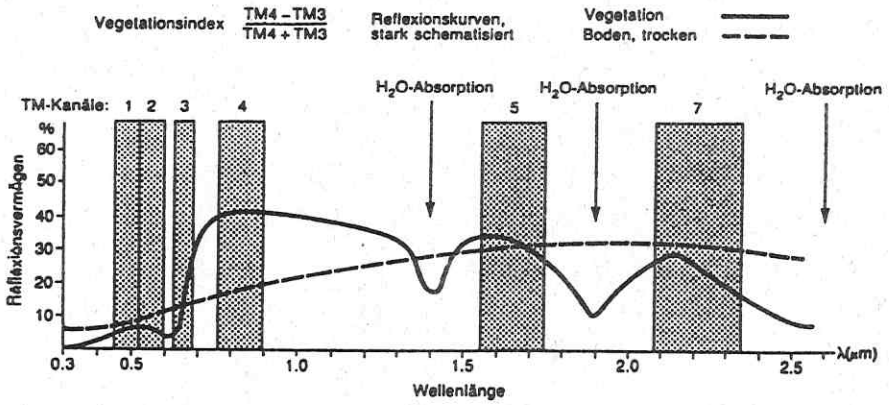


Abb. 2: Spektrale Reflexion verschiedener Materialien [KAPPAS, 1994, S. 89]

Aus dem NDVI kann der transformierte Vegetationsindex TNDVI durch folgende Formel

berechnet werden:

$$TNDVI_{TM} = (\text{Kanal 4} - \text{Kanal 3}) / (\text{Kanal 4} + \text{Kanal 3}) + 0{,}5$$

(KAUTH & THOMAS, 1976) entwickelten das Konzept der sogenannten "Tasseled Cap". Dieses beruht auf der Erkenntnis, daß die Reflexionswerte verschiedener Bodentypen in einem zwei- oder mehrdimensionalen Merkmalsraum eine Linie, die Bodenlinie (soil line) bilden. Bei zunehmender Vegetationsbedeckung entfernen sich die entsprechenden Reflexionswerte senkrecht davon. Entsprechend einer Hauptkomponententransformation können Vektoren entlang der Bodenlinie ("soil brightness index") sowie in Richtung der Vegetationsentwicklung ("green vegetation index") errechnet werden. Von CRIST & CICONE (1977) ist dieses Verfahren für Landsat-TM-Daten weiterentwickelt worden.

Auf der Grundlage dieses Prinzips entwickelten RICHARDAS & WIEGAND (1977) den sogenannten lotrechten Vegetationsindex (Perpendicular Vegetation Index), der ein Maß für die senkrechte Distanz eines Reflexionspunktes zur Bodenlinie darstellt und dadurch die Vegetationsdichte bestimmt.

Das im folgenden beschriebene indirekte Verfahren zur Versiegelungserhebung stützt sich auf die Feststellung von Vegetationsflächen. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, daß Grünflächen unversiegelt sein müssen. Dieses ist mit Ausnahme von begrünten Tiefgaragen und Dachbegrünungen auch gegeben. Da deren Flächenanteil an der Gesamtfläche noch sehr gering ist, kann dieser fernerkundliche Erhebungsfehler als relativ gering eingeschätzt werden. Im Umkehrschluß wird aufgrund fehlender Vegetation auf eine Versiegelung geschlossen. Das trifft bis auf unversiegelte, vegetationslose Flächen wie vegetationsloser Acker, Abgrabungen und Aufschüttungen auch zu. Selbst letztere sind oft schnell durch Spontanvegetation wieder begrünt. Der Flächenanteil unversiegelter, vegetationsloser Flächen in Stadtgebieten kann insgesamt als sehr gering eingeschätzt werden.

5.2.2 Übersicht und Erläuterung des Verfahrens

Das grundlegende Auswerteschema zeigt die folgende Abbildung 3.

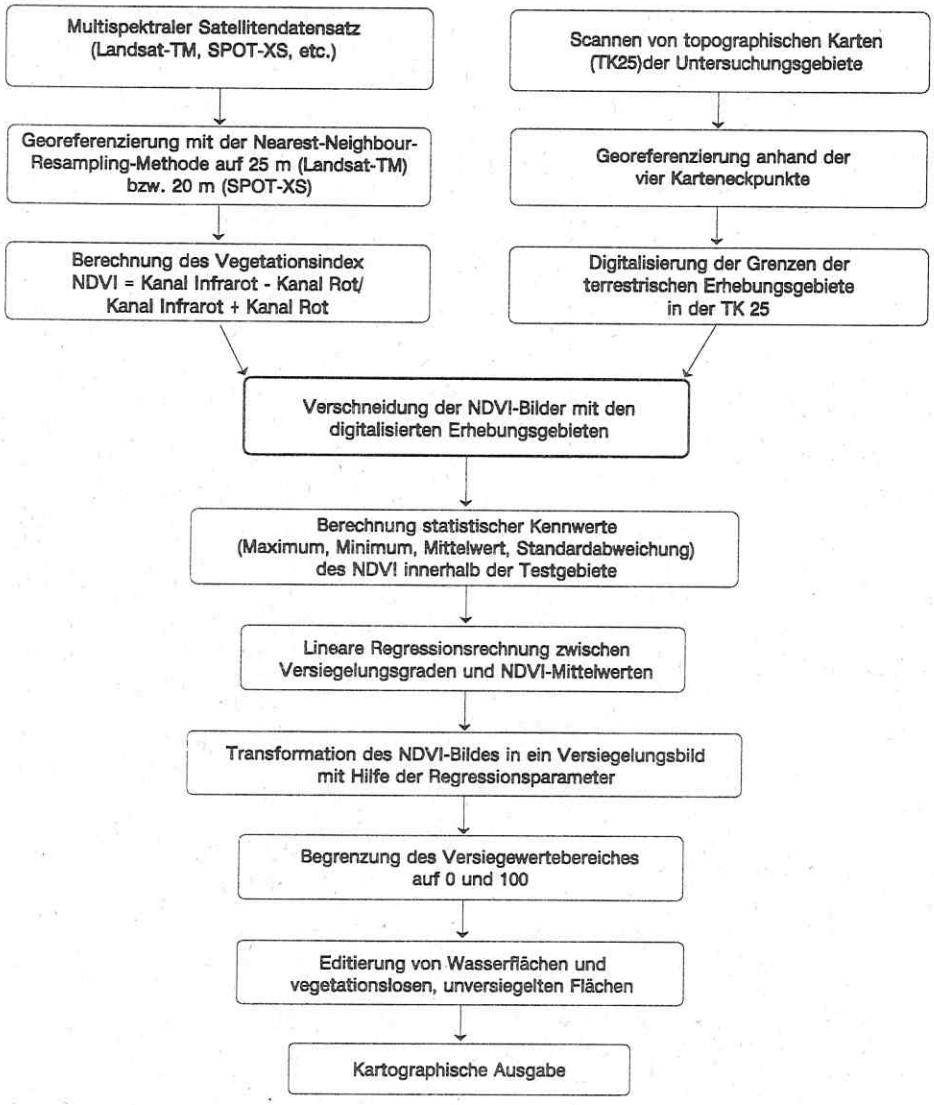


Abb. 3: Prinzipdarstellung der entwickelten Auswertemethodik

Die Stadtflächen von Dresden und Leipzig wurden jeweils aus den Satellitenszenen ausgeschnitten und mit Hilfe von topographischen Karten im Maßstab 1 : 50 000 mit einem mittleren Fehler von 0,7 - 0,9 Pixeln georeferenziert.

Anschließend wurden aus den georeferenzierten Datensätzen Vegetationsindexbilder berechnet. Hierbei fand das Berechnungsverfahren zum "NDVI" (Normalized Difference Vegetation Index) Verwendung (s. Kap. 5.2.1). Weitere Indizes, wie der Tasseled-Cap-Index, wurden aus den Daten berechnet, trugen aber zu keiner wesentlichen Verbesserung der Korrelation mit den Bodendaten bei.

Die Grenzen der terrestrischen Testgebiete wurden aus gescannten, topographischen Karten im Maßstab 1 : 25 000 digitalisiert. Diese wurden in die Vegetationsindexbilder eingeblendet und die Indexwerte der Testgebiete als mittlerer Vegetationsindex dieser Testflächen berechnet. Der

mittlere NDVI-Wert jedes Testgebietes wurde dem jeweiligen terrestrisch erhobenen Versiegelungswert gegenübergestellt und ein lineares Regressionsmodell angewandt. Es ergaben sich Korrelationskoeffizienten zwischen 0,87 und 0,88 (s. Kap. 6). Über die Regressionskoeffizienten wurden die Vegetationsindexbilder in Versiegelungsbilder transformiert.

5.2.2.1 Kalibrierung mit terrestrischen Referenzdaten

Erste visuelle Kontrollen zeigten, daß die so gewonnenen Versiegelungswerte in unversiegelten, vegetationsbestandenen Flächen erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Das ist u. a. darauf zurückzuführen, daß die in die Regression einfließenden Testgebiete hauptsächlich Wohngebiete sind, die mittlere Versiegelungswerte von ca. 30 % - 90 % aufweisen. Es fehlten für die Kalibrierung Flächen mit einem Versiegelungsgrad von 0 % (unversiegelt) und 100 % (vollversiegelt). Daher schien es sinnvoll, zusätzlich Flächen ohne Versiegelung und mit Vollversiegelung in die Kalibrierung einzubeziehen. Die Grenzen von versiegelungsfreien Flächen, wie Stadtpark- oder Wiesenflächen (Versiegelungsgrad 0 %) sowie vollversiegelten Flächen, wie beispielsweise große Parkplatzflächen, wurden digitalisiert und deren mittlerer Vegetationsindexwerte berechnet. Diese Werte wurden in die Regression einbezogen und verbesserten die Korrelation geringfügig. Eine erneute visuelle Kontrolle erbrachte eine deutlich verbesserte Plausibilität der berechneten Versiegelungswerte.
Landwirtschaftliche Flächen und größere Waldgebiete, die größtenteils außerhalb des Siedlungsgebietes anzutreffen sind, weisen bedingt durch ihren hohen Vegetationsbestand - bei landwirtschaftlichen Flächen abhängig vom Zustand der Frucht oder des Feldes - teilweise sehr hohe Vegetationsindexwerte und somit sehr niedrige Versiegelungswerte auf, die weit in den negativen Bereich hineinreichen können. Auch kann es in einigen wenigen Fällen zu Versiegelungswerten > 100 in vollversiegelten Flächen kommen. Diese unsinnigen Versiegelungswerte müssen durch eine Begrenzung auf den Wertebereich [0, 100] - der dem Definitionsbereich des Versiegelungsgrades entspricht - verhindert werden.

5.2.2.2 Kalibrierung ohne terrestrische Referenzdaten

Ziel der Untersuchung war es, neben der Prüfung der Möglichkeit der fernerkundlichen Versiegelungsaufnahme durch Satellitenbilder und der Bestimmung erreichbarer Genauigkeiten und methodischer Fehler auch ein operationell anwendbares Verfahren zu entwickeln. Die bisher beschriebene Methodik stützt sich auf die Kenntnis des Versiegelungsgrades von terrestrischen Erhebungsgebieten. Diese Erhebungen sind sehr aufwendig und nur im Rahmen grundsätzlicher

Methodenuntersuchungen möglich. Operationelle Verfahren sollten aus Kostengründen auf terrestrische Aufnahmen verzichten können. So wurde nach Untersuchung der grundsätzlichen Leistungsfähigkeit des Verfahrens auch ein Verfahren entwickelt, das ohne Bodendaten auskommt.
Es werden dazu ausschließlich unversiegelte und vollversiegelte Gebiete benutzt. Diese lassen sich durch Interpretation des Satellitenbildes und Absicherung der Oberflächenbedeckung durch topographische Karten und/oder Vorortkenntnis sehr leicht identifizieren und digitalisieren. Die mittleren Vegetationsindexwerte dieser Gebiete dienen zur Bestimmung der Parameter der Transformationsgleichungen. Die dazu erforderlichen Regressionskoeffizienten berechnen sich aus den Punkten mit den Koordinaten $P_{unversiegelt}(0,NDVI_{unversiegelt})$ und $P_{versiegelt}(100,NDVI_{versiegelt})$. Dieses vereinfachte Verfahren beeinträchtigt die Genauigkeit der Versiegelungswerte in den Flächen mit Wohnbebauung geringfügig, erweist sich ansonsten aber als nur unwesentlich schlechter als das Verfahren mit Einbeziehung der Bodendaten (vgl. Kap. 6).

5.3.3 Kartographische Ausgabe

Übersichtskarten zur Versiegelung sollen in prägnanter und schnell erfaßbarer Form raumbezogen die Versiegelungswerte wiedergeben. Die Anzahl der Versiegelungsklassen muß sich nach der Genauigkeit des verwendeten Verfahrens richten. Dieses ist, wie später gezeigt wird, mit einem Fehler von ca. 10 % behaftet. Die Wahl von 10 Klassen zur Abdeckung der Versiegelungsklassen von 0 - 100 % war darum sinnvoll. Da das menschliche visuelle System wesentlich weniger Grauwert- als Farbklassen unterscheiden kann, lag eine Farbausgabe der Versiegelungsklassen nahe. Um sich in der Farbwahl sowohl an kartographischen Standards als auch an intuitive Interpretationsmuster zu halten, wurde für vollversiegelte Flächen ein tiefes Rot und für unversiegelte Flächen, die in aller Regel vegetationsbestanden sind, ein tiefes Grün gewählt. Die 8 Versiegelungsklassen dazwischen wurden farblich abgestuft im RGB-System von Rot bis Grün gewählt.
Ausmaskiert und in einer besonderen Farbe müssen die Gebiete Wasser und vegetationsloser Boden dargestellt werden. Diese werden methodenbedingt in ihrem Versiegelungsgrad falsch wiedergegeben. Beide Flächenarten werden durch Editierung oder Klassifikation maskiert, mit der Farbe Grün wie unversiegelte Flächen eingefärbt.
Um die Lesbarkeit der Karten zu verbessern, wurde der thematische Layer "Versiegelungsgrad" mit einer topographischen Information unterlegt. Diese umfaßt nur den Grundriß und ist gedithert, um die Lesbarkeit des thematischen Layers nicht zu beeinträchtigen. Die Karten wurden mit einem Koordinatennetz (Gauß Krüger) sowie Legende und Erläuterungen zur Datengrundlage und zur Auswertmethodik vervollständigt.

Die kartographischen Arbeiten wurden mit Hilfe des Map-Composers von ERDAS Imagine 8.2 und mit ARCVIEW 2.0 durchgeführt.

6 Landsat-TM-Satellitendaten zur Versiegelungserhebung

6.1 Datenauswahl und Georeferenzierung

Um eine möglichst aktuelle Erhebung durchführen zu können, wurden für die Untersuchungsräume Dresden und Leipzig nach umfassender Recherche wolkenfreie Landsat-Szenen aus dem Jahr 1994 ausgewählt. Da das Verfahren auf der Auswertung des Vegetationsindex aufbaut, war die Beschaffung von Sommeraufnahmen angezeigt. Um den Schattenanteil in der Aufnahme klein zu halten, sollten vorzugsweise Aufnahmen aus der Hochsommerzeit Juni/Juli Verwendung finden. Zur Prüfung des Auswerteverfahrens konnte zusätzlich für den Untersuchungsraum Dresden auf eine vorhandene Szene vom 19.08.1992 zurückgegriffen werden.
Um die Satellitenbilddaten mit anderen raumbezogenen Informationen, wie z. B. den Grenzen der terrestrischen Erhebungsgebiete oder topographischen Karten, zu verknüpfen, ist deren Georeferenzierung notwendig. Diese erfolgt über das Setzen von Paßpunkten im Satellitenbild und in topographischen Karten im Maßstab 1 : 50 000. Die Georeferenzierung erbrachte folgende Genauigkeit:

Tab. 15: Entzerrungsgenauigkeit der Landsat-TM-Daten

Datensatz	Anzahl der Paßpunkte	Fehler
Landsat-TM 30.07.1994 (Dresden)	40	0,92
Landsat-TM 21.07.1994 (Leipzig)	65	0,83

Das erforderliche Resampling der Pixeldaten erfolgte mit der Nearest Neighbour Methode. Diese bewirkt die Beibehaltung der Intensitätswerte in allen Kanälen, so daß auch Verknüpfungsparameter wie der Vegetationsindex durch die Entzerrung unverändert bleiben. Als Pixelgröße wurde die bei Landsat-TM-Daten übliche Größe von 25 m für das Bodenelement gewählt.

6.1.1 Untersuchungsgebiet Dresden

Für die Versiegelungserhebung sind in erster Linie städtische Flächen von Interesse. Darum wurde versucht, daß Stadtgebiet vollständig in seinen administrativen Grenzen zu erfassen. Das ist bis auf einen geringfügigen Anschnitt von drei statistischen Bezirken im Norden von Dresden

gelungen. Die West-Ost-Ausdehnung wurde wesentlich weiter gewählt, als es die Stadtgrenze erfordert hätte. Dadurch wird der Agglomerationsraum, zu dem auch die angrenzenden Städte und Gemeinden Radebeul, Coswig, Pirna, Freiberg, Heidenau und Weißig gehören, vollständig erfaßt. Da nur rechteckige Flächen ausgeschnitten werden können, war ein hoher Anteil Wald- und Landwirtschaftsfläche im Untersuchungsgebiet nicht zu verhindern.

6.1.2 Untersuchungsgebiet Leipzig

In den Satellitenszenen von Leipzig wurde das etwa kreisförmige Stadtgebiet in einem weiten Umkreis ausgeschnitten, um auch die große Dynamik dieser Agglomeration (überdimensionale Gewerbegebiete, neues Messegelände, Wohnparks, etc.) dokumentieren zu können. So reicht das Untersuchungsgebiet von Schkeuditz und Günthersdorf im Westen bis Taucha und Naunhof im Osten, im Norden bis nördlich der Autobahn Halle-Dresden. Im Süden der Stadt dominieren die Gruben des Braunkohlentagebaues, sodaß hier die Abgrenzung wesentlich dichter an der Stadtgrenze erfolgen konnte.

6.2 Berechnung der Vegetationsindexbilder und Diskussion

Für die Landsat-Daten wurde nach Georeferenzierung der Vegetationsindex berechnet. Durch die Berechnungsvorschrift des NDVI kann sich theoretisch ein Wertebereich von [-1, 1] ergeben, der jedoch in der Regel nicht ausgeschöpft wird. Tabelle 16 gibt statistische Parameter des NDVI und des roten und infraroten Spektralkanals wieder.

Tab. 16: Statistische Parameter des NDVI und der NDVI-bestimmenden Kanäle 3 und 4 in Landsat-TM-Daten

Satellitenbilddaten	TM-Kanal 3 (sichtbares Rot)				TM-Kanal 4 (nahes Infrarot)				NDVI (Vegetationsindex)			
	min	max	m	s	min	max	m	s	min	max	m	s
Landsat-TM 30.-07.1994 (Dresden)	22	133	39,10	10,44	20	156	70,08	15,40	-0,28	0,66	0,28	0,15
Landsat-TM 19.-08.1992 (Dresden)	18	230	34,85	11,29	17	255	68,60	16,54	-0,22	0,70	0,33	0,17
Landsat-TM 21.-07.1994 (Leipzig)	13	228	38,23	15,12	8	222	71,00	19,93	-0,46	0,77	0,30	0,21

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, sind die Mittelwerte und Standardabweichungen sowohl im TM-Kanal 3 und 4 als auch im NDVI sehr ähnlich. Geringfügige Abweichungen lassen sich auf die verschiedenen Gebiete (Dresden/Leipzig), auf die unterschiedlichen Aufnahmedaten und die

damit verbundene phänologische Situation einschließlich der Aufnahmebedingungen (Atmosphärentrübung) usw. zurückführen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Histogramme der NDVI-Werte der Landsat-Szenen:

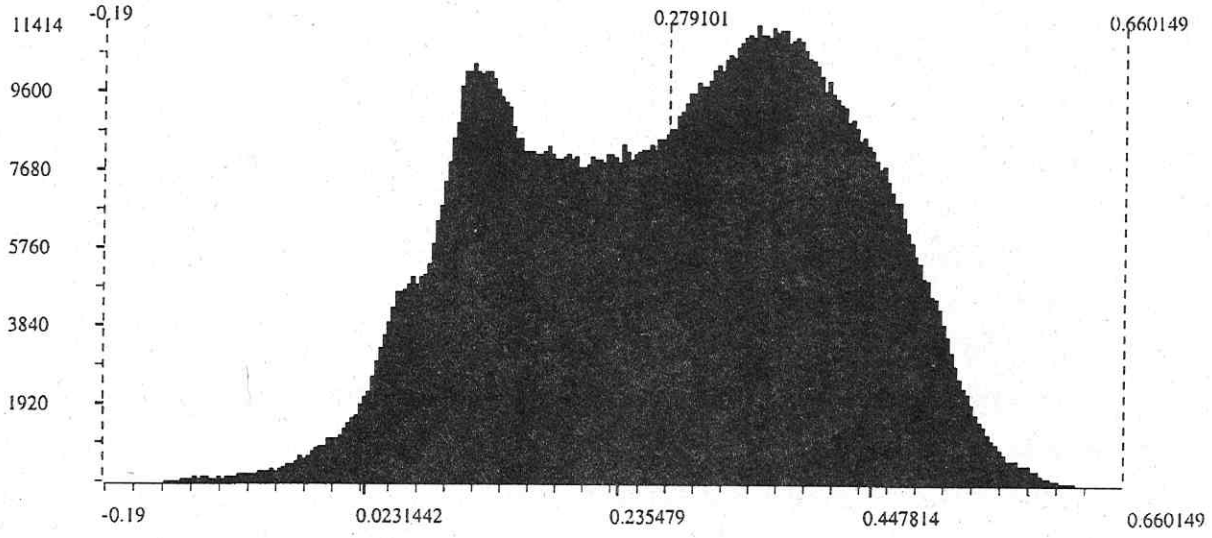


Abb. 4: Geglättetes NDVI-Histogramm Landsat-TM vom 30.07.1994 (Dresden)

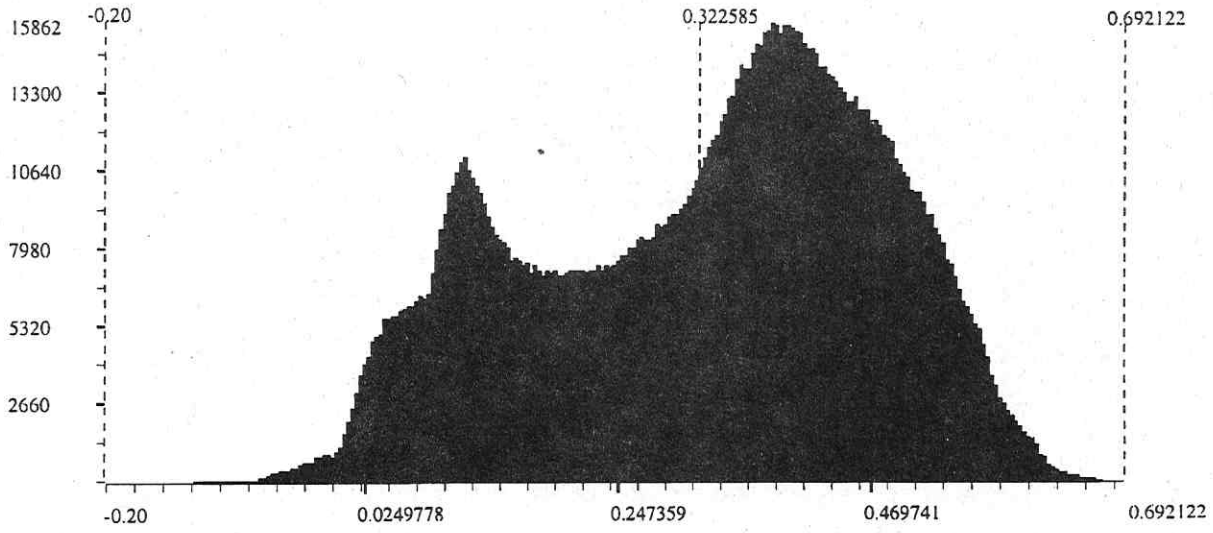


Abb. 5: Geglättetes NDVI-Histogramm Landsat-TM vom 19.08.1992 (Dresden)

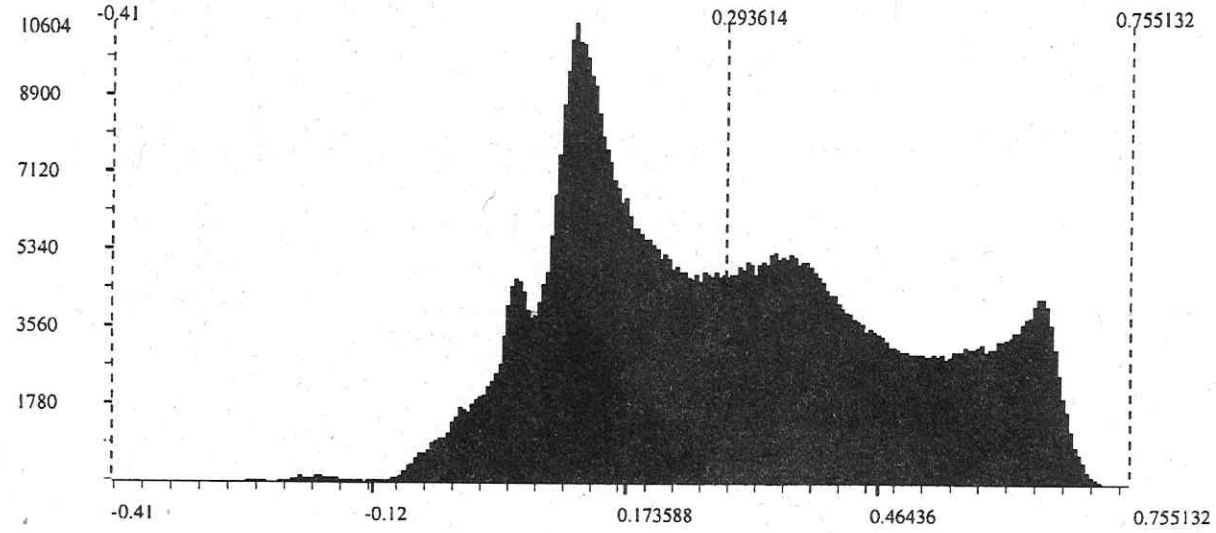


Abb. 6: Geglättetes NDVI-Histogramm Landsat-TM vom 21.07.1994 (Leipzig)

Bemerkenswert ist die große Ähnlichkeit der Histogramme der Dresdner Szenen von 1994 und 1992.

Während der erste Verteilungsgipfel auf weitesgehend vegetationslose Ackerflächen und stark versiegelte Flächen zurückzuführen ist, repräsentiert der zweite Verteilungsgipfel vegetationsbestandene Flächen. Das Histogrammtal zwischen den zwei Gipfeln ist auf locker bebaute Stadtflächen und Ackerflächen im Reifezustand zurückzuführen, die durch eine Mischung von Versiegelungs- und Vegetationsanteilen im Pixel geprägt sind. Der flachere Flankenverlauf des zweiten Gipfels ist auf die größere Streubreite des Vegetationsindex bei Vegetationsflächen zurückzuführen, wie auch nachfolgende Untersuchungen zeigten. Das NDVI-Histogramm der Leipziger Szene ist eingipflig mit einer sehr breiten auslaufenden Flanke. Der Gipfel wird durch die große Zahl von Ackerflächen im Reifezustand (Ährenschieben) gebildet. Hier macht sich der etwa 14 Tage früher liegende Aufnahmezeitpunkt im Vergleich zur Dresdner Szene von 1994 bemerkbar.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der Vegetationsindizes für verschiedene typische Oberflächenbedeckungsarten bestimmt. Das ist sowohl für die Bestimmung der methodischen Fehler des Verfahrens als auch für die Bestimmung zusätzlicher Eichpunkte für die Transformation des Vegetationsindex in den Versiegelungsgrad notwendig.

Tabelle 18 zeigt beschreibende statistische Parameter des NDVI-Wertes für verschiedene Oberflächenbedeckungsarten. Diese Untersuchungen wurden nur an den Dresdner Szenen vorgenommen.

Tab.18 : Mittlere NDVI-Werte nach Oberflächenbedeckungsarten (Landsat-TM-Aufnahme)

Oberflächenbedeckungsart	Landsat-TM 19.08.1992				Landsat-TM vom 30.07.1994			
	min	max	m	s	min	max	m	s
Laubwald und städtische Parkflächen	0,34	0,60	0,47	0,07	0,31	0,56	0,46	0,06
Nadelwald	0,29	0,57	0,36	0,06	0,22	0,33	0,31	0,03
Rasen	0,22	0,54	0,37	0,07	0,20	0,53	0,36	0,07
Wiese	0,15	0,58	0,38	0,15	0,28	0,53	0,45	0,05
vollversiegelte Flächen (Asphalt, etc.)	-0,09	0,13	-0,02	0,04	-0,11	0,12	-0,02	0,04
Wasserflächen	-0,14	0,05	-0,05	0,03	-0,18	-0,05	-0,10	0,03

Folgende Schlußfolgerungen können aus der Tabelle gezogen werden:

- Den höchsten mittleren NDVI-Wert (0,45) erreicht Laubwald. Das ist auf die hohe Biomasse und den relativ hohen Feuchtegehalt in Laubwaldgebieten selbst in Hochsommerperioden zurückzuführen.
- Nadelwald hat von den vollständig vegetationsbedeckten Gebieten den geringsten NDVI-Wert. Das ist auf den relativ geringen Chlorophyllanteil in den Nadeln zurückzuführen.
- Rasenflächen haben ebenfalls einen geringen NDVI-Wert. Auch das ist auf die geringe Biomasse verbunden mit dem geringen Feuchtigkeitsbindevermögen von Rasenflächen zurückzuführen.
- Wiesen haben einen geringfügig höheren mittleren Vegetationsindex als Rasenflächen, verursacht durch die weniger intensive Pflege. Allerdings streuen hier die Vegetationsindexwerte sehr stark (Standardabweichung = 0,15!), aufgrund des stark unterschiedlichen phänologischen Zustandes (vor Mahd, nach Mahd).
- Vollversiegelte Flächen weisen einen geringen und wenig streuenden mittleren NDVI-Wert von -0,02 auf.
- Mit -0,05/-0,1 weisen Wasserflächen den geringsten NDVI-Wert auf. Dieser geringe Wert ist auf die geringe Reflexion sowohl im sichtbaren roten Kanal als auch im nahen Infrarotkanal zurückzuführen.
- Die statistischen Parameter Maximum, Minimum, Mittelwert und Standardabweichung unterscheiden sich nur gering zwischen den beiden Landsat-Szenen. Das weist auf eine hohe Stabilität der Werte, unabhängig von der einzelnen Aufnahme, hin, wenn diese vom gleichen saisonalen Aufnahmezeitpunkt sind.

6.3 Korrelation zwischen NDVI und Bodendaten der Versiegelung

Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang zwischen mittlerem NDVI der terrestrischen Erhebungsgebiete und dem mittleren Versiegelungsgrad. Die Verteilung der Punktwolke bei linearer Achsenteilung weist auf einen linearen relativ streng korrelierten negativen Zusammenhang zwischen NDVI und Versiegelungsgrad hin.

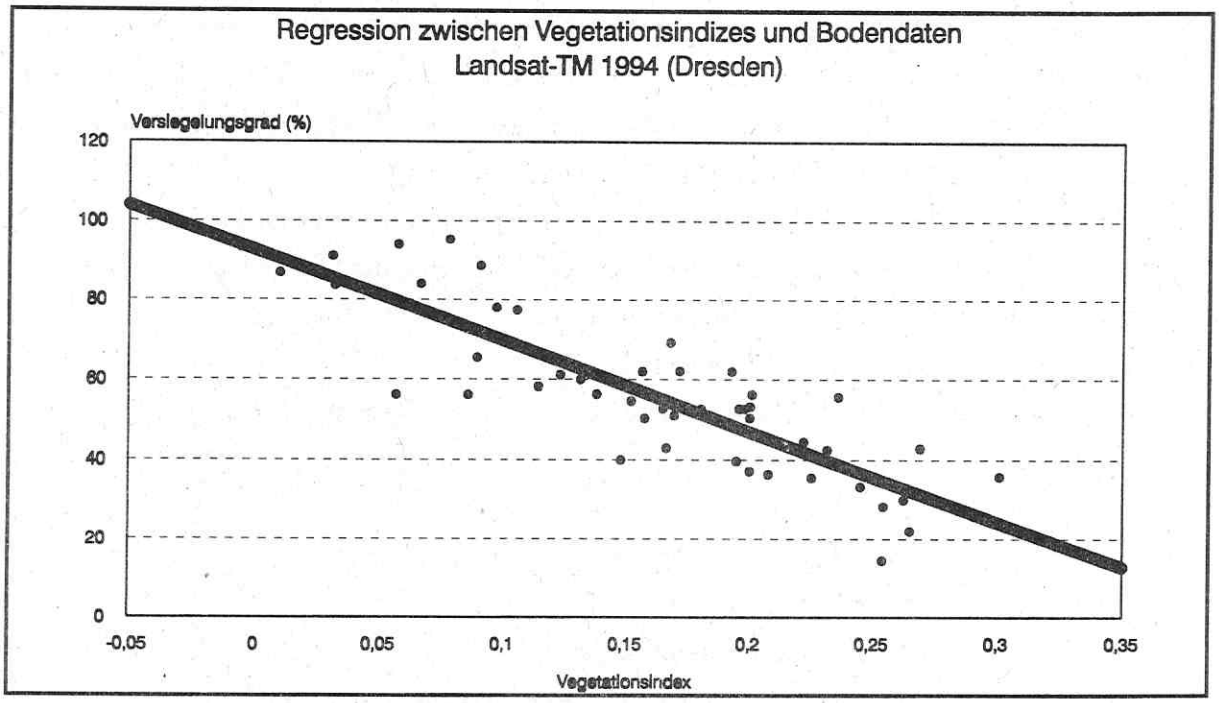


Abb. 7: Darstellung des Zusammenhanges zwischen NDVI und Versiegelungsgrad in der Dresdner Landsat-TM-Szene vom 30.07.94

Dieser Zusammenhang wurde für alle Landsat-Szenen bestimmt und ergab die in Tabelle 19 gezeigten Parameter.

Tab. 19: Parameter eines linearen Regressionsmodells zwischen Vegetationsindex NDVI und terrestrisch erhobenen Versiegelungsgrad VSG für Landsat-TM-Daten

Aufnahme	Punktanzahl	Korrelationskoeffzient	Regressionsgleichung
Landsat vom 30.07.94 (Dresden)	52	-0,87	VSG = -227,84 * NDVI + 92,42
Landsat vom 19.08.92 (Dresden)	50	-0,87	VSG = -208,27 * NDVI + 95,78
Landsat vom 21.07.94 (Leipzig)	29	-0,73	VSG = -121,88 * NDVI + 86,14

Die Parameter der Regressionsgeraden sind aufnahmespezifisch und immer für das aktuelle Bild

zu bestimmen. In allen drei Aufnahmen zeigt sich ein hochkorrelierter negativer Zusammenhang zwischen NDVI und Versiegelungsgrad.

6.4 Bestimmungsgenauigkeit des Erhebungsverfahrens

Ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz des vorgestellten fernerkundlichen Erhebungsverfahrens ist die zu erwartende Bestimmungsgenauigkeit der Versiegelung. Diese muß sowohl bezüglich terrestrischer Erhebungen, die mit ihrer hohen Genauigkeit das Referenzverfahren darstellen, als auch mit anderen fernerkundlichen Datenquellen und anderweitig erhobenen Daten erfolgen. Die durch die oben beschriebene Vorgehensweise errechneten Versiegelungsbilder zeigten nach eingehender visueller Kontrolle teilweise Abweichungen von erwarteten Versiegelungswerten bzw. von den Versiegelungszahlen der terrestrisch erhobenen Testgebiete.
Anlage 3 zeigt eine Übersicht aller Testgebiete, ihrer NDVI-Werte, der terrestrisch erhobenenen und der aus den Satellitendaten gewonnenen Versiegelungswerten sowie den Abweichungen (Residuen) zwischen beiden Versiegelungswerten.
Zusammenfassend können die Abweichungen der Versiegelungsgrade wie folgt erklärt werden:

VSG Satellitendaten > VSG terrestrische Erhebung:
- Großgrün überdeckt versiegelte Flächen
- Veränderungen nach der terr. Erhebung
  - Abriß- oder Entsiegelungsmaßnahmen
  - Begrünung unversiegelter Flächen (Spontanvegetation o.ä.)

VSG Satellitendaten < VSG terrestrische Erhebung
- devitalisierte oder vertrocknete Grünflächenbereiche
- unversiegelte Flächen ohne Vegetation werden in den Satellitendaten als versiegelt eingestuft
- Versiegelungs- und Baumaßnahmen nach der terrestrischen Erhebung

Bei den Abweichungen der Versiegelungsgradwerte auf den Industrieflächen kann davon ausgegangen werden, daß auf diesen Flächen in der Zwischenzeit ein deutlicher Struktur- und Nutzungswandel stattgefunden hat oder daß einige Flächen jetzt brach liegen.

6.4.1 Bestimmungsgenauigkeit der Verfahren mit und ohne Bodendaten

Tabelle 20 zeigt den Bestimmungsfehler des Verfahrens (mit und ohne Bodendatenkalibrierung) in Bezug auf die terrestrisch erhobenen Bodendaten akkumuliert über verschiedene Stadtstrukturtypen.

Tab. 20: Bestimmungsfehler der fernerkundlich erhobenen Versiegelung in Abhängigkeit vom Stadtstrukturtyp für Landsat-TM-Daten

Stadtstrukturtyp	Anzahl	Bestimmungsfehler des VSG [%]			
		Kalibrierung mit Bodendaten		Kalibrierung ohne Bodendaten	
		mittlerer	maximaler	mittlerer	maximaler
Geschlossene Blockbebauung	3	4,1	9,6	6,3	16,6
Offene Blockbebauung	8	9,2	17,6	15,9	23,7
Mehrgesch. Wohnungsbau (>3 Geschosse)	10	7,1	18,9	8,3	22,2
Siedlungen (<3 Geschosse)	6	4,9	9,5	13,7	22,3
Einzel- und Reihenhausbebauung	5	7,6	16,8	19,6	30,4
Grünanlagen	8	8,7	19,4	9,1	23,7
Industrieanlagen	9	9,7	19,2	12,3	23,3
Alte Ortskerne	1	4,1	-	11,8	-
Testgebiete insgesamt	50	7,7	19,4	12,1	30,4
Kontrollgebiete insgesamt	16	14,9	27,8	16,9	37,3
Erhebungsgebiete insgesamt	66	9,5	27,8	13,3	37,3

Der mittlere Fehler bleibt bei dem Verfahren mit Kalibrierung durch Bodendaten für alle Strukturtypen unter 10 %, der maximale unter 20 %. Das Verfahren ohne Kalibrierung bedingt erwartungsgemäß etwas schlechtere Daten (mittlerer Fehler < 20 %, maximaler Fehler bis 30 %). Der mittlere Fehler über allen Kontrollgebieten ist größer als der über allen Erhebungsgebieten.

6.4.2 Vergleich verschiedener Landsat-Datensätze

Der Vergleich der Dresdner Versiegelungskarten, abgeleitet aus den Landsat-TM-Datensätzen vom 30.07.94 und vom 19.08.92 erbrachte folgendes Ergebnis:

Tab. 21: Mittlerer und maximaler Bestimmungsfehler der Versiegelungserhebung mit Landsat-TM-Daten für zwei verschiedene Satellitenaufnahmen (Untersuchungsgebiet Dresden)

Stadtstrukturtyp	Anzahl	alle Angaben in %						
		Bodenda-ten VSG	Landsat vom 30.07.94			Landsat vom 19.08.92		
			VSG	mittlerer Fehler	maximaler Fehler	VSG	mittlerer Fehler	maximaler Fehler
Geschlossene Blockbebauung	3	85,8	83,2	4,1	9,6	80,8	5,1	10,6
Offene Blockbebauung	8	68,0	61,3	9,2	17,6	61,8	7,0	22,0
Mehrgesch. Wohnungsbau (>3 Geschosse)	10	50,2	54,3	7,1	-18,9	54,9	9,6	-19,7
Siedlungen (<3 Geschosse)	6	50,3	49,3	4,9	-9,5	47,5	4,9	9,4
Einzel- und Reihenhausbebauung	5	44,0	39,7	7,6	16,8	38,9	6,7	10,5
Grünanlagen	8	35,6	40,1	8,7	-19,4	36,2	10,2	-25,9
Industrieanlagen	9	79,6	77,6	9,7	19,2	80,2	8,5	-19,1
Alte Ortskerne	1	29,8	33,9	4,1	-	30,6	0,8	-
Testgebiete insgesamt	50	56,9	56,6	7,7	-19,4	56,1	7,8	-25,9
Kontrollgebiete insgesamt	16	47,6	51,5	14,9	-32,0	47,6	14,2	-25,9
Erhebungsgebiete insgesamt	66	54,6	55,4	9,5	-32,0	54,0	9,3	-25,9

Die mittleren Bestimmungsfehler der beiden Landsat-Aufnahmen bezogen auf die Testflächen sind annähernd gleich. Trotzdem können sich die Versiegelungswerte in einzelnen Punkten und Flächen zwischen zwei verschiedenen Landsat-Szenen stark unterscheiden. Dieser Effekt soll an Hand des Histogramms und der statistischen Auswertung der Differenz der Versiegelungskarten geprüft werden.

Folgende Parameter kennzeichnen das Differenzbild:
Mittelwert: $m = -0,73$
Standartabweichung: $s = 29,7$

Abbildung 8 zeigt das Histogramm des Differenzbildes der Dresdner Versiegelungskarten (Landsat-94 / Landsat-92).

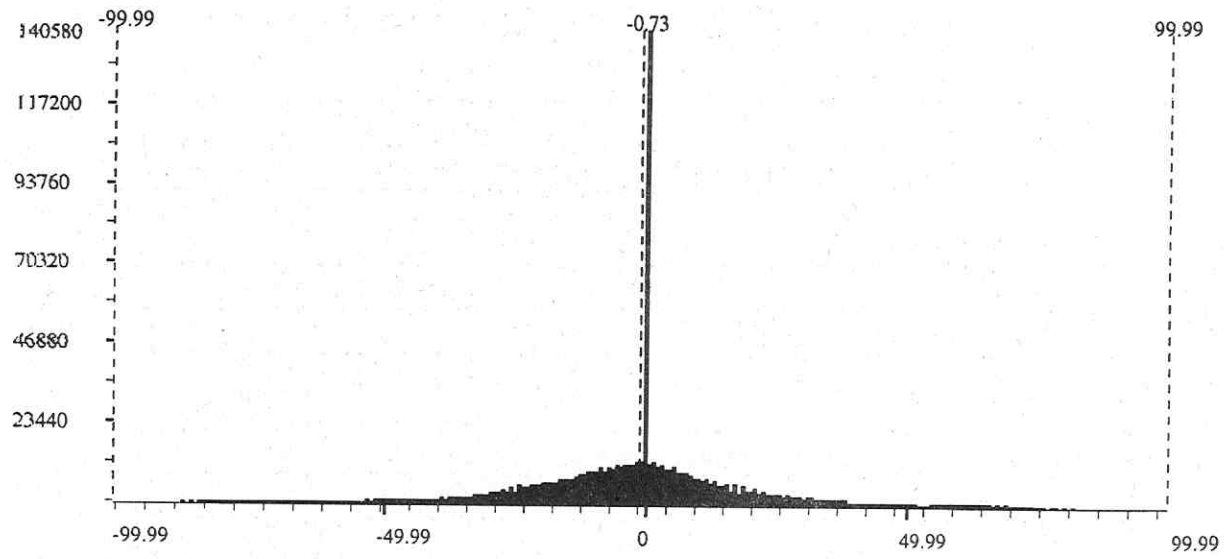


Abb. 8: Histogramm des Differenzbildes VSG_{TM94}-VSG_{TM92}

Auffallend ist die überdurchschnittliche Häufung von 0-Werten. Dieses ist auf den hohen Anteil unversiegelter Flächen zurückzuführen, die auch in den beiden Versiegelungskarten richtig ausgewiesen sind.

Da negative Versiegelungswerte auf 0 gesetzt wurden, resultiert diese ungewöhnliche Histogrammform. Der Mittelwert von -0,73 weist auf die gute Übereinstimmung der Versiegelungskarten in ihren Absolutwerten hin. Der hohe mittlere Fehler von 29,7 ist auf einen erheblichen Anteil von landwirtschaftlichen Nutzflächen zurückzuführen, die methodenabhängig einen Fehler bis zu 100 % im Versiegelungsgrad bedingen können, da vegetationslose LW-Flächen als unversiegelte Flächen ausgewiesen werden. Auch der Ufersaum der Elbe weist Differenzen bis zu 100 % auf, je nach Pegelstand.

6.4.3 Vergleich verschiedener Sensoren (Landsat-SPOT)

Die Ergebnisse des Vergleichs der Übersichtskarten von Landsat und SPOT sind in der folgenden Tabelle und Abbildung wiedergegeben.

Tab. 22: Mittlerer und maximaler Bestimmungsfehler der Versiegelungserhebung mit Landsat-TM- und SPOT-XS-Daten im Vergleich (Untersuchungsgebiet Dresden)

Stadtstrukturtyp	Anzahl	alle Angaben in %						
		Bodenda-ten VSG	Landsat vom 30.07.94			SPOT vom 21.04.92		
			VSG	mittlerer Fehler	maximaler Fehler	VSG	mittlerer Fehler	maximaler Fehler
Geschlossene Blockbebauung	3	85,8	83,2	4,1	9,6	76,9	5,1	10,6
Offene Blockbebauung	8	68,0	61,3	9,2	17,6	69,2	7,0	13,4
Mehrgesch. Wohnungsbau (>3 Geschosse)	10	50,2	54,3	7,1	-18,9	47,8	9,6	9,7
Siedlungen (<3 Geschosse)	6	50,3	49,3	4,9	-9,5	49,7	4,9	10,8
Einzel- und Reihenhausbebauung	5	44,0	39,7	7,6	16,8	42,4	6,7	12,0
Grünanlagen	8	35,6	40,1	8,7	-19,4	44,2	10,2	-30,3
Industrieanlagen	9	79,6	77,6	9,7	19,2	78,9	8,5	-18,4
Alte Ortskerne	1	29,8	33,9	4,1	-	41,5	11,7	-
Testgebiete insgesamt	50	56,9	56,6	7,7	-19,4	57,4	7,8	-30,3
Kontrollgebiete insgesamt	16	47,6	51,5	14,9	-32,0	45,5	14,2	17,5
Erhebungsgebiete insgesamt	66	54,6	55,4	9,5	-32,0	54,5	9,3	-30,3

Folgende Parameter kennzeichnen das Differenzbild:

Mittelwert: m = -5,58

Standartabweichung: s = 30,62

Abbildung 9 zeigt das Histogramm des Differenzbildes der Versiegelungskarten (Landsat-94/SPOT-92).

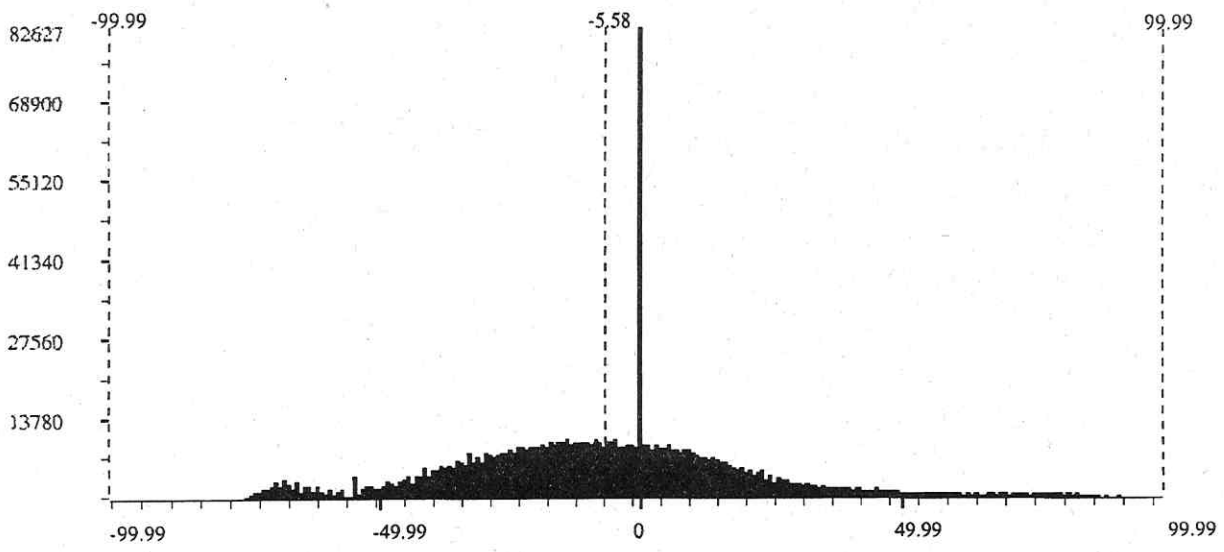


Abb. 9: Histogramm des Differenzbildes VSG_{TM94}-VSG_{SPOT92}

7 SPOT-Satellitendaten zur Versiegelungserhebung

7.1 Datenauswahl und Georeferenzierung

Für die Untersuchung der Eignung von multispektralen SPOT-Daten mußte auf eine Aufnahme vom April 1992 für den Untersuchungsraum Dresden zurückgegriffen werden. Jüngere Szenen mit hoher Bildqualität waren nach dem Recherchestand 10/94 nicht verfügbar. Der große zeitliche Abstand zu den Landsat-Daten vom Sommer 1994 schränkt die Vergleichbarkeit ein. In der Interpretation dieser Aufnahme muß vor allem deren sehr früher saisonaler Aufnahmezeitpunkt berücksichtigt werden. Voruntersuchungen ergaben, daß die Vegetationsperiode zum Aufnahmezeitpunt gerade erst begonnen hatte. Dieser Umstand führt gerade bei dem gewählten Verfahren der Transformation des Vegetationsindex in den Versiegelungsgrad zu erheblichen Problemen, da z. B. Bäume noch wenig belaubt sind und so nur einen geringen Vegetationsindex aufweisen.
Andererseits ist der Rückgriff auf suboptimales Bildmaterial im späteren operationellen Einsatz von Fernerkundungsverfahren häufig notwendig. Darum ist eine Methodenprüfung auch mit suboptimalen Aufnahmen wichtig.

Tabelle 23 zeigt die Paßpunktanzahl und Entzerrungsgenauigkeit der Szenen.

Tab. 23: Entzerrungsgenauigkeit der SPOT-XS-Daten

Satellitenbilddatensatz	Anzahl der Paßpunkte	mittlerer Fehler
SPOT-XS 21.04.1992 (Dresden)	43	0,75
SPOT-XS 25.06.1994 (Leipzig)	63	0,58

7.2 Berechnung des Vegetationsindexbildes

Für die SPOT-XS-Daten wurde nach Georeferenzierung der Vegetationsindex berechnet. Die Tabelle 24 gibt die statistischen Parameter der SPOT-XS-Daten wieder.

Tab. 24: Beschreibende statistische Parameter der verwendeten SPOT-XS-Szenen

Satellitenbild-daten	SPOT-Kanal 2 (sichtbares Rot)				SPOT-Kanal 3 (nahes Infrarot)				NDVI (Vegetationsindex)			
	min	max	m	s	min	max	m	s	min	max	m	s
SPOT-XS 21.-04.1992 (Dresden)	24	228	42,3	9,3	18	244	51,18	13,2	-0,31	0,54	0,09	0,13
SPOT-XS 25.-06.1994 (Leipzig)	32	254	78,1	26,3	16	254	148,40	37,4	-0,46	0,77	0,30	0,21
SPOT-XS 06.05.1990 (Leipzig)	26	254	50,2	18,3	19	254	117,30	39,2	-0,35	0,75	0,38	0,23

Wie der Tabelle 24 zu entnehmen ist, sind Mittelwerte und Standardabweichungen sowohl im SPOT-Kanal 2 und 3 als auch im NDVI sehr verschieden. Die großen Abweichungen lassen sich auf die verschiedenen Gebiete (Dresden/Leipzig) und auf die unterschiedliche saisonale Situation (Phänologie) zurückführen. So ist am 21.04.92, dem Tag der Datenaufnahme der Dresdner Szene, die Vegetationsperiode gerade erst angebrochen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Histogramme der NDVI-Werte der SPOT-XS-Szenen:

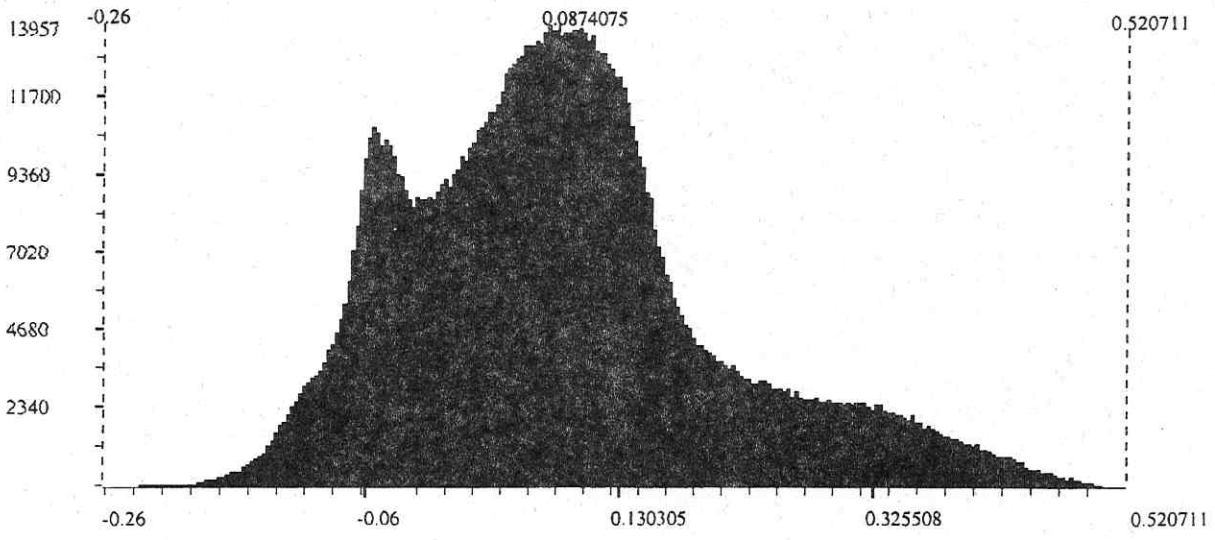


Abb. 10: Geglättetes NDVI-Histogramm SPOT-XS vom 21.04.1992 (Dresden)

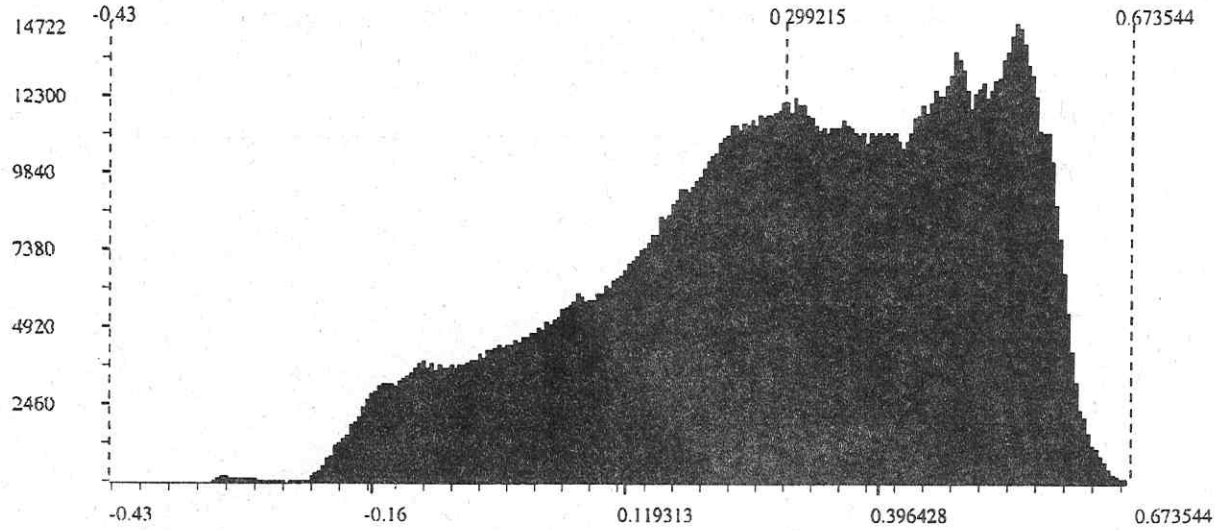


Abb. 11: Geglättetes NDVI-Histogramm SPOT-XS vom 25.06.1994 (Leipzig)

7.3 Korrelation zwischen NDVI und Bodendaten der Versiegelung

Auch für diesen Datensatz wurden zusätzliche Testgebiete mit Vollversiegelung und ohne Versiegelung digitalisiert und deren NDVI-Werte aufgenommen. Tabelle 25 zeigt statistische Parameter des Vegetationsindex bei SPOT-XS-Aufnahmen für verschiedene Oberflächenbedekkungsarten.

Tab. 25: Mittlere NDVI-Werte nach Oberflächenbedeckungsarten (SPOT-XS)

Oberflächenbedeckungsart	SPOT-XS vom 21.04.1992 (Dresden)				SPOT-XS vom 30.07.1994 (Leipzig)			
	min	max	m	s	min	max	m	s
Laubwald und städtische Parkflächen	-0,03	0,16	0,06	0,03	0,56	0,61	0,59	0,03
Nadelwald	0,05	0,15	0,11	0,02	-	-	-	-
Rasen	0,14	0,41	0,32	0,05	-0,47	0,57	0,53	0,06
Wiese	0,11	0,39	0,26	0,06	-	-	-	-
Vollversiegelte Flächen (Asphalt, etc.)	-0,22	-0,06	-0,14	0,02	-0,30	-0,21	-0,16	0,05
Wasserflächen	-0,21	-0,12	-0,17	0,02	-0,19	-0,14	-0,18	0,03

Abbildung 12 zeigt den Zusammenhang zwischen Vegetationsindex NDVI und Versiegelungsgrad für die SPOT-Aufnahme Dresdens vom 21.04.1992.

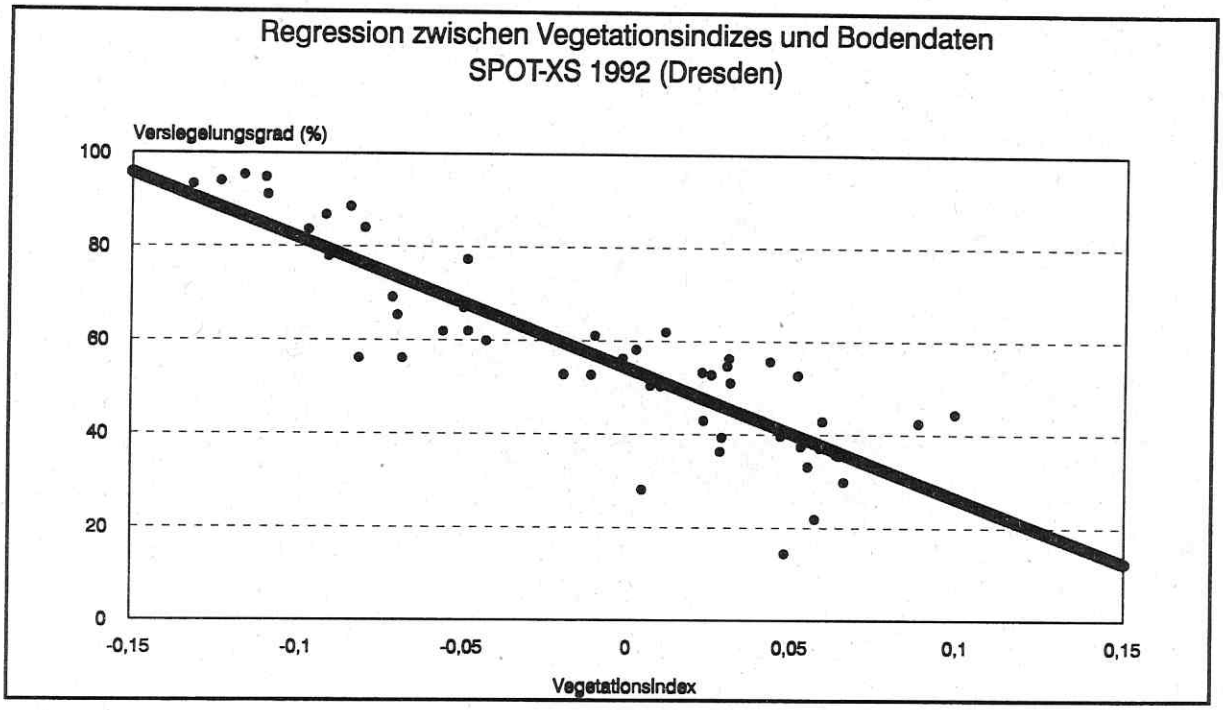


Abb. 12: Darstellung des Zusammenhanges zwischen NDVI und Versiegelungsgrad in der Dresdner SPOT-XS-Szene vom 21.04.92

Für die SPOT-XS-Aufnahmen wurden mittels linearem Regressionsmodell folgende Parameter bestimmt:

Tab. 26: Parameter eines linearen Regressionsmodells zwischen Vegetationsindex NDVI und terrestrisch erhobenen Versiegelungsgrad VSG für SPOT-XS-Daten

Aufnahme	Punktanzahl	Korrelationskoeffzient	Regressionsgleichung
SPOT-XS vom 21.04.92 (Dresden)	51	-0,87	VSG = -273,96 * NDVI + 54,13
SPOT-XS vom 21.07.94 (Leipzig)	29	-0,81	VSG = -127,19 * NDVI + 71,82

Bemerkenswert sind die im Vergleich zu den Landsat-TM-Aufnahmen völlig anderen Regressionsparameter, während die Korrelation ähnliche Werte aufweist. Die verschiedenen Regressionsparameter sind auf die unterschiedliche Empfindlichkeit der Spektralkanäle von Landsat und SPOT zurückzuführen.

Die über die Regressionskoeffizienten transformierten Versiegelungskarten für Dresden und Leipzig sind im Kartenteil zu finden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Zwischenberichtes ist noch keine umfassende Aussage zur Eignung der Fernerkundung zur Versiegelungserhebung möglich. Der jetztige Forschungsstand berechtigt aber zu folgenden Thesen:

- Die Versiegelungserhebung durch fernerkundliche Verfahren ist prinzipiell möglich.
- Die Genauigkeit der Verfahren liegt unter der einer terrestrischen Datenaufnahme, ist aber für Übersichtskarten ausreichend.
- Landsat-TM- und SPOT-Aufnahmen sind für die Erstellung von Übersichtskarten der Versiegelung im Maßstab 1 : 50 000 geeignet. Voraussetzung sind qualitativ hochwertige Aufnahmen aus der Vegetationsperiode. Die Versiegelung kann mit einer mittleren Genauigkeit von ca. 10 % aufgenommen werden.
- Systematische Fehler in der Ausweisung des Versiegelungsgrades werden bei vegetationslosen, unversiegelten Flächen (Abgrabungen, Aufschüttungen, Äcker) und bei Wasserböden gemacht.
- Aufnahmezeitpunkt der Satellitenbilddaten muß der Hochsommer sein (Vegetationsperiode, Schattenflächenminimierung).

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1: Berücksichtigte Einflußgrößen und deren Differenzierung in den Berechnungsverfahren der Versiegelungsparameter
Tab. 2: Vergleich von FE-Quellen bezüglich wichtiger Paramater der Versiegelungsaufnahme
Tab. 3: Eignung der Fernerkundung zur Parametererhebung
Tab. 4: Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab
Tab. 5: Mögliche Kartenmaßstäbe der verschiedenen Fernerkundungssensoren
Tab. 6: Erkennbarkeit städtischer Oberflächenbedeckungen im CIR-Luftbild
Tab. 7: Erkennbarkeit städtischer Oberflächenbedeckungen im Satellitenbild
Tab. 8: Übersicht des amerikanischen Landsat-Satellitenprogramms
Tab. 9: Kostenabschätzung für operationelle Erstellung von Versiegelungskarten aus Landsat-TM-Daten
Tab. 10: Übersicht gebräuchlicher CIR-Filme
Tab. 11: Spektrale Auflösung des Daedalus-Scanners
Tab. 12: Übersicht der terrestrisch erhobenen Testgebiete im Untersuchungsgebiet Dresden
Tab. 13: Übersicht der terrestrisch erhobenen Testgebiete im Untersuchungsraum Leipzig
Tab. 14: Übersicht der verwendeten Fernerkundungsdaten
Tab. 15: Entzerrungsgenauigkeit der Landsat-TM-Daten
Tab. 16: Statistische Parameter des NDVI und der NDVI-bestimmenden Kanäle 3 und 4 in Landsat-TM-Daten
Tab. 18: Mittlere NDVI-Werte nach Oberflächenbedeckungsarten (Landsat-TM-Aufnahme)
Tab. 19: Parameter eines linearen Regressionsmodells zwischen Vegetationsindex NDVI und terrestrisch erhobenen Versiegelungsgrad VSG für Landsat-TM-Daten
Tab. 20: Bestimmungsfehler der fernerkundlich erhobenen Versiegelung in Abhängigkeit vom Stadtstrukturtyp für Landsat-TM-Daten
Tab. 21: Mittlerer und maximaler Bestimmungsfehler der Versiegelungserhebung mit Landsat-TM-Daten für zwei verschiedene Satellitenaufnahmen (Untersuchungsgebiet Dresden)
Tab. 22: Mittlerer und maximaler Bestimmungsfehler der Versiegelungserhebung mit Landsat-TM- und SPOT-XS-Daten im Vergleich (Untersuchungsgebiet Dresden)
Tab. 23: Entzerrungsgenauigkeit der SPOT-XS-Daten
Tab. 24: Beschreibende statistische Parameter der verwendeten SPOT-XS-Szenen
Tab. 25: Mittlere NDVI-Werte nach Oberflächenbedeckungsarten (SPOT-XS)
Tab. 26: Parameter eines linearen Regressionsmodells zwischen Vegetationsindex NDVI und terrestrisch erhobenen Versiegelungsgrad VSG für SPOT-XS-Daten

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Relative spektrale Empfindlichkeit des Aerochrome Infrared 2443 von Kodak
Abb. 2: Spektrale Reflexion verschiedener Materialien [Kappas, 1994, S. 89]
Abb. 3: Prinzipdarstellung der entwickelten Auswertemethodik
Abb. 4: Geglättetes NDVI-Histogramm Landsat-TM vom 30.07.1994 von (Dresden)
Abb. 5: Geglättetes NDVI-Histogramm Landsat-TM vom 19.08.1992 (Dresden)
Abb. 6: Geglättetes NDVI-Histogramm Landsat-TM vom 21.07.1994 (Leipzig)
Abb. 7: Darstellung des Zusammenhanges zwischen NDVI und Versiegelungsgrad in der Dresdner Landsat-TM-Szene vom 30.07.94
Abb. 8: Histogramm des Differenzbildes VSG_{TM94}-VSG_{TM92}
Abb. 9: Histogramm des Differenzbildes VSG_{TM94}-VSG_{SPOT92}
Abb. 10: Geglättetes NDVI-Histogramm SPOT-XS vom 21.04.1992 (Dresden)
Abb. 11: Geglättetes NDVI-Histogramm SPOT-XS vom 25.06.1994 (Leipzig)
Abb. 12: Darstellung des Zusammenhanges zwischen NDVI und Versiegelungsgrad in der Dresdner SPOT-XS-Szene vom 21.04.92

Verzeichnis der Karten

Karte 1 : Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Dresden - erstellt aus Landsat-TM-Daten
Karte 2 : Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Dresden - erstellt aus SPOT-XS-Daten
Karte 3 : Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Leipzig - erstellt aus Landsat-TM-Daten
Karte 4 : Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Leipzig - erstellt aus SPOT-XS-Daten
Karte 5 : KWR-1000-Aufnahme / Stadtzentrum von Dresden
Karte 6 : KFA-1000-Aufnahme / Stadtzentrum von Dresden
Karte 7 : CIR-Aufnahme / Dresden, Innere Neustadt
Karte 8 : Mittlerer Versiegelungsgrad der statistischen Bezirke Dresdens

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1 : Histogramm der KWR-1000-Aufnahme (Juni 1989) vom Stadtgebiet Dresden

Anlage 2 : Mittlerer Versiegelungsgrad verschiedener administrativer Einheiten Dresdens, berechnet auf Grundlage einer prozessierten Landsat-TM-Aufnahme vom 30.07.1994

Anlage 2a: Mittlerer Versiegelungsgrad der Ortsamtsbezirke der Stadt Dresden

Anlage 2b: Mittlerer Versiegelungsgrad der Stadtteile der Stadt Dresden;

Anlage 2c: MIttlerer Versiegelungsgrad der statistischen Bezirke der Stadt Dresden

Anlage 2d: Flächenanteil der Versiegelungsklassen an der Gesamtfläche des Stadtgebietes Dresden

Anlage 3 : Zusammenhang zwischen Vegetationsindex NDVI und dem terrestrisch erhobenen Versiegelungsgrad;
Datengrundlage: Landsat-TM-Aufnahme vom 30.07.1994

Literaturverzeichnis:

Achen, Matthias, Untersuchungen über Nutzungsmöglichkeiten von Satellitenbilddaten für eine ökologisch orientierte Stadtplanung am Beispiel Heidelberg, Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Heidelberg, Heft 91/1993, 1993.

Albertz, Jörg; Kreiling, Walter, Photogrammetrisches Taschenbuch, Wichmann Verlag, Karlsruhe 1989.

Bähr, Hans-Peter; Vögtle, Thomas, Digitale Bildverarbeitung, Wichmann, Karlsruhe 1991.

Boetticher, Martina; Fisch, Rose, Zur Einführung des Biotopflächenfaktors (BFF) in die Landschafts- und Bauleitplanung, Das Gartenamt 37, Januar 1988.

Dech, Stefan, Fernerkundung von Umweltbelastung, DLR Forschungsberichte Heft 93-46, 1993.

Heber, Bernd; Lehmann, Iris, Normative Ansätze zur ökologischen Bewertung von Bodenversiegelungen, Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Dresden, IÖR-Schriften 12, 1995, S. 87 - 90.

Heber, Bernd; Lehmann, Iris, Stadtstrukturelle Orientierungswerte für die Bodenversiegelung in Wohngebieten, Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Dresden, IÖR-Schriften 05, 1993.

Kappas, M., Fernerkundung nah gebracht, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1994.

Kauth, R. J.; Thomas, G. S., The Tasseled Cap, Proc. of the Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafajette, Indiana, USA, 1976.

Klaedtke, H.-G.; Kleyer, M., Bodenversiegelung in Stuttgart, in: "Naturschutz und Landesplanung", Jg. 23c 6/1991, S. 238 - 242.

Konencny, Gottfried, Satellitenfernerkundung und Kartographie, GIS 2/95, Wichmann, Karlsruhe 1995, S. 3 - 12.

Kraus, Karl; Schneider, Werner, Fernerkundung Band 1 und 2, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1988.

Kronberg, Peter, Fernerkundung der Erde, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1985.

Lillesand, Thomas M.; Kiefer, Ralph W., Remote sensing ans image interpretation John Wiley & Sons.

Lohmann, Peter; Rauchfuss, Christian, Die Möglichkeit der Nutzung von Multispektral-scanner-Aufnahmen bei Deponieerkundungen, GIS 3/1994, Wichmann, Karlsruhe 1994, S. 9 - 15.

Meinel, Gotthard, Ein Klassifikator zur Trennung von Vegegationsgebieten in CIR-Bildern, Vortrag auf GEOSYSTEMS User Group Meeting 94 in Feldafing, 1994.

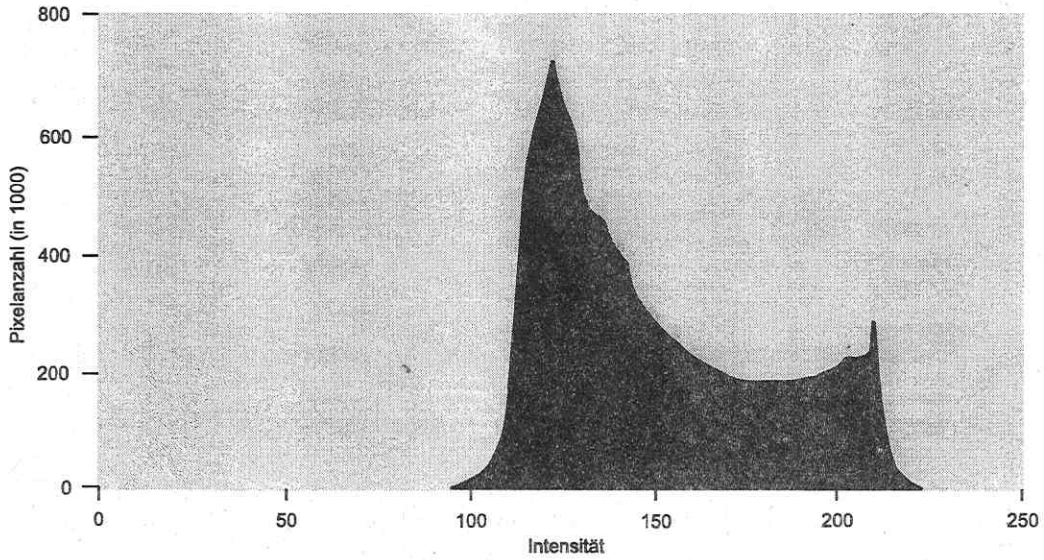
Netzband, Maik; Meinel, Gotthard, Die Erfassung der Bodenversiegelung mittels Satellitendaten, Proceedings vom Geosystems User Group Meeting 1995 in Feldafing, 1995, S. 75 - 80.

Sperber, Heinz; Meyer, Hans Heinrich, Vorstellung eines Schemas zur Erfassung und Bewertung der Ver- und Entsiegelungsintensität in Siedlungsbereichen, Das Gartenamt 38, Mai 1989, S. 254 - 298.

Strathmann, Frank-W., Taschenbuch der Fernerkundung, Wichmann, Karlsruhe 1990.

Winter, R.; Markwitz, W., Tagungsband des 9. Nutzerseminars des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums der DLR, DLR-Mitt. 93 - 08.

Anlage 1: Histogramm der KWR-1000 Aufnahme (Juni 1989) vom Stadtgebiet Dresden



Histogramm der KWR-1000-Aufnahme vom Juni 1989 vom Stadtgebiet Dresden

Deutlich wird vor allem die geringe radiometrische Auflösung. Nur die Hälfte der zur Verfügung stehenden Bandbreite wird ausgenutzt.

Anlage 2a: Mittlerer Versiegelungsgrad der Ortsamtsbezirke der Stadt Dresden

Ortsamtsbezirk	mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Altstadt	61
Neustadt	48
Pieschen	49
Klotzsche	44
Loschwitz	17
Blasewitz	47
Leuben	45
Prohlis	36
Südvorstadt	41
Cotta	40

Anlage 2b: Mittlerer Versiegelungsgrad der Stadtteile von Dresden

Stadtteil	mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Innere Altstadt	82
Pirnaische Vorstadt	60
Seevorstadt-Ost	38
Willsdruffer Vorstadt/ Seevorstadt-West	71
Friedrichstadt	70
Johannstadt-Nord	56
Johannstadt-Süd	56
Äußere Neustadt	71
Radeberger Vorstadt	35
Innere Neustadt	60
Leipziger Vorstadt	62
Albertstadt	39
Pieschen-Süd	65
Mickten	51
Kaditz	53
Trachau	32
Pieschen-Nord	54
Klotzsche	45

Hellerau/ Wilschdorf	41
Hellerberge	38
Loschwitz/ Wachwitz	21
Bühlau/ Weißer Hirsch	24
Hosterwitz/ Pillnitz	23
Dresdener Heide	15
Blasewitz	39
Striesen - Ost	59
Striesen - Süd	53
Striesen - West	54
Tolkewitz/ Seidnitz - Nord	39
Seidnitz/ Dobritz	49
Gruna	52
Leuben	50
Laubegast	41
Kleinzschachwitz	37
Meußlitz	55
Prohlis - Nord	47
Prohlis - Süd	50
Niedersedlitz	41
Lockwitz	24
Leubnitz - Neuostra	33
Strehlen	48
Reick	65
Südvorstadt - West	60
Südvorstadt - Ost	57
Räcknitz / Zschertnitz	40
Kleinpestitz / Mockritz	32
Coschütz / Gittersee	34
Plauen	44
Cotta	52
Löbtau - Nord	71
Löbtau - Süd	62
Naußlitz	25
Gorbitz -Süd	55
Gorbitz - Ost	57
Gorbitz - Nord	58
Briesnitz	35

Anlage 2c: Mittlerer Versiegelungsgrad der statistischen Bezirke Dresdens

Statistischer Bezirk	Mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Innere Altstadt-Ost	86
Innere Altstadt-West	77
Pirnaische Vs.(Grunaer-Süd)	69
Pirnaische Vs.(Zirkusstr)	59
Pirnaische Vs.(Blochmannstr)	55
Pirnaische Vs.(Pestalozzistr)	43
Pirnaische Vs.(Steinstr)	64
Seevs.-Ost(Prager Str)	84
Seevs.-Ost(Räcknitzstr)	75
Seevs.-Ost(Lindengasse)	52
Strehlen(Tiergartenstr)	46
Großer Garten	20
Bürgerwiese/Blüherpark	42
Wilsdruffer Vs.(Ostra-Allee)	79
Wilsdruffer Vs.(Ermischstr)	69
Wilsdruffer Vs.(Maternistr)	64
Seevs.-West(Am See)	59
Seevs.-West(Sternplatz)	60
Seevs.-West(Feldgasse)	65
Wilsdruffer Vs.(Jagdweg)	77
Friedrichst.(Löbtauer Str)	68
Friedrichst.(Schäferstr)	81
Friedrichst.(Klinikum)	69
Friedrichst.(Güterbahnhof)	79
Friedrichst.(Ostragehege)	64
Johannst.-Nord(Elsasser Str)	62
Johannst.-Nord(Bönischplatz)	62
Johannst.-Nord(Hopfgartenstr)	68
Johannst.-N(Pfeifferhannsstr)	67
Johannst.-Nord(Th.-Müntzer-Pl)	55
Johannst.-Nord(Gutenbergstr)	80
Johannst.-Nord(Neubertstr)	74
Johannst.-N(Medizin. Akademie)	53
Elbwiesen/Johannstadt	45
Johannst.-Süd(Marschnerstr)	55
Johannst.-Süd(Wintergartenstr)	54
Johannst.-Süd(Nicolaistr)	53
Johannst.-Süd(Schumannstr)	45
Johannst.-Süd(Permoserstr)	57
Johannst.-Süd(Cranachstr)	54
Johannst.-Süd(Zöllnerstr)	70
Johannst.-Süd(M.-Cebotari-Str)	56
Johannst.-Süd(Lortzingstr)	63
Äußere Neust.(Schönbrunnstr)	78
Äußere Neust.(Timäusstr)	84
Äuß.Neust.(Katharinenstr)	85
Äußere Neust.(Böhmische Str)	76
Äußere Neust.(Görlitzer Str)	78
Äußere Neust.(Schönfelder Str)	79
Äußere Neust.(Frühlingstr)	73
Äußere Neust.(Tannenstr)	55
Radeberger Vs.(Jägerstr)	30
Radeberger Vs.(Forststr)	35
Radeberger Vs.(Angelikastr)	36
Radeberger Vs.(Am Jägerpark)	37
Innere Neust.(Königstr)	64
Innere Neust.(Sarrasanistr)	60
Innere Neust.(Wigardstr)	59
Antonst.-Süd(Hoyerswerd. Str)	56
Leipziger Vs.(Eisenbahnstr)	80
Leipziger Vs.(Rudolfstr)	70
Leipziger Vs.(Helgolandstr)	76
Leipziger Vs.(Unterer Hecht)	76
Leipziger Vs.(Mittlerer Hecht)	54

Statistischer Bezirk	Mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Leipziger Vs.(Oberer Hecht)	39
Hellersiedlung	49
Industriegelände	37
Leipziger Vs.(Weimarische Str)	70
Leipziger Vs.(Moritzburger St)	64
Pieschen-Süd(Torgauer Str)	71
Pieschen-Süd(Altpieschen)	70
Pieschen-Süd(Leisniger Pl)	53
Trachau-Süd(Alttrachau)	47
Trachau-Süd(Bunsenstr)	65
Mickten(Dreyßigplatz)	63
Mickten(Lommatzscher Str)	56
Mickten(Sternstr)	48
Mickten(Altmickten)	53
Übigau	54
Kaditz(Kläranlage)	48
Kaditz(Wächterstr)	65
Kaditz(Peschelstr)	56
Kaditz(Altkaditz)	48
Kaditz(Riegelplatz)	64
Trachau(Cottbuser Str)	53
Trachau(Wahnsdorfer Str)	48
Trachau(Stephanstr)	46
Trachau(Platanenstr)	50
Trachau(Trobischstr)	42
Trachau(Industriestr)	57
Trachau(Richard-Rösch-Str)	46
Trachau(Neuländer Str)	44
Heidefriedhof	17
Leipziger Vs.-NW(Liststr)	60
Pieschen-Nord(Riesaer Str)	70
Pieschen-Nord(Hellerauer Str)	56
Pieschen-Nord(Trachenbgr. Str)	68
Pieschen-Nord(Rückertstr)	52
Pieschen-Nord(Duckwitzstr)	48
Trachenberge	36
Klotzsche(Altklotzsche)	43
Klotzsche(Lubminer Str)	50
Klotzsche(Grüner Weg)	38
Klotzsche(Am Trobischberg)	41
Klotzsche(Königswald-Süd)	46
Klotzsche(Königswald-Nord)	44
Klotzsche(Selliner Str)	56
Klotzsche(Binzer Weg)	56
Wilschdorf	42
Rähnitz	42
Hellerau(Festspielhaus)	37
Hellerau(Markt)	42
Industriegebiet Klotzsche	67
Klotzsche/Dresdner Heide(Fuchsberg)	27
Hellerberge	41
Waldpark Klotzsche	28
Loschwitz(Schevenstr)	12
Loschwitz(Körnerplatz)	32
Oberloschwitz	14
Wachwitz	17
Weißer Hirsch	18
Loschwitz-Nordost(Rißweg)	27
Loschwitz-NO(Am Weißen Adler)	22
Bühlau(Neubühlauer Str)	26
Bühlau(Neukircher Str)	26
Bühlau(Ullersdorfer Str)	16
Alt-Bühlau/Quohren	35
Rochwitz	20

Statistischer Bezirk	Mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Neu-Rochwitz	18
Niederpoyritz	23
Hosterwitz	28
Pillnitz	17
Oberpoyritz	20
Söbrigen	41
Dresdener Heide	15
Blasewitz(Händelallee)	42
Blasewitz(Schillerpl)	35
Blasewitz(Waldpark)	13
Blasewitz(Kretschmerstr)	48
Blasewitz(Oehmestr)	55
Neugruna(Gustav-Freytag-Str)	42
Neugruna(Polenzstr)	56
Elbwiesen(Blasewitz)	33
Striesen-Ost(Sickingenstr)	56
Striesen-Ost(Jacobistr)	54
Striesen-Ost(Pohlandstr)	54
Striesen-Ost(Dornblüthstr)	55
Striesen-Ost(Ermelstr)	61
Striesen-Ost(Voglerstr)	56
Striesen-Ost(Bärensteiner Str)	67
Johannst.-SO(Anton-Graff-Str)	47
Striesen-Süd(Mosenstr)	59
Striesen-Süd(Mansfelder Str)	51
Johannst.-SO(Lipsiusstr)	43
Johannst.-SO(Comeniusstr)	44
Striesen-Süd(Haenel-Clauß-Pl)	59
Striesen-Süd(Hepkeplatz)	46
Striesen-Süd(Glashütter Str)	58
Striesen-West(Krenkelstr)	53
Striesen-West(Tittmannstr)	53
Striesen-West(Wormser Pl)	52
Striesen-West(Löscherstr)	58
Striesen-West(Alemannenstr)	52
Striesen-West(Altstriesen)	56
Tolkewitz(Wehlener Str)	33
Tolkewitz(Knappestr)	27
Tolkewitz(Wilischstr)	64
Seidnitz-Nord(Löwenhainer Str)	51
Seidnitz-Nord(Johnsbacher Weg)	55
Seidnitz-Nord(Altenberger Str)	43
Seidnitz-Nord(Schmiedebgr.Str)	52
Seidnitz-Nord(Schlottwtzr.Str)	55
Johannesfriedhof/Krematorium	26
Seidnitz(Rennbahn)	50
Seidnitz(Schilfweg)	55
Seidnitz(Dobritzer Str)	51
Dobritz(Altdobritz/Basedowstr)	41
Seidnitz(Hellendorfer Str)	40
Seidnitz(Altseidnitz)	52
Seidnitz(Alter Elbarm)	58
Seidnitz(Hirschbacher Weg)	63
Seidnitz(Ulberndorfer Weg)	55
Gruna(Karl-Roth-Str)	53
Gruna(Falkensteinpl)	55
Gruna(Gartenheimallee)	44
Gruna(Am Knie)	43
Gruna(Rosenbergstr)	58
Gruna(Papstdorfer Str)	57
Gruna(Beilstr)	49
Gruna(Karcherallee)	34
Strehlen-Nordost(Basteistr)	56
Leuben(Altleuben)	45

Statistischer Bezirk	Mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Leuben(Stephensonstr)	41
Leuben(Kleinzschachwitzer Str)	42
Leuben/Niedersedlitz(Sachsenw)	69
Leuben(Altleuben)	51
Leuben(Mockethaler Str)	56
Leuben(Birkwitzer Weg)	50
Leuben(Rottwerndorfer Str)	42
Dobritz-Süd(Jessener Str)	54
Laubegast-Nord/Alttolkewitz	29
Laubegast(Burgenlandstr)	39
Laubegast(Hallstädter Str)	39
Laubegast(Altlaubegast)	48
Laubegast(Gasteiner Str)	52
Laubegast(Kärntner Weg)	43
Kleinzschachwitz-Nord	27
Kleinzschachwitz-Süd	36
Meußlitz	40
Zschieren	39
Großzschachwitz(Alte Str)	51
Großzschachwitz(Rathener-Nord)	63
Großzschachwitz(Rathener-Mitt)	59
Großzschachwitz(Rathener-Süd)	56
Großzschachwitz(Schweizstr)	51
Sporbitz	58
Prohlis-Nord(Dohnaer Pl)	46
Prohlis-Nord(Am Anger)	41
Prohlis-Nord(Gubener Str)	42
Prohlis-Nord(Albert-Wolf-Pl)	57
Prohlis-Nord(Jacob-Winter-Pl)	59
Prohlis-Süd(Spremberger St)	60
Prohlis-Süd(Finsterwald.-West)	64
Prohlis-Süd(Finsterwald.-Ost)	52
Prohlis-Süd(Senftenberger-Süd)	43
Prohlis-Süd(Elsterwerdaer-SW)	63
Prohlis-Süd(Spreewalder-Süd)	51
Prohlis-Süd(Spreewalder-Ost)	49
Prohlis-Süd(Spreewalder-West)	37
Niedersedlitz-Südost	42
Niedersedlitz(Dorfstr)	31
Niedersedlitz(Windmühlenstr)	33
Niedersedlitz(Sosaer Str)	49
Niedersedlitz(C.-Morgenst.-St)	49
Niedersedlitz(E.-Kästner-Str)	54
Niedersedlitz(M.-Wander-Str)	34
Luga	19
Lockwitz	20
Nickern	33
Torna	34
Leubnitz(Leubnitzer Höhe)	22
Leubnitz(Hans-Otto-Weg)	56
Leubnitz(Fritz-Busch-Str)	39
Leubnitz(Altleubnitz)	31
Leubnitz(Wieckestr)	52
Leubnitz(Clausen-Dahl-Str)	37
Leubnitz(Feuerbachstr)	46
Mockritz-Ost(Gostritzer Str)	31
Strehlen(August-Bebel-Str)	50
Strehlen(Rayskistr)	43
Strehlen(Lenbachstr)	60
Strehlen(Geystr)	30
Strehlen(Eugen-Bracht-St)	46
Strehlen(Hans-Lohmar-Str)	61
Strehlen(Wilhelm-Lachnit-Str)	64
Strehlen(Wilhelm-Rudolph-Str)	48

Statistischer Bezirk	Mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Reick-NW(Edmund-Moeller-Weg)	45
Reick(Lohrmannstr)	66
Reick(Am Lehmhaus)	50
Reick(Lübbenauer Str)	60
Reick(Mügelner Str)	70
Südvs.-West(Feldschlößchenstr)	70
Südvs.-West(Schweizer Str)	63
Südvs.-West(Bayrische Str)	57
Südvs.-West(Eisenstuckst-West)	79
Südvs.-West(Eisenstuckst-Mitt)	59
Südvs.-West(Schnorrstr-West)	45
Südvs.-West(Nürnberger Pl/TU)	55
Südvs.-West(Bayreuther-West)	64
Südvs.-West(Bayreuther-Ost)	46
Südvs.-Ost(Hochschulstr)	54
Südvs.-Ost(Uhlandstr)	69
Südvs.-Ost(Lukasplatz)	50
Südvs.-Ost(Ackermannstr)	54
Südvs.-Ost(Wundtstr)	47
Räcknitz(Alträcknitz)	40
Räcknitz(M.-Andersen-Nexö-Str)	33
Räcknitz(Auguste-Lazar-Str)	51
Zschertnitz(Bulgakowstr)	41
Zschertnitz(Rubensweg)	38
Zschertnitz(Paradiesstr)	46
Zschertnitz(Zschertnitzer Weg)	46
Zschertnitz(Tizianstr)	49
Strehlen-SW(Donndorfstr)	34
Kleinpestitz(Muldaer Str)	42
Kleinpestitz(Eppendorfer Weg)	52
Kleinpestitz(Dorfhainer Str)	37
Kaitz	37
Altmockritz/Altpestitz	33
Gostritz	21
Coschütz-Ost	40
Coschütz-West	22
Gittersee	39
Plauen(Würzburger Str-West)	62
Plauen(Würzburger Str-Ost)	43
Plauen(Regensburger Str)	52
Plauen(Nöthnitzer Str)	42
Plauen(Müllerbrunnenstr)	62
Plauen(Kantstr)	37
Plauen(Friedrich-Hegel-Str)	35
Plauen(Hohenplauen)	31
Cotta(Cossebauder Str)	56
Cotta(Grillparzerplatz)	47
Cotta(Weidentalstr-West)	56
Cotta(Weidentalstr-Ost)	47
Cotta(Sachsdorfer Str)	60
Friedrichst.-SW(Fröbelstr)	46
Löbtau-Nord(Ebertplatz)	79
Löbtau-Nord(Altlöbtau)	65
Löbtau-Nord(Grumbacher Str)	65
Löbtau-Nord(Conertplatz)	65
Löbtau-Nord(Malterstr-Nord)	63
Löbtau-Süd(Schillingstr)	67
Löbtau-Süd(Frankenbergstr)	78
Löbtau-Süd(Altfrankener Str)	55
Löbtau-Süd(Zauckeroder Str)	37
Löbtau-Süd(Deubener Str)	71
Löbtau-Süd(Rabenauer Str)	62
Naußlitz-Nord	52
Wölfnitz	42

Statistischer Bezirk	Mittlerer Versiegelungsgrad [%]
Naußlitz-West	40
Naußlitz-Süd	30
Dölzschen	23
Niedergorbitz/Roßthal	20
Gorbitz-Süd(Amal.-Dietrich-Pl)	68
Gorbitz-Süd(Wölfn. Ring-Ost)	58
Gorbitz-Süd(Wölfn. Ring-West)	57
Gorbitz-Süd(Altgorb. Ring-Ost)	62
Gorbitz-Süd(Altgorb.Ring-Mitt)	59
Gorbitz-Süd(Wilsdr. Ring-Ost)	53
Gorbitz-Süd(Wilsdr. Ring-West)	57
Gorbitz-Süd(Schreberstr)	50
Gorbitz-Ost(Am Gorbitzbach)	48
Gorbitz-Ost(Dahlienweg-Süd)	64
Gorbitz-Ost(Asternweg)	61
Gorbitz-Ost(Höhenpromenade)	63
Gorbitz-Ost(Leutew. Ring-Ost)	62
Gorbitz-Ost(Leutew. Ring-Mitt)	58
Gorbitz-Ost(Leutew. Ring-West)	56
Gorbitz-Nord(Omsew. Ring-SO)	53
Gorbitz-Nord(Omsew. Ring-NW)	62
Neu-Omsewitz(Melissenweg)	62
Neu-Omsew.(Kresseweg)	75
Neu-Omsewitz(Harthaer-Ost)	67
Neu-Omsewitz(Harthaer-Mitte)	58
Neu-Omsewitz(Harthaer-West)	50
Neu-Omsewitz(Thymianweg)	68
Stetzsch	36
Kemnitz	34
Briesnitz-Nord	29
Briesnitz-Süd	50
Alt-Omsewitz	36
Leutewitz	31

Anlage 2d: Flächenanteil der Versiegelungsklassen an der Gesamtfläche des Stadtgebietes Dresden

Versiegelungsklasse [%]	Fläche [ha]	Fläche [%-Anteil]
0 -10	3921,7	17,4
10 - 20	2710,1	12,0
20 - 30	3010,7	13,3
30 - 40	2615,2	11,6
40 - 50	2047,8	9,1
50 - 60	1916,8	8,5
60 - 70	1835,4	8,1
70 - 80	1573,2	7,0
80 - 90	1204,8	5,3
90 - 100	1772,1	7,8

Anlage 3:

Zusammenhang zwischen Vegetationsindex NDVI (TM 1994) und terrestrisch erhobenen Versiegelungsgrad

Testgebiet	Vegetations-index NDVI	Versiegelungs-grad VSG (terr.)	Versiegelungs-grad (TM '94)	Residuen	Fehlerbegründung
W1	0.1479	39.9	58.7	-18.8	nutzungsbedingt devitalisierte Grünflächen
W4 I	0.2318	42.4	39.6	2.8	
W4 II	0.195	39.6	48	-8.4	
W4 III	0.1565	61.9	56.8	5.1	
W4 IV	0.2004	53.2	46.8	6.4	
W5	-0.0055	93.3	93.7	-0.4	
W6 I	0.0099	86.8	90.2	-3.4	
W7 I	0.0906	88.6	71.8	16.8	Straßenbäume überdecken Versiegelungen
W7 II	0.0665	84	77.3	6.7	
W7 III	0.1313	59.9	62.5	-2.6	
W7 V	0.1054	77.4	68.4	9	
W8 I	0.1929	61.9	48.5	13.4	Großgrün überdeckt versiegelte Flächen
W8 II	0.1717	62	53.3	8.7	
W8 III	0.196	52.7	47.8	4.9	
W8 IV	0.0893	65.4	72.1	-6.7	
W8 V	0.168	69.2	54.1	15.1	Großgrün überdeckt Versiegelungen
W11 I	0.1695	51	53.8	-2.8	
W11 II	0.2453	33.1	36.5	-3.4	
W11 III	0.2412	37.4	37.5	-0.1	
W14	0.2627	29.8	32.6	-2.8	
W15 I	0.2012	56.2	46.6	9.6	
W15 II	0.1981	52.6	47.3	5.3	
W15 III	0.2003	50.4	46.8	3.6	
G1	0.1142	58.1	66.4	-8.3	
G2a	0.2542	14.4	34.5	-20.1	Kleingartenanlage (hoher Anteil vegetationsloser Boden)
G3 I	0.2222	44.4	41.8	2.6	
G3 II	0.2079	36.3	45.1	-8.8	
G3 III	0.2653	21.9	32	-10.1	
G4a	0.3012	35.7	23.8	11.9	
G4b	0.2545	28.1	34.4	-6.3	
G5b	0.2255	35.4	41	-5.6	
I1 I	0.0567	56.1	79.5	-23.4	Versiegelung nach terrestrischer Erhebung
I1 II	0.031	91.1	85.4	5.7	
I1 III	0.0573	94	79.4	14.6	Entsiegelungen nach terrestrischer Erhebung
I1 IV	0.078	95.3	74.7	20.6	Entsiegelungen nach terrestrischer Erhebung
I2	0.111	67	67.1	-0.1	
I3	0.0971	78	70.3	7.7	
I4 I	-0.0106	94.8	94.8	0	
I4 II	0.032	83.6	85.1	-1.5	
I4 III	0.0857	56.1	72.9	-16.8	Versiegelung nach terrestrischer Erhebung
W12 I	0.2086	44.7	44.9	-0.2	
W12 II	0.1493	49.1	58.4	-9.3	
W2 II	0.1575	50.3	56.5	-6.2	
W2 III	0.1664	42.9	54.5	-11.6	
W3 I	0.1231	61.1	64.4	-3.3	
W3 II	0.1379	56.3	61	-4.7	
W9 I	0.2003	37.1	46.8	-9.7	
W9 II	0.1805	52.6	51.3	1.3	
W9 III	0.165	52.7	54.8	-2.1	
W10 I	0.2693	42.8	31.1	11.7	
W10 II	0.2362	55.6	38.6	17	Großgrün überdeckt Versieglungen
W13	0.152	54.6	57.8	-3.2	

Karteninterpretation

Karten 1 und 2

Gut und übereinstimmend in den Landsat- und SPOT- Versiegelungskarten der Stadt Dresden (Karten 1 und 2) wird der hohe Versiegelungsgrad des Stadtzentrums von Dresden wiedergegeben (rote Färbung).
Stadtrandbereiche und durchgrünte Wohnviertel mit einem mittleren Versiegelungsgrad von 30 - 50 % werden in hellgrünem und gelbem Farbton wiedergegeben.
Die etwas bessere geometrische Auflösung der SPOT-Daten ist an der deutlicheren Wiedergabe des Straßennetzes zu erkennen. Beide Karten weisen am Elbufer einen Pixelsaum mit teilweise hohen Versiegelungswerten auf. Diese fehlerhaften Werte sind auf Mischpixel im Uferzonenbereich zurückzuführen.
Auffallend ist auch das Vorhandensein von Versiegelungswerten bis teilweise 30 % in der Dresdener Heide (Mischwaldgebiet) und im Großen Garten (Stadtparkfläche). Diese hohen Versiegelungswerte sind durch sehr spärliche Vegetationsdecken zu erklären (Waldlichtungen mit Jungbaumbestand mit hohem Anteil vegetationsloser Böden in der Dresdener Heide bzw. kurzgeschnittenen Rasenflächen im Großen Garten).
Bemerkenswert sind weiterhin die z.T. deutlich höheren Versiegelungswerte von Laubwaldgebieten und städtischen Flächen mit dichtem Baumbestand in der SPOT-Versiegelungskarte gegenüber der Landsat-Karte. Das ist auf den frühen saisonalen Aufnahmezeitpunkt der SPOT-Aufnahme zurückzuführen, der am Anfang der Vegetationsperiode liegt, so daß die Bäume z.T. noch unbelaubt sind und Baumflächen geringe Vegetationsindexwerte und damit erhöhte Versiegelungswerte aufweisen.

Karten 3 und 4

Die Karten 3 und 4 zeigen die Übersichtswerte der Versiegelung für die Stadt Leipzig.
Die Karten stimmen sehr gut überein, aufgrund des fast gleichen Aufnahmedatums zwischen Landsat- und SPOT-Aufnahme.
Große, neuversiegelte Flächen am Stadtrand, wie das Neue Messegelände im Norden oder das Paunsdorf-Center im Osten der Stadt heben sich deutlich heraus.

Karte 5

Karte 5 zeigt die hohe Auflösung der KWR-1000-Daten. Die digitalen Daten mit einer

Bodenauflösung von 2,6 m wurden georeferenziert und in einem Maßstab 1 : 10 000 wiedergegeben. Alle wichtigen städtebaulichen Objekte sind deutlich erkennbar. Eine Differenzierung von Belagsarten ist nicht möglich. Auch die Unterscheidung von versiegelten Flächen und Vegetationsflächen ist aufgrund der panchromatischen Aufnahme oft nicht möglich.

Karte 6

Karte 6 zeigt das Dresdener Stadtzentrum im Maßstab 1: 25 000 in einer KFA-1000-Aufnahme. Die Bodenauflösung beträgt ca 8,5 m. Straßen sind gut erkennbar, Bebauungen nur bei genügender Größe und nur in der Grundstruktur. Der Spektrozonalfilm SN-10 bewirkt eine Darstellung der Vegetation in Grün- und von Versiegelungsflächen in Rottönen.

Karte 7

Karte 7 zeigt die hohe Auflösung von CIR-Aufnahmen aus geringer Flughöhe (450 m, Meßkammerkonstante 153 mm). Die Karte zeigt im Maßstab 1 : 2 500 die innere Neustadt Dresdens. Durch die Farbinfrarotdarstellung und die hohe Auflösung kann genau zwischen versiegelten und unversiegelten Flächen unterschieden werden.
Eine Einschätzung der Belagsart ist nicht möglich.

Karte 8

Karte 8 zeigt den mittleren Versiegelungsgrad der statistischen Bezirke Dresdens, abgeleitet aus der Landsat-Übersichtskarte der Versiegelung.
Deutlich heben sich die innere Altstadt, Seevorstadt und Teile der Friedrichstadt mit einem Versiegelungsgrad > 70 % heraus.
Die hochverdichteten, innerstädtischen Bezirke der inneren Neustadt erreichen bemerkenswerterweise "nur" Versiegelungswerte von 50-70%. Das ist auf die erheblichen Flächenanteile der Elbwiesen zurückzuführen, die den Versiegelungsgrad im Mittel senken.
Versiegelungswerte unter 20 % werden nur an den Stadträndern bzw. in den beiden städtischen Parkflächen "Großer Garten" und "Waldpark" erreicht.

Stadtökologische Forschungen

Nr. 1 UFZ-Bericht Nr. 5/1996
Winkler, M.:
Untersuchungen zur gepflanzten Vegetation und ihre ökologische Bedeutung

Nr. 2 UFZ-Bericht Nr. 6/1996
Arndt, E., Pellmann, H.:
Ökologische Charakterisierung von Biotopen im urbanen Raum am Beispiel von Modelltiergruppen

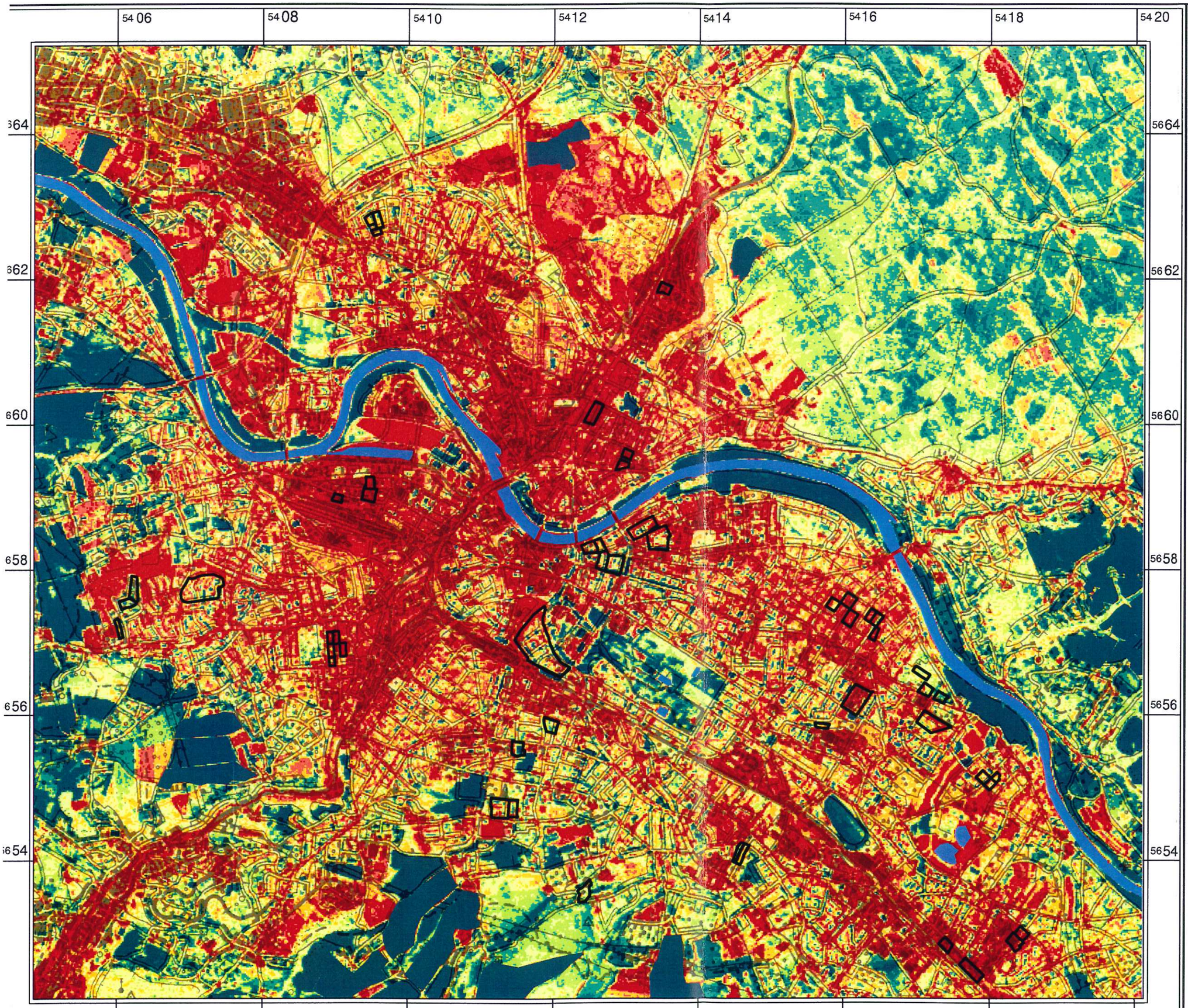
Nr. 3 UFZ-Bericht Nr. 8/1996
Frühauf, M., Breuste, I., Breuste, J., Diaby, K., Sauerwein, M., Zierdt, M.:
Hallesche Kleingärten. Nutzung und Schadstoffbelastung als Funktion der sozioökonomischen Stadtstruktur und physisch-geographischer Besonderheiten.

Nr. 4 UFZ-Bericht Nr. 9/1996
Heinz, V.:
Die Flächennutzung der Stadt Leipzig im klassifizierten Landsat-TM-Bild

Nr. 5 UFZ-Bericht Nr. 10/1996
Freyer, K., Popp, P., Treutler, H.C., Wagler, D., Schuhmann, G.: Untersuchungen zu Wechselbeziehungen zwischen Immissionen und Flächennutzung auf strukturtypischen Testflächen in Leipzig

Nr. 6 UFZ-Bericht Nr. 11/1996
Schulte, G.:
Stadtböden - Schadstoffbelastung und -mobilität

Nr. 7 UFZ-Bericht Nr. 12/1996
Breuste, J., Keidel, T., Meinel, G., Münchow, B., Netzband, M., Schramm, M .:
Erfassung und Bewertung des Versiegelungsgrades befestigter Flächen



Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Dresden - erstellt aus SPOT - XS Daten -

Maßstab 1 : 50 000

1 0 1 2 km

Legende

Versiegelungsgrad [%] :

0 - < 10	50 - < 60
10 - < 20	60 - < 70
20 - < 30	70 - < 80
30 - < 40	80 - < 90
40 - < 50	90 - ≤ 100

Gewässer

Testgebiet (terrestrisch erhoben)

Rasterdaten (Grundriß) der TK 100 (N)
Gen.-Nr.: DN R 010/94
Vervielfältigt mit Genehmigung
des LVA Sachsen

Datenerfassung

Datenquelle :

Satellit:	SPOT (XS-Modus)
Aufnahmedatum:	21.04.1992
Bodenauflösung:	20 m x 20 m

Datenprozessierung :

Geometrische Entzerrung:	43 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage:	TK 25 (N)
Resampling:	Nearest Neighbour / 20 m

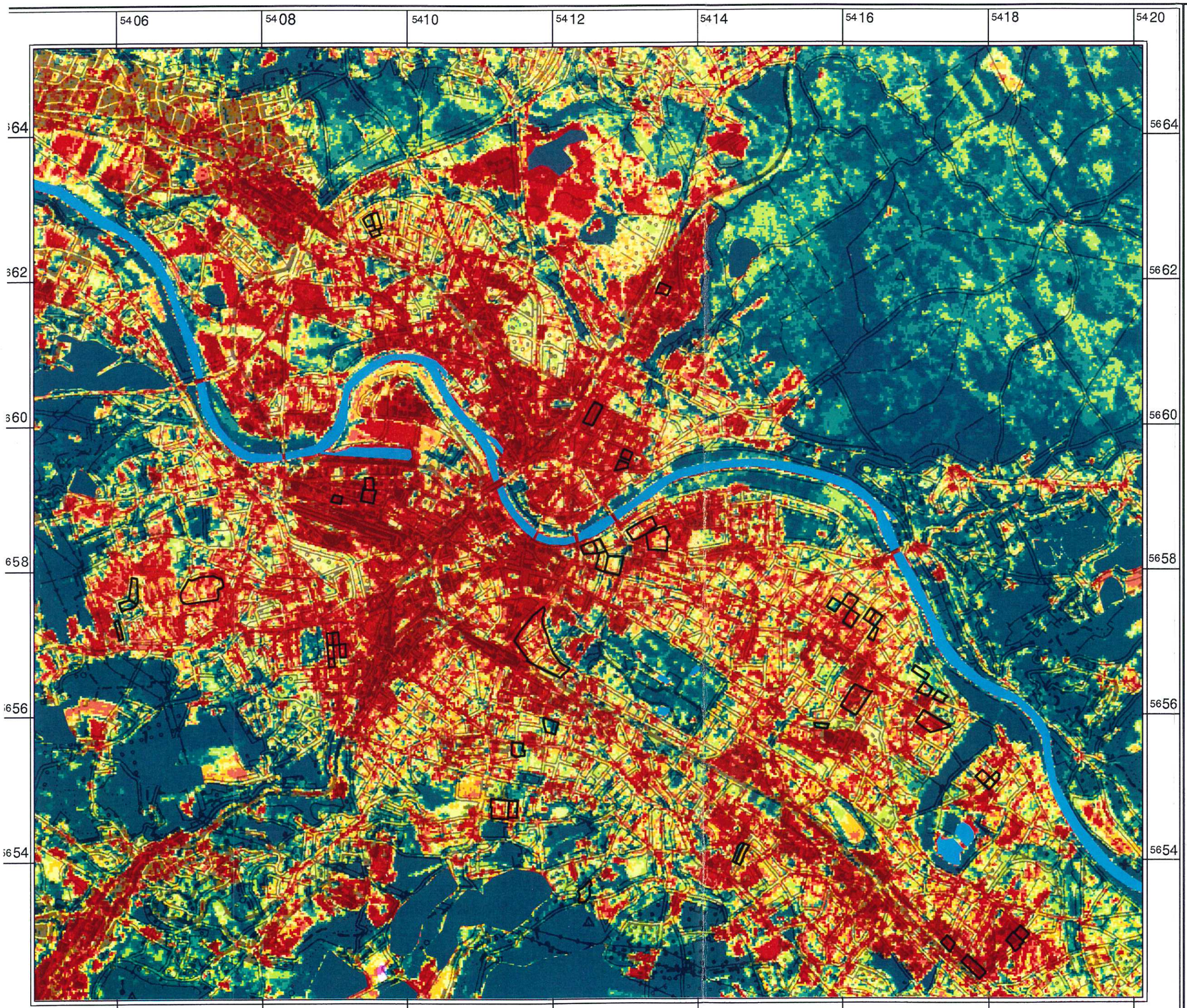
Auswertung:
* Berechnung des Vegetationsindex (NDVI)
* Digitalisierung der Grenzen der Testgebiete und Aufnahme der mittl. NDVI-Werte
* Transformation der Vegetationsindizes in Versiegelungswerte über mittlere NDVI der Testgebiete und zusätzliche unversiegelte und vollversiegelte Testgebiete
* Begrenzung auf [0,100] - Wertebereich
* Einteilung in 10 Klassen (10%-Schritte)

Hinweis:
Wald- und Landwirtschaftsflächen weisen, methodisch bedingt, teilweise zu hohe Versiegelungswerte auf

Digitale Bildverarbeitung:	M. Netzband und G. Meinel
Kartographie:	M. Netzband und C. Knapp
Programm:	ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe:	Tektronix-Phaser 480X

Erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes Az.: Q2-Q2500/9 im Auftrag des Sächsischen Staatsministerium f. Umwelt u. Landesentwicklung

Institut für
ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995



Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Dresden - erstellt aus Landsat -TM Daten -

Maßstab 1 : 50 000

1 0 1 2 km

Legende

Versiegelungsgrad [%] :

0 - < 10	50 - < 60
10 - < 20	60 - < 70
20 - < 30	70 - < 80
30 - < 40	80 - < 90
40 - < 50	90 - ≤ 100

Gewässer

Testgebiet (terrestrisch erhoben)

Rasterdaten (Grundriß) der TK 100 (N)
Gen.-Nr.: DN R 010/94
Vervielfältigt mit Genehmigung
des LVA Sachsen

Datenerfassung

Datenquelle :

Satellit:	Landsat-TM 5
Aufnahmedatum:	30.07.1994
Bodenauflösung:	30 m x 30 m

Datenprozessierung :

Geometrische Entzerrung:	40 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage:	TK 25 (N)
Resampling:	Nearest Neighbour / 25 m

Auswertung:
* Berechnung des Vegetationsindex (NDVI)
* Digitalisierung der Grenzen der Testgebiete und Aufnahme der mittl. NDVI-Werte
* Transformation der Vegetationsindizes in Versiegelungswerte über mittlere NDVI der Testgebiete und zusätzliche unversiegelte und vollversiegelte Testgebiete
* Begrenzung auf [0,100] - Wertebereich
* Einteilung in 10 Klassen (10%-Schritte)

Hinweis:
Wald- und Landwirtschaftsflächen weisen, methodisch bedingt, teilweise zu hohe Versiegelungswerte auf

Digitale Bildverarbeitung:	M. Netzband und G. Meinel
Kartographie:	M. Netzband und C. Knapp
Programm:	ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe:	Tektronix-Phaser 480X

Erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes Az.: Q2-Q2500/9 im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums f. Umwelt u. Landesentwicklung

Institut für
ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995

Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Leipzig - erstellt aus Landsat - TM Daten -

Maßstab 1 : 50 000

1 0 1 2 km

Legende

Versiegelungsgrad [%] :

0 - < 10	50 - < 60
10 - < 20	60 - < 70
20 - < 30	70 - < 80
30 - < 40	80 - < 90
40 - < 50	90 - ≤100

Gewässer

Testgebiet (terrestrisch erhoben)

Rasterdaten (Grundriß) der TK 100 (N)
Gen.-Nr.: DN R 04/96
Vervielfältigt mit Genehmigung
des LVA Sachsen

Datenerfassung

Datenquelle :

Satellit: Landsat-TM 5
Aufnahmedatum: 21.07.1994
Bodenauflösung: 30 m x 30 m

Datenprozessierung :

Geometrische Entzerrung: 65 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage: TK 25 (N)
Resampling: Nearest Neighbour / 25 m

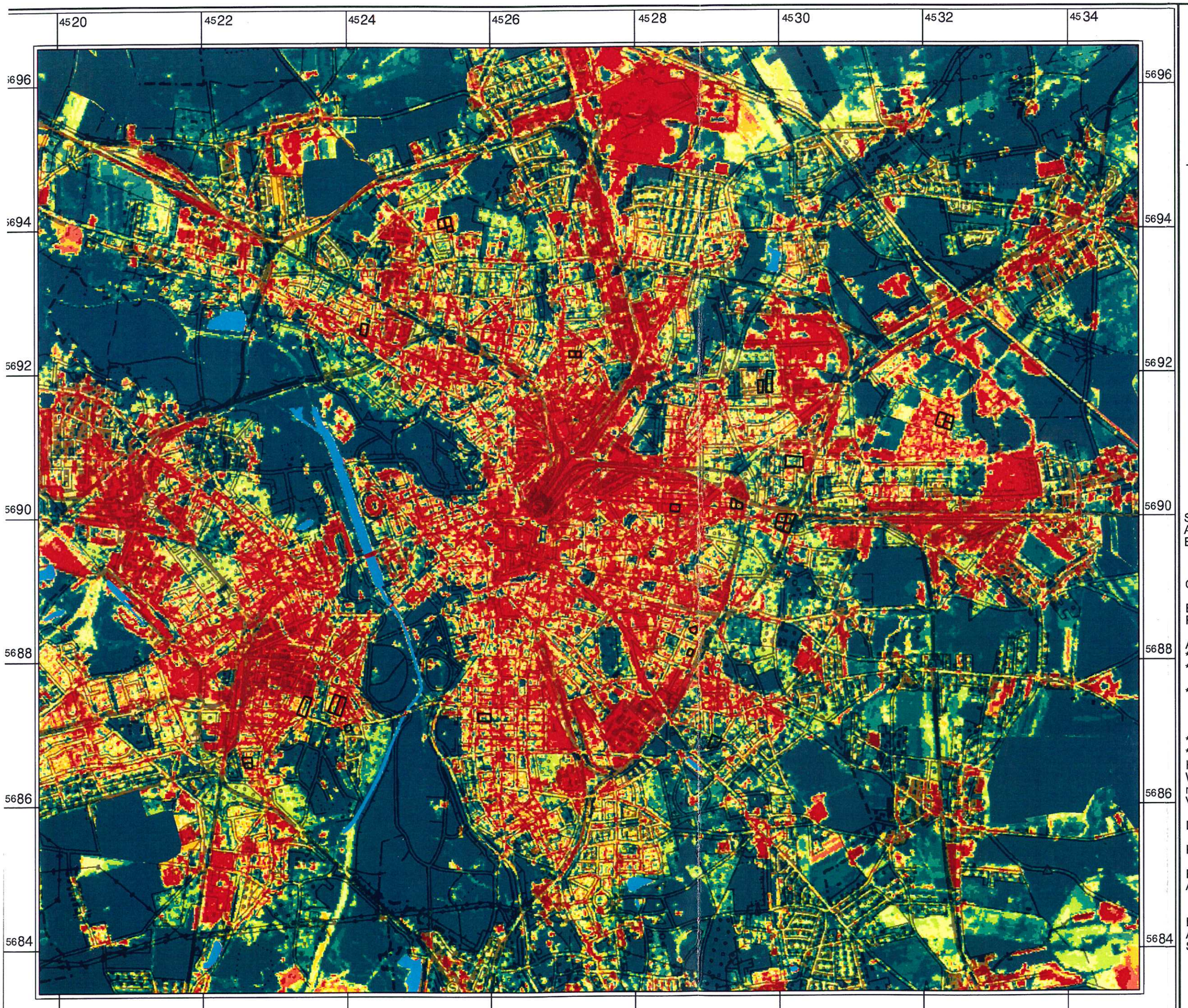
Auswertung:
* Berechnung des Vegetationsindex (NDVI)
* Digitalisierung der Grenzen der Testgebiete und Aufnahme der mittl. NDVI-Werte
* Transformation der Vegetationsindizes in Versiegelungswerte über mittlere NDVI der Testgebiete und zusätzliche unversiegelte und vollversiegelte Testgebiete
* Begrenzung auf [0,100] - Wertebereich
* Einteilung in 10 Klassen (10%-Schritte)

Hinweis:
Wald- und Landwirtschaftsflächen weisen, methodisch bedingt, teilweise zu hohe Versiegelungswerte auf

Digitale Bildverarbeitung: M. Netzband und G. Meinel
Kartographie: M. Netzband und C. Knapp
Programm: ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe: Tektronix-Phaser 480X

Erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes Az.: Q2-Q2500/9 im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums f. Umwelt u. Landesentwicklung

Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden 1995



Übersicht der Bodenversiegelung im Stadtgebiet Leipzig - erstellt aus SPOT - XS Daten -

Maßstab 1 : 50 000

1 0 1 2 km

Legende

Versiegelungsgrad [%] :

0 - <10	50 - <60
10 - <20	60 - <70
20 - <30	70 - <80
30 - <40	80 - <90
40 - <50	90 - ≤100

Gewässer

Testgebiet (terrestrisch erhoben)

Rasterdaten (Grundriß) der TK 100 (N)
Gen.-Nr.: DN R 04/96
Vervielfältigt mit Genehmigung
des LVA Sachsen

Datenerfassung

Datenquelle :

Satellit:	SPOT (XS -Modus)
Aufnahmedatum:	25.06.1994
Bodenauflösung:	20 m x 20 m

Datenprozessierung :

Geometrische Entzerrung:	65 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage:	TK 25 (N)
Resampling:	Nearest Neighbour / 18 m

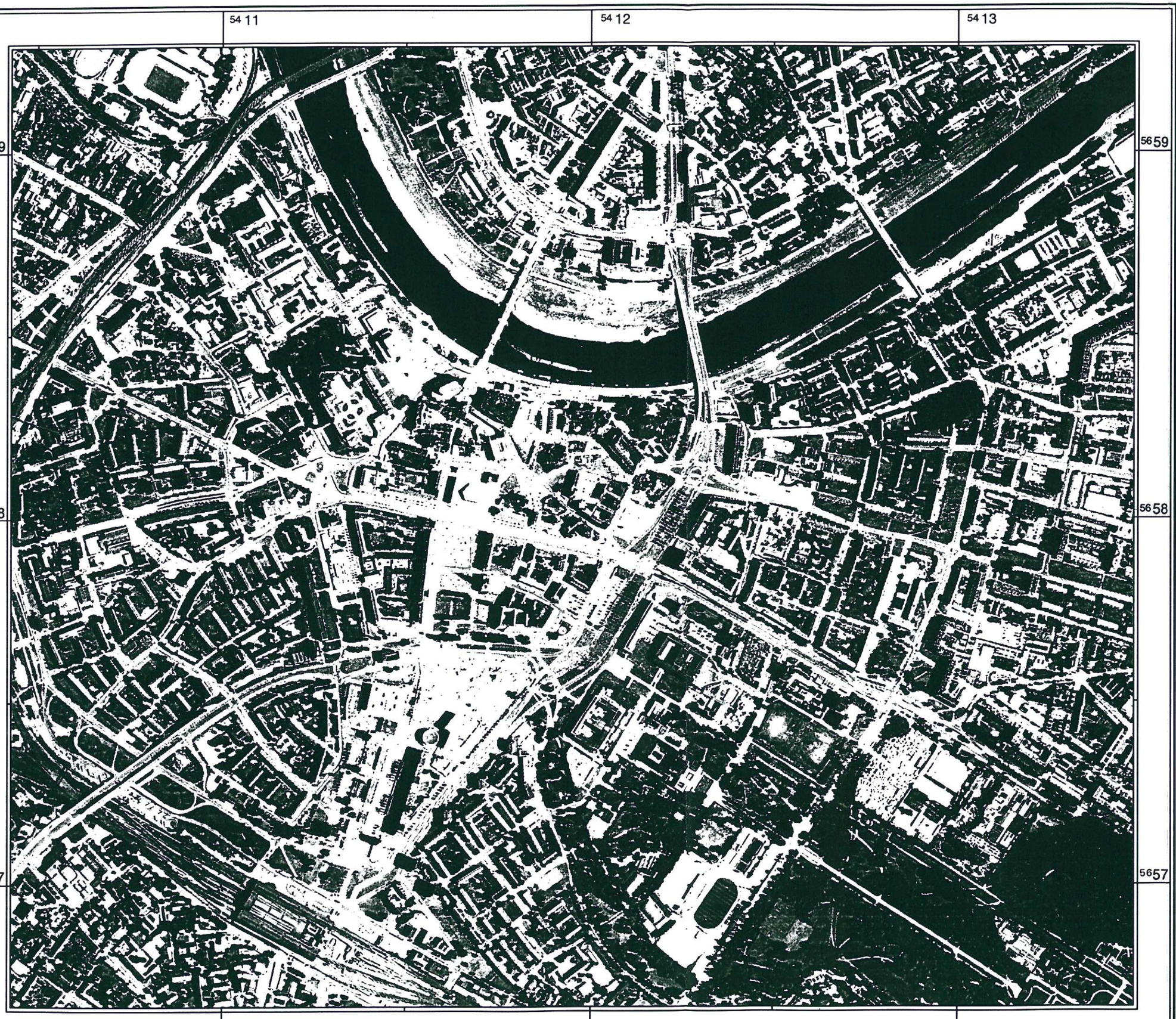
Auswertung:
* Berechnung des Vegetationsindex (NDVI)
* Digitalisierung der Grenzen der Testgebiete und Aufnahme der mittl. NDVI-Werte
* Transformation der Vegetationsindizes in Versiegelungswerte über mittlere NDVI der Testgebiete und zusätzliche unversiegelte und vollversiegelte Testgebiete
* Begrenzung auf [0,100] - Wertebereich
* Einteilung in 10 Klassen (10%-Schritte)

Hinweis:
Wald- und Landwirtschaftsflächen weisen, methodisch bedingt, teilweise zu hohe Versiegelungswerte auf

Digitale Bildverarbeitung:	M. Netzband und G. Meinel
Kartographie:	M. Netzband und C. Knapp
Programm:	ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe:	Tektronix-Phaser 480X

Erstellt im Rahmen des Forschungsprojektes Az.: Q2-Q2500/9 im Auftrag des Sächsischen Staatsministerium f. Umwelt u. Landesentwicklung

Institut für
ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995



KWR 1000 - Aufnahme Stadtzentrum von Dresden

Maßstab 1 : 10 000

200 0 200 400 m

Datenbeschreibung

Datenquelle:

Sensor:	KWR 1000 (russische Meßkammer)
Aufnahmedatum:	Juni 1989
Bildgrundlage:	Panchromatischer Film
Bildformat:	50 x 60 cm
Bildmaßstab:	1: 50 000 bis 1: 120 000
lieferbarer Ausschnitt:	20 x 20 km
Bodenauflösung:	0,75 - 2 m
Wiederholrate:	missionsabhängig
digitale Bildauflösung:	2,6 m

Datenprozessierung

Geometrische Entzerrung:	58 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage:	TK 10 (N)
Resampling:	Cubic Convolution/ 2 m
Digitale Bildverarbeitung:	C. Knapp und G. Meinel
Kartographie:	C. Knapp
Programm:	ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe:	Tektronix-Phaser 480X

Original Data © WORLDMAP International Ltd. and Gescenter PRIRODA 1993;
distributed by Dornier EDS under licence from WORLDMAP Int. Ltd.

Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995

KFA 1000 - Aufnahme
Stadtzentrum von Dresden

Maßstab 1 : 25 000

0.5 0 0.5 1 km

Datenbeschreibung

Datenquelle:

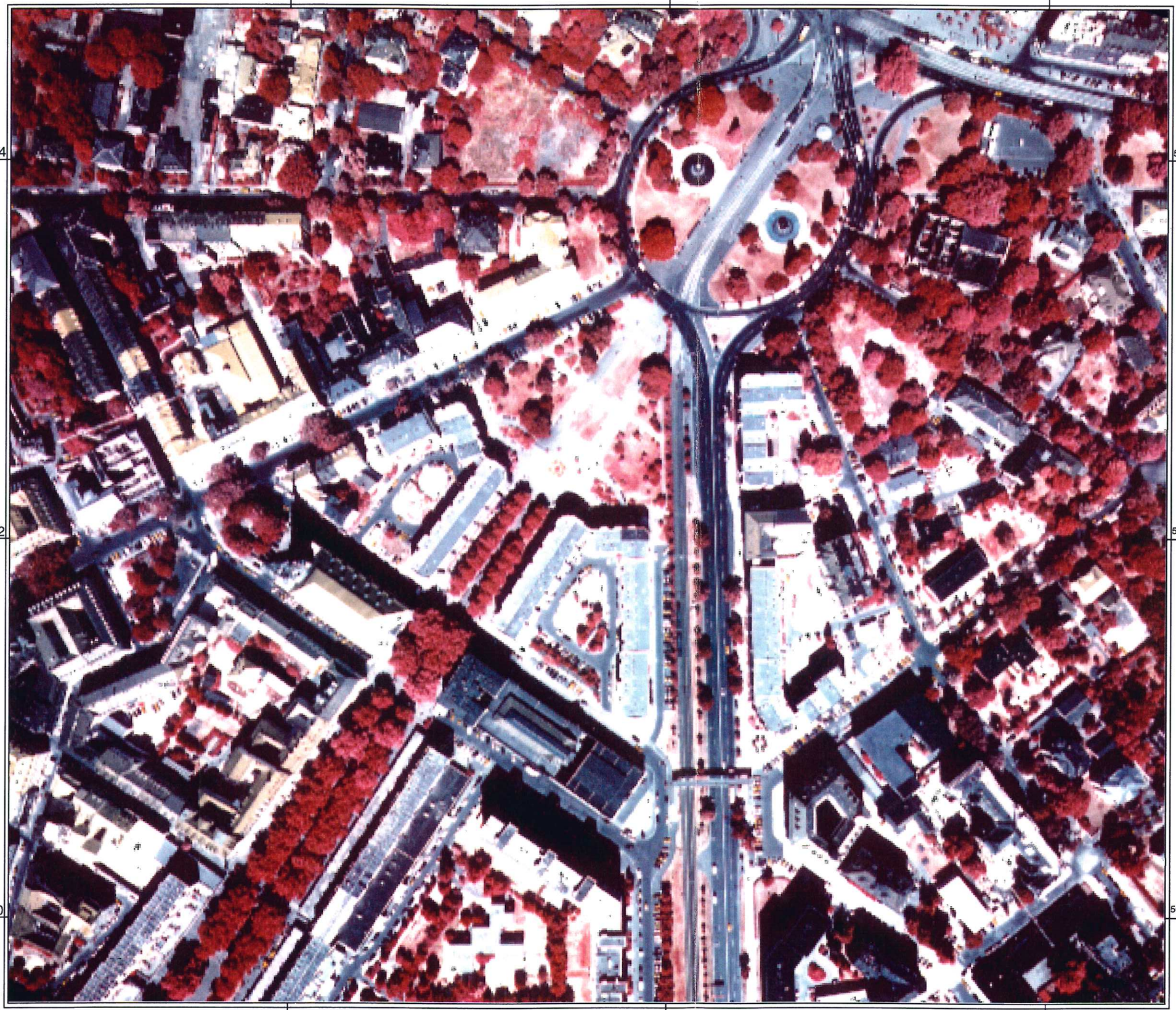
Sensor:	KFA 1000 (russische Meßkammer)
Aufnahmedatum:	27.05.1989
Bildgrundlage:	Spektrozonalfilm SN -10
Filmauflösung:	145 - 160 Lp/mm
Spektrale Empfindlichkeit:	0,57 - 0,67 µm 0,67 - 0,80 µm
Bildformat:	30 x 30 cm
Bildmaßstab:	1: 250 000 bis 1: 280 000
Bildfeld:	80 x 80 km
Bodenauflösung:	5 - 10 m
Wiederholrate:	missionsabhängig
Farbscan:	8,5 µm (3000 dpi)
digitale Bildauflösung:	2,6 m

Datenprozessierung

Geometrische Entzerrung:	42 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage:	TK 25 (N)
Resampling:	Nearest Neighbour/ 8 m
Bildverbesserung:	Histogramm-egalisierung
Digitale Bildverarbeitung:	M. Netzband und G. Meinel
Kartographie:	C. Knapp
Programm:	ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe:	Tektronix-Phaser 480X

Original Data © WORLDMAP International Ltd. and Gescenter PRIRODA 1993;
distributed by Dornier EDS under licence from WORLDMAP Int. Ltd.

Institut für
ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995



Colorinfrarot - Aufnahme

Innere Neustadt von Dresden

Maßstab 1 : 2 000

50 0 50 m

Datenbeschreibung

Datenquelle:

Aufnahmetyp:	Farbinfrarotaufnahme (CIR)
Aufnahmedatum:	10.08.1995
Aufnahmezeit:	12.00 Uhr MEZ
Film:	Aerochrome Infrared 2443 (Kodak)
Kamera:	Reihenmeßkammer A15/23
Meßkammer-konstante:	153 mm
Filter:	D
Flughöhe:	450 m
Bildmaßstab:	ca. 1 : 3000
Bodenauflösung:	ca. 0,1 m
Datenaquisition:	DLR, Institut für Optoelektronik
Flugzeugtyp:	DO 228/D-CALM

Datenprozessierung

Geometrische Entzerrung:	20 Paßpunkte, mit Polynom 2. Ordnung
Entzerrungsgrundlage:	TK 10(N)
Resampling:	Cubic Convolution/ 1 m
Digitale Bildverarbeitung:	C. Knapp und G. Meinel
Kartographie:	C. Knapp
Programm:	ERDAS-Imagine 8.2
Ausgabe:	Tektronix-Phaser 480X

ATM-Scannerbefliegung von Dresden im Rahmen des Forschungsprojektes Az.: Q2-Q2500/9 im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung

Institut für
ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995

Mittlerer Versiegelungsgrad der statistischen Bezirke Dresdens

Maßstab 1 : 75000

1 0 1 2 Kilometers

Grenzen der statistischen Bezirke
Versiegelungsgrad in %

- 0 - 10
- 11 - 20
- 21 - 30
- 31 - 40
- 41 - 50
- 51 - 60
- 61 - 70
- 71 - 80
- 81 - 90
- 91 - 100

Datenquellen:

Sensor: Landsat-TM-Satellitendaten
vom 30.6.94
Bodenauflösung 30 m

Statistische Bezirke der digitalen Blockkarte Dresden (Stand 7/94),
Städtisches Vermessungsamt

Datenprozessierung:

Entzerrungsgrundlage:	TK50 (N)
Resampling:	Nearest Neighbour,25m
Berechnung des Vegetationsindex:	NDVI=(K4-K3)/(K4+K3)
Kalibrierung auf Versiegelungsgrad:	0 - 100%
Dig. Bildverarbeitung:	M. Netzband J. Gössel G. Meinel
Kartographie:	J. Gössel
Software:	ERDAS-Imagine 8.2 ARC/INFO 7.02 ArcView 2.0
Ausgabegerät:	Tektronix-Phaser 480X

Institut für
ökologische Raumentwicklung e.V.
Dresden 1995

Hrsg.: Prof. Dr. Jürgen Breuste
Projektbereich Urbane Landschaften
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Permoserstr. 15
D-04318 Leipzig
Telefon 0341/235-2843
Telefax 0341/235-2534

Autoren:

Dr.-Ing. Michael Schramm
Ingenieurgemeinschaft Wasser-Abfall-Boden (IWAB)
Marie-Alexandra-Str. 27
D-76135 Karlsruhe
Telefon 0721/32599
Telefax 0721/32502

Dipl. Geogr. Maik Netzband und Dr.-Ing. Gotthard Meinel
Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden
Weberplatz 1
D-01217 Dresden
Telefon 0351/4679-254
Telefax 0351/4679-212

Prof. Dr. Jürgen Breuste, Dipl. Geogr. Birgit Münchow und Dr. Thomas Keidel
Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Projektbereich Urbane Landschaften
Permoserstr. 15
D-04318 Leipzig
Telefon 0341/235-2890
Telefax 0341/235-2534