

## Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM<sub>10</sub>-Belastung

FA 2.271

Forschungsstelle: Bergische Universität Wuppertal, Fachgebiet Sicherheitstechnik / Umweltschutz (Prof. Dr.-Ing. E. Schmidt)

Bearbeiter: Bracke, D. / Reznik, G. / Möllken, H. / Bertelt, W. / Schmidt, E.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: März 2010

### 1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojekts "Einfluss der Straßenrandbegrünung auf die PM<sub>10</sub>-Belastung" war es zu ermitteln, inwieweit Pflanzen am Straßenrand Feinstäube auf ihren Blattoberflächen abscheiden und so einen Beitrag zur Senkung der Feinstaubbelastung leisten können. Zusätzlich sollten die Belastungen der Pflanzen untersucht werden, die sie durch die Feinstäube ausgesetzt werden.

### 2 Untersuchungsmethodik

Um die Untersuchungen zielgerichtet durchführen zu können, wurde zunächst ein geeignetes Modell aufgestellt. In diesem Modell werden vom Verkehr generierte Partikeln unterschiedlicher Größe und Beschaffenheit durch den Wind zu den Pflanzen getragen und dort aufgrund physikalischer Vorgänge, wie zum Beispiel Diffusion oder Impaktion, auf den Blättern der Pflanzen abgeschieden.

Die auf den Blättern abgeschiedenen Partikeln verbleiben dann entweder dauerhaft bis zum Ende der Vegetationsperiode auf den Blättern oder werden zum Teil mit dem Regen abgewaschen oder durch den Wind wieder aufgewirbelt. Auf der anderen Seite stellen die abgeschiedenen Partikeln aber auch eine mögliche Belastung für die Pflanzen selbst dar. Dieser Stress kann dann zu vermindertem Wachstum oder anderen Schäden an den Pflanzen führen.

Um eine Aussage über die Richtigkeit des oben formulierten Modells machen und alle in ihm vorkommenden Fragestellungen beantworten zu können, musste eine Vielzahl unterschiedlicher Untersuchungsmethoden angewendet werden. Dabei wurde versucht, die Zusammenhänge, die zu einer Abscheidung der Partikeln auf den pflanzlichen Oberflächen führen, in verschiedenen Größen-Maßstäben zu erfassen und zu erklären.

Die Abscheidung an einzelnen Blättern und kleinen Pflanzenstrukturen wurde in einer Bestäubungskammer bei sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,01 und 0,03 ms<sup>-1</sup> untersucht. Durch diese Versuche sollten die grundlegenden Mechanismen der Abscheidung von Partikeln an pflanzlichen Oberflächen erkannt und analysiert werden. Die für die Durchführung der Versuche verwendete Bestäubungskammer besteht aus einem Plexiglasrohr zur Aufnahme der Pflanzen, einem Staubdosierer und einem Streulichtspektrometer (PCS 2000, Fa. Palas) für die Erfassung der Staubkonzentration. Die Staubkonzentration der Luft wurde vor und nach der Umströmung der Pflanze bestimmt, um so Aussagen über eine Abscheidung von Partikeln an der Pflanze machen zu können. Für die Versuche wurden die Pflanzenarten Efeu, Fichte, Kirschlorbeer, Purpurbeere, Berg-Johannisbeere, Brennnessel und Rote Heckenkirsche ausgewählt. Zusätzlich wurde in weiteren Versuchen die Abwaschung bereits abgeschiedener Partikeln von den Blattoberflächen untersucht. Dazu wurden Pflanzen, die

zuvor in der Bestäubungskammer bestäubt wurden, in einer Regenkammer mit Wasser beregnet. Anhand der Partikelauflage auf den Blättern vor und nach der Beregnung sowie der Partikelgrößenverteilung im aufgefangenen Regenwasser konnten Aussagen über das Reinigungsverhalten der Blätter und Pflanzen gemacht werden.

Um das Verhalten größerer Pflanzen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten untersuchen und bewerten zu können, wurde eigens für diese Aufgabe ein Windkanal gebaut. Durch diese Versuche sollten die Abscheidung von Partikeln an Pflanzen bei Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 4 ms<sup>-1</sup> und die Beeinflussung des Strömungsfelds durch die Pflanzen untersucht werden. Es wurden im Rahmen der Versuche im Windkanal drei Pflanzenarten beaufschlagt; es handelte sich hierbei um Efeu, Kirschlorbeer und Fichte. Die Pflanzen wurden jeweils in drei unterschiedlichen Breiten, Höhen und Porositäten in jeweils verschiedenen Geschwindigkeitsstufen vermessen.

Der Windkanal besteht aus einem drei Meter langen Aluminiumrahmen, in den Plexiglasscheiben eingelassen wurden. Die erforderliche Luftströmung wird durch fünf Gebläse erzeugt, die zusammen einen maximalen Volumenstrom von 22 500 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> erzeugen können. Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt mit Hitzkugelanemometern in einem Raster von 10 Zentimetern vor und hinter den Pflanzen. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung der Feinstaubkonzentration mit laseroptischen Feinstaubmessgeräten an neun Messpunkten vor und hinter den Pflanzen.

Um einen möglichen Ersatz von Pflanzen durch abiotische Materialien zu untersuchen, wurden zusätzlich Messreihen an einem Polyester-Filz, einem Kokosfaser-Netz und einem Windschutz-Netz im Windkanal durchgeführt. Wie die Pflanzen wurden die abiotischen Materialien in jeweils drei verschiedenen Breiten, Höhen und Porositäten in jeweils drei Geschwindigkeitsstufen vermessen.

Die Überprüfung des Modells unter realen Bedingungen wurde durch Feldmessungen an den Autobahnen A 1 und A 46 im Raum Wuppertal vorgenommen. Hier wurden Pflanzenstrukturen vermessen, die entlang von Autobahnen vorkommen. Für die Durchführung dieser Versuche wurden mehrere laseroptische Feinstaubmessgeräte (EnvironCheck 107 und DustMonitor 1.108, Fa. Grimm) auf den dem Verkehr zu- und abgewandten Seiten der Hecken aufgestellt. Auf diese Weise sollten die Differenzen der Feinstaubkonzentrationen erfasst werden, die durch die Pflanzen verursacht werden. Da die klimatischen Bedingungen eine große Rolle bei Feldmessungen spielen, wurden zeitgleich die Lufttemperatur, relative Feuchte sowie Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst und aufgezeichnet.

Als Ergänzung zu den Laborversuchen und den Feldmessungen wurden Simulationen mit einem CFD-Programm (numerische Strömungssimulation) durchgeführt. Hier sollte ein mathematisches Modell der Abscheidung von Partikeln sowie der Umströmung von Pflanzen erstellt und mit den Ergebnissen der anderen Versuche verglichen werden. Um dieses Ziel erreichen zu können, wurde zunächst damit begonnen, einzelne, vereinfachte Blätter in Form runder Scheiben mit verschiedenen Durchmessern zu modellieren und für erste Simulationen zu nutzen.

Bei diesen Simulationen wurden die Scheiben in unterschiedlichen Winkeln angeströmt und die Abscheidung von Partikeln unterschiedlicher Größe berechnet. Nach dem Abschluss dieser ersten Phase wurden die Blätter zu Blattkombinationen zusammengefasst. Hier wurde die Abscheidung an Kombina-

tionen von bis zu drei Blättern unterschiedlicher Größe berechnet. Den Abschluss der Simulationen bildete die Berechnung der Abscheidegrade für eine vereinfachte Hecke, deren Blätter aus runden Scheiben bestanden. Diese wurde in den Simulationen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten angeströmt und der Gesamtabscheidegrad für verschiedene Partikelgrößen berechnet.

Der Frage nach einer möglichen Schädigung der Pflanzen durch Feinstaub wurde in einer Reihe von biologischen Untersuchungen nachgegangen. Um diese Fragestellung beantworten zu können, wurden biologische Parameter von Pflanzen an verkehrsnahen Standorten mit denen von Kontrollpflanzen verglichen, die geschützt an der Universität Wuppertal aufgestellt wurden. Bei den Versuchen wurden unter anderem die Aktivitäten der Enzyme Katalase und Malat-Dehydrogenase sowie die Photosynthese-Aktivität der Pflanzen bestimmt. Für die Bestimmung der Enzym-Aktivitäten wurden Blattproben von den Pflanzen entnommen, in flüssigen Stickstoff eingefroren und anschließend mechanisch und chemisch aufgeschlossen. Abschließend erfolgte die photometrische Bestimmung der Enzym-Aktivitäten. Die Bestimmung der Photosynthese-Aktivität erfolgte dagegen auf rein physikalischem Weg über die sogenannte Fluoreszenz. Um diese zu ermitteln, wird ein Blatt einer Pflanze mit einem speziellen Gerät kurzfristig belichtet und die bei der Photosynthese entstehende Fluoreszenzstrahlung bestimmt. Aus dem Maß der Fluoreszenz können dann Rückschlüsse auf die Photosynthese-Aktivität und damit die Gesundheit der Pflanze gezogen werden.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchungen in der Bestäubungskammer zeigten die grundsätzliche Eignung von Pflanzen, Feinstaub auf ihren Blattoberflächen immissionsrelevant abzuscheiden. Diese Fähigkeit zur Abscheidung wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst, darunter Blattgröße, Beschaffenheit der Blattoberfläche, Partikelgröße und Anströmgeschwindigkeit der Luft.

Es konnte gezeigt werden, dass die Abscheideleistung der Pflanzen unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit mit Zunahme der Blattoberfläche wächst, wobei kleinere Einzelblätter eine relativ bessere Abscheidung erreichen als größere. Die Abscheidung in Abhängigkeit von der Partikelgröße ist hingegen noch nicht eindeutig geklärt, hier gibt es zwischen den einzelnen Pflanzenarten große Unterschiede.

Der genaue Einfluss der Blattform konnte aufgrund der geringen Anzahl an Pflanzenarten nicht abschließend geklärt werden. Allerdings zeigen die bereits gewonnenen Erkenntnisse, dass eine einfache Blattform zu einer geringeren Abscheidung führt, als eine stark untergliederte Blattform.

Durch die Abwaschung konnte bei allen Testpflanzen eine deutliche Reduzierung der Belegung der Blattoberflächen mit Feinstaub erreicht werden. Allerdings zeigen sich auch hier wieder starke Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzenarten. Die Abnahme der Feinstaubflächenbelegung war beispielsweise bei der Fichte am geringsten, während bei der Purpurbeere die stärkste Abnahme zu verzeichnen war.

Bei der Untersuchung des aufgefangenen Regenwassers zeigte sich, dass größere Partikeln besser von den Blattoberflächen entfernt werden als kleinere. Bei den untersuchten Brennnesseln und Berg-Johannisbeeren konnte beispielsweise eine Reinigung von über 80 Prozent für Partikeln mit einer Größe von mehr als 15 µm festgestellt werden.

Die Versuche im Windkanal zeigten eine deutliche Beeinflussung des Strömungsfelds durch die Pflanzen und abiotischen Materialien. Hinter den Versuchsobjekten kommt es zur Ausbil-

dung eines Windschattens, also eines Bereichs mit verminderter Strömungsgeschwindigkeit. An den Rändern der Versuchsobjekte zeigte sich hingegen eine teilweise deutliche Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit. Vergleicht man die Geschwindigkeiten der an- und abströmenden Luft, kann man einen deutlichen Einfluss der Geometrie des Versuchsobjekts feststellen. Besonders in der höchsten Geschwindigkeitsstufe mit Anströmgeschwindigkeiten von über 3 ms<sup>-1</sup> zeigte sich teilweise eine starke Zunahme der Umströmung und starke Verlangsamung im Windschatten. Allerdings war dies bei den pflanzlichen Versuchsobjekten teilweise nur sehr schwer zu erkennen, im Gegensatz zu den abiotischen Materialien, wo dieses Verhalten stärker zu Tage trat. Zusätzlich wurden die Messergebnisse durch starke Schwankungen überlagert, welche die Auswertung erschwerten und für die noch eine Erklärung gefunden werden muss.

Bei der Untersuchung der Beeinflussung der Feinstaubkonzentration durch die Versuchsobjekte kann noch keine abschließende Aussage getroffen werden. Beim Vergleich der Feinstaubkonzentrationen vor und hinter den Versuchsobjekten zeigten sich starke Schwankungen in den Messwerten. Diese Schwankungen drückten sich in erster Linie darin aus, dass sich Zunahmen und Verringerungen in den Differenzen der Feinstaubkonzentrationen ohne erkennbaren Grund ergaben. Als mögliche Ursachen für dieses Verhalten konnten schließlich zwei Punkte ermittelt werden. Zum einen kam es im vermessenen Umweltaerosol aufgrund von Veränderungen in der Zusammensetzung zu variierenden Konzentrationen. Als mögliche Quellen sind Fahrzeugverkehr, Bauarbeiten mit Schneide- und Schweißarbeiten sowie die Blüte von Bäumen und der damit verbundenen Freisetzung von Pollen zu nennen. Zum anderen konnte auch festgestellt werden, dass sich hinter den Versuchsobjekten zum Teil starke Verwirbelungen ergeben, welche die festgestellten Feinstaubkonzentrationen massiv beeinflussten, da sich durch die Wirbel eine lokale Konzentrationsüberhöhung ergab. Es kann daher abschließend keine belastbare Aussage über die Wirksamkeit einzelner Pflanzenarten oder abiotischer Materialien bezüglich ihrer Abscheideleistung für Feinstaub gemacht werden.

Bei den durchgeführten Feldmessungen zeigte sich teilweise eine deutliche Erniedrigung der Feinstaubkonzentration auf der dem Verkehr abgewandten Seite der Hecken. Allerdings waren auch Erhöhungen der Konzentration zu verzeichnen. Ursachen für diese widersprüchlichen Ergebnisse sind in erster Linie in den klimatischen Bedingungen an der Autobahn zu sehen, da insbesondere die Windverhältnisse ständigen Änderungen unterworfen sind. Es zeigte sich, dass der Wind überwiegend parallel zu den Hecken strömte. Auf diese Weise wurde sowohl ein Transport der Partikeln von den Messgeräten weg als auch von entfernten Quellen zu den Messgeräten hin durchgeführt, was zu einer schwer kontrollierbaren Beeinflussung der Messwerte führte. Hinzu kamen Abweichungen in den Messwerten zwischen den einzelnen Messgeräten, die aber durch Nullmessungen und die Verwendung von Korrekturfaktoren ausgeglichen werden konnten.

Hinter den Hecken zeigte sich die Ausbildung eines Konzentrationsprofils. Bei einem stabilen Profil war eine nahezu konstante Feinstaubkonzentration in verschiedenen Entfernungen und Höhen über einen längeren Zeitraum zu verzeichnen. Demgegenüber waren an einigen Messtagen starke Schwankungen im Profil zu verzeichnen; eine Ausbildung von Bereichen konstanter Konzentration konnte dann nicht beobachtet werden. Von diesen Schwankungen war besonders die grobe Fraktion PM<sub>10</sub> betroffen; die gleichzeitig vermessenen Fraktionen PM<sub>1</sub> und PM<sub>2,5</sub> zeigten dagegen nur geringe Schwankungen. Anhand der parallel aufgezeichneten klimatischen Parameter konnte noch keine Erklärung für die Ausbildung eines stabilen Profils oder

für die zeitweise auftretenden Schwankungen gefunden werden.

Die durchgeführten Simulationen mit dem CFD-Programm brachten eine Reihe von ergänzenden Ergebnissen. Zur Vereinfachung wurden anstelle realer Blattgeometrien runde Scheiben unterschiedlicher Durchmesser modelliert. Die berechneten Abscheidegrade von Partikeln auf diesen Scheiben steigen mit zunehmender Partikelgröße an, wobei Partikeln kleiner als 10 µm im untersuchten Parameterumfeld praktisch kaum abgeschieden werden. Oberhalb dieser Grenze zeigt sich jedoch mit wachsender Partikelgröße eine starke Zunahme der Abscheidung. Darüber hinaus werden bei gleichen Bedingungen relativ mehr Partikeln auf Scheiben mit kleineren Durchmessern abgeschieden als auf größeren Scheiben. Dieses Ergebnis wird auch bei der Simulation von Kombinationen mehrerer Blattmodelle gleicher oder unterschiedlicher Größe erzielt. Auch hier zeigen die kleineren Scheiben bei allen untersuchten Anströmgeschwindigkeiten ein deutlich besseres Abscheideverhalten; auch hier stiegen die Abscheidegrade mit zunehmender Partikelgröße an. Als besonders wirksam hat sich eine Kombination herausgestellt, die aus drei Scheiben mit einem Durchmesser von jeweils 20, 30 und 40 Millimetern bestand.

Den Abschluss der durchgeführten Simulationen bildete die Berechnung der Abscheidegrade einer gesamten Heckenanordnung. Als Ergebnis dieser Berechnungen kann festgehalten werden, dass auch bei diesen Berechnungen nur bei Partikeln mit einer Größe von mehr als 10 µm eine deutliche Abscheidung auftritt. Unterhalb dieser Größe kann im Bereich der untersuchten Parameter der Hecke und Anströmung nur eine verschwindend geringe Abscheidung festgestellt werden. Insofern bestätigen die Ergebnisse dieser Berechnungen die Resultate der simulierten Einzelblätter. Bei den durchgeführten pflanzenphysiologischen Untersuchungen zeigte sich eine teilweise deutliche Belastung der Pflanzen durch die Emissionen des Straßenverkehrs. Es wurde darüber hinaus aber auch festgestellt, dass die Aktivität des Enzyms Malat-Dehydrogenase nicht als Parameter für die Belastung der Pflanzen genutzt werden kann, da die gemessenen Unterschiede zwischen Proben- und Kontrollpflanzen zu gering waren, um eine belastbare Aussage machen zu können.

Dahingegen zeigte sich, dass die Parameter Katalase-Aktivität und Gluthation-Gehalt deutlich besser geeignet sind, die Belastung der Pflanzen zu beurteilen. Bei der Katalase zeigte sich eine deutlich höhere Aktivität in den Probenpflanzen als in der Kontrollgruppe, was auf eine Belastung der Pflanzen durch äußere Einwirkungen schließen lässt. Ebenso ist der Gluthation-Gehalt der Pflanzen entlang der Autobahnen im Vergleich zu den Kontrollpflanzen erhöht, was ebenfalls als Indiz für eine verstärkte Belastung gewertet werden kann. Die Parameter Photosynthese-Aktivität und Chlorophyllgehalt zeigen auffallende Unterschiede zwischen den einzelnen Pflanzen; eine genauere Aussage ist aber aufgrund der geringen Messhäufigkeit und der natürlichen Schwankungen der Parameter zurzeit noch nicht möglich.

Die pflanzenphysiologischen Untersuchungen haben insgesamt gezeigt, dass Pflanzen an verkehrsreichen Standorten starken Belastungen ausgesetzt sind. Allerdings lassen sich anhand der Untersuchungen nur Aussagen über die Gesamtbelastung machen; Rückschlüsse über die Belastungen allein durch Feinstaub sind dagegen nicht möglich.

#### 4 Folgerungen für die Praxis

Aus den bisher gewonnenen Ergebnissen lassen sich nur wenige konkrete Folgerungen für die Praxis ableiten. Im Rahmen der Feldmessungen konnte weder ein eindeutig positiver noch negativer Einfluss der Bepflanzung auf die Feinstaubkonzentration nachgewiesen werden. Da jedoch die Laborversuche gezeigt haben, dass Pflanzen grundsätzlich in der Lage sind, Feinstaub in immissionsrelevantem Maße auf ihren Blättern abzuscheiden, stehen einem Einsatz von Pflanzen entlang von Fernstraßen zur Verminderung der Feinstaubbelastung keine grundlegenden Bedenken entgegen. Jedoch sollten bei der Planung von Pflanzungen zwei Punkte besonders in Betracht gezogen werden. Der erste Punkt betrifft die Ausrichtung der Pflanzung entlang der Autobahn. Die Pflanzungen sollten in einem möglichst großen Winkel zur vorherrschenden Windrichtung an der Fahrbahn liegen. Erfolgt die Anpflanzung in einem flachen Winkel oder parallel hierzu, strömt der Wind mit den Partikeln an den Pflanzen vorbei und es kann keine Abscheidung stattfinden. Dabei muss auch beachtet werden, dass durch den Fahrzeugverkehr eine starke Beeinflussung des Windfelds stattfindet. Dies sollte im Rahmen vorbereitender Messungen untersucht werden. Zusätzlich sollten Pflanzenarten ausgewählt werden, die den Belastungen des Standorts Autobahn widerstehen können. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte die Eignung entsprechender biologischer Parameter bestätigt werden. Diese Parameter können bei der Begutachtung bestehender Pflanzungen und bei der Einführung neuer Pflanzenarten als Straßenrandbegrünung herangezogen werden.

Nach der Durchführung dieses Projekts erscheint es als nicht sinnvoll, eine Straßenrandbegrünung nur unter dem Gesichtspunkt der Verminderung der Feinstaubkonzentration anzulegen. Vielmehr sollten zusätzliche Effekte wie Lärminderung oder gestalterische Aspekte berücksichtigt werden.

Einen möglichen Ansatz bieten hingegen abiotische Materialien als Alternative zu den Pflanzen. In den Windkanalversuchen konnte bereits im Ansatz die Wirksamkeit der untersuchten Alternativen gezeigt werden. Diese bieten sich vorzugsweise dort an, wo für eine funktionierende und langlebige Straßenrandbegrünung zu wenig Platz vorhanden ist, wie beispielsweise entlang von Stadtautobahnen. Das abiotische Material kann beispielsweise an bereits vorhandenen Lärmschutzwänden angebracht werden. Ebenso ist eine frei stehende Aufhängung zwischen Masten oder Traversen denkbar. Hier besteht allerdings noch ein erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich des Langzeitverhaltens des Materials unter realen Bedingungen.