

# **ROdEM: Modellierung einer optimalen Raumnutzungsverteilung zur Minimierung von Kfz-Emissionen**

*Georg Kribernegg, Stefan Hausberger, Martin Rexeis, Christian Schiller*

(DI Dr. Georg Kribernegg, IKK Kaufamm-Kribernegg ZT-GmbH, Mariatrosterstraße 158, 8010 Graz, g.kribernegg@ikk.at)  
(Ao.Univ.-Prof. DI Dr. Stefan Hausberger, TU Graz, Inffeldgasse 21/A, 8010 Graz, hausberger@vkmb.tugraz.at)  
(DI Dr. Martin Rexeis, TU Graz, Inffeldgasse 21/A, 8010 Graz, rexeis@vkmb.tugraz.at)  
(PD Dr.-Ing. habil. Christian Schiller, TU Dresden, Hettnerstraße 3, POT 157, D-1062 Dresden, christian.schiller@theoretische-verkehrsplanung.de)

## **1 ABSTRACT**

ROdEM stellt ein Simulationsmodell zur Optimierung der Raumnutzungsverteilung bei minimalen Kfz-Emissionen dar. Das Modell umfasst die Raumstrukturgegebenheiten eines Gebietes, die gesamte Verkehrsnachfrage- und Angebotsmodellierung im Personen- und Güterverkehr, die Emissions- und Immissionsberechnung und einen übergeordneten Optimierungsalgorithmus. Damit steht ein flexibles Werkzeug für eine integrierte Raum- und Verkehrsplanung inklusive Wirkungsermittlung zur Verfügung, bei dem die Reduktion von Energieverbrauch (klimarelevant) und Schadstoffbelastungen (lokale Luftgüte) oberste Priorität hat.

## **2 ALLGEMEINES**

### **2.1 Hintergründe**

Die Raum- und Verkehrsplanung ist ein wesentliches Instrument um die Verkehrsnachfrage und damit auch Energieverbrauch, Treibhausgas-, Schadstoff- und Lärmemissionen langfristig zu beeinflussen. Dem entsprechend ist in Österreich eine optimierte Raumplanung in nahezu allen umweltpolitischen Programmen der Bundesregierung als Maßnahme niedergeschrieben und teilweise auch in der Gesetzgebung zu finden (zB ROG 1974). Die Bedürfnisse an die Infrastruktur sind allerdings sehr komplex, was sich auch in den unterschiedlichen, teilweise gegenläufigen Zielen für die Raumplanung widerspiegelt. Zu den Zielen gehört beispielsweise bestmögliche Erreichbarkeit und Gewährleistung einer hohen Mobilität für alle Menschen, minimale Verkehrserzeugung mit minimalen Schadstoff- und Treibhausgasemissionen, Verlagerung unvermeidbarer Schadstoff- und Lärmemissionen in unkritische Gebiete und das bei möglichst geringen Infrastrukturkosten.

Eine wesentliche Verbesserung auf dem Weg zu einer nachhaltigen Raumentwicklung wäre die frühe und intensive Auseinandersetzung mit den Wirkungen der geplanten Raumnutzungen sowie die Analyse der Wechselwirkungen zwischen Raum-, Verkehrs- und Umweltplanung. Dabei sollte das Ziel eine voll integrierte Raum- und Verkehrsplanung sein, bei der die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen räumlicher Nutzungsverteilung und vorhandenem Verkehrsangebot als ein komplexes System begriffen werden. Dafür fehlt ein praxisnahes Planungstool, das die Zusammenhänge von Raumnutzungsänderungen, Verkehrsentwicklung und damit zusammenhängenden Umweltauswirkungen als sich gegenseitig beeinflussende Variablen begreift und diese vor allem im erforderlichen Planungsmaßstab der örtlichen Raumplanung zu modellieren im Stande ist.

### **2.2 Ziele für ROdEM**

Mit ROdEM soll ein Planungstool zur Optimierung der Raumnutzung für minimale Verkehrsemissionen geschaffen werden, das in der Optimierung bestimmte Randbedingungen und Einschränkungen aus Sicht der bestehenden Raumnutzung und auch der Schadstoffimmissionen berücksichtigt. Das angestrebte Modell für emissionsseitige Optimierungsprozesse in der Raumplanung soll auf bestehende Modelle aus mehreren Fachbereichen aufbauen, diese kompatibel entwickeln und sie dann mit einer Optimierungsroutine und Benutzeroberfläche ergänzen.

Darüber hinaus werden mit ROdEM vor allem folgende wissenschaftliche Ziele verfolgt:

- Gestaltung einer langfristig tragfähigen Raumnutzungs- und Verkehrsentwicklung mit Fokus auf die Minimierung von negativen Umweltwirkungen des Kfz-Verkehrs.
- Erfassen des Problembereiches der suboptimalen Raumnutzungsverteilung und des damit verbundenen Verkehrs sowie die Möglichkeiten darauf einzuwirken.

- Bereitstellung eines neuartigen Planungswerkzeuges mit dem Potenzial, eine wesentliche Verbesserung in der Planung und Beratung im Bereich der Raum-, Verkehrs- und Umweltplanung zu bewirken.
- Beeinflussung der örtlichen Raumplanung als wesentliche Entscheidungsebene, wobei der Ansatz grundsätzlich auf allen Entscheidungsebenen, namentlich auch auf Landes- oder Bundesebene, anwendbar sein soll.
- Berücksichtigung aller Verkehrsteilnehmer (MIV, ÖV, Rad, Fuß) im Modellzyklus und Darstellung des tatsächlichen Potenzials von Veränderungen in der Raumnutzungsverteilung in Hinblick auf eine Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel durch intelligente Raumplanung.
- Integration der Wirkungsmodellierung von Kfz-Schadstoffemissionen in einen durchgängigen Modellzyklus zur Abbildung und zum besseren Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Raumnutzungsverteilung, Verkehrsnachfrage, Verkehrsangebot und damit verbundenen Umweltwirkungen für die österreichische Fahrzeugflotte.
- Verwendung von Raumstrukturgrößen wie beispielsweise Anzahl von Einwohnern und Arbeitsplätzen als endogene Variable im Modell, womit eine Entwicklung der Raumnutzungsverteilung modelliert werden kann.
- Kombination verschiedener Zielgrößen zur Optimierung der Raumnutzungsverteilung: Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, für ganz bestimmte Flächenwidmungen (zB Einkaufszentren) als Verkehrserreger eines typischen Verkehrsbildes (Wegzweck Einkaufsverkehr, Pkw-Fahrzeugmix, typische zeitliche Verteilung) konkrete Aussagen beispielsweise über die Ideallage von Neuentwicklungen zu treffen.
- Prüfung der zeitlich differenzierten Modellierung der Verkehrsnachfrage in Form von Stundenzeitscheiben zur besseren Berücksichtigung von Stauerscheinungen. Dabei sollen die Möglichkeiten und das Potenzial in Hinblick auf die Emissions- und Immissionsberechnung ausgelotet werden.
- Optimierung der räumlichen Auflösung des Kaltstartmodells in dem Netzwerk-Emissionsmodell NEMO für eine realistische Ermittlung der Emissionsänderungen auf kleinräumigen Straßensegmenten. Bestimmung der typischen Kat- und Kühlwasser-Temperaturverteilungen der Kfz-Flotte für die unterschiedlichen Raumnutzungsarten aus der Verteilung der Parkzeiten und der Weglängenverteilung als Funktion der Umgebungstemperatur.
- Mit Hilfe der Modellierung in ROdEM soll die Möglichkeit geschaffen werden, ortsbezogen konkret die Überschreitungsbereiche beispielsweise in einem Luftgütesanierungsgebiet gemäß Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) auszuweisen und somit die zulässigen Emissions- und Immissionszuwächse zu definieren und im Optimierungsablauf zu berücksichtigen.

### 3 DER MODELLANSATZ

#### 3.1 Grundlage

Ein geeigneter Ansatz für die integrierte Raumnutzungs- und Verkehrsmodellierung auf Ebene der örtlichen Raumplanung wurde von Schiller (2007) an der TU Dresden entwickelt. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen quantitativer Raumnutzung, deren Lagegunst sowie Verkehrsnachfrage und Angebot modelliert. Schiller lässt eine die normative Raumplanung unterstützende Modelltheorie entstehen, in der vorhandene Freiheitsgrade (Grenzen und Freiräume) der Raumnutzung verwendet werden, um mögliche Strukturgrößen (Einwohner, Arbeitsplätze, Verkaufsflächen) innerhalb dieser Freiheitsgrade aus verkehrsplanerischer Sicht zu optimieren.

Für ROdEM lag die wissenschaftliche Herausforderung in der Erweiterung des Ansatzes von Schiller (2007) zur Integration der Emissionsmodellierung mit verschiedenen Zielgrößen wie Treibhausgasemissionen, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, PM, HC und CO oder auch gewichtete Kombinationen dieser Komponenten. Als nicht variable Randbedingungen können darüber hinaus in jeder Raumeinheit des Modells maximale Emissionszunahmen definiert werden, die aus der Randbedingung der lokalen Einhaltung der Luftgütegrenzwerte sowie der Existenz von Luftgütesanierungsgebieten abgeleitet werden.

### 3.2 Modellprinzip

Die nachfolgende Grafik zeigt das Modellprinzip mit den Teilmodellen, deren Verknüpfung sowie die wesentlichen Modellinputs und Outputs in stark vereinfachter Form.

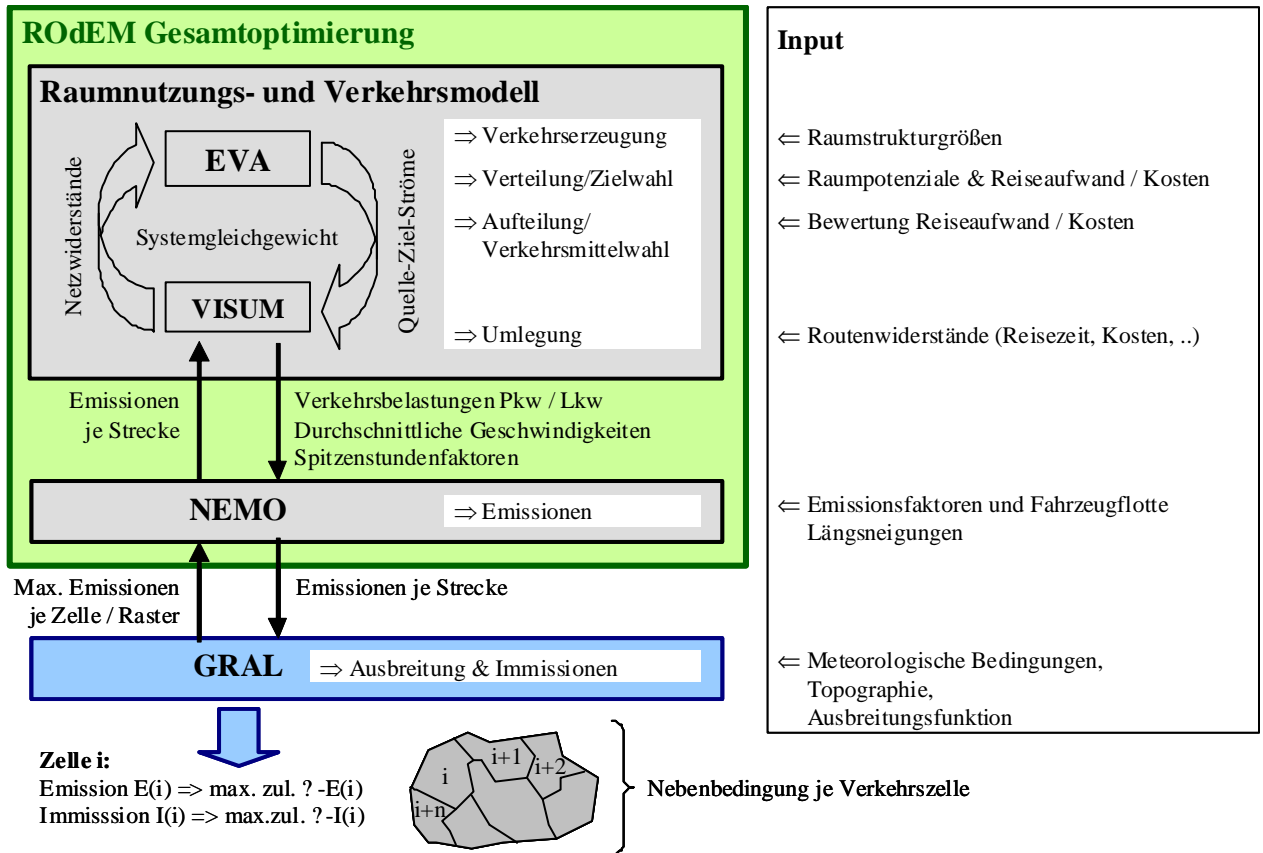


Fig. 1: Modellprinzip ROdEM

Kern von ROdEM ist ein makroskopisches Verkehrsnachfrage- und Angebotsmodell bei dem die Raumstruktur mittels einzelner Flächeneinheiten als Ausgangs- und Zielort von Verkehrsströmen modelliert wird. Dabei bildet das simultane Verkehrsnachfragemodell EVA (entwickelt an der TU Dresden, <http://www.theoretische-verkehrsplanung.de>) die Schritte Verkehrserzeugung, Verteilung/Zielwahl und Aufteilung/Verkehrsmittelwahl ab. In Kombination mit dem Routenwahl- und Umlegungsmodell VISUM (entwickelt von der PTV AG, Karlsruhe, <http://www.ptv.de/>) steht ein durchgängig konsistenter Modellansatz zur Ermittlung von Netzbelastungen für alle gängigen Landverkehrsmittel zur Verfügung. Wesentlich bei der Modellierung ist, dass durch den iterativen Vorgang von der Verkehrserzeugung über die Verteilung, Aufteilung sowie Routenwahl und Umlegungen ein Systemgleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und Nachfrage ermittelt wird. In ROdEM werden über den Ansatz von Schiller (2007) die Raumstrukturgrößen (zB Einwohner, Arbeitsplätze, Verkaufsflächen) nicht mehr als fix vorgegebene Größen sondern als endogene, innerhalb festgelegter Grenzen variable Einflussgrößen modelliert. Für die Verteilung dieser Raumstrukturgrößen im Untersuchungsgebiet werden in ROdEM als Zielfunktion die Minimierung von Emissionen wie beispielsweise CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, PM, HC und CO oder auch gewichtete Kombinationen dieser Komponenten herangezogen. Zur Modellierung der Emissionen dient das Netzwerkemissionsmodell NEMO (Network Emission Model, Rexeis 2007), wobei in ROdEM einerseits eine voll durchgängige Modellkoppelung zwischen Verkehrsmodell und Emissionemodell entwickelt wird. Andererseits erfolgt die Integration der Modellergebnisse aus NEMO, namentlich die streckenbezogenen Schadstoffemissionen, in den Optimierungsalgorithmus des Gesamtmodells.

Eine weitere wesentliche Neuerung von ROdEM ist die Berücksichtigung von Immissionen im Untersuchungsgebiet als Nebenbedingung der Systemoptimierung. Dabei wird zunächst einmal zur Ermittlung der Immissionen für den Initialisierungszustand auf Basis der vorhandenen Verkehrsbelastungen und der daraus ableitbaren Emissionen das Ausbreitungsmodell GRAL verwendet (Öttl et. al. 2001). Über die vorherrschenden Ausbreitungsbedingungen und einer Verknüpfung zwischen Netzabschnitten (Strecken

mit Verkehrsbelastungen) und betroffenen Immissionsrastern (Flächen mit schädlichen Emissionen) können über die Festlegung von Grenzwerten maximal zulässige Emissionsmengen definiert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch die iterative Optimierung in Richtung minimaler Emissionen im Untersuchungsgebiet, wobei in jeder Iterationsschleife jene Zellen mit lokalen Grenzwertüberschreitungen ausgewiesen werden. Für die Gesamtoptimierung wird dann jener Zustand gesucht, der bei Einhaltung aller Nebenbedingungen (Immissionsgrenzwerte je Verkehrszelle) möglichst nahe am Systemoptimum (zB minimale CO<sub>2</sub>-Emissionen im Untersuchungsgebiet) liegt.

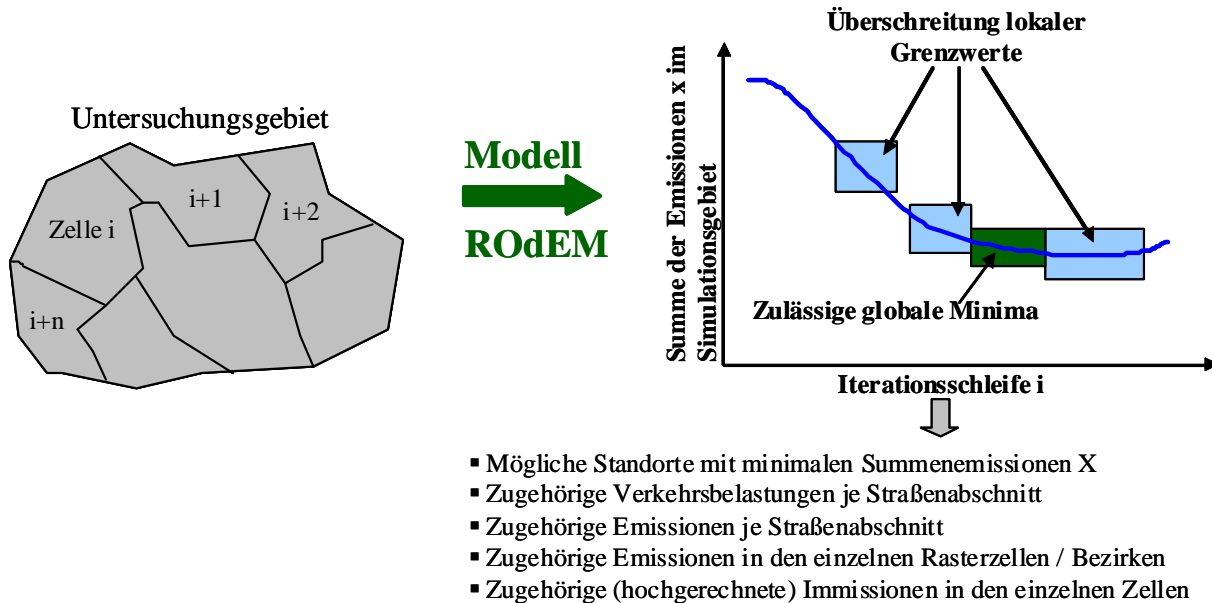


Fig. 2: Prinzip der Optimierung mit ROdEM bei Einhaltung der Nebenbedingungen lokaler Immissionsgrenzwerte

Damit ist es möglich, die Auswirkungen der globalen Optimierung im Untersuchungsgebiet möglichen lokalen Grenzwertüberschreitungen gegenüber zu stellen. Mit der freien Wählbarkeit der Grenzwerte sowie der Zielgrößen für die Optimierung ist eine hohe Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Anwendungsfälle für ROdEM gegeben.

#### 4 DEMONSTRATIONSBEISPIEL UND ZWISCHENERGEBNISSE

Neben den theoretischen Entwicklungen für ROdEM wurde ein Demonstrationsbeispiel zu Testzwecken aufgebaut. Ziel ist es, in einem überschaubaren und gut abgegrenzten Untersuchungsgebiet über umfangreichen Testrechnungen das Potenzial der Modellierung auszuloten und gleichzeitig mögliche Fehlerquellen zu minimieren. Auf Grund der vorhandenen Datengrundlagen bezüglich der tatsächlichen Verkehrsverhältnisse und in Bezug auf ein vorhandenes Ausbreitungsmodell der TU Graz wurde der Bezirk Hartberg in der Steiermark für das Demonstrationsbeispiel ausgewählt. Nachfolgende Abbildung zeigt die räumliche Unterteilung des Untersuchungsgebiets in Verkehrszellen und die der Modellierung zu Grunde liegenden Flächenwidmungen (Basisflächen der Raumnutzung).

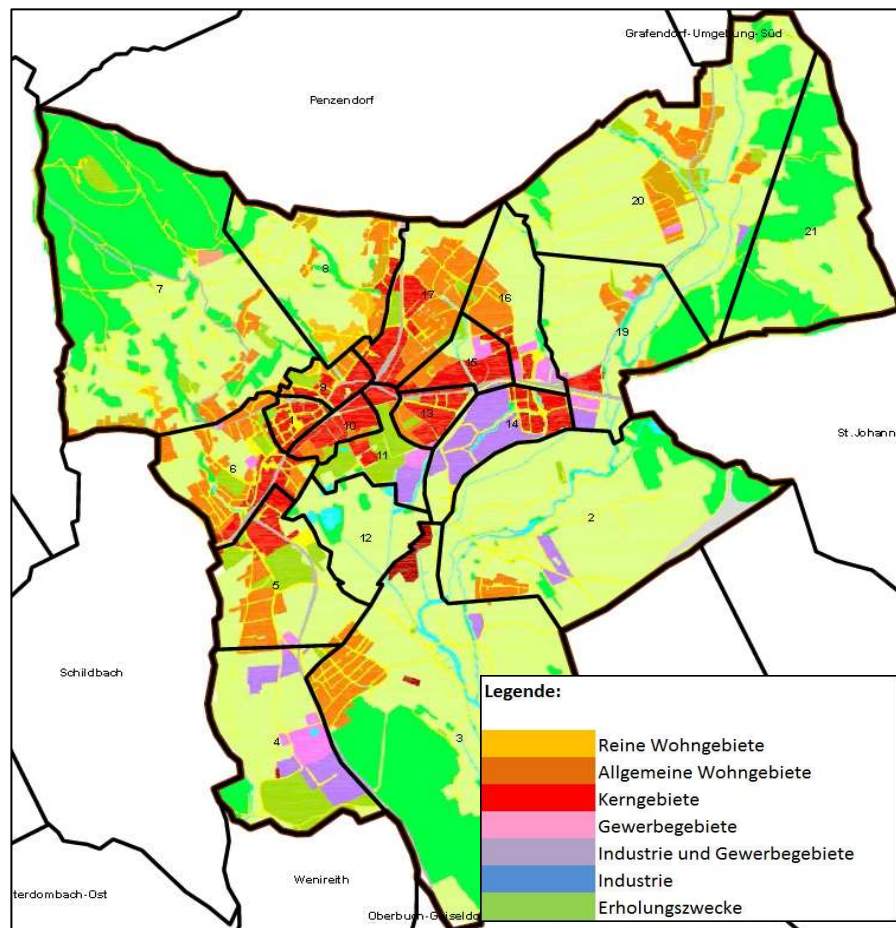


Fig. 3: Flächenwidmung und Verkehrszellen des Demonstrationsbeispielles Hartberg

Das Gesamtmodell RODeM befindet sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt gerade in der ersten Testphase, wodurch an dieser Stelle keine weiteren Erläuterungen und Ergebnisse zur Modellierung präsentiert werden können. Allerdings kann kurz auf ein Zwischenergebnis der Testrechnungen mit NEMO bezüglich einer besseren Abbildung von Stauerscheinungen im Tagesverlauf eingegangen werden. Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass bei einer Modellierung von Stundenzeitscheiben mit Stundenverkehrsstärken gegenüber der gängigen Modellierung mit Tagesverkehrsstärken eine erheblich schärfere Abbildung von staubedingten erhöhten Emissionen möglich ist. Mit den Ergebnissen aus einer umfangreichen statistischen Analyse von Verkehrsdaten auf bestimmten Straßentypen (Neuhold, 2010) erfolgte die Auflösung der im Verkehrsmodell abgebildeten Tagesverkehrsstärken und entsprechenden mittleren Geschwindigkeiten auf 24 Stundenwerte. Über Testfahrten im Untersuchungsgebiet konnten außerdem die ermittelten Modell-Geschwindigkeiten verifiziert werden. Dann erfolgten Vergleichsrechnungen mit NEMO. Die nachfolgende Tabelle zeigt die relativen Differenzen zwischen den beiden Berechnungsvorgängen für einen stark befahrenen Streckenabschnitt in Hartberg im Istzustand.

CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	HC	CO	Partikel (motorisch)
+2%	+4%	+14%	+12%	+2%

Tabelle 1: Differenzen der Berechnungsergebnisse für einen stark befahrenen Streckenabschnitt mit NEMO für Stunden- versus Tageswerte

Im Vergleich zur Emissionsmodellierung mit Verkehrsbelastungen auf Tagesbasis zeigen sich bei der stundenfeinen Modellierung um rd. 2-4% höhere Emissionen für die Emissionskomponenten NO<sub>x</sub>, motorische Partikel sowie CO<sub>2</sub>. Die immissionsseitig als weniger kritisch einzustufenden HC und CO-Emissionen werden auf dem stark befahrenen Streckenabschnitt anhand von Tagesdurchschnittswerten um 10-15% unterschätzt. Bezogen auf die Gesamtsumme der Emissionen eines Tages im Untersuchungsgebiet liegt dieser Fehler jedoch für alle Emissionskomponenten deutlich unter 2%. Dieses Ergebnis bestätigt grundsätzlich die im Voraus angenommene Hypothese der Unterschätzung von Emissionen bei

Berechnungen auf Tagesbasis. Für den erheblichen Mehraufwand bei der Modellierung und vor allem in Hinblick auf die Unsicherheiten durch die vielen Annahmen und Vereinfachungen über den gesamten Modellierungszyklus hinweg erscheinen die Differenzen jedoch relativ gering zu sein. Es liegt daher nahe, für zukünftige Modellierungen weiterhin Tageswerte zu verwenden.

## 5 CONCLUSIO UND AUSBLICK

Obwohl die Modellentwicklung gegenwärtig noch nicht abgeschlossen ist, stimmen die ersten Testläufe optimistisch, dass die gesetzten Ziele erreicht werden können. Mit ROdEM wird erstmals ein Planungswerkzeug für eine integrierte Raum-, Verkehrs- und Umweltplanung bis zur Entscheidungsebene der örtlichen Raumplanung zur Verfügung stehen. Nachfolgend seien beispielhaft mögliche Anwendungen bzw. Anwendungspotenziale für ROdEM skizziert:

- Unterstützung einer umweltschonenden, intelligenten Raumplanung durch die Möglichkeit, raumstrukturelle Entwicklungen bis hin zu einzelnen Standortentscheidungen durchgängig zu modellieren und umweltrelevant zu bewerten.
- Umfassende Analyse verschiedener geplanter Raumnutzungskonzepte (Flächenwidmungspläne, Raumordnungskonzepte, usw.) sowohl auf der Ebene der örtlichen Raumplanung als auch auf Landes- oder Bundesebene.
- Durchgängige Wirkungsmodellierung von Maßnahmen, die sowohl direkt als auch indirekt die Flächennutzungen beeinflussen. Beispielsweise könnte die raumstrukturelle Entwicklung durch eine neue ÖV-Linie gegenüber einer Straßenverkehrslösung modelliert und die umweltrelevanten Wirkungen in einem direkten Vergleich aufgezeigt werden. Ein anderes Beispiel wäre die Modellierung möglicher Raumstruktureffekte durch die Einführung von Umweltzonen (dafür müsste zusätzlich auf der Verkehrsnachfrageseite eine Segmentierung der Kfz-Flotte nach Umweltklassen erfolgen).
- Evaluierung von Flächenwidmungsmaßnahmen für Sanierungsgebiete gemäß Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L, BGBl. I Nr. 115/1997).

Abschließend bleibt festzuhalten, dass mit einer möglichen Anwendung des Modellierungsansatzes auf ein größeres Untersuchungsgebiet als im Demonstrationsbeispiel auch die Gestaltungs- und Optimierungsmöglichkeiten zunehmen würden. Dann erst könnte das ganze Potenzial eines integrierten Raum-, Verkehrs- und Umweltplanungswerkzeuges mit dem Ziel der umweltschonenden raumstrukturellen Entwicklung sichtbar gemacht werden.

## 6 REFERENCES

- NEUHOLD R.: Typisierung von Verkehrsbelastungsganglinien im österreichischen Straßennetz. Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, März 2010.
- ÖTTL D., ALMBAUER R. A., STURM P. J. : A new method to estimate diffusion in low wind, stable conditions. *Journal of Applied Meteorology*, 40, p 259-268, 2001.
- REXEIS M., HAUSBERGER S., ZALLINGER M., KURZ C.: PHEM and NEMO: Tools for micro- and meso-scale emission modelling; 6th International Conference on Urban Air Quality; Cyprus, 27-29 March 2007.
- ROG (1974): Gesetz vom 25. Juni 1974 über die Raumordnung im Lande Steiermark (Steiermärkisches Raumordnungsgesetz 1974) Stammfassung: LGBl. Nr. 127/1974.
- SCHILLER Ch.: Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung. Technische Universität Dresden, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Heft 10/2007.