

Anschrift der Verfasser:

Dr. Bertil Mächtle, Nachwuchsgruppenleiter, Geographisches Institut der Universität Heidelberg

Dipl.-Geogr. Kim Frederik Gerst, wiss. Ang., Geographisches Institut der Universität Heidelberg

Prof Dr. Olaf Bubbenzer, Lehrstuhl Physiogeographie, Geographisches Institut der Universität Heidelberg

Prof. Dr. Gerd Wolff, Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz

Klimarelevante Einflüsse urbaner Bodeninanspruchnahmen

Grundlagen

Der Klimawandel ist in den letzten Jahren einer breiten Öffentlichkeit als wohl größte Herausforderung der Menschheit bewusst geworden. Während der vergangenen 10 000 Jahre der Erdgeschichte waren die klimatischen Verhältnisse außergewöhnlich stabil und es stand zu erwarten, dass sich an diesem Zustand auch in den nächsten Jahrtausenden nichts ändert – sofern der Mensch keinen übermäßigen Druck auf die natürlichen Gleichgewichte ausübt (Berger & Loutre 2002).

Tatsächlich ist jedoch genau dies der Fall – insbesondere die Zunahme an Treibhausgasen in der Atmosphäre hat bereits dazu geführt, dass die Grenze der Belastbarkeit des natürlichen holozänen Gleichgewichts des Atmosphärensystems überschritten ist und sich erste spürbare Klima- und Umweltveränderungen einstellen. Andere Systeme, wie das ozeanische, sind auf dem Weg, die Grenzen der Belastbarkeit zu überschreiten (s. Rockström et al. 2009a,b zu ausführlichen Erläuterungen).

Besonders problematisch ist hierbei, dass die Reaktion der Systeme auf sich verändernde determinierende Parameter meist nicht gleichmäßig linear abläuft. Für deren Mehrzahl bedeutet die Überschreitung der Belastbarkeitsgrenze, ausgelöst durch Veränderungen verschiedener Schlüsselvariablen, eine abrupte (nicht-lineare) Zustandsänderung der Systeme selbst. Eine Neuordnung des Monsunsystems beispielsweise wird mit verheerenden Wirkungen auf die betroffenen Menschen verbunden sein (Lenton et al. 2008). Ein Verschwinden des antarktischen Eisschildes oder die Zerstörung des tropischen Regenwaldsystems wird komplexe Rückkopplungseffekte erzeugen, die eine Rückkehr zum Ausgangszustand nicht mehr zulässt, also irreversibel ist! Die Abschätzung dieser „tipping points“, an denen bestehende Systeme außer Kontrolle geraten, wird eine der wichtigsten Aufgaben künftiger Forschung sein (Lenton et al. 2008).

Fragestellung und Zielsetzung

Eine der Schlüsselvariablen, die das globale Klima beeinflusst, ist die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Der Strahlungsantrieb der langlebigen anthropogenen Treibhausgase wird zu mehr als 60 % durch die Kohlenstoffdioxid-(CO₂)-Konzentration bestimmt (IPCC 2007a). Da im Zuge von Bodeninanspruchnahmen der Kontakt mit oberirdischen und unterirdischen Kohlenstoffspeichern (Vegetation, C_{org}) meist unvermeidlich ist, soll der Einfluss von Bodeninanspruchnahmen auf die

Kohlenstoffbilanz von Böden und Vegetation und damit letztlich auf den CO₂-Gehalt der Atmosphäre hier näher betrachtet werden. Weitere Folgen solcher Eingriffe wie die Beeinflussung der CH₄- und N₂O-Bilanz sowie die Auswirkungen auf das Feinstaubfilterungspotenzial oder das Stadtklima werden gegenwärtig noch untersucht.

Vereinfacht lassen sich beim Kompartiment Boden zwei klimabeeinflussende Wirkungskreise unterscheiden:

1. Der Boden als Quelle und Senke für CO₂: Eingriffe in Böden haben direkte Auswirkungen auf die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Damit haben die zugehörigen Folgen in der Summe globalen Charakter. Indirekt werden bei lokalen Bodeninanspruchnahmen anderswo Nutzungsänderungen ausgelöst, die die Kapazität des Kohlenstoffspeichers Boden – Vegetation weltweit verändern.

2. Der Boden als Pflanzenstandort und als Sorbent für lufttransportierte Partikel: Mit den Bodeninanspruchnahmen gehen naturnahe und funktionstaugliche Bodenflächen, die als Pflanzenstandorte dienen, samt zugehöriger Vegetation verloren. Dabei kommt es neben CO₂-Freisetzungen aus dem Boden zu zusätzlichen Emissionen durch den Abbau der pflanzlichen Biomasse der Vegetation. Gleichzeitig fällt als indirekte Wirkung der Boden mit zugehöriger Vegetation als Sorbent und Filter für Feststoffe aus der Luft aus. Die Folgen hiervon zeigen sich eher lokal in der Umgebung der Bodeninanspruchnahmen (z.B. Feinstaubproblematik, Veränderungen im Stadtklima – s. hierzu z.B. A.S.P. (2007)).

Die Auswirkungen von Bodeninanspruchnahmen auf die atmosphärische CO₂-Konzentration werden im Folgenden näher erörtert. Die Studie erfolgt im Rahmen des EU-Projekts „URBAN-SMS, WP6: awareness & acceptance“ (INTERREG IV B – CENTRAL) – Priorität 3.1 „Förderung einer guten Umweltqualität durch das Management und den Schutz natürlicher Ressourcen“. Auf Basis des gegenwärtigen Forschungsstandes soll bewertet werden, welchen Einfluss Bodeninanspruchnahmen auf das Klima und den Klimawandel haben, um die Auswirkungen von Bodeninanspruchnahmen bezüglich des Faktors „Klima“ planerisch abschätzen zu können.

Direkte Wirkungen – Böden als Quelle und Senke für Treibhausgase

CO₂ spielt eine wichtige Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf, der durch kontinuierliche Stoffflüsse zwischen den Ozeanen, der terrestrischen Biosphäre und der Atmosphäre geprägt ist (Lal 2008). Im terrestrischen Kreislauf wird CO₂ durch die Photosyntheseaktivitäten der Pflanzen oberirdisch (Vegetation) bzw. unterirdisch in Form von organischen Kohlenstoffverbindungen (C_{org}) festgelegt und durch Abbauprozesse nach einer spezifischen Verweildauer von Monaten bis Jahrhunderten wieder freigesetzt. Der Kohlenstoffpool im Standortsystem „Boden – Vegetation“ befindet sich also in einem dynamischen Gleichgewichtszustand zwischen Kohlenstofffestlegung und -freisetzung, der quantitativ von verschiedenen Faktoren abhängig ist. Ohne im Einzelnen darauf weiter einzugehen kann grundsätzlich festgestellt werden, dass anthropogene Eingriffe in das Standortsystem meist zu einer Veränderung der gleichgewichtigen Kohlenstoffvorräte des Bodens und der Vegetation führen.

Ausgehend von einer für Mitteleuropa potenziell weitgehend geschlossenen Waldbedeckung bedeutet dies, dass durch Änderungen der Bodennutzung wie Rodung, Ackerbau bis hin zur Überbauung von Böden stets Kohlenstoff freigesetzt wird. Diese Prozessabfolge hat einen Abbau der

Biomasse und des organischen Bodenkohlenstoffs zur Folge, der zu einem Anstieg der atmosphärischen CO₂-Gehalte führt.

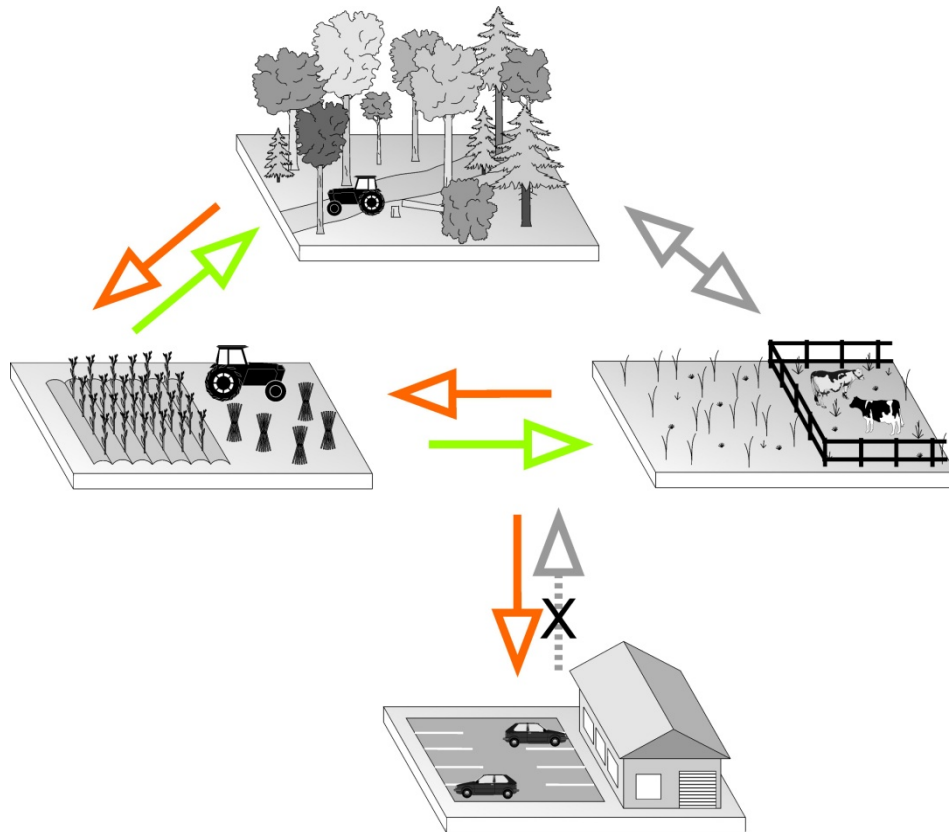
Folgende oft chronologischen Nutzungseinflüsse führen dazu, dass das Standortsystem „Boden – Vegetation“ als CO₂ -Quelle wirkt:

- Rodung
- Landwirtschaftliche Nutzung (Bodenbearbeitung, Biomasseentzug durch die Ernte)
- Gefügestörung durch Abtrag und Aufbringung von Mutterboden im Zuge der Überbauung von Böden.

Umgekehrt lässt sich der Kohlenstoffgehalt des Standortsystems „Boden – Vegetation“ durch geeignete Nutzungsänderungen erhöhen, so dass dieses als CO₂-Senke wirken kann. Beispielsweise kann hier CO₂ aus der Atmosphäre im Zuge einer Aufforstung neuerlich eingespeichert werden. Ähnliches gilt für die Böden. Da viele Böden durch jahrelange menschliche Nutzung (z.B. Pflugbodenbearbeitung) stark an Humus verarmt sind, können diese durch eine entsprechende regenerative Bodenbearbeitung/-nutzung gleichfalls wieder in gewissem Umfang CO₂ binden (Lal 2008).

Generalisiert sind Änderungen der Bodennutzung in ihrer Auswirkung auf die Kohlenstoffbilanz der betroffenen Flächen differenziert zu betrachten (Abb. 1): Eine Nutzungsänderung von Wald zu Grünland beeinflusst die C_{org}-Gehalte nicht signifikant, die Änderung zu Ackerland jedoch eindeutig (Schils et al. 2008, Guo & Gifford 2002). Die klimaspezifischen Wirkungen der Nutzungsänderungen in den Bereichen mit funktionstauglichen Böden sind theoretisch noch reversibel. Im Falle der Bodeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr ist eine klimawirksame Wiederherstellung von Bodenfunktionen (z.B. großflächige Entsiegelung und Bodenrekultivierung) allerdings weder vorstellbar noch ökonomisch zu bewerkstelligen.

Insofern wird deutlich, dass die bauliche Inanspruchnahme der Böden eine extreme Negativwirkung besitzt. Unterstellt man, dass eine flächenhafte Entsiegelung und Rekultivierung nicht realisierbar ist, zählt die Überbauung der Böden als letzter Schritt der Inanspruchnahme, bei dem sowohl das Senkenpotenzial für CO₂ als auch die Funktion als Vitastandort irreversibel und somit endgültig verloren geht.



C_{org} : + Zunahme - Abnahme

→	Wald	Grünland	Ackerland	Versiegelung
Wald			-	-
Grünland			-	-
Ackerland	+	+		-

Grafik: Frederik Gerst, Geographisches Institut der Universität Heidelberg

Abb.1 : Generalisierte Darstellung der Wirkung von Landnutzungsänderungen auf die Kohlenstoffvorräte im Boden. Erläuterungen s. Text.

Quantitative Betrachtung

Um eine Vorstellung von der Größenordnung der Treibhausgasfreisetzung durch Bodeninanspruchnahmen zu erhalten, wurde für eine repräsentative, locker bebaute Testfläche im Stadtteil Stuttgart-Riedenberg die Freisetzung von CO_2 infolge der Bodeninanspruchnahme anhand der C_{org} -Gehalte von Leitprofilen der Stadtbodenkartierung Stuttgart (Holland 1995) abgeschätzt.

Die Testfläche liegt im Bereich der Filderebene im Süden Stuttgarts. Hier dominieren Bodentypen wie Parabraunerden bzw. Pseudogley-Parabraunerden aus Löss. Die Überschlagsrechnungen erfolgten auf Basis dreier vergleichsweise gering anthropogen überprägter Leitprofile unter Eichen-Hainbuchen-Wald bzw. unter Buchen-Eichen-Wald und am Feldrain.

Die ursprünglich gespeicherte Kohlenstoffmenge der Testfläche wurde aus dem Mittel der vorliegenden Bodenparameter der drei Leitprofile nach der Formel von Neufeldt (2005) berechnet, um die einmalige durch die bauliche Bodeninanspruchnahme verursachte CO_2 -Emission zu erfassen.

Das arithmetische Mittel der C_{org} -Gehalte der drei Profile beträgt 48 t/ha in den Oberbodenhorizonten (Ah, Al, Ahl-Btv).

Der durchschnittliche Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsfläche liegt bei 49,5 % (ermittelt aus georeferenzierten hochauflösenden GoogleEarth-Bildern, Gerst 2010). Er liegt etwas über dem für Bayern ermittelten Versiegelungsgrad für den Stadt- und Umlandbereich im Bereich von Siedlungs- und Verkehrsflächen von 47,4 % (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007). Unter Anwendung der IPCC-Richtlinien zur Erstellung der nationalen Treibhausgasinventare unter der UN-Klimarahmenkonvention (IPCC 2006), welche lediglich von einem 20%-igen Abbau des C_{org} (oberste 30 cm) im Zuge von Bodenversiegelung ausgehen (sog. Tier1-Standard), ergibt sich damit eine Emission von 17,4 t CO_2 /ha ($\text{Masse } CO_2 = \text{Masse } C_{org} * 44/12$). Die Bebauung der Testfläche von 8,15 ha hat damit eine Freisetzung von 142 t CO_2 verursacht.

Wendet man diese Werte überschlägig auf die Bodeninanspruchnahmen auf der Gemarkung Stuttgart für die Jahre von 1980–2009 an, die in großem Maße einst landwirtschaftlich genutzte Lößböden betrafen, berechnet sich die zugehörige CO_2 -Emission durch bauliche Bodeninanspruchnahme wie folgt:

Im Betrachtungszeitraum von knapp 30 Jahren nahm auf der Gemarkung Stuttgart die Siedlungs- und Verkehrsfläche um 1604 ha zu, landwirtschaftlich genutzte Bodenflächen in gleicher Größenordnung ab (Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt). Unter Verwendung der o.g. Kohlenstoffvorräte beläuft sich die durch Bauaktivitäten verursachte CO_2 -Freisetzung aus dem Bodenspeicher für den Zeitraum 1980–2009 nach Tier1-Standard ($48 \text{ t } (C_{org})/\text{ha} * 0,2 \text{ (Tier1)} * 0,474 \text{ (Versiegelungsgrad)} * 1604 \text{ ha} * 44/12$) auf insgesamt 26 750 t CO_2 . Dies entspricht einer Freisetzungsrate von ca. 920 t/Jahr. Verglichen mit den technischen CO_2 -Emissionen im Stadtgebiet Stuttgart (Kraftwerke, Industrie, Haushalte und Verkehr) von 3,4 Mio. t CO_2 für das Jahr 2005 (Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt) ist das ein vergleichbar geringer Anteil von 0,027 %.

Die Betrachtung des Gesamtverlustes an gespeichertem organischem Kohlenstoff lässt den Beitrag der CO_2 -Emissionen durch Landnutzungsänderungen von der Rodung über Grünland- und Ackernutzung bis hin zur Überbauung jedoch in einem anderen Licht erscheinen. Ausgehend von einer Siedlungs- und Verkehrsfläche auf der Gemarkung Stuttgart von 10 656,1 ha (Stand 2009, Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt) mit einem Versiegelungsgrad von 47,4 % ergibt sich eine vollständig in Anspruch genommene Fläche von ca. 5050 ha ursprünglich natürlicher Böden. Mangels flächenspezifischer Daten wurde für die Abschätzung des freigesetzten CO_2 von den Kohlenstoffgehalten der o.g. Leitprofile ausgegangen, um die Größenordnung der Emissionen zu berechnen. Die Gesamtfreisetzung des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs in Folge der Inanspruchnahme dieser Bodenflächen beträgt bei Anwendung des Tier1-Standards damit ca. 180 000 t CO_2 .

Neben der Freisetzung von C_{org} aus dem Bodenspeicher muss bei dieser Gesamtbetrachtung auch die ursprünglich natürliche standortstypische Vegetationsdecke mit einbezogen werden. Da für das Stadtgebiet Stuttgarts keine entsprechenden Daten vorlagen, wurden als grobe Näherung Daten zu den einzelnen Kompartimenten von Waldökosystemen aus Thüringen für das Jahr 1990 (Buchenwald) verwendet (Wirth et al 2005, s. Tab. 1).

Tabelle 1: Mittlere Kohlenstoffvorräte in den verschiedenen Kompartimenten eines Buchenwaldes (Wirth et al. 2005).

Kompartiment	C-Vorrat (t/ha)
Dendromasse	131
Bodenvegetation	1,7
Totholz	8,9
Organische Auflage	11,3
Summe	152,9

Es wurde davon ausgegangen, dass bei der Inanspruchnahme eines entsprechenden Waldökosystems für urbane Siedlungszwecke der gesamte Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse vor Ort oder durch Abtransport nach einer gewissen Verzögerungszeit abgebaut und damit in Form von CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt wurde. Damit errechnet sich die aus der oberirdischen Biomasse freigesetzte CO₂-Menge wie folgt: 152,9 t C/ha (Vorrat) * 10656,1 ha * 44/12 = 5,98 Mio. t CO₂.

Zu den zuvor genannten Emissionen aus den heutigen Siedlungs- und Verkehrsbereichen durch die Freisetzung von C_{org} kommen damit noch weitere 5,98 Mio. t CO₂ durch das Entfernen der oberirdischen Biomasse hinzu, also in der Summe etwa 6 Mio. t CO₂ im Vergleich zum ursprünglichen Naturzustand. Da die Bodeninanspruchnahme zu Siedlungs- und Verkehrszwecken mit einer technischen Bodenversiegelung einher geht, ist diese Freisetzung irreversibel.

Dazu kommt in der Bilanz noch die von Wald in Ackerland umgewandelte Gemarkungsfläche von 4782,4 ha, deren CO₂-Emission durch das Entfernen der oberirdischen Biomasse 2,68 Mio. t CO₂ beträgt. Art und Umfang historischer Landnutzungsänderungen sind nicht dokumentiert, so dass die hierdurch bedingten bodenbürtigen CO₂-Emissionen (z.B. bei der Umwandlung von Wald zu Acker) nicht berücksichtigt werden konnten.

Insgesamt ergibt sich durch die seit Jahrhunderten andauernde Inanspruchnahme der Böden auf der heutigen Gemarkungsfläche von Stuttgart infolge der Veränderungen der Böden und deren Funktionen im Laufe der chronologischen Nutzungsabfolge eine CO₂-Emission von überschlägig 8,66 Mio. t CO₂.

Indirekte Wirkungen – „Export“ von Emissionen

Neben der Betrachtung der direkten Folgen von Bodeninanspruchnahmen in Ballungsräumen dürfen die indirekten Folgen nicht übersehen werden. Zu den hierdurch verursachten Emissionen kommen in globalem Rahmen wenig beachtete, aber gleichwohl klimawirksame Emissionen von CO₂ hinzu. Dies geschieht durch die Kompensation von durch Inanspruchnahmen verloren gegangener Bodenflächen für die Nahrungsmittelproduktion. Verluste an landwirtschaftlich nutzbaren Böden führen über kurz oder lang dazu, dass diese durch die Urbarmachung neuer Bodenflächen kompensiert werden müssen, um die Bedürfnisse einer wachsenden Weltbevölkerung zu befriedigen. Dies hat zur Folge, dass sich die Agroindustrie mittlerweile stellenweise bereits für die Böden natürlicher Waldökosysteme wie z.B. des tropischen Regenwaldes interessiert (FAO 2009). Allein der hier in der oberirdischen Biomasse gespeicherte organische Kohlenstoff wird auf 200 t/ha geschätzt (Nascimento & Laurance 2002), der durch die agrarische Bodeninanspruchnahme bald in die Atmosphäre freigesetzt wird. Weitere Negativfolge dieser Entwicklung ist, dass die Produktivität dieser tropischen Urwald-Böden oft um den Faktor 3 bis 4 geringer ist als diejenige unserer Böden in

den gemäßigten Breiten. So lag der Hektarertrag für Weizen 2009 in Deutschland bei 7,8 t/ha, in Brasilien jedoch lediglich bei 2,0 t/ha, in Argentinien bei 1,8 t/ha. Für Mais ist das Verhältnis etwas günstiger (<http://faostat.org>, online-Ressource). Damit lösen urbane Bodeninanspruchnahmen in Deutschland durch die Erst- bzw. Ersatzerschließung von Böden für landwirtschaftliche Zwecke zusätzliche CO₂-Emissionen aus, die in der Größenordnung von (überschlägig) bis zu 3000 t CO₂/ha liegen können.



Abb. 2: Frisch gerodete Fläche in Paraná/Südbrasilien (Aufnahme: A. Egger).

Fazit – leisten Bodeninanspruchnahmen einen Beitrag zum Klimawandel?

Ziel dieser Untersuchung war, den direkten Einfluss von Bodeninanspruchnahmen auf die atmosphärische CO₂-Konzentration grundsätzlich und an einem quantitativen Fallbeispiel zu betrachten. Ergebnis ist, dass urbane Bodeninanspruchnahmen tatsächlich eine unmittelbare Klimawirksamkeit durch die Freisetzung von CO₂ haben. Der quantitative Beitrag hingegen ist, wie das Beispiel jüngerer Bodeninanspruchnahmen in Stuttgart (920 t CO₂/Jahr) zeigt, im Vergleich zu den aktuellen technischen Gesamtemissionen im Stadtgebiet (3 400 000 t CO₂/Jahr) sehr gering. Betrachtet man die menschliche Bodeninanspruchnahme jedoch über längere Zeiträume, so summieren sich über die Jahrhunderte/Jahrtausende die Emissionen aus den Böden bzw. den Veränderungen des Standortsystems „Boden – Vegetation“ zu Größenordnungen auf, die nicht zu vernachlässigen sind.

Die Änderungen der Kohlenstoffgehalte im Standortsystem „Boden – Vegetation“ leisten im Laufe der Nutzung somit doch einen merklichen Beitrag zum Global Warming. Bislang spielen die Klimawirkungen durch Bodeninanspruchnahmen in der kommunalen Wahrnehmung jedoch nur im

Rahmen von stadtklimatischen Betrachtungen eine Rolle. Dass hier auch Zusammenhänge zwischen Bodenverlusten und der Feinstaubbelastung der Luft bestehen, die v.a. in den Ballungsräumen große Probleme bereitet, ist bislang zu wenig bekannt und Gegenstand unserer laufenden Untersuchungen.

Generell ist festzustellen, dass die Folgeerscheinungen von Bodeninanspruchnahmen in unseren Breiten sowohl in der Öffentlichkeit als auch bei den verantwortlichen Entscheidungsträgern bislang noch wenig Beachtung finden. Eine direkte Wahrnehmung maßgeblicher Klimafolgen, die durch das hiesige Handeln ausgelöst werden, ist bei uns auch nur schwer möglich, da die besonders ins Gewicht fallenden Negativbeiträge unserer Bodeninanspruchnahmen anderenorts verursacht werden.

Da Bodeninanspruchnahmen neben lokalen auch globale – gleichmäßige oder wie einleitend erläutert abrupte – Klimafolgen haben, ist es wichtig, dass diese mehr in das Bewusstsein geraten. Nachdem die Planungshoheit in der Bundesrepublik bei den Kommunen liegt, muss die Bedeutung des urbanen Bodenschutzes in der Bauleitplanung neu gewichtet werden. Dabei gilt: lokaler Bodenschutz ist für das Klima in der Nahumgebung vorteilhaft. Gleichfalls von Bedeutung – und im Hinblick auf den Nachhaltigkeitsaspekt heute schon fast unverzichtbar - ist allerdings dessen Positiveffekt auf das Weltklima.

Literatur:

A.S.P. (Verein zur Förderung agrar- und stadtoökologischer Projekte e.V.) (2007): Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotenzial (qualitativ und quantitativ) von Pflanzen.- 173 S.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (2007): Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern.- 16 S.

BERGER, A. & LOUTRE, M.F. (2002): An Exceptionally Long Interglacial Ahead?.- *Nature* 297, 1287-1288.

FAO (2009): State of the World's Forests 2009. Rome, 152 S.

GERST, K.F. (2010): Böden und ihre Funktion als Quelle und Senke für die Treibhausgase Kohlenstoffdioxid und Methan - Bewertung und Bilanzierung am Beispiel von Bodeninanspruchnahmen der Stadt Stuttgart.- Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Heidelberg, Geographisches Institut.

GUO, L.B., GIFFORD, R.M. (2002): Soil Carbon stocks and land use change: a meta analysis.- *Global Change Biology* 8, 345-360.

HOLLAND, K. (1995): Die Böden Stuttgarts: Erläuterung zur Bodenkarte 1:20.000.- Schriftenreihe des Amtes für Umweltschutz / Landeshauptstadt Stuttgart 1995 (3), 240 S.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.- National Greenhouse Gas Inventories Programme [EGGLESTON H.S., BUENDIA L., MIWA K., NGARA T. AND TANABE K. (Hg.)].

IPCC (2007a): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working

Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.- [SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K., TIGNOR M.M.B., MILLER, H.L (Hg.)], 996 S.

IPCC (2007b): Klimaänderung 2007: Synthesebericht.- Deutsche IPCC Koordinierungsstelle (Hg.), 109 S.

LAL, R. (2008): Carbon Sequestration.- *Philosophical Transactions of The Royal Society* **363**, 815-830.

Landeshauptstadt Stuttgart, Statistisches Amt (Zugriff 29.7.2010): Online-Plattform KOMUNIS

Landeshauptstadt Stuttgart, Stadtmessungsamt (Zugriff 29.7.2010): Online-Plattform KOMUNIS

LE MER, J., ROGER, P. (2001): Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review.- *European Journal of Soil Biology* **37**, 25-50.

LENTON, T.M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, J.W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., SCHELLNHUBER, H.J. (2008): Tipping elements in the earth's climate system.- *PNAS* **105** (6), 1786-1793.

NASCIMENTO, H.E.M., LAURANCE, W.F. (2002): Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study.- *Forest Ecology and Management* **168** (1-2), 311-321.

NEUFELDT, H. (2005): Carbon stocks and sequestration potentials of agricultural soils in the federal state of Baden-Württemberg, SW Germany.- *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **168**, 202-211.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, F.S., LAMBIN, E.F., LENTON, T.M., SCHEFFER, S., FOLKE, C., SCHELLNHUBER, H.J., NYKVIST, B., DE WIT, C.A., HUGHES, T., VAN DER LEEUW, S., RODHE, H., SÖRLIN, S., SNYDER, P.K., COSTANZA, R., SVEDIN, U., FALKENMARK, M., KARLBERG, L., CORELL, R.W., FABRY, W.J., HANSEN, J., WALKER, B., LIVERMAN, D., RICHARDSON, K., CRUTZEN, P., FOLEY, J.A. (2009a): A safe operating space for humanity.- *Nature* **461**, 472-474.

ROCKSTRÖM, J., W. STEFFEN, K. NOONE, Å. PERSSON, F.S. CHAPIN, III, E. LAMBIN, T.M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H. SCHELLNHUBER, B. NYKVIST, C.A. DE WIT, T. HUGHES, S. VAN DER LEEUW, H. RODHE, S. SÖRLIN, P.K. SNYDER, R. COSTANZA, U. SVEDIN, M. FALKENMARK, L. KARLBERG, R.W. CORELL, V.J. FABRY, J. HANSEN, B. WALKER, D. LIVERMAN, K. RICHARDSON, P. CRUTZEN, AND J. FOLEY (2009b): Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* **14**(2): 32. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

SCHILS, R., KUIKMAN, P., LISKI, J., VAN OIJEN, M., SMITH, P., WEBB, J., ALM, J., SOMOGYI, Z., VAN DEN AKKER, J., BILLET, M., EMMETT, B., EVANS, C., LINDNER, M., PALOSUO, T., BELLAMY, P., JANDL, R., HIEDERER, R. (2008): Climsoil: Review of existing information on the interrelations between soil and climate change.- European Commission, 208 S.

WIRTH, C., SCHULZE, E.D., SCHWALBE, G., TOMCZYK, S., WEBER, G.E., WELLER, E. (2004): Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens: Abschlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Projektes „Modelluntersuchung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls“.- Mitteilungen der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei **23**, 308 S.