

GAIA

ÖKOLOGISCHE PERSPEKTIVEN FÜR
WISSENSCHAFT UND GESELLSCHAFT
ECOLOGICAL PERSPECTIVES FOR
SCIENCE AND SOCIETY

1 | 2012



Mit freundlicher Unterstützung von



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Raumentwicklung ARE

- **FOCUS:** 20 YEARS AFTER THE EARTH SUMMIT
- EU POLICY AND ENVIRONMENTAL GOVERNANCE
- LAND USE MANAGEMENT



GAIA is available online at www.ingentaconnect.com/content/oekom/gaia
www.oekom.de | B 54649 | ISSN 0940-5550 |
GAIAEA 21/1, 1–80 (2012)



Nachhaltiges Ressourcen- und Stoffstrommanagement

Zwischen Gigatonnen und Mikrogramm

Nachhaltiges Ressourcenmanagement ist ein zentrales Forschungsfeld im NaWis-Verbund: Zwei neue Professuren stellen ihr Programm vor und zeigen Leitbilder einer nachhaltigen Ressourcenpolitik auf.

Stefan Bringezu, Klaus Kümmerer

Sustainable Resource and Material Flow Management. Of Gigatons and Micrograms
GAIA 21/1 (2012): 69–72 | **Keywords:** dematerialisation, detoxification, renewables, socio-industrial metabolism

Wie lassen sich Rohstoffe aus der Landwirtschaft, Wäldern und geologischen Vorkommen möglichst produktiv gewinnen? Wie können schädigende Nebenwirkungen des Abbaus möglichst klein gehalten werden? Dies sind nur einige Fragen, mit denen sich nachhaltiges Ressourcenmanagement befasst. Relevant ist das relativ junge Forschungsfeld allemal, da der Material- und Energieeinsatz in Produktion und Konsum ein Niveau erreicht hat, das eine nachhaltige Versorgung auf globaler Ebene unmöglich macht. Insgesamt wurden 2010 weltweit rund 60 Milliarden Tonnen Rohstoffe abgebaut und geerntet – der Hauptteil davon aus nicht erneuerbaren Quellen.¹ Setzt sich der steigende Rohstoffbedarf fort, werden im Jahr 2030 100 Milliarden Tonnen fossiler Energieträger, Erze, Mineralien und Biomasse benötigt (Giljum et al. 2009). Hinzu kommen die zwei- bis dreifache Menge an nicht genutzten Ressourcen (etwa Bergbauabfälle), Bodenverluste durch Erosion bewirtschafteter Flächen sowie Infrastrukturmaßnahmen und andere Eingriffe, die zu einem wachsenden Ausmaß tiefgreifender Landschaftsveränderungen führen (Bringezu und Bleischwitz 2009).

Zusätzlich gilt es nicht nur die Produktion ins Visier zu nehmen, sondern auch den Verbleib der Produkte, sobald sie nicht mehr genutzt werden. Nachhaltiges Ressourcenmanagement hat den Anspruch, Produktion und Reproduktion zusammenzudenken (Held et al. 2000) und dabei die Stoffströme hinsichtlich ihrer raum-zeitlichen Variabilität und Reichweite zu untersuchen. Gleichwohl wird ein vollständiger Stoffkreislauf in Produktion und Reproduktion nie möglich sein, da Gewinnung und Verarbeitung der Rohstoffe sowie Nutzung der Produkte inklusive Verwertung zu entropischen Verlusten führen. Auszugleichen ist der Stoffverlust nur durch verringerte Stoffströme, also Einsparungen, oder durch neue Rohstoffe, was wiederum die Umwelt belastet oder schädigt.

Effizientere Prozesse können das Problem nicht lösen, da effizienter produzierte Güter verstärkt nachgefragt werden, so dass Einspareffekte zumindest teilweise kompensiert werden (Reboundeffekt). Daher genügt es nicht, nur die technische Effizienz zu steigern, um wirklich einen umweltentlastenden Effekt zu erzielen, sondern es muss die Ressourcenproduktivität der gesamten Wirtschaft erhöht werden. Letztlich entscheidend sind Quantität und Qualität aller Stoff- und Warenströme einschließlich der nicht intendierten Folgen:

Je größer der Stofffluss (Umsatz pro Zeit) in Form von Massenmaterialien oder toxischen Substanzen ist, desto weiter sind wir vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernt, desto höher ist die Entropieproduktion und desto weniger effizient ist der Stoffumsatz.

Nebenwirkungen der Rohstoffgewinnung
Ökonomisch bedeutet ursprünglich, sparsam mit knappen Ressourcen umzugehen. Doch die Hinweise verdichten sich, dass die kritische Knappheit nicht so sehr von der ökonomisch-technischen Verfüg-

>

Kontakt Autoren: Prof. Dr. Stefan Bringezu | Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH | Wuppertal | Deutschland | E-Mail: stefan.bringezu@wupperinst.org

Prof. Dr. Klaus Kümmerer | Leuphana Universität Lüneburg | Lüneburg | Deutschland | E-Mail: klaus.kuemmerer@leuphana.de

Kontakt NaWis-Runde: Prof. Dr. Uwe Schneidewind | Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH | Döppersberg 19 | 42103 Wuppertal | Deutschland | Tel.: +49 202 2492100 | E-Mail: uwe.schneidewind@wupperinst.org | www.wupperinst.org

© 2012 S. Bringezu, K. Kümmerer; licensee oekom verlag. This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1 Aktuelle Daten unter www.materialflows.net.

barkeit der Rohstoffe abhängt – die durch technischen Fortschritt ständig verbessert wird –, sondern vielmehr von den Nebenwirkungen von Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, Produktnutzung, Emissionen und Abfallbeseitigung. Diese führen kontinuierlich zu Rohstoffverlusten (Dissipation), wobei Umweltmedien (Böden, Wasser, Luft) dadurch entstehende Belastungen nur begrenzt abpuffern können. Außerdem akzeptiert die Gesellschaft Umweltverschmutzungen nur bis zu einem gewissen Ausmaß und befürchtet Folgen für die Gesundheit. Natürliche Ressourcen sollten daher möglichst sparsam und produktiv eingesetzt werden.

Effizienzsteigerungen bezogen auf einzelne Produkte sind auch mit dem Paradigma der Skaleneffekte² aus der modernen Ökonomie zu erklären: Enthält ein Produkt weniger Rohstoffe als vorher, die Stückzahlen aber steigen, werden insgesamt mehr Rohstoffe benötigt. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass derzeit weltweit die meisten Volkswirtschaften wachsen. Daher muss der gesamte sozio-industrielle Stoffwechsel umgebaut werden: von der Rohstoffgewinnung über die Produktion von Grundwerkstoffen, Halb- und Fertigwaren bis zum Ge- und Verbrauch der Produkte, dem Recycling und der Abfalldeposition. Dabei stellen sich zwei Leitfragen:

- Wie ist der Mengenaustausch des anthropogenen Systems mit der natürlichen Umwelt verträglich zu gestalten (die erstmalige Materialentnahme bestimmt die späteren Emissions- und Abfallmengen)?
- Wie können weniger Schadstoffe eingesetzt und freigesetzt werden?

Die Dematerialisierungs- und die Detoxifikationsstrategie des gesellschaftlichen Stoffwechsels sollen die Antworten liefern und damit unsere physischen Lebens- und Arbeitsgrundlagen nachhaltig ausrichten. Mit der Dematerialisierung beschäftigt sich vor allem die Forschung über ökologische Ökonomie, die Detoxifikation ist ein wesentlicher Forschungszweig der nachhaltigen Chemie. Ökologische Ökonomie und nachhaltige Chemie ergänzen sich komplementär.

Der sozio-industrielle Stoffwechsel

Nachhaltiges Ressourcenmanagement erfordert eine deutliche Erhöhung der gesamten Ressourcenproduktivität um einen Faktor X, damit Wohlstand gesichert werden kann. Aktuelle politische Programme fördern Forschung in diese Richtung, so die *Roadmap for Resource Efficiency*³ der Europäischen Kommission und das deutsche Ressourceneffizienzprogramm *ProgRess*⁴, das derzeit das Bundesumweltministerium erarbeitet. Auf lange Sicht wird allerdings nicht nur die Frage relevant sein, wie mehr ökonomischer Wohlstand (*welfare*) mit weniger Ressourcenverbrauch erzeugt werden kann. Es gilt auch, den Ressourcenverbrauch vom Wohlbefinden (*well-being*) abzukoppeln und die Stoffströme und Ressourcennutzungen zu definieren, die langfristig aufrechterhalten werden können beziehungsweise müssen. Außerdem muss der künftige sozio-industrielle Metabolismus in seiner Struktur und seinem Umfang beschrieben werden, wie er nachhaltig funktionieren kann (Bringezu 2009). Dies geht über Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion und zur Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz hinaus: Wirtschaft und Gesellschaft sind zunehmend auf eine energetisch und stofflich erneuerbare und auch tatsächlich regenerierte Basis zu stellen (Bringezu 2000) und die Wechselwirkungen mit der Bio- und Geosphäre innerhalb eines *safe operating space* (Rockström et al. 2009) zu halten.

Für den Übergang in Richtung Nachhaltigkeit spielen vier *Kernstrategien* eine zentrale Rolle (Bringezu 2009):

1. eine ressourceneffiziente und recyclingbasierte Industrie, die auf die funktionellen Bedürfnisse des Endverbrauchs ausgerichtet ist;
2. eine *steady-stocks society*, deren Technosphäre bei Erreichen eines Reifezustands physisch netto nicht mehr wächst, also ein Gleichgewicht zwischen Auf- und Abbau erreicht hat;
3. solarisierte Infrastrukturen, um die Oberflächen von Gebäuden, Anlagen und Straßen zur Energiegewinnung zu nutzen und
4. eine *balancierte* Bioökonomie, um die Regenerationsfähigkeit natürlicher Prozesse zu nutzen, die Ökosysteme

nicht über die Maßen zu strapazieren und die Landnutzung global gerecht zu entwickeln.

Aktuelle Trends

Zwei aktuelle Trends verstärken die Ausdehnung der globalen Anbaufläche, den Rückgang von Grasland, Savannen und Wäldern – vorwiegend in den Tropen – sowie die Intensivierung der Landwirtschaft (Bringezu et al. 2009a):

- die zunehmende Nutzung biotischer Ressourcen aufgrund steigender Nahrungsmittelnachfrage vonseiten einer wachsenden Weltbevölkerung, die sich in Schwellenländern vermehrt Fleisch- und Milchprodukte leisten kann, und
- die wachsende Nachfrage im Non-Food-Bereich (nachwachsende Rohstoffe, Biokraftstoffe), forciert durch politische Maßnahmen.

Die zu erwartenden Flächennutzungsänderungen werden in den nächsten Jahrzehnten zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen sowie zu einem Verlust an Biodiversität und sauberen Wasserressourcen führen. Allein eine Steigerung der Erträge pro Hektar wird diese Trends nicht aufhalten. Vielmehr muss die Effizienz in Produktion und Konsum drastisch erhöht werden, beim Einsatz von Biomasse *und* von fossilen Ressourcen, wie etwa beim Kraftstoffverbrauch im Autoverkehr. Wollen Wirtschaftsregionen wie die EU sowie einzelne Länder zur nachhaltigen Gestaltung der Landnutzung beitragen, können sie die Anbaufläche, die für den inländischen Konsum notwendig ist (Bringezu et al. 2012), und den indirekten Wasserverbrauch (Stoeglehner et al. 2011) quantifizieren und bei übermäßiger Inanspruchnahme ihren Politikrahmen so anpassen, dass die besonders ressourcenintensiven Nachfragen gedrosselt werden: So können

² Als Skaleneffekt (*economies of scales*) wird in der Produktionstheorie der Betriebswirtschaftslehre und in der Mikroökonomie die Abhängigkeit der Produktionsmenge von der Menge der eingesetzten Produktionsfaktoren definiert.

³ <http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe>

⁴ www.bmu.de/wirtschaft_und_umwelt/downloads/doc/47843.php

etwa die Beimischungsquoten von Biokraftstoffen reduziert werden, so dass die Nachfrage nach Biodiesel aus Raps- oder Sojaöl sinkt.

Weltweit steigt auch die Nutzung abiotischer stofflicher Ressourcen – Metalle, nichtmetallische Minerale, fossile Energieträger. Aufgrund des Rohstoffabbaus nimmt die Menge an ungenutzter Extraktion (Bergbauabfälle) ebenfalls zu, da vermehrt großflächig abgegraben wird.⁵ Dabei verursachen nicht nur hohe Konzentrationen einzelner Stoffe Umweltprobleme, sondern in zunehmendem Ausmaß auch niedrige Konzentrationen vieler Stoffe (*micropollutants*, also Spurenstoffe im

erneuerbarer Energien. Doch auch Windräder benötigen Material – und obwohl die Windenergie pro erzeugter Kilowattstunde deutlich weniger ressourcenintensiv ist als der konventionelle fossile Energiemix, enthält der Windturbinenpark in Deutschland jetzt bereits mehr Kupfer und Stahl als sämtliche konventionellen Kraftwerke (Steger et al. 2011). Doch Kupfer ist ein Metall, dessen Primärerzeugung mit einem großen „ökologischen Rucksack“ verbunden ist. Außerdem benötigen Permanentmagnete in Windturbinen „seltene Erden“ (zum Beispiel Dysprosium oder Neodym), die aufgrund ihrer spezifischen Materialeigenschaften eingebaut werden; in west-

ihnen enthält. Dringend notwendig ist daher ein gezieltes Produktdesign, das nachhaltige Funktionalitäten für die Zukunft berücksichtigt (*benign by design*, Kümmerer 2007).

Dieses Konzept ist auch wesentlicher Baustein der Detoxifikation. Die toxischen Eigenschaften organischer Stoffe sind so weit als möglich zu reduzieren. Die Verwendung von Stoffen, die über Produkte oder als Produktbestandteile ins Abwasser oder in die aquatische Umwelt gelangen können, muss so geplant werden, dass sie schnell und möglichst vollständig zurückgehalten oder – bei organischen Stoffen – abgebaut werden (Kümmerer 2007, Kümmerer und Schramm 2008).

Natürliche Ressourcen sollten möglichst sparsam und produktiv eingesetzt werden.

Wasser, Kümmerer 2010). Sie lassen sich nur mit hohem Aufwand entfernen und stellen eine große Herausforderung für eine nachhaltige Wasserwirtschaft dar – neben den altbekannten Problemen des Zugangs zu sauberem Wasser und sanitären Anlagen (DFG 2003).

Es sind aber auch positive Entwicklungen auszumachen: Beispielsweise koppelt sich das Wirtschaftswachstum in nahezu allen untersuchten Ländern vom direkten Materialverbrauch „relativ“ ab, steigt also langsamer als das Bruttoinlandsprodukt (Bringezu et al. 2009b, OECD 2011, UNEP 2011). Zugleich zeigen die Analysen, dass in vielen Fällen Ressourcenentnahme und -aufbereitung in Regionen mit geringerer Bevölkerungsdichte und weniger strengen Umweltauflagen verlagert werden (Bringezu et al. 2009b).

Ressourcenverbrauch und Klimaschutz

Gegenwärtig spielen umweltpolitisch vor allem Maßnahmen des Klimaschutzes eine herausragende Rolle, insbesondere die Förderung von Technologien zur Nutzung

lichen Ländern kam es hier in den letzten Jahren jedoch zu Versorgungsengpässen. Auch bei der Herstellung von Photovoltaikzellen werden je nach Technologie zum Teil (öko-)toxische Substanzen wie Cadmium verwendet, bei denen bislang nicht geklärt ist, in welchem Umfang sie unter Freilandbedingungen oder auf Bauschuttdeponien freigesetzt werden.

Bei seltenen Erden, aber auch bei anderen seltenen Ressourcen muss man sogar von großen Nutzungsverlusten ausgehen (Kümmerer 2011, 2012): Mikrochips in elektronischen Produkten enthalten eine Vielzahl unterschiedlicher Elemente in geringen Konzentrationen auf kleinstem Raum. Je geringer die Konzentration eines Stoffes in einer Matrix ist, desto schwieriger, aufwendiger und unrentabler gestaltet sich seine Wiedergewinnung. Anders ausgedrückt: Es ist zunehmend problematisch und nicht nachhaltig, dass immer geringere Anteile zunehmend unterschiedlicher Stoffe und Materialien in zunehmend komplexen Produkten eingesetzt werden. Da zudem, wie erwähnt, aufgrund der Effizienzsteigerung die Produktkosten sinken, werden immer mehr neue Produkte produziert. Dadurch gehen wertvolle Rohstoffe verloren, obwohl (oder gerade weil) das einzelne Produkt immer weniger von

Forschungsschwerpunkte der Institute

Die Forschungsgruppe Stoffströme und Ressourcenmanagement des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie und des Center for Environmental Systems Research der Universität Kassel bearbeiten folgende Schwerpunkte:

- Der globale Ressourcenverbrauch von Ländern, Wirtschaftssektoren und Infrastruktursystemen wird analysiert; es werden Szenarien und Referenzwerte zur nachhaltigen Gestaltung dieses Ressourcenverbrauchs entwickelt.
- Technologien für erneuerbare Energien werden hinsichtlich ihrer Ressourcenimplikationen untersucht. Dies betrifft die Materialintensität sowie die Landnutzung mineralisch und biomassesebasierter Systeme unter Berücksichtigung ihrer dynamischen Entwicklung.
- Möglichkeiten und Hemmnisse für eine regenerative Ressourcenbasis werden untersucht, vor allem für ein *urban mining*, also die Nutzung der in Gebäuden und Infrastrukturen gespeicherten Materialien („Minen der Zukunft“); außerdem werden die Optionen für ein Kohlenstoffrecycling bewertet, um organische Abfälle wieder in Grundwerkstoffe umsetzen zu können, sowie die Möglichkeiten, langfristig eine industrielle Photosynthese zu betreiben.

Am Institut für Nachhaltige Chemie und Umweltchemie der Leuphana Universität Lüneburg steht komplementär dazu die

⁵ Auch die Menge der Aufbereitungsabfälle und -abwässer, die bei der Ressourcengewinnung entstehen, steigt mit der Zeit, da der Metallgehalt der geförderten Erze tendenziell abnimmt.

DIE ZUKUNFT DES WIRTSCHAFTENS HAT BEGONNEN!

NEU!

2012



SCHWERPUNKT

Klimaschutz durch Energetische Gebäudesanierung

WEITERE THEMEN

- Wer bezahlt die Energiewende bei Wohngebäuden?
- Wissenschaftsjahr 2012: Wissen als Basis für Innovation
- Re-Produktionsketten für eine zukunftsfähige Regionalwirtschaft

JETZT
PROBEABO
ANFORDERN!

kontakt@oekom.de

Leseproben, Informationen zur
Zeitschrift und Abobedingungen:

www.oekologisches-wirtschaften.de

oekom
verlag

Sicht auf einzelne Stoffe in Stoffströmen und chemischen Produkten im Vordergrund. Dies zeigt sich in folgenden Themenbereichen, die teilweise in inter- und transdisziplinärer Kooperation mit Kolleg(inn)en der Fakultät für Nachhaltigkeit bearbeitet werden:

- Quellen und Verhalten von organischen Spurenschadstoffen in Wasser und in der Atmosphäre werden untersucht, vor allem die abiotische und die biotische Abbaubarkeit solcher Stoffe sowie die Bedeutung der Qualität und Quantität von Substanzflüssen.
- Identifizierung der bei unvollständig verlaufenden Abbauprozessen gebildeten abbaustabilen Transformationsprodukte und Untersuchung ihrer toxischen und für das Umweltverhalten relevanten Eigenschaften (Bewertung); zudem die experimentelle und computerbasierte Untersuchung der Abbauprozesse (Chemieinformatik).
- Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für das gezielte Design neuer Stoffe und Produkte, die den Kriterien der nachhaltigen Chemie und der nachhaltigen Pharmazie genügen (*benign by design*) und damit einen wichtigen Beitrag zur Detoxifikation des sozio-industriellen Stoffwechsels leisten.
- Im Bereich der konzeptionell-theoretischen Arbeiten fokussieren die Wissenschaftler(innen) die Bedeutung von Zeit (*Zeitskalen, Zeitpunkte, windows of opportunity*) und arbeiten an einem besseren Verständnis der (beabsichtigten) Dissipation von Stoffen im Kontext von Nachhaltigkeit.
- In Energiefragen wird die Möglichkeit der chemischen Speicherung von Energie („thermische Batterie“) untersucht.

Literatur

- Bringezu, S. 2000. *Ressourcennutzung in Wirtschaftsräumen*. Berlin: Springer.
- Bringezu, S. 2009. Visions of a sustainable resource use. In: *Sustainable resource management*. Herausgegeben von S. Bringezu, R. Bleischwitz. Sheffield, UK: Greenleaf. 155–215.
- Bringezu, S., R. Bleischwitz (Hrsg.). 2009. *Sustainable resource management*. Sheffield, UK: Greenleaf.
- Bringezu, S., H. Schütz, M. O'Brien, L. Kauppi, R.W. Howarth, J. McNeely. 2009a. *Towards sustainable production and use of resources: Assessing biofuels*. International Panel for Sustainable

Resource Management. Paris: United Nations Environment Programme (UNEP).

- Bringezu, S., H. Schütz, M. Saurat, S. Moll, J. Acosta-Fernandez, S. Steger. 2009b. Europe's resource use: Basic trends, global and sectoral patterns and environmental and socioeconomic impacts. In: *Sustainable resource management*. Herausgegeben von S. Bringezu, R. Bleischwitz. Sheffield, UK: Greenleaf. 52–154
- Bringezu, S., M. O'Brien, H. Schütz. 2012. Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass. A conceptual and empirical contribution to sustainable management of global resources. *Land Use Policy* 29: 224–232.
- DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) (Hrsg.). 2003. *Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Giljum, S., C. Polzin, C. Lutz. 2009. *Global implications of a European environmental tax reform*. www.petre.org.uk (abgerufen 23.01.2012).
- Held, M., S. Hofmeister, K. Kümmerer, B. Schmid. 2000. Auf dem Weg von der Durchflussökonomie zur nachhaltigen Stoffwirtschaft: Ein Vorschlag zur Weiterentwicklung der grundlegenden Regeln. *GAIA* 9/4: 257–266.
- Kümmerer, K. 2007. Sustainable from the very beginning: Rational design of molecules by life cycle engineering as an important approach for green pharmacy and green chemistry. *Green Chemistry* 9: 899–907.
- Kümmerer, K. 2010. Neuartige Spurenstoffe im Wasser. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54: 349–359.
- Kümmerer, K. 2011. Dissipation and the need for benign design. Vortrag auf dem *World Resources Forum*. Davos, 19.–21. September.
- Kümmerer, K. 2012. Der Übergang ins postfossile Zeitalter – Übersehene Knappheiten. *Tutzinger Blätter* 1: 12–14.
- Kümmerer, K., E. Schramm. 2008. Arzneimittelentwicklung: Die Reduzierung von Gewässerbelastungen durch gezieltes Moleküldesign. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 20: 249–263.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development). 2011. *Towards green growth*. Paris: OECD.
- Rockström, J. et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472–475.
- Steger, S., M. Fekkek, S. Bringezu. 2011. *Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Ressourceneffizienz*. Paper 2.4. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/detailergebnisse_der_aps/download_s_ap_2 (abgerufen 23.01.2012).
- Stoeglehner, G., P. Edwards, P. Daniels, M. Narodslawsky. 2011. The water supply footprint: A strategic planning tool for sustainable regional and local water supplies. *Journal of Cleaner Production* 19: 1677–1686.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2011. *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. Paris: UNEP.