

Assessment of global green, blue and virtual water fluxes

Stefanie Rost

Abstract

Sustaining food production for a growing world population under a changing climate does not only depend on the availability, management and efficiency in the use of “blue” water (irrigation water withdrawals from rivers, lakes, and aquifers), it depends even more on “green” water (rainfall). Both kinds of water can be consumed productively by plants (transpiration) and unproductively from the soil surface (evaporation) or from the vegetation canopy (interception loss). Within this thesis, I quantify for the first time, spatially explicit and in a consistent modelling framework, how terrestrial precipitation is partitioned into blue and green water flows for natural ecosystems as well as agriculture. Moreover, I highlight the effects of anthropogenic driving forces, such as land use change, irrigation, and changes in climate and atmospheric CO₂ concentration, upon temporal and spatial variations in the flows of the terrestrial water cycle, such as evapotranspiration and its individual components, and river discharge. Finally, I assess the water limitation on present cropland and the global potential of strategies for managing blue water (irrigation) and green water (“vapour shift” from evaporation to transpiration, and “runoff harvesting” for supplemental irrigation) to mitigate water limitations on present cropland and thus, to enhance crop production.

For this, I used the dynamic global vegetation and water balance model LPJmL (‘Lund-Potsdam-Jena managed Land’) with a daily temporal and a 0.5° spatial resolution. LPJmL simulates the growth and abundance of natural and agricultural vegetation and the related water fluxes in a single framework. As part of this thesis, I enhanced the model by a river routing module, lakes and reservoirs as additional water storage pools, and a module to account for blue water withdrawals for households and industry. Since on irrigated land crops use both blue and green water, I developed a method to quantify their individual fractions.

The results demonstrate that the majority of terrestrial precipitation (~45%) is evapotranspired by the world’s natural terrestrial ecosystems. About 16% is presently used by humans in rainfed and irrigated agriculture including pasture. Water consumption on cropland is globally dominated by green water (>85%), only some regions depend to a large extent on the consumption of blue water. A substantial portion (~50%) of global irrigation water withdrawals stem from non-renewable and/or non-local resources such as fossil groundwater and diverted river water.

The results confirm the observation that humans significantly alter the terrestrial water cycle at global scale. Anthropogenic land use change, compared to a simulation with potential natural vegetation only, reduced global evapotranspiration by about 4% and with that, increased river discharge by about 7%. In contrast, irrigation increased global evapotranspiration by up to 2% and decreased river discharge by up to 1.5%, but their spatial patterns differ. Projections of potential future climate and land use are estimated to intensify human alterations of the terrestrial water cycle. Furthermore, it could be shown that the observed trend in global river discharge – an increase of 7.7% during the last

century – were primarily caused by changes in precipitation (+6.5%), followed by land cover changes (+1.7%), rising CO₂ (+1.2%), and a negative influence caused by global warming (-0.9%), and irrigation (-0.3%).

In many regions of the world, especially in semi-arid climates, crop production is far from its potential. This situation can be substantially improved by various blue and in particular green water management options, though in some areas any such effort is restricted by precipitation deficits. However, the results of two on-farm water management strategies – (i) reducing soil evaporation (“vapor shift”); and (ii) collecting runoff on cropland and using it during dry-spells (“runoff harvesting”) – confirm earlier suggestions that there is a huge potential to produce “more crop per drop” in rainfed agriculture. A moderate scenario (implying both a 25% reduction in evaporation and a 25% collection of runoff) suggests that global food production can be increased by 19%, which is comparable with the effect of current irrigation (17%). But it also appears that even under the improved water management options considered within this thesis, water resources on current cropland will not be sufficient to meet the growing global food demand. This poses crucial questions on tradeoffs between land and water use for agriculture and natural ecosystems.

Zusammenfassung

Die Nahrungssicherheit für eine wachsende Weltbevölkerung unter einem sich ändernden Klima hängt nicht nur von der Verfügbarkeit, dem Management und der Nutzungseffizienz von “blauem” Wasser ab (Bewässerungswasser aus Flüssen, Seen oder Grundwasserleitern), sondern auch von “grünem” Wasser (Niederschlag). Beide Formen können produktiv durch Pflanzen (Transpiration) oder unproduktiv aus dem Boden (Evaporation) oder von der Vegetationsoberfläche (Interzeption) konsumiert werden. Im Rahmen dieser Doktorarbeit quantifiziere ich zum ersten Mal, räumlich explizit und in einer konsistenten Modellumgebung, die Aufteilung des kontinentalen Niederschlags in blaue und grüne Wasserflüsse unterschieden zwischen natürlichen Ökosystemen und Landwirtschaft. Darüber hinaus zeige ich die Auswirkungen menschlicher Eingriffe, wie Landnutzungswandel, Bewässerung, Änderungen im Klima und der atmosphärischen CO₂ Konzentration, auf zeitliche und räumliche Veränderungen im terrestrischen Wasserkreislauf, wie der Evapotranspiration und ihren einzelnen Komponenten und dem Abfluss, auf. Zuletzt berechne ich die Wasserlimitierung auf derzeitigem Ackerland sowie das Potential mit geeigneten Maßnahmen zum Management von blauem (Bewässerung) sowie grünem Wasser (“Verschiebung der Verdunstung” von Evaporation zu Transpiration und “Speichern von lokalem Abfluss” zur ergänzenden Bewässerung), diese Wasserlimitierung abzuschwächen und damit die Biomasseproduktion zu erhöhen.

Dafür habe ich das dynamische globale Vegetations- und Wasserhaushaltsmodell LPJmL (‘Lund-Potsdam-Jena managed Land’) mit einer täglichen zeitlichen und 0.5° räumlichen Auflösung verwendet. LPJmL simuliert das Wachstum und die Abundanz natürlicher und landwirtschaftlicher Vegetation sowie die zugehörigen Wasserflüsse in einer Modellumgebung. Innerhalb dieser Doktorarbeit habe ich dieses Modell um ein Flussablaufmodul, Seen und Talsperren als zusätzliche Wasserspeicher und einem Modul zur Wasserentnahme für Haushalte und Industrie erweitert. Da auf bewässerten landwirtschaftlichen Flächen sowohl blaues als auch grünes Wasser konsumiert wird, habe ich eine Methode entwickelt diese individuellen Anteile zu unterscheiden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der größte Teil des terrestrischen Niederschlags (~45%) von natürlichen terrestrischen Ökosystemen konsumiert wird. Rund 16% werden derzeit vom Menschen auf unbewässertem und bewässertem Acker- und Weideland verbraucht. Ein beachtlicher Anteil (~50%) der globalen Entnahme von Bewässerungswasser stammt von nicht-erneuerbaren und nicht-lokalen Ressourcen wie fossilem Grundwasser und der Umleitung von Flüssen.

Die Ergebnisse bekräftigen die Beobachtung, dass der Mensch global sichtbar in den terrestrischen Wasserkreislauf eingreift. Anthropogener Landnutzungswandel, im Vergleich zu einer Simulation mit nur potentiell natürlicher Vegetation, reduziert die Evapotranspiration global um rund 4% und erhöht dadurch den Abfluss um etwa 7%. Im Gegensatz dazu erhöht Bewässerung global die Evapotranspiration bis zu 2% und verringert den Abfluss bis zu 1.5%, jedoch mit räumlich unterschiedlichen Mustern. Projektionen von potentiell zukünftigem Klima und Landnutzung werden diese Änderungen in den einzelnen Wasserflüssen noch verstärken. Der Trend im globalen Abfluss – ein Anstieg von 7.7% über das letzte Jahrhundert – wurde hauptsächlich durch Änderungen im Niederschlag (+6.5%) bestimmt, gefolgt von Landnutzungswandel (+1.7%), CO₂ Anstieg (+1.2%), und einem negativen Einfluß durch die globale Erwärmung (-0.9%) und durch Bewässerung (-0.3%).

Die Simulationen zeigen ferner, dass die derzeitige landwirtschaftliche Produktion in vielen Regionen der Welt (besonders in semi-ariden Gebieten) durch Wasser limitiert ist. Diese Situation kann durch gezieltes Management von grünem Wasser wesentlich verbessert werden. Allerdings sind in einigen Regionen diese Maßnahmen durch mangelndem Niederschlag stark eingeschränkt. Dennoch bekräftigen die Ergebnisse zweier Strategien zum lokalen Management von Wasser im Regenfeldbau – (i) Reduktion der Bodenevaporation (“vapor shift”) und (ii) Auffangen von Abfluss zur Nutzung in Trockenperioden (“runoff harvesting”) – frühere Thesen, dass in der unbewässerten Landwirtschaft ein großes Potential besteht “mehr Ertrag pro Tropfen Wasser” zu erzielen. In einem moderaten Szenario (Kombination von 25% Reduktion der Bodenevaporation und 25% Auffangen vom Abfluss) kann die globale Nahrungsmittelproduktion um 19% gesteigert werden, was vergleichbar ist mit dem Effekt derzeitiger Bewässerung (17%). Aber trotz des Potentials der hier betrachteten Optionen zum Management von grünem Wasser, erscheinen diese nicht ausreichend zu sein, um den steigenden Bedarf an Nahrungsmitteln zu befriedigen. Das wirft äußerst wichtige Fragen zu Kompromissen zwischen der Nutzung von Land und Wasser für den Menschen und natürlicher Ökosystemen auf.