



Doctoral Thesis

Seasonal arsenic cycling in irrigated paddy soils in Bangladesh and arsenic uptake by rice

Author(s):

Dittmar, Jessica

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006114084> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 18817

SEASONAL ARSENIC CYCLING IN IRRIGATED PADDY SOILS IN BANGLADESH AND
ARSENIC UPTAKE BY RICE

A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
JESSICA DITTMAR
Dipl. Natw. ETH Zurich

born July 15, 1977
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ruben Kretzschmar, examiner
Dr. Andreas Voegelin, co-examiner
Dr. Stephan Hug, co-examiner
Prof. Dr. Scott Fendorf, co-examiner

2010

Summary

Over the last decades, dry season (*boro*) rice production in Bangladesh has been largely intensified to meet the rising food demand of the growing population and to ensure food self-sufficiency. To date, *boro* rice cultivation accounts for more than 50% of the country's rice production, as it provides higher yields and yield security than the traditional rice varieties. Dry season rice requires large amounts of water for irrigation, which is mainly provided by groundwater abstraction from shallow tube wells, often containing high arsenic (As) concentrations. In the long-term, this may lead to As accumulation in paddy soils and further to elevated As contents in rice plants, threatening food quality, rice yields and human health.

In order to accurately assess all risks for human and environmental health associated with *boro* rice cultivation using As-rich groundwater for irrigation, detailed investigations of paddy soils and rice plants are necessary to provide insight into the complex cycling of As in lowland paddy field systems. Consequently, the aim of the present work was to shed light on the As cycling at a specific field site in Munshiganj district/Bangladesh. On the study site, *boro* rice has been grown from December until May since the early 1990s. During the growth season, the fields are irrigated intermittently through single water inlets into individual fields with As-rich groundwater extracted from a shallow aquifer by diesel powered pumps. Before harvest fields dry out and subsequently get inundated during monsoon flooding between mid June and late October.

The three major objectives addressed in the present thesis were (i) to investigate the spatiotemporal distribution of As in irrigated paddy soils, (ii) to quantify gains and losses of soil As during irrigation and monsoon flooding over a three-year period in order to assess the potential for long-term As accumulation in these fields, and (iii) to estimate the extent of increasing soil As concentrations on growth of and As uptake by rice.

The input of As into paddy soils through As rich irrigation water is laterally heterogeneous because of the gradual removal of As through coprecipitation together with iron from slowly spreading and oxidizing irrigation water and As sorption to soil particles. Therefore, soil As contents decrease with increasing distance to the water inlet, leading to highly variable topsoil As concentrations within individual fields. Soil As contents after the irrigation period showed that most As input occurred close to the water inlet and that As was mainly retained in the top few centimeters of soil. After monsoon flooding, topsoil As contents were again lower, suggesting As input during irrigation to be at least partly counteracted by As mobilization during monsoon flooding. However, the persisting lateral

As gradient suggested net As accumulation over the past years of groundwater-based irrigation.

To obtain a comprehensive picture of the As cycling and possible As accumulation at the study site, the total As mass within the top 40 cm of paddy soil was determined and the variations were monitored over a three-year period on a 3D-sampling grid to account for the spatial distribution of soil As. Gains and losses of soil As in different depth segments were calculated using a mass-balance approach. Annual As input with irrigation water equaled $4.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Within the top 40 cm of soil, the mean As accumulation over three years amounted to $2.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, implying that on average $2.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ were lost from the soil. Seasonal changes of soil As showed that 1.05 to $2.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ were lost during monsoon flooding. The remaining As-loss (up to $0.95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) was attributed to leaching with percolating irrigation water. Extrapolating the observed trends into the future suggests that at the investigated field site, total As within the top 40 cm of soil will further increase by a factor of 1.5 to 2 until 2050 under unchanged conditions.

The impact of As accumulation in soils on rice plants, i.e., rice straw and grain, was investigated over three consecutive harvest seasons (2005-2007). The field data revealed that straw and grain As concentrations were elevated in the field and highest near the irrigation water inlet, where As concentrations in both soil and irrigation water were highest. Additionally, a pot experiment with soils and rice seeds from the field site was carried out in which soil and irrigation water As were varied in a full factorial design. The results suggested that both, soil As accumulated in previous years and As freshly introduced with irrigation water, influence As uptake during rice growth. At similar soil As contents, plants grown in pots exhibited similar grain and straw As contents as plants grown in the field. This suggested that the results from pot experiments performed at higher soil As levels could be used to assess the effect of continuing soil As accumulation on As content and yield of rice. Based on the scenario of long-term As accumulation at the study site, we estimated that unchanged irrigation practice may result in an increase of average grain As concentrations from currently $\sim 0.15 \text{ mg As kg}^{-1}$ to 0.25 - $0.58 \text{ mg As kg}^{-1}$ by the year 2050. This could translate into a 1.5 to 3.8 times higher As intake by the local population via rice, then possibly exceeding the provisional tolerable daily As intake by FAO/WHO.

Overall, As is expected to increase within the soils at the investigated field site, even though the accumulation is slowed by As losses during monsoon and irrigation. The accumulation of As in the soils further leads to elevated As concentrations in the rice plant.

In the future, this may adversely affect rice yield and quality, being a threat to food security, human health and environment. The results presented in this thesis provide a basis for evaluating the risks associated with current and predicted soil and plant As concentrations. The present data set allowed estimating the specific risk of As contamination for human and environmental health on a field site in Munshiganj district (Bangladesh) associated with *boro* rice production using As-rich groundwater for irrigation. However, transferring the results to other areas of Bangladesh should be exercised with caution, as site-specific differences may play a key role in the nature of As cycling. Further research addressing paddy soil As levels need to account for the possible lateral and vertical heterogeneity of As concentrations within paddy fields. With regard to an all-embracing risk assessment, site-specific differences must be particularly addressed and emphasized in order to identify long-term mitigation strategies for all of Bangladesh.

Zusammenfassung

In Bangladesch wurde der Anbau von *Boro* Reis über die letzten Jahrzehnte stark intensiviert, um den steigenden Nahrungsmittelbedarf der wachsenden Bevölkerung unabhängig vom Ausland decken zu können. *Boro* Reis bietet im Vergleich mit traditionellen Reisvarietäten höhere Erträge und Ertragsicherheit und macht heutzutage mehr als 50% der Reisproduktion des Landes aus. Der in der Trockenzeit angebaute *Boro* Reis erfordert jedoch eine intensive Bewässerung der Felder, für die häufig oberflächennahes Grundwasser verwendet wird, das mit geogenem Arsen (As) belastet ist. Langfristig kann dies zu erhöhten Arsengehalten in Reisfeldböden führen und in der Folge zu steigenden Arsenkonzentrationen in Reispflanzen, die dann Nahrungsmittelqualität, Erträge wie auch die menschliche Gesundheit bedrohen.

Um die Risiken für Mensch und Umwelt beurteilen zu können, die mit der Verwendung von arsenreichem Grundwasser für die *Boro* Reisproduktion verbunden sind, ist ein Verständnis des komplexen Arsenkreislaufs im Tieflandreisanbau notwendig. Die vorliegende Arbeit verfolgte das Ziel, den Arsenkreislauf an einem Feldstandort in Munshiganj/Bangladesch zu untersuchen, an dem seit Anfang der 1990iger Jahren von Dezember bis Mai *Boro*-Reis angebaut wird. Während der Reiswachstumsperiode werden die einzelnen Felder periodisch durch je einen Wassereinlass mit arsenreichem Grundwasser aus einem oberflächennahen Aquifer bewässert. Vor der Ernte trocknen die Felder aus und sind anschliessend von Mitte Juni bis Ende Oktober vom Monsun erneut überflutet.

Die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit bestanden darin, (i) die räumliche und zeitliche Verteilung von Arsen im Feldboden zu untersuchen, (ii) die Zunahme und Abnahme von Arsen während Bewässerung und Monsun über einen dreijährigen Zeitraum zu quantifizieren, um daraus die langfristige Anreicherung von Arsen im Boden abzuschätzen, und (iii) die Auswirkungen der Arsenanreicherung auf das Wachstum der Reispflanzen und deren Arsenaufnahme zu ermitteln.

Analysen der Arsengehalte im Feldboden vor und nach der Bewässerungsperiode zeigten, dass der höchste Arseneintrag nahe dem Wassereinlass stattgefunden hat und dass Arsen mehrheitlich in den obersten Zentimetern zurückgehalten wurde. Diese Beobachtungen wurden damit erklärt, dass Arsen zusammen mit Eisenkolloiden graduell aus dem sich langsam ausbreitenden und oxidierenden Bewässerungswasser entfernt wird und ausserdem an Bodenpartikel adsorbiert wird. Im Verlaufe der Feldüberflutung im Monsun gingen die Arsengehalte im Oberboden wieder auf den Stand vor der

Bewässerung zurück. Dies deutet darauf hin, dass eine Mobilisierung von Arsen während des Monsuns zumindest teilweise dem Arseneintrag durch die Bewässerung entgegenwirkt. Nichtsdestotrotz weist der bestehende laterale Arsengradient darauf hin, dass Arsen über die letzten Jahre der grundwasserbasierten Bewässerung angereichert wurde.

Um die zeitliche Arsenanreicherung am Feldstandort zu untersuchen, wurde die totale Arsenmenge in den obersten 40 cm des Reisbodens über einen Zeitraum von 3 Jahren mit Hilfe einer Massenbilanz quantifiziert. Hierfür wurde ein dreidimensionales Beprobungsraster gewählt, welches die räumlich heterogene Verteilung der Arsengehalte im Boden berücksichtigte. Der jährliche Arseneintrag über die Bewässerung betrug $4.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Innerhalb der obersten 40 cm des Bodens betrug die mittlere Arsenanreicherung über drei Jahre $2.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Demzufolge sind im Mittel $2.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aus dem Boden ausgetragen worden. Saisonale Veränderungen im Bodengehalt implizierten einen Verlust von 1.05 bis $2.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ während des Monsuns und einen Verlust des Restes von bis zu $0.95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ mit infiltrierendem Bewässerungswasser. Eine Extrapolation der beobachteten Trends lässt für den untersuchten Feldstandort eine Arsenzunahme in den obersten 40 Zentimetern des Bodens um einen Faktor 1.5 bis 2 bis zum Jahr 2050 erwarten.

Die Auswirkung der Arsenanreicherung im Boden auf Reispflanzen wurde über drei aufeinanderfolgende Erntezeiten untersucht (2005-2007). Die Feldstudie ergab, dass die Arsengehalte in Stroh und Korn im Feld erhöht waren und nahe dem Wassereinlass maximale Werte erreichten, wo auch die Arsenkonzentrationen in Bewässerungswasser und Boden am höchsten waren. Zusätzlich wurde eine Topfstudie mit Boden und Saatgut vom Feldstandort durchgeführt, in der Arsen im Boden und Bewässerungswasser in einem vollständig faktoriellen Design variiert wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass sowohl das Bodenarsen, welches in vorhergehenden Jahren angereichert wurde, als auch das Arsen, welches frisch mit dem Bewässerungswasser hinzugeführt wurde, die Arsenaufnahme während des Reiswachstums beeinflussen. Gleiche Bodenarsenkonzentrationen führten sowohl in den Töpfen als auch im Feld zu ähnlichen Stroh- und Kornarsengehalten. Dies legt nahe, dass die Resultate des Topfexperimentes bei höheren Bodenarsengehalten dazu dienen könnten den Effekt von weiterer Bodenarsenakkumulation auf den Arsengehalt in Pflanzen und den Reisertrag abzuschätzen. Basierend auf dem Langzeitszenario der Bodenarsenanreicherung am Feldstandort, wurde der Arsengehalt der Pflanzen abgeschätzt, wie er aufgrund der extrapolierten Bodenarsengehalte im Jahre 2050 zu erwarten ist. Fortschreitende

Bewässerung resultiert in einer Zunahme der Arsenkonzentrationen im Reiskorn von derzeit $0.15 \text{ mg As kg}^{-1}$ auf $0.25\text{-}0.58 \text{ mg As kg}^{-1}$ im Jahre 2050. Die Aufnahme von Arsen der lokalen Bevölkerung durch den Konsum von Reis mit der für 2050 extrapolierten Arsenkonzentration erhöht sich gegenüber heute um einen Faktor von 1.5 bis 3.8 und überschreitet somit den von der FAO/WHO vorgeschlagenen tolerierbaren Wert für die tägliche Arsenaufnahme.

Gesamthaft wird erwartet, dass Arsen in den Böden des untersuchten Standortes zunimmt, obwohl die Anreicherung durch Verluste von Arsen während des Monsuns und der Bewässerung verlangsamt wird. Die Anreicherung von Arsen in den Böden führt ausserdem zu erhöhten Arsengehalten in den Reispflanzen, welche zukünftig möglicherweise die Reisernte und -qualität nachteilig beeinflussen und somit eine Gefahr für Nahrungssicherheit, menschliche Gesundheit und Umwelt darstellen könnten. Der hier präsentierte Datensatz erlaubte das Risiko der Arsenkontamination für Mensch und Umwelt im Zusammenhang mit der *Boro* Reisproduktion durch arsenreiches Wasser am Feldstandort in Munshiganj/Bangladesch abzuschätzen. Die in dieser Doktorarbeit präsentierten Resultate sollten jedoch nur mit Vorsicht auf andere Gebiete in Bangladesch übertragen werden, da örtliche Gegebenheiten, wie Unterschiede in der Bewässerung und im Monsun, den Arsenkreislauf grundlegend verändern können. Zukünftige Forschung sollte die mögliche laterale und vertikale Heterogenität innerhalb der Reisfelder berücksichtigen. Hinsichtlich einer umfassenden Risikobeurteilung müssen standortspezifische Unterschiede besonders berücksichtigt und hervorgehoben werden, um Strategien zur langfristigen Abschwächung der Arsenanreicherung in ganz Bangladesch zu entwickeln.