

# Human zinc nutrition in arid regions with zinc deficiency in soils and crops

## a case study in central Iran

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Roohani, Nazanin

**Publication date:**

2012

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007321947>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 20393

# **Human zinc nutrition in arid regions with zinc deficiency in soils and crops – a case study in central Iran**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
NAZANIN ROOHANI  
M.Sc. in Irrigation and Drainage Engineering, Shiraz University

Citizen of United States of America

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner  
Prof. Dr. Richard F. Hurrell, co-examiner  
Prof. Dr. Roya Kelishadi, co-examiner

2012

## SUMMARY

---

Zinc (Zn) deficiency is recognized as a major problem of human nutrition world-wide. It has been estimated to affect up to one-third of the world's population. Inadequate dietary intake of bioavailable forms of Zn is considered the most frequent cause of Zn deficiency. The risk of insufficient dietary Zn intake is particularly high in populations depending on sources with low levels of absorbable Zn such as cereals and with no or only limited access to sources rich in bioavailable Zn such as meat. This situation is wide-spread in arid regions of developing countries. In the developing world; cereal grains provide nearly 50% of the daily calory intake of the population, and up to 70% in rural areas.

While the problem of Zn deficiency in developing countries was recognized already decades ago, it is only rather recently that a relationship between human Zn deficiency and low Zn levels in soils and crops has been found. Building on this link between soil and human nutrition, biofortification of food plants has been proposed as a new strategy to fight Zn malnutrition in developing countries. In addition to breeding for crop varieties with enhanced Zn-efficiency, it also includes the adaptation of farming practices such as fertilization and other soil amendments to improve the Zn concentration of consumed parts of food plants. In contrast to other interventions to abate Zn malnutrition, such as dietary diversification, supplementation and food fortification, biofortification is particularly attractive because it can improve crop production at the same time.

Independent of the choice of strategy, sustainable solutions require an approach that considers the system of land use, agricultural management practices, food production, consumer behaviour, human nutrition as a whole. Such an approach requires the knowledge and understanding of the relevant Zn fluxes through the system. This thesis was part of a larger project with the objective to develop, test and apply – using central Iran as an exemplary case – a system of model-based procedures to assess the fluxes of the essential microelement Zn through the food chain from soil through plants and livestock to the human population, in ordert (i) to identify dominant pathways of Zn from soils into crops and from there into human diets, (ii) to create a framework for the analysis of the effects of soil, climate, land use and agricultural practices on the nutritional quality of the produced food

stuffs with respect to Zn availability for humans and (iii) to provide a decision-supporting tool for the evaluation of agricultural options to reduce dietary Zn deficiency. In the framework of this project the objectives of the thesis were: (1) to assess the major Zn sources in the diet of the study population; (2) to analyze phytic acid contents in the diets of the study population as main inhibitory factor of Zn bioavailability in the food; (3) to assess the dietary Zn intake and the nutritional Zn status of the study population, taking account also of iron nutrition status; (4) to develop a Zn intake model for the analysis of intervention strategies; and (5) to assess possible food-based strategies to improve human Zn nutrition.

Central Iran was chosen as case study region for this project because (i) Zn deficiency is considered an important public health concern in Iran (Balali et al. 1998), (ii) policymakers have started to become aware of the concern and are paying increasing attention to improve the nutritional status of the people, (iii) central Iran is representative for many other semi-arid to arid regions in the developing world with diets being based primarily on cereals, and (iv) a well-established basis of scientific collaboration existed between ETH and Isfahan University of Technology (IUT).

In a first step, two surveys were carried out, one in a suburban and the other in a rural community, on dietary habits and food composition in the study region. Major foods and ingredients were collected in the households of the participants of the study and analyzed for Zn, iron and phytic acid (PA). Zn was analysed in rice, wheat flour, bread and legumes (n=111) as well as the main animal source foods (dairy and meat products, n=107) and 9 local cooked dishes (n=38), consumed in a rural and suburban population in central Iran. Phytic acid, which is the main inhibitor of intestinal Zn absorption, was measured in the cereal and legume foods as well as in the local dishes. In addition, iron and calcium were measured in selected rice samples and legumes before and after cooking. The Zn concentration in cooked rice and bread, as major staples, were  $0.88 \pm 0.34$  and  $1.32 \pm 0.16$  mg/ 100 g DW in the suburb area and  $1.29 \pm 0.45$  and  $1.77 \pm 0.21$  mg/ 100 g DW in the rural area, respectively. The PA:Zn molar ratio of flat bread was 24 in the suburban area and 22 in the village. Cooked rice and composite dishes had PA:Zn molar ratios between 4 to 13. The results indicate that the local cheese-making processes, rice-polishing and bread-making have a major influence on Zn concentrations in the final products. The PA:Zn molar ratios indicate a low Zn absorption from the common flat breads, but no inhibited absorption from cooked rice and composite dishes.

In the next step we estimated the Zn and iron (Fe) status in the same two sample populations as before, related the Zn status to dietary Zn intake as determined from the data of

the previous surveys, and examined the relationship between Zn and Fe status. Blood samples from 341 subjects (27 preschool children, 157 schoolchildren, 91 women, 66 men) were analyzed for serum Zn, serum ferritin, total iron binding capacity, and hemoglobin concentrations. Daily Zn intake was calculated using the 3-day weighed food records of the previous surveys. The overall prevalences of Zn deficiency were 5.9% in the rural and 7.2% in the suburban community. The prevalence of iron deficiency was 27% in the rural and 31% in the suburban community. There was a positive correlation between Zn and Hb, but no correlation between Zn and Fe status. The prevalence of anemia was higher in the rural than in the suburban community (33.5% vs. 22.7%;  $p=0.04$ ). Almost half of the anemia in the suburban community and 36% in the rural community were associated with iron deficiency. The hemoglobin levels correlated significantly with the serum Zn concentrations. The low prevalence of Zn deficiency was unexpected. It may be explained by a relatively high Zn intake from animal source foods. Anemia affected some 30% of the subjects, although less than half was due to iron deficiency. Given that Zn plays a role in the production of red blood cells and that there was no correlation between Zn and Fe status, it is possible that Zn deficiency was an independent cause of anemia. The lack of correlation between Fe and Zn status could be due to the frequent consumption of dairy products and tea.

In the final step, we developed a model for the evaluation of different intervention scenarios for abating human Zn deficiency by enhancing dietary Zn intake and demonstrated its applicability for the case of our test population. The model determines dietary Zn intake for different user-defined population groups using the molar PA:Zn ratio as an indicator of Zn bioavailability and taking account of uncertainty in the input data by means of Monte Carlo simulation. Based on the data from the first two steps, Iranian national statistics and other available sources, the model was used to assess the risk of Zn deficiency in the study population and to compare different scenarios of its future development. The scenario analysis revealed that it would take up to 60 years until 97.5% of the population would meet the estimated average Zn requirements if the consumption of major food items would continue to increase at their current exponential rates. With fortification of wheat flour, this goal could hypothetically be reached within 15 years. Biofortification was the next best alternative where after 15 years only 12% of the population would still be at risk of Zn deficiency.

While a more detailed study on trends in the dietary habits of the Iranian population and their variability among groups due to socio-economic and other factors would certainly be a and expedient and warranted sequel to this study, the scenario analysis showed that the Zn intake model developed here is a useful tool for the analysis of possible future trends and to

assist the design and evaluation of appropriate and efficient intervention strategies such as (bio)fortification. Our study in particular also shows that uncertainty analysis is crucial in such studies.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Zinkmangel gilt als eines der grössten globalen Probleme der Humanernährung. Schätzungen zufolge sind bis zu einem Drittel der Weltbevölkerung betroffen. Ungenügende Aufnahme von Zink (Zn) in bioverfügbarer Form wird als Hauptgrund für Zn-Mangel erachtet. Das Risiko einer unzulänglichen Zn-Aufnahme mit der Nahrung ist besonders hoch in Bevölkerungsteilen, deren Zn-Versorgung hauptsächlich von Zn-Quellen mit niedrigen Gehalten von absorbierbarem Zn abhängig ist und die keinen oder nur limitierten Zugang zu anderen Zn-Quellen haben. Besonders in ariden und semiariden Gebieten in Entwicklungsländern ist diese Situation verbreitet anzutreffen. Fast 50% des Kalorienbedarfs der städtischen und bis zu 70% der ländlichen Bevölkerung wird hier über Getreide abgedeckt.

Das Problem des Zn-Mangels in Entwicklungsländern wurde schon vor Jahrzehnten erkannt. Allerdings wurde erst in letzter Zeit eine Beziehung zwischen Zn-Mangel in der Bevölkerung und niedrigen Zn-Konzentrationen in Böden und Getreide entdeckt. Aufbauend auf der Beziehung zwischen Boden und Humanernährung, wurde die Biofortifikation von Zn in Nahrungspflanzen als neue Strategie im Kampf gegen Zn-Mangel in Entwicklungsländern vorgeschlagen. Neben der Züchtung von Getreidevarietäten mit erhöhter Zn-Effizienz beinhaltet dies auch die Anpassung der ackerbaulichen Methoden, wie der Düngung sowie der Applikation anderer Bodenzusätze, um die Zn-Konzentration in den konsumierten Pflanzenteilen zu verbessern. Im Gegensatz zu anderen Massnahmen zur Verminderung von Zn-Mangel, wie Diversifikation der Ernährung, Gabe von Nahrungsergänzungsmitteln und Zinkanreicherung von Nahrungsmitteln, ist die Biofortifikation besonders attraktiv weil gleichzeitig die Getreideproduktion verbessert werden kann.

Unabhängig von der Strategie brauchen nachhaltige Lösungen einen ganzheitlichen Ansatz, der das Landnutzungssystem, die Agrarmethoden, die Nahrungsmittelproduktion, das Konsumentenverhalten und die Ernährung mit einbezieht. Dieser Ansatz benötigt das Wissen und Verständnis der relevanten Zn-Flüsse im System. Diese Doktorarbeit war Teil eines grösseren Projekts, welches anhand des Fallbeispiels Iran das Ziel verfolgte, ein System modelbasierter Massnahmen zu entwickeln, zu testen und anzuwenden um die Zn-Flüsse

durch die gesamte Nahrungskette vom Boden über die Pflanzen und Tiere bis zum Mensch zu erfassen, um (i) die dominanten Wege von Zn vom Boden in Lebensmittel und die Ernährung zu identifizieren, (ii) einen Rahmen zu schaffen für die Analyse der Effekte, die Boden, Klima, Landnutzung und Agrarmethoden auf die Qualität der produzierten Nahrungsmittel bezüglich Zn-Verfügbarkeit für den Menschen haben, (iii) ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, das dabei hilft agrartechnische Massnahmen zu evaluieren die als Option zur Verbesserung der Zinkversorgung zur Verfügung stehen. Im Rahmen des Gesamtprojektes hatte diese Doktorarbeit folgende Ziele: (1) die Hauptquellen von Zn in der Ernährung der untersuchten Bevölkerungsteile zu identifizieren, (2) den Phytinsäuregehalt (PA) der Nahrung der untersuchten Bevölkerung als Haupthemmungsfaktor für die Bioverfügbarkeit von Zn zu analysieren, (3) die Nahrungsaufnahme und den Gehalt von Zn in den Nahrungsmitteln der untersuchten Bevölkerung unter Einbezug der Eisen (Fe) Versorgung zu bestimmen, (4) ein Zinkaufnahme-Modell für die Analyse von Interventionsstrategien zu entwickeln, (5) mögliche Ernährungs-basierte Strategien zu beurteilen.

Zentraliran wurde als Fallstudie für dieses Projekt gewählt, weil (i) Zn-Mangel ein wichtiges öffentliches Gesundheitsproblem im Iran ist (Balali et al., 1998), (ii) die Politik begonnen hat sich dieses Problems bewusst zu werden und zunehmend Wert auf die Verbesserung des Zn-Versorgungszustands der Bevölkerung legt, (iii) Zentraliran mit seiner hauptsächlich getreidebasierten Ernährung repräsentativ ist für viele andere semiarid bis aride Regionen in Entwicklungsländern, (iv) bereits eine gut etablierte wissenschaftliche Kollaboration zwischen ETH Zürich und Isfahan University of Technology (IUT) existierte. In einem ersten Schritt wurden zwei Umfragen zu den Ernährungsgewohnheiten und der Nahrungszusammensetzung durchgeführt, eine in einer suburbanen und eine in einer ländlichen Gemeinde im Zentraliran. Die Hauptnahrungsmittel und Zutaten wurden in den Haushalten der Studienteilnehmer gesammelt und auf Zn, Fe und PA analysiert. Zink wurde in Reis, Weizenmehl, Brot und Gemüse (n=111) sowie in den wichtigsten tierischen Nahrungsmitteln (Milch- und Fleischprodukte, n= 107) analysiert. Weiterhin wurden 9 typische lokale Gerichte (n=38) der ländlichen und suburbanen Bevölkerung in Zentraliran untersucht. Phytinsäure, der Haupthemmstoff der intestinalen Zn Absorption, wurde in Getreiden und Gemüsen sowie in typischen lokalen Gerichten gemessen. Ferner wurde die Fe- und Kalziumkonzentrationen ausgesuchter Reisproben und Gemüse vor und nach dem Kochen gemessen. In den Grundnahrungsmitteln lagen die Zn-Konzentrationen bei  $0.88 \pm 0.34$  (gekochter Reis) und  $1.32 \pm 0.16$  mg/ 100 g Trockengewicht (Brot) in der suburbanen Region und  $1.29 \pm 0.45$  und  $1.77 \pm 0.21$  mg/ 100 g Trockengewicht in der ruralen Region.



Das molare PA:Zn-Verhältnis von Fladenbrot lag in der suburbanen Region bei 24 und in der ländlichen Region bei 22. Gekochter Reis und die typischen lokalen Gerichte hatten molare PA:Zn-Verhältnisse zwischen 4 und 13. Unsere Resultate zeigten, dass die Art der lokalen Käseherstellung, das Polieren des Reis und die Brotproduktion einen grossen Einfluss auf die Zn-Konzentrationen in den Nahrungsmitteln haben. Die molaren PA:Zn-Verhältnisse deuten auf eine niedrige Zn-Aufnahme aus dem Fladenbrot, aber eine ungehemmte Absorption aus gekochtem Reis und kombinierten Gerichten hin.

In einem zweiten Schritt haben wir den Zn- und Fe-Versorgungszustand der gleichen Populationen untersucht. Dabei wurde der Zn-Versorgungszustand der erhobenen Zinkaufnahme zugeordnet und die Beziehung zwischen der Zn- und Fe-Versorgung überprüft. In Blutproben von 341 Probanden (27 Kindergartenkinder, 157 Schulkinder, 91 Frauen, 66 Männer) wurden die Konzentrationen von Zn und Ferritin im Serum, die totale Eisenbindekapazität, und der Hämoglobingehalt (Hb) bestimmt. Die tägliche Zn-Aufnahme wurde anhand des „3-day weighed food records“ berechnet, der aus der vorhergehenden Untersuchung bekannt war. Durchschnittlich waren 5.9% der ruralen und 7.2% der suburbanen Bevölkerung von Zn-Mangel betroffen. Die Verbreitung von Fe-Mangel lag bei 27% in der ruralen und 31% in der suburbanen Gemeinde. Es existierte eine positive Korrelation zwischen der Zn-Konzentration und den Hb-Gehalten, aber keine Korrelation zwischen der Zn- und Fe-Eisenkonzentration im Blut. Die Verbreitung von Anämie war stärker in der ruralen als in der suburbanen Gemeinde (33.5% vs. 22.7%;  $p=0.04$ ). Fast die Hälfte der Anämiefälle in der suburbanen und 36% der Fälle in der ruralen Gemeinde waren durch Fe-Mangel verursacht. Die Hämoglobinwerte korrelierten stark mit den Zn-Konzentrationen im Blutserum. Die geringe Verbreitung von Zinkmangel war unerwartet, könnte aber durch eine relativ hohe Zn-Aufnahme über tierische Lebensmittel erklärt sein. Anämie betraf 30% der Probanden, allerdings war sie bei weniger als der Hälfte davon durch Fe-Mangel verursacht. Da Zn eine Rolle bei der Produktion von roten Blutkörperchen spielt und es keine Korrelation zwischen der Zn- und Fe-Versorgung gab, ist es möglich dass Zn-Mangel eine unabhängige Ursache für Anämie war. Das Fehlen einer Korrelation zwischen Fe- und Zn-Versorgung könnte im hohen Konsum von Milchprodukten und Tee begründet sein.

Im letzten Schritt haben wir ein Modell für die Evaluation von unterschiedlichen Massnahmen zur Verminderung von Zn-Mangel durch eine verbesserte Nahrungsaufnahme von Zn entwickelt, und haben die Anwendbarkeit des Modells auf unsere Testpopulation evaluiert. Das Modell bestimmt die Nahrungsaufnahme von Zn für verschiedene, vom Nutzer-

definierte Bevölkerungsgruppen anhand des molaren PA:Zn-Verhältnisses als Indikator für die Zn Bioverfügbarkeit, und berücksichtigt Daten-Unsicherheiten durch eine Monte-Carlo Simulation. Basierend auf den Daten der beiden ersten Untersuchungen, nationalen iranischen Statistiken und weiterer verfügbaren Quellen wurde das Modell benutzt um das Risiko von Zn-Mangel in der Beispielpopulation zu bestimmen und verschiedene zukünftige Entwicklungsszenarien zu vergleichen. Die Szenarioanalyse ergab, dass es bis zu 60 Jahren dauern würde bis 97.5% der Bevölkerung ausreichend mit Zn versorgt wären, wenn der Verbrauch der Hauptnahrungsmittel weiterhin mit den derzeitigen exponentiellen Raten steigen würde. Mit der Zn-Anreicherung von Weizenmehl könnte dieses Ziel theoretisch in 15 Jahren erreicht werden. Nach der Szenarioanalyse wäre Biofortifikation die zweitbeste Alternative, hier wären nach 15 Jahren nur noch 12% der Bevölkerung durch Zn-Mangel gefährdet.

Die Szenarioanalyse hat gezeigt, dass das Zn Aufnahmemodell, das hier entwickelt wurde, ein hilfreiches Werkzeug für die Analyse von möglichen Zukunftstrends ist, und bei Design und Evaluierung von passenden und effizienten Massnahmen, wie (Bio-)Fortifikation, unterstützend mitwirken kann. Unsere Arbeit hat gezeigt dass eine Unsicherheitsanalyse in solchen Studien entscheidend ist.