



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

TRANSFER VON ELEMENTEN IN DIE MUTTERMILCH

BMU - 2005-654



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2005-654

„Transfer von Elementen in die Muttermilch“

Dipl.-Ing. Simone Wünschmann

Dipl.-Ing. Ina Kühn

Heike Heidenreich

Dr. rer.nat. Stefan Fränze

Dr. rer.nat. Olaf Wappelhorst

Univ.-Prof. Dr. rer. Nat. Bernd Markert

Internationales Hochschulinstitut Zittau

**(Lehrstuhl Umweltverfahrenstechnik Fachgruppe Human- und
Ökotoxikologie)**

IMPRESSUM

Dieser Band enthält einen Abschlussbericht über ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BMU übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Eigentümer behält sich alle Rechte an der weiteren Nutzung oder Vervielfältigung des Berichts vor.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BMU übereinstimmen.

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Referat RS I 2

Postfach 12 06 29

53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2005

IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR STRAHLENSCHUTZ

Forschungsbericht StSch 4258 April 2003

Transfer von Elementen in die Muttermilch

von

Dipl.-Ing. Simone Wünschmann*

Dipl.-Ing. Ina Kühn

Heike Heidenreich

Dr. rer. nat. Stefan Fränze

Dr. rer. nat. Olaf Wappelhorst

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Bernd Markert

Internationales Hochschulinstitut Zittau

Lehrstuhl Umweltverfahrenstechnik

Fachgruppe Human- und Ökotoxikologie

Anmerkung

Dieser Bericht ist vom Internationalen Hochschulinstitut Zittau im Auftrag des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Rahmen des Vorhabens StSch 4258 erstellt worden. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren. Der Eigentümer behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des Auftraggebers zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Dieser Bericht gibt die Meinung und Auffassung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des auftraggebenden Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit übereinstimmen.

* Korrespondenzautorin: Dipl.-Ing. Simone Wünschmann, e-mail: wuenschmann@ihi-zittau.de

Kurzfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurde der Übergang verschiedener Elemente aus der Nahrung der Mutter in die Muttermilch untersucht. Die aus der Untersuchung für stabile Elemente abgeleiteten **Transferfaktoren (TF)** Nahrung/Muttermilch werden im Strahlenschutz auf Radionuklide angewendet, um eine mögliche Strahlenexposition des Säuglings durch den Verzehr von Muttermilch abzuschätzen. Insgesamt nahmen in den Jahren 1998-2001 23 Mütter (mature Laktationsphase) im wesentlichen aus der Euroregion Neißة (PL, CZ, D) über einen Untersuchungszeitraum von 2-8 Wochen an dieser Studie teil, von denen insgesamt 8805 Lebensmittel- und Muttermilchproben analysiert wurden. Die Ermittlung der täglichen Elementaufnahme erfolgte hierbei mittels Duplikatmethode. Anhand der ermittelten TF der Elemente Ag, Au, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, I, La, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Ra*, Rb, Re*, Ru, Sb, Sr, Te*, Th, Ti, U, Y, Zn und Zr zeigten theoretische Überlegungen, dass der Übertritt der Metallionen in die Frauenmilch in komplexierter Form erfolgt und dass der TF mit der relativen Stabilität der Komplexe ansteigt. Daher kann vermutet werden, dass eine Gefährdung des gestillten Kindes insbesondere durch die toxikologisch relevanten Elemente wie Cd, aber auch Ba nicht zu befürchten ist. Neben den Hinweisen auf eine homöostatische Regulation insbesondere der Elemente Cu, Fe und Zn konnten darüber hinaus zeitliche Verschiebungen zwischen der Aufnahme über die mütterliche Nahrung und Deposition in der Milch für ausgewählte Elemente geschätzt werden. Des weiteren zeigte sich, dass die Elementzufuhren der essentiellen Elemente bei ausschließlicher Zufuhr über die Muttermilch im Vergleich zu den Empfehlungswerten für Säuglinge < 4 Monate (Ausnahme Fe, Mo und evtl. Mn) zufriedenstellend waren, jedoch mit zunehmendem Alter (> 4 Monate) bei einer Zufuhr ausschließlich über die Muttermilch als defizitär betrachtet werden müssen.

This research project was to derive data concerning the extent of transfer of various chemical elements from maternal food into human milk. **Transfer factors** (hereafter TF) food/mother's milk were then taken to represent those of nuclides pertinent to radiation protection to estimate possible radioactive burdens of breast-fed babies. A total of 23 mothers mainly from the Euroregion Neisse (PL, CZ, D; all being in their mature phases of lactation) took part in this work (1998-2001) for periods of time between two and eight weeks (8805 samples were analysed). The diurnal uptake of elements was determined by means of duplicate method. TF values thus determined for Ag, Au, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, I, La, Mn, Mo, Nb, Ni, P, Pb, Ra*, Rb, Re*, Ru, Sb, Sr, Te*, Th, Ti, U, Y, Zn, Zr were used for a theoretical analysis. According to the latter approach metal ions undergo transfer into mother's milk mainly in coordinated states (i.e. bound to anionic ligands), with TF values increasing with complex stabilities. Thus presumably neither Cd nor Ba, both forming but weak complexes, pose hazards to breast-fed children. There are indications for homeostatic regulation in Cu, Fe and Zn; moreover time delays between uptake by maternal food and delivery into milk could be calculated for several elements. Additional comparisons with RDI values for babies showed that supply by mother's milk solely would suffice at ages < 4 months except for Fe, Mo and possibly Mn whereas at > 4 months exclusive breast-feeding might bring about deficits in mineral supplies.

*: die Ergebnisse dieser Elemente waren nicht beurteilbar / the results concerning these elements could not be taken under consideration

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Ziele des Forschungsvorhabens	3
2. Material und Methoden	4
2.1 Probenahmegebiet.....	4
2.2 Probenahme.....	4
2.2.1 Werbung von Probandinnen.....	4
2.2.2 Probandinnen.....	4
2.2.3 Lebensmittel- und Muttermilchproben.....	6
2.2.3.1 Fehlerquellen bei der Probenahme.....	7
2.2.3.2 Lagerung.....	7
2.3 Probenvorbereitung.....	8
2.3.1 Lebensmittelproben.....	8
2.3.1.1 Homogenisation.....	8
2.3.1.2 Mikrowellenaufschluss und Iod-Extraktion.....	8
2.3.2 Muttermilchproben.....	10
2.3.2.1 Dichtebestimmung.....	10
2.3.2.2 Trockenmassebestimmung durch Gefriertrocknung.....	10
2.3.2.3 Mikrowellenaufschluss und Iod-Extraktion.....	10
2.4 Instrumentelle- und Multielementanalytik.....	11
2.4.1 Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS).....	11
2.4.2 Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES).....	12
2.4.3 Qualitätssicherung der instrumentellen Bestimmung.....	13
2.5 Berechnungsmethoden.....	14
2.5.1 Transferfaktor Nahrung/Muttermilch.....	14
2.5.1.1 Tägliche Elementaufnahme durch die verzehrten Lebensmittel	14
2.5.1.2 Berechnung der Elementkonzentration in der Muttermilch	14
2.5.1.3 Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch	15
2.5.2 Elementzufuhr des gestillten Kindes über die Muttermilch.....	15
2.5.3 Statistische Methoden.....	16
2.5.3.1 Logarithmische Transformation.....	16
2.5.3.2 Box-Plots.....	16
2.5.3.3 Korrelationsanalysen.....	16

3. Ergebnisse	17
3.1 Qualitätssicherung des Datenmaterials	17
3.1.1 Referenzmaterialien	17
3.1.2 Nachweis- und Bestimmungsgrenze	17
3.2 Gesamtverzehrmenge und Elementaufnahme über die Nahrung	19
3.3 Einzelelementbetrachtungen	20
3.3.1 Barium (Ba)	20
- Quantifizierung der täglichen Elementaufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Elementkonzentration in der Muttermilch	
- Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch	
- Ermittlung der täglichen Elementzufuhr des Säuglings mit der Muttermilch	
3.3.2 Blei (Pb)	23
3.3.3 Cadmium (Cd)	26
3.3.4 Cäsium (Cs)	29
3.3.5 Eisen (Fe)	32
3.3.6 Gold (Au)	35
3.3.7 Iod (I)	38
3.3.8 Kupfer (Cu)	44
3.3.9 Mangan (Mn)	47
3.3.10 Nickel (Ni)	50
3.3.11 Phosphor (P)	53
3.3.12 Rhenium (Re)	56
3.3.13 Rubidium (Rb)	57
3.3.14 Strontium (Sr)	60
3.3.15 Tellur (Te)	63
3.3.16 Yttrium (Y)	64
3.3.17 Zink (Zn)	67
3.3.18 Zirkonium (Zr)	70
3.3.19 Auswertung der Elementdaten aus der Projektphase I (1998-2000) (Ag, Ce, Co, Cr, Ga, La, Mo, Nb, Ra, Ru, Sb, Th, Ti, U)	73
3.4 Multielementbetrachtung	77
3.4.1 Verteilung der Elemente in Lebensmitteln und Muttermilch	77
3.4.1.1 Ermittelte Elementaufnahmemengen über die mütterliche Nahrung und Elementkonzentrationen in der Muttermilch	77
3.4.1.2 Zusammenfassender Vergleich der ermittelten Elementaufnahmemengen über die mütterliche Nahrung und Elementkonzentrationen in der Muttermilch mit Literaturangaben	78
3.4.1.3 Unterschiede in den ermittelten Elementgehalten in der mütterlichen Nahrung und Muttermilch zwischen den Müttern	79
3.4.2 Interelementare Korrelationen in Lebensmitteln und Muttermilch	79

3.4.3	Experimentell ermittelte Transferfaktoren Nahrung/Muttermilch	81
3.4.3.1	Klassifikation nach chemischen Kriterien	81
3.4.3.2	Interindividuelle Variation, Minimum- und Maximumwerte	82
3.4.3.3	Abhängigkeit von der Laktationszeit – Komplexierung der Metallionen? ..	82
3.4.3.4	Supplementationseinfluss	83
3.4.4	Elementzufuhr des Säuglings mit der Muttermilch	84
4	Modellbetrachtungen in Bezug auf die Ermittlung des Transferfaktors	86
4.1	Relativierung des Transferfaktors: Konzentrationsabhängigkeit und praktische Konsequenzen	86
4.2	Mobilisierung von Elementen aus körpereigenen Depots	87
4.3	Fraktionierung der chemischen Elemente ausweislich unterschiedlicher Transferfaktorenwerte und Eigenschaften der Brustdrüsenmembran: elektrostatische Effekte auf Kat- und Anionen (Nichtmetalle, Oxometallate [z.B. Molybdän])	87
4.4	Zeitliche Verschiebung und Lebensdauer der zu betrachtenden Radionuklide: gelangen die Nuklide durch die Nahrungskette bis zum Säugling?	88
4.5	Homöostatische Regulierung und Wechselwirkung von Elementen	91
4.6	Supplementationseffekte	91
4.7	Möglichkeit der Kontrolle des Transferfaktors von Spaltradionukliden durch gezielte Supplementation mit anderen Elementen (I, Fe)	92
4.8	Vorhersage theoretischer Transferfaktoren anhand eines vereinfachten Komplexbildungsmodells	92
4.9	Korrelationen zwischen Komplexstabilitäten und dem Transferfaktor	94
5	Bewertung der ermittelten Transferfaktoren	97
6	Zusammenfassung	99
7	Literaturverzeichnis	101
8	Anhang	105
8.1	Elementgehalte Lebensmittel	105
8.2	Elementgehalte Muttermilch	107
8.3	Ermittelte Transferfaktoren	108
8.4	Elementspezifische Konzentrationen in ausgewählten Lebensmitteln	109
8.5	Elementspezifische Blutkonzentrationen	118
8.6	Handzettel zur Werbung von Probandinnen	119
8.7	Fragebogen für die Probandinnen	120
8.8	Arbeitsphasen und Zeitplanung des Forschungsvorhabens	122

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Säugetiere einschließlich des Menschen unterscheiden sich von fast allen übrigen¹ durch ein besonderes Brutpflegeverhalten, das vom Mutterorganismus ausgewählte Nahrung(-bestandteile) in chemisch stark modifizierter Form (anders als die Kropffütterung bei Vögeln) an den Nachwuchs weiter gibt: Das Säugen der Kinder, das so charakteristisch ist, dass ihm die gesamte Tierklasse ihren deutschen ebenso wie den englischen (*mammals*, *mamma* = Brust), polnischen (*ssak*; Verbform *ssac* = saugen) etc. Namen verdankt.

Mit der mütterlichen Nahrungsauswahl ist eine auch beim Menschen zumeist unbewusste Auswahl von Inhaltsstoffen verbunden; dies betrifft anorganische und organische Stoffe in ganz ähnlicher Weise, so lange die Begleitstoffe nicht Geschmack, Geruch, Haltbarkeit des Nahrungs- oder Futtermittels negativ beeinflussen, was bei den hier zu diskutierenden Leicht- und Schwermetallen nicht der Fall ist. Auch sind Organismen bei der Anreicherung und Weiterleitung (Stillen, Honigproduktion, Nahrungskette) von Inhaltsstoffen ihrer Nahrung offensichtlich nicht in der Lage, essentielle Substanzen gegenüber anderen, u.U. bereits in kleinen Mengen toxischen, positiv auszuwählen² und entsprechend anzureichern, was auch die Länge von Nahrungsketten begrenzt. Das Stillverhalten von Säugern kann als Sonderfall einer solchen Nahrungskette angesehen werden. Eine Abtrennung unnötiger oder unzuträglicher anorganischer Komponenten erfolgt auch deshalb nicht, weil die relativ wenigen unterschiedlichen Transportmechanismen bzw. Transport"vehikel" (Bindungspartner wie Transferrin, Albumine, Metallothioneine) jeweils für eine Vielzahl von Substanzen – einschließlich deren etwa unterschiedlicher Oxidationsstufen – und somit weitgehend unspezifisch wirksam sind.

Dies erlaubt es umgekehrt, die im Rahmen dieses Projektes gefundenen Regelmäßigkeiten des Transports anorganischer Stoffe in die Muttermilch mithilfe relativ einfacher Modelle der anorganischen Chemie (z.B. mithilfe von Komplexbildungskonstanten der betreffenden Sätze von Metallionen) zu beschreiben und hieraus **Vorhersagen** für weitere, insbesondere toxische (Hg, Platinmetalle) oder wegen ihrer Radioaktivität problematische Stoffe ([zumindest dreiwertige] Actinoiden, Spaltradionuklide einschließlich der Elemente Technetium und Promethium, die keine stabilen Isotope haben) herzuleiten.

Als empirischer Parameter dient in dieser Untersuchung der sogenannte **Transferfaktor Nahrung/Muttermilch**, der den Übergang von chemischen Elementen aus der mütterlichen Nahrung in

¹ Ausnahmen sind hier nur einige Fische (insbesondere Buntbarsche der Gattungen *Symphysodon* und *Uaru*), deren Larven mit speziell produzierten Hautsekreten ernährt werden, sowie Staaten bildende Insekten wie Bienen und Hummeln (Produktion von Honig und „Weiselmilch“).

² Dies ist nur ein Spezialfall eines allgemeineren Erfahrungssatzes hinsichtlich der evolutionären „Optimierung“ der Nutzung von Metallen in der Biologie: der unter chemischen Aspekten ideale Zustand ist nur bei einzelnen evolutionär und biochemisch sehr alten Umsetzungen erreicht, ansonsten werden von lebenden Organismen nach wie vor nicht optimal geeignete Katalysatoren verwendet (Fränze et al. (2003b), Publikation in Vorbereitung).

die Muttermilch kennzeichnet und dabei definiert wird als Konzentration in der Frischsubstanz Muttermilch [$\mu\text{g}/\text{kg}$] im Verhältnis zur täglichen Zufuhr des Elementes [$\mu\text{g}/\text{d}$] unter Gleichgewichtsbedingungen.

Die aus der Untersuchung stabiler Elemente (s. Zielstellungen) abgeleiteten Transferfaktoren werden im Strahlenschutz auf radioaktive Isotope angewendet, um die mögliche Strahlenexposition eines Säuglings durch den Verzehr von Muttermilch zu berechnen. Dabei wird unterstellt, dass sich die Biokinetik radioaktiver und stabiler Isotope eines Elementes nur geringfügig unterscheidet. Radioaktive Isotope sind, sofern sie nicht extrem langlebig sind, im Vergleich zu den stabilen Isotopen wegen ihrer geringen Stoffmenge als „Verunreinigung“ zu betrachten. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Transport- und Übergangsverhalten eines radioaktiven und eines stabilen Isotopes (des gleichen Elementes) in der Nahrung und in der Muttermilch gleich sind (Ausnahme: Tritium). Aus der „Verdünnung“ der radioaktiven Isotope durch stabile Isotope des gleichen Elements resultiert eine lineare Beziehung zwischen der täglichen Aufnahme eines **radioaktiven** Isotops mit der mütterlichen Nahrung und dessen Konzentration in der Muttermilch. Dies gilt unabhängig von einer eventuellen homöostatischen Regulierung des Elementgehalts in der Muttermilch, sofern die tägliche Zufuhr stabiler Isotope gleich bleibt.

Bei **stabilen** Isotopen muss diese lineare Transferbeziehung, insbesondere in bestimmten Konzentrationsbereichen oder unter dem stets gegebenen Einfluss anderer Komponenten, nicht zutreffen. Dies eröffnet zusätzliche Handlungsperspektiven: wenn die vermehrte Zufuhr eines bestimmten Elementes (Zn, Fe, I etc.) den Übertritt anderer, insbesondere toxischer wie Cd, Pb oder Ba in die Muttermilch hemmt, kann dies dazu genutzt werden, den Säugling durch Supplementation bei der Mutter zu schützen, selbst wenn der dafür Ausschlag gebende Mechanismus nicht bekannt ist.

Dies ist eine handlungsorientierte Dimension der Untersuchungen; formal gesehen ließe sich anstelle eines einzelnen Zahlenwerts für den Transferfaktor selbstverständlich auch ein Polynom höheren (mindestens zweiten) Grades angeben, das diese Zusammenhänge explizit numerisch berücksichtigt. Die Angabe solcher Polynome bedürfte aber noch einer breiteren Datenbasis. Daher wird hier am „einfachen“ Transferfaktor fest gehalten. Die Datenanalyse stützt sich dabei auf geometrische Mittelwerte. Die Ausnahme ist Iod, wo arithmetische Mittelwerte berechnet wurden.

Bereits im Jahr 1998 beauftragte das Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, das Internationale Hochschulinstitut Zittau im Rahmen einer ‚Machbarkeitsstudie‘, Transferfaktoren spezifischer Elemente (s.u.) zu ermitteln (Projektphase 1 1998-2000). Im vorliegenden Bericht (Projektphase 2 2000-2002) werden diese Ergebnisse mit den hier zu ermittelnden Transferfaktoren (s.u.) dargelegt und diskutiert.

1.2 Zielstellungen des Forschungsvorhabens

Folgende Zielstellungen werden mit den hier vorliegenden Untersuchungen verfolgt:

1. Quantifizierung der täglichen Elementaufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Elementkonzentration in der Muttermilch (Zeitraum: 2-8 Wochen);
2. Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch der Elemente *Eisen (Fe)*, *Iod (I)*, *Kupfer (Cu)*, *Mangan (Mn)*, *Nickel (Ni)*, *Zink (Zn)*, *Phosphor (P)*, *Barium (Ba)*, *Cadmium (Cd)*, *Cäsium (Cs)*, *Blei (Pb)*, *Gold (Au)*, *Rubidium (Rb)*, *Rhenium (Re)*, *Strontium (Sr)*, *Tellur (Te)*, *Yttrium (Y)* und *Zirkonium (Zr)*;

[aus der Projektphase 1998-2000 (StSch4155): *Antimon (Sb)*, *Cer (Ce)*, *Cobalt (Co)*, *Chrom (Cr)*, *Gallium (Ga)*, *Lanthan (La)*, *Molybdän (Mo)*, *Niob (Nb)*, *Radium (Ra)*, *Ruthenium (Ru)*, *Silber (Ag)*, *Thorium (Th)*, *Titan (Ti)* und *Uran (U)*]

kursiv: essentielle Elemente

3. Ermittlung der Elementzufuhr des gestillten Säuglings mit der Muttermilch sowie die Ermittlung des Anteils des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Elementes.

Darüber hinaus werden folgende Zielstellungen abgeleitet:

4. Untersuchung möglicher Effekte einer Supplementation (mit I, Zn oder Fe) auf das Transferverhalten;
5. Berechnung der zeitlichen Verschiebung beim Elementtransfer in die Muttermilch;
6. Untersuchungen zur homöostatischen Regulierung einzelner Elemente;
7. Erstellung von Modellen zur Vorhersage von Transferfaktoren für weitere Elemente.

Tiefgreifende Erkenntnisse über die hoch komplexen physiologischen Prozesse im menschlichen Körper wie z.B. die Frage nach der chemischen Bindungsform, Transportprozesse, etc. der Elemente könnten aufbauend auf dieser Datenlage der Transferfaktoren entwickelt werden. Ansatzpunkte dafür werden im Kapitel ‚Modellbetrachtung‘ dieser Studie anhand eines vereinfachten Komplexbildungsmodells angeführt.

2 Material und Methoden

2.1 Probenahmegebiet

Die Lebensmittel- und Muttermilchproben von insgesamt 23 Müttern stammten im wesentlichen aus der Euroregion Neiße (Abb. 1), die Teile der Bundesrepublik Deutschland, der Tschechischen Republik und der Republik Polen umfasst. Bis Anfang der 90er Jahre war diese Region Teil des „Schwarzen Dreiecks“, das sich durch eine extrem hohe atmosphärische Staubbelastung (Braunkohle als häuslicher Energieträger) auszeichnete (Wappelhorst et al. 1999). Durch ein Moosbio-monitoring (Konzentrationsmessungen 37 stabiler Elemente) aus den Jahren 1995/96 kamen Wappelhorst et al. (2000) zu dem Ergebnis, dass die atmosphärischen Depositionen dieser Elemente in der Euroregion Neiße mit denen anderer mäßig belasteter Regionen Mitteleuropas vergleichbar sind. Lediglich die Fe- und Ti-Immissionen lägen über dem europäischen Durchschnitt. Die Auswahl des Untersuchungsgebietes ergab sich aus der regionalen Position der Institution des Auftragnehmers.



Abb. 1: Die Euroregion Neiße im Dreiländereck Deutschland, Polen und der Tschechischen Republik.

2.2 Probenahme

2.2.1 Werbung von Probandinnen

Ein wesentlicher Aspekt während der gesamten Projektlaufzeit war die Werbung von geeigneten Probandinnen. Dazu wurden Handzettel entworfen, um das Interesse junger Mütter am Projekt zu wecken, die zunächst in Zittau und Umgebung, später auch im Gebiet von Görlitz und Löbau, bei Kinderärzten, Gynäkologen, Hebammen, Geburtskliniken und Stillgruppen ausgelegt wurden. Mütter, die am Projekt interessiert und zur Teilnahme bereit waren, wurden ausführlich über das Ziel der Untersuchung und die Art der Zusammenarbeit unterrichtet. Es nahmen nur Mütter teil, die trotz der zusätzlichen Belastung von ihrer Projektteilnahme überzeugt waren.

2.2.2 Probandinnen

Im gesamten Projektzeitraum nahmen insgesamt 23 Probandinnen für je 2 bis 8 Wochen an den Untersuchungen teil. In Tab. 1 sind der jeweilige Probenahmezeitraum, Wohnort, Alter und die Anzahl der Kinder angegeben. Tab. 1 enthält außerdem das Alter des gestillten Kindes, Geburtsgewicht und Geburtsgröße. Ein Zeitraum von 2 Wochen ist als Mindestuntersuchungsumfang an-

zusehen, da sich bei einer kürzeren Periode einzelne Lebensmittel mit extremen Elementgehalten unverhältnismäßig auf das Ergebnis auswirken könnten. Eine mögliche zeitliche Verschiebung zwischen der Aufnahme eines Elementes mit der Nahrung und der Abgabe in die Milch kann ebenfalls nur bei längeren Untersuchungszeiträumen ermittelt werden.

Die geographische Lage Zittaus ermöglichte auch Müttern aus der Republik Polen und der Tschechischen Republik an dem Projekt teilzunehmen, so dass des weiteren auch die Möglichkeit einer geographischen Differenzierung bestand. Das Durchschnittsalter der durchweg **nichtrauchenden** Probandinnen betrug 29 Jahre. Die Schwangerschaften und Entbindungen verliefen komplikationslos. Während des Untersuchungszeitraumes wies der jüngste gestillte Säugling ein Alter von 2 Wochen und das älteste gestillte Kind ein Alter von 71,2 Wochen auf. Die untersuchten Mütter befanden sich somit in der maturen Laktationsphase (ab dem 14. Tag nach der Geburt). Mütter, die sich in der kolostrumen (die ersten 5 Tage nach der Geburt) oder transitorischen Laktationsphase (6-10 Tage nach der Geburt, Bates und Prentice 1994) befanden, konnten aufgrund fehlender Bereitschaft nicht für dieses Projekt geworben werden.

Tab. 1: Angaben zu den am Projekt beteiligten Müttern und Kindern.

^a: Probandinnen, bei denen zusätzlich das Element Iod gemessen wurde; ^b: zu Beginn des Untersuchungszeitraumes

	Angaben zur Probandin				Angaben zum Kind		
	Probenahmezeitraum in Wochen	Wohnort	Alter	Anzahl weiterer Kinder	Alter in Monaten ^b	Geburtsgewicht in g	Geburtsgröße in cm
A ^a	3,6	Dürrhennersdorf (D)	29	1	0,6	4150	54
B	2,0	Hörnitz (D)	29	1	3,3	4220	53
D	2,0	Swierzawa (PL)	27	0	2,5	3500	54
E ^a	4,0	Olbersdorf (D)	33	1	1,0	3210	51
F ^a	2,0	Olbersdorf (D)	33	4	6,0	3320	52
G ^a	2,6	Waltersdorf (D)	33	2	7,0	3660	53
H	8,0	Bogatynia (PL)	38	2	2,8	2800	50
I	6,1	Waltersdorf (D)	28	1	8,2	2980	50
J ^a	4,0	Olbersdorf (D)	24	1	6,6	4040	52
K ^a	2,0	Sohland (D)	27	0	1,8	2480	49
L	2,0	Bad Oldesloe (D)	30	0	4,4	3610	52
M	2,0	Görlitz (D)	26	1	3,5	2900	49
N	4,0	Bogatynia (PL)	37	2	16,4	3200	52
O	2,0	Bogatynia (PL)	25	0	11,3	4300	54
P	4,0	Bogatynia (PL)	30	1	6,8	3800	61
Q	2,0	Zittau (D)	24	1	1,4	3600	50
R ^a	2,0	Olbersdorf (D)	35	2	4,9	3780	52
T ^a	1,6	Novy Bor (CZ)	23	0	5,6	4050	53
U	2,3	Delligsen (D)	28	1	3,6	3200	52
V ^a	2,0	Zittau (D)	25	0	1,7	3570	52
W ^a	2,0	Bogatynia (PL)	27	1	1,5	3500	54
Y	2,0	Schönbach (D)	34	3	1,0	3140	46
Z	2,0	Schlegel (D)	24	0	0,4	3040	48

2.2.3 Lebensmittel- und Muttermilchproben

Jeder Probandin wurde ein Buchstabe (A-Z) zugeordnet, unter dem die jeweiligen Proben und Analysenergebnisse codiert wurden. So konnte für die am Projekt teilnehmenden Mütter der Datenschutz gewahrt werden und eine übersichtliche Trennung der zu untersuchenden Proben erfolgen. Die Mütter, denen ursprünglich die Buchstaben C, S und X zugeordnet wurden, sind aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit bei der Probenabgabe nachträglich ausgeschlossen worden.

Zur Ermittlung der mit der Nahrung aufgenommenen Mengen der Elemente müssen Teile der Lebensmittel analysiert werden, die die beteiligten Mütter verzehren (Duplikatmethode³). Um eine gute Compliance zu erzielen, war dieser Teil der Probenahme so gestaltet, dass die Teilnehmerinnen ihn problemlos selbständig durchführen konnten. Folgende Hilfsmittel standen zur Verfügung:

- Polyethylengefäße unterschiedlicher Größe,
- Protokollbögen und Etiketten für die Lebensmittel- und Muttermilchproben (fortlaufend beschriftete Etiketten zum Kennzeichnen der Probengefäße),
- Waage ($M_{\max} = 1200$ g, Genauigkeit $\pm 0,1$ g),
- Milchpumpe (bei Bedarf).

Zur Bestimmung des verzehrten Anteils eines *Lebensmittels* wurde von den Probandinnen ein Teller oder ein Glas auf die Waage gestellt, diese auf Null tariert und nach dem Auf- oder Einfüllen das Gewicht abgelesen. Durch diese Methode konnte eine möglichst genaue Ermittlung der verzehrten Menge bei gleichzeitiger appetitlicher Zubereitung erfolgen.

In den Protokollbogen wurden alle verzehrten Speisen und Getränke mit Datum, Uhrzeit, Art der Lebensmittel, Mengen in g und Probengefäßnummer (z.B. A1 für die erste Probe der Mutter A) fortlaufend eingetragen. Die Probengefäße wurden mit dem entsprechenden Etikett gekennzeichnet. Lebensmittel, die im Laufe der Teilnahme wiederholt verzehrt wurden und bei denen von einer gleichen Zusammensetzung ausgegangen werden konnte, wie z.B. Mineralwasser, Fruchtsaft eines Herstellers mit gleichem Verfallsdatum oder Losnummer oder der Käse, der über mehrere Tage verteilt konsumiert wird, wurden nur einmal in ein Probengefäß gefüllt. Bei erneutem Verzehr wurde in das Protokoll die Nummer der abgefüllten Probe und die Verzehrmenge eingetragen.

Die *Muttermilchprobe* wurde einmal pro Tag (von beiden Brüsten) gesammelt und im Plan mit Datum, Uhrzeit und Gefäßnummer notiert. Dabei sollte die Milchprobe nach Möglichkeit immer zur gleichen Tageszeit gesammelt werden. Wenn bei einem Abpumpvorgang nicht ausreichend Milch (je 30-50 ml) gesammelt werden konnte, wurde dieser mehrmals pro Tag wiederholt.

³ Hierbei werden Duplikate der tatsächlich verzehrten Nahrung in einem definierten Zeitraum (in dieser Studie 2-8 Wochen) untersucht. Mit dieser Methode können die tägliche Zufuhr und der Verlauf der Elementaufnahme während des gesamten Untersuchungszeitraumes angenähert erfasst werden. Vergleichbare Ansätze, die zur Abschätzung der individuellen Zufuhr von Elementen eingesetzt werden, wie z.B. die auf retrospektive Befragung (*dietary history*) oder Protokollierung (*food research*) basierende Ermittlung des Nahrungsverzehrs, erlauben eine weitaus weniger verlässliche Bestimmung der täglichen Zufuhr von Elementen, da hierbei sekundäre Einflüsse wie z.B. die individuelle Zubereitung von Speisen unberücksichtigt bleiben.

In Absprache mit den Teilnehmerinnen wurden die gesammelten Lebensmittel- und Muttermilchproben ein- bis zweimal pro Woche abgeholt und ins Labor transportiert. Jede Teilnehmerin erhielt einen Fragebogen, um für die spätere Auswertung der Ergebnisse wichtige Angaben zur Mutter und zum Kind zu erfassen.

Dieser beinhaltete:

- Angaben zur Person: Name, Wohnort, wohnhaft seit, vorherige Wohnorte, Ort und Zeitraum, Alter, Größe, Gewicht, ausgeübter Beruf, ggf. Exposition gegenüber Schadstoffen am Arbeitsplatz
- Angaben zum Kind: Geburtsdatum des Kindes, Geburtsgewicht, Größe
- Ernährungsgewohnheiten: Hat sich die Ernährung während der Schwangerschaft oder nach der Geburt geändert? Haben sich durch das Abwiegen der Nahrung die Essgewohnheiten verändert? Werden im Untersuchungszeitraum Medikamente eingenommen? Rauchen Sie?

Für die polnischen und tschechischen Mütter wurden die Anweisungen, Protokoll- und Fragebögen übersetzt, um sprachlichen Missverständnissen vorzubeugen. Die ausgefüllten Speisepläne und Fragebögen wurden für die Auswertung ins Deutsche übersetzt.

2.2.3.1 Fehlerquellen bei der Probenahme

Trotz einer detaillierten Erläuterung musste damit gerechnet werden, dass die Probandinnen die Anweisungen nicht immer korrekt befolgten. Die abgefüllten Lebensmittelproben mussten zur Ermittlung der Aufnahme genau die gleiche Zusammensetzung wie die verzehrten Proben haben. Dieses war nicht immer einfach zu gewährleisten, z.B. durch unterschiedlich große Fleischstücke, ungleiches Verhältnis von Soße und Kartoffeln, etc. oder es wurde etwas weniger von der bevorzugten Speise in das Gefäß gefüllt.

Ein weiterer Fehler, der bei der Kontrolle der Probengefäße auffiel, war eine zu gering abgefüllte Menge. Bei der Analyse ergaben sich dadurch größere Fehler als bei einer ordnungsgemäßen Probenmenge zu erwarten gewesen wären. Auch entsprach bei einigen Proben der Inhalt nicht der Eintragung im Protokollbogen. Diese Fehler konnten in den Fällen korrigiert werden, bei denen eine Verwechslung der Probengefäße vorlag.

Dagegen waren fehlende Proben sehr selten, da dies schon bei der Abholung auffiel und nach Möglichkeit korrigiert wurde. Der Grund des Fehlens war meistens der Verzehr von Süßigkeiten durch ältere Kinder. Außerdem konnten bei der Angabe der Verzehrsmengen Fehler entstehen, wenn nicht verzehrte Anteile von der vor dem Essen gewogenen Menge nicht abgezogen wurden.

2.2.3.2 Lagerung

Die Gefäße wurden von den Probandinnen bis zur Abholung in einer haushaltsüblichen Tiefkühltruhe oder einem Gefrierschrank tiefgekühlt (-18°C) zwischengelagert. Unter Kühlung wurden die Proben ins Labor gebracht und dort bis zur Analyse bei -20°C aufbewahrt.

2.3 Probenvorbereitung

Die Probenvorbereitung wurde aufgrund der sich stark unterscheidenden Elementkonzentrationen getrennt für die Lebensmittel und die Muttermilch durchgeführt.

2.3.1 Lebensmittelproben

2.3.1.1 Homogenisation

Trink- und Mineralwasser sowie ungesüßter Tee und Kaffee konnten direkt ohne weitere Vorbehandlung mit der ICP-MS auf die Elementgehalte untersucht werden.

Die festen Lebensmittelproben wurden direkt nach dem Auftauen vollständig mit einem Ultra-Turrax feinstzerkleinert. Ein Teil dieser Proben wurde als Rückstellprobe wieder eingefroren, um möglicherweise notwendige Wiederholungsmessungen zu ermöglichen.

2.3.1.2 Mikrowellenaufschluss und Iod-Extraktion

Druckunterstützter Mikrowellenaufschluss

Der druckunterstützte Mikrowellenaufschluss bringt einen erheblichen Zeitvorteil gegenüber herkömmlichen Aufschlussmethoden (bei einem weitgehend vollständigen Aufschluss der Matrix). Durch die Verwendung geschlossener Gefäße wird zudem die Gefahr einer Kontamination während des Aufschlusses minimiert. Deshalb ist diese Aufschlussart für eine Arbeit mit hoher Probenanzahl und kontaminationsempfindlichen Proben als Methode der Wahl anzusehen (Lippo & Särkelä 1995; Iyengar 1998).

Die Aufschlüsse wurden mit dem Mikrowellengerät MLS ETHOS plus II 1000/10s (Microwave Lab System GmbH, Leutkirch) und dem Rotor HPR 1000/6 mit Teflongefäßen durchgeführt (Markert 1996; Rhoades 1996; Rossipal & Krachler 1998; Wappelhorst 1999). Von den *Lebensmittelproben* wurden Mengen zwischen 0,4-2,5 g Frischgewicht (je nach Lebensmittelart) direkt in die Aufschlussgefäße eingewogen. Als Aufschlussreagenzien dienten je 4 ml Salpetersäure 65% und je 2 ml Wasserstoffperoxid 30% (beide Merck, suprapur®). Das Aufschlussprogramm des Mikrowellengerätes ist in der Tab. 2 wiedergegeben.

Tab. 2: Eingesetztes Mikrowellenaufschlussprogramm für Lebensmittelproben.

Schritt	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1	3	0 auf 85
2	6	85 auf 145
3	4	145 auf 200
4	12	200
5	15	Kühlung

Nach Abkühlung der aufgeschlossenen Proben wurde die klare Aufschlusslösung in 50 ml Messkölbchen bis zur Marke mit deionisiertem Wasser aufgefüllt. Konnten die Aufschlusslösungen

nicht unmittelbar der instrumentellen Analytik zugeführt werden, erfolgte eine Zwischenlagerung in mit konzentrierter Salpetersäure gereinigten Gefäßen im gefrorenen Zustand bei -20°C .

Iod-Extraktion

Die in der Elementspurenanalyse häufig eingesetzte Mineralisation mit Salpetersäure kann für die Iodbestimmung nicht verwendet werden; eine Oxidation von Iodid zu Iod führt bereits zu Verlusten, die auch beim Arbeiten mit geschlossenen Quarzgefäßen und bei Aufschlusstemperaturen von 300°C beobachtet werden (z.B. High-Pressure-Asher-Aufschluss). Generell beinhalten alle Arten von Aufschlussverfahren wie die Mikrowellen- oder Verbrennungsverfahren Verluste für das Element Iod. Alternativ kann durch Zusatz von alkalischen Agentien das Iod stabilisiert und somit Verdampfungsverluste vermindert werden (Fecher et al. 1999).

Als stark alkalische Lösung hat sich Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) gegenüber einer Ammoniaklösung (Nachteil: Flüchtigkeit und geringe Alkalinität) oder Natriumhydroxidlösung (Nachteil: Interferenzen bei der ICP-MS Messung) in der Analytik durchgesetzt. Basierend auf TMAH als alkalischem Agens wurde ein Extraktionsverfahren (s. Fecher et al. 1999, Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz (LMBG) § 35 1998) entwickelt und mit der ICP-MS als Detektionsmethode kombiniert.

Die festen und flüssigen *Lebensmittelproben* wurden direkt nach dem Auftauen vollständig mit einem Ultra-Turrax feinstzerkleinert. Für die Extraktion wurden jeweils 0,2-2,4 g (je nach Lebensmittelart) in 100 ml Glasgefäße überführt. Die *Muttermilchproben* wurden gefriergetrocknet und mit einer Einwaage von jeweils 500 mg in Glasgefäße eingewogen. Von den gefriergetrockneten Muttermilchproben wurde die Trockenmasse für die Umrechnung bezogen auf Frischgewicht bestimmt.

Die eingewogenen Proben wurden mit je 1 ml Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) und 5 ml deionisiertem Wasser versetzt und mit einem Deckel fest verschlossen. Die Extraktion der Proben erfolgte im Trockenschrank bei einer Temperatur von $90 \pm 3^{\circ}\text{C}$ für 3 Stunden. Da diätetischen Lebensmitteln Iodverbindungen stets in anorganischer Form zugesetzt werden (BGBl 1988), war zu erwarten, dass derartige Zusätze durch TMAH vollständig extrahiert würden. Nach Abkühlen der Proben auf Raumtemperatur wurden diese unter Zusatz von deionisiertem Wasser in 25 ml Maßkölbchen überführt. Um die Analytik beeinflussende größere partikuläre Inhaltsstoffe zu eliminieren, wurden die Proben durch Celluloseacetat-Membranen der Größe 0,45 - 5 μm filtriert (LMBG § 35 1998; Fecher et al. 1999).

Zur Kompensation von Drifterscheinungen während der Messzeit des Elementes Iod mit der ICP-MS wurde den Proben als interner Standard⁴ je 0,5 ml Tellur zugesetzt.

⁴ Der interne Standard gehört nicht zu den Analytelementen, die in einer Probe bestimmt werden sollen. Der interne Standard kompensiert Intensitätsveränderungen durch Matrixeffekte, Drift und Kurzzeitrauschen des Systems.

2.3.2 Muttermilchproben

2.3.2.1 Dichtebestimmung

Für den Mikrowellenaufschluss wurde gefriergetrocknete Milch verwendet. Aus diesem Grund beziehen sich die bei der Analyse ermittelten Elementgehalte auf die Trockenmasse. Um eine Umrechnung der Elementgehalte in der Frischmilch, bezogen auf das Volumen zu ermöglichen, müssen die Dichte und die Trockenmasse der Milch bekannt sein. Zur Ermittlung der Dichte wurde mit einer Analysenwaage die Masse von 5 ml Milch einer jeden Einzelprobe bestimmt.

2.3.2.2 Trockenmassebestimmung durch Gefriertrocknung

Es wurden 20 ml (bzw. bei geringerer Abfüllmenge 15 ml) der jeweiligen Muttermilchprobe in Polyethylen-Gefäße abgefüllt, gewogen und gefriergetrocknet und nach dem Trocknen zur Bestimmung der Trockenmasse der Muttermilch zurückgewogen. Die Aufbewahrung des Milchpulvers erfolgte in luftdicht verschlossenen Polystyrol-Gefäßen. Die durchschnittlich bestimmte Trockenmasse der Muttermilch jeder Probandin sowie die ermittelte Dichte sind in Tab. 3 aufgeführt.

Tab. 3: Trockenmasse und Dichte der Muttermilch. Durchschnitt über den Probenahmezeitraum.

Probandin	Trockenmasse [g/100g]	Dichte [g/ml]	Probandin	Trockenmasse [g/100g]	Dichte [g/ml]
A	12,6	1,02	N	15,1	1,02
B	13,0	1,02	O	10,8	1,03
D	11,4	1,02	P	13,7	1,01
E	14,4	1,02	Q	12,2	1,02
F	13,8	1,02	R	11,8	1,02
G	12,1	1,02	T	11,5	1,03
H	13,3	1,02	U	10,9	1,02
I	11,3	1,02	V	13,9	1,02
J	14,5	1,02	W	14,0	1,03
K	14,4	1,03	Y	12,3	1,02
L	11,9	1,02	Z	11,8	1,03
M	13,1	1,02			

2.3.2.3 Mikrowellenaufschluss und Iod-Extraktion

Druckunterstützter Mikrowellenaufschluss

Die gefriergetrocknete Milch wurde mit je 0,4 g in ein 20 ml Glasgefäß eingewogen, mit 4 ml HNO₃ (Merck, suprapur®) und 2 ml H₂O₂ (Merck, suprapur®) versetzt und anschließend in ein mit 8 ml deionisiertem Wasser, 1 ml H₂O₂ und einem Tropfen HNO₃ aufgefüllten Teflon-Gefäß gestellt. Der Aufschluss erfolgte in der Mikrowelle ETHOS plus II 1000/10s der Fa. MLS GmbH, Leutkirch mit dem in der Tab. 4 angeführten Mikrowellenaufschlussprogramm.

Tab. 4: Eingesetztes Mikrowellenaufschlussprogramm für Muttermilchproben.

Schritt	Zeit [min]	Temperatur [°C]
1	10	0 auf 50
2	15	50 auf 70
3	15	70 auf 100
4	5	100 auf 140
5	15	140 auf 220
6	10	220
7	15	Kühlung

Die Aufschlusslösung wurde anschließend mit deionisiertem Wasser auf 10 ml aufgefüllt.

Iod-Extraktion

Die Iod-Extraktion der Muttermilchproben erfolgte analog den Lebensmittelproben (s. S. 9).

2.4 Instrumentelle- und Multielementanalytik

2.4.1 Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS)

Die Elemente Au, Ba, Cd, Cs, Cu, I, Mn, Ni, Pb, Rb, Re, Sr, Te, Y, Zn und Zr wurden mit Hilfe eines Massenspektrometers mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) ELAN 6000 der Firma Perkin-Elmer vermessen (Madeddu & Rivoldini 1996; Markert 1996; Miller-Ihli 1996; Wolf & Grosser 1997). Das Prinzip der ICP-MS beruht auf der Atomisierung und Ionisation der Probenbestandmoleküle und der darauffolgenden Trennung der Ionen nach ihren spezifischen Massen und Ladungen. Die Atomisierung und Ionisation der Proben erfolgt thermisch in einem induktiv gekoppelten Plasma bei ca. 7000 K.

Zur Kalibrierung wurde der Merck® Standard VI eingesetzt (ICP Multi Element Standard VI). Für die Elemente Cs, Zr, Y und Re wurde die Kraft® Multielement Standardlösung und für Au der Kraft® Einzelstandard verwendet.

Zur Kompensation von Drifterscheinungen während der Messzeit der o.a. Elemente mit der ICP-MS wurde den Proben kein interner Standard (Re, Te, Y) zugesetzt (da Analytelemente, s. S. 9).

Die Geräteparameter des ICP-MS sind in Tab. 5 und die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen mit und ohne Anpassung auf die Probeneinwaage⁵ in den Tab. 6a/b aufgelistet.

⁵ Die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen sind über Blindwertmessungen und Standardabweichungen nach Anleitung der Firma Perkin Elmer in µg/l ermittelt worden. Um jedoch die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen bezogen auf die tatsächlich eingewogenen Lebensmittel- und Muttermilchproben in µg/kg zu ermitteln, wurde nach folgender Berechnung verfahren:

Nachweisgrenze (NG) bezogen auf die Probeneinwaage: $NG [\mu\text{g/l}] \cdot \text{Probenauffüllvolumen [l]}$ mit deionisiertem H₂O (LM: 50 ml; MM: 10 ml)/ Probeneinwaage [kg] (bei Iod betrug das Auffüllvolumen für die LM- und MM-Proben jeweils 25 ml; durchschnittliche Probeneinwaage der LM 1,3 g)

Tab. 5: Geräteeinstellungen des ICP-MS Perkin Elmer ELAN 6000.

Nebulizer gas flow	0,96-1,00 L/min	Replicates	3
Lens voltage	7,5-8,5 V	Sample flush speed	24 rpm
Analog stage voltage	-2050 V	Read delay	80 s
Pulse stage voltage	1500 V	Delay and analysis speed	24 rpm
ICP RF Power	1100 W	Wash	180 s
Run pressure	$1,5 \times 10^{-5}$ Torr	Wash speed	48 rpm

Tab. 6a: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Elemente in µg/l.
LM: Lebensmittelproben; MM: Muttermilchproben

Nachweis- und Bestimmungsgrenze [µg/l]				Nachweis- und Bestimmungsgrenze [µg/l]			
Au	0,02	0,085	Pb	0,0005	0,0018		
Ba	0,003	0,013	Rb	0,003	0,013		
Cd	0,015	0,059	Re	0,0045	0,018		
Cs	0,0024	0,0097	Sr	0,0004	0,001		
Cu	0,002	0,009	Te	0,27	1,09		
I	0,05	0,2	Y	0,0003	0,0013		
Mn	0,0006	0,0025	Zn	0,006	0,023		
Ni	0,003	0,013	Zr	0,006	0,024		

Tab. 6b: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Elemente umgerechnet auf die Probeneinwaage in µg/kg (s. Fußnote 5, S. 11)

	Nachweis- und Bestimmungsgrenze [µg/kg]				Nachweis- und Bestimmungsgrenze [µg/kg]				
	LM	MM ^a	LM	MM ^a	LM	MM ^a	LM	MM ^a	
Au	1,0	0,5	4,0	2,0	Pb	0,025	0,013	0,1	0,05
Ba	0,14	0,07	0,6	0,3	Rb	0,15	0,07	0,6	0,3
Cd	0,75	0,38	3,0	15	Re	0,2	0,1	0,9	0,45
Cs	0,12	0,06	0,48	0,24	Sr	0,02	0,01	0,08	0,04
Cu	0,1	0,05	0,4	0,2	Te	14	7	54	27
I	1,0	2,5	4,0	10	Y	0,015	0,0075	0,06	0,03
Mn	0,03	0,015	0,12	0,06	Zn	0,3	0,15	1,2	0,6
Ni	0,15	0,07	0,6	0,3	Zr	0,3	0,15	1,2	0,6

^a: bezogen auf Trockenmasse

2.4.2 Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES)

Die Elemente Eisen und Phosphor wurden mit Hilfe der Atomemissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) bestimmt (Markert 1996). Bei der ICP-OES wird die Elementbestimmung über die Emission von Lichtquanten bei Übergängen von Elektronen zwischen verschiedenen energetischen Zuständen ermöglicht. Dabei ergeben sich elementspezifische Spektren, die eine Quantifizierung der Elemente in einer Probenlösung ermöglichen (Fecher 1995).

Zur Kalibration des Elementes Fe wurde der Merck[®] Standard IV eingesetzt (ICP Multi Element Standard IV) und für P der Merck[®] Anionen-Mehrelementstandard 1. Die Geräteparameter des

ICP-OES Optima 3000 der Firma Perkin-Elmer ist in Tab. 7 und die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der gemessenen Elemente in den Tab. 8a/b wiedergegeben.

Tab. 7: Geräteeinstellungen des ICP-OES Perkin Elmer Optima 3000.

Nebulizer gas flow	0,8 L/min
Power	1300 W
Pump rate	1,5 ml/min

Tab. 8a: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Elemente in $\mu\text{g/l}$.
LM: Lebensmittelproben; MM: Muttermilchproben

Nachweis- und Bestimmungsgrenze [$\mu\text{g/l}$]		
Fe	10	40
P	28	112

Tab. 8b: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen der untersuchten Elemente umgerechnet auf die Probeneinwaage in $\mu\text{g/kg}$ (s. Fußnote 5, S. 11)

	Nachweis- und Bestimmungsgrenze [$\mu\text{g/kg}$]			
	LM	MM	LM	MM
Fe	500	250	2000	1000
P	1400	700	5600	2800

2.4.3 Qualitätskontrolle der instrumentellen Bestimmung

Die hohe Reproduzierbarkeit eines Messergebnisses ist nur eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die Richtigkeit eines Analysenergebnisses (Markert 1996). Als Hinweis darauf, ob die gemessene Zusammensetzung einer Probe der realen Zusammensetzung des Ausgangsmaterial entspricht, können (zertifizierte) Referenzmaterialien genutzt werden, deren Elementzusammensetzung aufgrund von Ringanalysen bekannt ist (Fecher 1995, Markert 1996, Iyengar 1998).

Für die analytische Qualitätskontrolle wurden folgende Referenzmaterialien eingesetzt:

Peach leaves (NIST 1547), Pine needle (NIST 1575), TEA (GBW 08505), Apple leaves (NIST 1515), Tomato leaves (NIST 1573) und ‚Skim Milk Powder‘ (CRM 063R) (Einwaage 0,5 g).

Für das Element Iod wurden bei der Extraktion der Proben ‚Hay Powder‘ (CRM 129) und ‚Skim Milk Powder‘ (CRM 063R) mitgeführt.

2.5 Berechnungsmethoden

2.5.1 Transferfaktor Nahrung/Muttermilch

2.5.1.1 Tägliche Elementaufnahme durch die verzehrten Lebensmittel (LM)

Für jede Probandin (A, B, ...) erfolgte eine separate Aufbereitung der Analysenwerte und Berechnung der täglichen Elementaufnahme. Die von der Probandin gesammelten und gekennzeichneten Lebensmittelproben (A1, A2,...) wurden einzeln analysiert. Zuerst wurde die **Elementaufnahme durch das einzelne Lebensmittel** i errechnet. Durch Multiplikation des Elementgehalts bzw. der -konzentration der Einzelprobe mit der täglichen Verzehrmasse des Lebensmittels i ergibt sich die jeweilige tägliche Elementaufnahme (Gl. 1).

$$(Gl. 1) \quad EA_i = c(LM)_{i(FG)} \cdot m(LM)_i$$

EA_i :	tägliche Elementaufnahme durch das LM i [$\mu\text{g}/\text{d}$]
$c(LM)_{i(FG)}$:	Elementkonzentration des LM i bezogen auf Frischgewicht [$\mu\text{g}/\text{g}$]
$m(LM)_i$:	täglich verzehrte Masse des LM i [g/d]

Die gesamte **tägliche Elementaufnahme** durch die jeweiligen Lebensmittel errechnet sich aus der Summe der nahrungsspezifischen einzelnen Elementaufnahmen des jeweilig betrachteten Untersuchungstages (Gl. 2).

$$(Gl. 2) \quad EA_d = \sum_{i=1}^n EA_i$$

EA_d :	Elementaufnahme der Mutter während eines Tages [$\mu\text{g}/\text{d}$]
EA_i :	tägliche Elementaufnahme durch das LM i [$\mu\text{g}/\text{d}$]

Aufgrund der Protokollierung und Analyse aller am Tag verzehrten Lebensmittel lässt sich eine weitgehend exakte durchschnittliche Elementkonzentration der verzehrten Lebensmittel ermitteln. Die **durchschnittliche Elementkonzentration** aller Lebensmittel eines Tages berechnet sich aus dem Verhältnis der Elementaufnahme eines Tages zur Masse der an diesem Tag verzehrten Lebensmittel (Gl. 3).

$$(Gl. 3) \quad c(LM)_{d(FG)} = \frac{EA_d}{m(LM)_d}$$

$c(LM)_{d(FG)}$:	durchschnittliche Elementkonzentration der LM eines Tages bezogen auf Frischgewicht [$\mu\text{g}/\text{g}$]
EA_d :	Elementaufnahme der Mutter während eines Tages [$\mu\text{g}/\text{d}$]
$m(LM)_d$:	verzehrte Masse an LM während eines Tages [g/d]

2.5.1.2 Berechnung der Elementkonzentration in der Muttermilch

Zur Analyse der Muttermilch (MM) wurden gefriergetrocknete Proben verwendet, so dass die Analysenwerte zunächst auf die Trockenmasse (TM) bezogen vorliegen. Um die Umrechnung bezogen auf Frischgewicht (FG) zu ermöglichen, wurde von jeder Probe die Trockenmasse (TM) bestimmt. Die Elementkonzentration bezogen auf Frischgewicht berechnet sich nach Gl. 4.

$$(Gl. 4) \quad c(MM_d)_{FG} = c(MM_d)_{TM} \cdot TM_d$$

$c(MM_d)_{FG}$: Elementkonzentration in der Muttermilch eines Tages bezogen auf Frischgewicht [$\mu\text{g/g}$]
 $c(MM_d)_{TM}$: Elementkonzentration in der Muttermilch eines Tages bezogen auf Trockenmasse [$\mu\text{g/g}$]
 TM_d : Trockenmasse [g/g]

2.5.1.3 Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Der **Transferfaktor** (TF_d) eines Tages wird vereinfacht durch das Verhältnis der Elementkonzentration in der Muttermilch eines Tages (bezogen auf Frischgewicht) und der durchschnittlichen Elementaufnahme des gleichen Tages wiedergegeben (Gl. 5).

$$(Gl. 5) \quad TF_d = \frac{c(MM_d)_{FG}}{EA_d}$$

TF_d : Transferfaktor Nahrung/Muttermilch eines Tages [d/kg]
 $c(MM_d)_{FG}$: Elementkonzentration in der Muttermilch eines Tages bezogen auf Frischgewicht [$\mu\text{g/kg}$]
 EA_d : Elementaufnahme der Mutter während eines Tages [$\mu\text{g/d}$]

Die **theoretische Obergrenze des Transferfaktors**, bei der 100% der aufgenommenen Elementmenge aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch übergehen, wird über Gleichung 6 ermittelt.

$$(Gl. 6) \quad TF_d \leq \frac{1}{I(MM)}$$

TF_d : Transferfaktor Nahrung/Muttermilch eines Tages [d/kg]
 $I(MM)$: Tägliche Verzehrmenge von Muttermilch* [kg/d]
 *: 0,85 kg/d (DFG 1984)

Der **Bruchteile des partitionierten Elementes**, der aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch übergeht, ist das Produkt aus dem Transferfaktor und der täglichen Verzehrmenge von Muttermilch (Gl. 7).

$$(Gl. 7) \quad E_p = TF_d \cdot I(MM) \cdot 100\%$$

E_p : Bruchteile des partitionierten Elementes, der in die Muttermilch übergeht [%]
 TF_d : Transferfaktor Nahrung/Muttermilch eines Tages [d/kg]
 $I(MM)$: Tägliche Verzehrmenge von Muttermilch [kg/d]

2.5.2 Elementzufuhr des gestillten Säuglings über die Muttermilch

Die tägliche Elementzufuhr des Säuglings über die Muttermilch errechnet sich entweder direkt aus dem Produkt der Konzentration eines Elementes in der Muttermilch und der täglichen Verzehrmenge von Muttermilch nach Gl. 8_a oder aber aus dem elementspezifischen Transferfaktor nach Gl. 8_b. Für die tägliche Verzehrmenge von Muttermilch während der maturaen Laktationsphase wurde 0,85 kg/d (DFG 1984) angesetzt.

(Gl. 8a)	$EA_{S(d)} = c(MM_d)_{FG} \cdot I(MM)$	$EA_{S(d)}$:	Elementaufnahme des Säuglings über die Muttermilch während eines Tages [$\mu\text{g}/\text{d}$]
		$c(MM_d)_{FG}$:	Elementkonzentration in der Muttermilch eines Tages bezogen auf Frischgewicht [$\mu\text{g}/\text{kg}$]
(Gl. 8b)	$EA_{S(d)} = EA_d \cdot TF_d \cdot I(MM)$	EA_d :	Elementaufnahme der Mutter während eines Tages [$\mu\text{g}/\text{d}$]
		TF_d :	Transferfaktor Nahrung/Muttermilch eines Tages [d/kg]
		$I(MM)$:	Tägliche Verzehrmenge von Muttermilch [kg/d]

2.5.3 Statistische Methoden

2.5.3.1 Logarithmische Transformation

Hinsichtlich der statistischen Verteilung zeigte sich lediglich bei dem Element Iod eine Normalverteilung; deshalb konnte hier der arithmetische Mittelwert angegeben werden. Alle weiteren untersuchten Elemente zeigten eine schiefe (asymmetrische) Verteilung bei den Lebensmittel- und Muttermilchproben. Nach einer logarithmischen Transformation der Originaldaten ergab sich annähernd eine Normalverteilung. Als statistische Kenngröße wurde das jeweilige *geometrische Mittel* der Originaldaten, als Streuungsmaß die relative Standardabweichung ($\pm \text{RSD}^6$) angegeben. Die Spannweiten zwischen den kleinsten und größten Werten werden mit Klammern gekennzeichnet. Sogenannte ‚nicht exakt nachweisbare‘ Elemente, die unterhalb der Nachweisgrenze lagen, wurden mit Hilfe eines gängigen Schätzverfahrens in die statistische Auswertung mit einbezogen. Hierbei wurden alle n.n.-Werte durch den halben Wert ihrer Nachweisgrenze substituiert (Hecht 2000). Hinsichtlich der „Mullelementanalytik, mögliche Darstellungsweisen von Meßdaten“ siehe auch Markert (1987).

2.5.3.2 Box-Plots

Ein sogenannter Box-Plot bietet eine grafische Möglichkeit, um zentrale Tendenz, Streuung- und Schiefe einer Verteilung darzustellen. Hierbei werden die Daten entlang der Variablenachse durch ein Rechteck (Box) aufgetragen, dessen Länge vom unteren Quartil Q1 bis zum oberen Quartil Q3 reicht. Das geometrische Mittel ist als Querstrich in der Box dargestellt.

2.5.3.3 Korrelationsanalysen

Die Korrelationsanalyse (vergleicht [x und y] Werte paarweise) untersucht stochastische Zusammenhänge zwischen gleichwertigen Zufallsvariablen anhand einer Stichprobe. Eine Maßzahl für die Stärke und Richtung eines linearen Zusammenhangs ist der Korrelationskoeffizient. Er ist annähernd oder gleich Null, wenn kein linearer Zusammenhang vorliegt, und er ist gleich +1 oder -1, wenn ein strikter linearer Zusammenhang besteht. Die Signifikanz von Korrelationen wurde in Abhängigkeit von der Probenanzahl nach Geigy (1989) bestimmt. Sogenannte ‚Ausreißer‘ wurden bei der Korrelationsanalyse eliminiert.

Angewandte Statistikprogramme: STATGRAPHICS plus program und Microsoft Excel.

⁶ es handelt sich hierbei um biologische Variabilitäten, wobei Standardabweichungen > 100% möglich sind

3 Ergebnisse

3.1 Qualitätssicherung des Datenmaterials

3.1.1 Referenzmaterialien

In Tab. 9 sind die mit der ICP-MS bzw. ICP-OES ermittelten Elementgehalte in den eingesetzten Referenzmaterialien den zertifizierten bzw. Richtwerten gegenübergestellt (bezogen auf die vorliegende Projektphase II).

Die für die Qualitätskontrolle (neben der Blindwertmessung) eingesetzten Referenzmaterialien zeigten für die Elemente Ag, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, I, Mn, Mo, P, Pb, Rb, Sb, Sr, U und Zn zufriedenstellende Ergebnisse (Abweichung zwischen dem Mess- und dem Referenz- bzw. Richtwert bis 15%).

Höhere Abweichungen (15-80%) zwischen dem in der vorliegenden Studie gemessenen Wert und dem Referenz- bzw. Richtwert konnten bei den Elementen Cu, Ni, La, Ti und Th festgestellt werden.

Für die Elemente Au, Ga, Nb, Ra, Re, Ru, Te, Y und Zr standen keine Vergleichswerte zur Verfügung.

3.1.2 Nachweis- und Bestimmungsgrenze

Um die ermittelten Messergebnisse qualitativ beurteilen zu können, wird in der nachfolgenden Ergebnisdarstellung der Einzelelementbetrachtung (s. 3.3) der jeweilige Prozentsatz der gemessenen Werte, der oberhalb der Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze (NG/BG) nachgewiesen werden konnte, mitaufgeführt.

Die ermittelten Konzentrationen der Elemente Ba, Co, Cu, Ga, La, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Rb, Sr, Ti, Y und Zn lagen in über 95% der untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben oberhalb der BG.

In den Lebensmittelproben konnten die Elemente Cd, Ce, Cr, Cs, Fe, I, Th, U und Zr nur zu 63-87% oberhalb der BG bzw. zu 72-97 % oberhalb der NG nachgewiesen werden, während in den Muttermilchproben die ermittelten Messwerte dieser Elemente bei 55-100% der Proben oberhalb der BG bzw. bei 98-100% oberhalb der NG lagen.

Das Element Ag konnte lediglich in 36% der Lebensmittelproben oberhalb der BG bzw. in 69% oberhalb der NG nachgewiesen werden, während in den Muttermilchproben 97% der Messwerte oberhalb der BG lagen.

Die Messwerte der Elemente Au, Nb, Sb und Ru lagen in 14-37% der Lebensmittelproben oberhalb der BG bzw. in 25-88% oberhalb der NG, während bei den Muttermilchproben 5-56% der Messwerte oberhalb der BG und 43-100% oberhalb der NG nachgewiesen werden konnten.

Die gemessenen Werte der Elemente Ra, Re und Te lagen zu 100% unterhalb der BG.

Tab. 9: Vergleich zertifizierter (oben) und gemessener Elementgehalte (unten) in den in dieser Untersuchung eingesetzten Standardreferenzmaterialien [$\mu\text{g/g}$].
 []: empfohlene Richtwerte (keine zertifizierten Werte vorhanden); leere Kästchen: keine Angaben.

	Au	Re	Te	Y	Zr	Cd	Cs	Pb	I
Peach leaves (1547 NIST)						0,026 \pm 0,003 0,025 \pm 0,005		0,87 \pm 0,03 0,84 \pm 0,09	
Pine needle (1575 NIST)						[< 0,5] 0,18		10,8 \pm 0,5 10,6 \pm 1,6	
TEA (GBW 08505)						0,032 \pm 0,005 0,039 \pm 0,006	[0,13] 0,126 \pm 0,008	1,06 \pm 0,10 1,06 \pm 0,12	
Apple leaves (1515 NIST)						0,013 \pm 0,002 0,013 \pm 0,002		0,47 \pm 0,024 0,48 \pm 0,08	[0,3] 0,3 \pm 0,105
Tomato leaves (1573 NIST)						1,52 \pm 0,04 1,67 \pm 0,8	[0,053] 0,047		
Skim Milk Powder (CRM 063R)									0,81 \pm 0,05 0,76 \pm 0,04
Hay Powder (CRM 129)									0,167 \pm 0,024 0,144 \pm 0,014

	Fe	Ba	Cu	Mn	Ni	P	Rb	Sr	Zn
Peach leaves (1547 NIST)	218 \pm 14 190 \pm 13	124 \pm 4 110 \pm 6	3,7 \pm 0,4 3,4 \pm 0,5	98 \pm 3 89 \pm 9	0,69 \pm 0,09 1,1 \pm 0,2	1370 \pm 70 1291 \pm 80	19,7 \pm 1,2 17,3 \pm 1,2	53 \pm 4 50,5 \pm 4,3	17,9 \pm 0,4 19,6 \pm 3,2
Pine needle (1575 NIST)	200 \pm 10 165 \pm 26		3,0 \pm 0,3 2,9 \pm 0,3	675 \pm 15 699 \pm 126	[3,5] 2,5 \pm 0,4	1200 \pm 200 1104 \pm 158	11,7 \pm 0,1 11,4 \pm 1,9	4,8 \pm 0,2 4,2 \pm 0,23	
TEA (GBW 08505)	373 \pm 23 320 \pm 28	15,7 \pm 1,9 12,5 \pm 1,3	16,2 \pm 1,9 14,2 \pm 1,5	766 \pm 28 731 \pm 94	7,61 \pm 0,48 7,2 \pm 0,8	4260 \pm 230 3857 \pm 156	36,9 \pm 1,3 34,4 \pm 4	10,8 \pm 1,8 9,4 \pm 0,6	38,7 \pm 3,9 39,2 \pm 6,5
Apple leaves (1515 NIST)	83 \pm 5 74 \pm 5	49 \pm 2 43,6 \pm 2,5	5,64 \pm 0,24 5,1 \pm 0,7	54 \pm 3 49 \pm 5	0,91 \pm 0,12 0,93 \pm 0,3	1590 \pm 110 1463 \pm 62	10,2 \pm 1,5 8,7 \pm 0,5	25 \pm 2 22 \pm 0,9	12,5 \pm 0,3 13,4 \pm 1,7
Tomato leaves (1573 NIST)	368 \pm 7 374 \pm 117	[63] 56,4 \pm 7,8	4,7 \pm 0,14 5 \pm 2,2	246 \pm 8 224 \pm 32	1,59 \pm 0,07 2,4 \pm 0,4	2160 \pm 40 2317 \pm 477	14,89 \pm 0,27 14,2 \pm 3	[85] 75 \pm 5	30,9 \pm 0,7 33,6 \pm 13
Skim Milk Powder (CRM 063R)	2,32 \pm 0,23 2,4 \pm 1,9		0,602 \pm 0,019 0,49 \pm 0,09			11100 \pm 130 10399 \pm 881			

3.2 Gesamtverzehrmenge und Elementaufnahme über die Nahrung

Die Probandinnen nahmen innerhalb des Probenahmezeitraumes sehr unterschiedliche Mengen an Lebensmitteln (feste und flüssige) zu sich (Abb. 2). Dadurch ergaben sich hohe Unterschiede in der absoluten Aufnahmemenge einiger Elemente. Durchschnittlich wurden pro Tag **3,0 kg** Lebensmittel (geom. Mittelwert) verzehrt. Die minimale Gesamtverzehrmenge betrug 1,0 kg/d und die maximale Menge 7,4 kg/d. Hohen Gesamt Mengen war immer ein hoher Getränkekonsum (z.B. Tee, Mineralwasser, Saft) zuzuordnen.

Im Vergleich zu der ermittelten Gesamtverzehrmenge von Lebensmitteln (Duplikatmethode) 25-34jähriger Frauen aus der Studie nach Becker et al. (1996) verzehrten die in der vorliegenden Studie untersuchten stillenden Mütter ca. 20% höhere Lebensmittelmengen.

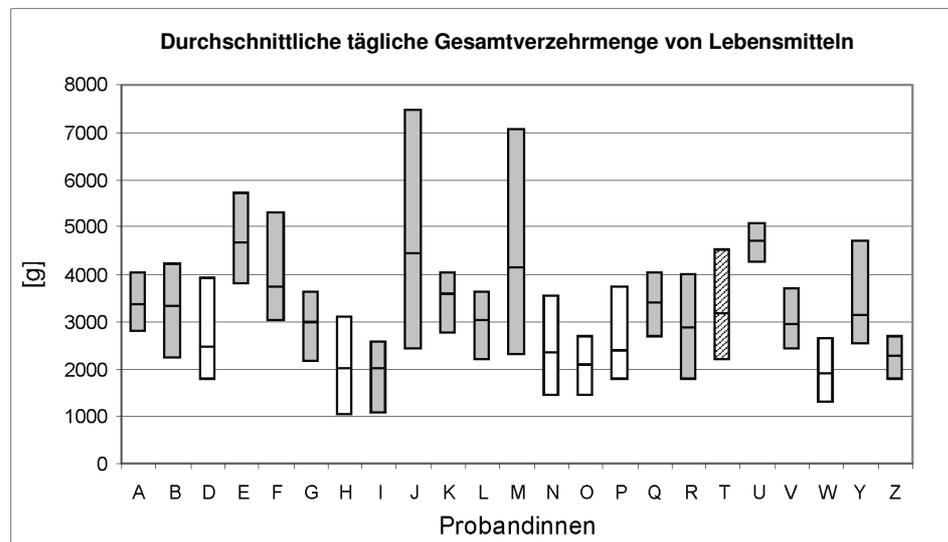


Abb. 2: Durchschnittliche tägliche Gesamtverzehrmenge von Lebensmitteln der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z ; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter (schraffiert): T). Der geometrische Mittelwert ist als Querstrich wiedergegeben.

Zwischen der täglichen Gesamtverzehrmenge und der elementspezifischen Aufnahmemenge über die Lebensmittel der untersuchten Probandinnen ergab sich ein signifikanter Zusammenhang ($p > 0,05$) für die Elemente Au, Ba, Cd, Ce, Cr, Cu, Fe, Ga, La, Mn, Mo, P, Rb, Ru, Sr, Ti, U, Y, Zn und Zr; für die Elemente Ag, Co, Cs, Nb, Ni, Pb, Sb, Th und Y konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden.

Aus Abb. 2 ist außerdem eine geringere Gesamtverzehrmenge der polnischen Mütter (D, H, N, O, P und W) und zweier deutscher Mütter (I und Z) ersichtlich. Die tägliche Gesamtverzehrmenge der polnischen Mütter lag im Vergleich zu den deutschen Müttern etwa um 1 kg/d (flüssige und feste Lebensmittel) niedriger ($2,2 \text{ kg/d} \pm 9,6\%$).

3.3 Einzelelementbetrachtungen

3.3.1 Barium (Ba)

Ba wird derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen, es wirkt aber stimulierend. Laut Binder (2000) enthält der Körper rund 0,3 mg pro kg Körpergewicht, die tägliche Zufuhr liegt unter 1 mg, die toxische Dosis wird bei 200 mg und die letale Dosis bei 2-4 g angegeben. Der Ba-Gehalt im Blut liegt nach Minoia et al. (1990) bei 0,47-2,4 µg/l. Einen wesentlichen Einfluss auf die Ba-Konzentration in der Muttermilch hat das Rauchen von Zigaretten. In der Milch stillender Mütter, die rauchten, wurde eine ca. 5fach höhere Ba-Konzentration ermittelt (Coni et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Ba-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Ba-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 4 sind die durchschnittlichen Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Ba-Zufuhr betrug im Mittel **718 µg ± 50%** (137-160.000 µg/d) bzw. **240 µg/kg ± 40%** (90-46000 µg/kg (99% > BG)) und ist mit der Zufuhrmenge < 1 mg/d nach Binder (2000) vergleichbar. Lediglich eine Mutter (F) wies eine ca. 3fach höhere Aufnahme auf (2200 µg/d), die eindeutig auf den Verzehr von nuss- bzw. mohnhaltigen Lebensmitteln zurückgeführt werden konnte. Bei den übrigen Müttern zeigte sich eine relativ gleichmäßige Ba-Aufnahme über den jeweiligen Untersuchungszeitraum, die nicht durch extreme Minimum- bzw. Maximumwerte gekennzeichnet war.

In Abb. 4 sind die durchschnittlichen Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Es wurden **5,2 µg/kg ± 45%** (0,25-70 µg/kg (100% > BG)) quantifiziert, die zufriedenstellend mit der ermittelten durchschnittlichen Konzentration von 2,1-4,6 µg/kg in der muren Muttermilch österreichischer Probandinnen nach Krachler et al. (1998) verglichen werden kann.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein konstantes Niveau der Konzentration an Ba in der Muttermilch (Abb. 3). In der kolostrumen Phase fanden Krachler et al. (1998) signifikant höhere Konzentrationen (bis zu 19 µg/kg).

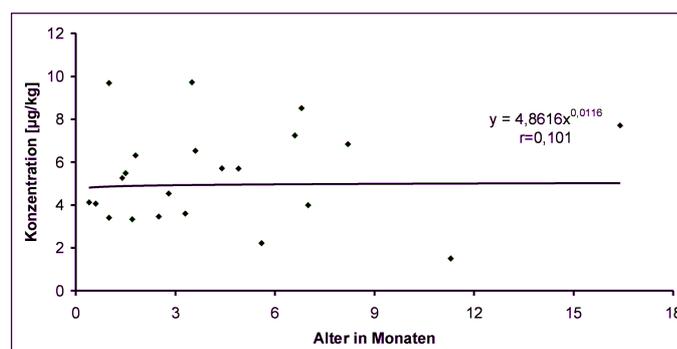


Abb. 3: Ba-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

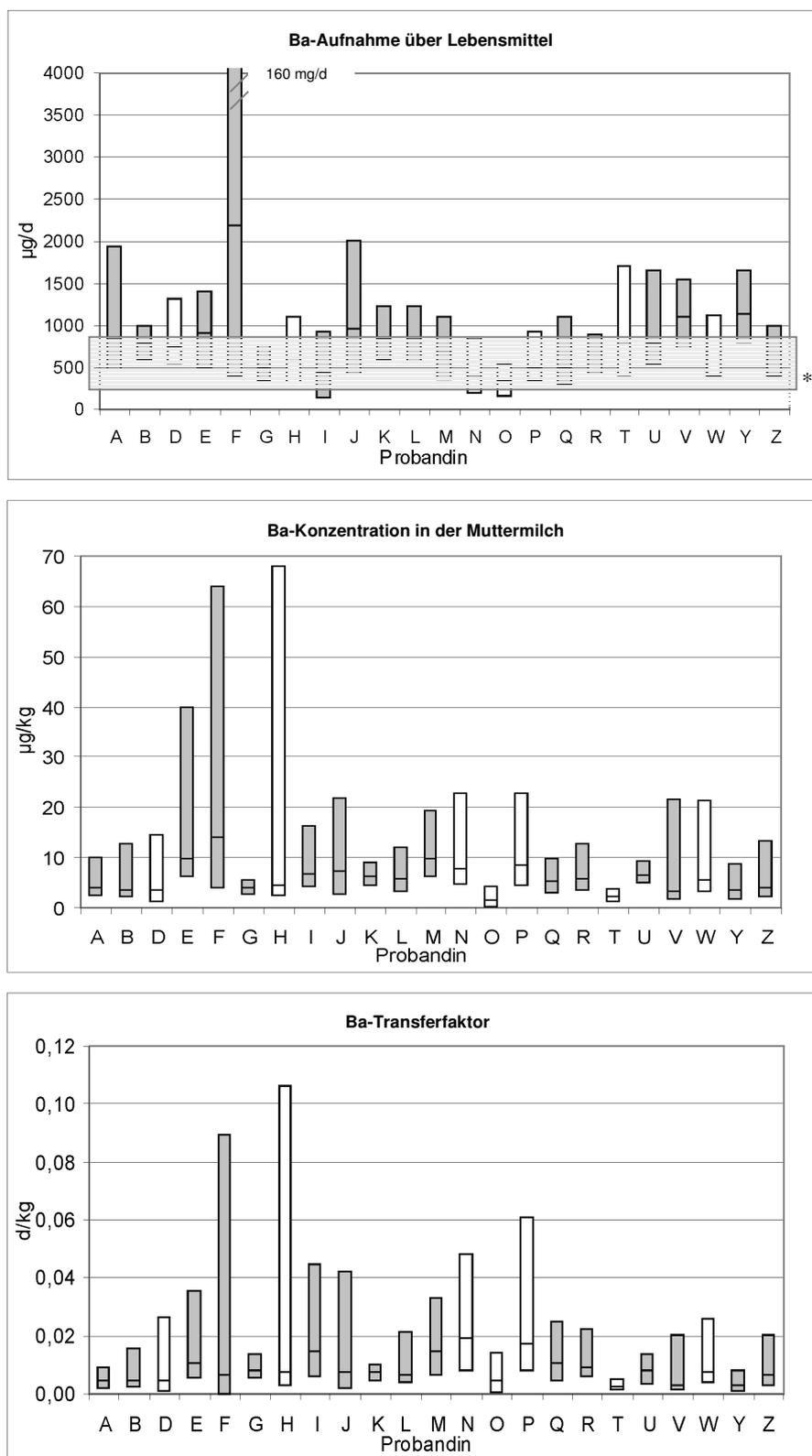


Abb. 4: Durchschnittliche tägliche Bariumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Bariumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: tägliche Zufuhr nach Binder (2000) unter 1 mg/d.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Ba-Aufnahme über die Nahrung und der Ba-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Ba-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,007 d/kg ± 57%** (0,00008-0,11 d/kg; Abb. 4) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten für die Konzentration von Ba in der Muttermilch (konstant, Abb. 3) und für dessen Transferfaktor (signifikanter Anstieg, Abb. 5). Bezüglich der Ba-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine signifikant abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

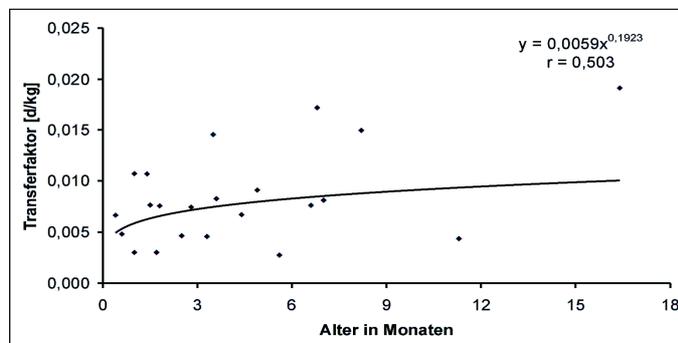


Abb. 5: Ba-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Ba-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Ba-Zufuhr der gestillten Säuglinge über die Muttermilch betrug durchschnittlich **4,5 µg/d** (1,3-8,3 µg/d). Zwischen den Altersgruppen < 4 Monate und > 4-17 Monate fand sich kein Unterschied in der Mengenzufuhr. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Ba betrug im Durchschnitt etwa 0,6%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Ba-Verteilung

Tab. 10 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Ba-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 10: Zusammenfassende Beschreibung der Ba-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [µg/d]	718	(137-160000)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	240	(90-46000)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	5,2	(0,25-67)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,0072	(0,00008-0,11)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	4,5	(1,3-8,3)

3.3.2 Blei (Pb)

Pb wird derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen, es wirkt jedoch kanzerogen und teratogen. Als Grenzwert der täglichen Nahrungsaufnahme wurde von der WHO 430 µg festgelegt, wobei die toxische Dosis für Blei 1 mg beträgt und als letale Dosis ca. 10 g angegeben wird (Binder 2000). Die WHO geht von einer täglichen Aufnahme von 200-300 µg Blei aus. Minoia et al. (1990) geben für den Bleigehalt im Blut einen mittleren Wert von 157 µg/l an bzw. das Umweltbundesamt einen geometrischen Mittelwert von 33 µg/l (Umwelt-Survey 1998).

Quantifizierung der täglichen Pb-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Pb-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 7 sind die durchschnittlichen Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Pb-Zufuhr betrug im Mittel **77 µg ± 64%** (17-950 µg/d) bzw. **26 µg/kg ± 67%** (4-500 µg/kg (98% > BG)). An einzelnen Tagen wurde der Grenzwert von 430 µg (WHO) von den Müttern D und O geringfügig überschritten, extremere Maximalwerte wiesen die Mütter I und K auf, die auf das Verzehren von Fischstäbchen, Schwarzbrot mit Leberwurst und Reisaufguss mit Paprika, Kartoffeln mit brauner Butter und gebratenen Karpfen zurückgeführt werden konnten. Die in dieser Studie ermittelte Aufnahmemenge von 77 µg/d sowie die in der Studie nach Becker et al. (1996) ermittelte Aufnahmemenge von 28 µg/d für 25-34 jährige Frauen, lagen deutlich unterhalb der von der WHO geschätzten Aufnahmemengen (200-300 µg/d).

In Abb. 7 sind die durchschnittlichen Pb-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **2,5 µg/kg ± 49%** (0,7-60 µg/kg (100% > BG)) ermittelt, der im ‚normalen‘ Bereich nach WHO (1989) einzuordnen ist (2-5 µg/l).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ansteigender Trend für die Konzentration an Pb in der Muttermilch (Abb. 6). Dieses Ergebnis deckt sich **nicht** mit der Aussage nach Krachler et al. (1998), die einen signifikant ($p < 0,001$) abnehmenden Trend mit dem Verlauf der Laktation ermittelten.

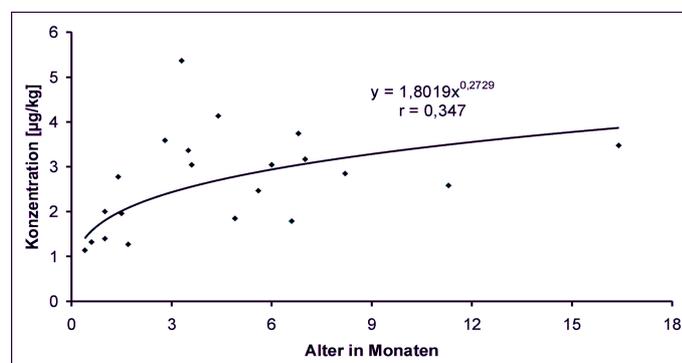


Abb. 6: Pb-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

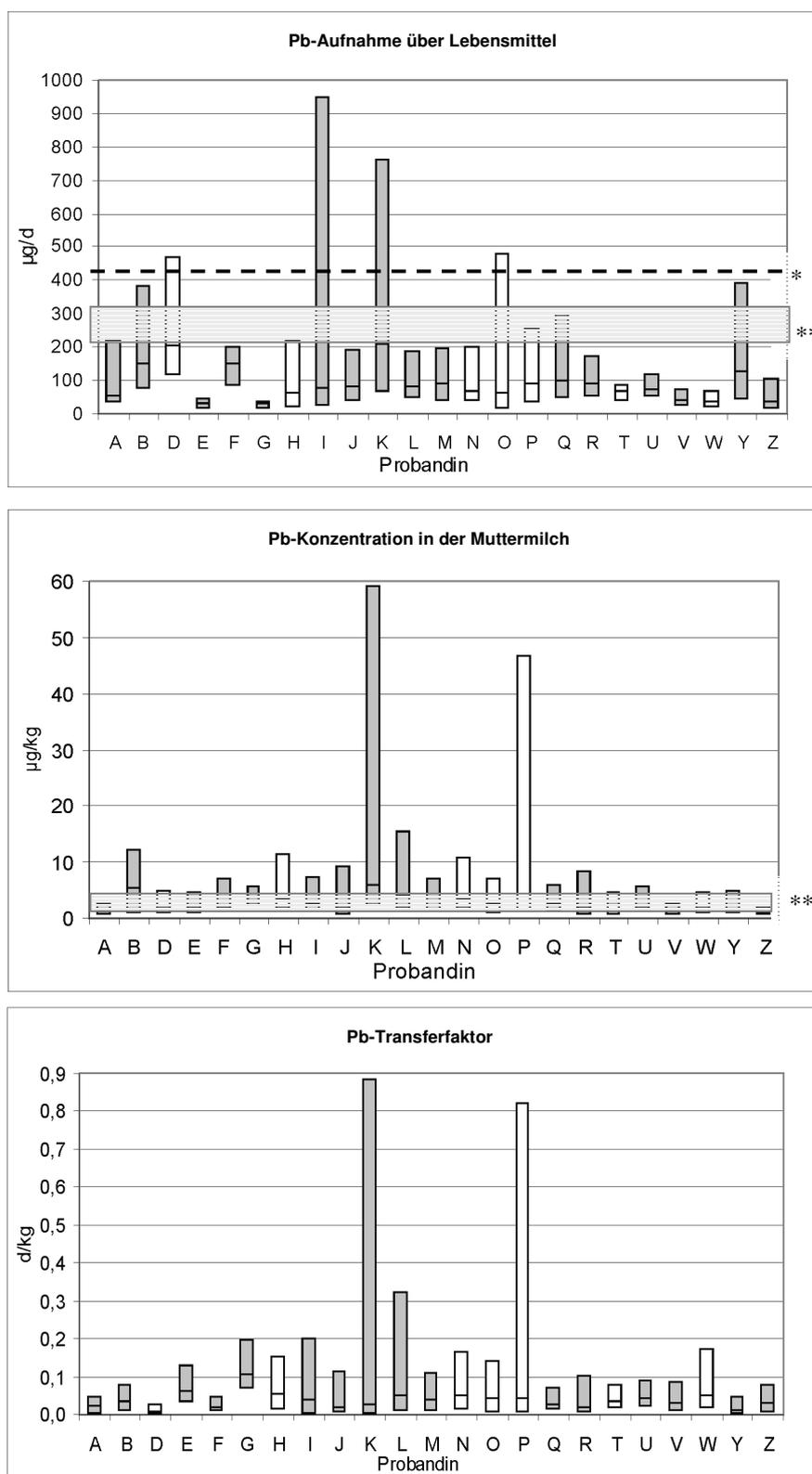


Abb. 7: Durchschnittliche tägliche Bleiaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Bleikonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: Grenzwert für die Pb-Aufnahme über die Nahrung nach WHO; **: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Pb-Aufnahme über die Nahrung und der Pb-Konzentration in der Muttermilch ($p < 0,05$, $n = 21$).

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Pb-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,033 d/kg \pm 60%** (0,002-0,9 d/kg, Abb. 7) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten für die Konzentration von Pb in der Muttermilch (Anstieg, Abb. 6) und für dessen Transferfaktor (keine Veränderung, Abb. 8). Bezüglich der Pb-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine gering zunehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

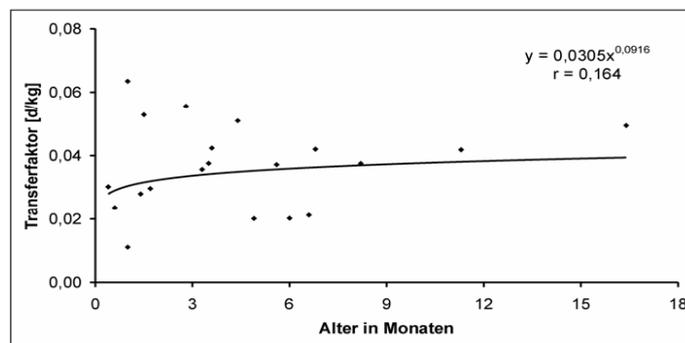


Abb. 8: Pb-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Pb-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Pb über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge durchschnittlich **2,3 $\mu\text{g}/\text{d}$** (0,9-4,5 $\mu\text{g}/\text{d}$). Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Pb betrug im Durchschnitt 2,8%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Pb-Verteilung

Tab. 11 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Pb-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 11: Zusammenfassende Beschreibung der Pb-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [$\mu\text{g}/\text{d}$]	77	(17-950)
Konzentration in der Nahrung [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	26	(4-500)
Konzentration in der Muttermilch [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	2,5	(0,7-60)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,033	(0,002-0,9)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [$\mu\text{g}/\text{d}$]	2,3	(0,9-4,5)

3.3.3 Cadmium (Cd)

Cadmium und seine Verbindungen sind giftig und möglicherweise kanzerogen, teratogen und mutagen. Mit der Nahrung und Wasser nimmt der Mensch täglich ca. 0,05-0,1 mg Cd auf (Raucher) (Binder 2000), von Nichtrauchern werden in Mitteleuropa durchschnittlich 35 µg/d über die Nahrung zugeführt (Oehlmann und Markert 1997). Als kritischen Grenzwert gibt die WHO 0,07 mg/d an. Cadmiumgehalte im Blut werden nach Minoia et al. (1990) mit 0,6 µg/l bzw. nach dem Umweltbundesamt (Umwelt-Survey 1998) mit 0,44 µg/l angegeben

Quantifizierung der täglichen Cd-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Cd-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 10 sind die durchschnittlichen Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Cd-Zufuhr betrug im Mittel **14 µg/d ± 28%** (3-90 µg/d) bzw. **4,6 µg/kg ± 25%** (1,2-2,0 µg/kg (69% > BG, 72% > NG)). Ähnliche Zufuhren von 10-12 µg/d ermittelten Müller et al. (1993) bei Erwachsenen der neuen Bundesländer. Der Grenzwert von 0,07 mg/d (WHO) wurde an einzelnen Tagen von den Probandinnen A, I und U überschritten, der auf das Verzehren von Walnüssen, Roggenbrötchen und maßgeblich durch mohnhaltige Kuchenprodukte zurückgeführt werden konnte.

In Abb. 10 sind die durchschnittlichen Cd-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Im Mittel betrug die Konzentration **0,2 µg/kg ± 72%** (0,02-6,4 µg/kg (55% > BG, 98% > NG)) und lag somit im ‚normalen‘ Bereich nach WHO bzw. im Bereich, den Krachler et al. (1998) angeben (<0,18-0,2 µg/kg). Relativ hohe Spannweiten zwischen dem Minimum- und Maximumwert zeigten sich bei den Müttern A, E, K, N, R, V und Z.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein konstantes Niveau der Konzentration an Cd in der Muttermilch (Abb. 9), lediglich in der kolostrumen Phase lag eine 5fach höhere Konzentration vor (1,1 µg/kg, Krachler et al. 1998).

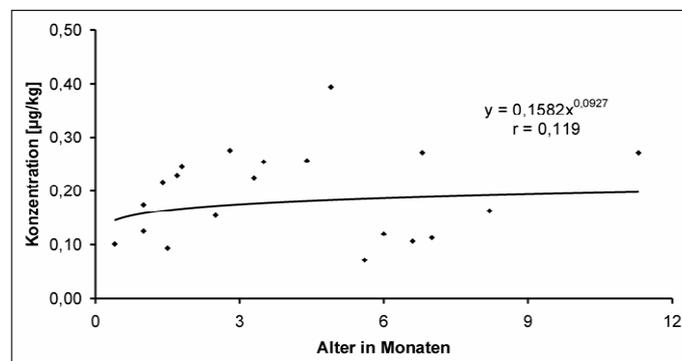


Abb. 9: Cd-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

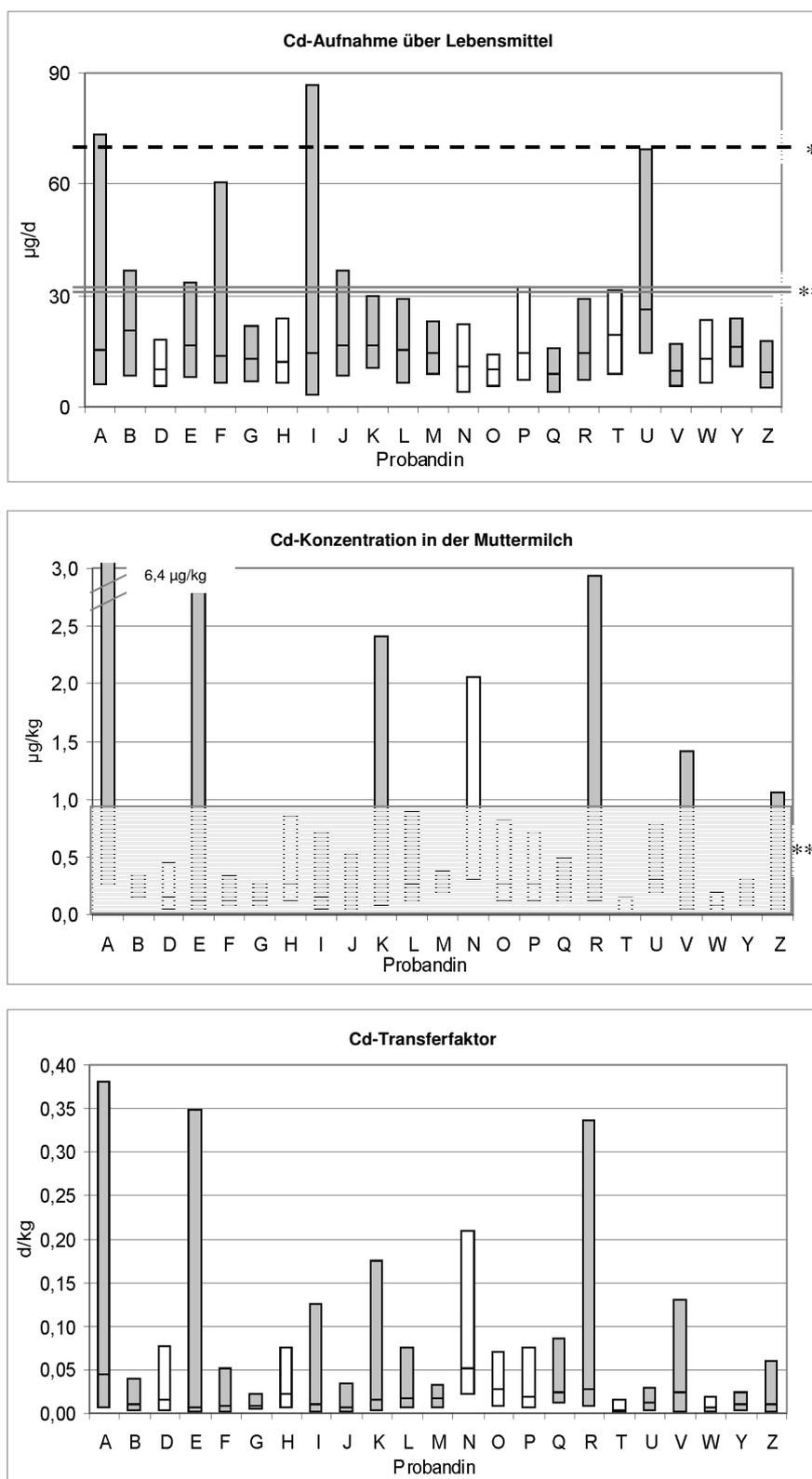


Abb. 10: Durchschnittliche tägliche Cadmiumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Cadmiumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: Grenzwert für die Cd-Aufnahme über die Nahrung nach WHO; **: Durchschnittliche Cd-Aufnahme über die Nahrung nach Oehlmann und Markert (1997); ***: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Cd-Aufnahme über die Nahrung und der Cd-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Cd-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,014 d/kg ± 82%** (0,001-0,4d/kg; Abb. 10) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Cd in der Muttermilch (keine Veränderung, Abb. 9) und für dessen Transferfaktor (keine Veränderung, Abb. 11). Bezüglich der Cd-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine geringfügig abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

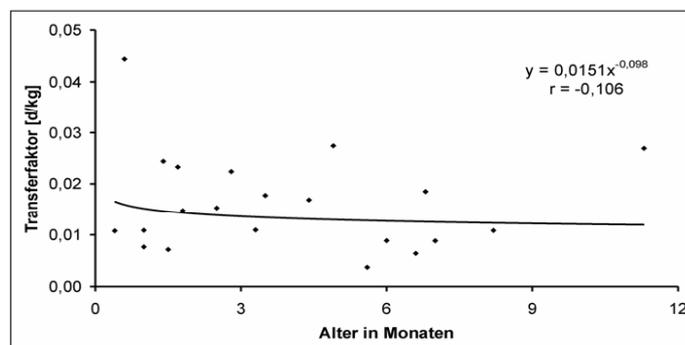


Abb. 11: Cd-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Cd-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Cd über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge durchschnittlich **0,2 µg/d** (0,06-0,6 µg/d). Zwischen den Altersgruppen < 4 Monate und > 4-17 Monate fand sich kein Unterschied in der Mengenzufuhr. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Cd betrug im Durchschnitt etwa 1,2%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Cd-Verteilung

Tab. 12 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Cd-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 12: Zusammenfassende Beschreibung der Cd-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum- und Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [µg/d]	14	(3-90)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	4,6	(1,2-2,0)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	0,2	(0,02-6,4)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,014	(0,001-0,4)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	0,2	(0,06-0,6)

3.3.4 Cäsium (Cs)

Cs wird derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen. Das Element gilt als nicht toxisch. Die durchschnittliche Zufuhr des einzig stabilen Isotops ^{133}Cs über die Nahrung beträgt laut Emsley (2001) 30 $\mu\text{g}/\text{d}$. Der Cs-Blutgehalt beträgt ca. 3 $\mu\text{g}/\text{l}$ (Minoia et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Cs-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Cs-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 13 sind die durchschnittlichen Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Cs-Zufuhr betrug im Mittel **8 $\mu\text{g}/\text{d} \pm 41\%$** (1,0-350 $\mu\text{g}/\text{d}$) bzw. **2,7 $\mu\text{g}/\text{kg} \pm 38\%$** (0,4-190 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (87% > BG, 87% > NG)). Die ca. 6fach höhere Aufnahmemenge der Mütter F und R von bis zu 350 μg konnte an einzelnen Tagen auf den Verzehr von gebratenen Nudeln mit Fleisch (Bratfett?) sowie Nüsse zurückgeführt werden. Generell existiert wenig Datenmaterial über Cäsium in Lebensmitteln und in der Muttermilch, da dieses Element in der Regel nur mit speziellen analytischen Messgeräten wie u.a. mit dem Atomabsorptionsspektrometer mit spezieller Optik (Resonanzlinie für Cs 852,1 nm) erfasst werden kann. In der vorliegenden Studie wurde Cs mit der ICP-MS gemessen, bei der die Qualitätskontrolle in Form von mitgeführten Blind- und Referenzwerten zufriedenstellend war.

In Abb. 13 sind die durchschnittlichen Cs-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **2,2 $\mu\text{g}/\text{kg} \pm 46\%$** ermittelt (0,7-7,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (100% > BG)), der in etwa dem angegebenen Bereich nach Krachler et al. (1998) in der Muttermilch entspricht (3,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$) und dem Cs-Gehalt im Blut ähnelt (3,0 $\mu\text{g}/\text{l}$, Minoia et al. 1990).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein relativ konstantes Niveau der Konzentration an Cs in der Muttermilch (Abb. 12). Nach Krachler et al. (1998) konnte während der gesamten Laktationsphase (kolostrume, transitorische, mature Phase) keine Cs-Konzentrationsveränderung festgestellt werden.

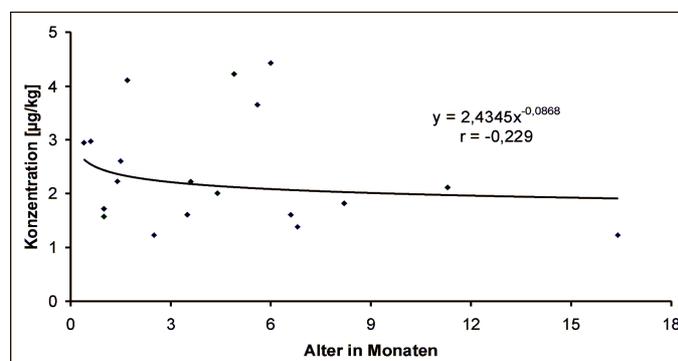


Abb. 12: Cs-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

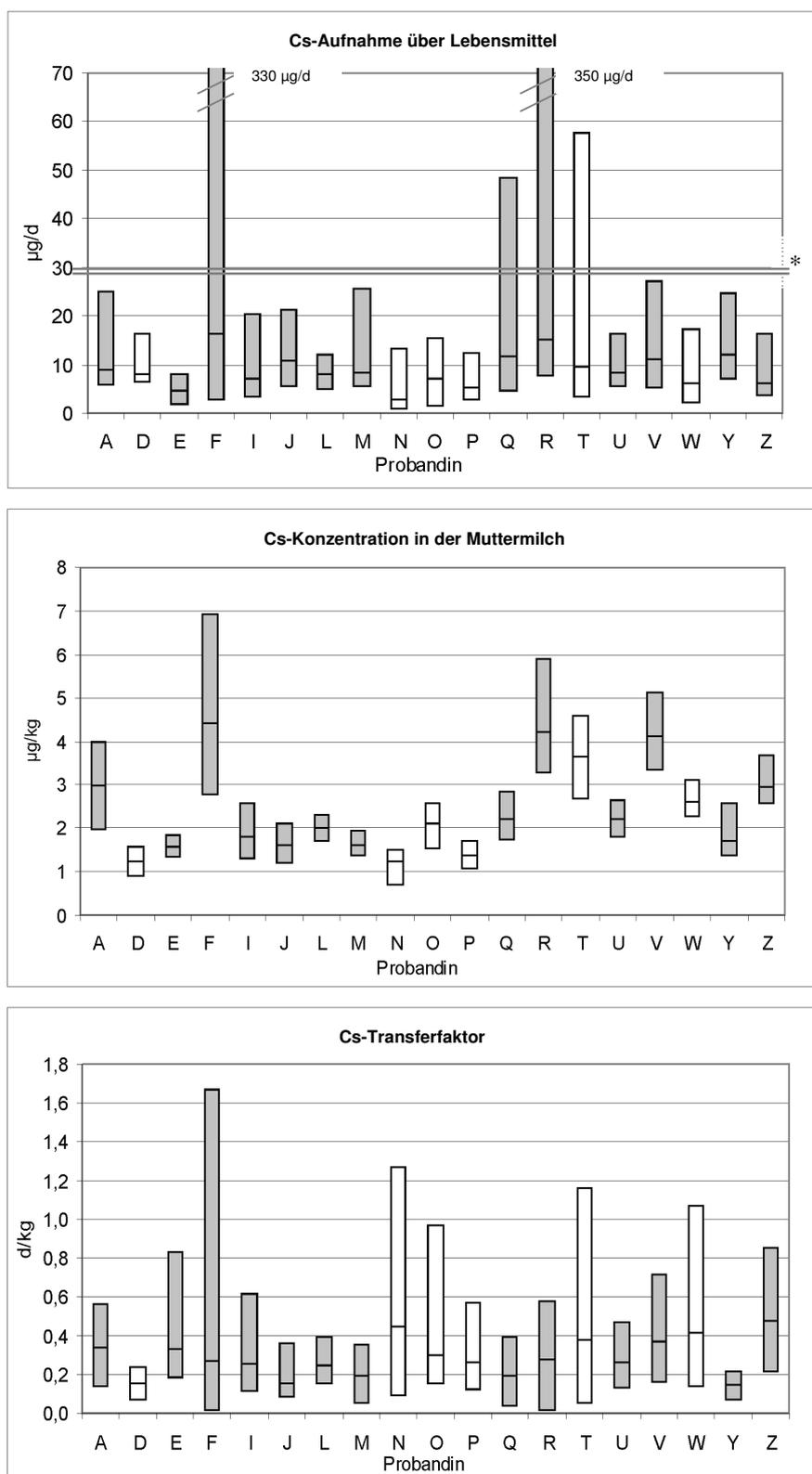


Abb. 13: Durchschnittliche tägliche Cäsiumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Cäsiumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, E, F, I, J, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: tägliche Zufuhr nach Emsley (2001).

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Cs-Aufnahme über die Nahrung und der Cs-Konzentration in der Muttermilch ($p < 0,001$, $n = 19$).

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Cs-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,271 d/kg \pm 35%** (0,01-1,7 d/kg; Abb. 13) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Cs in der Muttermilch (keine Veränderung, Abb. 12) und für dessen Transferfaktor (Abb. 14). Bezüglich der Cs-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine relativ gleichbleibende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

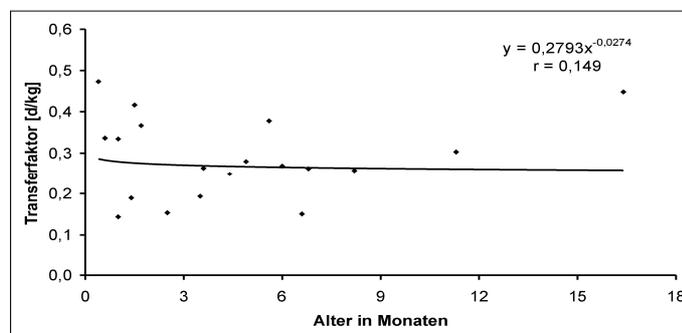


Abb. 14: Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Cs-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Cs über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge durchschnittlich **2,1 $\mu\text{g/d}$** (1,0-3,7 $\mu\text{g/d}$). Zwischen den Altersgruppen < 4 Monate und > 4 -17 Monate fand sich kein Unterschied in der Mengenzufuhr. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Cs betrug im Durchschnitt 23%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Cs-Verteilung

Tab. 13 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Cs-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 13: Zusammenfassende Beschreibung der Cs-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [$\mu\text{g/d}$]	8	(1,0-350)
Konzentration in der Nahrung [$\mu\text{g/kg}$]	2,7	(0,4-190)
Konzentration in der Muttermilch [$\mu\text{g/kg}$]	2,2	(0,7-7,0)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,271	(0,01-1,7)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [$\mu\text{g/d}$]	2,1	(1,0-3,7)

3.3.5 Eisen (Fe)

Eisen gehört zu den lebenswichtigen Spurenelementen für den menschlichen und tierischen Organismus. Der tägliche Bedarf an Fe beträgt zwischen 6-40 mg, er erhöht sich bei größeren Blutverlusten und in der Schwangerschaft. Als toxische Dosis gilt die Menge von 200 mg, als letale Dosis 7-35 g (Binder 2000). Der Eisengehalt im Blut beträgt 415 mg/kg (Emsley 2001).

Quantifizierung der täglichen Fe-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Fe-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 16 sind die durchschnittlichen Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die Mütter E, K und R (schraffiert) supplementierten jeweils mit 15 mg/d Biosan, 100 mg/d Plastolen N und 98 mg/d Ferro sanol duodenal (Eisenpräparate); die Z-Mutter nahm gelegentlich ein ‚Eisengetränk‘ zu sich. Die tägliche Aufnahmemenge der nicht Fe-supplementierten Mütter betrug **10 mg/d ± 34%** (2-80 mg/d) bzw. **3,5 mg/kg ± 31%** (0,8-40 mg/d (68% > BG, 82% > NG)) und entspricht dem Bereich von 9,4 mg/d, den Illing et al. (1993) bei ostdeutschen Frauen ermittelten. Die empfohlene Fe-Zufuhr für Stillende von 20 mg/d (Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) 2000) wird somit nur von den mit Fe supplementierten Müttern mit jeweils 20, 110 und 105 mg/d erreicht.

In Abb. 16 sind die durchschnittlichen Fe-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die durchschnittliche Fe-Konzentration in der Milch der nicht supplementierten Mütter lag bei **230 µg/kg ± 55%** (13-2000 µg/kg (88% > BG, 99% > NG)) und entsprach dem Referenzbereich von 200-1700 µg/l nach Caroli et al. (1994). Die WHO gibt einen Referenzbereich zwischen 350-720 µg/l an. Die supplementierten Mütter E, K und R zeigten in der Muttermilch ähnliche Konzentrationen (270, 460, 270µg/kg) wie einige nicht supplementierte Mütter.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein abnehmender Trend für die Konzentration an Fe in der Muttermilch (Abb. 15).

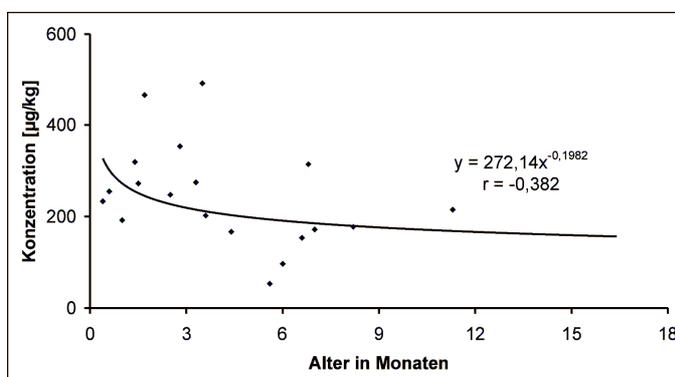


Abb. 15: Fe-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

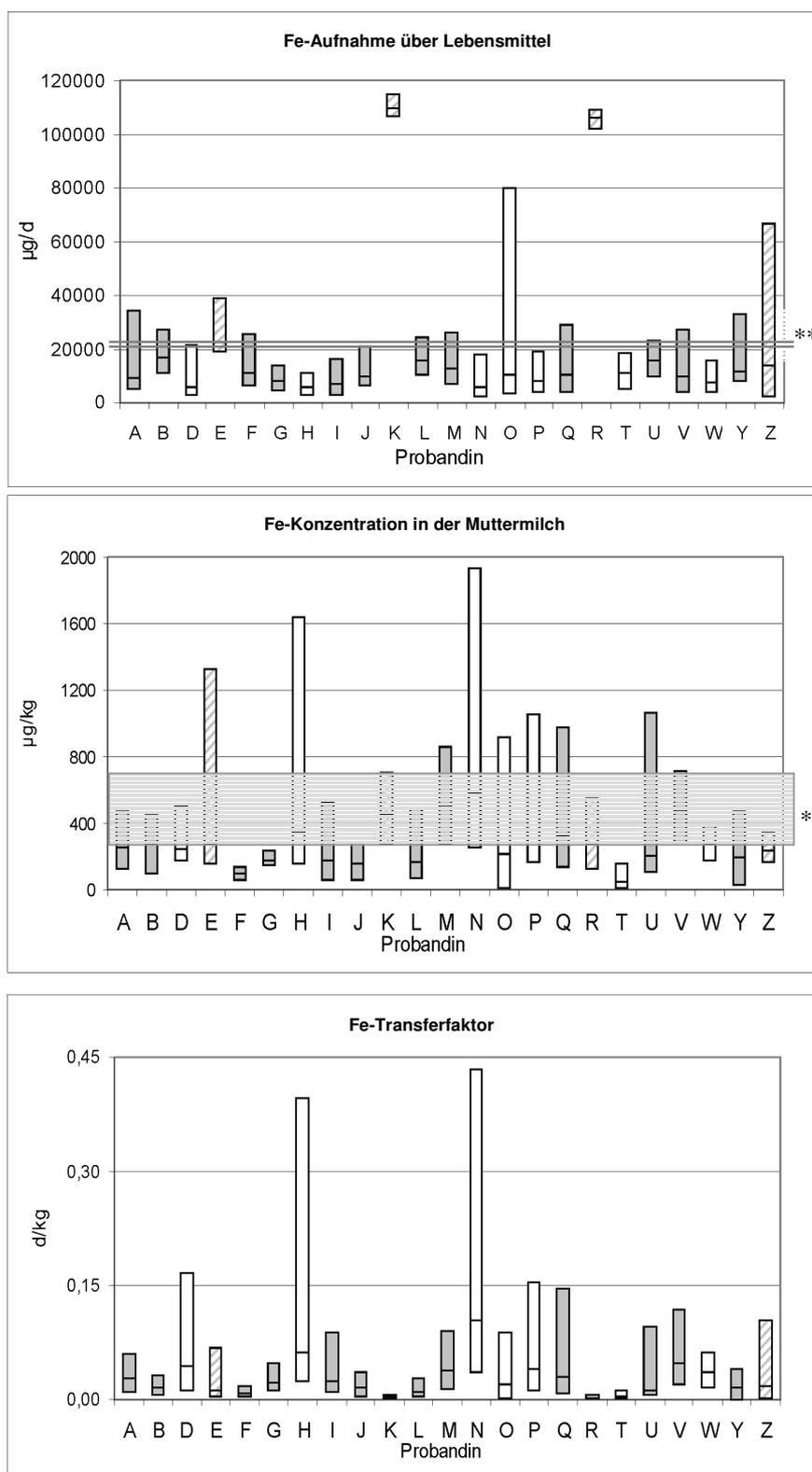


Abb. 16: Durchschnittliche tägliche Eisenaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Eisenkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). Schraffierte Balken: supplementierte Mütter; **: empfohlene Zufuhr nach DGE (2000); *: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Fe-Aufnahme über die Nahrung und der Fe-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Fe-Transferfaktor (geom. Mittelwert) der nicht supplementierten Mütter betrug **0,02 d/kg ± 114%** (0,0008-0,4 d/kg; Abb. 16) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg. Die Transferfaktoren der supplementierten Mütter K und R lagen im Mittel ca. eine Zehnerpotenz niedriger (K 0,004, R 0,003 und F 0,009, T 0,005 d/kg).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Fe in der Muttermilch (abnehmend, Abb. 15) und für dessen Transferfaktor (Abb. 17). Bezüglich der Fe-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

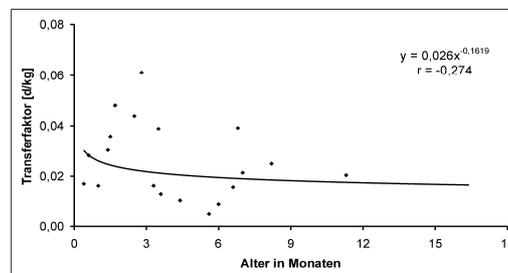


Abb. 17: Fe-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Fe-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die gestillten Säuglinge der nicht supplementierten Mütter nahmen im Alter < 4 Monaten durchschnittlich **260 µg/d** (160-420 µg/d) über die Milch auf und demzufolge ca. 50% weniger, als von der DGE (2000) für eine ‚empfohlene Zufuhr‘ geschätzt wird (500 µg/d). Die durchschnittliche Zufuhr der Säuglinge > 4 Monate reduzierte sich auf **160 µg/d** (80-270 µg/d). Für diese Altersgruppe empfiehlt die DGE eine ca. 50fach höhere Zufuhr von 8 mg/d. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Fe betrug für die nicht Fe-supplementierten Mütter etwa 2,0%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Fe-Verteilung

Tab. 14 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Fe-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 14: Zusammenfassende Beschreibung der Fe-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [mg/d]	10	(2-80)
Konzentration in der Nahrung [mg/kg]	3,5	(0,8-40)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	230	(13-2000)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,02	(0,0008-0,4)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	< 4 Mon.: 260 (160-420); > 4 Mon.: 160 (80-270)	

3.3.6 Gold (Au)

Bezogen auf die Lebensmittel lagen lediglich 14% der Werte oberhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (4,0 µg/kg) und 50% unterhalb der Nachweisgrenze (1,0 µg/kg). In der Muttermilch zeigte sich ein analoges Bild (17% > BG (2,0 µg/kg), 43% < NG (0,5 µg/kg)). Darüber hinaus sind die Ergebnisse aufgrund fehlender Referenz- bzw. Richtwerte für die Qualitätssicherung der gemessenen Daten unter Vorbehalt zu werten.

Au wird derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen. Reines Gold ist ungiftig und wird vom Organismus gut vertragen, es wirkt unter Umständen stimulierend (Binder 2000). Das Tragen von goldhaltigen Schmuckstücken sowie Zahnfüllungen könnte nach Krachler et al. (2000) die Goldkonzentration in der Muttermilch beeinflussen.

Quantifizierung der täglichen Au-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Au-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 19 sind die durchschnittlichen Au-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug **3 µg/d ± 53%** (0,5-40 µg/d) bzw. **1 µg/kg ± 41%** (0,5-8,0 µg/kg) und lag somit um 2 µg/d höher als die Au-Aufnahme der englischen Bevölkerung (Gregory et al. 1990, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food 1995). Die hohen Maximumwerte der Mütter B und E (22 und 35 µg/d) konnten auf den Verzehr von Kuchen (Quark, Raspel) und Torte (Quark, Sahne, Mandarinen) zurückgeführt werden.

In Abb. 19 sind die durchschnittlichen Au-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **0,1 µg/kg ± 114%** (0,02-2,5 µg/kg) ermittelt. Krachler et al. (2000) geben einen ca. 3fach höheren Wert von 0,29 µg/l an. Ob das Tragen goldhaltigen Schmucks oder Zahnfüllungen einen Einfluss auf die Goldkonzentration in der Muttermilch hat, wurde im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein geringfügig abnehmender Trend für die Konzentration an Au in der Muttermilch (Abb. 18).

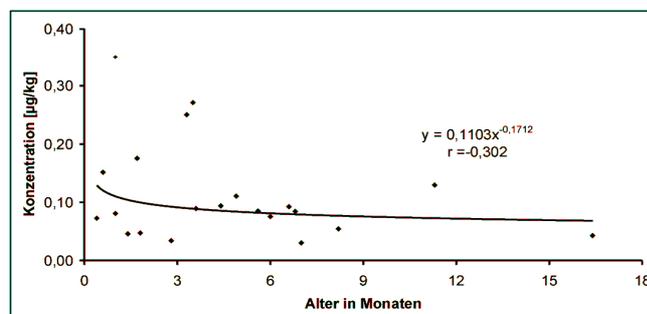


Abb. 18: Au-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

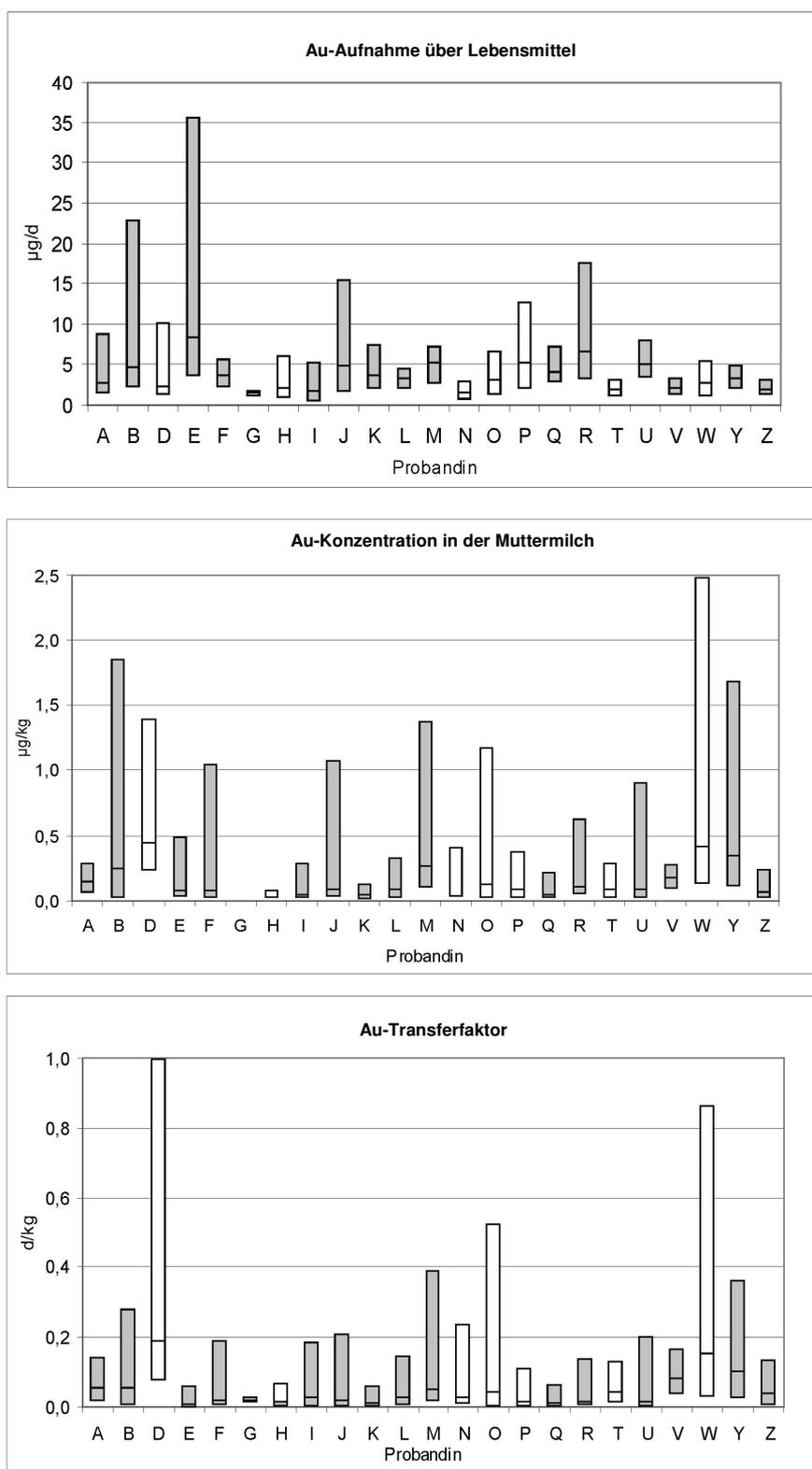


Abb. 19: Durchschnittliche tägliche Goldaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Goldkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T).

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Au-Aufnahme über die Nahrung und der Au-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Au-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,03 d/kg ± 140%** (0,001-1,0 d/kg; Abb. 19) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg. Lediglich die polnischen Mütter D und W wiesen je einmal innerhalb des 14tägigen Untersuchungszeitraumes einen maximalen Transferfaktor um 1 d/kg auf.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Au in der Muttermilch (geringfügige Abnahme, Abb. 18) und für dessen Transferfaktor (Abb. 20). Bezüglich der Au-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine geringfügig abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

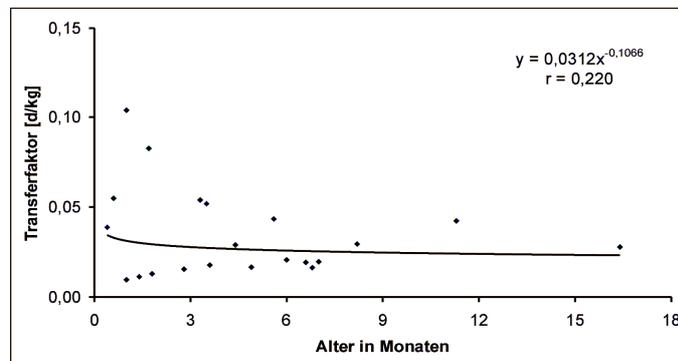


Abb. 20: Au-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Au-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Au über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge der Altersgruppe < 4 Monate **0,16 µg/d** (0,03-0,4 µg/d); für die Säuglinge > 4 Monate reduzierte sich die Au-Zufuhr auf etwa die Hälfte (**0,07 µg/d** (0,03-0,1 µg/d)). Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Au betrug im Durchschnitt etwa 2,7%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Au-Verteilung

Tab. 15 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Au-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab.15: Zusammenfassende Beschreibung der Au-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [µg/d]	3	(0,5-40)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	1	(0,5-8,0)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	0,1	(0,02-2,5)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,03	(0,001-1,0)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	< 4 Mon.: 0,16 (0,03-0,4); > 4 Mon.: 0,07 (0,03-0,1)	

3.3.7 Iod (I)⁷

I gehört zu den essentiellen Spurenelementen, die für den Menschen lebensnotwendig sind. Der tägliche Bedarf beträgt laut WHO und Binder (2000) 0,1-0,2 mg und wird über die Nahrung und Trinkwasser aufgenommen. Der Iodgehalt im Blut wird von Emsley (2001) mit 60 µg/kg angegeben.

Quantifizierung der täglichen I-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der I-Konzentration in der Muttermilch

In Tab. 16 sind die durchschnittlichen Iodaufnahmemengen der jeweiligen Mütter dargestellt (arithmetischer Mittelwert). Die deutschen Mütter (A, F, J, K, R, V, Y, Z) nahmen im Durchschnitt **166 ± 59 µg/d** Iod über die Nahrung auf (32-440 µg/d). Die höheren Aufnahmemengen der Mütter E (318 µg/d), G (391 µg/d) und T (242 µg/d) wurden durch zusätzliche Iodgaben in Tablettenform bedingt (Mutter E: Biosan® 150 µg/d, Mutter G: Jodid® 200 µg/d und Mutter T: Jodid® 100 µg/d). Durch den geringen Verzehr von Milch-, Ei- und Seefischprodukten der polnischen Mütter D und W lag die Aufnahme bei **70 ± 38 µg/d** (14-172 µg/d); die höchste Iodaufnahme erfolgte hierbei über Suppen (Speisesalz).

Im Vergleich zu der empfohlenen Aufnahmemenge von 200 µg/d der WHO und von 260 µg/d nach der DGE nahmen die deutschen Mütter um 17 bzw. 36 % geringere Iodmengen über die Nahrung zu sich. Die Iodzufuhr der polnischen Mütter wies im Vergleich zu den Empfehlungswerten der WHO und DGE sogar ein Defizit von 65 bzw. 73 % auf. Eine durchschnittliche Iodaufnahme von 317 µg/d (140-520 µg/d) erreichten die Iodsupplementierten Mütter und lagen damit oberhalb der Empfehlungswerte.

Tab. 16: Durchschnittliche tägliche Iodaufnahme über die Nahrung und durchschnittliche Iodkonzentration der verzehrten Lebensmittel. MA: Mittlere Abweichung vom Median

	Iodaufnahme durch Lebensmittel [µg/d]			Iodkonzentration in Lebensmitteln [µg/kg]	
	Mittelwert ± σ	Median ± MA	Minimum - Maximum	Mittelwert ± σ	Median ± MA
Deutsche Mütter					
A	137 ± 42	133 ± 31	53 - 218	41 ± 13	40 ± 11
F	145 ± 73	124 ± 25	53 - 293	38 ± 17	33 ± 7
J	184 ± 87	177 ± 70	54 - 440	41 ± 19	39 ± 15
K	223 ± 60	209 ± 33	144 - 346	62 ± 19	59 ± 12
R	190 ± 60	184 ± 38	91 - 303	65 ± 18	67 ± 10
V	153 ± 58	151 ± 43	43 - 269	50 ± 16	50 ± 8
Y	159 ± 33	164 ± 29	96 - 205	51 ± 11	49 ± 9
Z	138 ± 68	113 ± 27	32 - 265	61 ± 30	55 ± 12
	166 ± 59		32 - 440	51 ± 18	
Iodsupplementation					
E	318 ± 63	317 ± 44	227 - 513	68 ± 10	68 ± 7
G	391 ± 59	376 ± 42	295 - 519	131 ± 19	129 ± 13
T	242 ± 87	232 ± 28	137 - 413	76 ± 23	78 ± 22
	317 ± 70		137 - 519	92 ± 17	
Polnische Mütter					
D	76 ± 41	68 ± 20	16 - 172	30 ± 14	29 ± 9
W	64 ± 36	51 ± 13	14 - 142	33 ± 18	27 ± 7
	70 ± 38		14 - 172	32 ± 16	

⁷ Das vorliegende Kapitel wurde in Teilen bereits publiziert (Wünschmann et al. 2002b).

Die höchste Aufnahmemenge von 223 µg/d ohne Supplementation erreichte die Mutter K durch das Trinken von Früchtetee. Generell waren die mengenmäßig bedeutendsten Iodquellen der deutschen Mütter das iodierte Speisesalz (zubereitete Speisen) und (Kuh-)Milchprodukte (Joghurt, Schokomilchriegel, Cappuccino etc.). Meerestiere wie iodreiche Seefische wurden kaum konsumiert.

In Tab. 17 ist die durchschnittliche Iodkonzentration in der Muttermilch über den jeweiligen Untersuchungszeitraum dargestellt (arithmetischer Mittelwert). Die ermittelte durchschnittliche Iodkonzentration in der Muttermilch der deutschen Mütter lag bei **81 ± 25 µg/kg** (20-200 µg/kg) und der polnischen Mütter bei 65 ± 24 µg/kg (31-155 µg/kg). Höhere Werte erreichten die Iodsupplementierten Mütter E und G mit 217 ± 42 und 252 ± 81 µg/kg. Die tschechische Mutter T, die im Vergleich zu den Müttern E und G nur 100 µg/d Iod supplementierte, zeigte in der Milch eine Konzentration von 93 ± 31 µg/kg.

Tab. 17: Iodkonzentration in der murenen Muttermilch. MA: Mittlere Abweichung vom Median

Muttermilch [µg/kg]			
	Mittelwert ± σ	Median ± MA	Minimum - Maximum
Deutsche Mütter			
A	73 ± 24	72 ± 12	37-157
F	94 ± 34	85 ± 24	58-189
J	52 ± 16	47 ± 7	20- 93
K	97 ± 26	89 ± 20	68-154
R	40 ± 10	36 ± 7	25- 59
V	76 ± 20	77 ± 15	35-100
Y	121 ± 36	109 ± 10	70-202
Z	93 ± 37	81 ± 25	38-162
	81 ± 25		20-202
Iodsupplementation			
E	217 ± 42	202 ± 31	164-320
G	252 ± 81	233 ± 61	161-464
T	93 ± 31	103 ± 23	42-136
	187 ± 51		42-464
Geringe Iodzufuhr			
D	75 ± 31	68 ± 19	41-155
W	55 ± 16	56 ± 10	31- 91
	65 ± 24		31-155

Hinsichtlich der Iodkonzentration in der Muttermilch ist der Probenahmezeitpunkt der Milch von wesentlicher Bedeutung. Die höchste zeitliche Änderung (meist: Abnahme) verschiedener Elementkonzentrationen wurde während der ersten 2 Wochen des Stillens festgestellt (Casey et al. 1989). Die hier untersuchten Muttermilchproben wurden zwischen der 2. und 30. Laktationswoche (reife Frauenmilchphase) entnommen. In Abb. 21 ist die Iodkonzentration in der Muttermilch gegen das Alter des Säuglings (zum Zeitpunkt der Probenahme) aufgetragen. Das Ergebnis zeigt im Verlauf der Laktation eine nicht signifikante Abnahme der Iodkonzentration.

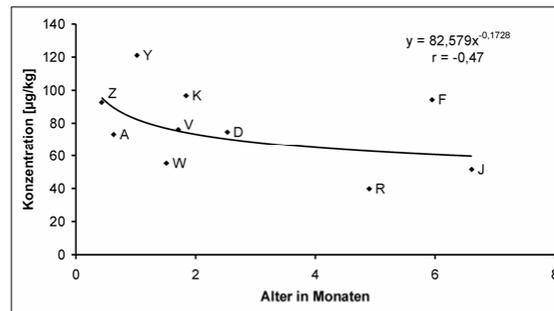


Abb. 21: I-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit. (Keine Berücksichtigung iodsupplementierter Mütter)

Das Verhältnis Iodaufnahme/Iodkonzentration in der Muttermilch

Die Iodgehalte in der Muttermilch der nicht iodsupplementierten Mütter standen in keinem signifikanten Zusammenhang zu den Iodaufnahmemengen durch die Nahrung (Abb. 22).

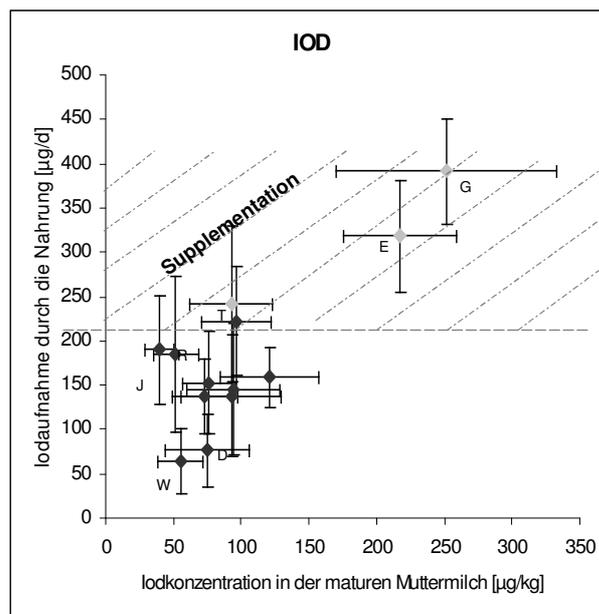


Abb.22: Verhältnis zwischen der Iodaufnahmemenge durch die Nahrung und der Iodkonzentration in der Muttermilch. E, G und T sind iodsupplementierte Mütter.

Die Mütter J und R nahmen überdurchschnittliche Iodmengen mit der Nahrung auf (184 und 190 µg/d; die durchschnittliche Aufnahmemenge lag bei 166 µg/d), während in ihrer Milch die geringsten Iodkonzentrationen gemessen wurden (52 und 40 µg/kg; der Durchschnitt lag bei 81 µg/kg). Mutter F, mit einer unterdurchschnittlichen Aufnahme von 145 µg/d, wies in der Milch eine ähnliche Konzentration (94 µg/kg) wie Mutter K auf (97 µg/kg), obwohl Mutter K die 1,5fache Menge an Iod aufnahm. Die geringsten Aufnahmemengen zeigten die polnischen Mütter W und D mit 64 und 76 µg/d, sie wiesen allerdings in ihrer Milch höhere Werte (55 und 75 µg/kg) im Vergleich zu den deutschen Müttern R und J (40 und 52 µg/kg) auf.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Durch die hohe Variation der Iodaufnahmemengen durch die Nahrung bei verhältnismäßig konstanter Konzentration in der Milch ergaben sich erhebliche zeitabhängige Unterschiede der auf Tagesbasis ermittelten Transferfaktoren (siehe Minimum- und Maximum-Werte der Tab. 18, arithmetische Mittelwerte). Zwischen den iod-supplementierten und nicht iod-supplementierten Müttern konnten keine Unterschiede in den Transferfaktoren ermittelt werden; hier lagen die durchschnittlichen Transferfaktoren bei $0,58 \pm 0,18$ bzw. **$0,56 \pm 0,23$ d/kg** mit Spannweiten zwischen 0,2 - 1,1 d/kg bzw. 0,1 - 2,2 d/kg. Ein zweifach höherer durchschnittlicher Wert von 1,3 d/kg (0,28-4,37 d/kg) zeigte sich bei den polnischen Müttern D und W, die die geringste Iodzufuhr über die Nahrung aufwiesen. Die Transferfaktoren der polnischen Mütter überschritten damit die theoretische Obergrenze von 1,2 d/kg bei einer täglichen Verzehrmenge an Muttermilch von 0,85 kg/d. Dies deutet darauf hin, dass entweder eine geringere Menge an Muttermilch tatsächlich verzehrt wurde oder > 100% der aufgenommenen Iodmenge der Mutter in die Milch übergegangen zu sein scheint (Mobilisierung aus körpereigenen Depots?).

Tab. 18: Transferfaktoren für den Übergang des Iods aus der Nahrung in die Muttermilch in d/kg.
MA: Mittlere Abweichung vom Median

Probandin	Transferfaktor Nahrung/Muttermilch		
	Mittelwert [d/kg]	Median \pm MA [d/kg]	Minimum-Maximum [d/kg]
Deutsche Mütter			
A	0,60 \pm 0,34	0,50 \pm 0,12	0,26-1,67
F	0,81 \pm 0,50	0,73 \pm 0,23	0,21-2,24
J	0,35 \pm 0,22	0,32 \pm 0,14	0,11-1,27
K	0,47 \pm 0,21	0,44 \pm 0,10	0,19-1,07
R	0,22 \pm 0,06	0,20 \pm 0,04	0,15-0,34
V	0,54 \pm 0,14	0,54 \pm 0,08	0,28-0,81
Y	0,77 \pm 0,16	0,78 \pm 0,10	0,49-1,11
Z	0,74 \pm 0,24	0,69 \pm 0,18	0,42-1,19
	0,56 \pm 0,23		0,11-2,24
Iodsupplementation			
E	0,70 \pm 0,15	0,68 \pm 0,11	0,36-0,97
G	0,64 \pm 0,21	0,59 \pm 0,13	0,41-1,11
T	0,41 \pm 0,18	0,36 \pm 0,09	0,21-0,78
	0,58 \pm 0,18		0,21-1,11
Polnische Mütter			
D	1,38 \pm 1,01	1,17 \pm 0,61	0,28-4,37
W	1,19 \pm 0,89	0,93 \pm 0,34	0,39-3,90
	1,28 \pm 0,95		0,28-4,37

Nach der koreanischen Studie von Moon & Kim (1999), deren stillende Mütter in der kolostrumalen Milchphase ca. die doppelte Iodzufuhr und -menge in ihrer Muttermilch im Vergleich zur maturaen Milchphase aufzeigen, verringerte sich der Transferfaktor von 0,79 d/l auf 0,69 d/l (Iodzufuhr: von 2744 auf 1300 $\mu\text{g}/\text{d}$, Iodkonzentration in der Milch: von 2170 auf 890 $\mu\text{g}/\text{l}$). Im Vergleich dazu betrug der Transferfaktor der deutschen Mütter 0,56 d/kg. Unter Berücksichtigung des Untersuchungszeitpunktes der koreanischen Mütter (4 Wochen post partum) und der deutschen Mütter (2-

30 Wochen post partum) sind die Transferfaktoren von 0,56 d/kg bzw. 0,69 d/l als geringfügig abweichend einzuschätzen.

Tägliche Iodzufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von I über die Muttermilch betrug für die Säuglinge der deutschen Mütter in der Altersgruppe < 4 Monate **79 µg/d** (62-102 µg/d, n = 5) und lag damit oberhalb der empfohlenen Zufuhrmengen für eine angemessene Ernährung nach der DGE und WHO (40-50 µg/d). In der Altersgruppe > 4 Monate reduzierte sich die Zufuhr auf **53 µg/d** (34-80 µg/d; n = 3) und entsprach nicht der empfohlenen Zufuhr von 80 µg/d nach der DGE. Die WHO nennt eine geringere empfohlene Iodzufuhr von 50 µg/d für diese Altersgruppe.

Die gestillten Säuglinge der iodsupplementierten Mütter bekamen durchschnittlich 159 µg/d (79-214 µg/d; n = 3; Altersgruppe > 4 Monate) über die Milch verabreicht und nahmen demzufolge eine 3fach höhere Iodmenge als die Kinder von nicht iodsupplementierten Müttern zu sich.

Die gestillten Säuglinge der polnischen Mütter, die sich in der Altersgruppe > 4 Monate befanden, nahmen eine ähnliche Iodmenge von 55 µg/d auf (47-64 µg/d; n = 2) wie die Kinder der deutschen nicht supplementierten Mütter. Die polnischen Mütter nahmen nur etwa die Hälfte an Iod im Vergleich zu den deutschen Müttern über die Nahrung auf.

Der Anteil des partitionierten I aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch betrug bei den deutschen nicht- und iodsupplementierten Müttern 47,6 % und bei den polnischen Müttern rechnerisch 108,8%. Hierbei wurde eine tägliche Verzehrmenge an Muttermilch von 0,85 kg/d unterstellt.

Zeitliche Verschiebung zwischen der Aufnahme und Deposition in die Muttermilch

Die Verwendbarkeit des Isotops ^{123}I ($T_{1/2} = 13,3 \text{ h}$) als orales Radiodiagnostikon legt die Vermutung nahe, dass die tatsächliche Zeitverzögerung bei oraler Aufnahme erheblich kürzer ist als 24 Stunden. Dies gilt insbesondere, wenn das Iod als einfaches Iodidion vorliegt, also in der wässrigen und nicht in der Lipid-Phase der Nahrungsmittel. Hierfür spricht der bei flüssiger Schlagsahne gegenüber Molke erheblich geringere Iodgehalt (Molkepulver 0,17 µg/g, Sahne 30% Fettgehalt 0,07µg/g). Einen weiteren Hinweis auf die Plausibilität derart kurzer Verzögerungen liefert auch die Toxikologie: Species, die mit Iodid hinsichtlich ihrer Ionengröße im freien wie hydratisierten Zustand, der Ladung, der Polarisierbarkeit, der Löslichkeit analoger Salze in Wasser und unpolaren Medien und anderer Parameter vergleichbar sind, werden weitaus schneller aufgenommen; so führt die orale Aufnahme entsprechender Mengen von löslichen Cyaniden innerhalb weniger Minuten zum Tod.

Weaver et al. (1960) verabreichten stillenden Müttern ^{131}I (10-30 µCi) oral, dessen höchster quantitativer Anteil während den ersten 24 Stunden in der Milch nachgewiesen werden konnte. In Abb. 23 sind die täglichen Iodaufnahmemengen den Iodkonzentrationen in der Milch gegenübergestellt. Zur Demonstration wurden die Ergebnisse der Mütter A und Y herangezogen, deren Untersuchungen zwischen 2 und 4 Wochen andauerten. Evident wird, dass im Gegensatz zur Mutter A die grafische Darstellung der Mutter Y an Tagen mit höheren Iodaufnahmemengen eine Deposition in die Milch entweder am selben Probenahmetag oder um einen Tag zeitverzögert belegt. Bei der

Mutter A ist eher ein uneinheitliches Verteilungsmuster erkennbar, d.h. selbst Peaks, die durch höhere Aufnahmen bedingt werden, können den höheren Peaks in der Milch nicht zugeordnet werden.

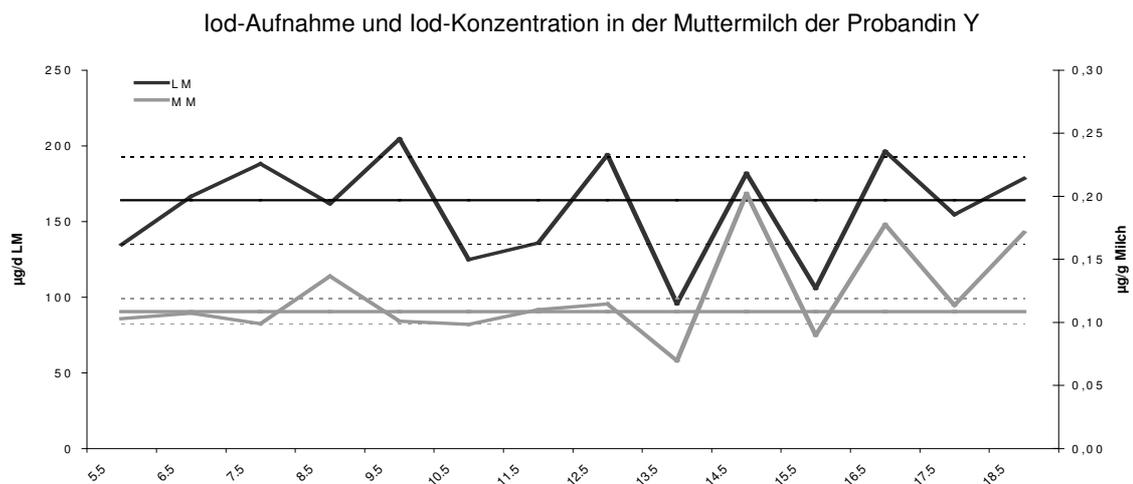
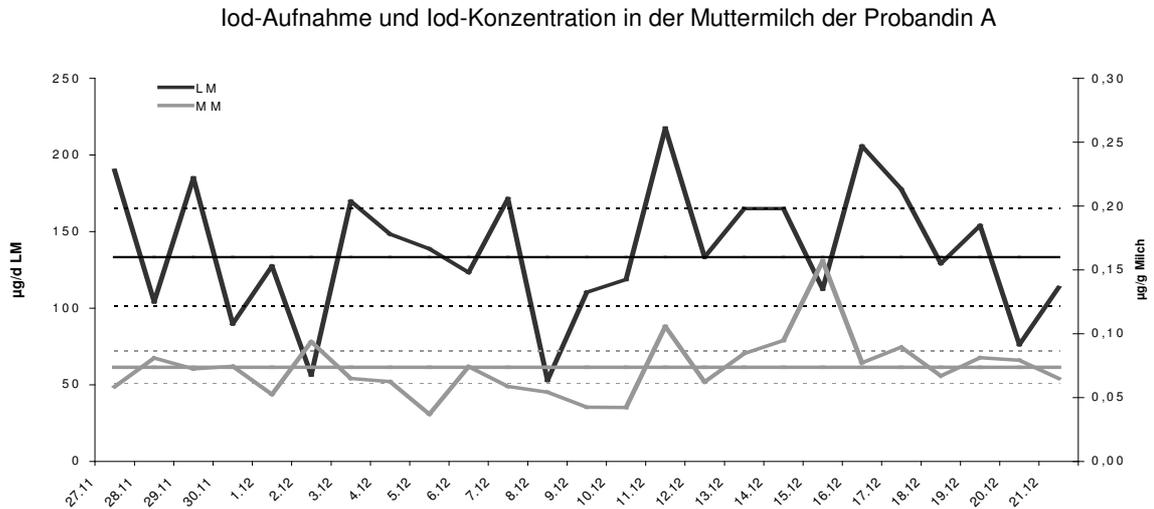


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf zwischen der Iodaufnahme über die Nahrung und Deposition in die Milch der Probandinnen A und Y jeweils mit Medianwert und Medianabweichung.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten I-Verteilung

Tab. 19 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten I-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 19: Zusammenfassende Beschreibung der I-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.

	Arithmetischer Mittelwert ± Standardabweichung	
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [$\mu\text{g}/\text{d}$]	166 ± 59 (D)	70 ± 38 (PL)
Konzentration in der Nahrung [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	51 ± 18 (D)	32 ± 16 (PL)
Konzentration in der Muttermilch [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	80 ± 25 (D)	65 ± 24 (PL)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	$0,56 \pm 0,23$ (D)	$1,28 \pm 0,95$ (PL)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [$\mu\text{g}/\text{d}$]	(D) < 4 Mon.: 62-102; 4 < 12 Mon.: 34-80	
Zeitlicher Transport zw. Aufnahme und Deposition in die Milch	¹³¹ I ca. 24 h	

Weaver et al. 1960

D: Deutsche Mütter (n=8); PL: Polnische Mütter (n=2)

3.3.8 Kupfer (Cu)

Cu gehört zu den lebenswichtigen Spurenelementen, die im Organismus in Enzymen und im Blutplasma (Coeruloplasmin) enthalten sind. Der Mensch nimmt über die Nahrung täglich etwa 1,4-6 mg Cu auf, jedoch nur 1-2 mg werden resorbiert. Die toxische Dosis liegt bei über 250 mg, eine letale Dosis ist nicht bekannt (Binder 2000). Der Kupfergehalt im Blut wird mit 1225 µg/l angegeben (Minoia et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Cu-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Cu-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 25 sind die durchschnittlichen Cu-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug **1,2 mg/d ± 36%** (0,3-5,0 mg/d) bzw. **420 µg/kg ± 22%** (175-1850 µg/kg (99% > BG)) und lag damit in dem von der DGE (2000) geschätzten Bereich für eine angemessene Zufuhr von 1,0-1,5 mg/d für Jugendliche und Erwachsene. Die Mütter F und R nahmen an einigen Tagen bis zu 5 mg/d Cu über die Nahrung auf, die auf das Verzehren von Vollmilchschokolade, Nussmischungen, Marzipan und Soja-Drinks sowie Brot mit Leber und Zwiebeln zurückgeführt werden konnten. Eine relativ gleichmäßig hohe Cu-Aufnahme wies die Mutter K auf, die Cu überwiegend durch das Trinken von Früchtetee (bzw. Teemischung) und Fruchtsäften aufnahm.

In Abb. 25 sind die durchschnittlichen Cu-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **195 µg/kg ± 52%** (50-500 µg/kg (100% > BG)) ermittelt, der gut mit dem Referenzbereich nach Caroli et al. (1994) übereinstimmt und innerhalb des Referenzbereiches der WHO liegt (180-751 µg/l, 180-310 µg/l).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein abnehmender Trend für die Konzentration an Cu in der Muttermilch (Abb. 24, $p < 0,001$, $n = 23$), der nach Rossipal und Krachler (1998) ebenfalls ermittelt werden konnte.

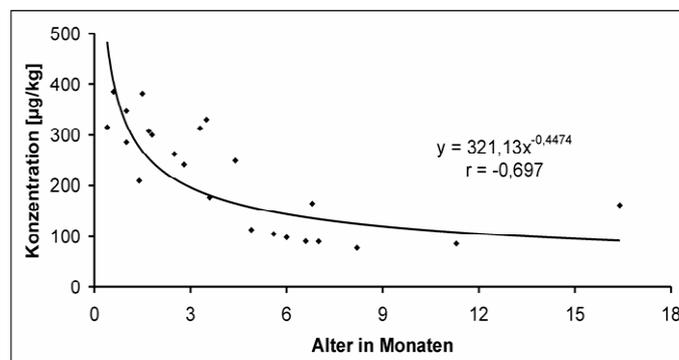


Abb. 24: Cu-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

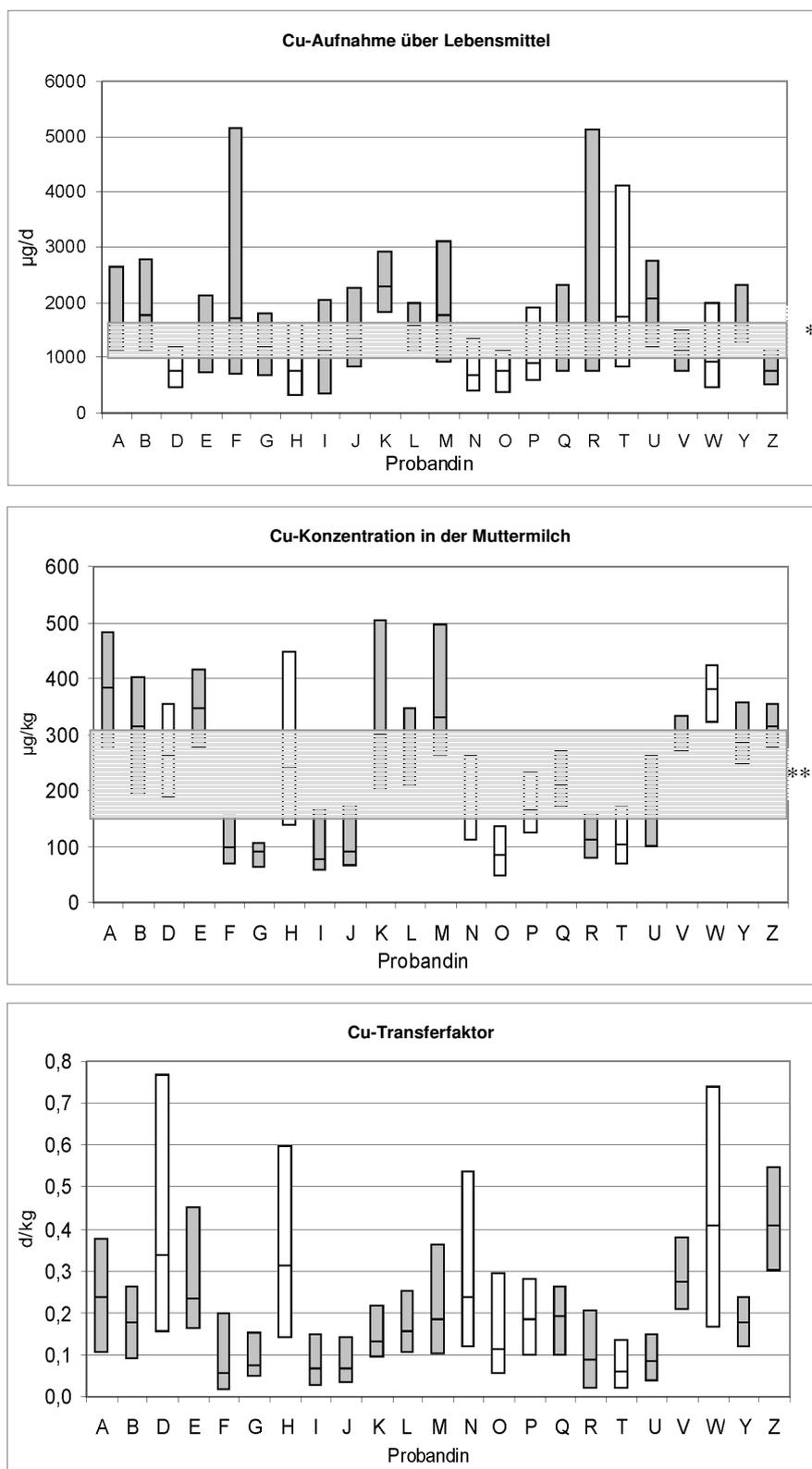


Abb. 25: Durchschnittliche tägliche Kupferaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Kupferkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: empfohlene Zufuhr nach DGE; **: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Cu-Aufnahme über die Nahrung und der Cu-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Cu-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,16 d/kg ± 70%** (0,02-0,8 d/kg; Abb. 25) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Cu in der Muttermilch (Abnahme, Abb. 24) und für dessen Transferfaktor (Abb. 26). Bezüglich der Cu-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

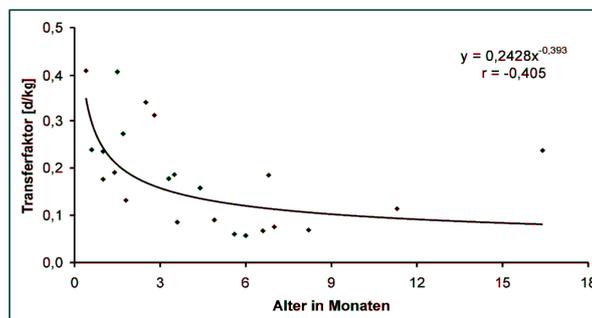


Abb. 26: Cu-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Cu-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Cu über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge der Altersgruppe < 4 Monate **250 µg/d** (150-320), die gut mit dem Schätzwert (0,2-0,6 mg/d) für eine angemessene Zufuhr nach der DGE (2000) vereinbar ist. Die Zufuhr der gestillten Säuglinge > 4 Monate reduzierte sich um das 2,4fache (**105 µg/d** (66-210 µg/d)) und entsprach in etwa 1/6 bzw. 1/7 der Menge, die laut DGE den Säuglingen dieser Altersgruppe zugeführt werden sollte (0,6-0,7 mg/d).

Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Cu betrug im Durchschnitt etwa 13,2%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Cu-Verteilung

Tab. 20 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Cu-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 20: Zusammenfassende Beschreibung der Cu-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [mg/d]	1,2	(0,3-5,0)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	420	(175-1850)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	195	(50-500)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,16	(0,02-0,8)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	< 4 Mon.: 250 (150-320) ; > 4 Mon.: 105 (66-210)	

3.3.9 Mangan (Mn)

Mn gehört zu den Spurenelementen, die für alle Organismen essentiell sind. Biologische Bedeutung hat Mn vor allem bei der Stoffwechselregulation als Aktivator verschiedener Enzyme. Der tägliche Bedarf für den Menschen liegt bei etwa 5 mg und wird hauptsächlich über die Nahrung gedeckt (Binder 2000). Der Mangangehalt im Blut beträgt etwa 8,8 µg/l (Minoia et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Mn-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Mn-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 28 sind die durchschnittlichen Mn-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug im Mittel **3,5 mg/d ± 46%** (0,9-13 mg/d) bzw. **1,1 mg/kg ± 35%** (0,5-3,5 mg/kg (100% > BG)) und lässt sich gut mit den ermittelten Aufnahmemengen deutscher Frauen nach Becker et al. (1996) und Anke et al. (1991) vergleichen (3,9 bzw. 2,0-3,8 mg/d); die DGE (2000) gibt einen ähnlichen Bereich an (2,0-5,0 mg/d). Die hohen mittleren Aufnahmemengen der Mütter L, T und U konnten auf den regelmäßigen Verzehr von Vollkornprodukten und Tees zurückgeführt werden.

In Abb. 28 sind die durchschnittlichen Mn-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Im Mittel betrug die Konzentration **4,6 µg/kg ± 28%** (1,5-290 µg/kg (100% > BG)) und ist mit der ermittelten Konzentration von 4,2 µg/kg bzw. 3-4 µg/l nach Krachler et al. (1998) und der WHO vergleichbar.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein konstantes Niveau der Konzentration an Mn in der Muttermilch (Abb. 27). Dieser Trend wird von Krachler et al. (1998) ebenfalls beschrieben, die darüber hinaus in der kolostrum Phase eine 2-fach höhere Menge ermitteln konnten.

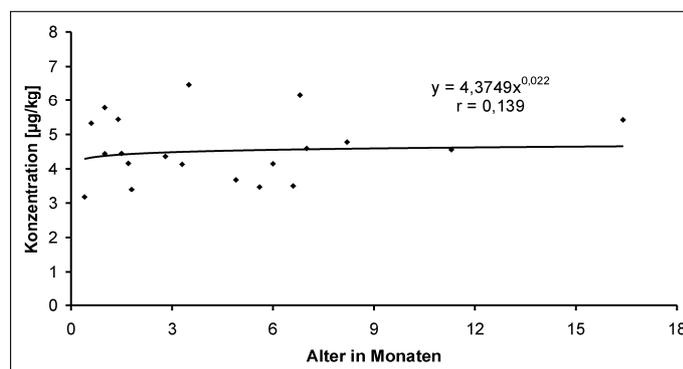


Abb. 27: Mn-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

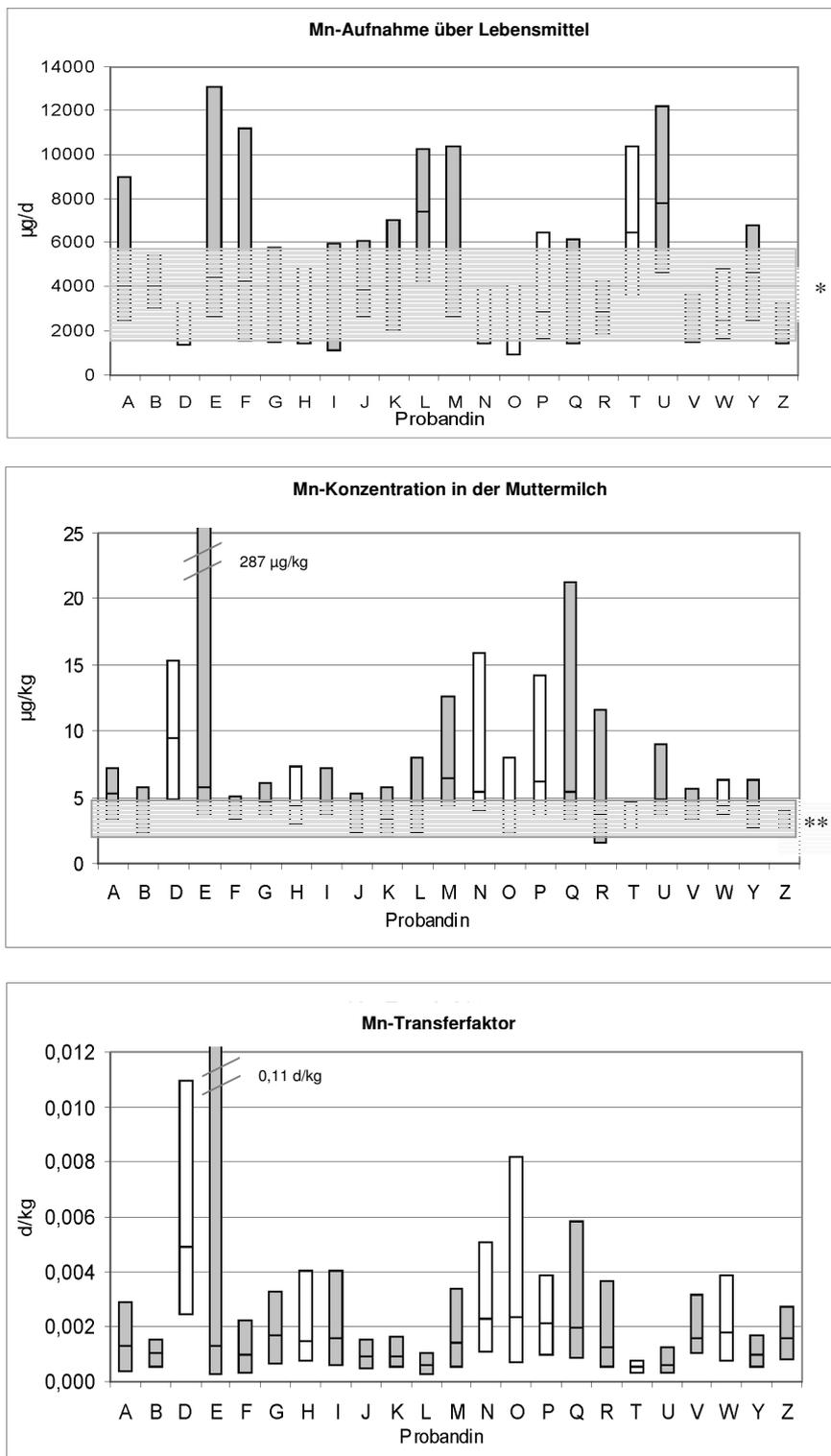


Abb. 28: Durchschnittliche tägliche Manganaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Mangankonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: empfohlene Zufuhrmenge nach DGE; **: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Mn-Aufnahme über die Nahrung und der Mn-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Mn-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,0013 d/kg ± 67%** (0,0003-0,11 d/kg; Abb. 28) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Mn in der Muttermilch (keine Veränderung, Abb. 27) und für dessen Transferfaktor (Abb. 29). Bezüglich der Mn-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine relativ gleichbleibende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

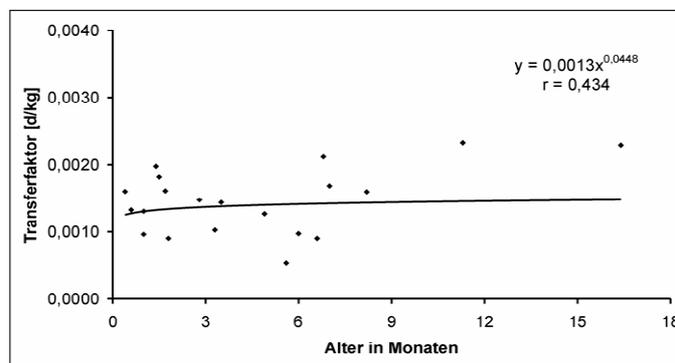


Abb. 29: Mn-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Mn-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Mn über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge **4,3 µg/d** (2,5-5,5 µg/d). Die DGE (2000) gibt einen Schätzwert für die empfohlene Zufuhr für Säuglinge > 4 Monate an, der um das 140-230fache höher liegt als die in der vorliegenden Studie betrachteten Säuglinge über die Milch zugeführt bekamen; die DGE (2000) geht von einer Zufuhr von 0,6-1,0 mg/d bei Säuglingen > 4 Monate aus. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Mn betrug im Durchschnitt etwa 0,1%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Mn-Verteilung

Tab. 21 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Mn-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 21: Zusammenfassende Beschreibung der Mn-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [mg/d]	3,5	(0,9-13)
Konzentration in der Nahrung [mg/kg]	1,1	(0,5-3,5)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	4,6	(1,5-290)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,0013	(0,0003-0,11)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	4,3	(2,5-5,5)

3.3.10 Nickel (Ni)

Ni gehört zu den Spurenelementen, deren Funktion für den menschlichen Organismus derzeit nicht eindeutig geklärt ist. Der erwachsene menschliche Organismus enthält etwa 10 mg. Die tägliche Zufuhr über die Nahrung liegt etwa bei 0,3-0,5 mg. Für Mitteleuropa wurde bisher bei beruflich nicht exponierten Personen von einer täglichen Aufnahmemenge von 500 µg ausgegangen. Ni ist nachweislich kanzerogen (Binder 2000). Der Ni-Blutgehalt beträgt ca. 2,3 µg/l (Minoia et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Ni-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Ni-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 31 sind die durchschnittlichen Ni-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Ni-Zufuhr betrug **250 µg/d ± 49%** (36-2220 µg/d) bzw. **84 µg/kg ± 37%** (15-570 µg/kg (93% > BG)). Binder (2000) gibt eine tägliche Zufuhr von 300-500 µg an, während bei der englischen Bevölkerung eine Aufnahmemenge von 120 µg/d ermittelt werden konnte (Ysart et al. 1999).

Höhere Ni-Aufnahmemengen konnten auf den Verzehr von Steak mit Pfeffersöße, Brötchen und Tomatensuppe zurückgeführt werden; eine Lebensmittelgruppe, die eindeutig höhere Ni-Gehalte aufwies, konnte nicht identifiziert werden.

In Abb. 31 sind die durchschnittlichen Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurden **14 µg/kg ± 29%** (5-100 µg/kg (100% > BG)) ermittelt. Krachler et al. (2000) ermittelten eine um 95% niedrigere Konzentration in der Milch österreichischer Mütter. Die in der vorliegenden Studie ermittelte Konzentration von 14 µg/kg entspricht eher den Werten, die in der industriell hergestellten Babynahrung gefunden wurde (11-18 µg/l, Krachler et al. 2000) und nach WHO (1989) als ‚normal‘ beschrieben wird (11-16 µg/l).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein konstantes Niveau der Konzentration an Ni in der Muttermilch (Abb. 30).

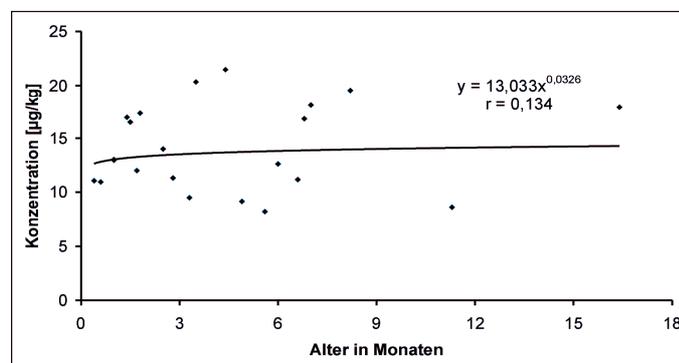


Abb. 30: Ni-Konzentration in der Muttermilch im Laufe der Laktationsdauer.

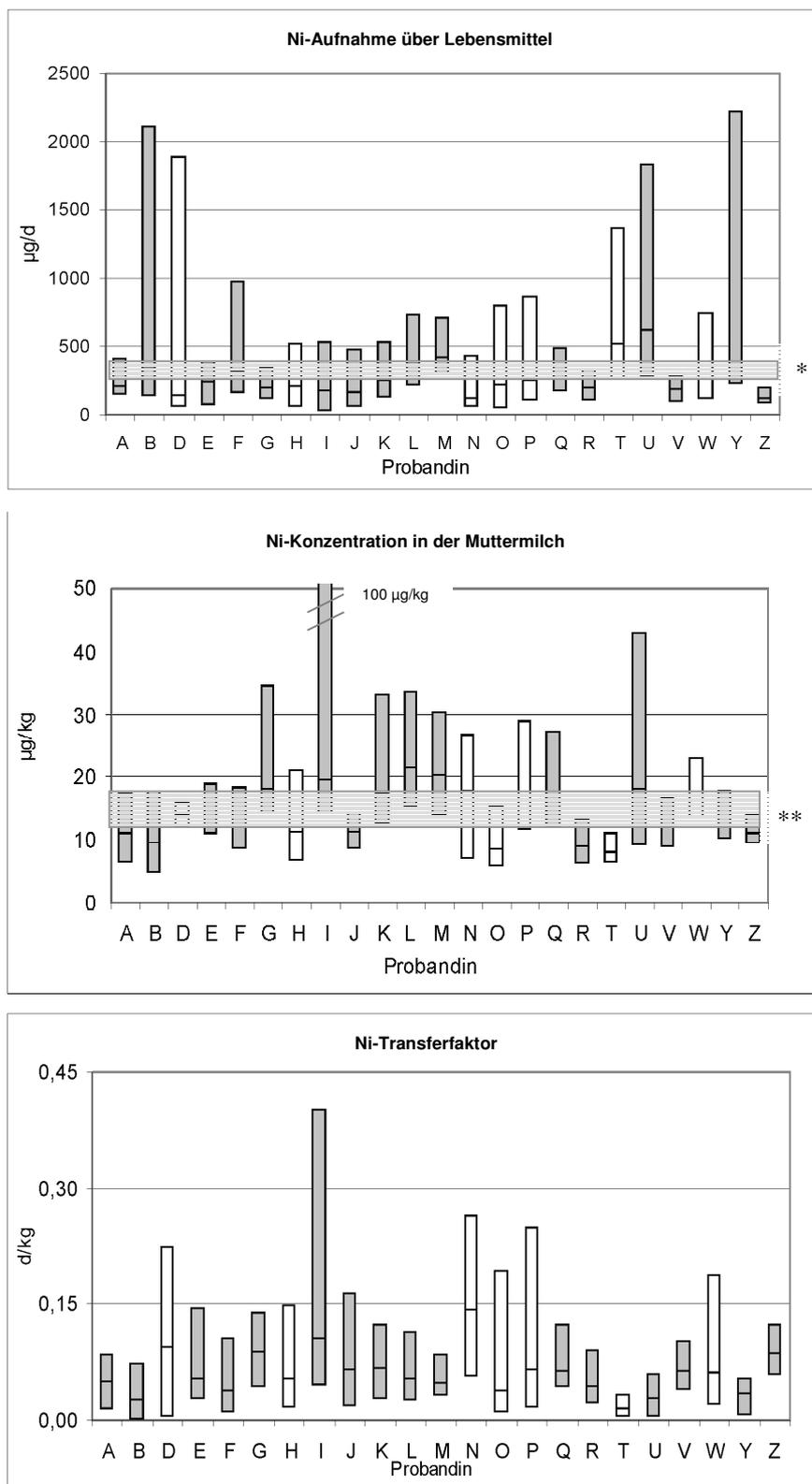


Abb. 31: Durchschnittliche tägliche Nickelaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Nickelkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: tägliche Zufuhr nach Binder (2000); **: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Ni-Aufnahme über die Nahrung und der Ni-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Ni-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,054 d/kg ± 51%** (0,002-0,4 d/kg; Abb. 31) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten für die Konzentration von Ni in der Muttermilch (keine Veränderung, Abb. 30) und für dessen Transferfaktor (Abnahme, Abb. 32). Bezüglich der Ni-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine relativ gleichbleibende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

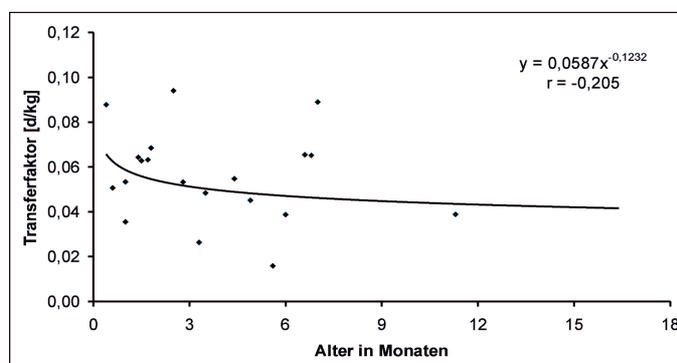


Abb. 32: Ni-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Ni-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Ni über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge durchschnittlich **12 µg/d** (8-18 µg/d). Zwischen den Altersgruppen < 4 Monate und > 4-17 Monate fand sich kein Unterschied in der Zufuhrmenge. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Ni betrug im Durchschnitt etwa 4,6%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Ni-Verteilung

Tab. 22 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Ni-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 22: Zusammenfassende Beschreibung der Ni-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [µg/d]	250	(36-2220)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	84	(15-570)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	14	(5-100)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,054	(0,002-0,4)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	12	(8-18)

3.3.11 Phosphor (P)

P ist für alle Organismen lebensnotwendig. Der erwachsene menschliche Körper enthält durchschnittlich etwa 750 g P, von denen etwa 650 g im Knochensystem fest gebunden sind. Der tägliche Bedarf liegt bei etwa 1-1,2 g und wird hauptsächlich über die Nahrung gedeckt (Binder 2000). Die P-Konzentration im Blut wird von Emsley (2001) mit 345 mg/kg angegeben.

Quantifizierung der täglichen P-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der P-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 34 sind die durchschnittlichen P-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug **1,2 g/d ± 30%** (0,2-3,5 g/d) bzw. **0,41 g/kg ± 24%** (0,1-0,9 g/kg (95% > BG)) und stimmt gut mit der empfohlenen Zufuhr von 0,9 g/d nach DGE (2000) überein. Auffallend sind die niedrigeren P-Aufnahmemengen der polnischen Mütter (D, H, N, O, P und W (T ist eine tschechische Mutter)), die ca. 30% unterhalb des Durchschnitts der deutschen Mütter (1,4 g/d) lagen. Das Verzehren von nuss- und käsehaltigen Lebensmitteln (Schimmelkäse?) war verantwortlich für die höchsten registrierten Aufnahmemengen.

In Abb. 34 sind die durchschnittlichen P-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **115 mg/kg ± 18%** (33-195 (100% > BG)) ermittelt, der grob dem Bereich nach WHO zuzuordnen ist (135-155 mg/l).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein abnehmender Trend für die Konzentration an P in der Muttermilch (Abb. 33, $p < 0,001$; $n = 23$). Dieser Trend konnte ebenfalls von Harzer und Mitarbeitern 1986 ermittelt werden.

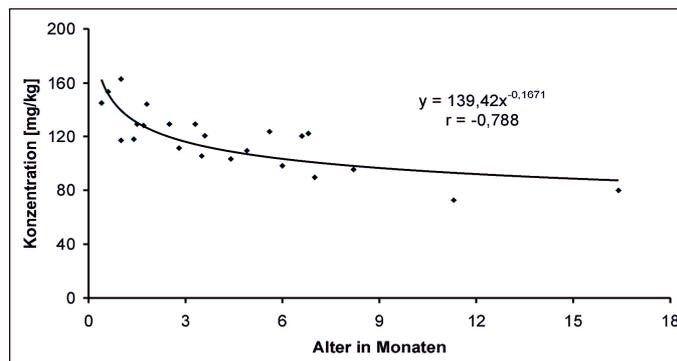


Abb. 33: P-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

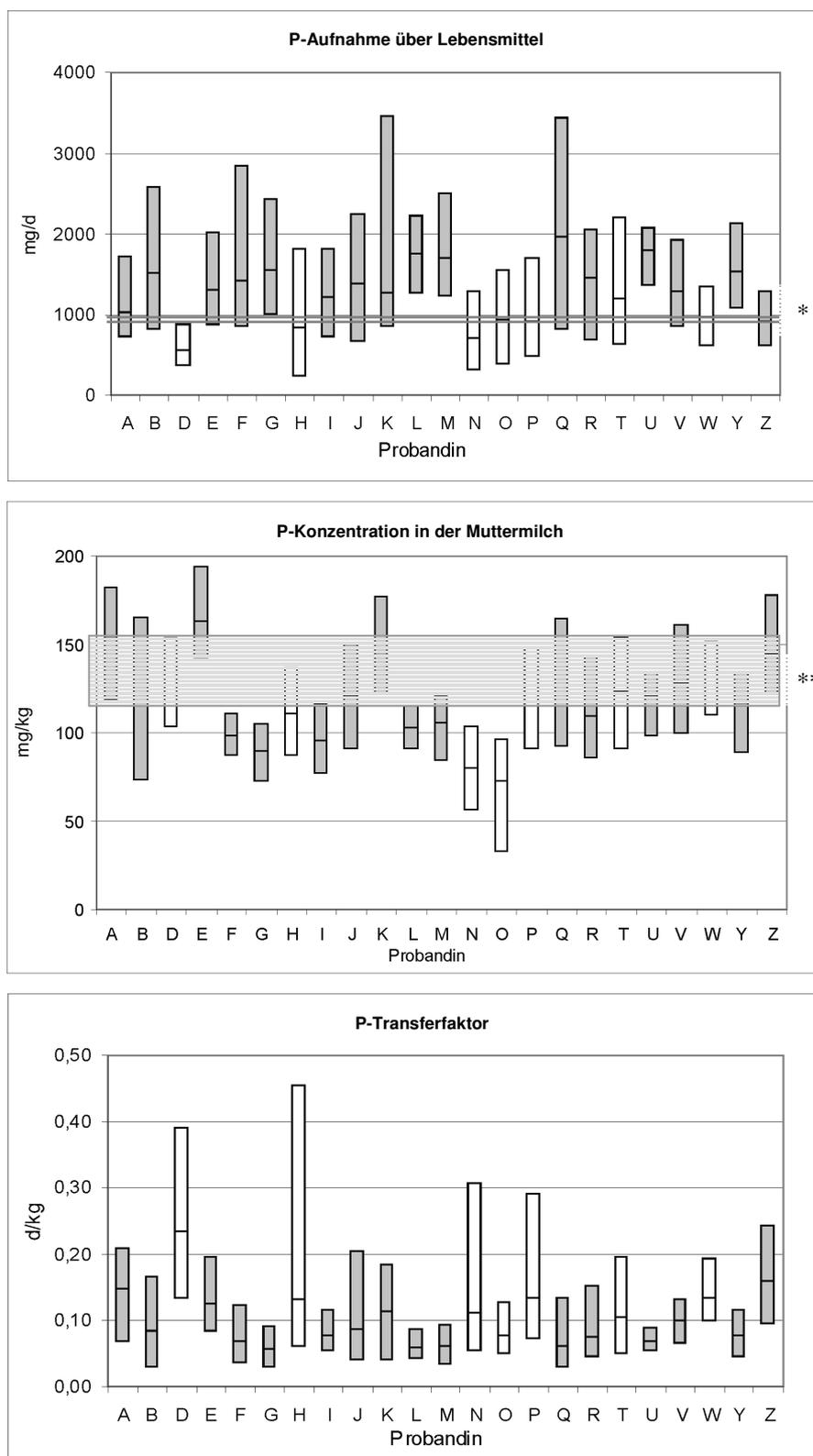


Abb. 34: Durchschnittliche tägliche Phosphoraufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Phosphorkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: empfohlene Zufuhr nach DGE; **: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der P-Aufnahme über die Nahrung und der P-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche P-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,095 d/kg ± 43%** (0,03-0,46 d/kg; Abb. 34) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von P in der Muttermilch (Abnahme, Abb. 33) und für dessen Transferfaktor (Abb. 35). Bezüglich der P-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine relativ gleichbleibende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

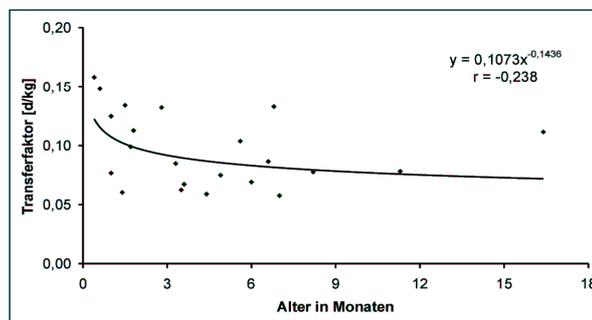


Abb. 35: P-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche P-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von P über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge < 4 Monate **110 mg/d** (90-140 mg/d); die Zufuhr der Säuglinge > 4 Monate reduzierte sich auf **86 mg/d** (60-105 mg/d). Für die Altersgruppe < 4 Monate empfiehlt die DGE (2000) eine tägliche Zufuhr von 120 mg, die gut mit der hier ermittelten Zufuhr von 110 mg/d vereinbar ist. Für die Altersgruppe 4 bis unter 12 Monate empfiehlt die DGE (2000) eine Aufnahme von 300 mg/d, die ca. 3fach höher liegt als die Menge, die die gestillten Säuglinge in der vorliegenden Studie über die Muttermilch zugeführt bekamen. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten P betrug im Durchschnitt etwa 8%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten P-Verteilung

Tab. 23 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten P-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 23: Zusammenfassende Beschreibung der P-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [g/d]	1,2	(0,2-3,5)
Konzentration in der Nahrung [g/kg]	0,41	(0,1-0,9)
Konzentration in der Muttermilch [mg/kg]	115	(33-195)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,095	(0,03-0,46)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [mg/d]	< 4 Mon.: 110 (90-140) ; > 4 Mon.: 86 (60-105)	

3.3.12 Rhenium (Re)

Re wird bis heute (derzeit) keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen. Das Element wird als gering toxisch eingestuft, Toxizitätswerte sind jedoch nicht bekannt. Die toxikologischen Eigenschaften der Re-Verbindungen sind noch nicht ausreichend untersucht (Binder 2000).

Quantifizierung der täglichen Re-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Re-Konzentration in der Muttermilch

Alle analysierten Werte befanden sich unterhalb der analytischen Bestimmungsgrenze (0,9 µg/kg) und lediglich 5 % oberhalb der Nachweisgrenze (0,2 µg/kg).

In der Muttermilch lagen 28% der gemessenen Werte oberhalb der Bestimmungsgrenze (0,45 µg/kg) und 10% unterhalb der Nachweisgrenze (0,1 µg/kg).

Aus Gründen analytischer Unzulänglichkeiten (Erfassbarkeit und Qualitätssicherung der Daten) sind die Befunde quantitativ/qualitativ nicht auswertbar.

3.3.13 Rubidium (Rb)

Rb wird derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen. In seinem physiologischen Verhalten ähnelt es dem Kalium, es gilt als geringfügig toxisch und wirkt stimulierend. Eine toxische und letale Dosis ist nicht bekannt. Die tägliche Zufuhr an Rb liegt bei 1,5-6 mg (Binder 2000). Der Rubidiumgehalt im Blut beträgt im Mittel 2,8 mg/l (0,9-6,8 mg/l, Minoia et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Rb-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Rb-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 37 sind die durchschnittlichen Rb-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug im Mittel **2,1 mg/d ± 32%** (0,4-16 mg/d) bzw. **730 µg/kg ± 26%** (200-3600 µg/kg (100% > BG)) und stimmt gut mit den Aufnahmemengen von 1,5-4,5 mg/d bzw. 1,5-6 mg/d nach Bertram (1992) und Binder (2000) überein. Die höchsten Aufnahmemengen konnten auf den Verzehr von milch-, obst- und nusshaltigen Produkten zurückgeführt werden.

In Abb. 37 sind die durchschnittlichen Rb-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Im Mittel betrug die Konzentration **440 µg/kg ± 27%** (190-1030 µg/kg (100% > BG)), die im Vergleich zu der Studie nach Krachler et al. (1998) um ca. 40% niedriger lag (720 µg/kg).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein geringfügig abnehmender Trend für die Konzentration an Rb in der Muttermilch (Abb. 36), der ebenfalls u.a. von Perrone et al. (1993) beschrieben wird.

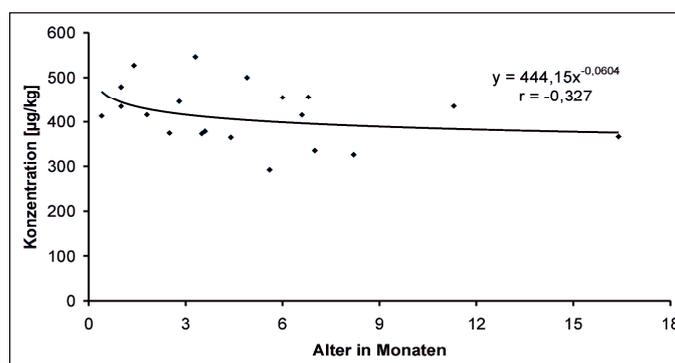


Abb. 36: Rb-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

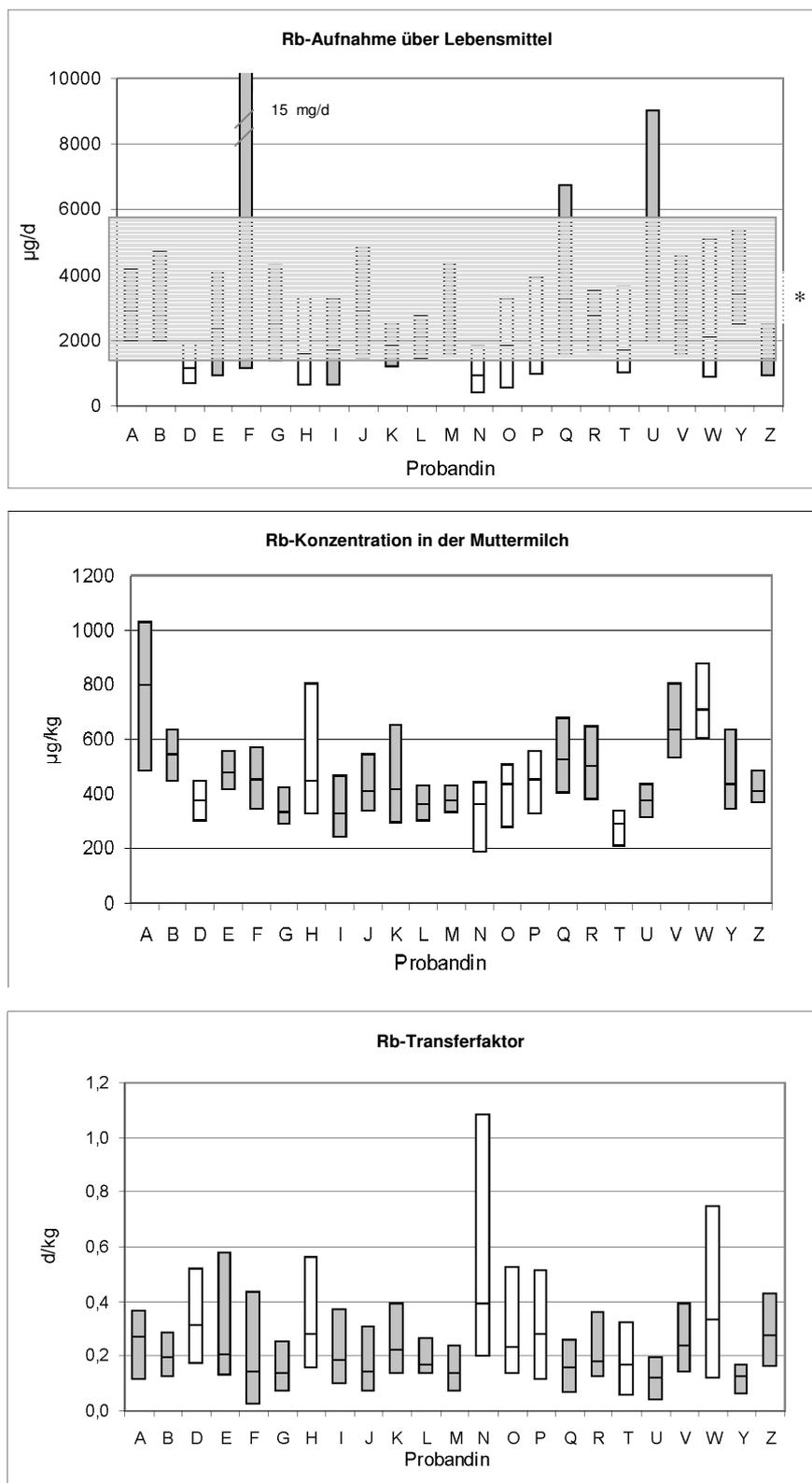


Abb. 37: Durchschnittliche tägliche Rubidiumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Rubidiumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: tägliche Zufuhr nach Binder (2000).

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Rb-Aufnahme über die Nahrung und der Rb-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Rb-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,2 d/kg ± 36%** (0,02-1,1 d/kg; Abb. 37) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Rb in der Muttermilch (geringfügige Abnahme, Abb. 36) und für dessen Transferfaktor (keine Veränderung, Abb. 38). Bezüglich der Rb-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

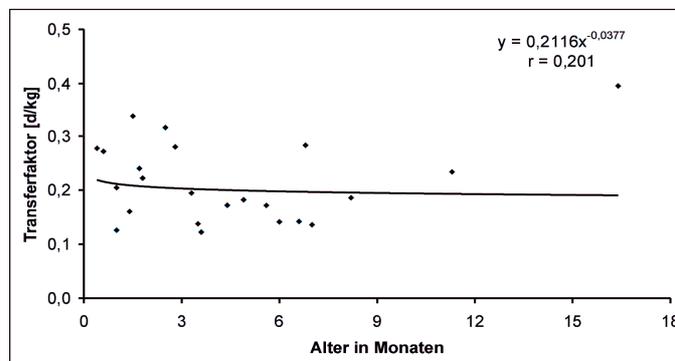


Abb. 38: Rb-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Rb-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Rb über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge < 4 Monate **426 µg/d** (320-700 µg/d) und für die Säuglinge > 4 Monate **335 µg/d** (250-425 µg/d). Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Rb betrug im Durchschnitt etwa 17%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Rb-Verteilung

Tab. 24 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Rb-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 24: Zusammenfassende Beschreibung der Rb-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.

GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [mg/d]	2,4	(0,4-16)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	730	(200-3600)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	440	(190-1030)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,2	(0,02-1,1)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	< 4 Mon.: 426 (320-700) ; > 4 Mon.: 335 (250-425)	

3.3.14 Strontium (Sr)

Sr gehört zu den Spurenelementen, denen derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen wird. Das Metall gilt als nicht toxisch. Die Gesamtmasse des Elements im erwachsenen Körper beträgt etwa 300 mg Sr^{2+} , das wegen seiner Ähnlichkeit mit Calcium hauptsächlich in der Knochensubstanz enthalten ist. Die tägliche Zufuhr wird auf 1-5 mg geschätzt (Binder 2000). Die Sr-Konzentration im Blut wird mit 30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ angegeben (Emsley 2001).

Quantifizierung der täglichen Sr-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Sr-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 40 sind die durchschnittlichen Sr-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug **1,4 mg/d \pm 40%** (0,3-20 mg/d) bzw. **485 $\mu\text{g}/\text{kg}$ \pm 28%** (155-6000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (100% > BG)) und ist mit dem angegebenen Bereich nach Bertram (1992; 0,8-2,0 mg/d) und Binder (2000, 1-5 mg/d) vergleichbar. Die höheren Zufuhrmengen der Mutter F (Maximalwert 20 mg/d) konnten auf den Verzehr von nuss- und mohnhaltigen Produkten sowie auf den Verzehr von Weizenprodukten zurückgeführt werden.

In Abb. 40 sind die durchschnittlichen Sr-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Im Mittel betrug die Konzentration **40 $\mu\text{g}/\text{kg}$ \pm 34%** (17-100 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 100% > BG) und ist gut mit der ermittelten Konzentration von 33 $\mu\text{g}/\text{kg}$ nach Krachler et al. (1998) vergleichbar. Die Mütter A, E, L und Z, die die höchsten mittleren Konzentrationen in der Milch aufwiesen, konsumierten gelegentlich Vitaminsäfte bzw. -kautabletten. Mutter M wies ebenfalls hohe Sr-Werte in der Milch auf, jedoch ohne ersichtlichen Zusammenhang mit Vitaminpräparaten.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein abnehmender Trend für die Konzentration an Sr in der Muttermilch (Abb. 39), der ebenfalls u.a. von Perrone et al. (1993) beschrieben wird.

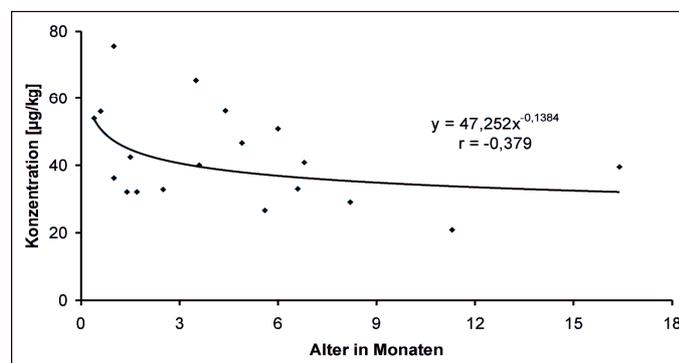


Abb. 39: Sr-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

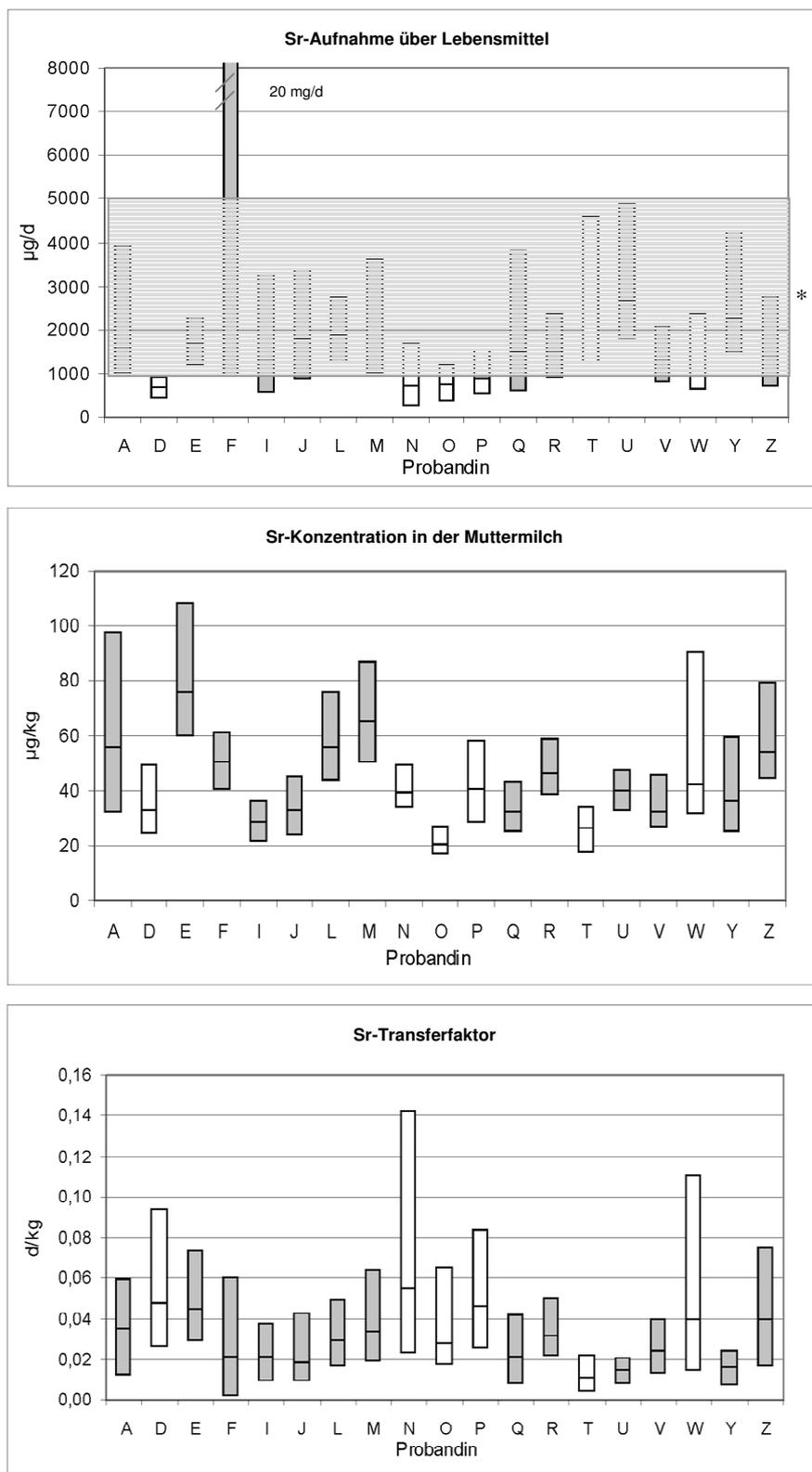


Abb. 40: Durchschnittliche tägliche Strontiumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Strontiumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, E, F, I, J, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). *: tägliche Zufuhr nach Binder (2000).

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Sr-Aufnahme über die Nahrung und der Sr-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Sr-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,027 d/kg ± 44%** (0,002-0,14 d/kg; Abb. 40) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten für die Konzentration von Sr in der Muttermilch (Abnahme, Abb. 39) und für dessen Transferfaktor (keine Veränderung, Abb. 41). Bezüglich der Sr-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

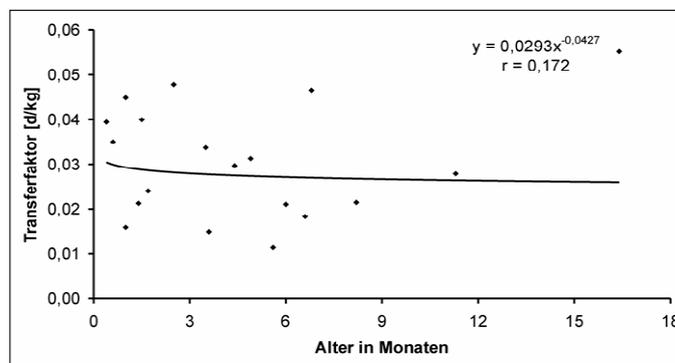


Abb. 41: Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Sr-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Sr über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge durchschnittlich **30-36 µg/d** (17-40 µg/d). Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Sr betrug im Durchschnitt 2,3%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Sr-Verteilung

Tab. 25 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Sr-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 25: Zusammenfassende Beschreibung der Sr-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [mg/d]	1,4	(0,3-20)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	485	(155-6000)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	40	(17-100)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,027	(0,002-0,14)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	30-36	(17-40)

3.3.15 Tellur (Te)

Te und seine Verbindungen sind giftig und wirken teratogen. Als toxische Dosis gilt bereits die Menge von 0,25 mg, als letale Dosis 2 g.

Quantifizierung der täglichen Te-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Te-Konzentration in der Muttermilch

Alle analysierten Te-Konzentrationen in den Lebensmittelproben befanden sich unterhalb der analytischen Nachweisgrenze von 14 µg/kg.

Alle analysierten Te-Konzentrationen in den Muttermilchproben befanden sich unterhalb der analytischen Nachweisgrenze von 6,8 µg/kg.

Aus Gründen analytischer Unzulänglichkeiten (Erfassbarkeit und Qualitätssicherung der Daten) sind die Befunde quantitativ/qualitativ nicht auswertbar.

3.3.16 Yttrium (Y)

Y wird derzeit keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen. Das Element gilt als toxisch und ist vermutlich kanzerogen. Über den Y-Gehalt im Blut liegen keine Daten vor.

Quantifizierung der täglichen Y-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Y-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 42 sind die durchschnittlichen Y-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug **7,2 µg/d ± 38%** (1,3-27µg/d) bzw. **2,4 µg/kg ± 38%** (0,5-11 µg/kg (96 % > BG)). Literaturdaten über Y-Aufnahmemengen liegen nicht vor. In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 26) sind beispielhaft konsumierte Lebensmittel (-Produkte) einiger Mütter gelistet, die die höchsten Y-Konzentrationen oberhalb der Bestimmungsgrenze (> 0,06 µg/kg) aufwiesen:

Tab. 26: Yttrium-Konzentrationen in Lebensmitteln

Lebensmittel (-Produkt)	Y-Konzentration bezogen auf FG [µg/kg]	Lebensmittel (-Produkt)	Y-Konzentration bezogen auf FG [µg/kg]
Schokoladenkeks	24	Erdnussflips	26
Nussschokolade	10	Cracker (Tuc)	11
Gummibärchen	15		
Kokos-Keks	37	Kartoffeln (Mangold)	22
Waffeln	23	Spinat	12
Kartoffelpuffer mit Apfelmus	15		
Traubenzucker	12	Brot, Butter	20
Alete Kinderkeks	11	Brot mit Nugat	16
Kaubonbon	26		
Tic Tac	32	Kakao	50
Bananenjoghurt	17		
Himbeerjoghurt	36		

Mutter J nahm darüber hinaus täglich Antibiotika, Carotin Tabletten sowie Soledumkapseln zu sich, in denen jeweils 0,011, 0,88 und 0,16 µg/g Y nachgewiesen werden konnte.

In Abb. 42 sind die durchschnittlichen Y-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **0,15 µg/kg ± 70%** ermittelt (0,01-3,6 µg/kg (100% > BG)). Vergleichsdaten aus der Literatur liegen nicht vor.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein geringfügig zunehmender Trend für die Konzentration an Y in der Muttermilch (Abb. 43).

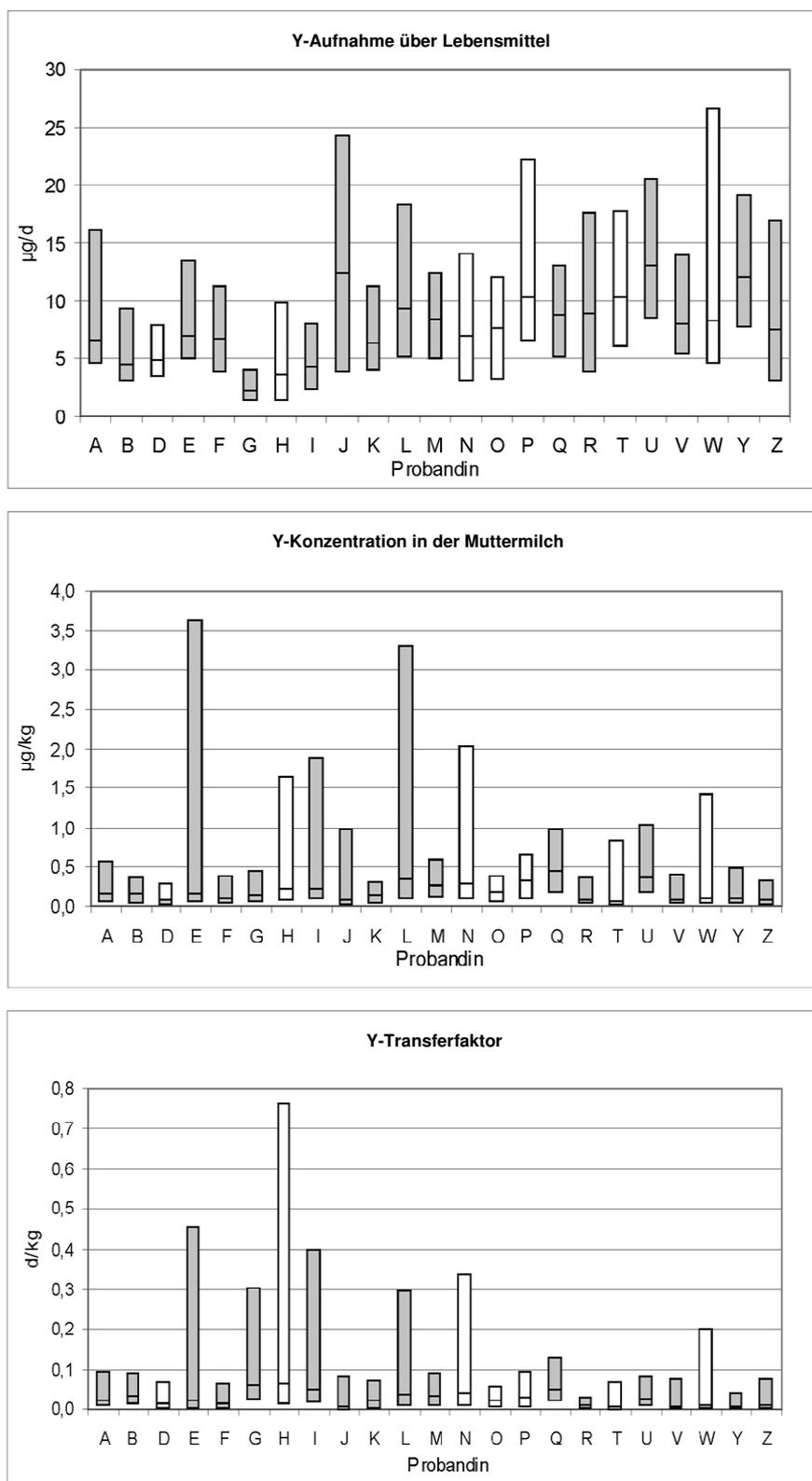


Abb. 42: Durchschnittliche tägliche Yttriumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Yttriumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T).

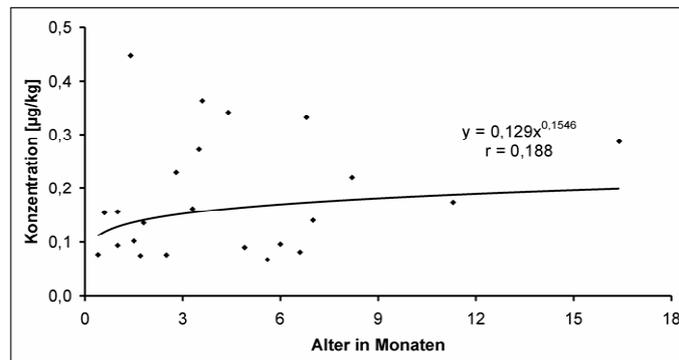


Abb. 43: Y-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Y-Aufnahme über die Nahrung und der Y-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Y-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,021 d/kg ± 80%** (0,0014-0,8 d/kg; Abb. 42) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Y in der Muttermilch (Abb. 43) und für dessen Transferfaktor (geringfügige Zunahme). Bezüglich der Y-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine geringfügig abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

Tägliche Y-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Y über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge durchschnittlich **0,1 µg/d** (0,05-0,4 µg/d). Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Y betrug im Durchschnitt etwa 1,8%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Y-Verteilung

Tab. 27 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Y-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 27: Zusammenfassende Beschreibung der Y-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [µg/d]	7,2	(1,3-27)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	2,4	(0,5-11)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	0,15	(0,01-3,6)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,021	(0,0014-0,8)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	0,1	(0,05-0,4)

3.3.17 Zink (Zn)

Zn gehört zu den Spurenelementen, die für den Menschen lebenswichtig sind. Der tägliche Bedarf von 15-40 mg Zn wird hauptsächlich über Nahrungsmittel wie Fisch, Fleisch, Milch und Getreideprodukte gedeckt. Eine toxische Dosis wurde auf 150-600 mg festgelegt, die letale Dosis liegt bei 6 g Zn^{2+} (Binder 2000). Das Metall gilt nur als gering toxisch. Die Konzentration von Zn wird im Blut mit 6,3 mg/l angegeben (Minoia et al. 1990).

Quantifizierung der täglichen Zn-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Zn-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 45 sind die durchschnittlichen Zn-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die Mutter A (schraffiert) supplementierte mit „Zink + C depot“ 5 mg/d. Die tägliche Zn-Aufnahmemenge der nicht supplementierten deutschen Mütter betrug **11,5 mg/d \pm 30%** (4-26 mg/d) und ist gut mit der empfohlenen Zufuhr für Stillende von 11 mg/d nach DGE (2000) vergleichbar. Die polnischen/tschechischen Mütter nahmen im Vergleich zu den deutschen Müttern ca. 34 % weniger Zn über die Nahrung auf (7,6 mg/d). Als durchschnittliche Zn-Aufnahme aller untersuchten Probandinnen (bis auf Mutter A) konnten **9,8 mg/d \pm 30%** (2,6-25 mg/d) bzw. **3,4 mg/kg \pm 18%** (1-9 mg/d (100% > BG)) ermittelt werden. Höhere Zn-Aufnahmemengen konnten auf den Verzehr von z.B. Vollkornbrot, Fleischsorten (Kalbsschnitzel 63 μ g/g!) sowie Milchprodukten und Kartoffeln mit Spinat zurückgeführt werden.

In Abb. 45 sind die durchschnittlichen Zn-Konzentrationen der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde bei den nicht supplementierten Müttern ein Wert von **776 μ g/kg \pm 96%** (160-3300 μ g/kg; 100% > BG) ermittelt, der weitestgehend mit dem WHO-Referenzbereich vergleichbar ist (700-2000 μ g/l).

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein abnehmender Trend ($p < 0,005$; $n = 19$) für die Konzentration an Zn in der Muttermilch (Abb. 44), den Rossipal und Krachler (1997) ebenfalls in ihrer Studie beschreiben.

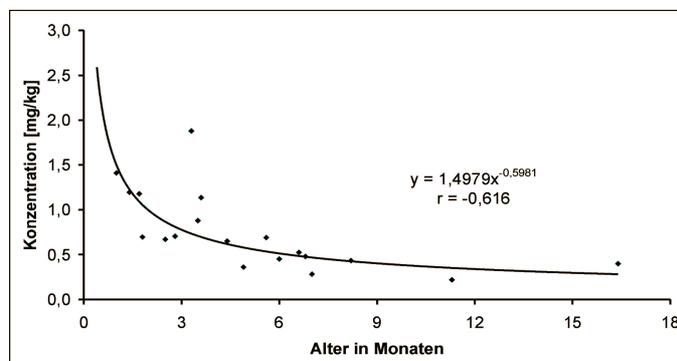


Abb. 44: Zn-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

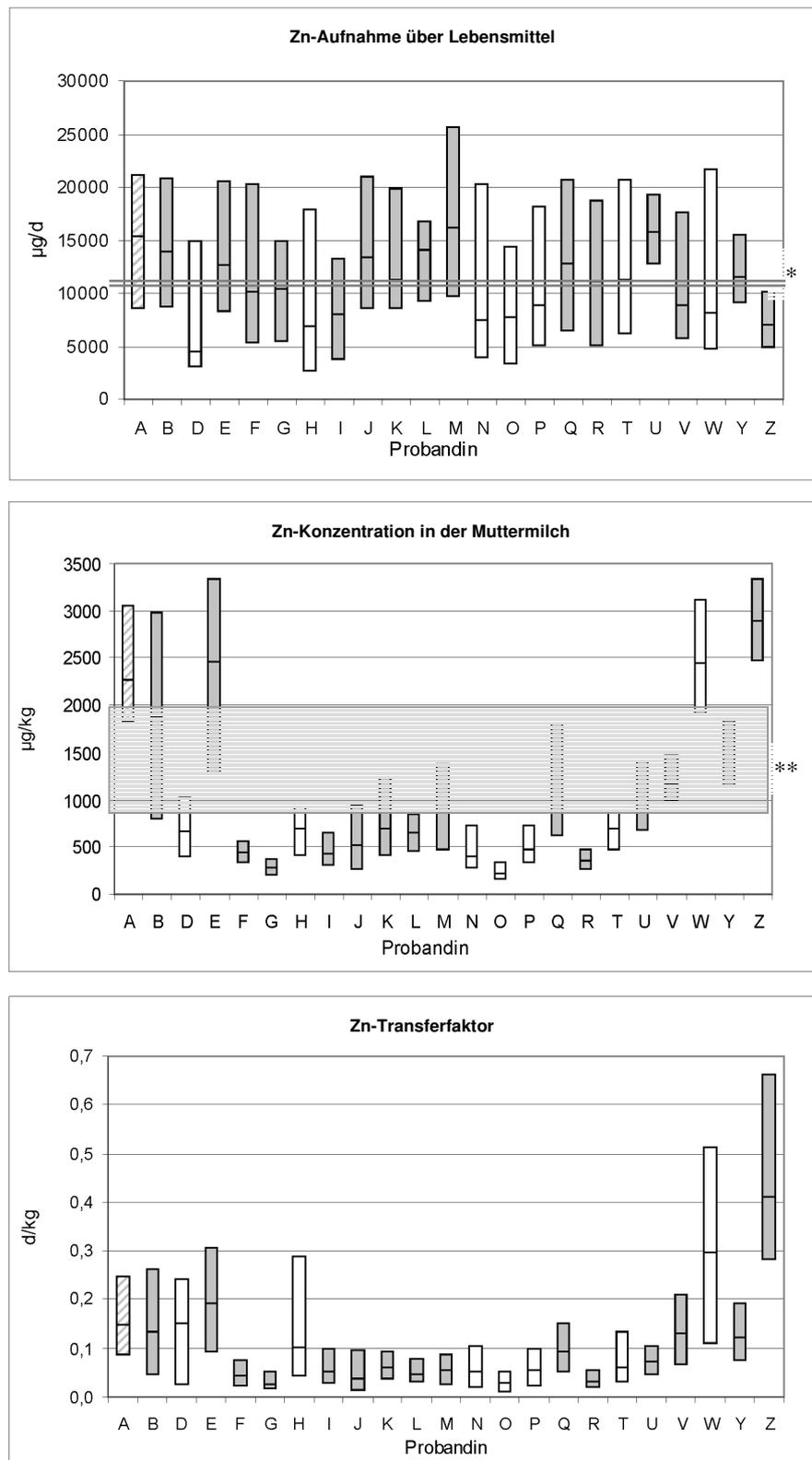


Abb. 45: Durchschnittliche tägliche Zinkaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Zinkkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mutter: T). Schraffierter Balken: supplementierte Mutter; *: empfohlene Zufuhr nach DGE (2000); **: Referenzbereich nach WHO.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Zn-Aufnahme über die Nahrung und der Zn-Konzentration in der Milch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Zn-Transferfaktor (geom. Mittelwert) der nicht supplementierten Mütter betrug **0,077 d/kg ± 119%** (0,01-0,7 d/kg; Abb. 45) und lag unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein ähnliches Verhalten für die Konzentration von Zn in der Muttermilch (signifikante Abnahme, Abb. 44) und für dessen Transferfaktor (Abb. 46). Bezüglich der Zn-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

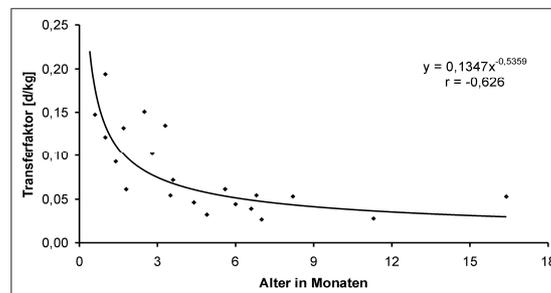


Abb. 46: Zn-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Zn-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Zn über die Muttermilch betrug für die Säuglinge < 4 Monate **1296 µg/d** (570-2460 µg/d) und reduzierte sich auf **381 µg/d** (190-580 µg/d) mit fortschreitendem Alter. Die DGE (2000) empfiehlt eine tägliche Zufuhr von 1,0 mg/d für Säuglinge < 4 Monate, die gut mit der hier ermittelten Zufuhr korrespondiert. Für die Altersgruppe 4 bis < 12 Monate empfiehlt die DGE (2000) eine Aufnahme, die ca. 5fach höher liegt als die gestillten Säuglinge in der hiesigen Studie über die Muttermilch zugeführt bekamen. Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Zn betrug im Durchschnitt etwa 6,5%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Zn-Verteilung

Tab. 28 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Zn-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 28: Zusammenfassende Beschreibung der Zn-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.

GM: geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [mg/d]	9,8	(2,6-25)
Konzentration in der Nahrung [mg/kg]	3,4	(1,1-8,7)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	776	(160-3500)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,077	(0,01-0,7)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	< 4 Mon.: 1296 (570-2460) ; > 4 Mon.: 381 (190-580)	

3.3.18 Zirkonium (Zr)

Zr wird bis heute (derzeit) keine biologische Bedeutung für den menschlichen Organismus zugewiesen. Toxizitätswerte sind nicht bekannt (Binder 2000). Der erwachsene menschliche Körper enthält im Durchschnitt ca. 1 mg Zr, das hauptsächlich an Plasmaproteine gebunden und in den Knochen gespeichert ist. Die tägliche Zufuhr wird auf 0,05 mg geschätzt. Der Blutgehalt wird mit 10 µg/kg angegeben (Emsley 2001).

Quantifizierung der täglichen Zr-Aufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Zr-Konzentration in der Muttermilch

In Abb. 48 sind die durchschnittlichen Zr-Aufnahmemengen der jeweiligen Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Die tägliche Zufuhr betrug **19,4 µg/d ± 318%** (0,5-270 µg/d) bzw. **6,6 µg/kg ± 247%** (0,25-73 µg/kg (82% > BG, 84% > NG)) und lag damit im Vergleich zur geschätzten Aufnahmemenge nach Binder (2000, 50 µg/d) um etwa 60% niedriger. Weitere Literaturangaben standen nicht zur Verfügung. Die Mütter A, E und K nahmen höhere Mengen an Zr durch das Trinken von Fruchtsäften, Stilltee, Bio-San (Schwanger + Fit) sowie Früchtetee (Trinkmenge ca. 1,5 kg/d) auf. Süßwaren wie gefüllte Schokolade, Marzipan, Mohnstollen, Plätzchen etc. wie auch Käsesorten (Camembert) und Semmelknödel wiesen höhere Zr-Werte auf (gefüllte Schokolade bis zu 0,54 µg/g).

In Abb. 48 sind die durchschnittlichen Zr-Konzentrationen in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen dargestellt (geom. Mittelwert). Durchschnittlich wurde ein Wert von **1,3 µg/kg ± 228%** (0,04-52 µg/kg; 100% > BG)) ermittelt. Vergleichsdaten hinsichtlich der Konzentration in der Muttermilch lagen nicht vor.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein relativ konstantes Niveau der Konzentration an Zr in der Muttermilch (Abb. 47).

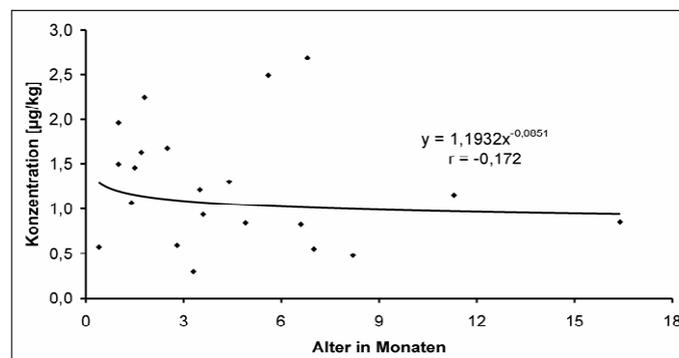


Abb. 47: Zr-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

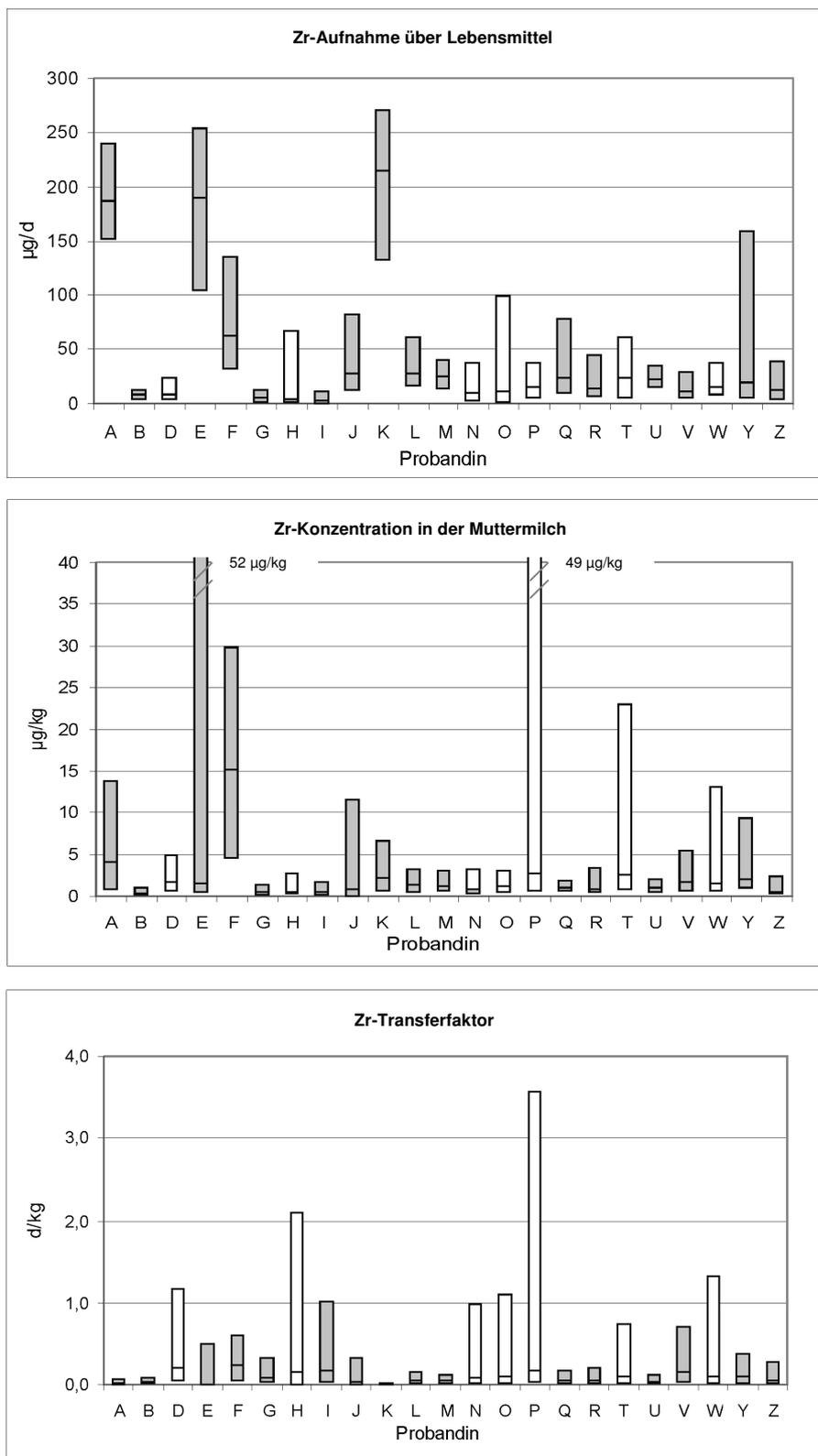


Abb. 48: Durchschnittliche tägliche Zirkoniumaufnahme über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Zirkoniumkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen A-Z (Deutsche Mütter: A, B, E, F, G, I, J, K, L, M, Q, R, U, V, Y, Z; polnische Mütter: D, H, N, O, P, W; tschechische Mütter: T).

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein Zusammenhang zwischen der Zr-Aufnahme über die Nahrung und der Zr-Konzentration in der Muttermilch.

Der hieraus ermittelte durchschnittliche Zr-Transferfaktor (geom. Mittelwert) betrug **0,065 d/kg ± 98%** (0,001-3,6 d/kg). In Abb. 48 ist zu erkennen, dass die Maximalwerte der Transferfaktoren bei den polnischen Müttern zwischen 1- 3,6 d/kg lagen. Die durchschnittlichen Transferfaktoren lagen jedoch alle unterhalb der theoretischen Obergrenze von 1,2 d/kg.

Über die Laktationsperiode hinweg zeigte sich ein unterschiedlicher Trend für die Konzentration von Zr in der Muttermilch (keine Veränderung, Abb. 47) und für dessen Transferfaktor (Zunahme, Abb. 49). Bezüglich der Zr-Aufnahmemenge der Mütter über die Nahrung konnte mit Hilfe der angewandten Duplikatmethode eine abnehmende Zufuhr über die hier untersuchte Laktationsphase hinweg ermittelt werden.

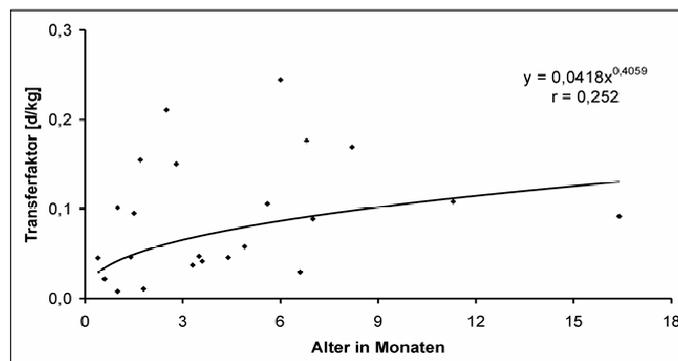


Abb. 49: Zr-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Zr-Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch

Die Zufuhr von Zr über die Muttermilch betrug für die gestillten Säuglinge im Durchschnitt **1 µg/d** (0,2-2,2 µg/d). Der Bruchteil des aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch partitionierten Zr ergab einen Anteil von 5,5%.

Zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Zr-Verteilung

Tab. 29 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der ermittelten Zr-Verteilung in den untersuchten Lebensmittel- und Muttermilchproben wieder.

Tab. 29: Zusammenfassende Beschreibung der Zr-Verteilung in der Nahrung und Muttermilch.
GM: Geometrischer Mittelwert

	GM	Spannweite (Minimum-Maximumwert)
Aufnahme der Mutter über Lebensmittel [µg/d]	19,4	(0,5-270)
Konzentration in der Nahrung [µg/kg]	6,6	(0,25-73)
Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	1,3	(0,04-52)
Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg]	0,065	(0,001-3,6)
Aufnahme des Kindes über die Muttermilch [µg/d]	1	(0,2-2,2)

3.3.19 Auswertung der Elementdaten aus der Projektphase I (1998-2000)

Silber (Ag), Cer (Ce), Cobalt (Co), Chrom (Cr), Gallium (Ga), Lanthan (La), Molybdän (Mo), Niob (Nb), Radium (Ra), Ruthenium (Ru), Antimon (Sb), Thorium (Th), Titan (Ti), Uran (U)

Die oben aufgeführten Elemente wurden bereits in der 1. Projektphase (StSch 4155, Wappelhorst et al. 2000, 2002) vermessen und die Messdaten analog den Daten im vorliegenden Projekt statistisch aufbereitet (geometrische Mittelwerte, s. 2.5.3 Statistik).

Quantifizierung der täglichen Elementaufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung der Elementkonzentration in der Muttermilch

In Tab. 30 sind die durchschnittlichen täglichen Elementaufnahmemengen über Lebensmittel, die durchschnittlichen täglichen Elementkonzentrationen in der Muttermilch und die durchschnittlichen täglichen Transferfaktoren mit Angabe der jeweiligen relativen Standardabweichung (RSD) von 19 untersuchten Probandinnen aus der Euroregion Neißة dargestellt. Außerdem dargestellt sind die Spannweiten zwischen dem kleinsten und größten gemessenen Wert sowie der Prozentsatz an Messwerten, die oberhalb der jeweiligen Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze (NG/BG) ermittelt werden konnten. **Radium** konnte weder in den Lebensmittel- noch in den Muttermilchproben ausgewertet werden (die Ra-Werte lagen in den Lebensmittel- und Muttermilchproben alle < NG).

Tab. 30: Durchschnittliche tägliche Elementaufnahmemenge über Lebensmittel, durchschnittliche tägliche Elementkonzentration in der Muttermilch und durchschnittlicher täglicher Transferfaktor (geom. Mittelwert) der untersuchten Probandinnen. NG/BG: Nachweis- und Bestimmungsgrenze; RSD: relative Standardabweichung; n.b.: nicht bestimmbar.

	Aufnahmemenge ± RSD [µg/d]	Minimum-/ Maximum- werte [µg/d]	BG/ NG [%]	Konzentration in der Muttermilch [µg/kg]	Minimum-/ Maximum- werte [µg/kg]	BG/ NG [%]	Transferfaktor ± RSD [d/kg]	Minimum-/ Maximum- werte [d/kg]
Ag	4,3 ± 588%	0,3-297	36>BG 69>NG	0,7 ± 66%	0,01-20	97>BG 100>NG	0,152 ± 253%	0,0017-23
Ce	4,5 ± 43%	0,5-35	84>BG 97>NG	0,1 ± 40%	0,03-1	97>BG 100>NG	0,025 ± 82%	0,0026-1
Co	17 ± 59%	0,06-3835	97>BG 98>NG	0,8 ± 48%	0,3-17	100>BG 100>NG	0,046 ± 80%	0,0003-8
Cr	147 ± 97%	7,0-3840	63>BG 79>NG	10 ± 48%	0,2-163	99>BG 100>NG	0,065 ± 60%	0,0006-3
Ga	21 ± 46%	4-80	99>BG 99>NG	0,5 ± 36%	0,08-2	100>BG 100>NG	0,022 ± 74%	0,0036-0,2
La	2,5 ± 51%	0,01-18	94>BG 95>NG	0,07 ± 29%	0,0007-0,7	100>BG 100>NG	0,030 ± 204%	0,0038-10
Mo	110 ± 58%	18-610	95>BG 98>NG	0,6 ± 81%	0,006-5	99>BG 99>NG	0,005 ± 127%	0,0001-0,1
Nb	2,5 ± 45%	0,4-20	15>BG 49>NG	0,04 ± 25%	0,01-4	5>BG 57>NG	0,016 ± 43%	0,0009-0,5
Ra	n.b.	n.b.	100<NG	n.b.	n.b.	100<NG	n.b.	n.b.
Ru	1 ± 112%	0,11-12	19>BG 25>NG	0,03 ± 206%	0,005-0,8	38>BG 43>NG	0,025 ± 237%	0,0005-2
Sb	3,5 ± 415%	0,33-500	37>BG 88>NG	0,1 ± 80%	0,013-12	56>BG 100>NG	0,035 ± 64%	0,0003-5
Th	0,7 ± 81%	0,1-6	79>BG 92>NG	0,02 ± 28%	0,002-0,3	95>BG 100>NG	0,022 ± 76%	0,001-0,6
Ti	4156,0 ± 34%	802-13620	98>BG 99>NG	282 ± 34%	83-806	100>BG 100>NG	0,067 ± 76%	0,011-0,7
U	1,5 ± 61%	0,2-9	72>BG 93>NG	0,03 ± 63%	0,003-0,2	63>BG 100>NG	0,018 ± 72%	0,0019-0,7

Die *Aufnahmemengen* der essentiellen Elemente **Mo** und **Co** mit jeweils 110 und 17 µg/d sind mit den Angaben der englischen Studie nach Ysart et al. (1999) vergleichbar (120 µg/d, 11 µg/d). Für **Cr** als ein weiteres essentielles Element zeigte sich eine ca. 6fach höhere Aufnahmemenge (147 µg/d) gegenüber der Studie nach Becker et al. (1996) (26 µg/d, alte Bundesländer); in der englischen Studie nach Ysart et al. (1999) wurde im Vergleich zur vorliegenden Studie ein ca. 2fach höherer Wert ermittelt (300 µg/d).

Die Aufnahmemenge von **Sb** ist mit derjenigen der englischen Bevölkerung vergleichbar (3,5 µg/d), während die ermittelten Aufnahmemengen von **Ru** und **Ti** nicht mit den Angaben der hier zur Verfügung gestandenen Literatur übereinstimmen: in der englischen Bevölkerung wurde eine ca. 4fach höhere Ru-Aufnahme (4 µg/d, Ysart et al. 1999) gegenüber einer Aufnahmemenge von 1 µg/d in der vorliegenden Studie ermittelt. Bezüglich Ti lag die ermittelte Aufnahmemenge in der vorliegenden Studie mit 4 mg/d ca. 5fach über der geschätzten Zufuhr nach Binder (2000) (0,8 mg/d).

Literaturdaten über die Aufnahmemengen der Elemente **Ag, Ce, Ga, La, Nb, Th** und **U** lagen nicht vor.

Hinsichtlich der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen lagen die ermittelten Werte der Elemente Ag, Cr, Nb, Ru, Sb, Th und U lediglich mit 15-79% oberhalb der Bestimmungsgrenze bzw. mit 25-93% oberhalb der Nachweisgrenze; alle weiteren unter 3.3.19 untersuchten Elemente (mit der Ausnahme von Ra) wiesen Werte zwischen 84-100% oberhalb der Bestimmungsgrenze auf.

Die ermittelten Konzentrationen der Elemente **Ag, La, Sb** in der *Muttermilch* (0,65, 0,07, 0,13 µg/kg) sind mit den Angaben nach Krachler et al. (Österreich [1998, 2000]) vergleichbar (0,41, <0,05, <0,36 µg/kg).

Für **Mo** konnte ein Wert von 0,6 µg/kg ermittelt werden, der bei Krachler et al. (1998) mit 1-1,6 µg/kg angegeben wird.

Krachler et al. (2000) ermittelten eine ca. 2,5fach höhere **Cr**-Konzentration in der Milch (24,3 µg/l mit einer hohen Spannweite zwischen <0,8-163 µg/l) gegenüber der in der vorliegenden Studie ermittelten Konzentration von 9,6 µg/kg, die eher mit der ermittelten Konzentration von 9 µg/kg nach Coni et al. (Italien [1990]) vergleichbar ist.

Für **Co** konnte ein Wert von 0,78 µg/kg ermittelt werden, der zwischen den angegebenen Konzentrationsbereichen nach der WHO (1989) mit 0,15-0,35 µg/l und nach Krachler et al. (1998) mit 1,6-3,0 µg/l lag.

Eine eindeutig höhere **Ti**-Konzentration lag in der hier untersuchten Muttermilch (282 µg/kg) gegenüber der nach Krachler et al. (2000) ermittelten Konzentration von 6,3 µg/l vor. Im Vergleich mit einer amerikanischen Studie (250 µg/l, Anderson [1992]) bewegte sich der hier gefundene Wert in der gleichen Größenordnung.

Literaturdaten über die Konzentrationen der Elemente **Ce, Ga, Nb, Ru, Th** und **U** in der Muttermilch lagen nicht vor.

Hinsichtlich der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen lagen die ermittelten Werte der Elemente Nb, Ru, Sb und U lediglich mit 5-63% oberhalb der Bestimmungsgrenze bzw. mit 43-100% oberhalb der Nachweisgrenze; alle weiteren untersuchten Elemente (mit der Ausnahme von Radium) wiesen Werte zwischen 95-100% oberhalb der Bestimmungsgrenze auf.

Elementkonzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit

Während der maturaen Laktationsphase stieg die Konzentration der Elemente Cr, Ga und Ru in der Muttermilch insignifikant mit der Zeit an (Abb. 50), während Co, Mo, Sb und U ein zeitlich konstantes Niveau der Konzentrationen aufzeigten. Einen mit der Zeit abnehmenden Trend der Konzentration in der Muttermilch wiesen die Elemente Ag, Ce, La, Nb, Th und Ti auf.

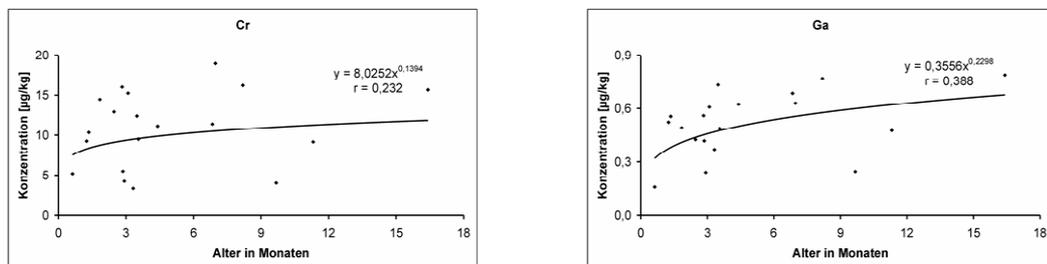


Abb. 50: Cr- und Ga-Konzentration in der Muttermilch in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Ermittlung des Transferfaktors Nahrung/Muttermilch

Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Aufnahme über die Nahrung und der Konzentration in der Muttermilch aller in Tab. 30 aufgeführten Elemente. Die hieraus ermittelten Transferfaktoren TF wiesen für Ag (0,152 d/kg) den höchsten und für Mo den niedrigsten Wert (0,005 d/kg) auf. Wie außerdem aus Tab. 30 zu entnehmen ist, können die ermittelten TF der Elemente Co, Cr und Ti einem ähnlichen Größenbereich zwischen 0,046-0,067 d/kg zugeordnet werden, während die TF der Elemente Ce, Ga, La, Ru, Sb und Th in die Größenordnung von 0,022-0,035 d/kg fallen. Für die TF_{Nb} und TF_U kann ein ähnlicher Größenbereich zwischen 0,016-0,018 d/kg angegeben werden.

In Abhängigkeit von der maturaen Laktationszeit zeigte sich lediglich bei den Elementen Co und Ga ein Anstieg des TF (Abb. 51), während die TF von Nb, Sb, Ti und U keine Veränderung aufzeigten. Die ermittelten TF der Elemente Ag, Ce, Cr, La, Mo, Ru und Th wiesen einen abnehmenden Trend auf.

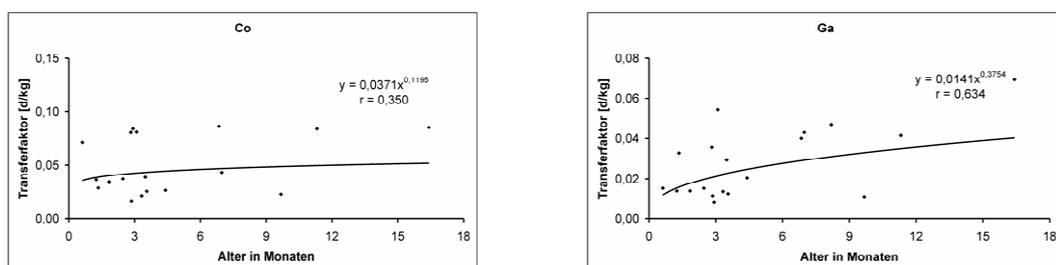


Abb. 51: Co- und Ga- Transferfaktoren in Abhängigkeit von der Laktationszeit.

Tägliche Elementzufuhr des Säuglings über die Muttermilch

In Tab. 31 sind die ermittelten durchschnittlichen täglichen Elementzufuhrmengen der gestillten Säuglinge der untersuchten Probandinnen aufgeführt, die ausschließlich über die Muttermilch zugeführt wurden (Annahme: Milchverzehrmenge des Säuglings 850 g/d (DFG 1985)). Zwischen den Altersgruppen < 4 Monate und > 4 Monate fand sich kein wesentlicher Unterschied in der element-spezifischen Mengenzufuhr.

Für eine angemessene tägliche **Cr**-Zufuhr für Säuglinge unter 4 Monaten empfiehlt die DGE (2000) 1-10 µg/d, die gut mit der hier ermittelten Zufuhr von 8 µg/d vergleichbar ist. Eine höhere Cr-Zufuhr zwischen 20-40 µg/d empfiehlt die DGE (2000) für Säuglinge > 4 Monate, die im Vergleich mit den hier betrachteten Säuglingen der gleichen Altersgruppe ausschließlich über die Muttermilch (ca. 8 µg/d) nicht zugeführt wurde.

Durchschnittlich nahmen die Säuglinge 0,46 µg/d **Mo** über die Muttermilch auf. Im Vergleich zu der empfohlenen Zufuhr von 7 µg/d für Säuglinge < 4 Monate nach der DGE (2000) nahmen die hier betrachteten Säuglinge demnach eine um ca. 15fach geringere Menge Mo über die Muttermilch auf. Für die Altersgruppe > 4 Monate empfiehlt die DGE (2000) eine höhere Mo-Zufuhr zwischen 20-40 µg/d, die im Vergleich der hier ermittelten Zufuhrmengen der gleichen Altersgruppe (Zufuhr etwa 0,46 µg/d) ca. um das 44 bzw. 90fache höher liegt.

Weitere Vergleichsdaten elementspezifischer Zufuhrmengen von Säuglingen standen nicht zur Verfügung.

Tab. 31: Durchschnittliche tägliche Elementzufuhr der gestillten Säuglinge über die Muttermilch und Angabe der Partitionierung des Elementes aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch. n.b.: nicht bestimmbar.

	Zufuhr des Säuglings über die Muttermilch [µg/d]	Minimum-/Maximum-werte [µg/d]	Partitionierung der Elemente über die mütterliche Nahrung in die Milch [%]
Ag	0,55	0,12-1,3	13,0
Ce	0,10	0,02-0,19	2,1
Co	0,65	0,46-1,2	4,0
Cr	8,10	2,8-16	5,5
Ga	0,40	0,14-0,62	2,0
La	0,06	0,007-0,1	2,5
Mo	0,46	0,18-1,6	0,5
Nb	0,03	0,008-0,05	1,4
Ra	n.b.		
Ru	0,02	0,005-0,18	2,1
Sb	0,10	0,02-0,5	3,0
Th	0,013	0,002-0,022	2,0
Ti	236,0	148-452	5,7
U	0,022	0,008-0,09	1,5

Aus Tab. 31 sind außerdem die ermittelten Partitionierungsraten der untersuchten Elemente aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch zu entnehmen. Demnach konnten für die Elemente Mo die geringste (0,5 %) und für die Elemente Co, Cr und Ti (4-5,7 %) bzw. Ag (13 %) die höchsten Partitionierungsraten ermittelt werden.

3.4 Multielementbetrachtung

3.4.1 Verteilung der Elemente in der mütterlichen Nahrung und Muttermilch

3.4.1.1 Ermittelte Elementaufnahmemengen über die mütterliche Nahrung und Elementkonzentrationen in der Muttermilch

In Tab. 32 sind die ermittelten durchschnittlichen täglichen Elementkonzentrationen bzw. -aufnahmemengen (geom. Mittelwert) über die Nahrung (LM) und die ermittelten durchschnittlichen täglichen Elementkonzentrationen in der Muttermilch (MM) der untersuchten Probandinnen zusammengestellt.

Tab. 32: Ermittelte Elementkonzentrationen in Lebensmitteln (LM) und in der Muttermilch (MM) sowie tägliche Aufnahmemengen mit Lebensmitteln. Für Iod ist der arithmetische, für alle übrigen Elemente der geometrische Mittelwert angegeben. RSD: relative Standardabweichung [%]; n.b.: nicht beurteilbar.

	LM [µg/d]	RSD ± %	LM [µg/kg]	RSD ± %	MM [µg/kg]	RSD ± %
Th	0,7	81	0,26	62	0,02	28
Ru	1,1	112	0,38	76	0,03	206
U	1,5	61	0,55	40	0,03	63
Nb	2,5	45	0,79	47	0,04	25
La	2,5	51	0,81	36	0,07	29
Au	3,2	53	1,07	41	0,10	114
Sb	3,5	415	1,30	346	0,13	80
Ag	4,3	588	1,51	440	0,65	66
Ce	4,5	43	1,62	28	0,12	40
Y	4,2	38	2,42	38	0,15	70
Cs	8,0	41	2,72	38	2,21	46
Cd	14	28	4,67	25	0,20	72
Co	17	59	5,98	72	0,78	48
Zr	19	318	6,55	247	1,28	228
Ga	21	46	7,43	28	0,48	36
Pb	77	64	25	67	2,53	49
Mo	110	58	38	35	0,61	81
I	166	35	51	35	81	30
Cr	147	97	52	73	10	48
Ni	250	49	83	37	14	29
Ba	718	50	239	40	5,0	45
Cu	1200	36	416	22	195	52
Sr	1400	40	484	28	41	34
Rb	2400	32	729	26	442	27
Mn	3500	46	1153	35	5,0	28
Ti	4156	34	1479	30	282	34
Zn	9800	30	3451	18	817	96
Fe	9700	34	3500	31	229	55
P	1200 · 10³	30	4073 · 10²	24	115 · 10³	18
Ra			n.b.		n.b.	
Re			n.b.		n.b.	
Te			n.b.		n.b.	

Die geringsten Elementaufnahmemengen von $\leq 10 \mu\text{g/d}$ konnten für die Elemente Th, Ru, U, Nb, La, Au, Sb, Ag, Ce, Y und Cs ermittelt werden, die ebenfalls in der Muttermilch relativ geringe Kon-

zentrationen zwischen 0,02-0,15 µg/kg aufwiesen (Ausnahmen: Ag mit 0,65 µg/kg und Cs mit 2,21 µg/kg).

Höhere Elementaufnahmemengen zwischen 10 -100 µg/d wurden für die Elemente Cd, Co, Zr, Ga und Pb ermittelt. In der Muttermilch wiesen die Elemente Cd, Ga und Co Konzentrationen zwischen 0,2 und 0,8 µg/kg auf, während die Konzentrationen von Zr und Pb in der Muttermilch im Bereich zwischen 1,3 und 2,5 µg/kg lagen.

Für die Elemente Mo, I, Cr, Ni und Ba konnten Aufnahmemengen über die Nahrung zwischen 100 - 1000 µg/d ermittelt werden. In der Muttermilch lag Mo lediglich mit einer Konzentration von 0,6 µg/kg vor, während Cr und Ni Konzentrationen zwischen 10 - 14 µg/kg aufwiesen. Ba lag im Bereich von 5,0 µg/kg. Für das Anion Iod wurden durchschnittlich 81 µg/kg in der Muttermilch ermittelt.

Tägliche Elementaufnahmemengen im Milligrammbereich (1-10 mg/d) konnten für die Elemente Cu, Sr, Rb, Mn, Ti, Zn und Fe ermittelt werden, wobei die höchste Elementaufnahme mit durchschnittlich 1,2 g/d das Element P aufwies. In der Muttermilch lag Mn lediglich mit 5,0 und Sr mit 41 µg/kg vor, während Cu, Ti und Fe in einem ähnlichen Konzentrationsbereich zwischen 195 - 282 µg/kg und Rb und Zn mit jeweils 442 und 817 µg/kg ermittelt werden konnten. P lag als einziges Element mit 115 mg/kg im Milligrammbereich in der Muttermilch vor.

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Elementaufnahme über die Nahrung und der Elementkonzentration in der Muttermilch konnte lediglich für die Elemente Pb ($p < 0,05$) und Cs ($p < 0,001$) festgestellt werden.

3.4.1.2 Zusammenfassender Vergleich der ermittelten Elementaufnahmemengen über die mütterliche Nahrung und Elementkonzentrationen in der Muttermilch mit Literaturangaben

Es ergaben sich quantitative Unterschiede zwischen den in der vorliegenden Studie ermittelten *Elementaufnahmemengen* über die Nahrung und den in der Literatur gefundenen Angaben für die Elemente Au, Cr, Pb, Ru, Ti und Zr (Literaturangaben über Aufnahmemengen von Ag, Ce, Ga, La, Nb, Th, U und Y fanden sich nicht). Hierbei konnten in der vorliegenden Studie höhere Aufnahmemengen für Ti (s. 3.3.19), Au (s. 3.3.6), Cr (s. 3.3.19) und geringere Aufnahmemengen für Pb (s. 3.3.2), Ru (s. 3.3.12) und Zr (3.3.18) ermittelt werden. Im Vergleich zu Literaturangaben fanden sich ähnliche Aufnahmemengen für die Elemente Ba, Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, P, Rb, Sb, Sr und Zn.

Zwischen den in der vorliegenden Studie ermittelten Konzentrationen in der *Muttermilch* und den in der Literatur gefundenen Angaben ergaben sich quantitative Unterschiede für Ti, Ni, Rb und Cr (Literaturangaben über Konzentrationen von Ce, Ga, Nb, Ru, Th, U, Y und Zr fanden sich nicht). Die ermittelten Konzentrationen von Ti und Ni lagen in der vorliegenden Studie 45fach bzw. 17fach höher als die ermittelten Konzentrationen aus einer österreichischen Studie (s. 3.3.10 und 3.3.19). Würden allerdings die in der vorliegenden Studie gefundenen Ti- und Ni-Werte mit den Angaben

nach der WHO bzw. nach Angaben einer amerikanischen Studie verglichen, so wäre kein Konzentrationsunterschied vorhanden. In der Literatur fanden sich höhere Konzentrationsbereiche für Cr und Rb im Vergleich mit den in dieser Studie ermittelten Werten (s. 3.3.13, 3.3.19), während für die Elemente Ag, Ba, Cd, Cs, Cu, Fe, La, Mn, P, Pb, Sb, Sr und Zn keine deutlichen Unterschiede gefunden wurden.

3.4.1.3 Unterschiede in den ermittelten Elementgehalten in der mütterlichen Nahrung und Muttermilch zwischen den Müttern

In Tab. 32 (3.4.1.1) ist neben der Angabe der ermittelten Elementgehalte in den untersuchten Lebensmitteln und Muttermilch außerdem die relative Standardabweichung (\pm RSD) angegeben.

Ersichtlich wird, dass insbesondere die Gehalte der Elemente Sb, Ag und Zr in den aufgenommenen Lebensmitteln zwischen den Müttern stark variieren. Hierbei konnten hohe Standardabweichungen (RSD) zwischen $\pm 250 - \pm 440$ % berechnet werden. Darüber hinaus zeigte sich bei den Elementen Th, Ru, Co, Pb und Cr ebenfalls ein höherer Unterschied (RSD > 50%). Geringere Unterschiede im Elementgehalt der verzehrten Lebensmittel zwischen den Müttern (RSD < 50%) konnten hingegen für alle weiteren in der Tab. 32 aufgeführten Elemente ermittelt werden, wobei der Zn-Gehalt der Nahrung mit ± 18 % RSD den geringsten Unterschied zwischen den Müttern aufwies.

Bezüglich der Unterschiede in den ermittelten Elementkonzentrationen in der Muttermilch der einzelnen Mütter untereinander konnten für die Elemente Ru, Au und Zr die höchsten relativen Standardabweichungen ermittelt werden ($\pm 114-228$ % RSD). Weiterhin zeigten sich hohe Unterschiede (RSD > 50%) bei den Elementen U, Sb, Ag, Y, Cd, Mo, Cu, Zn und Fe. Für alle weiteren in der Tab. 32 aufgeführten Elemente konnten geringere Standardabweichungen (RSD < 50%) hinsichtlich der Konzentrationen in der Muttermilch im Vergleich der Mütter untereinander ermittelt werden.

Zusammenfassend zeigten insbesondere die Gehalte der Elemente Ru, Sb, Ag und Zr sowohl in der aufgenommenen Nahrung als auch in der Muttermilch Standardabweichungen > 50%.

3.4.2 Interelementare Korrelationen in Lebensmitteln und Muttermilch

In Tab. 33 ist die Korrelationsmatrix der untersuchten Elemente in den Lebensmitteln denen der Muttermilch gegenübergestellt. Die häufigsten interelementaren Korrelationen fanden sich für Zn und Sr in den Lebensmitteln, während in der Muttermilch neben Zn und Sr noch Th und Ga zu nennen sind.

Ähnliche (signifikante) Korrelationsmuster konnten für folgende Elementpaare sowohl in den Lebensmittel- als auch in den Muttermilchproben ermittelt werden:

Ce/La, Cu/Ga, Cu/Sr, Nb/Ba, Ni/Cr, Sr/P, Rb/P, Th/La, Zn/Cr, Zn/Cu, Zn/Ga, Zn/P und Zn/Rb

3.4.3 Experimentell ermittelte Transferfaktoren Nahrung/Muttermilch

3.4.3.1 Klassifikation nach chemischen Kriterien

Werden die in der Tab. 34 ermittelten elementspezifischen Transferfaktoren TF nach ihrer Höhe des Übergangs aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch klassifiziert, so ergibt sich folgendes (chemisches) Clustering:

1. $TF \leq 0,02$ Ba, Cd, Mn (zweiwertige Metallionen mit nur [kinetisch wie auch thermodynamisch] relativ labilen Komplexen) sowie Nb, Mo, U (hohe Oxidationsstufen);
2. TF zwischen 0,02 und 0,06 die meisten untersuchten Elemente;
3. TF zwischen 0,06 und 0,15 P, Ti, Zr, Cr, Zn (überwiegend mittlere Oxidationsstufen [+ III oder + IV]; Zn^{2+} ist essentiell und bildet mäßig stabile Komplexe);
4. $TF \geq 0,15$ Rb, Cs, Ag, Cu, I (insbesondere einwertige Kat- und Anionen).

Tab. 34: Elementspezifische Transferfaktoren (TF) für den Übergang aus der Nahrung in die Muttermilch unter Ausschluss I-, Fe- und Zn-supplementierter Mütter. Für Iod ist der arithmetische, für alle übrigen Elemente der geometrische Mittelwert angegeben. Die Schwankungsbreite bezieht sich auf die auf Tagesbasis ermittelten Transferfaktoren. RSD: relative Standardabweichung; n.a.: nicht auswertbar

	TF [d/kg]	±RSD [%]	Minimum-Maximum [d/kg]		TF [d/kg]	±RSD [%]	Minimum-Maximum [d/kg]
Ra	n.a.			La	0,030	204	0,0038-10,7
Re	n.a.			Au	0,032	140	0,001-1,0
Te	n.a.			Pb	0,033	60	0,002-0,9
Mn	0,001	67	0,00025-0,11	Sb	0,035	64	0,0003-5,0
Mo	0,005	127	0,0001-0,08	Co	0,046	80	0,0003-8,2
Ba	0,007	57	0,000078-0,11	Ni	0,054	51	0,002-0,4
Cd	0,014	82	0,001-0,38	Cr	0,065	60	0,0006-2,8
Nb	0,016	43	0,0009-0,45	Zr	0,065	98	0,001-3,6
U	0,018	72	0,0019-0,7	Ti	0,067	76	0,011-0,65
Y	0,021	80	0,0014-0,76	Zn	0,077	119	0,01-0,66
Ga	0,022	74	0,0036-0,23	P	0,095	43	0,028-0,455
Th	0,022	76	0,001-0,6	Ag	0,152	253	0,0017-23
Fe	0,023	114	0,00083-0,43	Cu	0,156	70	0,02-0,8
Ce	0,025	82	0,0026-1,12	Rb	0,200	36	0,02-1,1
Ru	0,025	237	0,0005-2,4	Cs	0,271	35	0,01-1,7
Sr	0,027	44	0,002-0,14	I^a	0,560	41	0,11-2,2

Die Klassifikation der ermittelten elementspezifischen TF nach chemischen Kriterien ergab grobe Hinweise auf eine mögliche Abhängigkeit von der jeweiligen biologisch stabilen Oxidationsstufe: Ag, Rb, Cs, Cu > Zn > andere zweiwertige Metalle > Cr, Ga, La, Ce, Ti, Zr > Mo, Nb, Th und U. Diese Einteilung deutet darauf hin, dass stabile einfach geladene Kationen leicht und Oxoanionen von Metallen kaum transportiert werden. Die Beschreibung des Verhaltens zweiwertiger Ionen

durch die IRVING-WILLIAMS-REIHE⁸ (Sigel & McCormack 1970) ist sowohl für den TF (Ba < Cd < Fe ≈ Sr < Co < Ni >> Zn; Ba < Fe, Co ≈ Zn; Ausnahme hier Mn) als auch für den Blut/Milch-Übergang (Cd < Mn < Fe < Co < Ni >> Zn; Ausnahme hier Cu) möglich, die Ausnahmen weisen auf **Redoxprozesse** hin:

Die Autoren nehmen eine Retention von Mn in oxidierter Form im Verdauungstrakt oder Blut (Mn^{III}-Transferrin-Komplex) an, während der offenbar erschwerte Übertritt von Cu in die Milch eine Folge dort reduzierender, Cu(I) bildender Bedingungen sein dürfte (der TF für den Gesamtübergang Nahrung/Milch folgt hingegen der Irving-Williams-Reihe, ist also für ein zwei- [oder ein-]wertiges Kation sehr hoch bzw. „normal“). Daraus ergeben sich mit dem bekannten pH von Frauenmilch (ca. 6,9) Obergrenzen des Redoxpotentials, aus welchem wiederum die stabilen Formen vieler chemischer Elemente in der Muttermilch ermittelt werden können (POURBAIX-DIAGRAMME⁹ ⇒ Oxidhydrate gehen schwer in die Milch; As, Tl und Te fallen in der Frauenmilch jeweils als deren stärkst toxische Oxidationsstufen an).

3.4.3.2 Interindividuelle Variationen, Minimum- und Maximumwerte

Hohe interindividuelle Variationen (RSD > 100%) wiesen die TFs der Elemente Ag, Au, Fe, La, Mo, Ru und Zn auf, während bei den TFs der Elemente Cs, I, Nb, P, Rb und Sr die geringsten Variationen (RSD < 50%) ermittelt werden konnten.

Theoretische Überlegungen zeigen, dass der Übertritt der Metallionen in die Frauenmilch wohl großteils in komplexierter Form erfolgt (s. hierzu 3.4.3.3) und dass folglich der TF mit der relativen Stabilität der Komplexe ansteigt (Ba < Sr ≈ Cd < Fe < Pb < Co < Ni < Cu > Zn). Dies gilt sowohl für die (geometrischen) Mittelwerte als auch für die Maxima (Ausnahme Co, vgl. Tab. 34); letztere können unter Aspekten der Risikovorsorge/Gefahrenminimierung aussagekräftiger sein als bestimmte Durchschnittswerte.

3.4.3.3 Abhängigkeit von der Laktationszeit – Komplexierung der Metallionen?

Im Zuge der Laktation sinken die Konzentrationen organischer Stoffe in der Frauenmilch, die für transportierte Metallionen als Liganden fungieren können (Aminosäuren, Fettsäuren, Lactat etc.), teilweise erheblich ab (um bis zu zwei Drittel). Dies wirkt sich u.U. auf den Transfer von Metallionen, die nicht oder nur stark erschwert als freie Ionen übertreten, in die Milch aus. Man stellt bei

⁸ Die Irving-Williams-Reihe gibt die **relativen** Stabilitäten gleichartiger (1 : 1-; d.h. ein Zentralion, ein Ligand, vier Wassermoleküle) Komplexe zweiwertiger Metallionen M²⁺ mit zweizähligen Liganden wie Glycinat, Oxalat, Ethylendiamin, Lactat oder 1,10-Phenanthrolin wieder. Sie bezieht sich ursprünglich nur auf die 3d-Übergangsmetallionen Mn...Zn sowie die Erdalkalimetalle Mg...Ba, wurde aber seit ca. 1955 auf weitere zweiwertige Ionen erweitert (Cd, Hg, Pb, Platinmetalle). Die stabilsten Komplexe sind dabei fast immer die von Cu(II), der absolute Unterschied zwischen den Stabilitäten z.B. der Cu(II)- und der Ba(II)-Komplexe (um die beiden Extreme zu nennen) hängt von der Art des Liganden ab: er ist bei schwefelhaltigen Liganden am größten, bei reinen Sauerstoffdonoren (Lactat, Oxalat) am geringsten.

⁹ Diagramme, die angeben, in welcher Form (Kation, Anion, Oxidhydrat, Metall etc.) ein chemisches Element in wässriger Lösung als Funktion von Redoxpotential und pH-Wert vorliegt. Erweiterungen schließen Effekte der Anwesenheit weiterer Elemente (Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel) ein.

Cu, Zn und Ni einen erheblichen Abfall des TF mit der Zeit fest, d.h. gerade bei denjenigen zweiwertigen Metallen, die die relativ stabilsten Komplexe bilden, während bei gering komplexbildenden Elementen (Erdalkalien, Cd) kein Effekt (kein Zusammenhang zwischen Laktationsalter und TF) erkennbar ist. Diese letztgenannten Elemente liegen offenbar größtenteils (zu ca. 90 – 95 %) als freie Ionen vor und werden, wenn auch ineffektiv ($TF \approx 0,01$), in dieser Form, d.h. unabhängig von der dortigen Ligandenkonzentration in die Milch überführt (nur einwertige freie Ionen gelangen leicht in die Milch [Rb, Cs]). Der Anteil freier Ionen kann durch Ligandenkonzentrationsverminderung dann nicht mehr erhöht werden.

Abb. 52 skizziert den möglichen Membranübergang von zwei- und dreiwertigen Ionen aus dem Blut/Serum in die Muttermilch mit dem jeweiligen ermittelten TF-Wertebereich. Die Daten für dreiwertige (Cr, Ga etc.) und höher oxidierte Ionen sind zum Vergleich mit angeführt; sie bedürfen allerdings noch weiterer theoretischer Bearbeitung.

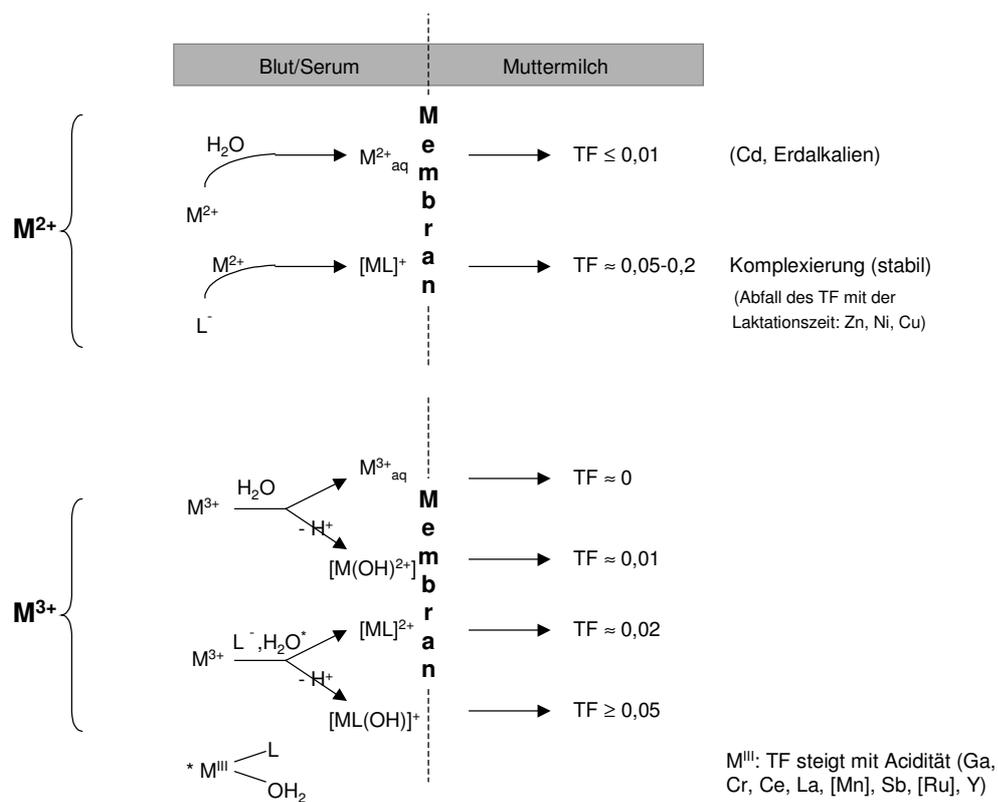


Abb. 52: Möglicher Membranübergang von zwei- und dreiwertigen Metallionen aus dem Blut/Serum in die Muttermilch. L: Ligand, TF: Transferfaktor Nahrung/Muttermilch [d/kg].

3.4.3.4 Supplementationseinfluss

Lediglich drei Mütter supplementierten täglich zusätzlich Fe-Präparate (s. 3.3.5), die insbesondere bei den Müttern mit den höchsten zusätzlichen Dosierungen zu relativ niedrigen TF_{Fe} führten. Ein ähnliches Verhalten ist bei Zn zu vermuten (in der vorliegenden Studie supplementierte lediglich eine Mutter mit Zn); Moore et al. stellten 1984 fest, dass trotz hoher zusätzlicher Zn-Verabreichung keine wesentlich höhere Zn-Konzentration in der Muttermilch ermittelt werden konnte. Bei den iod-

supplementierten Müttern (n=3) zeigte sich ein ähnlicher TF wie bei den nicht iodsupplementierten (s. 3.3.7). Auch im Vergleich zu den aus einer koreanischen Studie (extrem hoher Iodverzehr) berechneten TF zeigte sich kein wesentlicher Unterschied. Lediglich bei zwei polnischen Müttern (D und W s. 3.3.7), die an der Iodstudie teilgenommen haben (extrem niedriger Iodverzehr, n=2), deutete sich ein TF > 1 d/kg an.

3.4.4 Elementzufuhr des Säuglings mit der Muttermilch

Für die Ermittlung der durchschnittlichen täglichen Elementzufuhr des Säuglings mit der Muttermilch wurde nach der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG 1984) für die mature Laktationsphase eine tägliche Verzehrmenge von Muttermilch von 0,85 kg/d zugrunde gelegt.

In Tab. 35 sind die so ermittelten durchschnittlichen täglichen Elementzufuhrmengen der Säuglinge mit der Muttermilch zusammengestellt. Um Vergleiche mit den empfohlenen Richtwerten für eine angemessene Zufuhr von Elementen nach der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE 2000) anstellen zu können, erfolgte eine Klassifizierung der Säuglinge in die Altersgruppen „< 4 Monate“ und „> 4 Monate“. Mit zunehmendem Alter der Säuglinge (> 4 Monate) nahm die Elementzufuhrmenge über die Muttermilch im Vergleich zur Altersgruppe < 4 Monate insbesondere der essentiellen Elemente **I, P, Cu, Fe, (Rb) und Zn** ab (s. Tab. 35); für **Au** konnte ebenfalls eine Reduktion festgestellt werden. Für alle weiteren Elemente blieb die Elementzufuhr mit zunehmendem Alter der Säuglinge relativ konstant.

Tab. 35: Durchschnittliche tägliche Elementzufuhr der Säuglinge mit der Muttermilch und Partitionierung der Elemente aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch. DGE: Deutsche Gesellschaft für Ernährung; n.a.: nicht auswertbar; ¹: Säuglingsalter: < 4 Monate / > 4 Monate; ²: kein Unterschied in der Elementzufuhr zwischen den Altersklassen < 4 Monate und > 4 Monate.

	Zufuhr des Säuglings mit der Muttermilch	Empfohlene Zufuhr nach der DGE (2000)	Partitionierung aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch		Zufuhr des Säuglings mit der Muttermilch	Empfohlene Zufuhr nach der DGE (2000)	Partitionierung aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch
	[µg/d]	[µg/d]	[%]		[µg/d]	[µg/d]	[%]
Th	0,01 ²		2,0	Pb	2,3 ²		2,8
Ru	0,02 ²		2,1	Mn	4,3 ²	k.A./600-1000 ¹	0,1
U	0,02 ²		1,5	Ba	4,5 ²		0,6
Nb	0,03 ²		1,4	Cr	8,1 ²	1-10/20-40 ¹	5,5
La	0,06 ²		2,5	Ni	12 ²		4,6
Ce	0,1 ²		2,1	Sr	30-36		2,3
Sb	0,1 ²		3,0	I	79/53 ¹	40/80 ¹	47,6
Y	0,1 ²		1,8	P	110/86 ¹ mg/d	120/300 ¹ mg/d	8,0
Cd	0,2 ²		1,2	Ti	236 ²		5,7
Au	0,2/0,07 ¹		2,7	Cu	252/105 ¹	200-600/ 600-700 ¹	13,2
Ga	0,4 ²		2,0	Fe	255/157 ¹	500/8000 ¹	2,0
Mo	0,5 ²	7/20-40 ¹	0,5	Rb	426/335 ¹		17,0
Ag	0,6 ²		13,0	Zn	1296/381 ¹	1000/2000 ¹	6,5
Co	0,7 ²		4,0	Ra	n.a.		
Zr	1,1 ²		5,5	Re	n.a.		
Cs	2,1 ²		23,0	Te	n.a.		

Die täglichen Zufuhrmengen der Elemente Cu, P, Zn und Cr der **Säuglinge** im Alter **< 4 Monate** entsprachen in etwa der empfohlenen täglichen Zufuhr der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE 2000). Bei den hier betrachteten Säuglingen zeigte sich in der Altersgruppe **< 4 Monate** für Fe im Vergleich zu der empfohlenen Zufuhr nach DGE eine um etwa 50% bzw. für Mo eine um 93% niedrigere Aufnahme. Bezüglich des Iods konnte eine um 50% höhere Zufuhr gegenüber der empfohlenen Zufuhr nach der DGE ermittelt werden. Für die Zufuhr von Mn lag für diese Altersgruppe kein Vergleichswert der DGE vor.

Für die **Säuglinge der Altersgruppe > 4 Monate** war die Zufuhr der essentiellen Elemente Cu, Fe, I, P, Zn, Mn, Cr, Mo über die Muttermilch im Vergleich mit den Empfehlungswerten der DGE nicht mehr ausreichend. Die in der vorliegenden Studie ermittelten Zufuhrdaten betragen 19% (Zn), 15-18% (Cu), 2% (Fe), 66% (I), 29% (P), < 1% (Mn), 20-40% (Cr) und < 3% (Mo) der von der DGE empfohlenen Tagesmenge.

In Tab. 35 ist außerdem die ermittelte Partitionierung der untersuchten Elemente aus der mütterlichen Nahrung in die Muttermilch dargestellt, d.h. der Bruchteil der von der Mutter aufgenommenen Elemente, der in die Muttermilch übergeht. Demnach konnten für die Elemente Mn, Mo und Ba die geringsten (< 1%) und für die Elemente Ag, Cu, Rb, Cs und I die höchsten Partitionierungen (13-47%) ermittelt werden.

4 Modellbetrachtungen in Bezug auf die Ermittlung des Transferfaktors

4.1 Relativierung des Transferfaktors für stabile Isotope: Konzentrationsabhängigkeit und praktische Konsequenzen

Eingangs sei daran erinnert, dass die in dieser Arbeit abgeleiteten TF für stabile Isotope im Strahlenschutz auf **radioaktive** Isotope angewendet werden. Durch die Verdünnung radioaktiver Isotope durch stabile Isotope des gleichen Elements ergibt sich eine einfache Proportionalität zwischen der täglich mit der mütterlichen Nahrung aufgenommenen Aktivität und der spezifischen Aktivität in der sekretierten Muttermilch. Die Proportionalitätskonstante entspricht formal dem „Transferfaktor“ für stabile Isotope des gleichen chemischen Elements.

Für **stabile** Isotope bzw. in den Fällen, wo ein chemisches Element ausschließlich radioaktive Isotope besitzt, ist diese einfache Proportionalität in der Regel nicht mehr gegeben. In der Realität bestehen jedoch

- 1) auch dann nicht lineare Zusammenhänge, wenn Zufuhrmengen außerhalb des Mangelbereichs betrachtet werden und
- 2) treten mit fortschreitender Laktation Veränderungen der Frauenmilch hinsichtlich ihrer Gehalte an Proteinen, Fetten und Zuckern ein, die gleichsinnig sind (Abnahme der Konzentrationen auf etwa ein Drittel) und mit Änderungen der Transferfaktoren für **einige** Elemente korrespondieren:

Die TF für Cu, Zn und Ni sinken mit steigendem Säuglingsalter erheblich, während für Cd, Sr, Ba kaum Änderungen oder ein leichter (allerdings nicht signifikanter) Anstieg gefunden wurde. Dies entspricht wiederum der IRVING-WILLIAMS-Reihe: Zweiwertige Metall-Ionen (M^{2+}), die in wässrigen Milieus nur schwache Komplexe bilden, wie Cd, Sr oder Ba (ähnliches gilt für Mn, doch ist dessen tatsächliche Oxidationsstufe im Blut unsicher bzw. wahrscheinlich + III [an Transferrin bindende Form]), liegen bei den relativ niedrigen Ligandenkonzentrationen in Blut und Milch (Blut: freie Aminosäuren ≤ 1 mmol/l, Lactat 1 – 4 mmol/l, Glucose ca. 7 mmol/l usw.) als einfache (nur mit Wasser komplexierte) und damit doppelt positiv geladene Kationen vor, die die offenbar gleichnamig geladene Membran nur schwer passieren können (daher $TF < 0,03$ für diese Metalle).

Vermindert sich nun mit der Zeit die Konzentration potenzieller Liganden in der Frauenmilch, so ändert sich am Verhalten von Cd, Sr oder Ba gar nichts, weil diese vorher und jetzt gleichermaßen nicht (durch Anionen) komplexiert vorliegen. Demgemäß bleiben auch deren TF-Werte unverändert. Anders verhält es sich bei stark komplexbildenden zweiwertigen Ionen (Ni, Cu, Zn):

Werden nun erheblich verminderte Ligandenkonzentrationen angeboten, so wird die Komplexbildung dieser M^{2+} -Ionen zurückgehen und damit deren Übergang in die Milch erschwert, mit der Folge, dass der TF für diese drei Elemente mit fortschreitender Laktation erheblich absinkt. Im Prinzip lassen sich aus diesen Daten sowohl die durchschnittliche Molmasse als auch die Komplexbildungskonstante der diese Metalle in der Milch bindenden Spezies näherungsweise bestimmen und aus letzterer zumindest grobe Rückschlüsse auf die Natur der Liganden ziehen.

4.2 Mobilisierung von Elementen aus körpereigenen Depots

Nur ein gewisser Prozentsatz eines gegebenen chemischen Elementes gelangt durch Resorption im Magen-Darm-Trakt in den Blutstrom. Die Abgabe aus dem Blut an andere Körperkompartimente wie auch den Körper verlassende Senken (Urin, Schweiß, Muttermilch, nicht aber Faeces¹⁰) bestimmt sich folglich durch die Resorptionsrate und Beiträge aus anderen Depots, etwa der Skelett- oder Fettsubstanz. Nimmt man eine geradlinige Übertragung eines Stoffes aus der Nahrung über den Verdauungstrakt und den Blutstrom zu den zitierten Senken an, so werden die Flüsse daher mathematisch stetig von Stufe zu Stufe geringer, da keiner dieser Transferprozesse mit 100 % Effizienz verläuft.

Im Falle von Blei sind weitere Untersuchungen u. E. dringlich und auch wissenschaftlich aussichtsreich, und zwar aus mindestens zwei Gründen:

- Lipophiles Blei ($R_xPb^{(4-x)+}$) stellt eine insbesondere für Säuglinge wegen seiner Neuro- und Cerebrotoxizität besonders gefährliche Form dar, weshalb eine Herkunft aus dem Fettgewebe ein Risiko anzeigen würde, das gegenüber anorganischem Blei erhöht wäre, und
- bei Blei unterliegt die Zusammensetzung der vier stabilen natürlichen Isotope ²⁰⁴Pb; ²⁰⁶Pb; ²⁰⁷Pb; ²⁰⁸Pb beträchtlichen Schwankungen, die unterschiedliche Quellen zu unterscheiden gestatten. Dies gilt selbstverständlich auch retrospektiv für alle Quellen von Blei (Nahrung, Atemluft etc.), die sich in den Depots manifestieren (vgl. Beattie [1992]: Der eisige Schlaf. Das Schicksal der Franklin-Expedition).

4.3 Fraktionierung der chemischen Elemente ausweislich unterschiedlicher Transferfaktorenwerte und Eigenschaften der Brustdrüsenmembran: elektrostatische Effekte auf Kat- und Anionen (Nichtmetalle, Oxometallate [z.B. Molybdän])

Die beobachtete globale Abhängigkeit der TF von der biologisch stabilen Oxidationsstufe (s. 3.4.3.1) lässt sich durch die Annahme deuten, dass die Brustmembran zwischen den Kapillaren und den Kavernen der Milchdrüse eine positive Oberflächenladung aufweist – sei es durch einen hohen Anteil basischer Aminosäurereste in der Proteinfraction der Zellwand (Arginin, Lysin), sei es durch selektive bzw. überwiegende Adsorption von Kationen an der Membran. In beiden Fällen resultiert eine ausgeprägte Abstoßung höher geladener Kationen an der Membran, wodurch schwach komplexbildende M^{2+} , M^{3+} (Erdalkalien, Cd, Mn) weitaus weniger leicht übertreten können als die Monokationen von Rb, Cs und Ag.

Elemente, die höher geladene Anionen bilden, wie Molybdän, werden von einer solchen Membran zwar elektrostatisch angezogen, haften dort aber an, ohne sie in nennenswertem Maße durchdringen zu können.

¹⁰ Die Fäkalkonzentration von Metallen wird überwiegend durch die Anteile bestimmt, die gar nicht erst resorbiert wurden, auch wenn einzelne Elemente in den Darm rücksekretiert werden, z.B. als Metallkomplexe in der Gallenflüssigkeit.

Die Daten für Cd, Pb deuten auf weitgehende Retention auch thiophiler Metalle im Blutstrom hin, d.h. Schwefel bzw. schwefelhaltige Biomoleküle wie die Aminosäuren Cystein oder Methionin, Peptide wie Glutathion oder schwefelhaltige Heterocyclen wie Thiazolderivate sind am Transport thiophiler (und erst recht anderer, nicht oder wenig schwefelaffiner) (Schwer-)Metalle in die Milch nicht beteiligt. Dies wird durch den aus den TF berechenbaren Wert des elektrochemischen Ligenparameter für die Milchbindungsform bestätigt.

4.4 Zeitliche Verschiebung und Lebensdauer der zu betrachtenden Radionuklide: gelangen die Nuklide durch die Nahrungskette bis zum Säugling?

Die in der Tab. 36 geschätzte zeitliche Verschiebung zwischen der Aufnahme von Elementen aus der mütterlichen Nahrung und deren Deposition in die Muttermilch wurde nach folgender Annahme berechnet (aufgrund der vereinfachten Darstellung auf der Basis eines Flussmodells sind die Schätzungen lediglich als Orientierungswerte zu verstehen): Blutvolumen (ca. 5,5 l) \approx 2 · tägliche Gesamtmenge an Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme (3,0 kg/d). Daraus folgt z.B. bei Gleichheit der Konzentrationen in Nahrung und Blut und 20 % Resorptionsquote eine zeitliche Verschiebung von 10 Tagen (s. Gleichung 9). Dabei wird nach einer erhöhten Zufuhr kein scharf umrissenes Maximum auftreten, sondern eine breite erhöhte Konzentrationsverteilung.

$$(Gl. 9) \quad V_{Blut} = \frac{\left(\frac{c(Blut)}{c(LM)} \right)}{\left(\frac{RR}{100} \right)} \cdot 2$$

V_{Blut} : Verweilzeit im Blut [d]
 $c(Blut)$: Elementkonzentration im Blut [$\mu\text{g/l}$]
 $c(LM)$: Elementkonzentration in Lebensmitteln [$\mu\text{g/kg}$]
 RR : Resorptionsrate über den Verdauungstrakt [%]

Tab. 36: Geschätzte zeitliche Verschiebung zwischen der Elementaufnahme über die Nahrung und Deposition in die Muttermilch für zahlreiche Elemente. ^a: Daten nach Minoia et al. (1990), Emsley (2001)* und Umweltbundesamt (1998)**.

	Nahrung [µg/kg]	Blutkonzentration ^a [µg/kg]	Quotient [-]	Resorption ca. [%]	Zeitliche Verschiebung ca.
Rb	729	2645	3,6	hoch ¹¹	ca. 20 d
Sr	484	30*	0,062	20	15 h
Ba	240	1,13	0,005	15	1,6 h
Pb	25	31**	1,24	5 – 10	26 - 50 d
Cd	4,67	0,41**	0,09	6	3 d
Th	0,26	0,20	0,76	0,02 (?)	(22 a)
Zr¹²	6,55	10*	1,5	3 (s.u.)	ca. 100 d
Nb	0,79	5*	6,3	< 5	≥ 250 d (!)
Cr	52	0,22 (?)	0,0042	1 – 2	10 – 21 h ¹³
Mn	1.153	8,29	0,0072	4 – 5	7 – 9 h
Fe	3.500	415.000 ^{14*}	0,06 – 0,2	< 25	> 40 h
Ni	84	2,16	0,026	10	13 h
Cu	417	1.155	2,77	≤ 50	11 d
Ag	1,51	0,35	0,23	≈ 10	5 d

Die Elemente liegen im Blut zumeist an spezialisierte Transportproteine gebunden vor. Da die Brustdrüsenmembran für große Proteinmoleküle nicht oder kaum permeabel ist, ist die Demetallierung (Hydrolyse) dieser Komplexe eine notwendige Bedingung des Transfers in die Milch. Sie stellt, wie Überlegungen zur Hydrolysenkinetik von Metallkomplexen zeigen, jedoch *nicht den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt* dar, weil die Austauschzeiten der Metallionen zwischen Blutlösung und Komplex (Transportprotein) im Bereich zwischen µs (Erdalkalimetalle) und wenigen Minuten (Co, Cu, Cr) liegen. Die einzige Ausnahme bildet Ni; die Hydrolyse seines Albuminkomplexes (Transportform) erfolgt auf der Zeitskala von Wochen und dauert mithin weitaus länger als die in der Tab. 36 geschätzte mittlere Verweilzeit im Blut von 13 Stunden.

Für Rb, Cd, Ag sowie Cu ergeben sich zeitliche Verschiebungen innerhalb unseres Zeithorizontes (1 – 20 d), für Fe nur dann, wenn kein Austausch mit der Häm-Eisenfraktion in Milz oder Knochenmark eintritt. Bei Cr ist der Wert sehr unsicher, bei Sr und Mn sowie Ba ist der Prozess zu

¹¹ „rubidium is easily absorbed from the guts“; für die Berechnung werden 40 % zu Grunde gelegt.

¹² Zirconium ist im Urin **nicht** nachweisbar (Emsley 2001), in Frauenmilch aber in Konzentrationen enthalten, die mit jenen in Nahrung und Blut größenordnungsmäßig vergleichbar sind. Die Senke ist hauptsächlich das Skelett, in dem sich Zirconium dem zu Folge langsam anreichert (Gesamtgewicht ca. 12 kg, Konzentration < 0,1 ppm, entsprechend < 1,2 mg Zr_{Skelett}). Der Gesamtzirconiumgehalt des Körpers wird meist mit ca. 1 mg angegeben (Ausnahme: Elmadfa & Letzmann (1988) nennen 300 mg). Die Lebensmittelration entspricht einer jährlichen Aufnahme von ca. 2,5 mg, woraus sich unter der gängigeren Annahme beim durchschnittlichen Alter der Probandinnen (seit ca. 12 Jahren erwachsen) und fehlender Ausscheidung über die Niere eine Resorptionsquote von ca. 3 % errechnet. Diese wird oben zu Grunde gelegt.

¹³ Für die *niedrigste* von Emsley angeführte Blutkonzentration von 6 µg/l resultiert eine zeitliche Verschiebung von elf bis 23 Tagen.

¹⁴ Die nicht an Häm gebundene Eisenmenge beträgt nur ca. 200 – 700 µg/l; die o.a. Gesamtmenge kann aber als Test für die Brauchbarkeit des einfachen Modells heran gezogen werden, weil die Lebensdauer von Erythrozyten bekannt ist (ca. 120 d). Mit dem Gesamteisen im Blut ergeben sich ca. 230 d mittlere Verweildauer für Fe im Blutvolumen, angesichts des in der Milz erfolgenden „Recyclings“ von Häm-Eisen ein sinnvoller Wert. Der oben berechnete Wert bezieht sich auf das an Transferrin gebundene Fe(III); freie Eisen(III) Ionen können wegen der Schwerlöslichkeit des Oxids und Oxidhydrates bei pH 7,4 (Blut) praktisch nicht in Lösung verbleiben.

schnell für unsere experimentell begründete Zeitauflösung. Dass derart kurze Zeitverschiebungen wie die hier für Ba und Mn berechneten (wenige Stunden) tatsächlich realistisch sind, zeigen autoradiographische Studien am Tiermodell (*Rattus norvegicus*):

Auch wenn man bei den gegenüber dem Menschen erheblich kleineren Nagern einen relativ intensiveren Stoffwechsel unterstellen muss (Wünschmann et al. 2001, 2002a)¹⁵, bleibt doch fest zu halten, dass in Ratten (nach i.v. Injektion) eine unterschiedlich starke Partition zumindest eines Elementes in verschiedene Organe innerhalb weniger Minuten eintritt; die entsprechenden Untersuchungen wurden mit Franciumisotopen durchgeführt (Emsley 2001, S. 151), also an einem extrem kurzlebigen¹⁶ Alkalimetallion. Selbst unter diesen Umständen resultiert eine ausgeprägte Verteilung zwischen den Organen und Geweben. Dem zu Folge dürften auch die berechneten Werte für Ba oder Mn plausibel sein.

Grundsätzlich muss aber betont werden, dass **jeder** Transportpfad – auch bei Aufnahme des Nuklids durch Einatmen oder über die Haut – sich durch das mütterliche Blut als Zwischenspeicher vollzieht (Oehlmann & Markert 1997). Bei Radionukliden – deren Verhalten hier ja modelliert werden soll – ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass während des Durchlaufens der Nahrungskette – einschließlich ihres intraspezifischen „Endstücks“ mit dem Stillvorgang – ein Teil der Nuklide radioaktiv zerfällt und daher nicht mehr bzw. mit dann massiv verändertem chemischem Verhalten zum Säugling gelangen kann¹⁷. Dennoch darf nicht geschlussfolgert werden, dass solche Nuklide, deren Halbwertszeiten kürzer sind als die hier abgeschätzten Verweildauern im mütterlichen Blutvolumen, dem Säugling nicht mehr begegnen werden, und zwar aus mehreren Gründen:

- Es resultiert kein scharfes Maximum der Konzentration in der Muttermilch nach einmalig erhöhter Aufnahme des Nuklids, sondern eine relativ breite zeitliche Verteilung¹⁸. Dies bedeutet bei Radionukliden, dass anfangs noch höhere Anteile unzerfallen vorhanden sein können und in die Milch überführt werden können.
- Das Tochternuklid kann selbst radioaktiv sein und seinerseits u.U. in höherem Maß in die Milch übergehen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn sich die biochemisch stabile Oxidationsstufe des Tochternuklids von der des Mutternuklids unterscheidet (evtl. niedriger ist) oder wenn das Tochternuklid stabilere Komplexe bildet.
- Das Mutternuklid kann in eine gleichfalls radioaktive Tochter zerfallen, deren Halbwertszeit lang gegen die berechnete Verweildauer ist und die im Körper der Mutter nur in geringem Maß zerfällt.

¹⁵ Weitere diesbezüglich ernährungsphysiologisch interessante Daten finden sich in Wünschmann et al. (2001, 2002a).

¹⁶ Die beiden langlebigsten Franciumisotope, ²¹²Fr und ²²³Fr, haben Halbwertszeiten von nur ca. 20 Minuten; von **allen** übrigen Elementen bis hinauf zur Ordnungszahl 103 (Lawrencium) sind langlebigere oder stabile Nuklide bekannt.

¹⁷ Bei langlebigen Thorium- und Uranisotopen ist das hier irrelevant, weil deren radioaktive Lebensdauern die des Menschen um Zehnerpotenzen übersteigen. Sie können – wie auch Technetium – hier als stabile Elemente angesehen werden.

¹⁸ Dies ist der Grund, weshalb sich die Verweildauer bzw. zeitliche Verschiebung nicht direkt anhand der Zuordnung einzelner Peaks bestimmen lässt und daher eine indirekte, rechnerische Abschätzung durchgeführt werden musste.

4.5 Homöostatische Regulierung und Wechselwirkung von Elementen

Im Zuge der Laktation sinken die Konzentrationen organischer Stoffe in der Frauenmilch, die für transportierte Metallionen als Liganden fungieren können (Aminosäuren, Fettsäuren, Lactat etc.), teilweise erheblich ab (um bis zu zwei Drittel). Dies wirkt sich u.U. auf den Transfer von Metallionen, die nicht oder nur stark erschwert als freie Ionen übertreten, in die Milch aus.

Man stellt bei Cu, Zn und Ni einen erheblichen Abfall des TF mit der Zeit fest, d.h. gerade bei denjenigen zweiwertigen Metallen, die die relativ stabilsten Komplexe bilden, während bei gering komplexbildenden Elementen (Erdalkalien, Cd) kein Effekt (kein Zusammenhang zwischen Laktationsalter und TF) erkennbar ist. Diese letztgenannten Elemente liegen offenbar größtenteils (ca. 90 – 95 %) als freie Ionen vor und werden, wenn auch ineffektiv ($TF \approx 0,01$), in dieser Form, d.h. unabhängig von der dortigen Ligandenkonzentration, in die Milch überführt (nur einwertige freie Ionen passieren leicht in die Milch [Rb, Cs]). Der Anteil freier Ionen kann durch Ligandenverminderung dann nicht mehr erhöht werden.

Die außergewöhnliche Stabilität von Cu(II)-Komplexen mit fast beliebigen Bindungspartnern würde ohne Regulation ihrer Konzentration im Blut und Serum dazu führen, dass sämtliche Proteine als Kupferkomplexe vorlägen, weil Cu alle anderen zweiwertigen Ionen verdrängen würde. Dies wird durch Bindung von Cu^{2+} (und Zn^{2+}) an entsprechende Transportproteine (Albumine) vermieden; hier liegt **Homöostase** (hier enggefasst verstanden als ein Prozess, bei dem die Metallzufuhr die Bildung des Transportproteins über Genexpression induziert) vor. Die Konsequenz ist allerdings (auch bei Zn), dass der Rückgang der Milchkonzentrationen von Liganden mit fortschreitender Laktation mit einem Rückgang des (allerdings hohen) TF dieser Metalle und damit der Spurenelementversorgung des Säuglings verbunden ist.

Weitere Hinweise auf eine homöostatische Regulierung findet man bei Fe, bei dem die Bildung von Transferrin (nach Oxidation zu Fe(III)) mit nachfolgender Deposition des Fe in der Milz so effektiv verläuft, dass die Fe-Aufnahme des Kindes durch Fe-Supplementation der Mutter sogar verringert wird. Da auch Mn (als Mn(III)) sehr stabil an Transferrin bindet und die Fe-Versorgung auch der nicht supplementierten Mütter relativ gut war, ist der extrem niedrige TF von Mn (0,001) plausibel. Gleiches (kleiner TF) sollte unter dieser Annahme (ausgeprägte Induktion von Transferrin) auch für Plutonium (biologisch als Pu(IV) vorliegend) gelten. Im Vergleich mit anderen vierwertigen Elementen (Ti, Zr, Th), für die Messwerte des TF vorliegen, die relativ hoch sind (0,02-0,07), sollte Pu bei guter Fe-Versorgung daher weit weniger in die Milch transferiert werden, was das Risiko einer Exposition auch aus dem ubiquitären Fallout mindert.

4.6 Supplementationseffekte

Supplementationen von Elementen lösen teils komplexe Effekte aus: Bei Zugabe von Eisen tritt ein erheblicher Abfall des TF für Fe auf. Dies legt den Schluss nahe, dass Fe bei vermehrter Zufuhr zu Fe(III) oxidiert, an Transferrin gebunden und an einem anderen Ort als der Brustdrüse deponiert bzw. verwendet wird.

Für Zink liegt nur ein Beispiel für Supplementation vor; aber auch hier findet man einen TF_{Zn} , der unter dem aus der für die Mutter A individuell errechneten Regression und der Stabilität von Zinkkomplexen berechneten liegt. Moore et al. (1984) untersuchten den Effekt einer oralen Zinksupplementation auf die Zinkkonzentration in der Muttermilch und kamen zu dem Resultat, dass das Brustgewebe über einen Mechanismus zur Kontrolle der Zinksekretion verfügt; d.h. trotz gesteigerter Zinkverabreichung konnte keine wesentlich höhere Zinkkonzentration in der Muttermilch festgestellt werden.

Es besteht ein Antagonismus zwischen dem Stoffwechsel von Iod und dem von Zink, indirekt auch mit demjenigen von Nickel (Anke in Fiedler und Rösler 1993), außerdem eine starke indirekt antagonistische Beziehung zum Selenstoffwechsel, der wiederum den Verbleib thiophiler Schwermetalle reguliert, von denen hier Cd, Cu und Pb in die Studie eingingen. Deshalb ist bei Iodgaben mit erheblichen Rückwirkungen auf den normalen Verlauf des Stoffwechsels und den Transfer dieser Elemente in die Frauenmilch zu rechnen, wie er sich nach Elementen differenziert bei allen drei Iodsupplementierten Müttern zeigt. Hier bestehen komplexe antagonistische Wechselwirkungen, deren gesundheitliche Konsequenzen (Expositionsrisiken für den Säugling) genauer betrachtet werden müssen.

4.7 Möglichkeit der Kontrolle des Transferfaktors von Spaltradionukliden durch gezielte Supplementation mit anderen Elementen (Fe, I)

Die TF zahlreicher Elemente (Ba, Cd, Fe, Pb, Zn) werden durch erhöhte Zufuhr anderer Elemente erheblich beeinflusst, so durch eine solche von Iod oder Eisen. Dies legt die Frage nahe, ob evtl. die flächendeckende Medikation mit Iodid im Havariefall eine Kontrolle des Transfers von neben ^{131}I dominierenden Spaltradionukliden wie ^{140}Ba (13 d Halbwertszeit) und ^{89}Sr (50 d) erlaubt und welche Nebenwirkungen dabei zu erwarten sind. Im Falle von Sr besteht auch die Möglichkeit direkter isotopischer Verdünnung mit Kohl-Produkten (z.B. Sauerkraut), die recht hohe Sr-Gehalte aufweisen. Wirkungsvoller (weil überproportionale Effekte bewirkend) sind allerdings Gaben von Zn, Fe oder I, denn diese bewirken jeweils erhebliche Verminderungen des Ba-Übergangs, was insbesondere in der ersten Zeit nach einer schweren kerntechnischen Havarie sowie bei rauchenden Müttern wichtig ist (diese zeigen stark erhöhte Ba-Konzentrationen in der Milch [Coni et al. 1990]). Diese Supplementationen schützen den Säugling auch vor Cd und Pb, aber der Transfer von Zink nimmt jeweils zu.

4.8 Vorhersage theoretischer Transferfaktoren anhand eines vereinfachten Komplexbildungsmodells

Aus toxikologischen und spurenanalytischen Gründen (Unterschreiten auch heutiger analytischer Nachweisgrenzen, z.B. Te, Au, Re, Platinmetalle) ist es nicht möglich, die Transferfaktoren für alle interessierenden chemischen Elemente direkt zu bestimmen. Dieser Umstand macht es notwendig, mithilfe von Korrelationsmethoden aus der physikalischen anorganischen Chemie das Verhalten

seltener (Platinmetalle), toxikologisch problematischer (Blei, Cadmium, Quecksilber) oder obligat radioaktiver Elemente (z.B. Technetium¹⁹, Promethium²⁰, Actinoiden²¹, also Elemente, die keine stabilen Isotope aufweisen, die als Modelle untersucht werden könnten) beim Transfer in die Muttermilch rechnerisch herzuleiten (Fränzele 2003a).

Mit den Komplexbildungskonstanten bekannter Testliganden (z.B. EDTA für Hg²⁺ und die Lanthanoiden) und den abgeleiteten Regressionsgleichungen, die die Stabilität der Koordinationskomplexe mit der Größe des TF verknüpfen, lassen sich theoretische TF für analytisch unzugängliche Elemente berechnen, sofern die Speziation der Elemente hinreichend eindeutig ist, d.h. nicht Retention z.B. durch Oxidation und Bindung an Transferrin erfolgt. Diese kann auch konzentrationsabhängig sein, z.B. bei Eisen. Streng genommen gelten auch die so berechneten Werte nur jeweils für eine Probandin, doch stimmen sie vielfach gut überein. Aus Gründen der Gefahrenvorsorge sind die jeweils höchsten Werte der TF als handlungsleitend zu sehen. Die breite Gültigkeit des Korrelationsansatzes zeigt, dass die Transportformen der biologisch relevanten Schwermetalle im Blut (Transferrin für Fe und Mn, Albumine für Cu und Zn [und Cd, Pb ?], Phosphoproteine für Ca [sowie Sr und Ba], vgl. DaSilva & Williams 2001) in der Brustdrüse vollständig demetalliert und als Liganden durch eine vermutlich für alle Metalle identische Spezies ersetzt werden. Mithilfe linearer Regressionen, die auf elektrochemische Einflüsse der Liganden (Chatt et al. 1980; Lever 1990) in Metallkomplexen abheben (Fränzele 2003, Publikation in Vorbereitung), lässt sich diese Transportspezies zwar nicht exakt identifizieren, jedoch die metallbindenden funktionellen Gruppen und damit die Stoffklasse erkennen. Demzufolge dürfte es sich um Carboxylate wie Lactat oder Citrat handeln, nicht aber um Aminosäuren, auch schwefelhaltige Donoren sind auszuschließen; aus der Häufigkeit der Liganden in Blut und Milch sowie den jeweiligen Komplexstabilitäten folgt Lactat als die wahrscheinlichste koordinierende Spezies. Ein weiteres Kriterium liefert das unterschiedliche Verhalten der Elemente bzw. ihrer TF-Werte mit fortschreitender Laktation: hiermit kann die anfängliche Ligandenkonzentration abgeschätzt werden (ca. 10⁻⁴ M/l).

Dies lässt vermuten, dass auch der Transfer anderer thiophiler Schwermetalle wie Pd, Pt und Hg mit diesem Ansatz vorhergesagt werden kann, wobei angesichts der bekanntermaßen hohen Stabilitäten von deren M(II)-Komplexen mit relativ hohen TF-Werten gerechnet werden muss. So deuten die Korrelationen mit EDTA²² als Testligand einen TF $\geq 0,1$ für Quecksilber(II) an, der zwar kein radiotoxikologisches, aber ein chemotoxikologisches Problem signalisiert. Cadmiumkomplexe sind weniger stabil als ihre Hg(II)- und meist auch Zn(II)-Homologen (Irving & Williams 1953), für die Platinmetalle (Kfz-Immissionen !) ist jedoch mit noch höheren TF-Werten als für Hg zu rechnen. Die Beziehung zur Komplexbildungskonstante sollte sich angesichts von Polarisierbarkeitseffekten

¹⁹ Ordnungszahl Z = 43; 7.Nebengruppe (Homologes von Mangan, Rhenium und Bohrium), als Spaltprodukt relevantes Isotop ⁹⁹Tc (T_{1/2} = 212.000 a)

²⁰ Z = 61, Seltenerdmetall, als Spaltprodukt relevantes Isotop ¹⁴⁷Pm (T_{1/2} = 2,6 a)

²¹ Z = 89 (Actinium, daher der Name der gesamten 5f-Elementserie) – 99 (Einsteinium), die schwereren Actinoiden (Z = 100 – 103) werden in Kernreaktoren nur noch in geringsten Spuren bzw. gar nicht gebildet.

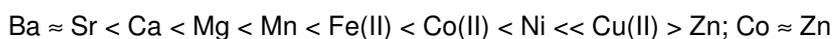
²² EDTA wird hier herangezogen, weil für diesen Liganden Komplexstabilitäten auch für eher "exotische" zwei- und dreiwertige Kationen bekannt sind, so für Hg²⁺ und zahlreiche Lanthanoiden und Actinoiden (Mizerski 1997).

auch auf metallorganische Ionen wie R_2Pb^{2+} (aus Folgeprodukten der Kraftstoffverbleiung) und R_2Pt^{2+} ²³ erstrecken; beide bilden extrem stabile und auch lipophile Komplexe (Elschenbroich & Salzer 1992), so dass hier $TF \approx 1$ durchaus wahrscheinlich ist. Organobleiverbindungen sind insbesondere für Säuglinge ausgeprägt neuro- und cerebrotoxisch (Kaim & Schwederski 1991; Williams & DaSilva 1996).

4.9 Korrelation zwischen Komplexstabilitäten und dem Transferfaktor

Arbeitshypothetisch folgt, dass die Komplexbildungskonstanten K_{diss} bzw. $-\log K_{diss}$ als **Kontrollparameter des TF in die Muttermilch** zu betrachten sind, da alle Proteine unabhängig von ihrem aktuellen Metallgehalt und biologischer Funktion aufgrund der Seitenketten der Aminosäurereste sowie der relativ offenen Raumstruktur dazu neigen, (weitere) Metallionen zu komplexieren.

Es ist nicht allgemein feststellbar, an welchen Donoratomen (Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff, evtl. Selen) die biologische Komplexbildung in erster Linie erfolgt. Allerdings zeigt der Vergleich einer Vielzahl zweiwertiger²⁴ Kationen, dass dies für die qualitative Reihenfolge der Bindungsstärke (= Komplexstabilität) wenig relevant ist; dieser Sachverhalt drückt sich in der so genannten IRVING-WILLIAMS-Reihe (Williams 1953; Irving & Williams 1953; Sigel & McCormack 1970) aus. Die Komplexstabilitäten steigen dabei meist (mit wenigen Permutationen) gemäß



an; andere zweiwertige Ionen wie Pb, Cd, Hg oder die Platinmetalle Pd und Pt fügen sich dann in die Stabilitätssequenz ein, wenn keine reinen Schwefelliganden verwendet werden ($Cd \leq Zn < Pb < Hg < Pd; Hg < Cu$, Position von Pt(II) noch unsicher). Die IRVING-WILLIAMS-Reihe gilt gleichartig für verschiedene Chelatliganden (Komplexliganden, die zwei oder mehr Bindungsstellen mit einem einzelnen Metallion ausbilden, und nur für solche), die Stabilitätskurve $[-\log K_{diss} \text{ für } \{(Ba^{2+} \dots Cu^{2+}) + L\}]$ steigt aber für Oxalat, Glycinat, Ethylendiamin, 2-Aminoethanthiol(-at), Glycolat, Thioglycolat etc. unterschiedlich steil an; die Ladung des Liganden ist dabei ohne wesentlichen Einfluss.

²³ R = CH₃; eine Biomethylierung von Platin wurde *in vitro* bereits nachgewiesen.

²⁴ Weil nur wenige einwertige Ionen [Li, Tl, die Münzmetalle Ag und Au und das extrazellulär und ohne organische {über C-Atome bindende} Liganden wie CO, Alkene oder Cyanid relativ instabile Cu(I)] Komplexe nennenswerter Stabilität bilden, ist die Aufstellung einer analogen Reihe kaum sinnvoll. Bei dreiwertigen Ionen (Al und dessen Homologe, Lanthanoiden, schwere Actinoiden, Cr, Fe, Ru, Co, Rh, Ir) ist die Datenlage schlechter, doch zeigt sich der Bindungsbeitrag der d-Elektronen in deren Stabilitätsreihe gemäß $Al \approx La, Ce(III) < V(III) < Cr(III) < Mn(III) < Fe(III) \ll Co(III)$ [nach Da Silva & Williams 2001; Mizerski 1997, ergänzt]. Actinoiden(III)Komplexe sind deutlich stabiler als ihre Lanthanoidenanaloga, was radiotoxikologisch relevant sein könnte. Dreiwertiges Fe und Co unterscheiden sich von den der Irving-Williams-Reihe zu Grunde liegenden zweiwertigen Formen durch weit höhere Komplexbildungskonstanten. Im Unterschied zu den zweiwertigen Metallionen spielen hier aber auch kinetische Effekte eine Rolle: Cr(III)-Komplexe sind zwar thermodynamisch recht wenig stabil, hydrolysieren aber sehr langsam. Dies sollte zwar nicht die TF, wohl aber die Zeitverschiebung bis zur Spiegelung erhöhter oder verminderter Metallzufuhr in der Milch beeinflussen. Bei zweiwertigen Ionen ist dieser Effekt nur für an Albumin gebundenes Nickel relevant. Im Falle von Fe, Co, Ir, Ce und einigen weiteren Elementen kann die Ligandenaustauschkinetik durch Redoxprozesse drastisch beschleunigt werden (reduktive Hydrolyse von Co(III)-Komplexen, Horvath & Stevenson 1992; Jordan 1994). Noch höher geladene Kationen liegen weitestgehend hydrolysiert (V(IV), Ti, Zr, Mn(IV)) vor oder sogar als Oxoanionen (V(V), Cr(VI), Mn(VI), fünf- bis siebenwertiges Tc und Re), für die diese Beschreibung nicht mehr gültig ist.

Daher wurde hier das Transferverhalten zahlreicher zweiwertiger Ionen in die Muttermilch mit Komplexstabilitäten dieser Vertreter der Irving-Williams-Reihe korreliert, um folgende Hypothese zu testen: nach Hydrolyse oder Abbau im Blut befindlicher Proteinkomplexe erfolgt ein passiver Transport vom Blutstrom in die Muttermilch²⁵ nach Koordination der Ionen an mithilfe von Korrelationsanalysen zu bestimmende Liganden.

Gemäß der LFER-Hypothese²⁶ (Hammett 1978) wurden **lineare** Korrelationen zwischen $\log TF$ und $-\log K_{\text{diss}}$ des Komplexes (1. Koordinationsstufe²⁷) hergestellt. Als Testliganden mit bekannter Komplexstabilität dienten Acetylacetonat (2,4-Pentandion-Anion, Modell für Zucker), Citrat (O-Donor, Trianion), Ethylendiamin und die Aminosäuren Glycin, EDTA sowie Cystein (jeweils als Anionen²⁸). Mangan verhält sich „anomal“ (s.u.), wahrscheinlich infolge Oxidation, und wurde daher in die lineare Regression mit Komplexstabilitäten nicht einbezogen; insgesamt umfasst sie Daten für 19 Mütter.

Bei nicht mit Iod supplementierten Müttern resultiert eine sehr gute Korrelation des mit der Komplexstabilität gemäß der Irving-Williams-Reihe ansteigenden TF mit den Testliganden. Im Gegensatz zum Übertritt in den Urin führt verstärkte Komplexbildung also nicht zur Retention eines Metalls im Blutstrom, sondern **befördert** dessen Übergang in die Muttermilch. Sr und Ba korrelieren gut, obgleich ihre Komplexe recht schwach sind. Konzentrationen potentieller Liganden im Blutstrom sind z.B.: Glycin ca. 400 μM , Glucose 7 mM, Carbonsäuren < 1 mM²⁹.

Es ist festzuhalten, dass der **Transfer von Mangan** (als einzigem Element) gegenüber den Erwartungen stark **gehemmt** ist ($TF \approx 10^{-3}$, gegenüber einem Rechenwert aus den Mn ignorierenden Regressionen nahe 0,025). Ohne Berücksichtigung der Zahlenwerte für Mn verbessern sich die

²⁵ Obwohl Muttermilch wie die aller anderen Säuger ein Mehrphasensystem darstellt und Lipophilieeffekte für die Überführung von unpolaren organischen Kontaminanten relevant sind, hat die „Weichheit“ von Metallionen (Pearson 1963; Smith 1990) für deren Transferverhalten in die Muttermilch keine dominierende Bedeutung. Obwohl die Ladung des biologisch aktiven Liganden und damit die seiner M(II)- und M'(III)-Komplexe nicht bekannt ist, spricht die von uns festgestellte ähnliche Größenordnung der TF-Werte für viele zwei- und dreiwertige Ionen (unbeschadet der Beziehung zu den Komplexstabilitäten) für einen relativ geringen Unterschied der Ladung der transportierten Komplexe, möglicherweise bedingt durch Bildung von $[M^{III}(\text{OH})L]^{q+}$ -Spezies, die die gleiche Ladung wie M(II)Komplexe aufweisen. Ausgeprägt saure M^{3+} (Fe, Ga) würden sich dann quantitativ wie M^{2+} -Ionen verhalten, was den Beobachtungen entspricht.

²⁶ LFER (Lineare Freie Energie)-Beziehungen (relationship): Diese Beziehungen entspringen der Beobachtung, dass zahlreiche energetisch definierte Parameter chemischer Verbindungen (Komplexe, Moleküle) wie Redoxpotential oder Aktivierungsenergiebarrieren bei analogen Reaktionen linear mit elektronischen Eigenschaften dieser Spezies korrelieren, welche ihrerseits u.a. aus den optischen Spektren ablesbar sind. Weiterhin bestehen analoge Korrelationen zwischen (den Logarithmen der) Komplexstabilitäten für gegebene Metallionenreihen (wie die der Irving-Williams-Serie) und Paare von Liganden. Dies lässt sich von bekannten Liganden wie EDTA, Glycinat, Citrat etc. auf unbekannte wie die Transportform der Metallionen in der Muttermilch erweitern: auch hier ist nach LFER eine log-lineare Beziehung der Bindungsstabilitäten, d.h. eine direkt lineare Relation zwischen den freien Bildungsenergien, zu erwarten. Dies ist der Hintergrund der Beziehungen zwischen $\log TF$ und $\log K_{\text{diss}}$ für gängige Liganden wie EDTA über ganze Serien von Metallionen: der Proportionalitätsfaktor stimmt für fast alle Probandinnen gut überein.

²⁷ d.h. 1 : 1-Komplexe, die außer für EDTA noch 3 – 4 Wassermoleküle als Koliganden enthalten. Bei den geringen hier in Rede stehenden Konzentrationen ist nicht mit weiter gehender Ligandenbeladung des Metallions zu rechnen, weshalb die Zahlenwerte für die erste Koordinationsstufe zum Ausgangspunkt der Regressionsrechnungen gewählt wurden.

²⁸ Glycin: Monoanion; EDTA: Tetraanion; Cystein: Dianion

²⁹ Die Sr- und Ba-Komplexe einfacher chelatbildender Aminosäuren oder Hydroxycarbonsäuren (Glycin, Äpfelsäure) haben Bildungskonstanten zwischen 5 und 10^3 , EDTA hingegen solche von ca. 10^8 .

Korrelationen daher beträchtlich. Dies deutet auf eine Retention von Mn³⁰ im mütterlichen Körper in wahrscheinlich höherer Oxidationsstufe als +II hin. Angesichts der bekannten ausgeprägten Neurotoxizität von Mangan für Säuglinge und Kleinkinder ist dies möglicherweise von biologischer Bedeutung, auch wenn gestillte Kinder formal als mangandefizient gelten müssen.

Beim pH (ca. 7,4) und Redoxpotential des Blutes sind (nach den Pourbaix-Diagrammen; vgl. Daten in Kaim & Schwederski 1993; Sigg & Stumm 1996, Kümmel & Papp 1990) Oxomangan(III) oder –(IV)-Species wie Mn₂O₃ thermodynamisch stabil. Mangan wird innerhalb des Blutstroms oder (weniger wahrscheinlich angesichts dort teilweise reduzierender Bedingungen) bereits im Darm oxidativ von den übrigen zwei- und dreiwertigen Ionen abgetrennt, woraus gegenüber der Theorie stark erniedrigte Transferfaktoren resultieren.

Für alle übrigen zweiwertigen Elemente einschließlich der thiophilen M²⁺-Ionen Cd, Pb und Cu ergibt sich eine sehr gute Korrelation. Iodsupplementation geht bei den Müttern E, G und T mit beträchtlich erhöhter Streuung der Regressionsdaten einher. Bei F wird die geringere Geradensteigung (bei ähnlich guter Korrelation) als Indiz für eine gewisse Stoffwechselabweichung (relativ zu den übrigen Probandinnen, jedoch nicht notwendigerweise im Sinne eines pathologischen Zustands) gedeutet.

³⁰ Dass die Mn(II)-Komplexe wie Ba und Sr zu labil zur Bildung von Komplexen und nachfolgendem Metalltransport in koordiniertem Zustand sind, zeigt sich daran, dass sich die TF dieser drei Elemente bei abnehmender Ligandenkonzentration in Folge fortschreitender Laktation nicht erkennbar ändern.

5 Bewertung der ermittelten Transferfaktoren

Aus unseren Messreihen ergibt sich, dass der Transferfaktor als **Kennzahl** – d.h. wenn der TF durch einen einzelnen Zahlenwert abgebildet wird, nicht durch eine Funktion, die Nichtlinearitäten oder/und den Einfluss anderer Elemente auf die Übertragung eines Elements in die Muttermilch berücksichtigen könnte – bestimmte Phänomene nicht wieder gibt:

- Die Konzentration eines Elements in der Muttermilch kann homöostatisch geregelt und damit in gewissen Grenzen unabhängig von der täglichen Aufnahme sein. In diesen Fällen spiegelt der TF die Variation der täglichen Aufnahme des Elements wider.
- Der TF kann mit fortschreitender Laktation absinken (Cu, Ni, Zn) oder ansteigen (Ga), beginnend bereits mit der Geburt.
- Ein Element kann die Aufnahme eines anderen verstärken (synergistischer Transport), hemmen (Antagonismus) oder
- zwischen beiden kann eine komplexere Beziehung bestehen (in diesem Falle treten Maxima oder Minima des TF als Funktion der Aufnahmemenge des zweiten Elements auf), d.h. es resultieren parabelähnliche Funktionen $TF_{(M)}$ vs. $Aufn_{(M, Mutter, oral)}$, z.B. in den Substanzpaaren Zn/Fe (parabolisch) oder Cd; Pb/Fe (Maximum in der Mitte der Funktion).
- Der TF gibt die zeitliche Verschiebung zwischen Extremereignissen der Aufnahme eines Elements und der daraus resultierenden Konzentration in der Muttermilch nicht wieder.

Für mindestens drei essentielle Elemente sowie mehrere weitere findet man dennoch einen relativ konstanten TF (Nb, Sr, P, Rb, Cs, I, Pb, Cr). Die genaue Kenntnis der Ursachen der Wechselwirkungen, die zu Variationen des TF führen, ist schwer zu erlangen, aber auch nicht erforderlich. Für eine formal strenge Behandlung des TF wäre es notwendig, für alle in die Berechnung des TF eines Elements eingehenden Zahlenwerte Auftragungen gegen die Aufnahmemengen aller übrigen Elemente zu erstellen; in praxi kann allerdings angenommen werden, dass Veränderungen bei nicht essentiellen Elementen im Ultraspurenbereich ohne Rückwirkungen bleiben (der TF von P oder Fe als Mengenelemente wird wahrscheinlich nicht messbar dadurch beeinflusst, ob die Mutter 2 oder 4 µg Uran/d verzehrt). Anders stellt sich die Situation dar, wenn die Aufnahmemenge von Elementen mit essentiellen Speziationsformen starken Schwankungen unterworfen ist (z.B. diejenige von Co); diese Schwankungen werden sich auf den Stoffwechsel und den Transport/Transfer anderer Elemente ähnlich auswirken wie eine planvolle Supplementation.

Diese Wechselwirkungen lassen sich empirisch ohne jede biochemische oder anderweitige Modellvorstellung erfassen und direkt handlungsleitend dafür einsetzen, die ungewollte Aufnahme von Elementen wie Pb, Cd etc. zu vermindern (s. 4.1.6-7). Neben der Supplementation essentieller Elemente wie Fe, Zn (oder I) kann nach dem oben Gesagten auch die nicht toxischer wie Sr treten.

Trotz der einleitend geschilderten Problematik meist physiologisch bedingter Vorgänge ist der in dieser Studie ermittelte ‚einfache‘ TF als Basisbezugsgröße für weiterführende Untersuchungen geeignet. Auch die in dieser Studie von den TF abgeleiteten modelltheoretischen Betrachtungen

über Transportprozesse, vorliegende Bindungsformen, homöostatische Regulierung, aber auch die zeitliche Verschiebung zwischen der Aufnahme und der Deposition spezifischer Elemente in der Milch sind als erste Anhaltspunkte zu deuten.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine ähnliche Studie, bei der die Elementaufnahme über die mütterliche Nahrung bei gleichzeitiger Quantifizierung dieser Elemente in der Muttermilch nicht recherchiert werden konnte und somit die vorliegende Studie, die aus einer relativ hohen Teilnehmeranzahl ($n=19$ bzw. $n=23$) und demzufolge hohen Probenanzahl (insgesamt 8805 Einzelproben) sowie hinsichtlich der Elementaufnahme über die Nahrung mittels Duplikatmethode resultiert, als grundlegender Ansatz gelten kann.

6 Zusammenfassung

Die ermittelten **Transferfaktoren** (TF) als Maß der tatsächlichen Exposition des Säuglings bedürfen einer Gewichtung durch radiotoxikologische sowie chemotoxikologische (Cd, Pb, Ba) Parameter (die TF der Elemente Ra, Re und Te konnten in dieser Studie nicht beurteilt werden). Theoretische Überlegungen zeigten, dass der Übertritt der Metallionen in die Frauenmilch in komplexierter Form erfolgt und dass folglich der TF mit der relativen Stabilität der Komplexe ansteigt (gemäß $Ba < Sr \approx Cd < Fe < Pb < Co < Ni < Cu > Zn; Zn > Ni$). Dies gilt sowohl für die (geometrischen) Mittelwerte als auch für die Maxima (Ausnahme Co). Die Supplementationsdaten (I, Fe [je $n=3$], Zn [$n=1$]) deuten an, dass der TF durch Querwechselwirkungen – nicht nur Antagonismen – verändert werden kann. Auch das Zeitverhalten der TF über die Laktation stimmt hiermit überein: Stark komplexbildende Metallionen gehen in die weniger donoraktive Milch länger stillender Mütter im geringeren Maße über, d.h. der TF für Ni, Cu und Zn sinkt mit der Zeit beträchtlich.

Trotz der geringen Anzahl I-, Fe- und Zn-**supplementierter Mütter** deuten die Ergebnisse im Falle einer vermehrten Zugabe von Fe auf einen erheblichen Abfall des TF für Fe hin. Dies legt den Schluss nahe, dass Fe bei vermehrter Zufuhr zu Fe(III) oxidiert, an Transferrin gebunden und an einem anderem Ort als der Brustdrüse deponiert bzw. verwendet wird. Für Zn lag nur ein Beispiel vor; aber auch hier fand man einen TF_{Zn} , der unter dem aus der für die Zn-supplementierte Mutter individuell errechneten Regressionen und der Stabilität von Zinkkomplexen berechneten lag. Hinsichtlich der TF_I fanden sich keine Unterschiede zu Müttern, die I supplementierten. Auch fand sich ein ähnlicher TF_I bei koreanischen Müttern, die eine ca. 8fach höhere I-Zufuhr aufwiesen (Moon und Kim 1999).

Modelltheoretische Betrachtungen ergaben Hinweise auf eine **homöostatische Regulation** (hier enggefasst verstanden als ein Prozess, bei dem die Metallzufuhr die Bildung des Transportproteins über Genexpression induziert) des Elementes Fe, bei dem die Bildung von Transferrin (nach Oxidation zu Fe(III)) mit nachfolgender Deposition des Fe in der Milz so effektiv verläuft, dass die Fe-Aufnahme des Kindes durch Fe-Supplementation der Mutter sogar verringert wird. Da auch Mn (als Mn(III)) sehr stabil an Transferrin bindet und die Fe-Versorgung auch der nicht supplementierten Mütter relativ gut war, ist der extrem niedrige TF von Mn (0,001) plausibel. Gleiches (kleiner TF) sollte unter dieser Annahme (ausgeprägte Induktion von Transferrin) auch für Plutonium (biologisch als Pu(IV) vorliegend) gelten. Weitere Hinweise auf eine homöostatische Regulation ergaben sich für Cu und Zn.

Die **zeitliche Verschiebung** zwischen der Aufnahme der Elemente mit der mütterlichen Nahrung und dem Übergang in die Muttermilch konnte mit Hilfe eines vereinfachten Flussmodells abgeschätzt werden, sofern die Resorptionsrate und Konzentration im Blut bekannt waren. Für die Elemente Rb, Cd und Ag sowie für Cu ergaben sich zeitliche Verschiebungen innerhalb unseres Zeithorizonts (1-20 d), für Fe nur dann, wenn kein Austausch mit der Häm-Eisenfraktion in Milz oder Knochenmark eintritt. Bei Cr (10-21 h) ist der Wert sehr unsicher, bei Sr (15 h) und Mn (7-9 h) so-

wie Ba (1,6 h) ist der Prozess zu schnell für unsere experimentell begründete Zeitauflösung. Für Pb konnte ein zeitlicher Übergang von ca. 26-50 d, für Zr ca. 100 d und für Nb \geq 250 d berechnet werden, während für Th eine Übergangszeit von - unter Vorbehalt – 22 a kalkuliert wurde (s. hierzu nähere Erläuterungen unter 4.4).

Modellierungen zeigten, dass eine **Vorhersage weiterer TF** analytisch bisher unzugänglicher Elemente möglich ist, wenn die Komplexbildungskonstanten bekannter Testliganden (z.B. EDTA für Hg^{2+} und die Lanthanoiden) und die daraus abgeleiteten Regressionsgleichungen erstellt werden. Voraussetzung hierfür ist die eindeutige Speziation der Elemente, d.h. wenn nicht Retention z.B. durch Oxidation und Bindung an Transferrin erfolgt.

Neben diesen obigen beschriebenen abgeleiteten Ergebnissen der TF wurden darüber hinaus die täglichen elementspezifischen **Zufuhrmengen der Säuglinge mit der Muttermilch** ermittelt. Die täglichen Zufuhrmengen der Elemente Cu, P, Zn und Cr der Säuglinge im Alter < 4 Monate entsprachen in etwa der empfohlenen täglichen Zufuhr nach Leitlinien der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE 2000). Bei den hier betrachteten Säuglingen zeigte sich in der Altersgruppe < 4 Monate für Fe im Vergleich zu der von der DGE empfohlenen Zufuhr eine um etwa 50% bzw. für Mo eine um 93% niedrigere Aufnahme. Bezüglich des Iods konnte eine um 50% höhere Zufuhr gegenüber der empfohlenen Zufuhr nach der DGE ermittelt werden. Für die Zufuhr von Mn lag für diese Altersgruppe kein Vergleichswert der DGE vor. Für die Säuglinge der Altersgruppe > 4 Monate war die Zufuhr der essentiellen Elemente Cu, Fe, I, P, Zn, Mn, Cr, Mo über die Muttermilch im Vergleich mit den Empfehlungswerten der DGE nicht mehr ausreichend. Die in der vorliegenden Studie ermittelten Zufuhrraten betragen 19% (Zn), 15-18% (Cu), 2% (Fe), 66% (I), 29% (P), < 1% (Mn), 20-40% (Cr) und < 3% (Mo) der von der DGE empfohlenen Tagesmenge.

7 Literatur

- Anderson RR (1992) Comparison of trace elements in milk of four species. In: Jensen R.G. (ed.) (1995) Handbook of Milk Composition. Academic Press San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto, 658.
- Anke M, Groppel B, Krause U, Arnhold W, Langer M (1991) Trace element intake (zinc, manganese, copper, molybdenum, iodine and nickel) of humans in Thuringia and Brandenburg of the FRG. *J. Trace Electrolytes Health Dis.* 5, 69-74.
- Anke M (1993) Die Bedeutung der Spurenelemente für die Fauna. In: Fiedler HJ, Rösler HJ (Hrsg.) Spurenelemente in der Umwelt. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart, 221 – 55.
- Bates CJ, Prentice A (1994) Breast Milk as a Source of Vitamins, Essential Minerals and Trace Elements. *Pharmac. Ther.* 62, 193-220.
- Beattie O (1992) Der eisige Schlaf. Das Schicksal der Franklin-Expedition. John Geiger Piper, Mchn.
- Becker K, Nöllke P, Hermann-Kunz E, Krause C, Schenker D, Schulz C (1996) Umwelt-Survey 1990/1991 Band III: Zufuhr von Elementen und Schadstoffen mit der Nahrung (Duplikate und diet History) in den alten Bundesländern, Umweltbundesamt.
- Bertram HP (1992) Spurenelemente: Analytik, ökotoxikologische und medizinisch-klinische Bedeutung. Urban & Schwarzenberg, München, Wien, Baltimore.
- BGBl I. (1988) Diätverordnung v. 25.08.1988, 1713.
- Binder H (Hrsg.) (2000) Lexikon der chemischen Elemente. S. Hirzel Verlag Stuttgart, Leipzig.
- Caroli S, Alimonti A, Coni F, Petrucci F, Senofonte O, Violante N (1994) The assessment of reference values for elements in human biological tissues and fluids: a systematic review. *Crit Rev Anal chem* 24, 363-398.
- Casey CE, Neville MC, Hambidge KM (1989) Studies in human lactation: Secretion of zinc, copper and manganese in human milk. *Am J Clin Nutr* 49, 773-785.
- Chatt J, Kan CT, Leigh GJ, Pickett CJ, Stanley DR (1980) Transition metal binding sites and ligand parameters. *J Chem Soc Dalton* 1980, 2032 – 38.
- Coni E, Falconieri P, Ferrante E, Semeraro P, Beccaloni E, Stacchini A, Caroli S (1990) Reference values for essential and toxic elements in human milk. *Ann. Ist. Super. Sanità*, 26, 119-130.
- Da Silva JJRF, Williams RJP (2001) The biological chemistry of the elements. The inorganic chemistry of life. Oxford, University Press.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (1984) Rückstände und Verunreinigungen in Frauenmilch. Verlag Chemie Weinheim.
- Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) (2000): Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr. <http://www.dge.de>
- Elmadfa I, Letzmann C (1988) Ernährung des Menschen. Stuttgart, Ulmer.
- Elschenbroich C, Salzer A (1992) Organometallchemie. Stuttgart, Teubner.
- Emsley J (Hrsg.) (2001) Nature's Building Blocks. A A-Z Guide to the Elements. Oxford University Press.
- Fecher P (1995) ICP-OES und ICP-MS. In: Matter L (Hrsg.) Lebensmittel- und Umweltanalytik mit der Spektroskopie, VCH-Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 63-110.
- Fecher P, Walther C, Sondermann J (1999) Bestimmung von Iod in diätetischen Lebensmitteln mit der ICP-Massenspektrometrie. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau* 95. Jahrgang, Heft 4, 133-142.
- Fränze S (2003a): Irving-Williams Series, Electrochemical Ligand Parameter and Description of Biochemical Features. In Vorbereitung

- Fränzele S, Fränzele O, Lieth H, Markert B (2003b) Geochemistry of Origins of Life: Essentiality Pattern of Elements, in Vorbereitung.
- Furia T (1972) First Stability Constants of Various Metal Chelates. CRC Handbook of Food Additives, Baton Rouge, CRC Press.
- Gregory EL, Foster K, Tyler H, Wiseman M (1990) The Dietary and Nutritional Survey of British Adults (London: The Stationery Office).
- Hammett LP (1978) Physikalische Organische Chemie. Weinheim, Verlag Chemie.
- Hecht H (2000) Die Bewertung von Inhaltsstoffen in geringen Mengen. In: Anke M, Müller R, Schäfer U (Hrsg.) (2000) Mineralstoffe. Mengen-, Spuren- und Ultraspurenelemente in der Prävention. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart 22-45.
- Horvath O, Stevenson, KL (1992) Charge Transfer Photochemistry of Coordination Compounds. Weinheim, VCH.
- Howell RR, Palma PA, West MS, Capioli RM, Seifert WE (1986) Trace elements in human milk: Differences over time and between population groups. In: Howell RR, Morriss FH, Pickering LK, (eds.) Human Milk in Infant Nutrition and Health, Thomas, Springfield, 28-50.
- Illing H, Anke M, Kräuter U (1993) Iron intake in Germany. In: Anke M, Meissner CF, Mills CF (eds.) Trace Elements in Man and Animals, TEMA 8.
- Irving H, Williams RJP (1953) The Stability Series for Complexes of Divalent Ions. J.Chem.Soc. 3192 – 3210.
- Iyengar GV, Subramanian KS, Woittiez JRW (1998) Element analysis of biological samples – principles and practice, CRC-Press, New York.
- Jordan RB (1994) Mechanismen anorganischer und metallorganischer Reaktionen. Stuttgart, Teubner.
- Kaim W, Schwederski B (1993) Bioanorganische Chemie. Stuttgart, Teubner.
- Kolditz L (1990) Anorganische Chemie. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- Kommission ‚Human-Biomonitoring‘ des Umweltbundesamtes (1996) Qualitätssicherung beim Human-Biomonitoring. Bundesgesundheitsblatt, 39/1996, 216-221.
- Krachler M, Shi Li F, Rossipal E, Irgolic J (1998) Changes in the Concentrations of Trace Elements in Human Milk during Lactation. Trace Elements Med. Biol., Vol. 12, 159-176.
- Krachler M, Prohaska T, Koellensperger G, Rossipal E, Stingeder G (2000) Concentrations of Selected Trace Elements in Human Milk and in Infant Formulas Determined by Magnetic Sector Field Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, Biological Trace Element Research 76, 97-112.
- Kümmel R, Papp S (1990) Umweltchemie – eine Einführung. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz (LMBG) § 35 (1998) Untersuchungen von Lebensmitteln. Bestimmung von Jod in diätetischen Lebensmitteln mit der ICP-MS. L 49.00-6, Amtliche Sammlung von Untersuchungsverfahren.
- Lever ABP (1990) Electrochemical parametrization of metal complex redox potentials, using the ruthenium(III)/ruthenium(II) couple to generate a ligand electrochemical series. Inorg Chem 29, 1271-85.
- Lippo H, Särkelä A (1995) Microwave dissolution method for the determination of heavy metals in biomonitors using GFAAS and flame AAS. Atomic Spectroscopy 16 (4), 154-157.
- Madeddu B, Rivoldini A (1996) Analysis of plant by ICP-OES and ICP-MS using an improved microwave oven acid digestion. Atomic Spectroscopy 17, Nr. 4, 148-154.
- Markert B (1987) Multielementanalytik, mögliche Darstellungsweisen von Meßdaten. Fresenius' Z.Anal. Chem., 327, 329-334.

- Markert B (1996) Instrumental Element and Multi-Element Analysis of Plant Samples – Methods and Applications. John Wiley & Sons, Chichester, New York.
- Marquart H, Schäfer SG (1994) Lehrbuch der Toxikologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin.
- Miller-Ihli NJ (1996) Trace element determinations in foods and biological samples using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and flame atomic absorption spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 44 Nr. 9, 2675-2679.
- Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (1995) National Food Survey 1994 (London: The Stationery Office).
- Minoia C, Sabbioni E, Apostoli P, Pietra R, Pozzoli L, Gallorini M, Nicolaou G, Alessio L, Capodaglio E (1990) Trace Elements Reference Values in Tissues from Inhabitants of the European Community. *The Science of the Total Environment* 95, 89-105.
- Mizerski W (1997) Tablice Chemiczne. Warszawa, Wydawnictwo Adamantan.
- Moon S, Kim J (1999) Iodine content of human milk and dietary iodine intake of Korean lactating mothers. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 50, 165-171.
- Moore MEC, Moran JR, Greene HL (1984) Zinc supplementation in lactating women: Evidence for mammary control of zinc secretion. *The Journal of Pediatrics*, 600-602.
- Müller M, Anke M, Thiel C, Hartmann E (1993) Zur Cadmiumaufnahme Erwachsener in den neuen Bundesländern, *Ernährungs-Umschau* 40, 6, 240-243.
- Oehlmann J, Markert B (1997) Humantoxikologie. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart.
- Pearson RG (1963) Hard and Soft Acids and Bases. *J.Amer.Chem.Soc.* 85, 3353 – 58.
- Perkin Elmer (1996) Software Handbuch-Elan 6000, Überlingen.
- Perrone L, Di Palma L, Di Toro R, Gialanella G, Moro R (1993) Trace Element Content of Human Milk During Lactation. *J Trace Elem Electrolytes Health Dis*, 7, 245-247.
- Rhoades CB (1996) Clean Laboratory Chemistry for the Microwave-assisted Digestion of Botanical Samples. *J. of Analytical Atomic Spectrometry* 11, 751-757.
- Rossipal E, Krachler M (1998) Pattern of trace elements in human milk during the course of lactation. *Nutrition Research*, 18, 1, 11-24.
- Sigel H, McCormick DB (1970) On the Discriminating Behavior of Metal Ions and Ligands with Regard to their Biological Significance. *Acc.Chem.Res.* 3, 201 – 208.
- Sigg L, Stumm W (1996) *Aquatische Chemie. Eine Einführung in die Chemie wässriger Lösungen und natürlicher Gewässer.* Stuttgart, Teubner.
- Smith DW (1990) Electronegativity in Two Dimensions. Reassessment and Resolution of the Pearson-Pauling Paradox. *J.Chem.Educ.* 67, 911 – 14.
- Umweltbundesamt (Hrg.) (1998) Umwelt-Survey 1998, Metalle in Blut und Urin. <http://www.umweltbundesamt.de/survey/us98/blut.htm>
- Wappelhorst O (1999) Charakterisierung atmosphärischer Deposition durch ein terrestrisches Biomonitoring in der Euroregion Neiße. PHD-Thesis, Internationales Hochschulinstitut Zittau.
- Wappelhorst O, Korhammer S, Leffler US, Markert B (2000) Ein Moosbiomonitoring zur Ermittlung atmosphärischer Elementeträger in die Euroregion Neiße (D, PL, CZ), UWSF-Z. *Umweltchemie. Ökotox.* 12 (4) 191-200.
- Wappelhorst O, Kühn I, Heidenreich H, Markert B (2000) Transfer von Elementen in die Muttermilch. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens StSch 4155 im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Neuherberg.
- Wappelhorst O, Kühn I, Heidenreich H, Markert B (2002) Transfer of Selected Elements From Food Into Human Milk. *Nutrition* 18:316-322.

- Weaver JC, Kamm ML, Dobson RL (1960) Excretion of Radioiodine in Human Milk. *J.A.M.A* 173:872-5.
- Williams RJP (1953) The stability of complexes. *J.Chem.Soc.* 1953, 3192 – 3210.
- Williams RJP, Da Silva JJRF (1996) *The natural selection of the chemical elements.* Oxford, Clarendon.
- Wolf RE, Grosser ZA (1997) Overview and Comparison of ICP-MS Methods for Environmental Analysis. *Atomic Spectroscopy* 18 Nr. 5, 145-151.
- World Health Organization (WHO) (1989) *Minor and Trace Elements in Breast Milk.* World Health Organization, Geneva.
- Wünschmann S, Oehlmann J, Delakowitz B, Markert B (2001) Untersuchungen zur Eignung wildlebender Wanderratten (*Rattus norvegicus*) als Indikatoren der Schwermetallbelastung, Teil 1. *UWSF-Z Umweltchem Ökotox* 13 (5), 259-265.
- Wünschmann S, Oehlmann J, Delakowitz B, Markert B (2002a) Untersuchungen zur Eignung wildlebender Wanderratten (*Rattus norvegicus*) als Indikatoren der Schwermetallbelastung, Teil 2. *UWSF-Z Umweltchem Ökotox* 14 (2), 96-103.
- Wünschmann S, Fränze S, Kühn I, Heidenreich H, Markert B (2002b) Verteilung chemischer Elemente in der Nahrung und Milch stillender Mütter. Teil I: Iod. *UWSF-Z Umweltchem Ökotox* 14 (4) 221-227.
- Ysart G, Miller P, Crews H, Robb P, Baxter M, De L'Argy C, Lofthouse S, Sargent C, Harrison N (1999) Dietary exposure estimates of 30 elements from the UK Total Diet Study. *Food and Contaminants*, 16, 9, 391-403.

8 Anhang

8.1 Elementgehalte Lebensmittel

(Projektphase I (1998-2000))

Tab. 37: Mittlere Elementaufnahme [$\mu\text{g/d}$] über die Nahrung der untersuchten Probandinnen A-U über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). RSD: Relative Standardabweichung

	Ag	Ce	Co	Cr	Ga	La	Mo	Nb	Ru	Sb	Th	Ti	U
A	2,0	3,6	40	49	23	1,9	66	1,2	0,6	1,6	0,6	1922	0,4
B	2,4	8,5	31	259	27	3,2	203	2,6	0,6	71,5	1,1	5188	1,2
C	1,2	4,3	9	65	29	1,1	121	1,6	1,1	1,9	0,4	5582	1,4
D	1,2	2,9	12	35	10	1,6	76	1,8	0,4	1,9	0,6	4476	0,8
E	1,4	7,3	24	112	28	4,2	143	2,5	2,0	2,2	0,7	5962	1,6
F	0,7	2,4	11	98	11	1,7	55	2,3	1,2	1,7	0,4	2520	1,0
G	1,6	3,7	27	62	15	2,8	121	2,8	0,9	2,2	0,7	5417	0,7
H	1,0	2,0	18	139	16	0,2	62	2,8	0,8	3,1	0,2	2674	1,0
I	3,6	3,8	12	140	16	2,2	115	2,0	0,7	3,7	1,2	4814	0,9
K	4,5	7,4	19	155	36	4,4	86	3,4	0,4	4,8	2,1	4125	3,6
L	3,3	7,5	28	474	30	4,4	237	6,0	1,1	3,6	1,8	5586	2,3
M	3,7	4,9	18	352	25	3,1	140	2,5	5,8	4,3	2,4	4849	4,1
N	1,8	2,9	7	42	11	1,6	50	2,3	1,5	4,1	0,5	3352	1,5
O	13,7	4,4	5	258	11	2,4	100	1,4	0,7	2,9	0,6	2968	1,7
P	36,9	4,7	10	228	17	2,7	68	2,2	1,2	3,7	0,4	2714	1,9
Q	4,9	4,4	19	253	17	2,5	129	2,2	3,1	2,7	1,3	7727	2,3
R	19,2	4,3	16	177	37	2,3	148	1,4	0,7	4,1	0,4	4010	2,4
S	106,0	8,5	40	250	37	4,4	135	2,0	1,0	8,9	0,8	5030	3,2
U	46,8	6,5	23	577	39	3,9	264	2,5	2,4	3,9	0,9	4647	2,5
Gesamt	4	5	17	147	21	2	109	2,2	1	4	0,7	4157	2
RSD [%]	588	43	59	97	46	51	58	45	112	415	81	34	61

(Projektphase II (2000-2002))

Mittlere Elementaufnahme [$\mu\text{g/d}$] der Elemente über die Nahrung der untersuchten Probandinnen A-Z über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). *: arithmetischer Mittelwert; RSD: Relative Standardabweichung; n.u.: nicht untersucht; ■: Supplementierte Mütter

	Au	Ba	Cd	Cs	Cu	Fe	I*	Mn	Ni	Pb	P	Rb	Sr	Y	Zn	Zr
A	3	845	15	9	1613	9025	137	4019	216	56	1036745	2933	1600	7	15388	187
B	5	787	20	n.u.	1764	16872	n.u.	4033	360	151	1523315	2808	n.u.	5	13925	8
D	2	747	10	8	774	5637	76	1922	149	205	551477	1185	686	5	4446	8
E	8	904	17	5	1476	22694	318	4430	243	32	1305573	2343	1686	7	12719	190
F	4	2183	14	16	1725	10731	145	4267	326	151	1423081	3219	2417	7	10160	62
G	2	492	13	n.u.	1195	8036	391	2736	203	30	1556611	2465	n.u.	2	10387	6
H	2	610	12	n.u.	774	5772	n.u.	2961	213	65	841865	1590	n.u.	4	6890	4
I	2	448	14	7	1105	7091	n.u.	2944	178	80	1213184	1704	1325	4	8014	3
J	5	952	17	11	1351	9786	184	3891	171	84	1390636	2920	1802	12	13365	28
K	4	834	17	n.u.	2282	109385	223	3766	253	212	1277408	1869	n.u.	6	11337	214
L	3	853	15	8	1579	15939	n.u.	7404	392	81	1752649	2120	1892	9	14022	28
M	5	669	14	8	1775	12702	n.u.	4506	420	90	1692047	2710	1945	8	16184	26
N	2	403	11	3	682	5636	n.u.	2366	125	70	716689	926	716	7	7530	9
O	3	345	10	7	757	10535	n.u.	1957	222	62	930221	1860	749	8	7775	11
P	5	496	15	5	892	8023	n.u.	2918	258	89	918964	1612	877	10	8805	15
Q	4	492	9	12	1098	10514	n.u.	2751	263	99	1957713	3285	1509	9	12854	23
R	7	626	14	15	1253	106053	190	2900	203	92	1462313	2744	1489	9	11091	15
T	2	808	19	10	1745	10887	242	6489	517	66	1191804	1702	2343	10	11244	24
U	5	789	26	8	2073	15595	n.u.	7779	627	72	1795775	3093	2681	13	15793	23
V	2	1110	10	11	1129	9737	153	2587	190	43	1295781	2646	1336	8	8917	11
W	3	718	13	6	936	7600	64	2455	263	37	962818	2106	1062	8	8204	15
Y	3	1130	16	12	1620	11830	159	4618	367	126	1527454	3450	2281	12	11601	19
Z	2	620	9	6	770	13686	138	1987	126	38	914710	1487	1368	8	7031	13
Gesamt	3	718	14	8	1233	12589	186	3491	250	77	1233105	2163	1455	7	10093	19
RSD [%]	53	50	28	41	36	220	47	46	49	64	30	32	40	38	31	318

(Projektphase I (1998-2000))

Tab. 38: Mittlere Elementaufnahme [$\mu\text{g}/\text{kg}$] über die Nahrung der untersuchten Probandinnen A-U über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). RSD: Relative Standardabweichung

	Ag	Ce	Co	Cr	Ga	La	Mo	Nb	Ru	Sb	Th	Ti	U
A	1,1	2,0	22	27	12	1,1	37	0,6	0,3	0,9	0,4	1063	0,2
B	0,7	2,6	9	78	8	1,0	61	0,8	0,2	21,5	0,3	1561	0,4
C	0,4	1,6	3	24	11	0,4	44	0,6	0,4	0,7	0,1	2044	0,5
D	0,6	1,6	7	19	6	0,9	41	1,0	0,2	1,0	0,3	2393	0,4
E	0,3	1,8	6	27	7	1,0	35	0,6	0,5	0,5	0,2	1457	0,4
F	0,4	1,4	7	59	7	1,0	33	1,4	0,7	1,0	0,2	1520	0,6
G	0,5	1,2	9	21	5	0,9	40	0,9	0,3	0,7	0,2	1813	0,2
H	0,5	1,0	9	69	8	0,1	31	1,4	0,4	1,6	0,1	1333	0,5
I	1,8	1,9	6	70	8	1,1	57	1,0	0,4	1,8	0,6	2405	0,4
K	1,2	2,0	5	43	10	1,2	24	0,9	0,1	1,3	0,6	1144	1,0
L	1,1	2,5	9	156	10	1,4	78	2,0	0,4	1,2	0,6	1835	0,8
M	0,9	1,2	4	85	6	0,7	34	0,6	1,4	1,0	0,6	1168	1,0
N	0,8	1,2	3	18	5	0,7	21	1,0	0,6	1,7	0,2	1417	0,6
O	6,6	2,1	2	123	6	1,1	48	0,7	0,4	1,4	0,3	1422	0,8
P	15,4	2,0	4	95	7	1,1	29	0,9	0,5	1,5	0,2	1133	0,8
Q	1,4	1,3	6	74	5	0,7	38	0,6	0,9	0,8	0,4	2264	0,7
R	4,9	1,1	4	45	10	0,6	38	0,3	0,2	1,1	0,1	1027	0,6
S	26,7	2,1	10	63	9	1,1	34	0,5	0,2	2,2	0,2	1266	0,8
U	10,0	1,4	5	123	8	0,8	56	0,5	0,5	0,8	0,2	989	0,5
Gesamt	1,5	1,6	6,0	52,5	7,4	0,8	38,9	0,8	0,4	1,3	0,3	1479,3	0,6
RSD [%]	436,2	28,1	70,7	73,6	28,5	36,5	34,9	47,4	77,1	349,5	61,8	30,3	39,5

(Projektphase II (2000-2002))

Mittlere Elementaufnahme [$\mu\text{g}/\text{kg}$] über die Nahrung der untersuchten Probandinnen A-Z über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). *: arithmetischer Mittelwert; RSD: Relative Standardabweichung; n.u.: nicht untersucht; ■: Supplementierte Mütter

	Au	Ba	Cd	Cs	Cu	Fe	I*	Mn	Ni	Pb	P	Rb	Sr	Y	Zn	Zr
A	0,8	253	4,6	2,6	482	2697	41	1201	65	17	309780	876	478	2	4592	55,9
B	1,4	237	6,2	n.u.	531	5077	n.u.	1214	108	45	458412	845	n.u.	1,4	4190	2,4
D	1,0	304	4,1	3,3	314	2292	30	782	60	83	224203	482	279	2,0	1807	3,2
E	1,8	194	3,5	1,0	317	4866	68	950	52	7	279916	502	361	1,5	2727	40,8
F	1,0	583	3,6	4,4	461	2868	38	1140	87	40	380301	860	646	1,8	2715	16,6
G	0,5	165	4,3	n.u.	400	2689	131	916	68	10	520894	825	n.u.	0,8	3476	2,1
H	1,1	304	6,1	n.u.	386	2877	n.u.	1476	106	32	419633	792	n.u.	1,8	3434	2,0
I	0,9	224	7,2	3,5	552	3543	n.u.	1471	89	40	606165	851	662	2,2	4004	1,4
J	1,1	214	3,7	2,4	303	2195	41	873	38	19	311906	655	404	2,8	2998	6,3
K	1,0	231	4,6	n.u.	633	30343	62	1045	70	59	354348	518	n.u.	1,8	3145	59,4
L	1,1	280	5,0	2,7	519	5236	n.u.	2432	129	27	575765	697	622	3,0	4606	9,3
M	1,3	161	3,5	2,0	428	3060	n.u.	1086	101	22	407616	653	469	2,0	3899	6,2
N	0,7	170	4,7	1,2	288	2383	n.u.	1001	53	30	303053	392	303	2,9	3184	3,9
O	1,5	165	4,8	3,3	362	5046	n.u.	938	106	30	445587	891	359	3,6	3724	5,1
P	2,2	207	6,1	2,2	372	3350	n.u.	1218	108	37	383726	673	366	4,3	3677	6,4
Q	1,2	144	2,6	3,4	322	3080	n.u.	806	77	29	573582	962	442	2,6	3766	6,8
R	2,3	217	5,0	5,2	435	36817	65	1007	70	32	507647	952	517	3,1	3850	5,1
T	0,6	255	6,1	3,0	550	3433	76	2046	163	21	375818	537	739	3,2	3546	7,4
U	1,1	168	5,6	1,8	441	3317	n.u.	1655	133	15	382017	658	570	2,8	3360	4,8
V	0,7	375	3,3	3,8	381	3288	50	874	64	14	437505	893	451	2,7	3011	3,6
W	1,4	377	6,9	3,3	491	3989	33	1289	138	19	505320	1105	557	4,3	4306	8,0
Y	1,1	362	5,1	3,8	518	3785	51	1477	117	40	488661	1104	730	3,8	3711	6,2
Z	0,8	271	4,1	2,7	337	5991	61	870	55	16	400377	651	599	3,3	3078	5,6
Gesamt	1,1	240	4,7	2,7	417	4188	57	1153	84	26	407380	729	484	2,4	3451	6,5
RSD [%]	41	40	25	38	22	200	47	35	37	67	24	26	28	38	18	247

8.2 Elementgehalte Muttermilch

(Projektphase I (1998-2000))

Tab. 39: Mittlere Elementkonzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$] in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen A-U über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). RSD: Relative Standardabweichung

	Ag	Ce	Co	Cr	Ga	La	Mo	Nb	Ru	Sb	Th	Ti	U
A	0,147	0,080	0,906	4	0,246	0,057	0,212	0,035	0,084	0,098	0,017	361	0,027
B	0,280	0,131	0,658	3	0,369	0,067	1,930	0,038	0,006	0,565	0,025	378	0,018
C	0,192	0,130	0,751	4	0,241	0,072	0,388	0,053	0,010	0,147	0,023	420	0,030
D	0,269	0,104	0,881	5	0,159	0,053	0,357	0,028	0,009	0,078	0,018	293	0,021
E	0,568	0,223	0,887	13	0,425	0,118	1,575	0,058	0,011	0,195	0,023	292	0,042
F	1,130	0,222	0,915	15	0,608	0,111	0,790	0,033	0,008	0,156	0,018	533	0,032
G	0,586	0,116	1,160	19	0,629	0,067	0,744	0,028	0,006	0,157	0,014	344	0,014
H	0,949	0,153	1,447	16	0,560	0,069	0,579	0,036	0,019	0,117	0,017	447	0,022
I	0,976	0,075	2,034	16	0,769	0,046	1,328	0,028	0,019	0,104	0,013	255	0,022
K	1,239	0,097	0,643	14	0,491	0,062	0,752	0,030	0,009	0,184	0,013	291	0,020
L	0,675	0,080	0,738	11	0,624	0,059	0,540	0,033	0,081	0,108	0,010	197	0,017
M	0,940	0,084	0,711	12	0,732	0,075	0,496	0,044	0,112	0,141	0,018	175	0,034
N	0,707	0,084	0,560	16	0,788	0,058	1,664	0,035	0,047	0,124	0,011	172	0,031
O	0,483	0,102	0,428	9	0,476	0,056	0,282	0,026	0,153	0,104	0,011	192	0,043
P	1,557	0,141	0,870	11	0,685	0,076	0,402	0,056	0,020	0,135	0,015	344	0,032
Q	1,027	0,194	0,541	10	0,555	0,111	0,665	0,039	0,081	0,110	0,025	233	0,036
R	1,294	0,152	0,548	9	0,523	0,086	0,485	0,038	0,021	0,188	0,014	223	0,102
S	1,064	0,107	0,625	5	0,418	0,076	0,450	0,033	0,211	0,076	0,021	218	0,043
U	0,649	0,071	0,590	9	0,487	0,048	0,345	0,037	0,050	0,064	0,019	272	0,020
Gesamt	0,65	0,12	0,78	9,61	0,48	0,07	0,61	0,04	0,03	0,13	0,02	282,10	0,03
RSD [%]	66	40	48	48	36	29	81	25	206	80	28	34	63

(Projektphase II (2000-2002))

Mittlere Elementkonzentration [$\mu\text{g}/\text{kg}$] in der Muttermilch der untersuchten Probandinnen A-Z über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). *: arithmetischer Mittelwert; RSD: Relative Standardabweichung; n.u.: nicht untersucht; : Supplementierte Mütter

	Au	Ba	Cd	Cs	Cu	Fe	I*	Mn	Ni	Pb	P	Rb	Sr	Y	Zn	Zr
A	0,2	4,1	0,7	3,0	385	254	73	5,3	11	1,3	153560	797	56	0,15	2268	4,1
B	0,3	3,6	0,2	n.u.	313	274	n.u.	4,1	9	5,4	129077	546	n.u.	0,16	1878	0,3
D	0,4	3,5	0,2	1,2	262	247	75	9,5	14	1,8	129139	374	33	0,08	670	1,7
E	0,1	9,7	0,1	1,6	347	269	217	5,8	13	2,0	162962	479	76	0,16	2466	1,5
F	0,1	14,0	0,1	4,4	98	97	94	4,1	13	3,0	98213	455	51	0,10	451	15,2
G	0,0	4,0	0,1	n.u.	90	171	252	4,6	18	3,2	89589	335	n.u.	0,14	281	0,6
H	0,0	4,5	0,3	n.u.	242	353	n.u.	4,4	11	3,6	111277	446	n.u.	0,23	704	0,6
I	0,1	6,8	0,2	1,8	78	177	n.u.	4,8	20	2,8	95458	326	29	0,22	433	0,5
J	0,1	7,2	0,1	1,6	91	153	52	3,5	11	1,8	120245	415	33	0,08	524	0,8
K	0,0	6,3	0,2	n.u.	300	459	97	3,4	17	6,1	143984	415	n.u.	0,14	696	2,2
L	0,1	5,7	0,3	2,0	249	167	n.u.	4,3	21	4,1	103230	365	56	0,34	650	1,3
M	0,3	9,7	0,3	1,6	330	493	n.u.	6,5	20	3,4	105518	373	66	0,27	879	1,2
N	0,0	7,7	0,6	1,2	162	582	n.u.	5,4	18	3,5	79898	366	40	0,29	399	0,9
O	0,1	1,5	0,3	2,1	86	215	n.u.	4,6	9	2,6	72662	435	21	0,17	219	1,2
P	0,1	8,5	0,3	1,4	165	314	n.u.	6,2	17	3,7	122230	456	41	0,33	479	2,7
Q	0,0	5,3	0,2	2,2	209	319	n.u.	5,4	17	2,8	117967	527	32	0,45	1194	1,1
R	0,1	5,7	0,4	4,2	113	272	40	3,7	9	1,8	109460	500	47	0,09	361	0,8
T	0,1	2,2	0,1	3,6	105	53	93	3,5	8	2,5	123557	292	27	0,07	690	2,5
U	0,1	6,5	0,3	2,2	177	202	n.u.	4,9	18	3,0	120513	378	40	0,36	1136	0,9
V	0,2	3,3	0,2	4,1	308	468	76	4,2	12	1,3	128152	635	32	0,07	1178	1,6
W	0,4	5,5	0,1	2,6	381	272	55	4,4	16	2,0	129112	710	42	0,10	2448	1,5
Y	0,4	3,4	0,2	1,7	286	192	121	4,4	13	1,4	117092	434	36	0,09	1411	2,0
Z	0,1	4,1	0,1	2,9	315	233	93	3,2	11	1,1	144844	413	54	0,08	2899	0,6
Gesamt	0,1	5,2	0,2	2,2	195	240	103	4,6	14	2,5	115611	442	41	0,2	816	1,3
RSD [%]	116	54	73	46	53	53	58	28	29	49	19	27	34	70	96	229

8.3 Ermittelte Transferfaktoren

(Projektphase I (1998-2000))

Tab. 40: Mittlere Element-Transferfaktoren [d/kg] der untersuchten Probandinnen A-U über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). RSD: Relative Standardabweichung

	Ag	Ce	Co	Cr	Ga	La	Mo	Nb	Ru	Sb	Th	Ti	U
A	0,072	0,022	0,023	0,082	0,011	0,030	0,003	0,030	0,143	0,063	0,027	0,188	0,062
B	0,114	0,015	0,021	0,013	0,014	0,021	0,010	0,014	0,010	0,008	0,022	0,073	0,014
C	0,164	0,030	0,084	0,065	0,008	0,063	0,003	0,033	0,009	0,076	0,065	0,075	0,021
D	0,230	0,035	0,071	0,147	0,015	0,032	0,005	0,016	0,021	0,040	0,032	0,065	0,026
E	0,405	0,031	0,037	0,116	0,015	0,028	0,011	0,023	0,006	0,088	0,033	0,049	0,027
F	1,671	0,093	0,081	0,155	0,054	0,066	0,014	0,015	0,006	0,091	0,045	0,211	0,033
G	0,360	0,031	0,043	0,307	0,043	0,024	0,006	0,010	0,006	0,071	0,019	0,063	0,020
H	0,944	0,076	0,080	0,115	0,036	0,298	0,009	0,013	0,024	0,037	0,068	0,167	0,023
I	0,269	0,019	0,170	0,112	0,047	0,021	0,011	0,014	0,025	0,029	0,011	0,052	0,025
K	0,277	0,013	0,034	0,093	0,014	0,014	0,009	0,009	0,023	0,038	0,006	0,071	0,006
L	0,204	0,011	0,027	0,024	0,020	0,013	0,002	0,005	0,073	0,030	0,006	0,035	0,007
M	0,253	0,017	0,038	0,035	0,029	0,024	0,004	0,017	0,019	0,033	0,008	0,036	0,008
N	0,389	0,029	0,085	0,370	0,069	0,036	0,033	0,015	0,031	0,030	0,021	0,051	0,021
O	0,035	0,023	0,084	0,036	0,041	0,024	0,003	0,018	0,206	0,036	0,019	0,065	0,026
P	0,042	0,030	0,086	0,050	0,040	0,029	0,006	0,026	0,018	0,036	0,033	0,127	0,017
Q	0,210	0,044	0,029	0,041	0,033	0,044	0,005	0,018	0,026	0,040	0,019	0,030	0,015
R	0,067	0,035	0,036	0,055	0,014	0,036	0,003	0,028	0,030	0,045	0,039	0,055	0,042
S	0,010	0,013	0,016	0,022	0,011	0,018	0,003	0,017	0,215	0,008	0,028	0,043	0,014
U	0,014	0,011	0,026	0,016	0,012	0,012	0,001	0,015	0,020	0,016	0,022	0,059	0,008
Gesamt	0,153	0,025	0,046	0,065	0,023	0,030	0,006	0,016	0,025	0,036	0,022	0,068	0,018
RSD [%]	253	82	80	60	74	204	127	43	237	64	76	76	72

(Projektphase II (2000-2002))

Mittlere Element-Transferfaktoren [d/kg] der untersuchten Probandinnen A-Z über den jeweiligen Untersuchungszeitraum (geometrische Mittelwerte). *: arithmetischer Mittelwert; RSD: Relative Standardabweichung; n.u.: nicht untersucht; ■: Supplementierte Mütter

	Au	Ba	Cd	Cs	Cu	Fe	I*	Mn	Ni	Pb	P	Rb	Sr	Y	Zn	Zr
A	0,055	0,005	0,044	0,336	0,239	0,028	0,600	0,001	0,051	0,024	0,148	0,272	0,035	0,024	0,147	0,022
B	0,054	0,005	0,011	n.u.	0,178	0,016	n.u.	0,001	0,026	0,036	0,085	0,195	n.u.	0,036	0,135	0,037
D	0,189	0,005	0,015	0,154	0,339	0,044	1,380	0,005	0,094	0,009	0,234	0,316	0,048	0,015	0,151	0,211
E	0,010	0,011	0,008	0,334	0,235	0,012	0,700	0,001	0,053	0,063	0,125	0,205	0,045	0,022	0,194	0,008
F	0,021	0,006	0,009	0,269	0,057	0,009	0,810	0,001	0,039	0,020	0,069	0,141	0,021	0,014	0,044	0,244
G	0,020	0,008	0,009	n.u.	0,076	0,021	0,640	0,002	0,089	0,106	0,058	0,136	n.u.	0,062	0,027	0,089
H	0,015	0,007	0,022	n.u.	0,312	0,061	n.u.	0,001	0,053	0,056	0,132	0,280	n.u.	0,063	0,102	0,150
I	0,029	0,015	0,011	0,258	0,069	0,025	n.u.	0,002	0,106	0,038	0,078	0,186	0,021	0,050	0,053	0,169
J	0,019	0,008	0,006	0,151	0,067	0,016	0,350	0,001	0,065	0,021	0,086	0,142	0,018	0,007	0,039	0,029
K	0,013	0,008	0,015	n.u.	0,132	0,004	0,470	0,001	0,068	0,029	0,113	0,222	n.u.	0,021	0,061	0,010
L	0,029	0,007	0,017	0,248	0,158	0,010	n.u.	0,001	0,055	0,051	0,059	0,172	0,030	0,037	0,046	0,046
M	0,052	0,015	0,018	0,193	0,186	0,039	n.u.	0,001	0,048	0,038	0,062	0,138	0,034	0,033	0,054	0,047
N	0,028	0,019	0,052	0,447	0,237	0,103	n.u.	0,002	0,143	0,049	0,111	0,396	0,055	0,041	0,053	0,092
O	0,042	0,004	0,027	0,303	0,114	0,020	n.u.	0,002	0,039	0,042	0,078	0,234	0,028	0,023	0,028	0,108
P	0,016	0,017	0,018	0,262	0,185	0,039	n.u.	0,002	0,065	0,042	0,133	0,283	0,047	0,032	0,054	0,176
Q	0,011	0,011	0,024	0,190	0,191	0,030	n.u.	0,002	0,064	0,028	0,060	0,160	0,021	0,051	0,093	0,046
R	0,017	0,009	0,027	0,280	0,090	0,003	0,220	0,001	0,045	0,020	0,075	0,182	0,031	0,010	0,033	0,058
T	0,043	0,003	0,004	0,378	0,060	0,005	0,410	0,001	0,016	0,037	0,104	0,172	0,011	0,007	0,061	0,106
U	0,018	0,008	0,012	0,264	0,085	0,013	n.u.	0,001	0,029	0,042	0,067	0,122	0,015	0,028	0,072	0,041
V	0,082	0,003	0,023	0,366	0,273	0,048	0,540	0,002	0,063	0,030	0,099	0,240	0,024	0,009	0,132	0,155
W	0,154	0,008	0,007	0,416	0,408	0,036	1,190	0,002	0,063	0,053	0,134	0,337	0,040	0,012	0,298	0,095
Y	0,104	0,003	0,011	0,144	0,176	0,016	0,770	0,001	0,036	0,011	0,077	0,126	0,016	0,008	0,122	0,102
Z	0,039	0,007	0,011	0,473	0,410	0,017	0,740	0,002	0,088	0,030	0,158	0,277	0,039	0,010	0,412	0,045
Gesamt	0,032	0,007	0,014	0,271	0,156	0,019	0,610	0,001	0,055	0,033	0,095	0,203	0,028	0,021	0,079	0,066
RSD [%]	140	57	82	35	70	95	20	67	51	60	43	36	44	80	119	98

8.4 Elementspezifische Konzentrationen in ausgewählten Lebensmitteln

Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$.

¹ Einheit in mg/kg; * Aufbewahrung, Lagerung und Verarbeitung der Lebensmittel bei jeder Probandin individuell. Aufgrund der Vielfalt der Lebensmittel ist eine exakte Sortentrennung nicht möglich (z.B. verschiedene Brotsorten, wie Weißbrot, Mehrkornbrot usw.)

Elemente	Ag	Au	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe
Früchte/Obst *										
Apfel	2 - 58 n=15	7 n=4	28 - 874 n=52	3 - 20 n=18	0,6 - 14 n=48	0,6 - 22 n=53	24 - 265 n=15	0,5 - 10 n=25	106 - 2590 n=53	5 ¹ n=9
Apfelsine			210 n=5	4 n=1	2 n=4	2 - 14 n=14	38 n=2	0,8 n=3	422 n=5	
Banane	21 n=7	6 n=1	76 - 2251 n=32	13 n=2	0,7 - 2 n=15	0,4 - 12 n=28	53 n=9	0,6 - 3 n=10	605 - 6375 n=33	2 - 21 ¹ n=25
Birne	12 n=3		540 n=2	12 n=1	0,6 - 8 n=12	1 - 17 n=13	61 n=6	4 n=1	621 n=2	4 ¹ n=2
Kiwi	16 n=1		1700 n=1		2 n=5	3 n=6	32 n=2	2 n=1	1200 n=1	
Mandarine			158 n=7		0,9 n=6	1 - 16 n=15	29 n=1	2 n=2	388 n=7	3 ¹ n=1
Weintraube	15 n=1	5 n=1	63 n=2		0,6 - 5 n=15	0,5 - 5 n=15	18 n=7	1 n=2	985 n=2	3 ¹ n=1
Rosinen	13 n=6	5 n=1	1036 n=3	5 n=3	57 n=6	16 n=6	158 n=5	18 n=3	4849 n=3	50 ¹ n=3
Gemüse und Gemüseprodukte *										
Gurke	6 n=3	9 n=2	15 - 277 n=18	4 - 28 n=7	2 n=8	0,4 - 18 n=14	486 n=4	0,9 n=5	159 - 711 n=18	6 ¹ n=3
Gurke (sauer)	12 n=7		165 - 481 n=10	3 - 10 n=10	1 - 11 n=10	2 - 7 n=10	26 - 146 n=9	1 n=7	252 - 638 n=10	2 - 7 ¹ n=10
Kartoffel (gekocht)	2 - 73 n=21	3 n=6	33 - 1377 n=52	6 - 38 n=52	0,6 - 44 n=29	0,9 - 16 n=33	25 - 1647 n=19	0,06 - 62 n=38	335 - 1765 n=52	1 - 8 ¹ n=48
Kohlrabi	6 n=7		207 n=6	6 n=6	0,9 - 5 n=11	2 - 87 n=12	379 n=3	0,8 n=3	270 n=6	6 ¹ n=3
Möhre	12 n=4		262 - 3869 n=18	3 - 78 n=16	0,9 - 26 n=15	0,5 - 97 n=16	48 n=6	0,6 - 4 n=12	128 - 852 n=18	4 ¹ n=7
Paprika	9 n=4		91 n=6	11 n=5	3 n=5	13 n=5	46 n=2	0,7 n=2	597 n=6	3 ¹ n=3
Petersilie	5 n=2		3269 n=1	18 n=1	63 n=4	14 n=4	61 n=2		3829 n=1	37 ¹ n=1
Pilze (zubereitet)	22 n=8		99 n=5	4 n=2	4 n=8	6,8 n=8	397 n=4	2 n=4	763 n=5	3 ¹ n=4

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg.

Elemente	Ag	Au	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe
Radieschen	23 n=3		347 n=4	14 n=4	6 n=7	11 n=7		0,9 n=3	254 n=4	6 ¹ n=4
Rote Rübe	142 n=1		3 n=3	24 n=3	3 n=2	5 n=3	82 n=2	1 n=1	760 n=3	4 ¹ n=3
Samen (Sonnenblume, Sesam ...)	4 n=3	7 n=1	682 n=2	82 n=2	7 n=8	1156 n=7		22 n=2	8110 n=2	28 ¹ n=2
Schnittlauch	19 n=5	52 n=2	331 n=4	21 n=5	9 n=6	14 n=6	74 n=2	1 n=5	1043 n=5	14 ¹ n=5
Spinat	2 n=3		854 n=6	58 n=6	75 n=3	16 n=3	222 n=3	2 n=5	671 n=6	16 ¹ n=6
Tomate	2 - 104 n=10		7 - 379 n=12	11 n=5	0,7 - 14 n=12	0,5 - 10 n=19	80 n=8	6 n=5	121 - 486 n=12	5 ¹ n=9
Getreide und Getreideprodukte *										
Brot	2 - 116 n=27	4 - 81 n=11	413 - 7482 n=36	8 - 95 n=36	2 - 9 n=50	0,8 - 49 n=49	28 - 3171 n=27	1 - 7 n=24	732 - 7149 n=36	6 - 49 ¹ n=36
Brötchen	2 - 12 n=15	6 n=4	280 - 2331 n=35	6 - 135 n=35	1 - 27 n=34	1 - 484 n=34	25 - 47943 n=25	1 - 9 n=23	641 - 5193 n=35	4 - 162 ¹ n=35
Corn-flakes	7 n=3	11 n=2	1000 n=9	21 n=7	3 n=5	3 n=5	182 n=4	0,8 - 5 n=10	146 - 2250 n=11	4 - 235 ¹ n=10
Hühnerlei *										
Ei (gekocht oder gebraten)	27 n=6	9 n=7	110 - 2194 n=33	4 - 14 n=11	0,6 - 7 n=17	1 - 27 n=34	28 - 2070 n=23	0,5 - 4 n=25	176 - 1935 n=33	2 - 36 ¹ n=32
Fisch und Fischerzeugnisse *										
Fisch (zubereitet)	2 - 40 n=13	9 n=2	14 - 625 n=23	3 - 27 n=18	0,6 - 29 n=23	2 - 21 n=23	39 - 2282 n=19	3 - 36 n=16	172 - 1263 n=23	2 - 39 ¹ n=18
Fleisch und Fleischerzeugnisse (auch Geflügel) *										
Fleisch (zubereitet)	2 - 204 n=30	4 - 44 n=20	10 - 1693 n=87	3 - 38 n=73	0,6 - 20 n=72	0,8 - 101 n=77	29 - 3376 n=58	1 - 105 n=70	231 - 4526 n=87	2 - 91 ¹ n=81
Wurst	2 - 190 n=45	4 - 32 n=24	13 - 1554 n=89	3 - 42 n=70	0,6 - 55 n=104	0,4 - 33 n=102	25 - 2179 n=90	2 - 19 n=58	186 - 5396 n=90	4 - 64 ¹ n=89
Milch und Milcherzeugnisse *										
Joghurt	38 n=16	17 n=4	35 - 793 n=82	3 - 16 n=19	0,6 - 18 n=36	0,8 - 79 n=66	24 - 350 n=36	2 - 6,2 n=74	31 - 778 n=82	4 ¹ n=5
Milch	20 n=6	5 n=1	45 - 930 n=33	4 n=2	0,8 n=2	1 - 3 n=22	32 n=5	2 - 7 n=25	12 - 451 n=33	3 ¹ n=2
Trinkschokolade	6 n=3	10 n=2	99 - 1798 n=26	3 - 20 n=10	0,7 - 7 n=16	3 - 85 n=16	60 n=10	3 - 44 n=16	173 - 4157 n=26	2 - 12 ¹ n=14

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg .

Elemente	Ag	Au	Ba	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe
Käse	60 n=18	4 - 28 n=10	65 - 1929 n=25	3 - 10 n=12	0,6 - 37 n=42	0,6 - 362 n=52	25 - 2991 n=25	0,7 - 4 n=18	233 - 1328 n=25	3 ¹ n=7
Quark (zubereitet)	11 n=13	5 n=2	42 - 1398 n=30	7 n=9	0,7 - 6 n=23	0,6 - 18 n=34	28 - 253 n=20	2 - 6 n=22	38 - 637 n=30	7 ¹ n=9
Getränke *										
Bier	8 n=8		19 - 1160 n=14	7 n=1	2 n=9	0,4 - 14 n=18	64 n=4	0,9 n=6	32 - 109 n=16	
Kaffee, Cappuccino	2 - 58 n=13	9 n=3	32 - 655 n=70	6 n=2	0,6 - 3 n=12	0,4 - 15 n=44	217 n=5	0,6 - 22 n=58	23 - 400 n=69	2 ¹ n=2
Saft	2 - 138 n=20	6 n=2	24 - 992 n=91	4 - 21 n=21	0,6 - 11 n=58	0,3 - 14 n=65	25 - 103 n=14	0,5 - 12 n=65	13 - 1341 n=93	2 - 46 ¹ n=12
Tee	2 - 31 n=21		9 - 711 n=153	12 n=9	0,6 - 4 n=39	0,3 - 10 n=94	161 n=9	0,5 - 9 n=44	17 - 911 n=152	5 ¹ n=2
Honig, Zucker- und Süßwaren *										
Honig	79 n=1	5 n=1	137 n=4	6 n=1	5 n=10	25 n=10	50 n=3		209 n=4	34 ¹ n=2
Marzipan					9 n=2	8 n=2	863 n=2			
Schokolade	2 - 465 n=35	4 - 59 n=20	287 - 4304 n=65	5 - 191 n=62	2 - 64 n=58	5 - 307 n=59	35 - 1490 n=57	5 - 57 n=53	0,9 - 33 ¹ n=65	4 - 110 ¹ n=64
Süßigkeiten	2 - 277 n=17	4 - 72 n=11	17 - 3827 n=51	3 - 88 n=42	1 - 50 n=27	3 - 221 n=25	61 - 5948 n=24	0,5 - 229 n=42	48 - 7655 n=51	2 - 68 ¹ n=40
Schalenfrüchte *										
Kokosnuss	7 n=2				1 n=2	42 ¹ n=2	63 n=2			
Mandeln	3 n=3				8 n=3	1910 n=3	44 n=1			
Nüsse	2 - 12 n=12	6 n=1	0,4 - 810 ¹ n=19	3 - 755 n=19	0,7 - 25 n=18	8 - 6234 n=20	32 - 196 n=10	0,5 - 625 n=14	1 - 12 ¹ n=19	5 - 37 ¹ n=18
Sonstiges *										
Kuchen	2 - 677 n=51	4 - 59 n=34	98 - 6697 n=194	3 - 238 n=177	0,6 - 28 n=156	0,7 - 97 n=159	25 - 923 n=123	0,6 - 65 n=159	67 - 5014 n=194	2 - 67 ¹ n=177
Müsli	96 n=7	8 n=2	61 - 3013 n=12	6 - 31 n=11	1 - 30 n=11	3 - 1158 n=12	25 - 359 n=10	34 n=9	323 - 4748 n=12	4 - 56 ¹ n=12
Pizza	36 n=4	8 n=2	346 - 1778 n=14	10 - 25 n=10	2 - 43 n=15	3 - 67 n=15	27 - 1048 n=15	2 - 9 n=13	744 - 1220 n=14	4 - 12 ¹ n=14

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg .

Elemente	Ga	I	La	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	Rb
Früchte/Obst *										
Apfel	0,5 - 24 n=54	5 n=2	0,2 - 6 n=52	150 - 8247 n=53	0,9 - 43 n=53	4 n=1	5 - 409 n=44	40 - 1380 ¹ n=53	5 - 798 n=52	95 - 2886 n=53
Apfelsine	1 - 10 n=14		0,1 - 3 n=14	225 n=5	1 - 59 n=13	8 n=1	51 n=5	174 ¹ n=5	20 n=5	478 n=5
Banane	0,6 - 73 n=30	177 n=1	0,1 - 0,9 n=29	733 - 9230 n=32	11 - 347 n=30		7 - 5594 n=30	181 - 375 ¹ n=33	3 - 418 n=32	116 - 9884 n=32
Birne	1 - 53 n=13		0,3 - 5 n=13	1117 n=2	3 - 54 n=13	6 n=2	40 n=2	246 ¹ n=2	52 n=2	625 n=2
Kiwi	83 n=6		5 n=6	1110 n=1	5 n=5		154 n=1	314 ¹ n=1	18 n=1	2280 n=1
Mandarine	2 - 25 n=15	5 n=1	0,1 - 1 n=13	227 n=7	1 - 15 n=13		35 n=7	165 ¹ n=7	15 n=7	442 n=7
Weintraube	0,8 - 4 n=15		0,4 - 3 n=15	859 n=2	3 - 111 n=15	13 n=2	25 n=2	204 ¹ n=2	10 n=2	1380 n=2
Rosinen	36 n=6		26 n=6	2613 n=3	44 n=6	6 n=5	242 n=3	775 ¹ n=3	146 n=3	4272 n=3
Gemüse und Gemüseprodukte *										
Gurke	0,8 - 9 n=14	25 n=3	0,1 - 1 n=14	59 - 1859 n=18	14 - 538 n=14	3 n=1	10 - 78 n=16	138 - 369 ¹ n=18	3 - 50 n=18	109 - 894 n=18
Gurke (sauer)	5 - 22 n=10	6 n=3	0,8 - 5 n=10	295 - 809 n=10	7 - 96 n=10		50 - 324 n=10	166 - 319 ¹ n=10	4 - 136 n=10	168 - 527 n=10
Kartoffel (gekocht)	0,9 - 14 n=34	5 - 395 n=24	0,1 - 22 n=32	810 - 2513 n=52	4 - 223 n=34	11 n=2	7 - 1576 n=52	227 - 612 ¹ n=51	4 - 316 n=52	167 - 2624 n=52
Kohlrabi	3 - 24 n=12	4 n=1	0,3 - 3 n=12	783 n=6	4 - 194 n=12	3 n=1	149 n=6	359 ¹ n=6	33 n=6	2493 n=6
Möhre	5 - 117 n=17	46 n=7	0,2 - 16 n=17	234 - 6067 n=18	3 - 62 n=17	3 n=2	18 - 112 n=17	126 - 540 ¹ n=18	6 - 100 n=18	74 - 5827 n=18
Paprika	2 n=5	5 n=2	1 n=5	537 - 1189 n=6	31 n=5		76 n=6	233 ¹ n=6	19 n=6	364 n=6
Petersilie	64 n=4		33 n=4	5068 n=1	585 n=4	8 n=4	211 n=1	608 ¹ n=1	831 n=1	1904 n=1
Pilze (zubereitet)	3 n=8	173 n=1	3 n=8	390 n=5	42 n=8	3 n=2	210 n=5	548 ¹ n=5	170 n=5	1319 n=5
Radieschen	14 n=7		3 n=7	780 n=4	117 n=7		356 n=4	245 ¹ n=4	75 n=4	510 n=4
Rote Rübe	125 n=3	53 n=2	2 n=2	1873 n=3	15 n=3		73 n=3	330 ¹ n=3	39 n=3	1466 n=3

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg.

Elemente	Ga	I	La	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	Rb
Samen (Sonnenblume, Sesam ...)	522 n=8		5 n=8	17721 n=2	955 n=8	4 n=1	2849 n=2	3390 ¹ n=2	39 n=2	8560 n=2
Schnittlauch	15 n=6		5 n=6	4181 n=5	557 n=6	6 n=2	225 n=5	463 ¹ n=5	141 n=5	439 n=5
Spinat	54 n=3	49 n=4	22 n=3	4722 n=6	63 n=3	10 n=2	215 n=6	371 ¹ n=6	53 n=6	789 n=6
Tomate	0,4 - 7 n=17	35 n=2	0,1 - 6 n=19	407 - 1323 n=12	30 - 106 n=19	13 n=2	8 - 80 n=11	94 - 368 ¹ n=12	7 - 369 n=12	199 - 912 n=12
Getreide und Getreideprodukte *										
Brot	1 - 227 n=51	8 - 317 n=12	0,2 - 13 n=51	3 - 30 ¹ n=36	13 - 1058 n=51	4 n=9	0,02 - 10 ¹ n=35	583 - 4960 ¹ n=35	14 - 129 n=36	594 - 2857 n=36
Brötchen	5 - 39 n=34	4 - 532 n=18	0,7 - 20 n=33	0,9 - 12 ¹ n=35	61 - 6378 n=34	16 n=9	0,02 - 24 ¹ n=31	630 - 2530 ¹ n=35	10 - 149 n=35	588 - 2951 n=35
Corn-flakes	9 n=7	150 n=4	0,9 n=7	0,1 - 14 ¹ n=11	170 n=7		38 - 324 n=11	353 - 1960 ¹ n=11	8 - 52 n=11	293 - 2341 n=11
Hühnerlei *										
Ei (gekocht oder gebraten)	0,5 - 101 n=33	25 - 790 n=16	0,1 - 4 n=28	28 - 6556 n=33	15 - 499 n=34	23 n=4	10 - 786 n=30	116 - 3280 ¹ n=33	5 - 437 n=33	639 - 2533 n=33
Fisch und Fischerzeugnisse *										
Fisch (zubereitet)	0,4 - 29 n=23	15 - 723 n=16	0,4 - 7 n=22	96 - 1710 n=23	3 - 275 n=22	9 n=6	12 - 166 n=17	322 - 2890 ¹ n=23	5 - 3993 n=23	178 - 3961 n=23
Fleisch und Fleischerzeugnisse (auch Geflügel) *										
Fleisch (zubereitet)	0,5 - 90 n=80	6 - 456 n=44	0,1 - 10 n=77	102 - 6746 n=87	7 - 478 n=80	2 - 28 n=10	12 - 5473 n=81	110 - 4070 ¹ n=87	4 - 697 n=87	0,6 - 14 ¹ n=87
Wurst	0,4 - 50 n=104	5 - 1439 n=36	0,2 - 13 n=102	19 - 6680 n=90	2 - 485 n=107	2 - 14 n=11	4 - 1644 n=85	466 - 6180 ¹ n=90	4 - 307 n=88	746 - 4684 n=90
Milch und Milcherzeugnisse *										
Joghurt	0,9 - 31 n=67	43 - 254 n=50	0,1 - 7 n=65	33 - 3744 n=82	2 - 126 n=67	4 n=5	3 - 295 n=78	438 - 1240 ¹ n=82	4 - 235 n=78	683 - 2929 n=82
Milch	2 - 9 n=23	7 - 282 n=16	0,1 - 0,5 n=17	17 - 898 n=33	21 - 141 n=23		24 - 143 n=32	646 - 1030 ¹ n=33	2 - 155 n=32	793 - 2924 n=33
Trinkschokolade	4 - 16 n=17	76 - 324 n=15	0,1 - 5 n=15	118 - 3878 n=26	14 - 53 n=17	3 n=2	67 - 1216 n=24	321 - 1950 ¹ n=26	2 - 499 n=26	1 - 14 ¹ n=26
Käse	2 - 76 n=53	233 n=8	0,2 - 11 n=52	102 - 679 n=25	26 - 220 n=53	6 n=6	21 - 441 n=24	1430 - 10600 ¹ n=24	6 - 779 n=25	191 - 1049 n=25
Quark (zubereitet)	2 - 16 n=35	158 n=7	0,2 - 3 n=33	13 - 1279 n=30	21 - 122 n=35	4 n=3	18 - 223 n=27	91 - 1840 ¹ n=30	6 - 575 n=30	139 - 2835 n=30

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg .

Elemente	Ga	I	La	Mn	Mo	Nb	Ni	P	Pb	Rb
Getränke *										
Bier	0,4 - 20 n=21	10 n=2	0,1 - 5 n=21	50 - 125 n=16	3 - 47 n=21		8 - 48 n=13	78 - 309 ¹ n=16	4 - 92 n=16	63 - 298 n=16
Kaffee, Cappuccino	1 - 6 n=44	5 - 119 n=34	0,1 - 1 n=41	75 - 940 n=70	1 - 23 n=41	5 n=2	10 - 718 n=59	15 - 761 ¹ n=70	3 - 73 n=69	32 - 2589 n=70
Saft	0,5 - 42 n=69	22 n=9	0,1 - 6 n=71	4 - 4076 n=93	0,9 - 59 n=66		5 - 345 n=76	7 - 714 ¹ n=90	2 - 764 n=92	1 - 3100 n=93
Tee	0,3 - 15 n=105	31 n=9	0,1 - 2 n=87	18 - 4192 n=153	0,8 - 14 n=45	6 n=2	3 - 1443 n=128	6 - 784 ¹ n=66	2 - 290 n=153	8 - 1381 n=153
Honig, Zucker- und Süßwaren *										
Honig	2 - 188 n=10		0,6 - 14 n=10	778 n=4	2 - 17 n=10	2 n=2	50 n=4	41 ¹ n=4	70 n=4	585 n=4
Marzipan	66 n=2		4 n=2		167 n=2	5 n=1				
Schokolade	4 - 133 n=59	12 - 364 n=38	0,3 - 89 n=59	0,7 - 39 ¹ n=65	30 - 688 n=59	2 - 30 n=31	278 - 2809 n=65	588 - 2850 ¹ n=65	5 - 1485 n=63	2 - 18 ¹ n=65
Süßigkeiten	5 - 89 n=26	5 - 420 n=17	0,3 - 21 n=26	0,02 - 37 ¹ n=51	3 - 172 n=24	9 n=8	29 - 1849 n=51	10 - 2630 ¹ n=49	10 - 829 n=50	0,01 - 16 ¹ n=51
Schalenfrüchte *										
Kokosnuss	6 n=2		2 n=2		86 n=2	15 n=2				
Mandeln	322 n=3		5 n=3		326 n=3	3 n=3				
Nüsse	7 - 318 n=20	182 n=7	0,4 - 15 n=18	4 - 40 ¹ n=17	11 - 4960 n=20	6 n=6	231 - 6777 n=18	1020 - 4310 ¹ n=19	16 - 609 n=19	0,7 - 33 ¹ n=19
Sonstiges *										
Kuchen	1 - 73 n=161	9 - 512 n=112	0,2 - 14 n=154	0,1 - 16 ¹ n=194	9 - 474 n=161	2 - 49 n=44	7 - 946 n=178	240 - 4220 ¹ n=194	6 - 2599 n=188	214 - 7545 n=194
Müsli	13 - 87 n=12	89 n=7	0,3 - 18 n=12	1 - 26 ¹ n=12	61 - 519 n=12	9 n=4	50 - 729 n=12	495 - 3000 ¹ n=12	14 - 178 n=12	0,8 - 12 ¹ n=12
Pizza	9 - 56 n=15	15 - 300 n=10	0,5 - 26 n=15	2 - 6 ¹ n=14	42 - 424 n=15	9 n=2	52 - 715 n=13	914 - 3250 ¹ n=14	8 - 253 n=14	757 - 2377 n=14

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg .

Elemente	Ru	Sb	Sr	Th	Ti	U	Y	Zn	Zr
Früchte/Obst *									
Apfel	0,8 - 3 n=10	2 - 117 n=10	19 - 1210 n=53	0,1 - 2 n=35	134 - 2081 n=54	0,4 - 0,8 n=14	0,4 - 9 n=52	0,3 - 13 ¹ n=53	1 - 58 n=41
Apfelsine	2 n=8		2611 n=3	0,2 n=8	374 - 1740 n=14	0,5 n=1	1 n=5	2 ¹ n=5	3 n=1
Banane	0,8 - 7 n=13	5 n=5	181 - 1215 n=29	0,1 - 1 n=13	554 - 1158 n=30	0,6 n=9	0,3 - 8 n=32	1 - 5 ¹ n=33	2 - 88 n=28
Birne	1 n=4	11 n=1	1460 n=1	0,4 n=8	258 - 1058 n=13	0,5 n=2	3 n=2	3 ¹ n=2	2 n=2
Kiwi	2 n=2		839 n=1	0,3 n=3	1094 n=6	0,7 n=1	0,5 n=1	1 ¹ n=1	29 n=1
Mandarine	2 n=7		2518 n=5	0,2 n=9	370 - 1263 n=15	0,4 n=2	2 n=6	1 ¹ n=7	20 n=3
Weintraube	2 n=2	27 n=1	482 n=2	0,1 - 0,6 n=13	362 - 2605 n=15	0,5 n=2	4 n=2	0,8 ¹ n=2	13 n=2
Rosinen	5 n=3	7 n=4	4521 n=3	7 n=6	4013 n=6	4 n=6	36 n=3	4 ¹ n=3	40 n=3
Gemüse und Gemüseprodukte *									
Gurke	3 n=3		54 - 3152 n=16	0,2 n=8	340 - 1424 n=14	1 n=3	0,1 - 9 n=18	1 - 3 ¹ n=18	1 - 45 n=14
Gurke (sauer)	2 n=5	3 n=3	461 - 1568 n=10	0,1 - 1 n=10	536 - 1554 n=10	0,4 - 3 n=10	2 - 10 n=10	1 - 10 ¹ n=10	6 n=9
Kartoffel (gekocht)	0,8 - 7 n=10	11 n=4	117 - 688 n=47	0,1 - 1 n=25	763 - 2300 n=34	0,4 - 1 n=22	0,3 - 13 n=52	2 - 5 ¹ n=52	2 - 72 n=41
Kohlrabi			3621 n=4	0,5 n=9	726 - 1954 n=12	0,5 n=3	2 n=6	2 ¹ n=6	10 n=5
Möhre	4 n=3	2 n=3	930 - 3877 n=13	0,1 - 3 n=13	436 - 1282 n=17	0,4 - 2 n=10	0,3 - 31 n=17	1 - 4 ¹ n=18	2 - 77 n=15
Paprika	3 n=2		1753 n=5	0,3 n=5	675 n=5	0,7 n=4	5 n=6	2 ¹ n=6	17 n=5
Petersilie	2 n=1	110 n=4		13 n=4	2991 n=4	2 n=4	22 n=1	9 ¹ n=1	46 n=1
Pilze (zubereitet)	2 n=4	8 n=3	211 n=4	1 n=8	2266 n=8	3 n=5	4 n=5	4 ¹ n=5	17 n=5
Radieschen	2 n=2	8 n=1	801 n=4	0,4 n=7	878 n=7	1 n=7	5 n=4	3 ¹ n=4	9 n=4
Rote Rübe	2 n=1		2275 n=2	0,4 n=3	2447 n=3	0,9 n=2	3 n=3	6 ¹ n=3	6 n=3

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg .

Elemente	Ru	Sb	Sr	Th	Ti	U	Y	Zn	Zr
Samen (Sonnenblume, Sesam ...)	5 n=2	3 n=4	1068 n=2	0,7 n=4	2380 n=8	0,7 n=5	5 n=2	26 ¹ n=2	13 n=2
Schnittlauch	18 n=2	4 n=5	1546 n=5	1 n=6	1989 n=6	5 n=6	32 n=5	7 ¹ n=5	45 n=5
Spinat	3 n=2	9 n=2	2305 n=5	7 n=3	2546 n=3	7 n=3	13 n=6	5 ¹ n=6	38 n=6
Tomate	7 n=4	3 n=3	114 - 3087 n=12	0,1 - 0,6 n=12	479 - 1269 n=19	1 n=7	0,8 - 12 n=12	0,7 - 5 ¹ n=12	11 n=8
Getreide und Getreideprodukte *									
Brot	2 n=8	2 - 1130 n=27	0,4 - 15 ¹ n=24	0,1 - 5 n=50	2 - 13 ¹ n=51	0,5 - 7 n=49	1 - 29 n=36	5 - 38 ¹ n=36	1 - 164 n=35
Brötchen	2 n=3	2 - 60 n=24	366 - 6820 n=23	0,1 - 6 n=31	2 - 9 ¹ n=34	0,4 - 10 n=32	1 - 17 n=34	5 - 26 ¹ n=35	2 - 130 n=28
Corn-flakes	2 n=1	2 n=2	99 - 1271 n=11	1 n=3	3317 n=7	1 n=4	2 - 28 n=11	2 - 18 ¹ n=11	3 - 34 n=10
Hühnerlei *									
Ei (gekocht oder gebraten)	2 n=6	2 n=6	163 - 2206 n=25	0,1 - 2 n=24	0,3 - 10 ¹ n=34	0,4 - 2 n=18	0,4 - 15 n=33	0,8 - 25 ¹ n=33	2 - 101 n=24
Fisch und Fischerzeugnisse *									
Fisch (zubereitet)	2 n=3	2 - 703 n=14	138 - 2041 n=16	0,1 - 2 n=20	2 - 10 ¹ n=23	0,5 - 13 n=20	0,7 - 17 n=23	3 - 19 ¹ n=23	1 - 175 n=22
Fleisch und Fleischerzeugnisse (auch Geflügel) *									
Fleisch (zubereitet)	0,9 - 5 n=11	2 - 204 n=32	48 - 1111 n=70	0,1 - 2 n=66	1 - 24 ¹ n=80	0,4 - 4 n=61	0,5 - 20 n=84	2 - 74 ¹ n=87	1 - 198 n=82
Wurst	0,8 - 9 n=30	2 - 65 n=58	94 - 2105 n=58	0,1 - 5 n=96	2 - 30 ¹ n=107	0,4 - 12 n=93	0,3 - 39 n=89	3 - 40 ¹ n=90	1 - 120 n=87
Milch und Milcherzeugnisse *									
Joghurt	0,8 - 6 n=23	2 n=8	170 - 818 n=74	0,1 - 3 n=54	1 - 5 ¹ n=66	0,4 - 3 n=50	0,3 - 37 n=77	3 - 8 ¹ n=82	1 - 247 n=70
Milch	2 n=9	4 n=2	195 - 701 n=25	0,1 - 0,3 n=12	2 - 6 ¹ n=23	0,7 n=9	0,1 - 12 n=32	3 - 6 ¹ n=33	2 - 50 n=25
Trinkschokolade	3 n=3	2 n=2	349 - 5310 n=16	0,1 - 2 n=16	2 - 4 ¹ n=17	0,7 n=4	0,2 - 54 n=25	2 - 48 ¹ n=26	2 - 103 n=17
Käse	1 - 8 n=17	2 - 418 n=24	305 - 7408 n=18	0,1 - 4 n=46	3 - 31 ¹ n=53	0,4 - 32 n=46	1 - 10 n=25	7 - 51 ¹ n=25	2 - 259 n=21
Quark (zubereitet)	2 - 6 n=12	2 n=3	268 - 1225 n=23	0,1 - 1 n=33	2 - 7 ¹ n=35	0,4 - 1 n=27	0,5 - 57 n=30	0,7 - 14 ¹ n=30	1 - 104 n=23

Forts. Tab. 41: Gemessene Elementgehalte (\bar{x}) in verschiedenen Lebensmitteln (Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenzen) in $\mu\text{g}/\text{kg}$. ¹ Einheit in mg/kg .

Elemente	Ru	Sb	Sr	Th	Ti	U	Y	Zn	Zr
Getränke *									
Bier	2 n=9	15 n=2	63 - 230 n=16	0,1 - 1 n=11	186 - 3913 n=21	0,4 - 4 n=14	1 - 11 n=16	0,2 - 1 ¹ n=16	1 - 15 n=13
Kaffee, Cappuccino	2 n=9	3 n=4	95 - 1203 n=63	0,1 - 1 n=31	71 - 2141 n=44	0,4 - 3 n=22	0,4 - 22 n=67	0,2 - 3 ¹ n=70	1 - 85 n=53
Saft	0,8 - 3 n=12	28 n=8	10 - 2361 n=83	0,1 - 1 n=49	12 - 842 n=71	0,4 - 3 n=46	0,4 - 72 n=90	0,1 - 5 ¹ n=93	1 - 106 n=67
Tee	0,8 - 3 n=16	2 - 8 n=10	34 - 1447 n=126	0,1 - 5 n=40	8 - 1105 n=99	0,4 - 2 n=35	0,1 - 7 n=148	0,06 - 7 ¹ n=153	1 - 68 n=84
Honig, Zucker- und Süßwaren *									
Honig	5 n=1	3 n=8		0,9 n=9	408 n=9	1 n=8	3 n=4	4 ¹ n=4	6 n=4
Marzipan		3 n=2		2 n=1	5784 n=2	0,6 n=2			
Schokolade	4 n=6	2 - 42 n=56	0,7 - 14 ¹ n=53	0,1 - 25 n=57	2 - 13 ¹ n=59	0,6 - 5 n=58	2 - 79 n=64	5 - 33 ¹ n=65	1 - 544 n=59
Süßigkeiten	3 n=5	2 - 44 n=26	0,1 - 10 ¹ n=47	0,1 - 11 n=25	0,5 - 247 n=26	0,4 - 9 n=27	2 - 100 n=48	0,4 - 22 ¹ n=51	1 - 242 n=43
Schalenfrüchte *									
Kokosnuss		3 n=1		3 n=2	3495 n=2	0,5 n=1			
Mandeln				0,9 n=3	17 ¹ n=3	2 n=3			
Nüsse	3 n=2	2 - 12 n=13	1 - 100 ¹ n=14	0,1 - 4 n=18	4 - 20 ¹ n=20	0,5 - 1 n=10	2 - 27 n=19	10 - 39 ¹ n=19	2 - 162 n=13
Sonstiges *									
Kuchen	0,9 - 5 n=14	2 - 29 n=118	0,2 - 12 ¹ n=159	0,1 - 4 n=126	0,3 - 12 ¹ n=161	0,4 - 6 n=144	0,7 - 53 n=178	1 - 24 ¹ n=194	1 - 412 n=170
Müsli	1 n=1	4 n=8	1033 n=9	0,2 - 8 n=10	3 - 9 ¹ n=12	0,4 - 8 n=10	0,9 - 30 n=12	4 - 23 ¹ n=12	1 - 54 n=11
Pizza	2 n=2	22 n=4	685 - 2735 n=13	0,1 - 1 n=14	3 - 17 ¹ n=15	0,4 - 6 n=14	2 - 14 n=14	9 - 36 ¹ n=14	6 - 125 n=13

8.5 Elementspezifische Blutkonzentrationen nach Minoia et al. 1990 und Emsley 2001

Tab. 42: Elementspezifische Blutkonzentrationen nach Minoia et al. (1990), Emsley* (2001) und Umweltbundesamt (1998, Umwelt-Survey)**. Alle Angaben in µg/kg (Dichte des Blutes: 1,06 kg/l).

	Blutkonzentration [µg/kg]
Au	0,04
U	0,09
Th	0,20
Cr	0,22
Ga	0,24
Ag	0,35
Co	0,37
Cd	0,41**
Mo	1,0*
Ba	1,1
La	1,4
Sb	2,0
Ni	2,2
Ce	2,8
Cs	2,8
Nb	5,0*
Mn	8,3
Zr	10*
Sr	30*
Pb	31**
Ti	50*
I	57
Cu	1.155
Rb	2.645
Zn	5.978
P	345.000*
Fe	(415.000)*
Ru	k.A.
Y	k.A.

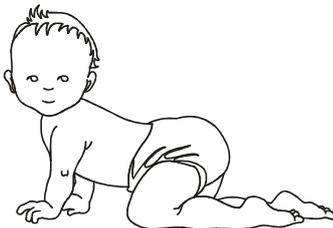
8.6 Handzettel zur Werbung von Probandinnen

Untersuchung von Muttermilch - Interessentinnen für Testreihe gesucht -

Wie Sie sicher wissen, ist die Zusammensetzung der Muttermilch auf die Bedürfnisse des Neugeborenen optimal abgestimmt. Sie bietet darüber hinaus Schutz gegen Infektionen. Ein Ersatz sollte deshalb, wo immer möglich, vermieden werden, da die Muttermilch die beste Ernährung für Babys ist.

Durch die allgemeine Belastung der Umwelt und damit auch der Nahrung der Mütter gelangen Schadstoffe in die Muttermilch.

Ziel einer Untersuchung am Internationalen Hochschulinstitut Zittau ist es, den Anteil ausgewählter chemischer Elemente (z.B. Cadmium, Blei) zu bestimmen, die aus der Nahrung der stillenden Mutter in die Muttermilch gelangen. Dafür werden Nahrungs- und Muttermilchproben über einen Zeitraum von mindestens 2 Wochen gesammelt und untersucht.



Im Rahmen dieser Arbeit werden stillende Mütter gesucht, die sich bereit erklären, Proben ihrer Nahrung und ihrer Muttermilch für einen Zeitraum von mindestens 2 Wochen untersuchen zu lassen. Wir würden uns freuen, wenn Sie sich zur Zusammenarbeit bereit erklären würden.

Kontaktadresse:
Dr. Olaf Wappelhorst
Lebensmittelchemiker
Internationales Hochschulinstitut Zittau
Arbeitsgruppe Humantoxikologie
Markt 23
02763 Zittau
Tel.: 03583/771523
Fax: 03583/771534
email: wappelh@ihi.htw-zittau.de

8.7 Fragebogen für die Probandinnen

FRAGEBOGEN**für die Teilnehmerinnen an der Untersuchung zum Elementtransfer aus der Nahrung in die Muttermilch.**

Bitte füllen Sie den Fragebogen sorgfältig aus, da die Angaben für die Auswertung der Ergebnisse wichtig sind. Selbstverständlich werde die Angaben streng vertraulich behandelt und nicht an Dritte weiter gegeben.

I. Angaben zur Person

Name: _____

Wohnort: _____

Wohnhaft seit: _____

Vorherige Wohnorte
Ort und Zeitraum: _____

Alter: _____

Größe: _____ cm

Gewicht: _____ kg

Ausgeübter Beruf: _____

Sind Sie an ihrem Arbeitsplatz Schadstoffen ausgesetzt und wenn ja welchen?
Nein Ja _____

II. Angaben zum Kind

Geburtsdatum des Kindes (Monat/Jahr): _____

Geburtsgewicht: _____ g

Größe: _____ cm

III. Angaben zu weiteren Kindern

Anzahl der weiteren Kinder: _____

1. Kind: Geburtsdatum (Monat/Jahr) _____ Stilldauer _____ Wochen

2. Kind: Geburtsdatum (Monat/Jahr) _____ Stilldauer _____ Wochen

3. Kind: Geburtsdatum (Monat/Jahr) _____ Stilldauer _____ Wochen

IV. Ernährungsgewohnheiten

Haben Sie während der Schwangerschaft oder nach der Geburt Ihres Kindes die Ernährungsgewohnheiten geändert? Zum Beispiel Durchführung einer Diät, Verzicht auf Fleisch, Süßigkeiten, ...

Ja Nein

wenn ja, wann und wie

Veränderten Sie durch das Abwiegen der Nahrung ihre Eßgewohnheiten?

Ja Nein

Wenn ja, wie?

Nehmen bzw. nahmen Sie zur Zeit der Untersuchung Medikamente ein?

Ja Nein

Wenn ja, welche

Rauchen Sie?

Ja Nein

Wenn ja, wieviel pro Tag und welche Marke?

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit.

8.8 Arbeitsphasen und Zeitplanung des Forschungsvorhabens

Die Durchführung des Projektes gliederte sich in 4 Arbeitsphasen (Tab. 43):

Phase A: Werbung und Auswahl der Probandinnen

Phase B: Probenahme

Phase C: Probenvorbereitung und instrumentelle Analytik des Elementes Iod

Phase D: Probenvorbereitung und instrumentelle Analytik der Elemente

Ba, Cd, Cs, Pb, Fe, Au, Cu, Mn, Ni, Rb, Re, Sr, Te, Y, Zn, Zr und P

Phase E: Datenauswertung von insgesamt 8805 Lebensmittel- und Muttermilchproben

Tab. 43: Grafische Übersicht über den zeitlichen Ablauf des Forschungsvorhabens.

