



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

SCHRIFTENREIHE REAKTORSICHERHEIT UND STRAHLENSCHUTZ

**ZUSAMMENSTELLUNG UND AUSWERTUNG VON
RADIOÖKOLOGISCHEN MESSDATEN ZUM TRANSFER
BODEN/PFLANZE UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER
LOKALEN VARIABILITÄT IN DEUTSCHLAND**

BMU - 2004-642



WIR STEuern UM AUF ERNEUERBARE ENERGIEN.

BMU – 2004-642

**Zusammenstellung und Auswertung von
radioökologischen Messdaten zum Transfer
Boden/Pflanze unter Berücksichtigung der lokalen
Variabilität in Deutschland**

Arne Cierjacks und Bert Albers

Newscope GbR

Haidwiesenweg 2

82205 Gilching

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 wurde durch newsope GbR, Haidwiesenweg 2, 82205 Gilching, erstellt.

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

Herausgeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Arbeitsgruppe RS I 1
Postfach 12 06 29
53048 Bonn

ISSN 1612-6386

Erscheinungsjahr: 2004

Gliederung	S.
Zusammenfassung	1
Summary	4
1. Zielsetzung	6
2. Erstellung der Datenbank	6
2.1. Erfassung der Literaturstellen	6
2.2. Kriterien für die Datenerfassung	7
2.3. Aufbau der Datenbank	10
2.3.1. Modul 1: Transferfaktoren-Datenbank	10
2.3.1.1. Block 1: Allgemeine Angaben	11
2.3.1.2. Block 2: Pflanzenparameter	12
2.3.1.3. Block 3: Transferfaktoren	14
2.3.1.4. Block 4: Bodenparameter	15
2.3.2. Modul 2: Einstufung der Datenquelle	16
2.3.3. Modul 3: Literatur-Datenbank	17
2.3.4. Abfrage statistischer Daten zum Transferfaktor nach Pflanzenart oder Pflanzeneinordnung	18
2.3.5. Komfortable Darstellung der Eingabefelder eines Datensatzes	19
3. Lokale Variabilität der Transferfaktoren	20
3.1. Räumliche Darstellung der Messpunkte mit dem Top50 Viewer	20
3.1.1. Suche und Anzeige von Datensätzen mit dem TOP50 Viewer	21
3.1.2. Darstellung der Messpunkte durch Overlays	24
3.1.3. Räumliche Verteilung der Messpunkte für Radiocäsium und Radiostrontium	24
3.2. Geostatistische Analysen	25
3.2.1. Räumliche Abhängigkeit der Radiocäsium-Transferfaktoren von „Gras“-Proben	26
3.2.2. Räumliche Abhängigkeit der Radiocäsium-Transferfaktoren bei „Getreide“-Proben	28
4. Statistische Auswertung	29
4.1. Radiocäsium	29
4.1.1. Statistische Kenngrößen	29
4.1.2. Cs-Transferfaktoren für Boden- und Pflanzenkategorien	30
4.1.3. Cs-Transferfaktoren nach Experimentklassen	32
4.1.4. Cs-Transferfaktoren nach unterschiedlichen Kontaminationstypen	33
4.1.5. Radiocäsium-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern	34
4.1.5.1. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Kaliumkonzentration in der Pflanze	34
4.1.5.2. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit vom verfügbaren Kaliumgehalt des Bodens	34
4.1.5.3. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens	35
4.1.5.4. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens	36
4.1.5.5. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit von der organischen Substanz des Bodens	36

4.2. Radiostrontium	37
4.2.1. Statistische Kenngrößen	37
4.2.2. Sr-Transferfaktoren für einzelne Boden- und Pflanzenkategorien	38
4.2.3. Sr-Transferfaktoren nach Experimentklassen	40
4.2.4. Sr-Transferfaktoren nach unterschiedlichen Kontaminationstypen	40
4.2.5. Sr-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern	41
4.2.5.1. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Calciumkonzentration in der Pflanze	41
4.2.5.2. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit vom verfügbaren Ca-Gehalt des Bodens	42
4.2.5.3. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens	42
4.2.5.4. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens	43
4.2.5.5. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit von der organischen Substanz des Bodens	44
4.3. Plutonium	45
4.3.1. Statistische Kenngrößen	45
4.3.2. Pu-Transferfaktoren für einzelne Boden- und Pflanzenkategorien	46
4.3.3. Pu-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern	46
4.4. Jod	47
4.4.1. Statistische Kenngrößen	47
4.4.2. J-129-Transferfaktoren für einzelne Boden- und Pflanzenkategorien	47
4.4.3. J-129-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern	48
5. Literatur	49
5.1. Zitierte Literatur	49
5.2. Datenquellen	50

Anhang

Zusammenfassung

- 1) Die Datenquellen zu Transferfaktoren Boden/Pflanze für Radiocäsium, Radiostrontium, Plutonium sowie Jod-129 in Deutschland wurden recherchiert und evaluiert. Über 100 Datenquellen mit relevanten Transferfaktoren wurden ermittelt, davon wurden 54 intensiv ausgewertet und nach Qualitätskriterien eingestuft.
- 2) Zur Auswertung der Datenquellen wurde eine Datenbank erstellt, die einen möglichst umfassenden Überblick über die Transferfaktoren, wichtige Begleitparameter sowie besondere Eigenheiten der Probennahme und Analyse gibt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Transferfaktoren auf die Größe $[\text{Bq kg}^{-1} \text{ Pflanzentrockenmasse} / \text{Bq kg}^{-1} \text{ Bodentrockenmasse}]$ normiert und möglichst auch Pflanzen- und Bodenparameter auf Standardeinheiten umgerechnet. Zudem wurden allgemeine Boden- und Pflanzenangaben vereinheitlicht, um eine umfangreiche statistische Auswertung zu ermöglichen. Damit sind die Daten auch für die Übernahme in ein Simulationsmodell vorbereitet.
- 3) In die Datenbank wurden insgesamt 4800 Datensätze eingetragen, die als Einzel- und aggregierte Werte über 7300 in Deutschland gezogene Proben repräsentieren. Über ein Abfragemodul kann der Mittelwert aller untersuchten Pflanzenarten und Pflanzeneinordnungen komfortabel abgefragt werden. Zusätzliche Informationen über das Versuchsdesign, Nuklidgehalte in den Pflanzen und Böden, wichtige Begleitparameter sowie detaillierte Bemerkungen lassen eine Einordnung jedes Datensatzes zu.
- 4) Über ein speziell konstruiertes Abfragesystem auf Grundlage der TOP50-Karten kann jeder Probenahmeort anhand des Hoch- und Rechtswertes – soweit diese aus den Datenquellen zu ermitteln waren – mit den zur Verfügung stehenden Daten abgerufen werden. Dies ermöglicht eine schnelle Betrachtung der in Frage kommenden Datensätze und eine Beurteilung der regionalen Variabilität für jeden erfassten Datenpunkt.
- 5) Transferfaktoren (für eine Vielzahl verschiedener Pflanzen- und Bodeneigenschaften) stehen für Radiocäsium in Westdeutschland fast flächendeckend zu Verfügung, während die Radiostrontium-Aufnahme nur lokal gemessen wurde. Plutonium und Jod sind in wenigen Freilandexperimenten untersucht worden, so dass die Transferfaktoren nur den einzelnen Bodenentnahmepunkten zugeordnet werden können.
- 6) Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR wurden von 1962 bis 1976 Pflanzen- und Bodenproben zur Überwachung der Umweltradioaktivität analysiert, Transferfaktoren Boden/Pflanze konnten aus diesen Daten aber nicht berechnet werden. Lediglich aus

Proben, die nach dem Chernobylunfall 1987/88 entnommen und dokumentiert wurden, wurde der Transferfaktor unter der Annahme berechnet, dass eine Oberflächenkontamination keinen signifikanten Einfluss auf die Nuklidkonzentration der Pflanze gehabt hat.

- 7) Mit einer geostatistischen Analyse von Radiocäsiumdaten konnte eine statistische räumliche Korrelation bis zu einem Radius von 98 km (Datensatz „Gras“) ermittelt werden, während für den Datensatz „Getreide“ keine Abhängigkeit nachgewiesen werden konnte. Aufgrund der Handhabungsunterschiede bei Probenahme und Analyse lassen sich diese Ergebnisse aber nicht verallgemeinern. Beim Datensatz „Gras“ könnte sich beispielsweise der regionale Probenahme-Aktionsradius der einzelnen Arbeitsgruppen widerspiegeln. Eindeutige Aussagen über die räumliche Variabilität lassen sich demzufolge nur machen, wenn die Probenahmestrategie vereinheitlicht und die analytische Variabilität minimiert wird.
- 8) Mit den Datensätzen insbesondere der Radiocäsium- und Radiostrontium-Transferfaktoren wurden umfangreiche statistische Auswertungen vorgenommen. Ziel war es, die Transferfaktoren verschiedener Kombinationen Pflanze/Boden mit denen aus internationalen Empfehlungen (NISB99, FRIS92, IAEA94) zu vergleichen und ihre Tauglichkeit als Input-Parameter für radioökologische Modelle zu verifizieren.
- 9) Bei Radiocäsium wurden insgesamt 3305 Datensätze untersucht. Die Transferfaktoren für die wichtigsten Kombinationen Pflanze/Boden stimmten weitgehend mit den internationalen Empfehlungen überein, insbesondere mit den von NISB99 zusammengestellten Mittelwerten aus der europäischen Datenbank der International Union of Radioecologists (IUR). Mit einer Ausnahme können die gemittelten Transferfaktoren für verschiedene Kombinationen Pflanze/Boden aus der vorliegenden Studie daher als abgesichert gelten. Auch konnte eindeutig festgestellt werden, dass der Radiocäsium-Transferfaktor abhängig vom verfügbaren Kaliumgehalt des Bodens ist. Hier gilt: Je niedriger die Kaliumverfügbarkeit ist, desto höher ist der Transferfaktor. Der gleiche (negative) Zusammenhang konnte auch zwischen dem pH-Wert des Bodens und der Radiocäsiumaufnahme bestimmt werden.
- 10) Die Radiostrontiumaufnahme der Pflanzen (N = 1009) reiht sich statistisch signifikant in der Reihenfolge Sand > Lehm > Ton. Der Transferfaktor auf Sandböden war etwa 4mal so hoch wie auf Tonböden. Wiederum konnte (mit Ausnahme der Kombination Getreide/Tonböden) eine weitgehende Übereinstimmung zwischen den gemittelten Werten aus dieser Studie und den Daten von NISB99 bzw. IAEA94 gefunden werden. Somit können auch die Daten für die Radiostrontium-Transferfaktoren als abgesichert gelten. Die Radiostrontiumaufnahme ist hochsignifikant abhängig von der organischen

Substanz im Boden – je niedriger der Kohlenstoffgehalt, desto höher war der Transferfaktor. Nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte eine mögliche, oftmals diskutierte Abhängigkeit vom verfügbaren Ca-Gehalt des Bodens.

- 11) Insgesamt vier Studien untersuchten die Plutoniumaufnahme vom Boden in die Pflanze, wobei nur insgesamt 62 Datensätze ausgewertet werden konnten. Für Gemüse konnte ein durchschnittlicher Transferfaktor in der Größenordnung der Empfehlung in IAEA94 ermittelt werden, für Getreide lag dieser jedoch um einen Faktor 100 höher als der empfohlene Wert. Es besteht ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen der organischen Substanz im Boden und der Plutoniumaufnahme, letztlich können alle Werte aufgrund der eingeschränkten Datengrundlage aber nicht als gesichert betrachtet werden.
- 12) Für Jod-129 wurden insgesamt 344 Datensätze eingetragen, die im Wesentlichen (330 Datensätze) aus zwei Veröffentlichungen stammen. Während für Getreide nur Einzelwerte vorlagen, konnten 318 Datensätze der Pflanzeneinordnung „Gras“ zugeordnet werden. Mit einem geometrischen Mittel von 0,015 (TF_{norm}) für die Kombination Gras/Sand wurde allerdings ein um den Faktor 4 höherer Transferfaktor als in IAEA94 gefunden. Die Aufnahme von J-129 ist positiv korreliert mit der organischen Substanz des Bodens und negativ mit dem pH-Wert.

Summary

- 1) Publications on soil-to-plant transfer factors (TFs) for radiocesium, radiostrontium, plutonium and iodine-129 in Germany were evaluated. Over 100 publications with relevant TFs were identified, whereof 54 were intensively analyzed and rated according to quality criteria.
- 2) A database was created which gives a comprehensive survey of the transfer factors, important related soil and plant parameters and peculiarities of sampling and analyses. For better comparability, TFs were standardized and expressed in units of [Bq kg⁻¹ plant dry matter / Bq kg⁻¹ soil dry matter]. To enable statistical analyses, soil and plant parameters were standardized, too. Standardization also prepares data as input for modelling.
- 3) The database contains 4800 records which represent singular and aggregated values of more than 7300 samples taken in Germany. Mean values of individual combinations radionuclide/crop can be queried easily using a special software module. Additional information about the experimental design, nuclide contents in plants and soil, important parameters and detailed remarks allow a classification of each record.
- 4) Using a dedicated query system and TOP50 maps, each sampling site can be accessed and displayed together with the corresponding data based on its Gauss-Krüger coordinate, provided the latter could be derived from the publication. Thus relevant records can be inspected quickly and the regional variability can be assessed.
- 5) Transfer factors for radiocesium are available for a variety of different plants and soils all over West Germany, whereas uptake of radiostrontium was measured only locally. As only a few field experiments exist for plutonium and iodine, transfer factors can only be related to the respective sampling sites.
- 6) In the former GDR plant and soil samples were analyzed from 1962 to 1976 to monitor the environmental radioactivity. Soil-to-plant transfer factors could not be calculated from these data. Transfer factors were derived only from samples which were taken after the Chernobyl accident in 1987/88, assuming that surface contamination did not significantly influence the radionuclide concentration of the plant.
- 7) A geostatistical analysis of the radiocesium data revealed a spatial correlation up to a radius of 98 km (records "grass"), whereas for the records "cereals" no spatial dependency could be proved. As sampling and analysis may differ in different publications, the results can not be generalized. For the records "grass", the spatial correlation possibly reflects the sampling radius of different work groups. Definite

conclusions about the spatial variability are only possible, if the sampling procedures and analytical methods are standardized.

- 8) Data sets, notably those of radiocesium and radiostrontium, were statistically analyzed in detail. The aim was to compare the TFs of different combinations soil/crop with international recommendations (NISB99, FRIB92, IAEA94) and to verify their suitability as input parameters for radioecological modelling.
- 9) For radiocesium 3305 records were investigated. Transfer factors for the most important combinations soil/crop agree with international recommendations to a large extent, especially with the values of NISB99 compiled in the European database of the International Union of Radioecologists (IUR). With one exception, the transfer factors for different soil/crop combinations of this study can be regarded as validated. It was also proved that the radiocesium transfer factor depends on the content of exchangeable potassium in soil: The lower the availability of potassium, the higher is the transfer factor. The same (negative) correlation was proved to exist for the pH value and the uptake of radiocesium.
- 10) Radiostrontium uptake of plants (N = 1009) significantly decreases in the sequence sand > loam > clay. The transfer factor on sand soils was approximately a factor of four higher than on clay soils. With the exception of cereals on clay soils, data agree to a large extent with those of NISB99 and IAEA94. Hence, the radiostrontium transfer factors of this study can be regarded as validated. Radiostrontium uptake depends most significantly on the content of organic matter in soil. The lower the carbon content, the higher is the transfer factor. A definite dependency on the calcium content, which is often discussed in literature, could not be proved.
- 11) Four studies investigated plutonium transfer from soil to plant. Only 62 records could be analyzed. For vegetables a mean transfer factor in the order of the value recommended in IAEA94 was determined. The mean transfer factor for cereals was a factor of 100 higher than the recommended data. For the records available a significant positive correlation between the organic matter content of soil and the plutonium uptake was found. As only few studies exist, transfer factors can not be regarded as validated.
- 12) For iodine-129 altogether 344 records exist, whereof most (330 data sets) come from two publications. Whereas only single values are available for cereals, 318 records belong to the category "grass". The geometric mean of 0.015 (standardized TF) for the combination grass/sand is four times as high as the one in IAEA94. Uptake of iodine-129 is positively correlated with organic matter content of soil and negatively correlated with pH value.

1. Zielsetzung

Bei der prognostischen Ermittlung der Strahlenexposition, wie z.B. nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung (alt), wird der Boden-Pflanze-Transfer von Radionukliden mittels sogenannter Transferfaktoren quantifiziert (BMI_90). Der Fokus des Projekts lag auf der Erstellung einer Datenbank für radioökologische Messdaten zum Transfer Boden/Pflanze in Deutschland seit 1950. Berücksichtigt wurden die Nuklide Cs-137, Cs-134, Sr-85, Sr-89, Sr-90, J-129 sowie Pu-238 und Pu-239,240.

Dabei sollte

- (a) ein möglichst umfassender Überblick über alle Messergebnisse gegeben,
- (b) Pflanzen- und Bodenparameter, soweit vorhanden, mit erfasst,
- (c) geographische Angaben recherchiert und in Koordinaten angegeben,
- (d) eine weitgehende Standardisierung der Datenbankeinträge (gegebenenfalls Umrechnungen) vorgenommen,
- (e) eine problemlose elektronische Weiterverarbeitung gewährleistet und
- (f) die grundsätzliche Eignung (Qualität) der Datenquelle evaluiert werden.

Zudem sollten die Daten im Hinblick auf ihre regionale Variabilität dargestellt und ausgewertet sowie die bestimmenden Einflussfaktoren für die Radionuklid-Aufnahme durch Pflanzen untersucht werden. Abschließend wurden Transferfaktoren für unterschiedliche Pflanzen- und Bodenkombinationen anhand der vorliegenden Datenbank analysiert und mit anderen Veröffentlichungen verglichen.

2. Erstellung der Datenbank

2.1. Erfassung der Literaturstellen

Grundlage der vorliegenden Datenbank ist eine Evaluierung der in Deutschland vorliegenden Untersuchungen von Transferfaktoren Boden/Pflanze für nicht-natürliche Radionuklide. Dazu erfolgte eine Durchsicht der einschlägigen Zeitschriften und Datenbanken nach relevanten Veröffentlichungen zu dem Thema, deren Fundstellen in das Literaturmodul der Datenbank übernommen wurden. Die Überprüfung der Vollständigkeit erfolgte nach dem „Go back“-Prinzip, d.h. Zitathinweise in den Veröffentlichungen wurden auf relevante Daten evaluiert und gegebenenfalls zur Vervollständigung in das Literaturmodul übernommen.

Alle relevanten Institute bzw. deren Rechtsnachfolger sowie Landesbehörden wurden mit der Bitte um Auflistung bzw. Zusendung der vorhandenen Dokumentationen (hier vor allem sogenannte „graue“ Veröffentlichungen wie Proceedings, Forschungsreports, Diplom- und Doktorarbeiten usw.) angeschrieben und/oder mündlich angesprochen. Es wurde um eine

Stellungnahme gebeten, ob entsprechende Daten vorhanden sind und ob diese für die Studie zur Verfügung gestellt werden können.

Bei den einschlägigen wissenschaftlichen Einrichtungen, die sich in der Bundesrepublik Deutschland mit dem Thema Strahlenschutz bzw. Radioökologie befassten, war die Kooperation mit einer Ausnahme so gut, dass davon ausgegangen wird, dass der überwiegende Teil der Literatur vorlag und in die Datenbank eingearbeitet wurde. Teilweise wurden auch nicht veröffentlichte Daten und Messreihen zur Verfügung gestellt.

Die Reaktion der angeschriebenen Bundesländerbehörden war sehr unterschiedlich, teilweise wurden schriftliche Absagen erteilt, obwohl über andere Quellen bekannt war, dass Messungen durchgeführt wurden. Sofern diese öffentlich zugänglich waren, wurden diese ebenfalls in die Datenbank aufgenommen. Eine wichtige Datenquelle waren dabei Untersuchungen im Zusammenhang mit Standortgutachten geplanter oder existierender kerntechnischer Anlagen, die – soweit zugänglich gemacht – in die Datenbank eingearbeitet wurden. Trotzdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass gerade aus diesen Standortgutachten weitere, nicht allgemein zugängliche Daten vorhanden sind, die noch nicht in der Datenbank erfasst werden konnten.

Daten aus der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik wurden ausschließlich von staatlichen Organen erhoben und in Berichten veröffentlicht. Forschungsergebnisse von Universitäten und sonstigen wissenschaftlichen Einrichtungen sind nicht bekannt. Mit der Gründung der Staatlichen Zentrale für Strahlenschutz 1962 wurde in der DDR die systematische Untersuchung von Boden und Pflanzen – hauptsächlich landwirtschaftlicher Nutzpflanzen – aufgenommen. Zunächst wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, das aber im Laufe der Jahre immer weiter zusammengestrichen wurde. Dokumentiert wurden die Ergebnisse dieser Messreihen in den Reports der „Staatlichen Zentrale für Strahlenschutz“, ab 1975 „Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz“. Mit Ausnahme der Messdaten von 1968 sowie 1973 und 1974 liegen die Ergebnisse von 1962 bis einschließlich 1976 vor. Danach wurde das Messprogramm bis 1986 ausgesetzt und erst nach dem Reaktorunfall in Chernobyl in veränderter Form wieder aufgenommen.

2.2. Kriterien für die Datenerfassung

Die publizierten Werte wurden auf ihre Eignung für die Erfassung in der Datenbank geprüft und vorbereitet. Daten wurden nur aufgenommen, wenn sie folgende Kriterien erfüllten:

(a) **Es muss sich eindeutig um Transferfaktoren Boden/Pflanze handeln.**

Der Terminus „Transferfaktor Boden/Pflanze“ beschreibt den Transfer von Radionukliden vom Boden über die Wurzel in die Pflanze. D.h. Werte, bei denen ein signifikanter Einfluss

einer Oberflächenkontamination,

einer Resuspension oder

einer Translokation

wahrscheinlich war, sollten nicht in die Datenbank aufgenommen werden. Allerdings fehlen hierzu in den allermeisten Fällen konkrete Angaben; im Zweifelsfall wurden die Daten mit aufgenommen. In Ausnahmefällen wurde der Transferfaktor auch über vorliegende Nuklidkonzentrationen im Boden bzw. in Pflanzen neu berechnet; dies ist dann ausdrücklich vermerkt.

(b) **Eine Umrechnung des Transferfaktors bezogen auf Trockensubstanz Boden bzw. Pflanze sollte möglich sein.**

Nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung (alt) wird der Transferfaktor als Verhältnis der spezifischen Aktivität der Pflanzenfrischmasse in Bq/kg und der spezifischen Aktivität der Bodentrockenmasse in Bq/kg ausgedrückt. Allerdings hat sich inzwischen bei den internationalen Zusammenstellungen von Transferfaktoren (FRIS92, IAEA94, NISB99) eine Umrechnung auf den Trockensubstanzgehalt der Pflanze bewährt.

Daher wurden, um einen Vergleich mit internationalen Zahlen zu gewährleisten, alle Daten relativ auf Trockensubstanz Boden bzw. Pflanze eingetragen bzw., wenn notwendig, umgerechnet. Dies setzt in der Regel voraus, dass die Werte der Boden- und Pflanzenkonzentrationen dokumentiert worden sind. Um eine ausreichend breite Datengrundlage zu bekommen, musste aber teilweise mit allgemeinen Umrechnungsfaktoren zur Abschätzung des Verhältnisses von Feucht- und Trockengewicht gearbeitet werden. In Anhang 2 sind die verwendeten Umrechnungsfaktoren in % Trockensubstanz angegeben.

(c) **Eine geographische Angabe des Probenahmeortes sollte möglichst dokumentiert sein.**

Gemäß den Projektvorgaben sollte eine Abschätzung der lokalen Variabilität der Transferfaktoren vorgenommen werden. Daher wurden im Wesentlichen Daten aufgenommen, bei denen eine Ortsbezeichnung der Probenahmestelle angegeben

war. Diese wurde – soweit eindeutig und möglich – in Rechts- und Hochwert nach Gauß-Krüger mittels der TOP50-Karten der jeweiligen Landesvermessungsämter umgerechnet.

(d) Die Datenberechnung und die Darstellung der Daten muss eindeutig und nachvollziehbar sein.

Die Daten in der Literaturquelle sollten möglichst in Tabellen oder eindeutigen Graphiken dokumentiert sein. Vielfach erfolgte auch ein Kontakt mit den Autoren mit der Bitte um Hilfestellung bzw. Bereitstellung der Daten. Daten mit eindeutigen Berechnungsfehlern bzw. nicht nachvollziehbaren Rechenwegen konnten nicht berücksichtigt werden.

(e) Die Datenquelle muss als Primärliteratur Originalmessdaten enthalten.

Es wurden nur Daten aus Erstveröffentlichungen übernommen, denen ein Experiment zugrunde lag. In Sekundärliteratur zitierte Werte mit einer unsicheren Datengrundlage wurden nicht berücksichtigt. Mehrmals veröffentlichte Messergebnisse wurden nach sorgfältiger Recherche nur einmal aufgenommen. Im Zweifelsfall wurde aus den meist umfangreichen Berichten der Arbeitsgruppen zitiert.

Knapp 400 relevante Literaturstellen wurden in eine Literaturdatenbank eingetragen, davon sind insgesamt etwa 250 Literaturstellen auf Transferfaktoren Boden/Pflanze durchgesehen worden. 105 Quellen enthielten Transferdaten (siehe Literaturdatenbank). Gemäß den oben genannten Kriterien wurden aus 54 Veröffentlichungen (siehe Literaturverzeichnis) Werte in die Datenbank übernommen. Die Transferfaktoren-Datenbank enthält ca. 4800 Einzel- bzw. gemittelte Datenreihen, die ca. 7400 Einzelergebnisse repräsentieren.

Aus der ehemaligen DDR liegen Boden- und Pflanzendaten aus den Jahren 1962 bis 1976 und ab 1986 vor. Während 1962 noch jeweils über 100 Boden- und Pflanzenproben auf Sr-90 analysiert wurden (REIS65), wurden im Untersuchungsjahr 1976 insgesamt nur noch 4 Grasmischproben im gesamten Territorium der DDR auf Sr-90 und Cs-137 untersucht (SAAS78). Um das Verhältnis der Oberflächenkontamination und der bodenbürtigen Nuklidaufnahme abzuschätzen, wurde anfangs bei oberirdischen Pflanzenteilen das Verhältnis $[\text{Sr-90}/\text{Gesamt-}\beta\text{-Aktivität im Fallout}]/[\text{Sr-90}/\text{Gesamt-}\beta\text{-Aktivität in der Pflanze}]$ bestimmt. Diese Berechnungsmethode gibt jedoch nur dann sichere Werte, wenn keine nennenswerte Verlagerung in unterirdisch wachsende Pflanzenteile erfolgt (REIS65). Bei der Berechnung des Verhältnisses Sr-90/Rest- β -Aktivität kommt es jedoch zu Werten über 100%, was theoretisch natürlich nicht der Fall sein kann. Eine belastbare Grundlage für eine Berechnung des Transferfaktors Boden/Pflanze kann daher trotz guter Datengrundlage nicht geschaffen werden. Die vorliegenden Daten wurden daher nicht in die Transferfaktoren-

Datenbank eingearbeitet. Aufgenommen wurden die Ergebnisse der Cs-137-Messungen aus den Jahren 1987 und 1988 nach dem Chernobyl-Unfall (SAAS89), da davon ausgegangen wird, dass in diesen Jahren ein Radionuklideintrag über die Atmosphäre vernachlässigbar ist.

Erwähnt werden soll noch, dass Transferfaktoren aus der recht umfangreichen Datenquelle EHLK97 nicht übernommen werden konnten, da diese nicht tabellarisch vorlagen und aus den dreidimensionalen Graphiken die Werte nicht ausreichend genau abgelesen werden konnten.

2.3. Aufbau der Datenbank

Die erstellte Datenbank gliedert sich in drei Module:

Im Modul 1 (Transferfaktoren) sind alle Daten eingetragen, die eine Übernahme oder Berechnung von Transferdaten aus der vorgegebenen Literatur zulassen.

Im Modul 2 (Einstufung der Datenquelle) wird eine Bewertung der zugrunde liegenden Literaturstelle vorgenommen, sofern deren Ergebnisse in die Tabelle Transferfaktoren mit übernommen worden sind.

Im Modul 3 (Literatur) sind die für die Recherche und Dateneingabe relevanten Literaturstellen bibliographisch dokumentiert.

Zusätzlich kann über Abfragefunktionen die Einzelausgabe der Werte mit allen relevanten Informationen erfolgen sowie gezielt nach Transferfaktoren für Einzel- bzw. Pflanzengruppen gesucht werden. Als Ausgabe wird für jede Abfrage der arithmetische Mittelwert und die Standardabweichung ausgegeben. Für diese Abfragen wurden die Tabellen Statistik_TF_Pflanzeneinordnung sowie Statistik_Transferfaktoren gebildet, die über entsprechende Formulare abgerufen werden können.

2.3.1. Modul 1: Transferfaktoren-Datenbank

Die Transferfaktoren-Datenbank ist in 4 Blöcke gegliedert. Im ersten Block (Allg) werden allgemeine Angaben über das Versuchsdesign sowie ein örtlicher Bezug dokumentiert. In einem zweiten Block (Pf) werden die wichtigsten Kenngrößen für die untersuchten Pflanzen aufgeführt und in einem vierten Block (Bo) sind die entsprechenden Informationen für die Bodendaten genannt. Im dritten und zentralen Block (TF) werden die Transferfaktoren angegeben bzw. neu berechnet.

Dabei wurde ein möglichst standardisiertes Eingabeformat benutzt. Pflichtfelder sind: Literaturstelle, Radionuklid, Experimentklasse, Kontaminationstyp, Pflanzeneinordnung,

Pflanzenteil und der normierte Transferfaktor. Alle anderen Parameter konnten in den meisten Fällen ermittelt werden, sind aber nur dann durchgehend eingetragen.

2.3.1.1. Block 1: Allgemeine Angaben

In diesem Block werden die Informationen zusammengefasst, die neben den Pflanzen- und Bodendaten für die Einordnung der Transferfaktoren wichtig und notwendig sind:

- **Literatur-ID:** Gibt die Literaturstelle an, aus der die eingetragenen Daten übernommen worden sind. Die Literatur-ID setzt sich aus den ersten vier Buchstaben des Namens des Erstautors und den letzten zwei Zahlen des Jahres der Veröffentlichung zusammen. Bei mehreren Veröffentlichungen des Erstautors in einem Jahr werden diese mit einem kleinen Buchstaben gekennzeichnet.
- **Einstufung der Datenquelle:** Hier wurde die Gesamtpunktzahl einer qualitativen Einstufung der Literaturquelle eingetragen. Näheres siehe Kap. 2.3.2.
- **Eingabenummer:** Die automatische Nummerierung ist aufgrund des Löschens fehlerhafter Datensätze nicht immer kontinuierlich, aber eindeutig. Das Fehlen bestimmter Nummern deutet nicht darauf hin, dass es in der Literaturstelle weitere Daten gibt, die nicht in der Datenbank erfasst wurden. Mit der singulären Eingabenummer könnten die Datensätze z.B. bei einer statistischen Auswertung jederzeit wieder zugeordnet werden.
- **Radionuklid:** Enthält die Angabe des Radionuklids. Folgende Isotope wurden dabei berücksichtigt:
 - (a) Cs-134
 - (b) Cs-137
 - (c) Sr-90
 - (d) Sr-89
 - (e) Sr-85
 - (f) J-129
 - (g) Pu-238, Pu-239,240
- **Allg-Standort:** Bezeichnung der Probenahmestelle, so wie diese in der Datenquelle bezeichnet worden ist.
- **Allg-GeoAng:** Hier werden allgemeine geographische Angaben wie beispielsweise das Bundesland, die Region oder der Landkreis genannt. Bei verschiedenen Proben von gleichen Standorten kann auch die Probennummerierung eingehen, was das Auffinden der Werte in der Literaturstelle ermöglicht.

- **Position:** Die geographische Position (Gauß-Krüger-Koordinaten) wurde mit Hilfe der digitalen Kartenserie TOP50 der Deutschen Landesvermessung bestimmt. Angegeben sind jeweils die Gauß-Krüger-Koordinaten des genannten Ortes. In Ausnahmefällen war es auch möglich, die genauen Koordinaten der Probenahmestelle einzufügen. Bei Lysimeter- und Topfversuchen beziehen sich die Angaben auf den Herkunftsort des Bodens. Bei nur ungenauen oder nicht eindeutigen Bezeichnungen wurde auf die Gauß-Krüger-Koordinaten verzichtet.
- **Allg-ExKlasse:** Angabe der Art des Experiments:
 - (a) Feldexperiment
 - (b) Topfexperiment
 - (c) Lysimeter
 - (d) Sonstiges (siehe Bemerkungen)
- **Allg-KonTyp:** Art der Kontamination mit dem Radionuklid:
 - (a) Fallout
 - (b) Chernobyl
 - (c) Künstlich
 - (d) Andere (siehe Bemerkungen)
- **Allg-VersDesign:** Kurzbeschreibung der Probenahme und Analytik
- **Allg-Dat-Kont, Allg-Dat-Proben:** Gibt den Zeitpunkt der Kontamination bzw. der Probennahme an. Diese waren für die Mehrheit der Literaturangaben bekannt. Für die Kontamination in Folge des Reaktorunfalls in Chernobyl wurde 1986 eingetragen. Fallout-Kontaminationen konnten in der Regel nicht datiert werden. Ist das Datum des Radionuklideintrages genauer zu bestimmen, ist dieses unter Bemerkungen festgehalten. Das Feld „Datum“ gibt das genaue Datum der Pflanzenentnahme an. Bei Monatsangaben wurde hier durchgehend der erste Tag des Monats angegeben. Teilweise wurden Messwerte zerfallskorrigiert auf ein bestimmtes Datum bezogen. Dies wurde unter Bemerkungen vermerkt, als Zeitpunkt wurde jedoch, wenn möglich, der tatsächliche Entnahmekzeitpunkt aufgenommen. Bei FIEL94 war kein Entnahmedatum genannt, daher wurde das Bezugsdatum für die Zerfallskorrektur angegeben.
- **Allg-Bemerk:** Bemerkungen zu den vorangegangenen Feldern

2.3.1.2. Block 2: Pflanzenparameter

- **Pf-Einordnung:** Für eine statistische Analyse ist eine Einordnung der Pflanzen notwendig. Diese wurde nicht nach botanischen Kriterien, sondern möglichst nach Nahrungs- bzw. Futtermittelrelevanz vorgenommen.

- (a) Früchte (Himbeere, Brombeere, Heidelbeere, Wein usw.)
 - (b) Futterpflanzen (Luzerne, Klee, Raps usw.)
 - (c) Gemüse (Kohl, Kartoffel, Gurke usw.)
 - (d) Getreide
 - (e) Gras (Gras als allg. Bezeichnung, Weidelgras usw.)
 - (f) Hackfrüchte (Zuckerrübe, Futterrübe)
 - (g) Wildpflanzen (Farne, Blütenpflanzen, Hainsimsen usw.)
 - (h) Andere (nur Tabak)
- **Pf-Bez:** Deutscher Name der Pflanze, soweit angegeben. Sollte kein genauere Name („Gras“) vorliegen, wird hier noch einmal die Pf-Einordnung wiederholt.
 - **Pf-Ang:** Angabe des systematischen Namens, wenn angegeben bzw. identifizierbar. Angaben zu Unterarten und Varietäten sind unter Pf-Bemerk vermerkt. Eine Ausnahme bilden von der Wuchsform her stark unterschiedliche Unterarten, wie beispielsweise verschiedene Kohlsorten. Diese wurden unter Pf-Bez getrennt aufgeführt.
 - **Pf-Teil:** Angabe des untersuchten Pflanzenteils, wenn nicht die ganze Pflanze untersucht wurde. Es wurden nur geläufige Bezeichnungen verwendet, auch wenn diese in der Literaturstelle anders benannt wurden (Blätter, Hülse, Stängel, oberirdische Pflanzenteile, Karyopse usw.).
 - **Pf-Orig-Nuklidkonz, Pf-Nuklidkonz-Orig-Einh:** Die Original-Radionuklidkonzentration in der Pflanze, so wie sie direkt aus der Quelle übernommen werden konnte.
 - **Pf-Nuklidkonz-Norm:** Die Nuklidkonzentration in den Pflanzen wurde durchgehend in

Bq kg⁻¹ [TS Pflanze]

umgerechnet. Sofern dieser Wert nicht experimentell bestimmt wurde oder in der Originalliteratur Umrechnungsfaktoren angegeben waren, sind die in Anhang 2 dokumentierten prozentualen Trockengewichte in Bezug auf das Feuchtgewicht verwendet worden. Bei einigen Pflanzen war es notwendig, Werte von nahe verwandten Arten zu übernehmen oder mit Schätzungen zu arbeiten. Dies ist dann entsprechend dokumentiert worden.

- **Pf-K:** Die Kaliumkonzentration in der Pflanze wurde in

g kg⁻¹ [Pflanzentrockenmasse TS]

umgerechnet (siehe Anhang 1), sofern die Werte nicht in dieser Einheit angegeben wurden.

- **Pf-Ca:** Die Calciumkonzentration in der Pflanze wurde in

$$\text{g kg}^{-1} \text{ [Pflanzentrockenmasse TS]}$$

umgerechnet (Anhang 1), sofern die Werte nicht in dieser Einheit angegeben wurden.

- **Pf-Bemerk:** Zusätzliche Erläuterungen bzw. Bemerkungen zum Block 2 Pflanzenparameter
- **Pf-Anzahl:** Anzahl der Einzelproben, auf die sich der eingetragene Wert bezieht. In einigen Fällen fehlt der Eintrag, weil die Anzahl der Einzelproben unklar ist. Bei der statistischen Auswertung wurde der Wert dann aber als Einzelwert betrachtet.
- **Pf-Stat:** Angaben über die Berechnungen (echte Mittelwerte, Mischproben usw.) sowie Bemerkungen über die Streuung der Werte. Wo dies Auswirkungen auf die Aussagekraft der Daten und Transferfaktoren hatte, sind auch weitere statistische Auswertungen erwähnt.

2.3.1.3. Block 3: Transferfaktoren

- **TF-Original, TF-Orig-Einheit:** Gibt den Original-Transferfaktor aus der Literaturquelle mit der entsprechenden Einheit an. In einigen Fällen, in denen kein Transferfaktor angegeben war, wurde der Transferfaktor aus den vorgegebenen Pflanzen- und Bodendaten berechnet und dann bei TF-Norm eingetragen.
- **TF-Tiefe:** Gibt die Bodentiefe in cm an, auf die der Transferfaktor Bezug nimmt. Wenn keine Angaben in der Literaturquelle vorhanden sind, werden bei TF-Bemerk die Besonderheiten noch einmal detailliert beschrieben (z. B. Pflugtiefe, durchwurzelte Zone usw.)
- **TF-Norm:** Als Bezugswert dient der normierte Transferfaktor (TF_{norm})

$$\frac{\text{Bq} * \text{kg}^{-1} \text{ [Pflanzentrockenmasse]}}{\text{Bq} * \text{kg}^{-1} \text{ [Bodentrockenmasse]}}$$

der als dimensionslose Größe durchgängig angegeben bzw. in diese Größe umgerechnet ist. Sofern das Verhältnis von Frisch- und Trockenmasse nicht experimentell bestimmt oder Werte angegeben wurden, wurde für die Umrechnung von Frisch- in Trockensubstanz entsprechend den Faktoren in Anhang 2 verfahren.

- **TF-agg:** Hier wurde der „aggregated“ Transferfaktor (TF_{agg})

$$\frac{\text{Bq} * \text{kg}^{-1} \text{ [Pflanzentrockenmasse]}}{\text{Bq} * \text{m}^{-2} \text{ [Bodentrockenmasse]}}$$

bezogen auf die Oberfläche (m^2) und auf eine bestimmte Tiefe des Bodens angegeben, wenn dieser in der Datenquelle berechnet wurde.

- **TF-Bemerk:** Nähere Erläuterungen zum Block Transferfaktoren, wenn notwendig.

2.3.1.4. Block 4: Bodenparameter

- **Bo-Typ, Bo-Art:** Bodentyp und Bodenart wurden, wenn in der Literatur angegeben, in die Datenbank eingetragen. Allerdings erfolgten die Bezeichnungen nicht immer in Anlehnung an DIN 4220 bzw. die Systematik der Böden Deutschlands, sondern teilweise mit den Bezeichnungen „Sand-“ bzw. „Lehmböden“ oder auch nach Augenmaß wie z.B. „sandiger Boden“. Eine einheitliche Nomenklatur konnte daher nicht hergestellt werden.
- **Bodenkategorie:** Zur besseren statistischen Behandlung der Daten wurden diese entsprechend NISB99 in Sand (>70% Sandfraktion), Lehm, Ton (>35% Tonfraktion) und organische Böden (>20% Glühverlust) unterteilt. Aber auch hier gilt: „Sandböden“ wurden in die Kategorie Sand und „Lehmböden“ in die Kategorie Lehm eingeordnet, auch wenn dazu in der Literatur keine zusätzlichen Angaben gemacht wurden.
- **Tongehalt:** Als zusätzlicher Parameter wurde der Tongehalt in Prozent – soweit dieser bestimmt wurde – eingetragen.
- **Nutzung:** Soweit angegeben, wurde hier die Nutzung des Bodens eingetragen. Auf detaillierte Angaben wurde verzichtet. Es wurden übergeordnete Begriffe wie „Wald“, „Acker“, „Grünland“ usw. verwendet.
- **Bo-Nuklidkonz, Bo-Nuklidkonz-Einh:** Analog zu den Pflanzenparametern wurde hier die in der Literatur angegebene Radionuklidkonzentration in der Originaleinheit angegeben.
- **Bo-Nuklidkonz-Norm:** Die Radionuklidkonzentration wurde in

Bq kg^{-1} [Bodentrockenmasse TS]

eingetragen bzw., wenn in der Literatur in dieser Einheit nicht angegeben, entsprechend umgerechnet.

Die Umrechnung einer Flächenaktivität in spezifische Aktivität erfolgte nach dem in BRUE92 beschriebenen Verfahren, bei dem ein mittleres Gewicht von 240 kg m^{-2} für Waldböden (Schicht 0-15 cm bei einer Dichte von $1,6 \text{ kg l}^{-1}$) angenommen wird. Da es sich bei den betreffenden Literaturstellen, bei denen eine Flächenaktivität in eine spezifische Aktivität umgerechnet werden musste, ausschließlich um humose Wald- und Moorstandorte handelte, wurde nur mit dem o.g. Faktor gerechnet.

Bei FUE79b wurde für die Lysimeterversuche mit Ackerböden das gleiche Verfahren gewählt, um die Bodenkontamination abzuschätzen. Diese berechneten Werte brauchten aber in diesem Fall nicht für die Berechnung des Transferfaktors herangezogen werden.

- **Bo-Ca, Bo-K:** Austauschbares Kalium und Calcium im Boden wurde durchgängig in

mval 100g⁻¹ [Bodentrockenmasse TS]

angegeben bzw. umgerechnet (Anhang 1).

Für jeden Datensatz wurde nur ein Wert angegeben, der möglichst die Konzentration der austauschbaren Kationen zum Zeitpunkt der Probennahme repräsentiert. Ein Vergleich ist aber nur eingeschränkt möglich, weil sich die Konzentration in einer Vegetationsperiode ändern kann und auch die Bestimmungsmethoden unterschiedlich waren.

- **Bo-pH, Bo-pH-Meth:** Angabe des pH-Wertes des Bodens sowie die zur Bestimmung angewandte Messmethode (Wasser bzw. CaCl₂). Letztere Methode lässt in der Regel einen etwas höheren pH-Wert erwarten als die Messung in Wasser; NISB99 haben den pH-Wert der Wassermessungen generell um 0,7 erhöht. In dieser Studie wurde aber auf eine Umrechnung verzichtet, weil die von NISB99 genutzten Umrechnungsfaktoren auf eine mündliche Mitteilung beruhen und in der einschlägigen Literatur nicht verifiziert werden konnten.
- **Bo-OrgS:** Die organische Substanz wird in der Regel durch den prozentualen Glühverlust bei hohen Temperaturen (>400°C) bestimmt. Wenn die Werte als prozentualer Kohlenstoffanteil angegeben waren, wurden diese mit dem Faktor *1,7 umgerechnet.
- **Bo-Anzahl, Bo-Stat:** Anzahl der Bodenproben, die als Mittelwert oder als Mischprobe den eingetragenen Wert repräsentieren. Bei Einzelproben steht hier der Wert 1.
- **Bo-Bemerk:** Erläuterungen zum Datenblock Bodenparameter.

2.3.2. Modul 2: Einstufung der Datenquelle

Die in die Transferdatenbank aufgenommenen Literaturstellen wurden mit einem standardisierten Einstufungsschema bewertet. Dadurch kann unmittelbar festgestellt werden, ob die zugehörige Literaturstelle Mindestanforderungen genügt und ob die ermittelten Einzel-Transferfaktoren als abgesichert gelten können bzw. ob im Einzelfall die Datenquelle im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit überprüft werden sollte. Insgesamt wurden 17 unterschiedliche Merkmale erfasst (Anhang 3), die im einzelnen auf einer vierteiligen Bewertungsskala eingeordnet wurden. Dabei bedeutet ein Punkt, dass das abgefragte Merkmal nicht zutrifft bzw. nicht vorhanden ist; zwei Punkte wurden vergeben, wenn das

Merkmal teilweise zutrifft. Volle vier Punkte konnten erreicht werden, wenn die Eigenschaft klar und eindeutig bestimmt und dokumentiert wurde, nur drei Punkte gab es, wenn das Merkmal überwiegend vorhanden war. Aufgrund der Bedeutung der reinen Qualitätsmerkmale „**Örtliche Beziehung**“, „**Tiefenverteilung**“, „**Zeitliche Beziehung**“, „**Saisonalität**“, „**Kontrollproben**“ sowie „**Aggregierte Daten**“ wurden diese mit der doppelten Punktzahl gewichtet. Die Summe der Merkmale (max. 100) gibt die Wertigkeit der Literaturstelle an. Im Feld „**Besonderheiten**“ sind schriftliche Ergänzungen zu der Einstufung dokumentiert.

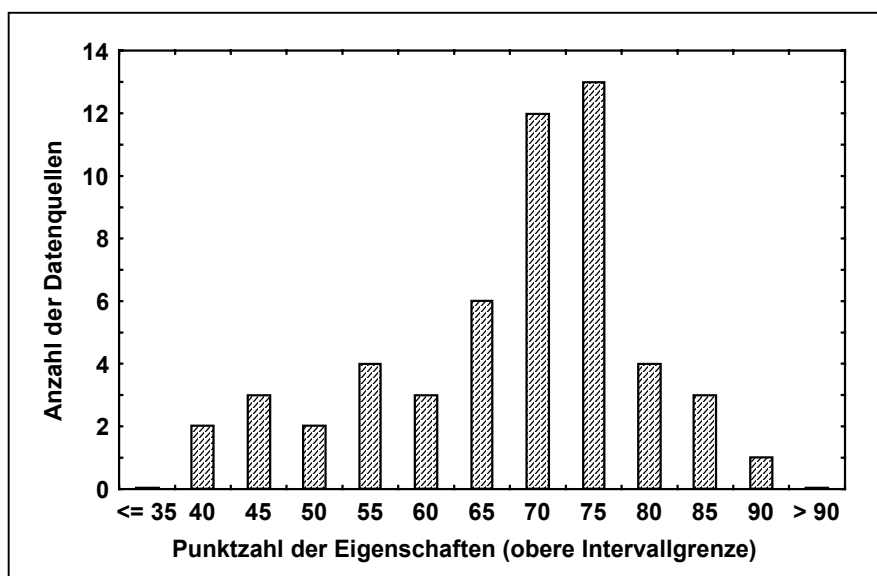


Abb. 1: Verteilung der Wertigkeit (Qualität) der genutzten Datenquellen (N=54; Mittelwert 66; Minimum 37, Maximum 86).

Die Häufigkeitsverteilung der Punktzahlen für die Datenquellen ist in Abb. 1 wiedergegeben. Die Summe der Punkte rangiert dabei zwischen 37 (SAAS89) und 86 (FIL94). Der Durchschnitt wurde mit 66 Punkten ermittelt. Damit kann ein Nutzer der Datenbank schnell entscheiden, ob eine Weiterverarbeitung der aus der Datenquelle stammenden Transferfaktoren sinnvoll ist oder nicht. Allerdings kann diese Punkteskala nur ein Hinweis sein. Im Zweifelsfall sind die Einzelheiten der Datenquelle zu beachten bzw. sollte mit den Autoren Kontakt aufgenommen werden.

2.3.3. Modul 3: Literatur-Datenbank

In der Literatur-Datenbank sind die bibliographischen Angaben aller Datenquellen dokumentiert, soweit diese für die Erfassung der Transferfaktoren evaluiert worden sind bzw. als Literaturhinweis in relevanten Veröffentlichungen angegeben waren.

Über die **Identifikationsnr** kann jede erfasste Literaturstelle eindeutig und einmalig identifiziert werden. Diese setzt sich zusammen aus den ersten 3 oder 4 Buchstaben des Namens

des Erstautors und den letzten 2 Ziffern des Erscheinungsjahres (Bsp.: BUNZ98), gefolgt von einem kleinen Buchstaben, wenn mehrere Veröffentlichungen des Erstautors im betreffenden Jahr erschienen sind. Die **Identifikationsnr** verzweigt in die anderen Datenbanken.

Neben den allgemeinen bibliographischen Angaben finden sich unter Rubrik „**Nachweis**“ Angaben über den Stand der Recherche. „*Vorhanden*“ bedeutet, dass die Literaturstelle im Bestand als Original oder Kopie vorliegt. „*Durchgesehen*“ wurden Literaturstellen, die keine für die Studie notwendigen Daten enthalten. „*Nicht nachweisbar*“ waren Literaturstellen, die als Hinweis in anderen Dokumenten erfasst wurden, aber nicht zugänglich waren; Einträge mit der Bezeichnung „*Literaturstelle*“ standen in einem Zusammenhang mit den erfassten Daten, wurden aber nicht weiter bearbeitet. Letztere wurden aber nicht aus der Datenbank gelöscht, um für weitere Bearbeiter einen umfassenden Literaturüberblick zu gewährleisten.

Des Weiteren wurde in dem Literatur-Modul dokumentiert, um welche Art der Veröffentlichung es sich handelt, ob Transferdaten vorliegen und ob diese in die Datenbank übernommen wurden. Das Vorhandensein von Transferdaten in einer Literaturstelle bedeutet nicht automatisch eine Erfassung in der Transferdatenbank, da diese auch schon in der Erstveröffentlichung vorhanden sein können. Nähere Angaben sind in den Bemerkungen zu finden.

2.3.4. Abfrage statistischer Daten zum Transferfaktor nach Pflanzenart oder Pflanzeneinordnung

Um eine komfortable Auswertung der Datenbank zu ermöglichen, wurde ein Abfrageformular entwickelt, das eine Ausgabe des Mittelwertes von TF_{norm} für verschiedene Pflanzenarten bzw. -einordnungen ermöglicht. Dadurch ist der Nutzer in der Lage, den Transferfaktor für in der Datenbank vorhandene Pflanzenarten schnell abzurufen.

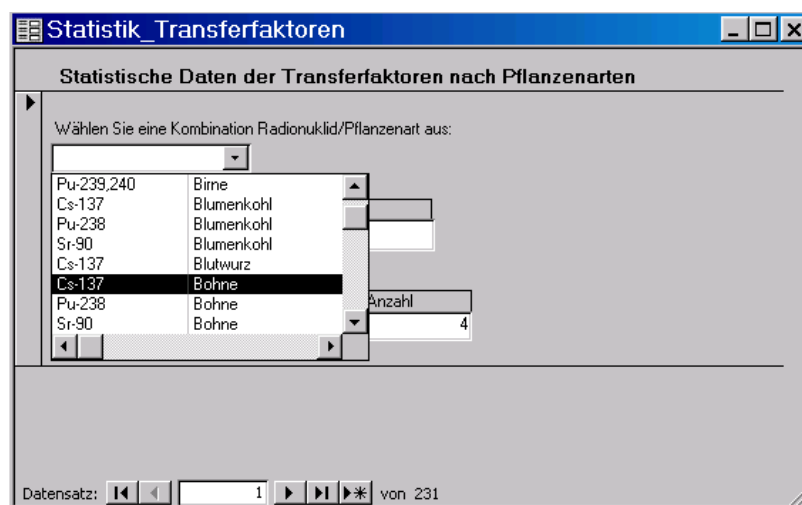


Abb. 2: Abfragemaske zur Ermittlung des durchschnittlichen TF_{norm} nach Pflanzenarten.

Dazu enthält die Datenbank Transferfaktoren.mdb vorbereitete Formulare zum Abfragen von Transferfaktoren jeweils gruppiert nach Pflanzenart oder Pflanzeneinordnung. Die

entsprechenden Formulare befinden sich in der Mappe Formulare. Nach dem Öffnen des Formulars Statistik_TF_Pflanzenart bzw. Statistik_TF_Pflanzeneinordnung erscheint eine Maske (Abb. 2), in deren erstem Feld eine Kombination Radionuklid/Pflanzenart bzw. Radionuklid/Pflanzeneinordnung ausgewählt werden kann.

Ist der gewünschte Datensatz ausgewählt, so wird für die betreffende Kombination der Mittelwert und die Standardabweichung des Transferfaktors (genormt) angezeigt sowie die Anzahl der Stichproben, auf der die angegebenen Daten beruhen.

2.3.5. Komfortable Darstellung der Eingabefelder eines Datensatzes

Alle Datensätze lassen sich komfortabel über das Formular Transferfaktoren_Ausgabe mit allen Eigenschaften über eine entsprechende Maske ausgeben bzw. verändern (Abb. 3).

The screenshot shows a Microsoft Access window titled 'Microsoft Access - [Transferfaktoren]'. The form contains the following fields and values:

Eingabenummer	160	Allg-GeoAng	Niederrhein
Radionuklid	Cs-137	Position	2533910/5745120
TF-Original	0,069	Allg-ExKlasse	Lysimeter
TF-Orig-Einheit	Bq/kg FS-Bq/kg TS	Allg-KonTyp	Chernobyl
TF-Tiefe (cm)	20	Allg-VersDesign	Entnahme von 8 Lysimetern (0,5 qm x 80 cm), Untersuchung der Cs-Aufnahme durch Nutzpflanzen in Abhängigkeit von der Aufbringung von durch Chernobyl-
TF-Norm	0,0793	Allg-Dat-Kont.	1986
TF-Tagg		Allg-Dat-Proben.	1989
TF-Bemerk.	Bezogen auf 0-20 cm	Datum	
		Allg-Bemerk.	Kontrolllysimeter ohne Klärschlamm, Werte zerfallskorrigiert auf den 1.1.89
Pf-Einordnung	Getreide	Bo-Typ	Gley-Podsol
Pf-Bez.	Weizen	Bo-Art	IS
Pf-Ang.	Triticum aestivum	Tongehalt	4,7
Pf-Teil	Karopse	Nutzung	Acker
Pf-Orig-Nuklidkonz.	0,71	Bo-Nuklidkonz.	10,34
Pf-Nuklidkonz.-Orig-Einh.	Bq/kg FS	Bo-Nuklidkonz.-Einh.	Bq/kg TS
Pf-Nuklidkonz.-Norm	0,82	Bo-Nuklidkonz.-Norm	10,34
Pf-K	9,58	Bo-Ca	4,6
Pf-Ca		Bo-K	0,9
PF-Anzahl	1	BO-pH	5,4
Pf-Bemerk.	3. Kultur 1989/90, Sorte OKAPI	Bo-pH-Meth.	in CaCl2
		Bo-OrigS	3,2
		Bo-Anzahl	3
		Bo-Stat	Mittelwert aus Mischprobe mit je 5 Bohrungen

At the bottom of the form, there is a status bar showing 'Datensatz: 152 von 4841' and a description: 'Kurzbeschreibung der Probenahme und Analytik, gegebenenfalls erweiterte Angaben'. The Windows taskbar at the bottom shows the Start button, icons for Microsoft Word, Statistica, and Microsoft Access, along with the system clock showing 12:08.

Abb. 3: Ausgabemaske der erfassten Größen eines Datensatzes.

3. Lokale Variabilität der Transferfaktoren

Transferfaktoren werden von einer Reihe von räumlichen Bezugsgrößen beeinflusst: Verteilung der Radionuklidkonzentration im Boden, pH-Wert, organische Substanz und andere Bodenfaktoren, aber auch Menge und Verteilung der Niederschläge usw. Mögliche Störfälle werden immer einen räumlichen Bezug haben, wie die Radionuklidverteilung in Deutschland infolge des Chernobylunfalls beweist. Darum ist es notwendig, die in der Datenbank erfassten Transferfaktoren möglichst exakt lokal zuordnen zu können. Aus diesem Grund wurde, wenn möglich, für jeden Datensatz der Rechts- und Hochwert der Probenahmeorte bestimmt und die Transferfaktoren räumlich dargestellt. Dadurch kann jeder einzelne Probenahmepunkt mit allen verfügbaren Daten direkt aus dem Kartenmaterial abgerufen werden.

3.1. Räumliche Darstellung der Messpunkte mit dem Top50 Viewer

Die räumliche Darstellung der Messpunkte wurde mit dem Programm TOP50 Viewer ermöglicht. Dieses greift auf eine Access-Datenbank (Feldexperimente.mdb) zu. Das Programm (ca. 30-40 EUR) ist über jedes Landesvermessungsamt zu erhalten; auf jeder CD ist eine Karte Bundesrepublik Deutschland 1:1 000 000 vorhanden. Höherauflösende Kartenwerke bis hin zu Kartenblättern im Maßstab 1:50 000 müssen bei Bedarf zusätzlich über die Landesvermessungsämter gekauft werden; diese sind aber für die grundlegenden Informationen nicht notwendig.

Das Programm Top50 Viewer ermöglicht die elektronische Kartendarstellung sowie die Verknüpfung mit den in der Datenbank zusammengefassten Transferdaten. Durch die Verknüpfung der Kartenwerke über geographische Koordinaten ist ein koordinatengetreuer Maßstabswechsel möglich.

Folgende Daten sind über die mit dem Top50 Viewer verknüpfte Datenbank (Feldexperimente.mdb) abrufbar:

- Nuklide, gruppiert nach Kontaminationstyp (Chernobyl, Fallout)
- Gauß-Krüger-Koordinate des Messpunktes
- Kürzel für Literaturstelle laut Transferfaktor-Datenbank
- Transferfaktor, normiert
- Transferfaktor, wie in der Datenquelle angegeben, mit Einheit
- Nuklidkonzentration in der Pflanze
- Nuklidkonzentration im Boden

Datensätze aus Topfexperimenten, Lysimeterversuchen und Versuchen mit im Freiland künstlich aufbrachten Radionukliden sowie die Messungen von Pu-238, Pu-239 und Pu-240 oder solche ohne Ortsangabe wurden hier nicht berücksichtigt. Einen Überblick über die Messpunkte in Deutschland geben die Karten in den Anhängen 4-7.

3.1.1. Suche und Anzeige von Datensätzen mit dem TOP50 Viewer

Der Top50 Viewer ermöglicht die Suche und Darstellung der Messpunkte für einzelne Datensätze oder Gruppen von Datensätzen, die nach bestimmten Kriterien ausgesucht werden können. Nach Auswahl der gewünschten Karte wird im Menü durch Bearbeiten -> Objektdaten -> Suchen eine Dialogmaske geöffnet (Abb. 4).

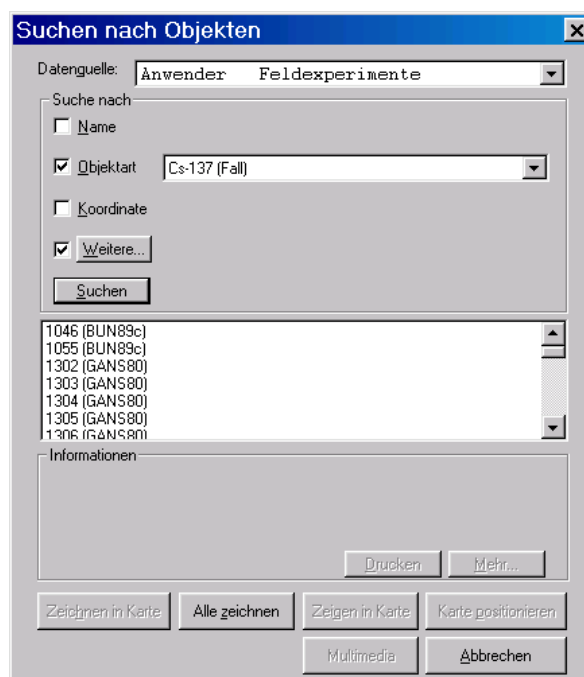


Abb. 4: Abfragemaske zur Darstellung der räumlichen Zuordnung von Transferfaktoren.

Hier muss zunächst die **Datenquelle** angewählt werden, das ist in diesem Fall die Datenbank Anwender Feldexperimente (Feldexperimente.mdb). Die Datenbank befindet sich im Installationsverzeichnis des Top50 Viewers im Unterverzeichnis \database.

Im Feld **Name** kann die eindeutige ID des Messpunktes gegebenenfalls mit dem Zusatz Literaturstelle als Kürzel in Klammern eingegeben werden. Eine Wildcard-Suche mit * (beliebig viele beliebige Zeichen) oder ? (ein beliebiges Zeichen) ist möglich. So ist es auch möglich, sämtliche Kombinationen zu suchen (Bsp.: Darstellung von Punkten einer Arbeitsgruppe usw.).

Im Feld **Objektart** kann eine Datengruppe ausgesucht werden. Die vorliegenden Daten sind nach Radionukliden gemäß Tab. 1 gruppiert:

Tab. 1: Zuordnung von Radionuklid und Kontaminationstyp als Objektart.

Radionuklid	Kontaminationsquelle	Objektart
Cs-134	Chernobyl	Cs-134 (Cher)
Cs-137	Chernobyl	Cs-137 (Cher)
Cs-137	Fallout	Cs-137 (Fall)
Cs-134,137	Chernobyl	Cs-134,137 (Cher)
Sr-90	Chernobyl	Sr-90 (Cher)
Sr-90	Fallout	Sr-90 (Fall)

Im Feld **Koordinate** kann über die Eckpunkte eines selbst aufgezeichneten Rechtecks ein definierter Kartenausschnitt ausgewählt werden. Es werden dann nur all diejenigen Messpunkte eingezeichnet, die sich innerhalb dieses Rechtecks befinden. Dadurch können beispielsweise die Transferdaten jeder beliebigen Region angezeigt werden.

Über den Button **Weitere** wird eine zusätzliche Dialogmaske geöffnet.



Abb. 5: Suchmaske für spezielle Abfragen.

Hier kann die Suche um die in den Zusatzfeldern Text 1 bis Text 10 und Zahl 1 bis Zahl 5 definierten Daten erweitert werden. Leider konnte die Beschriftung in der Maske nicht geändert werden. Die als Text 1, Text 2 bezeichneten Felder enthalten folgende Informationen (Tab. 2):

Tab. 2: Zuordnung der Feldinhalte zu den Bezeichnungen in der Maske.

Bezeichnung	Feldinhalt
Text 1	Gauß-Krüger-Koordinate (Rechtswert)
Text 2	Gauß-Krüger-Koordinate (Hochwert)
Text 3	Pflanzenart
Text 4	TF-Wert (original) mit Einheit
Zahl 1	TF-Wert (genormt), Einheit: $\text{Bq kg}^{-1} / \text{Bq kg}^{-1}$
Zahl 2	Pflanzennuklidkonzentration, Einheit: Bq kg^{-1}
Zahl 3	Bodennuklidkonzentration, Einheit: Bq kg^{-1}

Die einzelnen Feldinhalte können dabei mit den Operatoren UND oder ODER verknüpft werden. Für die numerischen Felder ist die Auswahl von Werten möglich, die kleiner, größer oder gleich einem eingegebenen Wert sind. Es ist auch die Eingabe eines Bereichs möglich. Hier müssen zwei Werte (Trennzeichen Semikolon, z.B. 0,02;0,1) angegeben werden. So können zum Beispiel für eine Objektart alle diejenigen Messpunkte angezeigt werden, die kleiner als ein definierter TF-Wert sind oder die sich innerhalb eines definierten TF-Bereichs befinden.

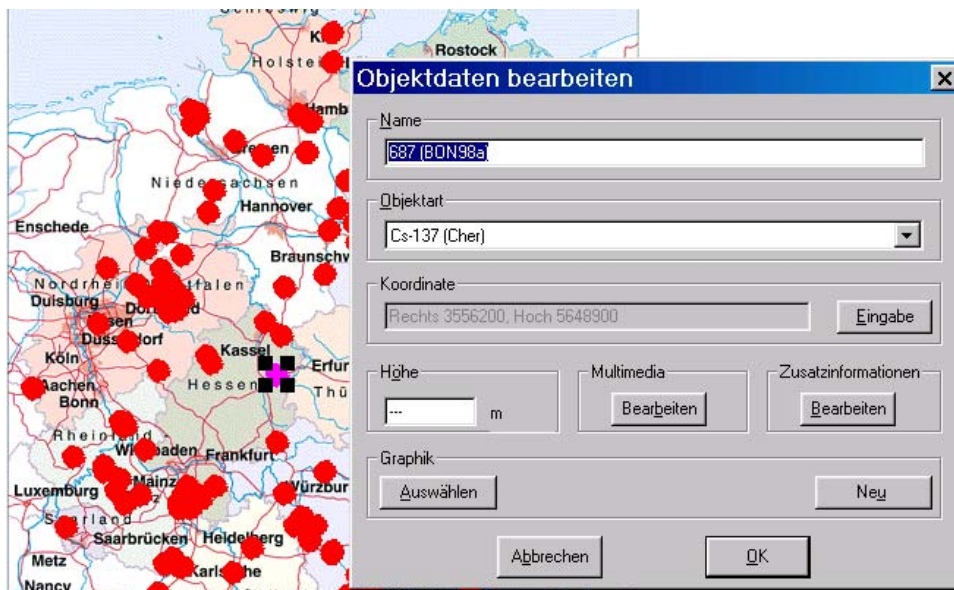


Abb. 6: Beispiel einer Darstellung von Messpunkten in Deutschland (hier Probenahmepunkt bei Kassel, der von BON98a untersucht wurde) mit der Möglichkeit, zusätzliche Informationen abzurufen.

Nach Betätigen des Buttons **Suchen** werden alle IDs mit Literaturschlüssel angezeigt, die den eingegebenen Kriterien entsprechen. Es ist nun möglich, einen oder mehrere Datensätze der Suchmenge zu markieren. Dadurch werden standardmäßig die Eingabenummer mit dem Kürzel der Literaturstelle, die Objektart sowie die geographischen Koordinaten angezeigt. Durch Betätigen des Buttons **Mehr** können die in den Text- und Zahlenfeldern enthaltenen Informationen abgerufen werden (vgl. Tab. 2).

Die Suchmenge kann im ausgewählten Kartenblatt dargestellt werden. Nach Betätigen des Buttons **Alle zeichnen** gelangt man in eine Dialogmaske, in der Grafikeinstellungen

vorgenommen werden. Hier kann das in der Datenbank definierte Symbol verwendet werden oder ein neues Symbol definiert werden (Achtung: Nur wenn das in der Datenbank definierte Symbol verwendet wird, ist das Abrufen der zugehörigen Daten möglich). Der Top50 Viewer erstellt nun ein Kartenbild für die in der Suchmenge befindlichen Messpunkte. Jetzt kann ein einzelner Messpunkt angewählt werden (Abb. 6). Durch Betätigen der rechten Maustaste erscheint ein Kontextmenü. Wählt man hier den Menüpunkt **Datenbank**, so werden die Daten des Messpunktes angezeigt. Die Darstellung großer Datenmengen mit dem Top50 Viewer führt offensichtlich zu Verarbeitungsproblemen (z.B. die Darstellung aller Cs-137-Daten mit Kontaminationsquelle Chernobyl). Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Darstellung großer Suchmengen auf mehrere Teilschritte zu unterteilen. Hierfür kann ggf. die Suchmenge reduziert werden, indem z.B. nur Teilbereiche von TF-Werten dargestellt werden. Jede beliebige Suchmenge kann in einem Overlay gespeichert werden.

3.1.2. Darstellung der Messpunkte durch Overlays

Für jedes Radionuklid wurde ein sogenanntes Overlay erstellt, in dem sämtliche Messpunkte dargestellt werden können. Dabei stehen die Kürzel „Cher“ und „Fall“ jeweils für „Chernobyl“ und „Fallout“. Die Overlays befinden sich im Installationsverzeichnis des Top50 Viewers im Unterverzeichnis \overlay und können nach Auswahl des gewünschten Kartenmaßstabs aus dem Programm über Datei -> Overlay laden abgerufen werden. Es ist möglich, mehrere Overlays zu überlagern. Da die Overlays nicht mit der Quelldatenbank Feldexperimente.mdb verknüpft sind, ist es allerdings nicht möglich, hiermit die einem dargestellten Punkt zugeordneten Daten abzurufen. Folgende Overlays liegen vor:

Sr-90_Chern.ovl

Sr-90_Fall.ovl

Cs-134,137_Chern.ovl

Cs-137_Fall.ovl

Cs-137_Chern.ovl

Cs-134_Chern.ovl

3.1.3. Räumliche Verteilung der Messpunkte für Radiocäsium und Radiostrontium

Die ermittelten Transferfaktoren für Radiocäsium aus dem Kernwaffenfallout sind über Deutschland ungleich verteilt. Freilandexperimente wurden im Wesentlichen in Rheinland-Pfalz und in der Nähe der Großforschungseinrichtungen durchgeführt. Des Weiteren sind noch Untersuchungen im Raum Gorleben und aus der Bremer Umgebung in die Datenbank aufgenommen worden. Aus anderen Gegenden liegen keine Untersuchungen vor (siehe Karte Anhang 4). Nach dem Chernobylunfall wurden die Untersuchungen intensiviert und es

liegen mit Ausnahme der neuen Bundesländer sowohl für Cs-134 (Karte Anhang 6) als auch für Cs-137 (Karte Anhang 5) Daten vor. Sr-90-Untersuchungen aus Freilandexperimenten konzentrieren sich auf das südwestliche und südliche Deutschland; in den nördlichen Bundesländern konnten keine Untersuchungen nach dem Chernobylunfall nachgewiesen werden (Karte Anhang 7).

3.2. Geostatistische Analysen

Die Aufnahme von Radionukliden über den Wurzelpfad in die Pflanze ist von einer Vielzahl von Eigenschaften abhängig. Ein Hauptfaktor sollte dabei die Radionuklidkonzentration im Boden sein, die wiederum von der lokalen Verteilung und der Menge der Niederschläge abhängig ist. Aber auch andere Faktoren spielen eine Rolle, wie beispielsweise Bodeneigenschaften, Nutzungsweise usw. Als Untersuchungshypothese wird unterstellt, dass es eine räumlich bedingte Variabilität bei den Transferfaktoren gibt. Trifft dies zu, dann würde der Transferfaktor bis zu einer Entfernung z von den räumlichen Eigenschaften abhängen, darüber hinaus wäre er unabhängig. Kennt man diese Eigenschaft, beispielsweise bei wichtigen Futter- und Nahrungsmitteln, können bei einem Störfall die notwendigen Untersuchungen in Abhängigkeit von den verfügbaren Ressourcen so gestaltet werden, dass die gezogenen Proben als räumlich voneinander unabhängig betrachtet werden können.

Mit geostatistischen Methoden kann die räumliche Abhängigkeit und die flächenhafte Verteilung von (Boden-)Eigenschaften ermittelt werden. Über ein Variogramm lässt sich die Struktur der räumlichen Abhängigkeit eines Merkmals in einem Untersuchungsgebiet ermitteln (WEBS90). ALBE00 konnten beispielsweise auf einer Untersuchungsfläche von 100 m x 100 m nachweisen, dass die Cs-Konzentration in den Pflanzen eine räumliche Abhängigkeit aufweist, die durch unterschiedliche Pflanzengesellschaften auf der Fläche bedingt ist.

Die vorliegenden Daten wurden einer geostatistischen Analyse unterzogen. Dabei wird unterstellt, dass die Werte zwar zufallsverteilt, aber über das Untersuchungsgebiet gleichmäßig verteilt sind. Zudem sollten für die Erstellung eines Variogramms etwa 400 Datensätze (Probenahmestellen) vorliegen. Für eine Analyse der räumlichen Abhängigkeit von Radionukliden im Untersuchungsgebiet (Westdeutschland) erfüllen nur die zusammengefassten Datensätze für die Radiocäsiumaufnahme bei „Getreide“ und „Gras“ annähernd diese Voraussetzung, weil dort zumindest näherungsweise botanische bzw. physiologische Unterschiede in der Nuklidaufnahme ausgeschlossen werden können.

Zudem konnten nur Datensätze aus der vorliegenden Datenbank für eine geostatistische Analyse herangezogen werden, bei denen der normierte Transferfaktor (TF_{norm}) mit folgenden Eigenschaften vorhanden war:

- Es muss sich um eine Fallout- oder Chernobylkontamination handeln.
- Die Ortsbezeichnung musste so eindeutig sein, dass ein Rechts- und Hochwert ermittelt werden konnte.
- Die Pflanzen lassen sich eindeutig bestimmten Kategorien zuordnen.

In die geostatistische Auswertung können nur Transferfaktoren einfließen, die singularär einem Ort zuzuordnen sind. Daher wurde bei doppelten oder mehrfachen Transferfaktoren (bezogen auf einen Ort) der Mittelwert gebildet und dieser für die Analyse genommen. Dieses Verfahren reduziert allerdings die Anzahl erheblich, so dass die empfohlenen 400 Datensätze nicht erreicht werden konnten.

Für die genaue Zuordnung der Daten in einem räumlichen XY-Koordinatensystem mit genau definierten Abständen eigneten sich die ermittelten Rechts- und Hochwerte nicht, da diese, auf Deutschland bezogen, kein einheitliches Abstandsgitter zulassen. Daher wurden die Längen- und Breitengrade der Punkte ermittelt und näherungsweise (Längengrad in Minuten x 1,15 km; Breitengrad in Minuten x 1,85 km) der Abstand der Punkte in Kilometer berechnet. Vor der geostatistischen Analyse wurden die log-normal verteilten Transferfaktoren (Chi-Quadrat-Test) entsprechend $\log_e(TF_{norm})$ transformiert.

3.2.1. Räumliche Abhängigkeit der Radiocäsium-Transferfaktoren von „Gras“- Proben

Gemäß den genannten Bedingungen konnten aus einem Datensatz von 913 Radiocäsium-Transferfaktoren für „Gras“ 263 individuelle Mittel- oder Einzelwerte jeweils auf einen definierten Ort bezogen werden. Die Punkte waren über das Untersuchungsgebiet (Westdeutschland) relativ gleichmäßig verteilt (siehe dazu die räumliche Verteilung der Transferdaten in Anhang 4 und 5). Mit diesen Wertepaaren wurde ein Semivariogramm berechnet (Abb. 7).

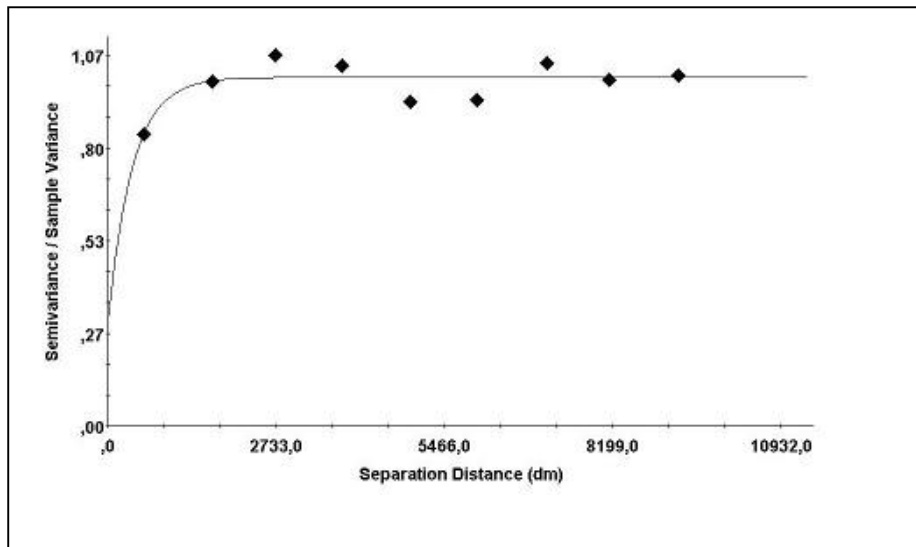


Abb. 7: Semivariogramm der Radiocäsium-Transferdaten für das Untersuchungsgebiet Westdeutschland.

Bei der Abschätzung der räumlichen Korrelation konnte ein Range (d.h. der Abstand, ab dem die Werte als räumlich unabhängig voneinander betrachtet werden müssen) von **98 km** bei einem r^2 von 0,595 ermittelt werden. Allerdings muss beachtet werden, dass aufgrund der Zusammenstellung aus vielen Datenquellen eine hohe Vielfältigkeit in den Probenahme- und Analysebedingungen besteht, die eine abgesicherte Aussage in Bezug auf den räumlichen Zusammenhang nur bedingt zulassen. Auch ein regionaler Bezug der Untersuchungsorte von Arbeitsgruppen könnte eine scheinbare räumliche (Un-)Abhängigkeit bewirken, weil der Probenahme-Aktionsradius oftmals in der Größenordnung des Range liegt und daher Analyse- und Handhabungsunterschiede der Laboratorien eine Rolle spielen könnten. Daher kann dieses Ergebnis nur verifiziert werden, wenn die Probenahmebedingungen möglichst konstant sind, Analyseunsicherheiten weitestgehend ausgeschlossen werden können und dabei ein unterschiedlich weites Raster (vom mikro- bis hin zum makroskaligen Bereich) untersucht wird. Dann kann z.B. festgestellt werden, wie sich kleinräumige Varianzen im Vergleich zu großräumigen Varianzen verhalten und damit auch, ob letztendlich Semivariogramme die räumliche Variabilität von Transferfaktoren auf makroskaliger Ebene überhaupt beschreiben. Trotzdem kann es sinnvoll sein, im Störfall auf ein Probenahmeraster in bestimmten Größenordnungen (hier ca. 100 km) zurückzugreifen, wenn die sonstigen Bedingungen möglichst konstant gehalten werden.

3.2.2. Räumliche Abhängigkeit der Radiocäsium-Transferfaktoren bei „Getreide“-Proben

Die Datensätze bei „Getreide“ wurden analog zu den „Gras“-Daten aus der Datenbank extrahiert. Von insgesamt 553 Datensätzen konnten 103 individuellen Koordinaten zugeordnet werden, für den Rest wurden wie schon bei „Gras“ Mittelwerte aus den Transferdaten gebildet und den Probenahmepunkten zugeordnet.

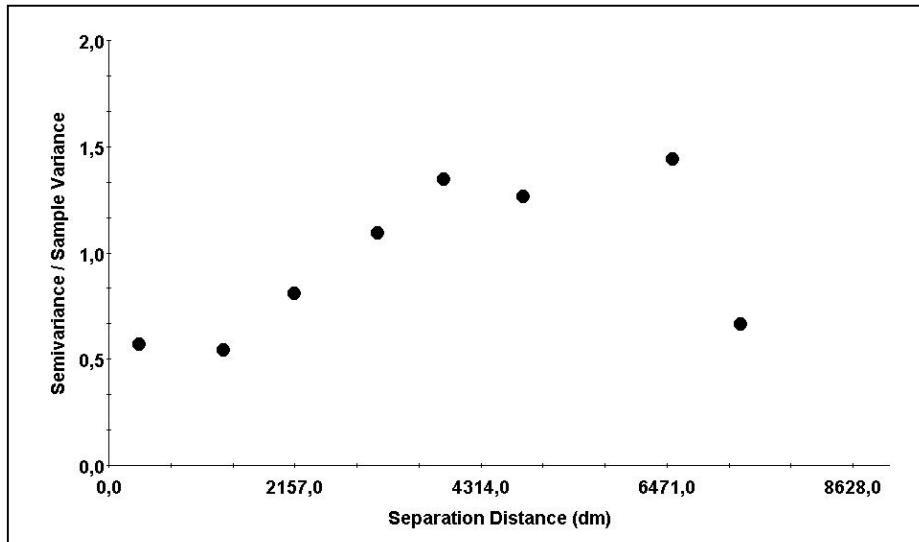


Abb. 8: Semivariogramm des Cäsium-Transferfaktors (TF_{norm}) für Getreide.

Im Gegensatz zu den „Gras“-Transferfaktoren konnte im Semivariogramm (Abb. 8) kein Modell mit einem $r^2 > 0,2$ angepasst werden, d.h. eine räumliche Abhängigkeit liegt nicht vor bzw. tritt nur unterhalb des kleinsten Beprobungsabstandes auf. Allerdings könnte auch hier ein systematischer Fehler auftreten, weil im Gegensatz zu den „Gras“-Daten die Probenahmestellen nur sehr ungleich verteilt sind: Die Punkte sind überwiegend südlich der Donau konzentriert, während in den westlichen Bundesländern Hessen, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen der Transferfaktor von Getreide kaum untersucht wurde.

4. Statistische Auswertung

4.1. Radiocäsium

4.1.1. Statistische Kenngrößen

In der vorliegenden Datentabelle sind insgesamt 2451 Transferfaktoren für das Isotop Cs-137 und 854 Datensätze für das Isotop Cs-134 aufgenommen worden. Die wichtigsten Kenngrößen für den Transferfaktor sind in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Wichtige statistische Kenngrößen der Radiocäsium-Transferfaktoren.

	N	Geom. Mittelwert	Median	Minimum/ Maximum
Cs-134	854	1,22	0,84	0,002/1307
Cs-137	2451	0,36	0,22	0,0001/1168
Cs-137/Cs-134	3305	0,49	0,30	0,0001/1307

Auffallend ist der hohe Wertebereich, der von sehr geringen Transferfaktoren wie 0,0001 für Roggen (Karyopse) aus einem Lysimeterversuch (STEF88) bis hin zu 1307 als

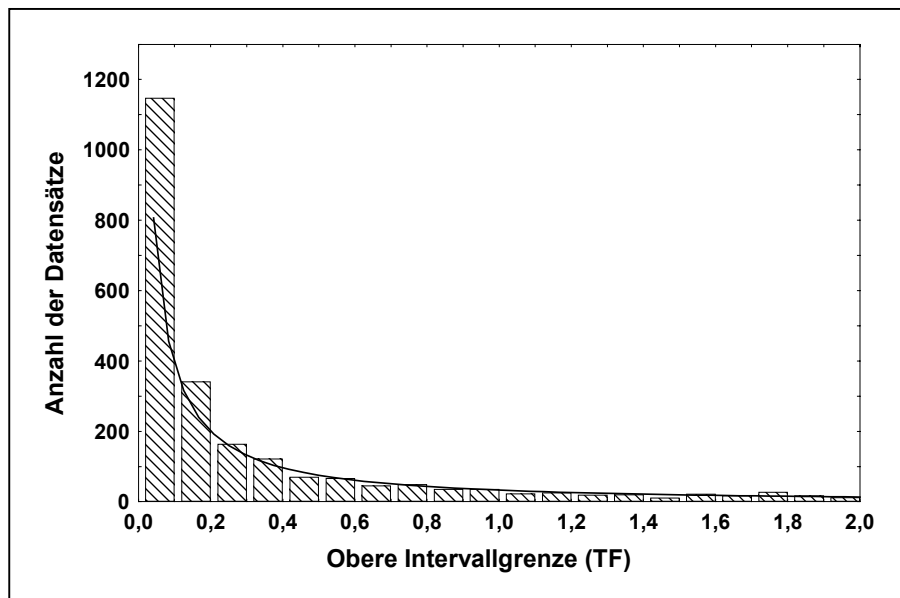


Abb. 9: Verteilungsmuster der Transferfaktoren für Cs-134/137. N= 3305; log-normale Verteilung ($p < 0,001$).

Ausnahmewert für Farn auf einem Niedermoorstandort (WILH89) reicht, auf dem offensichtlich Radiocäsium so mobil war, dass die Bezugsgröße Boden nur eine untergeordnete Rolle gespielt haben könnte.

Die Verteilung der Datensätze macht Abb. 9 deutlich. Diese folgt einer log-normalen Verteilung, d.h. mit zunehmendem Transferfaktor sinkt die Anzahl der Datensätze in der entsprechenden Klasse. Daher sind statistische Methoden für nicht normalverteilte Daten anzuwenden. Unterschiede zwischen einzelnen Gruppen wurden mit dem Mann-Whitney-U-Test ermittelt, Korrelationen mit dem Spearman-Rank-Korrelation-Verfahren getestet. Als Mittelwert wurde das geometrische Mittel angegeben.

4.1.2. Cs-Transferfaktoren für Boden- und Pflanzenkategorien

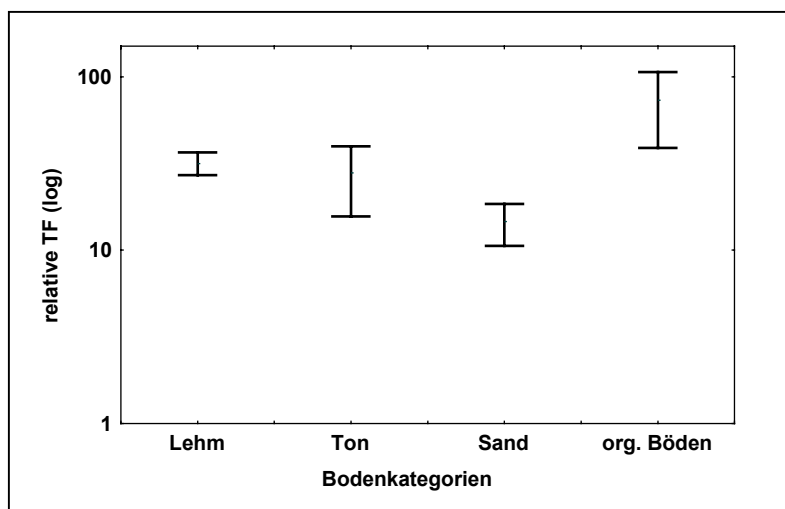
Die Aufnahme von Radionukliden wird in erster Linie von Pflanzen- und Bodeneigenschaften bestimmt. Ziel dieser Auswertung ist es daher, für eine Reihe von Bodeneigenschaften in Kombination mit einer Pflanzeneinordnung einen möglichst allgemeingültigen Transferfaktor zu bestimmen. Tab. 4 gibt einen Überblick über die Zahl der in der Datenbank vorhandenen Datensätze für verschiedene Kombinationen von Pflanzeneinordnungen und Bodeneigenschaften. Die Pflanzeneinordnungen wurden dabei so gewählt, dass einerseits eine möglichst hohe Anzahl von Datensätzen in einer Gruppe zusammengefasst werden konnte, andererseits sowohl die Wuchsform (Hackfrüchte versus Getreide) wie auch die Bedeutung als Nahrungs- bzw. Futtermittel berücksichtigt werden konnte (Gemüse versus Gras). Die im Abschlussbericht näher betrachteten Kombinationen Pflanze/Boden sollen einen allgemeinen Überblick geben; über ein spezielles Abfragemodul (siehe Kapitel 2.3.4.) kann der Mittelwert jeder einzelnen Pflanzenart bzw. Pflanzeneinordnung abgefragt werden.

Tab. 4: Zahl der Datensätze in den einzelnen Kategorien für Radiocäsium.

	Sand	Lehm	Ton	Org. Böden	Summe
Getreide	220	181	11	1	413
Futterpflanzen	11	4	2	0	17
Gras	195	90	26	26	337
Gemüse	225	21	0	0	246
Früchte	141	579	76	37	833
Hackfrüchte	31	3	3	0	37
Wildpflanzen	111	201	34	71	417
Andere (Tabak)	4	0	0	0	4
Summe	938	1079	152	135	2304

Abb. 10 gibt die Konfidenzintervalle der arithmetischen Mittelwerte der Cs-Transferfaktoren für die Bodenkategorien an. Die absoluten TF-Werte werden durch die Veröffentlichung von WILH89 geprägt, aus der extrem hohe Transferfaktoren für Waldgebiete in Süddeutschland nach dem Chernobylunfall resultieren und die mit über 400 hohen Einzelwerten einen großen Einfluss auf die Mittelwertbildung haben.

Abb. 10: Konfidenzintervalle der arithmetischen Mittelwerte der Transferfaktoren für Cs-Isotope in den



unterschiedlichen Bodenkategorien.

Als geometrisches Mittel wurde ein Transferfaktor von 0,3 für Sand, für Lehm 1,2, für Ton 1,5 und für organische Böden 6,2 berechnet. Die Werte für Ton und Lehm sind nicht signifikant unterscheidbar (U-Test, $p > 0,05$), während organische Böden mit ihren spezifischen Eigenschaften die höchsten Transferfaktoren zeigen.

Tab. 5: Vergleich zwischen den „empfohlenen“ Transferfaktoren (recom. values) aus der IUR-Database für verschiedene Pflanzeneinordnungen nach den Veröffentlichungen von NISB99 und FRIS92 und den geometrischen Mittelwerten aus dieser Studie (Mittelwert gebildet über alle Experimentklassen).

Pflanzeneinordnung	Boden	NISB99		Diese Studie	
		N	Recom. values	N	Geom. Mittel
Getreide Cereals (NISB99)	Sand	208	0,021	220	0,037
	Lehm	358	0,014	181	0,012
	Ton	49	0,011	11	0,077
Gemüse Green vegetables (NISB99)	Sand	72	0,21	225	0,13
	Lehm	100	0,12	21	0,048
Wurzelgemüse einschl. Kartoffeln Root vegetables (NISB99)	Sand	38	0,054	91	0,071
	Lehm	52	0,037	7	0,034
Gras (FRIS92)	Sand	229	0,24	195	0,35
	Lehm	246	0,11	90	0,21
	Moor	21	0,53	26	1,04

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemittelten Transferfaktoren dieser Studie und den Daten von NISB99 konnte nachgewiesen werden (Tab. 5). Bis auf eine Ausnahme (Getreide auf tonigen Böden) unterscheiden sich die Transferfaktoren höchstens um den Faktor 2,5, was angesichts der großen Variabilität der untersuchten Datensätze als gering angesehen werden kann. Die normierten Transferfaktoren für die o.g. Pflanzeneinordnungen (einschließlich Gras auf Moorböden) können daher als abgesichert gelten.

4.1.3. Cs-Transferfaktoren nach Experimentklassen

Nachfolgend wurde getestet, ob die Experimentklassen signifikanten Einfluss auf den Transferfaktor von Pflanzeneinordnungen haben. Der geometrische Mittelwert und die Anzahl der Datensätze sind in Tab. 6 angegeben.

Generell kann beobachtet werden, dass der Transferfaktor bei Feldexperimenten höher liegt als bei Lysimeter- und Topfversuchen. Dies konnte NISB99 bestätigen. Die Unterschiede liegen mehrheitlich bei einem Faktor von etwa 4 bis 8. Offensichtlich sind unter kontrollierten Bedingungen Einflussfaktoren wie Direktkontamination und Resuspension sehr viel besser auszuschließen als im Freiland. Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Experimentklassen konnten in der Regel zwischen Lysimeter- und Topfexperimenten festgestellt werden.

Tab. 6: Transferfaktoren von Cs134/137 verschiedener Kombinationen von Pflanzeneinordnungen, Experimentklassen und Bodenkategorien.

	N	Geom. Mittel		N	Geom. Mittel
Sand			Lehm		
Getreide/Feld	121	0,078	Getreide/Feld	176	0,013
Getreide/Lysimeter	71	0,015	Getreide/Topf	5	0,005
Getreide/Topf	28	0,014	Gras/Feld	56	0,334
Gras/Feld	117	0,597	Gras/Lysimeter	8	0,266
Gras/Lysimeter	61	0,118	Gras/Topf	26	0,073
Gras/Topf	17	0,500	Gemüse/Feld	6	0,300
Gemüse/Feld	57	0,559	Gemüse/Topf	15	0,024
Gemüse/Lysimeter	141	0,080	Ton		
Gemüse/Topf	27	0,086	Gras/Feld	6	0,168
Hackfrüchte/Feld	19	0,164	Gras/Topf	20	0,130
Hackfrüchte/ Lysimeter	6	0,022			
Hackfrüchte/Topf	6	0,037			

4.1.4. Cs-Transferfaktoren nach unterschiedlichen Kontaminationstypen

Um zu testen, ob die drei Kontaminationstypen globaler Fallout, Einträge infolge des Chernobyl-Reaktorunfalls oder die experimentelle (künstliche) Kontamination einen signifikanten Einfluss auf den Transferfaktor haben, wurden diese für einzelne Pflanzeneinordnungen ausgewertet. Tabelle 7 gibt den geometrischen Mittelwert und die Anzahl der Datensätze für die einzelnen Kontaminationstypen an.

Tab. 7: TF_{norm} aufgeschlüsselt nach Kontaminationstypen.

	N	Geom. Mittel		N	Geom. Mittel
Sand			Lehm		
Getreide/Fallout	110	0,11	Getreide/Fallout	51	0,091
Getreide/Chernobyl	24	0,020	Getreide/Chernobyl	125	0,006
Getreide/künstlich	86	0,011	Getreide/künstlich	5	0,005
Gras/Fallout	70	0,27	Gras/Fallout	31	0,14
Gras/Chernobyl	68	0,92	Gras/Chernobyl	25	0,98
Gras/künstlich	57	0,16	Gras/künstlich	34	0,099
Gemüse/Fallout	57	0,56	Gemüse/Fallout	6	0,30
Gemüse/Chernobyl	16	0,32	Gemüse/künstlich	15	0,024
Gemüse/künstlich	152	0,070	Früchte/Fallout	42	0,088
Hackfrüchte/Fallout	19	0,16	Früchte/Chernobyl	537	2,40
Hackfrüchte/ künstlich	12	0,029			
Ton			Org. Böden		
Gras/Fallout	5	0,14	Gras/Fallout	13	0,77
Gras/künstlich	20	0,13	Gras/Chernobyl	10	1,56

Die normierten Transferfaktoren sind bis auf wenige Ausnahmen bei verschiedenen Kontaminationstypen signifikant unterschiedlich (U-Test, $p < 0,05$). Lediglich bei Ton konnten Werte aus den Versuchen mit künstlicher Kontamination denen von Fallout-Experimenten gleichgestellt werden. In den einzelnen Bodenkategorien und Pflanzeneinordnungen zeigen die Fallout- und Chernobyl-Transferfaktoren kein einheitliches Verhalten; teilweise wurden höhere, teilweise niedrigere Transferfaktoren ermittelt. Eine allgemeingültige Aussage im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Werte kann daher nicht gemacht werden – um die Datengrundlage zu verbreitern, wurde daher nicht zwischen den Kontaminationstypen unterschieden.

4.1.5. Radiocäsium-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern

4.1.5.1. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Kaliumkonzentration in der Pflanze

Zwischen der Kalium- und der Radiocäsiumkonzentration der Pflanze besteht ein signifikanter Zusammenhang (Spearman-Rank-Korrelation; N=1907; R=0,178; p<0,001) wie auch zwischen dem normierten Transferfaktor und der Kaliumkonzentration der Pflanze (Spearman-Rank-Korrelation; N=1970; R=0,087; p<0,001). Diese Korrelation wird durch hohe TF-Werte stabilisiert, ist aber auch noch signifikant, wenn nur die Werte bis zum 90. Perzentil berücksichtigt werden (Spearman-Rank-Korrelation; N=1864; R=1,944; p<0,05). Tabelle 8 zeigt den Zusammenhang zwischen den Transferfaktoren und der Kaliumkonzentration in den wichtigsten Pflanzeneinordnungen mit N≥60.

Tab. 8: Transferfaktor in Abhängigkeit von der K-Konzentration der Pflanze.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	116	0,3356	<0,001
Getreide/Lehm	144	0,1069	n.s.
Gras/Sand	135	-0,5051	<0,001
Gemüse/Sand	60	0,3950	<0,05
Früchte/Sand	91	-0,3686	<0,001
Früchte/Lehm	361	-0,4028	<0,001
Wildpflanzen/Sand	94	0,4593	<0,001
Wildpflanzen/Lehm	82	-0,1442	n.s.

n.s. = nicht signifikant

Auch wenn die Korrelationen in den meisten Fällen hoch signifikant sind, kann der positive Zusammenhang zwischen der Kaliumkonzentration der Pflanze und dem normierten Transferfaktor nicht bestätigt werden. Es gibt durchaus Pflanzeneinordnungen, deren Kaliumkonzentration hochsignifikant negativ mit dem Transferfaktor korreliert ist.

4.1.5.2. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit vom verfügbaren Kaliumgehalt des Bodens

Der normierte Transferfaktor ist mit dem verfügbaren Kaliumgehalt des Bodens hochsignifikant negativ korreliert (Spearman-Rank-Korrelation; N=2292; R=-0,6174; p<0,001). Dies gilt auch, wenn nur die Transferdaten bis zum 90. Perzentil berücksichtigt werden. Signifikant negativ korreliert ist auch der Transferfaktor in den einzelnen Pflanzeneinordnungen, wenn N≥56 (siehe Tab. 9).

Die Abhängigkeit des Transferfaktors vom verfügbaren Kaliumgehalt des Bodens kann über alle Datensätze hinweg als gesichert betrachtet werden. Auch NISB99 konnte auf Grundlage der IUR-Database diesen Zusammenhang nachweisen.

Tab. 9: Transferfaktor in Abhängigkeit vom verfügbaren Kaliumgehalt des Bodens.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	216	-0,0816	n.s.
Getreide/Lehm	165	-0,3475	<0,001
Gras/Sand	195	-0,3556	<0,001
Gras/Lehm	89	-0,1807	n.s.
Früchte/Sand	140	-0,6560	<0,001
Früchte/Lehm	530	-0,7155	<0,001
Früchte/Ton	56	-0,7106	<0,001
Wildpflanzen/Sand	110	-0,7830	<0,001
Wildpflanzen/Lehm	163	-0,2034	<0,01

n.s. = nicht signifikant

4.1.5.3. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens

Der pH-Wert des Bodens ist über alle relevanten Datensätze von Radiocäsium hinweg hochsignifikant negativ korreliert mit dem normierten Transferfaktor (Spearman-Rank-Korrelation; N=2970; R=-0,6404; p <0,001). Auch wenn nur die Werte bis zum 90. Perzentil berücksichtigt werden, bleibt dieser Zusammenhang hochsignifikant. Bei Betrachtung der Zusammenhänge in den einzelnen Pflanzeneinordnungen bestätigt sich die negative Korrelation; diese ist auch bei der Hälfte der Fälle signifikant abgesichert (Tab. 10). Ebenfalls fanden NISB99 signifikant negative Korrelationen zwischen dem pH-Wert und dem Transferfaktor, allerdings bei Wurzelgemüse auch eine positive Korrelation.

Tab. 10: TF_{norm} in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	216	-0,0827	n.s.
Getreide/Lehm	181	-0,0736	n.s.
Gras/Sand	195	-0,5814	<0,001
Gras/Lehm	89	-0,5849	<0,001
Gemüse/Sand	225	-0,0606	n.s.
Früchte/Sand	141	-0,5618	<0,001
Früchte/Lehm	568	-0,6484	<0,001
Früchte/Ton	76	-0,4795	<0,001
Wildpflanzen/Sand	111	-0,0505	n.s.
Wildpflanzen/Lehm	180	-0,0390	n.s.

n.s. = nicht signifikant

4.1.5.4. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens

Der Tongehalt ist ebenfalls hochsignifikant negativ korreliert mit dem normierten Transferfaktor (Spearman-Rank-Korrelation; N=1381; R=-0,2682; p <0,001).

Bei Betrachtung von ausgewählten Kombinationen Pflanze/Boden (Tab. 11) ist dieser Zusammenhang zumindest bei Sandböden eindeutig und hochsignifikant: Je höher der Tongehalt, desto geringer ist der Transferfaktor. Bei Böden mit einem generell höheren Gehalt an Ton, wie z.B. Lehm, ist die Korrelation nicht mehr signifikant.

Tab. 11: TF_{norm} in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens bei einzelnen Pflanzeneinordnungen.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	220	-0,2153	<0,01
Getreide/Lehm	165	-0,1407	n.s.
Gras/Sand	188	-0,5281	<0,001
Gras/Lehm	65	-0,0238	n.s.
Gemüse/Sand	225	-0,2282	<0,001
Früchte/Lehm	186	0,1065	n.s.

n.s. = nicht signifikant

4.1.5.5. Cs-Transferfaktor in Abhängigkeit von der organischen Substanz des Bodens

Wie auch schon von anderen Autoren (LIVE91, FRIS90) nachgewiesen, ist die organische Substanz hochsignifikant positiv korreliert mit dem normierten Transferfaktor (Spearman-Rank-Korrelation; N=2733; R=0,5291; p <0,001). Dies ist unverändert der Fall, wenn nur die TF bis zum 90. Perzentil berücksichtigt werden. Allerdings ist dieser Trend nicht so eindeutig, wenn unterschiedliche Pflanzeneinordnungen betrachtet werden (N≥89, Tab. 12), wie auch in der Untersuchung von NISB99 bestätigt wird.

Tab. 12: TF_{norm} in Abhängigkeit von der organischen Substanz des Bodens bei einzelnen Pflanzeneinordnungen.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	193	-0,0067	n.s.
Getreide/Lehm	172	-0,1719	<0,05
Gras/Sand	194	0,2068	<0,05
Gras/Lehm	89	0,1662	n.s.
Gemüse/Sand	223	-0,1511	<0,05
Früchte/Sand	125	0,3069	<0,001
Früchte/Lehm	519	0,6877	<0,001
Wildpflanzen/Sand	93	0,4811	<0,001
Wildpflanzen/Lehm	159	0,2345	<0,01

n.s. = nicht signifikant

Bei Getreide und Gemüse wird sogar keine Abhängigkeit bzw. eine schwach negative Korrelation festgestellt. Lediglich bei Kategorien, die einen weiten Bereich an organischer Substanz im Boden repräsentieren, kann die eindeutige positive Abhängigkeit bestätigt werden.

4.2. Radiostrontium

4.2.1. Statistische Kenngrößen

In der vorliegenden Datenbank wurden Experimente mit den Strontium-Isotopen Sr-85, Sr-89 sowie Sr-90 aufgenommen. Das geometrische Mittel des normierten Transferfaktors beträgt für Sr-85 bei einem N von 60 Datensätzen 0,66; für Sr-89 (N = 121) 7,55 und für Sr-90 (N = 828) 1,40. Allerdings beruhen die Datensätze für Sr-85 nur auf zwei Veröffentlichungen (HAIS85a; STEF88) und für das Isotop Sr-89 nur auf einer Arbeit aus dem Jahre 1967 (GUEN67), während für Sr-90 auf insgesamt 15 verschiedene Veröffentlichungen zurückgegriffen werden konnte. Da ein unterschiedliches Verhalten der Strontium-Isotope in der Pflanze nicht nachzuweisen ist, wurde in der nachfolgenden Auswertung keine Unterscheidung zwischen den drei Isotopen vorgenommen. Das geometrische Mittel über alle Strontium-Datensätze liegt mit 1,64 (Minimum 0,012; Maximum 145; N = 1009) in der Größenordnung wie sie von der IAEA94 für verschiedene Kombinationen Pflanze/Boden veröffentlicht wurde.

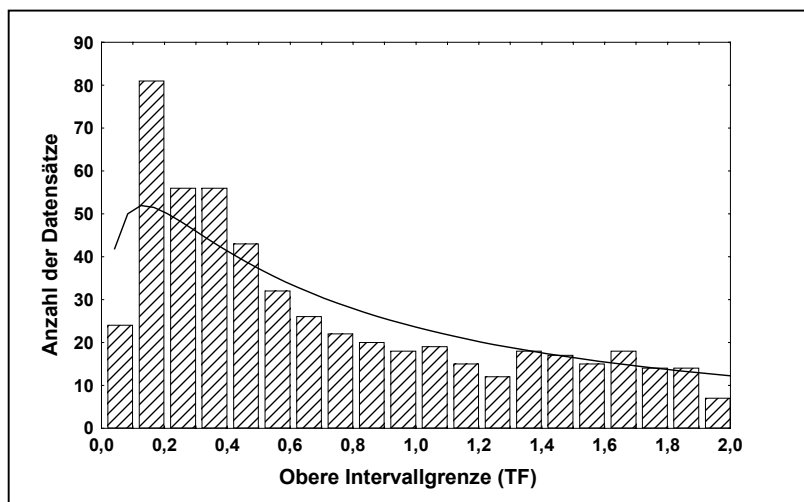


Abb. 11: Verteilungsmuster der Transferfaktoren für Sr-Isotope, N= 1009; log-normal, $p < 0,001$.

Die Verteilung der Datensätze macht Abb. 11 deutlich. Wie auch schon bei Radiocäsium folgt diese einer log-normalen Verteilung, so dass wie bei der Auswertung von Radiocäsium Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen mit dem Mann-Whitney-U-Test und

Korrelationen mit dem Spearman-Rank-Korrelation-Verfahren getestet wurden. Als Mittelwert wurde das geometrische Mittel angegeben.

4.2.2. Sr-Transferfaktoren für einzelne Boden- und Pflanzenkategorien

Die Aufnahme von Strontium wird in erster Linie von den Pflanzen- und Bodeneigenschaften dominiert. Wie auch bei Radiocäsium, wurden in Anlehnung an die Untersuchungen der IUR (NISB99) bestimmte Eigenschaften in Gruppen zusammengefasst. Diese sind in Tab. 13 aufgelistet. Dabei konnten 969 Datensätze eindeutig zugeordnet werden; bei 40 Datensätzen (Differenz zu N=1009) fehlten Aussagen zu den untersuchten Böden.

Tab. 13: Zahl der Datensätze für Strontium-Isotope in den einzelnen Kategorien.

	Sand	Lehm	Ton	Org. Böden	Summe
Getreide	211	60	10	1	282
Futterpflanzen	74	20	0	2	96
Gras	142	43	0	7	192
Gemüse	210	11	0	0	221
Früchte	20	116	0	0	136
Hackfrüchte	32	3	3	0	38
Wildpflanzen	0	0	0	0	0
Andere (Tabak)	4	0	0	0	4
Summe	693	253	13	10	969

In Tabelle 14 sind die wesentlichen statistischen Kenngrößen des normierten Transferfaktors für einzelne Bodenkategorien aufgeführt.

Tab. 14: Kenngrößen des TF_{norm} für Strontium für einzelne Bodenkategorien.

	Sand	Lehm	Ton	Org. Böden
N	693	253	13	10
Geometrisches Mittel	1,94	1,00	0,47	1,22
Minimum	0,01	0,024	0,126	0,04
Maximum	145	20,70	3,58	1,90
*	a,d	b,d	c	d

*Gleiche Buchstaben kennzeichnen Gruppen, die sich nicht signifikant unterscheiden (U-Test).

Die Mittelwerte für die einzelnen Bodenkategorien unterscheiden sich bei den Mineralböden signifikant voneinander. Die Transferfaktoren sind auf Sandböden im Durchschnitt doppelt so hoch wie solche auf Lehmböden, die wiederum um etwa den Faktor 2 höhere Strontium-Transferfaktoren aufweisen als Tonböden. Im Gegensatz zum Radiocäsium ist Strontium in organischen Böden offensichtlich nicht so pflanzenverfügbar; die Aufnahme ist geringer als bei Sand, wenn auch aufgrund der niedrigen Anzahl der Werte die Unterschiede nicht signifikant sind. Die Ergebnisse werden bestätigt durch die Auflistung in IAEA94, die bei den

meisten Kombinationen Pflanze/Boden auf Moorböden niedrigere Werte angibt als auf sandigen Standorten.

Wie auch bei den anderen untersuchten Radionukliden wurden die Strontium-Transferfaktoren mit denen der IUR-Databse (NISB99) und dem „Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments“ (IAEA94) verglichen (Tab. 15).

Tab. 15: Vergleich zwischen den „empfohlenen“ Transferfaktoren für Strontium (recom. values) aus der IUR-Databse für verschiedene Pflanzeneinordnungen nach den Veröffentlichungen von NISB99 und IAEA94 und den geometrischen Mittelwerten aus dieser Studie (Mittelwert gebildet über alle Experimentklassen).

Pflanzeneinordnung	Boden	NISB99		Diese Studie	
		N	Recom. values	N	Geom. Mittel
Getreide Cereals (NISB99)	Sand	112	0,23	211	0,67
	Lehm	88	0,15	60	0,36
	Ton	21	0,071	10	0,50
Gemüse Green vegetables (NISB99)	Sand	54	3,2	210	2,8
	Lehm	75	2,4	11	1,6
Wurzelgemüse einschl. Kartoffeln Root vegetables (NISB99)	Sand	32	1,5	90	1,3
	Lehm	29	1,6	2	0,79
Gras (IAEA94)	Sand	115	1,7	142	2,5
	Lehm	70	1,1	43	1,4
	Moor	4	0,34	7	1,3

Recom. values = Recommended values (NISB99)

Wie auch schon für Radiocäsium ergibt sich in der Regel auch für Strontium eine weitgehende Übereinstimmung der gemittelten Transferfaktoren mit denen von Nisbet et al. (NISB99) und denen aus dem IAEA-Handbuch (IAEA94). Lediglich bei Getreide auf Tonböden wurden aus der vorliegenden Datenbank um den Faktor 7 höhere durchschnittliche Transferfaktoren ermittelt als die von der IUR bzw. die von der IAEA veröffentlichten Daten basierend auf einer älteren Zusammenstellung der IUR. Alle anderen Mittelwerte unterscheiden sich maximal um den Faktor 4.

4.2.3. Sr-Transferfaktoren nach Experimentklassen

Aufgrund der geringen Anzahl der Werte bei den Bodenkategorien Ton und organische Böden konnten diese nicht weiter ausgewertet werden. Nachfolgend sind daher nur auf Sand bzw. Lehm Böden durchgeführte Experimente für die einzelnen Pflanzeneinordnungen näher betrachtet worden (Tab. 16).

Tab. 16: Transferfaktoren von Strontium verschiedener Pflanzeneinordnungen und Experimentklassen.

Sand	N	Geom. Mittel	Lehm	N	Geom. Mittel
Getreide/Feld	123	0,60	Getreide/Feld	55	0,43
Getreide/Lysimeter	58	1,09	Getreide/Topf	5	0,05
Getreide/Topf	30	0,41	Gras/Feld	25	0,95
Futterpflanzen/ Lysimeter	8	1,30	Gras/Topf	18	2,33
Futterpflanzen/Topf	65	12,83	Gemüse/Feld	6	1,41
Gras/Feld	79	2,24	Gemüse/Topf	5	1,97
Gras/Lysimeter	38	1,60			
Gras/Topf	25	6,58			
Gemüse/Feld	62	1,17			
Gemüse/Lysimeter	126	3,55			
Gemüse/Topf	22	8,14			
Hackfrüchte/Feld	20	3,82			
Hackfrüchte/ Lysimeter	6	2,29			
Hackfrüchte/Topf	6	1,89			

Bei der Strontiumaufnahme kann im Gegensatz zu Radiocäsium kein genereller Trend in Bezug auf die Experimentklassen nachgewiesen werden. Signifikante Unterschiede (U-Test, $p < 0,05$) zwischen Feld- und Lysimeterversuchen wurden nur bei Gemüse/Sand nachgewiesen. Zwischen Topf- und Feldversuchen waren die Differenzen im TF-Wert zum größten Teil signifikant, aber beispielsweise in der wichtigen Gruppe Getreide/Sand konnten keine eindeutigen Unterschiede nachgewiesen werden. Zudem war der Trend nicht eindeutig: In Topfversuchen wurden teilweise höhere Aufnahmen, teilweise niedrigere Transferfaktoren nachgewiesen. Um eine generelle Vergleichbarkeit mit den Werten aus der IUR-Datenbank zu gewährleisten (NISB99), wurde wie auch dort auf eine Differenzierung in die einzelnen Experimentklassen verzichtet.

4.2.4. Sr-Transferfaktoren nach unterschiedlichen Kontaminationstypen

Strontiumexperimente in der vorliegenden Datenbank wurden an Freilandproben (Fallout) oder mit einer künstlichen Kontamination durchgeführt. Tab. 17 gibt den geometrischen Mittelwert und die Anzahl der Datensätze für Strontium-Transferfaktoren für die einzelnen Kontaminationstypen an.

Tab. 17: TF_{norm} für Strontium aufgeschlüsselt nach Kontaminationstypen.

	N	Geom. Mittel		N	Geom. Mittel
Sand			Lehm		
Getreide/Fallout	123	0,61	Getreide/Fallout	46	0,39
Getreide/künstlich	88	0,78	Getreide/künstlich	5	0,05
Gras/Fallout	79	2,24	Gras/Fallout	25	0,95
Gras/künstlich	63	2,80	Gras/künstlich	18	2,32
Gemüse/Fallout	62	1,17	Gemüse/Fallout	6	1,41
Gemüse/künstlich	148	4,02	Gemüse/künstlich	5	1,97
Hackfrüchte/Fallout	20	3,81			
Hackfrüchte/künstlich	12	2,07			

Mit Ausnahme von Hackfrüchten/Sand und Getreide/Lehm liegen die Aufnahmen auf den künstlich kontaminierten Böden höher als bei den Feldexperimenten mit globalem Fallout, allerdings gibt es bei Getreide, Gras, Hackfrüchten sowie Gemüse auf Lehmböden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Transferfaktoren bei künstlichem und atmosphärischem Eintrag. Lediglich bei Gemüse/Sand konnte bei künstlich kontaminierten Böden ein fast vierfach höherer Transfer als bei Feldexperimenten gefunden werden. Diese Ergebnisse stimmen mit Daten von NISB99 überein, die ebenfalls für die Strontiumaufnahme in Lysimeteruntersuchungen (Gemüse/Sand) eine um den Faktor 4 höhere Aufnahme im Vergleich zu Feldexperimenten gefunden hatten, für andere Kombinationen Pflanze/Boden jedoch nicht.

4.2.5. Sr-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern

4.2.5.1. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit von der Calciumkonzentration in der Pflanze

Zwischen der Ca-Konzentration in der Pflanze und dem normierten Transferfaktor besteht ein hochsignifikanter positiver Zusammenhang (Spearman-Rank-Korrelation; $N=543$; $R=0,7356$; $p<0,001$). Dieser grundsätzliche Zusammenhang kann auch bei den einzelnen Kombinationen Pflanze/Boden bestätigt werden (Tab. 18). Nach diesen Ergebnissen kann festgehalten werden, dass über die Ca-Konzentration in der Pflanze die Strontiumaufnahme ausreichend genau abgeschätzt werden kann.

Tab. 18: TF_{norm} in Abhängigkeit von der Ca-Konzentration in der Pflanze.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	94	0,4733	<0,001
Getreide/Lehm	21	0,4886	<0,05
Futterpflanzen/Sand	63	0,4702	<0,001
Futterpflanzen/Lehm	19	-0,2227	n.s.
Gras/Sand	84	-0,1012	n.s.
Gras/Lehm	41	0,8257	<0,001
Gemüse/Sand	54	0,5096	<0,001
Früchte/Sand	20	0,7083	<0,001
Früchte/Lehm	115	0,7440	<0,001
Hackfrüchte/Sand	18	0,7197	<0,001

n.s. = nicht signifikant

4.2.5.2. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit vom verfügbaren Ca-Gehalt des Bodens

Der normierte Transferfaktor für die Strontiumaufnahme ist mit dem verfügbaren Calciumgehalt des Bodens hochsignifikant negativ korreliert (Spearman-Rank-Korrelation; $N=860$; $R=-0,1914$; $p<0,001$). Allerdings kann dieses Ergebnis bei der Betrachtung verschiedener Kombinationen Pflanze/Boden nicht bestätigt werden (Tab. 19).

Tab. 19: Transferfaktor von Strontium in Abhängigkeit vom verfügbaren Calciumgehalt des Bodens.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	190	-0,2364	<0,01
Getreide/Lehm	22	0,1278	n.s.
Futterpflanzen/Sand	73	-0,1637	n.s.
Futterpflanzen/Lehm	19	-0,8397	<0,001
Gras/Sand	137	-0,5098	<0,001
Gras/Lehm	40	-0,1548	n.s.
Gemüse/Sand	198	-0,3489	<0,001
Früchte/Sand	20	0,5668	<0,01
Früchte/Lehm	116	-0,0790	n.s.
Hackfrüchte/Sand	31	-0,3733	n.s.

n.s. = nicht signifikant

Ausgehend von diesen Ergebnissen kann nicht empfohlen werden, den verfügbaren Ca-Gehalt des Bodens als Größe für die Abschätzung des Transferfaktors und damit für die Aufnahme von Strontium heranzuziehen. Auch NISB99 kommen zu den gleichen Ergebnissen für die von ihnen untersuchte europäische Transferfaktoren-Datenbank.

4.2.5.3. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens

Der pH-Wert des Bodens ist über alle relevanten Strontium-Datensätze hinweg hochsignifikant negativ korreliert mit dem normierten Transferfaktor (Spearman-Rank-

Korrelation; $N=953$; $R=-0,2330$; $p < 0,001$), d.h. mit steigendem pH-Wert sinkt der Transferfaktor für Strontium.

Wie auch beim verfügbaren Calcium korreliert der pH-Wert für die einzelnen Kombinationen Pflanze/Boden nicht sehr gut mit dem normierten Transferfaktor für Strontium-Isotope (Tab. 20). Lediglich bei Gemüse/Sand und Futterpflanzen/Sand besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Faktoren, was von NISB99 für eine Reihe von Kombinationen ebenfalls nachgewiesen werden konnte. Im Gegensatz zu NISB99 kann aber anhand dieser Ergebnisse nicht empfohlen werden, die Strontium-Aufnahme aus dem pH-Wert des Bodens abzuschätzen.

Tab. 20: TF_{norm} in Abhängigkeit vom pH-Wert des Bodens.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	205	-0,0545	n.s.
Getreide/Lehm	60	0,1775	n.s.
Futterpflanzen/Sand	74	-0,3841	<0,001
Futterpflanzen/Lehm	20	-0,3911	n.s.
Gras/Sand	142	-0,1559	n.s.
Gras/Lehm	43	0,3607	<0,05
Gemüse/Sand	201	-0,2791	<0,001
Früchte/Sand	20	0,1913	n.s.
Früchte/Lehm	116	-0,0404	n.s.
Hackfrüchte/Sand	32	-0,3166	n.s.

n.s. = nicht signifikant

4.2.5.4. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens

Zwischen Tongehalt und Strontiumaufnahme durch die Pflanze besteht kein signifikanter Zusammenhang (Spearman-Rank-Korrelation; $N=954$; $R=-0,054$; nicht signifikant). Auch für die verschiedenen Kombinationen Pflanze/Boden ergibt sich kein einheitliches Bild (Tab. 21).

Tab. 21: TF_{norm} in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens bei einzelnen Pflanzeneinordnungen.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	211	-0,0929	n.s.
Getreide/Lehm	51	0,5103	<0,001
Futterpflanzen/Sand	74	0,2692	<0,05
Futterpflanzen/Lehm	20	-0,0981	n.s.
Gras/Sand	142	0,0383	n.s.
Gras/Lehm	43	0,5611	<0,001
Gemüse/Sand	210	-0,3767	<0,001
Früchte/Sand	20	-0,5300	<0,05
Früchte/Lehm	116	-0,0690	n.s.
Hackfrüchte/Sand	32	-0,4607	<0,01

n.s. = nicht signifikant

4.2.5.5. Sr-Transferfaktor in Abhängigkeit von der organischen Substanz des Bodens

Im Gegensatz zur Radiocäsiumaufnahme ist die Strontiumaufnahme hochsignifikant negativ korreliert mit der organischen Substanz des Bodens (Spearman-Rank-Korrelation; $N=914$; $R=-0,2169$; $p<0,001$). Bis auf zwei Ausnahmen (Früchte/Sand und Hackfrüchte/Sand) wird dieser negative Zusammenhang bestätigt, wenn auch nicht in allen Fällen statistisch signifikant (Tab. 22).

Die Daten zeigen, dass der Strontium-Transferfaktor sinkt, wenn der organische Gehalt der Böden steigt. Den gleichen Zusammenhang fanden auch Nisbet et al. in ihrer Studie (NISB99), so dass dieser Zusammenhang als gesichert gelten kann.

Tab. 22: TF_{norm} für Strontium in Abhängigkeit von der organischen Substanz des Bodens bei einzelnen Pflanzeneinordnungen.

Spearman-Rank-Korrelation	N	R	p
Getreide/Sand	182	-0,1362	n.s.
Getreide/Lehm	51	-0,1877	n.s.
Futterpflanzen/Sand	74	-0,4686	<0,001
Futterpflanzen/Lehm	19	-0,1780	n.s.
Gras/Sand	142	-0,4515	<0,001
Gras/Lehm	43	-0,6918	<0,001
Gemüse/Sand	199	-0,1302	n.s.
Früchte/Sand	20	0,5287	<0,05
Früchte/Lehm	116	-0,0790	n.s.
Hackfrüchte/Sand	28	0,2123	n.s.

n.s. = nicht signifikant

4.3. Plutonium

4.3.1. Statistische Kenngrößen

Die Anzahl der Datensätze mit ermittelten Transferfaktoren für Plutoniumisotope ist wegen der aufwändigen Probenaufarbeitung und Analytik sehr viel geringer als bei den Radionukliden Cäsium und Strontium. In die Datenbank sind 62 Datensätze aus insgesamt vier Veröffentlichungen übernommen worden. Dabei wurden 41mal die Transferfaktoren von Pu-238 bestimmt, 21mal diejenigen der Isotope Pu-239,240.

Wie auch bei Radiostrontium und Radiocäsium zeigt sich eine deutlich linkssteile Verteilung der Datensätze mit einem Schwerpunkt bei kleinen Transferfaktoren (Tab. 23). Allerdings konnte eine log-normale Verteilung vermutlich aufgrund der geringen Anzahl der Datensätze bei einem Irrtumswahrscheinlichkeitsniveau von $p < 0,05$ nicht nachgewiesen werden.

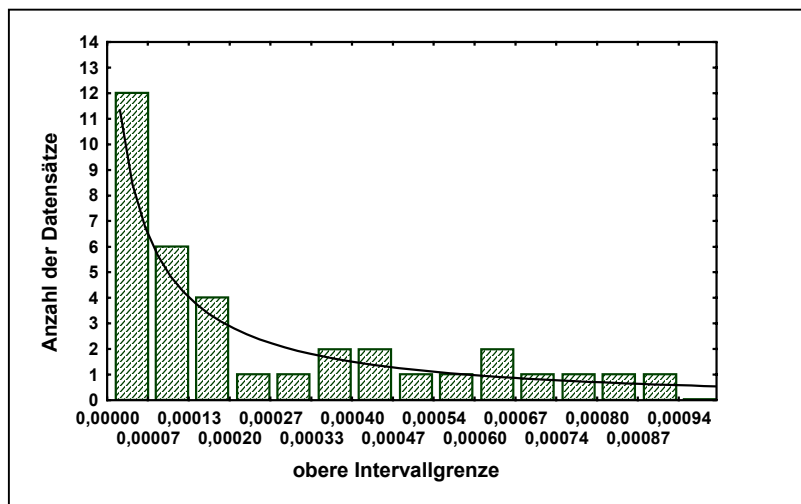


Abb. 12: Verteilungsmuster der Transferfaktoren für Pu-Isotope, N= 62; log-normal nicht signifikant.

Die Mittelwerte zwischen den beiden Plutonium-Isotopen unterscheiden sich etwa um den Faktor 30, so dass beide Isotope sich im Aufnahmeverhalten signifikant unterschiedlich verhalten könnten. Allerdings werden die hohen durchschnittlichen Transferfaktoren von Pu-239,240 geprägt durch zwei außerordentlich hohe Werte bei Zea mays (DIEN83). Werden diese beiden etwa um eine Zehnerpotenz höheren Werte nicht berücksichtigt, so errechnet sich ein geometrisches Mittel von 0,00075, das sich nicht signifikant vom Transferfaktor von Pu-238 unterscheidet. Insofern bleibt es bei Berücksichtigung der vorhandenen Datensätze ungeklärt, ob das Aufnahmeverhalten der verschiedenen Plutonium-Isotope sich unterscheidet.

Tab. 23: Statistische Kenngrößen von Plutonium-Transferfaktoren.

Pu-Isotop	N	Geom. Mittelwert	Minimum	Maximum
Pu-238	41	0,00024	0,000004	0,014
Pu-239,240	21	0,0062	0,0003	0,22
Pu-238,239,240	62	0,00085	0,000004	0,22

4.3.2. Pu-Transferfaktoren für einzelne Boden- und Pflanzenkategorien

Insgesamt konnten nur 48 Datensätze in der Kombination Pflanze/Boden ausgewertet werden (Tab. 24). Daher sind belastbare statistische Aussagen für die Plutonium-Aufnahme bei den unterschiedlichen Kombinationen nicht zu machen.

Das geometrische Mittel der Versuchsansätze (unabhängig von der Pflanzeneinordnung) beträgt bei Sand 0,00076, während bei Lehm ein achtfach höherer Wert (0,0057) gefunden werden konnte. Die beiden Zea mays-Proben (DIEN83) wurden dabei nicht berücksichtigt.

Tab. 24: Zahl der Datensätze für Plutonium-Isotope in den einzelnen Kategorien.

	Sand	Lehm	Ton	Org. Böden	Summe
Getreide	9	9	3	0	21
Gras	1	0	0	0	1
Gemüse	25	0	0	0	25
Früchte	1	0	0	0	1
Summe	36	9	3	0	48

21 Versuchsansätze wurden mit Getreide durchgeführt und 25 mit Gemüseproben. Das geometrische Mittel bei Getreide beträgt 0,0008 und bei Gemüse-Proben 0,0002. Im Vergleich liegen die Ergebnisse für die Gemüseproben in der gleichen Größenordnung wie die „expected values“ für „mixed green vegetables“ in IAEA94 (0,000073; N=27). Allerdings liegt die Plutonium-Aufnahme bei Getreide um den Faktor 100 höher als die Angabe in IAEA94, die allerdings auch eine Schwankungsbreite der Werte über 6 Zehnerpotenzen (0,42/0,00000035) angibt, so dass genaue Aussagen über die Plutoniumaufnahme nicht gemacht werden können.

4.3.3. Pu-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern

Eine Abhängigkeit der Plutoniumaufnahme von mit erfassten Pflanzen- (K-Konzentration, Ca-Konzentration) oder Bodenparametern (K-Gehalt, Ca-Gehalt, pH-Wert) konnte nicht

nachgewiesen werden. Lediglich zwischen der organischen Substanz des Bodens und dem Plutonium-Transferfaktor besteht ein positiver Zusammenhang (N=48; R=0,4004; p<0,01).

4.4. Jod

4.4.1. Statistische Kenngrößen

Für J-129 wurden insgesamt 344 Datensätze in die Datenbank übernommen, die im Wesentlichen (330 Datensätze) aus den Veröffentlichungen von HAI93 und PEL_93 stammen.

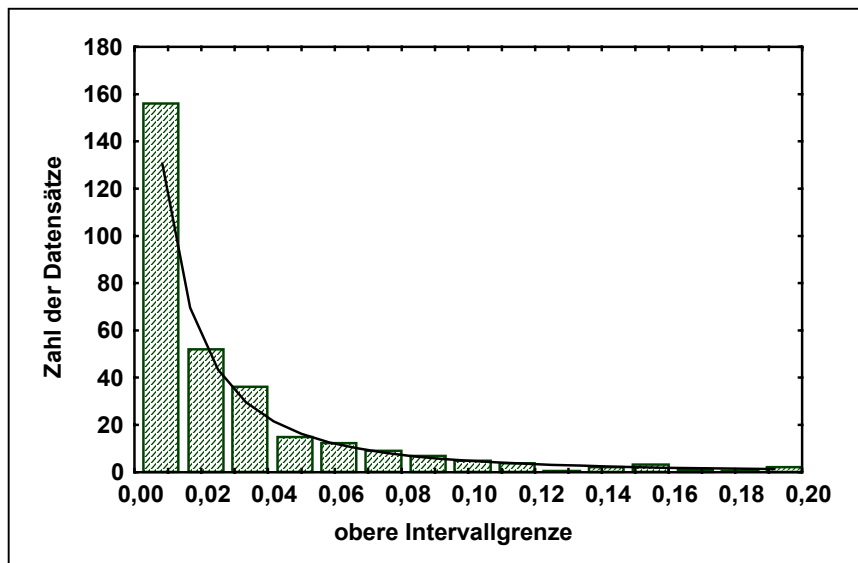


Abb. 13: Verteilung des TF_{norm} für J-129 über die Datensätze (N=344).

Wie auch bei den anderen untersuchten Nukliden wird hier eine deutlich linkssteile Verteilung gefunden, die allerdings nicht signifikant log-normal verteilt ist.

Tab. 25: Statistische Kenngrößen des TF_{norm} von J-129.

J-Isotop	N	Geom. Mittelwert	Minimum	Maximum
J-129	344	0,014*	0,001*	1,86

* Drei in der Datenbank mit einem Transferfaktor von 0 angegebenen Datensätze wurden bei der Angabe des geometrischen Mittelwertes und des Minimums nicht berücksichtigt.

Auch wenn sich Minimum und Maximum um mehr als den Faktor 1000 unterscheiden, wiesen über 86% der Datensätze einen Transferfaktor <0,07 auf.

4.4.2. J-129-Transferfaktoren für einzelne Boden- und Pflanzenkategorien

Insgesamt konnten 320 Datensätze in der Kombination Pflanze/Boden ausgewertet werden, wovon 318 der Pflanzeneinordnung „Gras“ zugeordnet werden. Dabei wuchsen 310 Proben

auf Sandböden und 8 konnten eindeutig Lehmböden zugeordnet werden. Der geometrische Mittelwert der Kombination Gras/Sand wurde mit 0,015 festgestellt, während die Kombination Gras/Lehm einen geringfügig, aber nicht signifikant höheren Transferfaktor (0,018) aufweist. Die IAEA gibt bei Gras einen Mittelwert für den Jod-Transferfaktor von 0,0034 an, allerdings bei einer Probenanzahl von nur N=14 (IAEA94).

4.4.3. J-129-Transferfaktoren in Abhängigkeit von Pflanzen- und Bodenparametern

Die Abhängigkeit des Transferfaktors von Pflanzen- und Bodenparametern konnte nur für die Kombination Gras/Sand betrachtet werden, da nur hier ausreichend Datensätze zur Verfügung standen. Ein signifikanter negativer Zusammenhang konnte zwischen dem pH-Wert des Bodens und der J-129-Aufnahme nachgewiesen werden (Spearman-Rank-Korrelation; N=310; R=-0,1781; p<0,01). Mit zunehmendem Gehalt an organischer Substanz steigt der J-129-Transferfaktor an (Spearman-Rank-Korrelation; N=310; R=0,1935; p<0,001).

5. Literatur

5.1. Zitierte Literatur

Hier nicht aufgeführte Literatur siehe Kap. 5.2.

[BMI_90] Bundesminister des Innern (1990) Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger 42, 1990.

[FRIS92] Frissel MJ (1992) An Update of the recommended soil-to-plant transfer factors. Eighth Report of the IUR Working group on soil-to-plant Transfer, IUR, Balen, Belgium.

[FRIS90] Frissel MJ, Noorijk H, VanBergelijck KE (1990) The impact of extreme conditions, as occurring in natural ecosystems, on the soil-to-plant transfer of radionuclide. In: Desmet G, Nasimbeni P, Belli M, editors. Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments. Barking UK: Elsevier Applied Science 40-47.

[IAEA94] International Atomic Energy Agency (1994) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments. IAEA - Technical Report Series 364, Vienna.

[LIVE91] Livens FR, Horill AD, Singleton DL (1991) Distribution of radiocesium in the soil-plant-systems of upland areas in Europe. Health Phys 60, 539-545.

[NISB99] Nisbet AF, Woodman RFM, Haylock RGE (1999) Recommended Soil-to-plant Transfer Factors für Radiocaesium and Radiostrontium for Use in Arable Systems. National Radiological Protection Board NRPB-R304, Chilton, Didcot, Oxon OX110RQ

[REIS65] Reißig H (1965) Der Sr-90-Gehalt in Böden und Pflanzen auf dem Territorium der DDR 1963. Kernenergie 8, 364-378.

[SAAS78] Kunert J, Kunert M, Ziesack H, Thiele J (1978) Ergebnisse der Strahlenschutzüberwachung des Territoriums der Deutschen Demokratischen Republik auf Falloutradioaktivität 1975. Bericht Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR 157, 1-56.

[WEBS90] Webster R, Oliver MA (1990) Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. Oxford University Press.

5.2. Datenquellen

- [ALB00a] Albers B, Steindl H, Schimmack W, Bunzl K (2000) Soil-to-plant and plant-to-cows milk transfer of radiocaesium in alpine pasture: significance of seasonal variability. *Chemosphere* 41, 717-723.
- [ALBE02] Albers BP, Kleinschroth S (Unveröffentlichtes Manuskript) ¹³⁷Cs concentrations in vegetation of alpine pastures in relation to different plant communities and Ellenberg's indicator values.
- [BAFM83] Anonymus (1983) Untersuchungen zum Transfer von Strontium-, Cäsium- und relevanten Schwermetallnukliden unter den radioökologischen Bedingungen der Umgebung von Gorleben. Abschlußbericht FV St.SCH 702c Institut für Chemie und Physik der Bundesanstalt für Milchforschung, Kiel, 56S + Anhang.
- [BIES83] Biesold H, Kroll R (1983) Untersuchungen zur Radioökologie des Tabaks. GRS-Bericht 53, 49S.
- [BIL91a] Bilo M (1991) Untersuchungen zum Transfer des durch den Reaktorunfall von Tschernobyl abgelagerten Radiocäsiums vom Boden in die Pflanze. Berichte des Forschungszentrums Jülich 2546, 116S.
- [BLOC93] Block J (1993) Verteilung und Verlagerung von Radiocaesium in zwei Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz insbesondere nach Kalk- und Kaliumdüngung. Mitteilungen der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz 24/93; 289S.
- [BOIK78] Boikat U, Köhler W, Khosravi A (1978) Untersuchungen zum Cäsium-Transfer Boden-Pflanze auf Dauerweiden. In: Kellermann HJ (eds) Radioaktivität und Umwelt, S525-540.
- [BOIK82] Boikat U (1982) Transfer von Cäsium vom Boden zur Vegetation auf Dauerweiden im Marschengebiet der Wesermündungsregion. Dissertation Universität Bremen, 170S.
- [BON98a] Bonka H (1998) Radionuklidtransport nach dem Kernreaktorunfall in Tschernobyl und daraus ableitbare radioökologische Parameter. BMU Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz 507, 274S.
- [BRUE92] Brückmann A (1992) Radioaktives Cäsium nach dem Tschernobyl-Reaktorunfall in Waldökosysteme: Transfer Boden-Pflanze-Boden - Verhalten im Boden und in Pflanzen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme 90, 110S.
- [BUER93] Bürmann W (1993) Horizontspezifische Tiefenverteilung von Cäsium-Radionukliden in Waldböden Oberschwabens. Diplomarbeit Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 103S.
- [BUN86] Bunzl K, Kracke W (1986) Accumulation of fallout ¹³⁷Cs in some plants and berries of the family ERICACEAE. *Health Phys* 50, 540-542.
- [BUN87c] Bunzl K, Kracke W (1987) Soil to plant transfer of ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ²³⁸Pu, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from global fallout in flour and bran from wheat, rye, barley and oats, as obtained by field measurements. *Sci Total Environ* 63, 111-124.
- [BUN89c] Bunzl K, Kracke W (1989) Seasonal Variation of Soil-to-Plant Transfer of K and Fallout ¹³⁴, ¹³⁷Cs in Peatland Vegetation. *Health Phys* 57, 593-600.

- [BUN89d] Bunzl K, Kracke W (1989) Transfer von ^{137}Cs und ^{90}Sr in Mehl, Kleie und Stroh von Weizen, Roggen, Gerste und Hafer in den Jahren 1982, 1986 (Reaktorunfall von Tschernobyl) und 1987 in Feldversuchen. Z Lebensm Unters Forsch 188, 439-444.
- [DIEN83] Dienstbach F, Bächmann K, Thom C (1983) Untersuchungen des Plutoniumgehalts von Pflanzen. Z Pflanzenern Bodenk 146, 690-696.
- [DIRS88] Dirscherl, M (1988) Bestimmung von Cäsium-137 in Boden und Bewuchs - Ableitung von Transferfaktoren. Diplomarbeit Berufsakademie Karlsruhe/ GSF Neuherberg.
- [DRIS91] Drissner J (1991) Radiocäsium-Transfer im Ökosystem Wald in Oberschwaben Diplomarbeit Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 79S.
- [DRIS98] Drissner J, Klemt E, Bürmann W, Enslin F, Heider R, Schick G, Zibold G (1998) Availability of caesium radionuclides for plants - classification of soil and role of mycorrhiza. J Environ Radioactivity 41, 19-32.
- [FEIT97] Feiten A, Bonka H (1997) ^{90}Sr Strontiummessungen in Umweltproben aus Aachen, die nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl genommen wurden. Diplomarbeit RWTH Aachen 18S.
- [FIEL94] Fielitz U (1994) Radioaktivität in Wildtieren. BMU Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz 408, 119S +Anhang
- [FUE79b] Führ F (1979) Die Aufnahme von Radionukliden aus dem Boden -Ermittlung praxisgerechter Transferfaktoren. Radioökologie - Berichtsband der Fachtagung Radioökologie des Deutschen Atomforums e.V. Vulkan-Verlag, S 147-161.
- [GANS80] Gans I, Arndt J (1980) Untersuchungen zum Transferfaktor Boden-Pflanze der Radionuklide ^{90}Sr und ^{137}Cs in der Umgebung des Kernkraftwerks Biblis. Modellstudie Radioökologie Biblis, Teilstudie 6; Bericht 5 , 19S+Anhang.
- [GUEN67] Günther J (1967) Die Aufnahme von radioaktivem Strontium durch Weissklee und Bodeneigenschaften; Untersuchungen an Böden Schleswig-Holsteins und an Modellböden Dissertation Universität Kiel, 95S.
- [HAI85a] Haisch A, Capriel P, Forster S (1985) Cäsiumverfügbarkeit für Pflanzen auf drei verschiedenen Böden Transferfaktoren Boden-Pflanze. Landwirtschaftl. Forschung 38, 229-236.
- [HAI85b] Haisch A, Capriel P, Forster S (1985) Strontiumverfügbarkeit für Pflanzen auf drei verschiedenen Böden Transferfaktoren Boden-Pflanze Landwirtschaftl. Forschung 38, 237-244.
- [HAIS93] Haisch A, Schüttelkopf H (1993) Transferfaktoren Boden-Pflanze für I-129 und Weidebewuchs KFK-Bericht 5119, 65S.
- [HAND80] Handl J, Kühn W (1980) Determination of transfer coefficients for ^{137}Cs and ^{60}Co in a slime-soil-grassland ecosystems. Health Phys 38, 703-705.
- [HAND90] Handl J, Jakob D (1990) Verlagerung von Jod-129 im Boden und Transfer zum Bewuchs. Jahresbericht 90 KFK Jülich, 59-74.
- [HEB73a] Hebel RD (1973) Untersuchungen über den Einfluss verschiedener Umweltfaktoren auf die Verteilung von ^{137}Cs in Böden und der Bodenbeschaffenheit auf

die Cs-137 Aufnahme durch Pflanzen unter dem Gesichtspunkt der Schlachttierkontamination. Dissertation LMU München 103S + Anhang.

[HUND91] Hund M (1991) Radiocäsium in Waldökosystemen Oberschwabens. Transportmechanismen. Diplomarbeit Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 88S

[KAME99] Kamert S (1999) Zeitabhängigkeit der Radiocäsium-Kontamination in Seen und Wäldern Oberschwabens Diplomarbeit Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 76S

[KONO99] Konoplev AV, Avila R, Bulgakov AA, Drissner J, Johanson KJ, Klemt E, Konopleva IV, Miller R, Nikolova I, Popv VE, Zibold G (1999) Proceedings of NATO ARW: Modelling Radiocaesium Bioavailability in Forest Soils.

[KUEH84] Kühn W, Schuller P (1984) The influence of soil parameters on Cs-137-uptake by plants from long-term fallout on forest clearings and grassland. Health Phys 46, 1083-1093.

[MOLZ89] Molzahn D, Klepsch A, Assmann-Werthmüller U (1989) Bestimmung von Transferfaktoren von Caesium in der Kette Boden-Rapspflanzen-Rapsblüte-Rapshonig. Apidologie 20, 473-483.

[MOL93a] Molzahn D, Assmann-Werthmüller U (1993) Caesium radioactivity in several selected species of honey. Sci Total Environ 130, 95-108.

[PEL_93] Pel E (1993) Zum Verhalten von Iod im System Boden-Pflanze-Luft. KFK-Bericht 5118, 111S + Anhang.

[PIM86a] Pimpl M, Schmidt W, Schüttelkopf H (1986) Boden/Pflanzen-Transfer der Aktiniden. KFK-Bericht 4170, S549-566.

[PIMP88] Pimpl, M (1988) Untersuchungen zum Boden/Pflanzen-Transfer von NP-237, Pu-238, Am-241 und Cm-244. KFK-Bericht 4452, 70S.

[ROEM91] Römmelt R, Hirsche L, Wirth E (1991) Untersuchungen über den Transfer von Cs-137 und Sr-90 in ausgewählten Belastungspfaden. BFS-ISH-Berichte 155, 89S.

[SCHA90] Schaller G, Leisig C, Krestel R, Wirth E (1990) Caesium und Kalium- Aufnahme durch Pflanzen aus Böden. BFS-ISH-Berichte 146, 26S.

[SCHE59] Scheffer F, Ludwieg F (1959) Gefäßversuche über die Aufnahme von Radiostrontium aus dem Boden. Z Pflanzenern, Düngung, Bodenkunde 85, 244-249.

[SCHI60] Schilling G (1960) Strontium in der höheren Pflanze. II. Verteilung und Bildungszustand in der Pflanze. Z Pflanzenern Düng Bodenk 91, 212-222.

[SCHI95] Schick G (1995) Untersuchung der Bioverfügbarkeit von Cäsium-137 in Streuwiesen und Mooren Oberschwabens. Diplomarbeit Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 81S.

[STE79b] Steffens W, Führ F, Mittelstaedt W (1979) The Evaluation of Laboratory Experiments to determine Transfer Factors of Radionuclides from Soil to Plant. In: Proceedings of the 11th Symposium International de Radioecologie, Cadarache. S. 705-706.

[STEF88] Steffens W, Führ F, Mittelstaedt W, Klaes J, Förstel H (1988) Untersuchung des Transfers von ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co und ⁵⁴Mn vom Boden in die Pflanze und der wichtigsten,

den Transfer beeinflussenden Bodenparameter; Abschlußbericht StSCH 702A, Berichte der Kernforschungsanlage Jülich 2250, 121S.

[WAGN89] Wagner A (1989) Radioökologische Untersuchungen in der Nahrungskette Luft-Boden-Reben-Wein; Teil 2: Abschlussbericht. BMU Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz 160, 70S+Anhang

[WELL79] Weller H (1979) Bestimmung von Bodenkenndaten und Boden-Pflanzen-Transferfaktoren für Sr-90 und Cs-137 an Proben aus der Umgebung des geplanten Kernkraftwerkes Neupotz. Bericht der LUFA Speyer, 22+Anhang.

[WELL82] Weller H (1982) Bestimmung von Boden-Pflanzen-Transferfaktoren für Sr-90 und Cs-137 sowie Kenndaten der Böden und Pflanzen an Proben aus der Umgebung des Kernkraftwerkes Mülheim-Kärlich. Untersuchungsbericht der LUFA Speyer, 20+Anhang.

[WIEC72] Wiechen A (1972) Ursachen des hohen Cs137-Gehaltes der Milch von Moorböden. Milchwissenschaften 27, 82-84.

[WILH89] Wilhelm C (1989)
Untersuchung der radioaktiven Belastung in Wild und Fischen sowie Pflanzen im Raum Oberschwaben von September 1988 bis Februar 1989 mit Hilfe eines Gammaskpektrometers. Diplomarbeit Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 48S +Anhang.

[WIRT94] Wirth E, Hiersche L, Kammerer L, Krajewska G, Krestel R, Mahler S, Römmelt R (1994) Transfer Equations for Cesium-137 for Coniferous Forest Understorey Plant Species. Sci Total Environ 157, 163-170.

Anhang 1: Umrechnungsfaktoren

1. Nuklidkonzentration in der Pflanze und im Boden:

$$1 \text{ pCi} = 0,037 \text{ Bq}$$

2. Kaliumgehalt in der Pflanze:

$$\text{K}^+ \frac{\text{g}}{\text{kg}} [\text{TS}] = 10^3 \text{ ppm} [\text{TS}]$$

3. Calciumgehalt in der Pflanze:

$$\text{Ca}^{2+} \frac{\text{g}}{\text{kg}} [\text{TS}] = 10^3 \text{ ppm} [\text{TS}] = \frac{2 \text{ mval}}{40,08 \text{ g}} [\text{TS}]$$

4. Austauschbares Kalium im Boden:

$$1 \text{ mval} = 1 \text{ meq} = 39,098 \text{ mg K}^+ = 1,2 * 39,098 \text{ mg K}_2\text{O}$$

5. Austauschbares Calcium im Boden:

$$1 \text{ mval} = 1 \text{ meq} = \frac{40,08}{2} \text{ mg Ca}^{2+} = 1,4 * \frac{40,08}{2} \text{ mg CaO}$$

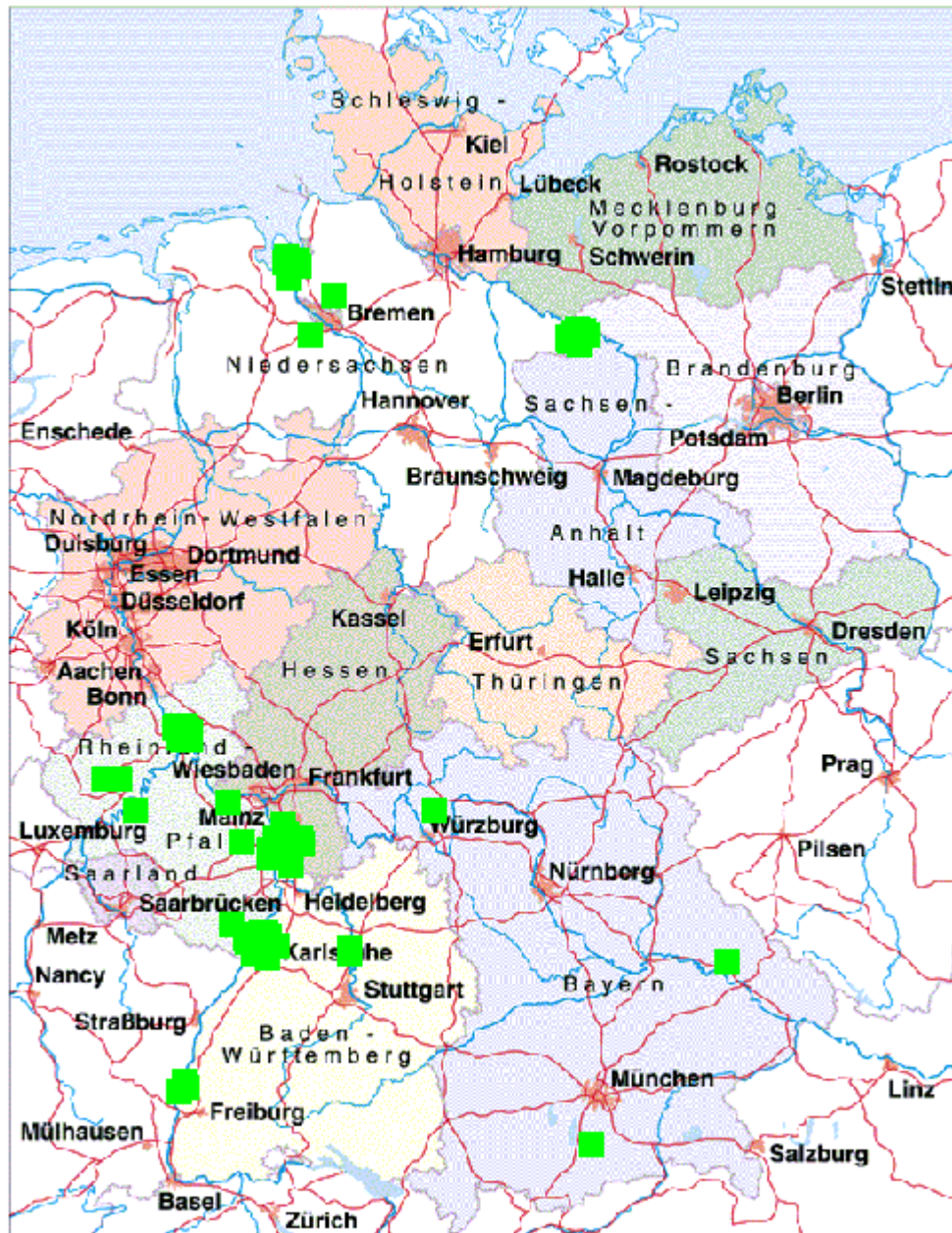
**Anhang 2: Trockensubstanzgehalte in % für verschiedene Nutzpflanzen
(Quellen BAFM93, DRIS98, STEF88)**

Pflanzeneinordnung/Pflanzenart	Pflanzenteil	% TS
Gras/Grünlandbewuchs	Oberirdische Pflanzenteile	20
Getreide (außer Mais)	Stroh/Karyopse	87
Mais	Oberirdische Pflanzenteile	20
Hackfrüchte (Zucker-, Steck- und Runkelrüben)	Blätter	15
Zuckerrübe	Wurzel	24
Steckrübe, Runkelrübe, Rote Beete	Wurzel	12
Raps	Oberirdische Pflanzenteile	15
Kartoffel	Knolle, Schale, Fleisch	21,5
Spargel	Spross	6,4
Kopfsalat	Blätter	4
Luzerne, Futterpflanzen entsprechend Klee	Oberirdische Pflanzenteile	10
Buschbohnen, Grüne Bohnen, Erbsen	Hülse	10
Gurke	Frucht	4
Weißkohl, Wirsing, Rotkohl, Blumenkohl	Oberirdische Pflanzenteile	12
Spinat	Blätter	10
Möhren	Wurzel	12
Zwiebel	Zwiebel	14
Zwiebel	Laub	10
Farn	Blätter	20
Heidelbeere, Preiselbeere	Oberirdische Pflanzenteile, Blätter	36
Himbeere	Oberirdische Pflanzenteile, Blätter	30
Brombeere	Oberirdische Pflanzenteile, Blätter	30
Heidekraut (keine Quellenangabe)	Oberirdische Pflanzenteile	40
Erdbeeren (keine Quellenangabe)	Frucht	4
Johannisbeeren (keine Quellenangabe)	Frucht	4
Apfel (keine Quellenangabe)	Frucht	10
Sauerkirsche (keine Quellenangabe)	Frucht	10
Wein	Rappen	40
Wein	Trauben	10
Wein	Blätter	30

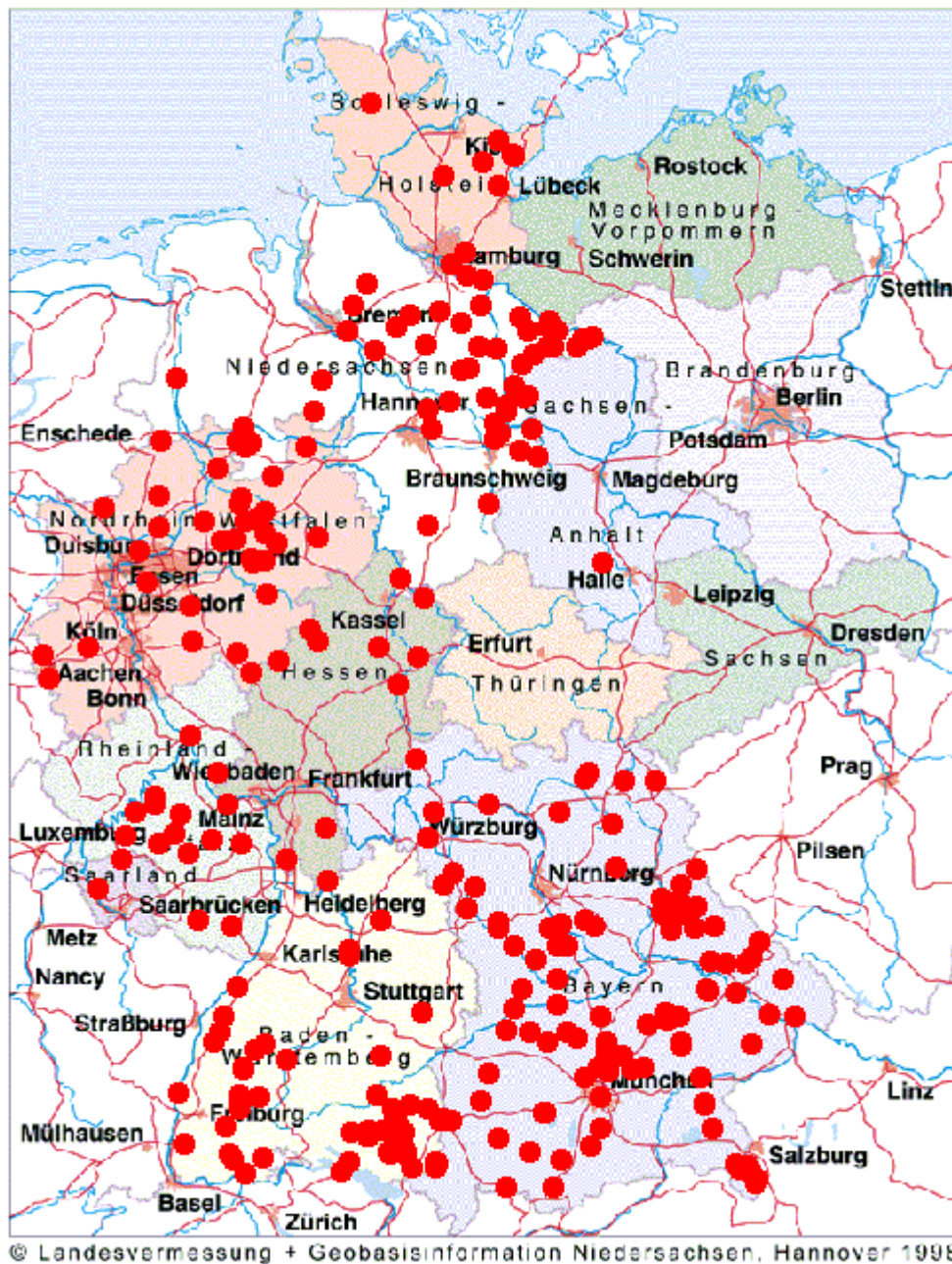
Anhang 3: Einordnungskriterien der ausgewerteten Datenquellen

Experimenttyp	Experiment (Andere 1, Topfexperiment 2, Lysimeter 3, Feldexperiment 4)
Veröffentlichungsart	Wie liegen die Daten vor? (Sonstiges 1, Proceedings/Diplomarbeit 2, Gutachten/Forschungsbericht 3, Originalarbeit (redigiert) 4)
Daten: Probenahmeort	Sind die Orte der Probenahme in der Literaturstelle genannt und nachvollziehbar?
Daten: Pflanzenart	Sind die untersuchten Pflanzenarten eindeutig zu bestimmen?
Daten: Pflanzenparameter	Sind weitere Pflanzenparameter (bei Cs-Untersuchungen Kaliumgehalt, bei Sr-Untersuchungen der Calciumgehalt) bestimmt worden?
Daten: Bodeneigenschaften	Sind grundlegende Bodeneigenschaften (Bodentyp oder/und Bodenart, pH-Wert) genannt?
Daten: Bodenparameter	Sind weitere Bodenparameter (Tongehalt, bei Cs-Untersuchungen austauschbares Kalium, bei Sr-Untersuchungen austauschbares Calcium, organische Substanz) genannt?
Methode: Nuklidbestimmung	Ist die Methode der Nuklidbestimmung dokumentiert und ausreichend beschrieben?
Methode: Versuchsaufbau	Sind Versuchsaufbau und -methodik klar beschrieben und begründet worden?
Methode: Datendarstellung	Ist die Darstellung der Daten immer nachvollziehbar und fehlerfrei (Daten tabellarisch aufgelistet, Querverbindungen zwischen Tabellen eindeutig)?
Methode: Transferfaktor	Erfolgte die Berechnung des TF nachvollziehbar und auf der Grundlage gemessener Größen (Trockensubstanz, Feuchtgewicht, Bodengewicht usw.)?
Qualität: Örtliche Beziehung	Sind Boden- und Pflanzenproben am gleichen Ort entnommen worden?
Qualität: Tiefenverteilung	Wurde bei Bodenproben auf die Tiefenverteilung im Boden geachtet?
Qualität: Zeitliche Beziehung	Sind Boden- und Pflanzenproben zum gleichen Zeitpunkt entnommen worden?
Qualität: Saisonalität	Wurde auf die Saisonalität des Transferfaktors geachtet?
Qualität: Fehlerbetrachtung	Wurde eine Fehlerbetrachtung durchgeführt?
Qualität: Kontrollproben	Wurden im Versuchsansatz Kontrollproben gemessen?
Qualität: Aggregierte Daten	Sind die Transferfaktoren aus Mittelwerten oder aggregierten Daten ermittelt worden?
Gewichtung (Summe der Qualitätskriterien)	Summe der Einzelwerte
Besonderheiten	Beschreibung der Auswertungsbesonderheiten der Datenquelle

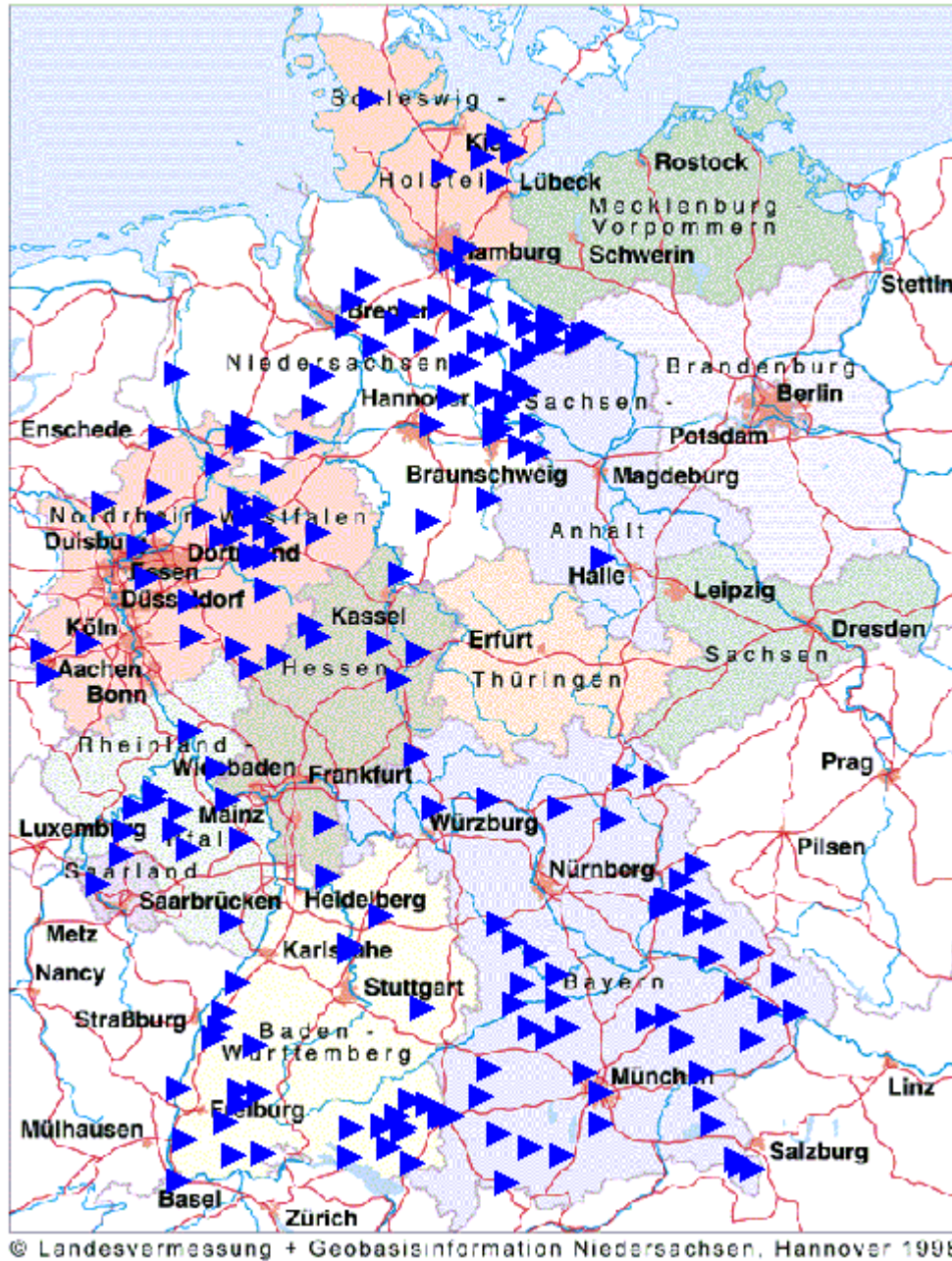
Anhang 4: Übersicht über die Probenahmestellen in Deutschland für die Bestimmung von **Cs-137-Transferfaktoren** für den „**globalen Fallout**“ (grüne Quadrate)



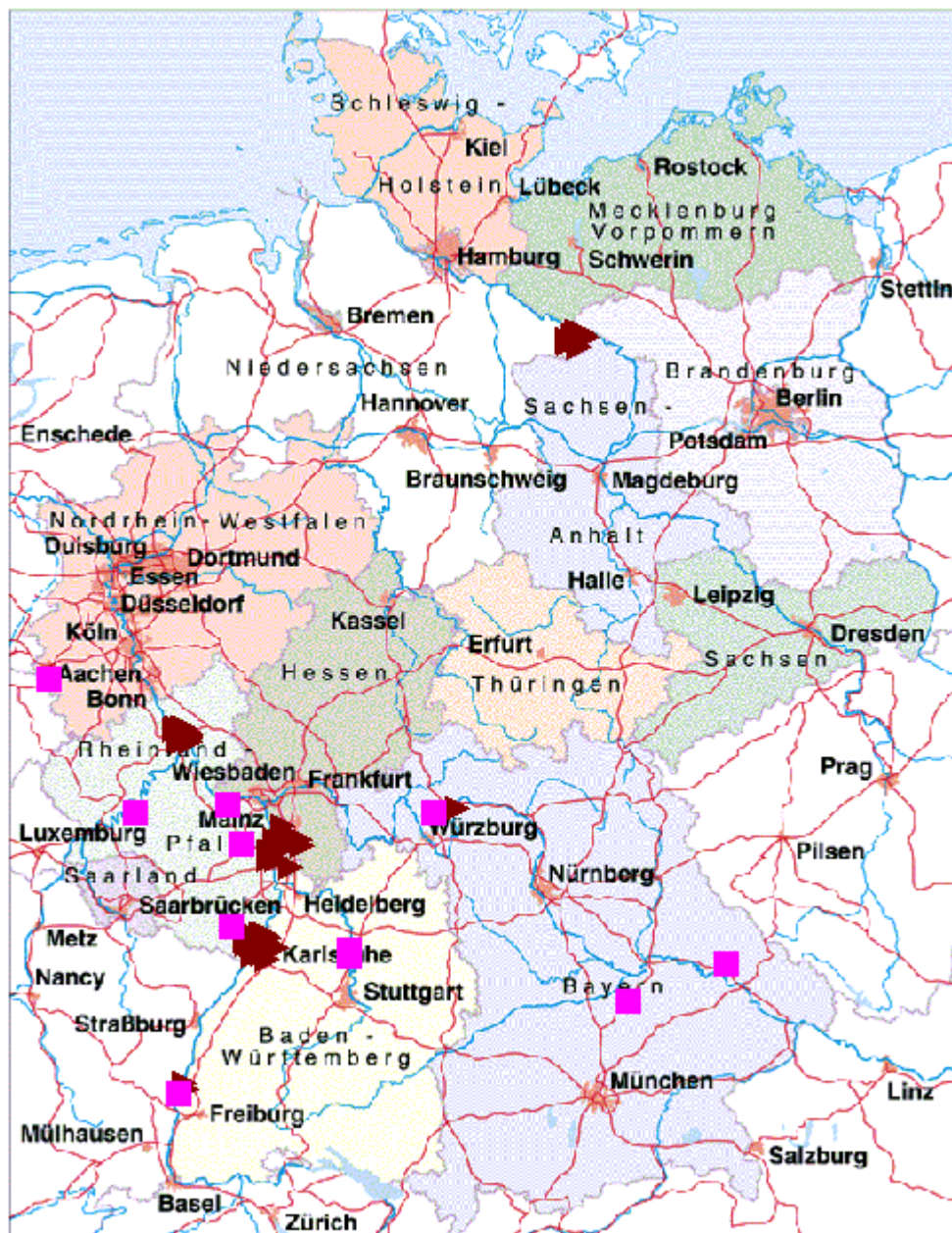
Anhang 5: Übersicht über die Probenahmestellen in Deutschland für die Bestimmung von **Cs-137**-Transferfaktoren nach dem „**Chernobyl**-Unfall“ (rote Punkte)



Anhang 6: Übersicht über die Probenahmestellen in Deutschland für die Bestimmung von **Cs-134**-Transferfaktoren nach dem „**Chernobyl**-Unfall“ (blaue Dreiecke)



Anhang 7: Übersicht über die Probenahmestellen in Deutschland für die Bestimmung von **Sr-90-Transferfaktoren** [„**globaler Fallout**“ (braune Dreiecke); **Chernobyl** (magentafarbene Quadrate)]



© Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen, Hannover 1998