

**Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen von
Kompartiment-Modellen und Computer-Voxel-Phantomen für
interne Strahlenexposition der Patienten durch
Radiopharmazeutika in der Nuklearmedizin**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)**

genehmigt durch die Fakultät für Naturwissenschaften
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von **Dipl.-Phys. Vladimir Spielmann**

geb. am 28.06.1973 in Tiflis/Georgien

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Christoph Hoeschen
Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Glatting

eingereicht am: 21.06.2016

verteidigt am: 02.02.2017

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Motivation und Ziel	1
1.2 Gliederung dieser Arbeit	3
2 Unsicherheitsanalyse	4
2.1 Einleitung.....	4
2.2 Unsicherheitsfortpflanzung.....	6
2.3 Monte-Carlo-Sampling-Technik.....	7
2.3.1 Latin-Hypercube-Sampling-Methode (LHS).....	8
2.3.2 Pseudozufallszahlen und Quasi-Monte-Carlo-Simulation.....	10
3 Sensitivitätsanalyse	13
3.1 Einleitung.....	13
3.2 Lokale und globale Sensitivitätsanalysen (LSA und GSA)	13
3.3 Methoden der Sensitivitätsanalysen.....	14
3.3.1 Scatterplots und Ableitungen.....	15
3.3.2 Lineare Regression	17
3.3.3 Bedingte Varianzen; Varianzbasierte Methode	18
3.3.4 Morris-Methode und Metamodellierung.....	22
4 Berechnung der Dosiskoeffizienten	25
4.1 Einleitung.....	25
4.2 MIRD-Schema	25
4.3 ICRP-Schema.....	27
4.4 Verallgemeinertes Schema.....	29
4.5 Bestimmung der S-Faktoren. Monte-Carlo-Simulation.....	33
4.5.1 Phantome	34
4.5.2 Monte-Carlo-Simulation für Teilchenpropagation	36
4.6 Bestimmung der zeitintegrierten Aktivität.....	40
4.6.1 MIRD-Modell	40
4.6.2 ICRP-Modell	41
5 Anwendung der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen in der Nuklearmedizin	43
5.1 Einleitung.....	43
5.2 Ausgewählte Radiopharmazeutika und die zugehörigen Radionuklide	43
5.3 Positron Emission Tomography (PET)	48
5.4 Single-Photon Emission Computed Tomography (SPECT).....	49

II

5.5	Modell, Parameter und Dosiskoeffizienten ausgewählter Radiopharmazeutika	49
5.5.1	^{18}F -FDG	50
5.5.2	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetat	53
5.5.3	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Phosphonate	54
5.5.4	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi.....	54
5.5.5	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin.....	55
5.5.6	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA	56
5.5.7	^{201}Tl -Chlorid	57
5.6	Unsicherheitsberechnung	59
5.6.1	Bestimmung der Unsicherheiten der zusammengestellten Modellparameter	59
5.6.2	Bestimmung der Unsicherheiten der mittels Phantomen bestimmten S-Faktoren	61
5.6.3	Bestimmung der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten	64
5.7	Identifikation der sensitiven Parameter.....	65
5.7.1	Bestimmung des partiellen Rangkorrelationskoeffizienten.....	66
5.7.2	Bestimmung der Sensitivitätsindices.....	67
6	Ergebnisse und Diskussion	69
6.1	Einleitung.....	69
6.2	Unsicherheiten der zeitintegrierten Aktivität	70
6.3	Unsicherheiten der S-Faktoren	75
6.4	Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten	94
6.5	Vergleich von Dosiskoeffizienten mit Literaturwerten	104
6.6	Sensitivitätsmaß als Indikator (measure or index).....	113
6.6.1	Korrelation zwischen den biokinetischen Parametern und der Aktivität	113
6.6.2	Korrelation zwischen der Aktivität und den Dosiskoeffizienten	125
6.6.3	Korrelation zwischen den biokinetischen Parametern und den Dosiskoeffizienten .	139
6.7	Anteile der Unsicherheiten von Modell und Voxel-Phantom	156
7	Zusammenfassung	161
Abkürzungsverzeichnis		163
Anhang		165
A	Literaturwerte von Dosiskoeffizienten.....	166
B	Statistische Daten von biokinetischen Parametern	175
Literaturverzeichnis		184

*„Das eben haben wir mit Wissenschaft gemeint.
 Daß das Fragen wie das Antworten mit Ungewißheit
 verbunden ist und daß beides weh tut.
 Doch daß es keinen Weg drumherum gibt.
 Und daß man nichts verbirgt,
 sondern daß alles offen ans Licht kommt.“*

Peter Høeg „Der Plan von der Abschaffung des Dunkels“

1 Einleitung und Motivation

1.1 Motivation und Ziel

Nuklearmedizin ist ein medizinisches Fachgebiet, das mit geringen Mengen an radioaktiven Stoffen, den sogenannten Radiopharmazeutika oder Radiotracern hantiert, die zur Diagnose und Behandlung einer Vielzahl von Krankheiten auf eine sichere, schmerzlose und kostengünstige Weise verwendet werden. Der große Nutzen der Nuklearmedizin liegt darin, dass durch sie eine Vielzahl von verschiedenen biologischen Prozessen im Körper untersucht werden kann. Im Gegensatz zu der Röntgendiagnostik, die auf Anatomie basiert, können mit der Nuklearmedizin Organfunktionen und Organaufbau erforscht werden. Beispiele für die verschiedenen biologischen Prozessen, die durch die nuklearmedizinischen Bildgebungstechniken gemessen werden können, umfassen die Gewebedurchblutung, den Glukosestoffwechsel, die Somatostatin-Rezeptor-Szintigrafie zur Diagnostik von neuroendokrinen Tumoren, die Dichte der Dopamin-Rezeptoren im Gehirn und Genexpression [13]. Die nuklearmedizinischen Verfahren werden heutzutage daher in einer breiten Spanne von medizinischen Fachrichtungen eingesetzt, von der Kinderheilkunde bis zur Kardiologie oder Psychiatrie. Es steht eine große Anzahl verschiedener nuklearmedizinischer Bildgebungsverfahren zur Verfügung und es gibt kaum ein wichtiges Organsystem, das von der Nuklearmedizin nicht abgebildet werden kann.

Durch Nuklearmedizinische Bildgebungstechniken werden Anomalien im Krankheitsverlauf in sehr frühen Stadien erkannt, lange bevor einige medizinische Probleme mit anderen diagnostischen Tests offensichtlich werden. Es ist das beste Frühwarnsystem für bestimmte Arten von Herzerkrankungen, Schilddrüsenerkrankungen, Tumoren, Knochenveränderungen u.v.m. Das Erkennen einer Krankheit in einem frühen Stadium ermöglicht ihre schnellere Behandlung und dadurch einen besseren Ausblick auf Genesung.

Sowohl in der Diagnostik als auch in der Therapie werden in der Nuklearmedizin zum Erkennen und Behandeln der Krankheiten Radiopharmazeutika eingesetzt. Radiopharmazeutika sind Substanzen, die in den Körper durch Injektion, Inhalation oder Ingestion gelangen und die in spezifischen Organen, Knochen oder im Gewebe angereichert werden. Die in der Nuklearmedizin verwendeten Radiopharmazeutika emittieren Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung. Im Fall eines Positronen

emittierenden Radionuklids werden durch Annihilation ($e^-e^+ \rightarrow 2\gamma$) Photonen emittiert. Mithilfe von speziellen Kameras, Gamma- oder PET-Kameras, können diese Prozesse extern erfasst werden. Diese Kameras liefern Daten und Informationen über die abgebildeten Objekte.

Spätestens zum Enden des 19. Jahrhunderts, seit der Entdeckung der Radioaktivität durch Wilhelm Conrad Röntgen, ist allgemein bekannt, dass man – aufgrund der Radioaktivität, die auch beim Verabreichen von Radiopharmazeutika an den Patienten entsteht – an ein gewisses Risiko von Spätschäden gebunden ist. Die aktuellen Forschungen belegen, dass die physikalischen Größen „Organdosis“ und „Effektivdosis“ der beste Weg ist, die biologischen Effekte vorauszusagen [81]. Aus diesem Grund soll die verabreichte Strahlendosis zur Erreichung des medizinischen Ziels so niedrig wie möglich gehalten werden [19, 20, 59]. Um dies zu ermöglichen, muss die bei einer Behandlung resultierende Strahlendosis für jedes Radiopharmazeutikum genau vorhergesagt werden können. Die genaue Kenntnis der internen Dosimetrie für ein Radionuklid ist von grundlegender Bedeutung für die Herstellung eines Radiopharmazeutikums mit einem erforderlichen Sicherheitsprofil [59]. Von den Fachkommissionen ICRP (International Commission on Radiological Protection) und MIRD (Medical Internal Radiation Dose Committee) wurden für alle üblichen Radiopharmazeutika Referenzwerte für Dosiskoeffizienten veröffentlicht, mit deren Hilfe die zu erwartenden Organdosen oder effektive Dosen berechnet werden können, um somit eine optimale Planung der Untersuchung zu ermöglichen. Dabei wurden mathematische Modelle für die zeitlichen Verläufe der Aktivitätskurven in Organen und Geweben (sogenannte biokinetische Modelle) [6] sowie mathematische Darstellungen des menschlichen Körpers (mittlerweile auch in Form voxelisierter Bilder, sogenannte Voxel-Phantome) [34] herangezogen. Alle diese Modelle sind für einen idealisierten Standardmenschen erstellt und es gibt kaum Informationen über die Unsicherheiten, die sich dadurch ergeben, dass sowohl die Biokinetik als auch die Anatomie individueller Patienten von den Referenzwerten abweichen können.

Durch diese Art der Dosisbestimmung, nämlich durch die mathematische Berechnung mithilfe standardisierter biokinetischer und dosimetrischer Modelle, unterliegt die interne Dosis deutlich größeren Unsicherheiten als die externe Dosis [64, 82, 83]. Die Angaben der Unsicherheiten von Dosiskoeffizienten sind aber wichtig, um beispielsweise alternative diagnostische Verfahren miteinander zu vergleichen und die Methodik auszuwählen, die bei entsprechender (vergleichbarer) diagnostischer Qualität die niedrigste Patientenexposition verursacht. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse können zusätzlich die Parameter und die Bestandteile der Modelle identifiziert werden, die am meisten zur Unsicherheit beitragen und deswegen in zukünftigen experimentellen Studien besser untersucht werden sollen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Unsicherheiten und damit die Zuverlässigkeit von Dosiskoeffizienten für ausgewählte Radiopharmazeutika zu ermitteln sowie die biokinetischen und dosimetrischen Parameter zu identifizieren, die am meisten zur Unsicherheit der Dosiskoeffizienten beitragen.

1.2 Gliederung dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert. In **Kapitel 2** wird die Unsicherheitsanalyse vorgestellt. Die Unsicherheitsquellen und deren Klassifizierung werden diskutiert. Es wird ein Überblick über verschiedene Methoden zur Berechnung und Fortpflanzung der Unsicherheiten in mathematischen Modellketten gegeben. Die Methoden werden beschrieben und miteinander verglichen. Eine in dieser Arbeit implementierte Technik, die Latin-Hypercube-Sampling-Methode, die zur Berechnung der Unsicherheit von Ausgangsgrößen eines mathematischen Modells benutzt wird, wird vorgestellt und anhand von Beispielen ausführlich erklärt.

In **Kapitel 3** wird die Sensitivitätsanalyse besprochen. Eine ausführliche Übersicht über die lokalen und globalen Methoden sowie ihre Vor- und Nachteile werden dargestellt. Es werden verschiedene Techniken, von den Scatterplots und linearen Regressionen bis zur Metamodellierung zur qualitativen und quantitativen Sensitivitätsanalysen dargelegt. Die zum Verständnis der implementierten varianzbasierten Methoden benötigten theoretischen Grundlagen werden besonders ausführlich beschrieben und diskutiert. Um verschiedene Verfahren zu vergleichen und weitere mögliche Techniken der Sensitivitätsanalyse vorzustellen, werden zudem alternative, in dieser Arbeit nicht implementierte Methoden beschrieben.

Die Methoden zur Berechnung der Dosiskoeffizienten werden in **Kapitel 4** behandelt. Es werden Schemas vorgestellt, die von der ICRP und dem MRD-Komitee ausgearbeitet wurden. Es wird gezeigt, dass die Dosiskoeffizienten von zwei Faktoren abhängen: von den zeitintegrierten Aktivitäten in den Quellorganen eines biokinetischen Modells (Biokinematik) und den sogenannten S-Faktoren (Dosimetrie), den Bruchteilen der in den Organen absorbierten Energien einer Strahlung, die aus menschenähnlichen Phantomen berechnet werden können. Die theoretischen Grundlagen für die Berechnung der zeitintegrierten Aktivität nach den Schemas der ICRP und des MIRD-Komitees werden vorgestellt. Auch die in der Arbeit verwendeten voxelisierten Phantome und die Berechnungen der S-Faktoren mittels dieser Phantome werden in diesem Kapitel ausführlich beschrieben.

In **Kapitel 5** werden die für diese Arbeit entwickelten und zuvor beschriebenen Methoden angewandt, um die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse bei der Bestimmung von Dosiskoeffizienten für Radiopharmazeutika in der Nuklearmedizin durchzuführen. Ausgewählte Radiopharmazeutika, ihre biokinetischen Modelle und Parameter werden vorgestellt. Ein kurzer Exkurs in die Funktionsweise von PET (**P**ositron **E**mission **T**omography) und SPECT (**S**ingle-**P**hoton **E**mission **C**omputed **T**omography) wird gegeben. Es wird ein Computerprogramm beschrieben, das zur Berechnung der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten entwickelt wurde. Im Rahmen der Unsicherheitsanalyse wird die Vorgehensweise bei Bestimmung der Unsicherheiten der zusammengestellten biokinetischen Modellparameter, der mittels Voxel-Phantomen bestimmten S-Faktoren sowie der Dosiskoeffizienten der ausgewählten Radiopharmazeutika ausführlich dargelegt. Zum Schluss wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse die Vorgehensweise bei der Identifikation der sensitiven Parameter dargestellt.

In **Kapitel 6** werden abschließend die Ergebnisse dieser Arbeit aus der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse tabellarisch und graphisch zusammengefasst und ausführlich diskutiert.

Kapitel 7 stellt eine kurze Zusammenfassung der Arbeit dar.

Die zahlreichen für die Arbeit benötigten Daten werden im **Anhang** in Form von Tabellen dargestellt. In **Kapitel A** werden die Referenzwerte für Dosiskoeffizienten, die man in verschiedenen Studien recherchiert hat, zusammengefasst. Diese Werte dienen als Vergleichswerte für die in dieser Arbeit berechneten Dosiskoeffizienten. Statistische Daten von biokinetischen Parametern, die zur Berechnung der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten eingesetzt werden, sind in **Kapitel B** zu finden.

2 Unsicherheitsanalyse

2.1 Einleitung

Um einen natürlichen Prozess zu beschreiben, z. B. den der Biokinetik, dem Materialtransport im menschlichen Körper, wird sich oft mathematischer Modelle bedient. Solche Modelle beschreiben komplexe natürliche Abläufe nur approximativ und sie unterliegen teilweise großen Unsicherheiten. Modellierungen an sich sind daher immer mit Unsicherheiten behaftet.

Die Unsicherheitsanalyse dient in erster Linie dazu, alle Unsicherheitsquellen einer Modellkette zu analysieren und miteinander zu verknüpfen, um die Gesamtunsicherheit der Modellvorhersagen abschätzen zu können. Das Ziel einer Unsicherheitsanalyse besteht demnach darin, eine Eintrittswahrscheinlichkeit zu ermitteln, mit der das erzielte Ergebnis innerhalb eines bestimmten Intervalls liegt. Mithilfe der Unsicherheitsanalyse soll die Transparenz zu allen Aspekten der Expositionsschätzung und Risikobewertung erhöht werden. Die Entscheidungsträger und Interessensvertreter sind dadurch in der Lage, die Risikobewertungen besser verstehen zu können und die Entscheidungen begründet zu treffen.

Die Ursachen für die Unsicherheiten sind unterschiedlicher Natur und oft schwer aufzudecken. Je mehr man jedoch über diese Ursachen weiß, desto einfacher ist es, sie zu reduzieren.

Es liegt nahe, Unsicherheiten in entsprechende Klassen zu unterteilen. Hierbei hat sich die Unterteilung in „objektive Unsicherheiten“ und „subjektive Unsicherheiten“ bewährt.

Die objektiven Unsicherheiten werden oft Unsicherheiten vom Typ A, natürliche oder auch aleatorische Unsicherheiten, genannt. Wie der Name schon verrät, werden hierbei stochastische Unsicherheiten bezeichnet, die mit wirklichen Zufallsprozessen, z. B. Turbulenzen, eines zu untersuchenden Phänomens zusammenhängen. Die objektiven Unsicherheiten können durch bekannte Verteilungsfunktionen charakterisiert werden. Bei diesen Unsicherheiten lassen sich die

Zufallsprozesse kaum vermeiden oder auch reduzieren, weil der Mensch diese natürliche Variabilität definitionsgemäß nicht beeinflussen kann.

Die subjektiven Unsicherheiten, in der Literatur oft auch als Unsicherheiten vom Typ B oder als epistemische Unsicherheiten bezeichnet, entstehen durch mangelndes Wissen, z. B. bezüglich der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeiten oder des zugehörigen Modells. Hierbei hat der Mensch sehr wohl einen Einfluss. Durch steigendes Wissen über die zu untersuchenden Prozesse lassen sich die epistemischen Unsicherheiten verringern oder gar vermeiden.

Die Aufspaltung von Unsicherheiten in diese beiden Klassen hat den Vorteil, die beeinflussbaren Unsicherheiten von den stochastischen Unsicherheiten zu trennen, um so den Forschungsbedarf aufzuzeigen.

Zur feineren Auflösung von Unsicherheiten wird über die Klassifizierung von Unsicherheitsquellen diskutiert. Diese Unsicherheitsquellen sind sehr vielfältig und lassen sich nur schwer in verschiedene Klassen unterteilen. In der Literatur sind jedoch solche Klassifizierungen zu finden und eine davon ist die, die Effekte von Einflussgrößen (Szenario, Modell, Parameter) auf die Exposition bzw. das Risiko beschreibt und in die entsprechenden Klassen Szenario-Unsicherheit, Modellunsicherheit und Parameterunsicherheit unterteilt [61].

Die Szenario-Unsicherheit wird als die Unsicherheit angesehen, die entsteht, wenn nicht alle denkbaren Szenarien berücksichtigt worden sind. Da die Vollständigkeit relevanter Szenarien nicht nachgewiesen werden kann, bleibt aus diesem Grund immer eine nicht erfassbare Restunsicherheit übrig.

Modellunsicherheiten hingegen resultieren aus falschen oder vereinfachten Modellannahmen, aus Fehlern in der theoretischen Struktur des Modells, Verständnismängeln des ganzen Systems sowie aus der Umsetzung der Prozessalgorithmen. Modelle sind nur eine approximative Darstellung der Realität und können nicht alle, sondern nur spezifische Sachverhalte betrachten. Manche biokinetischen Modelle, die in dieser Arbeit betrachtet werden, sind Modelle, die z. B. auf gewöhnlichen Differenzialgleichungen erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten basieren. Auch die Modellauflösung ist wegen der endlichen Zahl von Kompartimenten, die in den biokinetischen Modellen die menschlichen Organe oder spezifische Regionen beschreiben, begrenzt. Durch noch immer begrenzte Rechnerkapazität und Zeitmangel müssen Prozesse in der Modellierung häufig vereinfacht dargestellt werden, was sich in den Unsicherheiten widerspiegelt.

Bei der mathematischen Abbildung komplexer natürlicher Prozesse mittels mathematischer Modelle sind zahlreiche Parameter, die den Zustand eines Systems oder Prozesses repräsentieren, erforderlich. Als Parameterunsicherheiten bezeichnet man die Unsicherheiten, die eben mit diesen Parametern zusammenhängen. Diese resultieren aus schlecht bestimmmbaren Modellparametern, falschen Wertebereichen und dem Einfluss sensibler Parameter. Bei der Modellierung verschiedener Prozesse können auch Parameterinteraktionen bestehen, die nicht verstanden oder vollständig

erfasst sind. Aus diesem Grund liefern auch diese einen Beitrag zur Gesamtunsicherheit einer Modellkette.

Wie wir weiter unten sehen werden sind Parameter, die in dieser Arbeit betrachtete Modelle beschreiben in erster Linie Transferkoeffizienten zwischen Kompartimenten in biokinetischen Modellen sowie die in den Organen absorbierten Energiebruchteile ionisierender Strahlung. Dies sind gemessene, „gefittete“ oder berechnete Größen, die sowohl einer stochastischen als auch einer systematischen Variabilität unterliegen. Bei solchen Modellen ist es unmöglich, die Parameter genau zu quantifizieren. Man hat hier vielmehr mehrere Parametersätze, die zu ähnlich guten Ergebnissen führen. Die Messgrößen sind heuristischer Natur. Sie stellen eine Stichprobe aus einer unbekannten Grundgesamtheit dar und sind entsprechend mit den Unsicherheiten verbunden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Unsicherheitsanalyse nur die Modellparameterunsicherheiten betrachtet.

2.2 Unsicherheitsfortpflanzung

Bei der Bestimmung der das Modell beschreibenden Parameter liegt eine gewisse Unsicherheit vor, sodass diese Parameter nicht genau, sondern vielmehr über eine Verteilungsfunktion fehlerhaft beschrieben werden. Diese Unsicherheit kann sich über die Modellkette fortpflanzen und resultiert schlussendlich in der Unsicherheit der Ausgangsgröße. Es gibt unterschiedliche Arten, wie man diese Unsicherheitsfortpflanzung mathematisch behandelt. Dazu stehen analytische, statistische und numerische Methoden zur Verfügung, die in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurden. Eines der gängigsten analytischen Verfahren ist das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz. Das Gesetz gibt den geschätzten Wert Δy , die Unsicherheit von y , an:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots} \quad (2.1)$$

Dabei ist $y = y(x_1, x_2, \dots)$ eine Funktion von unabhängigen Variablen x_1, x_2, \dots , die das eigentliche Modell beschreibt.

Als Standardunsicherheit wird oft die Standardabweichung u_x angesehen. Dabei gilt $u_x = s_x = \sqrt{Var(x)}$ und $Var(x) = s_x^2 = u_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$. $Var(x)$ stellt die korrigierte Varianz dar. Damit wird das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz zu:

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} u_2\right)^2 + \dots} \quad (2.2)$$

Sind die n Variablen x_1, x_2, \dots, x_n der Funktion y abhängig, dann muss das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz zum verallgemeinerten Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz erweitert werden:

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} u_i \right)^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \right) u(x_i, x_k)} \quad (2.3)$$

Dabei stellt $u(x_i, x_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ die korrigierte Kovarianz zwischen jeweils zwei Größen dar.

Ist die Funktion, die das Modell beschreibt, nicht zu komplex, so kann die Unsicherheitsfortpflanzung eben mithilfe des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes berechnet werden.

2.3 Monte-Carlo-Sampling-Technik

Bei komplexeren mathematischen Modellen bietet sich ein nummerisches Verfahren an, die Unsicherheitsfortpflanzung zu untersuchen. Sehr verbreitet und etabliert sind vor allem die Methoden einer stochastischen Szenarioanalyse, Monte-Carlo-Simulation genannt, und unterschiedliche Verfahren, die darauf aufbauen.

Wesentlicher Bestandteil einer Monte-Carlo-Simulation ist die Wahrscheinlichkeitstheorie und die Statistik. Mithilfe der Monte-Carlo-Simulation werden Stichproben (Samples) von Eingangsgrößen eines mathematischen Modells auf zufällige Art generiert. Da das vorliegende mathematische Modell in der Regel deterministischer Natur ist, werden aus den so gewonnenen Eingangsgrößen über das Ursache-Wirkungsgeflecht die zugehörigen Ausgangsgrößen eindeutig bestimmt. Durch ständige Wiederholung dieser Prozedur wird somit eine große Zahl an zufälligen Ausgangsgrößen berechnet, was einen guten Näherungswert für die tatsächlichen Werte dieser Zielgrößen darstellt (Gesetz der großen Zahlen).

Die Generierung einer großen Anzahl von unterschiedlichen Eingangsgrößen oder Parametersätzen kann mit verschiedenen Sampling-Verfahren bewerkstelligt werden. Eine der bekanntesten solcher Methoden, die Latin-Hypercube-Sampling-Methode (LHS), wurde im Rahmen dieser Arbeit implementiert und wird im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben.

2.3.1 Latin-Hypercube-Sampling-Methode (LHS)

Die Latin-Hypercube-Sampling-Methode wurde von McKay, Beckman und Conover entwickelt und erstmals in [58] vorgestellt. Sie stellt ein mathematisches Verfahren, die Parameter-Samples zu generieren, dar und dient dazu, den Rechenaufwand zu reduzieren. Dabei können präzisere Ergebnisse erreicht und die Anzahl der durchzuführenden Simulationen minimiert werden.

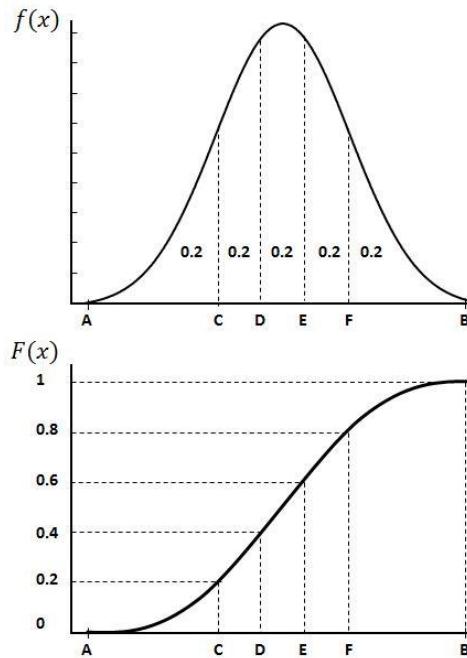
Für die Erstellung von n Samples für jeden der Parameter X_1, \dots, X_k , wird der Bereich von jedem Parameter, innerhalb dessen die Samples generiert werden sollen, in n Abschnitte von gleicher Wahrscheinlichkeit geteilt. In Bezug auf die Wahrscheinlichkeitsdichte wird innerhalb eines jeden Intervalls ein Wert auf zufällige Weise ausgewählt. Die so generierten n Werte des Parameters X_1 werden mit den n Werten des zweiten Parameters X_2 ausgehend von der gleichen Wahrscheinlichkeit auf die zufällige Art kombiniert. Diesen Duplet kombiniert man auf die zufällige Art mit dem dritten Parameter X_3 und so weiter, bis n k -Tupel gebildet sind. Die i -te Zeilen der so entstandenen $n \times k$ -Matrix stellen dann den k -Tupel der Parameter für den i -ten „computer run“ für das Computermodell dar.

Nimmt man an, dass die betrachtete Variable X_1 eine Normalverteilung besitzt und zwischen zwei Grenzwerten A und B liegt, die ein Konfidenzintervall von 99,9 % umschließen, so gilt

$P(X_1 \leq A) = 0,0005$ und $P(X_1 \geq B) = 0,0005$, wobei $P(E)$ die Wahrscheinlichkeit einer Zufallsvariable E darstellt. A und B sind also die 0,0005- und die 0,9995-Quantile der Verteilung X_1 . Die Wahrscheinlichkeit die Variable X_1 im Bereich zwischen A und B vorzufinden ist 99,9 %. Es gilt also $P(A \leq X_1 \leq B) = 0,999$. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Normalverteilung der Variable X_1 können mithilfe der Grenzwerte A und B bestimmt werden. Für den Mittelwert der Normalverteilung gilt $\mu = \frac{(A+B)}{2}$. Mit den standardisierten Zufallsvariablen $Z = \frac{X-\mu}{\sigma}$ und $P(Z \leq -3,29) = 0,0005$ gilt für die Standardabweichung: $\sigma = \frac{(B-A)}{6,58}$.

An folgendem Beispiel soll die Generierung von Stichproben für $n = 5$ Parameter-Samples deutlich gemacht werden.

Man teilt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eines jeden Parameters in $n = 5$ Abschnitte, die gleicher Wahrscheinlichkeit entsprechen (Abbildung 1). Da $P(A \leq X_1 \leq C) = P(C \leq X_1 \leq D) = \dots = P(F \leq X_1 \leq B) = 0,1998$ gilt, haben die Flächen unter der Kurve, die die Dichte darstellt, die gleichen Flächen von der Größe 0,1998, d. h. abgerundet von ca. 0,2. Dies entspricht bei der Verteilungsfunktion den äquidistanten Abschnitten von 0,2 auf der Y -Achse.



ABBLUDUNG 1. Gleichmäßige Aufteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte bzw. der Verteilungsfunktion bezüglich der Wahrscheinlichkeiten für die Generierung mit LHS von $n = 5$ Samples

Der nächste Schritt wäre, einen Wert für X_1 aus jedem Bereich auszuwählen. Man wählt einen zufälligen Wert für die Wahrscheinlichkeit aus jedem Bereich, indem man die folgende Beziehung anwendet: $P_i = U_i \times 0,2 + (i - 1) \times 0,2$, mit $i = 1, 2, 3, 4, 5$. Die Werte für U_i werden aus dem Wertebereich von $(0, 1)$ zufällig gewürfelt. Die entsprechenden Samples für jeden Bereich werden aus der inversen Verteilungsfunktion berechnet:

$$X_1 = F_{X_1}^{-1} \left(\frac{i - 1 + U_i}{5} \right) \quad (2.4)$$

Zum Schluss wird noch jedes Intervall (Abbildung 1) durchnummeriert $AC = 1$, $CD = 2$, $DE = 3$, $EF = 4$, $FB = 5$. Diese Vorgehensweise wird für die restlichen Parameter X_2, \dots, X_k wiederholt.

Anschließend bildet man für jeden Parameter Zufallspermutationen der natürlichen Zahlen $(1, 2, 3, 4, 5)$. Die zu diesen Zahlen zugehörigen Samples jeder Variablen werden miteinander kombiniert. Tabelle 1 zeigt eine mögliche Paarung für zwei Variable:

TABELLE 1. Mögliche Paarung von Intervallnummern für zwei Parameter, aus denen mittels LHS Sample-Paare als Computer-Runs für ein mathematisches Modell generiert werden

Computer Run	Intervallnummer für X_1	Intervallnummer für X_2
1	4	1
2	2	4
3	5	3
4	1	2
5	3	5

Auf diese Art werden Permutationen für k -Variablen und n -Samples gebildet und miteinander kombiniert, um k -Tupel für jeden der n Computer-Runs zu generieren.

2.3.2 Pseudozufallszahlen und Quasi-Monte-Carlo-Simulation

Neben der LHS-Methode gibt es auch andere numerische Verfahren, die zum Lösen analytisch schwer lösbarer Probleme angewandt werden. So gibt es bei numerischer Integration, bei der unter anderem die Funktion an bestimmten Punkten berechnet werden muss, verschiedene Verfahren, die diese Punkte als Zahlensequenzen auf willkürliche Weise generieren. Jede dieser Methoden hat ihre Nach- und Vorteile. Obwohl die LHS-Methode in dieser Arbeit implementiert ist, sollen andere Methoden hier zum Vergleich vorgestellt werden.

Eine der alternativen numerischen Methoden ist die Simpson-Regel, ein Verfahren, bei dem zur Bestimmung eines Integrals die Funktion von einer Parabel approximiert wird. Schaut man sich die generierten Punkte in zwei Dimensionen, also für zwei Parameter, an, so stellt man fest, dass sie äquidistant zueinander, gleichmäßig die ganze Fläche ausfüllen (Abbildung 2) [10]. Der Nachteil dieser Technik ist es jedoch, dass ein ausreichend dichtes Gitter in höheren Dimensionen schwer zu konstruieren ist.

Ein anderes numerisches Verfahren, eine klassische Monte-Carlo-Simulation, verwendet zu Generierung von benötigten Punkten die Pseudozufallszahlen. Der meistverbreitete Generator zur Erzeugung von Pseudozufallszahlen ist der Kongruenzgenerator. Die Zahlenfolge wird hier rekursiv nach folgendem Schema generiert

$$x_{n+1} = (ax_n + b) \bmod m \quad (2.5)$$

Bei geeigneter Wahl von a, b, m und des Startwerts (engl. “seed”) x_0 können die Zufallszahlen x_n leicht berechnet werden. Benötigt man die Zufallszahlen, die gleichmäßig im Intervall $[0, 1]$ verteilt sind, so können diese aus $u_i = \frac{x_i}{m}$ gewonnen werden. Die Pseudozufallszahlen zeigen eine Tendenz,

Cluster zu bilden. Die Fläche wird nicht gleichmäßig befüllt; es gibt Bereiche mit mehreren Punkten oder auch Bereiche, in denen gar keine Punkte vorhanden sind (Abbildung 2).

Bei der Latin-Hypercube-Sampling-Methode wird die Fläche, verglichen mit den Pseudozufallszahlen, gleichmäßiger ausgefüllt. Die Clustering-Effekte werden vermieden indem kein Intervall k -mal belegt wird, solange nicht jedes andere Intervall mindestens $k - 1$ -mal besetzt ist (Abbildung 2).

Quasi-Monte-Carlo-Simulation (QMC) ist ein Verfahren, das versucht die Vorteile der Simpson-Regel und des Pseudozufallsgenerators zu vereinen. Im Vergleich zur traditionellen Monte-Carlo-Simulation werden bei der Quasi-Monte-Carlo-Simulation anstatt von Pseudozufallszahlen die Quasizufallszahlen (engl. *quasirandom* oder auch *low-discrepancy sequences*) verwendet. Der Name „Quasizufallszahlen“ röhrt daher, dass die Zahlenfolge nicht zufällig generiert wird. Vielmehr werden die Zahlen deterministischen Zahlensequenzen entnommen. Die Stichproben werden so konstruiert, dass sie den Raum auf eine quasizufällige aber gleichmäßige Art und Weise ausfüllen (Abbildung 2).

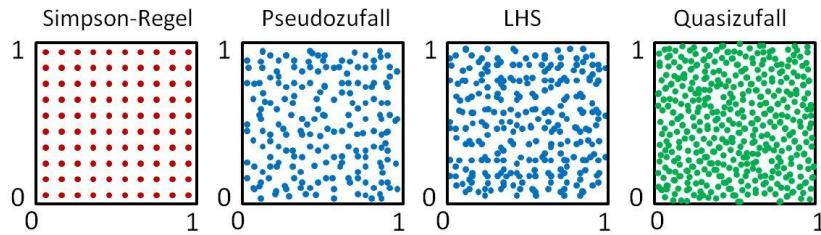


ABBILDUNG 2. Vergleich verschiedener Methoden zur Bildung von Zufallszahlen [24]

Zur besseren Unterscheidbarkeit wurde bei der Simpson-Regel in Abbildung 2 kleinere Anzahl an Samples dargestellt als bei den restlichen Verfahren. Die Anzahl der Samples bei den Pseudozufallszahlen, LHS-Zahlen und Quasizufallszahlen in Abbildung 2 ist gleich.

Zur Erstellung solcher Stichproben, die auf Quasizufallszahlen basieren, gibt es viele Ansätze, unter anderem von Halton [23], Faure [22], Niederreiter [65, 66] oder Sobol [79]. Will man die Güte einer Stichprobe bewerten, so wird oft die Diskrepanz als bestes Maß verwendet. Man definiert diese durch folgenden Ausdruck:

$$D_N = \sup_{B \in \Omega^k} \left| \frac{A(L)}{N} - \lambda_k(L) \right| \quad (2.6)$$

Dabei stellt $A(L)$ die Anzahl aller Punkte dar, die in den beliebigen Bereich L des Hyperkubus Ω^k fallen, und $\lambda_k(B)$ ist das Lebesgue-Maß. Schaut man sich die Stichprobe in einem Raum verteilt an, so ist die Diskrepanz ein Maß für die Gleichförmigkeit der Verteilung.

Obwohl die Sobol-Sequenz nicht die kleinste asymptotische Diskrepanz zeigt, dominiert sie in der Literatur zum Thema Sensitivitätsanalyse.

Die Sobol-Sequenz ist eine Stichprobe von n Punkten in einem Einheitshyperkubus $[0,1]^d$, wo d die Dimension des Problems darstellt. Jedes Element der Sequenz ist also ein Vektor der Länge d , deren Komponenten Bruchteile zwischen 0 und 1 sind.

Eine mögliche Berechnung der Sobol-Sequenz, ähnlich dem Schema des Kongruenzgenerators, kann nach der rekursiven Formel von Antonov und Saleev [3] durchgeführt werden:

$$x_{n+1} = v_{j(n)} \oplus x_n \quad (2.7)$$

\oplus stellt einen bit-weisen Kontravalenzoperator für Multiplikation dar. Er ist dem XOR-Operator zwischen zwei Zahlen von der Basis 2 äquivalent.

Im Unterschied zu den Koeffizienten a und b des Kongruenzgenerators, ist der Koeffizient $v_{j(n)}$ ein Vektor und variiert mit dem Index n und der Dimension d . Den Koeffizienten $v_{j(n)}$ nennt man Direction Number.

Um den Index $j(n)$ der Direction Number $v_{j(n)}$ zu bestimmen, stellt man den Index n als Zahl der Basis 2 dar und bestimmt von rechts aus gesehen die Platznummer der ersten „0“. Die Zahl gibt dann den Index $j(n)$ wieder.

Will man eine Sobol-Sequenz der Länge n erzeugen, so sind dafür $k = \lceil \log_2 n \rceil$ Direction Numbers für jede Dimension notwendig. Aus der Abbildung 2 ist ersichtlich, dass die Quasizufallszahlen Muster bilden, in denen keine Punkte vorhanden sind.

Das schwierigste an der Berechnung der Sobol-Sequenzen ist die Bestimmung von Direction Numbers. Sind die einmal bestimmt, ist die Berechnung der Sequenzzahlen schnell und einfach. Da in dieser Arbeit die Latin-Hypercube-Sampling-Methode implementiert ist und die Quasi-Monte-Carlo-Simulation nur zum Vergleich vorgestellt wird, soll hier nicht auf die Einzelheiten eingegangen und die Berechnung von Direction Numbers nicht erklärt werden.

Es kann gezeigt werden, dass sich die Güte der Stichprobe durch ein Resampling (zufallsbasierte Auswahl an Stichpunkten aus der Stichprobe) mit Pseudozufallsgenerator oder QMC nicht ändert, während sich die Diskrepanz beim Resampling mit der LHS-Methode ändern kann [24]. Da bei den Simulationen in dieser Arbeit ein Resampling nicht durchgeführt wird, ist der Nachteil der LHS-Technik gegenüber der QMC-Technik für die in dieser Arbeit gestellten Aufgaben nicht von Bedeutung.

Es wurde gezeigt, dass die Simulationen, die Sequenzen von Quasizufallsszahlen anstatt von Pseudozufallsszahlen benutzen, schneller konvergieren bei nicht zu hohen Dimensionen [10].

3 Sensitivitätsanalyse

3.1 Einleitung

Unter dem Begriff Sensitivitätsanalyse versteht man eine Reihe von Verfahren, die die Variabilität einzelner Modellparameter mit der Variabilität der Ausgangsgröße des Modells in Zusammenhang bringen. Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, Teile einer Modellkette oder Parameter einzeln zu variieren und den Einfluss auf die Zielgröße qualitativ und quantitativ zu untersuchen. Als eine mögliche Definition der Sensitivitätsanalyse nennen Saltelli et al. [71] eine „Untersuchung, wie die Unsicherheit in der Ausgangsgröße des Modells (numerisch oder auch anders) auf die verschiedenen Unsicherheitsquellen in den Eingangsgrößen aufgeteilt werden kann“. Eine andere mögliche Definition der Sensitivität gibt McCuen in seinem Buch [57]; er beschreibt sie als „Ausmaß der Änderung eines Faktors im Bezug zu der Veränderung eines anderen Faktors“.

Durch die Sensitivitätsanalyse können demnach besonders sensitive Modellparameter identifiziert werden, die den größten Einfluss auf die Unsicherheit der Ausgangsgröße haben und daher im Rahmen einer Modellbildung genauer untersucht werden sollen. So soll bei der Modellbildung in der internen Dosimetrie den sensitiven Einflussgrößen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, um die Expositionen und Risiken zu mindern.

Die mathematischen Modelle, die die natürlichen Prozesse beschreiben, werden mit zunehmender Anzahl einzelner Parameter immer komplexer, was bei begrenzten Rechnerkapazitäten zu Komplikationen führen kann. Die Sensitivitätsanalyse kann hierbei helfen, die weniger einflussreichen Parameter zu identifizieren und gegebenenfalls auszuschließen, um bei der Unsicherheitsanalyse den Rechenaufwand zu minimieren.

Der Forschungsbedarf für die bedeutsamen Faktoren kann damit begründet und die groben Schätzungen oder Fixierungen weniger einflussreicher Parametern gerechtfertigt werden.

Da einzelne Modellparameter oftmals in einer komplexen Wechselwirkung zueinander stehen, ist auch die Parameterinteraktion der Gegenstand der Untersuchung in der Sensitivitätsanalyse.

3.2 Lokale und globale Sensitivitätsanalysen (LSA und GSA)

Die zahlreichen Verfahren der Sensitivitätsanalyse können im Allgemeinen in drei Klassen gegliedert werden: lokale Sensitivitätsanalysen, globale Sensitivitätsanalysen und die sogenannten Screening-Methoden. Manchmal spricht man auch von deterministischen und stochastischen Ansätzen.

Bei der lokalen oder deterministischen Sensitivitätsanalyse untersucht man die Variabilität örtlich begrenzter Antwortgrößen eines Modells bei der gleichzeitigen Variation einer einzelnen Eingangsgröße, während die restlichen Eingangsgrößen auf einen bestimmten Wert fixiert, also konstant gehalten, werden (One-At-a-Time-Methode, OAT). Wiederholt man dieses Vorgehen für jeden einzelnen Modellparameter, so kann die jeweilige spezifische Sensitivität in Form von

partiellen Ableitungen oder auch Korrelationskoeffizienten bestimmt werden. Diese lokalen Bewertungsmaße können nur im Falle eines linearen Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen verwendet werden.

Obwohl die Umsetzung der lokalen Sensitivitätsanalyse recht einfach ist und sie einen ersten Überblick über die Sensitivität einzelner Eingangsgrößen bietet, sind die Nachteile dieser Technik nicht zu übersehen. Lokale Sensitivitäten haben nur geringe Aussagekraft, weil wegen der lokal eingeschränkten Betrachtung die Ausgangsgrößen nur an den Grenzen abgetastet werden. Es wird nicht der komplette Parameterraum abgedeckt. Ein weiterer Nachteil dieser Technik ist die Tatsache, dass die Interaktion zwischen den einzelnen Eingangsgrößen außer Acht gelassen wird. Auch wenn die Varianz eines einzelnen Modellparameters auf die Ausgangsgröße keinen Einfluss zu haben scheint, kann sie einen großen Einfluss auf eine andere Eingangsgröße haben.

In den globalen Sensitivitätsanalysen können Interaktionen zwischen einzelnen Parametern berücksichtigt und quantifiziert werden. Im Unterschied zu lokalen Verfahren können alle Modellparameter gleichzeitig variiert werden.

In der globalen Sensitivitätsanalyse wird außerdem der gesamte Werteraum der Eingangs- und Ausgangsgrößen in Betracht gezogen. Die zugehörigen globalen Sensitivitätsmaße wie die Sensitivitätsindices von Sobol betrachten den Einfluss der Variabilität der Eingangsgrößen auf die Streuung der Ausgangsgrößen im gesamten nichtlinearen Werteraum.

Die Streuung jedes einzelnen Parameters kann durch verschiedene Verteilungsfunktionen (z. B. normalverteilt oder logarithmisch normalverteilt) charakterisiert werden. Mittels eines stochastischen Verfahrens (z. B. Monte-Carlo-Simulation oder Latin-Hypercube-Sampling-Methode) lassen sich beliebig viele unterschiedliche Parametersätze testen und einzelne Parameter miteinander vergleichen. Obwohl die globale Sensitivitätsanalyse einen deutlich größeren Rechenaufwand erfordert, wird es empfohlen die Parameterinteraktionen in einem Modell zu berücksichtigen, um die Fehleinschätzung der Sensitivität durch lokale Verfahren zu vermeiden [70].

Unter Screening-Methoden versteht man eine Kombination lokaler und globaler Verfahren. Diese werden hauptsächlich zur Reduzierung von Rechenaufwand in globalen Verfahren benutzt, indem Parameter mit geringem Einfluss auf die Ausgangsgröße auf einem konstanten Wert gehalten (fixiert) werden und die restlichen Parameter gemäß ihrer Verteilungsfunktionen variieren. Eine solche Methode, die sogenannte Morris-Methode, wird weiter unten ausführlicher vorgestellt [63].

3.3 Methoden der Sensitivitätsanalysen

Die Anzahl von unterschiedlichen Methoden der Sensitivitätsanalysen ist recht groß. Die Auswahl reicht von subjektiven und graphischen Verfahren bis hin zu quantitativen Ansätzen. Regressions- und Korrelationskoeffizienten, Sensitivitätsindices und Sensitivitätsmaße sind einige der vielen Bewertungsmaße, die zur Beurteilung der Parametersensitivität herangezogen werden können. [29] gibt einen Überblick über diese herkömmlichen visuellen und nichtvisuellen Verfahren.

Die Auswahl einer passenden Methode hängt mit vielen Aspekten zusammen und erweist sich oft als nicht einfach. Sie richtet sich nach Faktoren wie der Problemstellung, dem Systemmodellaufbau oder dem zeitlichen Rahmen des Projekts. Mit steigender Parameterzahl werden Modelle und damit auch die Sensitivitätsanalysen immer komplexer. Aus diesem Grund ist die begrenzte Rechenkapazität ein weiterer Aspekt, nach dem sich die Auswahl eines richtigen Verfahrens richten soll.

In den nächsten Kapiteln werden einige ausgewählte Methoden der Sensitivitätsanalysen im Detail besprochen und miteinander verglichen.

3.3.1 Scatterplots und Ableitungen

Eine einfache Methode der Sensitivitätsanalyse, die Abhängigkeit der Variabilität der Ausgangsgröße eines Modells von der Variabilität der Eingangsparameter zu visualisieren, sind die Scatterplots. Die Parametersensitivität wird hier durch eine graphische Darstellung dieser Abhängigkeit subjektiv beurteilt. Im Folgenden soll die Vorgehensweise bei der Sensitivitätsanalyse mithilfe von Scatterplots kurz erläutert werden.

Das zu untersuchende lineare Modell soll durch folgende Funktion Y beschrieben werden:

$$Y = \sum_{i=1}^r \Omega_i Z_i \quad (3.1)$$

Werden Ω 's als konstante Koeffizienten gesetzt, dann sind $\vec{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_r)$ die eigentlichen Eingangsparameter des Modells. Die Parameter sollen normalverteilt und unabhängig sein $Z_i \sim N(0, \sigma_{Z_i})$ und $\sigma_{Z_1} < \sigma_{Z_2} < \dots < \sigma_{Z_r}$. Hier wurde einfachheitshalber angenommen, dass der Mittelwert der Verteilungen 0 ist und dass die Standardabweichungen von Parameter zu Parameter grösser werden.

Will man den Einfluss eines jeden Parameters auf die Funktion Y untersuchen, so generiert man mithilfe von Monte Carlo für jeden Parameter, basierend auf deren Normalverteilung, N -Samples. Auf diese Weise generiert man eine Input-Matrix M , wo die Zeilen N Parametersätze bilden:

$$M = \begin{bmatrix} z_1^1 & z_2^1 & \dots & z_r^1 \\ z_1^2 & z_2^2 & \dots & z_r^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_r^{N-1} \\ z_1^N & z_2^N & \dots & z_r^N \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Jede Zeile der Matrix stellt einen r -Tupel für die Berechnung von Y nach (3.1) dar. Die N Berechnungen ergeben für die Funktion einen Output-Vektor \mathbf{Y}

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y^1 \\ y^2 \\ \vdots \\ y^{N-1} \\ y^N \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Anschließend bildet man die Scatterplots, indem man die N -Samples eines jeden Parameters Z gegenüber N Werten des Outputs Y aufträgt. Zeigt der Scatterplot für einen der Parameter ein ausgebildeteres Muster als die restlichen Scatterplots, wo die Punkte mehr oder weniger willkürlich um den Nullpunkt verteilt sind, so kann man daraus folgern, dass derjenige Parameter auch den größten Einfluss auf die Funktion hat. So kann die Sensitivität einzelner Parameter qualitativ abgeschätzt werden.

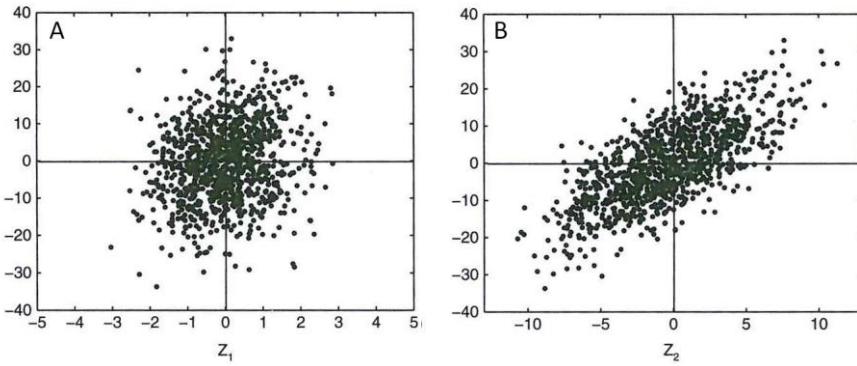


ABBILDUNG 3 Scatterplots der Variablen Z_1 und Z_2 . Qualitativ gesehen scheint die Variable Z_2 einen größeren Einfluss auf die Funktion Y zu haben als die Variable Z_1 [69]

Will man die Sensitivität jedoch quantifizieren, so geben oft die Ableitungen einer Funktion nach der entsprechenden Variablen die Sensitivität des Funktionswertes nach eben dieser Variablen wieder. Bildet man die partiellen Ableitungen der Funktion Y nach einzelnen Parametern Z_i , so erhält man für das betrachtete Modell (3.1) den konstanten Wert:

$$S_{Z_i} = \frac{\partial Y}{\partial Z_i} = \Omega_i \quad (3.4)$$

Dies würde bedeuten, dass Y gegenüber jedem Parameter Z_i gleich sensitiv ist, unabhängig davon, ob sich die Standardabweichungen der Parameter unterscheiden oder nicht. Dies ist mit den Ergebnissen aus den Scatterplots nicht konform und spiegelt die Tatsache unterschiedlicher Sensitivität nicht wider. Eine Abhilfe hierzu kann die Normalisierung von Ableitungen mithilfe von Standardabweichungen schaffen:

$$S_{Z_i}^\sigma = \frac{\sigma_{Z_i} \partial Y}{\sigma_Y \partial Z_i} = \frac{\sigma_{Z_i}}{\sigma_Y} \Omega_i \quad (3.5)$$

Es gilt

$$\sum_{i=1}^r (S_{Z_i}^\sigma)^2 = 1 \quad (3.6)$$

Wie man aus der Beziehung (3.5) ersehen kann, wächst auch die Sensitivität einzelner Parameter gegenüber Y mit steigender Standardabweichung. Die Sensitivitätsindices sind auf 1 normiert und sind sowohl von der Größe Ω als auch von der Standardabweichung σ abhängig. Die normalisierten Ableitungen wie in (3.5) könnten daher benutzt werden, um die Parametersensitivität quantitativ zu erfassen.

3.3.2 Lineare Regression

Die Einflüsse der Variabilität einzelner Modellparameter auf die Variabilität der Ausgangsgröße lassen sich demnach mit den Scatterplots subjektiv und visuell bestimmen. Bei einer großen Zahl von Parametern nimmt die Übersichtlichkeit jedoch deutlich ab. Die gängigste Methode, die Scatterplots zu quantifizieren, d. h. der Stärke der Sensitivität einzelner Modellparameter eine Zahl zuzuordnen, ist die lineare Regression. Neben den normierten Ableitungen ist es eine weitere Möglichkeit zur quantitativen Sensitivitätsanalyse.

Geht man von (3.2) und (3.3) und der Tatsache aus, dass die Funktion, die das Modell beschreibt, linear ist, dann gilt:

$$\hat{y}^j = b_0 + \sum_{i=1}^r b_{Z_i} z_i^j \quad (3.7)$$

Die Differenz von den mithilfe von Monte Carlo bestimmten Werten y^j und den Werten von \hat{y}^j stellt das sogenannte Residuum dar $e^j = y^j - \hat{y}^j$. Aus der Minimierung des Residuums im Quadrat mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate können die Werte für die Regressionskoeffizienten b_{Z_i} und b_0 gewonnen werden. Viel öfter verwendet man den sogenannten Standardisierten Regressionskoeffizienten, der durch die Beziehung (3.8) gegeben ist:

$$\beta_{Z_i} = b_{Z_i} \frac{\sigma_{Z_i}}{\sigma_Y} \quad (3.8)$$

Für das Beispiel von oben gilt $\beta_{Z_i} = S_{Z_i}^\sigma$ und

$$\sum_{i=1}^r (\beta_{Z_i})^2 = 1 \quad (3.9)$$

Dass die Werte gleich sind, liegt daran, dass das Modell linear ist. Wäre dies nicht der Fall, so wären die Werte unterschiedlich. Man würde aber die β_{Z_i} bevorzugen, da sie robuster und zuverlässiger

wären als die $S_{Z_i}^\sigma$ Werte. Die β_{Z_i} sind multidimensional gemittelte Werte, die $S_{Z_i}^\sigma$ Werte wurden dagegen am Mittelpunkt der Verteilung von Z_i gemessen, während die restlichen Parameter fix im Mittelpunkt gehalten worden sind. β_{Z_i} ist das Ergebnis der Untersuchung des kompletten Wertebereichs der Eingangsparameter.

Als Maß der linearen Abhängigkeit verwendet man oft das sogenannte Bestimmtheitsmaß R_Y^2 (oft auch Determinationskoeffizient genannt), das durch die folgende Beziehung gegeben ist:

$$R_Y^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.10)$$

Ergibt dies für einen Parameter Z_i beispielsweise 95 %, so würde das heißen, dass 95 % der Variation aller Y mit Z_i erklärt werden können.

Beachte, dass aus $\sum_{i=1}^r (\beta_{Z_i})^2 = 1 = \sum_{i=1}^r \left(b_{Z_i} \frac{\sigma_{Z_i}}{\sigma_Y}\right)^2$ folgt $\sum_{i=1}^r (b_{Z_i} \sigma_{Z_i})^2 = \sigma_Y^2 = V(Y)$. $V(Y)$ stellt dabei die Varianz der Funktion Y dar. Diese Formel spiegelt die Tatsache wider, dass sowohl die Gleichung (3.8) als auch die Gleichung (3.5) die Varianzzerlegungsformeln sind. Als ein Tool in der Sensitivitätsanalyse erlauben uns diese Formeln, die Varianz vom Modell-Output zu zerlegen; sie beschreiben somit seine Unsicherheit.

3.3.3 Bedingte Varianzen; Varianzbasierte Methode

Soll die Darstellung der Varianz vom Modell-Output bezüglich seiner Inputs modellunabhängig sein, d. h. auch für nichtlineare Modelle gelten, dann kann man in vielen objektiven, nichtvisuellen globalen Ansätzen für die Sensitivitätsbewertung zur sogenannten varianzbasierten Technik greifen. Die Basis stellt dabei eine Streuung der Ausgangsgröße des zu betrachteten Modells dar. Mithilfe dieser Technik können demzufolge komplexe nichtlineare Systeme quantitativ analysiert und adäquat bewertet werden. In der vorliegenden Arbeit wurde zur Quantifizierung der Sensitivitäten diese varianzbasierte Methode implementiert. Sie soll daher im Folgenden ausführlich behandelt werden.

Es soll angenommen werden, dass ein mathematisches Modell durch die Funktion $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ beschrieben wird und dass jeder Parameter X dieser Funktion eine von Null verschiedene Varianz hat.

Fixiert man den Parameter X_i auf einen bestimmten Wert x_i^* , dann erwartet man, dass die bedingte Varianz $V_{X_{\sim i}}(Y|X_i = x_i^*)$ kleiner als die Varianz $V(Y)$ wird. Dabei ist $X_{\sim i}$ der Vektor X , ausgenommen der Komponente i . Die bedingte Varianz wird also von Y über alle X außer X_i , das auf einen Wert x_i^* fixiert ist, genommen. Diese Varianz kann dann als ein Indikator für die Wichtigkeit des Parameters X_i angesehen werden. Je kleiner diese Varianz, desto größer wäre der Einfluss des Parameters auf Y . Dieser Ansatz hat aber zwei Probleme. So eine Sensitivitätssmessung ist abhängig von den Punkten x_i^* ,

auf die jeder Parameter fixiert wird, was recht unpraktisch ist. Zweitens, kann ein Modell erstellt werden, bei dem für bestimmte Faktoren X_i und Werte x_i^* die bedingte Varianz größer als die Totale Varianz wird, also $V_{X \sim i}(Y|X_i = x_i^*) > V(Y)$. Das Problem kann man vermeiden, indem man anstatt bestimmter Punkte x_i^* einen Mittelwert über alle möglichen Punkte x_i^* nimmt. Damit vermeidet man die x_i^* - Abhängigkeit. Dieser Mittewert kann als $E_{X_i}(V_{X \sim i}(Y|X_i))$ geschrieben werden. Wegen des Zerlegungssatzes der Varianz (3.11) ist $E_{X_i}(V_{X \sim i}(Y|X_i))$ immer kleiner als $V(Y)$.

$$E_{X_i}(V_{X \sim i}(Y|X_i)) + V_{X_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i)) = V(Y) \quad (3.11)$$

Kleinere Werte von $E_{X_i}(V_{X \sim i}(Y|X_i))$ oder größere von $V_{X_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i))$ haben folglich einen großen Einfluss des Faktors X_i zur Folge. Dabei gilt $V_{X_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i)) \leq V(Y)$.

Die bedingte Varianz $V_{X_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i))$ nennt man Effekt erster Ordnung von X_i auf Y und der Ausdruck

$$S_i = \frac{V_{X_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (3.12)$$

ist bekannt als Sensitivitätsindex erster Ordnung von X_i auf Y . S_i kann Werte annehmen zwischen 0 und 1. Größere Werte von S_i sollen einen größeren Einfluss von Parameter X_i auf Y signalisieren und umgekehrt. Es gilt:

$$\sum_{i=1}^r S_{Z_i} = 1 \quad (3.13)$$

Diese Sensitivitätsindices kann man auch verstehen, wenn man die oben erwähnten Scatterplots entlang der Abszisse in dünne Scheiben schneidet und sich den Mittelwert von Y von jeder Scheibe anschaut. Die Mittelwerte von Y variieren von Scheibe zu Scheibe. Nimmt man an, dass die Scheiben sehr dünn sind, so kommt man für die Varianz auf den schon bekannten Ausdruck $V_{X_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i))$. Es ist tatsächlich so, dass der Erwartungswert von Y über eine sehr dünne Scheibe damit korrespondiert, wie wenn man X_i konstant gehalten hätte, während man über alle X außer X_i mittelt. Das ist dann nichts anderes als $E_{X \sim i}(Y|X_i)$.

Für ein lineares Modell ist der Sensitivitätsindex aus der Gleichung (3.12) gleich dem standardisierten Regressionskoeffizienten aus der Gleichung (3.8) ins Quadrat genommen. Die Gleichung (3.9) gilt nur für lineare Modelle, während die Beziehung (3.13) für eine breitere Klasse von Modellen gilt. Für nicht additive Modelle, d. h. für die, bei denen man den Einfluss der Eingangsgrößen bezüglich der Varianzzerlegung nicht separieren kann, gilt:

$$\sum_{i=1}^r S_{Z_i} \leq 1 \quad (3.14)$$

Der Grund liegt darin, dass zum Sensitivitätsindex der ersten Ordnung Sensitivitätsindices der höheren Ordnungen dazukommen. Durch diese wird der Effekt der Interaktionen zwischen den einzelnen Variablen auf die Ausgangsgröße beschrieben.

Im Folgenden wird erklärt, wie man für ein allgemeines nicht zwingend lineares oder additives mathematisches Modell die Einflüsse einzelner Parameter und deren Interaktionen auf die Ausgangsgröße des Modells durch Sensitivitätsindices verschiedener Ordnungen quantifiziert. Die weiter unten beschriebenen Sensitivitätsindices wurden von Sobol im Jahre 1990 entwickelt [77, 78] und basieren auf seiner früheren Arbeit über die mehrdimensionale Formeln und Funktionen von Haar aus dem Jahr 1969 [76].

Gegeben sei ein mathematisches Modell, das durch die Funktion $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ beschrieben wird. Dabei ist sie in einem k -dimensionalen Einheitshyperkubus $\Omega^k = (X \mid 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, \dots, k)$ bestimmt.

Die Funktion lässt sich auf folgende Art eindeutig zerlegen:

$$f = f_0 + \sum_i f_i + \sum_i \sum_{j>i} f_{ij} + \dots + f_{12\dots k} \quad (3.15)$$

wenn gilt, dass f_0 eine Konstante ist und $\int_0^1 f_{i_1, i_2, \dots, i_s}(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_w} = 0; 1 \leq w \leq s$.

Dabei gilt: $f_i = f_i(X_i)$, $f_{ij} = f_{ij}(X_i, X_j)$ und so weiter.

Daraus folgt, dass

$$f_0 = \int_{\Omega^k} f(x) dx \quad (3.16)$$

ist und alle Faktoren auf der rechten Seite von der Formel (3.15) orthogonal sind. Es gilt:

$$\int_{\Omega^k} f_{i_1 \dots i_s} f_{j_1 \dots j_l} dx = 0 \quad (3.17)$$

wenn $(i_1 \dots i_s) \neq (j_1 \dots j_l)$.

Der Erwartungswert einer Funktion ist definiert als $E(f_i(x_i)) = \int f_i(x_i) p_i(x_i) dx_i$, dabei ist $p_i(x_i)$ die Dichtefunktion. Man kann sich diese Dichte in der Funktion $f_i(x_i)$ integriert denken, sodass man den Erwartungswert auch ohne die Dichtefunktion schreiben kann: $E(f_i(x_i)) = \int f_i(x_i) dx_i$

Es gilt dann: $f_0 = E(Y)$. f_0 kann direkt aus der Beziehung (3.16) bestimmt werden. Um andere Terme f_i, f_{ij} der Formel (3.15) berechnen zu können, geht man folgendermaßen vor. Man definiert eine Funktion

$$g_i(x_i) = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x) dx/dx_i \quad (3.18)$$

Dabei ist dx/dx_j das Produkt aller dx_i außer dx_j . Integriert man die Formel (3.15) über alle Variablen außer x_i , dann erhält man:

$g_i(x_i) = f_0 + f_i(x_i)$. Daraus können alle $f_i(x_i)$ berechnet werden. Und es gilt entsprechend der Überlegung von oben $f_i(x_i) = E_{X \sim i}(Y|X_i) - E(Y)$

Für $i < j$ definiert man weiter

$$g_{ij}(x_i, x_j) = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x) dx/dx_i dx_j \quad (3.19)$$

Die Integration der Formel (3.15) über alle Variablen außer x_i und x_j ergibt:

$g_{ij}(x_i, x_j) = f_0 + f_i(x_i) + f_j(x_j) + f_{ij}(x_i, x_j)$. Daraus können alle $f_{ij}(x_i, x_j)$ berechnet werden und es gilt $f_{ij}(x_i, x_j) = E_{X \sim ij}(Y|X_i, X_j) - f_i - f_j - E(Y)$.

Man definiere noch die folgende Funktion: $g_{i_1 \dots i_s}(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x) dx/dx_{i_1} \dots dx_{i_s}$; damit lassen sich die Terme $f_{i_1 \dots i_s}$ mit $s = 3, 4, \dots, n-1$ berechnen. Der letzte Term $f_{12\dots n}$ lässt sich direkt aus der Formel (3.15) ableiten.

Die Varianz ist bekanntlich definiert als: $V(X) = E(X^2) - E(X)^2$. Folglich gilt:

$$V(Y) = \int_{\Omega^n} f^2(x) dx - f_0^2 \text{ und } V_{i_1 \dots i_s} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f_{i_1 \dots i_s}^2 dx_{i_1} \dots dx_{i_s}$$

Also:

$$V_i = V(f_i(X_i)) = V_{X_i}[E_{X \sim i}(Y|X_i)] \quad (3.20)$$

$$V_{ij} = V(f_{ij}(X_i, X_j)) = V_{X_i X_j}[E_{X \sim ij}(Y|X_i, X_j) - V_{X_i}[E_{X \sim i}(Y|X_i)] - V_{X_j}[E_{X \sim j}(Y|X_j)]] \quad (3.21)$$

Den Term $V_{X_i X_j}(E_{X \sim ij}(Y|X_i, X_j))$ nennt man Effekt zweiter Ordnung. Dieser Ausdruck misst die Varianz von Output, wenn zwei Variablen X_i und X_j gleichzeitig fixiert werden.

Quadriert man die Formel (3.15) und integriert über Ω^n , dann gilt mit der Bedingung (3.17):

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_i \sum_{j>i} V_{ij} + \dots + V_{12\dots k} \quad (3.22)$$

Durch Dividieren beider Seiten der Formel (3.22) durch $V(Y)$ ergibt sich:

$$\sum_i S_i + \sum_i \sum_{j>i} S_{ij} + \dots + S_{12\dots k} = 1 \quad (3.23)$$

Wie man sieht, gibt es bei der Berechnung von Sensitivität eines bestimmten Parameters X_1 nicht nur Terme erster Ordnung S_1 , sondern auch Terme höherer Ordnungen S_{12}, S_{13}, S_{123} etc., die durch Interaktion mit anderen Parametern zustande kommen.

Bei einer Funktion mit drei Parametern könnte man den totalen Einfluss des Parameters X_1 auf Y durch $S_{T1} = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123}$ definieren. Dies wird als totaler Sensitivitätsindex des Parameters X_1 bezeichnet.

Den totalen Sensitivitätsindex kann man folgenderweise herleiten. Es gilt die Beziehung $V(Y) = V(E(Y|X_i)) + E(V(Y|X_i))$. Schreibt man diese Gleichung so um, dass anstatt X_i alle Parameter stehen außer X_i , also $\mathbf{X}_{\sim i}$, dann gilt: $V(Y) = V(E(Y|\mathbf{X}_{\sim i})) + E(V(Y|\mathbf{X}_{\sim i}))$.

Teilt man diese Gleichung durch $V(Y)$, erhält man den totalen Sensitivitätsindex S_{Ti} :

$$S_{Ti} = \frac{E_{X_{\sim i}}(V_{X_i}(Y|\mathbf{X}_{\sim i}))}{V(Y)} = 1 - \frac{V_{X_{\sim i}}(E_{X_i}(Y|\mathbf{X}_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (3.24)$$

S_{Ti} misst den totalen Effekt der Sensitivität der Variablen X_i , d. h. die erste und die höheren Ordnungen (Interaktion mit anderen Variablen).

3.3.4 Morris-Methode und Metamodellierung

Bei der Sensitivitätsanalyse großer numerischen Modelle mit einer großen Zahl an Parametern, kann es dazu kommen, dass sich die Berechnungen mit traditionellen Monte-Carlo-Simulationen wegen eines hohen Rechenaufwands als nicht möglich erweisen. 1991 erarbeitete Morris [62] eine Methode mit deren Hilfe man die Parameterzahl reduzieren konnte. Anhand einer Rastersuche, die auch Screening-Analyse genannt wird, konnte man entscheiden, ob ein Parameter vernachlässigbar, linear und additiv, nichtlinear oder in eine Interaktion mit anderen Parametern involviert ist. Auf diese Weise konnte man wichtige und weniger wichtige Parameter identifizieren. Durch die Berücksichtigung nur der wichtigen Parameter konnte somit die Parameterzahl verringert und das numerische Problem lösbar gemacht werden.

Die Methode basiert auf der Berechnung des Elementareffekts EE_i (engl.: *Elementary Effects*), der wie folgt definiert wird:

$$EE_i = \frac{f(X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, X_i + \Delta, \dots, X_k) - f(\mathbf{X})}{\Delta}$$

Die Funktion f oder das Modell ist von k Parametern $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, \dots, x_k)$ abhängig. Der Wert von $\Delta \in \left\{ \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1 - \frac{1}{p-1} \right\}$ ist von der Anzahl der Stufen p abhängig.

Die k Eingangsparameter variieren in einem k -dimensionalen Einheitshyperkubus und werden in einem p -Stufen-Netz unterteilt. p definiert mögliche Punkte im Parameterraum Ω^k . Nach dem p vorgegeben wurde, werden daraus alle möglichen Δ berechnet und eins davon ausgewählt.

Die Verteilung von Elementareffekten EE_i bezüglich eines Parameters X_i bezeichnet man mit F_i . Man erhält dies, indem die Parameter \mathbf{X} aus Ω gesampelt werden. Die Anzahl aller Elemente von F_i berechnet man aus $p^{k-1}[p - \Delta(p - 1)]$.

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für zwei Eingangsparameter X_1 und X_2 für $p = 5$ und $\Delta = \frac{3}{4}$

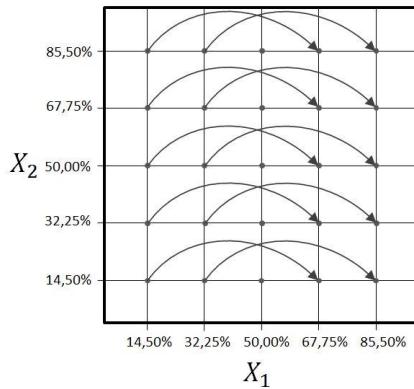


ABBILDUNG 4. Gitter der Morris-Screening-Methode für zwei Parameter

Die Schrittrichtung einer Zelle entspricht $\Delta = \frac{1}{4}$. Bei $\Delta = \frac{3}{4}$ springt man bei der Berechnung von EE_i über drei Zellen. Die Pfeile geben alle möglichen Schrittrichtungen an, deren Summe alle Elementareffekte wiedergeben. In dem Beispiel lassen sich also insgesamt $F_i = 10$ Elementareffekte für einen Parameter berechnen. Für die Analyse von EE_i für r Trajektorien und k Eingangsparametern ist die Anzahl der Simulationen $r(k + 1)$.

Als Bewertungsmaße wurden von Morris μ und σ als Schätzungen von dem Mittelwert und der Standardabweichung von F_i vorgeschlagen. Campolongo führte noch eine dritte Größe μ_i^* , den Mittelwert der Absolutbeträge, als Verbesserung zur Vermeidung von Typ-II-Fehlern ein. Diese können auftreten, wenn die Verteilung F_i sowohl positive als auch negative Werte annimmt.

$$\mu_i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r EE_{i,j} \quad (3.25)$$

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_{i,j}| \quad (3.26)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (EE_{i,j} - \mu_i)^2 \quad (3.27)$$

Der Mittelwert μ_i zeigt die Veränderung der Funktion f bei Variation des Parameters X_i . Campolongo hat gezeigt, dass die Größe μ_i^* ein guter Stellvertreter für den Sensitivitätsindex S_{Ti} ist, der im vorherigen Kapitel vorgestellt wurde. Auch σ_i stellt, ähnlich dem Index S_{Ti} , ein Maß für die Auswirkung von Interaktionen eines Parameters mit den anderen Parametern dar.

Zur Berechnung von Sensitivitätsindices μ , σ und μ^* werden Samples von Elementareffekten von jedem F_i benötigt. Die Erstellung dieser Samples basiert auf der Definition von Trajektorien im k -dimensionalen Parameterraum Ω^k . Man wählt auf eine zufällige Art einen Punkt auf dem Raster (wie in der Abbildung 4 gezeigt) aus. Basierend auf dem vorher gewählten Schritt Δ wird der nächste Punkt zufällig ausgewählt. Man wiederholt es k -mal, bis die Trajektorie geschlossen ist und ein Elementary Effects für X_i berechnet werden kann. Will man r Elementareffekte berechnen, werden r Trajektorien aufgestellt.

Um die Effektivität beim Generieren von Samples zu steigern schlug Campolongo in [9] noch eine Verbesserung vor. Aus der zuvor generierten hohen Zahl an Trajektorien M werden dabei r ausgewählt und zwar so, dass die Summe von geometrischen Abständen aller Punktpaare dieser Trajektorien unter allen möglichen r Trajektorien aus M maximal ist. Bei zwei Trajektorien wird solch eine Summe als Abstand d_{ml} bezeichnet und wie folgt definiert:

$$d_{ml} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{k+1} \sum_{j=1}^{k+1} \sqrt{\sum_{z=1}^k [X_z^{(i)}(m) - X_z^{(j)}(l)]^2} & m \neq l \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.28)$$

Bei komplexeren Modellen, die eine hohe Rechenzeit benötigen, ist selbst nach Reduzierung der Anzahl der Parameter die Simulation nicht oder schwer durchführbar. Um den Rechenaufwand deutlich zu reduzieren, können Ersatzmodelle eingesetzt werden. Ein Ersatzmodell ist eine adaptive Approximation eines bestehenden Simulationsmodells; es nennt sich Metamodell. Durch das Metamodell kann die Komplexität eines Simulationsmodells um ein Vielfaches reduziert werden.

4 Berechnung der Dosiskoeffizienten

4.1 Einleitung

In den Kapiteln 2 und 3 wurde die Unsicherheits- und die Sensitivitätsanalyse und deren Methoden ausführlichen dargestellt. Bevor man sich mit dem eigentlichen Ziel dieser Arbeit, der Bestimmung der Unsicherheit und der Sensitivität der in der Nuklearmedizin verwendeten Größen, auseinandersetzt, sollen in diesem Kapitel Techniken erklärt werden wie man solche Größen mathematisch behandelt.

Zur Berechnung der Strahlenexposition eines Patienten in der Nuklearmedizin dienen Größen wie die mittlere Energiedosis in einem Gewebe oder Organ, die Organdosis, die effektive Dosis und ihre Koeffizienten (der Wert pro verabreichte Aktivität genommen). Sowohl vom MIRD-Komitee als auch von der ICRP wurden Methoden zur Berechnung der Dosiskoeffizienten erarbeitet. Auch die ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) befasste sich in ihrem Bericht mit der Berechnungsmethode. Die ICRU 67 [41] stellte allerdings kein eigenes Schema auf, sondern verwendete das vom MIRD-Komitee.

Die ICRP veröffentlichte ihr eigenes Schema zur Berechnung der Dosiskoeffizienten in der Publikation Nr. 53 [39].

Vom MIRD-Komitee wurde das Schema im Jahre 1968 [53] erarbeitet und veröffentlicht. Im Jahre 1976 [52] folgte die revidierte Ausgabe. In den Jahren 1988 [54] und 1991 [55] erschien ein MIRD-Primer – eine didaktisch überarbeitete Ausgabe mit zahlreichen Beispielen. Im Jahre 2009 [7] veröffentlichten das MIRD-Komitee zusammen mit der ICRP ein einheitliches verallgemeinertes Schema zur Berechnung der Dosiskoeffizienten.

In den nächsten Kapiteln werden zum Vergleich das MIRD-Schema aus dem Jahre 1976 und das Schema aus der ICRP-Publikation Nr. 53 vorgestellt. Anschließend wird das einheitliche Schema im Detail besprochen, da es in dieser Arbeit auch implementiert wurde.

4.2 MIRD-Schema

Das Verfahren zur Berechnung von Dosiskoeffizienten, das von MIRD erarbeitet und im Jahre 1976 veröffentlicht wurde, soll hier beschrieben werden [52].

Die mittleren Energiedosen (in englischsprachiger Literatur „absorbed dose“ genannt) $\bar{D}(r_k)$ im Zielorgan r_k lassen sich durch folgende Beziehung darstellen:

$$\bar{D}(r_k) = \sum_h \tilde{A}_h S(r_k \leftarrow r_h) \quad (4.1)$$

mit

$$S(r_k \leftarrow r_h) = \sum_i \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \quad (4.2)$$

$$\Delta_i = k n_i E_i \quad (4.3)$$

$$\Phi_i(r_k \leftarrow r_h) = \frac{\phi(r_k \leftarrow r_h)}{m_\nu} \quad (4.4)$$

Dabei sind:

\tilde{A}_h	Zeitintegrierte (kumulierte) Aktivität im Quellorgan h (Anzahl der Umwandlungen im Quellorgan h)
r_h	Quellregion oder Quellorgan
r_k	Zielregion oder Zielorgan
$S(r_k \leftarrow r_h)$	S-Faktor, eine für ein Radionuklid charakteristische Größe, die die mittlere Energiedosis im Zielorgan k pro zeitintegrierte Aktivität im Quellorgan h darstellt
Δ_i	Mittlere Energie einer Strahlungsart i , die pro Einheit kumulierter Aktivität emittiert wird
k	die von den gewählten Einheiten abhängige Konstante
n_i	Ausbeute einer Strahlungsart i je Kernumwandlung
E_i	Energie einer Strahlungsart i je Kernumwandlung
$\phi(r_k \leftarrow r_h)$	Absorbiert Bruchteil: Anteil der durch die Radioaktivität in einem Quellorgan r_h emittierten Energie, die in einem Zielorgan r_k absorbiert wird (engl.: absorbed fraction [AF])
m_ν	Masse vom Zielorgan r_k
$\Phi_i(r_k \leftarrow r_h)$	Spezifischer absorbiert Bruchteil (engl.: specific absorbed fraction [SAF])

Die mittlere Energiedosis in einem Zielorgan ist folglich ein Produkt aus der zeitintegrierten Aktivität im Quellorgan h mit dem S-Faktor, aufsummiert über alle Quellorgane.

Die S-Faktoren sind Größen, die physikalische und anatomische Daten beinhalten. Die spiegeln die Art der Strahlung wider, sind also charakteristisch für ein Radionuklid. Die befassen sich aber auch mit Massen von Quell- und Zielorganen und deren geometrischen Größen wie der Form, Größe und den Abständen zu einander.

Die Proportionalitätskonstante k ist von den gewählten Einheiten für Δ_i und E_i abhängig.

Im SI-System ist k gleich 1 zu setzen. Wählt man aber die in manchen Schriften üblichen Einheiten, wie [$\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$] für die zeitintegrierte Aktivität, [$\text{g}\cdot\text{rad}$] für die Energie und [MeV] für die mittlere Energie pro Teilchen, so kommt man für k auf einen Wert von 2,13. [μCi] oder [$\text{g}\cdot\text{rad}$] sind keine SI-Einheiten und sollen deshalb nicht verwendet werden.

Aus den obigen Gleichungen ist $\Delta_i = k n_i E_i$ die einzige Gleichung, die von den Einheiten abhängig ist.

Oft ist es sinnvoller anstatt der zeitintegrierten Aktivität \tilde{A} das Verhältnis $\frac{\tilde{A}}{A_0}$ zu verwenden, wo A_0 die verabreichte Aktivität darstellt. Diese Größe wurde ursprünglich vom MIRD-Komitee als mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität (engl.: residence time) τ definiert, was zu Missverständnissen führen kann. Eigentlich stellt diese Größe die Anzahl der Umwandlungen pro Einheit verabreichter Aktivität A_0 dar. Es gilt folgende Beziehung:

$$\tau = A_0^{-1} \int_0^\infty A_h(t) dt = \frac{\tilde{A}_h(0, \infty)}{A_0} \quad (4.5)$$

Dabei ist $A_h(t)$ die Aktivität zum Zeitpunkt t und A_0 die Anfangsaktivität, d. h. die Aktivität zum Zeitpunkt $t = 0$. τ stellt also den zeitintegrierten Aktivitätskoeffizienten dar. Man sagt, dass die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität τ gleich der zeitintegrierten Aktivität \tilde{A} ist, bei verabrechter Aktivität $A_0 = 1 \text{ MBq}$.

Die Gleichung (4.1) kann dann folgendermaßen umgeschrieben werden:

$$\bar{D}(r_k) = A_0 \sum_h \tau_h S(r_k \leftarrow r_h) \quad (4.6)$$

Um die Energiedosen zu berechnen, bedarf es also der zeitintegrierten Aktivität sowie der S-Faktoren.

4.3 ICRP-Schema

Das Schema, das von der ICRP erarbeitet und in der Publikation Nr. 53 [39] veröffentlicht wurde, ist dem vom MIRD-Komitee sehr ähnlich. Es unterscheidet sich von der Methode des MIRD-Komitees mehr in der Notation als inhaltlich.

Die Energiedosen im Zielorgan T lassen sich aus folgender Beziehung berechnen:

$$D_T = \sum_S \tilde{A}_s \times S(T \leftarrow S) \quad (4.7)$$

mit

$$S(T \leftarrow S) = \frac{c}{M_T} \sum_i E_i Y_i \phi_i \quad (4.8)$$

Im Unterschied zum MIRD-Schema sind die Größen wie folgt bezeichnet:

\tilde{A}_s	Zeitintegrierte Aktivität im Quellorgan S
T	Zielorgan
$S(T \leftarrow S)$	S-Faktor, die mittlere Energiedosis im Zielorgan T pro zeitintegrierte Aktivität im Quellorgan S
c	die von den gewählten Einheiten abhängige Konstante
M_T	Masse vom Zielorgan T
ϕ_i	Absorbiert Bruchteil: Anteil der durch die Radioaktivität in einem Quellorgan S emittierten Energie, die in einem Zielorgan T absorbiert wird.

Auch hier sind die Energiedosen aus dem Produkt der zeitintegrierten Aktivität mit dem S-Faktor, aufsummiert über alle Quellorgane S , zu berechnen.

Für SI-Einheiten (E in [J], M in [kg] und $S(T \leftarrow S)$ in [Gy]) ist hier gleich wie im MIRD-Schema die Konstante c gleich 1 zu setzen.

Die zeitintegrierte Aktivität \tilde{A}_s lässt sich aus dem folgenden Integral bestimmen:

$$\tilde{A}_s(t) = \int_0^t A_s(u) du \quad (4.9)$$

Dabei ist $A_s(u)$ die zeitabhängige Aktivität im Quellorgan zum Zeitpunkt u .

\tilde{A}_s hängt von der verabreichten Anfangsaktivität A_0 , der physikalischen Halbwertszeit T_p und der Biokinetik des Radiopharmazeutikums ab. Dies gilt auch für das MIRD-Schema.

Die S-Faktoren wurden an dem gleichen Phantom berechnet wie im MIRD-Schema. Im Unterschied zum MIRD-Komitee führte die ICRP noch den Begriff der mittleren Äquivalentdosis ein.

Die Äquivalentdosis in einem Target-Organ T ist als Produkt der Energiedosis D_T , des Qualitätsfaktors Q und einer Konstante N , die diverse modifizierenden Faktoren beinhaltet, gegeben:

$$H_T = D_T Q N \quad (4.10)$$

Es wurde von der ICRP entschieden, N gleich 1 zu setzen.

Später führte die ICRP in ihrer Publikation Nr. 60 [32] den Begriff der Organdosis und der effektiven Dosis ein. H_T ist die Organdosis für das Organ T und w_R ist der Strahlungs-Wichtungsfaktor einer Strahlungsart R und wird definiert als:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (4.11)$$

Die effektive Dosis berechnet sich aus:

$$H_E = \sum_T w_T \times H_T \quad (4.12)$$

Dabei ist w_T der Gewebe-Wichtungsfaktor für das Organ T .

4.4 Verallgemeinertes Schema

Im Jahre 2009 veröffentlichten MIRD-Komitee und ICRP ein einheitliches verallgemeinertes Schema zur Dosisberechnung [7, 39, 55]. Dabei verfolgten sie dreierlei Ziele:

- a. Neudarstellung des Schemas, um dies sowohl für die Nuklearmedizin als auch für den Schutz der Bevölkerung nutzbar zu machen; Standardisierung der Nomenklatur
- b. Anpassen von Dosimetrie-Größen wie Organdosis oder Effektive Dosis, um die potentiellen Risiken der Strahlung, in Form von stochastischen Effekten am Patienten nach der Behandlung in der Nuklearmedizin, einzuschätzen
- c. Beleuchtung der Notwendigkeit dosimetrischer Größen bezüglich deterministischer Effekte (Zelltod oder Beeinträchtigung von Organfunktionen durch Verabreichung einer hohen Dosis) in der Radionuklidtherapie

Vom Quellorgan r_S ausgehend lässt sich die Energiedosis $D(r_T, T_D)$ im Zielorgan r_T durch folgende Beziehungen bestimmen:

$$D(r_T, T_D) = \sum_{r_S} \tilde{A}(r_S, T_D) S(r_T \leftarrow r_S) \quad (4.13)$$

mit

$$S(r_T \leftarrow r_S) = \sum_i \Delta_i \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_i) \quad (4.14)$$

$$\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_i) = \frac{\phi(r_T \leftarrow r_S, E_i)}{M(r_T)} \quad (4.15)$$

Die Zeitabhängigkeit vom S-Faktor muss erst dann in Betracht gezogen werden, wenn es um die Berechnung der Energiedosen in Tumorzellen geht, weil deren Masse mit der Zeit variiert. Auch bei Verabreichung von Radiopharmazeutika mit Radionukliden mit langen Halbwertszeiten im Jugendalter spielt die Zeitabhängigkeit der S-Faktoren eine Rolle.

Weil aber in den meisten Fällen die Quell- und Zielorgane während der Bestrahlung als konstant angenommen werden, kann der S-Faktor als zeitunabhängig angesehen werden.

Geht man von der Gleichung (4.13) aus, so können mit $\tilde{a}(r_S, T_D) = \frac{\tilde{A}(r_S)}{A_0}$ die Dosiskoeffizienten $d(r_S, T_D)$ definiert werden:

$$d(r_S, T_D) = \sum_{r_S} \tilde{a}(r_S, T_D) S(r_T \leftarrow r_S) \quad (4.16)$$

Wie schon oben ausgeführt, führte die ICRP die Organdosis ein, um bei der Bestimmung der Dosiskoeffizienten die möglichen stochastischen Effekte, wie Tumorbildung oder Erbgutschädigung, zu berücksichtigen. Im verallgemeinerten Konzept von MIRD und ICRP übernahm man den Formalismus der Organdosis und der effektiven Dosis von ICRP.

Die Organdosis $H(r_T, T_D)$ wird definiert als:

$$H(r_T, T_D) = \sum_R w_R D_R(r_T, T_D) \quad (4.17)$$

mit w_R als Strahlungs-Wichtungsfaktor.

Mit $h(r_T, T_D) = \frac{H(r_T, T_D)}{A_0}$ und den Gleichungen (4.13)-(4.17) gilt dann für den Organdosiskoeffizienten $h(r_T, T_D)$ des Zielorgans oder der Zielregion r_T über Dosisintegrationsperiode T_D folgende Beziehung:

$$h(r_T, T_D) = \sum_{r_S} \tilde{a}(r_S, T_D) S_w(r_T \leftarrow r_S) \quad (4.18)$$

mit

$$S_w(r_T \leftarrow r_S) = \sum_R w_R \sum_i \frac{E_{R,i} Y_{R,i} \phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})}{M(r_T)} \quad (4.19)$$

$$\tilde{a}(r_S, T_D) = \int_0^{T_D} a(r_S, t) dt = \frac{1}{A_0} \int_0^{T_D} A(r_S, t) dt = \frac{\tilde{A}(r_S)}{A_0} \quad (4.20)$$

Dabei gilt:

$\tilde{a}(r_S, T_D)$	Zeitintegrierter Aktivitätskoeffizient
$a(r_S, t)$	$a(r_S, t) = \frac{A(r_S, t)}{A_0}$, auf A_0 normierte Aktivität $A(r_S, t)$ im Quellenorgan oder Quellregion r_S
A_0	Anfangsaktivität
$S_w(r_T \leftarrow r_S)$	Strahlungsgewichteter S-Faktor
w_R	Strahlungs-Wichtungsfaktor
$E_{R,i}$	Energie einer Strahlung i von Strahlungsart R je Kernumwandlung

$Y_{R,i}$	Ausbeute einer Strahlung i von Strahlungsart R je Kernumwandlung
$\phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$	Absorbiert Bruchteil: Anteil der durch die Radioaktivität in einem Quellorgan r_S emittierten Energie, die in einem Zielorgan r_T absorbiert wird
$M(r_T)$	Masse des Zielorgans r_T

In Bezug auf dieses Schema wird in einem biokinetischen Modell mit einer begrenzten Anzahl von Quellorganen die Organdosis $D(r_T, T_D)$ in einer Zielregion r_T des Körpers folgendermaßen definiert:

$$D(r_T, T_D) = \sum_{r_S} \tilde{A}(r_S, T_D) S(r_T \leftarrow r_S) + \frac{\tilde{A}(REM) [(M_{TB} S(r_T \leftarrow TB) - \sum_{r_S} M_{r_S} S(r_T \leftarrow r_S))]}{M_{REM}} \quad (4.21)$$

Dabei ist $\tilde{A}(REM)$ die zeitintegrierte Aktivität in den restlichen (engl.: *remainder*) die Quellorgane nicht beinhaltenden Regionen im Körper, TB der gesamte Körper (engl.: **Total Body**). M_{TB} und M_{REM} sind entsprechend die Organmasse [g] des gesamten Körpers (TB) ohne den Inhalt der Organe mit einer Wand (Magen-Darm-Trakt, Harnblase und Gallenblase) [21] und die Organmasse [g] der restlichen Organe (REM), die die Quellorgane nicht beinhalten. Dabei gilt $M_{REM} = M_{TB} - \sum M_{r_S}$.

Die effektive Dosis basiert auf den mittleren Dosen in Organen oder Geweben des menschlichen Körpers. Der Referenzmann sowie die Referenzfrau mit entsprechenden anatomischen und physiologischen Charakteristika wurden in ICRP-Publikation Nr. 89 definiert [35]. Die effektive Dosis sowie der Koeffizient der effektiven Dosis wird aus den für die Region T des männlichen und weiblichen Referenzmenschen ermittelten Organdosen nach folgender Beziehung berechnet [33]:

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H(r_T, T_D)^{Male} + H(r_T, T_D)^{Female}}{2} \right] \quad (4.22)$$

$$e = \sum_T w_T \left[\frac{h(r_T, T_D)^{Male} + h(r_T, T_D)^{Female}}{2} \right] \quad (4.23)$$

Dabei sind:

w_T	Gewebe-Wichtungsfaktor für Organ T , mit der Bedingung, dass $\sum_T w_T = 1$ ist.
$H(r_T, T_D)^{Male}$	Organdosis eines Referenzmannes
$H(r_T, T_D)^{Female}$	Organdosis einer Referenzfrau
$h(r_T, T_D)^{Male}$	Organdosiskoeffizient eines Referenzmannes
$h(r_T, T_D)^{Female}$	Organdosiskoeffizient einer Referenzfrau

Die Gewebe-Wichtungsfaktoren w_T , wie sie in der Tabelle 2 stehen, sind für alle Organe über Geschlecht und Alter gemittelte Werte. Das impliziert, dass die effektive Dosis ausschließlich zu Strahlenschutzzwecken und nicht zur individuellen Risikobewertung benutzt werden kann. Abbildung

5 verdeutlicht noch mal den Weg zur Ermittlung der effektiven Dosis aus den gemittelten Werten der Organdosis für Mann und Frau.

TABELLE 2 Empfohlene Gewebe-Wichtungsfaktoren aus der Publikation ICRP-103 [33]

Tissue	w_T	$\sum w_T$
Bone-marrow (red), Colon, Lung, Stomach, Breast, Remainder tissues*	0.12	0.72
Gonads	0.08	0.08
Bladder, Oesophagus, Liver, Thyroid	0.04	0.16
Bone surface, Brain, Salivary glands, Skin	0.01	0.04
<i>Total</i>		1.00

*Remainder tissues: Adrenals, Extrathoracic (ET) region, Gall bladder, Heart, Kidneys, Lymphatic nodes, Muscle, Oral mucosa, Pancreas, Prostate (♂), Small intestine, Spleen, Thymus, Uterus/cervix (♀)

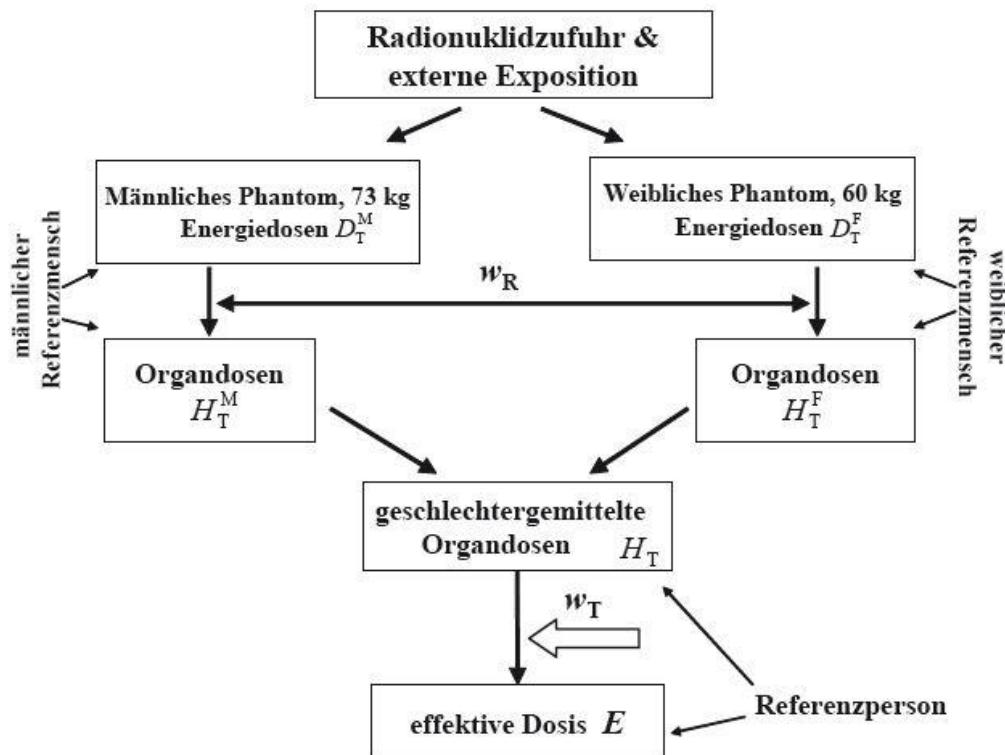


ABBILDUNG 5 Mittelung der Geschlechter für die effektive Dosis [36]

Die Effektivdosis als Mittelwert der Dosen für Mann und Frau, wie sie in der Gleichung (4.22) steht, wurde in der ICRP 103 [33] eingeführt und in der Praxis noch nicht angewendet. Die jetzigen von der ICRP veröffentlichten Dosiskoeffizienten wurden noch mit der alten Definition der Effektivdosis ermittelt, ohne Differenzierung zwischen Mann und Frau.

Da für diese Arbeit ein weibliches Referenzphantom zur Verfügung stand wird diese Differenzierung berücksichtigt und die hier beschriebene verallgemeinerte Form des Schemas zur Berechnung von Dosiskoeffizienten angewendet. Die Berechnungen werden ausschließlich für Erwachsene durchgeführt.

4.5 Bestimmung der S-Faktoren. Monte-Carlo-Simulation

Wie man aus der Gleichung (4.14) ersehen kann, sind S-Faktoren mit den SAF-Werten unmittelbar verknüpft und können daraus berechnet werden. Die SAF-Werte, also der Bruchteil der von dem Quellorgan emittierten Energie, die vom Zielorgan absorbiert wurde, berechnet man für die monoenergetische Strahlung mithilfe der Monte-Carlo-Simulation in einem den menschlichen Körper repräsentierenden Phantom. Die S-Faktoren sind dagegen radionuklidspezifisch.

Beim β^+ - oder β^- -Zerfall erhält das β -Teilchen einen variablen Teil der beim Zerfall eines Radionuklids freiwerdenden Energie, die in die kinetische Energie des Teilchens umgewandelt wird. Betrachtet man das Energiespektrum des β -Teilchens, so ist es kontinuierlich. So ein kontinuierliches Spektrum für das Radionuklid ^{18}F und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist exemplarisch in Abbildung 6 zu sehen. Folglich verwendet man oft anstelle der Mittelwerte der Energien die entsprechenden Energiespektren, sodass die Summe in der Gleichung (4.19) durch das Integral ausgetauscht wird und die Gleichung folgende Form erhält:

$$S(r_T \leftarrow r_S, t) = \int_0^{E_0} P(E) E \Phi(r_T \leftarrow r_S, E, t) dE \quad (4.24)$$

Hier ist $P(E)$ die Anzahl der β -Teilchen pro MeV pro nukleare Transformation, die für eine bestimmte Energie emittiert werden.

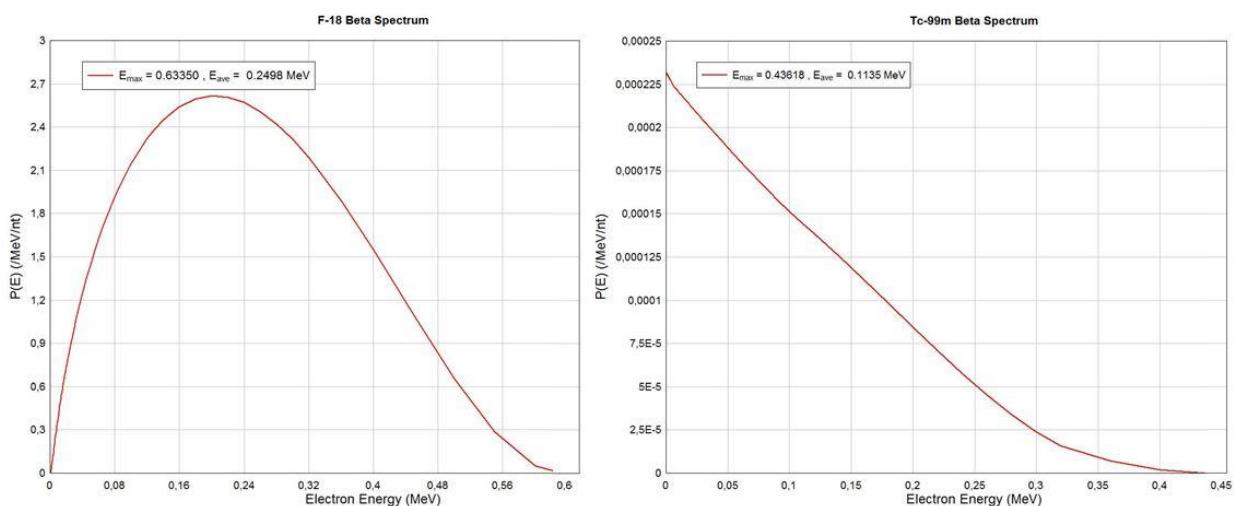


ABBILDUNG 6. Energiespektren von ^{18}F und $^{99\text{m}}\text{Tc}$

4.5.1 Phantome

Seit mehr als 30 Jahren wurden die SAF-Werte mithilfe von Phantomen berechnet, die auf der Basis eines anthropomorphen Phantoms von MIRD am Oak Ridge National Laboratory in Tennessee entwickelt wurden [15, 73-75]. Solche Phantome (Abbildung 7) basierten auf mathematischen Gleichungen, die planare, zylindrische, konische, elliptische und sphärische Flächen repräsentieren, die die Form und Position von idealisierten Organen im Körper darstellen. Zur Berechnung der SAF-Werte wurden solche Phantome vom MIRD-Komitee eingesetzt und, nach dem oben beschriebenen MIRD-Schema, wurden die internen Dosen bestimmt.

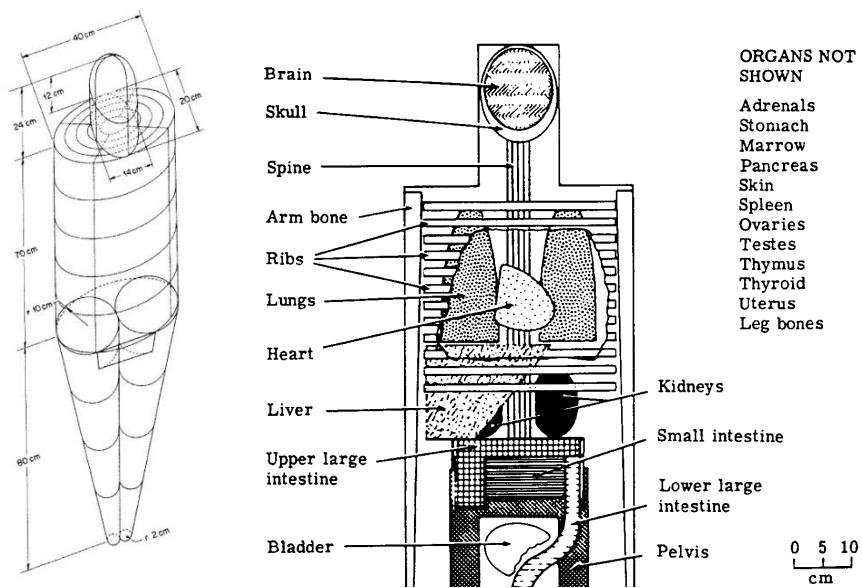


ABBILDUNG 7. Außen- und Innenansicht vom MIRD-Phantom eines Erwachsenen [73]

Später wurden 3D-Modelle des menschlichen Körpers anhand der Bilder konstruiert, die mit der Computertomographie oder der Magnetresonanztomographie an realen Menschen erstellt wurden. Auf diese Weise entstanden die sogenannten Voxel-Phantome (voxel = volume element). Verglichen mit den mathematischen Phantomen, widerspiegeln die Voxel-Phantome die menschliche Anatomie auf eine präzisere Art. Solche Phantome, die auf CT-Daten realer Personen basieren, können signifikant zur Verbesserung der Dosisabschätzung des Patienten beitragen. Die ICRP und auch die ICRU haben sich aus diesem Grund für die Verwendung von Voxel-Phantomen ausgesprochen. Diese sollten einen erwachsenen Referenzmann und eine Referenzfrau bezüglich ihrer Größe und Organmassen repräsentieren. Bei der Berechnung der SAF-Werte werden seit Kurzem diese Phantome von der ICRP eingesetzt und entsprechend dem oben erwähnten ICRP-Schema die internen Dosen bestimmt.

Das von der ICRP aktuell verwendete männliche und auch das weibliche Referenzphantom sind an die Daten aus der ICRP-Publikation 110 [34] angelehnt. Sie wurden vom Helmholtz Zentrum München in Zusammenarbeit mit der ICRP Task Group DOCAL entwickelt.

Zur Konstruktion des männlichen Phantoms (176 cm, 73 kg) wurden tomographische Daten eines 38-jährigen Mannes mit der Körpergröße von 176 cm und dem Körpergewicht von 70 kg verwendet. Die Daten entstammen aus 220 Schnittbildern mit 256 x 256 Pixeln.

Die Voxelgröße betrug 8 mm in der Höhe mit der planaren Auflösung von 2,08 mm, daraus resultierte ein Voxelvolumen von $34,6 \text{ mm}^3$. Es wurden 122 Organe und Gewebe (67 davon Knochen oder Knochengruppen) segmentiert. Im Voxel-Modell werden bestimmte Organe durch Voxelgruppen mit identischen Kennzahlen repräsentiert. Wegen seiner kleinen Größe von einigen 100 μm (kleiner als die Voxelgröße) konnte das Knochenmark nicht segmentiert werden. Die für die Segmentierung verwendete Software hieß MIPRON, das Voxel-Phantom GOLEM.

Das weibliche Phantom (163 cm, 60 kg) wurde aus den tomographischen Daten einer 43-jährigen Frau mit der Körpergröße 167 cm und dem Körpergewicht von 59 kg konstruiert. Nach der Ganzkörper-CT-Untersuchung und anschließenden Interpolation entstanden 346 Schnittbilder mit je 256 x 256 Pixeln. Die Voxelgröße betrug 5 mm in der Höhe mit der planaren Auflösung von 1,875 mm, daraus resultierte ein Voxelvolumen von $17,6 \text{ mm}^3$. Hier wurden 88 Objekte segmentiert. Für die Segmentierung wurde das Softwarepaket Analyze AVW (Biomedical Image Resource, Rochester, USA) verwendet; das Voxel-Phantom heißt LAURA.

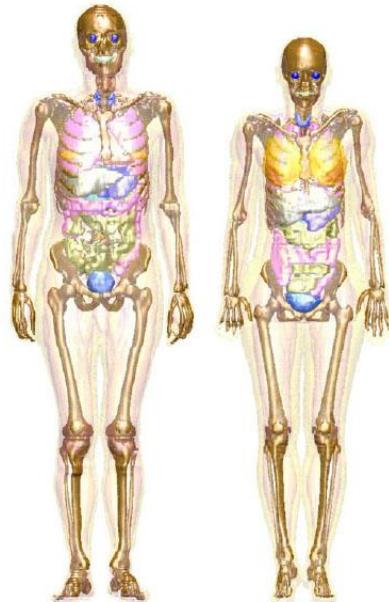


ABBILDUNG 8. Das männliche (links) und weibliche (rechts) computererzeugte referenzierte Voxel-Phantom. Verschiedene Organe sind im Bild farblich unterlegt. Die Muskeln und das Fettgewebe sind transparent dargestellt [89]

Die segmentierten Daten wurden schließlich durch die Änderung der Voxelgröße an die Referenzwerte der Skelettmasse und Körpergröße angepasst. Das Voxelvolumen für das männliche und weibliche Phantom betrug nach der Größenanpassung $36,54 \text{ mm}^3$ bzw. $15,25 \text{ mm}^3$, die planare Voxelauflösung 2,137 mm bzw. 1,775 mm. Die Anpassung der einzelnen Organmassen erfolgte

mittels Hinzufügen oder Entfernen von Organvoxel. Durch Hinzufügen von Fettgewebevoxeln korrigierte man schließlich noch die Ganzkörpermasse.

4.5.2 Monte-Carlo-Simulation für Teilchenpropagation

Die Integral- und Differenzialgleichungen, die die Propagation der geladenen Teilchen und der Photonen im Gewebe beschreiben, erscheinen als sehr komplex und sind nur durch Approximationen lösbar. Aus diesem Grund wird zur Berechnung des Teilchentransports, als machbare Simulation der physikalischen Realität, die Monte-Carlo-Simulation angewandt.

Für diese Arbeit wurden der Strahlungstransport mithilfe des am Helmholtz Zentrum München entwickelten User-Codes für den EGSnrc-Code [44] simuliert und daraus die SAF-Werte berechnet [88, 89]. Die Berechnung der SAF-Werte wurde von den Mitarbeitern des Helmholtzzentrums durchgeführt und für diese Arbeit bereitgestellt.

EGSnrc ist ein erweitertes Code-System von EGS (**E**lectron **G**amma **S**hower), einem System von Computercodes für die Monte-Carlo-Simulation zur Transportberechnung von Elektronen (e^+ oder e^-) und Photonen in einer willkürlichen Geometrie für die Energien von wenigen keV bis zu mehreren hundert von GeV.

Nach der Einnahme eines Radiopräparats und dessen Anlagerung in der Quellregion, entsteht dort ein Teilchen, das aus der Quelle heraus seinen Weg durch die Materie beginnt. Das Teilchen nimmt einen gewissen Weg bis zur Kollision mit einem anderen Teilchen. Der Weg wird durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt, die von dem totalen Wirkungsquerschnitt des Teilchens im Medium abhängt. Nach der Kollision kann das Teilchen absorbiert oder gestreut werden. Seine Energie und Flugrichtung ändert sich und müssen bei der Simulation aktualisiert werden. Beim Kollisionsprozess können auch neue Teilchen entstehen, was bei der Simulation auch berücksichtigt werden muss. Der Prozess der Bewegung und Streuung wird bei der Simulation solange wiederholt, bis das Teilchen absorbiert wurde oder die betrachtete Geometrie verlassen hat.

Im Falle von Photonen werden beim Durchgang durch die Materie hauptsächlich vier Effekte behandelt: die inkohärente Compton-Streuung, der photoelektrische Effekt, die Paarbildung und die kohärente Rayleigh-Streuung. Bei den ersten drei Effekten wird die Photonenenergie auf die Elektronen übertragen. Beim Compton-Effekt kann es zur Streuung an Atomelektronen für Photonen mit Energie zwischen 100 keV und 10 MeV kommen. Bei dem photoelektrischen Effekt muss das Photon die Austrittsarbeit der Elektronen, die bei wenigen eV liegen kann, überwinden, damit das Herauslösen der Elektronen stattfinden kann. Für die Paarbildung braucht man Photonenenergien von mindestens 1 MeV. Das heißt, die Paarbildung dominiert bei höheren Energien; für manche mittlere Energien ist der Compton-Effekt dominant und bei niedrigen Energien hat der photoelektrische Effekt die Oberhand.

Die Simulation von Elektronen erweist sich oft als kompliziert, da es beim Abbremsen schneller Elektronen oder von Sekundärteilchen, die auf dem Weg durch das Medium erschaffen werden, zu

hunderttausenden Interaktionen in der Materie kommt. Aufgrund dieser großen Zahl an Kollisionen ist die Simulation des Elektronentransports wegen der Beschränkungen in der Rechenleistung oft nicht möglich.

Bei der Monte Carlo Simulation werden demnach Parameter wie die freie Weglänge eines Photons oder Elektrons oder der Streuwinkel zufällig gewählt. Auch für einen möglichen Prozess (Compton oder Photoelektrischer Prozess etc.) muss sich während der Simulation entschieden werden.

Wie die freie Weglänge eines Teilchens auf eine zufällige Art gewählt werden kann, zeigt folgende Überlegung.

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen beim Durchgang durch ein Medium der Fläche F_{Medium} und der Dicke ds gestoppt wird ist

$$P = \frac{F_{Atom}}{F_{Medium}} = n\sigma ds \quad (4.25)$$

Dabei ist n die Teilchendichte und σ der totale Wirkungsquerschnitt pro Atom und F_{Atom} die Fläche der Atome im Medium. Damit kann der Strahlungsintensitätsabfall im Medium durch

$$dI = -IP = -In\sigma ds \quad (4.26)$$

$$I = I_0 e^{-sn\sigma} \quad (4.27)$$

beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Teilchen innerhalb dx gestoppt wird, ist hiermit

$$dP(s) = \frac{dI}{I_0} = n\sigma e^{-sn\sigma} ds \quad (4.28)$$

Für den Erwartungswert, oder den Mittelwert von s gilt

$$\langle s \rangle = \int_0^\infty s dP(s) = \int_0^\infty sn\sigma e^{-sn\sigma} ds = \frac{1}{n\sigma} = \lambda \quad (4.29)$$

Mit λ bezeichnet man die mittlere freie Weglänge eines Teilchens beim Durchgang durch das Medium.

Die Weglänge s eines Teilchens soll im Intervall $[0; \infty)$ zufällig gewählt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Weglänge irgendwo in diesem Intervall liegt ist gleich 1

$$\int_0^\infty p(s) ds = 1 \quad (4.30)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass s in ein Intervall $[0; x_1]$ fällt, ist über die Verteilungsfunktion ausgedrückt gleich

$$F_{s_1}(s) = \int_0^{s_1} p(s)ds \quad (4.31)$$

Verwendet man einen Zufallsgenerator, der eine Zahl ξ im Intervall $[0; 1]$ generiert, dann ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dieser Zahl im erwähnten Intervall gleich 1. Für die korrespondierende Verteilungsfunktion gilt dann

$$F_{\xi_1}(\xi) = \int_0^{\xi_1} p(\xi)d\xi = \xi_1 \quad 0 \leq \xi_1 \leq 1 \quad (4.32)$$

Das heißt aber, dass mit $\xi_1 = F_{s_1}(s) = \int_0^{s_1} p(s)ds$ das Integral von $p(s)$ und damit auch s bestimmt werden kann.

In der Abbildung 9 ist der Auswahlprozess eines zufälligen Wertes für die freie Weglänge s_1 graphisch dargestellt.

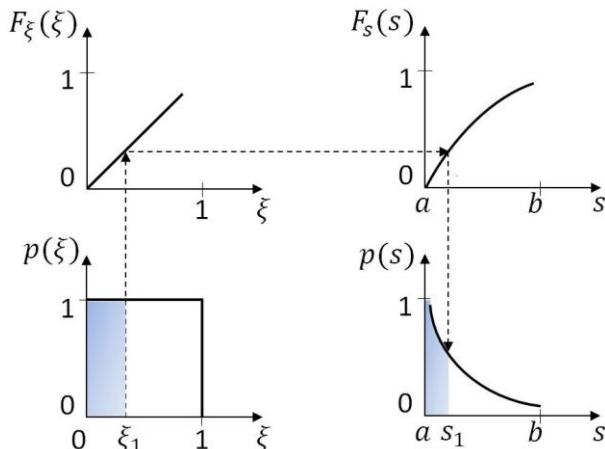


ABBILDUNG 9. Auswahlprozess eines zufälligen Wertes für die freie Weglänge eines Teilchens

Für die Weglänge s_1 gilt somit

$$\xi = \int_0^{s_1} p(s)ds = \int_0^{s_1} \mu \exp(-\mu s) ds = 1 - \exp(-\mu s_1) \quad (4.33)$$

$$s_1 = -\frac{\ln(\xi)}{\mu} = -\frac{\ln(\xi)}{n\sigma} \quad (4.34)$$

Auf gleiche Weise kann man zeigen, dass bei einer Streuung auftretenden Azimutalwinkel ϕ_1 gilt

$$\xi = \int_0^{\phi_1} \frac{1}{2\pi} d\phi = \frac{\phi_1}{2\pi} \quad (4.35)$$

$$\phi_1 = 2\pi\xi \quad (4.36)$$

Um den ganzen Prozess des Strahlungstransports zu verdeutlichen, wird dieser noch einmal in Abbildung 10 graphisch dargestellt. θ stellt dabei den Polarwinkel dar.

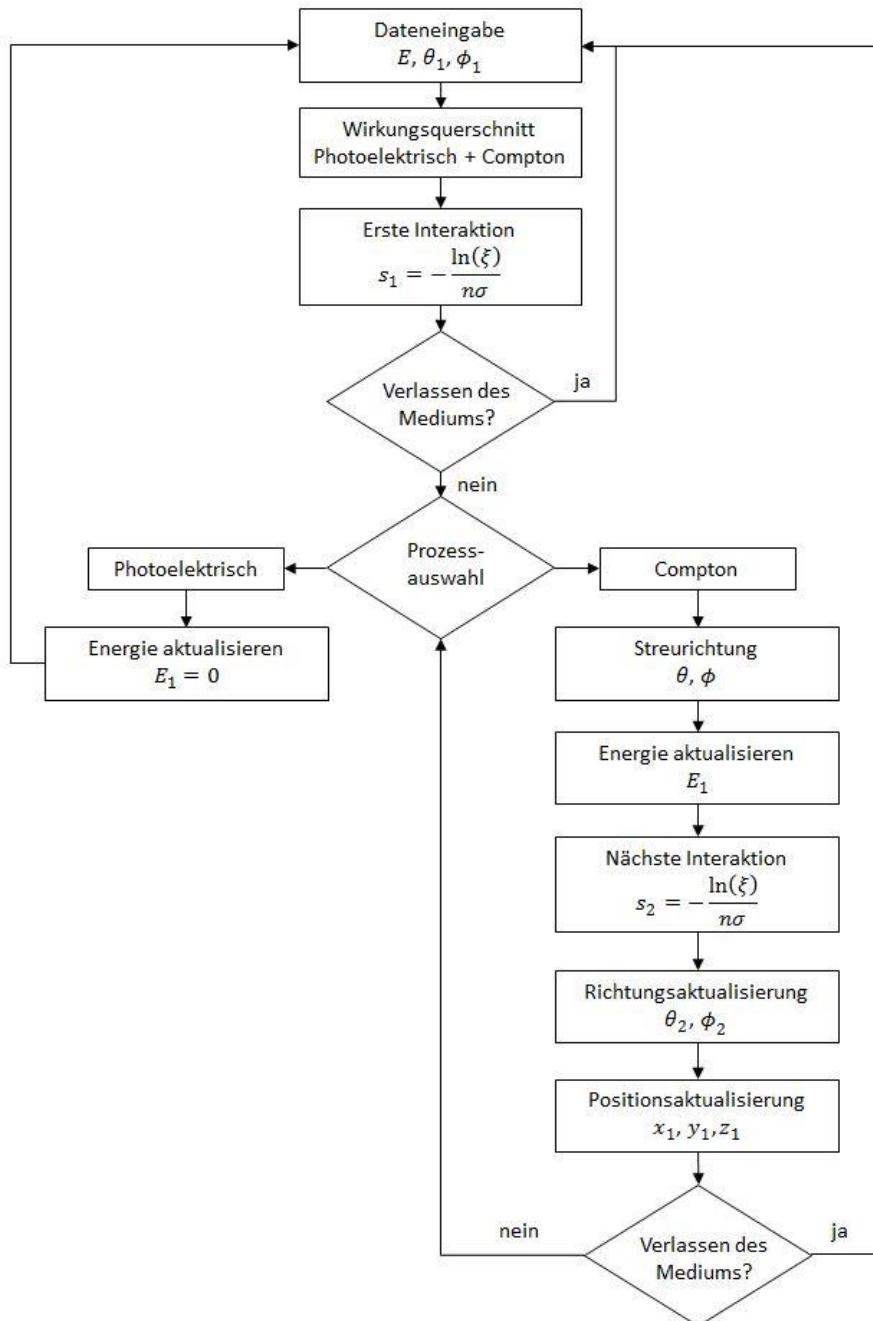


ABBILDUNG 10. Algorithmus zur Simulation des Transports einer Gammastrahlung durch das Medium [4]

4.6 Bestimmung der zeitintegrierten Aktivität

Zur Ermittlung von Dosiskoeffizienten ist, zusätzlich zu S-Faktoren, die Kenntnis der zeitintegrierten Aktivität in den Quellorganen eines biokinetischen Modells notwendig. Es gibt zwei etablierte Methoden, die jeweils von dem MIRD-Komitee und der ICRP entwickelt wurden, wie man diese Aktivitäten berechnet. In den nächsten Kapiteln werden diese Methoden dargestellt.

4.6.1 MIRD-Modell

Mithilfe eines biokinetischen Kompartimentmodells lassen sich die in den Kompartimenten zeitintegrierte Aktivität und die Dosiskoeffizienten in einzelnen Organen bestimmen. Abbildung 11 zeigt schematisch ein biokinetisches Modell mit zwei Kompartimenten i und j .

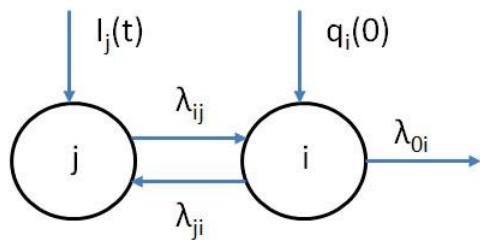


ABBILDUNG 11. Kompartiment-Modell [55]

Die Transferraten in den Kompartimenten werden durch folgende Gleichung, die später in einem Computerprogramm implementiert werden soll, beschrieben:

$$\frac{dq_i(t)}{dt} = \dot{I}(t) - \sum_{j=0, j \neq i}^n \lambda_{ji} q_i(t) - \lambda_p q_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{ij} q_j(t) \quad (4.37)$$

Dabei beschreibt $q_i(t)$ die durch das verabreichte Radiopharmazeutikum angesammelte Präparatmenge oder Aktivität im Kompartiment i zur Zeit t .

$-\lambda_{ji}$ ist die Transferrate der gesamten Emission, d. h. der Bruchteil der Aktivität q_i , der das Kompartiment i pro Zeiteinheit verlässt, wobei λ_{0i} die Transferrate ins Abseits des Systems ist.

λ_{ij} ist die Transferrate der Aufnahme, d. h. der Bruchteil der Aktivität, der in das Kompartiment i pro Zeiteinheit aus anderen Kompartimenten j hineinfließt, λ_p ist die Zerfallskonstante und $\dot{I}(t)$ die Transferrate des Präparats bei der Injektion.

Die Transferraten sind Konstanten. Die Relations (4.37) stellt also ein Gleichungssystem von gewöhnlichen inhomogenen linearen Differenzialgleichungen erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten dar.

Gewöhnlich existiert keine genaue Übereinstimmung zwischen den Kompartimenten und den anatomischen Regionen im Körper. Die Kompartimente sind vielmehr in verschiedene anatomische Regionen aufgeteilt.

Um eine Beziehung zwischen Kompartimenten i und Körperregionen h herzustellen, wurden Identifikationskoeffizienten oder Fraktionen a_{si} eingeführt. Für die Aktivität gilt dann:

$$A_s(t) = \sum_j a_{sj} e^{-(\lambda_p + \lambda_j)t} \quad (4.38)$$

Dabei ist λ_p die physikalische Zerfallskonstante, λ_j die biologische Eliminationsratenkonstante.

4.6.2 ICRP-Modell

Auch die ICRP benutzt die biokinetischen Kompartimentmodelle, mit deren Hilfe man die zeitintegrierte Aktivität und die Dosiskoeffizienten in einzelnen Organen bestimmen kann. Für die Radiopharmazeutika empfiehlt jedoch die ICRP das unten beschriebene Modell.

Drückt man die Transferraten durch Fraktionen und Halbwertszeiten aus, so ergibt die Lösung des Gleichungssystems (4.37) folgenden Ausdruck:

$$\frac{A_s(t)}{A_0} = F_s \sum_{j=n+1}^{n+m} a_j \sum_{i=1}^n \left\{ a_i \frac{T_i}{T_i - T_j} \left[\exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{i,eff}} t\right) - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{j,eff}} t\right) \right] \right\} \quad (4.39)$$

Oder mit der Gleichung (4.9), integriert über die Zeit:

$$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} = F_s \sum_{j=n+1}^{n+m} a_j \sum_{i=1}^n \left\{ a_i \frac{T_i}{T_i - T_j} \left[\frac{T_{i,eff}}{\ln 2} - \frac{T_{j,eff}}{\ln 2} \right] \right\} \quad (4.40)$$

λ_p und λ_i sind mit der physikalischen bzw. biologischen Halbwertszeit über folgende Beziehungen miteinander verknüpft:

$$\lambda_p = \frac{\ln 2}{T_p} \text{ und } \lambda_i = \frac{\ln 2}{T_i} \quad (4.41)$$

Dabei gilt:

F_s	Bruchteil der Verteilung im Organ S , d. h. der Bruchteil der verabreichten Substanz, der sich über die gesamte Zeit im Quellorgan anreichern würde, wenn man von dem radioaktiven Zerfall absieht
a_i	Bruchteil von F_s , der mit einer biologischen Halbwertszeit T_i ausgeschieden wird
a_j	Bruchteil von F_s , der mit einer biologischen Halbwertszeit T_j aufgenommen wird (in den biokinetischen Datentabelle mit Minus-Vorzeichen angegeben)
T_p	Physikalische Halbwertszeit des Radionuklids
T_i	Biologische Halbwertszeit der Ausscheidung
T_j	Biologische Halbwertszeit der Aufnahme
$T_{i,eff}$	Effektive Halbwertszeit der Ausscheidung
$T_{j,eff}$	Effektive Halbwertszeit der Aufnahme
n	Anzahl der Ausscheidungskomponenten
m	Anzahl der Aufnahmekomponenten

Zu beachten ist, dass

$$\sum F_s = 1, \sum a_i = 1 \text{ und } \sum a_j = 1 \quad (4.42)$$

gilt.

Die effektive Halbwertszeit kann aus der biologischen und der physikalischen Halbwertszeit aus folgender Beziehung berechnet werden:

$$\frac{1}{T_{i,eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_i} \quad (4.43)$$

Nimmt man an, dass die Aufnahme (Uptake) unverzüglich abläuft, vereinfacht sich die obige Gleichung (4.40) zu:

$$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} = F_s \sum_{i=1}^n a_i \frac{T_{i,eff}}{\ln 2} \quad (4.44)$$

Aus den tabellierten Werten für die Parameter F_s , a_i und T_i , kann demnach mithilfe der Gleichungen (4.43) und (4.44) die zeitintegrierte Aktivität im Organ pro verabreichter Aktivität A_0 bestimmt werden. Zusammen mit den Werten für die S-Faktoren kommt man dann auf die Dosiskoeffizienten. Stehen die Transferraten als Parameter zur Verfügung, so werden die in das biokinetische Modell eingesetzt, um mithilfe des Gleichungssystems (4.37) die Dosiskoeffizienten zu berechnen.

5 Anwendung der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen in der Nuklearmedizin

5.1 Einleitung

In dieser Arbeit wurden zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse sieben verschiedene Radiopharmazeutika ausgewählt, die in der nuklearmedizinischen Diagnostik breite Anwendung finden. Zur Berechnung der zeitintegrierten Aktivitäten in den Quellorganen und der S-Faktoren ist die Kenntnis von biokinetischen Modellen einzelner Radiopharmazeutika sowie der Zerfallsschemas der Radionuklide, auf denen sie basieren, notwendig.

In den nächsten Kapiteln werden die ausgewählten Radiopharmazeutika und die zugehörigen Radionuklide, biokinetischen Modelle und Modellparameter vorgestellt und analysiert. Anschließend werden die oben beschriebenen Techniken der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen angewandt, um Unsicherheiten der biokinetischen Parameter, der S-Faktoren und der Dosiskoeffizienten für die ausgewählten Radiopharmazeutika zu berechnen. Das letzte Unterkapitel beschreibt die Berechnung der Sensitivitätsindices der Modellparameter und der Anteile der Unsicherheiten des Modells und der Voxel-Phantome.

5.2 Ausgewählte Radiopharmazeutika und die zugehörigen Radionuklide

Die für diese Arbeit ausgewählten Radiopharmazeutika sind ^{18}F -Fluordesoxyglucose (^{18}F -FDG), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetat, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Phosphonate, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Macro-Aggregated-Albumin (MAA) und ^{201}Tl -Chlorid. Diese Radiopharmazeutika sind auf der Basis von Radionukliden ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und ^{201}Tl hergestellt.

^{18}F -FDG wird als Betastrahler in Positronen-Emissions-Tomographie-Studien eingesetzt und ist in der Kardiologie, Neurologie und Onkologie das am häufigsten verwendete Radiopharmazeutikum.

^{18}F zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 109,77$ min entweder unter Elektroneneinfang (3,27 %) oder unter β^+ -Zerfall (96,73 %) in das stabile Sauerstoffisotop ^{18}O . Beim β^+ -Zerfall wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt, dabei wird ein β^+ -Teilchen und ein Elektron-Neutrino emittiert. Die Neutrinos interagieren kaum mit der Materie, sodass sie in der Medizin keine Rolle spielen.

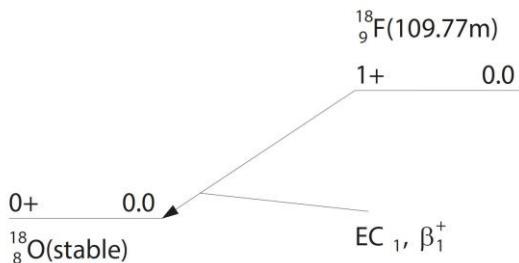


ABBILDUNG 12 Energieniveaus und Zerfallsdaten für das Isotop ^{18}F [37]

Ist ein Elektron aus der inneren Orbitale in einem Atom (üblicherweise aus der K-Schale) nah genug an dem Kern, d. h. die Überlappung der Wellenfunktion des Elektrons mit dem Kern übersteigt einen gewissen Grad, so wird das Elektron von dem Kern eingefangen. Der Kern wandelt sich in einen stabilen Kern um. Dabei wird ein Elektron-Neutrino, jedoch kein β^+ -Teilchen emittiert. Bei dem Prozess spricht man von einem *Elektroneneinfang* (engl. *electron capture*, EC).

Der Elektroneneinfang kann von zwei Prozessen begleitet werden. Zum einen ist dies die Aussendung von Röntgenstrahlung. Das eingefangene Elektron hinterlässt in der inneren Schale der Elektronenhülle ein Loch, das durch ein Elektron aus einer äußeren Schale durch spontane Emission wieder besetzt werden kann. Die dabei frei werdende Energie wird dann in Form einer Röntgenstrahlung (engl. *X-rays*) emittiert werden. Zum anderen ist dies die Emission der Auger-Elektronen. Wird die frei werdende Energie von benachbarten Elektronen aufgenommen, so können sie das Atom als Auger-Elektronen verlassen.

Tabelle 3 zeigt die mittlere Anzahl der abgestrahlten Teilchen pro Zerfall für das Radionuklid ^{18}F . Wie man aus der Tabelle ersehen kann sind außer β^+ -Teilchen noch *Annihilation Photons* angegeben. Bei der Emission eines β^+ -Teilchens kommt es zur Annihilation oder Paarvernichtung, indem durch Zusammenstoß des β^+ -Teilchens mit einem Elektron, beide vernichtet werden und zwei γ -Quanten mit Energien von jeweils 511 keV emittiert werden.

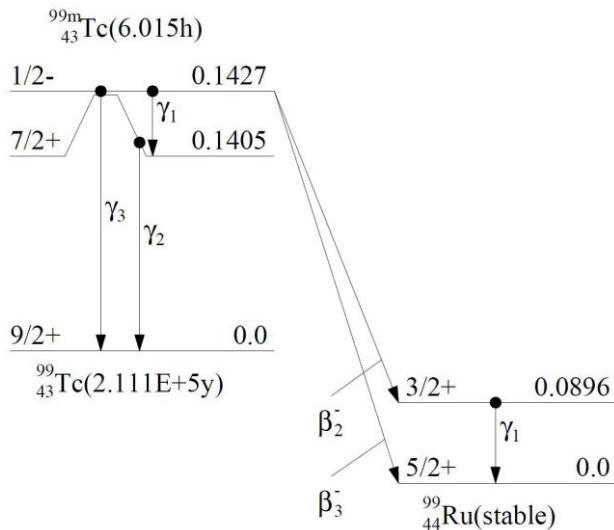
Weil das Radionuklid ^{18}F als β -Strahler kurzlebig ist und in keinen Zerfallsreihen vorkommt, muss es künstlich in Zyklotronen hergestellt werden. Man kann es herstellen, indem beispielsweise das schwere Sauerstoff-Isotop ^{18}O mit Protonen beschossen wird. Wegen verhältnismäßig kleinen Halbwertszeiten ist es sinnvoll, Zyklotronen in der Nähe eines Krankenhauses zu haben.

Das nächste Radionuklid ist $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Wegen einer langen Halbwertszeit von $T_{1/2} = 6,02$ Std. sagt man, dass $^{99\text{m}}\text{Tc}$ sich in einem metastabilen Zustand befindet. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist ein Isomer von ^{99}Tc , das als Spaltprodukt von Uran-235 und Plutonium-239 entsteht. Wie man aus der Abbildung 13 ersehen kann, hat ^{99}Tc zwei wichtige Energieniveaus. Es zerfällt unter Aussendung von einem γ -Quant mit der Energie von 0,0022 MeV gefolgt von der Aussendung eines weiteren γ -Quants mit der Energie von 0,1405 MeV in den Grundzustand oder es geht direkt in den Grundzustand über, unter der Aussendung eines γ -Quants mit der Energie von 0,1427 MeV. Der Grundzustand ist zwar nicht stabil,

kann aber wegen der sehr hohen Halbwertszeit von $T_{1/2} = 2,12 \times 10^5$ Jahren als stabil angesehen werden, sodass der β -Zerfall zum Ruthenium vernachlässigt werden kann.

Verliert der Kern beim γ -Zerfall Energie, so ist ein dem γ -Zerfall verwandter Prozess, die sogenannte *innere Konversion* (engl. *internal conversion*, IC), zu beobachten. Bei der inneren Konversion wird die beim Übergang des Atomkerns in den Grundzustand frei gewordene Energie E_γ direkt auf ein Hüllenelektron (gewöhnlich ein K- oder L-Elektron) übertragen, das mit der kinetischen Energie von $T = E_\gamma - B$ aus dem Atom ausgestoßen wird. Dabei ist B die Bindungsenergie des Elektrons [31].

Die mittlere Anzahl der Übergänge pro Zerfall wird vom MIRD-Komitee [18] wie folgt angegeben: 0,986 (γ_1), 0,986 (γ_2), 0,014 (γ_3). Auch die mittlere Anzahl der Emissionen verschiedener Strahlungsarten pro Zerfall, aufgeschlüsselt pro Übergang ist in dieser MIRD-Publikation zu finden. Gruppiert man die Werte nach Strahlungsart für alle Übergänge, so kommt man auf die Werte, die in der Tabelle 4 dargestellt sind [37]. Auch hier, wie bei ^{18}F , kann es zur Emission von β -Strahlung und begleitenden Prozessen von Röntgenstrahlung und der Emission von Auger-Elektronen kommen. Im Unterschied zu ^{18}F liegt hier jedoch ein β^- -Zerfall vor. Bei diesem Zerfall wird ein Neutron in ein Proton umgewandelt und dabei ein β^- -Teilchen und ein Antineutrino emittiert.



ABILDUNG 13 Energieniveaus und Zerfallsdaten für das Isotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [37]

Als ein Teil eines Radiopharmazeutikums kann es in Verbindung mit verschiedenen Liganden verwendet werden. Die Verteilung des Radionuklids im Körper ist sehr unterschiedlich und hängt von dem Radiopharmazeutikum, an das es gekoppelt ist, und dem pathologischen Zustand des Patienten ab. Es kann zum Abbilden von Schilddrüsen-, Herz- oder Lungenfunktion verwendet werden, es lagert sich aber auch in Knochen ab.

Zur besseren Übersicht sind in der Abbildung 14 die Unterschiede in der Verteilung des Radionuklids $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in Abhängigkeit von dem Radiopharmazeutikum graphisch dargestellt.

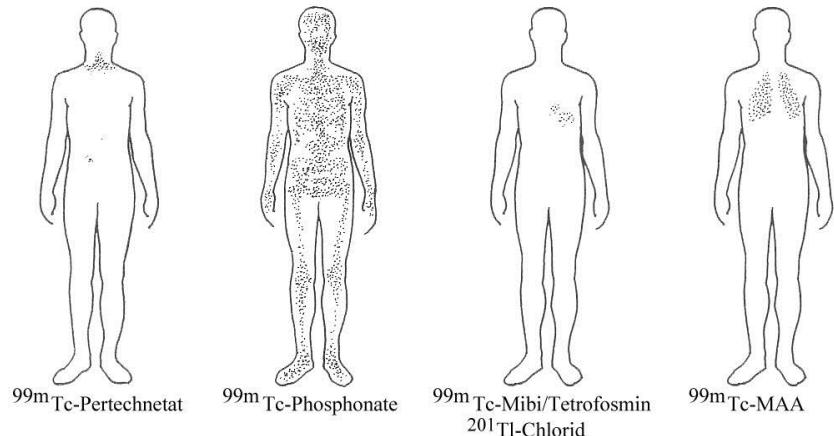


ABBILDUNG 14. Verteilung von verschiedenen Radiopharmazeutika im Körper eines Patienten [55]

Wegen seiner physikalischen Eigenschaften ist ^{99m}Tc ideal für die medizinische Diagnostik und wird deswegen in etwa 80 % der Fällen als γ -strahlender Marker bei Radiopharmazeutika eingesetzt. Da ^{99m}Tc mithilfe eines mobilen Nuklidgenerators hergestellt wird, sind seine weiteren Vorteile eine gute Verfügbarkeit und ein günstiger Preis.

Wie auch ^{99m}Tc ist ^{201}TI ein Gammastrahler und wird als ^{201}TI -Chlorid hauptsächlich zur Visualisierung von Prozessen im Myokard in der nuklearmedizinischen Diagnostik eingesetzt.

^{201}TI zerfällt mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 72,912$ Std. zum stabilen Quecksilber ^{201}Hg (Abbildung 15).

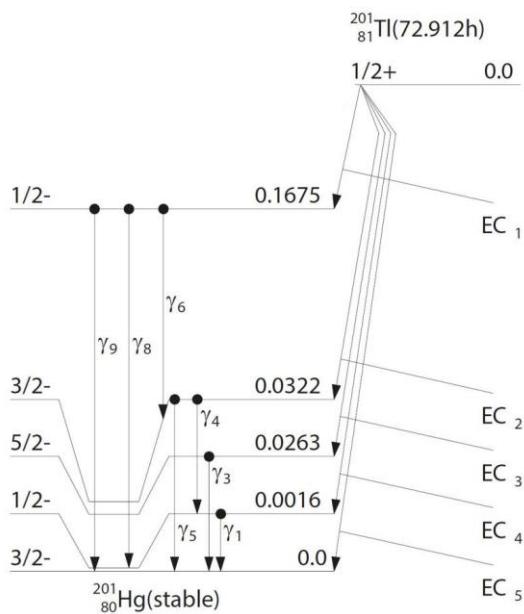


ABBILDUNG 15 Energieniveaus und Zerfallsdaten für das Isotop ^{201}TI [37]

Die mittlere Anzahl der Teilchenemissionen pro Zerfall mit korrespondierenden Energien ist in Tabelle 5 dargestellt.

TABELLE 3. Zerfallsenergien von ^{18}F [37]

Strahlungsart	Ausbeute (/nt*)	Energie (MeV)
Annihilationsstrahlung (Photonen)	1.94E+00	5.11E-01
Beta ⁺	9.67E-01	2.20E-01

*) nuclear transition

TABELLE 4. Zerfallsenergien von $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [37]

Strahlungsart	Ausbeute (/nt*)	Energie (MeV)
Gamma-Strahlung	8.91E-01	1.41E-01
X-Strahlen	5.58E+00	2.57E-04
Beta ⁻	3.70E-05	1.14E-01
Konversionselektronen (IC electrons)	1.10E+00	1.38E-02
Auger-Elektronen	4.41E+00	2.13E-04

*) nuclear transition

TABELLE 5. Zerfallsenergien von ^{201}Tl [37]

Strahlungsart	Ausbeute (/nt*)	Energie (MeV)
Gamma-Strahlung	1.33E-01	1.56E-01
X-Strahlen	2.43E+01	3.02E-03
Konversionselektronen (IC electrons)	9.08E-01	3.29E-02
Auger-Elektronen	2.09E+01	7.08E-04

*) nuclear transition

^{18}F -FDG wird als Positronenstrahler in PET-Studien eingesetzt. Die restlichen Radiopharmazeutika, als γ -Strahler, finden ihre Anwendung in SPECT. Hierzu soll ein kurzer Exkurs in die Funktionsweise von PET und SPECT gegeben werden.

5.3 Positron Emission Tomography (PET)

PET ist ein bildgebendes Verfahren der Nuklearmedizin, das Schnittbilder von gescannten Objekten erzeugt.

Wird einem Patienten ein Beta-Strahler in Form eines Radiopharmazeutikums appliziert, meist intravenös, so kommt es durch Annihilation des Positrons mit dem Elektron zur Entsendung von Gammaquanten. Bei jeder Annihilation entstehen zwei hochenergetische Photonen, die mit Energien von jeweils 511 keV in genau entgegengesetzte Richtung fliegen. Die ringförmig angeordneten Detektoren dienen dazu, die einfallenden Photonen zu registrieren. Zeichnet man alle Koinzidenzen, die zwischen je zwei gegenüberliegenden Detektoren auftreten, auf, so kann auf räumliche und zeitliche Verteilung des Radiopharmazeutikums im Gewebe oder Organ geschlossen und eine Serie von Schnittbildern errechnet werden (Abbildung 16).

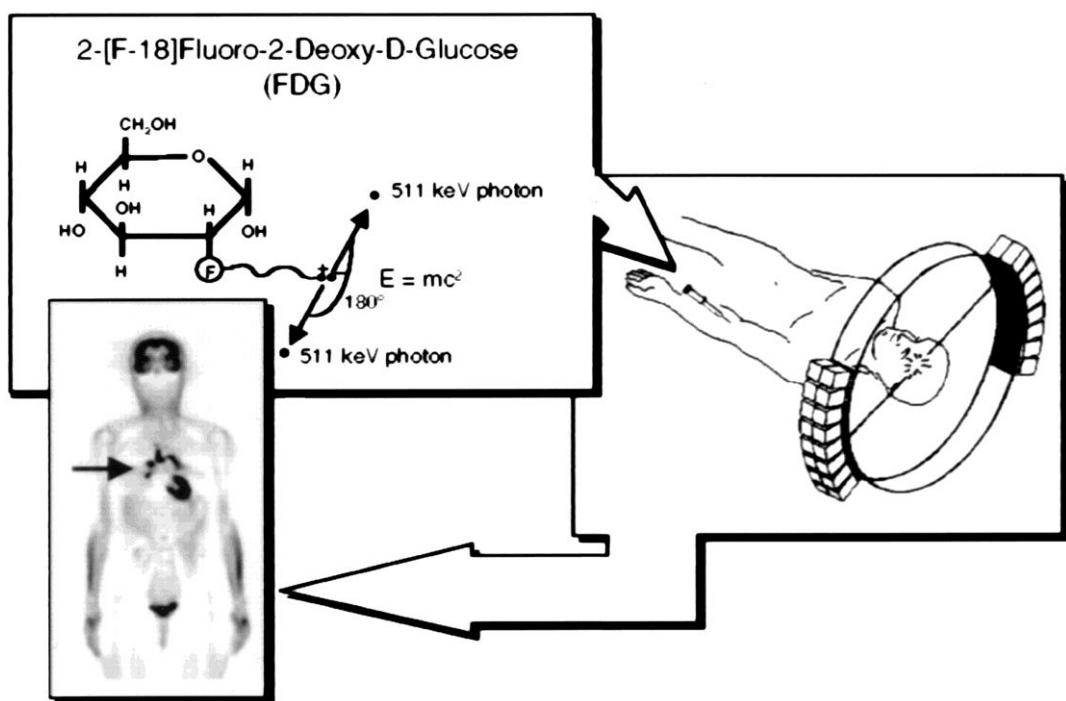


ABBILDUNG 16. Methodik für Positronen-Emissions-Tomographie am Beispiel eines ¹⁸F-FDG-Radiopharmazeutikums [67]

In PET geht es folglich, wie auch allgemein in der Nuklearmedizin, weniger um Form- und Struktur-Darstellungen, sondern vielmehr um die funktionalen Abbildungen der Stoffwechselvorgänge. Bereiche der PET-Anwendungen liegen deshalb in der Onkologie, Kardiologie sowie Neurologie.

5.4 Single-Photon Emission Computed Tomography (SPECT)

SPECT, die Einzelphotonen-Emissionscomputertomographie, ist ebenfalls ein bildgebendes Verfahren der Nuklearmedizin, das im Unterschied zu PET auf dem Prinzip der Einzelphotonendetektion beruht.

Bei SPECT wird dem Patienten ein Radiopharmazeutikum verabreicht, mit dem Radionuklid, das Gammastrahlung emittiert.

Die um den Körper rotierenden Gammakameras detektieren die emittierten Gammaquanten aus verschiedenen Richtungen kommend. Aus so gewonnenen Projektionen können anschließend mittels inverser Radontransformation Schnittbilder rekonstruiert werden.

Um die Richtung der auf die Detektoren einfallenden Photonen zu bestimmen, sind bei SPECT Kollimatoren notwendig. Dabei werden 99,99 % der Photonen weggefiltert und nur die Photonen durchgelassen, die eine bestimmte Richtung aufweisen. Durch den Einsatz der Kollimatoren kommt man bei SPECT auf eine um den Faktor 100 schlechtere Ausbeute als bei PET. Schlechtere Bildqualität und geringere räumliche Auflösung sind dabei die Folgen. Jedoch sind wegen viel höherer Halbwertszeiten der eingesetzten Radionuklide, die Herstellungskosten bei SPECT erheblich niedriger als bei PET, da hier oft ein Zyklotron zur Herstellung der Radionuklide in der Nähe gebaut werden muss.

Im Rahmen der Kardiologie, der Skelettszintigrafie oder von Hirnerkrankungen findet sie SPECT häufige Anwendung.

5.5 Modell, Parameter und Dosiskoeffizienten ausgewählter Radiopharmazeutika

In diesem Kapitel werden biokinetische Modelle und Parameter aller Radiopharmazeutika zusammengetragen und vorgestellt. Im Anhang A werden außerdem die Dosiskoeffizienten einzelner Organe für diese Radiopharmazeutika tabellarisch aufgelistet, die in diversen Publikationen von verschiedenen Autoren angegeben wurden. Die Dosiskoeffizienten wurden für eine große Zahl von Zielorganen berechnet und stellen die Mittelwerte dar. Man ging dabei von einer gleichmäßigen Verteilung des Radionuklids im Organ oder Gewebe aus. Außerdem sind von manchen Autoren auch die Koeffizienten der effektiven Dosis publiziert worden. Diese wurden ebenfalls notiert und stehen jeweils am Ende jeder Tabelle.

Für die ^{18}F -FDG wurden die zeitintegrierten Aktivitäten sowohl nach dem MIRD- (4.37) als auch nach dem ICRP-Schema (4.39) berechnet. Wenn die für die Unsicherheitsanalyse benötigten biokinetischen Parameter nach dem MIRD-Schema die Transferkonstanten λ_i 's sind (4.37), so sind es nach dem ICRP-Schema die biokinetischen Parameter F_s , a_i , T_i , a_j und T_j (4.39). Für die restlichen

sechs Radiopharmazeutika führte man die Berechnungen ausschließlich nach dem ICRP-Schema durch.

5.5.1 ^{18}F -FDG

Ersetzt man in Glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) eine Hydroxylgruppe (OH) durch das Isotop ^{18}F , so entsteht Fluorodesoxyglucose ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{FO}_5$), ein Glucoseanalogon, abgekürzt FDG genannt. Es wird vom Körper genauso wie Glucose aufgenommen. Beim Zerfall von ^{18}F in das stabile Sauerstoffisotop ^{18}O , bildet sich aus der FDG eine „normale“ Glucose mit einem schweren Sauerstoffkern. ^{18}F wird überwiegend in den Zellen aufgenommen, die Glukose aktiv metabolisieren. In diesen Zellen wird das PET-Signal entsprechend größer als in den anderen Zellen.

^{18}F -FDG hängt mit myokardischen und zerebralen Glukosemetabolismus zusammen und kann zur Untersuchung von schnell wachsenden Tumorzellen sowie Entzündungen angewandt werden. Das Radiopharmazeutikum lagert sich hauptsächlich im Myokard und Gehirn ab, aber auch in anderen Organen. Insbesondere in der Leber und in den Nieren wurden Spuren von ^{18}F -FDG an Hunden nachgewiesen. Ca. 20 % von verabreichtem ^{18}F -FDG wird innerhalb der ersten zwei Stunden in den Urin abgesondert.

In Abbildung 17 ist das biokinetische Modell für ^{18}F -FDG, das vom MIRD-Komitee entwickelt wurde, dargestellt [27]. Einzelne Kompartimente widerspiegeln die für den ^{18}F -FDG-Transport relevanten Organe, die im Austausch mit dem Blut stehen. Für Myokard, Leber und Lunge ist das in diesen Organen enthaltene Blut als zusätzliches Kompartiment separat dargestellt worden. Alle Organe außer der Lunge enthalten Kompartimente sowohl für den schnellen als auch für den langsamen Austausch. Die Messungen haben jedoch gezeigt, dass der Fluss aus den langsamen Kompartimenten von Myokard, Leber, Lunge und „sonstigem Gewebe“ auf null gesetzt werden kann (gestrichelte Pfeile), was sie zu Senken für das ^{18}F -FDG macht.

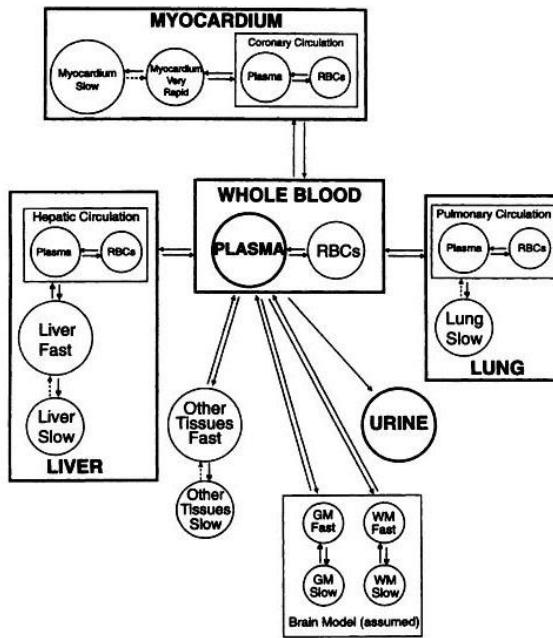


ABBILDUNG 17. Das biokinetische Modell für ^{18}F -FDG. Die gestrichelten Pfeile sind Parameter, die auf null gesetzt worden sind. RBCs = red blood cells; GM = gray matter; WM = white matter [27]

Die Messungen haben auch gezeigt, dass der schnelle Austausch von dem Myokard so rapide abläuft, dass es nicht aufgelöst werden kann.

Berücksichtigt man die oben erwähnten Tatsachen, kann man das Modell vereinfacht, wie in Abbildung 18 gezeigt, darstellen. Dieses Modell wird auch im laufenden Projekt angewandt.

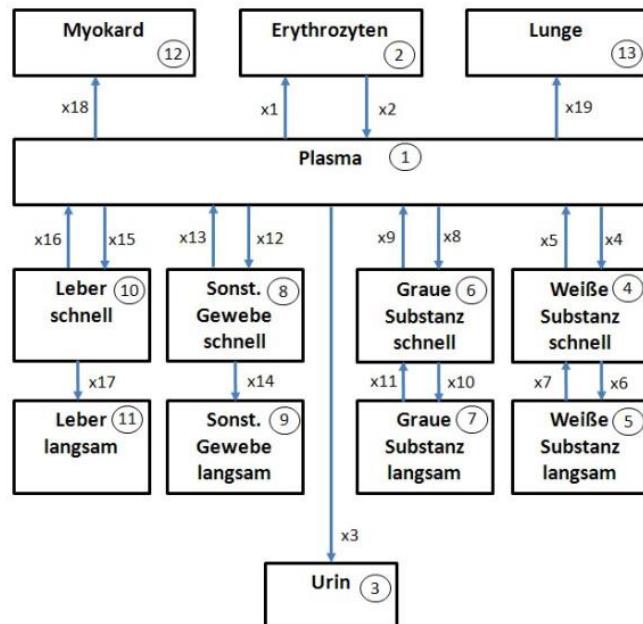


ABBILDUNG 18. Biokinetisches Modell für ^{18}F -FDG, entwickelt vom MIRD-Komitee

Die Parameter für das biokinetische Modell entstanden aus zehn Studien für fastende und nicht fastende Personen, denen Glukose verabreicht wurde (jeweils fünf Personen). In Tabelle 6 sind die für zehn Personen kombinierten Parameter zu sehen. Für jedes Kompartiment sind das arithmetische Mittel und die Standardabweichung angegeben. Für einige Kompartimente ist auch das geometrische Mittel angegeben.

TABELLE 6. Kombinierte Parameter (min^{-1}) für 5 fastende Personen und 5 Personen, denen Glucose verabreicht wurde. SA=Standardabweichung

Parameter	Mittelwert (μ)	SA (σ)	Geometrisches Mittel (μ^+)
Plasma zu Erythrozyten	4.8000	2.9200	4.0700
Erythrozyten zu Plasma	8.0700	2.8500	7.3500
Plasma zu Urin	0.0088	0.0022	0.0085
Plasma zu WS schnell	0.0540	0.0140	
WS schnell zu Plasma	0.1090	0.0440	
WS schnell zu WS langsam	0.0450	0.0190	
WS langsam zu WS schnell	0.0058	0.0017	
Plasma zu GS schnell	0.1020	0.0280	
GS schnell zu Plasma	0.1300	0.0660	
GS schnell zu GS langsam	0.0620	0.0190	
GS langsam zu GS schnell	0.0068	0.0014	
Plasma zu „sonstige“ schnell	0.3710	0.1270	0.3480
„Sonstige“ schnell zu Plasma	0.1020	0.0340	0.0970
„Sonstige“ schnell zu „sonstige“ langsam	0.0167	0.0073	0.0150
Plasma zum schnellen Leberkompartiment	0.0680	0.0690	0.0380
Schnelles Leberkompartiment zu Plasma	0.2190	0.1080	0.1860
Schnelles Leberkompartiment zur „Lebersenke“	0.0180	0.0230	0.0060
Plasma zu Myokard	0.0053	0.0044	0.0030
Plasma zu Lunge	0.0017	0.0006	0.0016

TABELLE 7. Biokinetische Parameter für ^{18}F -FDG [40]

Organ (S)	F_s	$T_{bio} [\text{h}]$	a	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} [\text{h}]$
Brain	0.08	∞	1.00	0.21
Heart wall	0.04	∞	1.00	0.11
Lungs	0.03	∞	1.00	0.08
Liver	0.05	∞	1.00	0.13
Other organs and tissues	0.80	0.20	0.07	1.70
		1.50	0.22	
		∞	0.70	
Urinary bladder contents	0.24			0.26

Die biokinetischen Parameter nach dem ICRP-Schema sind in Tabelle 7 dargestellt.

5.5.2 ^{99m}Tc -Pertechnetat

Das Verhalten von ^{99m}Tc -Pertechnetat (TcO_4^-) im menschlichen Körper ist dem von Iodide Ion sehr ähnlich [2]. Nachdem es oral, subkutan oder intramuskulär verabreicht wurde, lagert es sich hauptsächlich in Schilddrüse und Speicheldrüse sowie in Magen-Darm-Trakt, insbesondere in der Magenschleimhaut ab [47, 56]. Da es auch vom abgestorbenen Gehirngewebe aufgenommen wird, eignet es sich nicht nur zum Abbilden der Schilddrüse und Speicheldrüse sowie bei der Diagnostik des Meckel-Divertikels, sondern auch zur Untersuchungen von Prozessen im Gehirn [25, 26].

Die Parameter für das biokinetische Modell nach dem ICRP-Schema sind in Tabelle 8 aufgelistet.

TABELLE 8. Biokinetische Parameter für ^{99m}Tc -Pertechnetat [39]

Organ (S)	F_s	$T_{bio}[\text{h}]$	α	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0}[\text{h}]$
Thyroid	0.02	1.00	0.85	0.04
		10.0	0.20	
Salivary glands	0.03	1.00	0.90	0.06
		10.0	0.20	
Stomach wall	0.20	1.00	1.00	0.25
Stomach contents	0.20			0.15
SI contents	0.20			0.42
ULI wall	0.15	3.00	-1.00	0.54
		10.0	1.00	
ULI contents	0.35			0.74
LLI contents	0.35			0.36
Kidneys	0.65			0.03
Bladder contents	0.65			0.34
Remaining tissues	0.80	3.00	0.20	4.32
		4.50	0.24	
		45.0	0.56	

*SI contents – small intestine contents; ULI wall – upper large intestine wall;

ULI contents – upper large intestine contents; LLI contents – lower large intestine contents

5.5.3 ^{99m}Tc -Phosphonate

^{99m}Tc -Phosphonate ist ein Radiopharmazeutikum, das sich nach Verabreichen an den Patienten größtenteils in den Knochen ablagert. Ein kleiner Teil lagert sich jedoch auch in den Nieren ab.

Eine Halbwertszeit von $T_{1/2} = 6,02 \text{ h}$ und die vernachlässigbar kleine β -Strahlung erlauben eine Verabreichung von ^{99m}Tc von einigen mCi mit relativ niedriger Strahlenbelastung. Die Möglichkeit, höhere Aktivitäten zu verabreichen, erlaubt eine Ganzkörperbestrahlung. Zudem liegen die abgestrahlten Photonen im Bereich von 140 keV, was nahezu ideal für die Bildgebung ist.

Diese allgemeinen Vorteile von ^{99m}Tc sind auch der Grund, warum ^{99m}Tc -Phosphonate-Radiopharmazeutikum sehr gut zum Abbilden von Knochen geeignet ist.

Tabelle 9 zeigt die biokinetischen Parameter für ^{99m}Tc -Phosphonate, die in der ICRP 53 veröffentlicht wurden.

TABELLE 9. Biokinetische Parameter für ^{99m}Tc -Phosphonate [39]

Organ (S)	F_s	$T_{bio} [\text{h}]$	a	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} [\text{h}]$
Total body (excluding bladder contents)	1.00	0.50	0.30	4.06
		2.00	0.30	
		72.0	0.40	
Bone	0.50	0.25	-1.00	3.01
		2.00	0.30	
		72.0	0.70	
Kidneys	0.02	0.50	0.30	0.12
		2.00	0.30	
		72.0	0.40	
Bladder contents	1.00			1.15

5.5.4 ^{99m}Tc -Sestamibi

^{99m}Tc -Sestamibi (Handelsbezeichnung: Cardiolite) ist eine Komplexverbindung von Radioisotop ^{99m}Tc mit sechs (sesta=6) Methoxyisobutylisonitrile-Liganden (MIBI). Es wird hauptsächlich zum Abbilden vom Myokard verwendet. Nach der intravenösen Injektion verlässt das Präparat rapide den Blutkreislauf und lagert sich hauptsächlich im Muskelgewebe (inkl. Herz) sowie in Leber, Nieren, Speichel- und Schilddrüse ab.

Obwohl ^{201}TI das meistverbreitete und etablierte Radiopharmazeutikum für die Myokardszintigrafie ist, wurde $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi oder auch $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin, was weiter unten genau beschrieben wird, dazu entwickelt, ^{201}TI zu ersetzen. Der Grund liegt daran, dass ^{201}TI einen relativ niedrigen Gammapeak von 69-83 keV hat, was die Auflösung der Bilder verschlechtert. Die lange Halbwertszeit von $T_{1/2} = 72,912 \text{ h}$ limitiert zudem noch bei ^{201}TI die zu verabreichende Aktivität [30].

In der Tabelle 10 sind die biokinetischen Parameter aus der ICRP-Publikation 80 für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi aufgelistet. Hier wurden Parameter verwendet, die für ruhende Personen gelten.

TABELLE 10. Biokinetische Parameter für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi [38]

Organ (S)	F_s	$T_{bio}[\text{h}]$	α	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0}[\text{h}]$
Heart wall	0.015	4.00	0.67	0.070
		24.0	0.33	
Liver				0.675
<i>Immediate uptake</i>	0.180	1.30	0.85	
		24.0	0.15	
<i>Delayed uptake</i>	0.510			
Gall bladder contents	0.230			0.245
SI contents	0.690			0.495
ULI contents	0.690			0.645
LLI contents	0.690			0.315
Kidneys	0.140	7.00	1.00	0.657
Bladder contents				0.170
Muscles	0.200	24.0	1.00	1.390
Salivary glands	0.015	24.0	1.00	0.104
Thyroid	0.003	2.00	1.00	0.006
Other organs and remaining tissues	0.450	24.0	1.00	3.120

*SI contents – small intestine contents; ULI cont – upper large intestine contents; LLI contents – lower large intestine contents

5.5.5 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin (Markenbezeichnung: Myoview) ist ein Chelatkomplex mit zwei 1,2-*bis*[di-(2-ethoxyethyl)phosphino]ethane Liganden. Es wird ähnlich wie Sestamibi zum Abbilden vom Myokard verwendet. Auch hier verlässt das Präparat nach der intravenösen Injektion rapide den Blutkreislauf und lagert sich hauptsächlich im Muskelgewebe (inkl. Herz) sowie in Leber, Nieren und Speicheldrüse ab. Ein kleiner Teil wird von der Schilddrüse aufgenommen.

Tabelle 11 zeigt die biokinetischen Parameter für ^{99m}Tc -Tetrofosmin, die in der ICRP 80 veröffentlicht wurden. In der ICRP 106 [40] wurden später die gleichen Werte wie in der ICRP 80 veröffentlicht. Die in der Tabelle aufgelisteten Parameter sind Werte für ruhende Personen.

TABELLE 11. Biokinetische Parameter für ^{99m}Tc -Tetrofosmin [38]

Organ (S)	F_s	$T_{bio}[\text{h}]$	α	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0}[\text{h}]$
Heart wall	0.012	4.00	0.67	0.055
		24.0	0.33	
Liver	0.100	0.50	0.85	0.088
		2.00	0.15	
Gall bladder contents	0.180			0.240
SI contents	0.540			0.512
ULI contents	0.540			0.665
LLI contents	0.540			0.327
Kidneys	0.070	1.00	0.70	0.207
		24.0	0.30	
Bladder contents	0.460			0.328
Salivary glands	0.015	24.0	1.00	0.103
Thyroid	0.003	2.00	1.00	0.006
Other organs and tissues	0.800	0.33	0.15	4.780
		24.0	0.85	

*SI contents – small intestine contents; ULI cont – upper large intestine contents; LLI contents – lower large intestine contents

5.5.6 ^{99m}Tc -MAA

^{99m}Tc -MAA besteht aus einer sterilen wasserartigen Suspension von ^{99m}Tc , die die menschlichen Albumin-Teilchen markieren. ^{99m}Tc -MAA wird sofort nach intravenöser Injektion komplett von Arteriolen und Kapillaren in der Lunge aufgenommen. Daher findet ^{99m}Tc -MAA Anwendung beim Abbilden der Lunge. ^{131}I -MAA galt als das meistverbreitete Radiopharmazeutikum zur Untersuchung von Lungenerkrankungen. Doch die hohe Patientenbelastung durch hohe Energiedosen und die relativ hohe Energie von Gammastrahlung hat die Entdeckung und Entwicklung eines neuen Präparats bewirkt, des ^{99m}Tc -MAA [12].

Die Parameter für das biokinetische Modell nach dem ICRP-Schema sind in Tabelle 12 dargestellt.

TABELLE 12. Biokinetische Parameter für ^{99m}Tc -MAA [39]

Organ (S)	F_s	$T_{bio} [h]$	a	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} [h]$
Total body (excluding bladder contents)		1.00		7.61
Lungs	1.00	6.00	0.85	4.89
		72.0	0.15	
Liver	0.25	6.00	-1.00	1.04
		120	1.00	
Kidneys	1.00			0.02
Bladder contents	1.00			0.22

5.5.7 ^{201}Tl -Chlorid

Was die Verteilung von Thallium im menschlichen Körper und die neurophysiologischen Funktionen angeht, ist Thallium biologisch dem Kalium sehr ähnlich. ^{201}Tl -Chlorid wird hauptsächlich zur Visualisierung der Herzmuskelfunktion, der Blutzirkulation, der Nebenschilddrüsenfunktion sowie zum Auffinden von Tumoren in verschiedenen Organen verwendet [48].

Tabelle 13 zeigt die biokinetischen Parameter für ^{201}Tl -Chlorid, die in der ICRP 106 veröffentlicht wurden. Die Werte stimmen mit den zuvor in der ICRP 53 veröffentlichten Werten überein.

TABELLE 13. Biokinetische Parameter für ^{201}Tl -Chlorid [40]

Organ (S)	F_s	$T_{bio} [h]$	a	$\frac{\tilde{A}_s}{A_0} [h]$
Bone	0.060	168 672	0.63 0.37	4.900
Thyroid	0.002	168 672	0.63 0.37	0.160
Heart wall	0.040	10 168 672	0.5 0.32 0.18	1.900
Lungs	0.040	168 672	0.63 0.37	3.300
Kidneys	0.060	168 672	0.63 0.37	4.900
Spleen	0.007	168 672	0.63 0.37	0.570
Red marrow	0.060	168 672	0.63 0.37	4.900
Stomach wall	0.006	168 672	0.63 0.37	0.490
Small intestine wall	0.030	168 672	0.63 0.37	2.400
Muscles	0.410	168 672	0.63 0.37	33.00
Ovaries	0.0003	168 672	0.63 0.37	0.024
Testes	0.003	168 672	0.63 0.37	0.240
Other organs and tissues	0.190	168 672	0.63 0.37	16.00
SI contents	0.800			0.770
ULI contents	0.800			2.200
LLI contents	0.800			3.300
Urinary bladder contents	0.200			0.087
Liver	0.090	168 672	0.63 0.37	7.300

*SI contents – small intestine contents; ULI contents – upper large intestine contents;
LLI contents – lower large intestine contents

5.6 Unsicherheitsberechnung

Die Unsicherheitsanalyse von Dosiskoeffizienten erfolgte unter Zuhilfenahme der oben beschriebenen statistischen Methode, der Latin-Hypercube-Sampling-Methode. Nach dem LHS-Verfahren wurden sowohl für die biokinetischen Parameter als auch für die aus den Voxel-Phantomen gewonnenen S-Faktoren Samples generiert. Daraus schloss man auf die Unsicherheit der biokinetischen Parameter, bzw. der zeitintegrierten Aktivität, sowie der S-Faktoren. Die generierten Samples wurden verwendet, um mit der Gleichung (4.16) die Samples für die Dosiskoeffizienten zu gewinnen, um daraus auf die Unsicherheit derselben zu schließen. Anschließend wurden daraus unter Zuhilfenahme der Gleichung (4.23) die Unsicherheiten der effektiven Dosis bestimmt.

5.6.1 Bestimmung der Unsicherheiten der zusammengestellten Modellparameter

Wie schon oben aufgeführt, wurden für die ^{18}F -FDG die zeitintegrierten Aktivitäten in den Quellorganen, die die Kompartimente des biokinetischen Modells repräsentieren, sowohl nach dem MIRD- als auch nach dem ICRP-Schema berechnet. Die Berechnungen bei den restlichen sechs Radiopharmazeutika wurde ausschließlich nach dem ICRP-Schema durchgeführt.

Die biokinetischen Parameter sind statistische Größen, die eine gewisse Verteilung haben. Entsprechend dieser Verteilung wurden mithilfe der LHS-Methode Samples generiert. Für die Prozedur der Sample-Generierung benötigt LHS als Eingangsgrößen die Art der Verteilung sowie den Min- bzw. Max-Wert der Verteilung entsprechend einem bestimmten Konfidenzintervall. Bei einem Konfidenzintervall von 99,8 % stellen die Min- und Max-Werte der Verteilung die Perzentile $P_{0,1}$ und $P_{99,9}$ (entspricht den Quantilen $Q_{0,001}$ und $Q_{0,999}$) dar (Abbildung 19).

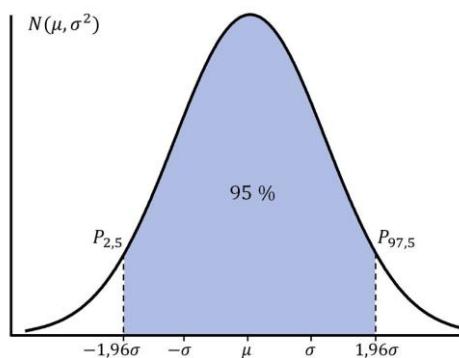


ABBILDUNG 19 Perzentile einer Normalverteilung eines Konfidenzintervalls von 95 %

Da man die Unsicherheitsanalyse von der ^{18}F -FDG nach zweierlei Schema durchgeführt hat, standen als biokinetischen Parameter für ^{18}F -FDG die Parameter nach dem MIRD-Schema sowie die Parameter nach dem ICRP-Schema zur Verfügung.

Die Bestimmung der Perzentile sowie der Art der Verteilung jedes einzelnen Parameters von ^{18}F -FDG nach dem MIRD-Schema wird im Folgenden erklärt.

Zunächst wurde davon ausgegangen, dass die biokinetischen Parameter als statistische Größen einer Normalverteilung unterliegen. Aus dem gegebenen Mittelwert μ und der Standardabweichung σ bestimmte man für jeden Parameter ausgehend von einem Konfidenzintervall von 99,8 % das Perzentil $P_{0,1}$:

$$P_{0,1} = \mu - 3,09\sigma \quad (5.1)$$

Die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen für die ^{18}F -FDG sind in der Tabelle 6 dargestellt.

Bei negativen Werten, die bei manchen Parametern entstanden, schloss man auf die logarithmische Normalverteilung. Die Perzentile wurden, jetzt ausgehend von der logarithmischen Normalverteilung, neu berechnet. Dabei wurden aus

$$\mu^* = \frac{\mu}{\sqrt{\omega}} \quad (5.2)$$

$$\sigma^* = \exp(\sqrt{\log(\omega)}) \quad (5.3)$$

$$\omega = 1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 \quad (5.4)$$

der geometrische Mittelwert μ^* und die multiplikative Standardabweichung σ^* bestimmt [51].

Nachdem auf diese Weise die Art der Verteilung für jeden Parameter bestimmt war, ging man von einem Konfidenzintervall von 95 % aus und berechnete entsprechend der Art der Verteilung die zur Generierung von Samples benötigten Perzentile $P_{2,5}$ und $P_{97,5}$.

Perzentile der Normalverteilung wurden aus den Gleichungen

$$P_{97,5} = \mu + 1,96\sigma \quad (5.5)$$

$$P_{2,5} = \mu - 1,96\sigma \quad (5.6)$$

bestimmt.

Für die logarithmische Normalverteilung wurden die Perzentile nach den Gleichungen

$$P_{97,5} = \mu^+ \times (\sigma^*)^{1,96} \quad (5.7)$$

$$P_{2,5} = \mu^+ \div (\sigma^*)^{1,96} \quad (5.8)$$

berechnet. Dabei wurden bei fehlenden μ^+ -Werten (Tabelle 6), die μ^* -Werte genommen.

Die Mittelwerte der Modellparameter nach dem ICRP-Schema wurden den Tabellen 7-13 entnommen. Da hier keine Standardabweichungen zur Verfügung standen, wurde eine Streuung von 20 %, d. h. ein Variationskoeffizient $c\nu$ von 0,2, und eine Normalverteilung angenommen. Bei einem Konfidenzintervall von 95 % entspricht der Variationkoeffizient von 20 % einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von mehr als 99,2 % [72]. Zur Berechnung von Perzentilen wurde sich der Gleichungen (5.1), (5.5) und der Tatsache bedient, dass

$$c\nu = \frac{\sigma}{\mu} \quad (5.9)$$

ist.

Bei den Quellorganen, bei denen die Parameter fehlten, die zeitintegrierte Aktivität jedoch angegeben war, wurde die 20 %-Streuung der Aktivität angenommen und daraus wurden die entsprechenden Perzentile berechnet. Bei der Generierung von Samples wurde die Beziehung (4.42) berücksichtigt. Die Parameter mit dem Wert 1 wurden nicht variiert.

5.6.2 Bestimmung der Unsicherheiten der mittels Phantomen bestimmten S-Faktoren

Bei Berechnung der Unsicherheiten von S-Faktoren wurde sich der berechneten und tabellierten SAF-Werte von sieben verschiedenen Phantomen bedient (Tabelle 14). Zu den zwei Referenzphantomen ICRP-AM (Adult Male) und ICRP-AF (Adult Female) kamen fünf Nichtreferenzphantome mit den Bezeichnungen Frank, Golem, MadPat (Madeira Patient), VisHum (Visual Human) und Voxelman hinzu. Das Phantom Voxelman ist das Modell von Zubal et al. [90], die restlichen sechs Phantome wurden am Helmholtz Zentrum München entwickelt. Mit der Entwicklung verschiedener Phantome bestrebte man das Ziel an, die Photonen- und Elektronenpropagation im Körper für diverse Organgrößen und -maße, aber auch für verschiedene Körperdimensionen und Organabstände zu untersuchen.



ABBILDUNG 20. Voxelphantome: ICRP-AM, ICRP-AF, Golem, Frank, Visual Human, Voxelman und Madeira Patient

Die SAF-Werte wurden für viele Quellorgan-Zielorgan-Paare (je nach der Segmentierung des entsprechenden Phantoms) für bis zu 25 Energien zwischen 10 keV und 100 MeV berechnet und tabelliert. Die SAF-Werte für die benötigten Energien wurden daraus logarithmisch interpoliert. Wenn der Wert Null war, wurde die Interpolation linear durchgeführt.

Bei einigen Phantomen waren für Elektronen die SAF-Werte nicht simuliert worden. Für diese SAF-Werte für Elektronen mit Energien kleiner als 100 keV wurden folgende Näherungen vorgenommen:

$$\Phi(r_T \leftarrow r_S) = \begin{cases} 1/M_T & \text{for } r_T = r_S \\ 0 & \text{for } r_T \neq r_S \\ 0.5/M_c & \text{for } r_T = \text{wall}, r_S = \text{contents of walled organ} \\ 1/M_{TB} & \text{for } r_S = \text{Total body} \end{cases} \quad (5.10)$$

Wie man aus der Abbildung 20 oder auch aus der Tabelle 14 ersehen kann, wurde bei nur drei der sieben Phantome der komplette Patientenkörper abgebildet. Die Phantome Frank, MadPat, VisHum und Voxelman stellen Teilphantome dar. Bei Berechnung von SAF-Werten mit solchen Teilphantomen erhält man für bestimmte Organpaare viel zu hohe Werte, sodass der SAF-Wert korrigiert werden muss. Diese Massenkorrektur wurde für alle Organpaare für die Teilphantome durchgeführt, indem die berechneten SAF-Werte mit dem Korrekturfaktor $M_{korr} = \frac{M_{Patient}}{M_{Phantom}}$ multipliziert wurden.

Die S-Werte wurden entsprechend der Gleichung (4.19) berechnet. Dabei wurden Mittelwerte der Energien aus der ICRP 107 [37] verwendet. So wurden für ^{18}F für die Photonen und β^+ -Teilchen die Energie und die entsprechenden Häufigkeiten, wie sie in Tabelle 3 zu sehen sind, eingesetzt. Für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ verwendete man die Werte entsprechend der Tabelle 4 und für ^{201}Tl rechnete man mit den Werten aus der Tabelle 5.

TABELLE 14. Daten der verwendeten Phantome

Merkmale	Phantomname						
	RCP-AM	RCP-AF	Frank	Golem	MadPat	VisHum	Voxelman
Geschlecht	M	F	M	M	M	M	M
Alter (y)	38	43	48	38	69	38	
Höhe (cm)	176	167	174	176	172	180	178
Gewicht (kg)	73	60	95	69	70	103	70
Anzahl Voxel (Millionen)	1.9	3.9	23.7	1.9	6.9	20.1	
Umfang	Ganzer Körper	Ganzer Körper	Kopf und Rumpf	Ganzer Körper	Kopf, Rumpf, Schenkel	Kopf bis Schenkel	Kopf, Rumpf, Schenkel

Für das Radiopharmazeutikum ^{201}TI -Chlorid wurden die S-Faktoren mithilfe eines nuklearmedizinischen Tools und einer Software namens „Esoterik“ gewonnen. Das nuklearmedizinische Tool ist eine von Juan Camilo Ocampo Ramos, Dr. Nina Petoussi-Henss und Maria Zankl am Helmholtz-Zentrum entwickelte Software. Das Computerprogramm basiert auf den Voxel-Phantomen und dient dazu, die interne Dosis für eine breite Spanne an Radionukliden zu berechnen. Auch „Esoterik“ ist eine Software, die von Dr. Nina Petoussi-Henss am Helmholtz-Zentrum entwickelt wurde.

Bei der Generierung von Samples mithilfe der LHS-Methode ging man davon aus, dass die Werte für die S-Faktoren, die man aus verschiedenen Phantomen gewann, einer Normalverteilung unterliegen. Aus diesen Werten bestimmte man für jeden Parameter den Mittelwert μ und die Standardabweichung σ , die aus der korrigierten empirischen Stichprobenvarianz s_x^2 nach folgender Schätzfunktion folgte:

$$\sigma = s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (5.11)$$

n stellt dabei die Anzahl vorhandener Werte für S-Faktoren, die man aus Simulationen mit verschiedenen Phantomen gewann, dar.

Ausgehend von einem Konfidenzintervall von 99,8 % berechnete man das Perzentil $P_{0,1}$ entsprechend der Gleichung 5.4. War der Wert negativ, ging man davon aus, dass die Verteilung der entsprechenden S-Faktoren logarithmisch ist. Man berechnete das geometrische Mittel μ^* und damit die geometrische Standardabweichung σ^* entsprechend der folgenden Gleichung:

$$\sigma^* = \exp \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{x_i}{\mu^*} \right) \right]^2} \quad (5.12)$$

Der weitere Ablauf bei der Bestimmung der Perzentile $P_{2,5}$ und $P_{97,5}$ und der Generierung von Samples entsprach dem der Bestimmung von Unsicherheiten der biokinetischen Modellparameter, was im Kapitel 5.6.1 beschrieben wurde.

Die Tabellen 22-38 listen die Art der Verteilung, den arithmetischen bzw. den geometrischen Mittelwert (μ bzw. μ^*) je nach der Verteilungsart, die Perzentile $P_{2,5}$ und $P_{97,5}$, den Variationskoeffizienten cv im Falle einer Normalverteilung und die geometrische Standardabweichung σ^* im Falle einer logarithmischen Verteilung der S-Faktoren für das jeweilige Radionuklid auf.

5.6.3 Bestimmung der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten

Es wird angenommen, dass der Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R für Elektronen und Photonen gleich 1 ist [32], sodass der Dosiskoeffizient aus Gleichung (4.16) gleich dem Organdosiskoeffizienten aus Gleichung (4.18) ist. Die Berechnung von Dosiskoeffizienten erfolgte also nach Gleichung (4.18) mit einem Strahlungs-Wichtungsfaktor $w_R = 1$. Die Berechnung der zeitintegrierten Aktivität erfolgte nach dem ICRP-Schema nach Gleichung (4.40). Für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG wurde die zeitintegrierte Aktivität zusätzlich auch nach dem MIRD-Schema berechnet, Gleichung (4.37). Für die Berechnung der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten wurde eine Software namens „DoseU“ in C# entwickelt und eingesetzt. Als Eingangsgrößen für das Programm dienten die zuvor mithilfe der LHS-Technik generierten 500 Samples jedes einzelnen biokinetischen Modellparameters und der S-Faktoren für jedes Quellorgan-Zielorgan-Paar. Daraus wurden zusammen mit den berechneten zeitintegrierten Aktivitäten für jedes Quellorgan die 500 Samples von den Dosiskoeffizienten bestimmt. Die so berechneten Samples erlaubten, beliebige statistische Größen wie das $P_{2,5}$ - oder $P_{97,5}$ -Perzentil, den Mittelwert oder die Standardabweichung der Dosiskoeffizienten zu berechnen und auf deren Unsicherheit zu schließen [80].

Aus den sieben in diesem Projekt verwendeten Phantomen war nur eins weiblich. Die biokinetischen Parameter und die daraus folgenden zeitintegrierten Aktivitäten, die von der ICRP angegeben wurden, gelten sowohl für den Referenzmann als auch für die Referenzfrau. Bei der Unsicherheitsanalyse wurden deswegen die Rechnungen auf eine Referenzperson ohne Geschlecht bezogen und die zeitintegrierte Aktivität $A(t)$ (Modelle) sowie die S-Faktoren (Phantome) wurden für eine neutrale Person ausgewertet. Das heißt, dass bei der vorliegenden Analyse die Unsicherheit aus dem Geschlecht nicht ermittelt wird.

Um den Unterschied in der Berechnung von Dosiskoeffizienten mit gleicher zeitintegrierter Aktivität aber verschiedenen S-Faktoren zu demonstrieren, wurden die Dosiskoeffizienten mit einem männlichen und weiblichen Referenzphantom [89] und einem mathematischen Phantom [73] berechnet und verglichen (Tabelle 47) [80].

Die berechneten Unsicherheiten für den Organdosiskoeffizienten sowie den Koeffizienten der effektiven Dosis sind in den Tabellen 39-46 dargestellt. Für die quantitative Beschreibung der Unsicherheit wurde der Unsicherheitsfaktor (UF) verwendet [49]. Die die Unsicherheit beschreibende Zahl kann in Bezug auf die untere und obere Grenze eines Konfidenzintervalls ausgedrückt werden. Für ein Konfidenzintervall von 95 % stellt der Unsicherheitsfaktor die Quadratwurzel des Quotienten von dem 97,5 %- und dem 2,5 %-Perzentil dar.

$$UF = \sqrt{\frac{P_{97,5}}{P_{2,5}}} \quad (5.13)$$

Abbildung 22 stellt den Vergleich von Organdosiskoeffizienten dar, die nach den MIRD- und ICRP-Schemas bestimmt wurden. Die Abbildungen 23-30 zeigen den Vergleich der berechneten Organdosiskoeffizienten mit den Literaturwerten, die in den Tabellen 93-101 aufgelistet sind.

Beim Vergleich der berechneten Dosiskoeffizienten mit Referenzwerten aus der Literatur wurden die berechneten Unsicherheiten von Dosiskoeffizienten graphisch in Form von Box-Plots, wie in der Abbildung 21 zu sehen ist, dargestellt. Der Wertebereich umfasst ein Konfidenzintervall von 95 % aller Werte mit einem mittleren Bereich von 50 %.

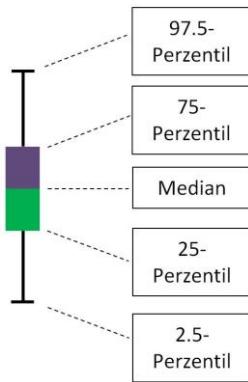


ABBILDUNG 21. Beschreibung des verwendeten Box-Plots

Bei der Berechnung der Unsicherheiten von Koeffizienten der effektiven Dosis wurden Gewebe-Wichtungsfaktoren aus der ICRP Publikation Nr. 103 verwendet (Tabelle 2). Die Unsicherheit im Gewebe-Wichtungsfaktor wurde nicht berücksichtigt, da sie von der ICRP nicht angegeben war.

Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse werden im nächsten Kapitel vorgestellt und ausführlich besprochen.

5.7 Identifikation der sensiblen Parameter

Wie weiter oben beschrieben, gibt es laut den Beziehungen (4.13) und (4.40) einen Zusammenhang zwischen den biokinetischen Modellparametern, der zeitintegrierten Aktivität im Quellorgan und der Energiedosis im Zielorgan.

Hier wird, bei der Annahme, dass der S-Faktor konstant bleibt, der Grad der Beziehung zwischen den Modellparametern und der zeitintegrierten Aktivität, den Modellparametern und der Dosis sowie der zeitintegrierten Aktivität und der Dosis berechnet.

5.7.1 Bestimmung des partiellen Rangkorrelationskoeffizienten

Ist ein Zusammenhang zwischen mindestens zwei Variablen linear und sind die Variablen normalverteilt, so kann der Grad des Zusammenhangs mithilfe des Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten von Bravais und Pearson berechnet werden.

Will man jedoch keine Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen machen, so kann man zum Spearmans-Rangkorrelationskoeffizienten greifen. Dieser Rangkorrelationskoeffizient ist außerdem nicht auf die Annahme, dass die Beziehung zwischen den Variablen linear ist, angewiesen und ist auch gegenüber den Ausreißern äußerst robust.

Bei mehreren Variablen ist oft die Frage interessant welche Korrelation zwischen zwei Variablen vorliegt, die von den simultanen Wirkungen der restlichen Variablen befreit sind. Hierzu kann der sogenannte partielle Rangkorrelationskoeffizient zu Hilfe genommen werden. Dieser wird in der vorliegenden Arbeit auch angewandt.

Daher wird an dieser Stelle die Berechnung des partiellen Rangkorrelationskoeffizienten zwischen den biokinetischen Modellparametern und der zeitintegrierten Aktivität erklärt. Die Berechnung des Koeffizienten zwischen den Modellparametern und der Dosis oder der zeitintegrierten Aktivität und der Dosis geschieht auf die gleiche Art.

Gegeben sind k Parameter X_1, X_2, \dots, X_k . Ausgehend von einer Normalverteilung und den Perzentilen $P_{2,5}$ und $P_{97,5}$ an der Grenze eines Konfidenzintervall von 95 % (Tabelle 102-126) wurden für jeden dieser Parameter mithilfe der LHS-Methode 500 Werte der Verteilung gesampelt. Eingesetzt in die Gleichung (4.40) erhält man 500 Werte für die zeitintegrierte Aktivität Y . Man berechnet die Korrelationskoeffizienten für jedes Parameterpaar r_{ij} mit $i, j = 1, \dots, k$ und auch zwischen den Parametern und der zeitintegrierten Aktivität r_{iy} mit $i = 1, \dots, k$ und bildet eine Korrelationsmatrix C der Form

$$C = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1k} & r_{1y} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2k} & r_{2y} \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & 1 & r_{ky} \\ r_{y1} & r_{y2} & \dots & r_{yk} & 1 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

mit

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.15)$$

Invertiert man die Matrix C , so kann gezeigt werden, dass Folgendes gilt:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-R_{x_1}^2} & c_{12} & \dots & c_{1k} & -\frac{B_1}{1-R_y^2} \\ c_{21} & \frac{1}{1-R_{x_2}^2} & \dots & c_{2k} & -\frac{B_2}{1-R_y^2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{k1} & c_{k2} & \dots & \frac{1}{1-R_{x_k}^2} & -\frac{B_k}{1-R_y^2} \\ -\frac{B_1}{1-R_y^2} & -\frac{B_2}{1-R_y^2} & \dots & -\frac{B_k}{1-R_y^2} & -\frac{1}{1-R_y^2} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

mit

$$P_{x_jy} = B_j \sqrt{\frac{1-R_{x_j}^2}{1-R_y^2}} \quad (5.17)$$

Die P_{x_jy} bilden die partiellen Rangkorrelationskoeffizienten zwischen den Modellparametern und der zeitintegrierten Aktivität. Dabei sind $R_{x_j}^2$ und R_y^2 Bestimmtheitsmaße und B_j die standardisierten Regressionskoeffizienten, die in Kapitel 3.3.2 beschrieben wurden.

Aufgrund der Bedingung (4.42) sind manche Parameter voneinander abhängig. Diese starke Korrelation führt dazu, dass die Determinante der Matrix C zu 0 wird und die Matrix sich entsprechend nicht invertieren lässt. Aus diesem Grund wurden die Parameter $F_{S_{Others}}$ und die betroffenen a_i aus der Berechnung herausgenommen. Daher sind in den unten angegebenen Tabellen 49-55 für diese Parameter keine Werte zu finden.

Mithilfe des FORTRAN 77 Programms von R. L. Iman, M. J. Shortencarier und J.D. Johnson [42] wurden auf die oben beschriebene Weise die partiellen Rangkorrelationskoeffizienten berechnet und tabelliert. Die Tabellen 49-55 zeigen die partiellen Rangkorrelationskoeffizienten zwischen den biokinetischen Modellparametern und der zeitintegrierten Aktivität in den Quellorganen, die Tabellen 57-68 die partiellen Rangkorrelationskoeffizienten zwischen der zeitintegrierten Aktivität und der berechneten Dosis in den Zielorganen und die Tabellen 71-84 die zwischen den Modellparametern und der Dosis.

5.7.2 Bestimmung der Sensitivitätsindices

Die Beziehung (4.13) macht deutlich, dass zur Unsicherheit der Dosis sowohl die Unsicherheit in der zeitintegrierten Aktivität als auch die Unsicherheit in den S-Faktoren beiträgt. Hier wurden die Methoden von I. Sobol und A. Saltelli verwendet, um die Beitragsanteile der zeitintegrierten Aktivität und der S-Faktoren zur Unsicherheit der Energiedosis im Zielorgan zu bestimmen.

Gegeben sei ein mathematisches Modell, das durch die Funktion $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ beschrieben wird. Dabei ist sie in einem k -dimensionalen Einheitshyperkubus $\Omega = (X \mid 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, \dots, k)$ bestimmt.

Die Funktion lässt sich auf folgende Art zerlegen:

$$f = f_0 + \sum_i f_i + \sum_i \sum_{j>i} f_{ij} + \dots + f_{12\dots k} \quad (5.18)$$

mit $f_i = f_i(X_i)$, $f_{ij} = f_{ij}(X_i, X_j)$ und so weiter und der Bedingung:

$$\int_0^1 f_{i_1, i_2, \dots, i_s}(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_s}) dx_{i_w} = 0 \quad (5.19)$$

Es gilt dann:

$$f_0 = \int_{\Omega^k} f(x) dx = E(Y) \quad (5.20)$$

$$f_i = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x) dx / dx_i - f_0 = E_{X \sim i}(Y|X_i) - E(Y) \quad (5.21)$$

$$f_{ij} = \int_0^1 \dots \int_0^1 f(x) dx / dx_i dx_j - f_i - f_j - f_0 = E_{X \sim ij}(Y|X_i, X_j) - f_i - f_j - E(Y) \quad (5.22)$$

$X_{\sim i}$ bedeutet dabei „über alle Variablen genommen, außer X_i “ und $E_{X \sim i}(Y|X_i)$ ist der Erwartungswert von Y mit fixierter Variable X_i . Mit dx/dx_i wird dabei das Produkt aller dx_j , ausgenommen dx_i , definiert.

Man kann zeigen, dass die Sensitivität der Variablen über die folgende Beziehung ausgedrückt werden kann:

$$S_{Ti} = \frac{E_{X \sim i}(V_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} = 1 - \frac{V_{X \sim i}(E_{X_i}(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (5.23)$$

S_{Ti} misst den totalen Effekt der Sensitivität der Variablen X_i , d. h. die erste und die höheren Ordnungen (Interaktion mit anderen Variablen). $V(Y)$ stellt dabei die Varianz von Y dar.

In diesem Projekt wurden die Sensitivitätsindices nicht analytisch, sondern numerisch berechnet. Mithilfe der LHS-Methode generierte man zwei unabhängige Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} , beide von der Dimension (N, k) . Dabei ist N die Anzahl der Samples (in unserem Fall 500) und k die Anzahl der Variablen.

Die k Spalten der Matrizen bildeten $1, 2, \dots, n$ Modellparameter und $n, n + 1, \dots, k$ S-Faktoren. Aus diesem k -Tupel der Variablen wird die Energiedosis im Zielorgan berechnet. Die Zeilen der Matrizen stellten die 500 Samples dar.

Man kann zeigen, dass die für den totalen Sensitivitätsindex benötigten Erwartungswert und die Varianz aus der folgenden Beziehung berechnet werden können:

$$E_{X_{\sim i}}(V_{X_i}(Y|X_{\sim i})) = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \left(f(\mathbf{A})_j - f(\mathbf{A}_B^i)_j \right)^2 \quad (5.24)$$

$$V(Y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(\mathbf{A})_j^2 - f_0^2 \quad (5.25)$$

$$f_0^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(\mathbf{A})_j \right)^2 \quad (5.26)$$

Dabei stellt die Matrix \mathbf{A}_B^i Matrix \mathbf{A} dar, bei der die i -te Spalte durch die entsprechende aus der Matrix \mathbf{B} ersetzt wurde. Da hier der Beitrag aller biokinetischen Modellparameter zusammen und aller S-Faktoren zusammen interessierte, wurden die Spalten der Modellparameter als Spalte 1 und die Spalten der S-Faktoren als Spalte 2 betrachtet, d. h. der Index i erfährt hier nur zwei mögliche Werte. Die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung sind in den Tabellen 85-92 dargestellt.

6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Einleitung

Die Unsicherheiten in der Dosisberechnung röhren von den Unsicherheiten in der zeitintegrierten Aktivität, die mit den biokinetischen Modellparametern zusammenhängen, und den Unsicherheiten der mithilfe von Voxel-Phantomen bestimmten S-Faktoren her. In den nächsten Kapiteln werden die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse bei der Berechnung von Dosiskoeffizienten für die sieben ausgewählten Radiopharmazeutika vorgestellt und diskutiert, wobei die Zwischenergebnisse für die

Unsicherheitsberechnungen der zeitintegrierten Aktivität und der S-Faktoren ebenfalls präsentiert werden.

6.2 Unsicherheiten der zeitintegrierten Aktivität

In den folgenden Tabellen 15-21 sind die statistischen Größen der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer τ [h] in den Quellorganen für verschiedene Radiopharmazeutika dargestellt.

Es gelten folgende Abkürzungen: ht wall = heart wall; ub cont = urinary bladder contents; s glands = salivary glands; st wall = stomach wall; uli wall = upper large intestine wall; st cont = stomach contents; si cont = small intestine contents; uli cont = upper large intestine contents; lli cont = lower large intestine contents; gb cont = gall bladder contents; r marrow = red bone marrow; others = other tissues.

Den Tabellen kann man $P_{2,5}$ - und $P_{97,5}$ -Perzentile der Verteilung, den Mittelwert, die Standardabweichung sowie den Variationskoeffizient in Prozent entnehmen. Es sind die Werte, die zur Unsicherheitsanalyse und zur Berechnung von Dosiskoeffizienten nach dem ICRP-Schema verwendet wurden, dargestellt. Die Unsicherheit der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG, bei dem die Unsicherheitsanalyse auch nach dem MIRD-Schema durchgeführt wurde, ist hier nicht gegeben. Tabelle 102 im Anhang B, sind jedoch die statistischen Daten, d. h. auch die Unsicherheiten, der biokinetischen Parameter von ^{18}F -FDG, die bei der Berechnung der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten nach dem MIRD-Schema verwendet wurden, zu entnehmen.

Da die effektive Aufenthaltsdauer mit der zeitintegrierten Aktivität über eine Konstante A_0 miteinander verknüpft ist (4.5) lässt sich aus den angegebenen Werten (Tabelle 15-21) unmittelbar auf die Unsicherheit der zeitintegrierten Aktivität in diesen Organen schließen. Die Unsicherheit der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] entspricht genau der Unsicherheit der zeitintegrierten Aktivität.

Die Unsicherheit der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität wurde aus der Unsicherheit der biokinetischen Parameter, die das biokinetische Modell beschreiben, berechnet. Für die Parameter wurde ein konstanter Variationskoeffizient von 20 % angenommen, da in der Literatur nur wenige Informationen über sie zu finden waren, und es wurde davon ausgegangen, dass die Parameter normalverteilt sind. Im Anhang B sind alle statistischen Daten der biokinetischen Parametern für alle sieben Radiopharmazeutika dargestellt. Die unten angegebenen statistischen Daten der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität (Tabelle 15-21) wurden mithilfe der Daten aus den Tabellen 103-126 ermittelt.

Die Daten aus den Tabellen 103-126 sind Variationen der biokinetischen Parameter aus den Tabellen 7-13, die von der ICRP publiziert wurden. Da, für manche Radiopharmazeutika nicht alle Parameter

von der ICRP angegeben wurden, wurden sie für die Variation geschätzt. So wurde z. B. bei dem Radiopharmazeutikum ^{99m}Tc -Pertechnetat der fehlende Parameter a_{i_1} im Quellorgan „Stomach contents“ auf 1 gesetzt und damit und auch mit den angegebenen Werten für die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität $\frac{\tilde{A}_S}{A_0}$, dem Bruchteil der Verteilung F_S und der physikalischen Halbwertszeit des Radionuklids T_p der Wert für die biologische Halbwertszeit der Ausscheidung T_{i_1} unter der Zuhilfenahme der Gleichung (4.40) berechnet (Tabelle 107).

Wie man aus den untenstehenden Tabellen ersehen kann, liegt der Variationskoeffizient der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität im Bereich von 0,76 % bis 31,76 %. Die niedrigen Prozentwerte röhren daher, dass einige biokinetische Parameter bei den entsprechenden Organen nicht variiert wurden. So hat beispielsweise der Variationskoeffizient der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität in der Harnblase bei dem Radiopharmazeutikum ^{99m}Tc -Phosphonat einen Wert von 4,06 %. Das liegt daran, dass die Parameter F_S und a_{i_1} für die Harnblase einen festen Wert von 1,0 haben (Tabelle 109) und sie bei der Berechnung der Unsicherheit der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität (4.40) nicht variiert wurden. Ähnlich verhält es sich bei den restlichen Radiopharmazeutika.

Die Variationskoeffizienten der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität sind, ausgenommen des Organs „Others“ bei ^{201}Tl -Chlorid, immer kleiner als 20 %, d. h. kleiner als die angenommene Variation der biokinetischen Parameter. Der Grund liegt darin, dass τ eine „robuste“ Größe ist, bei der sich die Variationen einzelner Parameter meistens gegenseitig aufheben.

TABELLE 15 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{18}F -FDG

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Brain	1.01E-01	2.10E-01	3.26E-01	3.75E-02	17.84
Ht wall	6.34E-02	1.32E-01	2.15E-01	2.39E-02	18.00
Lungs	4.02E-02	7.91E-02	1.32E-01	1.42E-02	17.99
Liver	5.82E-02	1.05E-01	1.79E-01	1.90E-02	18.13
Others	8.87E-01	1.70E+00	2.61E+00	3.05E-01	17.90
UB cont	1.87E-01	2.60E-01	3.38E-01	2.54E-02	9.78

TABELLE 16 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{99m}Tc -Pertechnetat

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Thyroid	2.73E-02	3.72E-02	4.94E-02	5.56E-03	14.95
S glands	4.06E-02	5.58E-02	7.27E-02	8.35E-03	14.98
St wall	1.73E-01	2.47E-01	3.34E-01	4.14E-02	16.78
ULI wall	4.71E-01	5.41E-01	6.10E-01	3.52E-02	6.51
Others	3.89E+00	4.31E+00	4.80E+00	2.42E-01	5.60
St cont	1.46E-01	1.54E-01	1.62E-01	4.03E-03	2.61
SI cont	4.15E-01	4.22E-01	4.28E-01	3.21E-03	0.76
ULI cont	7.27E-01	7.44E-01	7.60E-01	8.38E-03	1.13
LLI cont	3.43E-01	3.63E-01	3.83E-01	1.01E-02	2.78
Kidneys	2.55E-02	3.30E-02	4.05E-02	3.84E-03	11.63
UB cont	3.03E-01	3.45E-01	3.86E-01	2.13E-02	6.17

TABELLE 17 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{99m}Tc -Phosphonat

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Bone	2.26E+00	3.00E+00	3.82E+00	3.99E-01	13.30
Kidneys	5.51E-02	8.10E-02	1.13E-01	1.44E-02	17.79
UB cont	1.06E+00	1.15E+00	1.24E+00	4.67E-02	4.06
Others	7.11E-01	9.69E-01	1.22E+00	1.29E-01	13.32

TABELLE 18 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{99m}Tc -Sestamibi

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Ht wall	5.18E-02	6.90E-02	8.84E-02	9.48E-03	13.73
Kidneys	4.81E-01	6.51E-01	8.39E-01	9.15E-02	14.05
Muscles	1.05E+00	1.38E+00	1.73E+00	1.79E-01	12.93
S glands	7.78E-02	1.04E-01	1.30E-01	1.35E-02	13.02
Thyroid	4.57E-03	6.48E-03	8.44E-03	1.03E-03	15.94
Others	2.59E+00	3.10E+00	3.65E+00	2.79E-01	9.01
Liver	3.05E-01	4.22E-01	5.42E-01	6.17E-02	14.62
GB cont	2.35E-01	2.45E-01	2.55E-01	5.08E-03	2.07
SI cont	4.44E-01	4.95E-01	5.44E-01	2.57E-02	5.20
ULI cont	5.92E-01	6.45E-01	6.98E-01	2.73E-02	4.23
LLI cont	2.73E-01	3.15E-01	3.56E-01	2.14E-02	6.80
UB cont	1.61E-01	1.76E-01	1.90E-01	7.58E-03	4.32

TABELLE 19 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{99m}Tc -Tetrofosmin

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Ht wall	4.14E-02	5.52E-02	7.04E-02	7.58E-03	13.73
Liver	6.39E-02	8.88E-02	1.15E-01	1.37E-02	15.45
Kidneys	1.49E-01	2.06E-01	2.63E-01	3.09E-02	14.99
S glands	7.67E-02	1.04E-01	1.30E-01	1.34E-02	12.93
Thyroid	4.50E-03	6.48E-03	8.49E-03	1.03E-03	15.92
Others	4.40E+00	4.76E+00	5.11E+00	1.85E-01	3.89
GB cont	2.34E-01	2.41E-01	2.47E-01	3.35E-03	1.39
SI cont	4.74E-01	5.12E-01	5.49E-01	1.93E-02	3.77
ULI cont	6.26E-01	6.65E-01	7.02E-01	1.96E-02	2.95
LLI cont	2.93E-01	3.27E-01	3.60E-01	1.74E-02	5.34
UB cont	3.00E-01	3.28E-01	3.56E-01	1.46E-02	4.44

TABELLE 20 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{99m}Tc -MAA

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Lungs	3.85E+00	4.87E+00	5.50E+00	2.48E-01	5.10
Liver	1.56E-01	2.20E-01	2.85E-01	2.11E-02	14.19
Kidneys	1.11E-02	1.80E-02	2.47E-02	2.23E-03	12.38
UB-cont	5.85E-01	1.04E+00	1.45E+00	1.47E-01	9.60
Others	1.42E+00	1.66E+00	1.90E+00	7.56E-02	4.55

TABELLE 21 Statistische Daten von der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität τ [h] in verschiedenen Quellorganen für ^{201}Tl -Chlorid

Source	2.5th Percentile	Mean	97.5th Percentile	STD	cv %
Bone	3.67E+00	4.87E+00	6.10E+00	6.31E-01	12.94
Thyroid	1.22E-01	1.62E-01	2.03E-01	2.09E-02	12.89
Ht wall	1.34E+00	1.87E+00	2.42E+00	2.94E-01	15.71
Lungs	2.48E+00	3.25E+00	4.07E+00	4.22E-01	13.00
Kidneys	3.65E+00	4.87E+00	6.16E+00	6.32E-01	12.97
Liver	5.52E+00	7.30E+00	9.26E+00	9.45E-01	12.95
Spleen	4.32E-01	5.69E-01	7.11E-01	7.34E-02	12.92
R marrow	3.63E+00	4.87E+00	6.12E+00	6.33E-01	12.99
St wall	3.67E-01	4.87E-01	6.05E-01	6.29E-02	12.91
SI wall	1.82E+00	2.44E+00	3.05E+00	3.17E-01	13.02
Muscles	2.51E+01	3.33E+01	4.19E+01	4.33E+00	13.00
Testes	1.83E-01	2.44E-01	3.06E-01	3.16E-02	12.97
Others	6.68E+00	1.56E+01	2.54E+01	4.96E+00	31.76
SI cont	6.94E-01	7.70E-01	8.46E-01	3.87E-02	5.02
ULI cont	2.09E+00	2.20E+00	2.30E+00	5.14E-02	2.34
LLI cont	3.20E+00	3.30E+00	3.40E+00	5.35E-02	1.62
UB cont	7.96E-02	8.71E-02	9.47E-02	3.89E-03	4.46

6.3 Unsicherheiten der S-Faktoren

Die statistischen Daten der berechneten S-Faktoren sind in den Tabellen 22-38 dargestellt. Den Tabellen kann man die Art der Verteilung, die $P_{2,5}$ - und $P_{97,5}$ -Perzentile, das arithmetische oder das geometrische Mittel und den Variationskoeffizienten oder die geometrische Standardabweichung, je nachdem, ob es sich um eine Normalverteilung oder eine logarithmische Normalverteilung handelt, entnehmen. Wie aus den Tabellen ersichtlich ist, variiert für das Radionuklid ^{18}F im Falle der Normalverteilung der Variationskoeffizient von 4,5 % bis 32,21 % und bei der logarithmischen Normalverteilung die geometrische Standardabweichung von 1,30 bis 3,23. Für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ liegt der Variationskoeffizient im Bereich von 0,42 % bis 32,08 % und die geometrische Standardabweichung im Bereich von 1,27 bis 4,11. Für das Radionuklid ^{201}TI bewegt sich der Variationskoeffizient zwischen 0,21 % und 38,45 % und die geometrische Standardabweichung zwischen 1,27 und 15,28. Die Maximalwerte sind in den Tabellen zur besseren Unterscheidung rot und die Minimalwerte grün hinterlegt.

Beim Radiopharmazeutikum ^{201}TI -Chlorid hat der S-Faktor für das Organpaar Hoden-zu-Extrathoracic eine sehr große Unsicherheit mit einem Wert für die geometrische Standardabweichung von $\text{GSD} = 15,3$. Der Grund liegt daran, dass der Unterschied im Wert für verschiedene Phantome hier mehr als drei Größenordnungen betrug. Für das männliche Referenzphantom hatte der S-Faktor einen Wert von $4,4\text{E-}24 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$, für das Visual-Human-Phantom betrug der Wert aber $1,03\text{E-}21 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$. Für das Organpaar Hoden-zu-Gehirn betrug der S-Faktor beim männlichen Referenzphantom $4,09\text{E-}22 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$ und beim Visual-Human-Phantom $4,57\text{E-}20 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$, für das Organpaar Schilddrüse-zu-Thymus waren die S-Faktoren beim männlichen Referenzphantom $2,26\text{E-}15 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$, beim weiblichen Referenzphantom $2,06\text{E-}15 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$, beim Visual-Human-Phantom $3,77\text{E-}15 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$ und beim Phantom „Frank“ $6,00\text{E-}17 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$. Aus diesem Unterschied resultieren entsprechend die Unsicherheiten mit einem geometrischen Mittelwert von $\text{GSD} = 10,57$ (Tabelle 36) und $\text{GSD} = 5,19$ (Tabelle 33). Der doppelt so hohe Wert des S-Faktors beim Organpaar Milz-zu-Herz beim weiblichen Referenzphantom ($3,65\text{E-}16 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$) verglichen mit dem S-Faktor aus dem Visual-Human-Phantom ($1,40\text{E-}16 [\text{Sv Bqs}^{-1}]$) ergibt erneut eine hohe Unsicherheit mit einem Variationskoeffizient von $\text{cv} = 38,45 \%$ (Tabelle 35).

Die hohen Unsicherheiten bei den restlichen Radiopharmazeutika lassen sich auf die gleiche Art aus den großen Unterschieden der S-Faktoren bei verschiedenen Phantomen erklären.

Im Allgemeinen kann man feststellen, dass die Unsicherheiten bei der Berechnung von S-Faktoren größer als die Unsicherheiten bei der Berechnung von zeitintegrierten Aktivitäten in den Quellorganen der biokinetischen Modellen bei allen Radiopharmazeutika sind. Verglichen mit dem maximalen Wert des Variationskoeffizienten von 31,76 % für die zeitintegrierte Aktivität beträgt der Maximalwert des Variationskoeffizienten für die normalverteilten S-Faktoren 38,45 % und der maximale Wert für die geometrische Standardabweichung für logarithmisch verteilte S-Faktoren 15,28, was einer sehr großen Unsicherheit entspricht.

Große Unterschiede von S-Faktoren bei verschiedenen Phantomen können unterschiedliche Gründe haben. Zum einen sind es die unterschiedlichen Organmassen, Organgrößen und Organabstände. Kleinere Organe können schlecht segmentiert werden und tragen deswegen zur größeren Unsicherheiten bei der Berechnung der SAF-Faktoren bei. Zum anderen wurden für viele Phantome spezifische Bruchteile der Energien (SAF) für Elektronen nicht berechnet, sondern wie in Kapitel 5.6.2 beschrieben approximiert. Bei niedrigen Elektronenenergien, die man bei den Radionukliden ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ und ^{201}Tl auch hat, stimmt diese Approximation mit den tatsächlich berechneten SAF-Faktoren für Elektronen gut überein [89], so dass man wegen dieser Approximation keine großen Unsicherheiten in den SAF-Faktoren erwartet. Nichtsdestotrotz ist es eine der möglichen Unsicherheitsquellen bei der Berechnung der SAF-Faktoren und soll aus diesem Grund hier auch erwähnt werden.

TABELLE 22. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{18}F [Sv/Bq s] (Teil 1)

Target	Blood					Brain					Ht wall				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	lognorm.	6.9E-17	5.1E-16	2.0E-15	2.35	normal	2.6E-14	4.4E-14	6.3E-14	20.85	normal	3.8E-17	9.4E-17	1.5E-16	30.39
<i>Breast</i>	lognorm.	6.6E-16	1.6E-15	3.3E-15	1.51	lognorm.	2.9E-17	9.6E-17	2.4E-16	1.73	lognorm.	1.8E-15	3.2E-15	5.2E-15	1.31
<i>Colon</i>	lognorm.	4.7E-16	2.5E-15	8.1E-15	2.07	lognorm.	4.9E-18	9.9E-18	1.8E-17	1.39	lognorm.	9.6E-17	3.6E-16	9.6E-16	1.80
<i>Endosteum</i>	lognorm.	2.3E-16	9.7E-16	3.1E-15	1.95	normal	7.4E-16	1.4E-15	2.0E-15	23.38	normal	3.2E-16	5.9E-16	8.5E-16	23.39
<i>Liver</i>	lognorm.	9.5E-16	3.8E-15	1.1E-14	1.86	normal	2.4E-17	3.9E-17	5.4E-17	19.89	normal	2.2E-15	2.7E-15	3.2E-15	9.26
<i>Lungs</i>	lognorm.	2.0E-15	5.0E-15	1.1E-14	1.54	normal	5.7E-17	1.2E-16	1.9E-16	26.97	normal	3.9E-15	6.1E-15	8.4E-15	18.52
<i>Oesophagus</i>	normal	3.4E-15	6.6E-15	9.8E-15	24.76	lognorm.	1.0E-16	2.1E-16	3.8E-16	1.40	normal	9.4E-15	1.1E-14	1.2E-14	6.10
<i>R marrow</i>	normal	7.9E-16	1.9E-15	2.9E-15	29.36	lognorm.	4.6E-16	9.5E-16	1.7E-15	1.40	normal	9.0E-16	1.6E-15	2.3E-15	21.84
<i>S glands</i>	lognorm.	4.5E-16	1.5E-15	3.8E-15	1.72	normal	1.1E-15	2.4E-15	3.7E-15	27.71	normal	1.5E-16	3.5E-16	5.4E-16	28.79
<i>Skin</i>	lognorm.	2.9E-16	6.8E-16	1.4E-15	1.50	lognorm.	2.0E-16	3.9E-16	6.8E-16	1.37	normal	2.1E-16	3.4E-16	4.8E-16	20.08
<i>St wall</i>	lognorm.	1.1E-15	3.4E-15	8.0E-15	1.65	normal	1.3E-17	3.0E-17	4.7E-17	29.27	normal	2.2E-15	4.2E-15	6.2E-15	24.56
<i>Testes</i>	lognorm.	3.7E-16	6.9E-16	1.2E-15	1.35	lognorm.	1.1E-20	1.9E-19	1.1E-18	3.23	normal	2.7E-18	4.5E-18	6.3E-18	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	1.3E-15	3.5E-15	5.7E-15	32.14	normal	2.7E-16	4.9E-16	7.1E-16	23.01	normal	1.5E-15	1.7E-15	1.9E-15	5.02
<i>UB wall</i>	lognorm.	6.7E-16	1.2E-15	2.0E-15	1.31	normal	5.5E-19	1.2E-18	1.9E-18	28.44	normal	3.2E-17	3.9E-17	4.6E-17	9.28
<i>Adrenals</i>	lognorm.	1.9E-15	4.4E-15	8.7E-15	1.47	normal	1.4E-17	2.6E-17	3.8E-17	23.46	normal	1.4E-15	1.9E-15	2.3E-15	12.27
<i>ET</i>	lognorm.	3.1E-16	1.4E-15	4.4E-15	1.96	normal	3.0E-15	4.4E-15	5.8E-15	16.15	normal	1.3E-16	3.5E-16	5.7E-16	32.07
<i>GB wall</i>	lognorm.	5.7E-16	3.1E-15	1.1E-14	2.12	normal	1.3E-17	2.4E-17	3.6E-17	24.29	normal	1.3E-15	1.6E-15	2.0E-15	10.77
<i>Ht wall</i>	lognorm.	2.6E-15	4.8E-15	8.0E-15	1.33	lognorm.	3.8E-17	7.7E-17	1.4E-16	1.40	normal	1.0E-13	1.6E-13	2.2E-13	18.42
<i>Kidneys</i>	lognorm.	7.5E-16	3.4E-15	1.0E-14	1.94	normal	6.7E-18	1.8E-17	2.9E-17	31.56	normal	9.1E-16	9.8E-16	1.1E-15	3.71
<i>Lymph</i>	normal	1.4E-15	1.8E-15	2.3E-15	11.95	lognorm.	1.1E-16	2.1E-16	3.5E-16	1.33	normal	2.4E-15	2.8E-15	3.3E-15	8.36
<i>Muscle</i>	normal	6.9E-16	9.0E-16	1.1E-15	11.57	lognorm.	1.1E-16	2.4E-16	4.5E-16	1.42	normal	3.1E-16	4.7E-16	6.4E-16	17.49
<i>O mucosa</i>	lognorm.	2.8E-16	6.5E-16	1.3E-15	1.49	lognorm.	8.8E-16	3.7E-15	1.0E-14	1.86	lognorm.	2.1E-16	3.8E-16	6.4E-16	1.33
<i>Pancreas</i>	normal	1.8E-15	4.1E-15	6.3E-15	28.13	normal	1.0E-17	2.1E-17	3.1E-17	25.16	normal	7.3E-16	1.4E-15	2.2E-15	25.34
<i>Prostate</i>	lognorm.	3.4E-16	1.2E-15	3.0E-15	1.75	lognorm.	2.1E-19	5.4E-19	1.2E-18	1.56	normal	9.5E-18	1.6E-17	2.2E-17	20.00
<i>SI wall</i>	lognorm.	8.7E-16	2.8E-15	7.1E-15	1.71	lognorm.	4.8E-18	8.8E-18	1.5E-17	1.34	normal	3.1E-16	4.5E-16	5.9E-16	16.10
<i>Spleen</i>	lognorm.	5.0E-16	4.1E-15	1.7E-14	2.45	normal	1.9E-17	3.9E-17	5.9E-17	25.82	normal	2.4E-15	2.9E-15	3.3E-15	7.98
<i>Thymus</i>	normal	1.7E-15	4.0E-15	6.4E-15	30.02	lognorm.	4.6E-17	1.9E-16	5.9E-16	1.91	normal	3.6E-15	6.6E-15	9.6E-15	22.96

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 23. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{18}F [Sv/Bq s] (Teil 2)

Target	Lungs					Liver					UB cont				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	normal	5.7E-17	1.2E-16	1.8E-16	26.78	normal	2.2E-17	3.6E-17	5.0E-17	19.56	lognorm.	3.5E-19	1.4E-18	3.8E-18	1.84
<i>Breast</i>	normal	9.1E-16	2.1E-15	3.4E-15	29.25	lognorm.	5.9E-16	1.2E-15	2.1E-15	1.38	normal	1.4E-17	2.6E-17	3.8E-17	23.64
<i>Colon</i>	normal	1.4E-16	3.8E-16	6.2E-16	32.21	lognorm.	7.4E-16	1.6E-15	3.1E-15	1.45	lognorm.	1.3E-15	3.0E-15	5.7E-15	1.45
<i>Endosteum</i>	lognorm.	4.6E-16	8.9E-16	1.6E-15	1.37	normal	2.1E-16	5.5E-16	8.9E-16	31.13	lognorm.	4.0E-16	9.7E-16	2.0E-15	1.51
<i>Liver</i>	normal	1.7E-15	2.2E-15	2.7E-15	12.06	normal	2.2E-14	3.6E-14	4.9E-14	19.10	lognorm.	4.8E-17	1.8E-16	4.5E-16	1.77
<i>Lungs</i>	normal	1.9E-14	4.2E-14	6.5E-14	27.71	normal	1.7E-15	2.2E-15	2.7E-15	12.17	lognorm.	1.4E-17	5.3E-17	1.4E-16	1.79
<i>Oesophagus</i>	normal	3.2E-15	4.6E-15	6.0E-15	15.57	normal	1.8E-15	2.3E-15	2.7E-15	9.65	lognorm.	1.1E-17	6.3E-17	1.9E-16	2.07
<i>R marrow</i>	normal	8.9E-16	1.6E-15	2.3E-15	22.18	normal	4.2E-16	1.0E-15	1.7E-15	30.29	lognorm.	9.7E-16	1.7E-15	2.8E-15	1.30
<i>S glands</i>	normal	1.7E-16	3.9E-16	6.2E-16	28.94	normal	6.7E-17	1.1E-16	1.5E-16	20.02	normal	1.4E-18	3.0E-18	4.6E-18	26.75
<i>Skin</i>	normal	2.2E-16	4.3E-16	6.3E-16	24.59	normal	1.6E-16	4.0E-16	6.4E-16	31.21	lognorm.	1.7E-16	4.0E-16	7.8E-16	1.47
<i>St wall</i>	normal	1.1E-15	1.8E-15	2.4E-15	18.33	normal	2.3E-15	3.5E-15	4.6E-15	17.61	lognorm.	5.8E-17	1.9E-16	4.5E-16	1.69
<i>Testes</i>	lognorm.	2.4E-18	5.5E-18	1.1E-17	1.46	normal	1.1E-17	1.8E-17	2.4E-17	20.00	lognorm.	8.0E-16	1.5E-15	2.7E-15	1.36
<i>Thyroid</i>	normal	1.2E-15	2.2E-15	3.1E-15	22.23	normal	2.8E-16	3.6E-16	4.5E-16	11.94	lognorm.	3.8E-18	1.3E-17	3.2E-17	1.72
<i>UB wall</i>	lognorm.	2.0E-17	4.0E-17	7.3E-17	1.40	normal	5.3E-17	1.3E-16	2.0E-16	29.81	lognorm.	1.6E-14	6.1E-14	1.6E-13	1.79
<i>Adrenals</i>	normal	1.1E-15	1.4E-15	1.8E-15	13.03	normal	2.8E-15	5.9E-15	9.0E-15	26.80	lognorm.	5.1E-17	3.5E-16	1.1E-15	2.17
<i>ET</i>	lognorm.	1.4E-16	3.3E-16	6.8E-16	1.50	normal	4.6E-17	9.3E-17	1.4E-16	25.64	lognorm.	9.4E-19	3.0E-18	7.3E-18	1.68
<i>GB wall</i>	normal	6.5E-16	1.0E-15	1.4E-15	17.82	normal	7.8E-15	1.2E-14	1.5E-14	16.54	lognorm.	5.9E-17	3.3E-16	9.5E-16	2.03
<i>Ht wall</i>	normal	2.5E-15	4.9E-15	7.3E-15	25.22	normal	2.2E-15	2.5E-15	2.9E-15	7.11	lognorm.	2.0E-17	6.5E-17	1.6E-16	1.69
<i>Kidneys</i>	normal	5.0E-16	7.5E-16	1.0E-15	16.98	normal	1.6E-15	3.0E-15	4.5E-15	24.34	lognorm.	7.0E-17	8.5E-16	2.9E-15	2.58
<i>Lymph</i>	normal	6.9E-16	1.5E-15	2.3E-15	27.73	normal	8.7E-16	1.3E-15	1.8E-15	17.34	normal	1.3E-15	2.8E-15	4.3E-15	26.77
<i>Muscle</i>	normal	5.2E-16	7.1E-16	9.0E-16	13.70	normal	3.8E-16	5.4E-16	7.0E-16	15.35	normal	5.9E-16	9.5E-16	1.3E-15	19.33
<i>O mucosa</i>	normal	1.6E-16	4.0E-16	6.4E-16	30.92	lognorm.	5.0E-17	1.2E-16	2.5E-16	1.50	lognorm.	1.4E-18	8.9E-18	2.9E-17	2.16
<i>Pancreas</i>	normal	6.3E-16	1.1E-15	1.5E-15	21.17	normal	1.7E-15	4.5E-15	7.3E-15	31.43	lognorm.	9.9E-17	3.4E-16	8.4E-16	1.73
<i>Prostate</i>	lognorm.	9.4E-18	2.3E-17	4.8E-17	1.52	lognorm.	3.7E-17	6.9E-17	1.2E-16	1.34	normal	1.0E-14	1.6E-14	2.2E-14	17.95
<i>SI wall</i>	normal	2.1E-16	3.5E-16	4.9E-16	20.10	normal	8.6E-16	1.2E-15	1.5E-15	14.70	lognorm.	7.6E-16	2.6E-15	6.6E-15	1.74
<i>Spleen</i>	normal	1.6E-15	2.5E-15	3.4E-15	18.03	lognorm.	5.2E-16	1.0E-15	1.9E-15	1.38	lognorm.	2.5E-17	2.5E-16	8.2E-16	2.43
<i>Thymus</i>	normal	1.8E-15	4.1E-15	6.4E-15	29.16	normal	4.1E-16	8.0E-16	1.2E-15	24.92	lognorm.	5.9E-18	1.9E-17	4.7E-17	1.70

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^*

²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt

$P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 24. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{18}F [Sv/Bq s] (Teil 3)

Target	Distrib.	Others			
		$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{\ast 1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{\ast 2)}$
<i>Brain</i>	normal	2.6E-16	2.9E-16	3.1E-16	4.50
<i>Breast</i>	normal	8.4E-16	1.3E-15	1.7E-15	16.72
<i>Colon</i>	normal	1.2E-15	1.6E-15	2.0E-15	12.40
<i>Endosteum</i>	normal	1.1E-15	1.4E-15	1.7E-15	12.41
<i>Liver</i>	normal	5.5E-16	6.2E-16	6.9E-16	6.03
<i>Lungs</i>	normal	7.6E-16	8.9E-16	1.0E-15	7.35
<i>Oesophagus</i>	normal	1.2E-15	1.6E-15	1.9E-15	10.80
<i>R marrow</i>	normal	1.2E-15	1.6E-15	1.9E-15	11.01
<i>S glands</i>	normal	9.3E-16	1.3E-15	1.6E-15	13.65
<i>Skin</i>	normal	8.7E-16	1.1E-15	1.4E-15	12.13
<i>St wall</i>	normal	1.2E-15	1.4E-15	1.7E-15	9.39
<i>Testes</i>	normal	7.1E-16	1.2E-15	1.6E-15	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	1.1E-15	1.5E-15	1.9E-15	13.39
<i>UB wall</i>	normal	1.4E-15	1.6E-15	1.8E-15	5.26
<i>Adrenals</i>	normal	1.4E-15	1.6E-15	1.7E-15	5.21
<i>ET</i>	normal	9.6E-16	1.3E-15	1.7E-15	13.63
<i>GB wall</i>	normal	9.6E-16	1.2E-15	1.5E-15	11.66
<i>Ht wall</i>	normal	6.5E-16	7.2E-16	7.9E-16	4.97
<i>Kidneys</i>	normal	1.3E-15	1.6E-15	2.0E-15	9.94
<i>Lymph</i>	normal	1.2E-15	1.6E-15	1.9E-15	11.99
<i>Muscle</i>	normal	1.1E-15	1.5E-15	1.9E-15	13.69
<i>O mucosa</i>	normal	1.1E-15	1.4E-15	1.6E-15	10.83
<i>Pancreas</i>	normal	1.3E-15	1.6E-15	1.9E-15	10.04
<i>Prostate</i>	normal	7.8E-16	1.3E-15	1.8E-15	20.00
<i>SI wall</i>	normal	1.3E-15	1.7E-15	2.0E-15	9.62
<i>Spleen</i>	normal	1.3E-15	1.6E-15	1.8E-15	8.09
<i>Thymus</i>	normal	1.1E-15	1.5E-15	1.9E-15	13.02

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 25. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 1)

Target	Ht wall					Lungs					Bone				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2)}$
<i>Brain</i>	lognorm.	2.1E-18	5.7E-18	1.3E-17	1.59	normal	3.6E-18	9.4E-18	1.5E-17	31.82	lognorm.	8.8E-18	1.1E-16	5.8E-16	2.92
<i>Breast</i>	lognorm.	1.3E-16	3.2E-16	6.6E-16	1.51	lognorm.	5.3E-17	2.1E-16	6.3E-16	1.88	lognorm.	1.1E-18	1.4E-17	6.1E-17	2.78
<i>Colon</i>	lognorm.	1.9E-17	7.6E-17	2.3E-16	1.90	lognorm.	1.3E-17	6.3E-17	1.9E-16	1.99	lognorm.	5.7E-18	5.6E-17	2.7E-16	2.68
<i>Endosteum</i>	normal	5.4E-17	9.4E-17	1.3E-16	21.74	lognorm.	9.4E-20	1.3E-16	1.5E-14	21.10	normal	2.2E-17	3.3E-17	4.4E-17	16.96
<i>Liver</i>	normal	3.2E-16	3.6E-16	4.1E-16	6.42	normal	2.4E-16	3.1E-16	3.7E-16	10.76	lognorm.	5.2E-18	6.3E-17	3.4E-16	2.90
<i>Lungs</i>	normal	4.0E-16	6.8E-16	9.7E-16	21.50	normal	7.9E-16	1.1E-15	1.5E-15	15.08	lognorm.	7.6E-18	1.0E-16	5.9E-16	3.03
<i>Oesophagus</i>	normal	5.8E-16	1.1E-15	1.5E-15	23.08	normal	4.7E-16	6.3E-16	8.0E-16	13.25	lognorm.	1.1E-17	1.2E-16	5.9E-16	2.76
<i>R marrow</i>	lognorm.	7.8E-17	1.5E-16	2.6E-16	1.36	normal	1.2E-16	2.0E-16	2.8E-16	20.29	lognorm.	1.6E-17	2.0E-16	1.1E-15	2.93
<i>S glands</i>	lognorm.	2.2E-17	3.6E-17	5.6E-17	1.27	lognorm.	2.2E-17	4.1E-17	7.2E-17	1.36	normal	6.1E-18	1.5E-17	2.3E-17	29.60
<i>Skin</i>	lognorm.	2.4E-17	4.5E-17	7.7E-17	1.35	normal	2.4E-17	4.9E-17	7.4E-17	26.29	lognorm.	3.3E-18	3.9E-17	2.0E-16	2.86
<i>St wall</i>	normal	4.1E-16	6.5E-16	8.9E-16	18.75	normal	1.6E-16	2.5E-16	3.5E-16	18.49	lognorm.	4.1E-18	5.4E-17	3.0E-16	2.98
<i>Testes</i>	normal	1.3E-19	2.1E-19	3.0E-19	20.00	normal	1.1E-19	1.9E-19	2.6E-19	20.00	normal	2.4E-18	4.0E-18	5.6E-18	20.00
<i>Thyroid</i>	lognorm.	7.7E-17	1.8E-16	3.6E-16	1.49	normal	1.6E-16	3.0E-16	4.3E-16	22.68	lognorm.	8.1E-18	9.5E-17	4.9E-16	2.85
<i>UB wall</i>	lognorm.	1.0E-18	3.5E-18	8.6E-18	1.71	lognorm.	9.1E-19	2.6E-18	5.7E-18	1.60	lognorm.	8.7E-18	1.1E-16	6.4E-16	2.99
<i>Adrenals</i>	normal	1.9E-16	2.6E-16	3.2E-16	12.37	normal	1.6E-16	2.1E-16	2.5E-16	10.31	lognorm.	9.0E-18	9.3E-17	4.6E-16	2.73
<i>ET</i>	lognorm.	2.3E-17	3.8E-17	5.8E-17	1.27	lognorm.	1.2E-17	3.5E-17	7.9E-17	1.61	normal	7.2E-18	1.8E-17	2.8E-17	30.15
<i>GB wall</i>	normal	9.2E-17	1.8E-16	2.8E-16	25.38	normal	8.9E-17	1.4E-16	1.9E-16	18.41	lognorm.	5.9E-18	4.8E-17	2.0E-16	2.46
<i>Ht wall</i>	normal	2.4E-15	3.3E-15	4.2E-15	14.40	normal	3.8E-16	6.6E-16	9.5E-16	22.11	lognorm.	6.3E-18	7.2E-17	3.7E-16	2.83
<i>Kidneys</i>	normal	8.0E-17	1.2E-16	1.6E-16	17.55	normal	7.1E-17	1.0E-16	1.3E-16	15.64	lognorm.	6.3E-18	7.4E-17	3.9E-16	2.87
<i>Lymph</i>	normal	2.7E-16	3.4E-16	4.0E-16	10.07	normal	9.5E-17	1.9E-16	2.9E-16	25.93	normal	1.0E-17	1.3E-17	1.7E-17	12.11
<i>Muscle</i>	normal	5.2E-17	6.9E-17	8.6E-17	12.84	normal	6.6E-17	9.2E-17	1.2E-16	14.24	lognorm.	6.2E-18	8.0E-17	4.3E-16	2.95
<i>O mucosa</i>	lognorm.	1.9E-17	4.2E-17	7.9E-17	1.44	lognorm.	2.5E-17	4.4E-17	7.3E-17	1.32	normal	1.0E-17	1.8E-17	2.5E-17	21.51
<i>Pancreas</i>	normal	1.2E-16	2.9E-16	4.5E-16	28.82	normal	8.7E-17	1.6E-16	2.3E-16	22.86	lognorm.	5.9E-18	6.7E-17	3.5E-16	2.83
<i>Prostate</i>	normal	7.5E-19	1.2E-18	1.7E-18	20.00	lognorm.	3.1E-19	1.2E-18	3.0E-18	1.79	normal	9.0E-18	1.5E-17	2.1E-17	20.00
<i>SI wall</i>	normal	4.3E-17	7.7E-17	1.1E-16	22.38	normal	2.6E-17	4.5E-17	6.5E-17	21.91	lognorm.	7.1E-18	6.3E-17	2.9E-16	2.58
<i>Spleen</i>	normal	1.4E-16	3.4E-16	5.4E-16	30.56	normal	2.3E-16	3.4E-16	4.6E-16	17.15	lognorm.	5.8E-18	7.2E-17	3.9E-16	2.92
<i>Thymus</i>	lognorm.	2.7E-16	8.7E-16	2.1E-15	1.69	normal	2.5E-16	5.4E-16	8.4E-16	27.82	lognorm.	7.8E-18	8.3E-17	4.0E-16	2.74

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 26. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 2)

Target	Liver					Thyroid					S glands				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$
<i>Brain</i>	normal	1.6E-18	2.4E-18	3.2E-18	16.11	lognorm.	2.6E-17	4.8E-17	8.3E-17	1.34	normal	1.2E-16	3.0E-16	4.7E-16	29.75
<i>Breast</i>	lognorm.	7.9E-17	1.5E-16	2.7E-16	1.37	lognorm.	1.9E-17	6.4E-17	1.6E-16	1.72	lognorm.	9.2E-18	3.1E-17	7.5E-17	1.71
<i>Colon</i>	lognorm.	8.6E-17	2.2E-16	4.7E-16	1.54	lognorm.	2.2E-18	7.6E-18	2.1E-17	1.78	lognorm.	6.4E-19	1.8E-18	4.2E-18	1.61
<i>Endosteum</i>	lognorm.	4.7E-17	1.1E-16	2.3E-16	1.49	normal	7.8E-17	1.2E-16	1.5E-16	16.91	normal	5.9E-17	1.3E-16	2.0E-16	27.58
<i>Liver</i>	normal	1.5E-15	1.9E-15	2.3E-15	10.42	normal	3.2E-17	4.6E-17	5.9E-17	14.90	normal	5.9E-18	1.1E-17	1.5E-17	22.55
<i>Lungs</i>	normal	2.2E-16	2.9E-16	3.6E-16	12.62	normal	1.6E-16	3.0E-16	4.4E-16	24.20	lognorm.	2.3E-17	4.4E-17	7.6E-17	1.35
<i>Oesophagus</i>	normal	2.4E-16	3.2E-16	4.0E-16	12.49	lognorm.	8.6E-16	1.8E-15	3.5E-15	1.43	lognorm.	3.9E-17	1.3E-16	3.3E-16	1.71
<i>R marrow</i>	lognorm.	6.8E-17	1.3E-16	2.4E-16	1.37	normal	1.0E-16	1.7E-16	2.4E-16	20.74	normal	4.5E-17	1.1E-16	1.7E-16	30.18
<i>S glands</i>	normal	8.4E-18	1.1E-17	1.3E-17	10.90	lognorm.	2.1E-16	4.1E-16	7.4E-16	1.38	lognorm.	6.1E-15	1.1E-14	1.9E-14	1.34
<i>Skin</i>	lognorm.	2.6E-17	4.8E-17	7.9E-17	1.33	lognorm.	3.0E-17	5.5E-17	9.2E-17	1.33	lognorm.	3.7E-17	7.9E-17	1.5E-16	1.43
<i>St wall</i>	normal	3.3E-16	4.8E-16	6.4E-16	16.33	normal	1.5E-17	3.7E-17	5.9E-17	30.09	lognorm.	4.2E-18	8.3E-18	1.5E-17	1.38
<i>Testes</i>	normal	4.4E-19	7.2E-19	1.0E-18	20.00	normal	4.0E-21	6.6E-21	9.2E-21	20.00	normal	8.7E-21	1.4E-20	2.0E-20	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	3.3E-17	4.4E-17	5.5E-17	12.48	normal	2.4E-14	2.8E-14	3.2E-14	7.00	lognorm.	1.8E-16	3.5E-16	6.3E-16	1.38
<i>UB wall</i>	lognorm.	4.6E-18	1.2E-17	2.6E-17	1.55	lognorm.	1.6E-19	3.9E-19	8.1E-19	1.51	lognorm.	3.3E-20	1.0E-19	2.4E-19	1.66
<i>Adrenals</i>	normal	3.9E-16	8.2E-16	1.3E-15	27.08	normal	1.8E-17	2.9E-17	4.0E-17	19.54	normal	3.4E-18	5.9E-18	8.4E-18	21.58
<i>ET</i>	normal	4.6E-18	8.9E-18	1.3E-17	24.60	lognorm.	3.7E-16	6.1E-16	9.5E-16	1.28	lognorm.	3.4E-16	1.0E-15	2.3E-15	1.62
<i>GB wall</i>	normal	1.0E-15	1.5E-15	1.9E-15	16.38	normal	1.4E-17	2.4E-17	3.3E-17	20.17	normal	3.5E-18	6.1E-18	8.7E-18	21.51
<i>Ht wall</i>	normal	2.9E-16	3.6E-16	4.3E-16	9.96	normal	7.3E-17	1.8E-16	2.9E-16	30.56	lognorm.	1.2E-17	2.9E-17	6.2E-17	1.53
<i>Kidneys</i>	normal	2.2E-16	4.4E-16	6.7E-16	25.91	normal	7.4E-18	1.6E-17	2.5E-17	27.58	normal	1.7E-18	3.3E-18	5.0E-18	25.18
<i>Lymph</i>	normal	1.9E-16	2.0E-16	2.1E-16	2.96	normal	3.0E-16	3.8E-16	4.5E-16	10.26	normal	9.2E-17	1.2E-16	1.6E-16	13.24
<i>Muscle</i>	normal	4.7E-17	6.9E-17	9.1E-17	15.96	normal	4.5E-17	1.1E-16	1.8E-16	31.06	normal	3.1E-17	8.0E-17	1.3E-16	31.45
<i>O mucosa</i>	lognorm.	4.4E-18	1.0E-17	2.0E-17	1.48	lognorm.	1.5E-16	3.9E-16	8.5E-16	1.57	lognorm.	3.1E-16	1.2E-15	3.3E-15	1.83
<i>Pancreas</i>	normal	2.6E-16	6.9E-16	1.1E-15	31.74	normal	9.5E-18	2.3E-17	3.7E-17	29.97	normal	2.9E-18	5.1E-18	7.4E-18	22.62
<i>Prostate</i>	lognorm.	1.7E-18	5.9E-18	1.5E-17	1.74	normal	1.6E-19	2.6E-19	3.6E-19	20.00	normal	1.7E-20	2.8E-20	3.8E-20	20.00
<i>SI wall</i>	normal	1.2E-16	1.7E-16	2.2E-16	15.80	lognorm.	3.7E-18	7.1E-18	1.2E-17	1.35	normal	7.1E-19	1.6E-18	2.5E-18	28.29
<i>Spleen</i>	lognorm.	6.9E-17	1.5E-16	2.9E-16	1.44	normal	2.8E-17	4.6E-17	6.3E-17	19.53	normal	4.2E-18	9.0E-18	1.4E-17	27.26
<i>Thymus</i>	normal	5.3E-17	1.0E-16	1.5E-16	24.69	lognorm.	8.9E-17	2.3E-15	2.2E-14	4.08	lognorm.	1.6E-17	1.0E-16	3.8E-16	2.27

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 27. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 3)

Target	St wall					St cont					ULI wall				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
Brain	lognorm.	6.8E-19	1.7E-18	3.7E-18	1.54	lognorm.	6.7E-19	1.8E-18	3.9E-18	1.57	lognorm.	1.5E-19	3.6E-19	7.2E-19	1.49
Breast	lognorm.	4.6E-17	1.3E-16	3.0E-16	1.61	lognorm.	4.6E-17	1.4E-16	3.4E-16	1.67	lognorm.	6.4E-18	2.5E-17	6.9E-17	1.83
Colon	lognorm.	1.3E-16	3.8E-16	8.9E-16	1.63	lognorm.	9.9E-17	3.6E-16	1.0E-15	1.81	normal	7.9E-16	1.8E-15	2.9E-15	29.02
Endosteum	normal	4.0E-17	6.5E-17	9.0E-17	19.39	normal	3.8E-17	6.6E-17	9.5E-17	21.95	lognorm.	4.1E-17	8.3E-17	1.5E-16	1.39
Liver	normal	3.5E-16	4.9E-16	6.4E-16	15.34	normal	3.1E-16	4.6E-16	6.1E-16	16.82	normal	1.4E-16	3.0E-16	4.6E-16	26.76
Lungs	normal	1.6E-16	2.6E-16	3.6E-16	18.91	normal	1.8E-16	2.7E-16	3.7E-16	17.62	lognorm.	1.7E-17	4.4E-17	9.8E-17	1.56
Oesophagus	normal	2.9E-16	4.5E-16	6.1E-16	18.51	normal	3.0E-16	4.4E-16	5.8E-16	15.96	lognorm.	1.6E-17	5.2E-17	1.4E-16	1.73
R marrow	normal	5.0E-17	1.1E-16	1.7E-16	27.70	normal	4.8E-17	1.1E-16	1.7E-16	28.83	lognorm.	3.2E-17	1.0E-16	2.5E-16	1.69
S glands	normal	7.4E-18	7.6E-18	7.7E-18	1.02	normal	6.8E-18	8.4E-18	1.0E-17	9.69	lognorm.	6.7E-19	1.3E-18	2.3E-18	1.37
Skin	lognorm.	2.0E-17	4.9E-17	9.7E-17	1.49	lognorm.	2.0E-17	4.8E-17	9.8E-17	1.51	normal	3.4E-17	4.1E-17	4.8E-17	8.36
St wall	normal	2.4E-15	6.0E-15	9.6E-15	30.55	lognorm.	2.1E-15	4.6E-15	8.7E-15	1.44	lognorm.	1.1E-16	3.9E-16	1.1E-15	1.79
Testes	normal	4.3E-19	7.0E-19	9.7E-19	20.00	normal	4.7E-19	7.7E-19	1.1E-18	20.00	normal	2.7E-18	4.5E-18	6.2E-18	20.00
Thyroid	normal	1.4E-17	3.5E-17	5.7E-17	31.45	normal	1.6E-17	3.7E-17	5.8E-17	29.16	lognorm.	2.6E-18	6.8E-18	1.5E-17	1.57
UB wall	lognorm.	4.9E-18	1.4E-17	3.2E-17	1.61	lognorm.	4.4E-18	1.3E-17	2.9E-17	1.62	lognorm.	3.3E-17	1.0E-16	2.3E-16	1.63
Adrenals	normal	2.6E-16	7.0E-16	1.1E-15	32.08	normal	3.2E-16	7.3E-16	1.1E-15	28.56	normal	1.1E-16	2.4E-16	3.8E-16	27.29
ET	normal	7.2E-18	7.3E-18	7.4E-18	0.42	normal	6.1E-18	8.0E-18	1.0E-17	12.46	lognorm.	5.6E-19	1.3E-18	2.6E-18	1.48
GB wall	lognorm.	1.6E-16	4.3E-16	9.1E-16	1.55	lognorm.	1.4E-16	3.6E-16	7.7E-16	1.54	lognorm.	2.2E-16	9.1E-16	2.7E-15	1.89
Ht wall	normal	4.2E-16	6.5E-16	8.9E-16	18.53	normal	5.1E-16	6.8E-16	8.6E-16	13.06	lognorm.	2.0E-17	7.4E-17	2.1E-16	1.81
Kidneys	lognorm.	1.9E-16	3.9E-16	7.1E-16	1.40	lognorm.	2.0E-16	4.0E-16	7.1E-16	1.38	normal	3.3E-16	4.2E-16	5.0E-16	10.64
Lymph	normal	2.9E-16	4.2E-16	5.6E-16	16.30	normal	2.7E-16	3.8E-16	5.0E-16	15.83	normal	2.2E-16	3.1E-16	4.0E-16	14.33
Muscle	normal	4.5E-17	6.6E-17	8.8E-17	16.31	normal	4.5E-17	6.5E-17	8.5E-17	15.95	normal	3.9E-17	8.1E-17	1.2E-16	26.11
O mucosa	normal	6.8E-18	8.3E-18	9.9E-18	9.64	normal	5.1E-18	9.7E-18	1.4E-17	24.18	lognorm.	7.8E-19	1.7E-18	3.2E-18	1.43
Pancreas	normal	5.9E-16	1.5E-15	2.4E-15	30.83	lognorm.	7.4E-16	1.3E-15	2.2E-15	1.32	normal	2.4E-16	5.8E-16	9.3E-16	30.25
Prostate	normal	2.7E-18	4.5E-18	6.2E-18	20.00	normal	2.7E-18	4.4E-18	6.1E-18	20.00	normal	1.7E-17	2.8E-17	3.9E-17	20.00
SI wall	normal	2.4E-16	4.1E-16	5.9E-16	21.83	normal	2.1E-16	3.9E-16	5.6E-16	22.83	normal	4.7E-16	6.2E-16	7.6E-16	12.10
Spleen	lognorm.	4.1E-16	9.4E-16	1.9E-15	1.47	lognorm.	3.8E-16	9.9E-16	2.1E-15	1.55	lognorm.	3.7E-17	8.9E-17	1.8E-16	1.50
Thymus	lognorm.	3.0E-17	1.1E-16	2.7E-16	1.75	lognorm.	3.4E-17	1.2E-16	2.7E-16	1.70	lognorm.	4.6E-18	2.2E-17	6.4E-17	1.96

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 28. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 4)

Target	ULI cont					LLI cont					SI cont				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	lognorm.	1.2E-19	2.8E-19	5.6E-19	1.48	lognorm.	4.8E-20	1.8E-19	5.2E-19	1.84	lognorm.	5.3E-20	2.8E-19	9.9E-19	2.11
<i>Breast</i>	lognorm.	6.0E-18	2.9E-17	8.7E-17	1.98	lognorm.	2.0E-18	1.7E-17	7.8E-17	2.54	lognorm.	8.1E-18	3.0E-17	7.9E-17	1.79
<i>Colon</i>	normal	9.2E-16	1.6E-15	2.3E-15	21.97	normal	7.6E-16	1.3E-15	1.8E-15	20.98	normal	2.9E-16	5.4E-16	7.9E-16	23.84
<i>Endosteum</i>	lognorm.	3.6E-17	7.7E-17	1.5E-16	1.43	normal	5.6E-17	1.2E-16	1.9E-16	27.81	lognorm.	6.2E-17	1.0E-16	1.6E-16	1.27
<i>Liver</i>	lognorm.	1.1E-16	3.1E-16	6.9E-16	1.60	lognorm.	2.0E-17	4.5E-17	9.0E-17	1.47	lognorm.	3.3E-17	1.7E-16	5.9E-16	2.08
<i>Lungs</i>	lognorm.	1.3E-17	3.7E-17	8.8E-17	1.64	lognorm.	3.4E-18	3.0E-17	1.4E-16	2.58	lognorm.	6.1E-18	4.2E-17	1.8E-16	2.36
<i>Oesophagus</i>	lognorm.	1.1E-17	4.5E-17	1.3E-16	1.86	lognorm.	3.2E-18	3.6E-17	1.8E-16	2.82	lognorm.	8.0E-18	6.1E-17	2.7E-16	2.44
<i>R marrow</i>	lognorm.	2.7E-17	1.1E-16	3.1E-16	1.86	lognorm.	7.8E-17	1.7E-16	3.1E-16	1.42	lognorm.	5.9E-17	1.7E-16	3.8E-16	1.61
<i>S glands</i>	lognorm.	5.4E-19	1.5E-18	3.5E-18	1.61	lognorm.	1.1E-19	7.3E-19	2.6E-18	2.24	normal	9.4E-19	2.0E-18	3.0E-18	26.50
<i>Skin</i>	normal	3.1E-17	4.1E-17	5.1E-17	13.03	normal	3.7E-17	4.2E-17	4.6E-17	5.20	lognorm.	1.9E-17	5.6E-17	1.2E-16	1.61
<i>St wall</i>	lognorm.	1.0E-16	3.1E-16	7.7E-16	1.68	lognorm.	5.0E-17	2.4E-16	7.9E-16	2.02	lognorm.	2.8E-17	4.3E-16	2.9E-15	3.27
<i>Testes</i>	normal	2.0E-18	3.2E-18	4.5E-18	20.00	normal	2.1E-17	3.5E-17	4.9E-17	20.00	normal	4.1E-18	6.7E-18	9.3E-18	20.00
<i>Thyroid</i>	lognorm.	2.1E-18	5.6E-18	1.2E-17	1.58	lognorm.	5.4E-19	4.0E-18	1.7E-17	2.39	lognorm.	9.9E-19	6.0E-18	2.2E-17	2.21
<i>UB wall</i>	lognorm.	3.0E-17	1.1E-16	2.9E-16	1.78	normal	4.6E-16	7.6E-16	1.1E-15	19.81	lognorm.	5.2E-17	5.7E-16	2.4E-15	2.66
<i>Adrenals</i>	normal	9.4E-17	2.2E-16	3.4E-16	28.90	lognorm.	2.4E-17	1.4E-16	4.7E-16	2.13	lognorm.	4.9E-17	3.2E-16	1.3E-15	2.33
<i>ET</i>	lognorm.	5.9E-19	1.6E-18	3.4E-18	1.56	lognorm.	1.2E-19	7.1E-19	2.4E-18	2.13	normal	1.4E-18	1.9E-18	2.4E-18	12.90
<i>GB wall</i>	lognorm.	1.5E-16	8.5E-16	3.1E-15	2.18	normal	3.4E-17	5.7E-17	8.0E-17	20.75	lognorm.	5.9E-17	3.3E-16	1.2E-15	2.15
<i>Ht wall</i>	lognorm.	1.4E-17	6.1E-17	1.9E-16	1.93	lognorm.	4.3E-18	6.4E-17	3.6E-16	3.11	lognorm.	8.0E-18	7.5E-17	3.7E-16	2.66
<i>Kidneys</i>	normal	3.8E-16	4.1E-16	4.4E-16	3.95	lognorm.	7.9E-17	1.9E-16	3.8E-16	1.49	lognorm.	6.5E-17	4.5E-16	1.9E-15	2.37
<i>Lymph</i>	normal	1.3E-16	2.1E-16	2.9E-16	20.00	normal	9.0E-16	1.5E-15	2.1E-15	20.00	normal	3.6E-16	4.7E-16	5.7E-16	11.95
<i>Muscle</i>	normal	3.6E-17	8.6E-17	1.3E-16	29.34	normal	7.0E-17	1.1E-16	1.6E-16	19.56	normal	3.6E-17	9.6E-17	1.6E-16	31.97
<i>O mucosa</i>	lognorm.	6.2E-19	1.8E-18	4.0E-18	1.61	lognorm.	1.6E-19	7.3E-19	2.2E-18	1.94	normal	2.2E-18	2.2E-18	2.3E-18	1.79
<i>Pancreas</i>	lognorm.	2.1E-16	5.5E-16	1.2E-15	1.55	lognorm.	5.0E-17	2.6E-16	8.1E-16	2.03	lognorm.	5.2E-17	8.6E-16	6.2E-15	3.38
<i>Prostate</i>	normal	1.2E-17	2.0E-17	2.9E-17	20.00	normal	1.9E-16	3.1E-16	4.3E-16	20.00	normal	3.3E-17	5.4E-17	7.5E-17	20.00
<i>SI wall</i>	normal	3.5E-16	6.1E-16	8.8E-16	21.99	normal	2.9E-16	5.9E-16	8.9E-16	25.86	normal	8.3E-16	1.4E-15	1.9E-15	19.67
<i>Spleen</i>	lognorm.	3.7E-17	6.7E-17	1.1E-16	1.32	lognorm.	2.1E-17	2.2E-16	1.1E-15	2.74	lognorm.	1.8E-17	2.0E-16	1.1E-15	2.83
<i>Thymus</i>	lognorm.	3.6E-18	2.2E-17	7.7E-17	2.19	lognorm.	5.6E-19	2.0E-17	1.4E-16	4.11	lognorm.	7.2E-18	2.1E-17	4.7E-17	1.62

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 29. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 5)

Target	UB cont					Kidneys					Muscles				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	lognorm.	5.2E-21	4.6E-20	1.5E-19	2.35	lognorm.	3.2E-19	7.0E-19	1.4E-18	1.45	normal	9.2E-18	2.5E-17	4.0E-17	32.05
<i>Breast</i>	normal	8.0E-19	1.2E-18	1.6E-18	17.00	lognorm.	1.3E-17	3.3E-17	7.1E-17	1.54	normal	2.6E-17	3.6E-17	4.7E-17	15.19
<i>Colon</i>	lognorm.	1.9E-16	4.2E-16	7.9E-16	1.43	normal	2.6E-16	3.4E-16	4.2E-16	11.55	normal	5.8E-17	9.5E-17	1.3E-16	20.05
<i>Endosteum</i>	normal	1.2E-16	1.6E-16	2.0E-16	12.71	lognorm.	6.1E-17	1.4E-16	2.8E-16	1.47	normal	6.3E-17	9.7E-17	1.3E-16	17.91
<i>Liver</i>	lognorm.	3.2E-18	2.0E-17	6.0E-17	2.11	normal	2.5E-16	4.4E-16	6.2E-16	21.26	normal	4.6E-17	7.2E-17	9.8E-17	18.34
<i>Lungs</i>	lognorm.	5.6E-19	4.7E-18	1.6E-17	2.35	normal	6.8E-17	1.0E-16	1.3E-16	16.49	normal	6.4E-17	9.3E-17	1.2E-16	15.62
<i>Oesophagus</i>	lognorm.	5.3E-19	6.5E-18	2.5E-17	2.68	normal	8.0E-17	1.3E-16	1.9E-16	20.47	normal	5.6E-17	9.6E-17	1.4E-16	21.00
<i>R marrow</i>	normal	1.3E-16	2.3E-16	3.4E-16	23.44	normal	6.6E-17	1.7E-16	2.7E-16	30.73	normal	6.3E-17	1.2E-16	1.9E-16	25.38
<i>S glands</i>	normal	3.8E-20	7.6E-20	1.1E-19	25.16	normal	1.3E-18	2.7E-18	4.2E-18	27.23	normal	5.4E-17	6.1E-17	6.9E-17	6.28
<i>Skin</i>	lognorm.	1.8E-17	4.9E-17	1.0E-16	1.55	lognorm.	2.1E-17	5.0E-17	9.8E-17	1.48	normal	2.6E-17	5.7E-17	8.9E-17	28.14
<i>St wall</i>	lognorm.	4.2E-18	2.1E-17	6.3E-17	2.00	lognorm.	2.0E-16	3.8E-16	6.7E-16	1.37	normal	4.7E-17	6.8E-17	9.0E-17	16.04
<i>Testes</i>	normal	8.9E-17	1.5E-16	2.0E-16	20.00	normal	1.0E-18	1.7E-18	2.3E-18	20.00	normal	6.3E-17	1.0E-16	1.4E-16	20.00
<i>Thyroid</i>	lognorm.	9.0E-20	7.9E-19	2.6E-18	2.35	normal	5.5E-18	1.4E-17	2.3E-17	31.17	normal	4.8E-17	1.2E-16	1.8E-16	29.79
<i>UB wall</i>	lognorm.	2.1E-15	6.6E-15	1.6E-14	1.67	lognorm.	1.2E-17	3.8E-17	8.7E-17	1.64	normal	8.2E-17	1.3E-16	1.8E-16	18.81
<i>Adrenals</i>	lognorm.	3.4E-18	4.3E-17	1.6E-16	2.66	normal	7.2E-16	1.7E-15	2.7E-15	29.51	normal	5.0E-17	9.3E-17	1.4E-16	23.55
<i>ET</i>	lognorm.	1.9E-20	8.5E-20	2.6E-19	1.97	lognorm.	8.2E-19	2.1E-18	4.6E-18	1.56	normal	3.3E-17	5.4E-17	7.5E-17	20.14
<i>GB wall</i>	lognorm.	4.4E-18	4.0E-17	1.4E-16	2.42	lognorm.	2.1E-16	6.2E-16	1.5E-15	1.63	normal	3.9E-17	6.9E-17	1.0E-16	22.06
<i>Ht wall</i>	lognorm.	8.8E-19	5.8E-18	1.9E-17	2.19	normal	8.3E-17	1.2E-16	1.6E-16	16.24	normal	5.3E-17	7.1E-17	8.9E-17	12.61
<i>Kidneys</i>	lognorm.	7.2E-18	1.0E-16	3.7E-16	2.73	normal	3.1E-15	4.3E-15	5.6E-15	14.30	normal	6.0E-17	1.0E-16	1.4E-16	21.01
<i>Lymph</i>	normal	1.8E-16	3.9E-16	5.9E-16	26.89	normal	1.0E-16	2.6E-16	4.1E-16	31.12	normal	5.4E-17	9.9E-17	1.4E-16	22.92
<i>Muscle</i>	normal	7.6E-17	1.3E-16	1.8E-16	21.26	normal	5.9E-17	9.7E-17	1.4E-16	20.23	normal	9.6E-17	1.4E-16	1.8E-16	14.82
<i>O mucosa</i>	lognorm.	1.9E-20	7.4E-20	2.0E-19	1.80	lognorm.	9.1E-19	2.6E-18	5.9E-18	1.61	normal	5.8E-17	6.0E-17	6.2E-17	1.97
<i>Pancreas</i>	lognorm.	8.6E-18	4.3E-17	1.2E-16	1.98	normal	3.1E-16	8.2E-16	1.3E-15	31.63	normal	4.4E-17	8.0E-17	1.2E-16	23.01
<i>Prostate</i>	normal	1.4E-15	2.3E-15	3.2E-15	20.00	lognorm.	4.4E-18	1.7E-17	4.5E-17	1.81	normal	8.6E-17	1.4E-16	2.0E-16	20.00
<i>SI wall</i>	lognorm.	1.1E-16	3.6E-16	9.4E-16	1.73	normal	3.4E-16	4.5E-16	5.6E-16	12.26	normal	5.9E-17	9.5E-17	1.3E-16	19.61
<i>Spleen</i>	lognorm.	2.0E-18	2.0E-17	6.9E-17	2.45	normal	4.3E-16	6.7E-16	9.1E-16	18.34	normal	5.7E-17	8.5E-17	1.1E-16	16.92
<i>Thymus</i>	lognorm.	1.7E-19	1.1E-18	3.7E-18	2.20	normal	1.4E-17	3.0E-17	4.7E-17	27.68	normal	5.3E-17	7.5E-17	9.7E-17	15.26

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 30. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 6)

Target	GB cont					T-Body					Others-Pertechnetate				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
Brain	lognorm.	5.6E-19	1.2E-18	2.2E-18	1.41	normal	6.2E-17	8.8E-17	1.1E-16	15.03	normal	6.5E-17	8.8E-17	1.1E-16	13.41
Breast	lognorm.	4.3E-17	9.4E-17	1.8E-16	1.45	normal	5.9E-17	7.8E-17	9.8E-17	12.70	normal	5.2E-17	7.6E-17	1.0E-16	16.02
Colon	lognorm.	1.5E-16	6.3E-16	1.9E-15	1.89	normal	9.1E-17	1.3E-16	1.7E-16	15.90	normal	9.2E-17	1.2E-16	1.6E-16	13.32
Endosteum	lognorm.	4.5E-17	9.4E-17	1.7E-16	1.41	lognorm.	7.5E-17	1.5E-16	2.7E-16	1.39	lognorm.	6.9E-17	1.4E-16	2.5E-16	1.39
Liver	normal	1.0E-15	1.4E-15	1.8E-15	14.31	normal	1.0E-16	1.4E-16	1.8E-16	14.12	normal	9.7E-17	1.4E-16	1.8E-16	15.88
Lungs	normal	7.7E-17	1.4E-16	2.0E-16	22.40	normal	9.3E-17	1.3E-16	1.7E-16	14.74	normal	1.2E-16	1.4E-16	1.5E-16	5.04
Oesophagus	lognorm.	8.0E-17	1.7E-16	3.1E-16	1.42	normal	1.0E-16	1.5E-16	1.9E-16	16.00	normal	1.1E-16	1.4E-16	1.7E-16	11.80
R marrow	lognorm.	3.5E-17	1.3E-16	3.4E-16	1.78	lognorm.	8.1E-17	1.4E-16	2.2E-16	1.29	normal	1.0E-16	1.3E-16	1.5E-16	9.07
S glands	normal	4.7E-18	6.3E-18	7.8E-18	12.97	normal	5.1E-17	8.2E-17	1.1E-16	19.09	normal	4.3E-17	7.5E-17	1.1E-16	22.24
Skin	lognorm.	1.9E-17	5.1E-17	1.1E-16	1.57	normal	3.2E-17	6.5E-17	9.7E-17	25.85	normal	4.9E-17	6.0E-17	7.1E-17	9.22
St wall	lognorm.	1.6E-16	4.1E-16	8.6E-16	1.53	normal	8.8E-17	1.4E-16	1.9E-16	18.76	normal	7.1E-17	1.2E-16	1.7E-16	20.93
Testes	normal	6.7E-19	1.1E-18	1.5E-18	20.00	normal	6.0E-17	9.9E-17	1.4E-16	20.00	normal	6.1E-17	1.0E-16	1.4E-16	20.00
Thyroid	normal	1.2E-17	2.2E-17	3.2E-17	23.31	normal	6.9E-17	1.1E-16	1.5E-16	19.43	normal	8.1E-17	9.8E-17	1.1E-16	8.69
UB wall	lognorm.	7.2E-18	2.1E-17	4.9E-17	1.63	normal	9.7E-17	1.4E-16	1.8E-16	15.38	normal	9.3E-17	1.3E-16	1.8E-16	15.71
Adrenals	lognorm.	1.5E-16	1.4E-15	5.2E-15	2.46	normal	1.0E-16	1.6E-16	2.2E-16	19.52	normal	7.3E-17	1.5E-16	2.3E-16	25.97
ET	normal	3.2E-18	6.2E-18	9.2E-18	24.60	normal	6.0E-17	8.8E-17	1.2E-16	16.24	normal	6.5E-17	8.9E-17	1.1E-16	13.79
GB wall	lognorm.	6.7E-15	2.4E-14	6.2E-14	1.76	normal	7.9E-17	1.4E-16	2.1E-16	22.77	normal	1.0E-16	1.4E-16	1.9E-16	15.64
Ht wall	normal	8.1E-17	1.8E-16	2.8E-16	27.94	normal	1.1E-16	1.4E-16	1.8E-16	13.91	normal	1.2E-16	1.3E-16	1.4E-16	4.88
Kidneys	lognorm.	1.9E-16	6.4E-16	1.6E-15	1.72	normal	1.0E-16	1.5E-16	2.1E-16	17.12	normal	6.9E-17	1.3E-16	1.9E-16	24.19
Lymph	lognorm.	2.0E-16	3.4E-16	5.5E-16	1.30	normal	9.6E-17	1.3E-16	1.7E-16	13.57	normal	1.0E-16	1.2E-16	1.3E-16	6.36
Muscle	normal	3.8E-17	6.6E-17	9.5E-17	21.66	normal	7.4E-17	1.1E-16	1.4E-16	15.80	normal	6.9E-17	1.1E-16	1.5E-16	18.65
O mucosa	lognorm.	4.4E-18	8.0E-18	1.3E-17	1.32	normal	7.5E-17	9.0E-17	1.1E-16	8.77	normal	6.9E-17	8.5E-17	1.0E-16	9.77
Pancreas	lognorm.	3.1E-16	1.4E-15	4.1E-15	1.93	normal	1.1E-16	1.6E-16	2.2E-16	17.68	normal	8.3E-17	1.5E-16	2.2E-16	22.86
Prostate	normal	4.5E-18	7.3E-18	1.0E-17	20.00	normal	1.2E-16	1.4E-16	1.7E-16	10.43	normal	1.2E-16	1.4E-16	1.7E-16	7.99
SI wall	lognorm.	1.6E-16	3.6E-16	7.1E-16	1.46	normal	9.4E-17	1.4E-16	1.9E-16	17.20	normal	9.2E-17	1.4E-16	1.9E-16	18.14
Spleen	lognorm.	3.0E-17	1.4E-16	4.0E-16	1.93	normal	1.0E-16	1.4E-16	1.8E-16	13.85	normal	9.2E-17	1.4E-16	1.8E-16	16.27
Thymus	normal	2.3E-17	5.4E-17	8.5E-17	29.53	normal	7.7E-17	1.2E-16	1.6E-16	17.80	normal	9.7E-17	1.2E-16	1.4E-16	9.28

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 31. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 7)

Target	Others-Sestamibi					Others-Tetrofosmin					Others-Phosphonate				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$
<i>Brain</i>	normal	1.2E-16	1.2E-16	1.3E-16	2.95	normal	6.6E-17	9.1E-17	1.2E-16	14.00	normal	7.9E-17	9.0E-17	1.0E-16	6.23
<i>Breast</i>	normal	6.6E-17	9.0E-17	1.1E-16	13.71	normal	4.8E-17	7.3E-17	9.9E-17	17.87	normal	6.2E-17	8.6E-17	1.1E-16	14.18
<i>Colon</i>	normal	1.1E-16	1.4E-16	1.7E-16	11.12	normal	9.3E-17	1.3E-16	1.7E-16	14.20	normal	1.2E-16	1.4E-16	1.7E-16	9.44
<i>Endosteum</i>	lognorm.	6.4E-17	1.6E-16	3.5E-16	1.54	lognorm.	6.8E-17	1.4E-16	2.6E-16	1.40	lognorm.	7.6E-17	1.5E-16	2.8E-16	1.39
<i>Liver</i>	normal	6.7E-17	1.0E-16	1.4E-16	17.43	normal	5.2E-17	9.2E-17	1.3E-16	22.57	normal	1.2E-16	1.6E-16	1.9E-16	11.38
<i>Lungs</i>	normal	1.3E-16	1.5E-16	1.8E-16	7.70	normal	1.2E-16	1.3E-16	1.4E-16	5.12	normal	1.2E-16	1.5E-16	1.8E-16	9.34
<i>Oesophagus</i>	normal	1.4E-16	1.5E-16	1.7E-16	5.17	normal	9.5E-17	1.3E-16	1.7E-16	14.34	normal	1.4E-16	1.5E-16	1.7E-16	4.98
<i>R marrow</i>	normal	1.2E-16	1.3E-16	1.3E-16	2.03	normal	1.0E-16	1.3E-16	1.5E-16	9.94	normal	9.0E-17	1.3E-16	1.6E-16	14.78
<i>S glands</i>	lognorm.	4.8E-17	8.9E-17	1.5E-16	1.34	normal	4.3E-17	7.7E-17	1.1E-16	22.90	normal	6.6E-17	9.3E-17	1.2E-16	14.64
<i>Skin</i>	normal	5.3E-17	6.4E-17	7.6E-17	9.31	normal	5.0E-17	6.1E-17	7.1E-17	9.19	normal	5.6E-17	6.6E-17	7.6E-17	7.58
<i>St wall</i>	normal	9.8E-17	1.4E-16	1.9E-16	15.99	normal	6.9E-17	1.2E-16	1.7E-16	21.18	normal	1.0E-16	1.5E-16	1.9E-16	15.23
<i>Testes</i>	normal	6.3E-17	1.0E-16	1.4E-16	20.00	normal	6.3E-17	1.0E-16	1.4E-16	20.00	normal	7.1E-17	1.2E-16	1.6E-16	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	9.3E-17	9.5E-17	9.8E-17	1.36	normal	8.0E-17	9.9E-17	1.2E-16	9.47	normal	9.9E-17	1.1E-16	1.3E-16	7.17
<i>UB wall</i>	normal	1.0E-16	1.4E-16	1.8E-16	14.01	normal	9.5E-17	1.4E-16	1.8E-16	16.11	normal	1.3E-16	1.4E-16	1.6E-16	6.53
<i>Adrenals</i>	normal	6.4E-17	1.5E-16	2.3E-16	28.83	lognorm.	7.8E-17	1.3E-16	2.1E-16	1.29	normal	9.9E-17	1.7E-16	2.3E-16	20.61
<i>ET</i>	normal	8.1E-17	1.1E-16	1.5E-16	14.96	normal	6.6E-17	9.2E-17	1.2E-16	14.23	normal	7.6E-17	1.0E-16	1.3E-16	12.81
<i>GB wall</i>	normal	8.6E-17	1.2E-16	1.6E-16	15.75	normal	5.8E-17	1.1E-16	1.6E-16	23.54	normal	1.2E-16	1.6E-16	2.1E-16	12.94
<i>Ht wall</i>	normal	1.0E-16	1.3E-16	1.5E-16	8.84	normal	9.9E-17	1.1E-16	1.1E-16	3.59	normal	1.3E-16	1.4E-16	1.6E-16	3.77
<i>Kidneys</i>	normal	6.3E-17	1.3E-16	2.0E-16	27.05	normal	5.5E-17	1.3E-16	2.0E-16	28.67	normal	9.4E-17	1.5E-16	2.0E-16	18.23
<i>Lymph</i>	normal	1.2E-16	1.3E-16	1.4E-16	3.25	normal	1.0E-16	1.2E-16	1.3E-16	6.83	normal	1.2E-16	1.4E-16	1.5E-16	5.20
<i>Muscle</i>	lognorm.	5.5E-17	9.7E-17	1.6E-16	1.31	normal	7.0E-17	1.1E-16	1.5E-16	18.76	normal	9.1E-17	1.2E-16	1.4E-16	11.50
<i>O mucosa</i>	normal	8.9E-17	1.0E-16	1.2E-16	6.85	normal	7.1E-17	8.7E-17	1.0E-16	9.47	normal	8.0E-17	9.8E-17	1.2E-16	9.56
<i>Pancreas</i>	normal	9.7E-17	1.7E-16	2.4E-16	21.80	normal	6.3E-17	1.4E-16	2.2E-16	28.23	normal	1.1E-16	1.7E-16	2.3E-16	17.89
<i>Prostate</i>	normal	7.9E-17	1.7E-16	2.6E-16	27.45	normal	1.2E-16	1.5E-16	1.7E-16	8.49	normal	1.4E-16	1.6E-16	1.8E-16	6.48
<i>SI wall</i>	normal	1.1E-16	1.6E-16	2.2E-16	15.81	normal	9.1E-17	1.5E-16	2.0E-16	18.96	normal	1.2E-16	1.6E-16	2.0E-16	13.25
<i>Spleen</i>	normal	1.2E-16	1.6E-16	2.0E-16	11.46	normal	8.8E-17	1.4E-16	1.8E-16	17.80	normal	1.2E-16	1.5E-16	1.8E-16	10.17
<i>Thymus</i>	normal	1.1E-16	1.4E-16	1.6E-16	8.42	normal	9.2E-17	1.1E-16	1.4E-16	9.70	normal	1.0E-16	1.3E-16	1.6E-16	11.20

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^*

²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt

$P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 32. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{99m}Tc [Sv/Bq s] (Teil 8)

Target	Distrib.	Others-MAA			
		$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^*$ ¹⁾	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^*$ ²⁾
<i>Brain</i>	normal	6.7E-17	9.2E-17	1.2E-16	14.06
<i>Breast</i>	normal	4.6E-17	7.1E-17	9.6E-17	18.13
<i>Colon</i>	normal	9.3E-17	1.3E-16	1.7E-16	14.37
<i>Endosteum</i>	lognorm.	6.9E-17	1.4E-16	2.5E-16	1.39
<i>Liver</i>	normal	4.8E-17	9.0E-17	1.3E-16	23.64
<i>Lungs</i>	normal	1.0E-16	1.2E-16	1.3E-16	5.24
<i>Oesophagus</i>	normal	9.5E-17	1.3E-16	1.6E-16	13.25
<i>R marrow</i>	normal	9.9E-17	1.2E-16	1.5E-16	10.07
<i>S glands</i>	normal	5.9E-17	8.5E-17	1.1E-16	15.90
<i>Skin</i>	normal	5.0E-17	6.1E-17	7.1E-17	9.09
<i>St wall</i>	normal	6.7E-17	1.2E-16	1.7E-16	22.36
<i>Testes</i>	normal	6.4E-17	1.0E-16	1.5E-16	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	8.3E-17	1.1E-16	1.3E-16	10.70
<i>UB wall</i>	normal	9.6E-17	1.4E-16	1.8E-16	16.21
<i>Adrenals</i>	lognorm.	7.7E-17	1.3E-16	2.1E-16	1.29
<i>ET</i>	normal	6.8E-17	9.3E-17	1.2E-16	14.03
<i>GB wall</i>	normal	5.6E-17	1.1E-16	1.6E-16	24.05
<i>Ht wall</i>	normal	9.8E-17	1.1E-16	1.3E-16	6.98
<i>Kidneys</i>	normal	5.4E-17	1.2E-16	2.0E-16	29.00
<i>Lymph</i>	normal	1.0E-16	1.2E-16	1.3E-16	6.57
<i>Muscle</i>	normal	7.0E-17	1.1E-16	1.5E-16	18.69
<i>O mucosa</i>	normal	7.1E-17	8.9E-17	1.1E-16	10.29
<i>Pancreas</i>	normal	6.2E-17	1.4E-16	2.2E-16	28.56
<i>Prostate</i>	normal	1.2E-16	1.5E-16	1.7E-16	8.59
<i>SI wall</i>	normal	9.1E-17	1.5E-16	2.0E-16	19.12
<i>Spleen</i>	normal	8.5E-17	1.3E-16	1.8E-16	18.26
<i>Thymus</i>	normal	9.1E-17	1.1E-16	1.3E-16	9.35

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 33. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{201}TI [Sv/Bq s] (Teil 1)

Target	Bone					Thyroid					Ht wall				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	normal	7.9E-17	1.0E-16	1.2E-16	11.43	lognorm.	1.3E-17	2.6E-17	4.7E-17	1.39	lognorm.	6.9E-19	2.6E-18	7.3E-18	1.82
<i>Breast</i>	lognorm.	1.2E-17	2.0E-17	3.1E-17	1.28	lognorm.	1.1E-17	4.2E-17	1.1E-16	1.83	lognorm.	9.9E-17	2.4E-16	4.9E-16	1.50
<i>Colon</i>	lognorm.	2.4E-17	5.1E-17	9.7E-17	1.42	lognorm.	8.1E-19	3.5E-18	1.1E-17	1.94	lognorm.	7.8E-18	5.1E-17	2.0E-16	2.30
<i>Endosteum</i>	normal	7.0E-16	1.1E-15	1.6E-15	19.43	normal	6.6E-17	1.0E-16	1.4E-16	17.57	normal	4.2E-17	8.4E-17	1.2E-16	25.14
<i>Liver</i>	normal	2.7E-17	5.1E-17	7.5E-17	24.40	normal	1.8E-17	2.9E-17	4.1E-17	19.76	normal	2.8E-16	3.2E-16	3.5E-16	5.63
<i>Lungs</i>	normal	6.4E-17	8.4E-17	1.1E-16	12.56	normal	9.0E-17	2.2E-16	3.6E-16	30.55	normal	2.5E-16	6.1E-16	9.6E-16	29.88
<i>Oesophagus</i>	normal	5.9E-17	1.0E-16	1.4E-16	21.27	lognorm.	6.0E-16	1.5E-15	3.3E-15	1.55	normal	3.6E-16	9.5E-16	1.5E-15	31.71
<i>R marrow</i>	lognorm.	9.0E-17	6.2E-16	2.3E-15	2.29	normal	6.6E-17	1.3E-16	2.0E-16	25.71	lognorm.	5.5E-17	1.2E-16	2.4E-16	1.45
<i>S glands</i>	normal	3.3E-17	8.5E-17	1.4E-16	31.41	lognorm.	1.6E-16	3.2E-16	5.9E-16	1.41	lognorm.	1.4E-17	2.4E-17	3.9E-17	1.30
<i>Skin</i>	normal	1.6E-17	2.9E-17	4.1E-17	22.47	lognorm.	2.1E-17	4.4E-17	8.3E-17	1.42	normal	1.6E-17	2.9E-17	4.2E-17	22.53
<i>St wall</i>	normal	2.2E-17	4.1E-17	5.9E-17	23.01	lognorm.	1.1E-17	2.2E-17	4.1E-17	1.41	normal	2.9E-16	5.3E-16	7.7E-16	22.78
<i>Testes</i>	normal	1.3E-17	2.2E-17	3.1E-17	20.00	normal	1.3E-21	2.2E-21	3.0E-21	20.00	normal	5.4E-20	8.8E-20	1.2E-19	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	5.0E-17	8.1E-17	1.1E-16	19.57	lognorm.	2.9E-13	5.7E-13	1.0E-12	1.37	lognorm.	4.3E-17	1.4E-16	3.7E-16	1.73
<i>UB wall</i>	normal	8.0E-17	9.8E-17	1.2E-16	9.61	lognorm.	3.8E-20	1.4E-19	3.7E-19	1.79	lognorm.	3.2E-19	1.8E-18	5.8E-18	2.08
<i>Adrenals</i>	lognorm.	4.6E-17	8.6E-17	1.5E-16	1.34	normal	1.3E-17	1.6E-17	1.9E-17	10.40	normal	1.3E-16	1.9E-16	2.6E-16	17.31
<i>ET</i>	normal	7.2E-17	1.1E-16	1.5E-16	18.13	lognorm.	2.0E-16	5.2E-16	1.1E-15	1.55	lognorm.	4.2E-18	2.1E-17	7.0E-17	2.05
<i>GB wall</i>	lognorm.	1.4E-17	4.6E-17	1.1E-16	1.67	normal	6.6E-18	1.4E-17	2.1E-17	27.05	normal	8.3E-17	1.5E-16	2.2E-16	22.92
<i>Ht wall</i>	normal	3.3E-17	6.1E-17	8.9E-17	23.33	lognorm.	4.8E-17	1.4E-16	3.4E-16	1.65	lognorm.	1.1E-14	2.5E-14	4.9E-14	1.46
<i>Kidneys</i>	normal	3.6E-17	6.2E-17	8.7E-17	21.22	normal	5.3E-18	7.7E-18	1.0E-17	15.82	normal	4.2E-17	8.6E-17	1.3E-16	26.26
<i>Lymph</i>	normal	5.7E-17	8.2E-17	1.1E-16	15.13	normal	2.2E-16	3.8E-16	5.4E-16	21.47	normal	2.6E-16	3.2E-16	3.8E-16	10.02
<i>Muscle</i>	normal	4.4E-17	6.7E-17	8.9E-17	17.39	normal	3.4E-17	8.7E-17	1.4E-16	31.13	normal	3.5E-17	5.2E-17	7.0E-17	17.20
<i>O mucosa</i>	normal	5.5E-17	1.1E-16	1.6E-16	24.86	lognorm.	1.0E-16	3.0E-16	7.0E-16	1.64	lognorm.	1.1E-17	2.8E-17	5.9E-17	1.53
<i>Pancreas</i>	normal	2.6E-17	5.5E-17	8.5E-17	27.32	normal	5.0E-18	1.2E-17	1.9E-17	29.35	lognorm.	1.1E-16	2.2E-16	4.0E-16	1.40
<i>Prostate</i>	normal	5.4E-17	8.9E-17	1.2E-16	20.00	normal	3.6E-20	5.9E-20	8.2E-20	20.00	normal	3.2E-19	5.3E-19	7.4E-19	20.00
<i>SI wall</i>	lognorm.	3.2E-17	5.9E-17	1.0E-16	1.34	normal	1.3E-18	3.2E-18	5.0E-18	30.04	normal	2.9E-17	5.1E-17	7.2E-17	21.66
<i>Spleen</i>	normal	3.9E-17	5.9E-17	7.9E-17	17.42	normal	2.0E-17	2.7E-17	3.5E-17	14.54	lognorm.	1.1E-16	2.7E-16	5.5E-16	1.49
<i>Thymus</i>	normal	4.9E-17	8.7E-17	1.2E-16	21.99	lognorm.	4.0E-17	2.0E-15	2.6E-14	5.19	lognorm.	1.9E-16	8.3E-16	2.4E-15	1.92

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 34. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{201}TI [Sv/Bq s] (Teil 2)

Target	Lungs					Kidneys					Liver				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	lognorm.	1.7E-18	4.5E-18	9.8E-18	1.56	lognorm.	1.1E-19	2.4E-19	4.7E-19	1.46	lognorm.	4.0E-19	8.9E-19	1.7E-18	1.44
<i>Breast</i>	lognorm.	1.0E-16	1.8E-16	3.0E-16	1.31	lognorm.	9.9E-18	2.3E-17	4.7E-17	1.49	lognorm.	5.5E-17	1.1E-16	1.9E-16	1.38
<i>Colon</i>	lognorm.	6.3E-18	2.8E-17	8.7E-17	1.95	normal	2.1E-16	2.7E-16	3.3E-16	12.07	lognorm.	6.4E-17	1.4E-16	2.8E-16	1.45
<i>Endosteum</i>	normal	4.7E-17	9.3E-17	1.4E-16	25.49	normal	5.2E-17	8.1E-17	1.1E-16	18.17	normal	3.5E-17	6.9E-17	1.0E-16	24.98
<i>Liver</i>	normal	2.0E-16	2.5E-16	3.0E-16	10.12	normal	1.5E-16	3.7E-16	5.9E-16	30.86	normal	4.1E-15	6.1E-15	8.1E-15	16.77
<i>Lungs</i>	normal	7.0E-15	9.3E-15	1.2E-14	12.72	normal	4.4E-17	6.8E-17	9.2E-17	18.04	normal	2.0E-16	2.5E-16	3.0E-16	9.70
<i>Oesophagus</i>	normal	4.1E-16	5.4E-16	6.8E-16	13.00	normal	5.2E-17	9.1E-17	1.3E-16	21.60	normal	2.3E-16	2.7E-16	3.1E-16	8.02
<i>R marrow</i>	normal	7.6E-17	1.5E-16	2.3E-16	25.54	lognorm.	5.5E-17	1.1E-16	2.1E-16	1.41	lognorm.	4.5E-17	1.0E-16	1.9E-16	1.45
<i>S glands</i>	normal	1.4E-17	3.6E-17	5.7E-17	31.23	normal	1.3E-18	1.7E-18	2.1E-18	12.10	normal	4.3E-18	6.5E-18	8.7E-18	17.16
<i>Skin</i>	normal	1.8E-17	3.3E-17	4.8E-17	23.17	normal	2.1E-17	2.8E-17	3.6E-17	13.74	normal	2.2E-17	3.0E-17	3.8E-17	14.23
<i>St wall</i>	normal	1.2E-16	2.0E-16	2.8E-16	20.81	lognorm.	1.3E-16	3.2E-16	6.8E-16	1.54	normal	2.5E-16	4.2E-16	6.0E-16	20.63
<i>Testes</i>	normal	3.8E-20	6.3E-20	8.7E-20	20.00	normal	3.8E-19	6.3E-19	8.8E-19	20.00	normal	1.5E-19	2.5E-19	3.5E-19	20.00
<i>Thyroid</i>	lognorm.	1.1E-16	2.3E-16	4.3E-16	1.42	normal	4.3E-18	7.1E-18	1.0E-17	20.17	normal	1.6E-17	2.8E-17	4.1E-17	22.40
<i>UB wall</i>	lognorm.	2.5E-19	1.3E-18	4.0E-18	2.03	lognorm.	5.4E-18	2.9E-17	8.4E-17	2.01	lognorm.	1.9E-18	6.3E-18	1.5E-17	1.70
<i>Adrenals</i>	normal	1.2E-16	1.5E-16	1.9E-16	11.23	normal	6.8E-16	1.6E-15	2.5E-15	28.81	normal	3.2E-16	7.3E-16	1.1E-15	28.66
<i>ET</i>	lognorm.	8.1E-18	3.1E-17	8.8E-17	1.84	lognorm.	4.3E-19	1.3E-18	3.1E-18	1.66	lognorm.	1.8E-18	5.0E-18	1.2E-17	1.63
<i>GB wall</i>	normal	7.0E-17	1.1E-16	1.5E-16	18.00	lognorm.	1.3E-16	5.2E-16	1.5E-15	1.86	normal	9.4E-16	1.4E-15	1.8E-15	16.31
<i>Ht wall</i>	normal	2.5E-16	6.0E-16	9.5E-16	29.69	normal	4.2E-17	8.4E-17	1.3E-16	25.38	normal	2.8E-16	3.1E-16	3.5E-16	5.74
<i>Kidneys</i>	normal	4.6E-17	7.0E-17	9.4E-17	17.62	normal	1.6E-14	2.7E-14	3.8E-14	21.60	normal	1.5E-16	3.7E-16	5.9E-16	30.06
<i>Lymph</i>	normal	1.7E-16	1.9E-16	2.2E-16	6.91	lognorm.	1.4E-16	2.4E-16	4.0E-16	1.31	normal	1.5E-16	1.7E-16	1.8E-16	3.41
<i>Muscle</i>	normal	4.4E-17	7.0E-17	9.6E-17	18.79	normal	3.8E-17	8.1E-17	1.2E-16	27.04	normal	2.6E-17	5.5E-17	8.4E-17	26.62
<i>O mucosa</i>	lognorm.	1.5E-17	3.4E-17	6.9E-17	1.48	lognorm.	8.9E-19	1.7E-18	3.0E-18	1.37	lognorm.	4.1E-18	7.1E-18	1.2E-17	1.30
<i>Pancreas</i>	normal	6.0E-17	1.1E-16	1.5E-16	22.62	lognorm.	3.7E-16	7.4E-16	1.3E-15	1.38	normal	2.6E-16	5.6E-16	8.6E-16	27.39
<i>Prostate</i>	normal	2.1E-19	3.4E-19	4.8E-19	20.00	normal	3.6E-18	6.0E-18	8.3E-18	20.00	normal	1.3E-18	2.1E-18	3.0E-18	20.00
<i>SI wall</i>	normal	2.0E-17	2.8E-17	3.5E-17	14.29	normal	2.7E-16	3.8E-16	4.9E-16	14.65	normal	9.0E-17	1.3E-16	1.8E-16	16.57
<i>Spleen</i>	normal	1.5E-16	2.9E-16	4.2E-16	23.57	normal	2.8E-16	5.7E-16	8.6E-16	26.18	lognorm.	4.6E-17	1.2E-16	2.6E-16	1.57
<i>Thymus</i>	lognorm.	2.2E-16	4.3E-16	7.7E-16	1.38	lognorm.	7.9E-18	1.8E-17	3.4E-17	1.45	lognorm.	3.7E-17	7.9E-17	1.5E-16	1.42

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 35. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{201}TI [Sv/Bq s] (Teil 3)

Target	Spleen					R marrow					St wall				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1})$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2})$
<i>Brain</i>	lognorm.	4.4E-19	8.2E-19	1.4E-18	1.34	normal	5.4E-17	9.8E-17	1.4E-16	23.01	lognorm.	2.3E-19	6.4E-19	1.5E-18	1.61
<i>Breast</i>	normal	2.8E-17	5.9E-17	9.0E-17	26.89	lognorm.	2.1E-17	4.5E-17	8.6E-17	1.43	lognorm.	3.1E-17	9.2E-17	2.2E-16	1.64
<i>Colon</i>	lognorm.	2.8E-17	1.4E-16	4.8E-16	2.06	lognorm.	3.7E-17	9.9E-17	2.2E-16	1.58	lognorm.	8.3E-17	2.7E-16	6.8E-16	1.71
<i>Endosteum</i>	normal	4.8E-17	7.5E-17	1.0E-16	18.84	normal	1.2E-15	2.1E-15	3.0E-15	20.88	normal	3.1E-17	5.4E-17	7.6E-17	21.25
<i>Liver</i>	lognorm.	4.6E-17	1.2E-16	2.6E-16	1.55	lognorm.	4.7E-17	1.1E-16	2.1E-16	1.46	normal	2.4E-16	4.3E-16	6.1E-16	21.79
<i>Lungs</i>	normal	1.6E-16	2.9E-16	4.1E-16	22.28	normal	7.0E-17	1.6E-16	2.5E-16	28.24	normal	1.2E-16	2.0E-16	2.8E-16	20.84
<i>Oesophagus</i>	normal	1.7E-16	2.3E-16	2.9E-16	13.40	lognorm.	1.0E-16	2.0E-16	3.7E-16	1.40	normal	1.9E-16	3.7E-16	5.5E-16	24.49
<i>R marrow</i>	lognorm.	6.0E-17	1.1E-16	1.9E-16	1.34	normal	5.0E-15	6.3E-15	7.6E-15	10.54	lognorm.	3.6E-17	7.8E-17	1.5E-16	1.44
<i>S glands</i>	normal	4.3E-18	5.7E-18	7.0E-18	12.09	lognorm.	4.8E-17	8.5E-17	1.4E-16	1.31	normal	4.0E-18	4.1E-18	4.2E-18	1.20
<i>Skin</i>	normal	2.7E-17	3.7E-17	4.7E-17	13.87	normal	1.7E-17	2.9E-17	4.1E-17	20.60	normal	1.9E-17	2.8E-17	3.7E-17	16.93
<i>St wall</i>	lognorm.	2.9E-16	8.1E-16	1.8E-15	1.59	lognorm.	4.1E-17	8.5E-17	1.6E-16	1.42	lognorm.	2.0E-14	1.1E-13	3.2E-13	2.03
<i>Testes</i>	normal	1.1E-19	1.9E-19	2.6E-19	20.00	normal	1.4E-17	2.3E-17	3.3E-17	20.00	normal	1.6E-19	2.7E-19	3.8E-19	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	1.8E-17	2.7E-17	3.6E-17	17.44	normal	5.2E-17	1.4E-16	2.3E-16	32.13	lognorm.	9.6E-18	2.1E-17	4.0E-17	1.44
<i>UB wall</i>	lognorm.	1.2E-18	5.4E-18	1.5E-17	1.92	normal	1.3E-16	1.7E-16	2.0E-16	11.30	lognorm.	1.8E-18	8.4E-18	2.6E-17	1.96
<i>Adrenals</i>	lognorm.	3.5E-16	7.5E-16	1.4E-15	1.43	lognorm.	7.5E-17	1.8E-16	3.7E-16	1.51	normal	2.4E-16	5.4E-16	8.3E-16	27.89
<i>ET</i>	lognorm.	2.0E-18	4.6E-18	9.4E-18	1.49	normal	7.1E-17	1.4E-16	2.0E-16	24.33	lognorm.	1.1E-18	3.8E-18	9.9E-18	1.75
<i>GB wall</i>	lognorm.	1.7E-17	1.1E-16	3.9E-16	2.22	lognorm.	2.1E-17	1.0E-16	3.1E-16	1.99	lognorm.	1.2E-16	4.0E-16	9.9E-16	1.71
<i>Ht wall</i>	normal	6.6E-17	2.7E-16	4.7E-16	38.45	lognorm.	5.7E-17	1.3E-16	2.5E-16	1.46	normal	3.0E-16	5.3E-16	7.6E-16	21.97
<i>Kidneys</i>	normal	2.9E-16	5.7E-16	8.5E-16	25.31	lognorm.	6.1E-17	1.3E-16	2.3E-16	1.40	lognorm.	1.2E-16	3.3E-16	7.0E-16	1.56
<i>Lymph</i>	normal	1.9E-16	2.0E-16	2.2E-16	3.50	normal	1.2E-16	1.7E-16	2.1E-16	13.39	normal	2.5E-16	4.2E-16	6.0E-16	21.01
<i>Muscle</i>	normal	3.5E-17	6.8E-17	1.0E-16	24.92	normal	4.5E-17	8.7E-17	1.3E-16	24.92	normal	2.9E-17	5.2E-17	7.5E-17	22.50
<i>O mucosa</i>	lognorm.	2.9E-18	5.2E-18	8.6E-18	1.32	normal	5.5E-17	1.0E-16	1.5E-16	22.97	normal	3.0E-18	4.9E-18	6.8E-18	20.12
<i>Pancreas</i>	normal	1.7E-16	3.8E-16	6.0E-16	28.54	lognorm.	5.0E-17	1.2E-16	2.4E-16	1.49	normal	5.1E-16	1.2E-15	1.9E-15	29.87
<i>Prostate</i>	normal	8.1E-19	1.3E-18	1.9E-18	20.00	normal	8.8E-17	1.4E-16	2.0E-16	20.00	normal	1.4E-18	2.3E-18	3.1E-18	20.00
<i>SI wall</i>	normal	7.3E-17	1.4E-16	2.1E-16	25.02	lognorm.	4.2E-17	1.2E-16	2.9E-16	1.64	normal	1.6E-16	3.3E-16	5.0E-16	25.92
<i>Spleen</i>	normal	5.6E-14	6.3E-14	7.0E-14	6.00	lognorm.	6.0E-17	1.2E-16	2.1E-16	1.37	lognorm.	2.9E-16	8.2E-16	1.9E-15	1.61
<i>Thymus</i>	normal	2.2E-17	5.0E-17	7.9E-17	28.64	lognorm.	8.8E-17	1.8E-16	3.2E-16	1.39	lognorm.	1.8E-17	8.7E-17	2.5E-16	1.96

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 36. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{201}TI [Sv/Bq s] (Teil 4)

Target	SI wall					Muscles					Testes				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mid \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \mid \sigma^{*2)}$
<i>Brain</i>	lognorm.	4.4E-20	9.5E-20	1.8E-19	1.44	normal	1.0E-17	1.4E-17	1.7E-17	12.91	lognorm.	4.3E-23	2.3E-20	4.4E-19	10.57
<i>Breast</i>	lognorm.	5.9E-18	1.2E-17	2.2E-17	1.39	lognorm.	1.2E-17	2.3E-17	4.1E-17	1.37	normal	1.9E-20	3.2E-20	4.5E-20	20.00
<i>Colon</i>	normal	2.8E-16	5.2E-16	7.7E-16	23.62	lognorm.	3.8E-17	6.8E-17	1.1E-16	1.31	lognorm.	9.0E-18	3.0E-17	7.5E-17	1.72
<i>Endosteum</i>	normal	3.7E-17	1.0E-16	1.6E-16	32.01	normal	5.1E-17	8.4E-17	1.2E-16	19.89	normal	1.4E-17	2.3E-17	3.2E-17	20.00
<i>Liver</i>	normal	8.4E-17	1.3E-16	1.8E-16	18.41	normal	3.8E-17	4.8E-17	5.7E-17	10.01	normal	1.6E-19	3.5E-19	5.4E-19	27.74
<i>Lungs</i>	normal	2.0E-17	2.6E-17	3.3E-17	12.65	normal	4.4E-17	6.1E-17	7.8E-17	14.42	lognorm.	4.0E-20	6.6E-20	1.0E-19	1.27
<i>Oesophagus</i>	normal	1.6E-17	4.1E-17	6.6E-17	31.59	normal	4.0E-17	6.0E-17	8.0E-17	17.25	normal	6.6E-20	8.9E-20	1.1E-19	12.91
<i>R marrow</i>	lognorm.	3.5E-17	1.1E-16	2.8E-16	1.69	normal	4.4E-17	7.2E-17	1.0E-16	20.12	normal	1.3E-17	2.4E-17	3.5E-17	22.75
<i>S glands</i>	normal	6.1E-19	6.3E-19	6.4E-19	0.91	normal	4.5E-17	5.0E-17	5.5E-17	5.09	normal	3.3E-22	5.4E-22	7.5E-22	20.00
<i>Skin</i>	normal	2.4E-17	2.9E-17	3.3E-17	8.13	normal	2.0E-17	3.4E-17	4.9E-17	21.62	normal	8.7E-17	1.1E-16	1.3E-16	10.92
<i>St wall</i>	normal	1.6E-16	3.3E-16	5.0E-16	26.34	normal	3.2E-17	4.5E-17	5.9E-17	14.72	normal	2.4E-19	4.3E-19	6.2E-19	22.33
<i>Testes</i>	normal	6.3E-18	1.0E-17	1.4E-17	20.00	normal	5.3E-17	8.7E-17	1.2E-16	20.00	normal	1.5E-13	2.4E-13	3.4E-13	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	1.3E-18	2.8E-18	4.4E-18	27.73	normal	4.4E-17	7.6E-17	1.1E-16	21.40	lognorm.	8.9E-21	1.5E-20	2.4E-20	1.29
<i>UB wall</i>	lognorm.	6.3E-17	3.3E-16	1.1E-15	2.09	normal	6.5E-17	8.7E-17	1.1E-16	12.62	lognorm.	7.7E-17	1.9E-16	3.9E-16	1.51
<i>Adrenals</i>	normal	1.8E-16	2.6E-16	3.4E-16	15.81	normal	4.9E-17	6.3E-17	7.8E-17	11.84	lognorm.	1.7E-19	5.4E-19	1.3E-18	1.69
<i>ET</i>	lognorm.	1.7E-19	5.1E-19	1.2E-18	1.64	normal	3.3E-17	5.3E-17	7.4E-17	19.67	lognorm.	3.2E-25	5.2E-22	1.4E-20	15.28
<i>GB wall</i>	lognorm.	1.2E-16	2.7E-16	5.4E-16	1.48	normal	2.7E-17	4.4E-17	6.0E-17	19.44	normal	2.8E-19	5.4E-19	8.1E-19	24.97
<i>Ht wall</i>	normal	3.0E-17	4.9E-17	6.9E-17	20.28	normal	3.2E-17	4.6E-17	6.1E-17	15.96	normal	4.1E-20	9.4E-20	1.5E-19	29.00
<i>Kidneys</i>	normal	2.6E-16	3.8E-16	5.0E-16	15.61	normal	4.6E-17	7.0E-17	9.4E-17	17.61	lognorm.	5.0E-19	1.3E-18	2.8E-18	1.55
<i>Lymph</i>	normal	2.8E-16	4.8E-16	6.8E-16	21.55	normal	4.0E-17	8.1E-17	1.2E-16	25.74	normal	5.3E-17	8.6E-17	1.2E-16	20.00
<i>Muscle</i>	normal	3.4E-17	7.3E-17	1.1E-16	27.12	normal	2.8E-16	4.9E-16	6.9E-16	21.58	normal	7.2E-17	8.2E-17	9.3E-17	6.74
<i>O mucosa</i>	lognorm.	4.3E-19	7.4E-19	1.2E-18	1.30	normal	4.5E-17	4.9E-17	5.2E-17	3.63	normal	8.0E-22	1.3E-21	1.8E-21	20.00
<i>Pancreas</i>	normal	4.5E-16	7.0E-16	9.4E-16	17.91	normal	3.4E-17	5.2E-17	6.9E-17	17.54	normal	4.8E-19	9.1E-19	1.3E-18	24.18
<i>Prostate</i>	normal	6.5E-17	1.1E-16	1.5E-16	20.00	normal	6.8E-17	1.1E-16	1.6E-16	20.00	normal	1.8E-16	3.0E-16	4.2E-16	20.00
<i>SI wall</i>	lognorm.	4.9E-15	4.9E-14	1.9E-13	2.54	normal	2.7E-17	6.5E-17	1.0E-16	29.54	normal	9.0E-18	1.1E-17	1.4E-17	11.02
<i>Spleen</i>	normal	6.6E-17	1.4E-16	2.2E-16	27.48	normal	4.5E-17	5.8E-17	7.1E-17	11.36	lognorm.	1.4E-19	3.0E-19	5.7E-19	1.44
<i>Thymus</i>	lognorm.	2.7E-18	9.6E-18	2.4E-17	1.75	normal	2.5E-17	5.0E-17	7.6E-17	26.00	lognorm.	6.6E-21	1.9E-20	4.2E-20	1.61

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 37. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{201}TI [Sv/Bq s] (Teil 5)

Target	Others					SI cont					ULI cont				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$
<i>Brain</i>	normal	3.4E-16	3.6E-16	3.9E-16	3.70	lognorm.	4.5E-20	1.3E-19	3.1E-19	1.63	lognorm.	5.1E-20	1.4E-19	3.0E-19	1.57
<i>Breast</i>	normal	3.0E-16	3.1E-16	3.1E-16	1.15	lognorm.	5.2E-18	1.9E-17	4.9E-17	1.77	lognorm.	2.6E-18	1.7E-17	6.3E-17	2.26
<i>Colon</i>	normal	3.3E-16	3.6E-16	3.8E-16	3.57	normal	3.2E-16	5.0E-16	6.9E-16	18.80	normal	1.3E-15	1.7E-15	2.1E-15	13.31
<i>Endosteum</i>	normal	2.2E-16	2.3E-16	2.3E-16	0.63	lognorm.	4.9E-17	8.5E-17	1.4E-16	1.30	lognorm.	3.1E-17	6.7E-17	1.3E-16	1.44
<i>Liver</i>	normal	5.6E-17	6.1E-17	6.7E-17	4.73	normal	6.7E-17	1.6E-16	2.6E-16	30.41	lognorm.	7.1E-17	2.9E-16	8.2E-16	1.86
<i>Lungs</i>	normal	6.7E-17	6.8E-17	6.9E-17	0.62	normal	1.3E-17	3.6E-17	5.9E-17	32.33	lognorm.	5.6E-18	2.2E-17	6.1E-17	1.83
<i>Oesophagus</i>	normal	3.1E-16	3.4E-16	3.7E-16	4.41	lognorm.	2.9E-17	5.6E-17	9.8E-17	1.36	lognorm.	4.5E-18	2.3E-17	7.3E-17	2.04
<i>R marrow</i>	normal	1.2E-16	1.2E-16	1.2E-16	0.60	lognorm.	3.6E-17	1.0E-16	2.3E-16	1.60	lognorm.	5.9E-17	1.1E-16	1.9E-16	1.35
<i>S glands</i>	normal	3.1E-16	3.2E-16	3.3E-16	1.55	normal	6.7E-19	1.0E-18	1.3E-18	17.20	lognorm.	2.1E-19	7.3E-19	1.9E-18	1.74
<i>Skin</i>	normal	3.0E-16	3.0E-16	3.0E-16	0.71	normal	2.3E-17	2.9E-17	3.4E-17	9.50	normal	2.2E-17	2.9E-17	3.6E-17	12.46
<i>St wall</i>	normal	5.1E-17	8.8E-17	1.3E-16	21.76	lognorm.	2.3E-16	4.7E-16	8.4E-16	1.38	lognorm.	5.2E-17	1.5E-16	3.3E-16	1.61
<i>Testes</i>	normal	4.9E-17	8.1E-17	1.1E-16	20.00	normal	2.2E-18	3.7E-18	5.2E-18	20.00	normal	9.4E-19	1.6E-18	2.2E-18	20.00
<i>Thyroid</i>	normal	6.6E-17	7.6E-17	8.7E-17	7.13	lognorm.	1.7E-18	4.0E-18	8.0E-18	1.48	lognorm.	8.9E-19	3.2E-18	8.4E-18	1.77
<i>UB wall</i>	normal	3.2E-16	3.6E-16	3.9E-16	5.34	lognorm.	4.8E-17	2.5E-16	8.2E-16	2.06	lognorm.	1.7E-17	9.8E-17	3.3E-16	2.12
<i>Adrenals</i>	normal	3.0E-16	3.4E-16	3.7E-16	5.24	normal	2.3E-16	3.3E-16	4.2E-16	14.36	lognorm.	8.6E-17	1.5E-16	2.3E-16	1.29
<i>ET</i>	normal	3.1E-16	3.2E-16	3.3E-16	0.88	lognorm.	2.0E-19	7.1E-19	2.0E-18	1.80	lognorm.	2.4E-19	6.6E-19	1.5E-18	1.58
<i>GB wall</i>	normal	3.0E-16	3.2E-16	3.4E-16	3.56	lognorm.	1.0E-16	3.3E-16	8.3E-16	1.69	lognorm.	7.1E-17	7.3E-16	3.3E-15	2.65
<i>Ht wall</i>	normal	8.1E-17	9.7E-17	1.1E-16	8.06	lognorm.	3.9E-17	6.9E-17	1.1E-16	1.31	lognorm.	5.8E-18	3.0E-17	9.6E-17	2.04
<i>Kidneys</i>	normal	6.4E-17	8.7E-17	1.1E-16	13.41	normal	2.2E-16	4.7E-16	7.3E-16	27.49	normal	3.1E-16	3.8E-16	4.4E-16	8.47
<i>Lymph</i>	normal	3.3E-16	3.5E-16	3.6E-16	2.25	normal	3.1E-16	4.1E-16	5.1E-16	12.48	normal	1.4E-16	2.6E-16	3.7E-16	22.65
<i>Muscle</i>	normal	4.2E-17	6.2E-17	8.1E-17	16.02	normal	3.0E-17	6.7E-17	1.0E-16	28.01	lognorm.	3.9E-17	7.2E-17	1.2E-16	1.34
<i>O mucosa</i>	normal	3.2E-16	3.3E-16	3.5E-16	1.69	normal	1.1E-18	1.1E-18	1.1E-18	0.62	lognorm.	2.9E-19	8.1E-19	1.8E-18	1.60
<i>Pancreas</i>	normal	3.0E-16	3.7E-16	4.3E-16	9.30	normal	4.0E-16	9.5E-16	1.5E-15	29.25	lognorm.	2.5E-16	5.6E-16	1.1E-15	1.45
<i>Prostate</i>	normal	2.3E-16	3.8E-16	5.3E-16	20.00	normal	2.3E-17	3.8E-17	5.3E-17	20.00	normal	8.3E-18	1.4E-17	1.9E-17	20.00
<i>SI wall</i>	normal	8.3E-17	1.1E-16	1.4E-16	13.20	lognorm.	5.6E-16	6.6E-15	3.1E-14	2.80	normal	3.4E-16	5.3E-16	7.3E-16	18.84
<i>Spleen</i>	normal	6.5E-17	8.2E-17	9.9E-17	10.34	lognorm.	8.6E-17	2.0E-16	4.2E-16	1.50	lognorm.	1.8E-17	3.2E-17	5.2E-17	1.30
<i>Thymus</i>	normal	3.3E-16	3.4E-16	3.4E-16	0.21	lognorm.	3.7E-18	1.3E-17	3.2E-17	1.74	lognorm.	1.6E-18	6.3E-18	1.7E-17	1.83

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 38. Statistische Daten der S-Faktoren für ^{201}TI [Sv/Bq s] (Teil 6)

Target	LLI cont					UB cont				
	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$	Distrib.	$P_{2,5}$	$\mu \mu^{*1)}$	$P_{97,5}$	$cv\% \sigma^{*2)}$
<i>Brain</i>	lognorm.	2.6E-20	1.6E-19	5.7E-19	2.21	lognorm.	2.0E-21	1.1E-20	3.3E-20	2.03
<i>Breast</i>	lognorm.	1.3E-18	2.9E-17	1.8E-16	3.55	normal	4.2E-19	5.1E-19	5.9E-19	8.79
<i>Colon</i>	normal	1.3E-15	2.0E-15	2.7E-15	17.77	normal	1.8E-16	3.4E-16	5.1E-16	24.38
<i>Endosteum</i>	lognorm.	2.7E-17	6.5E-17	1.4E-16	1.52	normal	1.1E-16	1.2E-16	1.4E-16	5.15
<i>Liver</i>	lognorm.	2.1E-17	1.0E-16	3.1E-16	1.98	lognorm.	2.0E-18	6.5E-18	1.6E-17	1.71
<i>Lungs</i>	lognorm.	2.7E-18	3.6E-17	1.8E-16	2.93	lognorm.	2.6E-19	1.3E-18	3.7E-18	1.97
<i>Oesophagus</i>	lognorm.	2.9E-18	3.7E-17	1.8E-16	2.85	lognorm.	2.3E-19	1.8E-18	6.3E-18	2.34
<i>R marrow</i>	lognorm.	5.3E-17	1.1E-16	1.9E-16	1.39	normal	1.1E-16	1.5E-16	1.8E-16	11.72
<i>S glands</i>	lognorm.	9.5E-20	9.7E-19	4.3E-18	2.64	lognorm.	1.5E-20	2.4E-20	3.7E-20	1.27
<i>Skin</i>	normal	3.0E-17	3.1E-17	3.2E-17	1.37	normal	1.7E-17	2.6E-17	3.5E-17	18.05
<i>St wall</i>	lognorm.	6.8E-17	5.8E-16	2.4E-15	2.47	lognorm.	2.0E-18	9.0E-18	2.7E-17	1.96
<i>Testes</i>	normal	5.0E-19	8.2E-19	1.1E-18	20.00	normal	6.6E-17	1.1E-16	1.5E-16	20.00
<i>Thyroid</i>	lognorm.	3.9E-19	4.4E-18	2.1E-17	2.75	lognorm.	5.1E-20	1.4E-19	3.0E-19	1.57
<i>UB wall</i>	lognorm.	4.8E-18	1.1E-16	6.9E-16	3.56	lognorm.	2.4E-15	1.5E-14	5.3E-14	2.20
<i>Adrenals</i>	lognorm.	2.8E-17	1.6E-16	5.3E-16	2.11	lognorm.	2.1E-18	1.2E-17	3.6E-17	2.06
<i>ET</i>	lognorm.	1.3E-19	9.6E-19	3.7E-18	2.35	lognorm.	1.0E-20	2.4E-20	4.8E-20	1.49
<i>GB wall</i>	lognorm.	4.8E-17	1.5E-16	3.5E-16	1.66	lognorm.	2.5E-18	1.2E-17	3.7E-17	1.99
<i>Ht wall</i>	lognorm.	4.1E-18	6.4E-17	3.4E-16	3.08	lognorm.	3.5E-19	1.9E-18	5.7E-18	2.04
<i>Kidneys</i>	lognorm.	1.2E-16	2.8E-16	5.4E-16	1.47	lognorm.	6.1E-18	2.9E-17	8.4E-17	1.95
<i>Lymph</i>	normal	2.0E-16	3.2E-16	4.3E-16	18.48	normal	2.1E-16	2.9E-16	3.6E-16	13.80
<i>Muscle</i>	lognorm.	3.1E-17	6.8E-17	1.3E-16	1.45	normal	5.7E-17	9.4E-17	1.3E-16	20.18
<i>O mucosa</i>	lognorm.	1.2E-19	9.1E-19	3.6E-18	2.40	lognorm.	4.9E-21	1.9E-20	5.4E-20	1.85
<i>Pancreas</i>	lognorm.	1.1E-16	4.3E-16	1.2E-15	1.83	lognorm.	4.9E-18	1.8E-17	5.1E-17	1.81
<i>Prostate</i>	normal	3.9E-18	6.4E-18	8.9E-18	20.00	normal	1.2E-15	2.1E-15	2.9E-15	20.00
<i>SI wall</i>	normal	2.6E-16	6.7E-16	1.1E-15	31.25	lognorm.	6.5E-17	3.6E-16	1.3E-15	2.14
<i>Spleen</i>	lognorm.	2.2E-17	2.9E-16	1.4E-15	2.90	lognorm.	1.3E-18	5.5E-18	1.5E-17	1.86
<i>Thymus</i>	lognorm.	7.9E-19	8.4E-18	3.8E-17	2.68	lognorm.	4.0E-20	5.2E-19	2.2E-18	2.78

¹⁾ Bei Normalverteilung wird hier das arithmetische Mittel μ genommen; bei logarithmischer Verteilung – das geometrische Mittel μ^* ²⁾ Bei Normalverteilung wird hier der Variationskoeffizient cv in Prozent, bei logarithmischer Verteilung - die geometrische Standardabweichung σ^* dargestellt $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

6.4 Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten

Die errechneten statistischen Daten von Organdosiskoeffizienten und den Koeffizienten der effektiven Dosis für sieben untersuchte Radiopharmazeutika sind in den Tabellen 39-46 dargestellt [80]. Es sind der Mittelwert, die Standardabweichung und die Perzentile zu sehen. Die Unsicherheit der Koeffizienten wird durch den Unsicherheitsfaktor quantifiziert, der ebenfalls den Tabellen zu entnehmen ist.

Für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG variiert der Unsicherheitsfaktor, berechnet nach dem MIRD-Schema, von 1,2 bis 1,7 (Tabelle 39). Organe wie Harnblase, Gallenblase, Mundschleimhaut und Milz liegen im oberen Abschnitt des Unsicherheitsbereichs, wobei die Harnblase und die Milz die größte Unsicherheit von $\text{UF} = 1,7$ aufweisen.

Berechnet nach dem ICRP-Schema, liegt der Unsicherheitsfaktor von ^{18}F -FDG im Bereich zwischen 1,3 und 1,9 (Tabelle 40). Auch hier zeigt die Harnblase eine hohe Unsicherheit; mit einem Faktor von $\text{UF} = 1,9$ ist es mit Abstand die größte im Feld. Verglichen mit anderen Organen zeigt auch das Organ Gehirn eine hohe Unsicherheit mit einem Wert von $\text{UF} = 1,5$.

Da die Quellorgane für ein Radiopharmazeutikum für alle Zielorgane gleich bleiben, ist der größte Unsicherheitsfaktor im Feld bei der Berechnung von Dosiskoeffizienten in der Harnblase vor allem auf die hohen Variationskoeffizienten von S-Faktoren bei Gehirn-zu-Harnblase (28,44 %), Leber-zu-Harnblase (29,81 %) und einer hohen geometrischen Abweichung von dem S-Faktor bei Harnblase-zu-Harnblase (1,79) zurückzuführen (Tabelle 22-24).

Beim Radiopräparat $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetat liegt die Unsicherheit der Organdosiskoeffizienten im Bereich von 1,1 bis 1,5 (Tabelle 41). Die Gallenblase und die Harnblase sind Organe mit den größten Unsicherheitsfaktoren von 1,4 und 1,5. Auch hier wie bei ^{18}F -FDG hat man bei der Berechnung der Dosiskoeffizienten in der Harnblase hohe Unsicherheiten. Die Harnblase ist ein sensibles Organ, was die Berechnung von S-Faktoren angeht, da die Ergebnisse stark von ihrem Inhalt abhängen. Aus diesem Grund erwartet man bei den S-Faktoren für die Harnblase große Streuungen. Die in dieser Arbeit verwendeten S-Faktoren wurden für eine Harnblase mit der Masse des Inhalts von 200 g berechnet.

Für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Phosphonat ist die Unsicherheitsspanne größer als bei den Radiopharmazeutika ^{18}F -FDG und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetat (Tabelle 42). Der Unsicherheitskoeffizient erstreckt sich hier zwischen 1,2 und 2,4. Organe wie die Lunge, die Speiseröhre, das rote Knochenmark, die Schilddrüse, der Thymus und das Gehirn liegen alle im oberen Abschnitt des Unsicherheitsbereichs. Dabei hat das Gehirn mit UF von 2,4 den größten Unsicherheitsfaktor im Feld. Schaut man sich die Unsicherheiten der S-Faktoren für $^{99\text{m}}\text{Tc}$ an (Tabelle 25-32), so kann man feststellen, dass die Organpaare Knochen-zu-Gehirn ($\text{GSD} = 2,92$) und Harnblase-zu-Gehirn ($\text{GSD} = 2,35$) ziemlich hohe Unsicherheiten haben. Zusammen mit den hohen Unsicherheiten für die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität

(Tabelle 17) ergibt sich der hohe Unsicherheitsfaktor für die Dosiskoeffizienten im Gehirn. Da aber die Unsicherheiten in den S-Faktoren für das Radionuklid ^{99m}Tc immer gleich sind, egal mit welchen Liganden es in Verbindung berücksichtigt wird, sind die Unterschiede in den Unsicherheiten bei verschiedenen ^{99m}Tc -Radiopharmazeutika immer dem biokinetischen Modell zuzurechnen (biokinetische Parameter bzw. Quellorganen).

Der Unsicherheitskoeffizient des Radiopharmazeutikums ^{99m}Tc -Sestamibi variiert zwischen den Werten 1,1 und 1,6 (Tabelle 43). Die innere Knochenhaut (Endosteum), die Speicheldrüse, die Harnblase und die Gallblase unterliegen den größten Unsicherheiten. Die Gallblase hat dabei den größten Unsicherheitskoeffizienten mit dem Wert von UF = 1,6.

Für das Radiopharmazeutikum ^{99m}Tc -Tetrofosmin liegen die Werte des Unsicherheitsfaktors zwischen 1,1 und 1,7 (Tabelle 44). Die größten Unsicherheiten weisen dabei die innere Knochenhaut (UF = 1,4), die Speicheldrüse (UF = 1,4), der Magen (UF = 1,4), die Harnblase (UF = 1,5), die Gallenblase (UF = 1,7) und die Bauchspeicheldrüse (UF = 1,4) auf. Wie auch beim ^{99m}Tc -Pertechnet sind hier die Gallen- und die Harnblase die Organe mit dem höchsten Unsicherheitskoeffizienten.

Beim Radiopräparat ^{99m}Tc -MAA erstreckt sich die Unsicherheit der Organdosiskoeffizienten von 1,2 bis 2,4 (Tabelle 45). Der Thymus zeigt den größten Wert für die Unsicherheit von UF = 2,4, aber auch die Milz (UF = 2,1), die Schilddrüse (UF = 2,0), das Herz (UF = 1,9), die Brust (UF = 1,8), das rote Knochenmark (UF = 1,8) und die Speiseröhre (UF = 1,8) haben hohe Unsicherheitskoeffizienten. Die große Unsicherheit bei der Bestimmung von Dosiskoeffizienten im Thymus ist auf die großen Variationskoeffizienten von S-Faktoren bei Lunge-zu-Thymus (27,82 %), Nieren-zu-Thymus (27,68 %), Leber-zu-Thymus (24,69 %) und eine hohe geometrische Abweichung vom S-Faktor bei Harnblase-zu-Thymus (2,2) zurückzuführen (Tabelle 25-32). Die möglichen Ursachen für die hohen Unsicherheiten bei den S-Faktoren wurden im Kapitel 6.3 diskutiert.

Zum Schluss zeigt die Tabelle 46 die Unsicherheiten von ^{201}TI -Chlorid. Die Unsicherheitsfaktoren liegen im Bereich zwischen 1,2 und 2,6. Den mit Abstand größten Unsicherheitsfaktor von UF = 2,6 weist dabei der Dünndarm auf, gefolgt von Magen (UF = 2,0) und Gehirn (UF = 1,6). Auch hier ergeben die hohen Unsicherheiten in der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität in den Quellorganen (Tabelle 21) zusammen mit den korrespondierenden hohen Unsicherheiten der S-Faktoren (Tabelle 33-38) hohe Unsicherheiten in den entsprechenden Zielorganen.

Die Unsicherheitsfaktoren für den Koeffizienten der effektiven Dosis für sieben untersuchte Radiopharmazeutika liegen im Bereich zwischen 1,1 und 1,3 und können den Tabellen 40-46 entnommen werden. Die größten Unsicherheiten (UF = 1,3) verzeichnet man dabei bei den Radiopharmazeutika ^{99m}Tc -Phosphonat und ^{99m}Tc -MAA. Wie schon oben erwähnt, wurden bei der Berechnung der Unsicherheiten der effektiven Dosis konstante Gewebe-Wichtungsfaktoren (Tabelle 2) verwendet. Die effektive Dosis ist eine "robuste" Größe. Durch die Mittelung über mehrere Organe werden die Unterschiede geglättet und dadurch erhält man eine viel kleinere Unsicherheit als bei den Organdosen.

Die Abbildung 22 zeigt den Vergleich von Organdosiskoeffizienten für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG, die nach dem ICRP- und MIRD-Schema berechnet wurden. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist liegen die Organdosiskoeffizienten nach MIRD mit ihren Unsicherheitsbereichen für alle Zielorgane unterhalb der Organdosiskoeffizienten, die nach dem Modell von ICRP berechnet wurden. Die möglichen Ursachen könnten die unterschiedlichen Phantome sein, die bei den Berechnungen benutzt wurden. Auch die unterschiedlichen Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R , die von dem MIRD-Komitee und der ICRP verwendet wurden, tragen zu diesem Unterschied bei.

TABELLE 39. Organdosiskoeffizienten nach MIRD-Modell für ^{18}F -FDG [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	1.2E-01	2.1E-02	8.2E-02	1.0E-01	1.2E-01	1.4E-01	1.6E-01	1.4
Breast	9.8E-03	1.4E-03	7.1E-03	8.8E-03	9.7E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.3
Colon	1.4E-02	2.8E-03	9.3E-03	1.2E-02	1.4E-02	1.6E-02	2.0E-02	1.5
Endosteum	7.2E-03	1.3E-03	4.7E-03	6.3E-03	7.1E-03	8.0E-03	1.0E-02	1.5
Liver	2.8E-02	4.9E-03	1.9E-02	2.5E-02	2.8E-02	3.1E-02	3.8E-02	1.4
Lungs	3.4E-02	4.8E-03	2.5E-02	3.1E-02	3.4E-02	3.7E-02	4.4E-02	1.3
Oesophagus	4.1E-02	5.1E-03	3.1E-02	3.7E-02	4.0E-02	4.4E-02	5.1E-02	1.3
R marrow	1.3E-02	1.5E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.6E-02	1.2
S glands	1.4E-02	1.9E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.8E-02	1.3
Skin	5.2E-03	6.7E-04	3.9E-03	4.7E-03	5.1E-03	5.6E-03	6.6E-03	1.3
St wall	2.0E-02	3.2E-03	1.4E-02	1.7E-02	2.0E-02	2.2E-02	2.6E-02	1.4
Testes	4.4E-03	5.8E-04	3.3E-03	4.0E-03	4.4E-03	4.8E-03	5.6E-03	1.3
Thyroid	2.0E-02	2.9E-03	1.5E-02	1.8E-02	2.0E-02	2.2E-02	2.6E-02	1.3
UB wall	6.2E-02	1.6E-02	3.4E-02	5.1E-02	6.1E-02	7.3E-02	9.5E-02	1.7
Adrenals	2.3E-02	4.2E-03	1.5E-02	2.0E-02	2.3E-02	2.6E-02	3.2E-02	1.4
ET	1.9E-02	2.5E-03	1.4E-02	1.7E-02	1.9E-02	2.0E-02	2.4E-02	1.3
GB wall	1.7E-02	3.8E-03	1.0E-02	1.5E-02	1.7E-02	2.0E-02	2.5E-02	1.6
Ht wall	9.3E-02	1.9E-02	5.9E-02	7.9E-02	9.2E-02	1.0E-01	1.3E-01	1.5
Kidneys	1.9E-02	4.0E-03	1.2E-02	1.6E-02	1.9E-02	2.2E-02	2.7E-02	1.5
Lymph	1.3E-02	1.1E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.2
Muscle	6.0E-03	5.4E-04	4.9E-03	5.6E-03	5.9E-03	6.3E-03	7.0E-03	1.2
O mucosa	1.6E-02	3.6E-03	9.8E-03	1.4E-02	1.6E-02	1.9E-02	2.4E-02	1.6
Pancreas	1.9E-02	3.0E-03	1.4E-02	1.7E-02	1.9E-02	2.1E-02	2.6E-02	1.4
Prostate	1.7E-02	2.2E-03	1.3E-02	1.5E-02	1.7E-02	1.8E-02	2.2E-02	1.3
SI wall	1.5E-02	3.0E-03	1.0E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.7E-02	2.2E-02	1.5
Spleen	2.3E-02	5.6E-03	1.3E-02	1.9E-02	2.3E-02	2.7E-02	3.5E-02	1.7
Thymus	2.7E-02	3.6E-03	2.0E-02	2.5E-02	2.7E-02	3.0E-02	3.4E-02	1.3

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 40. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis nach ICRP-Modell für
 ^{18}F -FDG [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	3.5E-02	7.5E-03	2.3E-02	3.0E-02	3.5E-02	4.0E-02	5.2E-02	1.5
Breast	1.0E-02	1.7E-03	7.2E-03	8.9E-03	1.0E-02	1.1E-02	1.4E-02	1.4
Colon	1.3E-02	2.0E-03	9.8E-03	1.2E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.8E-02	1.3
Endosteum	1.1E-02	1.7E-03	8.2E-03	1.0E-02	1.1E-02	1.2E-02	1.5E-02	1.3
Liver	2.3E-02	3.7E-03	1.6E-02	2.0E-02	2.2E-02	2.5E-02	3.1E-02	1.4
Lungs	2.1E-02	3.3E-03	1.5E-02	1.9E-02	2.1E-02	2.3E-02	2.8E-02	1.4
Oesophagus	1.6E-02	2.0E-03	1.3E-02	1.5E-02	1.6E-02	1.7E-02	2.0E-02	1.3
R marrow	1.3E-02	1.9E-03	1.0E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.7E-02	1.3
S glands	9.9E-03	1.6E-03	7.1E-03	8.8E-03	9.9E-03	1.1E-02	1.4E-02	1.4
Skin	8.1E-03	1.4E-03	5.7E-03	7.2E-03	8.0E-03	9.1E-03	1.1E-02	1.4
St wall	1.3E-02	1.8E-03	9.6E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.6E-02	1.3
Testes	8.5E-03	1.5E-03	5.9E-03	7.4E-03	8.4E-03	9.5E-03	1.2E-02	1.4
Thyroid	1.1E-02	1.8E-03	7.6E-03	9.7E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.4E-02	1.4
UB wall	6.1E-02	2.0E-02	3.2E-02	4.7E-02	5.7E-02	7.1E-02	1.1E-01	1.9
Adrenals	1.4E-02	1.9E-03	1.0E-02	1.2E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.8E-02	1.3
ET	1.2E-02	1.8E-03	8.5E-03	1.0E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.6E-02	1.4
GB wall	1.4E-02	1.9E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.6E-02	1.8E-02	1.3
Ht wall	6.8E-02	1.3E-02	4.7E-02	5.8E-02	6.7E-02	7.5E-02	9.8E-02	1.4
Kidneys	1.3E-02	2.0E-03	9.0E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.7E-02	1.4
Lymph	1.4E-02	2.0E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.6E-02	1.9E-02	1.3
Muscle	1.1E-02	1.8E-03	7.4E-03	9.4E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.4E-02	1.4
O mucosa	1.1E-02	1.9E-03	7.8E-03	9.7E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.5E-02	1.4
Pancreas	1.3E-02	2.0E-03	9.4E-03	1.2E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.7E-02	1.3
Prostate	2.3E-02	2.9E-03	1.7E-02	2.1E-02	2.3E-02	2.5E-02	2.9E-02	1.3
SI wall	1.3E-02	2.1E-03	9.5E-03	1.2E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.8E-02	1.4
Spleen	1.2E-02	1.9E-03	8.8E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.6E-02	1.3
Thymus	1.4E-02	1.9E-03	1.0E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.8E-02	1.3
<i>Eff. dose</i>	1.6E-02	1.7E-03	1.3E-02	1.5E-02	1.6E-02	1.7E-02	2.0E-02	1.2

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 41. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis für ^{99m}Tc -Pertechnetat [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	1.4E-03	1.4E-04	1.2E-03	1.3E-03	1.4E-03	1.5E-03	1.7E-03	1.2
Breast	1.6E-03	1.5E-04	1.3E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.9E-03	1.2
Colon	1.3E-02	9.8E-04	1.1E-02	1.3E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.2
Endosteum	3.1E-03	4.5E-04	2.3E-03	2.8E-03	3.0E-03	3.3E-03	4.1E-03	1.3
Liver	4.6E-03	3.7E-04	3.9E-03	4.4E-03	4.6E-03	4.8E-03	5.4E-03	1.2
Lungs	2.9E-03	1.4E-04	2.6E-03	2.8E-03	2.9E-03	3.0E-03	3.1E-03	1.1
Oesophagus	3.4E-03	2.2E-04	3.0E-03	3.3E-03	3.4E-03	3.6E-03	3.9E-03	1.1
R marrow	3.4E-03	2.2E-04	3.0E-03	3.2E-03	3.3E-03	3.5E-03	3.9E-03	1.1
S glands	3.4E-03	5.5E-04	2.6E-03	3.0E-03	3.4E-03	3.7E-03	4.6E-03	1.3
Skin	1.4E-03	8.0E-05	1.3E-03	1.3E-03	1.4E-03	1.4E-03	1.6E-03	1.1
St wall	1.2E-02	1.7E-03	9.1E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.6E-02	1.3
Testes	1.8E-03	2.2E-04	1.4E-03	1.7E-03	1.8E-03	2.0E-03	2.3E-03	1.3
Thyroid	5.5E-03	5.9E-04	4.4E-03	5.0E-03	5.4E-03	5.8E-03	6.7E-03	1.2
UB wall	1.2E-02	2.6E-03	7.6E-03	9.8E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.7E-02	1.5
Adrenals	5.3E-03	5.3E-04	4.3E-03	4.9E-03	5.2E-03	5.6E-03	6.4E-03	1.2
ET	1.7E-03	1.5E-04	1.4E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.8E-03	2.0E-03	1.2
GB wall	7.1E-03	1.3E-03	5.1E-03	6.1E-03	6.9E-03	7.8E-03	1.0E-02	1.4
Ht wall	3.5E-03	1.9E-04	3.1E-03	3.3E-03	3.5E-03	3.6E-03	3.8E-03	1.1
Kidneys	5.9E-03	5.2E-04	5.0E-03	5.6E-03	5.9E-03	6.3E-03	7.1E-03	1.2
Lymph	6.8E-03	3.1E-04	6.2E-03	6.6E-03	6.8E-03	7.0E-03	7.4E-03	1.1
Muscle	2.7E-03	2.3E-04	2.2E-03	2.5E-03	2.7E-03	2.8E-03	3.1E-03	1.2
O mucosa	1.6E-03	1.5E-04	1.4E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.9E-03	1.2
Pancreas	8.5E-03	1.2E-03	6.8E-03	7.7E-03	8.3E-03	9.0E-03	1.1E-02	1.3
Prostate	5.7E-03	4.5E-04	4.9E-03	5.4E-03	5.7E-03	6.0E-03	6.6E-03	1.2
SI wall	8.9E-03	5.1E-04	8.0E-03	8.6E-03	9.0E-03	9.3E-03	1.0E-02	1.1
Spleen	4.4E-03	4.6E-04	3.6E-03	4.1E-03	4.3E-03	4.6E-03	5.4E-03	1.2
Thymus	2.4E-03	3.2E-04	2.0E-03	2.2E-03	2.4E-03	2.5E-03	3.3E-03	1.3
<i>Eff. dose</i>	5.8E-03	2.6E-04	5.3E-03	5.7E-03	5.8E-03	6.0E-03	6.3E-03	1.1

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 42. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis für ^{99m}Tc -Phosphonat [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	1.3E-03	7.2E-04	5.2E-04	8.1E-04	1.1E-03	1.6E-03	3.1E-03	2.4
Breast	4.2E-04	8.9E-05	3.0E-04	3.6E-04	4.0E-04	4.6E-04	6.4E-04	1.5
Colon	2.8E-03	5.2E-04	1.9E-03	2.4E-03	2.7E-03	3.1E-03	3.9E-03	1.4
Endosteum	1.6E-03	1.4E-04	1.3E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.6E-03	1.9E-03	1.2
Liver	1.3E-03	4.2E-04	8.2E-04	1.0E-03	1.2E-03	1.5E-03	2.4E-03	1.7
Lungs	1.5E-03	7.1E-04	7.5E-04	1.0E-03	1.3E-03	1.7E-03	3.6E-03	2.2
Oesophagus	1.7E-03	7.8E-04	8.4E-04	1.2E-03	1.5E-03	1.9E-03	3.8E-03	2.1
R marrow	3.3E-03	1.4E-03	1.8E-03	2.3E-03	2.9E-03	3.8E-03	7.0E-03	2.0
S glands	4.8E-04	4.9E-05	3.9E-04	4.5E-04	4.8E-04	5.2E-04	5.8E-04	1.2
Skin	7.7E-04	2.7E-04	4.7E-04	6.0E-04	7.1E-04	8.6E-04	1.4E-03	1.8
St wall	1.2E-03	3.8E-04	7.4E-04	9.3E-04	1.1E-03	1.3E-03	2.2E-03	1.7
Testes	1.1E-03	1.1E-04	8.5E-04	9.9E-04	1.1E-03	1.1E-03	1.3E-03	1.2
Thyroid	1.3E-03	6.4E-04	5.9E-04	8.4E-04	1.1E-03	1.5E-03	2.9E-03	2.2
UB wall	2.6E-02	8.4E-03	1.4E-02	2.0E-02	2.5E-02	3.1E-02	4.6E-02	1.8
Adrenals	2.0E-03	6.0E-04	1.3E-03	1.6E-03	1.9E-03	2.3E-03	3.4E-03	1.6
ET	5.4E-04	5.2E-05	4.6E-04	5.1E-04	5.4E-04	5.8E-04	6.5E-04	1.2
GB wall	1.3E-03	3.0E-04	8.9E-04	1.1E-03	1.2E-03	1.4E-03	2.1E-03	1.5
Ht wall	1.2E-03	4.7E-04	6.9E-04	9.0E-04	1.1E-03	1.4E-03	2.5E-03	1.9
Kidneys	2.7E-03	6.0E-04	1.8E-03	2.3E-03	2.6E-03	3.0E-03	4.2E-03	1.5
Lymph	2.3E-03	2.9E-04	1.7E-03	2.1E-03	2.3E-03	2.5E-03	2.9E-03	1.3
Muscle	1.7E-03	5.6E-04	1.1E-03	1.3E-03	1.6E-03	1.9E-03	3.2E-03	1.7
O mucosa	5.4E-04	4.0E-05	4.5E-04	5.1E-04	5.4E-04	5.6E-04	6.1E-04	1.2
Pancreas	1.6E-03	4.6E-04	1.0E-03	1.3E-03	1.5E-03	1.7E-03	2.7E-03	1.6
Prostate	1.0E-02	1.3E-03	7.8E-03	9.5E-03	1.0E-02	1.1E-02	1.3E-02	1.3
SI wall	2.7E-03	6.4E-04	1.7E-03	2.2E-03	2.6E-03	3.1E-03	4.2E-03	1.6
Spleen	1.4E-03	5.1E-04	8.9E-04	1.1E-03	1.3E-03	1.6E-03	2.8E-03	1.8
Thymus	1.2E-03	5.5E-04	6.3E-04	8.6E-04	1.1E-03	1.4E-03	2.5E-03	2.0
<i>Eff. dose</i>	2.7E-03	4.0E-04	2.1E-03	2.4E-03	2.7E-03	2.9E-03	3.6E-03	1.3

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 43. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis für ^{99m}Tc -Sestamibi [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	1.6E-03	1.2E-04	1.4E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.8E-03	1.2
Breast	1.8E-03	1.3E-04	1.5E-03	1.7E-03	1.8E-03	1.9E-03	2.0E-03	1.2
Colon	1.0E-02	6.7E-04	8.8E-03	9.7E-03	1.0E-02	1.1E-02	1.1E-02	1.1
Endosteum	3.4E-03	5.2E-04	2.5E-03	3.1E-03	3.4E-03	3.7E-03	4.7E-03	1.4
Liver	7.8E-03	5.4E-04	6.8E-03	7.4E-03	7.8E-03	8.1E-03	8.9E-03	1.1
Lungs	3.3E-03	1.5E-04	3.1E-03	3.2E-03	3.3E-03	3.4E-03	3.6E-03	1.1
Oesophagus	3.7E-03	1.7E-04	3.4E-03	3.6E-03	3.7E-03	3.8E-03	4.1E-03	1.1
R marrow	3.7E-03	2.1E-04	3.3E-03	3.5E-03	3.7E-03	3.8E-03	4.1E-03	1.1
S glands	5.4E-03	9.3E-04	3.8E-03	4.7E-03	5.4E-03	6.0E-03	7.6E-03	1.4
Skin	1.5E-03	8.9E-05	1.4E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.1
St wall	5.7E-03	7.0E-04	4.7E-03	5.2E-03	5.5E-03	6.0E-03	7.3E-03	1.2
Testes	1.8E-03	1.7E-04	1.5E-03	1.7E-03	1.8E-03	2.0E-03	2.2E-03	1.2
Thyroid	2.6E-03	1.8E-04	2.3E-03	2.5E-03	2.6E-03	2.7E-03	3.0E-03	1.1
UB wall	8.0E-03	1.4E-03	5.8E-03	7.0E-03	7.8E-03	8.7E-03	1.1E-02	1.4
Adrenals	9.6E-03	1.2E-03	7.4E-03	8.7E-03	9.5E-03	1.0E-02	1.2E-02	1.3
ET	1.9E-03	1.9E-04	1.6E-03	1.8E-03	1.9E-03	2.1E-03	2.4E-03	1.2
GB wall	2.7E-02	7.2E-03	1.6E-02	2.2E-02	2.6E-02	3.1E-02	4.4E-02	1.6
Ht wall	3.9E-03	2.1E-04	3.5E-03	3.7E-03	3.9E-03	4.0E-03	4.3E-03	1.1
Kidneys	1.5E-02	1.8E-03	1.2E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.6E-02	1.9E-02	1.3
Lymph	6.5E-03	3.1E-04	5.9E-03	6.3E-03	6.5E-03	6.7E-03	7.1E-03	1.1
Muscle	2.8E-03	2.2E-04	2.4E-03	2.6E-03	2.7E-03	2.9E-03	3.2E-03	1.2
O mucosa	1.9E-03	2.0E-04	1.6E-03	1.8E-03	1.9E-03	2.0E-03	2.4E-03	1.2
Pancreas	9.3E-03	1.4E-03	7.1E-03	8.3E-03	9.0E-03	9.9E-03	1.2E-02	1.3
Prostate	4.6E-03	4.2E-04	3.8E-03	4.3E-03	4.6E-03	4.9E-03	5.4E-03	1.2
SI wall	8.7E-03	4.8E-04	7.8E-03	8.3E-03	8.6E-03	9.0E-03	9.7E-03	1.1
Spleen	4.9E-03	4.2E-04	4.1E-03	4.6E-03	4.8E-03	5.1E-03	5.8E-03	1.2
Thymus	2.5E-03	1.6E-04	2.2E-03	2.4E-03	2.5E-03	2.6E-03	2.9E-03	1.1
<i>Eff. dose</i>	5.0E-03	1.7E-04	4.7E-03	4.9E-03	5.0E-03	5.1E-03	5.4E-03	1.1

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 44. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis für ^{99m}Tc -Tetrofosmin [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	1.7E-03	1.5E-04	1.4E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.8E-03	2.0E-03	1.2
Breast	1.6E-03	1.6E-04	1.3E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.9E-03	1.2
Colon	9.9E-03	6.9E-04	8.5E-03	9.4E-03	9.9E-03	1.0E-02	1.1E-02	1.2
Endosteum	3.3E-03	5.3E-04	2.4E-03	2.9E-03	3.2E-03	3.6E-03	4.5E-03	1.4
Liver	4.9E-03	3.7E-04	4.2E-03	4.6E-03	4.9E-03	5.1E-03	5.7E-03	1.2
Lungs	2.9E-03	1.3E-04	2.6E-03	2.8E-03	2.9E-03	3.0E-03	3.1E-03	1.1
Oesophagus	3.2E-03	2.4E-04	2.7E-03	3.0E-03	3.2E-03	3.3E-03	3.7E-03	1.2
R marrow	3.5E-03	2.2E-04	3.1E-03	3.3E-03	3.5E-03	3.6E-03	3.9E-03	1.1
S glands	5.5E-03	9.2E-04	3.8E-03	4.8E-03	5.4E-03	6.1E-03	7.4E-03	1.4
Skin	1.5E-03	8.3E-05	1.3E-03	1.4E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.1
St wall	4.6E-03	7.2E-04	3.6E-03	4.1E-03	4.5E-03	4.9E-03	6.6E-03	1.4
Testes	2.0E-03	2.4E-04	1.6E-03	1.9E-03	2.0E-03	2.2E-03	2.5E-03	1.3
Thyroid	2.6E-03	1.7E-04	2.3E-03	2.5E-03	2.6E-03	2.7E-03	2.9E-03	1.1
UB wall	1.1E-02	2.5E-03	7.8E-03	9.6E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.7E-02	1.5
Adrenals	6.0E-03	8.2E-04	4.7E-03	5.4E-03	5.9E-03	6.4E-03	7.8E-03	1.3
ET	2.0E-03	2.0E-04	1.6E-03	1.8E-03	2.0E-03	2.1E-03	2.4E-03	1.2
GB wall	2.4E-02	7.1E-03	1.4E-02	1.9E-02	2.3E-02	2.8E-02	4.2E-02	1.7
Ht wall	3.2E-03	1.8E-04	2.8E-03	3.0E-03	3.2E-03	3.3E-03	3.5E-03	1.1
Kidneys	8.1E-03	8.0E-04	6.7E-03	7.4E-03	8.0E-03	8.6E-03	9.6E-03	1.2
Lymph	6.2E-03	3.0E-04	5.6E-03	6.0E-03	6.2E-03	6.4E-03	6.8E-03	1.1
Muscle	2.8E-03	2.5E-04	2.3E-03	2.6E-03	2.8E-03	2.9E-03	3.2E-03	1.2
O mucosa	1.9E-03	2.0E-04	1.6E-03	1.8E-03	1.9E-03	2.1E-03	2.4E-03	1.2
Pancreas	7.3E-03	1.5E-03	5.3E-03	6.4E-03	7.1E-03	7.8E-03	1.1E-02	1.4
Prostate	5.8E-03	4.1E-04	5.0E-03	5.6E-03	5.8E-03	6.1E-03	6.7E-03	1.2
SI wall	8.3E-03	5.5E-04	7.2E-03	7.9E-03	8.3E-03	8.6E-03	9.4E-03	1.1
Spleen	3.8E-03	3.9E-04	3.1E-03	3.5E-03	3.7E-03	4.0E-03	4.6E-03	1.2
Thymus	2.4E-03	1.6E-04	2.1E-03	2.3E-03	2.4E-03	2.5E-03	2.7E-03	1.1
<i>Eff. dose</i>	4.6E-03	1.9E-04	4.3E-03	4.5E-03	4.6E-03	4.7E-03	5.0E-03	1.1

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 45. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis für ^{99m}Tc -MAA [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	7.0E-04	8.4E-05	5.5E-04	6.4E-04	6.8E-04	7.4E-04	8.8E-04	1.3
Breast	4.5E-03	1.5E-03	2.4E-03	3.4E-03	4.2E-03	5.2E-03	8.1E-03	1.8
Colon	2.7E-03	6.1E-04	1.9E-03	2.3E-03	2.6E-03	3.0E-03	4.3E-03	1.5
Endosteum	3.5E-03	1.1E-03	2.1E-03	2.7E-03	3.3E-03	4.0E-03	6.1E-03	1.7
Liver	1.2E-02	2.2E-03	8.5E-03	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.7E-02	1.4
Lungs	2.7E-02	8.0E-03	1.5E-02	2.1E-02	2.5E-02	3.1E-02	4.6E-02	1.7
Oesophagus	1.1E-02	3.6E-03	5.9E-03	8.5E-03	1.0E-02	1.3E-02	1.9E-02	1.8
R marrow	4.4E-03	1.5E-03	2.4E-03	3.4E-03	4.1E-03	5.1E-03	8.2E-03	1.8
S glands	1.1E-03	2.6E-04	7.1E-04	9.0E-04	1.0E-03	1.2E-03	1.7E-03	1.6
Skin	1.3E-03	3.8E-04	8.1E-04	1.0E-03	1.2E-03	1.5E-03	2.2E-03	1.7
St wall	6.2E-03	1.4E-03	4.1E-03	5.2E-03	6.0E-03	6.9E-03	9.3E-03	1.5
Testes	7.5E-04	8.5E-05	5.9E-04	6.9E-04	7.5E-04	8.1E-04	9.2E-04	1.3
Thyroid	5.0E-03	1.9E-03	2.5E-03	3.6E-03	4.7E-03	5.9E-03	9.7E-03	2.0
UB wall	5.7E-03	1.7E-03	3.3E-03	4.5E-03	5.4E-03	6.6E-03	9.8E-03	1.7
Adrenals	7.0E-03	1.6E-03	4.7E-03	5.9E-03	6.7E-03	7.9E-03	1.1E-02	1.5
ET	1.0E-03	2.0E-04	7.5E-04	8.9E-04	1.0E-03	1.1E-03	1.5E-03	1.4
GB wall	8.3E-03	1.4E-03	5.9E-03	7.3E-03	8.1E-03	9.1E-03	1.1E-02	1.4
Ht wall	1.2E-02	4.2E-03	5.9E-03	8.6E-03	1.1E-02	1.4E-02	2.2E-02	1.9
Kidneys	4.3E-03	8.6E-04	3.0E-03	3.7E-03	4.1E-03	4.8E-03	6.4E-03	1.5
Lymph	5.2E-03	6.0E-04	4.0E-03	4.7E-03	5.2E-03	5.6E-03	6.3E-03	1.2
Muscle	2.4E-03	6.3E-04	1.5E-03	1.9E-03	2.3E-03	2.7E-03	3.8E-03	1.6
O mucosa	1.3E-03	1.5E-04	1.1E-03	1.2E-03	1.3E-03	1.4E-03	1.7E-03	1.2
Pancreas	5.8E-03	1.2E-03	3.8E-03	4.9E-03	5.7E-03	6.5E-03	8.5E-03	1.5
Prostate	2.8E-03	2.9E-04	2.2E-03	2.6E-03	2.8E-03	3.0E-03	3.3E-03	1.2
SI wall	2.5E-03	3.3E-04	2.0E-03	2.2E-03	2.4E-03	2.6E-03	3.2E-03	1.3
Spleen	6.5E-03	2.7E-03	3.1E-03	4.6E-03	5.9E-03	7.8E-03	1.4E-02	2.1
Thymus	8.8E-03	4.3E-03	3.5E-03	5.9E-03	7.8E-03	1.1E-02	2.0E-02	2.4
<i>Eff. dose</i>	7.5E-03	1.1E-03	5.6E-03	6.8E-03	7.3E-03	8.0E-03	9.9E-03	1.3

¹⁾ Uncertainty factor

TABELLE 46. Organdosiskoeffizienten und Koeffizient der effektiven Dosis für ^{201}TI -Chlorid [mGy/MBq]

Target	Mean	STD	2.5th Percentile	25th Percentile	50th Percentile	75th Percentile	97.5th Percentile	UF ¹⁾
Brain	2.6E-02	6.3E-03	1.4E-02	2.1E-02	2.5E-02	3.0E-02	3.9E-02	1.6
Breast	2.9E-02	5.2E-03	1.9E-02	2.5E-02	2.9E-02	3.2E-02	4.0E-02	1.4
Colon	8.3E-02	6.5E-03	7.1E-02	7.9E-02	8.3E-02	8.8E-02	9.7E-02	1.2
Endosteum	8.7E-02	7.5E-03	7.3E-02	8.2E-02	8.7E-02	9.2E-02	1.0E-01	1.2
Liver	1.9E-01	2.7E-02	1.4E-01	1.7E-01	1.9E-01	2.0E-01	2.4E-01	1.3
Lungs	1.4E-01	1.7E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.7E-01	1.3
Oesophagus	5.6E-02	5.3E-03	4.6E-02	5.2E-02	5.5E-02	5.9E-02	6.6E-02	1.2
R marrow	1.5E-01	1.7E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.6E-01	1.8E-01	1.2
S glands	2.8E-02	5.0E-03	1.9E-02	2.4E-02	2.8E-02	3.1E-02	3.8E-02	1.4
Skin	2.5E-02	4.9E-03	1.6E-02	2.1E-02	2.5E-02	2.8E-02	3.5E-02	1.5
St wall	2.0E-01	7.7E-02	1.0E-01	1.5E-01	1.8E-01	2.4E-01	4.0E-01	2.0
Testes	2.3E-01	3.8E-02	1.5E-01	2.0E-01	2.2E-01	2.5E-01	3.2E-01	1.4
Thyroid	3.5E-01	7.7E-02	2.2E-01	2.9E-01	3.4E-01	3.9E-01	5.2E-01	1.5
UB wall	4.5E-02	5.9E-03	3.4E-02	4.1E-02	4.5E-02	4.8E-02	5.8E-02	1.3
Adrenals	8.9E-02	8.9E-03	7.3E-02	8.3E-02	8.9E-02	9.5E-02	1.1E-01	1.2
ET	3.0E-02	5.0E-03	2.1E-02	2.6E-02	3.0E-02	3.3E-02	4.0E-02	1.4
GB wall	8.3E-02	8.7E-03	6.6E-02	7.6E-02	8.3E-02	8.9E-02	1.0E-01	1.2
Ht wall	1.9E-01	4.6E-02	1.3E-01	1.6E-01	1.9E-01	2.2E-01	3.0E-01	1.5
Kidneys	5.1E-01	9.0E-02	3.5E-01	4.5E-01	5.1E-01	5.7E-01	7.0E-01	1.4
Lymph	5.9E-02	5.3E-03	5.0E-02	5.6E-02	5.9E-02	6.3E-02	7.0E-02	1.2
Muscle	7.1E-02	1.0E-02	5.3E-02	6.4E-02	7.0E-02	7.8E-02	9.1E-02	1.3
O mucosa	2.9E-02	5.3E-03	2.0E-02	2.5E-02	2.9E-02	3.3E-02	4.0E-02	1.4
Pancreas	8.0E-02	7.3E-03	6.8E-02	7.5E-02	8.0E-02	8.5E-02	9.5E-02	1.2
Prostate	4.1E-02	6.4E-03	3.1E-02	3.7E-02	4.1E-02	4.5E-02	5.5E-02	1.3
SI wall	3.7E-01	2.1E-01	1.4E-01	2.3E-01	3.2E-01	4.5E-01	9.3E-01	2.6
Spleen	1.7E-01	1.8E-02	1.3E-01	1.6E-01	1.7E-01	1.8E-01	2.0E-01	1.2
Thymus	4.3E-02	6.1E-03	3.2E-02	3.8E-02	4.3E-02	4.7E-02	5.6E-02	1.3
<i>Eff. dose</i>	1.3E-01	1.1E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.6E-01	1.2

¹⁾ Uncertainty factor

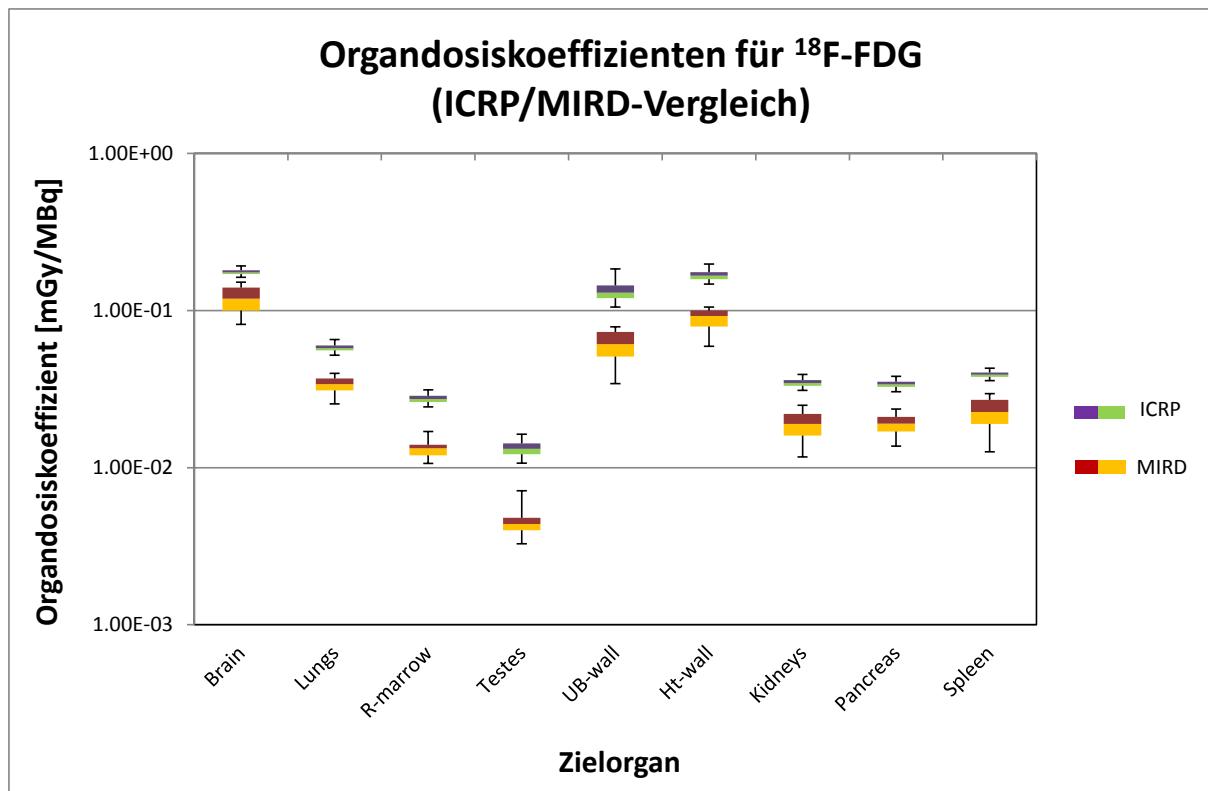


ABBILDUNG 22. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{18}F -FDG nach ICRP- und MIRD-Schemas

6.5 Vergleich von Dosiskoeffizienten mit Literaturwerten

Die berechneten Mittelwerte der Organdosiskoeffizienten wurden mit den in verschiedenen Publikationen angegebenen Werten verglichen. Man untersuchte, ob diese Referenzwerte innerhalb der berechneten Unsicherheitsintervalle liegen. Für einige Zielorgane waren keine Organdosiskoeffizienten in der Literatur vorhanden. Aus diesem Grund sind für diese Organe in den folgenden Abbildungen keine Referenzwerte abgebildet.

Für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG wurden die nach dem MIRD-Schema berechneten Organdosiskoeffizienten mit den Werten von Hays et al. aus der MIRD Publikation Nr. 19 [28] verglichen (Abbildung 23). Die Referenzwerte von Hays et al. liegen bei den Organen Gehirn, Lunge und Hoden außerhalb des berechneten Unsicherheitsintervalls.

Zu den berechneten Organdosiskoeffizienten nach dem ICRP-Schema wurden bei ^{18}F -FDG zum Vergleich Werte aus verschiedenen Publikationen der ICRP [38-40], des MIRD-Komitees [28] und aus anderen zahlreichen Publikationen [8, 16, 17, 43, 45, 60, 68] herangezogen (Abbildung 24).

Bei der Berechnung von Dosiskoeffizienten verwendete Mejia et al. [60] den MIRD-Formalismus. Werte für fast alle Organe entsprangen den Messungen an Menschen. Nur im Falle von rotem Knochenmark und Hoden verwendete man die Daten aus den Tiermessungen.

Die mit * gekennzeichnete Spalte aus der Tabelle 93 stellt Ergebnisse einer Berechnung dar, bei der die S-Faktoren umgerechnet auf einen amerikanischen und europäischen Referenz-Erwachsenen zur Hilfe gezogen wurden.

Bei Reivich et al. [68] entstammen die Berechnungen den Daten aus den Messungen an Hunden. Es wurde das biokinetische Modell vom MIRD-Komitee verwendet.

Jones et al. [43] bestimmte die Dosiskoeffizienten vom Gehirn aus den Daten von elf Probanden im Alter von 20 bis 68 Jahren. Für die restlichen Organe bediente man sich der Daten aus den Messungen an Hunden. Als biokinetisches Modell diente das Modell vom MIRD-Komitee.

Bei Hays et al. [28] lieferten sechs Männer und eine Frau im Alter von 55 bis 74 Jahren nach der intravenösen Verabreichung von FDG Daten für die Bestimmung von Dosiskoeffizienten.

Bei Deloar et al. [16] bezeichnet die Spalte † in der Tabelle 93 die Dosiskoeffizienten, die aus den Messungen mittels Magnetresonanztomographie (MRT) gewonnen wurden. In der Spalte * der Tabelle 94 sind Werte aus den Messungen am MIRD-Phantom [14], in Spalte ‡ stehen Dosiskoeffizienten, die aus den Daten der Messung am „Japanese reference man“ [85] entstanden sind und die in der Spalte § stehenden Werte entstammen Messungen an sechs Probanden nach der Thermolumineszenz-Dosimeter-Methode (TLD-Methode).

Khamwan et al. [45] sammelte Daten von 35 onkologisch kranken Thai-Patienten im Alter von 28 bis 60 Jahren nach Verabreichung von ¹⁸F-FDG und verwendete sie zur Bestimmung von Dosiskoeffizienten nach dem MIRD-Modell.

Die unterschiedliche Herangehensweise bei der Bestimmung von Dosiskoeffizienten führt dazu, dass die Referenzwerte für einige Organe einer starken Streuung unterlegen sind (Abbildung 24). So ist, verglichen mit dem berechneten Wert der Lunge von 0,0208 [mGy MBq⁻¹], der Wert von Khaman et al. 0,0046 [mGy MBq⁻¹] und der von Mejia et al. 0,094 [mGy MBq⁻¹]. Bei der Milz ist der berechnete Wert 0,0122 [mGy MBq⁻¹] und die Werte von Reivich et al. und Jones et al. liegen mit 0,05 [mGy MBq⁻¹] bzw. 0,04 [mGy MBq⁻¹] deutlich außerhalb des Unsicherheitsbereichs. Ähnlich ist es beim Vergleich des berechneten Mittelwerts für Haut von 0,00813 [mGy MBq⁻¹] mit dem von Khaman et al. 0,0011 [mGy MBq⁻¹], oder dem Mittelwert für Brust 0,01 [mGy MBq⁻¹] verglichen mit dem Wert von Khaman 0,0733 [mGy MBq⁻¹]. Für die restlichen Zielorgane liegen alle Referenzwerte innerhalb oder in der Nähe des berechneten Unsicherheitsbereichs.

Bei ^{99m}Tc-Pertechnetate wurden zum Vergleich Referenzwerte aus den ICRP-Publikationen [38, 39] und Werte des MIRD-Komitees [1] genommen (Abbildung 25). Für Brust, Leber, Lunge, Nieren, Milz und Thymus liegen diese Werte innerhalb des Unsicherheitsbereichs. Für alle anderen Zielorgane wurden zum Teil starke Abweichungen festgestellt.

Die berechneten Werte für Organdosiskoeffizienten für das Radiopharmazeutikum ^{99m}Tc-MAA wurden mit den Referenzwerten aus den ICRP-Publikationen [38, 39] verglichen. Wie Abbildung 26 zu entnehmen ist, liegen die ICRP-Werte meistens in dem berechneten Unsicherheitsbereich. Die Ausnahmen bilden die Lunge und die Hoden. Hier liegen die Referenzwerte der ICRP oberhalb des Unsicherheitsbereichs. Aber auch bei den Organen Gehirn und Harnblase liegen die ICRP-Werte an der oberen Unsicherheitsgrenze oder teilweise auch leicht oberhalb der Unsicherheitsspanne.

Bei dem Radiopharmazeutikum ^{99m}Tc -Phosphonat wurden zum Vergleich Organdosiskoeffizienten aus den ICRP-Publikationen Nr. 53 [39] und Nr. 80 [38] und aus der Publikation von Subramanian et al. [84] herangezogen (Abbildung 27). Subramanian verwendete bei der Berechnung Daten aus den Studien an Hunden. Wie man aus der Abbildung ersehen kann, liegen alle Werte mit Ausnahme des roten Knochenmarks, der Hoden und der Nieren innerhalb der berechneten Unsicherheit. Die Referenzwerte für die Harnblase liegen an der oberen Grenze des Unsicherheitsbereichs.

Abbildung 28 zeigt den Vergleich der berechneten Unsicherheiten der Organdosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Sestamibi mit den Referenzwerten aus der ICRP-Publikation Nr. 80 [38] und den Publikationen von Higley et al. [30] und Wackers et al. [87]. Wackers verwendete bei der Berechnung Daten von 12 Probanden. Die Dosiskoeffizienten, die Higley et al. [30] angibt, sind modifizierte Daten aus Leide et al. [50]. Wie man aus der Abbildung ersehen kann, passen die Werte von Higley et al. am besten mit den berechneten Organdosiskoeffizienten für viele Organe zusammen. Die Referenzwerte der ICRP und von Wackers et al. liegen meistens oberhalb des berechneten Unsicherheitsbereichs. Die Ausnahmen bilden hier die Leber und die Lunge, bei denen die Werte von Wackers et al. unterhalb der Unsicherheit liegen, und die Gallenblase, die Nieren und die Milz, bei denen die Werte von Wackers et al. innerhalb der Unsicherheitsspanne liegen.

In Abbildung 29 ist der Vergleich der Organdosiskoeffizienten von ^{99m}Tc -Tetrofosmin mit den Referenzwerten aus der ICRP-Publikation Nr. 80 [38] und der Publikation von Higley et al. [30], der Daten von 12 männlichen Probanden zur Berechnung verwendet hat, dargestellt. Wie man aus der Grafik ersehen kann, passen die Werte von Higley et al. besser mit den berechneten Organdosiskoeffizienten zusammen als die Referenzwerte der ICRP. Die Ausnahmen bilden die Harnblase, die Hoden und die Gallenblase. Hier liegt der ICRP-Wert innerhalb des Unsicherheitsintervalls, die Werte von Higley et al. jedoch außerhalb.

Die berechneten Organdosiskoeffizienten von ^{201}TI -Chlorid wurden mit den Referenzwerten aus den ICRP-Publikationen [38-40] und zahlreichen anderen Publikation [5, 11, 30, 46, 86] verglichen (Abbildung 30).

Thomas et al. [86] verwendete bei der Berechnung Daten von 28 Probanden aus 56 Studien. Außerdem wurden ältere Daten von 15 Patienten hinzugezogen in dem sie neu analysiert wurden. Auch Castronovo et al. [11] verwendete humane Studien. Krahwinkel et al. [46] nutzte Daten sowohl aus Tierversuchen als auch aus humanen Studien und Higley et al. [30] gibt modifizierte Dosiskoeffizienten aus Leide et al. [50] an.

Wie man der Grafik entnehmen kann, unterschätzt Krahwinkel et al. die berechneten Dosiskoeffizienten für fast alle Organe. Während die Werte der restlichen Autoren und der ICRP-Publikationen für viele Organe innerhalb des berechneten Unsicherheitsbereichs liegen, befinden sich die Werte von Krahwinkel et al. deutlich unterhalb des Intervalls.

Abbildung 31 zeigt den Vergleich der berechneten Koeffizienten der effektiven Dosis mit den Referenzwerten aus diversen ICRP-Publikationen [38-40]. Bei ^{18}F -FDG, ^{99m}Tc -MAA und ^{99m}Tc -Tetrofosmin passen die Referenzwerte sehr gut mit den berechneten Werten zusammen. Die

Referenzwerte für ^{99m}Tc -Pertechnetat, ^{99m}Tc -Phosphonat und ^{99m}Tc -Sestamibi liegen an der Grenze bzw. oberhalb des berechneten Unsicherheitsintervalls. Bei ^{201}TI -Chlorid liegt der Referenzwert aus der ICRP-Publikation Nr. 106 innerhalb, die Referenzwerte aus den ICRP-Publikationen Nr. 53 und Nr. 80 aber außerhalb des Unsicherheitsbereichs.

Bei Berechnung der Unsicherheiten von Koeffizienten der effektiven Dosis wurde die Unsicherheit im Gewebe-Wichtungsfaktor nicht berücksichtigt, da diese von der ICRP nicht angegeben war. Exemplarisch wurden jedoch Berechnungen mit variablen Gewebe-Wichtungsfaktoren vorgenommen. Für die Gewebe-Wichtungsfaktoren nahm man einen Variationskoeffizienten von 20 % an. Es stellte sich heraus, dass dies keinen signifikanten Effekt (weniger als 1 %) auf die Unsicherheit von Koeffizienten der effektiven Dosis hat.

Der Literaturwert von ICRP liegt oft nicht im berechneten Unsicherheitsbereich der Organdosiskoeffizienten, obwohl mit den von der ICRP angegebenen biokinetischen Modellparametern gerechnet wurde. Das liegt unter anderem daran, dass die ICRP die aus dem mathematischen Phantom berechneten S-Faktoren nutzt. Diese S-Faktoren weichen jedoch oft sehr stark von den von uns benutzten S-Faktoren ab.

Um die Unterschiede der Organdosiskoeffizienten zu demonstrieren, die mit gleicher zeitintegrierter Aktivität, jedoch mit unterschiedlichen S-Faktoren berechnet wurden, sind in Tabelle 47 Organdosiskoeffizienten gezeigt, die mit dem männlichen und weiblichen Referenzphantomen [89] und dem mathematischen Phantom [74] berechnet wurden. Die Berechnungen wurden für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG durchgeführt.

TABELLE 47 Vergleich von Organdosiskoeffizienten [mGy/MBq], berechnet aus Referenz-Voxel-Phantomen und aus mathematischen Phantomen für ^{18}F -FDG

Target	Voxel	Math.	Voxel	Math.	Male	Female
	Phantom	Phantom	Phantom	Phantom	Phantom	Phantom
	Male	Male	Female	Female	Voxel to Math.	Voxel to Math.
Brain	3.5E-02	3.8E-02	3.9E-02	4.4E-02	8.5 %	13.0 %
Breast	9.1E-03	9.2E-03	1.2E-02	1.1E-02	1.6 %	5.4 %
Colon	1.2E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.5E-02	6.7 %	2.4 %
Liver	2.2E-02	2.2E-02	2.7E-02	2.8E-02	0.1 %	3.8 %
Lungs	2.0E-02	2.0E-02	2.4E-02	2.5E-02	0.4 %	3.6 %
R marrow	1.2E-02	1.2E-02	1.4E-02	1.4E-02	6.4 %	4.2 %
Skin	7.3E-03	8.3E-03	8.7E-03	9.7E-03	13.8 %	11.6 %
St wall	1.2E-02	1.1E-02	1.4E-02	1.3E-02	10.7 %	3.1 %
Thyroid	1.0E-02	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	8.6 %	7.7 %
UB wall	6.9E-02	2.2E-01	1.0E-01	2.8E-01	212.8 %	184.8 %
Adrenals	1.3E-02	1.3E-02	1.6E-02	1.5E-02	0.4 %	2.0 %
ET	1.0E-02	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	3.9 %	3.7 %
GB wall	1.4E-02	1.3E-02	1.6E-02	1.5E-02	7.9 %	7.6 %
Ht wall	6.2E-02	6.7E-02	7.9E-02	8.9E-02	7.2 %	12.2 %
Kidneys	1.2E-02	1.1E-02	1.4E-02	1.4E-02	3.1 %	0.9 %
Muscle	9.5E-03	1.1E-02	1.1E-02	1.3E-02	14.4 %	12.1 %
Pancreas	1.3E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.6E-02	2.6 %	14.2 %
SI wall	1.3E-02	1.2E-02	1.6E-02	1.5E-02	5.2 %	6.9 %
Spleen	1.2E-02	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	4.0 %	1.8 %
Thymus	1.2E-02	1.2E-02	1.6E-02	1.4E-02	3.2 %	7.5 %

*R marrow – red marrow; St wall – stomach wall; UB wall – urinary bladder wall; ET - extrathoracic; GB wall – gall bladder wall; Ht wall – heart wall; SI wall – small intestine wall

Wie man aus der Tabelle ersieht liegen sehr große Unterschiede für das Organ „Harnblase“ vor. Verglichen mit den Referenzphantomen haben die mathematischen Phantome einen ganz anderen Aufbau. Hier werden die Organe im Unterschied zu voxelisierten Phantomen, durch geometrische Figuren (Kreise, Ellipsen etc.) mathematisch beschrieben. Außerdem wurden bei den mathematischen Phantomen die spezifischen Bruchteile der Energien (SAF) für Elektronen nicht explizit simuliert, sondern nach der Beziehung (5.10) approximiert. Zankl et al. [89] zeigte, dass die Unterschiede bei den Berechnungen von Organdosiskoeffizienten mit mathematischen Phantomen und Voxel-Phantomen größer als 150 % betragen können.

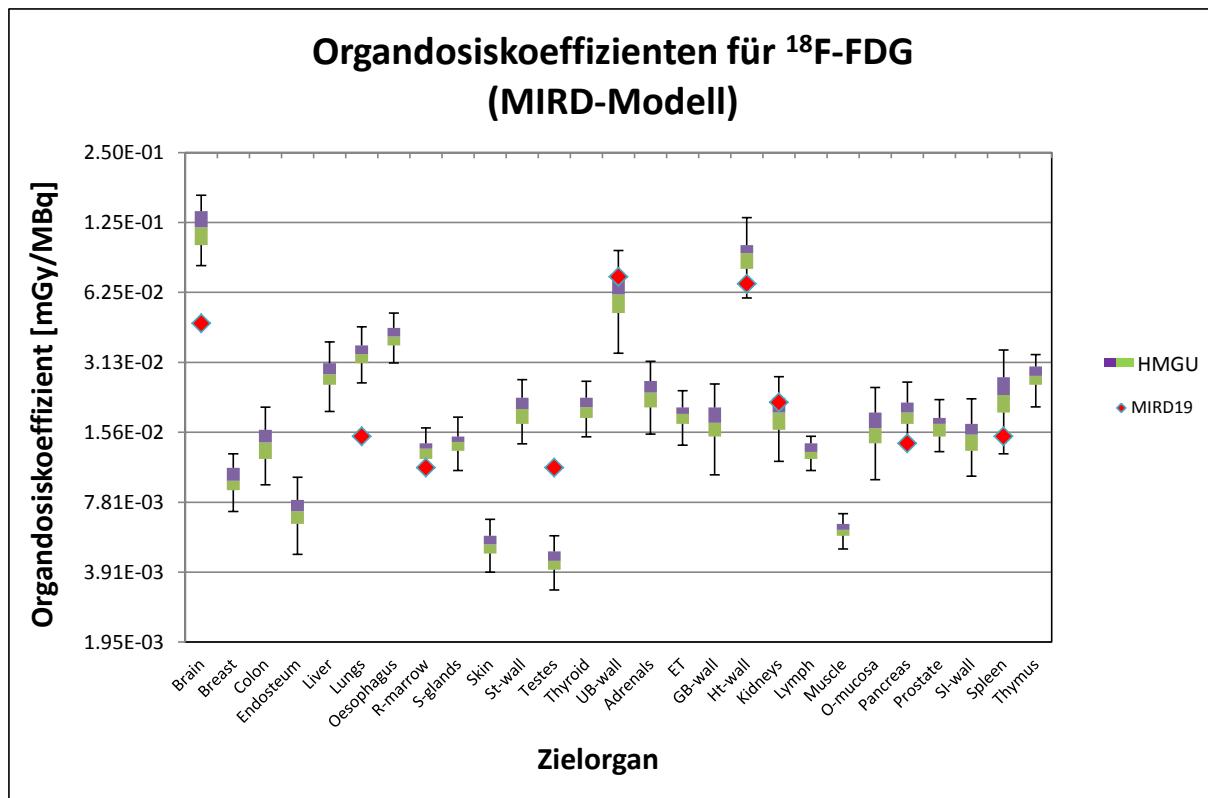


ABBILDUNG 23. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{18}F -FDG nach dem MIRD-Schema mit den Referenzwertenwerten

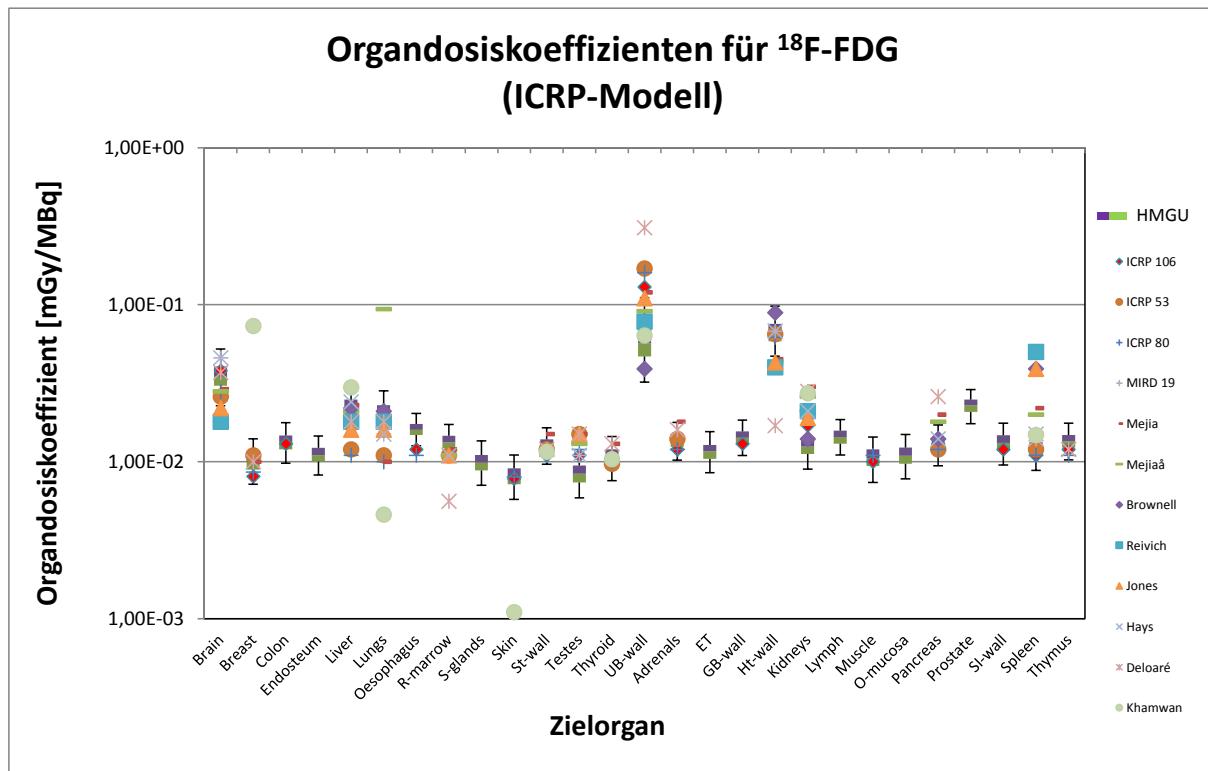


ABBILDUNG 24. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{18}F -FDG mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

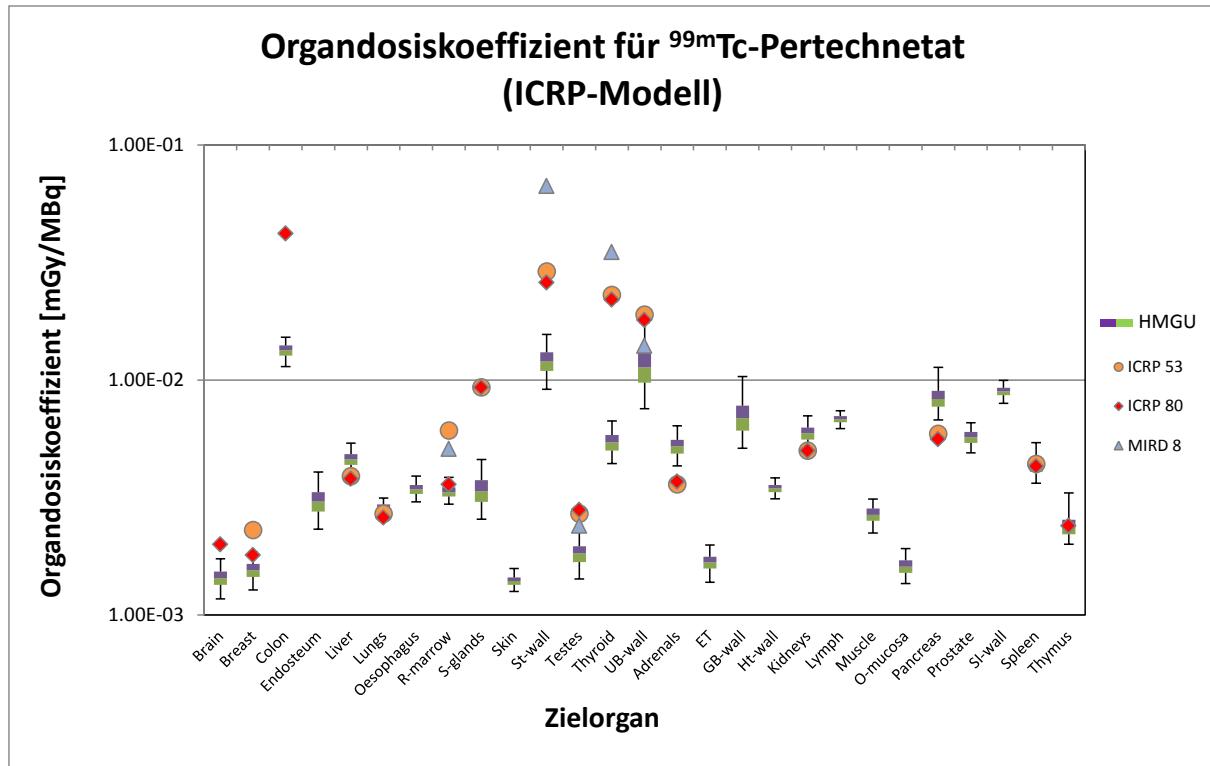


ABBILDUNG 25. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Pertechnetat mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

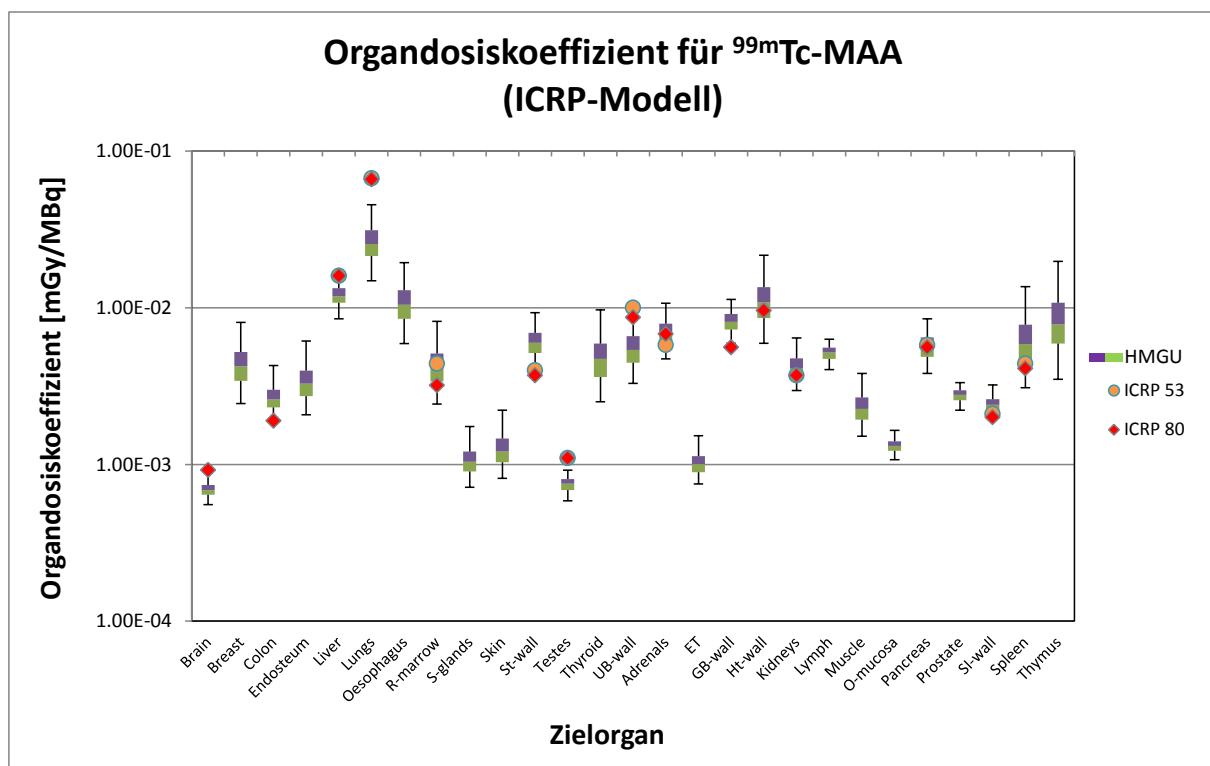


ABBILDUNG 26. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -MAA mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

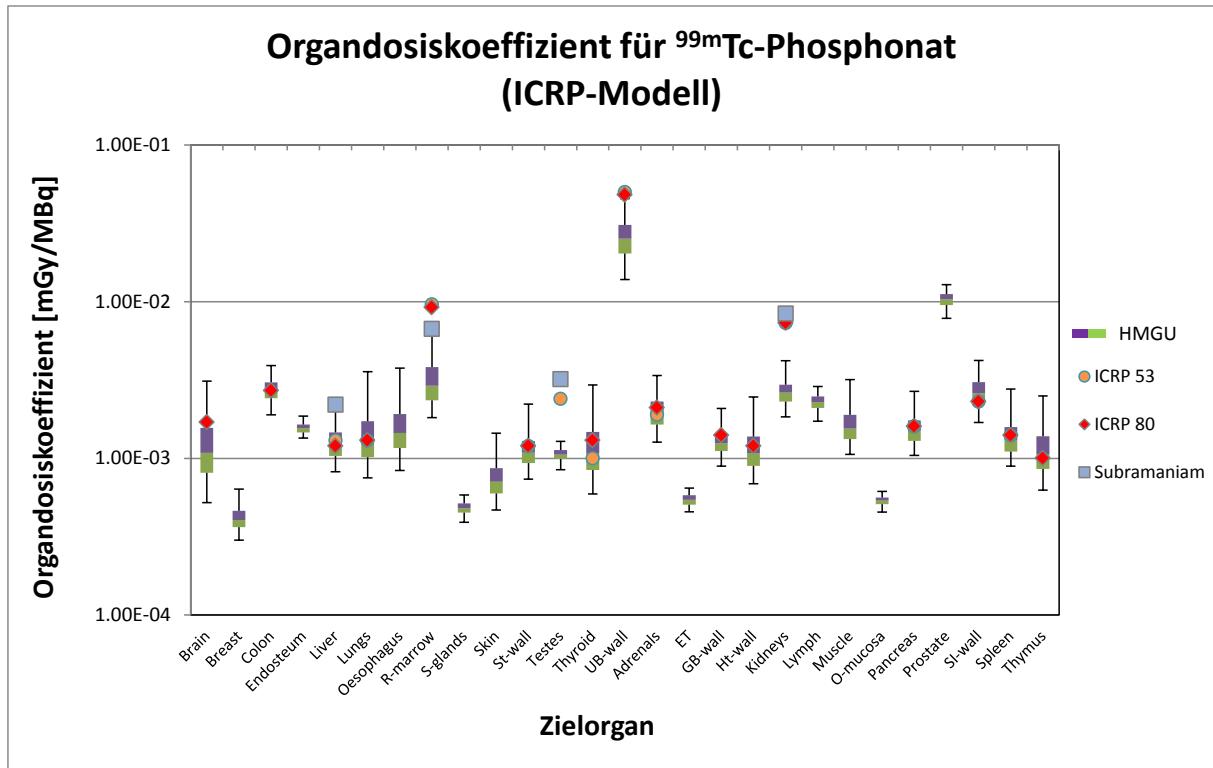


ABBILDUNG 27. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Phosphonat mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

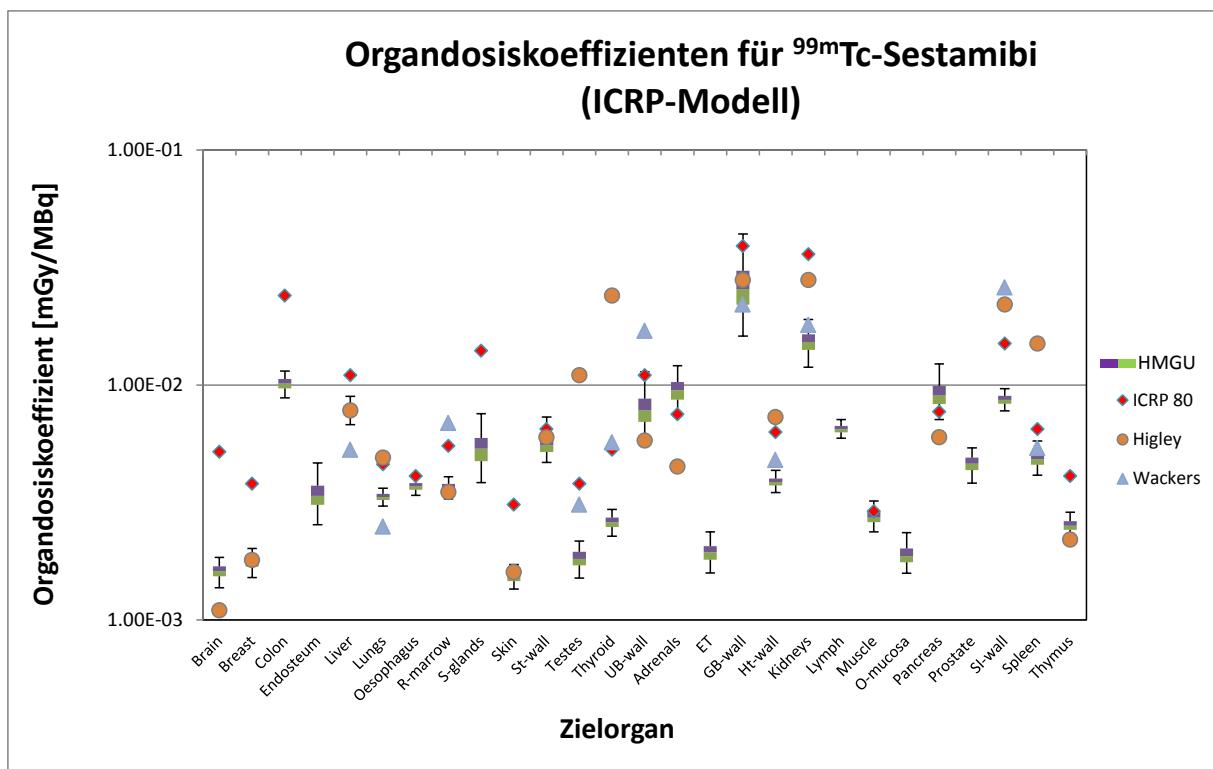


ABBILDUNG 28. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Sestamibi mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

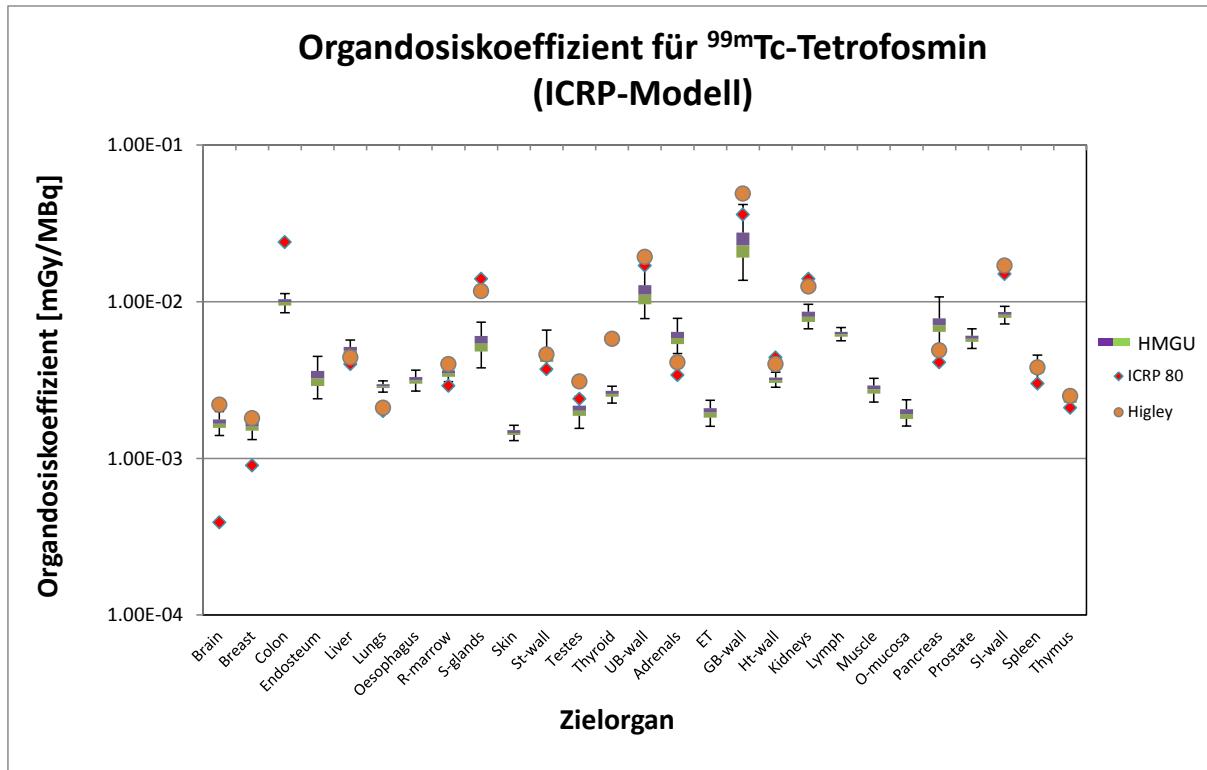


ABBILDUNG 29. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Tetrofosmin mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

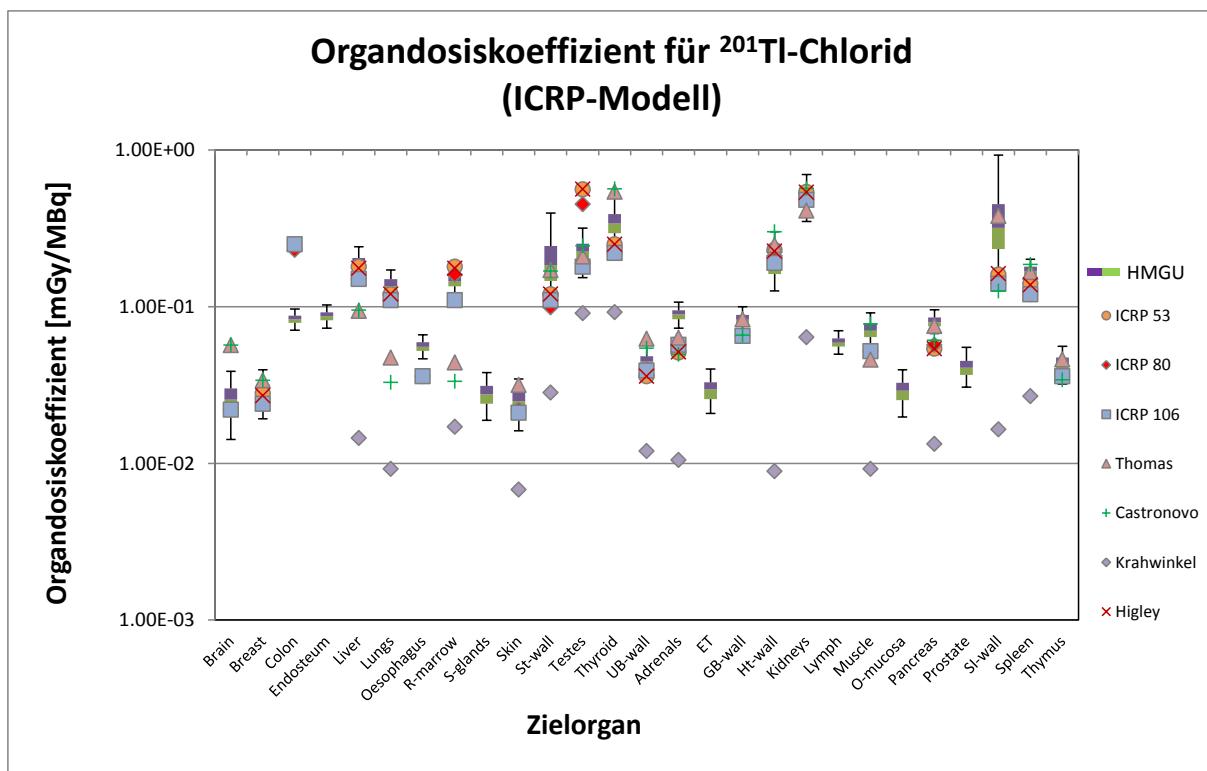


ABBILDUNG 30. Vergleich von berechneten Organdosiskoeffizienten für ^{201}TI -Chlorid mit den Werten aus verschiedenen Publikationen

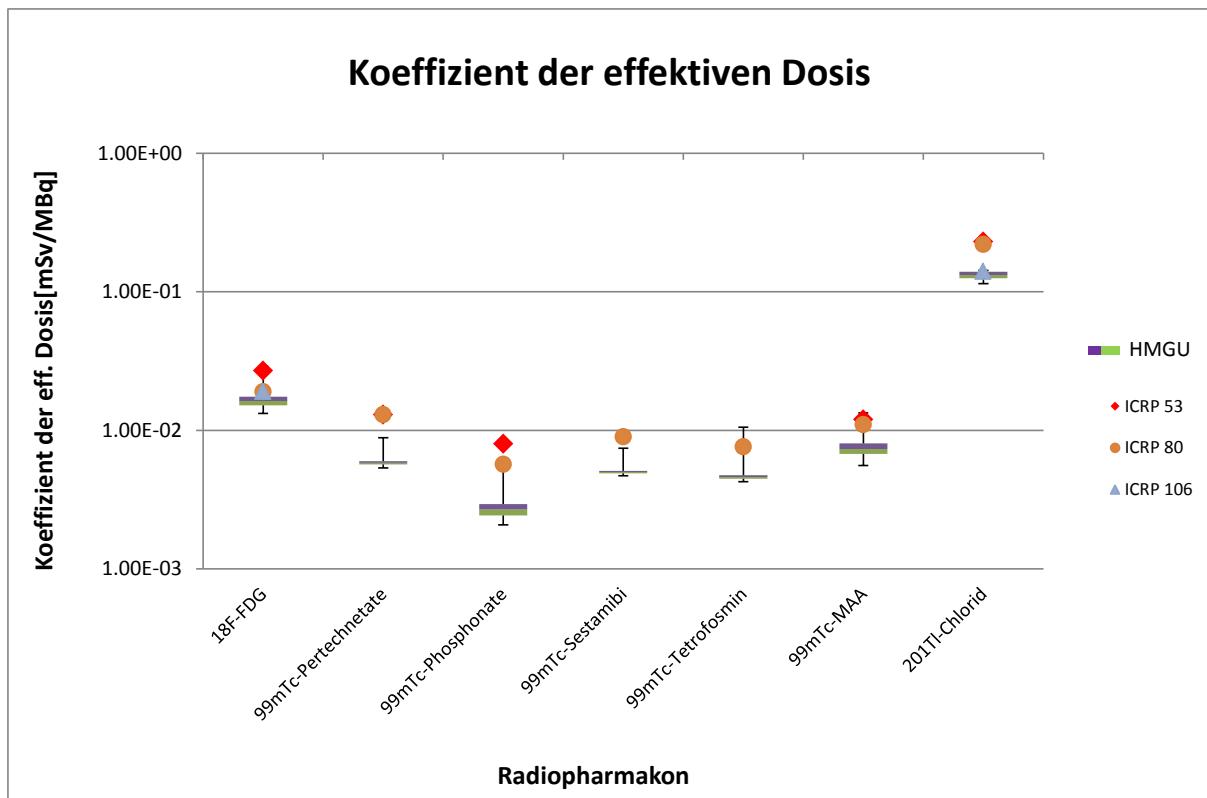


ABBILDUNG 31. Vergleich von berechneten Koeffizienten der effektiven Dosis für verschiedene Radiopharmazeutika mit den Literaturwerten

6.6 Sensitivitätsmaß als Indikator (measure or index)

Die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse entstandenen Ergebnisse zu den Korrelationen zwischen den Eingangsgrößen eines mathematischen Modells, präsentiert durch die Gleichung (4.13), und dessen Ausgangsgrößen werden in den nächsten Kapiteln vorgestellt und diskutiert. Konzentriert wurde sich dabei auf die Biokinistik, in dem die dosimetrische Größe, die S-Faktoren, fixiert wurden, man sie also nicht variieren ließ. Als Eingangsgrößen fungierten hier die biokinetischen Parameter und die zeitintegrierte Aktivität bzw. die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität in den Quellorganen. Im Folgenden werden demnach die Ergebnisse der Korrelationen der Paare Parameter-zu-Aktivität, Aktivität-zu-Dosis sowie Parameter-zu-Dosis vorgestellt.

6.6.1 Korrelation zwischen den biokinetischen Parametern und der Aktivität

In den Tabellen 48-55 ist der partielle Rangkorrelationskoeffizient zwischen den biokinetischen Parametern und der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität in den Quellorganen dargestellt. Zur besseren Unterscheidung sind Werte größer als 0,7 bzw. kleiner als -0,7 rot unterlegt

und fett markiert. Die Rangkorrelationskoeffizienten für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG sind in den Tabellen 48-49 dargestellt, wobei die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität in den Quellorganen für die Werte in der Tabelle 48 nach dem MIRD-Schema (4.37) und in der

Tabelle 49 nach dem ICRP-Schema (4.40) berechnet wurden. Die für die Ermittlung der Rangkorrelationskoeffizienten (Tabelle 50-55) verwendete mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für die restlichen Radiopharmazeutika wurde, wie oben erwähnt, nach dem ICRP-Schema berechnet.

Im Unterschied zum MIRD-Konzept benutzt die ICRP eine explizite mathematische Formel (4.40) zur Berechnung der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität im Quellorgan. Hier wird die Aktivität in einem Organ aus „seinen“ biokinetischen Parametern direkt berechnet und steht mit den Parametern eines anderen Organs nicht in Verbindung. Aus diesem Grund erwartet man hier keine großen Korrelationen zwischen den biokinetischen Parametern eines Organs und der effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität in einem anderen Organ. Die Ergebnisse aus den untenstehenden Tabellen spiegeln diesen Sachverhalt wider. Schaut man sich beispielsweise die partiellen Rangkorrelationskoeffizienten zwischen den Parametern und den effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität für das Radiopharmazeutikum $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetat an, so stellt man fest, dass die größten Korrelationen diejenigen, zwischen den Parametern und den zugehörigen Organen sind. Den Tabellen kann man auch entnehmen, dass der Parameter F_S am stärksten mit der effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität der Organe korreliert. Der Wert liegt für alle Radiopharmazeutika meistens über 95 %, die Ausnahmen bildet die Schilddrüse bei den Radiopharmazeutika $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi und $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin. Die Werte haben hier einen Wert von 88 % bzw. 89 %. Wie man aus den Tabellen ersehen kann, haben einige Parameter-Organ-Paare eine Korrelation mit einem Wert 1. Das liegt daran, dass diese Parameter aus den anderen Parametern oder auch aus der effektiven mittleren Aufenthaltsdauer der Aktivität, wie im Abschnitt 6. beschrieben wurde, berechnet wurden. In diesem Fall stehen sie in einer direkten Verbindung zueinander und weisen entsprechend einen Korrelationskoeffizient von Wert 1 auf.

Nach dem MIRD-Schema wird die zeitintegrierte Aktivität oder die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität im Organ aus den Differentialgleichungen ermittelt. Hier steht jedes Organ (Kompartiment) und jeder Parameter eines Organs mit einem anderen in Verbindung. Man hat hier andere Quellorgane und eine von dem ICRP-Schema unterschiedliche Struktur des Modells. Trotzdem zeigt die Tabelle 48 ein ähnliches Muster wie bei den Ergebnissen, die aus den Berechnungen nach dem ICRP-Schema entstanden sind (Tabelle 49-55). Auch hier sind die Korrelationen zwischen den Parametern und den zugehörigen Organen am stärksten. So hat der biokinetische Parameter, der den Transferkoeffizienten zwischen Plasma und Urin beschreibt, mit dem Korrelationskoeffizienten von 91 % den stärksten Einfluss auf die Harnblase. Der Transferkoeffizient Plasma-zu-Leber hat die stärkste Verbindung zur Leber (95 %) und der Parameter Plasma-zu-Myokard korreliert am stärksten mit dem Quellorgan „Herz“ (99 %).

TABELLE 48. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{18}F -FDG nach MIRD-Schema

Source	Plas_RBC	RBC_Plus	Plas_Urine	Plas_WMF	WMF_Plus	WMF_WMS	WMS_WMF
Brain	-0.17	0.06	-0.10	0.46	-0.50	0.42	-0.18
Ht cont	-0.15	0.06	-0.23	-0.16	0.26	-0.22	0.07
Lungs	-0.12	0.10	-0.17	-0.26	0.26	-0.22	0.03
Liver	-0.12	0.09	-0.05	-0.09	0.13	-0.04	0.04
Others	-0.18	0.12	-0.24	-0.35	0.37	-0.23	0.06
UB cont	-0.17	0.13	0.91	-0.18	0.24	-0.25	0.03
Blood	0.87	-0.74	-0.21	-0.23	0.24	-0.25	0.05

Source	Plas_GMF	GMF_Plus	GMF_GMS	GMS_GMF	Plas_OthersF	OthersF_Plus
Brain	0.74	-0.82	0.60	-0.26	-0.81	0.75
Ht cont	-0.36	0.48	-0.29	0.12	-0.80	0.73
Lungs	-0.40	0.53	-0.32	0.15	-0.83	0.77
Liver	-0.21	0.21	-0.13	0.05	-0.51	0.37
Others	-0.55	0.67	-0.45	0.14	0.91	-0.87
UB cont	-0.41	0.52	-0.31	0.17	-0.84	0.77
Blood	-0.39	0.55	-0.34	0.14	-0.82	0.76

Source	OthersF_OthersS	Plas_LiverF	LiverF_Plus	LiverF_LiverS	Plas_Myo	Plas_Lung
Brain	-0.72	-0.14	0.07	-0.01	-0.19	0.00
Ht cont	-0.68	-0.17	0.14	-0.14	0.99	0.00
Lungs	-0.76	-0.13	0.16	-0.14	-0.14	0.96
Liver	-0.39	0.95	-0.84	0.84	-0.06	-0.01
Others	0.85	-0.26	0.12	-0.18	-0.26	-0.12
UB cont	-0.76	-0.19	0.20	-0.13	-0.18	0.03
Blood	-0.73	-0.17	0.10	-0.19	-0.17	-0.02

*Plas - plasma; RBC - red blood cells; WMF - white matter fast; WMS - white matter slow; GMF - grey matter fast; GMS - grey matter slow; OtherF - other fast; OtherS - other slow; LiverF - liver fast; LiverS - liver slow

TABELLE 49. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{18}F -FDG (nach ICRP)

Source	BrainFs	BrainTi1	HtwFs	HtwTi1	LungFs	LungTi1	LiverFs	LiverTi1
Brain	1.00	0.01	0.08	-0.02	0.12	-0.13	0.04	0.09
Ht wall	0.05	-0.01	1.00	-0.07	-0.02	-0.03	0.00	-0.04
Lungs	-0.05	0.04	0.03	0.05	1.00	0.01	0.01	0.04
Liver	-0.01	-0.01	0.04	-0.01	-0.01	0.13	1.00	0.02
Others	-0.84	0.00	-0.57	0.02	-0.49	0.03	-0.69	-0.05
UB cont	0.02	-0.04	-0.02	-0.03	-0.05	-0.01	0.01	0.06

Source	OthersTi1	Othersai1	OthersTi2	Othersai2	OthersTi3	UBcntTi1
Brain	0.06	0.05	-0.06	-0.06	-0.06	-0.02
Ht wall	0.02	0.07	0.04	-0.07	-0.01	-0.05
Lungs	0.02	-0.03	0.08	0.02	0.00	0.06
Liver	0.00	-0.04	0.01	0.04	0.00	0.01
Others	0.15	-0.57	0.72	-0.73	-0.02	-0.02
UB cont	-0.07	0.03	0.02	-0.02	0.06	0.99

*Htw - heart wall; Liv - liver; Oth - other tissue; UBcnt - urinary bladder contents

TABELLE 50. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{99m}Tc-Pertechnetat

Source	ThyrFs	ThyrTi1	ThyrTi2	Thyrai2	SgldFs	SgldTi1	SgldTi2	Sgldai2	StwFs
Thyroid	0.97	0.88	0.54	0.78	-0.06	-0.06	0.05	-0.03	0.02
S glands	0.05	0.00	-0.03	-0.03	0.97	0.88	0.56	0.79	-0.06
St wall	0.03	-0.03	0.04	0.00	0.03	-0.08	0.01	-0.06	0.96
ULI wall	0.02	-0.06	-0.05	0.02	0.08	-0.06	0.03	0.02	0.00
Others	-0.26	-0.01	-0.02	-0.07	-0.32	0.02	-0.03	0.00	-0.93
St cont	-0.03	0.04	-0.05	-0.01	0.02	-0.07	0.00	-0.02	0.05
SI cont	-0.04	-0.04	-0.07	0.01	0.01	-0.03	-0.06	0.00	-0.08
ULI cont	0.05	-0.05	-0.05	0.03	0.04	0.02	0.03	0.00	-0.07
LLI cont	0.01	-0.07	-0.04	0.06	-0.06	0.01	-0.02	0.12	-0.01
Kidneys	-0.01	0.00	0.06	-0.06	0.03	-0.11	-0.03	0.03	0.05
UB cont	-0.11	0.04	-0.01	0.02	-0.07	0.04	0.02	0.02	-0.05

Source	StwlTi1	ULLwTi1	ULLwTj1	OthersTi1	Othersai1	OthersTi2	Othersai2
Thyroid	-0.02	0.06	-0.03	0.06	-0.03	0.03	0.01
S glands	-0.01	0.05	0.04	0.01	0.01	-0.01	-0.01
St wall	0.95	-0.01	-0.10	0.07	0.04	-0.06	-0.04
ULI wall	-0.04	0.95	-0.94	-0.02	0.00	0.08	0.01
Others	-0.03	0.03	0.00	0.56	-0.60	0.68	-0.60
St cont	-0.01	0.07	-0.03	-0.05	-0.01	0.01	0.01
SI cont	-0.03	0.03	0.10	-0.04	-0.07	-0.03	0.05
ULI cont	-0.09	-0.04	-0.01	-0.05	-0.01	0.01	-0.02
LLI cont	-0.05	-0.02	-0.04	0.00	0.05	-0.07	-0.06
Kidneys	-0.02	0.05	-0.06	-0.09	-0.05	-0.01	0.04
UB cont	0.08	0.04	0.03	0.00	0.01	-0.08	-0.04

Source	OthersTi3	StcntTi1	SICntTi1	ULIcntTi1	LLIcntTi1	KidneyTi1	UBcntTi1
Thyroid	0.00	0.02	-0.02	0.04	-0.08	-0.03	-0.04
S glands	-0.04	0.05	0.02	-0.02	0.01	-0.04	-0.01
St wall	0.04	0.03	0.03	0.01	-0.06	-0.09	0.03
ULI wall	0.06	0.00	0.03	0.01	-0.06	0.00	-0.01
Others	0.69	-0.06	-0.01	-0.03	0.05	-0.05	-0.04
St cont	-0.02	1.00	-0.01	-0.05	0.01	0.05	0.01
SI cont	-0.03	0.11	0.99	-0.04	0.03	-0.02	-0.05
ULI cont	0.00	0.00	-0.07	1.00	0.00	0.04	0.02
LLI cont	-0.03	-0.04	0.02	0.07	1.00	0.00	-0.02
Kidneys	0.01	0.08	-0.02	-0.02	0.07	1.00	-0.04
UB cont	0.04	0.02	-0.05	0.00	0.03	-0.03	1.00

*Thyr – thyroid; Sgld – salivary gland; Stw – stomach wall; ULIw – upper large intestine wall; Oth – other tissue; Stcnt – stomach contents; SICnt – small intestine contents; ULIcnt – upper large intestine contents; LLIcnt – lower large intestine contents; Kid – kidney; UBcnt – urinary bladder contents

TABELLE 51. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{99m}Tc-Phosphonat

Source	BoneFs	BoneTi1	Boneai1	BoneTi2	BoneTj1	KidneyFs	KidneyTi1
Bone	0.99	0.47	-0.89	0.43	-0.29	0.03	-0.10
Kidneys	0.01	-0.01	0.02	0.09	-0.04	0.95	0.16
UB cont	0.00	0.13	0.05	-0.06	-0.05	0.01	0.11
Others	-1.00	0.02	0.01	-0.08	-0.03	-0.58	-0.02

Source	Kidneyai1	KidneyTi2	Kidneyai2	KidneyTi3	UBcntTi1	OthersTi1
Bone	0.05	-0.06	-0.05	0.06	-0.01	-0.03
Kidneys	-0.60	0.32	-0.53	0.18	-0.01	0.05
UB cont	-0.02	-0.03	0.02	-0.05	1.00	0.01
Others	-0.02	-0.05	0.00	0.00	-0.03	0.88

*Bon – bone; Kid – kidney; UBcnt – urinary bladder contents; Oth – other tissue

TABELLE 52. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{99m}Tc -Sestamibi

Source	HtwFs	HtwTi1	HtwTi2	Htwai2	KidneyFs	KidneyTi1	MusclesFs
Ht wall	0.98	0.84	0.42	0.76	0.06	-0.07	0.01
Kidneys	0.01	0.04	-0.07	0.06	0.98	0.92	0.01
Muscles	-0.01	-0.04	-0.03	0.05	0.10	0.00	0.99
S glands	0.03	0.05	-0.01	-0.03	0.01	-0.02	-0.05
Thyroid	0.00	0.04	-0.06	0.01	0.11	0.09	0.04
Others	-0.17	0.06	0.02	-0.01	-0.86	0.05	-0.93
Liver	-0.02	0.12	0.02	-0.05	0.10	-0.04	0.05
GB cont	0.01	0.02	0.07	0.03	-0.01	0.03	-0.02
SI cont	-0.03	-0.07	0.04	-0.08	0.00	0.05	0.02
ULI cont	-0.03	-0.03	-0.06	-0.04	-0.01	-0.01	-0.01
LLI cont	-0.08	-0.01	0.02	0.06	0.03	-0.04	-0.03
UB cont	-0.01	0.01	-0.03	0.11	-0.02	0.11	0.01

Source	MusclesTi1	SgldFs	SgldTi1	ThyrFs	ThyrTi1	OthersTi1	LiverFs	LiverTi1
Ht wall	0.00	0.06	-0.02	0.02	0.06	0.00	-0.04	-0.01
Kidneys	0.01	-0.06	0.07	-0.03	0.01	0.07	-0.07	0.17
Muscles	0.88	0.05	-0.06	0.01	0.05	0.05	-0.01	-0.02
S glands	0.00	0.99	0.88	0.00	-0.01	0.09	0.06	-0.04
Thyroid	-0.11	0.03	0.05	0.88	0.83	0.06	0.03	0.00
Others	-0.02	-0.18	-0.06	0.05	-0.04	0.73	-0.91	0.07
Liver	-0.03	0.01	-0.01	0.01	0.04	0.03	0.98	0.89
GB cont	0.01	0.00	-0.02	0.18	-0.06	-0.01	0.06	0.12
SI cont	0.03	-0.02	0.03	0.00	0.10	-0.05	0.02	0.04
ULI cont	0.06	-0.05	0.00	-0.03	-0.08	0.05	0.00	-0.05
LLI cont	-0.05	-0.09	0.05	0.00	0.05	-0.05	-0.04	-0.03
UB cont	0.09	-0.03	-0.01	0.00	-0.10	-0.05	0.00	0.06

Source	LiverTi2	Liverai2	GBcntTi1	SICntTi1	ULIcntTi1	LLIcntTi1	UBcntTi1
Ht wall	0.02	0.02	0.00	-0.06	0.03	-0.07	0.00
Kidneys	-0.04	0.00	-0.07	0.07	0.00	-0.07	-0.03
Muscles	0.00	-0.04	-0.01	-0.08	0.00	0.01	0.06
S glands	0.02	0.04	0.02	0.06	0.01	0.01	0.03
Thyroid	0.02	0.04	0.08	0.06	-0.04	-0.07	0.08
Others	0.09	0.00	-0.01	0.04	-0.01	0.10	-0.04
Liver	0.32	0.82	0.01	0.03	-0.08	0.07	0.02
GB cont	-0.05	-0.03	1.00	0.02	-0.05	0.03	0.02
SI cont	0.08	-0.04	-0.02	1.00	0.02	0.10	0.02
ULI cont	0.05	0.02	-0.02	-0.01	1.00	-0.05	-0.02
LLI cont	0.06	0.03	-0.03	-0.05	-0.02	1.00	0.02
UB cont	0.01	0.01	0.06	0.01	0.05	-0.01	1.00

*Htw – heart wall; Kid – kidney; Mscl – muscles; Sgld – salivary gland; Thyr – thyroid; Oth – other tissue; GBcnt – gall bladder contents; SICnt – small intestine contents; ULIcnt – upper large intestine contents; LLIcnt – lower large intestine contents; UBcnt – urinary bladder contents

TABELLE 53. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{99m}Tc-Tetrofosmin

Source	HtwFs	HtwTi1	HtwTi2	Htwai2	LiverFs	LiverTi1	LiverTi2	Liverai2
Ht wall	0.98	0.84	0.46	0.78	-0.12	0.08	-0.01	-0.02
Liver	-0.05	0.03	0.00	0.04	0.96	0.91	0.69	0.70
Kidneys	0.01	0.03	-0.05	0.01	0.01	0.07	0.01	0.04
S glands	-0.03	0.05	0.12	-0.07	0.05	-0.10	-0.01	0.03
Thyroid	-0.02	0.04	0.09	-0.02	0.00	-0.05	-0.04	-0.05
Others	-0.07	-0.03	0.02	-0.08	-0.84	0.02	-0.04	0.02
GB cont	0.01	-0.04	0.07	0.03	-0.02	-0.02	0.09	0.00
SI cont	0.01	0.03	0.05	0.02	0.00	-0.09	0.00	-0.03
ULI cont	-0.05	-0.02	0.01	0.04	0.00	-0.03	0.03	-0.06
LLI cont	0.02	0.10	-0.04	0.09	0.02	0.03	0.02	-0.03
UB cont	-0.05	-0.07	-0.03	0.01	0.00	-0.03	-0.02	-0.04

Source	KidneyFs	KidneyTi1	KidneyTi2	Kidneyai2	SgldFs	SgldTi1	ThyrFs	ThyrTi1
Ht wall	0.04	0.02	0.01	0.03	-0.01	0.01	0.02	-0.04
Liver	-0.01	0.04	-0.02	-0.03	-0.03	0.05	0.04	0.04
Kidneys	0.97	0.70	0.55	0.92	-0.05	0.03	-0.08	-0.07
S glands	0.00	0.01	0.09	-0.06	1.00	0.90	-0.01	0.04
Thyroid	-0.04	-0.05	0.06	0.03	-0.01	0.01	0.89	0.82
Others	-0.73	-0.02	-0.02	-0.06	-0.18	0.09	-0.06	-0.05
GB cont	-0.03	0.04	0.05	0.07	0.05	-0.01	0.00	0.07
SI cont	-0.01	0.06	-0.02	-0.05	0.00	0.01	0.04	0.04
ULI cont	-0.02	0.05	-0.01	0.01	-0.12	0.03	0.00	-0.01
LLI cont	0.00	-0.02	-0.03	-0.02	0.00	-0.02	-0.06	-0.01
UB cont	0.03	-0.06	-0.09	-0.03	-0.08	0.01	-0.10	-0.04

Source	OthersTi1	Othersai1	OthersTi2	GBcntTi1	SICntTi1	ULICntTi1	LLICntTi1	UBcntTi1
Ht wall	0.00	-0.08	0.06	0.00	-0.04	0.01	0.01	-0.03
Liver	0.05	-0.06	0.06	-0.03	-0.03	0.07	-0.04	-0.08
Kidneys	0.04	0.09	0.00	0.01	-0.08	0.02	-0.01	0.01
S glands	0.04	0.01	-0.02	-0.03	0.02	0.00	0.02	-0.06
Thyroid	0.06	-0.07	0.03	-0.01	-0.03	0.00	-0.06	0.02
Others	0.15	-0.89	0.92	0.03	-0.01	0.00	0.04	0.01
GB cont	0.03	-0.01	0.00	0.98	0.03	0.07	-0.05	0.13
SI cont	-0.01	0.02	0.01	-0.04	1.00	0.01	0.02	-0.01
ULI cont	-0.04	-0.05	0.04	0.01	0.06	1.00	0.02	-0.04
LLI cont	0.00	-0.02	-0.04	-0.04	-0.07	-0.02	1.00	0.03
UB cont	-0.09	-0.08	-0.01	-0.03	0.02	0.06	0.07	1.00

*Htw – heart wall; Kid – kidney; Sgld – salivary gland; Thyr – thyroid; Oth – other tissue; GBcnt – gall bladder contents; SICnt – small intestine contents; ULICnt – upper large intestine contents; LLICnt – lower large intestine contents; UBcnt – urinary bladder contents

TABELLE 54. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{99m}Tc -MAA

Source	LungTi1	LungTi2	Lungai2	LiverFs	LiverTi1	LiverTj1
Lungs	0.99	0.31	0.89	0.05	0.02	-0.02
Liver	0.02	0.01	0.03	0.98	0.20	-0.92
Kidneys	-0.09	-0.02	0.02	0.01	0.06	-0.06
UB cont	0.06	-0.07	-0.01	0.01	0.06	-0.05
Others	0.02	-0.04	-0.04	-0.99	-0.04	0.00

Source	KidneyTi1	UBcntTi1	OthersTi1
Lungs	-0.06	-0.05	-0.04
Liver	0.04	-0.09	-0.03
Kidneys	0.97	-0.03	0.01
UB cont	-0.07	0.99	-0.03
Others	-0.01	-0.07	0.92

*UBcnt – urinary bladder contents; Others – other tissue

TABELLE 55. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität für ^{201}TI -Chlorid

Source	BoneFs	BoneTi1	BoneTi2	Boneai2	ThyrFs	ThyrTi1	ThyrTi2
Bone	1.00	0.87	0.44	0.73	0.05	0.01	-0.02
Thyroid	-0.03	0.00	0.06	-0.02	1.00	0.88	0.48
Ht wall	-0.03	-0.02	-0.05	0.00	-0.05	0.06	-0.04
Lungs	0.08	-0.01	0.05	0.00	-0.04	-0.06	0.08
Kidneys	-0.09	-0.04	0.07	-0.01	-0.04	-0.09	-0.10
Liver	0.02	0.02	-0.02	-0.09	-0.01	-0.02	-0.02
Spleen	0.03	0.03	-0.01	0.07	0.00	0.09	-0.01
R marrow	0.04	0.00	-0.01	0.00	-0.08	0.07	-0.02
St wall	-0.07	-0.04	-0.06	0.05	-0.05	-0.01	-0.07
SI wall	-0.01	-0.05	0.03	-0.03	0.01	-0.03	0.10
Muscles	-0.01	-0.02	-0.05	-0.05	0.03	-0.06	0.02
Testes	-0.05	0.11	0.04	0.00	0.02	0.00	0.04
Others	-0.53	-0.02	-0.09	0.03	-0.01	0.04	0.01
SI cont	0.00	0.01	0.13	-0.03	-0.04	-0.01	-0.13
ULI cont	0.06	0.02	0.01	0.06	-0.02	-0.14	-0.07
LLI cont	0.00	-0.04	0.03	0.02	0.06	0.02	-0.01
UB cont	-0.03	0.00	0.01	0.05	0.01	-0.07	-0.11

Source	Thyrai2	HtwFs	HtwTi1	HtwTi2	Htwai2	HtwTi3	Htwai3	LungFs	LungTi1
Bone	-0.03	-0.06	-0.04	-0.02	0.01	-0.02	0.02	-0.02	0.07
Thyroid	0.71	-0.06	0.02	0.00	0.02	-0.03	-0.01	0.12	-0.01
Ht wall	0.00	0.97	0.43	0.55	0.58	0.05	0.47	-0.06	-0.02
Lungs	0.02	0.05	0.08	0.04	-0.11	-0.02	0.11	1.00	0.86
Kidneys	0.05	0.02	0.07	-0.07	0.08	0.00	-0.07	0.06	0.07
Liver	0.01	-0.09	-0.03	-0.07	-0.07	0.04	0.09	-0.09	0.10
Spleen	-0.13	-0.01	-0.07	0.01	-0.06	0.05	0.05	-0.01	-0.04
R marrow	0.03	-0.01	0.03	0.05	0.06	-0.07	-0.04	-0.03	0.01
St wall	-0.04	0.02	0.00	0.05	-0.02	-0.02	0.04	-0.03	-0.03
SI wall	-0.02	0.00	-0.06	-0.04	0.00	-0.05	-0.03	0.10	-0.03
Muscles	-0.06	-0.02	-0.03	0.00	0.06	-0.02	-0.03	0.01	0.00
Testes	0.02	-0.08	0.01	0.07	-0.09	-0.01	0.10	0.01	-0.01
Others	0.01	-0.41	-0.04	0.08	0.05	0.00	-0.07	-0.37	0.05
SI cont	-0.03	-0.03	0.00	-0.03	-0.02	-0.02	0.07	-0.06	0.07
ULI cont	-0.06	-0.07	-0.01	0.07	-0.09	0.00	0.09	0.03	0.03
LLI cont	0.02	0.07	-0.09	-0.05	0.00	0.06	-0.02	0.13	-0.02
UB cont	-0.03	-0.05	0.08	0.07	-0.07	0.00	0.03	0.00	-0.05

Source	LungTi2	Lungai2	KidneyFs	KidneyTi1	KidneyTi2	Kidneyai2	LiverFs	LiverTi1
Bone	-0.05	-0.08	0.08	0.07	-0.08	0.00	0.01	0.00
Thyroid	0.01	0.01	0.05	-0.06	0.06	0.02	0.02	0.10
Ht wall	0.04	0.00	-0.03	0.09	0.04	0.02	0.04	0.05
Lungs	0.34	0.69	-0.08	-0.05	0.13	-0.03	-0.01	-0.07
Kidneys	0.02	0.06	1.00	0.87	0.39	0.68	-0.08	0.06
Liver	0.06	0.00	0.05	0.03	0.01	0.01	1.00	0.87
Spleen	0.00	0.02	0.06	-0.07	0.03	0.01	-0.06	-0.01
R marrow	-0.01	-0.02	-0.01	-0.07	0.01	-0.07	-0.01	-0.07
St wall	0.03	-0.03	0.00	-0.03	-0.03	0.03	0.10	-0.01
SI wall	-0.03	-0.02	-0.02	-0.07	0.06	0.04	-0.02	0.02
Muscles	-0.07	0.05	-0.07	-0.03	-0.03	0.03	-0.02	0.01
Testes	0.01	0.01	-0.04	-0.04	-0.09	0.09	0.05	0.02
Others	-0.02	0.01	-0.54	0.02	-0.01	-0.02	-0.71	-0.09
SI cont	0.00	0.10	0.05	0.00	0.05	-0.01	0.01	-0.01
ULI cont	0.11	0.13	0.05	-0.07	0.03	0.08	-0.01	-0.06
LLI cont	0.01	0.02	0.02	0.05	0.07	0.07	0.01	-0.05
UB cont	0.02	0.05	-0.01	0.05	-0.10	0.06	0.05	-0.03

Source	LiverTi2	Liverai2	SplFs	SplTi1	SplTi2	Splai2	RmarrFs	RmarrTi1	RmarrTi2
Bone	-0.01	-0.03	-0.04	-0.06	0.05	-0.04	-0.05	0.03	-0.03
Thyroid	0.01	0.01	0.01	0.04	-0.02	-0.04	-0.03	-0.07	-0.03
Ht wall	-0.04	-0.01	-0.01	0.03	0.04	0.04	0.05	-0.06	0.01
Lungs	0.04	-0.01	0.00	-0.02	-0.04	-0.01	-0.03	0.00	-0.05
Kidneys	-0.10	-0.04	-0.01	0.05	0.00	-0.03	0.00	-0.09	0.03
Liver	0.37	0.69	-0.08	0.00	0.02	-0.08	-0.01	-0.01	0.01
Spleen	0.04	-0.02	1.00	0.88	0.42	0.72	0.08	-0.09	-0.07
R marrow	0.07	0.05	0.00	-0.05	0.02	0.02	1.00	0.88	0.39
St wall	0.06	0.08	0.00	-0.05	-0.03	0.01	0.04	-0.07	-0.02
SI wall	0.01	0.01	-0.03	0.06	0.06	-0.01	-0.02	0.08	-0.07
Muscles	0.03	-0.03	0.05	-0.04	0.05	0.02	-0.04	-0.03	0.01
Testes	-0.02	-0.04	-0.04	0.00	0.05	0.05	0.01	-0.04	0.10
Others	0.00	0.09	-0.11	0.04	0.06	0.03	-0.57	-0.02	0.03
SI cont	0.03	-0.09	0.01	-0.02	0.00	-0.03	0.01	-0.06	0.06
ULI cont	-0.01	-0.01	-0.03	0.00	0.02	-0.06	0.01	-0.01	-0.02
LLI cont	0.03	0.06	0.00	-0.04	-0.07	-0.02	-0.13	0.04	0.05
UB cont	-0.01	-0.01	0.05	-0.05	-0.11	0.01	0.03	-0.05	0.04

Source	Rmarrai2	StwFs	StwTi1	StwTi2	Stwai2	SIwFs	SIwTi1	SIwTi2	SIwai2	MusclesFs
Bone	-0.01	-0.03	0.01	0.03	-0.03	0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.01
Thyroid	-0.02	0.01	0.00	0.07	-0.04	0.00	0.04	0.04	-0.04	0.04
Ht wall	-0.07	0.01	-0.04	0.02	-0.10	0.05	-0.03	0.07	0.02	0.01
Lungs	0.04	0.06	0.10	-0.05	0.00	0.10	-0.06	0.02	-0.01	-0.02
Kidneys	0.03	0.04	-0.06	-0.02	-0.01	0.04	0.01	-0.03	0.03	0.00
Liver	0.00	0.03	0.08	-0.05	0.00	-0.04	-0.03	-0.02	0.07	0.11
Spleen	-0.06	-0.13	0.00	-0.01	0.12	-0.06	-0.03	0.00	-0.05	0.04
R marrow	0.73	-0.11	0.02	-0.08	-0.05	0.05	-0.08	-0.05	-0.02	0.03
St wall	0.00	1.00	0.88	0.37	0.70	0.00	0.04	0.03	-0.04	0.04
SI wall	-0.01	0.02	0.08	-0.08	-0.06	0.99	0.86	0.39	0.70	0.03
Muscles	-0.02	0.02	-0.04	0.04	0.07	0.02	-0.05	0.05	0.12	0.99
Testes	-0.08	-0.05	-0.02	-0.03	-0.01	-0.03	0.06	0.06	0.01	0.06
Others	0.06	-0.07	-0.02	-0.02	0.02	-0.34	0.02	0.03	0.06	-0.98
SI cont	-0.02	0.05	0.06	0.06	0.01	0.04	-0.09	-0.05	-0.05	-0.09
ULI cont	-0.10	0.04	-0.01	-0.01	-0.04	-0.01	-0.02	0.03	0.04	0.02
LLI cont	0.07	0.01	-0.08	-0.03	-0.03	0.02	0.03	-0.04	0.03	-0.01
UB cont	0.06	0.04	0.06	0.02	-0.01	-0.01	0.00	-0.03	0.03	-0.11

Source	MusclesTi1	MusclesTi2	Musclesai2	TestesFs	TestesTi1	TestesTi2	Testesai2
Bone	0.03	-0.01	0.07	0.03	-0.04	0.01	0.04
Thyroid	0.04	-0.04	0.00	0.01	0.05	0.07	-0.03
Ht wall	0.04	-0.01	-0.03	-0.03	-0.01	0.07	-0.05
Lungs	0.00	-0.05	-0.09	-0.04	-0.05	0.00	0.01
Kidneys	-0.12	0.04	-0.04	-0.04	0.02	-0.02	0.00
Liver	0.03	-0.04	-0.02	0.09	0.01	-0.02	-0.08
Spleen	0.07	0.07	0.01	-0.01	0.00	-0.03	-0.03
R marrow	-0.06	-0.01	0.02	0.00	-0.10	0.03	0.09
St wall	0.02	-0.07	-0.06	0.04	0.02	-0.03	-0.06
SI wall	0.06	0.04	-0.06	0.00	-0.03	0.03	0.05
Muscles	0.84	0.39	0.66	0.03	0.06	-0.06	0.02
Testes	0.06	0.01	-0.01	0.99	0.86	0.40	0.67
Others	-0.01	-0.02	-0.01	0.02	-0.01	-0.12	0.03
SI cont	-0.03	-0.03	0.00	-0.02	0.08	-0.02	-0.09
ULI cont	0.03	0.03	0.08	0.09	0.03	-0.03	-0.06
LLI cont	-0.04	-0.01	0.03	0.09	0.04	0.03	-0.10
UB cont	0.06	-0.04	0.04	0.03	0.02	0.09	-0.05

Source	OthersTi1	Othersai1	OthersTi2	Othersai2	SlcntTi1	ULIcntTi1	LLIcntTi1	UBcntTi1
Bone	0.03	0.01	-0.05	0.01	-0.16	0.01	-0.04	-0.04
Thyroid	-0.03	0.06	-0.06	-0.05	0.01	-0.05	-0.02	-0.02
Ht wall	-0.02	-0.09	-0.06	0.10	-0.06	0.02	0.07	0.14
Lungs	0.00	0.05	-0.04	-0.04	-0.02	0.00	0.01	-0.03
Kidneys	0.04	-0.03	0.06	0.01	-0.02	-0.04	-0.05	0.00
Liver	0.05	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.07	0.00	0.01
Spleen	-0.02	0.03	-0.04	-0.03	0.06	0.02	0.00	-0.08
R marrow	-0.07	-0.08	-0.01	0.08	0.00	-0.03	-0.10	-0.06
St wall	0.00	0.01	0.01	-0.05	-0.01	-0.07	0.06	0.01
SI wall	0.01	-0.04	0.05	0.03	0.01	0.04	0.01	0.05
Muscles	-0.07	0.04	-0.04	-0.06	0.00	-0.01	-0.06	-0.02
Testes	-0.01	0.00	-0.07	-0.02	-0.02	0.03	0.03	0.03
Others	0.31	0.48	0.05	0.39	0.05	-0.03	-0.02	0.09
SI cont	-0.01	-0.07	0.09	0.07	1.00	0.00	-0.04	-0.01
ULI cont	0.04	-0.11	0.17	0.11	-0.05	1.00	0.02	0.00
LLI cont	0.00	0.09	-0.02	-0.06	0.07	0.03	1.00	0.04
UB cont	0.04	-0.05	-0.08	0.03	0.06	0.01	-0.03	1.00

*Bon – bone; Thyr – thyroid; Htw – heart wall; Kid – kidney; Spl – spleen; Rmarrow – red marrow; Stw – stomach wall; Slw – small intestine wall; Mscl – muscles; Tes – testes; Oth – other tissue; Slcnt – small intestine contents; ULIcnt – upper large intestine contents; LLIcnt – lower large intestine contents; UBcnt – urinary bladder contents

6.6.2 Korrelation zwischen der Aktivität und den Dosiskoeffizienten

Die Tabellen 56-68 zeigen den partiellen Rangkorrelationskoeffizienten zwischen der effektiven mittleren Aufenthaltsdauer der Aktivität im Quellorgan und den Dosiskoeffizienten im Zierorgan. Dabei stellt die Tabelle 56 Werte dar, die aus den Berechnungen der Aktivität für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG nach dem MIRD-Schema entstanden sind. Werte aus den Tabellen 57-68 gingen aus den Berechnungen nach dem ICRP-Schema hervor.

Wie man aus den untenstehenden Tabellen sieht, ergeben sich große Korrelationen immer dann, wenn Quell- und Zielorgan gleich sind. Bei der Berechnung für ^{18}F -FDG nach dem MIRD-Schema weisen die Quellorgane Harnblase und Gehirn maximale Korrelationen des Wertes 1 mit den gleichnamigen Zielorganen auf. Aber auch bei Leber und Lunge sind die Korrelationskoeffizienten von 93 % bzw. 85 % recht hoch. Die Ausnahme bildet hier das Kompartiment „Herzinhalt“, das mit dem Zielkompartiment „Herzwand“ mit lediglich 13 % korreliert. Aufgrund des oben erwähnten Berechnungsschemas des MIRD-Komitees für Aktivitäten, in dem alle Quellorgane in Verbindung mit den Zielorganen stehen, können Korrelationskoeffizienten auch für unterschiedliche Quell-Zielorgan-Paare hohe Werte aufweisen.

TABELLE 56. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ¹⁸F-FDG nach MIRD-Schema

Target	Source						
	UB cont	Brain	Liver	Lungs	Ht cont	Blood	Others
Brain	0.01	1.00	-0.04	-0.01	0.02	0.13	0.54
Breast	-0.61	-0.78	0.08	0.28	-0.59	0.76	0.58
Colon	0.78	-0.82	0.30	-0.18	-0.62	-0.43	0.85
Endosteum	0.12	0.69	-0.51	-0.03	-0.76	-0.43	0.33
Liver	-0.35	-0.50	0.93	-0.03	-0.35	-0.23	-0.08
Lungs	-0.43	-0.60	-0.14	0.85	-0.42	0.29	0.45
Oesophagus	-0.49	-0.67	-0.06	0.19	-0.47	0.79	0.88
R marrow	0.67	-0.09	0.05	0.19	-0.78	0.06	0.90
S glands	-0.49	0.77	-0.46	-0.06	-0.45	-0.34	0.41
Skin	0.17	0.26	0.21	0.08	-0.79	0.09	0.92
St wall	-0.66	-0.84	0.36	-0.04	-0.63	0.61	0.48
Testes	0.87	-0.51	-0.37	-0.12	-0.35	-0.31	0.75
Thyroid	-0.52	0.00	-0.15	0.51	-0.52	0.69	0.99
UB wall	1.00	0.00	0.05	-0.03	-0.01	-0.02	0.43
Adrenals	-0.56	-0.77	0.55	-0.09	-0.52	-0.35	0.41
ET	-0.21	0.97	-0.19	0.00	-0.21	0.00	0.72
GB wall	-0.46	-0.67	0.76	-0.12	-0.42	-0.41	-0.19
Ht wall	-0.02	-0.14	0.09	0.12	-0.13	0.99	0.37
Kidneys	-0.39	-0.77	0.56	-0.10	-0.53	-0.36	0.8
Lymph	0.69	-0.82	-0.08	0.04	-0.69	0.52	0.48
Muscle	0.72	-0.68	0.11	0.13	-0.73	0.08	0.86
O mucosa	-0.20	0.99	-0.10	0.09	-0.22	0.28	0.74
Pancreas	-0.57	-0.78	0.54	-0.10	-0.54	-0.24	0.6
Prostate	0.97	-0.17	-0.07	-0.03	-0.12	-0.14	0.34
SI wall	0.79	-0.79	0.18	-0.15	-0.58	-0.30	0.94
Spleen	-0.42	-0.72	0.06	0.31	-0.49	0.71	0.97
Thymus	-0.40	-0.57	-0.25	0.26	-0.39	0.80	0.81

*R marrow – red marrow; S glands – salivary glands; St wall – stomach wall; UB wall –urinary bladder wall; GB wall – gall bladder wall; Ht wall – heart wall; O mucosa – oral mucosa; SI wall – small intestine wall; Others – other tissue; UB cont – urinary bladder contents

TABELLE 57. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ¹⁸F-FDG nach ICRP-Schema

Target	Source					
	Brain	Ht wall	Lungs	Liver	Others	UB cont
Brain	0.67	-0.04	0.02	-0.02	0.03	0.02
Breast	-0.01	0.18	0.09	0.08	0.23	-0.13
Colon	0.05	0.01	0.05	0.02	0.28	0.04
Endosteum	0.11	0.05	0.00	-0.07	0.22	-0.03
Liver	-0.05	0.07	0.00	0.66	-0.02	0.02
Lungs	0.04	0.10	0.57	0.08	0.16	0.00
Oesophagus	0.03	0.57	0.23	0.18	0.42	-0.07
R marrow	0.09	0.10	-0.04	0.04	0.42	0.02
S glands	0.26	-0.01	-0.02	0.00	0.17	0.06
Skin	-0.03	0.06	-0.01	-0.03	0.37	0.02
St wall	-0.01	0.35	0.14	0.38	0.40	-0.02
Testes	-0.05	-0.07	-0.01	0.00	0.24	0.01
Thyroid	0.09	0.10	0.13	-0.01	0.33	-0.01
UB wall	0.05	0.05	-0.02	-0.01	0.10	0.11
Adrenals	0.03	0.18	0.13	0.44	0.47	-0.08
ET	0.47	0.08	0.10	0.04	0.26	0.07
GB wall	0.09	0.08	0.06	0.66	0.25	-0.02
Ht wall	0.06	0.71	0.02	0.04	0.03	0.01
Kidneys	-0.12	0.01	0.13	0.17	0.38	0.05
Lymph	0.01	0.15	0.13	0.00	0.22	-0.01
Muscle	-0.08	-0.05	0.05	0.02	0.34	0.02
O mucosa	0.25	-0.02	-0.03	-0.02	0.22	0.02
Pancreas	0.02	0.04	0.09	0.35	0.31	0.07
Prostate	0.05	0.02	0.03	-0.08	0.11	0.06
SI wall	0.00	0.03	0.06	0.01	0.30	0.05
Spleen	-0.01	0.28	0.20	0.09	0.44	-0.06
Thymus	-0.04	0.28	0.14	0.01	0.35	-0.01

*R marrow – red marrow; S glands – salivary glands; St wall – stomach wall; UB wall –urinary bladder wall; GB wall – gall bladder wall; Ht wall – heart wall; O mucosa – oral mucosa; SI wall – small intestine wall; Others – other tissue; UB cont – urinary bladder contents

TABELLE 58. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Pertechnetat (Teil 1)

Target	Source						
	Thyroid	S glands	St wall	ULI wall	Others	St cont	SI cont
Brain	0.09	0.12	-0.02	-0.04	0.50	-0.02	-0.01
Breast	-0.01	0.03	0.11	0.02	0.40	0.04	0.02
Colon	-0.10	0.07	-0.03	0.23	0.11	0.08	-0.03
Endosteum	0.07	0.04	0.00	0.12	0.19	0.02	0.00
Liver	0.01	0.00	0.10	0.10	0.22	0.01	-0.06
Lungs	0.04	-0.06	0.28	0.00	0.72	0.07	-0.04
Oesophagus	0.16	-0.01	0.20	-0.02	0.45	-0.02	0.02
R marrow	0.07	0.05	0.09	0.04	0.42	-0.01	0.06
S glands	0.01	0.57	0.00	0.05	0.17	0.03	0.04
Skin	0.02	0.04	0.05	0.06	0.54	0.04	-0.01
St wall	-0.07	0.08	0.50	-0.03	0.04	0.04	-0.02
Testes	-0.05	0.01	-0.07	0.03	0.31	0.09	-0.02
Thyroid	0.94	0.02	0.02	-0.01	0.26	0.04	-0.02
UB wall	-0.07	0.06	-0.13	0.01	-0.03	0.06	0.03
Adrenals	-0.05	-0.06	0.13	0.01	0.27	0.04	0.02
ET	0.11	0.16	-0.05	0.07	0.37	0.00	-0.06
GB wall	-0.07	0.01	0.04	0.10	0.08	-0.01	-0.01
Ht wall	0.05	0.04	0.44	-0.02	0.52	0.07	-0.01
Kidneys	0.02	-0.05	0.09	0.12	0.23	0.02	0.02
Lymph	0.05	-0.01	0.15	0.12	0.23	0.01	-0.07
Muscle	0.01	0.04	0.04	-0.06	0.39	0.00	0.01
O mucosa	0.11	0.23	0.01	-0.01	0.53	-0.01	0.02
Pancreas	-0.05	0.07	0.26	0.02	0.11	0.02	0.01
Prostate	-0.05	0.02	0.04	0.06	0.30	-0.02	0.04
SI wall	0.08	0.02	0.16	0.14	0.22	-0.06	-0.07
Spleen	0.01	0.03	0.32	0.02	0.23	0.02	0.00
Thymus	0.16	-0.07	0.04	0.01	0.36	0.02	-0.06

TABELLE 59. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Pertechnetat (Teil 2)

Target	Source			
	ULI cont	LLI cont	Kidneys	UB cont
Brain	-0.02	-0.01	-0.04	0.03
Breast	0.06	-0.04	-0.10	0.05
Colon	0.04	0.01	0.00	0.00
Endosteum	0.04	0.00	-0.02	-0.03
Liver	0.11	-0.05	0.00	0.01
Lungs	-0.02	0.04	0.03	0.01
Oesophagus	-0.03	-0.08	0.00	0.05
R marrow	0.07	0.14	0.01	0.13
S glands	-0.03	0.02	0.00	0.02
Skin	0.06	0.03	0.00	0.06
St wall	0.07	0.09	0.04	-0.08
Testes	-0.10	0.01	-0.02	0.07
Thyroid	-0.05	-0.01	-0.04	0.06
UB wall	0.00	0.00	0.02	0.20
Adrenals	0.02	-0.01	-0.01	-0.03
ET	0.02	-0.03	-0.05	0.04
GB wall	0.02	0.02	0.03	0.06
Ht wall	0.04	0.02	0.04	0.02
Kidneys	-0.05	0.09	0.18	0.06
Lymph	0.01	0.20	0.02	0.16
Muscle	0.00	0.00	0.06	0.05
O mucosa	-0.01	-0.02	0.01	-0.04
Pancreas	0.07	0.01	-0.03	0.04
Prostate	0.01	0.01	-0.03	0.39
SI wall	-0.01	0.10	0.03	0.14
Spleen	-0.01	0.07	-0.03	0.03
Thymus	0.02	-0.04	0.06	-0.04

TABELLE 60. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Phosphonat

Target	Source			
	Bone	Kidney	UB cont	Others
Brain	0.05	0.05	0.02	0.02
Breast	0.07	0.01	0.02	0.18
Colon	0.06	0.11	0.17	0.05
Endosteum	0.14	0.00	0.17	0.20
Liver	0.01	0.01	0.05	0.05
Lungs	0.02	0.00	0.02	0.01
Oesophagus	0.11	0.02	-0.01	0.07
R marrow	0.05	-0.07	0.02	-0.01
S glands	0.10	0.09	0.04	0.25
Skin	0.14	0.03	0.07	0.13
St wall	0.06	0.09	-0.01	0.09
Testes	0.03	0.01	0.30	0.19
Thyroid	0.04	0.06	-0.01	0.00
UB wall	0.03	-0.01	0.16	0.01
Adrenals	0.09	0.14	0.03	0.08
ET	0.13	0.01	0.09	0.27
GB wall	0.06	0.17	-0.01	0.09
Ht wall	-0.01	0.00	0.00	-0.01
Kidneys	0.06	0.43	-0.03	0.08
Lymph	0.01	0.06	0.29	0.06
Muscle	0.02	-0.02	0.10	-0.01
O mucosa	0.17	0.00	-0.08	0.32
Pancreas	0.06	0.12	0.05	0.08
Prostate	-0.05	-0.02	0.25	-0.04
SI wall	0.03	0.01	0.17	0.04
Spleen	0.12	0.14	-0.07	0.14
Thymus	0.11	0.03	-0.07	0.09

TABELLE 61. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Sestamibi (Teil 1)

Target	Source						
	Ht wall	Kidneys	Muscles	S glands	Thyroid	Others	Liver
Brain	-0.03	0.02	0.21	0.29	0.07	0.82	0.02
Breast	0.05	-0.01	0.17	0.06	0.03	0.37	0.15
Colon	-0.06	0.13	0.03	0.00	0.02	0.11	0.04
Endosteum	-0.03	0.03	0.07	0.08	-0.01	0.19	-0.01
Liver	0.06	0.24	0.10	0.01	0.04	0.09	0.61
Lungs	0.18	0.08	0.19	-0.03	0.06	0.45	0.26
Oesophagus	0.24	0.25	0.30	0.10	-0.05	0.52	0.40
R marrow	-0.04	0.14	0.23	0.05	0.01	0.27	0.06
S glands	0.00	-0.03	-0.03	0.53	0.03	-0.02	-0.06
Skin	0.02	0.09	0.19	0.04	0.00	0.28	0.03
St wall	0.01	0.16	-0.05	-0.01	0.05	0.09	0.10
Testes	-0.08	0.00	0.25	-0.05	-0.02	0.28	0.04
Thyroid	-0.04	-0.10	0.31	0.11	0.65	0.27	0.00
UB wall	-0.04	0.02	0.02	0.08	0.01	0.01	-0.03
Adrenals	-0.03	0.34	-0.06	-0.07	0.00	-0.04	0.00
ET	0.00	-0.05	0.16	0.22	0.03	0.33	0.02
GB wall	-0.03	0.05	-0.03	0.01	0.00	-0.02	0.04
Ht wall	0.53	0.08	0.12	0.02	0.03	0.27	0.26
Kidneys	-0.04	0.73	0.02	0.01	0.02	0.10	0.08
Lymph	0.03	0.12	0.09	0.11	0.08	0.17	0.05
Muscle	-0.05	0.08	0.28	0.00	-0.04	0.25	0.08
O mucosa	0.01	0.00	0.18	0.28	-0.04	0.35	-0.03
Pancreas	0.00	0.10	0.00	0.01	-0.12	0.05	0.07
Prostate	0.02	0.00	0.12	-0.03	-0.01	0.19	0.00
SI wall	0.12	0.20	0.06	-0.03	0.00	0.16	0.05
Spleen	0.05	0.45	-0.02	0.01	0.01	0.12	-0.02
Thymus	0.26	0.04	0.16	0.01	0.00	0.42	0.08

TABELLE 62. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Sestamibi (Teil 2)

Target	Source				
	GB cont	SI cont	ULI cont	LLI cont	UB cont
Brain	-0.07	-0.05	0.08	-0.11	0.05
Breast	0.04	0.03	0.00	-0.07	0.09
Colon	0.06	0.00	0.21	0.11	-0.05
Endosteum	0.11	0.08	-0.02	0.02	-0.01
Liver	0.04	-0.03	-0.05	-0.06	-0.03
Lungs	0.04	0.05	-0.01	0.02	0.04
Oesophagus	0.08	-0.01	-0.05	-0.12	-0.01
R marrow	0.10	0.06	0.00	0.13	0.04
S glands	0.02	0.03	-0.08	-0.04	0.07
Skin	0.03	0.09	0.06	0.00	0.03
St wall	0.08	0.05	0.07	0.04	0.04
Testes	0.03	0.02	0.04	0.01	0.05
Thyroid	-0.02	-0.04	0.08	-0.03	0.03
UB wall	-0.01	0.00	-0.01	0.05	0.03
Adrenals	0.03	0.10	0.01	0.09	0.01
ET	-0.02	0.01	0.06	-0.04	-0.04
GB wall	0.01	-0.03	0.05	0.02	-0.04
Ht wall	0.05	0.13	0.05	-0.05	-0.01
Kidneys	-0.07	0.04	-0.05	0.01	-0.05
Lymph	0.01	0.12	0.06	0.36	0.01
Muscle	-0.03	0.03	0.07	0.06	0.00
O mucosa	0.02	-0.02	0.07	0.07	0.05
Pancreas	0.01	0.04	0.02	0.03	0.01
Prostate	-0.06	0.10	0.03	0.07	0.13
SI wall	-0.01	0.22	0.20	0.09	0.03
Spleen	-0.04	0.01	0.01	0.02	0.05
Thymus	-0.01	-0.06	0.04	-0.01	0.06

TABELLE 63. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Tetrofosmin (Teil 1)

Target	Source						
	Ht wall	Liver	Kidneys	S glands	Thyroid	Others	GB cont
Brain	0.03	0.01	0.05	0.07	0.01	0.39	0.03
Breast	0.06	0.09	-0.05	0.04	-0.05	0.32	-0.01
Colon	0.10	-0.01	0.06	0.05	0.02	0.07	-0.01
Endosteum	-0.03	0.03	-0.03	0.05	0.02	0.18	-0.06
Liver	-0.03	0.21	0.12	0.00	-0.04	0.07	0.09
Lungs	0.18	0.09	0.17	-0.08	-0.01	0.62	-0.02
Oesophagus	0.13	-0.02	0.09	0.02	0.07	0.30	-0.05
R marrow	0.09	0.08	0.12	0.04	0.03	0.38	0.02
S glands	0.03	-0.02	0.00	0.51	0.06	0.04	0.00
Skin	0.05	0.05	0.07	0.10	-0.05	0.48	0.01
St wall	-0.05	0.00	0.07	0.03	0.00	0.11	0.01
Testes	0.05	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03	0.22	0.02
Thyroid	0.04	0.04	0.02	0.07	0.66	0.41	0.07
UB wall	0.08	-0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.02
Adrenals	0.02	-0.01	0.29	-0.01	0.06	0.07	0.13
ET	0.00	0.06	-0.05	0.25	0.04	0.33	0.05
GB wall	0.05	-0.04	0.00	-0.02	0.11	0.06	0.12
Ht wall	0.59	0.09	0.13	0.01	0.04	0.41	0.04
Kidneys	-0.01	-0.01	0.53	-0.11	0.02	0.11	0.06
Lymph	0.02	0.01	0.19	-0.01	-0.08	0.32	-0.04
Muscle	-0.02	0.13	0.03	-0.02	-0.02	0.32	-0.06
O mucosa	0.04	-0.08	-0.02	0.29	-0.01	0.25	-0.01
Pancreas	-0.05	0.06	0.14	0.01	0.01	0.12	0.10
Prostate	-0.03	0.00	-0.01	-0.08	-0.07	0.25	0.02
SI wall	-0.02	0.09	0.13	-0.03	-0.07	0.22	0.01
Spleen	0.11	0.03	0.11	0.08	-0.04	0.21	-0.03
Thymus	0.12	-0.03	0.03	0.04	0.06	0.40	-0.02

TABELLE 64. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -Tetrofosmin (Teil 2)

Target	Source			
	SI cont	ULI cont	LLI cont	UB cont
Brain	0.01	0.05	-0.05	0.03
Breast	0.09	0.02	0.03	0.06
Colon	0.03	0.11	0.13	0.10
Endosteum	0.01	-0.02	0.01	0.00
Liver	0.13	0.05	0.06	-0.04
Lungs	-0.02	-0.05	0.10	-0.06
Oesophagus	-0.03	0.05	0.02	0.00
R marrow	0.14	0.04	0.01	0.02
S glands	-0.03	-0.01	0.04	0.04
Skin	0.09	0.06	-0.06	0.08
St wall	-0.04	0.05	0.06	0.04
Testes	-0.01	0.03	0.03	-0.05
Thyroid	-0.01	0.10	-0.03	0.02
UB wall	0.07	-0.02	-0.04	0.18
Adrenals	-0.01	-0.02	-0.06	-0.10
ET	-0.04	0.02	0.06	-0.08
GB wall	-0.01	-0.02	-0.09	0.04
Ht wall	0.02	0.03	0.00	-0.06
Kidneys	0.11	0.03	-0.01	0.02
Lymph	0.14	0.05	0.29	0.11
Muscle	-0.01	0.06	-0.01	0.01
O mucosa	0.03	0.06	-0.01	0.05
Pancreas	-0.02	0.07	0.04	0.01
Prostate	0.12	-0.02	0.05	0.26
SI wall	0.27	0.14	0.08	0.09
Spleen	0.09	0.01	-0.09	-0.03
Thymus	0.04	0.03	0.09	0.01

TABELLE 65. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{99m}Tc -MAA

Target	Source				
	Lungs	Liver	Kidneys	UB cont	Others
Brain	0.15	-0.01	0.00	0.02	0.19
Breast	0.18	0.04	-0.04	0.02	-0.05
Colon	0.14	0.14	0.03	0.11	0.04
Endosteum	0.00	0.02	-0.04	-0.04	0.04
Liver	0.34	0.70	-0.02	-0.01	0.10
Lungs	0.41	0.11	0.01	0.03	0.02
Oesophagus	0.45	0.06	-0.01	0.02	-0.07
R marrow	0.32	0.14	0.03	0.04	0.07
S glands	0.29	0.03	0.04	-0.05	0.11
Skin	0.30	0.14	0.01	-0.03	0.11
St wall	0.35	0.18	0.05	0.03	0.00
Testes	-0.02	-0.05	0.07	0.14	0.13
Thyroid	0.26	-0.04	0.06	0.00	0.00
UB wall	-0.04	-0.03	0.00	0.28	0.03
Adrenals	0.29	0.37	0.05	-0.01	0.08
ET	0.21	-0.06	-0.01	0.06	-0.02
GB wall	0.20	0.59	0.01	-0.03	-0.04
Ht wall	0.33	-0.01	-0.06	0.00	-0.03
Kidneys	0.24	0.33	0.05	0.02	0.06
Lymph	0.31	0.12	0.00	0.09	0.01
Muscle	0.39	0.10	0.05	0.06	0.06
O mucosa	0.25	-0.01	0.02	0.04	0.07
Pancreas	0.27	0.32	-0.03	-0.06	0.01
Prostate	0.03	-0.06	-0.03	0.56	0.02
SI wall	0.18	0.25	0.04	0.09	0.10
Spleen	0.40	0.05	0.03	0.00	0.04
Thymus	0.30	0.08	-0.01	-0.02	0.09

TABELLE 66. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{201}TI -Chlorid (Teil 1)

Target	Source						
	Bone	Thyroid	Ht wall	Lungs	Kidneys	Liver	Spleen
Brain	0.05	0.00	0.01	0.07	-0.01	0.01	-0.06
Breast	-0.04	-0.06	0.10	0.08	-0.03	0.14	-0.02
Colon	-0.01	-0.07	-0.01	-0.07	0.04	-0.02	0.01
Endosteum	0.02	-0.04	-0.02	0.12	0.07	-0.03	0.01
Liver	-0.08	0.03	-0.05	0.01	-0.07	0.60	0.01
Lungs	0.08	-0.02	0.03	0.21	0.05	0.01	0.00
Oesophagus	0.02	0.09	0.40	0.24	0.08	0.22	-0.10
R marrow	0.05	0.04	-0.06	0.08	0.08	0.07	-0.08
S glands	-0.02	0.00	0.02	0.04	-0.03	-0.09	-0.02
Skin	0.08	-0.03	0.01	0.04	0.03	0.02	-0.03
St wall	0.04	0.00	0.14	0.11	0.16	0.35	0.04
Testes	-0.01	0.01	-0.08	0.10	0.05	-0.03	0.01
Thyroid	0.09	0.42	0.03	0.08	0.01	0.07	0.02
UB wall	-0.05	-0.07	-0.01	0.05	-0.07	-0.03	0.06
Adrenals	0.02	-0.02	0.09	0.03	0.45	0.31	0.06
ET	-0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.04
GB wall	0.01	0.08	0.04	0.09	0.15	0.55	-0.06
Ht wall	-0.02	0.00	0.75	0.00	-0.02	0.04	0.06
Kidneys	-0.04	0.02	0.04	-0.07	0.18	0.01	-0.07
Lymph	0.00	-0.13	0.07	0.03	0.22	0.07	0.05
Muscle	-0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
O mucosa	0.13	-0.05	0.02	0.04	0.10	-0.01	-0.04
Pancreas	-0.03	0.00	-0.05	0.04	0.24	0.30	0.01
Prostate	0.01	0.01	0.00	0.03	-0.02	-0.07	-0.04
SI wall	-0.09	0.06	0.03	0.02	0.23	0.11	-0.12
Spleen	0.02	0.01	-0.04	-0.06	-0.01	0.07	0.24
Thymus	0.12	0.12	0.20	0.21	0.09	0.03	-0.06

TABELLE 67. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität vs. Dosis für ^{201}TI -Chlorid (Teil 2)

Target	Source						
	R marrow	St wall	SI wall	Muscles	Testes	Others	SI cont
Brain	0.05	-0.05	-0.05	0.06	-0.01	0.95	-0.09
Breast	-0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.96	0.02
Colon	0.00	-0.10	0.04	0.03	0.00	0.70	-0.01
Endosteum	0.04	-0.04	0.05	0.08	-0.09	0.85	-0.05
Liver	-0.07	0.04	0.08	-0.02	0.01	-0.04	0.02
Lungs	0.04	0.04	0.03	0.02	0.05	0.05	-0.09
Oesophagus	0.12	-0.08	0.02	0.10	0.06	0.95	-0.06
R marrow	0.15	-0.01	0.11	0.09	-0.03	0.90	-0.02
S glands	0.11	0.06	0.05	0.22	-0.03	0.98	0.03
Skin	-0.04	0.05	-0.05	0.13	-0.02	0.96	-0.01
St wall	-0.02	0.26	0.11	0.03	-0.10	0.90	-0.08
Testes	-0.02	0.02	0.01	0.16	0.28	0.75	0.00
Thyroid	-0.09	-0.05	-0.03	0.25	-0.02	0.92	-0.06
UB wall	0.11	-0.01	0.06	0.25	-0.02	0.92	0.01
Adrenals	0.02	0.03	0.01	-0.01	0.08	0.78	-0.02
ET	0.08	-0.04	0.00	0.12	0.06	0.98	0.00
GB wall	0.03	0.02	0.05	0.01	-0.01	0.82	0.07
Ht wall	-0.06	0.03	-0.01	-0.01	-0.01	0.03	0.02
Kidneys	0.00	-0.04	-0.06	0.00	-0.07	0.02	-0.04
Lymph	0.10	0.00	0.11	0.18	-0.03	0.92	0.01
Muscle	0.11	-0.01	-0.03	0.22	0.00	0.96	-0.07
O mucosa	0.12	0.02	-0.01	0.18	-0.02	0.97	-0.07
Pancreas	-0.02	0.05	0.11	0.11	0.06	0.82	-0.04
Prostate	0.04	-0.07	-0.01	0.05	0.00	0.74	0.09
SI wall	0.05	0.05	0.36	0.21	-0.04	0.91	0.04
Spleen	0.09	0.00	0.01	-0.03	0.01	0.12	0.04
Thymus	0.09	-0.10	0.05	0.18	-0.08	0.95	0.04

TABELLE 68. Partieller Rangkorrelationskoeffizient.
Mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität
vs. Dosis für ^{201}TI -Chlorid (Teil 3)

Target	Source		
	ULI cont	LLI cont	UB cont
Brain	0.07	0.00	-0.05
Breast	0.07	-0.06	-0.02
Colon	-0.03	0.03	-0.10
Endosteum	-0.05	-0.06	-0.12
Liver	-0.03	-0.04	0.02
Lungs	-0.01	-0.05	0.01
Oesophagus	0.09	0.05	0.03
R marrow	0.04	0.08	-0.03
S glands	0.03	0.08	0.04
Skin	0.00	-0.04	-0.03
St wall	0.07	-0.01	-0.03
Testes	0.00	-0.07	0.03
Thyroid	-0.07	-0.02	0.00
UB wall	0.05	0.09	-0.05
Adrenals	-0.03	0.02	-0.02
ET	-0.01	-0.04	-0.04
GB wall	0.01	0.04	-0.05
Ht wall	-0.03	-0.08	0.06
Kidneys	-0.07	-0.02	-0.05
Lymph	-0.03	0.10	0.07
Muscle	0.02	-0.01	-0.01
O mucosa	0.06	-0.07	-0.02
Pancreas	0.05	0.06	0.02
Prostate	0.02	-0.08	-0.01
SI wall	0.06	0.08	0.00
Spleen	-0.04	0.02	0.01
Thymus	0.04	-0.04	0.01

6.6.3 Korrelation zwischen den biokinetischen Parametern und den Dosiskoeffizienten

Die Tabellen 69-84 stellen den Korrelationskoeffizienten zwischen den biokinetischen Parametern und den berechneten Dosiskoeffizienten in den Zielorganen dar.

Diese Ergebnisse sind logische Folgerungen der Ergebnisse aus den Kapiteln 6.6.1 und 6.6.2. Erwartungsgemäß sieht man hier große Korrelationen zwischen den biokinetischen Parametern und den Dosiskoeffizienten immer dann, wenn das Quellorgan dem Zielorgan entspricht.

TABELLE 69. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ¹⁸F-FDG nach MIRD-Schema (Teil 1)

Target	Parameter											
	PI_RBC	RBC_PI	PI_Ur	PI_WMF	WMF_PI	WMF_WMS	WMS_WMF	PI_GMF	GMF_PI	GMF_GMS	GMS_GMF	PI_OthF
Brain	-0.17	0.06	-0.11	0.46	-0.50	0.42	-0.18	0.75	-0.82	0.60	-0.26	-0.81
Breast	0.44	-0.27	-0.35	-0.42	0.46	-0.37	0.16	-0.69	0.78	-0.57	0.21	0.85
Colon	-0.17	0.13	0.26	-0.43	0.46	-0.35	0.12	-0.68	0.78	-0.54	0.22	0.88
Endosteum	-0.50	0.31	-0.03	0.34	-0.47	0.40	-0.20	0.71	-0.79	0.56	-0.27	0.07
Liver	-0.06	0.04	-0.17	-0.25	0.29	-0.15	0.04	-0.50	0.54	-0.34	0.17	0.50
Lungs	0.19	-0.09	-0.36	-0.42	0.45	-0.38	0.19	-0.69	0.78	-0.56	0.21	0.81
Oesophagus	0.27	-0.15	-0.32	-0.40	0.44	-0.32	0.12	-0.65	0.76	-0.54	0.17	0.88
R marrow	-0.16	0.12	0.12	-0.38	0.40	-0.27	0.07	-0.58	0.70	-0.46	0.16	0.89
S glands	-0.45	0.24	-0.54	0.43	-0.53	0.45	-0.22	0.78	-0.85	0.63	-0.36	0.11
Skin	-0.17	0.12	-0.18	-0.33	0.34	-0.19	0.05	-0.48	0.62	-0.40	0.12	0.91
St wall	0.34	-0.18	-0.32	-0.42	0.45	-0.36	0.15	-0.68	0.77	-0.55	0.21	0.85
Testes	-0.25	0.18	0.59	-0.43	0.46	-0.36	0.10	-0.68	0.78	-0.53	0.20	0.84
Thyroid	-0.09	0.06	-0.30	-0.36	0.37	-0.23	0.07	-0.56	0.68	-0.45	0.14	0.91
UB wall	-0.20	0.14	0.92	-0.22	0.29	-0.29	0.04	-0.48	0.59	-0.37	0.20	-0.80
Adrenals	-0.05	0.07	-0.26	-0.37	0.39	-0.29	0.12	-0.62	0.71	-0.47	0.21	0.88
ET	-0.28	0.12	-0.28	0.46	-0.53	0.46	-0.20	0.77	-0.84	0.62	-0.31	-0.66
GB wall	-0.10	0.10	-0.21	-0.28	0.29	-0.21	0.06	-0.55	0.62	-0.39	0.20	0.75
Ht wall	0.88	-0.76	-0.29	-0.34	0.38	-0.35	0.10	-0.56	0.70	-0.47	0.18	-0.75
Kidneys	-0.12	0.10	-0.19	-0.39	0.41	-0.29	0.11	-0.63	0.73	-0.49	0.20	0.90
Lymph	0.27	-0.13	0.38	-0.49	0.52	-0.44	0.17	-0.76	0.83	-0.62	0.27	0.80
Muscle	-0.07	0.07	0.20	-0.44	0.46	-0.34	0.11	-0.68	0.77	-0.54	0.21	0.88
O mucosa	-0.19	0.07	-0.19	0.45	-0.51	0.43	-0.19	0.76	-0.83	0.61	-0.28	-0.76
Pancreas	-0.03	0.05	-0.26	-0.39	0.41	-0.29	0.12	-0.63	0.72	-0.49	0.21	0.89
Prostate	-0.28	0.19	0.93	-0.32	0.43	-0.40	0.07	-0.65	0.75	-0.51	0.24	-0.62
SI wall	-0.16	0.12	0.13	-0.41	0.44	-0.32	0.11	-0.66	0.76	-0.52	0.20	0.89
Spleen	0.03	0.00	-0.26	-0.39	0.42	-0.28	0.09	-0.62	0.73	-0.50	0.16	0.90
Thymus	0.37	-0.23	-0.32	-0.39	0.45	-0.33	0.12	-0.66	0.76	-0.54	0.17	0.86

TABELLE 70. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ¹⁸F-FDG nach MIRD-Schema (Teil 2)

Target	Parameter						
	OthF_Pl	OthF_OthS	Pl_LivF	LivF_Pl	LivF_LivS	Pl_Myo	Pl_Lng
Brain	0.75	-0.72	-0.15	0.08	-0.02	-0.19	0.00
Breast	-0.78	0.76	0.03	-0.05	-0.10	-0.35	0.06
Colon	-0.83	0.81	0.01	0.01	-0.07	-0.33	-0.12
Endosteum	-0.03	0.01	-0.56	0.29	-0.33	-0.82	-0.08
Liver	-0.47	0.44	0.90	-0.73	0.73	-0.21	-0.01
Lungs	-0.72	0.72	-0.11	0.07	-0.20	-0.36	0.68
Oesophagus	-0.83	0.80	-0.17	0.05	-0.18	-0.32	-0.03
R marrow	-0.85	0.82	-0.22	0.12	-0.22	-0.63	-0.04
S glands	-0.03	0.07	-0.52	0.26	-0.31	-0.60	-0.09
Skin	-0.87	0.84	-0.19	0.08	-0.18	-0.64	-0.09
St wall	-0.80	0.77	0.20	-0.14	0.02	-0.30	-0.05
Testes	-0.79	0.75	-0.33	0.22	-0.27	-0.36	-0.13
Thyroid	-0.86	0.84	-0.28	0.12	-0.21	-0.33	-0.06
UB wall	0.74	-0.73	-0.23	0.20	-0.15	-0.22	0.01
Adrenals	-0.83	0.81	0.37	-0.23	0.17	-0.25	-0.08
ET	0.61	-0.56	-0.32	0.15	-0.12	-0.38	-0.04
GB wall	-0.70	0.68	0.76	-0.51	0.51	-0.18	-0.07
Ht wall	0.67	-0.64	-0.20	0.13	-0.22	-0.27	-0.02
Kidneys	-0.86	0.83	0.18	-0.11	0.04	-0.27	-0.10
Lymph	-0.74	0.70	-0.04	0.04	-0.15	-0.45	-0.03
Muscle	-0.83	0.81	-0.10	0.06	-0.16	-0.49	-0.04
O mucosa	0.70	-0.67	-0.22	0.11	-0.06	-0.29	0.00
Pancreas	-0.84	0.82	0.28	-0.18	0.10	-0.26	-0.09
Prostate	0.54	-0.53	-0.31	0.21	-0.20	-0.33	-0.04
SI wall	-0.85	0.82	-0.11	0.06	-0.13	-0.32	-0.12
Spleen	-0.85	0.83	-0.18	0.07	-0.17	-0.29	-0.05
Thymus	-0.81	0.78	-0.25	0.10	-0.24	-0.33	0.02

TABELLE 71. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ¹⁸F-FDG

Target	Parameter													
	BrainFs	BrainTi1	HtwlFs	HtwlTi1	LungFs	LungTi1	LiverFs	LiverTi1	OthTi1	Othai1	OthTi2	Othai2	OthTi3	UBcntTi1
Brain	0.69	0.01	-0.05	-0.03	0.01	-0.06	-0.03	-0.01	0.03	0.02	0.00	-0.03	0.01	0.04
Breast	-0.10	0.11	0.14	0.00	0.06	0.01	0.03	-0.01	0.05	-0.09	0.07	-0.01	0.00	-0.13
Colon	-0.05	-0.03	-0.04	0.10	0.02	-0.01	-0.05	-0.07	-0.05	-0.05	0.06	-0.08	-0.02	0.03
Endosteum	0.03	0.02	0.01	-0.05	-0.03	0.07	-0.13	-0.04	0.08	-0.13	0.02	0.03	-0.08	-0.04
Liver	-0.05	0.03	0.08	0.00	-0.01	-0.03	0.67	-0.03	-0.05	-0.02	0.02	0.02	0.11	0.02
Lungs	-0.02	-0.01	0.08	0.07	0.56	0.03	0.04	0.02	-0.07	-0.05	0.01	-0.03	0.07	0.00
Oesophagus	-0.14	0.01	0.53	-0.05	0.18	0.04	0.08	0.05	-0.02	-0.07	0.06	-0.14	-0.06	-0.07
R marrow	-0.07	0.01	0.02	-0.01	-0.11	0.04	-0.07	-0.02	0.04	-0.05	0.07	-0.16	0.03	0.02
S glands	0.22	0.07	-0.04	0.02	-0.04	-0.01	-0.04	-0.01	-0.08	-0.01	-0.04	-0.08	-0.02	0.06
Skin	-0.17	0.01	0.00	-0.04	-0.06	-0.04	-0.13	0.02	0.01	-0.04	0.01	-0.14	0.02	0.02
St wall	-0.17	-0.07	0.29	0.04	0.09	0.03	0.30	-0.03	0.07	-0.04	0.17	-0.15	-0.04	-0.01
Testes	-0.15	0.05	-0.11	0.01	-0.05	-0.07	-0.06	0.04	0.01	-0.06	0.13	-0.04	0.02	0.01
Thyroid	-0.04	0.02	0.04	0.04	0.09	0.03	-0.09	0.11	-0.06	0.01	0.05	-0.17	-0.03	-0.01
UB wall	0.01	-0.02	0.03	0.03	-0.03	-0.07	-0.04	0.01	-0.03	-0.01	0.02	-0.03	-0.01	0.09
Adrenals	-0.16	0.09	0.10	0.00	0.06	-0.03	0.35	0.02	0.06	-0.12	0.15	-0.11	-0.06	-0.09
ET	0.43	-0.02	0.04	0.02	0.07	0.05	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	0.09	-0.09	-0.07	0.06
GB wall	0.01	0.05	0.05	-0.01	0.03	-0.07	0.65	0.00	0.08	-0.12	-0.01	0.00	0.05	-0.02
Ht wall	0.05	-0.04	0.71	-0.04	0.02	-0.01	0.03	-0.08	0.01	0.04	-0.01	-0.06	-0.05	0.02
Kidneys	-0.28	-0.06	-0.06	0.09	0.08	0.07	0.09	0.07	0.05	-0.10	0.14	-0.09	0.04	0.04
Lymph	-0.08	0.09	0.12	-0.03	0.10	-0.02	-0.05	-0.02	-0.03	-0.02	-0.01	-0.09	-0.01	-0.01
Muscle	-0.21	0.02	-0.11	-0.05	0.01	0.10	-0.07	0.07	-0.09	-0.09	0.11	-0.07	-0.03	0.01
O mucosa	0.19	-0.05	-0.05	0.06	-0.06	-0.01	-0.07	-0.01	0.01	-0.02	0.00	-0.09	0.03	0.01
Pancreas	-0.10	-0.08	-0.02	0.01	0.05	-0.09	0.29	-0.01	0.07	-0.06	0.08	-0.09	-0.06	0.08
Prostate	0.01	-0.01	0.00	-0.09	0.01	-0.05	-0.11	0.04	-0.03	-0.04	0.06	-0.01	-0.01	0.05
SI wall	-0.12	0.04	-0.03	-0.03	0.01	0.05	-0.06	0.02	0.01	-0.05	0.13	-0.08	-0.01	0.03
Spleen	-0.19	0.08	0.21	0.01	0.14	-0.01	-0.03	0.06	0.08	-0.11	0.16	-0.12	0.08	-0.09
Thymus	-0.19	0.06	0.23	0.01	0.09	-0.03	-0.08	-0.03	-0.01	0.03	0.07	-0.19	0.06	-0.01

TABELLE 72. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ^{99m}Tc-Pertechnetat (Teil 1)

Target	Parameter													
	ThyrFs	ThyrTi1	ThyrTi2	Thyrai2	SgldFs	SgldTi1	SgldTi2	Sgldai2	STwlFs	STwlTi1	UlwlTi1	UlwlTj1	OthTi1	Othai1
Brain	0.01	0.07	-0.08	0.08	0.07	0.03	-0.06	0.04	-0.34	-0.02	-0.05	0.00	0.11	-0.13
Breast	-0.03	-0.04	0.05	-0.06	-0.03	0.03	-0.09	0.06	-0.24	0.17	0.02	-0.02	0.09	-0.17
Colon	-0.14	0.02	-0.08	0.06	0.06	0.06	-0.04	0.03	-0.13	0.04	0.18	-0.15	0.04	0.01
Endosteum	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	-0.01	-0.08	0.01	-0.17	0.03	0.08	-0.09	0.00	-0.08
Liver	-0.04	0.02	0.04	0.01	-0.03	0.01	-0.03	0.00	-0.11	0.12	0.13	-0.05	-0.01	-0.06
Lungs	-0.02	0.05	-0.01	-0.03	-0.12	-0.04	0.02	-0.08	-0.40	0.23	0.05	0.01	0.24	-0.22
Oesophagus	0.13	0.05	-0.07	0.00	-0.10	0.08	-0.03	0.00	-0.15	0.15	-0.01	0.02	0.07	-0.20
R marrow	0.03	-0.01	-0.03	0.06	0.00	0.02	0.03	0.02	-0.24	0.05	0.00	-0.06	0.09	-0.05
S glands	-0.03	0.05	0.07	-0.03	0.49	0.31	0.06	0.17	-0.11	-0.02	0.05	-0.02	0.02	-0.10
Skin	-0.05	0.00	0.06	0.09	-0.07	0.09	-0.01	0.04	-0.35	0.03	0.06	-0.07	0.05	-0.15
St wall	-0.06	0.01	0.03	-0.06	0.07	0.04	0.03	-0.03	0.42	0.38	-0.02	-0.01	-0.07	0.01
Testes	-0.07	0.02	-0.04	-0.06	-0.01	-0.02	0.00	0.03	-0.24	-0.06	0.03	-0.02	0.03	-0.07
Thyroid	0.90	0.72	0.29	0.57	-0.02	-0.04	0.04	-0.04	-0.17	0.06	0.04	0.02	0.06	0.02
UB wall	-0.10	-0.02	0.02	0.10	0.02	0.10	-0.02	0.02	-0.08	-0.11	0.01	0.01	0.01	-0.02
Adrenals	-0.02	-0.08	-0.02	-0.06	-0.07	-0.08	-0.01	0.05	-0.03	0.06	0.02	-0.01	0.07	-0.15
ET	0.06	0.09	0.00	0.00	0.14	0.07	-0.01	-0.04	-0.28	-0.01	0.03	-0.06	0.05	-0.12
GB wall	-0.08	0.05	-0.08	-0.06	-0.04	0.01	0.13	0.01	0.00	0.04	0.04	-0.11	0.10	-0.03
Ht wall	-0.02	0.06	0.07	0.02	-0.02	-0.02	0.08	0.02	-0.01	0.40	-0.03	-0.02	0.11	-0.08
Kidneys	0.03	-0.01	-0.07	-0.02	-0.06	-0.02	-0.01	0.03	-0.07	0.06	0.06	-0.12	0.18	-0.05
Lymph	0.01	0.01	0.06	-0.04	-0.03	-0.07	-0.02	0.06	0.03	0.07	0.10	-0.10	0.08	-0.09
Muscle	-0.06	0.06	0.02	0.01	-0.01	-0.06	0.05	0.02	-0.24	0.03	-0.09	-0.01	0.02	-0.07
O mucosa	0.05	0.05	-0.07	0.02	0.14	0.09	0.03	0.09	-0.39	0.05	0.00	0.01	0.05	-0.09
Pancreas	-0.01	-0.04	-0.05	-0.02	0.03	0.01	0.01	0.06	0.13	0.20	0.01	-0.01	0.00	0.04
Prostate	-0.06	-0.07	-0.03	0.06	-0.02	0.03	0.01	0.02	-0.18	0.02	0.02	-0.09	0.00	-0.03
SI wall	0.03	0.05	0.00	0.08	-0.02	0.01	-0.03	0.04	-0.02	0.14	0.15	-0.08	0.07	-0.06
Spleen	-0.03	0.04	-0.02	0.02	0.01	0.04	0.02	-0.02	0.10	0.30	-0.02	-0.04	0.05	-0.09
Thymus	0.14	0.02	0.01	-0.04	-0.12	-0.01	0.00	0.04	-0.21	0.04	0.05	0.03	0.06	-0.13

TABELLE 73. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für 99m Tc-Pertechnetat (Teil 2)

Target	Parameter								
	OthTi2	Othai2	OthTi3	STcntTi1	SlcntTi1	UlcntTi1	LlcntTi1	KidnTi1	UBcntTi1
Brain	0.21	-0.09	0.11	-0.03	-0.01	-0.02	0.00	-0.04	0.02
Breast	0.09	0.01	0.14	0.04	0.02	0.05	-0.04	-0.12	0.04
Colon	0.00	-0.04	0.02	0.08	-0.04	0.04	0.01	-0.01	-0.01
Endosteum	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.04	-0.01	-0.02	-0.03
Liver	0.12	-0.02	-0.01	0.01	-0.05	0.11	-0.06	0.00	0.00
Lungs	0.23	-0.17	0.14	0.04	-0.05	-0.02	0.05	0.01	0.00
Oesophagus	0.17	0.01	0.15	-0.02	0.02	-0.04	-0.08	-0.01	0.04
R marrow	0.11	-0.14	0.12	-0.01	0.05	0.07	0.14	0.00	0.12
S glands	0.07	0.03	0.05	0.04	0.04	-0.03	0.03	0.00	0.01
Skin	0.09	-0.12	0.11	0.04	-0.02	0.04	0.04	-0.01	0.06
St wall	0.03	-0.03	0.04	0.03	-0.01	0.06	0.08	0.03	-0.08
Testes	0.07	-0.06	0.11	0.08	-0.02	-0.10	0.01	-0.02	0.07
Thyroid	0.05	-0.09	0.10	0.05	-0.03	-0.02	-0.04	-0.05	0.03
UB wall	-0.03	0.03	-0.05	0.06	0.04	0.00	0.00	0.03	0.20
Adrenals	0.10	0.04	0.08	0.04	0.00	0.02	-0.01	-0.02	-0.03
ET	0.03	-0.03	0.08	0.00	-0.06	0.02	-0.03	-0.05	0.04
GB wall	0.03	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.02	0.03	0.04	0.06
Ht wall	0.11	-0.16	0.14	0.07	0.00	0.04	0.02	0.02	0.01
Kidneys	0.12	-0.03	0.01	0.01	0.02	-0.05	0.09	0.18	0.05
Lymph	0.01	-0.03	0.06	0.01	-0.09	0.00	0.20	0.02	0.17
Muscle	0.09	-0.10	0.08	0.00	0.02	0.00	0.01	0.06	0.04
O mucosa	0.15	-0.17	0.09	-0.01	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.04
Pancreas	0.04	-0.08	0.01	0.02	0.02	0.07	0.01	-0.04	0.04
Prostate	0.03	-0.09	0.15	-0.04	0.05	0.00	0.01	-0.04	0.39
SI wall	0.05	-0.01	0.07	-0.07	-0.06	-0.01	0.10	0.02	0.14
Spleen	0.03	-0.01	0.05	0.02	0.01	-0.01	0.07	-0.03	0.03
Thymus	0.06	-0.01	0.10	0.02	-0.06	0.01	-0.03	0.06	-0.04

TABELLE 74. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für 99m Tc-Phosphonat

Target	Parameter												
	BoneFs	BoneTi1	Boneai1	BoneTi2	BoneTj1	KidnFs	KidnTi1	Kidnai1	KidnTi2	Kidnai2	KidnTi3	UBcntTi1	OthTi1
Brain	0.07	0.06	-0.04	0.02	-0.02	0.06	-0.02	0.02	-0.02	-0.02	-0.07	0.01	0.01
Breast	-0.35	0.02	-0.05	0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.07	0.05	0.09	0.07	0.02	0.08
Colon	0.02	-0.01	-0.06	0.00	0.06	0.04	-0.01	-0.04	0.05	0.00	0.06	0.18	0.06
Endosteum	-0.21	-0.01	-0.16	0.09	-0.05	-0.06	-0.08	0.05	0.02	-0.06	-0.05	0.17	0.01
Liver	-0.14	0.03	0.00	-0.03	-0.05	-0.01	0.05	-0.07	0.03	0.07	-0.01	0.05	0.04
Lungs	0.04	-0.05	-0.03	0.02	-0.01	-0.03	0.05	0.01	-0.03	-0.02	-0.05	0.02	0.06
Oesophagus	0.11	0.03	-0.06	0.03	-0.11	0.06	-0.03	0.02	0.05	0.00	0.08	-0.01	-0.03
R marrow	0.16	-0.07	-0.06	0.05	-0.02	-0.05	-0.05	-0.04	0.01	0.07	0.01	0.03	0.03
S glands	-0.46	0.06	-0.11	0.05	0.00	0.03	0.01	0.07	0.01	-0.10	-0.01	0.03	0.06
Skin	0.01	0.04	-0.08	0.07	-0.04	0.00	-0.08	0.03	0.04	-0.03	-0.02	0.07	0.05
St wall	-0.13	-0.05	-0.09	0.05	-0.08	0.05	-0.05	-0.02	0.01	-0.01	0.05	-0.01	0.05
Testes	-0.44	-0.02	-0.04	0.00	-0.03	-0.03	0.00	0.02	0.08	-0.03	0.03	0.30	0.04
Thyroid	0.12	0.01	-0.02	0.06	-0.01	0.00	-0.09	-0.02	0.05	-0.01	0.06	-0.01	0.06
UB wall	0.04	-0.03	0.00	0.06	-0.03	-0.02	0.01	0.01	0.04	-0.01	0.01	0.16	-0.01
Adrenals	0.01	0.05	-0.04	0.07	-0.02	0.03	0.01	-0.08	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03
ET	-0.44	0.02	-0.12	0.02	-0.04	-0.10	0.03	-0.09	-0.05	0.05	-0.08	0.09	0.09
GB wall	-0.09	0.06	-0.02	0.00	-0.06	0.18	-0.01	-0.08	-0.04	0.05	-0.04	-0.01	0.05
Ht wall	0.00	-0.04	-0.04	-0.09	-0.10	0.03	-0.02	-0.03	-0.07	0.05	-0.01	0.00	0.00
Kidneys	-0.05	0.01	-0.07	-0.03	-0.02	0.28	0.09	-0.07	0.09	-0.10	0.07	-0.04	-0.03
Lymph	-0.17	-0.04	-0.07	0.00	0.00	0.08	0.02	-0.04	0.00	0.03	-0.01	0.29	-0.02
Muscle	0.09	0.09	-0.01	0.04	-0.05	0.00	0.04	0.01	0.03	-0.01	-0.04	0.10	-0.02
O mucosa	-0.48	0.05	-0.18	0.10	-0.02	-0.01	-0.03	-0.07	-0.09	0.08	-0.04	-0.08	0.14
Pancreas	-0.08	-0.02	-0.05	-0.03	0.05	0.08	0.06	-0.03	0.02	-0.02	0.06	0.05	0.07
Prostate	-0.01	-0.05	0.04	-0.01	0.07	-0.08	0.11	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	0.26	0.04
SI wall	-0.03	0.00	-0.05	-0.09	0.00	-0.02	0.04	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.17	0.09
Spleen	-0.08	0.06	-0.11	-0.02	-0.01	0.12	-0.02	-0.10	-0.04	0.06	-0.03	-0.06	0.07
Thymus	0.03	0.00	-0.12	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	-0.06	-0.02	0.03	-0.07	0.03

TABELLE 75. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ^{99m}Tc-Sestamibi (Teil 1)

Target	Parameter													
	HtwlFs	HtwlTi1	HtwlTi2	Htwlai2	KidnFs	KidnTi1	MsclFs	MsclTi1	SglndlFs	SglndTi1	ThyrFs	ThyrTi1	OthTi1	LiverFs
Brain	-0.16	0.11	0.02	0.02	-0.70	0.01	-0.77	0.06	0.14	0.06	0.07	0.03	0.55	-0.80
Breast	-0.04	0.13	0.12	-0.01	-0.31	0.05	-0.21	0.07	0.04	-0.03	0.01	0.00	0.22	-0.25
Colon	-0.08	0.03	0.03	0.02	0.05	0.09	-0.07	-0.02	-0.01	0.00	0.00	-0.03	-0.01	-0.07
Endosteum	-0.05	-0.03	-0.05	0.04	-0.16	0.11	-0.14	0.06	0.07	-0.02	0.00	0.01	0.07	-0.21
Liver	0.04	0.08	-0.04	-0.04	0.19	0.13	0.04	0.04	0.02	-0.03	0.00	0.07	0.03	0.60
Lungs	0.13	0.09	0.03	0.01	-0.31	0.17	-0.29	0.07	-0.07	0.00	0.04	0.08	0.25	-0.24
Oesophagus	0.22	0.12	0.00	-0.04	-0.22	0.20	-0.27	0.17	0.03	0.06	-0.07	0.04	0.39	-0.16
R marrow	-0.06	0.00	0.00	0.08	-0.09	0.11	0.01	0.17	0.01	0.04	0.02	-0.04	0.09	-0.28
S glands	-0.01	0.05	0.08	-0.01	-0.04	0.03	-0.03	0.03	0.52	0.16	0.02	0.00	-0.04	-0.06
Skin	-0.01	0.06	-0.07	-0.08	-0.14	0.06	-0.06	0.06	0.00	0.10	0.04	-0.10	0.20	-0.29
St wall	-0.03	0.07	-0.01	0.07	0.12	0.08	-0.18	0.05	-0.02	-0.03	0.04	0.00	0.04	0.01
Testes	-0.09	-0.01	0.04	-0.06	-0.23	-0.02	0.04	0.10	-0.07	-0.09	-0.03	0.02	0.18	-0.25
Thyroid	-0.06	0.03	-0.08	-0.04	-0.30	-0.03	0.17	0.08	0.10	0.06	0.61	0.48	0.20	-0.28
UB wall	-0.02	-0.08	0.00	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.05	0.06	0.07	0.02	-0.02	0.06	0.00
Adrenals	0.00	0.02	-0.01	-0.10	0.35	0.26	-0.07	0.10	-0.07	0.00	0.02	-0.01	-0.04	0.07
ET	-0.02	-0.02	0.01	0.02	-0.32	-0.02	-0.18	0.07	0.18	0.08	0.06	-0.02	0.16	-0.32
GB wall	-0.06	0.01	0.03	0.07	0.05	0.09	-0.01	-0.07	0.02	-0.01	0.05	-0.04	-0.02	0.05
Ht wall	0.49	0.15	0.14	0.14	-0.13	0.07	-0.15	0.05	0.01	0.00	0.01	0.05	0.18	0.03
Kidneys	-0.03	-0.02	-0.02	0.01	0.71	0.50	-0.10	0.01	-0.01	0.01	0.01	0.08	0.09	-0.01
Lymph	-0.01	0.04	0.02	0.09	-0.01	0.09	-0.08	0.04	0.07	0.09	0.04	0.08	0.12	-0.12
Muscle	-0.04	-0.04	-0.01	-0.05	-0.15	0.11	0.15	0.02	-0.02	-0.06	-0.04	-0.06	0.11	-0.19
O mucosa	-0.01	-0.08	-0.01	0.07	-0.28	-0.03	-0.18	0.08	0.25	0.03	-0.04	-0.01	0.21	-0.41
Pancreas	0.00	0.06	-0.05	-0.03	0.05	0.11	-0.07	0.02	0.03	-0.10	-0.08	-0.08	-0.03	0.02
Prostate	-0.02	0.07	-0.08	-0.01	-0.14	-0.03	-0.06	0.09	-0.06	0.05	0.00	-0.02	0.12	-0.22
SI wall	0.10	0.07	-0.06	-0.03	0.09	0.12	-0.09	-0.02	-0.02	-0.12	0.02	-0.02	0.04	-0.13
Spleen	0.06	-0.06	-0.01	0.02	0.42	0.21	-0.16	-0.09	-0.01	0.00	0.04	-0.03	0.15	-0.19
Thymus	0.24	-0.02	0.05	0.06	-0.32	0.09	-0.29	0.04	-0.03	-0.03	-0.04	0.06	0.25	-0.40

TABELLE 76. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ^{99m}Tc -Sestamibi (Teil 2)

Target	Parameter							
	LiverTi1	LiverTi2	Liverai2	GBcntTi1	SlcntTi1	UlcntTi1	LlcntTi1	UBcntTi1
Brain	0.07	0.07	0.10	-0.07	-0.02	0.06	-0.04	0.02
Breast	0.09	0.07	0.12	0.04	0.05	-0.01	-0.05	0.09
Colon	0.03	0.05	-0.04	0.06	0.00	0.21	0.11	-0.05
Endosteum	-0.06	0.04	0.01	0.11	0.08	-0.02	0.03	-0.01
Liver	0.43	0.11	0.26	0.03	-0.02	-0.07	-0.05	-0.02
Lungs	0.18	0.10	0.15	0.04	0.06	-0.02	0.04	0.04
Oesophagus	0.34	0.15	0.11	0.07	0.01	-0.07	-0.09	-0.01
R marrow	0.13	-0.03	0.10	0.09	0.06	-0.01	0.15	0.04
S glands	-0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	-0.08	-0.04	0.07
Skin	0.01	0.09	0.06	0.03	0.10	0.06	0.01	0.02
St wall	0.09	0.06	0.05	0.08	0.06	0.07	0.04	0.04
Testes	0.05	-0.01	0.04	0.02	0.02	0.04	0.02	0.05
Thyroid	0.01	0.00	0.03	0.00	-0.02	0.07	-0.03	0.06
UB wall	-0.05	0.04	-0.06	-0.01	0.00	-0.01	0.06	0.03
Adrenals	-0.05	-0.02	0.07	0.02	0.11	0.01	0.08	0.00
ET	0.11	0.01	-0.08	-0.02	0.02	0.06	-0.02	-0.05
GB wall	0.00	0.00	0.11	0.01	-0.03	0.05	0.02	-0.04
Ht wall	0.14	0.05	0.12	0.05	0.13	0.05	-0.04	-0.02
Kidneys	0.09	-0.01	-0.02	-0.08	0.06	-0.05	0.00	-0.06
Lymph	0.07	-0.06	0.05	0.00	0.12	0.05	0.37	0.01
Muscle	0.11	0.05	0.05	-0.03	0.04	0.07	0.07	0.00
O mucosa	0.02	0.01	0.02	0.02	-0.02	0.07	0.09	0.05
Pancreas	0.01	-0.07	0.07	-0.01	0.05	0.03	0.04	0.01
Prostate	-0.01	0.03	0.06	-0.07	0.10	0.03	0.08	0.13
SI wall	0.05	0.07	0.04	-0.02	0.23	0.21	0.10	0.03
Spleen	0.01	-0.02	0.08	-0.05	0.02	0.01	0.02	0.04
Thymus	0.08	0.01	0.10	0.00	-0.05	0.04	0.02	0.05

TABELLE 77. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ^{99m}Tc-Tetrofosmin (Teil 1)

Target	Parameter													
	HtwlFs	HtwlTi1	HtwlTi2	Htwlai2	LiverFs	LiverTi1	LiverTi2	Liverai2	KidnFs	KidnTi1	KidnTi2	Kidnai2	SgldFs	SgldTi1
Brain	0.03	-0.03	-0.02	-0.02	-0.16	-0.05	0.01	0.02	-0.11	0.00	-0.06	0.07	0.04	0.07
Breast	0.03	-0.02	-0.01	0.05	-0.09	0.04	0.03	0.09	-0.15	-0.03	-0.01	-0.01	0.02	0.02
Colon	0.08	0.02	0.11	0.02	-0.09	0.04	0.02	0.06	0.06	0.02	0.02	-0.02	0.04	0.09
Endosteum	-0.05	-0.02	-0.01	-0.03	-0.10	0.10	0.00	-0.03	-0.07	0.00	-0.01	-0.03	0.03	0.04
Liver	-0.03	0.00	0.10	0.03	0.13	0.07	0.07	0.15	0.06	0.08	0.03	0.07	-0.01	0.02
Lungs	0.18	-0.05	0.01	0.03	-0.29	0.03	0.08	0.06	-0.10	0.01	-0.04	0.12	-0.13	0.03
Oesophagus	0.12	-0.04	0.07	0.05	-0.18	0.01	-0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
R marrow	0.08	-0.03	0.01	0.03	-0.15	0.06	-0.03	0.05	0.03	-0.02	0.00	0.02	-0.01	0.11
S glands	0.03	0.02	0.06	-0.03	0.00	-0.07	0.03	-0.06	-0.07	0.01	0.08	0.03	0.49	0.19
Skin	0.01	0.00	0.03	0.09	-0.18	-0.01	0.07	0.00	-0.11	-0.04	0.02	0.05	0.06	0.06
St wall	-0.02	-0.05	-0.01	-0.02	-0.06	-0.03	0.05	0.08	0.04	0.01	0.04	0.02	0.01	0.06
Testes	0.05	-0.05	0.09	0.01	-0.11	-0.05	-0.12	-0.05	-0.08	0.00	-0.04	-0.04	-0.04	0.01
Thyroid	0.02	-0.03	0.11	0.02	-0.19	0.04	0.03	-0.06	-0.17	0.02	0.07	0.02	0.07	-0.04
UB wall	0.08	0.10	0.01	-0.10	-0.07	-0.02	-0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.02	0.06	-0.07
Adrenals	0.02	0.00	0.04	0.03	-0.04	-0.02	0.02	0.00	0.24	0.03	-0.05	0.17	-0.03	0.06
ET	-0.01	-0.03	0.02	-0.01	-0.08	0.01	-0.01	0.01	-0.17	-0.02	0.00	-0.04	0.24	-0.01
GB wall	0.09	-0.07	0.02	-0.07	-0.02	-0.10	0.07	-0.04	-0.05	0.05	0.05	0.00	-0.03	0.07
Ht wall	0.55	0.21	0.10	0.18	-0.11	0.00	-0.04	0.06	-0.06	-0.01	0.10	0.13	-0.03	0.04
Kidneys	0.01	0.00	-0.03	-0.09	-0.05	0.05	-0.10	-0.01	0.46	0.10	0.05	0.30	-0.12	0.00
Lymph	0.01	0.05	-0.07	-0.09	-0.12	0.00	0.06	-0.09	0.02	0.08	0.02	0.17	-0.03	0.02
Muscle	-0.03	0.02	-0.04	-0.01	-0.01	0.05	-0.03	0.04	-0.08	-0.06	-0.02	0.05	-0.04	0.04
O mucosa	0.04	0.01	-0.06	-0.04	-0.18	-0.07	0.01	-0.04	-0.11	0.06	0.00	-0.04	0.27	0.08
Pancreas	-0.01	-0.05	-0.07	-0.06	-0.01	0.00	0.09	-0.01	0.07	0.09	0.01	0.06	0.00	0.01
Prostate	-0.06	-0.01	0.07	-0.02	-0.14	0.01	0.04	-0.05	-0.09	0.02	-0.01	0.00	-0.09	0.01
SI wall	-0.01	-0.08	0.06	0.01	-0.04	0.03	0.03	0.05	0.02	0.01	0.03	0.08	-0.04	0.01
Spleen	0.09	0.05	0.02	0.03	-0.06	-0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	-0.05	0.07	0.08	-0.07
Thymus	0.09	0.08	0.02	-0.02	-0.24	0.01	-0.03	-0.04	-0.13	-0.16	-0.03	0.12	0.03	-0.02

TABELLE 78. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ^{99m}Tc-Tetrofosmin (Teil 2)

Target	Parameter									
	ThyrFs	ThyrTi1	OthTi1	Othai1	OthTi2	GBcntTi1	SICntTi1	UlcntTi1	LlcntTi1	UBcntTi1
Brain	0.00	-0.03	0.04	-0.25	0.29	0.04	0.01	0.05	-0.04	0.02
Breast	-0.04	-0.02	0.00	-0.20	0.23	-0.01	0.09	0.03	0.04	0.06
Colon	0.00	0.04	-0.10	-0.05	0.02	0.00	0.03	0.12	0.13	0.10
Endosteum	0.02	0.02	0.03	-0.17	0.07	-0.08	0.01	-0.01	0.01	0.00
Liver	-0.05	-0.01	-0.02	-0.09	0.01	0.09	0.13	0.05	0.06	-0.04
Lungs	-0.05	-0.02	0.00	-0.42	0.51	0.01	-0.03	-0.04	0.10	-0.07
Oesophagus	0.12	-0.02	0.02	-0.22	0.20	-0.04	-0.04	0.04	0.02	-0.01
R marrow	0.03	0.00	0.02	-0.24	0.30	0.01	0.14	0.04	0.01	0.02
S glands	0.04	0.08	0.02	0.04	0.07	0.00	-0.03	-0.01	0.04	0.03
Skin	-0.01	-0.05	0.02	-0.30	0.37	0.01	0.09	0.06	-0.05	0.07
St wall	0.00	0.01	0.05	-0.02	0.11	0.01	-0.04	0.05	0.06	0.04
Testes	-0.03	0.00	0.01	-0.12	0.20	0.04	0.00	0.03	0.03	-0.05
Thyroid	0.61	0.49	-0.01	-0.23	0.39	0.07	-0.02	0.10	-0.04	0.03
UB wall	0.05	-0.07	0.06	-0.02	0.04	0.01	0.07	-0.02	-0.04	0.18
Adrenals	0.06	-0.03	0.04	-0.08	0.02	0.14	-0.01	-0.02	-0.06	-0.09
ET	0.03	0.03	0.05	-0.18	0.23	0.05	-0.04	0.02	0.06	-0.08
GB wall	0.04	0.15	0.09	-0.06	0.03	0.11	-0.02	-0.02	-0.08	0.04
Ht wall	0.00	0.02	0.05	-0.28	0.29	0.04	0.01	0.04	0.01	-0.06
Kidneys	0.02	-0.02	0.04	-0.12	0.02	0.06	0.10	0.03	-0.02	0.03
Lymph	-0.08	-0.07	0.08	-0.16	0.25	-0.04	0.13	0.05	0.30	0.11
Muscle	-0.03	0.00	0.03	-0.21	0.25	-0.07	-0.02	0.07	0.00	0.00
O mucosa	0.00	-0.02	-0.01	-0.12	0.19	-0.01	0.02	0.06	0.00	0.05
Pancreas	0.00	0.00	0.05	-0.11	0.04	0.09	-0.03	0.06	0.04	0.02
Prostate	-0.04	-0.05	0.07	-0.15	0.18	0.02	0.12	-0.02	0.06	0.26
SI wall	0.00	-0.07	-0.07	-0.04	0.20	0.00	0.27	0.14	0.08	0.09
Spleen	-0.02	-0.03	0.07	-0.14	0.12	-0.05	0.09	0.01	-0.09	-0.04
Thymus	0.04	0.02	0.07	-0.28	0.27	-0.02	0.04	0.03	0.10	0.01

TABELLE 79. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für 99m Tc-MAA

Target	Parameter								
	LungsTi1	LungsTi2	Lungsa12	LiverFs	LiverTi1	LiverTj1	KidnTi1	UBcntTi1	OthTi1
Brain	0.15	-0.05	0.09	-0.29	-0.09	0.01	-0.01	0.01	0.15
Breast	0.18	0.00	0.04	0.13	-0.09	-0.03	-0.05	0.02	-0.02
Colon	0.14	-0.01	0.03	0.15	0.03	-0.09	0.03	0.11	0.03
Endosteum	0.02	-0.01	0.01	-0.03	-0.07	0.00	-0.04	-0.04	0.04
Liver	0.34	0.03	0.07	0.78	0.07	-0.59	-0.02	-0.04	0.00
Lungs	0.41	0.03	0.09	0.15	0.09	-0.01	0.01	0.03	0.03
Oesophagus	0.42	-0.01	0.18	0.18	0.01	-0.04	-0.02	0.01	-0.05
R marrow	0.31	0.04	0.09	0.10	0.04	-0.13	0.05	0.03	0.05
S glands	0.27	-0.08	0.13	-0.15	-0.03	0.00	0.05	-0.05	0.06
Skin	0.29	0.01	0.12	0.04	-0.07	-0.11	0.00	-0.04	0.08
St wall	0.35	-0.02	0.08	0.26	0.06	-0.11	0.05	0.02	0.05
Testes	-0.02	0.07	-0.02	-0.26	0.01	0.03	0.05	0.14	0.07
Thyroid	0.25	0.04	0.07	-0.08	0.02	0.02	0.07	0.00	-0.06
UB wall	-0.02	-0.01	-0.08	-0.10	0.00	-0.01	0.00	0.28	-0.03
Adrenals	0.30	0.00	0.02	0.42	0.00	-0.29	0.05	-0.02	0.01
ET	0.19	0.03	0.10	-0.10	-0.04	0.02	-0.01	0.06	-0.09
GB wall	0.19	-0.03	0.10	0.75	0.10	-0.47	0.02	-0.05	-0.07
Ht wall	0.32	-0.04	0.10	0.04	0.03	0.01	-0.07	0.00	-0.01
Kidneys	0.24	-0.04	0.04	0.41	0.07	-0.22	0.04	0.01	0.02
Lymph	0.29	0.14	0.09	0.17	-0.02	-0.08	-0.01	0.09	0.03
Muscle	0.38	0.02	0.09	0.04	-0.04	-0.14	0.03	0.06	0.00
O mucosa	0.23	-0.02	0.09	-0.11	-0.01	0.01	0.01	0.03	0.04
Pancreas	0.27	-0.01	0.11	0.44	0.10	-0.28	-0.03	-0.07	-0.05
Prostate	0.02	0.04	0.02	-0.11	-0.01	0.05	-0.03	0.56	0.04
SI wall	0.18	0.01	0.00	0.22	0.05	-0.18	0.04	0.08	0.04
Spleen	0.39	-0.04	0.15	-0.01	-0.05	-0.06	0.03	-0.01	-0.02
Thymus	0.27	-0.07	0.18	-0.01	0.00	-0.05	-0.03	-0.03	0.06

TABELLE 80. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ²⁰¹Tl-Chlorid (Teil 1)

Target	Parameter											
	BoneFs	BoneTi1	BoneTi2	Boneai2	ThyrFs	ThyrTi1	ThyrTi2	Thyrai2	HtwlFs	HtwlTi1	HtwlTi2	Htwlai2
Brain	-0.41	-0.03	-0.06	0.06	-0.01	0.02	0.00	0.03	-0.34	-0.04	0.09	0.08
Breast	-0.46	-0.01	-0.11	0.01	-0.04	0.00	-0.01	-0.01	-0.27	-0.04	0.00	0.03
Colon	-0.24	0.01	-0.09	0.04	-0.08	0.01	0.00	0.05	-0.15	-0.10	-0.05	-0.06
Endosteum	-0.30	0.00	-0.02	0.01	-0.03	0.02	0.02	-0.04	-0.24	-0.06	0.06	0.00
Liver	-0.08	-0.01	0.04	0.04	0.03	-0.01	0.01	0.04	-0.04	-0.06	-0.02	-0.09
Lungs	0.07	-0.03	0.03	0.00	-0.03	-0.02	0.07	-0.02	0.01	-0.08	0.02	0.05
Oesophagus	-0.46	0.04	-0.05	0.07	0.05	0.05	0.10	0.00	-0.12	0.00	0.08	0.12
R marrow	-0.36	0.04	-0.05	0.07	0.03	0.01	0.00	0.02	-0.27	-0.08	-0.01	0.03
S glands	-0.51	-0.01	-0.09	0.04	-0.01	0.03	0.02	-0.02	-0.37	-0.01	0.08	0.07
Skin	-0.44	0.00	-0.05	0.06	-0.03	0.06	-0.05	0.00	-0.36	0.01	0.07	0.08
St wall	-0.37	0.02	-0.02	-0.02	-0.01	0.02	-0.02	-0.01	-0.22	-0.01	0.09	0.08
Testes	-0.28	0.07	0.00	0.03	0.00	0.03	0.09	0.03	-0.27	-0.02	0.02	-0.01
Thyroid	-0.34	0.01	-0.08	-0.05	0.32	0.08	0.04	0.04	-0.27	0.03	0.08	0.03
UB wall	-0.45	0.04	-0.07	0.01	-0.06	0.05	0.01	-0.02	-0.32	-0.04	0.00	0.05
Adrenals	-0.28	0.09	-0.10	0.00	-0.04	0.02	0.01	-0.01	-0.15	0.00	0.09	0.13
ET	-0.49	-0.02	-0.08	0.06	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.37	-0.04	0.07	0.04
GB wall	-0.34	0.08	-0.10	0.01	0.06	0.05	0.04	0.05	-0.20	-0.08	0.06	0.05
Ht wall	-0.04	0.01	-0.07	-0.04	-0.02	0.07	0.03	-0.03	0.68	0.08	0.13	0.18
Kidneys	-0.04	0.00	-0.02	0.05	0.03	-0.01	0.00	-0.04	0.07	0.04	-0.01	-0.07
Lymph	-0.42	0.04	-0.03	0.03	-0.11	-0.01	-0.05	0.01	-0.28	-0.02	0.04	0.06
Muscle	-0.47	0.02	-0.11	0.01	-0.01	0.03	0.03	-0.01	-0.34	-0.01	0.05	0.10
O mucosa	-0.41	-0.05	-0.05	0.00	-0.04	0.03	0.02	0.00	-0.35	-0.03	0.07	0.07
Pancreas	-0.34	-0.03	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	0.04	-0.26	-0.11	0.02	0.07
Prostate	-0.25	0.02	-0.11	0.10	0.00	0.02	-0.03	-0.02	-0.18	-0.04	-0.03	0.09
SI wall	-0.45	-0.04	-0.05	-0.02	0.03	0.05	0.03	-0.03	-0.29	-0.02	0.08	0.07
Spleen	0.02	-0.05	-0.08	-0.06	0.02	0.02	-0.05	0.02	-0.11	0.07	-0.01	0.00
Thymus	-0.39	0.00	-0.13	0.04	0.07	0.05	0.05	0.03	-0.23	-0.09	0.11	0.06

TABELLE 81. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ²⁰¹Tl-Chlorid (Teil 2)

Target	Parameter											
	HtwlTi3	Htwlai3	LungsFs	LungsTi1	LungsTi2	Lungsa12	KidnFs	KidnTi1	KidnTi2	Kidnai2	LiverFs	LiverTi1
Brain	0.03	-0.07	-0.26	0.06	0.04	0.02	-0.46	0.04	-0.02	-0.02	-0.61	-0.07
Breast	-0.04	-0.04	-0.28	0.04	0.02	0.01	-0.49	0.05	0.00	0.01	-0.59	-0.03
Colon	0.01	0.03	-0.21	-0.02	-0.11	-0.01	-0.21	0.07	0.03	0.04	-0.37	-0.06
Endosteum	0.02	-0.04	-0.12	0.07	-0.08	0.09	-0.29	0.02	0.01	0.01	-0.51	-0.01
Liver	-0.05	0.07	0.02	0.00	-0.02	0.06	-0.05	-0.08	-0.01	0.05	0.64	0.14
Lungs	0.01	-0.03	0.21	0.10	-0.08	-0.01	0.02	0.05	-0.04	-0.01	-0.02	0.03
Oesophagus	0.01	-0.05	-0.16	0.11	0.01	-0.02	-0.44	0.09	0.02	-0.01	-0.55	-0.05
R marrow	-0.04	-0.09	-0.18	-0.03	-0.07	0.06	-0.33	0.00	-0.03	0.01	-0.51	-0.05
S glands	0.02	-0.08	-0.34	0.03	0.00	0.04	-0.53	0.04	-0.03	-0.03	-0.70	-0.09
Skin	0.00	-0.08	-0.31	0.07	-0.05	0.09	-0.47	0.02	-0.02	0.00	-0.64	-0.09
St wall	0.05	-0.05	-0.18	0.02	0.00	0.02	-0.29	0.02	0.06	0.06	-0.34	-0.02
Testes	-0.01	0.01	-0.09	0.08	0.02	-0.04	-0.23	-0.01	0.05	0.09	-0.41	-0.07
Thyroid	-0.02	-0.04	-0.21	0.02	0.00	0.02	-0.41	0.08	-0.02	-0.01	-0.55	-0.06
UB wall	0.05	-0.05	-0.26	0.06	-0.02	0.05	-0.47	-0.01	-0.05	-0.04	-0.59	-0.11
Adrenals	0.03	-0.11	-0.16	0.05	0.01	0.00	0.17	0.11	0.01	0.08	-0.15	0.01
ET	0.00	-0.06	-0.33	0.01	-0.03	0.05	-0.50	-0.01	0.00	-0.01	-0.67	-0.08
GB wall	0.00	-0.06	-0.14	0.03	0.00	0.06	-0.21	0.06	0.07	-0.04	0.11	0.05
Ht wall	0.02	0.10	-0.02	-0.02	0.04	0.01	-0.06	0.10	0.05	0.09	0.04	0.00
Kidneys	0.08	0.07	-0.09	0.01	0.05	-0.05	0.18	0.04	-0.07	-0.02	0.00	0.01
Lymph	0.00	-0.05	-0.25	0.00	-0.08	0.02	-0.28	0.01	-0.03	0.03	-0.56	0.03
Muscle	-0.05	-0.10	-0.31	0.05	-0.08	-0.01	-0.47	0.00	-0.07	-0.03	-0.63	-0.05
O mucosa	0.01	-0.08	-0.31	0.02	0.02	0.00	-0.46	0.05	0.00	0.00	-0.66	-0.03
Pancreas	-0.02	-0.08	-0.18	0.10	0.00	0.05	-0.10	0.03	0.05	0.02	-0.21	-0.02
Prostate	0.02	-0.09	-0.12	-0.06	-0.07	-0.01	-0.27	-0.05	-0.01	-0.04	-0.42	-0.08
SI wall	-0.04	-0.09	-0.25	0.02	-0.03	0.06	-0.27	0.07	0.00	0.03	-0.51	-0.07
Spleen	-0.01	0.01	-0.08	-0.04	0.04	0.04	-0.03	-0.01	-0.03	-0.03	0.02	0.09
Thymus	-0.03	-0.04	-0.19	0.09	0.00	0.02	-0.43	-0.01	0.03	0.01	-0.63	-0.07

TABELLE 82. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ²⁰¹Tl-Chlorid (Teil 3)

Target	Parameter											
	LiverTi2	Liverai2	SplnFs	SplnTi1	SplnTi2	Splnai2	RmarrFs	RmarrTi1	RmarrTi2	Rmarrai2	StwlFs	StwlTi1
Brain	0.00	0.07	-0.12	0.02	0.03	0.00	-0.45	-0.03	0.02	0.06	-0.08	-0.01
Breast	0.01	0.04	-0.10	0.02	0.01	-0.01	-0.50	-0.03	-0.01	0.04	-0.04	-0.03
Colon	-0.04	0.01	-0.04	0.03	-0.03	0.04	-0.25	-0.02	0.05	0.00	-0.10	-0.07
Endosteum	0.07	0.05	-0.05	-0.04	0.09	0.00	-0.33	-0.03	0.07	-0.01	-0.08	0.04
Liver	0.05	0.02	0.00	-0.03	-0.04	0.08	-0.07	0.01	0.04	-0.03	0.05	0.03
Lungs	0.00	0.02	0.02	-0.06	0.09	-0.10	0.03	0.02	-0.07	0.03	0.05	-0.08
Oesophagus	0.02	0.04	-0.15	-0.03	0.05	0.01	-0.43	-0.05	0.02	0.06	-0.10	-0.08
R marrow	-0.04	0.11	-0.13	0.02	0.13	-0.04	-0.31	0.02	0.04	0.03	-0.07	0.07
S glands	0.00	0.12	-0.11	0.08	0.07	0.00	-0.51	-0.02	0.01	0.07	-0.03	-0.01
Skin	0.01	0.06	-0.10	0.02	0.00	0.05	-0.53	-0.05	0.05	0.05	-0.02	-0.01
St wall	0.03	0.09	-0.04	0.01	0.01	0.05	-0.44	-0.07	0.03	0.07	0.17	0.04
Testes	-0.05	0.07	-0.05	0.04	0.07	0.07	-0.29	0.02	-0.04	-0.02	-0.01	-0.05
Thyroid	-0.03	0.08	-0.06	0.00	0.03	0.06	-0.48	-0.05	-0.01	-0.01	-0.08	-0.04
UB wall	0.04	0.02	-0.04	0.01	0.12	0.09	-0.39	-0.01	0.05	0.05	-0.05	-0.06
Adrenals	-0.02	0.07	0.01	-0.05	-0.07	0.04	-0.31	-0.02	0.02	0.02	0.00	0.03
ET	0.02	0.07	-0.12	0.04	0.07	0.04	-0.51	-0.02	0.03	0.04	-0.07	-0.01
GB wall	0.03	0.07	-0.13	0.00	0.06	0.06	-0.34	0.00	0.05	0.08	-0.01	-0.05
Ht wall	-0.06	0.03	0.06	-0.03	-0.04	0.04	-0.08	0.06	0.03	0.01	0.03	0.01
Kidneys	-0.05	0.01	-0.07	-0.04	-0.01	-0.07	0.00	0.00	-0.01	0.03	-0.03	-0.01
Lymph	0.04	0.06	-0.03	0.00	0.06	-0.01	-0.39	0.01	0.04	0.03	-0.04	-0.02
Muscle	0.02	0.07	-0.07	0.01	0.07	-0.04	-0.45	-0.03	0.00	0.10	-0.05	-0.02
O mucosa	0.01	0.12	-0.11	0.05	0.04	-0.04	-0.47	0.02	0.00	0.06	-0.04	-0.02
Pancreas	0.00	0.08	-0.05	-0.04	0.02	-0.01	-0.34	-0.06	0.00	0.02	0.00	0.03
Prostate	-0.01	0.01	-0.10	0.09	0.05	-0.03	-0.23	-0.03	-0.02	-0.03	-0.10	0.00
SI wall	-0.03	0.11	-0.17	0.03	0.02	0.04	-0.40	-0.02	-0.04	0.06	-0.01	-0.01
Spleen	0.02	-0.03	0.23	0.05	0.02	0.13	0.05	-0.01	0.11	0.03	0.00	-0.02
Thymus	-0.06	0.08	-0.13	0.06	0.04	0.03	-0.45	-0.02	-0.05	0.03	-0.12	-0.04

TABELLE 83. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ²⁰¹Tl-Chlorid (Teil 4)

Target	Parameter											
	StwlTi2	Stwlai2	StwlFs	SlwlTi1	SlwlTi2	Slwlai2	MsclFs	MsclTi1	MsclTi2	Msclai2	TstsFs	TstsTi1
Brain	-0.01	-0.02	-0.29	0.01	0.03	0.07	-0.96	0.03	-0.01	0.03	0.01	0.00
Breast	0.02	-0.01	-0.28	-0.02	0.06	0.05	-0.96	0.03	-0.02	-0.03	0.03	0.00
Colon	0.03	-0.11	-0.09	0.05	0.03	-0.03	-0.86	0.02	0.01	0.08	0.01	0.00
Endosteum	-0.01	0.03	-0.16	0.05	0.05	-0.01	-0.92	0.05	-0.07	-0.02	-0.06	-0.02
Liver	0.03	-0.04	0.07	0.12	0.04	-0.06	0.07	0.00	-0.03	-0.03	0.00	-0.02
Lungs	-0.08	-0.02	0.02	-0.03	-0.01	0.06	-0.07	0.06	0.09	0.03	0.03	0.04
Oesophagus	0.01	0.05	-0.26	-0.01	0.04	0.03	-0.96	0.00	-0.03	0.05	0.07	-0.01
R marrow	0.05	0.01	-0.14	0.03	0.02	0.00	-0.94	0.06	0.05	-0.05	-0.01	-0.01
S glands	-0.02	0.03	-0.29	0.01	0.03	0.06	-0.97	0.01	0.01	0.00	0.01	-0.01
Skin	0.02	-0.02	-0.32	0.00	0.01	0.03	-0.96	0.00	0.00	0.01	0.02	-0.07
St wall	0.05	0.08	-0.13	-0.03	0.08	0.01	-0.95	-0.02	0.05	0.03	-0.07	0.05
Testes	0.00	0.00	-0.15	0.04	-0.04	0.02	-0.85	0.02	-0.05	0.07	0.26	0.08
Thyroid	-0.04	0.05	-0.25	0.00	0.00	0.00	-0.94	0.04	-0.01	0.05	0.00	-0.02
UB wall	-0.02	-0.01	-0.20	0.02	0.03	0.02	-0.94	0.08	0.05	0.02	0.00	-0.04
Adrenals	0.03	0.03	-0.16	0.03	0.07	-0.08	-0.91	0.03	-0.04	0.06	0.10	-0.01
ET	-0.03	0.00	-0.31	0.02	0.05	0.08	-0.97	0.01	-0.03	0.03	0.06	-0.02
GB wall	-0.01	0.01	-0.13	-0.02	-0.05	-0.01	-0.92	-0.06	0.01	-0.02	0.00	-0.04
Ht wall	0.00	-0.03	0.00	0.04	0.01	-0.10	-0.07	0.05	0.02	-0.06	-0.02	0.00
Kidneys	-0.01	0.03	-0.05	-0.04	0.00	-0.11	0.00	-0.04	-0.08	-0.06	-0.06	0.00
Lymph	0.00	0.00	-0.16	0.04	0.04	0.02	-0.95	0.04	-0.01	0.02	0.00	-0.04
Muscle	-0.07	-0.03	-0.31	0.08	0.06	0.05	-0.96	0.08	0.01	-0.01	0.02	0.00
O mucosa	-0.02	-0.01	-0.30	0.02	0.01	0.03	-0.96	0.02	-0.01	0.00	0.01	0.01
Pancreas	0.02	0.03	-0.10	0.10	0.07	0.05	-0.91	0.10	-0.01	-0.08	0.07	-0.01
Prostate	-0.04	0.03	-0.16	0.04	0.01	-0.01	-0.86	0.00	-0.04	-0.01	0.01	0.02
SI wall	-0.07	0.04	0.05	0.10	0.03	0.12	-0.94	0.10	0.05	-0.02	-0.01	0.02
Spleen	-0.03	-0.06	0.00	-0.10	0.07	0.00	-0.25	0.00	-0.05	-0.05	0.02	-0.01
Thymus	0.02	-0.01	-0.25	-0.02	0.02	0.11	-0.96	0.00	-0.02	-0.01	-0.03	-0.01

TABELLE 84. Partieller Rangkorrelationskoeffizient. Parameter vs. Dosis für ²⁰¹Tl-Chlorid (Teil 5)

Target	Parameter									
	TstsTi2	Tstsai2	OthTi1	Othai1	OthTi2	Othai2	SlcntTi1	UlcntTi1	LlcntTi1	UBcntTi1
Brain	-0.09	0.03	0.24	0.42	0.02	0.27	-0.01	0.02	-0.01	0.04
Breast	-0.11	0.02	0.26	0.41	0.06	0.33	0.06	0.03	-0.05	0.07
Colon	-0.03	0.00	0.08	0.21	0.02	0.17	0.01	-0.04	0.02	-0.07
Endosteum	-0.06	-0.06	0.27	0.28	-0.04	0.26	-0.01	-0.06	-0.07	-0.05
Liver	0.01	0.00	0.05	0.02	0.01	-0.01	0.02	-0.02	-0.03	0.01
Lungs	0.03	0.02	-0.06	-0.01	0.02	0.00	-0.09	-0.01	-0.05	0.01
Oesophagus	-0.06	-0.08	0.30	0.41	0.02	0.36	0.00	0.04	0.02	0.11
R marrow	0.00	0.00	0.20	0.27	0.05	0.34	0.01	0.01	0.05	0.04
S glands	-0.10	0.03	0.30	0.48	0.01	0.35	0.07	-0.02	0.02	0.11
Skin	-0.15	-0.05	0.30	0.43	0.08	0.34	0.04	-0.03	-0.04	0.06
St wall	-0.16	0.05	0.16	0.37	0.07	0.27	-0.03	0.04	-0.03	0.04
Testes	-0.02	0.07	0.13	0.28	0.04	0.12	0.03	-0.01	-0.08	0.07
Thyroid	-0.11	0.03	0.21	0.41	-0.01	0.24	0.00	-0.08	-0.03	0.06
UB wall	-0.05	0.03	0.19	0.36	0.04	0.32	0.05	0.02	0.06	0.03
Adrenals	-0.07	-0.05	0.15	0.30	0.01	0.16	0.01	-0.04	0.00	0.02
ET	-0.12	0.04	0.25	0.46	0.04	0.35	0.05	-0.03	-0.03	0.07
GB wall	-0.05	0.06	0.23	0.27	-0.01	0.29	0.09	0.00	0.03	0.00
Ht wall	-0.02	0.04	0.01	-0.02	-0.03	0.01	0.02	-0.01	-0.07	0.09
Kidneys	-0.02	-0.05	0.02	-0.02	0.03	0.04	-0.04	-0.07	-0.01	-0.04
Lymph	-0.13	0.00	0.22	0.40	-0.01	0.29	0.05	-0.04	0.06	0.13
Muscle	-0.14	0.03	0.26	0.45	0.07	0.29	0.00	-0.01	-0.03	0.07
O mucosa	-0.15	0.00	0.25	0.41	0.04	0.38	0.00	0.00	-0.06	0.07
Pancreas	-0.05	0.05	0.16	0.29	-0.07	0.21	0.00	0.03	0.04	0.06
Prostate	-0.11	0.06	0.17	0.19	-0.04	0.20	0.10	0.01	-0.08	0.03
SI wall	-0.10	-0.01	0.30	0.37	0.01	0.27	0.07	0.03	0.05	0.06
Spleen	-0.01	-0.05	0.00	0.04	-0.01	0.03	0.04	-0.03	0.02	0.01
Thymus	-0.09	0.06	0.24	0.42	0.02	0.35	0.07	-0.01	-0.04	0.08

6.7 Anteile der Unsicherheiten von Modell und Voxel-Phantom

Die Tabellen 85-92 stellen den totalen Sensitivitätsindex der biokinetischen Parameter und der S-Faktoren als Beitragsmaß der Biokinetik und Dosimetrie zur Unsicherheit der Dosiskoeffizienten in den Zielorganen dar. Die Ergebnisse aus Tabelle 85 entsprechen den Berechnungen der zeitintegrierten Aktivität und den Organdosiskoeffizienten für das Radiopharmazeutikum ^{18}F -FDG nach dem MIRD-Schema. In den restlichen Tabellen sind Werte aus den Berechnungen nach dem ICRP-Schema zu finden.

Für alle Radiopharmazeutika, außer für ^{201}Tl -Chlorid, tragen zumeist die S-Faktoren zur größeren Unsicherheit der Dosiskoeffizienten bei. Lediglich bei den Zielorganen, die gleichzeitig die Quellorgane sind, haben die Sensitivitätsindices der biokinetischen Modelparameter einen hohen Wert und bei manchen von ihnen übersteigt der Wert den der S-Faktoren.

So sind bei ^{18}F -FDG (Tabelle 86) die Werte der totalen Sensitivitätsindices der Parameter der Organe Gehirn, Leber, Speiseröhre, Gallenblase, Lunge und Herz größer als 38 %. Lediglich die Werte von Leber und Herz (50,95 % bzw. 54,65 %) übersteigen die der S-Faktoren (47,74 % bzw. 44,02 %). Berechnet nach dem MIRD-Schema haben die totalen Sensitivitätsindices der Parameter der Organe Gehirn, Herz, Lymphe und Muskeln größere Werte als die der S-Faktoren (Tabelle 85).

Bei $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetate (Tabelle 87) haben die Sensitivitätsindices der Parameter für die Zielorgane Schilddrüse und Lunge größere Werte (94,98 % bzw. 54,66 %) als die der S-Faktoren (9,68 % bzw. 36,75 %).

Bei $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Phosphonat (Tabelle 88) sind die Speicheldrüse, ET (Extrathoracic) und die Mundschleimhaut, bei $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin (Tabelle 90) ist die Schilddrüse und bei $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi (Tabelle 89) sind Gehirn, Leber, Schilddrüse und die Niere die Zielorgane, bei denen die Sensitivitätsindices der Parameter die der S-Faktoren überschreiten.

Bei $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA haben alle S-Faktoren größere Indices als die der Modellparameter (Tabelle 91).

Bei ^{201}Tl -Chlorid (Tabelle 92) verhält es sich genau umgekehrt. Hier haben alle Parameter einen hohen Sensitivitätsindex, der zumeist größer ist als der der S-Faktoren. Für alle Quellorgane des biokinetischen Modells von ^{201}Tl -Chlorid, die gleichzeitig Zielorgane sind - mit Ausnahme von Lunge, Hoden und Milz, beobachtet man jedoch einen höheren Sensitivitätsindex bei den S-Faktoren als bei den biokinetischen Parametern. So sind die Beiträge zur Unsicherheit bei der Bestimmung von Dosiskoeffizienten bei den S-Faktoren für die Organe Endost (50,81 %), Magen (91,65 %), Schilddrüse (67,46 %), Nebennieren (53,66 %), Herz (69,82 %), Nieren (52,89 %), Muskeln (59,05 %) und Dünndarm (97,12 %) höher als die der Parameter für diese Organe.

TABELLE 85. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{18}F -FDG (nach MIRD-Schema)

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	55.84 %	43.55 %
Breast	20.04 %	86.18 %
Colon	7.96 %	95.17 %
Endosteum	15.51 %	87.27 %
Liver	15.75 %	84.42 %
Lungs	18.02 %	81.92 %
Oesophagus	42.54 %	66.96 %
R marrow	32.78 %	60.48 %
S glands	21.07 %	86.59 %
Skin	20.64 %	80.70 %
St wall	14.89 %	88.76 %
Testes	31.76 %	71.68 %
Thyroid	27.80 %	80.16 %
UB wall	14.36 %	90.92 %
Adrenals	21.31 %	80.98 %
ET	31.69 %	70.25 %
GB wall	7.16 %	91.90 %
Ht wall	56.39 %	48.17 %
Kidneys	8.05 %	87.56 %
Lymph	74.96 %	33.89 %
Muscle	71.14 %	35.07 %
O mucosa	13.53 %	88.25 %
Pancreas	31.08 %	68.15 %
Prostate	37.41 %	66.86 %
SI wall	10.98 %	89.30 %
Spleen	5.99 %	99.20 %
Thymus	30.19 %	70.72 %

TABELLE 86. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{18}F -FDG (nach ICRP-Schema)

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	48.34 %	50.44 %
Breast	9.48 %	92.59 %
Colon	9.78 %	91.51 %
Endosteum	12.52 %	97.37 %
Liver	50.95 %	47.74 %
Lungs	38.33 %	69.04 %
Oesophagus	38.11 %	55.03 %
R marrow	15.13 %	85.99 %
S glands	13.21 %	80.46 %
Skin	15.46 %	86.28 %
St wall	24.83 %	71.86 %
Testes	6.94 %	98.14 %
Thyroid	13.18 %	88.47 %
UB wall	0.11 %	100.79 %
Adrenals	33.53 %	67.10 %
ET	22.91 %	82.08 %
GB wall	40.14 %	57.95 %
Ht wall	54.65 %	44.02 %
Kidneys	18.50 %	82.01 %
Lymph	12.81 %	92.44 %
Muscle	12.52 %	82.94 %
O mucosa	9.03 %	96.17 %
Pancreas	20.51 %	87.82 %
Prostate	2.65 %	100.56 %
SI wall	11.03 %	91.79 %
Spleen	28.85 %	69.68 %
Thymus	18.14 %	88.25 %

TABELLE 87. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{99m}Tc -Pertechnetat

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	32.63 %	73.80 %
Breast	17.71 %	87.42 %
Colon	6.85 %	102.75 %
Endosteum	6.67 %	87.05 %
Liver	9.85 %	83.49 %
Lungs	54.66 %	36.75 %
Oesophagus	24.12 %	68.70 %
R marrow	22.28 %	72.81 %
S glands	35.67 %	61.96 %
Skin	37.92 %	66.90 %
St wall	29.71 %	73.36 %
Testes	17.57 %	86.66 %
Thyroid	94.98 %	9.68 %
UB wall	4.15 %	96.45 %
Adrenals	6.65 %	93.88 %
ET	25.59 %	70.78 %
GB wall	1.47 %	96.47 %
Ht wall	33.13 %	64.76 %
Kidneys	6.18 %	92.34 %
Lymph	15.14 %	85.09 %
Muscle	17.91 %	78.93 %
O mucosa	31.90 %	74.48 %
Pancreas	2.94 %	97.67 %
Prostate	25.67 %	74.10 %
SI wall	8.11 %	89.25 %
Spleen	8.97 %	84.62 %
Thymus	9.92 %	87.33 %

TABELLE 88. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{99m}Tc -Phosphonat

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	12.70 %	97.77 %
Breast	19.71 %	87.47 %
Colon	14.28 %	97.91 %
Endosteum	38.31 %	61.15 %
Liver	11.62 %	97.06 %
Lungs	9.95 %	84.45 %
Oesophagus	13.38 %	99.59 %
R marrow	13.41 %	101.86 %
S glands	52.78 %	48.85 %
Skin	12.96 %	98.07 %
St wall	15.48 %	89.92 %
Testes	28.14 %	79.97 %
Thyroid	12.80 %	97.44 %
UB wall	4.47 %	90.26 %
Adrenals	18.26 %	99.49 %
ET	56.18 %	44.64 %
GB wall	14.54 %	92.10 %
Ht wall	13.74 %	88.26 %
Kidneys	25.55 %	83.72 %
Lymph	17.89 %	80.76 %
Muscle	10.36 %	86.68 %
O mucosa	72.98 %	35.30 %
Pancreas	16.13 %	89.35 %
Prostate	24.45 %	79.71 %
SI wall	9.03 %	93.90 %
Spleen	14.31 %	82.58 %
Thymus	13.50 %	98.74 %

TABELLE 89. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{99m}Tc -Sestamibi

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	93.98 %	11.84 %
Breast	24.40 %	83.67 %
Colon	11.50 %	92.01 %
Endosteum	4.60 %	102.87 %
Liver	50.61 %	48.22 %
Lungs	37.73 %	69.65 %
Oesophagus	28.84 %	66.31 %
R marrow	12.89 %	84.90 %
S glands	34.42 %	65.55 %
Skin	19.69 %	77.11 %
St wall	3.70 %	99.29 %
Testes	19.69 %	78.38 %
Thyroid	53.58 %	45.07 %
UB wall	2.38 %	101.89 %
Adrenals	18.98 %	69.29 %
ET	30.18 %	71.46 %
GB wall	0.61 %	103.28 %
Ht wall	39.07 %	66.22 %
Kidneys	63.52 %	34.10 %
Lymph	22.46 %	75.10 %
Muscle	8.99 %	86.79 %
O mucosa	25.47 %	76.85 %
Pancreas	3.67 %	93.92 %
Prostate	12.78 %	89.17 %
SI wall	16.96 %	86.32 %
Spleen	22.29 %	81.03 %
Thymus	36.08 %	68.78 %

TABELLE 90. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{99m}Tc -Tetrofosmin

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	16.57 %	80.47 %
Breast	9.15 %	93.53 %
Colon	6.12 %	89.30 %
Endosteum	3.08 %	92.84 %
Liver	8.07 %	85.71 %
Lungs	46.31 %	56.61 %
Oesophagus	13.13 %	89.27 %
R marrow	14.50 %	90.35 %
S glands	33.82 %	70.21 %
Skin	23.46 %	76.05 %
St wall	1.55 %	92.80 %
Testes	9.01 %	87.24 %
Thyroid	58.02 %	41.24 %
UB wall	1.98 %	100.02 %
Adrenals	6.16 %	98.41 %
ET	14.94 %	83.31 %
GB wall	0.16 %	98.54 %
Ht wall	39.35 %	64.69 %
Kidneys	29.68 %	67.54 %
Lymph	18.05 %	79.96 %
Muscle	8.92 %	89.88 %
O mucosa	17.71 %	92.02 %
Pancreas	0.92 %	101.55 %
Prostate	15.41 %	82.50 %
SI wall	7.65 %	88.88 %
Spleen	6.85 %	95.61 %
Thymus	21.48 %	79.95 %

TABELLE 91. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{99m}Tc -MAA

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	8.15 %	88.15 %
Breast	1.60 %	97.57 %
Colon	3.19 %	96.82 %
Endosteum	1.26 %	100.09 %
Liver	19.91 %	80.29 %
Lungs	2.55 %	94.71 %
Oesophagus	1.84 %	98.51 %
R marrow	1.36 %	91.05 %
S glands	1.62 %	93.32 %
Skin	1.21 %	92.65 %
St wall	4.45 %	96.42 %
Testes	12.04 %	87.00 %
Thyroid	1.25 %	99.25 %
UB wall	8.72 %	93.40 %
Adrenals	7.70 %	94.72 %
ET	2.42 %	105.85 %
GB wall	28.88 %	66.09 %
Ht wall	1.55 %	98.01 %
Kidneys	7.02 %	89.89 %
Lymph	10.51 %	87.93 %
Muscle	1.40 %	98.62 %
O mucosa	8.45 %	102.74 %
Pancreas	9.49 %	92.77 %
Prostate	37.93 %	65.00 %
SI wall	5.12 %	89.72 %
Spleen	1.03 %	100.13 %
Thymus	0.98 %	98.42 %

TABELLE 92. Totaler Sensitivitätsindex für biokinetische Parameter und S-Faktoren für ^{201}TI -Chlorid

Target	S _T _Parameter	S _T _S-value
Brain	100.54 %	0.88 %
Breast	98.45 %	4.30 %
Colon	73.43 %	29.85 %
Endosteum	47.45 %	50.81 %
Liver	59.76 %	43.45 %
Lungs	75.83 %	31.33 %
Oesophagus	89.40 %	12.97 %
R marrow	67.07 %	31.84 %
S glands	98.35 %	0.90 %
Skin	101.26 %	1.50 %
St wall	9.55 %	91.65 %
Testes	52.20 %	46.26 %
Thyroid	29.05 %	67.46 %
UB wall	75.86 %	22.48 %
Adrenals	48.90 %	53.66 %
ET	95.70 %	3.69 %
GB wall	48.64 %	45.50 %
Ht wall	32.03 %	69.82 %
Kidneys	45.40 %	52.89 %
Lymph	88.16 %	14.92 %
Muscle	41.42 %	59.05 %
O mucosa	99.79 %	0.92 %
Pancreas	63.38 %	41.52 %
Prostate	71.85 %	28.78 %
SI wall	5.29 %	97.12 %
Spleen	86.72 %	10.98 %
Thymus	76.94 %	24.52 %

7 Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist, eine statistische Methode zu entwickeln, um die Unsicherheiten und damit die Zuverlässigkeit der Patientendosen durch die ausgewählten Radiopharmazeutika zu quantifizieren. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden zudem die biokinetischen sowie dosimetrischen Parameter identifiziert, die den größten Einfluss auf die Patientendosis haben und somit am meisten zur Unsicherheit der Dosiskoeffizienten beitragen. Die Unsicherheits- und die Sensitivitätsanalyse wurde für die folgenden sieben in der nuklearmedizinischen Diagnostik häufig angewandten Radiopharmazeutika durchgeführt: ^{18}F -FDG, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Pertechnetat, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Phosphonat, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Sestamibi, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Tetrofosmin, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Macro-Aggregated-Albumin (MAA), und ^{201}Tl -Chlorid.

Die Dosiskoeffizienten sind von zwei Arten von Faktoren abhängig: von den zeitabhängigen Faktoren, die durch die zeitintegrierte Aktivität \tilde{A} oder die mittlere effektive Aufenthaltsdauer der Aktivität τ repräsentiert werden, und von den zeitunabhängigen Faktoren - wenn man von der Konstanz der Quell- und Zielorgangröhren während der Bestrahlung ausgeht - repräsentiert durch den S-Faktor.

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Dosiskoeffizienten röhren folglich von den Unsicherheiten bei der Bestimmung der zeitintegrierten Aktivität bzw. der mittleren effektiven Aufenthaltsdauer der Aktivität und den S-Faktoren her. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Software entwickelt, die erlaubt, die Unsicherheiten der Größen \tilde{A} bzw. τ und der S-Faktoren getrennt zu berechnen und daraus die Unsicherheiten der Organdosiskoeffizienten und der Koeffizienten der effektiven Dosis zu bestimmen. Zur Berechnung der zeitintegrierten Aktivität, die bei Verabreichung eines Radiopharmazeutikums in einem Organ angereichert wird, wurden Schemata verwendet, die von der ICRP (International Commission on Radiological Protection) und vom MIRD-Komitee (Medical Internal Radiation Dose Committee) entwickelt wurden. Zur Bestimmung der Dosiskoeffizienten wurde ein verallgemeinertes Schema der ICRP und des MIRD-Komitees verwendet.

Die S-Faktoren lassen sich aus den Bruchteilen der in den Organen absorbierten Energien einer Strahlung, den sogenannten SAF-Werten (engl. *specific absorbed fraction*) bestimmen. Die Sensitivitätsanalyse aufgrund der SAF-Werte oder auch der S-Faktoren wurde mittels Monte-Carlo-Simulation für Teilchenpropagation an sieben sogenannten menschlichen digitalen Voxel-Phantomen durchgeführt. Sechs davon wurden zuvor am Helmholtz-Zentrum-München entwickelt.

Für die Generierung von Samples, die für die Sensitivitätsanalyse benötigt wird, wurde die Latin-Hypercube-Sampling-Technik verwendet.

Für eine quantitative Beschreibung der Unsicherheit wurde in der vorliegenden Arbeit der Unsicherheitsfaktor (UF) verwendet, der als Quadratwurzel aus dem Verhältnis des 97,5-ten zum 2,5-ten Perzentil der Dosisverteilung definiert ist. Die berechneten Unsicherheitsfaktoren der Organdosiskoeffizienten und der Koeffizienten der effektiven Dosis liegen in einem Bereich von 1,1 bis 2,6 bzw. 1,1 bis 1,3.

Bei der Sensitivitätsanalyse wurde mithilfe der partiellen Korrelationskoeffizienten der Einfluss der biokinetischen Parameter auf die zeitintegrierte Aktivität bzw. der Einfluss der Aktivität auf die Dosis untersucht. Durch die Fixierung des S-Faktors wurde dabei der Einfluss des dosimetrischen Anteils auf die Organdosis ausgeschaltet. Es wurden Parameter ausgemacht, die den größten Einfluss auf die Aktivität und auf die Dosis haben. Diesen biokinetischen Parametern soll in zukünftigen experimentellen Studien mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Abschließend wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse, die Anteile der Beiträge beider Unsicherheitsfaktoren, der Biokinetik und der Dosimetrie, auf die Unsicherheit der Dosiskoeffizienten berechnet. Für die Quantifizierung der Sensitivität wurde in diesem Projekt die varianzbasierte Methode der Sensitivitätsanalyse verwendet und, als Bewertungsmaß der totale Sensitivitätsindex genutzt. Es konnte festgestellt werden, dass für alle Radiopharmazeutika, mit Ausnahme von ^{201}TI -Chlorid, die S-Faktoren der meisten Organpaare einen größeren Einfluss auf die Unsicherheit der Dosiskoeffizienten haben als die biokinetischen Parameter. Lediglich für die Quellorgane, die gleichzeitig Zielorgane sind, wurde ein höherer Sensitivitätsindex bei den biokinetischen Parametern beobachtet als bei den S-Faktoren.

Die vorgestellte Methode zur Berechnung von Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten kann nicht nur bei den für diese Arbeit ausgewählten Radiopharmazeutika, sondern auch bei vielen anderen Radiopharmazeutika angewendet werden. Die hier entwickelte Technik kann in verschiedenen Bereichen der Nuklearmedizin ihren Einsatz finden. In den bildgebenden Verfahren könnte es helfen die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Aktivitäten in den Organen zu bestimmen. Die Kenntnis der Unsicherheiten der Dosiskoeffizienten wäre auch in der personalisierten Medizin, bei der Risikoanalyse sehr wichtig.

Abkürzungsverzeichnis

AF	Absorbed Fraction
Annih	Annihilation
Cont	Contents of the Organ
CT	Computer Tomography
Distrib	Distribution
EE	Elementary Effects
EGS	Electron Gamma Shower
Engl.	Englisch
ET	Extrathoracic
FDG	Fluordesoxyglucose
GB	Gall Bladder
GBcnt	Gall Bladder Contents
GM	Gray Matter
GMF	Grey Matter Fast
GMS	Grey Matter Slow
GS	Graue Substanz
GSA	Global Sensitivity Analysis
HMGU	Helmholtz Zentrum München. Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
Ht	Heart
Htw	Heart Wall
IC	Internal Conversion
ICRP-AF	Adult Female Phantom of International Commission on Radiological Protection
ICRP-AM	Adult Male Phantom of International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
LHS	Latin Hypercube Sampling Method
LiverF	Liver Fast
LiverS	Liver Slow
LLI	Lower Large Intestine
LLIcnt	Lower Large Intestine Contents
LSA	Local Sensitivity Analysis
MAA	Macro-Aggregated-Albumin
MadPat	Madeira Patient Phantom
Math	Mathematical
MIBI	Methoxyisobutylisonitrile
MIRD	Medical Internal Radiation Dose Committee
Myo	Myocardium
NCRP	National Council on Radiation Protection & Measurement
O mucosa	Oral mucosa

OAT	One-At-a-Time Method
OthF	Other Tissue Fast
OthS	Other Tissue Slow
Others	Other Tissue
PET	Positron Emission Tomography
Plas	Plasma
QMC	Quasi-Monte Carlo Method
R marrow	Red Bone Marrow
Rmarr	Red Bone Marrow
RBC	Red Blood Cells
REM	Remainder tissue
S glands	Salivary Glands
SA	Standardabweichung
SAF	Specific Absorbed Fraction
Sgld	Salivary Glands
SI	Small Intestine
SICnt	Small Intestine Contents
SIw	Small Intestine Wall
SPECT	Single-Photon Emission Computed Tomography
Spl	Spleen
St	Stomach
Stw	Stomach Wall
Stcnt	Stomach Contents
STD	Standard Deviation
TB	Total Body
Thyr	Thyroid
UB	Urinary Bladder
UBcnt	Urinary Bladder Contents
UF	Uncertainty Factor
ULI	Upper Large Intestine
ULIw	Upper Large Intestine Wall
ULIcnt	Upper Large Intestine Contents
VisHum	Visual Human Phantom
WM	White Matter
WMF	White Matter Fast
WMS	White Matter Slow
WS	Weißer Substanz

Anhang

A Literaturwerte von Dosiskoeffizienten

Die Tabellen 93-101 stellen die Organdosiskoeffizienten und die Koeffizienten der effektiven Dosis dar, die als Referenzwerte in verschiedenen Studien angegeben waren.

TABELLE 93. Dosiskoeffizienten für ^{18}F -FDG für Zielorgane in [mGy/MBq] (Teil 1)

Organs	Mejia et al. [60]	Mejia et al.* [60]	Brownell et al. [8]	Reivich et al. [68]	Jones et al. [43]	Hays et al. [28]	Deloar et al.† [16]
Kidneys	0.030	0.026	0.014	0.021	0.019	0.021	0.028
Lungs	0.010	0.094	0.021	0.018	0.016	0.015	0.018
Liver	0.023	0.021	0.022	0.018	0.016	0.024	0.018
Spleen	0.022	0.020	0.039	0.050	0.039	0.015	0.014
Red marrow	0.012	0.011			0.011	0.011	0.0056
Testes	0.015	0.013			0.015	0.011	0.015
Bladder wall 1	0.120	0.091	0.039	0.078	0.110		0.310
Bladder wall 2	0.066				0.059		
Brain	0.029	0.028	0.018	0.018	0.022	0.046	0.037
Heart	0.045	0.043	0.089	0.040	0.043	0.068	0.017
Pancreas	0.020	0.018	0.014			0.014	0.026
Ovaries						0.011	0.016
Adrenals	0.018						0.016
Stomach wall	0.015						0.012
Thymus							0.012
Thyroid	0.013						0.013
Uterus	0.019						0.019
Breast	0.010						0.010
Ribs							0.011
Skull							0.018
Spine							0.014
Pelvis							0.014
Bone surface	0.015						0.008
Bone marrow							
Gonads							
Skin							
Muscles							
Oesophagus							
Other tissue							
Whole body						0.012	
<i>ED [mSv/MBq]</i>	0.024						0.029

*Dosiskoeffizienten, die mittels S-Faktoren vom amerikanischen und europäischen Referenzphantom berechnet wurden

†Dosiskoeffizienten, die aus den Messungen mittels Magnetresonanztomographie (MRT) gewonnen wurden

TABELLE 94. Dosiskoeffizienten für ¹⁸F-FDG für Zielorgane in [mGy/MBq] (Teil 2)

Organs	Deloar et al.* [16]	Deloar et al.† [16]	Deloar et al.‡ [17]	Khamwan et al. [45]	ICRP-53 [39]	ICRP-80 [38]	ICRP-106 [40]
Kidneys	0.028	0.031	0.026	0.0273	0.021	0.021	0.017
Lungs	0.018	0.021	0.019	0.0046	0.011	0.010	0.020
Liver	0.019	0.019	0.019	0.0298	0.012	0.011	0.021
Spleen	0.014	0.014	0.016	0.0148	0.012	0.011	0.011
Red marrow	0.005	0.0054	0.0057		0.011	0.011	0.011
Testes	0.014	0.014	0.014		0.015	0.012	0.011
Bladder wall 1	0.310	0.120	0.370	0.0637	0.170	0.160	0.130
Bladder wall 2							
Brain	0.037	0.044	0.041		0.026	0.028	0.038
Heart	0.016	0.045	0.032		0.065	0.062	0.067
Pancreas	0.027	0.038	0.036		0.012	0.012	0.013
Ovaries	0.015	0.015			0.015	0.015	0.014
Adrenals	0.016	0.017	0.014		0.014	0.012	0.012
Stomach wall	0.012	0.013	0.014	0.0116	0.012	0.011	0.011
Thymus	0.011	0.014	0.013			0.011	0.012
Thyroid	0.013	0.014	0.013	0.0104	0.0097	0.01	0.010
Uterus	0.018	0.016			0.020	0.021	0.018
Breast	0.0089	0.011	0.010	0.0733	0.011	0.0086	0.0088
Ribs	0.0099	0.012					
Skull	0.016	0.018					
Spine	0.013	0.015					
Pelvis	0.012	0.013					
Bone surface	0.0071	0.0082	0.008	0.0213	0.010	0.011	0.011
Bone marrow				0.0181			
Gonads				0.0115			
Skin				0.0011		0.008	0.0078
Muscles						0.011	0.010
Oesophagus						0.011	0.012
Other tissue					0.011	0.011	0.012
Whole body							
<i>ED [mSv/MBq]</i>	0.029	0.021	0.032		0.027	0.019	0.019

* Werte aus den Messungen am MIRD-Phantom

† Dosiskoeffizienten, die aus den Daten der Messung am „Japanese reference man“ [85] entstanden sind

‡ Werte entstammen einer Messungen nach der Thermolumineszenz-Dosimeter (TLD)-Methode.

TABELLE 95. Dosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Pertechnetat
für Zielorgane in [mGy/MBq]

Organs	MIRD-8 [1]	ICRP-80 [38]	ICRP-53 [39]
Kidneys		0.0050	0.0050
Lungs		0.0026	0.0027
Liver		0.0038	0.0039
Spleen		0.0043	0.0044
Red marrow	0.0051	0.0036	0.0061
Testes	0.0024	0.0028	0.0027
Bladder wall	0.0140	0.0180	0.0190
Gall bladder		0.0074	
Salivary Glands		0.0093	0.0093
Brain		0.0020	
Heart		0.0031	
Pancreas		0.0056	0.0059
Ovaries	0.0059	0.0100	0.0100
Adrenals		0.0037	0.0036
Stomach wall	0.0670	0.0260	0.0290
Small intest		0.0160	0.0180
ULI wall	0.0184	0.0570	0.0620
LLI wall	0.0165	0.0210	0.0220
Colon		0.0420	
Thymus		0.0024	
Thyroid	0.0350	0.0220	0.0230
Uterus		0.0081	0.0081
Breast		0.0018	0.0023
Ribs			
Skull			
Spine			
Pelvis			
Bone surface		0.0054	0.0039
Bone marrow			
Skeleton			
Gonads			
Skin		0.0018	
Muscles		0.0032	
Oesophagus		0.0024	
Other tissue		0.0035	0.0034
Whole body	0.0038		
<i>ED [mSv/MBq]</i>		0.0130	0.0130

TABELLE 96. Dosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Phosphonat
für Zielorgane in [mGy/MBq]

Organs	ICRP-53 [39]	Subramanian et al. [84]	ICRP-80 [38]
Kidneys	0.0073	0.0084	0.0073
Lungs	0.0013		0.0013
Liver	0.0013	0.0022	0.0012
Spleen	0.0014		0.0014
Red marrow	0.0096	0.0067	0.0092
Testes	0.0024	0.0032	
Bladder wall	0.0500	0.1190	0.0480
Gall bladder			0.0014
Salivary Glands			
Brain			0.0017
Heart			0.0012
Pancreas	0.0016		0.0016
Ovaries	0.0035	0.0046	0.0036
Adrenals	0.0019		0.0021
Stomach wall	0.0012		0.0012
Small intest	0.0023		0.0023
ULI wall	0.0020		0.0019
LLI wall	0.0038		0.0038
Colon			0.0027
Thymus			0.0010
Thyroid	0.0010		0.0013
Uterus	0.0061		0.0063
Breast	0.0009		0.0007
Ribs			
Skull			
Spine			
Pelvis			
Bone surface	0.0630		0.0630
Bone marrow			
Skeleton		0.0100	
Gonads			
Skin			0.0010
Muscles			0.0019
Oesophagus			0.0010
Other tissue	0.0019		0.0019
Whole body		0.0019	
ED [mSv/MBq]	0.0080		0.0057

TABELLE 97. Dosiskoeffizienten für ^{99m}Tc -Sestamibi
für Zielorgane in [mGy/MBq]

Organs	ICRP-80 [38]	Wackers et al. [87]	Higley et al. [30]
Kidneys	0.0360	0.0180	0.0280
Lungs	0.0046	0.0025	0.0049
Liver	0.0110	0.0053	0.0078
Spleen	0.0065	0.0054	0.0150
Red marrow	0.0055	0.0069	0.0035
Testes	0.0038	0.0031	0.0110
Bladder wall	0.0110	0.0170	0.0058
Gall bladder	0.0390	0.0220	0.0280
Salivary Glands	0.0140		
Brain	0.0052		0.0011
Heart	0.0063	0.0048	0.0073
Pancreas	0.0077		0.0060
Ovaries	0.0091	0.0120	0.0130
Adrenals	0.0075		0.0045
Stomach wall	0.0065		0.0060
Small intest	0.0150	0.0260	0.0220
ULI wall	0.0270	0.0430	0.0760
LLI wall	0.0190	0.0300	0.0300
Colon	0.0240		
Thymus	0.0041		0.0022
Thyroid	0.0053	0.0057	0.0240
Uterus	0.0078		0.0081
Breast	0.0038		0.0018
Ribs			
Skull			
Spine			
Pelvis			
Bone surface	0.0082		0.0050
Bone marrow			
Skeleton			
Gonads			
Skin	0.0031		0.0016
Muscles	0.0029		
Oesophagus	0.0041		
Other tissue	0.0031		
Whole body		0.0044	
ED [mSv/MBq]	0.0090		0.012

TABELLE 98. Dosiskoeffizienten für
 ^{99m}Tc -Tetrofosmin für Zielorgane
in [mGy/MBq]

Organs	ICRP-80 [38]	Higley et al. [30]
Kidneys	0.0140	0.0125
Lungs	0.0020	0.0021
Liver	0.0040	0.0044
Spleen	0.0030	0.0038
Red marrow	0.0029	0.0040
Testes	0.0024	0.0031
Bladder wall	0.0170	0.0193
Gall bladder	0.0360	0.0490
Salivary Glands	0.0140	0.0117
Brain	0.00039	0.0022
Heart	0.0044	0.0040
Pancreas	0.0041	0.0049
Ovaries	0.0084	0.0095
Adrenals	0.0034	0.0041
Stomach wall	0.0037	0.0046
Small intestine	0.0150	0.0170
ULI wall	0.0270	0.0305
LLI wall	0.0200	0.0222
Colon	0.0240	
Thymus	0.0021	0.0025
Thyroid	0.0057	0.0058
Uterus	0.0072	0.0084
Breast	0.0009	0.0018
Ribs		
Skull		
Spine		
Pelvis		
Bone surface	0.0045	0.0056
Bone marrow		
Skeleton		
Gonads		
Skin	0.0013	0.0019
Muscles	0.0037	0.0033
Oesophagus	0.0021	
Other tissue	0.0039	
Whole body		0.0037
<i>ED [mSv/MBq]</i>	0.0076	0.0089

TABELLE 99. Dosiskoeffizienten für
 ^{99m}Tc - MAA für Zielorgane in [mGy/MBq]

Organs	ICRP-53 [39]	ICRP-80 [38]
Kidneys	0.0037	0.0037
Lungs	0.0670	0.0660
Liver	0.0160	0.0160
Spleen	0.0044	0.0041
Red marrow	0.0044	0.0032
Testes	0.0011	0.0011
Bladder wall	0.0100	0.0087
Gall bladder		0.0056
Salivary Glands		
Brain		0.00092
Heart		0.0096
Pancreas	0.0058	0.0056
Ovaries	0.0018	0.0018
Adrenals	0.0058	0.0068
Stomach wall	0.0040	0.0037
Small intestine	0.0021	0.0020
ULI wall	0.0022	0.0022
LLI wall	0.0016	0.0016
Colon		0.0019
Thymus		0.0061
Thyroid	0.0020	0.0025
Uterus	0.0024	0.0022
Breast	0.0056	0.0050
Ribs		
Skull		
Spine		
Pelvis		
Bone surface	0.0035	0.0051
Bone marrow		
Skeleton		
Gonads		
Skin		0.0015
Muscles		0.0028
Oesophagus		0.0061
Other tissue	0.0029	0.0028
Whole body		
ED [mSv/MBq]	0.0120	0.0110

TABELLE 100. Dosiskoeffizienten für ^{201}Tl -Chlorid für Zielorgane in [mGy/MBq] (Teil 1)

Organs	ICRP-53 [39]	ICRP-80 [38]	ICRP-106 [40]
Kidneys	0.540	0.480	0.480
Lungs	0.120	0.110	0.110
Liver	0.180	0.150	0.150
Spleen	0.140	0.120	0.120
Red marrow	0.180	0.160	0.110
Testes	0.560	0.450	0.180
Bladder wall	0.036	0.040	0.039
Gall bladder		0.065	0.065
Salivary Glands			
Brain		0.022	0.022
Heart	0.230	0.200	0.190
Pancreas	0.054	0.057	
Ovaries	0.120	0.730	0.120
Adrenals	0.051	0.057	0.057
Stomach wall	0.120	0.099	0.110
Small intestine	0.160	0.140	0.140
ULI wall	0.190	0.170	0.180
LLI wall	0.360	0.320	0.340
Colon		0.230	0.250
Thymus		0.036	0.036
Thyroid	0.250	0.220	0.220
Uterus	0.050	0.051	0.050
Breast	0.028		0.024
Ribs			
Skull			
Spine			
Pelvis			
Bone surface	0.340	0.340	0.380
Bone marrow			
Bone			
Skeleton			
Gonads			
Skin		0.022	0.021
Muscles		0.052	0.052
Oesophagus		0.036	0.036
Other tissue	0.056	0.058	0.054
Whole body			
ED [mSv/MBq]	0.230	0.220	0.140

TABELLE 101. Dosiskoeffizienten für ^{201}TI -Chlorid für Zielorgane in [mGy/MBq] (Teil 2)

Organs	Higley et al. [30]	Krahwinkel et al. [46]	Thomas et al. [86]	Atkins et al. [5]	Castronovo et al. [11]
Kidneys	0.5378	0.0638	0.410	0.316	0.5680
Lungs	0.1203	0.0092	0.047		0.0329
Liver	0.1757	0.0145	0.094		0.0949
Spleen	0.1378	0.0268	0.166		0.1860
Red marrow	0.1757	0.0171	0.044		0.0334
Testes	0.5622	0.0908	0.209	0.159	0.2450
Bladder wall	0.0360	0.0120	0.062		0.0544
Gall bladder			0.083		0.0657
Salivary Glands					
Brain			0.0568		0.0568
Heart	0.2257	0.0089	0.247		0.3010
Pancreas	0.0540	0.0133	0.075		0.0610
Ovaries	0.1203		0.102		0.1010
Adrenals	0.0513	0.0105	0.063		0.0497
Stomach wall	0.1203	0.0283	0.171		0.1690
Small intestine	0.1622	0.0165	0.379		0.1260
ULI wall	0.1878	0.0703	0.297	0.240	0.4230
LLI wall	0.3620	0.1451	0.296	0.240	0.1100
Colon					
Thymus			0.046		0.0341
Thyroid	0.2500	0.0923	0.542	0.270	0.5640
Uterus	0.0500	0.0135	0.086		0.0635
Breast	0.0270		0.034		0.0339
Ribs					
Skull					
Spine					
Pelvis					
Bone surface	0.3378		0.094		0.0831
Bone marrow					
Bone		0.0128			
Skeleton					
Gonads					
Skin		0.0068	0.032		
Muscles		0.0092	0.046		0.0775
Oesophagus					
Other tissue					
Whole body			0.058	0.057	0.0768
ED [mSv/MBq]	0.2122	0.0961			

B Statistische Daten von biokinetischen Parametern

Die Tabellen 102-126 stellen die statistischen Daten der biokinetischen Parameter dar. Dabei gelten folgende Abkürzungen:

μ - arithmetisches Mittel; $P_{2,5}$: 2,5 %-Perzentil; $P_{97,5}$: 97,5 %-Perzentil

TABELLE 102. Parameter für 18F-FDG (MIRD-Modell)

	Parameter	$\mu \mu^+ \mu^{*1)}$	$\sigma \sigma^{*2)}$	$P_{2,5}$	$P_{97,5}$	Verteilung
x1	Plasma zu Erythrozyten	4.0700	1.7526	1.3550	12.2246	lognormal
x2	Erythrozyten zu Plasma	7.3500	1.4089	3.7537	14.3918	lognormal
x3	Plasma zu Urin	0.0088	1.2792	0.0045	0.0131	normal
x4	Plasma zu WS schnell	0.0540	1.2905	0.0266	0.0814	normal
x5	WS schnell zu Plasma	0.1011	1.4748	0.0472	0.2165	lognormal
x6	WS schnell zu WS langsam	0.0415	1.4993	0.0187	0.0917	lognormal
x7	WS langsam zu WS schnell	0.0058	1.3325	0.0025	0.0091	normal
x8	Plasma zu GS schnell	0.1020	1.3094	0.0471	0.1569	normal
x9	GS schnell zu Plasma	0.1159	1.6143	0.0453	0.2963	lognormal
x10	GS schnell zu GS langsam	0.0620	1.3493	0.0248	0.0992	normal
x11	GS langsam zu GS schnell	0.0068	1.2260	0.0041	0.0095	normal
x12	Plasma zu „sonstige“ schnell	0.3480	1.3950	0.1812	0.6682	lognormal
x13	„Sonstige“ schnell zu Plasma	0.0970	1.3835	0.0513	0.1833	lognormal
x14	„Sonstige“ schnell zu „sonstige“ langsam	0.0150	1.5192	0.0066	0.0340	lognormal
x15	Plasma zum schnellen Leberkompartiment	0.0380	2.3195	0.0073	0.1977	lognormal
x16	Schnelles Leberkompartiment zu Plasma	0.1860	1.5945	0.0745	0.4642	lognormal
x17	Schnelles Leberkompartiment zur „Lebersenke“	0.0060	2.6748	0.0009	0.0413	lognormal
x18	Plasma zu Myokard	0.0030	2.0628	0.0007	0.0124	lognormal
x19	Plasma zu Lunge	0.0016	1.4087	0.0008	0.0031	lognormal

¹⁾ Bei Normalverteilung wurde hier der Mittelwert μ und bei der logarithmischen Verteilung der geometrische Mittelwert μ^+ aus der Tabelle 6 genommen. Beim Fehlen des Wertes μ^+ wurde der berechnete geometrische Mittewert μ^* (5.2) verwendet.

²⁾ Bei Normalverteilung wurde hier die Standardabweichung σ aus der Tabelle 6 und bei der logarithmischen Verteilung die berechnete multiplikative Standardabweichung σ^* (5.3) genommen.

TABELLE 103. Parameter für ^{18}F -FDG (ICRP-Modell) (Teil 1)

	Brain			Ht wall			Lungs		
Parameter	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.049	0.080	0.111	0.024	0.040	0.056	0.018	0.030	0.042
$Ti1 [h]$		∞			∞			∞	
$ai1$		1.000			1.000			1.000	
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.101	0.210	0.326	0.058	0.106	0.179	0.040	0.079	0.132

TABELLE 104. Parameter für ^{18}F -FDG (ICRP-Modell) (Teil 2)

	Liver			Others			UB cont		
Parameter	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.030	0.050	0.070	0.760	0.800	0.840	0.170	0.240	0.310
$Ti1 [h]$		∞		0.122	0.200	0.278	1.204	1.274	1.343
$ai1$		1.000		0.046	0.075	0.104		1.000	
$Ti2 [h]$				0.912	1.500	2.088			
$ai2$				0.137	0.225	0.313			
$Ti3 [h]$					∞				
$ai3$				0.583	0.700	0.806			
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.063	0.132	0.215	0.887	1.703	2.606	0.158	0.260	0.362

TABELLE 105. Parameter für ^{99m}Tc -Pertechnetat (ICRP-Modell) (Teil 1)

	Thyroid			S glands			St wall		
Parameter	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.012	0.020	0.028	0.018	0.030	0.042	0.122	0.200	0.278
$Ti1 [h]$	0.608	1.000	1.392	0.608	1.000	1.392	0.608	1.000	1.392
$ai1$	0.793	0.850	0.908	0.792	0.850	0.909			1.000
$Ti2 [h]$	6.080	10.00	13.92	6.080	10.00	13.92			
$ai2$	0.091	0.150	0.209	0.091	0.150	0.209			
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.023	0.037	0.055	0.036	0.056	0.081	0.140	0.247	0.397

TABELLE 106. Parameter für ^{99m}Tc -Pertechnetat (ICRP-Modell) (Teil 2)

Parameter	ULI wall			Others			UB cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.091	0.150	0.209	0.671	0.750	0.830	0.571	0.650	0.729
$Ti1 [h]$	6.080	10.00	13.92	1.824	3.000	4.176	0.312	0.392	0.471
$ai1$		1.000		0.122	0.200	0.278		1.000	
$Ti2 [h]$				2.736	4.500	6.264			
$ai2$				0.146	0.240	0.334			
$Ti3 [h]$				27.36	45.00	62.64			
$ai3$				0.394	0.560	0.719			
$Tj1 [h]$	1.824	3.000	4.176						
$aj1$		1.000							
<i>time</i>									
<i>integrated</i>	0.327	0.542	0.792	3.571	4.310	4.960	0.210	0.345	0.480
<i>activity [h]</i>									

TABELLE 107. Parameter für ^{99m}Tc -Pertechnetat (ICRP-Modell) (Teil 3)

Parameter	Kidneys			St cont			SI cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.637	0.650	0.663	0.148	0.200	0.252	0.139	0.200	0.261
$Ti1 [h]$	0.023	0.035	0.048	0.534	0.586	0.638	1.871	1.932	1.993
$ai1$		1.000			1.000			1.000	
<i>time</i>									
<i>integrated</i>	0.020	0.033	0.046	0.094	0.154	0.214	0.257	0.422	0.587
<i>activity [h]</i>									

TABELLE 108. Parameter für ^{99m}Tc -Pertechnetat (ICRP-Modell) (Teil 4)

Parameter	ULI cont			LLI cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.258	0.350	0.442	0.271	0.350	0.429
$Ti1 [h]$	1.855	1.947	2.040	0.737	0.816	0.896
$ai1$		1.000			1.000	
<i>time</i>						
<i>integrated</i>	0.452	0.743	1.034	0.221	0.363	0.505
<i>activity [h]</i>						

TABELLE 109. Parameter für ^{99m}Tc -Phosphonat (ICRP-Modell) (Teil 1)

	Bone			UB cont			Kidneys		
Parameter	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
Fs	0.304	0.500	0.696	1.000			0.012	0.020	0.028
$Ti1 [h]$	1.216	2.000	2.784	0.786	0.919	1.052	0.304	0.500	0.696
$ai1$	0.182	0.300	0.418	1.000			0.182	0.300	0.418
$Ti2 [h]$	43.78	72.00	100.2				1.216	2.000	2.784
$ai2$	0.589	0.700	0.811				0.182	0.300	0.418
$Ti3 [h]$				43.78			72.00	100.2	
$ai3$							0.169	0.400	0.635
$Tj1 [h]$	0.152	0.250	0.348						
$aj1$	1.000								
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	1.908	3.001	4.317	0.699	1.150	1.601	0.047	0.081	0.123

TABELLE 110. Parameter für ^{99m}Tc -Phosphonat (ICRP-Modell) (Teil 2)

<i>Parameter</i>	Others		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
<i>Fs</i>	0.368	0.480	0.592
<i>Ti1 [h]</i>	1.711	1.823	1.935
<i>ai1</i>		1.000	
<i>time</i>			
<i>integrated activity [h]</i>	0.589	0.969	1.349

TABELLE 111. Parameter für ^{99m}Tc -Sestamibi (ICRP-Modell) (Teil 1)

	Ht wall			Muscles			S glands					
Parameter	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$			
F_s	0.009	0.015	0.021	0.122	0.200	0.278	0.009	0.015	0.021			
$Ti1 [h]$	2.432	4.000	5.568	14.59	24.00	33.41	14.59	24.00	33.41			
$ai1$	0.545	0.670	0.797	1.000			1.000					
$Ti2 [h]$	14.59	24.00	33.41									
$ai2$	0.201	0.330	0.459									
<i>time</i>												
<i>integrated activity [h]</i>	0.042	0.069	0.100	0.790	1.385	1.960	0.065	0.104	0.144			

TABELLE 112. Parameter für ^{99m}Tc -Sestamibi (ICRP-Modell) (Teil 2)

Parameter	Thyroid			Others			UB cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
Fs	0.002	0.003	0.004	0.338	0.447	0.560	0.240	0.300	0.360
$Ti1 [h]$	1.216	2.000	2.784	14.59	24.00	33.41	0.360	0.420	0.480
$ai1$		1.000			1.000			1.000	
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.004	0.006	0.010	2.246	3.095	4.000	0.103	0.170	0.237

TABELLE 113. Parameter für ^{99m}Tc -Sestamibi (ICRP-Modell) (Teil 3)

Parameter	Kidneys			Liver			GB cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
Fs	0.085	0.140	0.195	0.109	0.180	0.251	0.169	0.230	0.291
$Ti1 [h]$	4.256	7.000	9.744	0.790	1.300	1.810	0.780	0.842	0.903
$ai1$		1.000		0.791	0.850	0.906		1.000	
$Ti2 [h]$				14.59	24.00	33.41			
$ai2$				0.091	0.150	0.209			
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.396	0.651	0.917	0.239	0.422	0.620	0.149	0.245	0.341

TABELLE 114. Parameter für ^{99m}Tc -Sestamibi (ICRP-Modell) (Teil 4)

Parameter	SI cont			ULI cont			LLI cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
Fs	0.595	0.690	0.785	0.583	0.690	0.797	0.616	0.690	0.764
$Ti1 [h]$	0.447	0.542	0.637	0.620	0.726	0.833	0.260	0.334	0.408
$ai1$		1.000			1.000			1.000	
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.301	0.495	0.689	0.392	0.645	0.898	0.192	0.315	0.438

TABELLE 115. Parameter für ^{99m}Tc -Tetrofosmin (ICRP-Modell) (Teil 1)

Parameter	Ht wall			Liver			S glands		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.007	0.012	0.017	0.061	0.100	0.139	0.009	0.015	0.021
$Ti1 [h]$	2.432	4.000	5.568	0.304	0.500	0.696	14.59	24.00	33.41
$ai1$	0.545	0.670	0.797	0.792	0.850	0.909	1.000		
$Ti2 [h]$	14.59	24.00	33.41	1.216	2.000	2.784			
$ai2$	0.201	0.330	0.459	0.091	0.150	0.209			
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.034	0.055	0.078	0.045	0.089	0.136	0.065	0.104	0.144

TABELLE 116. Parameter für ^{99m}Tc -Tetrofosmin (ICRP-Modell) (Teil 2)

Parameter	Thyroid			Others			UB cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.002	0.003	0.004	0.753	0.800	0.838	0.380	0.460	0.540
$Ti1 [h]$	1.216	2.000	2.784	0.201	0.330	0.459	0.458	0.538	0.619
$ai1$	1.000			0.091	0.150	0.209	1.000		
$Ti2 [h]$				14.59	24.00	33.41			
$ai2$				0.795	0.850	0.909			
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.004	0.006	0.010	4.154	4.763	5.309	0.199	0.328	0.457

TABELLE 117. Parameter für ^{99m}Tc -Tetrofosmin (ICRP-Modell) (Teil 3)

Parameter	Kidneys			GB cont			SI cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.043	0.070	0.097	0.127	0.180	0.233	0.443	0.540	0.637
$Ti1 [h]$	0.608	1.000	1.392	1.038	1.092	1.145	0.641	0.738	0.834
$ai1$	0.582	0.700	0.814	1.000			1.000		
$Ti2 [h]$	14.59	24.00	33.41						
$ai2$	0.182	0.300	0.418						
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.102	0.206	0.304	0.146	0.240	0.334	0.311	0.512	0.713

TABELLE 118. Parameter für ^{99m}Tc -Tetrofosmin (ICRP-Modell) (Teil 4)

Parameter	ULI cont			LLI cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.434	0.540	0.646	0.460	0.540	0.620
$Ti1 [h]$	0.889	0.995	1.100	0.371	0.451	0.531
$ai1$		1.000			1.000	
<i>time</i>						
<i>integrated</i>	0.404	0.665	0.926	0.199	0.327	0.455
<i>activity [h]</i>						

TABELLE 119. Parameter für ^{99m}Tc -MAA (ICRP-Modell) (Teil 1)

Parameter	Lungs			Liver			UB cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	1.000			0.152	0.250	0.348	1.000		
$Ti1 [h]$	3.648	6.000	8.352	72.96	120.0	167.0	0.109	0.156	0.204
$ai1$	0.793	0.850	0.908	1.000			1.000		
$Ti2 [h]$	43.78	72.00	100.2						
$ai2$	0.091	0.150	0.209						
$Tj1 [h]$				3.648	6.000	8.352			
$aj1$				1.000					
<i>time</i>									
<i>integrated</i>	3.852	4.871	5.502	0.585	1.039	1.453	0.134	0.220	0.306
<i>activity [h]</i>									

TABELLE 120. Parameter für ^{99m}Tc -MAA (ICRP-Modell) (Teil 2)

Parameter	Kidneys			Others		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	1.000			0.652	0.750	0.848
$Ti1 [h]$	0.008	0.013	0.017	1.917	2.062	2.208
$ai1$	1.000			1.000		
<i>time</i>						
<i>integrated</i>	0.011	0.018	0.025	1.010	1.662	2.314
<i>activity [h]</i>						

TABELLE 121. Parameter für ^{201}Tl -Chlorid (ICRP-Modell) (Teil 1)

Parameter	Bone			Thyroid			Ht wall		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.036	0.060	0.084	0.001	0.002	0.003	0.024	0.040	0.056
$Ti1 [h]$	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9	6.080	10.00	13.92
$ai1$	0.489	0.630	0.772	0.486	0.630	0.775	0.304	0.500	0.678
$Ti2 [h]$	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4	102.1	168.0	233.9
$ai2$	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515	0.195	0.320	0.445
$Ti3 [h]$							408.6	672.0	935.4
$ai3$							0.109	0.180	0.251
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	3.003	4.874	6.727	0.099	0.162	0.223	1.032	1.873	3.011

TABELLE 122. Parameter für ^{201}Tl -Chlorid (ICRP-Modell) (Teil 2)

Parameter	Lungs			Kidneys			Liver		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.024	0.040	0.056	0.036	0.060	0.084	0.055	0.090	0.125
$Ti1 [h]$	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9
$ai1$	0.485	0.630	0.766	0.485	0.630	0.768	0.485	0.630	0.769
$Ti2 [h]$	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4
$ai2$	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	2.050	3.249	4.671	2.868	4.874	6.726	4.156	7.300	10.27

TABELLE 123. Parameter für ^{201}Tl -Chlorid (ICRP-Modell) (Teil 3)

Parameter	Spleen			Red marrow			St wall		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.004	0.007	0.010	0.036	0.060	0.084	0.004	0.006	0.008
$Ti1 [h]$	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9
$ai1$	0.492	0.630	0.775	0.494	0.630	0.775	0.494	0.630	0.775
$Ti2 [h]$	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4
$ai2$	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	0.347	0.569	0.785	2.969	4.874	6.986	0.287	0.487	0.681

TABELLE 124. Parameter für ^{201}Tl -Chlorid (ICRP-Modell) (Teil 4)

Parameter	SI wall			Muscles			Testes		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.018	0.030	0.042	0.249	0.410	0.571	0.002	0.003	0.004
$Ti1 [h]$	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9	102.1	168.0	233.9
$ai1$	0.485	0.630	0.770	0.485	0.630	0.771	0.490	0.630	0.766
$Ti2 [h]$	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4	408.6	672.0	935.4
$ai2$	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515	0.225	0.370	0.515
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	1.506	2.437	3.412	21.15	33.31	47.13	0.145	0.244	0.326
<i>activity [h]</i>									

TABELLE 125. Parameter für ^{201}Tl -Chlorid (ICRP-Modell) (Teil 5)

Parameter	Others			SI cont			ULI cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.017	0.190	0.350	0.695	0.800	0.905	0.657	0.800	0.943
$Ti1 [h]$	102.1	168.0	233.9	0.568	0.673	0.779	1.815	1.957	2.100
$ai1$	0.383	0.630	0.877		1.000			1.000	
$Ti2 [h]$	408.6	672.0	935.4						
$ai2$	0.225	0.370	0.515						
<i>time</i>									
<i>integrated activity [h]</i>	1.562	15.61	30.45	0.468	0.770	1.072	1.338	2.200	3.062
<i>activity [h]</i>									

TABELLE 126. Parameter für ^{201}Tl -Chlorid (ICRP-Modell) (Teil 6)

Parameter	LLI cont			UB cont		
	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$	$P_{2,5}$	μ	$P_{97,5}$
F_s	0.648	0.800	0.952	0.158	0.200	0.242
$Ti1 [h]$	2.823	2.976	3.128	0.261	0.303	0.345
$ai1$		1.000			1.000	
<i>time</i>						
<i>integrated activity [h]</i>	2.006	3.300	4.594	0.053	0.087	0.121
<i>activity [h]</i>						

Literaturverzeichnis

- [1] MIRD dose estimate report No. 8: Summary of current radiation dose estimates to normal humans from ^{99m}Tc as sodium pertechnetate. *J Nucl Med.* 1976;17:74-77
- [2] Andros G, Harper PV, Lathrop KA, McCardle RJ. Pertechnetate-99m localisation in man with application to thyroid scanning and the study of thyroid physiology. *J Clin Endocrinol.* 1965;25:1067-1076
- [3] Antonov IA, Saleev VM. An Economic Method of Computing LPt Sequences. *USSR Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 1979;19:252-256
- [4] Arqueros F, Montesinos GD. A simple algorithm for the transport of gamma rays in a medium. *American Journal of Physics.* 2003;71:38-45
- [5] Atkins HL, Budinger TF, Lebowitz E, et al. Thallium-201 for medical use. Part 3: Human distribution and physical imaging properties. *J Nucl Med.* 1977;18:133-140
- [6] Berman M. *MIRD Pamphlet No. 12: Kinetic models for absorbed dose calculations.* New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1976;1-14.
- [7] Bolch WE, Eckerman KF, Sgouros G, Thomas SR. MIRD Pamphlet No. 21: A generalized schema for radiopharmaceutical dosimetry - standardization of nomenclature. *J Nucl Med.* 2009;50:477-484
- [8] Brownell GL, Ackerman RH, Strauss HW, et al. Preliminary imaging results with ^{18}F -2-fluoro-2-deoxy-D-glucose. *J Comput Assist Tomogr.* 1980;4:473-477
- [9] Campolongo F, Cariboni J, Saltelli A. An effective screening design for sensitivity analysis of large models. *Environmental Modelling and Software.* 2007;22:1509–1518
- [10] Carter M. A Toolbox for Quasirandom Simulation. *The Mathematica Journal.* 2011;13
- [11] Castronovo FP. ^{201}Tl -labelled TICI dosimetry revisited. *Nucl Med Commun.* 1993;14:104-107
- [12] Chandra R, Shamoun J, Braunstein P, Du Hov OL. Clinical evaluation of an instant kit for preparation of ^{99m}Tc -MAA for lung scanning. *J Nucl Med.* 1973;14:702-705
- [13] Cherry SR, Sorenson JA, Phelps ME. *Physics in Nuclear Medicine.* 4th ed. ed: Elsevier Saunders; 2012.

- [14] Cristy M, Eckerman KF. *Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources, Part I-VII.* Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory; 1987. TM-8381/V1-TM-8381/V7.
- [15] Cristy M, Eckerman KF. *Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources, Part I: Methods.* Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory; 1987. TM-8381/V1.
- [16] Deloar HM, Fujiwara T, Shidahara M, et al. Estimation of absorbed dose for 2-[F-18]fluoro-2-deoxy-D-glucose using whole-body positron emission tomography and magnetic resonance imaging. *Eur J Nucl Med.* 1998;25:565-574
- [17] Deloar HM, Fujiwara T, Shidahara M, Nakamura T, Yamadera A, Itoh M. Internal absorbed dose estimation by a TLD method for 18F-FDG and comparison with the dose estimates from whole body PET. *Phys Med Biol.* 1999;44:595-606
- [18] Dillman LT, Von der Lage FC. *MIRD Pamphlet No. 10. Radionuclide Decay Schemes and Nuclear Parameters for Use in Radiation Dose Estimation:* Society of Nuclear Medicine; 1974.
- [19] Early PJ. Use of diagnostic radionuclides in medicine. *Health Phys.* 1995;69:649-661
- [20] Early PJ, Landa ER. Use of therapeutic radionuclides in medicine. *Health Phys.* 1995;69:677-694
- [21] *SEECAL: Program to calculate age-dependent specific effective energies [computer program].* Version. Oak Ridge; 1993.
- [22] Faure H. Discrepancy de suites associées à un système de numération (en dimension s) (French). *Acta Arithmetica.* 1982;41:337-351
- [23] Halton JH. Algorithm 247: Radical-inverse quasi-random point sequence. *Association for Computing Machinery.* 1964;7
- [24] Han SO. *Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse als Beitrag zur Bewertung der Zuverlässigkeit adaptiver Struktursysteme,* Technischen Universität Darmstadt; 2011.
- [25] Harper PV, Andros G, Lathrop KA. *Preliminary observations on the use of six-hour Tc99m as a tracer in biology and medicine.* Washington, D.C.: Argonne Cancer Research Hospital Semiannual Report to the Atomic Energy Commission; 1962.
- [26] Harper PV, Beck R, Charleston D, Lathrop KA. Optimization of a scanning method using Tc99m. *Nucleonics.* 1964;22:50-54

- [27] Hays MT, Segall GM. A mathematical model for the distribution of fluorodeoxyglucose in humans. *J Nucl Med.* 1998;40:1358-1366
- [28] Hays MT, Watson EE, Thomas SR, Stabin MG. MIRD dose estimate report No. 19: Radiation absorbed dose estimates from 18F-FDG. *J Nucl Med.* 2002;43:210-214
- [29] Helton JC. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use performance assessment for radioactive waste disposal. *Reliability Engineering and System Safety.* 1993;42
- [30] Higley B, Smith FW, Smith T, et al. Technetium-99m-1,2-bis[bis(2-ethoxyethyl) phosphino]ethane: human biodistribution, dosimetry and safety of a new myocardial perfusion imaging agent. *J Nucl Med.* 1993;34:30-38
- [31] Hobbie RK, Roth BJ. *Intermediate Physics for Medicine and Biology.* Fourth Edition ed: Springer; 2006.
- [32] ICRP. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* Oxford, UK: Pergamon Press; 1991. ICRP Publication 60.
- [33] ICRP. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.* Oxford, UK: Elsevier; 2007. ICRP Publication 103.
- [34] ICRP. *Adult reference computational phantoms.* Oxford, UK: International Commission on Radiological Protection; 2009. ICRP Publication 110.
- [35] ICRP. *Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values.* Oxford, UK: Pergamon Press; 2002. 89.
- [36] ICRP. *Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007. ICRP-Veröffentlichung 103. Verabschiedet im März 2007. Deutsche Ausgabe 2009.* urn:nbn:de:0221-2009082154.
- [37] ICRP. *Nuclear decay data for dosimetric calculations.* Oxford, UK: International Commission of Radiological Protection; 2008. ICRP Publication 107.
- [38] ICRP. *Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals.* Oxford, UK: Pergamon Press; 1998. ICRP Publication 80.
- [39] ICRP. *Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals.* Oxford, UK: Pergamon Press; 1987. ICRP Publication 53.
- [40] ICRP. *Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals.* Oxford, UK: International Commission of Radiological Protection; 2008. ICRP Publication 106.

- [41] ICRU. *Absorbed-dose specification in nuclear medicine* 2002. 67.
- [42] Iman RL, Shortencarier MJ, Johnson JD. *A Fortran 77 program and user's guide for the calculation of partial correlation and standardized regression coefficients*: Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA); 1985. NUREG/CR-4122; SAND-85-0044; ON: TI85016573.
- [43] Jones SC, Alavi A, Christman D, Montanez I, Wolf AP, Reivich M. The radiation dosimetry of 2-[F-18]fluoro-2-deoxy-D-glucose in man. *J Nucl Med.* 1982;23:613-617
- [44] Kawrakow I, Mainegra-Hing E, Rogers DWO, Tessier F, Walters BRB. *The EGSnrc code system: Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. Ottawa: National Research Council of Canada (NRCC); 2009. 701.
- [45] Khamwan K, Krisanachinda A, Pasawang P. The determination of patient dose from 18F-FDG PET/CT examination. *Radiat Prot Dosim.* 2010;141:50-55
- [46] Krahwinkel W, Herzog H, Feinendegen LE. Pharmacokinetics of Thallium-201 in normal individuals after routine myocardial scintigraphy. *J Nucl Med.* 1988;29:1582-1586
- [47] Lathrop KA, Harper PV, Hinn GM, Andros G. Biological fate of technetium in mammals. *Radiat Res.* 1965;25:210
- [48] Lebowitz E, Greene MW, Fairchild R, et al. Thallium-201 for medical use. *J Nucl Med.* 1975;16:151-155
- [49] Leggett RW. Reliability of the ICRP's dose coefficients for members of the public. 1. Sources of uncertainty in the biokinetic models. *Radiat Prot Dosim.* 2001;95:199-213
- [50] Leide S, Diemer H, Ahlgren L, Mattson S. In Vivo Distribution and Dosimetry of Tc-99m MIBI in Man. 1992.
- [51] Limpert ES, W.E.; Abbt, M. Log-normal distributions across the sciences: keys and clues. *Bioscience.* 2001;51:341-352
- [52] Loevinger R, Berman M. *A Revised Schema for Calculating the Absorbed Dose from Biologically Distributed Radionuclides. MIRD Pamphlet No. 1. Revised ed.* New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1976.
- [53] Loevinger R, Berman M. *A schema for absorbed-dose calculations for biologically distributes radionuclides. MIRD Pamphlet No. 1.* New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1968.

- [54] Loevinger R, Budinger T, Watson E. *MIRD primer for absorbed dose calculations*. New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1988.
- [55] Loevinger R, Budinger T, Watson E. *MIRD primer for absorbed dose calculations. Revised ed.* New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1991;1-21.
- [56] McAfee JG, Fueger CF, Stern HS, Wagner HN, jr., Migita T. Tc99m pertechnetate for brain scanning. *J Nucl Med*. 1964;5:811-827
- [57] McCuen RH. *Statistical Methods for Engineers*: Prentice Hall; 1984.
- [58] McKay K, Beckman RJ. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*. 1979;21:239-245
- [59] McParland BJ. *Nuclear Medicine Radiation Dosimetry. Advanced Theoretical Principles*: Springer; 2010.
- [60] Mejia AA, Nakamura T, Masatoshi I, Hatazawa J, Masaki M, Watanuki S. Estimation of absorbed doses in humans due to intravenous administration of fluorine-18-fluorodeoxyglucose in PET studies. *J Nucl Med*. 1991;32:699-706
- [61] Merz B. *Hochwasserrisiken: Grenzen und Möglichkeiten der Risikoabschätzung*. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung; 2006.
- [62] Morris M. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*. 1991;33:161-174
- [63] Morris M. *IMPACT: Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty. Risk and Uncertainty (WP5) - Technical Report* Wallingford, UK 2004. Contract No. EVG1-CT-2001-00037.
- [64] NCRP. *Uncertainty in internal radiation dose assessment*. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection & Measurement; 2009. NCRP Report 164.
- [65] Niederreiter H. Quasi-Monte Carlo methods and pseudo-random numbers. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1978;84:957-1041
- [66] Niederreiter H. *Random number generation and quasi-Monte Carlo methods*: Society for Industrial and Applied Mathematics; 1992.
- [67] Phelps ME. Positron emission tomography provides molecular imaging of biological processes. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2000;97:9226-9233

- [68] Reivich M, Kuhl DE, Wolf A, et al. The [18F]fluorodeoxyglucose method for the measurement of local cerebral glucose utilization in man. *Circ Res.* 1979;44:127-137
- [69] Saltelli A, Ratto M, Andres T, et al. *Global sensitivity analysis: The Primer*; 2008.
- [70] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F. Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Statistical Science*. 2000;15:377-395
- [71] Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F, Ratto M. *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*; John Wiley & Sons, Ltd.; 2004.
- [72] Sappakitkamjorn J, Niwitpong S. Confidence Intervals for the Coefficients of Variation with Bounded Parameters. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2013;7
- [73] Snyder WS, Ford MR, Warner GG. *Estimates of specific absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom*. New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1978. 5, Revised.
- [74] Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Fisher HL. *Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom*. Medical Internal Radiation Dose Committee (MIRD). Pamphlet No. 5. New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1969.
- [75] Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson EE. "S" absorbed dose per unit cumulated activity for selected radionuclides and organs. New York, NY: Society of Nuclear Medicine; 1975. 11, Revised.
- [76] Sobol IM. *Multidimensional quadrature formulas and Haar functions*. Nauka ed. Moscow: (In Russian); 1969.
- [77] Sobol IM. On Sensitivity estimation for nonlinear mathematical models. *Matematicheskoe Modelirovaniye*. 1990;2:112-118
- [78] Sobol IM. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiment*. 1993;1:407-414. English translation of Russian original paper Sobol' (1990).
- [79] Sobol IM. Uniformly distributed sequences with an additional uniform property. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1976;16:236-242

- [80] Spielmann V, Li WB, Zankl M, Oeh U, Hoeschen C. Uncertainty Quantification in Internal Dose Calculations for Seven Selected Radiopharmaceuticals. *J Nucl Med.* 2016;57:122-128
- [81] Stabin MG. *Fundamentals of Nuclear Medicine Dosimetry*: Springer; 2008.
- [82] Stabin MG. Radiopharmaceuticals for nuclear cardiology: Radiation dosimetry, uncertainties, and risk. *J Nucl Med.* 2008;49:1555-1563
- [83] Stabin MG. Uncertainties in internal dose calculations for radiopharmaceuticals. *J Nucl Med.* 2008;49:853-860
- [84] Subramanian G, McAfee JG, Blair RJ, Kallfelz FA, Thomas FD. Technetium-99m-methylene diphosphonate - a superior agent for skeletal imaging: comparison with other technetium complexes. *J Nucl Med.* 1975;16:744-755
- [85] Tanaka G. Japanese Reference Man 1988-III. Masses of organs and tissues and other physical properties. *Nippon Acta Radiol.* 1988;48:509-513
- [86] Thomas SR, Stabin MG, Castronovo FP. Radiation-absorbed dose from 201Tl-thallous chloride. *J Nucl Med.* 2005;46:502-508
- [87] Wackers FJT, Berman DS, Maddahi J, et al. Technetium-99m hexakis 2-methoxyisobutyl isonitrile: human biodistribution, dosimetry, safety, and preliminary comparison to Thallium-201 for myocardial perfusion imaging. *J Nucl Med.* 1989;30:301-311
- [88] Zankl M, Petoussi-Henss N, Janzen T, et al. New calculations for internal dosimetry of betaemitting radiopharmaceuticals. *Radiat Prot Dosimetry.* 2010;139 (1-3):245-249
- [89] Zankl M, Schlattl H, Petoussi-Henss N, Hoeschen C. Electron specific absorbed fractions for the adult male and female ICRP/ICRU reference computational phantoms. *Phys Med Biol.* 2012;57:4501-4526
- [90] Zubal IG, Harrell CR, Smith EO, Rattner Z, Gindi G, Hoffer PB. Computerized three-dimensional segmented human anatomy. *Med Phys.* 1994;21:299-302

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Christoph Höschen ganz herzlich, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, diese interessante Arbeit am Helmholtz Zentrum München durchzuführen. Er interessierte sich stets für den Fortgang der Arbeit und war immer zu wertvollen Diskussionen bereit.

Mein ganz persönlicher Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dr. Weibo Li, der immer für mich da war, wenn ich ihn brauchte, und mich bei dieser Arbeit mit seinen wertvollen Ratschlägen unterstützte. Er lenkte die Arbeit oft durch geschickte Hinweise, ohne meinen notwendigen Freiraum einzuschränken.

Ich möchte auch Herrn Dr. Dietmar Noßke und Herrn Dr. Augusto Giussani vom Bundesamt für Strahlenschutz danken, die mir dieses Projekt ermöglichten. Auch für die sehr wertvollen Diskussionen und die lehrreichen Ratschläge mit Herrn Dr. Giussani bin ich ihm äußerst dankbar.

Auch meinen Kollegen, Herrn Dr. Uwe Oeh, Herrn Dr. Helmut Schlattl, Frau Maria Zankl und Frau Dr. Nina Petoussi-Henss möchte ich ganz herzlich danken, dass sie stets hilfsbereit waren und immer Zeit fanden, die benötigten Daten bereitzustellen und mit mir über einzelne Themen zu diskutieren.

Des Weiteren möchte ich allen anderen Institutsangehörigen für die schöne Zeit am Institut danken.

Nicht vergessen werden darf die Sekretärin, Frau Monika Keusch, die nicht nur half, wenn es galt, schwierige verwaltungstechnische Probleme zu lösen, sondern auch viel zum guten Institutsklima beitrug und beträgt.

Zum Schluss danke ich noch ganz herzlich meinen Eltern, die mich in jeder Hinsicht sehr unterstützten, und meinem lieben Kater Schlomo, der mit seinem Wesen für das richtige Arbeitsklima zu Hause sorgte.

München, im Juni 2016

Vladimir Spielmann

Dipl.-Phys. Spielmann, Vladimir
Gondershauserstr. 26
80939 München

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Dissertation zum Thema

Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen von Kompartiment-Modellen und Computer-Voxel-Phantomen für interne Strahlenexposition der Patienten durch Radiopharmazeutika in der Nuklearmedizin

selbstständig verfasst, nicht schon als Dissertation verwendet habe und die benutzten Hilfsmittel und Quellen vollständig angegeben wurden.

Weiterhin erkläre ich, dass ich weder diese noch andere Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.) an anderen Einrichtungen eingereicht habe.

München, den 20.06.2016

Vladimir Spielmann