

Generische Transportmodellierung von Radionukliden aus Halden und untertägigen Lagern unter Anwendung des k_d -Konzeptes

Diplomarbeit

am

Institut für Radioökologie und Strahlenschutz
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
von

Bastian Szermerski
geboren am 18.08.1985 in Hannover

November 2010

Referent: Prof. Dr. Rolf Michel
Korreferent: PD Dr. Ingo Leya

Erklärung der Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie die Zitate deutlich kenntlich gemacht zu haben.

Hannover, den 9. November 2010

Bastian Szermerski

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Radioaktivität	3
2.1.1	Zerfallsmodi	3
2.2	Klassifizierung	8
2.3	Zerfallsreihen	8
2.3.1	Natürliche Zerfallsreihen	9
2.3.2	Gleichgewichte und Ungleichgewichte	10
2.3.3	Bateman-Gleichung	11
3	Lagerung radioaktiver Abfälle	15
3.1	Radioaktiver Abfall	15
3.1.1	Klassifizierung	15
3.1.2	Zeitfrage	15
3.1.3	Zusammensetzung und Herkunft	15
3.1.4	Radionuklidinventar in der Schachanlage Asse II	17
3.2	Zwischenlager	17
3.3	Lagerstandorte in Deutschland	24
3.4	Endlagerung	25
3.4.1	Anforderungen an ein Endlager	26
3.4.2	Vergleich Wirtsgesteine	26
3.4.3	Internationaler Stand der Endlagerung	27
4	Transport von Radionukliden in porösen Medien	29
4.1	Durchlässigkeit poröser Medien	29
4.2	Wasserleitung von Festgesteinen	32
5	Das k_d -Konzept	35
5.1	k_d -Wert bestimmende Einflussfaktoren	36
5.2	Experimentelle Bestimmung	41
6	Haldenmodell	43
6.1	Lagerung von Nukliden auf Halden	43

6.2	Eigenschaften der Haldenkompartimente	43
6.3	Berechnete Dosen	47
6.4	Diskussion der Ergebnisse	50
7	Untertägiges Modell	51
7.1	Lagerung von Nukliden in untertägigen Lagern	51
7.2	Eigenschaften der Lagerkompartimente	51
7.3	Berechnete Dosen	52
7.4	Diskussion der Ergebnisse	53
8	Dosismodellierung	57
8.1	Szenario einer selbstversorgenden Referenzperson	57
8.1.1	Expositionsprofil	57
8.1.2	Altersklassen	58
8.1.3	Verzehrgewohnheiten	58
8.1.4	Transferfaktoren	58
8.1.5	Dosiskoeffizienten	59
9	Zusammenfassung und Ausblick	61
	Literaturverzeichnis	63
A	Tabellen	77
B	Abbildungen	97

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die vorliegende Arbeit ist am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz vom 10.11.2009 bis zum 9.11.2010 durchgeführt worden und befasst sich mit der Lagerproblematik von Radionukliden. Seit Beginn der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzung der Radioaktivität fallen Abfälle an, die langfristig von der Biosphäre verwahrt werden müssen. Um eine Gefährdung für Mensch und Umwelt auszuschließen, wird das Konzept der Einlagerung in tiefen geologischen Formationen international als geeignete Variante angesehen. Weltweit befindet sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein Endlager für hochradioaktiven Abfall (HAW) mit nicht vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Betrieb. Für jeden potenziellen Standort fallen Sicherheitnachweise und die Betrachtung von Störfällen an, um eine langfristige Isolierung des radioaktiven Abfalles garantieren zu können. Oberirdische Inventare in Form von Halden, beispielsweise aus bergbaulichen Hinterlassenschaften, haben potenziellen Kontakt zur Biosphäre und Nuklide können durch langfristige Beregnung in grundwasserleitende Systeme migrieren, während untertägige Lager absaufen können und somit Nuklide in Kontakt mit Wasser mobilisiert werden. Das kontaminierte Wasser kann hydrostatisch oder durch Gebirgskonvergenz ausgepresst werden. Daher ist es notwendig, Transportmodelle zu entwickeln, um eine mögliche Strahlenexposition für die Bevölkerung abzuschätzen. „Die Bevölkerung“ wird dabei durch eine normierte Referenzperson mit konservativen Aufenthalts- und Verzehrsgewohnheiten repräsentiert, um eine Dosisunterschätzung auszuschließen.

1.2 Aufgabenstellung

Für die Nachbetriebsphase eines Zwischen- oder Endlagers in Form einer Halde oder eines untertägigen Lagers, soll ein Störfallszenario entwickelt werden, in dem die Radionuklide durch Kontakt mit Wasser ausgewaschen werden und in grundwasserführende Systeme migrieren. An dieses System sei ein Brunnen angeschlossen, aus welchem die Referenzperson mit einem hohen Grad an Selbstversorgung Wasser bezieht.

Für die Kalkulation des Radionuklidtransportes wird das in Kapitel 5 beschriebene k_d -Konzept verfolgt, welches komplexe chemische Prozesse und Transporteigenschaften von Molekülen und Atomen in Wasser auf einen Verteilungskoeffizienten zurückführt. Aus den Nuklidkonzentrationen im Brunnenwasser wird gemäß [Bun10b] und [Bun08] eine Dosis modelliert.

2 Grundlagen

2.1 Radioaktivität

Radioaktivität ist das Bestreben eines Atomkerns von instabilen zu stabilen Zuständen überzugehen. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form verschiedener Teilchen oder auch Cluster abgegeben. Dieser im Kern stattfindende Prozess dauert an, bis ein ungestörtes Nuklid durch weitere Aussendung einen energetisch ungünstigeren Zustand erreichen würde. Ein Maß ist die Aktivität A , definiert als Anzahl Kernumwandlungen pro Zeitintervall. Die Aktivität ist proportional zu der Anzahl der Mutterkerne N multipliziert mit einer Zerfallskonstanten λ .

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) \quad (2.1)$$

$$[A] = \text{Bq} = \text{s}^{-1}$$

Die Differentialgleichung 2.1 integriert liefert das *Zerfallsgesetz*

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (2.2)$$

Gleichung 2.2 ist durch 2.1 ebenso gültig für die Aktivität. Zu welchem Zeitpunkt ein isoliert betrachteter Atomkern zerfällt, lässt sich nicht vorhersagen. Daher ist das Zerfallsgesetz nur für ein Ensemble von Teilchen gültig. Die Zerfallskonstante λ liefert den Abklingzeitraum auf $1/e$ der Anfangsaktivität bzw. der Anfangsmenge und ist reziprok zu der Lebensdauer τ . Alternativ lässt sich die Halbwertszeit $T_{1/2}$ verwenden, um die Zerfallskonstante auszudrücken, welche den Zeitraum angibt, in dem die Hälfte der Mutternuklide zerfallen ist.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \quad (2.3)$$

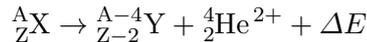
2.1.1 Zerfallsmodi

Ein instabiles Nuklid hat mehrere Möglichkeiten einen stabileren Zustand unter Energieabgabe zu erreichen, die drei wichtigsten Zerfallsarten sind α -Zerfall, β -Zerfall und γ -Zerfall. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, in verschiedenen Zerfallskanälen zu

unterschiedlichen Tochternukliden zu zerfallen. Welcher Zerfall vorliegt, ist abhängig von der Nukleonenzahl und dem Verhältnis von Neutronen zu Protonen.

α -Zerfall

Der α -Zerfall ist ein Kernübergang unter Aussendung eines zweifach positiv geladenen Heliumkerns ${}^4_2\text{He}^{2+}$. Dabei reduziert sich die Nukleonenzahl A um 4 und die Protonenzahl Z um 2. Sei X das Ausgangsnuklid und Y das Endnuklid, dann folgt:



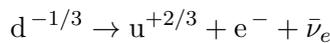
ΔE steht für die durch den Massendefekt verursachte Energie, die das α -Teilchen in kinetischer Form nach dem Zerfall besitzt und ist charakteristisch für jedes Nuklid. Die Wahrscheinlichkeit für ein solches Ereignis ist bestimmt durch das Potential, welches durch eine Überlagerung aus kurzreichweitiger attraktiver starker Wechselwirkung und repulsiver langreichweitiger Coulomb-Wechselwirkung die Form einer Coulomb-Barriere annimmt. Die Höhe der Barriere liefert die Tunnelwahrscheinlichkeit. Der verbleibende Kern erhält wegen Impulserhaltung einen Rückstoß und in der Hülle befinden sich zwei überschüssige Elektronen, welche durch Interaktion mit der Umgebung abgegeben werden. Zudem muss sich der Kern nach dem Zerfall nicht im Grundzustand befinden, sondern in einem angeregten, was die Abgabe eines γ -Quants zur Folge hat. Wegen der Energieerhaltung ist das α -Teilchen in einem solchen Fall langsamer.

β^- -Zerfall

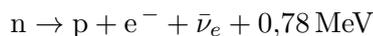
Beim β^- -Zerfall wird im Kern ein Neutron in ein Proton transformiert unter Aussendung eines Elektrons und Elektron-Antineutrinos.



Die Nukleonenzahl bleibt erhalten und die Ordnungszahl erhöht sich um eins. Ein Neutron besteht aus einem up-Quark und zwei down-Quarks $n = udd$ und Gluonen als Austauschteilchen der starken Wechselwirkung. Der Zerfall von einem Neutron in ein $p = uud$ wird durch die Umwandlung eines down-Quarks in ein up-Quark realisiert.



Neutronen unterliegen der schwachen Wechselwirkung, ein W^- -Boson mit Ladung $-1e$ vermittelt die Quarkumwandlung, deren Ladung addiert exakt $-1e$ ist. Die Wahrscheinlichkeit und Energiemenge ist abhängig von der Stabilität des Kerns und der Bindungsenergie. Freie Neutronen zerfallen mit einer Lebenserwartung von 886 s in ein p mit einer Energiedifferenz von 0,78 MeV.

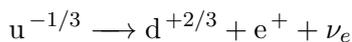


β^+ -Zerfall

Beim β^+ -Zerfall wird unter Aussendung eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos ein Proton in ein Neutron umgewandelt.



Analog zum β^- -Zerfall vermittelt ein W^+ -Boson mit Ladung $+1e$ die Quarktransformation und die nicht an die starke Wechselwirkung gebundenen Leptonen verlassen den Kern.



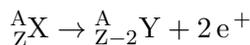
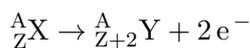
Diese Zerfallsart tritt vorzugsweise bei protonenreichen Kernen auf.

Zweifacher β -Zerfall

Bei einigen Nukliden ist der einfache Betazerfall energetisch verboten, da der Grundzustand der Tochter über dem der Mutter liegt. Nach dem Paarbildungsterm der Bethe-Weizsäcker-Formel sind Nukleonen in gg-Nukliden stärker gebunden als in uu-Nukliden und die Bindungsenergien gleicher Massenzahlen liegen als Funktion der Kernladungszahl auf Parabeln. Wegen des Paarbildungsterms liegen die Parabeln der gg-Nuklide energetisch tiefer als die der uu-Nuklide und der einfache Betazerfall kann unterdrückt sein. Das am Minimum am nächsten liegende Isobar ist bezüglich des Betazerfalls am stabilsten und kann durch einen zweifachen Betazerfall erreicht werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines solchen Ereignisses ist viel kleiner als beim einfachen Betazerfall, daher ist die Halbwertszeit sehr viel größer. Beim zweifachen Betazerfall sind zwei verschiedene Prozesse möglich:

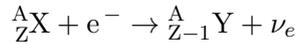
1. $(2\bar{\nu}\beta^-\beta^-)$ bzw. $(2\nu\beta^+\beta^+)$
2. $(0\bar{\nu}\beta^-\beta^-)$ bzw. $(0\nu\beta^+\beta^+)$

Beim ersten Fall transformieren sich beim $\beta^-\beta^-$ -Zerfall zwei Neutronen in Protonen unter Aussendung zweier Elektronen und beim $\beta^+\beta^+$ -Zerfall zwei Protonen in Neutronen unter Aussendung zweier Positronen und Elektronneutrinos. Der zweite, aktuell noch diskutierte Fall ist nur unter Verletzung der Leptonenzahl möglich und ist nicht mit dem Standardmodell konform. Hier annihilieren die beiden Neutrinos und wären „Majoranatur“, d.h. ihr eigenes Antiteilchen.



Elektroneneinfang

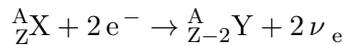
EC (engl. electron capture) ist ein zum β^+ -Zerfall konkurrierender Prozess, bei dem ein Proton unter Elektroneneinfang, typischer Weise aus der K-Schale, in ein Neutron transformiert wird und ein Elektroneneutrino emittiert.



Ist die Massendifferenz von Mutter und Tochter größer als 1022 MeV, d.h. zwei Elektronmassen, so muss kein Elektron eingefangen werden, sondern kann mit β^+ -Zerfall im Kern erzeugt werden. Daher findet bei jedem β^+ -zerfallenden Nuklid auch EC statt. Das Tochternuklid ist nicht immer im Grundzustand und emittiert daher beim Übergang ein charakteristisches γ -Quant. Die Atomhülle besitzt eine Lücke in der K-Schale, selten auch in höheren Schalen, und wird durch ein Elektron aus höheren Schalen aufgefüllt, was zu der Emission eines γ -Quantes oder Auger-Elektron führt.

Zweifacher Elektroneneinfang

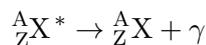
Der zweifache Elektroneneinfang findet nur mit sehr kleiner Wahrscheinlichkeit statt und hat daher sehr lange Halbwertszeiten. Dabei werden zeitgleich zwei Elektronen eingefangen und zwei Protonen unter doppelter Elektroneneutrinoemission in Neutronen umgewandelt.



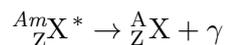
Häufig ist der Zerfall durch den einfachen Elektroneneinfang dominiert und lässt sich nur beobachten, wenn dieser energetisch verboten ist. Ist die Massendifferenz von Mutter zu Tochter größer als vier Elektronenmassen (2044 MeV), so ist zudem der $\beta^+\beta^+$ -Zerfall möglich. Analog zum zweifachen β -Zerfall wird auch die Option des neutrinolosen Zerfalls diskutiert, die wiederum dem Standardmodell widerspricht.

γ -Zerfall

Nach einem Zerfall muss die Tochter nicht im Grundzustand vorliegen, aus angeregten Zuständen wird beim Übergang in niederenergetische Zustände ein Photon emittiert.

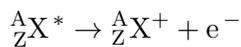


Es existieren einige metastabile angeregte Zustände als Isomer, die wegen der Übergangsregeln als ungestörtes System nicht in den Grundzustand zerfallen dürfen. Ein Beispiel ist ${}^{99m}\text{Tc}$, welches mit einer Halbwertszeit von sechs Stunden in den Grundzustand zerfällt und dabei ein niederenergetisches Photon mit 142,7 keV emittiert.



Innere Konversion

Ein Isomer hat die Möglichkeit mit der Elektronenhülle zu interagieren und ein Elektron aus dieser zu emittieren. Dabei verbleibt ein einfach positiv geladenes Atom.



Die kinetische Energie des Elektrons ist wegen Energieerhaltung die Differenz der Kernniveaus abzüglich der Bindungsenergie des Elektrons und daher Teil eines Linienspektrums.

$$E_{kin,e^-} = \Delta E_{Niveau} - E_{Bindung,e^-}$$

Da innere Konversion und γ -Zerfall konkurrierende Prozesse sind, teilen sich die Zerfallswahrscheinlichkeiten auf.

Spontanspaltung

Sehr schwere Nuklide können symmetrisch oder asymmetrisch unter Emission von Neutronen in zwei Töchter zerfallen. Dabei spalten sich Atomkerne spontan ohne äußere Einwirkung wie bei der neutroneninduzierten Kernspaltung. Vor einer Spaltung muss sich der Kern deformieren und abhängig von der Geometrie, Coulomb-Kraft (welche schwere Kerne zur Spaltung neigen lässt) und starken Wechselwirkung, welche eine energetisch niedrige sphärische Form des Kernes anstrebt, können besonders bei leichteren Kernen metastabile Zustände existieren. Die Zerfallswahrscheinlichkeitsverteilung in Tochterfragmente zeigt bei einigen Nukliden eine Doppelhöckerstruktur wie ${}^{252}\text{Cf}$, ${}^{242}\text{Cm}$ und ${}^{240}\text{Pu}$, kann aber auch symmetrischer Natur sein wie bei ${}^{257}\text{Fm}$.

Nukleonenemission

Kerne mit großer Protonen-/Neutronendifferenz können spontan einzelne Nukleonen emittieren. Die Halbwertszeiten solcher Nuklide sind in der Regel sehr klein.



Clusteremission

Größere Nuklide können in seltenen Fällen größere Fragmente als α -Teilchen abspalten. Der Unterschied zur Spontanspaltung ist, dass die Töchter beim Clusterzerfall stets die gleichen sind, während bei der Spontanspaltung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Vielzahl von Töchtern vorliegt.



2.2 Klassifizierung

Die natürlich auf der Erde vorkommenden Nuklide lassen sich nach ihrer Herkunft in drei Gruppen einteilen, in *kosmogene*, *radiogene* und *primordiale* Nuklide.

Kosmogene Radionuklide

Die obere Atmosphäre wechselwirkt mit extraterrestrischer Strahlung und erzeugt durch Spallationsreaktionen und Sekundärteilchen Reaktionsprodukte aller dort vorkommen Nuklide, also hauptsächlich ^{14}C durch Neutroneneinfang des Stickstoffs $^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1\text{p}$, aber auch Isotope von Edelgasen und einer Reihe weiterer Nuklide. Ausgehend von einem Gleichgewicht aus Zerfall und Nachproduktion von ^{14}C eignet sich dieses Nuklid wegen seiner Halbwertszeit von 5700 a und des Kohlenstoffkreislaufes zur Datierung organischer Materialien durch Bestimmung des Verhältnisses $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Radiogene Nuklide

Mitglieder der Zerfallsreihen mit Ausnahme der natürlichen Mütter sind radiogene Nuklide, ihre Halbwertszeiten sind klein gegenüber dem Erdalter, sodass ihr natürliches Vorkommen allein durch den Zerfall der drei Nuklide ^{232}Th , ^{235}U und ^{238}U bestimmt wird.

Primordiale Nuklide

Nuklide mit großen Halbwertszeiten, die bei der Nukleosynthese entstanden sind und bei der Erdentstehung eingetragen wurden und heute noch in messbaren Mengen vorhanden sind, werden primordial genannt. Zu ihnen zählen ^{40}K , ^{87}Rb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{244}Pu und einige weitere.

Anthropogene Nuklide

Seit Nutzungsbeginn der Radioaktivität in vielen Bereichen wie Medizin, Forschung, Wirtschaft und Militär werden vermehrt Radionuklide erzeugt, die unter natürlichen Umständen ausgestorben wären oder auf der Erde in vernachlässigbaren Mengen vorkamen. Aus dem nuklearen Brennstoffkreislauf entstehen Spaltprodukte und Transurane mit teilweise großen Halbwertszeiten. Das schwerste technisch nutzbare Nuklid ist Californium, dessen Isotope hinreichend langlebig sind ($T_{1/2}(^{251}\text{Cf}) = 898 \text{ a}$). Als starke Neutronenquelle lässt sich ^{252}Cf mit ($T_{1/2} = 2,645 \text{ a}$) nutzen. Der Unfall von Tschernobyl hat große Menge anthropogener Nuklide in die Umwelt freigesetzt, wie auch Kernwaffentests und andere militärische Aktivitäten.

2.3 Zerfallsreihen

Zerfallsprodukte können selber instabil sein, weiter zerfallen und dabei Mitglied einer Zerfallsreihe mit n Nukliden sein, wobei das n -te Nuklid stabil ist. Jedes radioaktive Nuklid

der Kette zerfällt unabhängig mit einer eigenen Zerfallswahrscheinlichkeit. Allgemein lässt sich eine lineare Zerfallsreihe darstellen als

$$X_1 \xrightarrow{\lambda_1} X_2 \xrightarrow{\lambda_2} \dots \xrightarrow{\lambda_i} X_i \xrightarrow{\lambda_{i+1}} \dots \xrightarrow{\lambda_{n-1}} X_n.$$

Im einfachsten Fall ist $n = 2$, dann zerfällt die Muttersubstanz nach 2.2 in eine stabile Tochter. Für den Fall $n = 3$ ist die Aktivität und Menge der Tochter an den Zerfall der Mutter gekoppelt, die Produktionsrate der Tochter ist gerade die Zerfallsrate der Mutter, eine zeitliche Abnahme an Tochterkernen erfolgt durch Zerfall in ein Enkelnuklid.

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{dN_1}{dt} - \lambda_2 N_2 \quad (2.5)$$

Die zeitliche Änderung der Mutterkerne ist bekannt und gerade das Zerfallsgesetz 2.2. Dies in 2.5 eingesetzt liefert eine Differentialgleichung

$$\frac{dN_2}{dt} = N_1(0)e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2$$

und lässt sich durch

$$N_2(t) = N_1(0)\lambda_1 \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right) \quad (2.6)$$

lösen. Um die zu der Teilchenzahl gehörige Aktivität zu erhalten, muss 2.6 mit der Zerfallskonstanten multipliziert werden, eine Ableitung nach der Zeit ist nicht erlaubt, da 2.1 nur den Zerfall eines Nuklids berücksichtigt und keine Zunahme. Für die Aktivität der Tochter als Funktion der Aktivität der Mutter folgt:

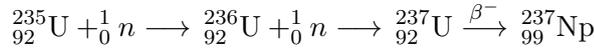
$$A_2(t) = A_1(0)\lambda_2 \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right) \quad (2.7)$$

Gleichung 2.6 und 2.7 setzen $N_2(t) = 0$ voraus. [May02]

2.3.1 Natürliche Zerfallsreihen

Die natürlichen Zerfallsreihen setzen sich zusammen aus den drei primordialen langlebigen Radionukliden ^{238}U , ^{235}U und ^{232}Th sowie ^{237}Np und den Zerfallsprodukten. Diese Nuklide stellen zugleich die Namenspaten der jeweiligen Zerfallsreihe dar, wobei die Np-Reihe wegen der zum Erdalter relativ kurzen Halbwertszeit des ^{237}Np von $2,14\text{E}+06$ Jahren in der Umwelt bereits nicht mehr vorkommt. Dennoch sind Radionuklide dieser Reihe wichtig für diese Arbeit, da solche auf künstlichem Wege nachproduziert werden, wie auch schwere Elemente bis hin zum Californium, dessen Isotope ^{249}Cf , ^{250}Cf , ^{251}Cf und ^{252}Cf die schwersten Nuklide der vier Reihen darstellen. Anthropogen erzeugte, signifikante Mengen sind z.B. in abgebrannten Brennstäben durch Neutroneneinfang am Uran

vorhanden.



Da sich bei einem α -Zerfall die Massenzahl um vier und beim β -Zerfall erhalten bleibt, werden alle Massenzahlen durch vier Zerfallsreihen abgedeckt.

2.3.2 Gleichgewichte und Ungleichgewichte

Für das Verhältnis der Zerfallskonstanten λ_1 und λ_2 lassen sich drei Fälle unterscheiden.

1. $\lambda_1 < \lambda_2$ transientes Gleichgewicht
2. $\lambda_1 > \lambda_2$ kein Gleichgewicht
3. $\lambda_1 \ll \lambda_2$ säkulares Gleichgewicht

Das Aktivitätsverhältnis wird im Laufe der Zeit allein durch die Zerfallswahrscheinlichkeiten der Nuklide bestimmt. Aus Umformung von 2.7 lässt sich das Verhalten ablesen.

$$A_2(t) = A_1(0)\lambda_2 \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right) \Rightarrow \frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}) \quad (2.8)$$

Transientes Gleichgewicht

Ist die Halbwertszeit der Mutter größer als die der Tochter $T_{1/2,1} > T_{1/2,2}$, aber nicht um Größenordnungen verschieden, so stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht ein, bei dem die Aktivität der Tochter stets über der der Mutter liegt.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.9)$$

Tabelle 2.1: Natürliche Zerfallsreihen

Primordiales Mutternuklid	Halbwertszeit in a	Stabiles Endnuklid	Name	Zuordnung
${}^{232}\text{Th}$	1,39E+10	${}^{208}\text{Pb}$	Thorium-Reihe	4n
${}^{237}\text{Np}$	2,14E+06	${}^{209}\text{Bi}$	Neptunium-Reihe	4n+1
${}^{238}\text{U}$	4,47E+09	${}^{206}\text{Pb}$	Uran-Radium-Reihe	4n+2
${}^{235}\text{U}$	7,04E+08	${}^{207}\text{Pb}$	Uran-Actinium-Reihe	4n+3

Kein Gleichgewicht

Ist die Tochter langlebiger als die Mutter, $T_{1/2,1} < T_{1/2,2}$, so kann sich zu keiner Zeit ein Gleichgewicht einstellen.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}) = \infty \quad (2.10)$$

Säkulares Gleichgewicht

Ist die Tochter relativ zur Mutter sehr kurzlebig, $T_{1/2,1} \ll T_{1/2,2}$, dann wird sich die Aktivität der Tochter als Grenzfall des transienten Gleichgewichtes nach kurzer Zeit der Mutter nahezu angleichen.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}) \approx 1 \quad (2.11)$$

2.3.3 Bateman-Gleichung

Im allgemeinen Fall berechnen sich die zeitlichen Mengenänderungen mit Ratengleichungen, der erste Teil ist die Produktionsrate, der zweite der Zerfall.

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= -\lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ &\vdots \\ \frac{dN_n}{dt} &= \lambda_{n-1} N_{n-1} \end{aligned}$$

Das System aus n Differentialgleichungen lässt sich mit einem Exponentialansatz lösen.

$$\begin{aligned} N_1 &= k_{11} e^{-\lambda_1 t} \\ N_2 &= k_{21} e^{-\lambda_1 t} + k_{22} e^{-\lambda_2 t} \\ &\vdots \\ N_n &= k_{n1} e^{-\lambda_1 t} + k_{n2} e^{-\lambda_2 t} + \dots + k_{nn} e^{-\lambda_n t} \end{aligned}$$

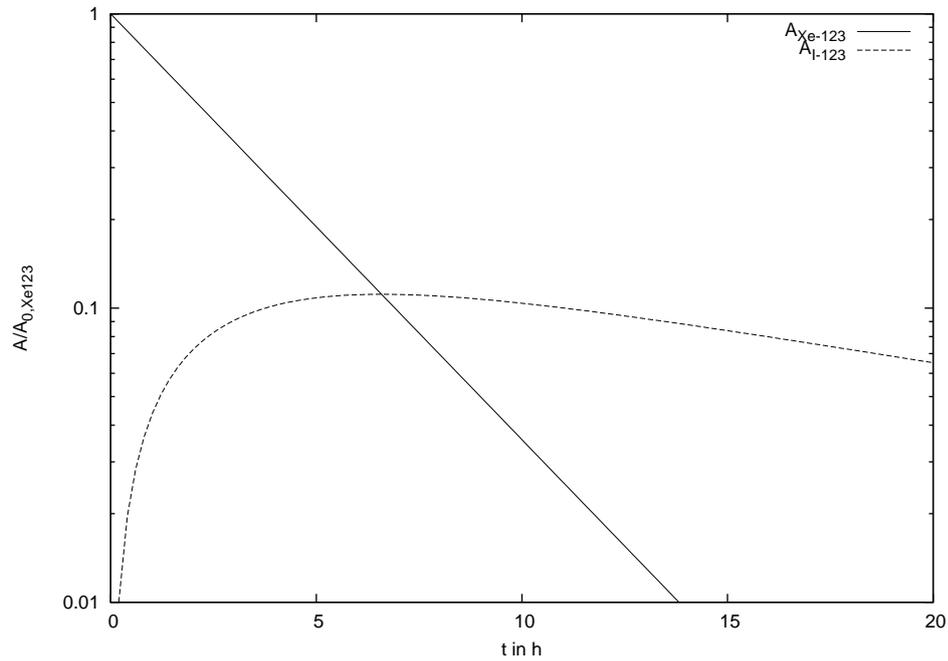


Abbildung 2.1: Kein Gleichgewicht: Der Zerfall von ^{123}Xe zu ^{123}I , ein Gleichgewichtszustand wird nie erreicht.

Ist zur Zeit $t = 0$ nur das erste Kettenglied vorhanden, $N_i(0) = 0$ ($i > 1$), vereinfachen sich die Randbedingungen und die Lösung ist

$$N_i(t) = \prod_{j=1}^{i-1} \lambda_j N_1(0) \sum_{j=1}^i \frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^i (\lambda_j - \lambda_i)}. \quad (2.12)$$

Die ersten Glieder der Kette lauten

$$\begin{aligned} N_1(t) &= N_1(0)e^{-\lambda_1 t} \\ N_2(t) &= \lambda_2 N_1(0) \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2} \right) \\ N_3(t) &= \lambda_2 \lambda_3 N_1(0) \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} - \frac{e^{-\lambda_3 t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right). \end{aligned}$$

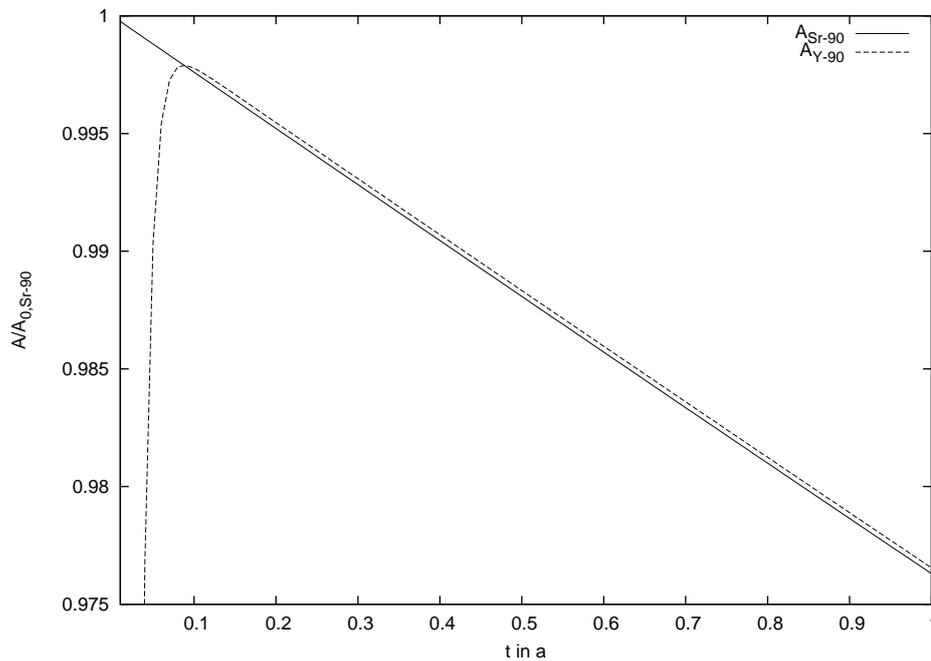


Abbildung 2.2: Säkulares Gleichgewicht: Zerfall von ^{90}Sr zu ^{90}Y . Ein säkulares Gleichgewicht stellt sich bereits nach kurzer Zeit ein.

Im Allgemeinen ist $N_i(0) \neq 0 \forall i \leq n$, und 2.12 muss für jedes Nuklid mit einer Initialsubstanz verschieden von null berechnet werden und wird um einen Summenterm erweitert.

$$N_i(t) = \sum_{j=1}^{i-1} \left[\prod_{k=1}^{j-1} \lambda_k N_j(0) \sum_{l=1}^j \frac{e^{-\lambda_l t}}{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^j (\lambda_m - \lambda_l)} \right] \quad (2.13)$$

Zu beachten sind Divergenzen für den Fall $\lambda_m = \lambda_l$, die allerdings in den natürlichen Zerfallsreihen nicht auftreten.

Verzweigungen

Gerade bei den natürlichen Zerfallsreihen kommt es vor, dass ein Nuklid mehrere Möglichkeiten hat, zu zerfallen und nicht ausschließlich Glied einer linearen Reihe ist. Bei dem

Zerfall in mehrere Töchter teilen sich die Wahrscheinlichkeiten auf.

$$N_0 \xrightarrow{\lambda_1} N_1 \vee N_0 \xrightarrow{\lambda_2} N_2 \vee \dots \vee N_0 \xrightarrow{\lambda_n} N_n$$

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (2.14)$$

Für Töchter mit Zerfallskonstanten $\lambda_{i,d}$ ergibt sich mit 2.12 und 2.14

$$N_i(t) = \lambda_{i,d} N_0(0) \left(\frac{e^{-\lambda_0 t}}{\lambda_{i,d} - \lambda_i} - \frac{e^{-\lambda_{i,d} t}}{\lambda_i - \lambda_{i,d}} \right). \quad (2.15)$$

Kann innerhalb einer Zerfallsreihe ein Nuklid von einer Mutter über verschiedene Zerfälle erreicht werden, so muss 2.12 für jeden dieser Wege angewendet werden. Sei P die Summe aller Pfade, um Nuklid N_i zu erreichen und

$$p, P \in \{\mathbb{N} | p \leq P\},$$

dann erweitert sich 2.13 um eine Summe und die Zerfallskonstanten und Nuklide werden pfadspezifisch.

$$N_i(t) = \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{i-1} \left[\prod_{k=1}^{j-1} \lambda_{k,p} N_{j,p}(0) \sum_{l=1}^j \frac{e^{-\lambda_{l,p} t}}{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^j (\lambda_{m,p} - \lambda_{l,p})} \right] \quad (2.16)$$

3 Lagerung radioaktiver Abfälle

3.1 Radioaktiver Abfall

3.1.1 Klassifizierung

Von der früheren Klassifizierung in LAW (low active waste), MAW (medium active waste) und HAW (high active waste) besteht nach heutigem Stand eine Unterteilung in wärmeentwickelnde Abfälle und solche, deren Wärmeentwicklung zu vernachlässigen ist. Erstgenannte stellen technische Anforderungen an die Behälter und können in geologischen Formationen Verformungen bewirken und bei Wassereintritt Einfluss auf Löslichkeiten ausüben. Desweiteren findet eine Unterteilung in Aggregatzustand, Aktivität, Masse, Volumen, Brennbarkeit, Herkunft und weitere Eigenschaften statt.

3.1.2 Zeitfrage

Die Zeitspanne, über die Radionuklide von der Biosphäre isoliert gelagert werden müssen, richtet sich nach der Zusammensetzung und Halbwertszeit. Für kurzlebige Nuklide eignen sich oberirdische kontrollierte Umgebungen, in denen die Aktivität in relativ kurzer Zeit auf ein geringes Niveau herabsinken kann und keine Gefährdung der Bevölkerung mehr darstellt. Für langlebige Radionuklide wie ^{238}U mit $T_{1/2} = 4,47\text{E} + 09$ uss eine Isolation über sehr lange Zeiträume gewährleistet sein. Hierfür werden Langzeitsicherheitsanalysen und Störfallszenarien entwickelt, die, wie auch diese Arbeit, Zeitspannen von 10000 Jahren berücksichtigen.

3.1.3 Zusammensetzung und Herkunft

Aus verschiedenen Bereichen entstehen Abfälle unterschiedlicher Zusammensetzung, die langfristig von der Biosphäre isoliert gelagert werden sollen.

Medizin

In der Nuklearmedizin existieren viele Anwendungsmöglichkeiten für Radionuklide in Diagnostik und Therapie. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ist ein niederenergetischer γ -Strahler mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 6$ h und wird zu diagnostischen Zwecken in Verbindungen eingesetzt, welche sich in dem entsprechenden Zielorgan anreichern und eine szintigraphische Darstellung ermöglichen. Als nichtinvasives Therapiebeispiel lässt sich ^{131}I mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 6$ d anführen, welches sich effektiv in der Schilddrüse anreichert und eine lokal begrenzte Organdosis verursacht. Die Patienten werden dabei isoliert und nuklidhaltige

Körperflüssigkeiten aufgefangen. Für medizinische Applikationen werden gezielt Nuklide mit kurzen physikalischen und biologischen Halbwertszeiten verwendet, der Anteil am radioaktiven Abfall aus der Medizin ist daher viel geringer als der Abfall aus kerntechnischen Anlagen.

Kernreaktoren und kerntechnische Anlagen

Die Nutzung der Kernspaltung zur Energiegewinnung führt, beginnend bei der Brennstoffherstellung und endend beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, zu erheblichen Abfallmengen. Bei der Uranförderung werden über- und untertage große Mengen an Uranerzen gefördert und das Uran größtenteils abgetrennt. Der dabei entstehende Abraum, welcher anteilig Uran und Folgeprodukte enthält, kann, auf oberirdischen Halden gelagert, durch Verwitterungsprozesse ausgewaschen werden und das Grundwasser infiltrieren. Bei der Brennelementherstellung wird das natürliche Verhältnis von $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ zu Gunsten von ^{235}U verändert und, als Urandioxid in Pellets gepresst, in Brennstäbe geschichtet zu einem Brennelement angeordnet. Die Nutzung ändert das Verhältnis wiederum und je nach genauer Zusammensetzung und Reaktortyp entstehen unterschiedliche Massenanteile Spaltprodukte und, durch Neutroneneinfang, schwerere Elemente als Uran wie z.B. Curium.

Während der Betriebsphase entstehen Mischabfälle wie Schutzkleidung, Werkzeuge, Folien, Isolationen, Filter, Rohrleitungen, Kabel und weitere Materialien, sowie abgebrannte Brennelemente. Diese werden im Reaktorgebäude in einem Abklingbecken wassergekühlt, einige Zeit gelagert und anschließend in zwischenlagerungsg geeignete Behälter wie den CASTOR verpackt, bis eine Endlagerungsmöglichkeit existiert. In der Nachbetriebsphase sind große Volumina an Bauteilen mit Aktivierungsprodukten vorhanden, wie in Tabelle 3.1 aufgeführt, die, verglichen mit den Nukliden in abgebranntem Brennstoff, relativ kurzlebig sind. Von diesen Nukliden ist ^{63}Ni als langlebigstes ausschlaggebend, ab wann Bauelemente dem Abfallwirtschaftskreislauf wieder zugeführt werden können, wie das Einschmelzen in Hochöfen, oder ob eine Lagerung auf Deponien oder unterirdisch vorzunehmen ist.

Tabelle 3.1: Aktivierungsprodukte in Bauteilen kerntechnischer Anlagen

Nuklid	Halbwertszeit
Co-58	7,08E+01 d
Co-60	5,27E+00 a
Ni-63	1,00E+02 a
Cr-51	2,77E+01 d
Mn-54	3,12E+02 d
Fe-59	4,45E+01 d

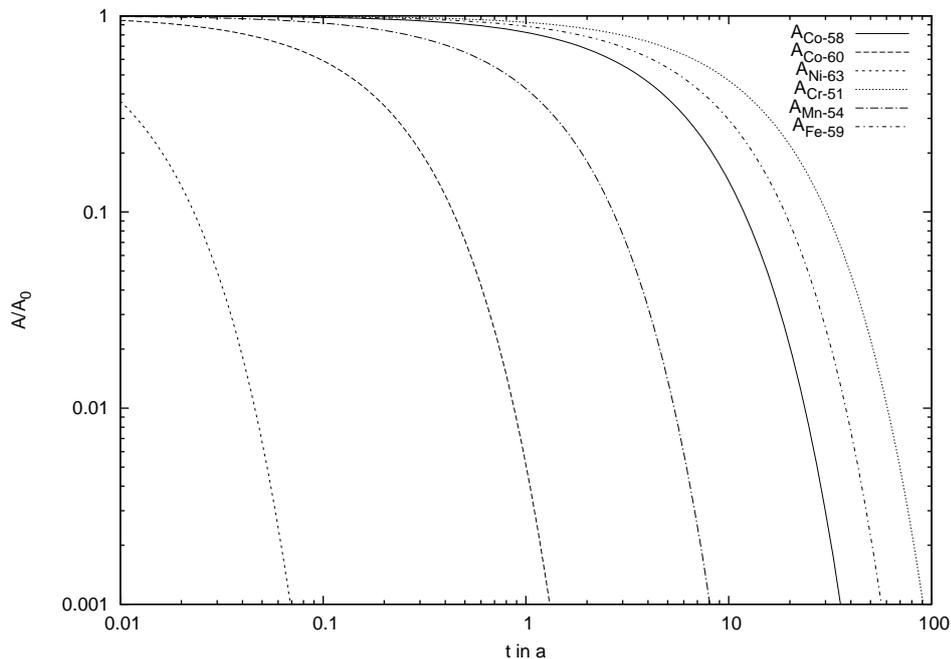


Abbildung 3.1: Berechnetes Abklingverhalten der Radionuklide aus Tabelle 3.1 in Bauelementen.

Forschung

In unterschiedlichen Forschungsbereichen entstehen radioaktive Abfälle, die langfristig gelagert werden müssen. Sie setzen sich zusammen aus Baumaterialien, kontaminierten Labormaterialien, einzementierten Abwässern, Strahlenquellen und weiteren Mischabfällen.

3.1.4 Radionuklidinventar in der Schachtanlage Asse II

In den Abbildungen 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 und 3.7 wird das zeitliche Verhalten des gesamten Radionuklidinventars der Schachtanlage Asse II ohne Berücksichtigung von Auswaschung oder Rückholung dargestellt. Eine Übersicht der Aktivitäten zum 1.1.1980 ist in Tabelle A.9 zu finden.

3.2 Zwischenlager

Ein Zwischenlager dient zur zeitlich begrenzten Lagerung von radioaktiven Abfällen, bis sie entsprechend konditioniert in ein Endlager überführt oder auf Grund ihrer Kurzlebig-

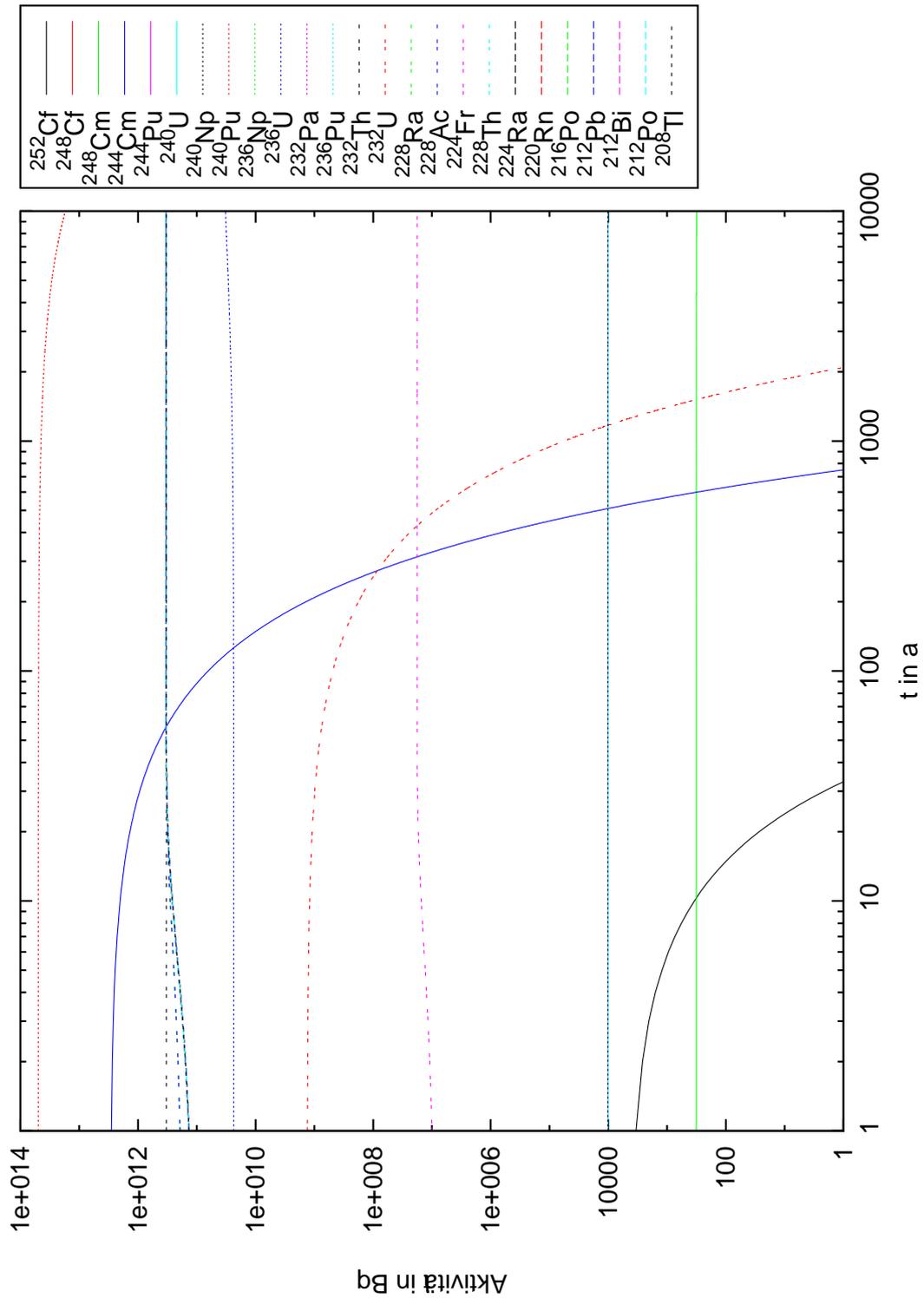


Abbildung 3.2: Radionuklidinventar der Th-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren

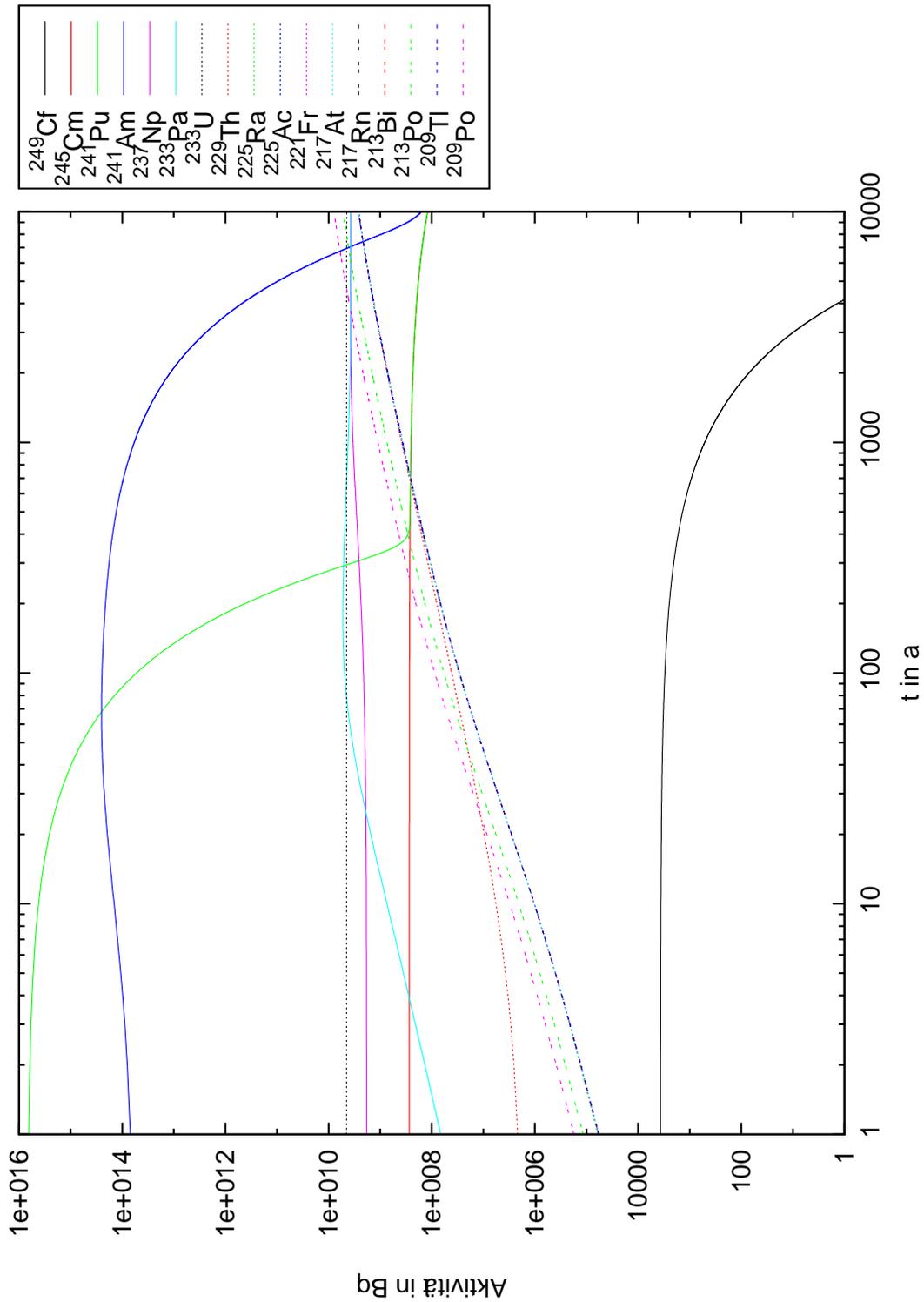


Abbildung 3.3: Radionuklidinventar der Np-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren

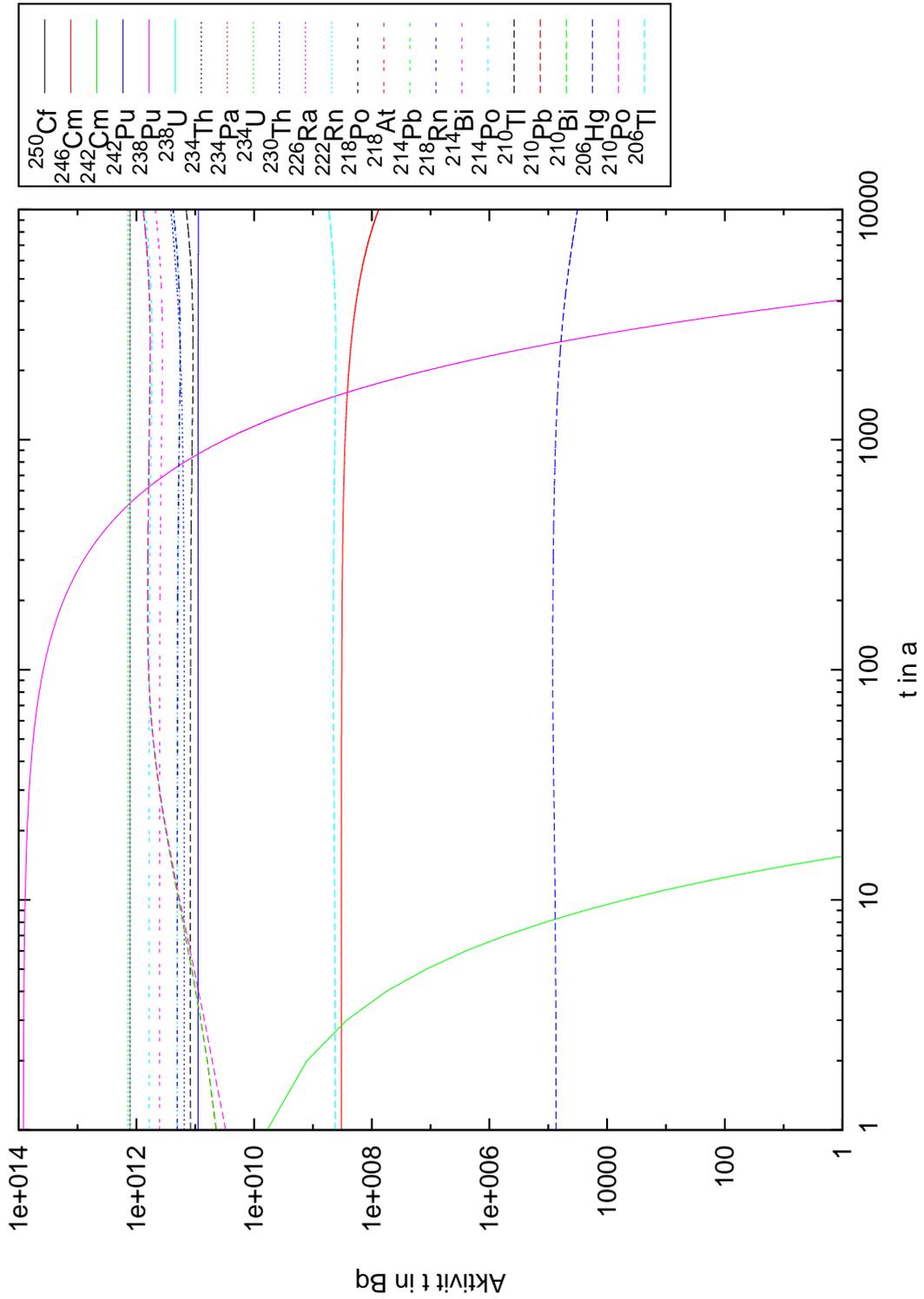


Abbildung 3.4: Radionuklidinventar der U-Ra-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren

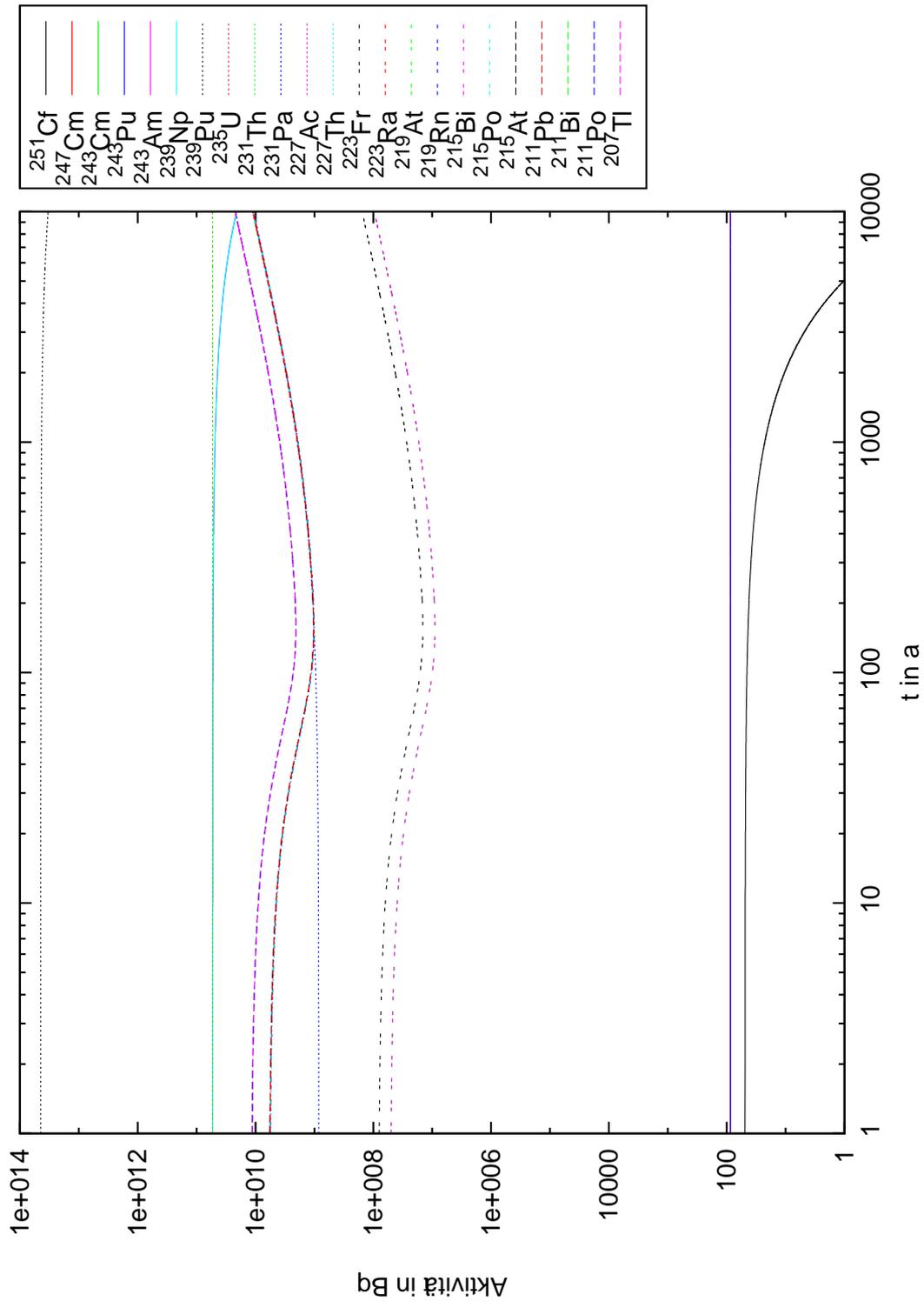


Abbildung 3.5: Radionuklidinventar der U-Ac-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren

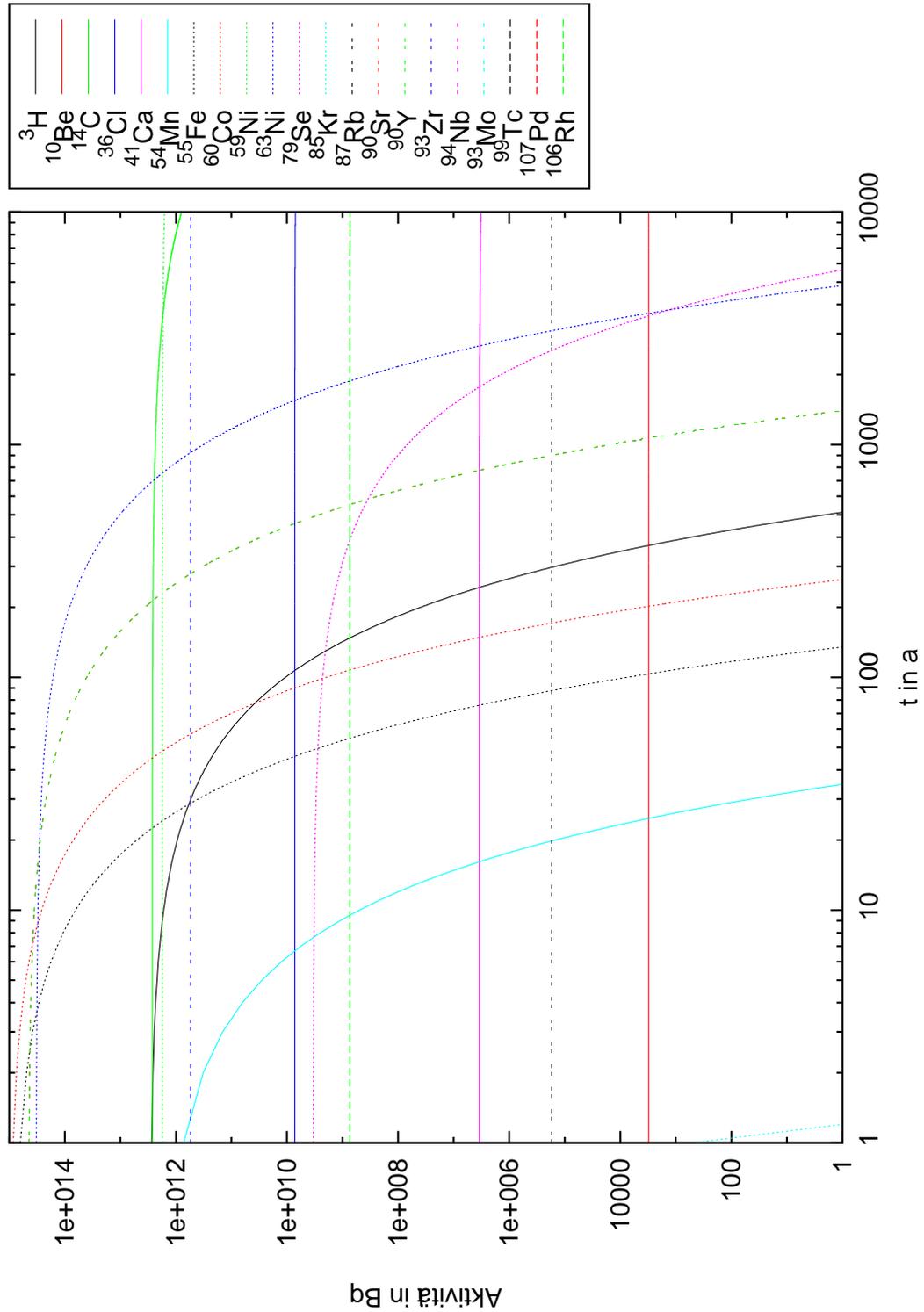


Abbildung 3.6: Radionuklidinventar bis zur Ordnungszahl 45 berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren

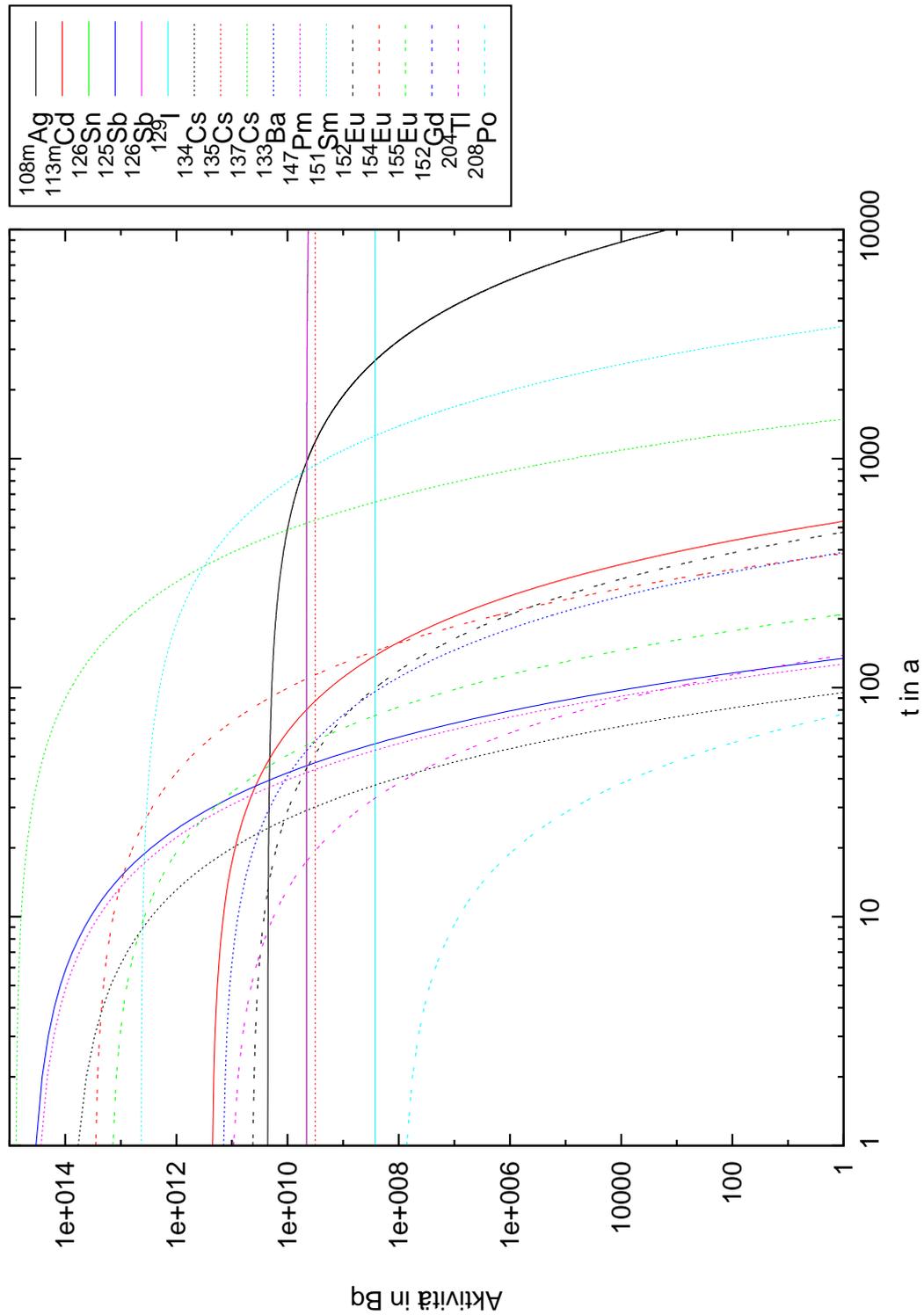


Abbildung 3.7: Radionuklidinventar der Ordnungszahlen 46-85 berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren

keit als konventioneller Abfall betrachtet werden können. In Deutschland bestehen sowohl zentrale als auch dezentrale Zwischenlager, in denen 94000 m^3 konditionierter Abfall lagert (Stand: 2008). Die Novellierung des Atomgesetzes von 2002 bewirkte eine Sorgspflicht der AKW-Betreiber den verwendeten Brennelementen gegenüber, sodass diese auf dem Gelände zwischengelagert werden müssen und Transporte entfallen. Dafür werden Lagerhallen errichtet und die Elemente in spezielle Behältnisse umgefüllt, wie z.B. CASTOR-Behälter. Zentrale Zwischenlager befinden sich an den Standorten Ahaus und Gorleben, in Ahaus standen zum Zeitpunkt 31.12.2009 329 CASTOR-Behälter verschiedener Bauart, in Gorleben fünf Behälter mit Brennelementen und 86 mit HAW-Glaskokillen. Darüber hinaus geben Kleinerzeuger radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung an den Landessammelstellen ab. Es gibt zwei Typen von Zwischenlagern, die Nass- und Trockenlager. Während Brennelemente in Kernkraftwerken in einem Wasserbecken zur Kühlung und Abschirmung gelagert werden, stehen in einem Trockenlager Behältnisse, die von der Luftkonvektion gekühlt werden.

3.3 Lagerstandorte in Deutschland

Morsleben

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) ist ein ehemaliges Bergwerk zur Gewinnung von Kali- und Steinsalz, bevor es ab 1971 in der DDR für kontaminierte Abfälle aller Art genutzt wurde. Nach der Wiedervereinigung erfolgte eine Übernahme durch den Bund am 3.10.1990 und ein bis zum 30.06.2000 befristeter Vertrag der Weiternutzung. 1998 wurde die Einlagerung gerichtlich ausgesetzt und 2001 verzichtete das Bundesamt für Strahlenschutz unwiderruflich auf weitere Einlagerungen. Am 30.11.2001 ereignete sich ein Löserfall im Zentralteil, bei welchem sich aus dem Deckenteil ein großes Volumen Steinsalz mit maximalen Kantenlängen von 33 m, 42 m und 5,5 mm und einem Eigengewicht von 4000 t löste. Seit 2003 werden bergbauliche Gefahrenabwehrmaßnahmen ergriffen, die ein Stützkonzept der einsturzgefährdeten Bereiche vorsieht. Bis 2011 werden hierfür Hohlräume mit Salzbeton verfüllt und verschlossen. Zum heutigen Zeitpunkt beläuft sich das Inventar auf 37000 m^3 in Behältern eingelagerte Abfälle und 6621 umschlossene radioaktive Quellen. Die Gesamtaktivität betrug zum Zeitpunkt 30.06.2005 $< 6E + 14\text{ Bq}$, wovon die Alphaaktivität in der Größenordnung von 10^{11} Bq liegt.

Konrad

In den beiden Schachtanlagen Konrad 1 und Konrad 2 bei Salzgitter wurde von 1965 bis 1976 Eisenerz abgebaut und nach Ende der Wirtschaftlichkeit folgte eine Prüfung auf die Eignung als Endlager. Insgesamt beläuft sich das Hohlraumvolumen auf 800000 m^3 , nach der Eisenerzgewinnung wurden Abbauräume teilweise verfüllt und in noch offenen Räumen sind keine gebirgsmechanischen Veränderungen erkennbar. Seit 2007 ist Konrad das erste nach Atomrecht genehmigte Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. Bis 2014 soll die Umrüstung abgeschlossen sein, in 800 m und 1300 m Tiefe wer-

den im Wirtsgestein nach Bedarf Einlagerungsfelder bis zu einer maximalen Kapazität von 303000 m^3 aufgefahren und unmittelbar nach Einlagerung verfüllt. Über den beiden Sohlen befindet sich eine 400 m mächtige Tonschicht als natürliche Barriere.

Gorleben

In der unmittelbaren Nähe von Gorleben sind vier Anlagen im Betrieb, ein Transportbehälterlager für verglaste hochradioaktive Abfälle aus der Wiederaufbereitung, ein Zwischenlager für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle, eine Konditionierungsanlage sowie das Erkundungsbergwerk. Ob tatsächlich radioaktive Abfälle im Salzstock Gorleben eingelagert werden, ist noch offen, da weiterhin nötige Sicherheitsanalysen ausstehen.

Asse

Vor der Einlagerung eines Nuklidinventars war die Schachanlage Asse II ein Salzbergwerk, in dem von 1909 bis 1925 Kalisalz und von 1916 bis 1964 Steinsalz gewonnen wurde. Bei der Steinsalzgewinnung entstanden 131 Kammern auf 13 Sohlen und im Zentralteil ein Hohlraum von 450000 m^3 , die wegen des geringen Anfalls von Abraum bei der Salzgewinnung unverfüllt verblieben. Um möglichst viele Rohstoffe zu gewinnen, wurden die einzelnen Kammern dicht gedrängt aufgefahren, mit teilweise wenigen Metern Abstand zueinander. Die Gebirgskonvergenz drückt die einzelnen Kammern zusammen und lässt Teile des Bergwerkes instabil werden. Zusätzlich sind Risse entstanden, durch die Wasser mit einer Quellstärke von $> 10000\text{ m}^3/\text{d}$ eindringt. Dieses wird auf der 658 m-Sohle in Becken gepumpt und auf der 725 m- und 750 m-Sohle in Sümpfen gesammelt. Aufgrund der geologisch ungünstigen Situation hat das BfS in einem Optionenvergleich Rückholung, Vollverfüllung und Umlagerung bewerten lassen und die Rückholung der radioaktiven Abfälle als geeignete Variante gewählt. Vor der Nutzung als Endlager für radioaktive Abfälle war die Asse II ab 1967 ein Versuchslager, um Grundkenntnisse zur Einlagerung solcher Abfälle zu erlangen. Hierfür wurden mit Fässern vernachlässigbarer Wärmeentwicklung Stapel- und Schüttversuche durchgeführt. In der darauffolgenden Nutzung als Endlager bis 1978 wurden insgesamt 125787 Fässer schwach- und mittelradioaktiven Abfalles eingelagert. Eine Auflistung des Inventars ist in Tabelle A.9 zu finden.

3.4 Endlagerung

In der Bundesrepublik Deutschland gilt für die Endlagerung das Prinzip der unbefristeten und sicheren Lagerung in tiefen geologischen Formationen und Sorgefreiheit der nachkommenden Generationen. Darüber hinaus werden keine radioaktiven Abfälle aus oder in andere Staaten zu Zwecken der Endlagerung transportiert. Seit 1976 obliegt die Verantwortung für die Entsorgung dem Bund, das Bundesamt für Strahlenschutz übernimmt dabei verschiedene Aufgabenfelder. Der Entsorgungsplan erfuhr 1994 eine Veränderung, indem Brennelemente ab 2005 nach Gebrauch nicht mehr wiederaufbereitet werden,

sondern unmittelbar endgelagert werden sollen. Die bis 2005 in die Wiederaufbereitungsanlagen transportierten Elemente in La Hague und Sellafield werden bis einschließlich 2011 in transportgeeignete CASTOR-Behältern nach Deutschland zurückgeführt und im Zwischenlager Gorleben stationiert.

3.4.1 Anforderungen an ein Endlager

Um eine Langzeitsicherheit zu gewährleisten, muss ein Endlager einige Voraussetzungen erfüllen. Das erwählte Wirtsgestein soll hinreichend homogen sein, keine geologischen Störungen aufweisen und sich mit einer gewissen Mächtigkeit über eine Mindestausdehnung erstrecken. Die Mächtigkeit soll mindestens 100 m betragen und eine Durchlässigkeit $< 10^{-10}$

3.4.2 Vergleich Wirtsgesteine

Bei der Standortfindung eines Endlagers ist die Wirksamkeit der geologischen und geotechnischen Barrieren ein primäres Entscheidungskriterium.

Salz

In Deutschland existiert eine große Anzahl an Salzstöcken und Salzkissen sowie entsprechende bergmännische Erfahrung durch mehr als 100 Jahre Salzbergbau. Steinsalz als Wirtsgestein besitzt einige günstige Eigenschaften. Das gebirgsmechanische Verhalten erlaubt das Auffahren großer Hohlräume ohne aufwendige Ausbauten oder Stabilisierungsmaßnahmen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit können auch wärmeentwickelnde Abfälle eingelagert werden, da die Abwärme effektiv abgeführt werden kann. Zwar ist Salz gut wasserlöslich, sodass bei langfristigem Wasserzutritt mit einer Umlösung größerer Volumina gerechnet werden muss, aber gleichzeitig ist Salz nahezu wasserundurchlässig. Im Gegensatz zu anderen Wirtsgesteinen verhindert das plastische Verformungsverhalten das

Tabelle 3.2: Bewertungsmatrix potentieller Wirtsgesteine [BGR07a]

Eigenschaft	Steinsalz	Ton	Kristallingestein
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	(sehr) gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

Auftreten größerer Klüfte und Risse und bedingt eine Selbstheilungskraft, die durch Gebirgskonvergenz und -divergenz verursachte Spalten ausheilen kann. [BGR95]

Ton

Ton und Tongesteine besitzen wegen der geringen Durchlässigkeit eine Barriere- und Stauwirkung für den Wassertransport. Bei k_f -Werten (Definition siehe Gleichung 4.1) von $< 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ist Diffusion der dominante Transportprozess, welcher aber hinreichend ineffizient für die Endlagerung ist. Eine weitere günstige Barrierewirkung ergibt sich durch eine gewisse Plastizität und in Hinblick auf Radionuklidtransport durch chemische Pufferwirkung und Rückhaltevermögen. Ton ist ein klastisches Sediment mit einer medianen Korngröße von $< 2 \mu\text{m}$. Für die Beurteilung einer potentiellen Eignung als Endlager sind Schichttiefe und Mineralzusammensetzung von besonderer Bedeutung. Unter mechanischer Beanspruchung verändert sich die Struktur von der typischen Blättchenform zur feinkörnigen Zusammensetzung, dementsprechend hängt auch die Porosität von der Tiefe ab. Für die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfall muss die chemische Reaktion der Minerale auf Erwärmung berücksichtigt werden, welche eine Korngrößenveränderung und Verringerung der Barrierewirksamkeit nach sich ziehen kann. In Deutschland ist die Erfahrung im Bergbau verglichen mit Salz geringer ausgeprägt, Kenntnisse wurden erst durch Standorterkundungen von Konrad sowie aus internationalen Projekten gewonnen. [BGR07b]

Kristallingestein

Kristallingestein wie Granit wird in einigen Ländern als geeignetes Wirtsgestein angesehen. Vorteilhaft sind hohe mechanische Festigkeit und Hohlraumstabilität, aber auch Temperaturbelastbarkeit und geringes Lösungsverhalten. Nachteilig hingegen ist die gute Wasserleitung bei der Existenz von Klüften, die eine Mobilitätsbarriere und dichten Einschluss der Radionuklide bei der Lagerung in Granit oder anderen Kristallingesteinen notwendig macht. [BGR94] In Deutschland erfüllen die Formationen die Mindestanforderungen wegen des geklüfteten Zustandes nicht und werden ausgeschlossen. [BGR07a]

3.4.3 Internationaler Stand der Endlagerung

Bei der Enlagerung langlebiger Radionuklide und HAW besteht internationaler Konsens diese in tiefen geologischen Formationen zu verwahren. Ein betriebsbereites Endlager steht weltweit noch nicht zur Verfügung, bisher existieren Konzepte bis hin zu Planungen. Der Zeitaufwand von der Standortfindung bis zur Betriebsbereitschaft ist erheblich, da alle Schutzziele eingehalten werden sollen und Langzeitsicherheitsnachweise erbracht werden müssen. Dabei spielen auch gesellschaftliche und politische Aspekte eine Rolle. Für relativ kurzlebige Radionuklide hat sich eine oberflächennahe Lagerung etabliert. Welches Wirtsgestein erwählt wird ist auch abhängig von der jeweiligen regionalen Verfügbarkeit.

4 Transport von Radionukliden in porösen Medien

4.1 Durchlässigkeit poröser Medien

Darcy-Gesetz

Ein einfacher Durchflussversuch zur Ermittlung mediumspezifischer Durchlässigkeiten für Potentialströmungen stellt eine Durchflussäule da, wie sie auch HENRY DARCY für seine Versuche benutzte. Die Säule wird dabei mit einem Lockergestein wie z.B. Sand gefüllt einer konstanten Flussrate ausgesetzt wird. Sie kann dabei geneigt werden, um den hydraulischen Gradienten zu verändern. Das Darcy-Gesetz hat die Form

$$\dot{V} = k_f \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{l}. \quad (4.1)$$

\dot{V}	Volumenstrom in $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
k_f	Durchlässigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Δh	Spiegelhöhenunterschied in m
l	Länge des durchströmten Mediums in m

Dieses Gesetz ist eingeschränkt in seiner Gültigkeit, es bezieht sich auf laminare Strömungen in homogenen wassergesättigten Schichten und auf eine makroskopische Betrachtung. [Pre03] Die Wasserdurchlässigkeit charakterisiert die Permeabilität eines Bodens und hängt neben der Bodenart auch von der Lagerungsdichte ab. Ein solcher Wert ist eine Verallgemeinerung, der unter realen Bedingungen Schwankungen unterliegt, da nicht immer gesättigte Wasserverhältnisse vorliegen und das Porenvolumen nur teilweise ausgefüllt ist. Je nach Bewuchs wird ein Teil des Wassers über die Wurzeln aufgenommen und dem Boden entzogen. Eine ungesättigte Zone transportiert Wasser wesentlich langsamer als im gesättigten Fall, es wird adhäsiv gebunden und durch Saugspannung gehalten. Je nach Zusammensetzung und Lagerungsdichte variiert die Wasserbewegung auf mikroskopischer Skala, sodass in einigen Bereichen eine stark reduzierte Wasserleitung vorliegt. Um der Inhomogenität zu genügen und ein durchflossenes Medium bestehend aus Schichtfolgen zu beschreiben, existiert neben dem Durchlässigkeitswert k_f die *Transmissivität* T , welche zu den jeweiligen Durchlässigkeiten die Mächtigkeit der einzelnen Schichten berücksichtigt. Für das Transportmodell dieser Arbeit werden Durchlässigkeitswerte wassergesättigter

Böden verwendet, da diese den ungünstigsten Fall bezüglich Nuklidtransportes repräsentieren und somit eine Dosisunterschätzung vermeiden.

$$T = \sum_i^N k_{f,i} \cdot y_i \quad (4.2)$$

T Transmissivität in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
 N Anzahl an Schichten
 y Schichtmächtigkeit in m

Geschwindigkeitsdefinitionen

Strömungen unterliegen der Kontinuitätsbedingung

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} \quad (4.3)$$

\dot{V} Volumenstrom in $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
 A Durchströmte Querschnittsfläche in m^2
 \bar{v} Mittlere Fließgeschwindigkeit in m/s

Der einfache Quotient lässt sich auch als eine aus dem Darcy-Gesetz ableitbare *Filtergeschwindigkeit* auffassen, welche den spezifischen Durchfluss darstellt. [DIN92] Auf mikroskopischer Skala legt jedes Wassermolekül eine eigene Wegstrecke zurück und besitzt daher eine eigene *Bahngeschwindigkeit*, dessen Variation mit der Inhomogenität eines porösen Körpers wächst.

$$v_b = \frac{x_b}{t} \quad (4.4)$$

v_b Bahngeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
 x_b Wegstrecke eines Partikels in m

Die im Darcy-Gesetz verwendete Fläche berücksichtigt nicht den Porenanteil, mit der sich ein Molekül in Hauptfließrichtung fortbewegt. Die korrigierte *Abstandsgeschwindigkeit* \bar{v}_p ist ein Mittelwert, um den die tatsächlichen Geschwindigkeiten je nach Inhomogenität stärker oder schwächer streuen.

$$\bar{v}_p = \frac{\bar{v}}{n} \quad (4.5)$$

\bar{v}_p Abstandsgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
 n Nutzporosität

Nutzporosität

In Granulaten wie Lockergesteinen entstehen zwischen den einzelnen Körnern und Gesteinspartikeln Hohlräume und Poren. Der Porenanteil in einer Sediment- oder Gesteinsschicht setzt sich zusammen aus dem Verhältnis von Porenvolumen zu Gesamtvolumen:

$$n = \frac{V_P}{V_{ges}} = \frac{V_{ges} - V_M}{V_{ges}} \quad (4.6)$$

n Porosität
 V_P Porenvolumen in m^3
 V_M Volumen der Feststoffmatrix in m^3
 V_{ges} Gesamtvolumen in m^3

Je nach Lagerungsdichte entstehen größere oder kleinere Hohlraumvolumina. Ein locker geschüttetes Material, ähnlich der Lagerung auf Halden, bietet mehr Zwischenräume als eine durch Diagenese verfestigte Sedimentschicht. Auch die Korngeometrie ist entscheidend, eine gleichförmige Kugelform verursacht ein größeres Porenvolumen und besitzt im Grenzfall der hexagonal dichtesten Kugelpackung einen Raumfüllungsgrad von 0,74. Bei großen Unförmigkeiten hingegen werden die Zwischenräume durch feinere Sedimente aufgefüllt. Lockergesteinsschichten sind in der Regel inhomogen, sodass von einem Gemisch mit einer Korngrößenverteilung ausgegangen werden muss.

Die Nutzporosität, d.h. der Anteil an effektiv nutzbaren Porenvolumen, wird durch den Haftwasseranteil bestimmt, welcher durch die Kornoberfläche pro Volumenelement bestimmt wird. Das Haftwasser ist adhäsiv gebunden und nimmt nicht am Sicker- oder Durchströmprozess teil. Die feinsten Sedimente, vor allem Tone, besitzen einen großen Porenanteil, eine hohe Saugspannung und einen hohen Haftwasseranteil, wegen der großen Kornoberfläche pro Volumen ist die Nutzporosität allerdings am kleinsten.

4.2 Wasserleitung von Festgesteinen

Grundsätzlich wird zwischen drei Möglichkeiten der Wasserleitung unterschieden.

- Porenleiter
- Kluftleiter
- Karstleiter

Während Lockergesteine Wasser durch Poren leiten, findet Wassertransport in Festgesteinen an Trennflächen statt. Die Unterbrechung der Kontinuität führt zu geologischen Störungen und größeren zusammenhängenden Hohlräumen, die potentiell Wasser führen können.

Kluftwasserleiter

Bestimmte Gesteine neigen zur Kluftbildung unter mechanischer Beanspruchung, charakterisiert wird dies durch den *Kompetenzgrad*. Kompetente Gesteine wie Sandsteine, Quarzite, Kalksteine und magmatische Gesteine verhalten sich unelastisch und bilden Risse bei Krafteinwirkung, während inkompetente wie Tonsteine, Tonschiefer, Schluffsteine und Halite wegen ihrer duktilen Eigenschaft sich plastisch verformen und kleinere Störungen auszuheilen vermögen. Klüfte entstehen bei tektonischer Aktivität, an den Trennflächen durch unterschiedliche Sedimentation oder an Talhängen. Dabei folgt die Kluftentstehung einer Hauptrichtung und bildet kleinere Klüften quer dazu aus. Der dabei entstandene Hohlraum kann eine Querschnittsfläche von wenigen Zentimetern bis einigen Metern aufweisen. Für die Wasserleitfähigkeit ist zudem der Durchtrennungsgrad bestimmend, welcher angibt, ob die Trennflächen vollständig getrennt oder teilweise verbunden sind. Die entstandenen Hohlräume können sich mit Sedimenten füllen, sodass die Wasserleitung durch ein poröses Medium ähnlich zur Porenwasserleitung stattfindet. Anthropogene Einflüsse wie Bergbau oder Tunnelbau bewirken eine lokale Auflockerung und Druckentlastung der Gesteinsschicht und können zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit führen.

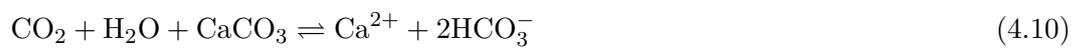
Karstwasserleiter

Karsthohlräume entstehen in wasserlöslichen Gesteinen wie Kalkgesteinen, Dolomitgesteinen oder Gips/Anhydrit. Aus wassergefüllten Klüften werden im Laufe der Zeit Volumina umgelöst und die Leitfähigkeit erhöht, wobei die Verteilung der Verklüftung maßgeblich für den Prozess ist und sehr unterschiedlich ausfallen kann. Sickerwasser nimmt aus der Luft im Boden Kohlendioxid auf, bildet Kohlensäure und löst z.B. im Karbonatgestein

Kalziumkarbonat.



Mit zunehmender Tiefe nimmt das Lösungsvermögen durch Pufferung ab, sodass eine Umlösung oberflächennah verstärkt stattfindet. In wassergesättigten Bereichen tritt eine Verkarstung durch Mischkorrosion auf, indem sich Wasser verschiedenen Härtegrades vermischt. Je höher die Anfangskonzentration an Kalk im Wasser, desto mehr Volumen wird umglöst, da der Prozess 4.10 umkehrbar ist.



5 Das k_d -Konzept

Die Ausbreitung von Radionukliden aus Halden und Lagern über den Wasserpfad wird im Folgenden durch ein System bestehend aus einer flüssigen und einer festen Phase modelliert. Die Anwesenheit einer flüssigen Phase in einem porösen Festkörper führt zu einer Mobilisierung von Radionukliden aus der festen Matrix. Die Aktivität teilt sich somit auf in einen im Wasser gelösten Teil und einen in der Feststoffmatrix sorbierten Teil.

$$A_{ges} = A_L + A_S \quad (5.1)$$

- A_{ges} Gesamtaktivität der Halde in Bq
 A_L Im Wasser gelöste Aktivität in Bq
 A_S In der Feststoffmatrix sorbierte Aktivität in Bq

Entsprechend gilt für die Konzentrationen:

$$C = nC_L + \rho C_S. \quad (5.2)$$

- C Volumenkonzentration in $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$
 C_L Konzentration in der wässrigen Phase in $\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}$
 C_S Konzentration in der Feststoffmatrix in $\frac{\text{Bq}}{\text{g}}$
 n Nutzporosität
 ρ Trockendichte der Feststoffmatrix $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

Für die Nuklidkonzentration in der Lösung folgt daraus mit dem k_d -Wert $k_d = \frac{C_S}{C_L}$

$$C_L = \frac{C}{n + \rho \frac{C_S}{C_L}} = \frac{C}{n + \rho k_d}. \quad (5.3)$$

Der k_d -Wert ist ein Verteilungskoeffizient mit der Einheit m^3/g und beschreibt nuklid- und systemabhängig die Sorptivmobilität relativ zu der Strömungsgeschwindigkeit unter den Annahmen, dass zwischen den Phasen stets chemisches Gleichgewicht herrscht und Sorptionsvorgänge reversibel sind.

$$k_d = \frac{\text{Aktivitätskonzentration im Feststoff}}{\text{Aktivitätskonzentration in Lösung}}$$

Realistisch betrachtet wird der Gleichgewichtszustand nie erreicht, da das System permanent gestört wird. Tochternuklide werden stetig nachgebildet und viele Parameter verändern sich im Laufe der Zeit und somit auch der Gleichgewichtszustand. Sorptionsprozesse sind nur dann reversibel, wenn ein sorbiertes Molekül unverändert bleibt. Dies ist der Fall bei schwachen Bindungen durch van-der-Waals- oder Dipolwechselwirkungen. Bei einer solchen Physiosorption sind Moleküle relativ schwach mit kleinen Bindungsenergien gebunden. Sind die Bindungen hingegen chemischer Natur, d.h. kovalenter oder ionischer Art, so können irreversible Molekülveränderungen auftreten. Die Bindungen der Chemosorption sind stabiler und zeichnen sich durch längere Reaktionszeiten aus. Beide Prozesse treten gemeinsam auf, welcher den dominanten Part übernimmt, hängt von Reaktionsbedingungen in der Umgebung und den Reaktionspartnern ab.

5.1 k_d -Wert bestimmende Einflussfaktoren

Ein k_d -Wert ist keine nuklidspezifische Konstante, sondern ist von dem chemischen Milieu, den thermodynamischen Randbedingungen und den das System charakterisierenden Größen abhängig.

Redoxverhalten

Die Löslichkeit vieler Elemente ist abhängig von der Oxidationsstufe, so ist z.B. U(IV) schwer löslich und U(VI) gut löslich. Die in Böden ablaufenden Redoxreaktionen sind abhängig von den Verfügbarkeiten der typisch enthaltenden Oxidationsmittel O_2 , NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} und Reduktionsmitteln H_2S , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} und FeS_2 . Das Sorptionsvermögen eines Bodens und der damit verbundene Nuklidtransport wird von solchen Reaktionen beeinflusst, z.B. bewirkt eine Reduktion von Fe^{3+} zu Fe^{2+} bei sinkendem pH-Wert eine Verminderung der Sorptionsvermögens und Abgabe der an Fe^{3+} -Hydroxiden sorbierten Nuklide an das Wasser. In Abbildung 5.1 ist das Eh-pH Diagramm von Eisen dargestellt, die gestrichelten Linien repräsentieren den Stabilitätsbereich von Wasser. Der Transport von Nukliden wie Ra^{2+} , welches nur zweiwertig vorkommt, kann indirekt durch chemische Reaktion mit Molekülen und deren Redoxverhalten beeinflusst werden. Das Redoxpotential im Grundwasser wird durch Infiltration beeinflusst und führt zu Veränderungen der Nuklidtransportgeschwindigkeiten.

pH-Wert

Ob eine Auflösung oder Ausfällung vorliegt, ist häufig vom pH-Wert abhängig. Insbesondere für Metalle, welche einen erheblichen Anteil eines Abfallinventars ausmachen können,

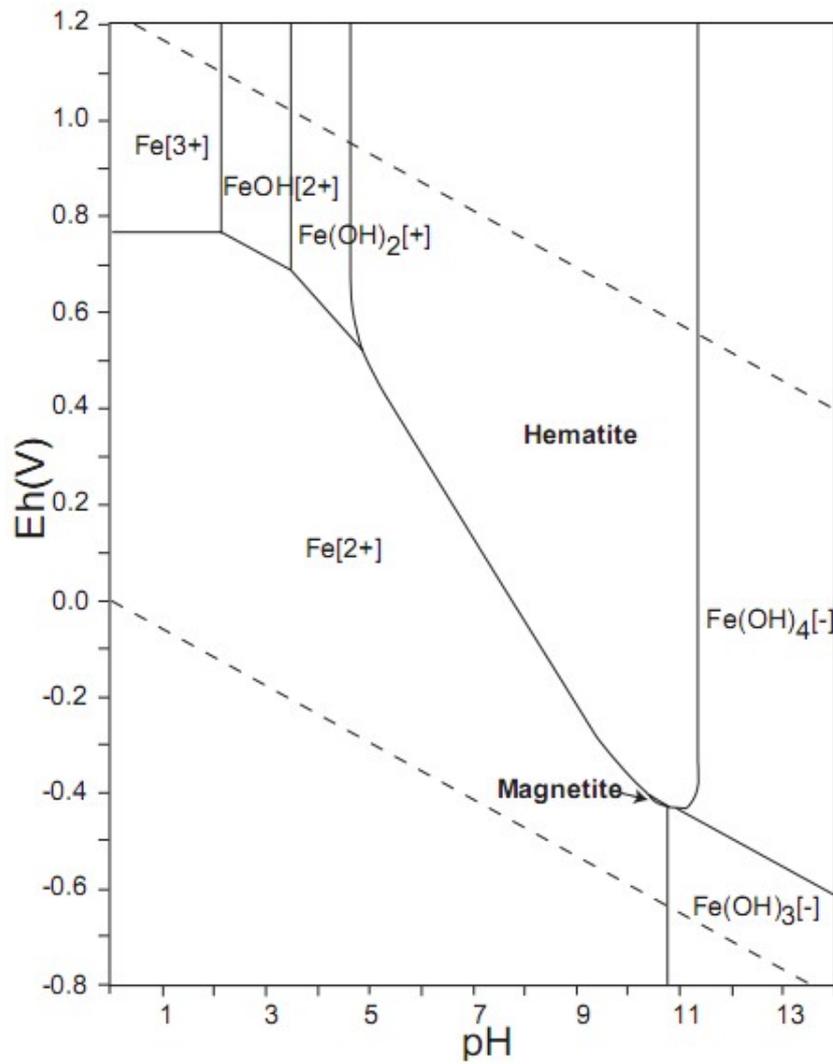


Abbildung 5.1: Eh-pH-Diagramm für Fe-Spezies bei Standardbedingungen im thermodynamischen Gleichgewicht [Nat05]

gilt diese Abhängigkeit. Während im basischen Bereich eine Ausfällung stattfindet, werden im sauren Milieu die in metallischer Form vorliegenden Nuklide als freie Kationen mobilisiert. Für den Verteilungskoeffizienten bedeutet dies für einige Elemente eine starke Kopplung an den pH-Wert. Im Gegensatz dazu finden sich Ionen wie Na^+ und Cl^- , deren Löslichkeiten nahezu unabhängig vom pH-Wert sind. In A.7 ist eine Tabelle zu der Abhängigkeit des k_d -Wertes von U(VI) zu finden, die in Abbildung 5.2 graphisch dargestellt ist. Deutlich zu erkennen ist die Schwankung über mehrere Zehnerpotenzen, die zu einer entsprechend großen Variabilität in der Dosisbestimmung führt.

Sorptionskonkurrenz

Das Rückhaltevermögen eines Bodens bezüglich Radionukliden ist durch seine spezifischen Oberflächensorptionsplätze pro Volumenelement begrenzt. Bei mehreren gelösten Stoffen im Sickerwasser tritt eine Sorptivkonkurrenz um die freien Plätze auf. Ist ein gering adsorbierbares Molekül in hinreichend hoher Konzentration vorhanden, kann es so viele Plätze belegen, dass andere Sorptive kaum eine Transportverzögerung im durchströmten Medium erfahren. Somit kann der k_d -Wert eines bestimmten Nuklides und damit auch die zugehörige effektive Transportgeschwindigkeit in Anwesenheit anderer gelöster Nuklide schwanken. Besondere Konkurrenz herrscht bei sich chemisch ähnlich verhaltenden Elementen und vergleichbaren Ionengrößen. Beispielsweise beeinflusst die Anwesenheit von Mg oder Ca die Sorption von Sr.

Sättigungsgrad

Der Grad der Wassersättigung des Bodens nimmt Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit von Radionukliden, indem in heterogenen, ungesättigten Böden Teile hydrologisch unwirksam werden. Bei einem heterogenen Bodentyp mit erhöhtem Tonanteil findet die Wasserleitung dann durch die feinen Poren statt und größere laufen trocken. Dies bewirkt durch das Sorptionsvermögen im Ton einen Anstieg des k_d -Wertes, während im umgekehrten Fall in einem Boden mit geringem Tonanteil ein Abfall des k_d -Wertes zu erwarten ist.

Kiesfraktion

Die Kornverteilung eines porösen Mediums übt Einfluss auf die mittlere Fließgeschwindigkeit aus. Größere Partikel müssen umflossen werden und der Wassertransport wird lokal verzögert. Zugleich verfügt Kies über eine geringe Oberfläche pro Volumenelement und über ein geringes Sorptionsvermögen. Nach [DIN87] zählen Partikel ab 2,0 mm Korngröße zum Kies und gehören zum Skelettanteil eines Bodens. Zwischen den Skelettteilen werden Hohlräume mit feineren Partikeln wie Sand aufgefüllt. Der Skelettanteil beeinflusst die Transportgeschwindigkeit insbesondere durch die resultierende Inhomogenität, die sich im ungesättigten Boden besonders auswirkt.

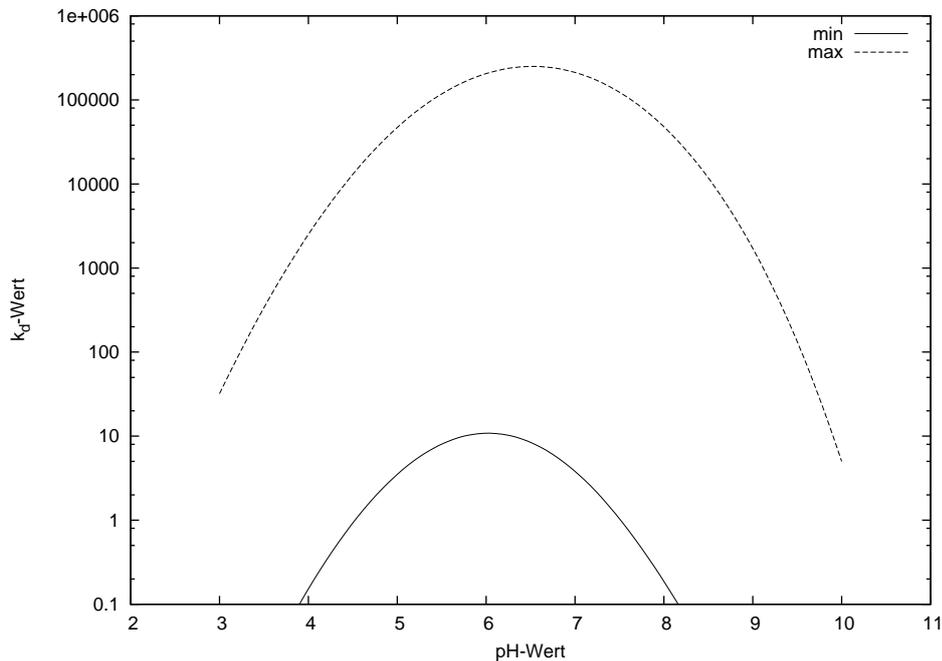


Abbildung 5.2: Abhängigkeit des U(VI)- k_d -Wertes vom pH-Wert. Dargestellt sind die kleinsten und größten ermittelten Werte aus [US199].

Oberflächenladung

Die spezifische Oberflächenladung pro Volumenelement ist maßgeblich für das Vermögen, Ionen aus der aquatischen Phase anzulagern. Dabei sind Parameter wie z.B. der pH-Wert ausschlaggebend in welchem Umfang dies geschieht. Somit ist die Oberflächenladung eine dynamische Größe, die auch durch die Sorption von Molekülen verändert wird. In Tonmineralien führt eine hohe Oberflächenladung zu repulsiven Kräften zwischen einzelnen Partikeln und kann die Barrierewirkung beeinträchtigen.

Ionenstärke

Gelöste Ionen wechselwirken auf Grund ihrer Ladung miteinander. Kationen und Anionen erfahren attraktive Kräfte und die Gesamtwirkung aller Ionen lässt sich durch die Ionenstärke ausdrücken. Um die einzelnen Ionen bilden sich Ionenatmosphären, die mit steigender Ionenstärke größere Ladungen beinhalten. Hierdurch wird die Anziehungskraft durch Abschirmung verringert.

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2 \quad (5.4)$$

C Konzentration in mol/l
 Z Ladungszahl

Der Gleichgewichtszustand verschiebt sich auf diese Weise, und im Massenwirkungsgesetz werden Konzentrationen durch chemische Aktivitäten ersetzt.

$$K = \frac{A_C A_D}{A_A A_B} = \frac{[C]^c \gamma_C^c [D]^d \gamma_D^d}{[A]^a \gamma_A^a [B]^b \gamma_B^b} \quad (5.5)$$

γ Aktivitätskoeffizient
 A Aktivität in mol/l

Bei Anwendung des k_d -Konzeptes bedeutet dies bei hohen Ionenstärken eine tendenzielle Überschätzung des Sorptionsvermögens, insbesondere kann der Salzgehalt im Wasser bei untertägigen Lagern durch Umlösung bedeutende Veränderungen bewirken.

Kolloide

Kolloide sind Partikel mit einem Durchmesser bis zu einigen μm Durchmesser. Dabei handelt es sich um Moleküle, organische Bestandteile wie Mikroorganismen oder mineralische Partikel. Diese können mit dem Wasser durch entsprechend große Poren wandern ohne dabei gelöst zu sein. Radionuklide erfahren einen beschleunigten Transport, wenn sie an Kolloide gebunden sind und als Folge kann die tatsächliche Mobilität, abhängig von den Eigenschaften der verfügbaren Kolloide, höher sein als (ohne Berücksichtigung der Kolloide) eingeschätzt. Die Geschwindigkeit der Kolloide kann dabei höher als die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers sein, da Kolloide wegen ihrer Größe durch größere Poren wandern. Bei Laborexperimenten wird die flüssige Phase oft abfiltriert und damit auch die Kolloidpartikel, sodass der k_d -Wert überschätzt wird. Für eine deutliche Veränderung der Transportbedingung von Radionukliden müssen Kolloide in ausreichender Anzahl verfügbar sein und so beschaffen sein, dass Radionuklide zur Sorption an deren Oberflächen neigen.

Mikroorganismen und organische Bestandteile

Im Boden leben verschiedene Mikroorganismen, die im ständigen Stoffaustausch mit der Umgebung stehen. Solche Organismen bilden Mineralbestandteile mit ihrem Stoffwechsel um und sind in organischen Bestandteilen einer Deponie enthalten. Zu den Organismen zählen Bakterien, die zu Gasbildung und Wärmeproduktion beitragen können. Bei Beregnung der Deponie wird ein Teil der Population ausgewaschen und in den Boden transportiert. Die Oberfläche der Bakterien bietet zusätzliche Sorptionsplätze für Kationen, da

sie, abhängig vom pH-Wert, negativ geladen sein kann. Eine Ansiedlung der Mikroorganismen an Mineraloberflächen führt zu Mineralumbildung und Sorptivkonkurrenz. Direkt und indirekt wird dadurch der Transport von Radionukliden beeinflusst. [Ham03]

5.2 Experimentelle Bestimmung

Messtechnisch lässt sich ein k_d -Wert im Labor über Schüttel- oder Durchflussversuche ermitteln oder durch In-Situ-Messungen an Bodenproben bestimmen.

Schüttelversuche

Eine Möglichkeit zur experimentellen Ermittlung bieten Schüttelversuche, bei denen ein bestimmter Boden im trockenen Zustand in ein geschlossenes Gefäß gegeben wird und mit einer angesetzten Lösung des zu untersuchenden Nuklides bewässert wird. Das Behältnis wird geschüttelt, sodass sich eine homogene Verteilung der Lösung in dem Boden einstellt. Die Versuchsdauer ist abhängig vom stoffspezifischen Gleichgewichtszustand und nach Abtrennung des Wassers durch Filtration oder Zentrifugieren lässt sich aus der neuen Konzentration ein Verteilungskoeffizient ermitteln.

$$k_d = V_W \frac{C_0 - C}{C M_{\text{Bod}}} e^{-\lambda t} \quad (5.6)$$

V_W	Zugegebene Menge an Wasser in m^3
C_0	Ausgangskonzentration in der Lösung in $\frac{\text{Bq}}{\text{g}}$
C	Konzentration in der abgetrennten Lösung in $\frac{\text{Bq}}{\text{g}}$
M_{Bod}	Trockenmasse des Bodens in g
t	Versuchsdauer in s
λ	Zerfallskonstante in s^{-1}

Der Vorteil von Schüttelversuchen ist die einfache Durchführbarkeit, allerdings liefern sie Ergebnisse mit lediglich kleinen Gültigkeitsbereichen und sind nur eingeschränkt auf reale Gegebenheiten übertragbar. Durch das Schütteln besteht der größtmögliche Kontakt zu allen Oberflächenbestandteilen des Bodens, was zu einer Überschätzung des Sorptionsverhaltens und damit zur einer Unterschätzung der Dosis führt. Neben Mess- und Auswertungsfehlern führt das gesamte Spektrum der Einflussfaktoren zu einer großen Schwankung der Messwerte.

Durchflussversuche

Bei Durchflussversuchen wird eine Säule mit dem zu untersuchenden Medium gefüllt und der Retardierungsfaktor R , welcher ein Maß für die Verlangsamung des Nuklidtransportes ist, experimentell bestimmt. Eine Lösung wird auf die Säule gegeben und nacheinander kleinere Volumina in verschiedenen Behältnissen aufgefangen. Aus der Zuordnung von

Zeit und Konzentration der Abgabe lässt sich eine Transportgeschwindigkeit für das zu untersuchende Nuklid ermitteln.

$$v_N = R \cdot v_W = \frac{v_W}{1 + \frac{\rho k_d}{n}} \quad (5.7)$$

$$k_d = (R - 1) \frac{n}{\rho} \quad (5.8)$$

v_W	Sickergeschwindigkeit des Wassers $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
v_N	Sickergeschwindigkeit des Nuklides $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
R	Retardierungsfaktor
ρ	Trockendichte des Bodens in $\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$
n	Nutzporosität

Der Vorteil bei Säulenversuchen ist die Möglichkeit, k_d -Werte für ungesättigten Böden zu ermitteln, hierfür muss in 5.8 die Nutzporosität n durch den volumetrischen Wassergehalt ersetzt werden. Außerdem kann untersucht werden, ob in der Lösung verschiedene Verbindungen und Komplexe vorliegen, indem zunächst die Aktivitätskonzentration in den Durchflussvolumina bestimmt wird und anschließend die Verbindungen, zu denen ein jeweiliger k_d -Wert bestimmt werden kann. Nachteilig gegenüber Schüttelversuchen ist, dass hier Unsicherheiten des k_d -Wertes entstehen, da jener nicht direkt gemessen wird, sondern über die Geschwindigkeit bestimmt wird. Neben des größeren Aufwandes beim Versuchsaufbau und der Analyse der Volumina steigt der Zeitaufwand zudem mit dem k_d -Wert. Eine Übertragbarkeit auf reale Bedingungen ist wie bei Schüttelversuchen nicht trivial, so wird z. B. ein Boden vor der Verwendung in der Säule homogenisiert, was ebenfalls zu einer Überschätzung des Sorptionsvermögens führt, da Bodenbestandteile wie Tonminerale normalerweise heterogen verteilt sind und solche im Versuch bestmöglich umströmt werden.

In-Situ-Messungen

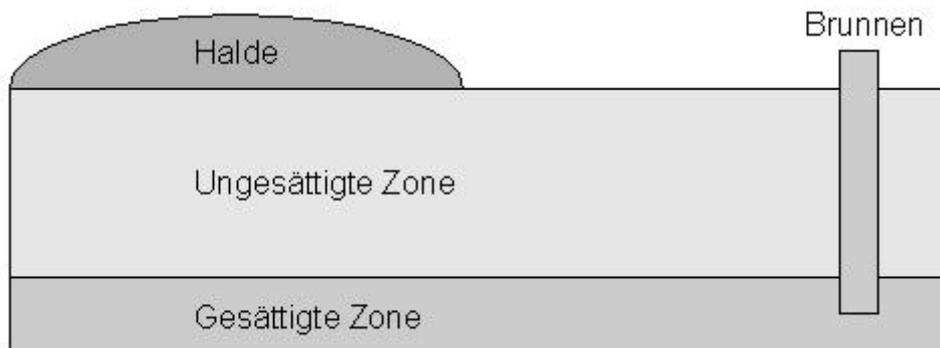
Bei In-Situ-Messungen werden Bodenproben an einem bestimmten Ort entnommen und enthaltenes Wasser durch Filtration oder Zentrifugieren abgetrennt. Aus den Konzentrationen in Boden und Wasser lässt sich ein k_d -Wert für einen Stoff, der im Boden enthalten ist, errechnen. Diese Methode befriedigt mehrere Realismusforderungen an die Randbedingungen und kann standortspezifisch für den gemessenen Stoff und untersuchten Boden relativ genaue k_d -Werte liefern. Der Nachteil dieser Methode ist der Aufwand in der Probenanalyse und, bei geringen Konzentrationen unter der Nachweisgrenze, der messtechnische Aspekt.

6 Haldenmodell

6.1 Lagerung von Nukliden auf Halden

Eine oberirdische Lagerung von Radionukliden erfolgt in diesem Modell auf einer Halde, die gemäß der Deponieverordnung [Bun02] in Deponieklasse III eingestuft wurde. Diese besitzt zunächst wirksame Oberflächen- und Basisabdichtungen, denen ein Versagen nach einer bestimmten Zeit unterstellt wird. Eine Umzäunung des Geländes verhindert die Zugänglichkeit für alle Zeiten, sodass für eine spätere Dosisbestimmung Aktivitäten von Privatpersonen auf der Halde ausgeschlossen werden können. Dadurch ist eine Dosis durch Direktinhalation von Boden ausgeschlossen, was bei einer homogenen Verteilung zu hypothetischen hohen Dosen führen kann. Der Betrachtungszeitraum umfasst 10000 Jahre, angelehnt an den Nachweiszeitraum in [SSK88]. Für größere Zeiträume wird die Annahmen mit immer größeren Unsicherheiten behaftet. Die Integrität der Halde kann über große Zeiträume nicht gewährleistet werden, da der Haldenkörper Erosionsprozessen und klimatologischen Veränderungen, wie z.B. Eiszeiten oder globaler Erwärmung, ausgesetzt ist. So endete die letzte Eiszeit vor etwa 10000 Jahren. Der Modellhalde wird unterstellt, dass sich Umgebungsparameter über diesen Zeitraum nicht verändern.

6.2 Eigenschaften der Haldenkompartimente



Haldenkörper

Das Nuklidinventar aus Tabelle A.9 ist Bestandteil einer homogenen Feststoffmatrix. Dieses wird durch sickern des Regenwasser ausgewaschen, wobei die Aktivitätskonzentrationen im Sickerwasser durch den k_d -Ansatz bestimmt werden. Darüber hinaus wird angenommen, dass jedes Element ohne gegenseitige Konkurrenz gemäß des k_d -Konzeptes mobili-

siert wird. Für einen Modellvergleich der Lagerungsmöglichkeiten wird ein Haldenvolumen analog zum unterirdischen Volumen von $2,2 \text{ E} + 06 \text{ m}^3$ angenommen. Dies führt bei einer quaderförmigen Geometrie zu einer Lagerungshöhe von 220 m, welches bei einem Haldenwachstum von 8 m/a nach Tabelle 6.1 einer Betriebszeit von 27,5 Jahren entspricht.

Haldenabdichtung

Eine Deponie der Klasse III ist durch Multibarrierenkonzepte zunächst wasserundurchlässig. Während der Barrierewirksamkeit der Basisabdichtung sind die Nuklide immobil und werden auch bei vorausgegangenem Versagen der Oberflächenabdichtung nicht ausgewaschen. Der Basis wird ein plötzliches Versagen unterstellt, welche ab einem bestimmten Zeitpunkt völlig wasserdurchlässig ist. Für Dosismodellierung dieser Arbeit wird ein frühes Totalversagen der Barrieren nach 50 Jahren unterstellt um den Dosisbeitrag kurzlebiger Radionuklide nicht zu unterschätzen.

Ungesättigte Zone

An die Basisabdichtung schließt sich eine homogene ungesättigte Zone aus einer Lockergesteinsschicht an. Der Grundwasserflurabstand ist regional und temporal eine veränderliche Größe, in dem Modell wird von einer konstanten Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht von 30 m ausgegangen. Die Schicht wird in 1 m breite Zellen unterteilt, sodass iterativ die Aktivitätskonzentration jeder Zelle bestimmt wird.

$$A_{\text{Zelle}}(y,t) = A_{\text{Migration}} - A_{\text{Zerfall}} - A_{\text{Washout}} \quad (6.1)$$

$$A_{\text{Migration}} = A_{\text{Migration,Nuklid}} + A_{\text{Migration,Nachproduktion}} \quad (6.2)$$

$$= \frac{A_{\text{Zelle}}(y - v_N \tau, t - \tau) Q_W}{n + \rho k_d} e^{-\lambda \tau} + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{N-1} \left[\prod_{k=1}^{j-1} \lambda_{k,p} \lambda_N A_{j,p}(x - v_n, t - \tau) \sum_{l=1}^j \frac{e^{-\lambda_{l,p} t}}{\prod_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^j (\lambda_{m,p} - \lambda_{l,p})} \right] \cdot \frac{Q_W}{V_{\text{Zelle}}(n + \rho k_d)} \quad (6.3)$$

$$A_{\text{Zerfall}} = A(y,t) \cdot e^{-\lambda \tau} \quad (6.4)$$

$$A_{\text{Washout}} = \frac{A(y,t) Q_W}{V_{\text{Zelle}}(n + \rho k_d)} \quad (6.5)$$

Die Nuklide erfahren dabei eine Retardierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit.

A_{Zelle}	Aktivität innerhalb einer Zelle in Bq
$A_{\text{Migration}}$	Zumigrierte Aktivität in Bq
$A_{\text{Migration,Nachproduktion}}$	Zumigrierte Aktivität aus Nachbildung in Bq, siehe Gl. 2.16
A_{Zerfall}	Zerfall innerhalb einer Zelle in Bq
A_{Washout}	NuklidAuswaschung einer Zelle in Bq
Q_{W}	Wasserdurchflussmenge pro Zeitintervall in $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
V_{Zelle}	Zellenvolumen in m^3

$$v_{\text{N}} = \frac{v_{\text{W}}}{1 + \frac{\rho k_{\text{d}}}{n}} \quad (6.6)$$

v_{W}	Fließgeschwindigkeit des Wassers m/s
v_{N}	Migrationsgeschwindigkeit eines Nulides in m/s
ρ	Dichte des porösen Mediums g/m^3
n	Nutzporosität

Die Sickergeschwindigkeit des Wassers abhängig von der Beschaffenheit des Lockergesteines. In Tabelle A.10 ist eine Übersicht der k_f -Werte dargestellt. Im Folgenden bezeichnet Ton, Sand und Lehm reinen Ton-, Sand-, und Lehmboden. Für das Haldenmodell wird ein gesättigter Zustand ohne Staunässe angenommen, sodass gerade die Wassermenge aus der Berechnungsrate zur Verfügung steht.

$$v_{\text{Si}} = \frac{Q_{\text{Si}} F_{\text{H}}}{n_{\text{Bod}} F_{\text{H}}} = \frac{0,8 \cdot 10000}{0,1} = 8 \frac{\text{m}}{\text{a}} \quad (6.7)$$

v_{Si}	Sickergeschwindigkeit des Wassers m/s
Q_{Si}	Niederschlagshöhe in m
F_{H}	Haldengrundfläche m^2
n_{Bod}	Porosität der Lockergesteinsschicht

Gesättigte Zone

Die Infiltration von kontaminierten Sickerwasser in Aquiferen und anschließender Wasserkonsum einer Person führt zu einer Dosis, die insbesondere von dem aus der Mächtigkeit resultierenden Verdünnungsfaktor bestimmt wird. Nach den Parametern von [BfS95] wird das Sickerwasser mit

$$n_{\text{GWL}} \cdot y_{\text{GWL}} \cdot v_{\text{W,GWL}} = 730 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \quad (6.8)$$

verdünnt. Eine Größendefinition erfolgt in Tabelle 6.1. Zudem findet eine Transportverzögerung statt, die geringer als in dem Lockergestein der ungesättigten Zone ausfällt.

$$C_{\text{Br}} = C_{\text{GWL}}(x = 500) = C_{\text{GWL}}(x = 0)e^{-\lambda \frac{x}{v_n}} \quad (6.9)$$

C_{GWL}	Nuklidkonzentration einer Zelle in Bq/m ³
C_{Br}	Nuklidkonzentration im Brunnenwasser in Bq/m ³
v_{N}	Migrationsgeschwindigkeit eines Nulides in in m/s

Tabelle 6.1: Haldenparameter

Parameter	Bezeichnung	Wert	Einheit
Dichte des Grundwasserleiters	ρ_{GWL}	2E+6	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$
Porosität des GWL	n_{GWL}	0,4	
Entfernung Halde, Brunnen	X	500	m
Vertikale Mächtigkeit des GWL	y_{GWL}	5	m
Fließgeschwindigkeit im GWL	$v_{\text{W,GWL}}$	1	$\frac{\text{m}}{\text{d}}$
Niederschlagshöhe	Q_{Si}	0,8	$\frac{\text{m}}{\text{a}}$
Sickerwasseranteil	f_{Si}	1	
Sickergeschwindigkeit	v_{Si} 8	m/a	
Haldengrundfläche	F_{H}	10000	m ³
Haldendichte	ρ_{H}	0,5E+6	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$
Porosität der Halde	n_{H}	0,2	
Haldenwachstum	v_{H}	8	$\frac{\text{m}}{\text{a}}$
Dichte der Lockergesteinsschicht	ρ_{Bod}	1,5E+06	$\frac{\text{g}}{\text{m}^3}$
Porosität der Lockergesteinsschicht	n_{Bod}	0,1	
Vertikale Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht	y_{Bod}	30	m

Haldenvergleich

In Tabelle 6.2 sind zum Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten hypothetischen Halde aus [BfS95] reale Halden aufgeführt. Die Modellhalde mit 10000 m² Grundfläche ist

verhältnismäßig klein und repräsentiert eher eine Mülldeponie als eine großflächige Abraumhalde.

Tabelle 6.2: Dimension verschiedener Halden

Halde	Grundfläche	Höhe	Betriebszeit	Quelle
Brinkforts Heide	1,24E+6 m ²	120 m	60 a	[Hoh09]
Modell BfS	1,00E+4 m ²	160 m	20 a	[BfS95]
Monte Kali (Heringen)	0,82E+6 m ²	250 m	35 a (laufend)	[Wer10]

6.3 Berechnete Dosen

Im Anhang sind Dosisberechnungen mit k_d -Werten für Sand, Lehm, Ton und organische Böden aus [Sys06] für die einzelnen Zerfallsreihen und Nuklide grafisch dargestellt, sowie für die ohne angegebenen Gültigkeitsbereiche k_d -Werte aus [BfS95]. Dabei ist die zugeführte Dosis in Abhängigkeit von der Zeit für einen mit Säuglingsmilchnahrung ernährten Säugling und einen Erwachsenen dargestellt, da diese Altersgruppen die höchste bzw. niedrigste Dosis erhalten. Die Berechnungsgrundlage für die Dosisbestimmung ist in Kapitel 9 zu finden.

Exemplarisch ist in Abbildung 6.1 eine Dosisbestimmung für den Säugling mit k_d -Werten aus [BfS95] und den Parametern aus Tabelle 6.1 dargestellt, sowie eine Berechnung für eine Tonschicht mit k_d -Werten aus [Sys06] in Abbildung 6.2.

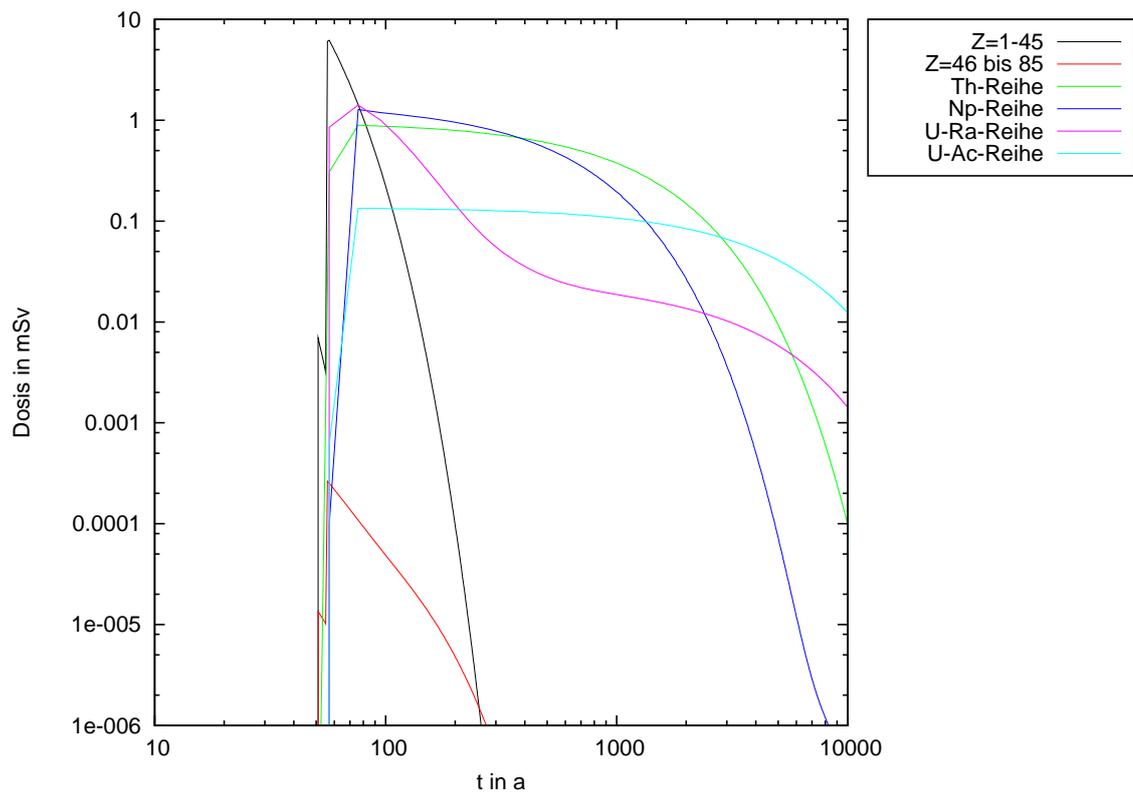


Abbildung 6.1: Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen mit den k_d -Werten nach [BfS95].

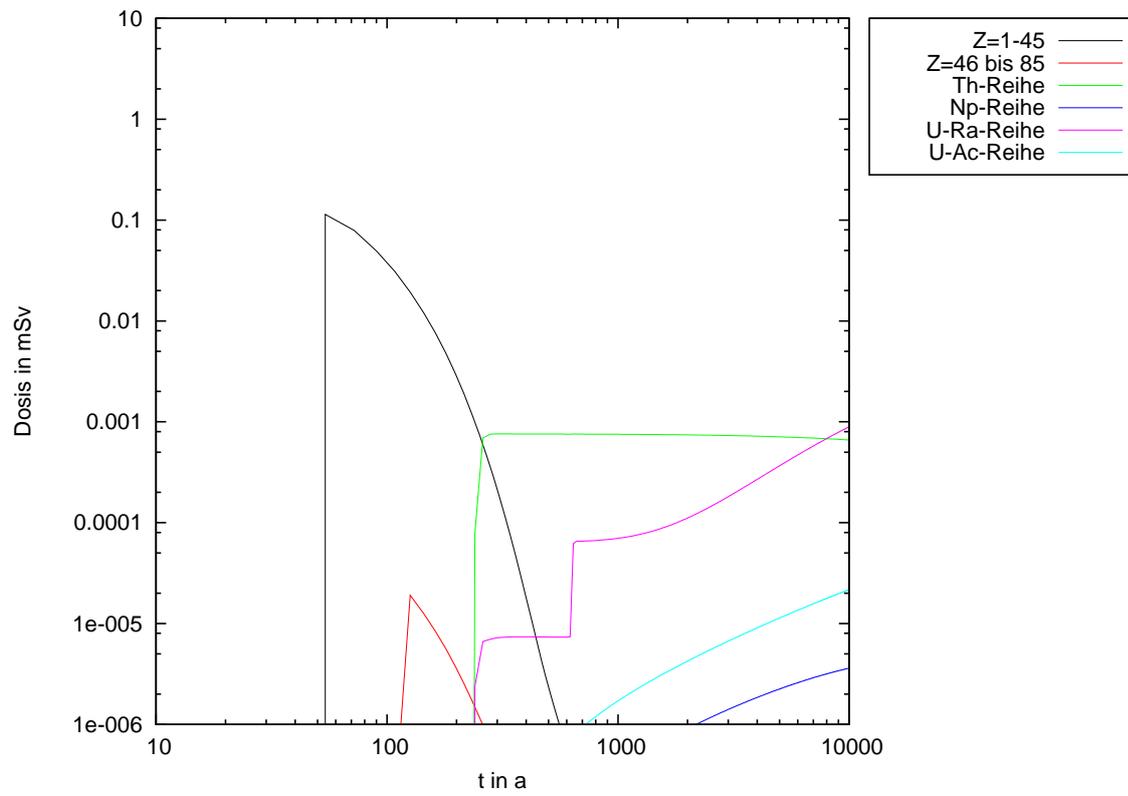


Abbildung 6.2: Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen mit den k_d -Werten für Ton aus Tabelle A.6.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Einer Dosis von bis zu 10 mSv/a liegt über dem zulässigen Grenzwert der Strahlenschutzverordnung [Bun01]. Das Ergebnis ist die Folge einer hypothetischen Annahme, dass das Inventar der Schachanlage Asse II auf einer Halde homogen verteilt ist. Dies ist zwar ein unrealistisches Szenario, erlaubt aber einen direkten Vergleich mit dem Modell Radionuklide untertägig zu lagern. Zu erkennen ist außerdem, dass die Einhaltung des Grenzwertes von 1 mSv/a bereits nach etwa 100 Jahren erfolgt. Wenn die Basisabdichtung erst ab diesem Zeitpunkt versagt, wird die Migration hinreichend herausgezögert, sodass die kurzlebigen anfangs dosisbestimmenden Nuklide bis zu dahin zerfallen sind.

Eine geringere potentielle Dosis, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, ist das Ergebnis bei gleichen Haldenparametern und k_d -Werten für Ton nach [Sys06]. Zu Berücksichtigen ist, dass nur für die Nuklide U, Th, Ra, Po, Pb und Ac k_d -Werte angegeben sind. Im Vergleich unterschiedlicher Lockgesteine sind die berechneten Dosen für eine Nuklidmigration durch eine Tonschicht am geringsten, was das gute Sorptionsvermögen von Tonmineralen wiedergibt.

An dem zeitlichen Verlauf der Dosis ist erkennbar, dass eine Barrierewirksamkeit von mehr als 50 Jahren die Strahlenexposition durch Radionuklide kleiner Ordnungszahlen deutlich vermindern würde.

7 Untertägiges Modell

7.1 Lagerung von Nukliden in untertägigen Lagern

Für die Lagerung von Radionukliden unter Tage wird ein Modell entworfen, für welches ein Störfall durch Absaufen angenommen wird. Dabei wird der Transport durch eine geologische Störung in Richtung Erdoberfläche betrachtet, die in einem Vorfluter mündet. Eine sich selbstversorgende Referenzperson bezieht aus einem Brunnen Wasser aus dem Vorfluter und erhält über diesen Expositions-pfad eine Dosis.

7.2 Eigenschaften der Lagerkompartimente

Ein unterirdisches End- oder Zwischenlager lässt sich in mehrere Kompartimente zerlegen.

- Lager
- Wirtsgestein
- Geologische Störungen
- Vorfluter

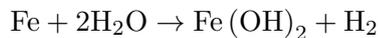
Vor dem Einbringen von radioaktivem Abfall in untertägige Lager wird dieser konditioniert und in geeignete Behälter verpackt. Diese werden in verschiedenen Hohlräumen, Kammern oder Kavernen aufrecht stehend, liegend oder locker geschüttet gelagert. Für das Modell wird das Lager als homogen angenommen, in dem das Asse-Inventar A.9 über ein Volumen von $1,3E+6 \text{ m}^3$ verteilt ist.

Als Wirtsgestein wird Salz verwendet, sodass bei Wasserzutritt Umlösung stattfindet und das Lagervolumen um $0,9E+6 \text{ m}^3$ auf $2,2E+6 \text{ m}^3$ vergrößert wird. Dabei säuft das gesamte Lager ab und wird vollständig mit Wasser gesättigt. Für den Zeitpunkt, ab dem der Radionuklidtransport einsetzt, spielen Parameter wie Versagen des Behälters und Freisetzung im Nahfeld, Zeitpunkt des Absaufens und Gebirgskonvergenz eine Rolle. Als Lagerdichte wird ein Wert von $0,5E+6 \text{ g/m}^3$ mit einer Nutzporosität von 0,2 verwendet. Für das Modell wird vereinfacht angenommen, dass ab einem gewissen Zeitpunkt alle Nuklide mobilisierbar sind und gemäß des k_d -Konzeptes ein Teil des Inventars gelöst vorliegt. Die Durchlässigkeit des Wirtsgesteines ist zu vernachlässigen, sodass alleiniger Transport durch geologische Störungen möglich ist. Für den Wasserzutritt wird ein ein Volumenstrom von $10000 \text{ m}^3/\text{a}$ angenommen.

Mit geologischen Störungen entstehen potentiell wasserleitende Systeme, durch welche ein Lager absaufen kann. Sind Nuklide in der flüssigen Phase gelöst, können diese durch verschiedene Mechanismen in Richtung Oberfläche transportiert werden.

- Hydrostatisch
- Auspressung durch Gebirgskonvergenz
- Auspressung durch Gasbildung

Gasbildung erfolgt vor allem durch korrosive Prozesse an Metallen und mikrobiologisch aus organischen Bestandteilen. Aus Eisenmetallen und Stahl entsteht Wasserstoff, während aus dem organischen Anteilen Methan entsteht.



Jede Tonne Eisen führt also zu einer Produktion von

$$\frac{1\text{E} + 6\text{ g}}{55,58 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1,8\text{E} + 5\text{ mol}$$

Wasserstoff und einem Gasvolumen unter Normalbedingungen von etwa 4000 m³. Das Gasvolumen in einer Kammer kann durch Wasserzutritt stark reduziert werden, sodass ab einem kritischen Punkt der Gasdruck das Wasser auspresst. [Kru09]

Die Störung selbst wird dabei als homogen mit einem effektiven Porenanteil von 0,075 und einer Dichte von 1,3E+6 g/m³ betrachtet und hat eine Querschnittsfläche von 10000 m². Für die Berechnung wird eine Unterteilung in Volumensegmente von 1 m Breite in Ausbreitungsrichtung und senkrecht zur Querschnittsfläche vorgenommen, in denen das Wasser und die Nuklide unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten besitzen. Die Nuklidwanderungsgeschwindigkeit wird dabei um einen nuklid- und gesteinschichspezifischen Faktor retardiert. Für jedes Nuklid wird für jeden Iterationsschritt die Konzentration in den Zellen analog zu dem Haldenmodell berechnet. Die geologische Störung mündet in einem Vorfluter und das kontaminierte Wasser wird entsprechend der Strömung des Vorfluters verdünnt. Eine Referenzperson entnimmt Wasser aus einem Brunnen und die daraus resultierende Dosis wird modelliert. Für Trinkwasserqualität wird eine instantane Verdünnung mit einem Verdünnungsfaktor des Vorfluters von 1100 angenommen.

7.3 Berechnete Dosen

Als repräsentative Altersklasse wird ein Säugling bis zu einem Alter von 1 a gewählt, welcher mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, da dieser die höchsten errechneten Dosen

Tabelle 7.1: Parameter bei untertägiger Lagerung

Parameter	Bezeichnung	Wert	Einheit
Dichte der geologischen Störung	ρ_{St}	1,3E+6	$\frac{g}{m^3}$
Porosität der Störung	n	0,075	
Länge der Störung	X	500	m
Querschnittsfläche der Störung	F_{Quer}	100	m^2
Quellstärke des Wasserzutrittes	Q_W	200	$\frac{m^3}{d}$
Dichte des Lagers	ρ_L	0,5E+06	$\frac{g}{m^3}$
Lagervolumen vor Wasserzutritt	V_L	1,3E+06	m^3
Lagervolumen nach Umlösung	\check{V}_L	2,2E+06	m^3
Beginn Umlösung	t_{Uml}	20	a
Ende Umlösung	t_{Uml}	50	a
Beginn Auspressung	t_{Aus}	50	a
Ende Auspressung	t_{Aus}	10000	a
Referenzdatum		1.1.1980	
Verdünnungsfaktor	f_{Verd}	1100	
ließgeschwindigkeit in der Störung	$v_{W,St}$	1	$\frac{m}{d}$

erhält. In Abbildung 7.1 und 7.2 ist der zeitliche Verlauf der Dosis, sortiert nach Zerfallsreihe und Ordnungszahl, mit den in Tabelle 7.1 verwendeten Randbedingungen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Dosis dem Zerfall der Radionuklide folgt und dabei von Leitnukliden dominiert wird. Der stufenweise Anstieg der Dosis innerhalb einer Zerfallsreihe liegt darin begründet, dass die Nuklide unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten besitzen und deshalb zu unterschiedlichen Zeiten im Brunnenwasser vorliegen. Eine Aufschlüsselung nach einzelnen Nukliden, k_d -Werten und Altersgruppen ist im Anhang zu finden. Abbildung 7.2 zeigt eine Dosisberechnung für den Transport durch Muschelkalk, eine im Höhenzug der Asse vorkommende Gesteinsschicht.

7.4 Diskussion der Ergebnisse

Eine maximale zusätzliche jährliche Dosis von 1 mSv entspricht exakt dem in [Bun01] festgelegten Grenzwert nach § 46 Abs. 1 für den Schutz von Einzelpersonen der Bevölkerung. Die Berechnungen mit den in der Tabelle 7.1 verwendeten Parametern führen zu Dosen in dieser Größenordnung. Das verwendete Modell eines Lagers ist dabei von konservativer Art, denn eine Annahme, dass radioaktiver Abfall homogen über eine Feststoffmatrix verteilt ist, widerspricht der Realität. Allerdings fordert das k_d -Konzept gerade diese Bedingung, und eine Homogenität ist Voraussetzung. Der Zeitpunkt des Absaufens und Spülung des Lagers ist für die Dosis entscheidend. Der hier gewählte Wert von 50 a unterstellt einen verhältnismäßig frühen Störfall, lässt sich aber durch das Vorhandensein

von Wasserzutritt und einer geologischen Störung in der Schachtanlage Asse II stützen. Eine Auswaschung des Inventars über einen Zeitraum von 10000 Jahren entspricht einem Versagen der Barrierewirksamkeit des Wirtsgesteines. Zusätzlich wird angenommen, dass ein Radionuklidtransport gegen die Schwerkraft in diesem Zeitrahmen möglich ist und sich keine stehende Wassersäule ausbildet, durch die der Transport zum Erliegen käme. Die aus [BfS95] benutzten k_d -Werte sind lediglich in fünf Klassen eingeteilt und schätzen Transport- und Sorptionsverhalten auf konservativer Ebene ein. Schließlich sieht die Dosismodellierung einen hohen Selbstversorgungsgrad vor, der sich im Laufe der Zeit nicht verändert. Allerdings ist diese Einschätzung heute äußerst konservativ, da Lebensmittel im Zuge der Globalisierung aus Teilen der gesamten Erde zum Endverbraucher in der Bundesrepublik Deutschland transportiert werden. Grundsätzlich sind solche konservativen Annahmen aber sinnvoll, da sie eine Dosisunterschätzung vermeiden und eine Vorhersagbarkeit der z.B. Ernährungs- und Lebensgewohnheiten über große Zeiträume fragwürdig ist. Ein zusätzliche jährliche Dosis von 1 mSv als Rechenergebnis eines konservativen Modelles ist zwar tendentiell überschätzt, entbindet aber nachfolgende Generationen nicht von der Sorgepflicht und könnte eine langfristige Überwachung des Lagers erforderlich machen.

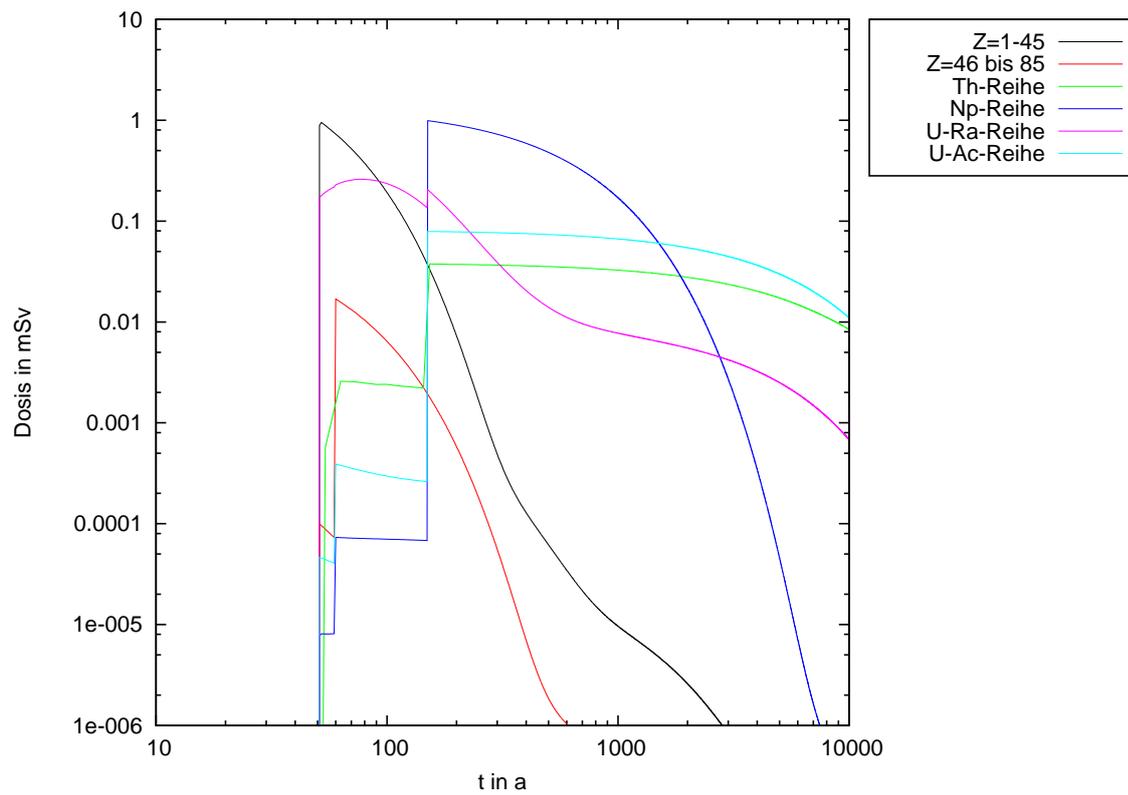


Abbildung 7.1: Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen. k_d -Werte nach [BfS95].

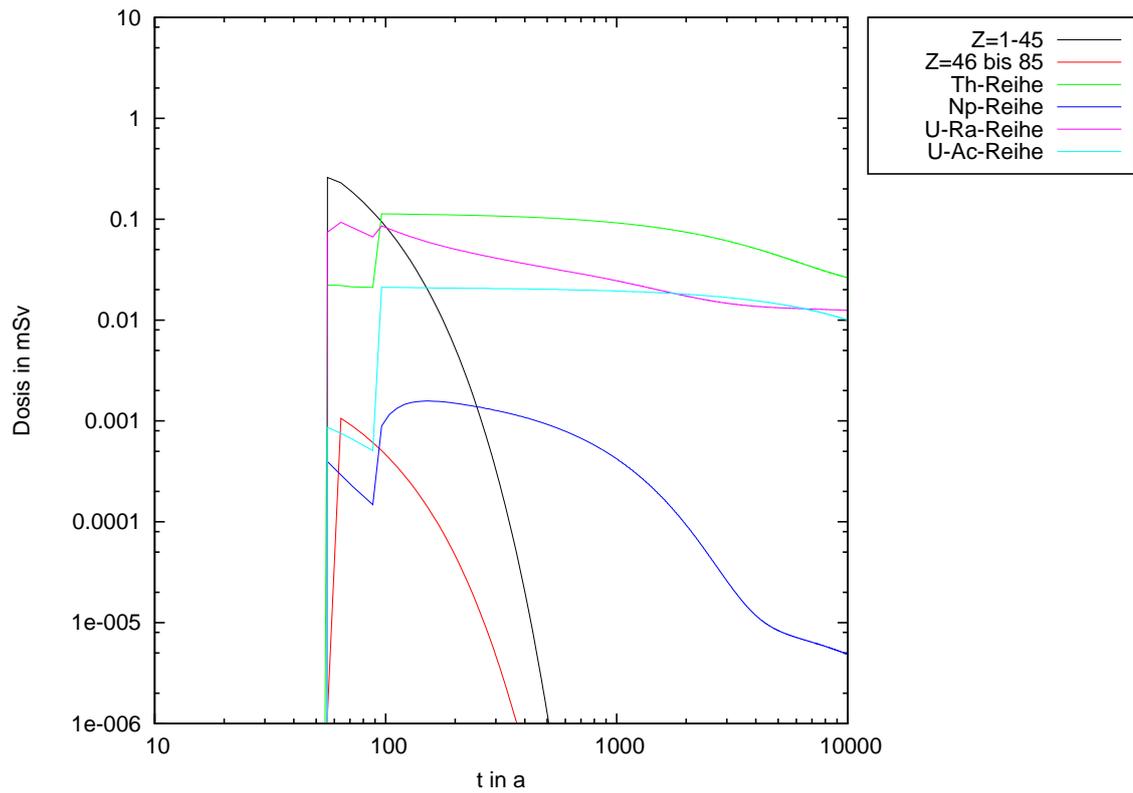


Abbildung 7.2: Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen. Die geologische Störung führt durch mittleren Muschelkalk. k_d -Werte nach [Sys06].

8 Dosismodellierung

8.1 Szenario einer selbstversorgenden Referenzperson

Für die Dosismodellierung ist ein Szenario für eine Person zu entwickeln, die sich an den ungünstigsten Einwirkstellen aufhält und sich von lokal erzeugten Lebensmitteln ernährt. Für die Lagerung von Radionukliden wird in dieser Arbeit ausgeschlossen, dass Personen Zugang zu der Halde oder dem Lager erlangen und somit keine Dosis durch Direktin-gestion oder externe Bestrahlung erhalten. Somit verbleibt ein Störfallszenario, in dem die wasserundurchlässige Bedeckung und Basis einer Halde in der Nachbetriebsphase ihre Wirksamkeit verlieren bzw. bei untertägiger Lagerung Wassereinbruch stattfindet. Die Radionuklide sind als vereinfachte Annahme homogen über eine Abfallmatrix verteilt, sodass Wasserzutritt das Inventar langfristig auswäscht.

8.1.1 Expositionspfad

Da das Wasser die kontaminierte Quelle ist, ist für die Strahlenexposition ausschließlich der Wasserpfad zu berücksichtigen. Hierfür wird angenommen, dass die Referenzperson sich in der Nähe eines Lagers oder Halde aufhält und über einen Brunnen verfügt, der als Wasserquelle für lokal erzeugte Lebensmittel und Trinkwasser für Mensch und Tier dient. In Anlehnung an [Hoh09] und [BfS95] befindet sich der Brunnen in diesem Modell in 500 m Entfernung. Der Wasserpfad beinhaltet die folgenden Verzweigungen [Bun08]:

- Trinkwasser - (Muttermilch)
- Trinkwasser - Säuglingsmilchnahrung
- Wasser - Fisch - (Muttermilch)
- Viehtränke - Kuh - Milch - (Muttermilch)
- Viehtränke - Tier - Fleisch - (Muttermilch)
- Beregnung - Pflanze - (Muttermilch)
- Beregnung - Pflanze - Kuh - Milch - (Muttermilch)
- Beregnung - Pflanze - Tier - Fleisch - (Muttermilch)

8.1.2 Altersklassen

Verzehrgewohnheiten und Dosiskonversionsfaktoren einer einzigen Referenzperson zu betrachten führt zu keiner hinreichenden Dosisbestimmung. Die Sensitivität auf Radioaktivität ist vom Alter abhängig, ebenso die Menge an verzehrten kontaminierten Lebensmitteln. Daher findet eine Einteilung in sechs verschiedene Altersklassen statt: ≤ 1 a, 1-2 a, 2-7 a, 7-12 a, 12-17 a und ≥ 17 a.

8.1.3 Verzehrgewohnheiten

Die Verzehrgewohnheiten nach [Bun08] spiegeln ein normiertes Ernährungsverhalten der Referenzperson in den oben genannten sechs Altersklassen wieder und erlauben, sortiert nach einzelnen Lebensmittelarten, eine Einschätzung der zugeführten Dosis. Für den Säugling bis zu einem Alter von einem Jahr wird eine Fallunterscheidung getroffen. Entweder wird er gestillt und durch Muttermilch versorgt oder er erhält die gleiche Menge Säuglingsmilchnahrung, die mit Trinkwasser zubereitet wird. Bei der Modellbetrachtung dieser Arbeit ist die kontaminierte Quelle das Trinkwasser, welches auch zur Bewässerung und in Tränken für das Vieh verwendet wird. Daher ist der größte Anteil der Dosis durch den Direktverzehr von Trinkwasser bedingt. D.h. für den Säugling, welcher aufbereitete Säuglingsmilchnahrung erhält, ist wegen der größten Dosiskonversionsfaktoren aller Altersklassen die größte Dosis zu erwarten.

8.1.4 Transferfaktoren

Transferfaktoren dienen zur Berechnung des Radionuklidtransfers von einem Medium in ein anderes. So werden diese Faktoren genutzt um z.B. die Aktivitätskonzentration im Fleisch zu bestimmen, wenn ein Tier vor der Schlachtung mit kontaminiertem Futter

Tabelle 8.1: Mittlere Verzehrgewohnheiten einer Referenzperson nach [AVV],[BergBau]

Altersgruppe in Jahren	≤ 1	1 – 2	2 – 7	7 – 12	12 – 17	> 17
Trinkwasser	55	100	100	150	200	350
Mutter-/Säuglingsmilch	200	-	-	-	-	-
Milch, Milchprodukte	45	160	160	170	170	130
Fisch	0,5	3	3	4,5	5	7,5
Fleisch, Wurst, Eier	5	13	50	65	80	90
Getreide, Getreideprodukte	12	30	80	95	110	110
einheimisches Frischobst, Obstprodukte	25	45	65	65	60	35
Kartoffeln, Wurzelgemüse, Säfte	30	40	45	55	55	55
Blattgemüse	3	6	7	9	11	13
Gemüse, Gemüseprodukte, Säfte	5	17	30	35	35	40

genährt worden ist. Für alle Übergänge innerhalb der Expositionspfade werden Transferfaktoren benötigt. In Tabelle A.12 sind die verwendeten Transferfaktoren aufgelistet.

8.1.5 Dosiskoeffizienten

Aus den Nuklidkonzentrationen in den einzelnen Lebensmitteln und den Verzehrsgewohnheiten wird eine Dosis mit Hilfe von Dosiskoeffizienten ermittelt. Ein solcher Koeffizient hat die Einheit Sv/Bq und ist nuklidspezifisch. In Tabelle A.11 ist eine Übersicht der verwendeten Dosiskoeffizienten zu finden. Die Herkunft solcher Werte beruht auf Tierexperimenten und Modellrechnungen für den Menschen. Lediglich für wenige Nuklide sind Daten am Menschen gewonnen wurden, wie Cäsium als Fallout-Nuklid oder Iod aus der medizinischen Anwendung. Wegen des individuellen chemischen Verhaltens in lebenden Organismen, existiert ein kritisches Organ, das von der Inkorporation von Radionukliden den größten Teil der Dosis erhält. Im Falle von Iod ist die Schilddrüse das kritische Organ. Für die Dosismodellierung dieser Arbeit werden die in [ICR01] aufgeführten effektiven Dosiskonversionsfaktoren verwendet.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den Berechnungen dieser Arbeit werden die Vor- und Nachteile des k_d -Konzeptes verdeutlicht und die potentielle Strahlendosis einer Referenzperson ermittelt. Die Radionuklidausbreitung in Grundwasserleitern, Böden und geologischen Störungen wird als Transport durch ein poröses Medium betrachtet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit jedes Nuklides wird dabei mit Hilfe des k_d -Wertes retardiert. Das k_d -Konzept bietet einen Rechenansatz, bei dem das gesamte chemische Verhalten auf einen einzigen Verteilungskoeffizienten zurückgeführt wird. Eine grafische Darstellung der zeitlichen Dosisverläufe für verschiedene k_d -Werte ist im Anhang zu finden.

Wie in Kapitel 5 beschrieben sind k_d -Werte mit einer hohen Variabilität verknüpft, sodass für jeden Wert ein Gültigkeitsbereich angegeben werden muss. Desweiteren sind solche Werte nicht über größere Zeiträume konstant, da sich das chemische Milieu mit dem langfristigen Auswaschen und durch Erosionsprozesse verändert.

Bei k_d -Werten, die auf experimentellem Wege ermittelt worden sind, besteht grundsätzlich das Problem der Übertragbarkeit auf reale Bedingungen. Laborexperimente vermögen nur begrenzt reale Bedingungen nachzustellen und In-situ-Proben geben nur lokal stark eingegrenzte Informationen wieder.

Das k_d -Konzept bietet folglich die Möglichkeit eine Stoffausbreitung in porösen Medien zu nähern. Eine Modellierung ist allerdings mit großen Unsicherheiten hinsichtlich des k_d -Wertes behaftet, da Sorptionsprozesse von einer Fülle von Faktoren abhängen. Da gerade der k_d -Wert maßgeblich für die Transportgeschwindigkeit und Löslichkeit ist, sind dazu vergleichbar kleine Variabilitäten in Parametern wie Dichte oder Nutzporosität bei der konservativen Berechnung zu vernachlässigen. Ein hoher Grad an Konservativität beschreibt zwar eine Halde oder ein Lager nur stark vereinfacht, neigt aber nicht zu einer Unterschätzung der Dosis.

Eine berechnete maximale Dosis von ungefähr 10 mSv/a für eine Halde hält zwar den Grenzwert von 10 mSv/a für die Zivilbevölkerung nicht ein [Bun01], und liegt auch deutlich höher als das 10 μ Sv/a-Prinzip, ist aber unter Berücksichtigung der konservativen Annahmen und k_d -Werte als eher gering wahrscheinliches Störfallszenario zu bewerten. Die Berechnung führt zu der Schlussfolgerung, dass eine Überwachung des Grundwassers hinsichtlich Radionuklidkonzentrationen sinnvoll erscheint und eine Gesundheitsgefährdung als nicht wahrscheinlich anzusehen ist. Es lassen sich noch größere Dosen berechnen, wenn angenommen wird, dass die Halde die Form einer Kegelhalde besitzt. Kegelhalden

bestehen aus locker geschüttetem Material und bieten größere Hohlräume und Wegsamkeiten für Regenwasser. Realistisch betrachtet wird ein radioaktiver Abfall wie in der Asse II niemals auf einer solchen Halde aufgebracht, sodass geringere Dosen als die berechneten wahrscheinlicher sind.

Für ein untertägliches Lager wurden Dosen ≤ 1 mSv/a für ein Störszenario mit frühem Absaufen und Transport gegen das Schwerefeld der Erde berechnet. Das Eintreten eines solchen Falles ist für einsturzgefährdete Bergwerke in Folge hohen Durchbauungsgrades wie die Asse für konservative Modelle als gerechtfertigte Annahme anzusehen. Grundsätzlich ist die Lagerung in tiefen geologischen Formationen der oberirdischen vorzuziehen, da keine direkte Verfügbarkeit für die Biosphäre besteht.

Ausblick

Die Modellierungen dieser Arbeit sind mit Vereinfachungen und konservativen Annahmen gestalten worden, sodass ein höherer Grad an Komplexität noch hinzugefügt werden kann, welcher die Einflussfaktoren auf k_d -Werte mit einschließt. Solche konservativen Modelle befriedigen zwar die wenigsten Realitätsansprüche, dienen aber zu einer Abschätzung der höchstmöglichen Dosis einer Referenzperson. Da die Kenntnis über k_d -Werte mit ihren Gültigkeitsbereichen Kernstück der Berechnungen sind, ist eine standortspezifische Angabe mit Gültigkeitsgrenzen erforderlich. Für eine konkrete Dosismodellierung für eine bestimmte Halde oder ein bestimmtes Lager sind daher Probennahmen unverzichtbar.

Literaturverzeichnis

- [2.510] 2.5, NuDat: Interactive Chart of Nuclides (2010), URL <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
- [Ber09] BERLIN, Digitaler Umweltatlas: Bodenkundliche Kennwerte (2009), URL www.stadtentwicklung.berlin.de
- [BfS95] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, G. Schaller, J. Poschner: Richtwerte für die spezifische Aktivität von schwach radioaktiv kontaminierten Abfällen, die konventionell entsorgt werden (1995), URL www.bfs.de
- [BGR94] Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands (1994), URL www.bgr.bund.de
- [BGR95] Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Salzformationen (1995), URL www.bgr.bund.de
- [BGR07a] Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinformationen (2007), URL www.bgr.bund.de
- [BGR07b] Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinformationen (2007), URL www.bgr.bund.de
- [Bun01] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ: Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (2001)
- [Bun02] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Verordnung über Deponien und Langzeitlager* (2002)
- [Bun08] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (2008)
- [Bun10a] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ: Assekate Version 9.2 (2010), URL www.bfs.de
- [Bun10b] BUNDESMINISTERIUM FÜR STRAHLENSCHUTZ: Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (2010), URL www.bfs.de

- [DIN87] DIN 4022 *Baugrund und Grundwasser*, Deutsches Institut für Normung e.V. (1987)
- [DIN92] DIN 4049-1 *Hydrogeologie, Grundbegriffe*, Deutsches Institut für Normung e.V. (1992)
- [Fir96] FIRESTONE, Richard B.: *Table of Isotopes*, Wiley-Interscience, 8. Aufl. (1996)
- [Ham03] HAMMER, Jörg: *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 9. Aufl. (2003)
- [Hoh09] HOHMANN, E.: *Strahlenexposition durch Ablagerung von Rückständen aus Arbeiten auf Bergeshalden*, Diplomarbeit, Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie, Leibniz Universität Hannover (2009)
- [ICR01] Dosiskoeffizienten bei äußerer und innerer Strahlenexposition (2001), URL www.bfs.de
- [Ins10] INSTITUT FÜR ANGEWANDTE ÖKOLOGIE: k_d -Werte, Mittlere Sorptionskoeffizienten im Deckgebirge der Schachanlage Asse (2010)
- [Kru09] KRUPP, Dr. Ralf Erhard: Strömungs- und Transportmodell, Langzeitsicherheit Asse II (2009), URL www.asse-2-begleitgruppe.de/
- [May02] MAYER-KUCKUCK, T.: *Kernphysik - Eine Einführung*, BG Teubner Verlag, 7. Aufl. (2002)
- [Nat05] NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY: Atlas of Eh-pH diagrams - Intercomparison of thermodynamic databases. *Geological Survey of Japan Open File Report* (2005), Bd. 419
- [Pre03] PRESS, F. und SIEVER, R.: *Allgemeine Geologie - Einführung in das System Erde, Theuern, Kümmersbrück*, Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg, 3. Aufl. (2003)
- [SSK88] SSK: STRAHLENSCHUTZKOMMISSION: Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle, Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission und der Strahlenschutzkommission (1988), URL www.ssk.de
- [Sys06] SYSTEMPLANUNG, Brenk: *K_d -Konzept und seine Anwendung für natürliche Radionuklide* (2006)
- [US199] Understanding Variation in Partition Coefficient, k_d , Values (1999), URL www.epa.gov
- [Wer10] WERRA, Werk: Information und Zahlen zum Monte Kali (2010), URL www.kalimuseum.heringen.de

Abbildungsverzeichnis

2.1	Kein Gleichgewicht: Der Zerfall von ^{123}Xe zu ^{123}I , ein Gleichgewichtszustand wird nie erreicht.	12
2.2	Säkulares Gleichgewicht: Zerfall von ^{90}Sr zu ^{90}Y . Ein säkulares Gleichgewicht stellt sich bereits nach kurzer Zeit ein.	13
3.1	Berechnetes Abklingverhalten der Radionuklide aus Tabelle 3.1 in Bauelementen.	17
3.2	Radionuklidinventar der Th-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren	18
3.3	Radionuklidinventar der Np-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren	19
3.4	Radionuklidinventar der U-Ra-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren	20
3.5	Radionuklidinventar der U-Ac-Reihe berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren	21
3.6	Radionuklidinventar bis zur Ordnungszahl 45 berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren	22
3.7	Radionuklidinventar der Ordnungszahlen 46-85 berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren	23
5.1	Eh-pH-Diagramm für Fe-Spezies bei Standardbedingungen im thermodynamischen Gleichgewicht [Nat05]	37
5.2	Abhängigkeit des U(VI)- k_d -Wertes vom pH-Wert. Dargestellt sind die kleinsten und größten ermittelten Werte aus [US199].	39
6.1	Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen mit den k_d -Werten nach [BfS95].	48
6.2	Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen mit den k_d -Werten für Ton aus Tabelle A.6.	49
7.1	Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen. k_d -Werte nach [BfS95].	55
7.2	Dosis für einen Säugling, der mit Säuglingsmilchnahrung ernährt wird, aufgeschlüsselt nach Zerfallsreihen. Die geologische Störung führt durch mittleren Muschelkalk. k_d -Werte nach [Sys06].	56

B.1	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	98
B.2	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	99
B.3	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	100
B.4	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	101
B.5	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	102
B.6	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	103
B.7	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	104
B.8	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	105
B.9	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	106
B.10	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	107
B.11	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	108
B.12	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].	109

B.13	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	110
B.14	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	111
B.15	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	112
B.16	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	113
B.17	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	114
B.18	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	115
B.19	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	116
B.20	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	117
B.21	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	118
B.22	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	119
B.23	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	120
B.24	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	121

B.25	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	122
B.26	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	123
B.27	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	124
B.28	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	125
B.29	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	126
B.30	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	127
B.31	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	128
B.32	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	129
B.33	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	130
B.34	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	131
B.35	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	132
B.36	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.	133

B.37	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	134
B.38	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	135
B.39	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	136
B.40	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	137
B.41	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	138
B.42	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	139
B.43	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	140
B.44	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	141
B.45	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	142
B.46	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	143
B.47	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	144
B.48	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	145

B.49	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	146
B.50	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk. . . .	147
B.51	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	148
B.52	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk. . . .	149
B.53	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.	150
B.54	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk. . . .	151
B.55	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95] .	152
B.56	Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95]	153
B.57	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95] .	154
B.58	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95]	155
B.59	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95]	156
B.60	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95]	157
B.61	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	158

B.62	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	159
B.63	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	160
B.64	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	161
B.65	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	162
B.66	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	163
B.67	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	164
B.68	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	165
B.69	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	166
B.70	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	167
B.71	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	168
B.72	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	169
B.73	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	170
B.74	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	171
B.75	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	172

B.76	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	173
B.77	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	174
B.78	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	175
B.79	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	176
B.80	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	177
B.81	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	178
B.82	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	179
B.83	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	180
B.84	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]	181
B.85	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	182
B.86	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	183
B.87	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	184
B.88	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	185
B.89	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	186

B.90	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	187
B.91	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	188
B.92	Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]	189

Tabellenverzeichnis

2.1	Natürliche Zerfallsreihen	10
3.1	Aktivierungsprodukte in Bauteilen kerntechnischer Anlagen	16
3.2	Bewertungsmatrix potentieller Wirtsgesteine [BGR07a]	26
6.1	Haldenparameter	46
6.2	Dimension verschiedener Halden	47
7.1	Parameter bei untertägiger Lagerung	53
8.1	Mittlere Verzehrsgewohnheiten einer Referenzperson nach [AVV],[BergBau]	58
A.1	Thorium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, für Np-236 Werte aus [Fir96], übrige Werte aus [2.510].	78
A.2	Neptunium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, Werte aus [2.510].	79
A.3	Uran-Radium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, Werte aus [2.510].	80
A.4	Uran-Actinium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, Werte aus [2.510].	81
A.5	k_d -Werte nach [BfS95] in m^3/g	82
A.6	k_d -Werte nach [Sys06] in m^3/g für verschiedene Bodenarten, geometrische Mittel (GM) und Variationsbereiche (Var). Einige Werte sind nicht ange- geben (n.a.)	83
A.7	K_d -Werte von U(VI) in Abhängigkeit vom pH-Wert nach [US199]	83
A.9	Nuklidinventar zum Stichtag 1.1.1980 [Bun10a]	83
A.8	K_d -Werte für das Deckgebirge der Schachanlage Asse II nach [Ins10] in $\frac{m^3}{g}$	88
A.10	k_f -Werte nach [Ber09]	89
A.11	Dosiskoeffizienten in Sv/Bq bei innerer Strahlenexposition für Einzelper- sonen der Bevölkerung. [ICR01]	90
A.12	Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes. [Bun08]	94

A Tabellen

Tabelle A.1: Thorium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, für Np-236 Werte aus [Fir96], übrige Werte aus [2.510].

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Wahrscheinlichkeit	Tochternuklid
Cf-252	2,65 a	α	96,91 %	Cm-248
		SF	3,09 %	
Cf-248	333,50 d	α	100,00 %	Cm-244
		SF	2,90E-3 %	
Cm-248	3,48E+5 a	α	91,61 %	Pu-244
		SF	8,39 %	
Cm-244	18,10 a	α	100,00 %	Pu-240
		SF	1,40E-4 %	
Pu-244	8,00E+7 a	α	99,88 %	U-240
		SF	0,12 %	
Pu-240	6,56E+3 a	α	100,00 %	U-236
		SF	5,70E-6 %	
Pu-236	2,86 a	α	100,00 %	U-232
		SF	1,90E-7 %	
Np-240	61,90 m	β^-	100,00 %	Pu-240
Np-236	1,53E+5 a	ϵ	87,30 %	U-236
		β^-	12,50 %	Pu-236
		α	0,16 %	Pa-232
U-240	14,10 h	β^-	100,00 %	Np-240
U-236	2,34 a	α	100,00 %	Th-232
		SF	9,40E-8 %	
U-232	68,90 a	α	100,00 %	Th-228
		SF	9,00E-20 %	
Pa-232	1,32 d	β^-	100,00 %	U-232
		ϵ	3,00E-2 %	
Th-232	1,40E+10 a	α	100,00 %	Ra-228
		SF	1,10E-9 %	
Th-228	1,91 a	α	100,00 %	Ra-224
		^{20}O	1,00E-11 %	
Ac-228	6,15 h	β^-	100,00 %	Th-228
Ra-228	5,75 a	β^-	100,00 %	Ac-228
Ra-224	3,63 d	α	100,00 %	Rn-220
		^{14}C	4,00E-9 %	Pb-210
Fr-224	3,33 m	β^-	100,00 %	Ra-224
Rn-220	55,60 s	α	100,00 %	Po-216
Po-216	0,15 s	α	100,00 %	Pb-212
Po-212	0,30 μs	α	100,00 %	Pb-208
		β^-	64,06 %	Po-212
Bi-212	60,55 m	α	35,94 %	Tl-208
		β^-	100,00 %	Bi-212
Tl-208	3,05 m	β^-	100,00 %	Pb-208

Tabelle A.2: Neptunium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, Werte aus [2.510].

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Wahrscheinlichkeit	Tochternuklid
Cf-249	351,00 a	α	100,00 %	Cm-245
		SF	5,00E-7 %	
Cm-245	8,50E+3 a	α	100,00 %	Pu-241
		SF	6,10E-7 %	
Am-241	4,33E+2 a	α	100,00 %	Np-237
		SF	4,00E-10 %	
Pu-241	14,29 a	α	100,00 %	Am-241
		SF	2,50E-3 %	
Np-237	2,14E+6 a	α	100,00 %	Pa-233
		SF	<2,00E-10 %	
U-233	1,59E+5 a	α	100,00 %	Th-229
		SF	<6,00E-9 %	
Pa-233	26,98 d	β^-	100,00 %	U-233
Th-229	7,88E+3 a	α	100,00 %	Ra-225
Ac-225	10,00 d	α	100,00 %	Fr-211
		^{14}C	5,00E-10 %	Bi-211
Ra-225	14,90 d	β^-	100,00 %	Ac-225
Fr-221	4,90 m	α	100,00 %	At-217
Rn-217	0,54 ms	α	100,00 %	Po-213
At-217	32,3 ms	α	99,99 %	Bi-213
		β^-	7,00E-3 %	Rn-217
Po-213	3,72 μs	α	100,00 %	Pb-209
Bi-213	45,59 m	β^-	97,80 %	Po-213
		α	2,20 %	Tl-209
Pb-209	3,25 h	β^-	100,00 %	Bi-209

Tabelle A.3: Uran-Radium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, Werte aus [2.510].

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Wahrscheinlichkeit	Tochternuklid
Cf-250	13,08 a	α	99,92 %	Cm-246
		SF	0,08 %	
Cm-246	4,76E+3 a	α	99,97 %	Pu-242
		SF	0,08 %	
Cm-242	162,80 d	α	100,00 %	Pu-238
		SF	6,20E-6 %	
Pu-242	3,75E+5 a	α	100,00 %	U-238
		SF	5,50E-4 %	
Pu-238	87,70 a	α	100,00 %	U-234
		SF	1,90E-7 %	
U-238	4,47E+9 a	α	100,00 %	Th-234
		SF	5,50E-5 %	
U-234	2,46E+5 a	α	100,00 %	Th-230
		SF	1,6E-9 %	
Pa-234	6,70 h	β^-	100,00 %	U-234
Th-234	24,10 d	β^-	100,00 %	Pa-234
Th-230	7,54E+4 a	α	100,00 %	Ra-226
		^{24}Ne	6,00E-11 %	Hg-206
Ra-226	1,60E+3 a	α	100,00 %	Rn-222
		^{14}C	3,20E-9 %	Pb-212
Rn-222	3,82 d	α	100,00 %	Po-218
Rn-218	35,00 ms	α	100,00 %	Po-214
At-218	1,50 s	α	99,90 %	Bi-214
		β^-	0,10 %	Rn-218
Po-218	3,10 m	α	99,98 %	Pb-214
		β^-	0,02 %	At-218
Po-214	0,16 ms	α	100,00 %	Pb-210
Po-210	138,38 d	α	100,00 %	Pb-206
Bi-214	19,90m	β^-	99,96 %	Po-214
		α	0,02 %	Tl-210
Bi-210	5,01 d	β^-	100,00 %	Po-210
		α	1,3E-4 %	Tl-206
Pb-214	26,8 m	β^-	100,00 %	Bi-214
Pb-210	22,20 a	β^-	100,00 %	Bi-210
		α	1,9E-6 %	Hg-206
Tl-210	1,30 m	β^-	100,00 %	Pb-210
Tl-206	4,20 m	β^-	100,00 %	Pb-206
Hg-206	8,32 m	β^-	100,00 %	Tl-206

Tabelle A.4: Uran-Actinium-Reihe sortiert nach Ordnungs- und Neutronenzahl, Werte aus [2.510].

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Wahrscheinlichkeit	Tochternuklid
Cf-251	898 a	α	100,00 %	Cm-247
Cm-247	1,56E+7 a	α	100,00 %	Pu-243
Cm-243	29,10 a	α	99,71 %	Pu-239
		ϵ	0,29 %	Am-243
Am-243	7,37E+3 a	α	100,00 %	Np-239
		SF	3,70E-9 %	
Pu-243	4,96 h	β^-	100,00 %	Am-243
Pu-239	2,41E+4 a	α	100,00 %	U-235
		SF	3,00E-10 %	
Np-239	2,36 d	β^-	100,00 %	Pu-239
U-235	7,04E+8 a	α	100,00 %	Th-231
		SF	7,00E-9 %	
Pa-231	3,28E+4 a	α	100,00 %	Ac-227
		SF	< 3,00E-10 %	
Th-231	25,52 h	β^-	100,00 %	Pa-231
Th-227	18,68 d	α	100,00 %	Ra-223
Ac-227	21,77 a	β^-	98,62 %	Th-227
		α	1,38 %	Fr-223
Ra-223	11,43 d	α	100,00 %	Rn-219
		^{14}C	8,90E-8 %	Pb-209
Fr-223	22,00 m	β^-	99,99 %	Ra-223
		α	6,00E-3 %	At-219
Rn-219	3,96 s	α	100,00 %	Po-215
At-219	56,00 s	α	97,00 %	Bi-215
		β^-	3,00 %	Rn-219
Po-215	1,78 ms	α	100,00 %	Pb-211
Po-211	0,52 s	α	100,00 %	Pb-207
Bi-215	7,60 m	β^-	100,00 %	Po-215
Bi-211	2,14 m	α	99,72 %	Tl-207
		β^-	0,28 %	Po-211
Pb-211	36,1 m	β^-	100,00 %	Bi-211
Tl-207	4,77 m	β^-	100,00 %	Pb-207

Tabelle A.5: k_d -Werte nach [BfS95] in m^3/g

Element	k_d in m^3/g	Element	k_d in m^3/g
H	1E-8	Ba	1E-6
Be	1E-6	La	1E-5
C	1E-8	Ce	1E-5
F	1E-7	Pr	1E-5
Na	1E-6	Nd	1E-5
Mg	1E-6	Pm	1E-5
Al	1E-5	Sm	1E-5
Si	1E-5	Eu	1E-5
P	1E-6	Gd	1E-5
S	1E-6	Tb	1E-5
Cl	1E-8	Dy	1E-5
K	1E-6	Ho	1E-5
Ca	1E-6	Er	1E-5
Sc	1E-6	Tm	1E-5
Ti	1E-5	Yb	1E-5
V	1E-6	Lu	1E-5
Cr	1E-5	Hf	1E-4
Mn	1E-6	Ta	1E-5
Fe	1E-5	W	1E-6
Co	1E-5	Re	1E-7
Ni	1E-5	Os	1E-5
Cu	1E-6	Ir	1E-5
Zn	1E-6	Pt	1E-5
Ga	1E-5	Au	1E-5
Ge	1E-5	Hg	1E-6
As	1E-6	Tl	1E-5
Se	1E-6	Pb	1E-4
Br	1E-8	Bi	1E-5
Rb	1E-5	Po	1E-6
Sr	1E-6	At	1E-6
Y	1E-5	Fr	1E-5
Zr	1E-4	Ra	1E-6
Nb	1E-5	Ac	1E-5
Mo	1E-6	Th	1E-4
Tc	1E-8	Pa	1E-5
Ru	1E-6	U	1E-5
Rh	1E-6	Np	1E-5
Pd	1E-6	Pu	1E-4
Ag	1E-6	Am	1E-4
Cd	1E-6	Cm	1E-4
In	1E-5	Bk	1E-4
Sn	1E-5	Cf	1E-4
Sb	1E-6	Es	1E-4
Te	1E-6	Fm	1E-4
I	1E-8	Md	1E-4
Cs	1E-5		

Tabelle A.6: k_d -Werte nach [Sys06] in m^3/g für verschiedene Bodenarten, geometrische Mittel (GM) und Variationsbereiche (Var). Einige Werte sind nicht angegeben (n.a.)

Element	Sand	Lehm	Ton	organischer Boden	
U	3,5E-5	1,5E-5	1,6E-3	4,1E-4	GM
	3,0E-8...2,0E-2	1,7E-8...9,0E-3	4,0E-6...4,9E-1	2,7E-6...6,0E-2	Var
Th	3,2E-3	3,3E-3	5,8E-3	8,9E-2	GM
	4,5E-5...2,0E-1	n.a.	3,0E-5...9,8E-1	9,0E-5...8,8E+2	Var
Ra	5,0E-4	3,6E-2	9,1E-3	2,4E-3	GM
	8,2E-7...3,0E-2	7,4E-5...1,8E+1	6,7E-4...1,2E-1	n.a.	Var
Pb	2,7E-4	1,6E-2	5,5E-4	2,2E-2	GM
	2,7E-6...2,7E-2	9,9E-4...2,7E-1	n.a.	8,1E-3...6,0E-2	Var
Po	1,5E-4	4,0E-4	3,0E-3	7,3E-3	GM
	6,0E-6...7,0E-3	2,4E-5...5,4E-3	n.a.	n.a.	Var
Pa	5,5E-4	1,8E-3	2,7E-3	6,6E-3	GM
	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Var
Ac	4,5E-4	1,5E-3	2,4E-3	5,4E-3	GM
	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	Var

Tabelle A.7: K_d -Werte von U(VI) in Abhängigkeit vom pH-Wert nach [US199]

K_d -Wert m^3/g	3	4	5	6	7	8	9	10
Min	<1,0E-6	4,0E-7	1,5E-5	1,0E-4	6,3E-5	4,0E-7	<1,0E-6	<1,0E-6
Max	3,2E-5	5,0E-3	1,6E-1	1,0	6,3E-1	2,5E-1	7,9 E-3	5,0E-6

Tabelle A.9: Nuklidinventar zum Stichtag 1.1.1980 [Bun10a]

Nuklid	HWZ	Inventar in Bq		
		LAW	MAW	Gesamt
H-3	1,23E+01 a	2,13E-12	7,65E+11	2,89E+12
Be-10	1,51E+10 a	1,76E+03	1,33E+03	3,09E+03
C-14	5,73E+03 a	2,43E+12	2,23E+11	2,65E+12
Na-22	2,60E+00 a			
Al-26	7,40E+05 a			
Tabelle wird fortgesetzt				

Tabelle A.9 – Fortsetzung

Element	HWZ	Inventar in Bq		
		LAW	MAW	Gesamt
P-32	1,43E+01 d			
S-35	8,75E+01 d			
Cl-36	3,01E+05 a	7,20E+09	3,73E+07	7,23E+09
Ar-39	2,69E+02 a			
K-40	1,28E+09 a			
Ca-41	1,03E+05 a	2,93E+06	5,05E+05	3,44E+06
Ca-45	1,64E+02 d			
Sc-46	8,38E+01 d			
Cr-51	2,77E+01 d			
Mn-54	3,12E+02 d	7,10E+11	9,16E+11	1,63E+12
Fe-55	2,73E+00 a	9,17E+13	7,22E+14	8,13E+14
Fe-59	4,45E+01 d			
Co-57	2,72E+02 d			
Co-58	7,08E+01 d			
Co-60	5,27E+00 a	2,47E+14	7,19E+14	9,66E+14
Ni-59	7,60E+04 a	5,17E+10	1,71E+12	1,76E+12
Ni-63	1,00E+02 a	8,60E+13	2,40E+14	3,26E+14
Zn-65	2,44E+02 d			
Se-75	1,20E+02 d			
Se-79	6,50E+04 a	2,26E+09	1,10E+09	3,36E+09
Kr-85	1,08E+01 a	8,00E+12	2,59E+06	8,00E+12
Rb-84	3,28E+01 d			
Rb-86	1,87E+01 d			
Rb-87	4,75E+10 a	1,18E+05	5,41E+04	1,72E+05
Sr-85	6,49E+01 d			
Sr-90	2,88E+01 a	2,98E+14	1,51E+14	4,50E+14
Y-88	1,07E+02 d			
Y-90	6,41E+01 h			
Zr-93	1,53E+06 a	1,70E+10	5,28E+11	5,45E+11
Zr-95	6,40E+01 d			
Nb-93m	1,61E+01 a			
Nb-94	2,03E+04 a	6,71E+10	1,10E+11	1,77E+11
Nb-95	3,50E+01 d			
Mo-93	4,00E+03 a	2,10E+08	6,96E+09	7,17E+09
Mo-99	6,60E+01 h			
Tc-99	2,11E+05 a	7,23E+10	3,36E+10	1,06E+11
Ru-103	3,94E+01 d			
Ru-106	3,74E+02 d			
Rh-106	2,98E+01 s			

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.9 – Fortsetzung

Element	HWZ	Inventar in Bq		
		LAW	MAW	Gesamt
Pd-107	6,50E+05 a	4,99E+08	2,42E+08	7,41E+08
Ag-108m	4,18E+02 a	1,93E+10	3,46E+09	2,27E+10
Ag-110m	2,50E+02 d			
Cd-113m	1,41E+01 a	1,83E+11	5,05E+10	2,34E+11
Cd-115	4,48E+01 d			
Sn-113	1,15E+02 d			
Sn-119m	2,93E+02 d			
Sn-121m	5,50E+01 a			
Sn-123	1,29E+02 d			
Sn-126	1,00E+05 a	3,17E+09	1,39E+09	4,56E+09
Sb-124	6,03E+01 d			
Sb-125	2,76E+00 a	2,52E+13	4,04E+14	4,29E+14
Sb-126	1,25E+01 d			
Sb-127	3,85E+00 d			
Te-132	7,63E+01 d			
I-125	5,94E+01 d			
I-129	1,57E+07 a	1,89E+08	7,81E+07	2,67E+08
I-131	8,02E+00 d			
Xe-133	5,25E+00 d			
Cs-134	2,06E+00 a	6,47E+13	1,68E+13	8,16E+13
Cs-135	2,30E+06 a	2,21E+09	9,70E+08	3,19E+09
Cs-137	3,01E+01 a	5,62E+14	2,17E+14	7,79E+14
Ba-133	1,05E+01 a	1,51E+11	0,00E+00	1,51E+11
Ce-141	3,25E+01 d			
Ce-144	2,85E+02 d			
Pr-144	1,73E+01 m			
Nd-147	1,10E+01 d			
Pm-147	2,62E+00 a	2,98E+14	5,56E+13	3,54E+14
Sm-151	9,00E+01 a	3,20E+12	1,12E+12	4,32E+12
Eu-152	1,35E+01 a	3,38E+10	1,05E+10	4,43E+10
Eu-154	8,59E+00 a	1,90E+13	1,17E+13	3,07E+13
Eu-155	4,76E+00 a	1,16E+13	4,48E+12	1,61E+13
Gd-153	2,42E+02 d			
Ho-166m	1,20E+03 a	7,03E+05	5,36E+05	1,24E+06
Tm-170	1,29E+02 d			
Lu-177	1,60E+02 d			
Hf-181	4,24E+01 d			
Ta-182	1,14E+02 d			
Re-186	2,00E+05 a			

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.9 – Fortsetzung

Element	Inventar in Bq			
	HWZ	LAW	MAW	Gesamt
Ir-192	7,38E+01 d			
Au-198	2,69E+00 d			
Hg-203	4,66E+01 d			
Tl-201	7,31E+01 h			
Tl-204	3,78E+00 a	1,12E+11	0,00E+00	1,12E+11
Tl-207	4,77E+00 m			
Tl-208	3,05E+00 m			
Pb-210	2,23E+01 a	2,51E+10	3,43E+02	2,51E+10
Pb-211	3,61E+01 m			
Pb-212	1,06E+01 h			
Pb-214	2,68E+01 m			
Bi-210	5,01E+00 d			
Bi-211	2,14E+00 m			
Bi-212	6,06E+01 m			
Bi-214	1,99E+01 m			
Po-208	2,90E+00 a	9,14E+07	0,00E+00	9,14E+07
Po-210	1,38E+02 d			
Po-212	2,99E-07 s			
Po-214	1,64E-04 s			
Po-215	1,78E-03 s			
Po-216	1,45E+00 s			
Po-218	3,10E+00 m			
Rn-219	3,96E+00 s			
Rn-220	5,56E+01 s			
Rn-222	3,82E+00 d			
Ra-223	1,14E+01 d			
Ra-224	3,66E+00 d			
Ra-226	1,60E+03 a	2,02E+11	6,90E+03	2,02E+11
Ra-228	5,75E+00 a	1,75E+11	3,71E+06	1,75E+11
Ac-227	2,18E+01 a	5,72E+09	1,53E+04	5,72E+09
Ac-228	6,15E+00 h			
Th-227	1,87E+01 d			
Th-228	1,91E+00 a	1,14E+11	7,14E+07	1,14E+11
Th-229	7,34E+03 a	1,08E+06	6,84E+05	1,76E+06
Th-230	7,54E+04 a	1,53E+11	4,68E+06	1,53E+11
Th-231	2,55E+01 h			
Th-232	1,41E+10 a	3,29E+11	1,18E+07	3,29E+11
Th-234	2,41E+01 d			
Pa-231	3,28E+04 a	8,43E+08	8,11E+04	8,43E+08

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.9 – Fortsetzung

Element	HWZ	Inventar in Bq		
		LAW	MAW	Gesamt
Pa-233	2,70E+01 d			
Pa-234m	1,17E+00 m			
U-232	6,89E+01 a	1,24E+09	8,68E+07	1,33E+09
U-233	1,59E+05 a	2,13E+09	2,36E+09	4,49E+09
U-234	2,46E+05 a	1,37E+12	7,80E+09	1,38E+12
U-235	7,04E+08 a	5,30E+10	2,54E+08	5,32E+10
U-236	2,34E+07 a	2,22E+10	1,32E+09	2,35E+10
U-238	4,47E+09 a	1,28E+12	3,45E+09	1,28E+12
Np-236	1,54E+05 a			
Np-237	2,14E+06 a	1,18E+09	6,43E+08	1,83E+09
Np-239	2,36E+00 d			
Pu-236	2,86E+00 a			
Pu-238	8,77E+01 a	7,58E+13	8,42E+12	8,42E+13
Pu-239	2,41E+04 a	4,09E+13	3,24E+12	4,41E+13
Pu-240	6,56E+03 a	4,59E+13	3,71E+12	4,96E+13
Pu-241	1,44E+01 a	6,21E+15	5,64E+14	6,78E+15
Pu-242	3,73E+05 a	8,11E+10	8,46E+09	8,96E+10
Pu-244	8,08E+07 a	9,05E+03	1,15E+03	1,02E+04
Am-241	4,32E+02 a	5,32E+13	5,98E+12	5,91E+13
Am-242m	1,41E+02 a	1,66E+10	8,46E+09	2,51E+10
Am-243	7,37E+03 a	2,95E+10	2,36E+10	5,32E+10
Cm-242	1,63E+02 d	2,82E+10	1,52E+08	2,83E+10
Cm-243	2,91E+01 a	2,16E+10	1,71E+10	3,87E+10
Cm-244	1,81E+01 a	1,49E+12	1,46E+12	2,95E+12
Cm-245	8,50E+03 a	1,46E+08	1,26E+08	2,72E+08
Cm-246	4,73E+03 a	1,86E+08	1,43E+08	3,28E+08
Cm-247	1,56E+00 a	6,57E+01	2,07E+01	8,64E+01
Cm-248	3,40E+00 a	2,27E+02	9,28E+01	3,20E+02
Cm-250	9,00E+03 a	4,29E-05	2,09E-05	6,39E-05
Cf-249	3,51E+02 a	2,33E+03	1,36E+03	3,69E+03
Cf-251	8,98E+02 a	3,39E+01	1,50E+01	4,89E+01
Cf-252	2,65E+00 a	3,75E+03	6,07E+02	4,36E+03
Cf-254	6,05E+01 d			

Tabelle A.8: K_d -Werte für das Deckgebirge der Schachanlage Asse II nach [Ins10] in $\frac{\text{m}^3}{\text{g}}$.

	Oberer Muschelkalk	mittlerer Muschelkalk
Se	4,0E-8	4,0E-7
Sr	7,0E-6	3,0E-6
Tc	1,4E-6	1,0E-7
I	1,2E-5	1,0E-6
Cs	1,5E-3	1,2E-4
Pb	1,4E-4	5,0E-5
Ra	1,4E-4	3,9E-5
Ac	2,0E-3	3,1E-4
Pa	1,0E-1	4,0E-2
U	1,5E-5	5,0E-7
Np	3,7E-4	2,5E-6
Pu	6,0E-3	3,6E-4
Am	1,0E-1	9,0E-4
Cm	1,0E-3	2,1E-4

Tabelle A.10: k_f -Werte nach [Ber09]

Bodenart	k_f in cm/d	Bezeichnung
fS	106	Feinsand
Ls2	20	schwach sandiger Lehm
Ls3	7	mittel sandiger Lehm
Ls4	14	stark sandiger Lehm
Lt2	9	schwach toniger Lehm
Lt3	10	mittel toniger Lehm
Lts	6	sandig-toniger Lehm
Lu	18	schluffiger Lehm
mS	427	Mittelsand
Sl2	49	schwach lehmiger Sand
Sl3	33	mittel lehmiger Sand
Sl4	21	stark lehmiger Sand
Slu	11	schluffig-lehmiger Sand
Ss	229	reiner Sand
St2	79	schwach toniger Sand
St3	17	mittel toniger Sand
Su2	88	schwach schluffiger Sand
Su3	32	mittel schluffiger Sand
Su4	42	stark schluffiger Sand
Tl	3	lehmiger Ton
Tt	2	reiner Ton
Tu2	5	schwach schluffiger Ton
Tu3	28	mittel schluffiger Ton
Tu4	28	stark schluffiger Ton
Uls	14	sandig-lehmiger Schluff
Us	10	sandiger Schluff
Ut2	7	schwach toniger Schluff
Ut3	8	mittel toniger Schluff
Ut4	9	stark toniger Schluff
Uu	7	reiner Schluff

Tabelle A.11: Dosiskoeffizienten in Sv/Bq bei innerer Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung. [ICR01]

Nuklid	Altersgruppe					
	≤ 1 a	1 – 2 a	2 – 7 a	7 – 12 a	12 – 17 a	≥ 17 a
H-3	6,4E-11	4,8E-11	3,1E-11	2,3E-11	1,8E-11	1,8E-11
Be-10	1,4E-08	8,0E-09	4,1E-09	2,4E-09	1,4E-09	1,1E-09
C-14	1,4E-09	1,6E-09	9,9E-10	8,0E-10	5,7E-10	5,8E-10
Na-22	2,1E-08	1,5E-08	8,4E-09	5,5E-09	3,7E-09	3,2E-09
Al-26	3,4E-08	2,1E-08	1,1E-08	7,1E-10	4,3E-10	3,5E-09
P-32	3,1E-08	1,9E-08	9,4E-09	5,3E-09	3,1E-09	2,4E-09
S-35	1,3E-09	8,7E-10	4,4E-10	2,7E-10	1,6E-10	1,3E-10
Cl-36	9,8E-09	6,3E-09	3,2E-09	1,9E-09	1,2E-09	9,3E-10
K-40	6,2E-08	4,2E-09	2,1E-08	1,3E-08	7,6E-09	6,2E-09
Ca-41	1,2E-09	5,2E-10	3,9E-10	4,8E-10	5,0E-10	1,9E-10
Ca-45	1,1E-08	4,9E-09	2,6E-10	1,8E-09	1,3E-09	7,1E-10
Sc-46	1,1E-08	7,9E-09	4,4E-09	2,9E-09	1,8E-09	1,5E-19
Cr-51	3,5E-10	2,3E-10	1,2E-10	7,8E-11	4,8E-11	3,8E-11
Mn-54	5,4E-09	3,1E-09	1,9E-09	1,3E-10	8,7E-10	7,1E-10
Fe-55	7,6E-09	2,4E-09	1,7E-09	1,1E-09	7,7E-10	3,3E-10
Fe-59	3,9E-08	1,3E-08	7,5E-09	4,7E-09	3,1E-09	1,8E-09
Co-57	2,9E-09	1,6E-09	8,9E-10	5,8E-10	3,7E-10	2,1E-10
Co-58	7,3E-09	4,4E-09	2,6E-09	1,7E-09	1,1E-09	7,4E-10
Co-60	5,4E-08	2,7E-08	1,7E-08	1,1E-08	7,9E-09	3,4E-09
Ni-59	6,4E-10	3,4E-10	1,9E-10	1,1E-10	7,3E-11	6,3E-11
Ni-63	1,6E-09	8,4E-10	4,6E-10	2,8E-10	1,8E-10	1,5E-10
Zn-65	3,6E-08	1,6E-08	9,7E-09	6,4E-09	4,5E-09	3,9E-09
Se-75	2,0E-08	1,3E-08	8,3E-09	6,0E-09	3,1E-09	2,6E-09
Se-79	4,1E-08	2,8E-08	1,9E-08	1,4E-08	4,1E-09	2,9E-09
Rb-84	2,0E-08	1,4E-08	7,9E-09	5,0E-09	3,3E-09	2,8E-09
Rb-86	3,1E-08	2,0E-08	9,9E-09	5,9E-09	3,5E-09	2,8E-09
Rb-87	1,5E-08	1,0E-08	5,2E-09	3,1E-09	1,8E-09	1,5E-09
Sr-85	7,7E-09	3,1E-09	1,7E-09	1,5E-09	1,3E-09	5,6E-10
Sr-90	2,3E-07	7,3E-08	4,7E-08	6,0E-08	8,0E-08	2,8E-08
Y-88	8,1E-09	6,0E-09	3,5E-09	2,4E-09	1,6E-09	1,3E-09
Y-90	3,1E-08	2,0E-08	1,0E-08	5,9E-09	3,3E-09	2,7E-09
Zr-93	1,2E-09	7,6E-10	5,1E-10	5,8E-10	8,6E-10	1,1E-09
Zr-95	8,5E-09	5,6E-09	3,0E-09	1,9E-09	1,2E-09	9,5E-10
Nb-93m	1,5E-09	9,1E-10	4,6E-10	2,7E-10	1,5E-10	1,2E-10

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.11 – Fortsetzung

Nuklid	Altersgruppe					
	≤ 1 a	1 – 2 a	2 – 7 a	7 – 12 a	12 – 17 a	≥ 17 a
Nb-94	1,5E-08	9,7E-09	5,3E-09	3,4E-09	2,1E-09	1,7E-09
Nb-95	4,6E-09	3,2E-09	1,8E-09	1,1E-09	7,4E-10	5,8E-10
Mo-93	7,9E-09	6,9E-09	5,0E-09	4,0E-09	3,4E-09	3,1E-09
Mo-99	5,5E-09	3,5E-09	1,8E-09	1,1E-09	7,6E-10	6,0E-10
Tc-99	1,0E-08	4,8E-09	2,3E-09	1,3E-09	8,2E-10	6,4E-10
Ru-103	7,1E-09	4,6E-09	2,4E-09	1,5E-09	9,2E-10	7,3E-10
Ru-106	2,7E-09	1,8E-09	9,1E-10	5,5E-10	3,3E-10	2,6E-10
Rh-106	1,4E-09	9,7E-10	5,3E-10	3,3E-10	2,0E-10	1,6E-10
Pd-107	4,4E-10	2,8E-10	1,4E-10	8,1E-11	4,6E-11	3,7E-11
Ag-108m	2,1E-08	1,1E-08	6,5E-09	4,3E-09	2,8E-09	2,3E-09
Ag-110m	2,4E-08	1,4E-08	7,8E-09	5,2E-09	3,4E-09	2,8E-09
Cd-113m	1,2E-07	5,6E-08	3,9E-08	2,9E-08	2,4E-08	2,3E-08
Cd-115	1,4E-08	9,7E-09	4,9E-09	2,9E-09	1,7E-09	1,4E-09
Sn-113	7,8E-09	5,0E-09	2,6E-09	1,6E-09	9,2E-10	7,3E-10
Sn-119m	4,1E-09	2,5E-09	1,3E-09	7,5E-10	4,3E-10	3,4E-10
Sn-121m	2,6E-09	1,7E-09	8,4E-10	5,0E-10	2,8E-10	2,3E-10
Sn-123	2,5E-08	1,6E-08	7,8E-09	4,6E-09	2,6E-09	2,1E-09
Sn-126	5,0E-08	3,0E-08	1,6E-08	9,8E-09	5,9E-09	4,7E-09
Sb-124	2,5E-08	1,6E-08	8,4E-09	5,2E-09	3,2E-09	2,5E-09
Sb-125	1,1E-08	6,1E-09	3,4E-09	2,1E-09	1,4E-09	1,1E-09
Sb-126	2,0E-08	1,4E-08	7,6E-09	4,9E-09	3,1E-09	2,4E-09
Sb-127	1,7E-08	1,2E-08	5,9E-09	3,6E-09	2,1E-09	1,7E-09
Te-132	4,8E-08	3,0E-08	1,6E-08	8,3E-09	5,3E-09	3,8E-09
I-125	5,2E-08	5,7E-08	4,1E-08	3,1E-08	2,2E-08	1,5E-08
I-129	1,8E-07	2,2E-07	1,7E-07	1,9E-07	1,4E-07	1,1E-07
I-131	1,8E-07	1,8E-07	1,0E-07	5,2E-08	3,4E-08	2,2E-08
Cs-134	2,6E-08	1,6E-08	1,3E-08	1,4E-08	1,9E-08	1,9E-08
Cs-135	4,1E-09	2,3E-09	1,7E-09	1,7E-09	2,0E-09	2,0E-09
Cs-137	2,1E-08	1,2E-08	9,6E-09	1,0E-08	1,3E-08	1,3E-08
Ba-133	2,2E-08	6,2E-09	3,9E-09	4,6E-09	7,3E-09	1,5E-09
Ce-141	8,1E-09	5,1E-09	2,6E-09	1,5E-09	8,8E-10	7,1E-10
Ce-144	6,6E-08	3,9E-08	1,9E-08	1,1E-08	6,5E-09	5,2E-09
Pr-144	6,4E-10	3,5E-10	1,7E-10	9,5E-11	6,5E-11	5,0E-11
Nd-147	1,2E-08	7,8E-09	3,9E-09	2,3E-09	1,3E-09	1,1E-09
Pm-147	3,6E-09	1,9E-09	9,6E-10	5,7E-10	3,2E-10	2,6E-10
Sm-151	1,5E-09	6,4E-10	3,3E-10	2,0E-10	1,2E-10	9,8E-11
Eu-152	1,6E-08	7,4E-09	4,1E-09	2,6E-09	1,7E-09	1,4E-09
Eu-154	2,5E-08	1,2E-08	6,5E-09	4,1E-09	2,5E-09	2,0E-09
Eu-155	4,3E-09	2,2E-09	1,1E-09	6,8E-10	4,0E-10	3,2E-10

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.11 – Fortsetzung

Nuklid	Altersgruppe					
	≤ 1 a	1 – 2 a	2 – 7 a	7 – 12 a	12 – 17 a	≥ 17 a
Gd-153	2,9E-09	1,8E-09	9,4E-10	5,8E-10	3,4E-10	2,7E-10
Ho-166m	2,6E-08	9,3E-09	5,3E-09	3,5E-09	2,4E-09	2,0E-09
Tm-170	1,6E-08	9,8E-09	4,9E-09	2,9E-09	1,6E-09	1,3E-09
Lu-177	6,1E-09	3,9E-09	2,0E-09	1,2E-09	6,6E-10	5,3E-10
Hf-181	1,2E-08	7,4E-09	3,8E-09	2,3E-09	1,4E-09	1,1E-09
Ta-182	1,4E-08	9,4E-09	5,0E-09	3,1E-09	1,9E-09	1,5E-09
Re-186	1,9E-08	1,1E-08	5,5E-09	3,0E-09	1,9E-09	1,5E-09
Ir-192	1,3E-08	8,7E-09	4,6E-09	2,8E-09	1,7E-09	1,4E-09
Au-198	1,0E-08	7,2E-09	3,7E-09	2,2E-09	1,3E-09	1,0E-09
Hg-203	5,5E-09	3,6E-09	1,8E-09	1,1E-09	6,7E-10	5,4E-10
Tl-201	8,4E-10	5,5E-10	2,9E-10	1,8E-10	1,2E-10	9,5E-11
Tl-204	1,3E-08	8,5E-09	4,2E-09	2,5E-09	1,5E-09	1,2E-09
Pb-210	8,4E-06	3,6E-06	2,2E-06	1,9E-06	1,9E-06	6,9E-07
Pb-211	3,1E-09	1,4E-09	7,1E-10	4,1E-10	2,7E-10	1,8E-10
Pb-212	1,5E-07	6,3E-08	3,3E-08	2,0E-08	1,3E-08	6,0E-09
Pb-214	2,7E-09	1,0E-09	5,2E-10	3,1E-10	2,0E-10	1,4E-10
Bi-210	1,5E-08	9,7E-09	4,8E-09	2,9E-09	1,6E-09	1,3E-09
Bi-212	3,2E-09	1,8E-09	8,7E-10	5,0E-10	3,3E-10	2,6E-10
Bi-214	1,4E-09	7,4E-10	3,6E-10	2,1E-10	1,4E-10	1,1E-10
Po-210	2,6E-05	8,8E-06	4,4E-06	2,6E-06	1,6E-06	1,2E-06
Ra-223	5,3E-06	1,1E-06	5,7E-07	4,5E-07	3,7E-07	1,0E-07
Ra-224	1,4E-09	1,6E-09	9,9E-10	8,0E-10	5,7E-10	5,8E-10
Ra-226	2,7E-06	6,6E-07	3,5E-07	2,6E-07	2,0E-07	6,5E-08
Ra-228	3,0E-05	5,7E-06	3,4E-06	3,9E-06	5,3E-06	6,9E-07
Ac-227	3,3E-05	3,1E-06	2,2E-06	1,5E-06	1,2E-06	1,1E-06
Ac-228	7,4E-09	2,8E-09	1,4E-09	8,7E-10	5,3E-10	4,3E-10
Th-227	3,0E-07	7,0E-08	3,6E-08	2,3E-08	1,5E-08	8,8E-09
Th-228	3,7E-06	3,7E-07	2,2E-07	1,4E-07	9,4E-08	7,2E-08
Th-229	1,1E-05	1,0E-06	7,8E-07	6,2E-07	5,3E-07	4,9E-07
Th-230	4,1E-06	4,1E-07	3,1E-07	2,4E-07	2,2E-07	2,1E-07
Th-231	3,9E-09	2,5E-09	1,2E-09	7,4E-10	4,2E-10	3,4E-10
Th-232	4,6E-06	4,5E-07	3,5E-07	2,9E-07	2,5E-07	2,3E-07
Th-234	4,0E-08	2,5E-08	1,3E-08	7,4E-09	4,2E-09	3,4E-09
Pa-231	1,3E-05	1,3E-06	1,1E-06	9,2E-07	8,0E-07	7,1E-07
Pa-233	9,7E-09	6,2E-09	3,2E-09	1,9E-09	1,1E-09	8,7E-10
Pa-234m	5,0E-09	3,2E-09	1,7E-09	1,0E-09	6,4E-10	5,1E-10
U-232	2,5E-06	8,2E-07	5,8E-07	5,7E-07	6,4E-07	3,3E-07
U-233	3,8E-07	1,4E-07	9,2E-08	7,8E-08	7,8E-08	5,1E-08
U-234	3,7E-07	1,3E-07	8,8E-08	7,4E-08	7,4E-08	4,9E-08

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.11 – Fortsetzung

Nuklid	Altersgruppe					
	≤ 1 a	1 – 2 a	2 – 7 a	7 – 12 a	12 – 17 a	≥ 17 a
U-235	3,5E-07	1,3E-07	8,5E-08	7,1E-08	7,0E-08	4,7E-08
U-236	3,5E-07	1,3E-07	8,4E-08	7,0E-08	7,0E-08	4,7E-08
U-238	3,4E-07	1,2E-07	8,0E-08	6,8E-08	6,7E-08	4,5E-08
Np-236	2,5E-09	1,3E-09	6,6E-10	4,0E-10	2,4E-10	1,9E-10
Np-237	2,0E-06	2,1E-07	1,4E-07	1,1E-07	1,1E-07	1,1E-07
Np-239	8,9E-09	5,7E-09	2,9E-09	1,7E-09	1,0E-09	8,0E-10
Pu-236	2,1E-06	2,2E-07	1,4E-07	1,0E-07	8,5E-08	8,7E-08
Pu-238	4,0E-06	4,0E-07	3,1E-07	2,4E-07	2,2E-07	2,3E-07
Pu-239	4,2E-06	4,2E-07	3,3E-07	2,7E-07	2,4E-07	2,5E-07
Pu-240	4,2E-06	4,2E-07	3,3E-07	2,7E-07	2,4E-07	2,5E-07
Pu-241	5,6E-08	5,7E-09	5,5E-09	5,1E-09	4,8E-09	4,8E-09
Pu-242	4,0E-06	4,0E-07	3,2E-07	2,6E-07	2,3E-07	2,4E-07
Pu-244	4,0E-06	4,1E-07	3,2E-07	2,6E-07	2,3E-07	2,4E-07
Am-241	3,7E-06	3,7E-07	2,7E-07	2,2E-07	2,0E-07	2,0E-07
Am-242m	3,1E-06	3,0E-07	2,3E-07	2,0E-07	1,9E-07	1,9E-07
Am-243	3,6E-06	3,7E-07	2,7E-07	2,2E-07	2,0E-07	2,0E-07
Cm-242	5,9E-07	7,6E-08	3,9E-08	2,4E-08	1,5E-08	1,2E-08
Cm-243	3,2E-06	3,3E-07	2,2E-07	1,6E-07	1,4E-07	1,5E-07
Cm-244	2,9E-06	2,9E-07	1,9E-07	1,4E-07	1,2E-07	1,2E-07
Cm-245	3,7E-06	3,7E-07	2,8E-07	2,3E-07	2,1E-07	2,1E-07
Cm-246	3,7E-06	3,7E-07	2,8E-07	2,2E-07	2,1E-07	2,1E-07
Cm-247	3,4E-06	3,5E-07	2,6E-07	2,1E-07	1,9E-07	1,9E-07
Cm-248	1,4E-05	1,4E-06	1,0E-06	8,4E-07	7,7E-07	7,7E-07
Cm-250	7,8E-05	8,2E-06	6,0E-06	4,9E-06	4,4E-06	4,4E-06
Cf-249	9,0E-06	8,7E-07	6,4E-07	4,7E-07	3,8E-07	3,5E-07
Cf-251	9,1E-06	8,8E-07	6,5E-07	4,7E-07	3,9E-07	3,6E-07
Cf-252	5,0E-06	5,1E-07	3,2E-07	1,9E-07	1,0E-07	9,0E-08
Cf-254	1,1E-05	2,6E-06	1,4E-06	8,4E-07	5,0E-07	4,0E-07

Tabelle A.12: Transferfaktoren zur Berechnung des Radionuklidtransportes. [Bun08]

Nuklid	T_r^{Wd}	T_r^{Pf}	T_r^{Mi} (d/kg)	T_r^{Fl} (d/kg)	$T_r^{\text{MM,g}}$ (d/kg)
H			2E-02	2E-02	5E-01
Be	5E-04	5E-04	1E-04	1E-03	6E-03
C			2E-02	4E-02	3E-01
F	3E-02	2E-03	2E-03	2E-01	2E-02
Na	4E-01	4E-01	4E-02	8E-02	5E-02
Mg	6E-01	6E-01	4E-03	2E-02	1E-01
Al	1E-03	1E-03	2E-04	2E-03	2E-02
Si	2E-04	2E-04	1E-04	4E-05	2E-01
P	5E-01	3E+00	3E-02	6E-02	1E-01
S	9E-01	9E-01	2E-02	1E-01	2E-01
Cl	5E+00	5E+00	2E-02	8E-02	8E-02
K	1E+00	1E+00	6E-03	2E-02	2E-01
Ca	2E-01	6E-02	2E-02	1E-03	4E-01
Sc	2E-01	2E-01	5E-06	2E-02	1E-01
V	3E-03	5E-04	2E-05	3E-03	4E-02
Cr	1E-02	4E-03	3E-03	1E-02	2E-01
Mn	2E-01	2E-01	3E-04	5E-04	2E-03
Fe	5E-03	5E-03	3E-04	2E-02	4E-02
Co	2E-02	2E-02	2E-04	1E-02	1E-01
Ni	2E-02	2E-02	1E-02	2E-03	3E-01
Cu	2E-01	2E-01	2E-03	1E-02	2E-01
Zn	3E-01	3E-01	1E-02	1E-01	2E-01
Ga	3E-04	3E-04	5E-05	5E-01	2E-02
Ge	2E-01	6E-01	5E-04	5E-01	1E+00
As	6E-03	2E-03	7E-05	2E-03	1E-01
Se	5E-01	5E-01	5E-02	2E-02	3E-01
Br	1E-01	3E-01	5E-02	3E-02	7E-02
Rb	9E-01	9E-02	6E-03	1E-02	4E-01
Sr	4E-01	4E-01	2E-03	6E-04	1E-01
Y	3E-03	3E-03	1E-05	1E-03	2E-02
Zr	1E-03	3E-03	5E-06	2E-02	7E-02
Nb	1E-02	1E-02	3E-03	3E-01	2E-02
Mo	2E-01	5E-02	2E-03	7E-03	3E-02
Tc	3E+00	3E+00	1E-05	4E-02	6E-01
Ru	1E-02	1E-02	1E-06	2E-03	3E-02

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.12 – Fortsetzung

Nuklid	T_r^{Wd}	T_r^{Pf}	T_r^{Mi} (d/kg)	T_r^{Fl} (d/kg)	$T_r^{\text{MM,g}}$ (d/kg)
Rh	2E-02	2E-02	1E-02	2E-03	3E-01
Pd	2E-02	2E-02	1E-02	4E-03	3E-01
Ag	2E-01	2E-01	5E-02	2E-03	2E-01
Cd	4E-01	4E-01	1E-03	4E-04	2E-01
In	3E-01	3E-01	1E-04	8E-03	2E-02
Sn	2E-01	2E-01	3E-03	8E-02	4E-03
Sb	1E-01	2E-02	2E-03	1E-03	4E-02
Te	2E+00	2E+00	2E-04	8E-02	4E-01
I	1E-01	2E-02	3E-03	1E-02	6E-01
Cs	5E-02	5E-02	5E-03	3E-02	3E-01
Ba	2E-01	3E-02	4E-04	1E-04	2E-02
La	3E-03	3E-03	2E-05	2E-03	3E-02
Ce	9E-03	9E-03	2E-05	2E-03	3E-02
Pr	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Nd	3E-03	3E-03	2E-05	4E-03	3E-02
Pm	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Sm	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Eu	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Gd	3E-03	3E-03	2E-05	4E-03	3E-02
Tb	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Dy	3E-03	3E-03	2E-05	6E-03	3E-02
Ho	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Er	3E-03	3E-03	2E-05	4E-03	3E-02
Tm	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Yb	3E-03	3E-03	2E-05	4E-03	3E-02
Lu	3E-03	3E-03	2E-05	5E-03	3E-02
Hf	2E-04	2E-04	5E-06	4E-01	2E-03
Ta	7E-03	7E-03	3E-06	5E-01	1E-03
W	2E-02	2E-02	5E-04	4E-02	4E-01
Re	3E-01	3E-01	2E-03	8E-03	9E-01
Os	5E-02	5E-02	5E-03	4E-01	1E-01
Ir	2E-02	2E-02	5E-03	2E-03	1E-01
Pt	5E-01	5E-01	5E-03	4E-03	1E-01
Au	3E-03	3E-03	6E-06	3E-03	1E-01
Hg	7E-02	2E-01	1E-05	3E-01	2E-01
Tl	3E-01	3E-01	2E-03	4E-02	1E+00
Pb	1E-02	7E-03	3E-04	4E-04	2E-01
Bi	2E-01	2E-01	5E-04	2E-02	6E-02
Po	1E-02	5E-03	3E-04	5E-03	6E-01

Tabelle wird fortgesetzt

Tabelle A.12 – Fortsetzung

Nuklid	T_r^{Wd}	T_r^{Pf}	T_r^{Mi} (d/kg)	T_r^{Fl} (d/kg)	$T_r^{\text{MM,g}}$ (d/kg)
At	3E-01	3E-01	5E-02	5E-01	1E+00
Ra	1E-02	5E-03	3E-03	9E-04	2E-01
Ac	3E-03	3E-03	2E-05	3E-03	6E-04
Th	2E-03	5E-04	5E-06	2E-04	2E-02
Pa	3E-03	3E-03	5E-06	5E-03	6E-04
U	3E-03	3E-03	5E-04	4E-04	2E-02
Np	2E-02	2E-02	5E-06	2E-04	6E-04
Pu	8E-05	4E-04	1E-07	3E-04	6E-04
Am	3E-04	3E-04	2E-05	5E-04	6E-04
Cm	3E-04	3E-04	2E-05	2E-04	6E-04
Bk	3E-03	3E-03	2E-05	2E-04	6E-04
Cf	3E-03	3E-03	2E-05	2E-04	6E-04

B Abbildungen

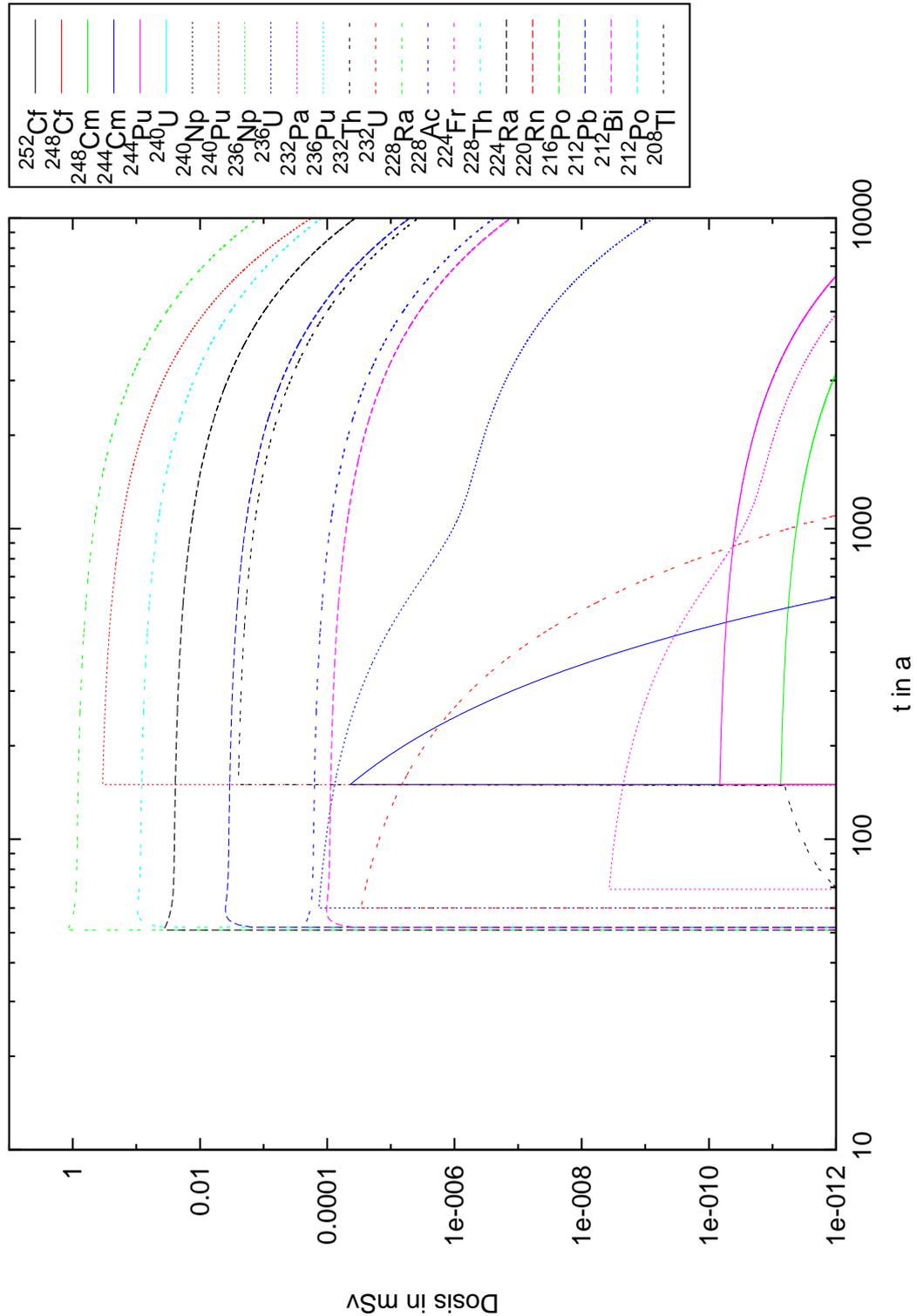


Abbildung B.1: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Bfs95].

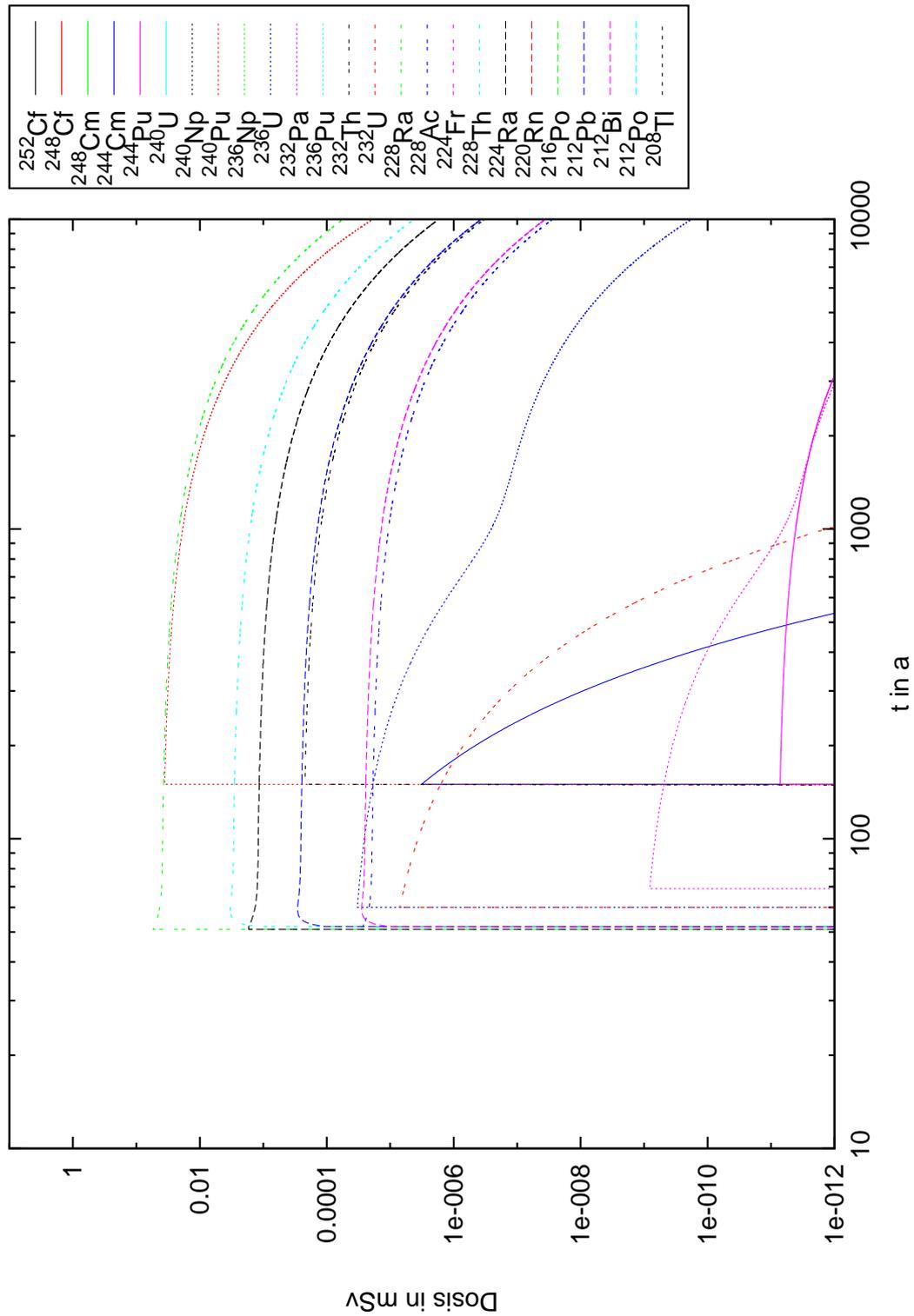


Abbildung B.2: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

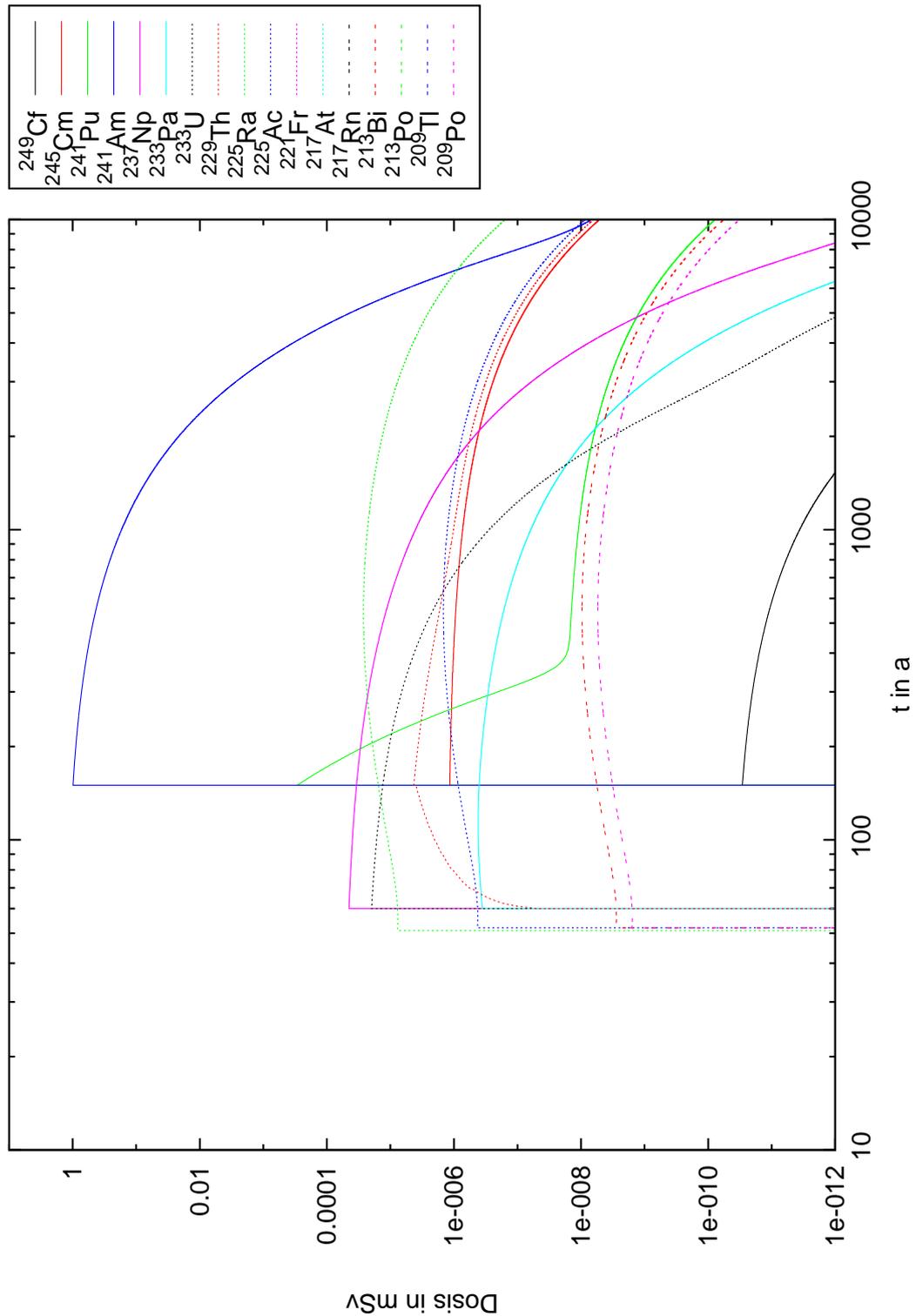


Abbildung B.3: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

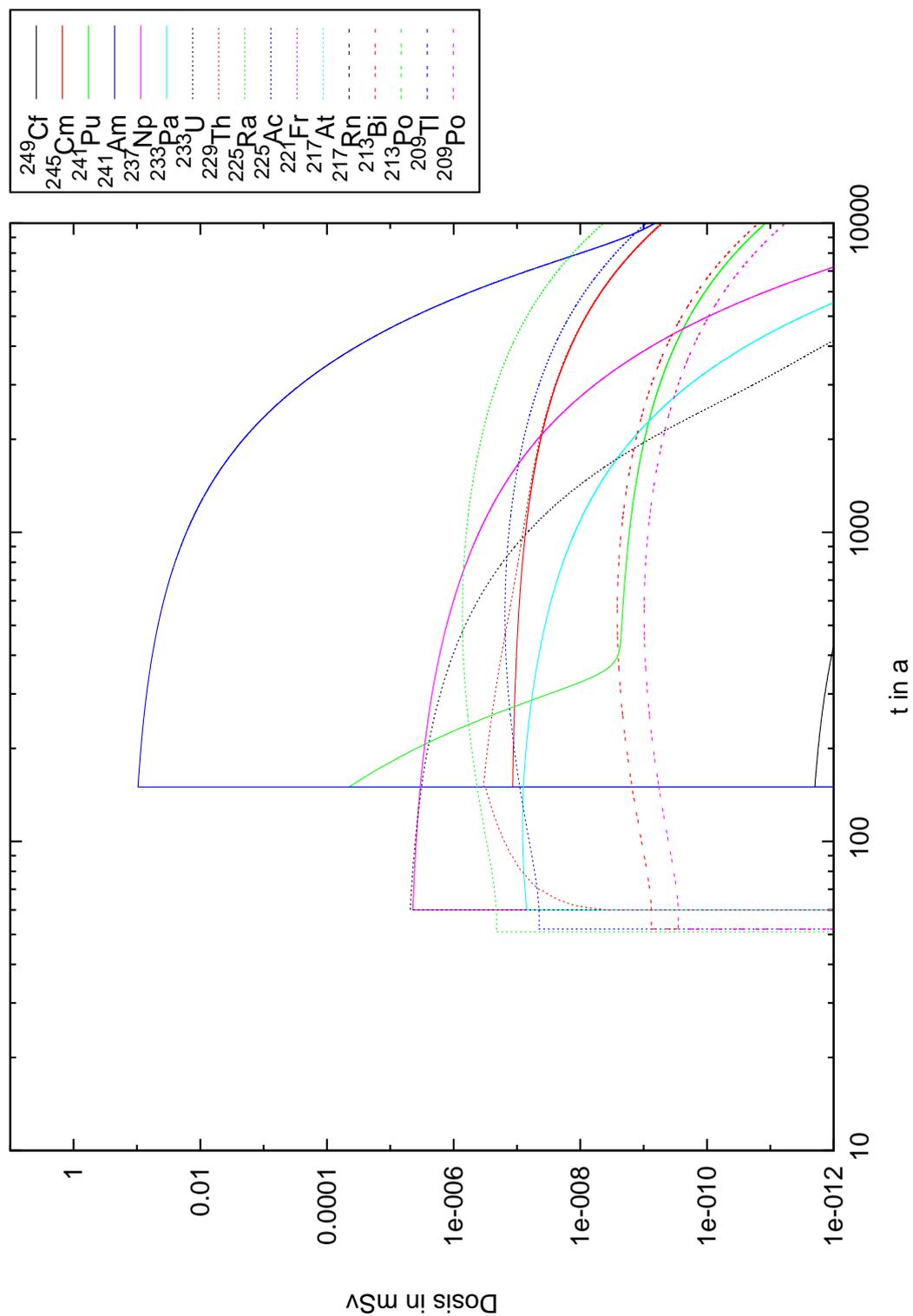


Abbildung B.4: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

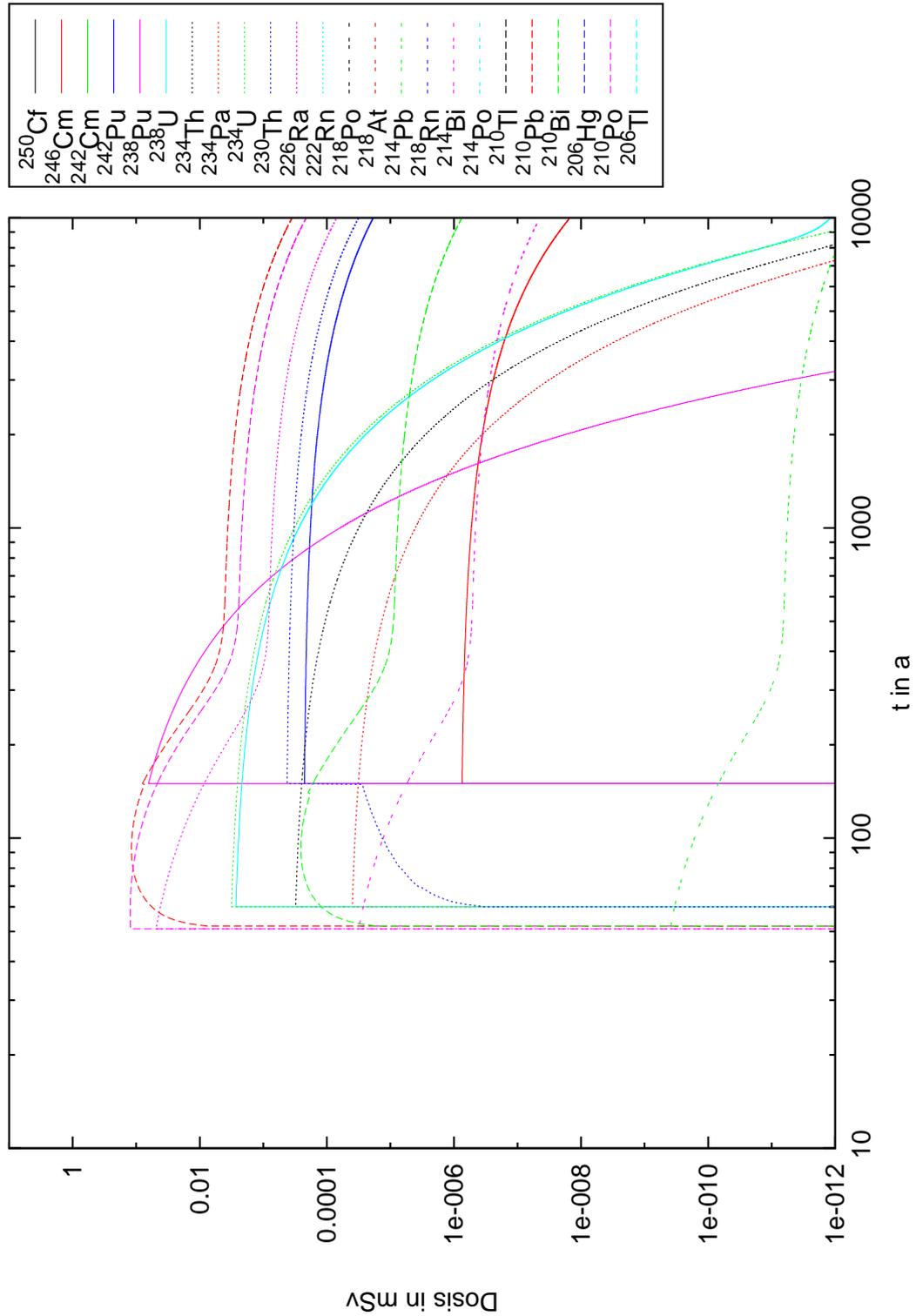


Abbildung B.5: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

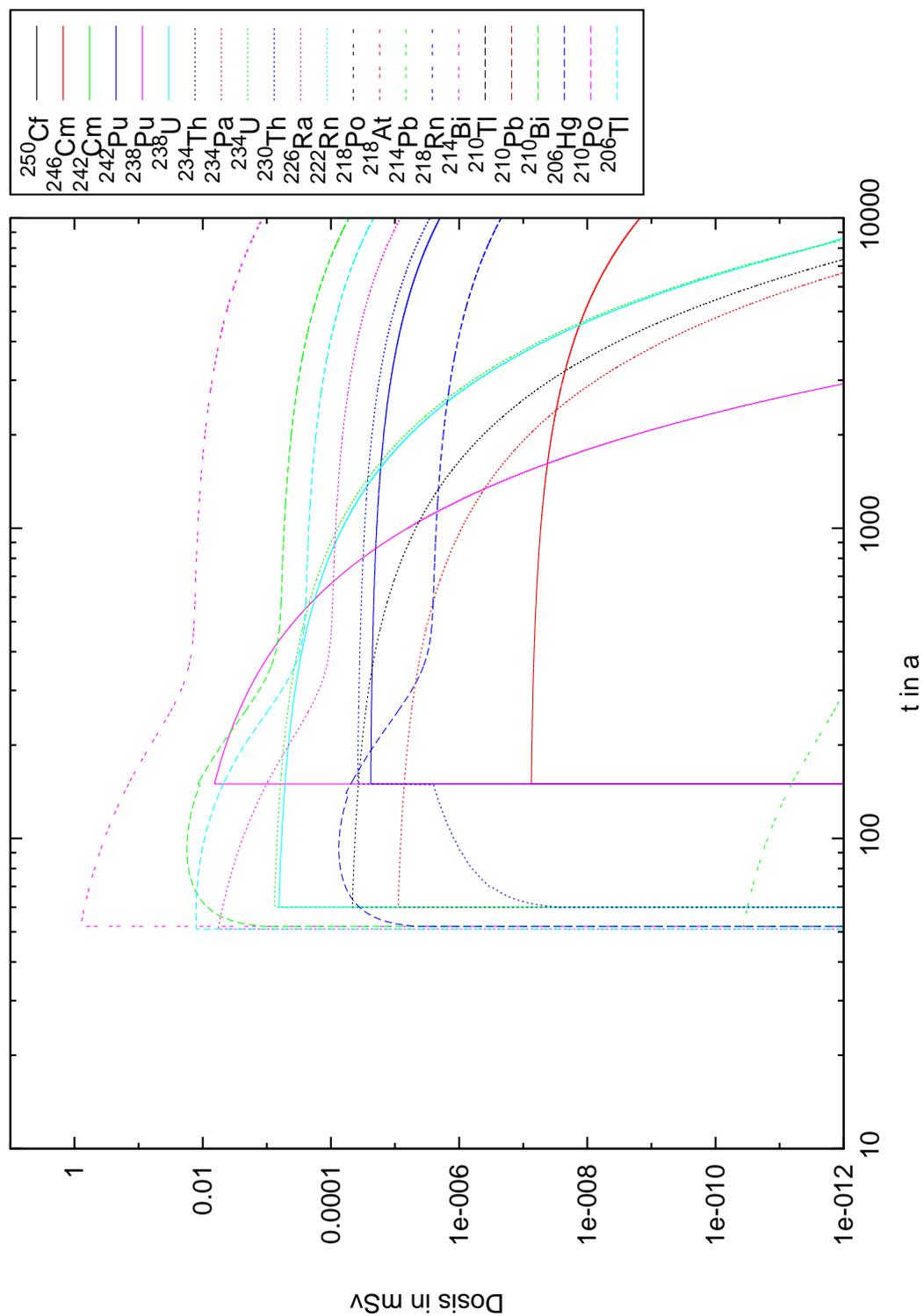


Abbildung B.6: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

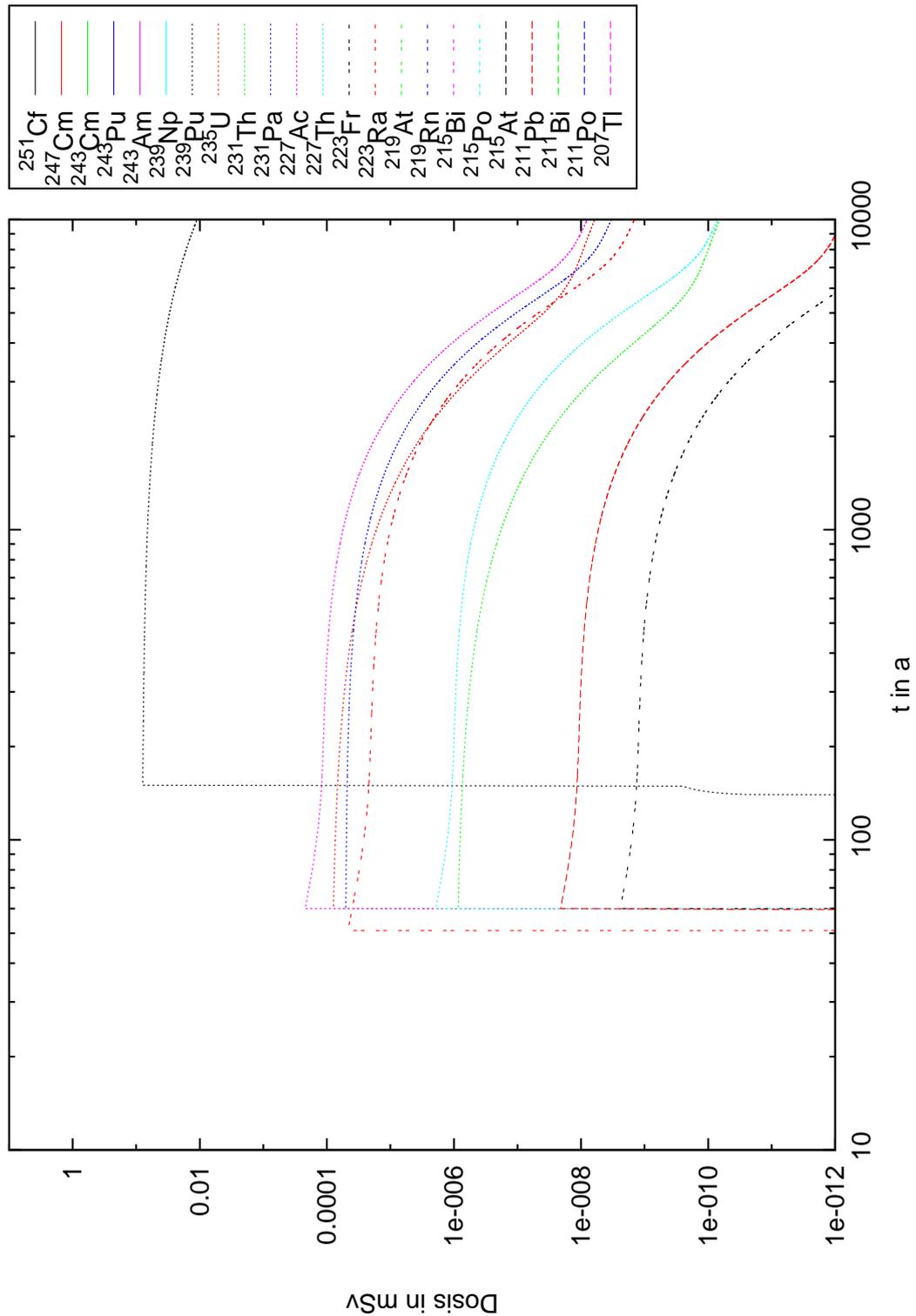


Abbildung B.7: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

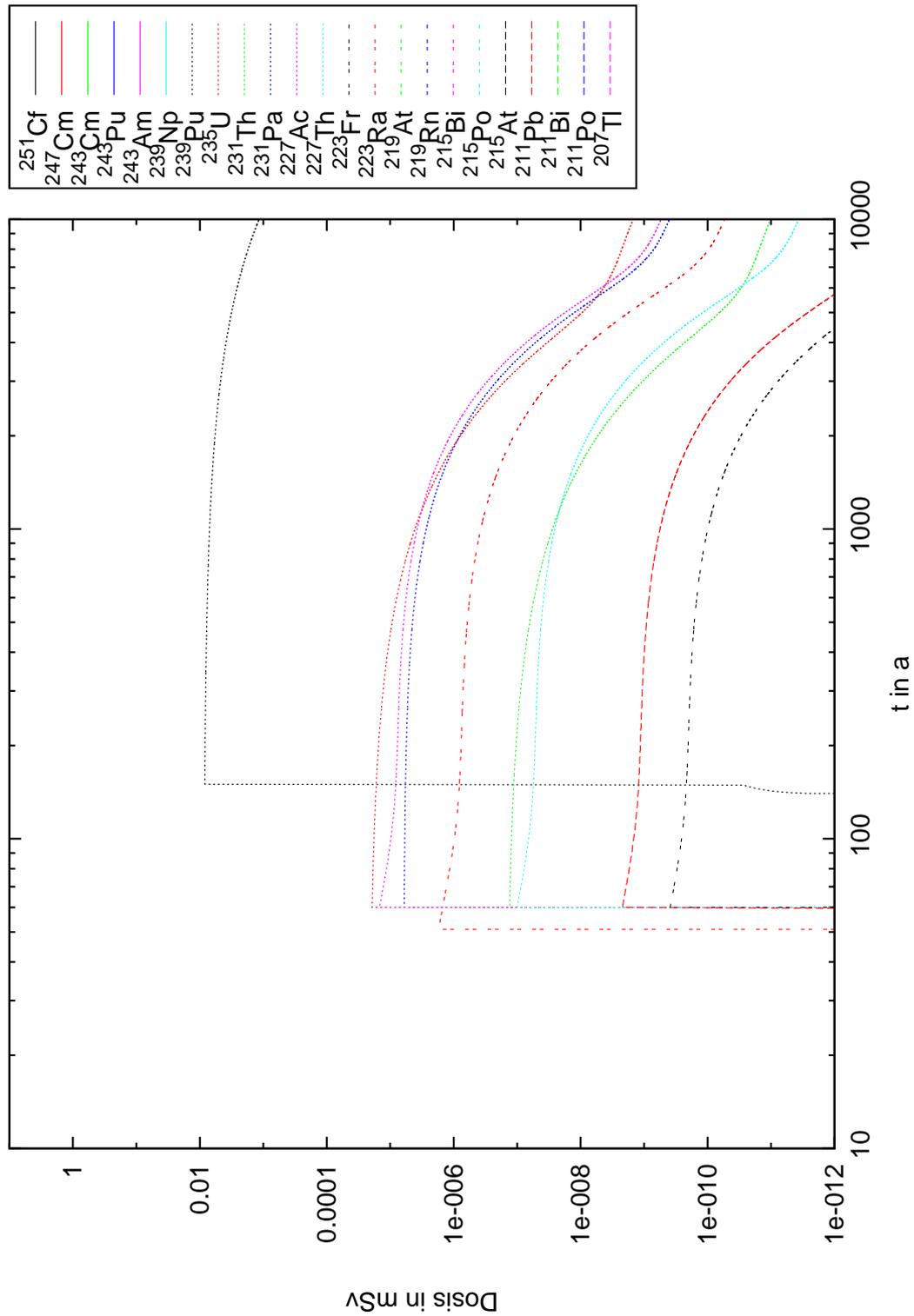


Abbildung B.8: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

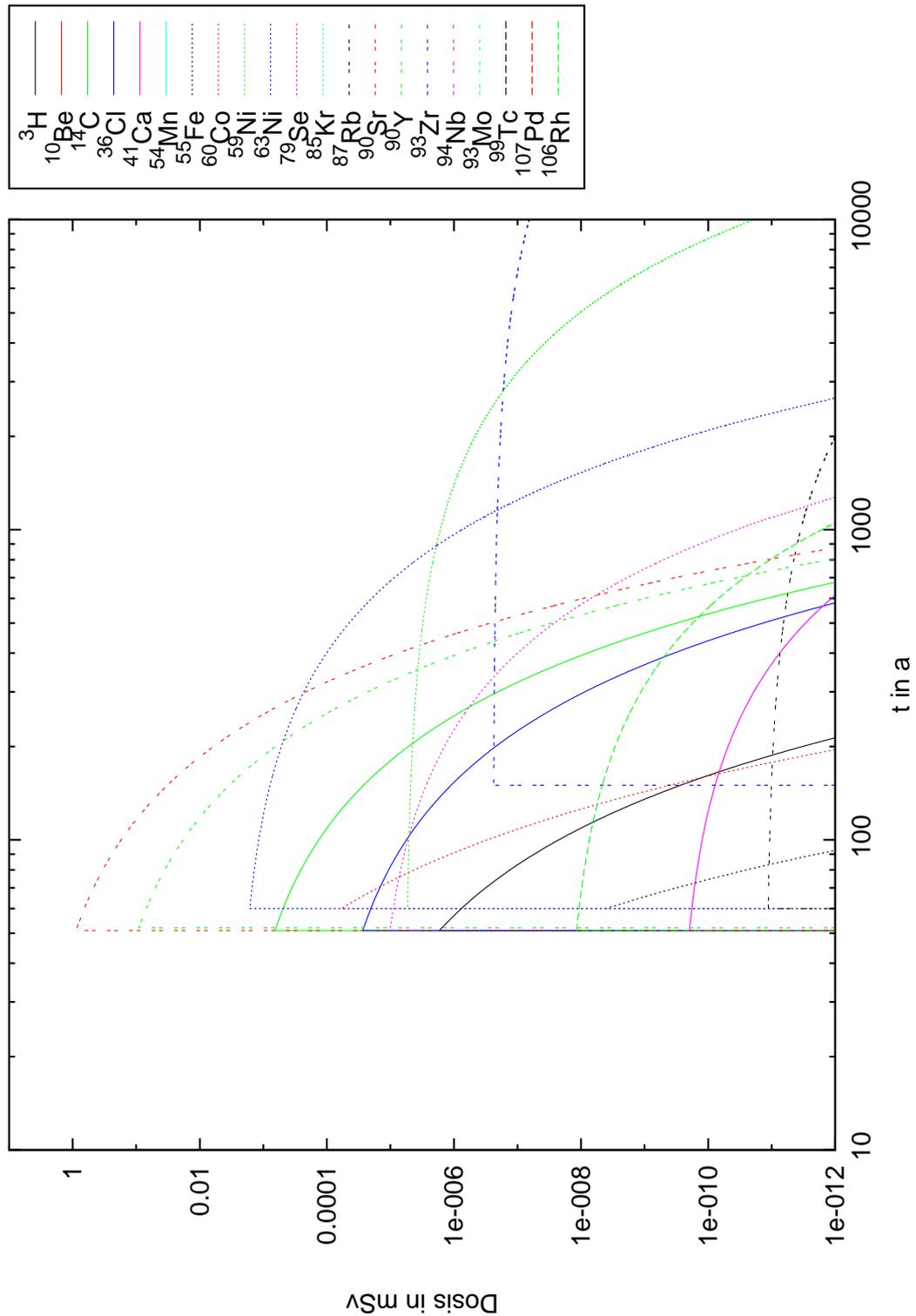


Abbildung B.9: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

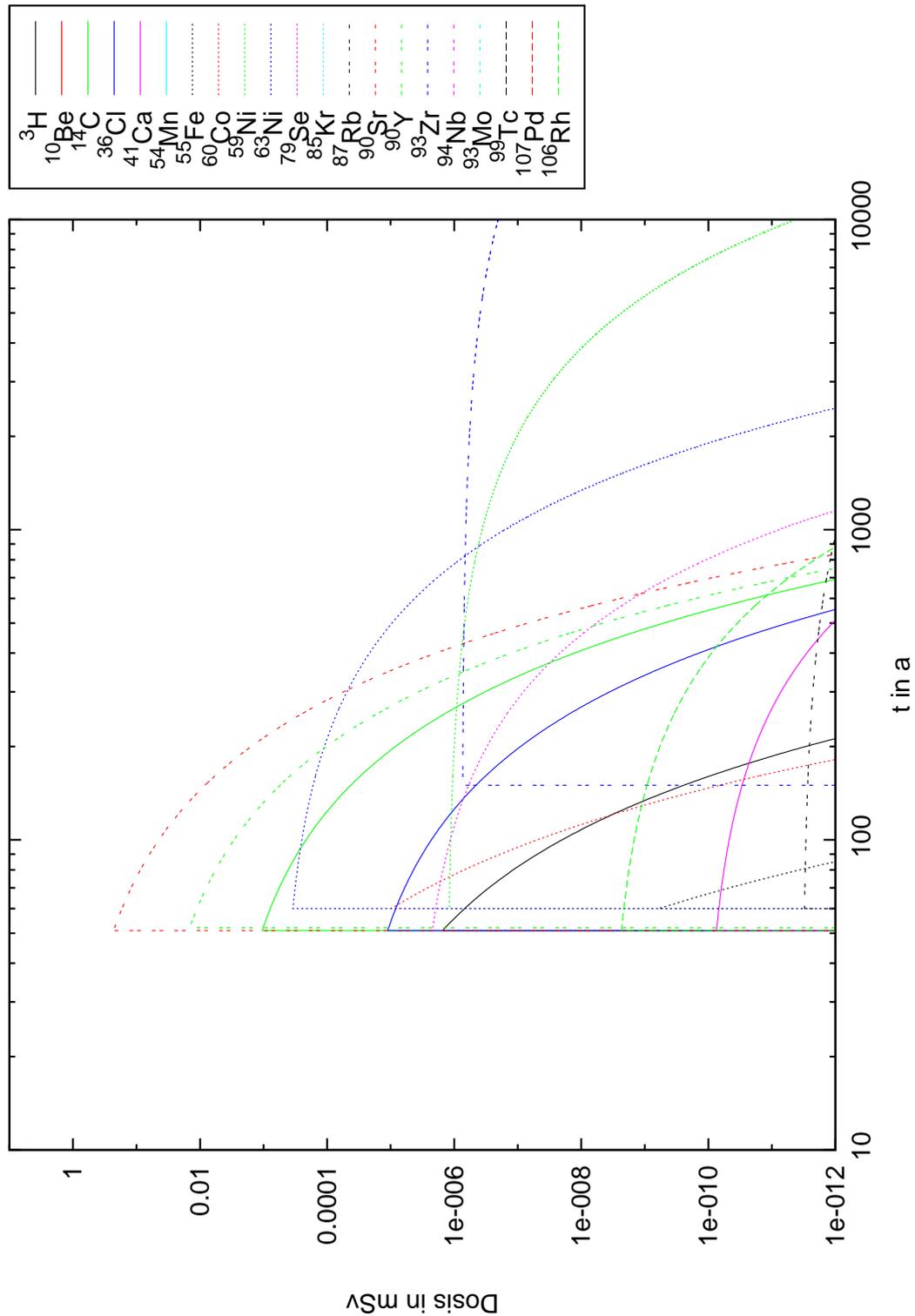


Abbildung B.10: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

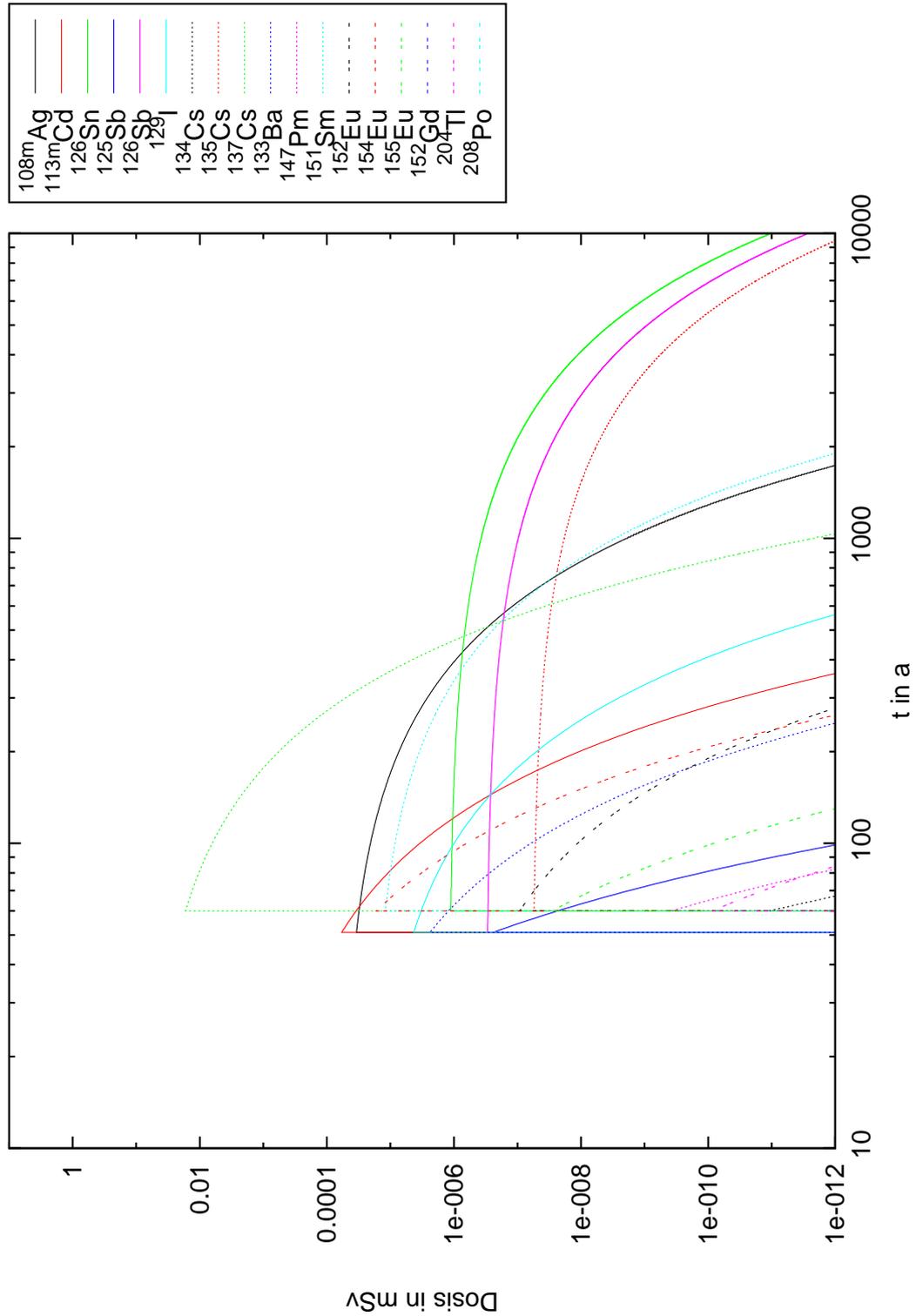


Abbildung B.11: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

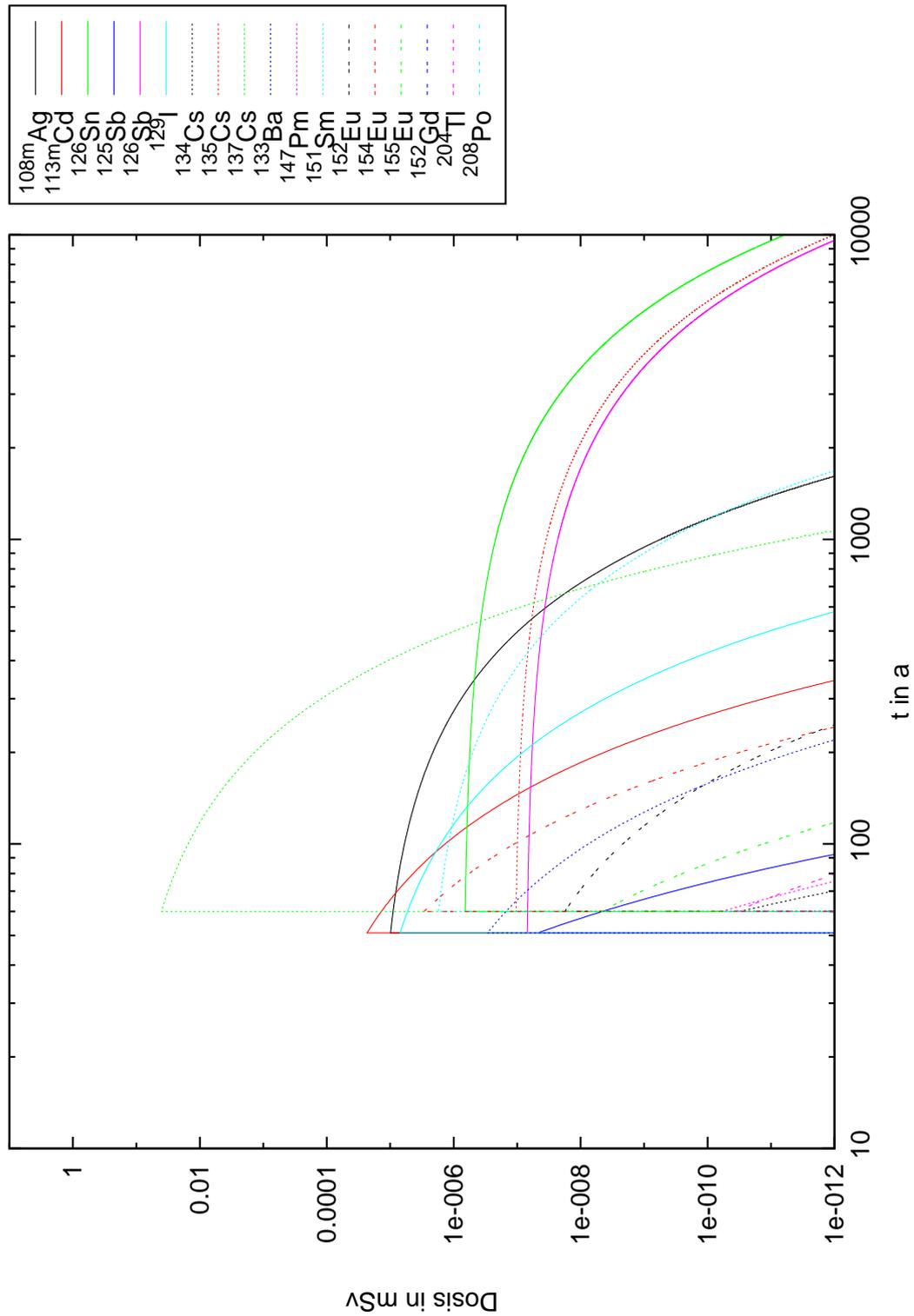


Abbildung B.12: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [BfS95].

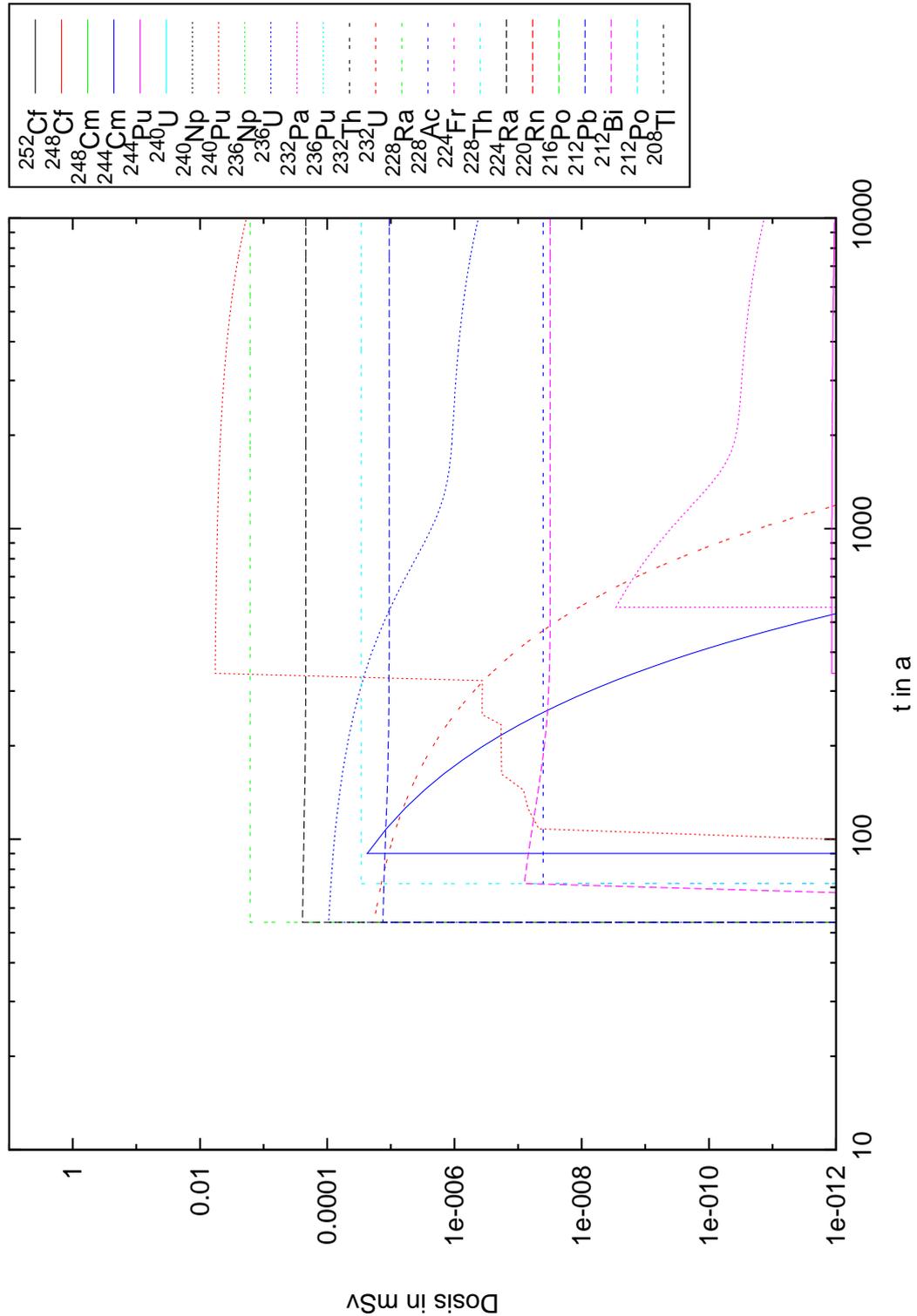


Abbildung B.13: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

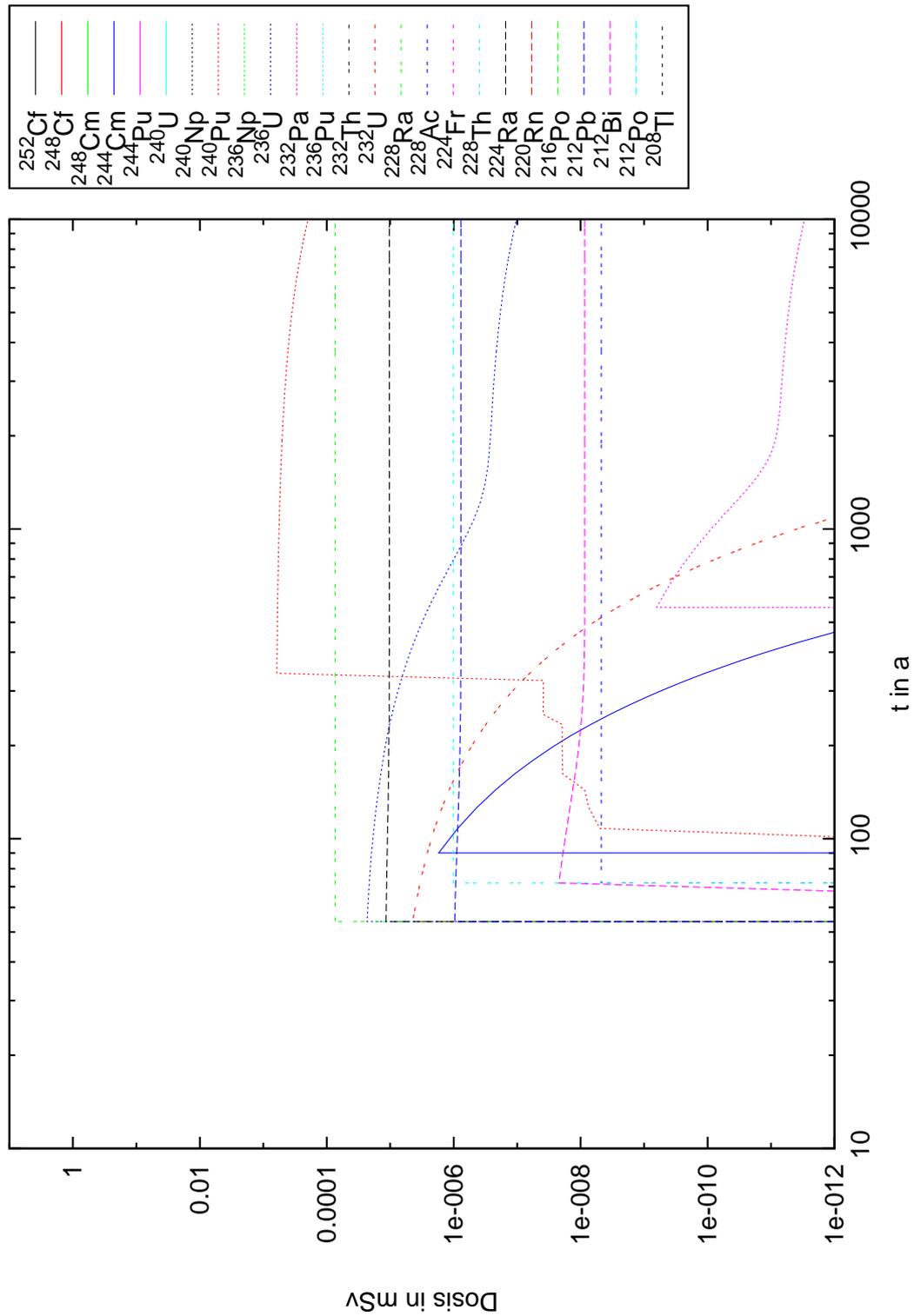


Abbildung B.14: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

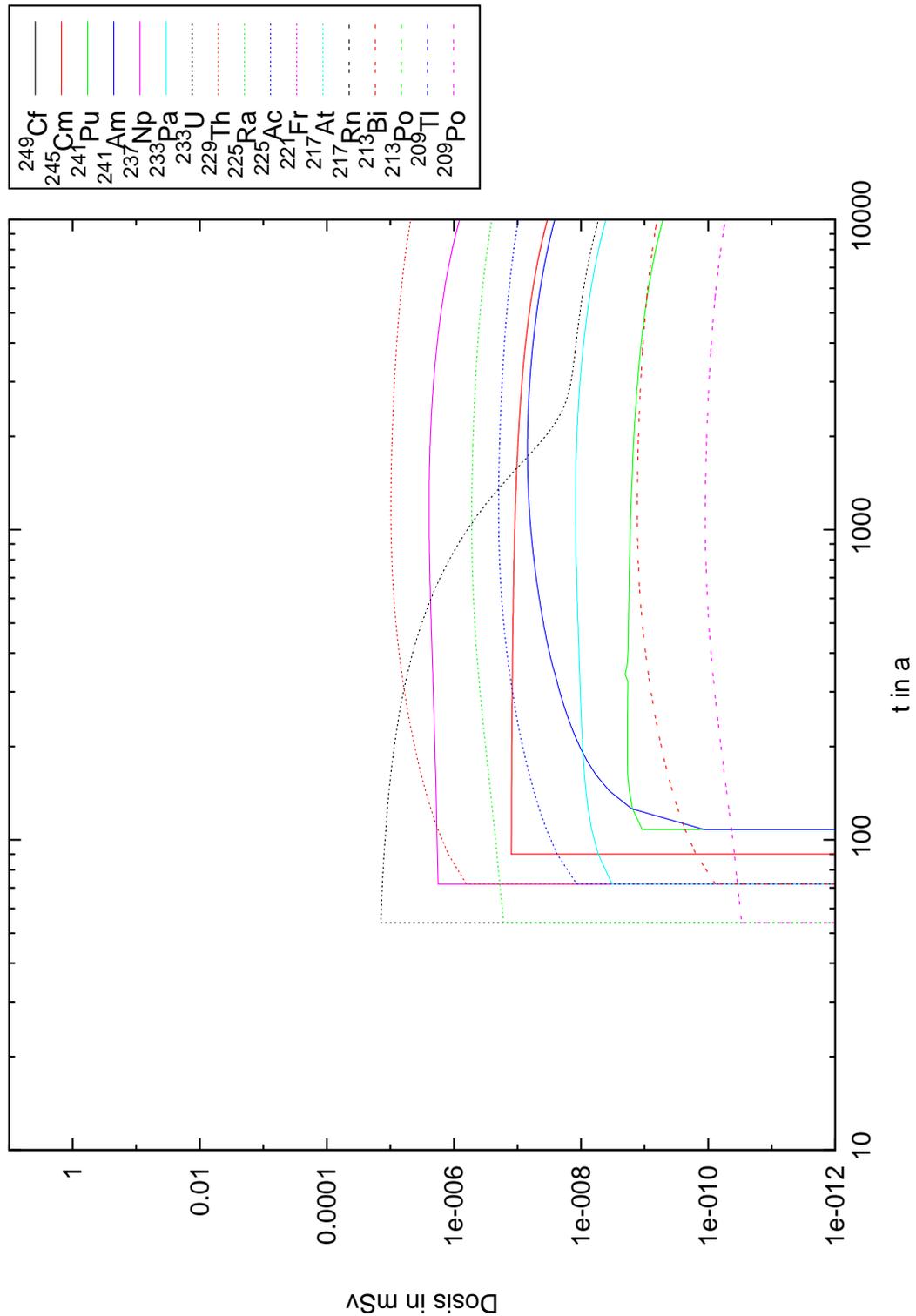


Abbildung B.15: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

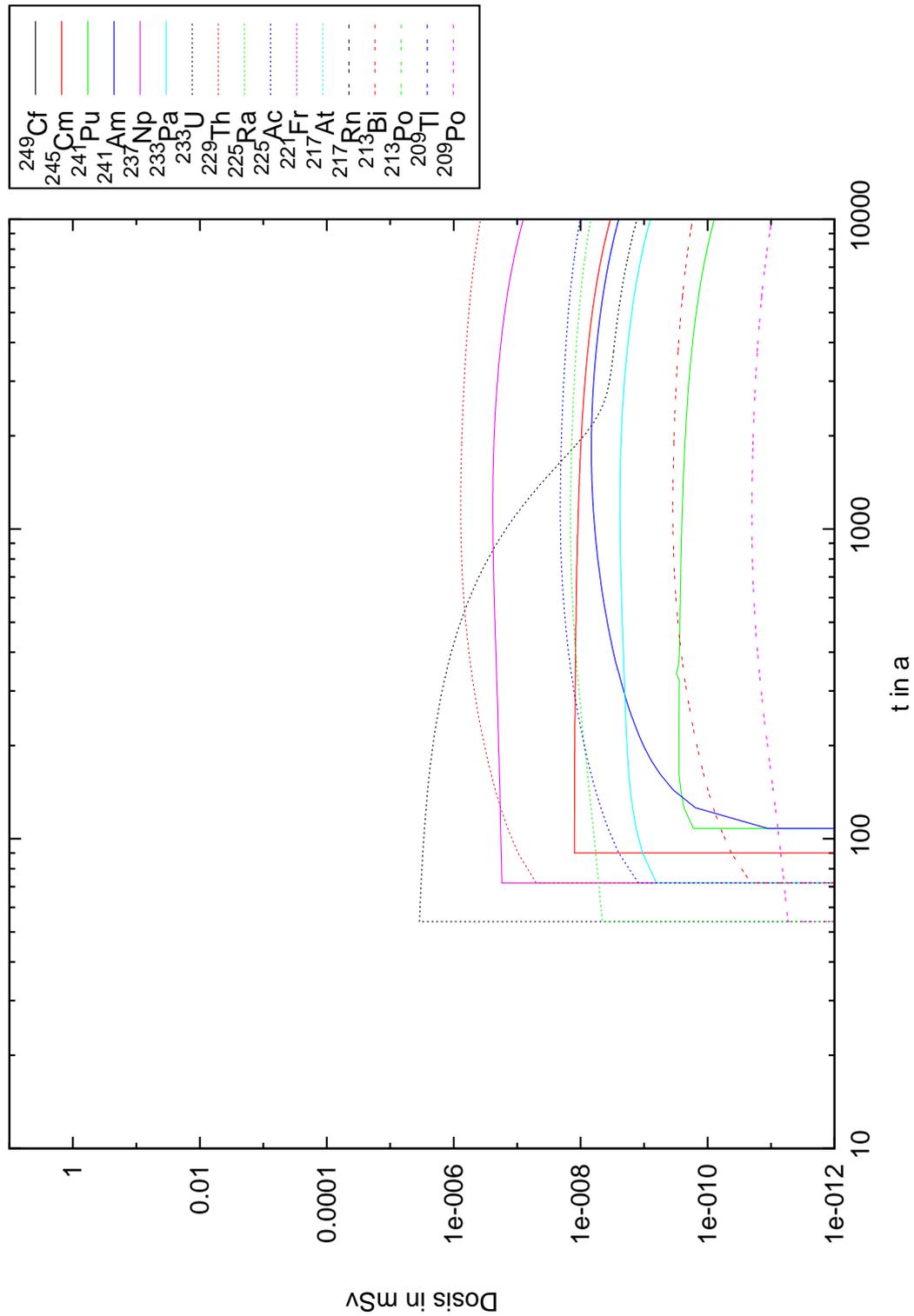


Abbildung B.16: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

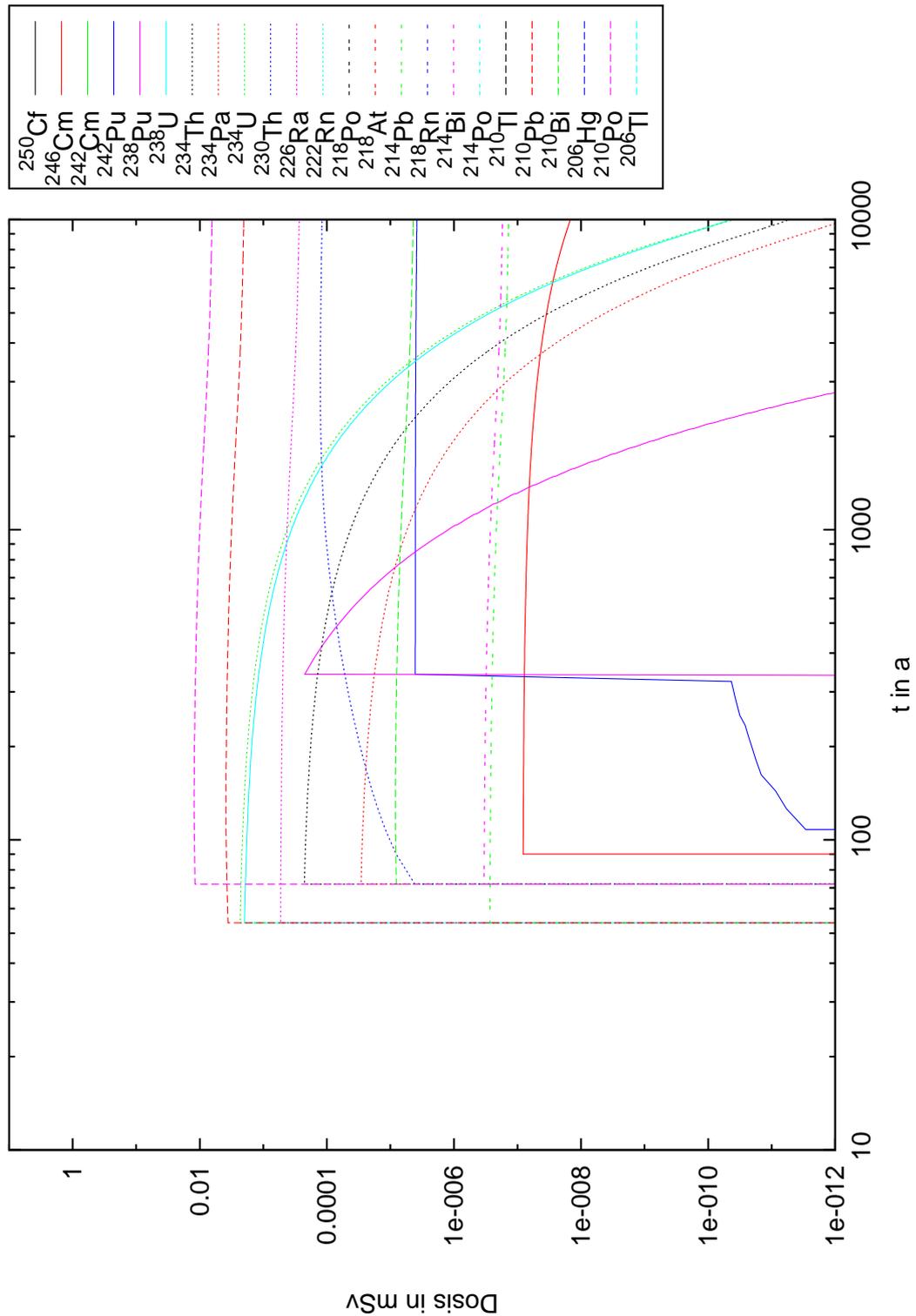


Abbildung B.17: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

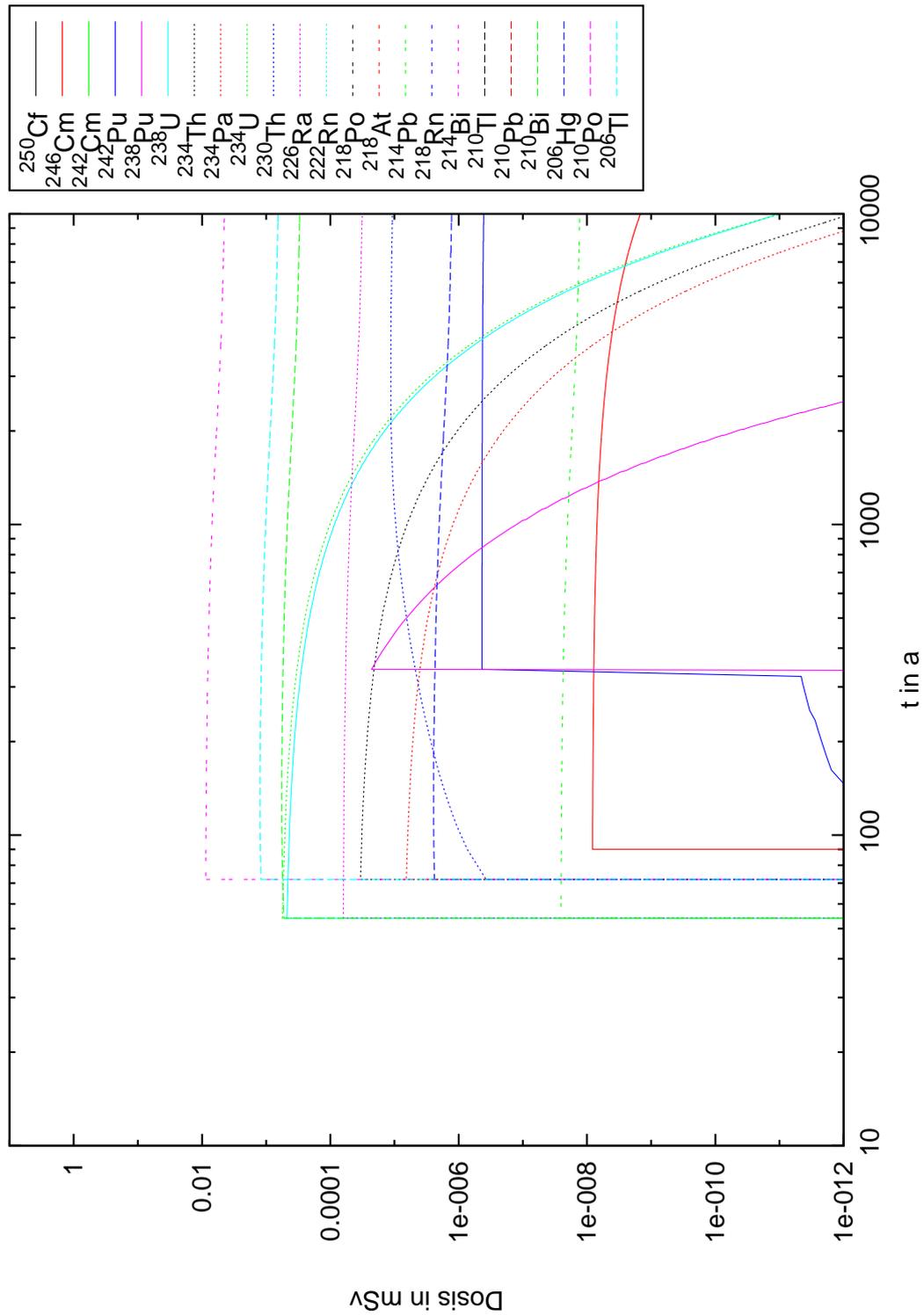


Abbildung B.18: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

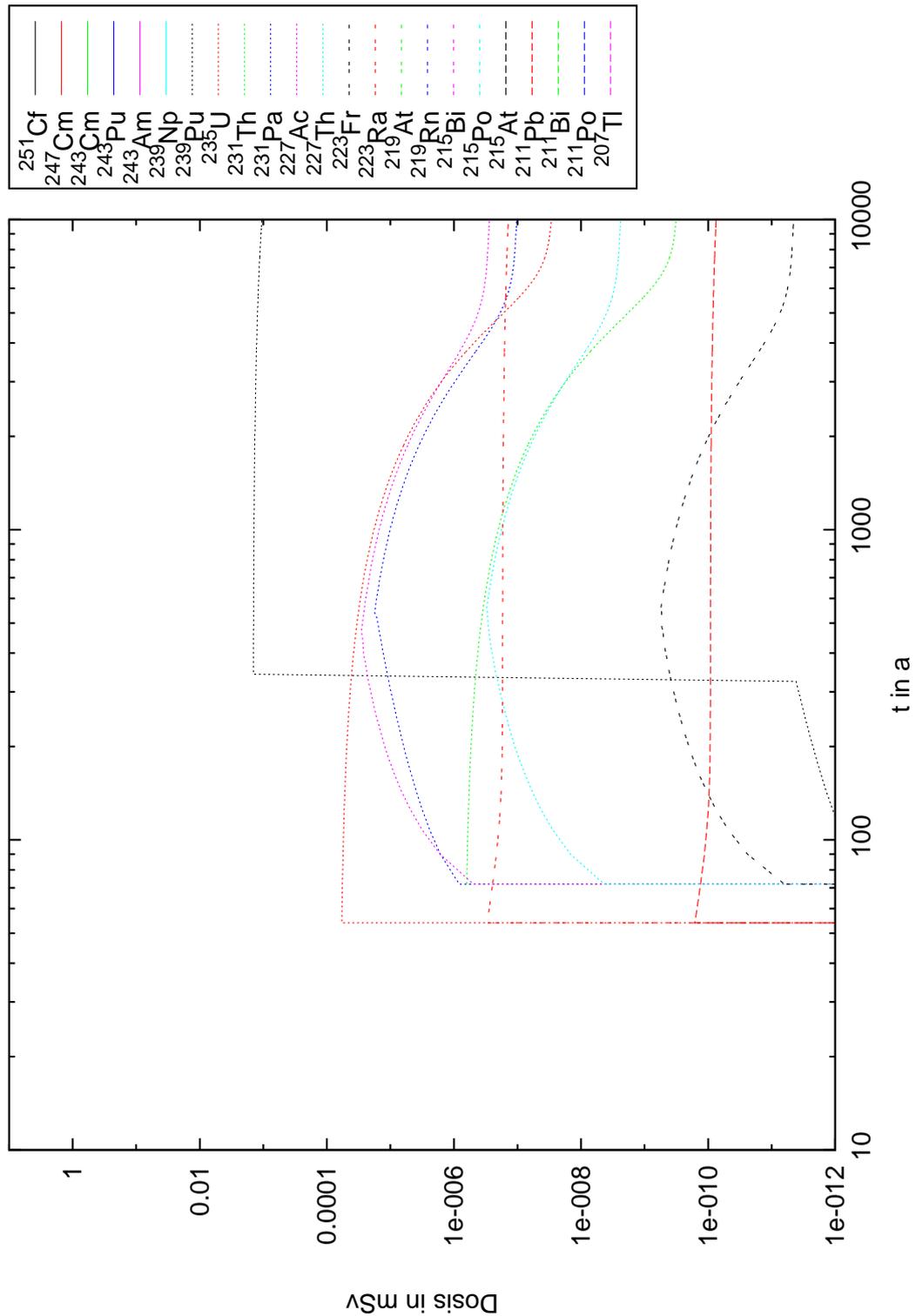


Abbildung B.19: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

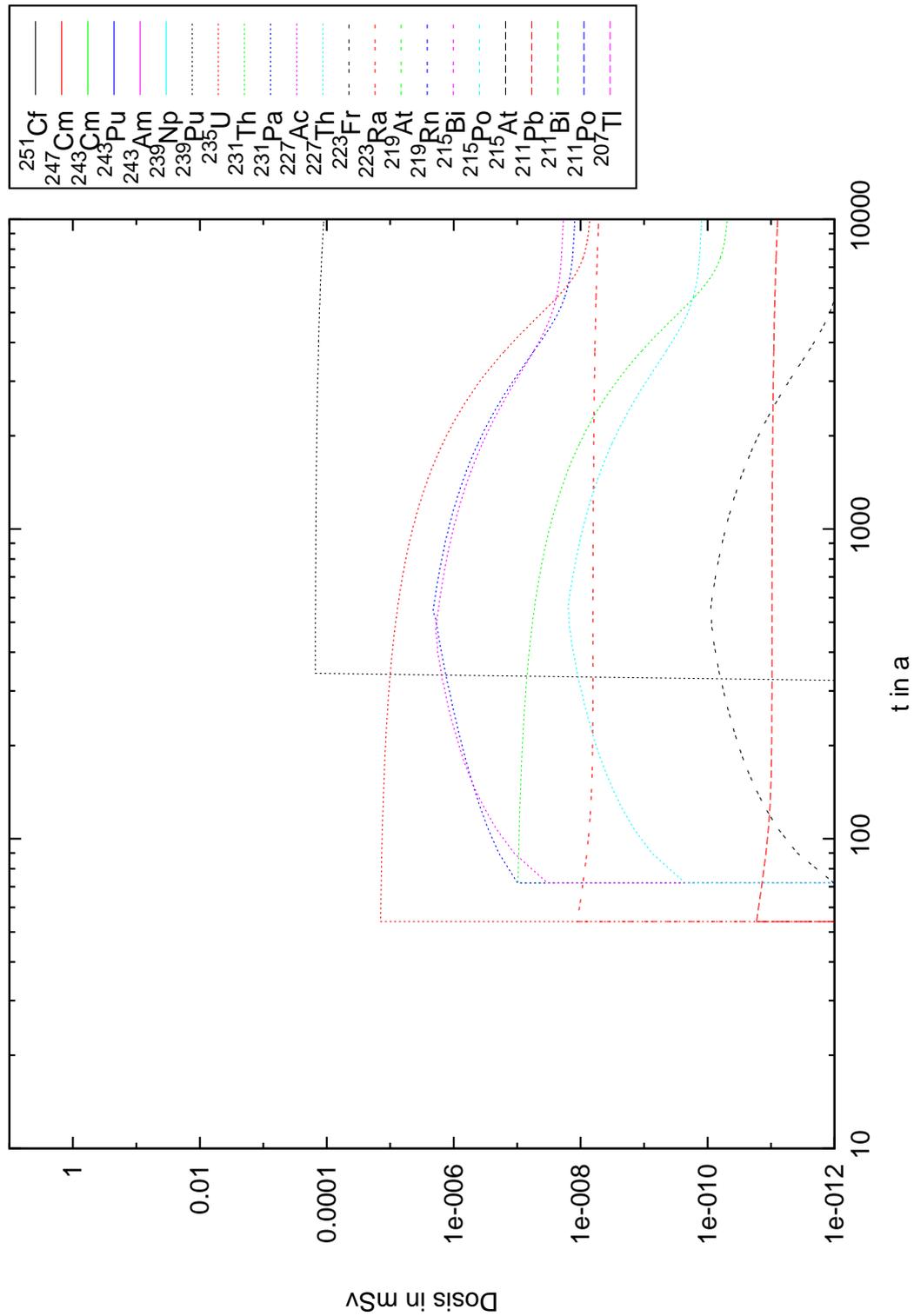


Abbildung B.20: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

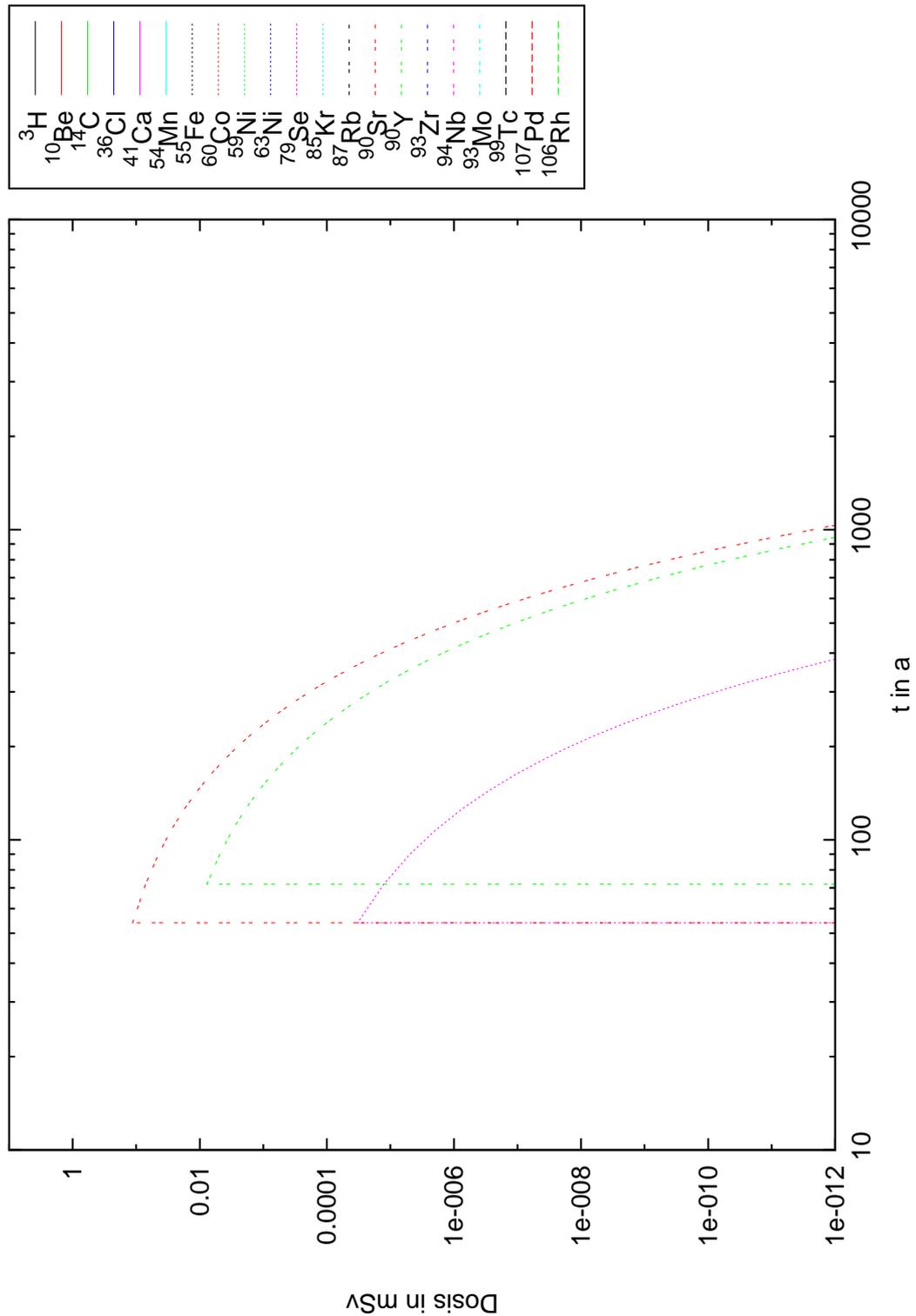


Abbildung B.21: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

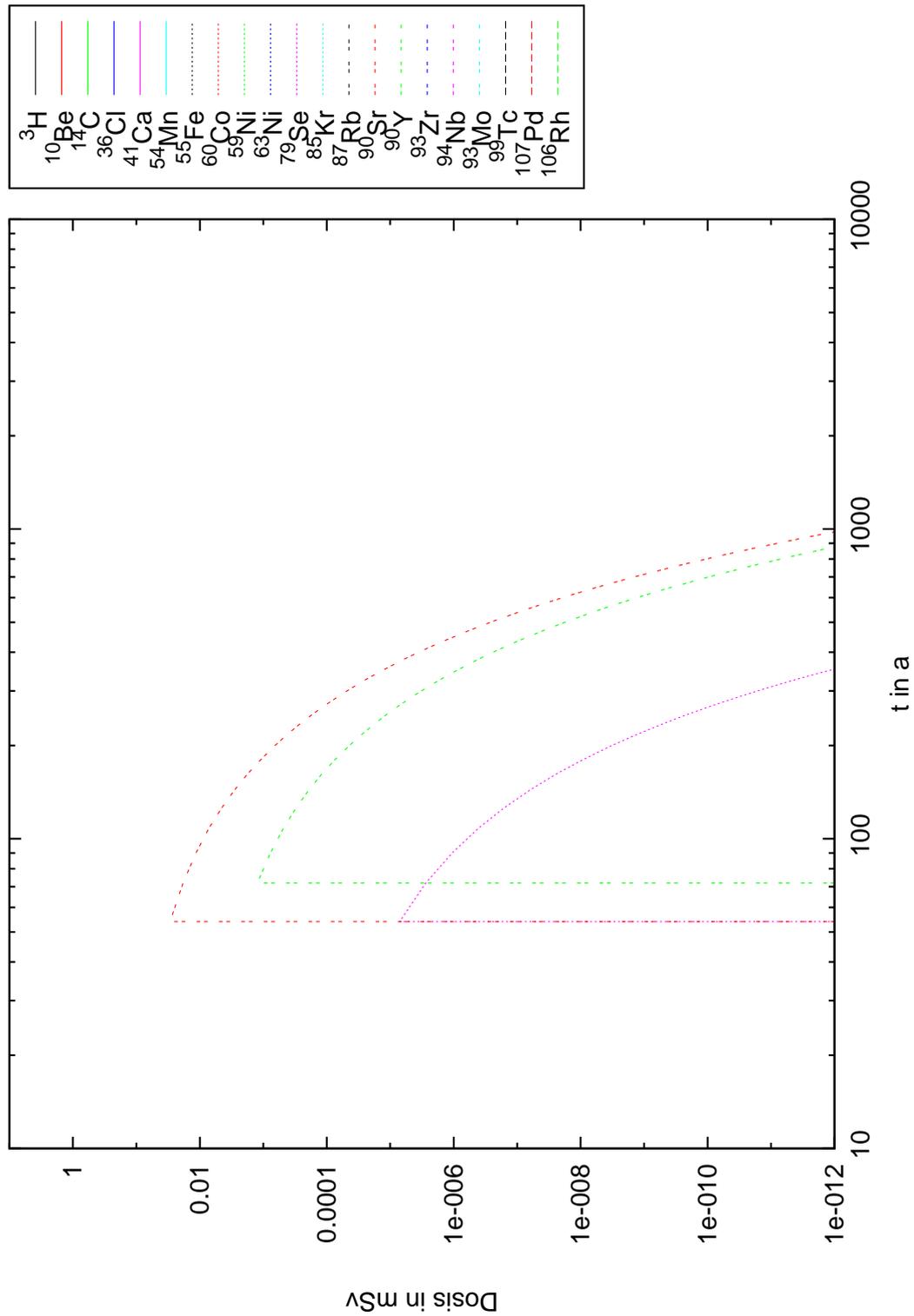


Abbildung B.22: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

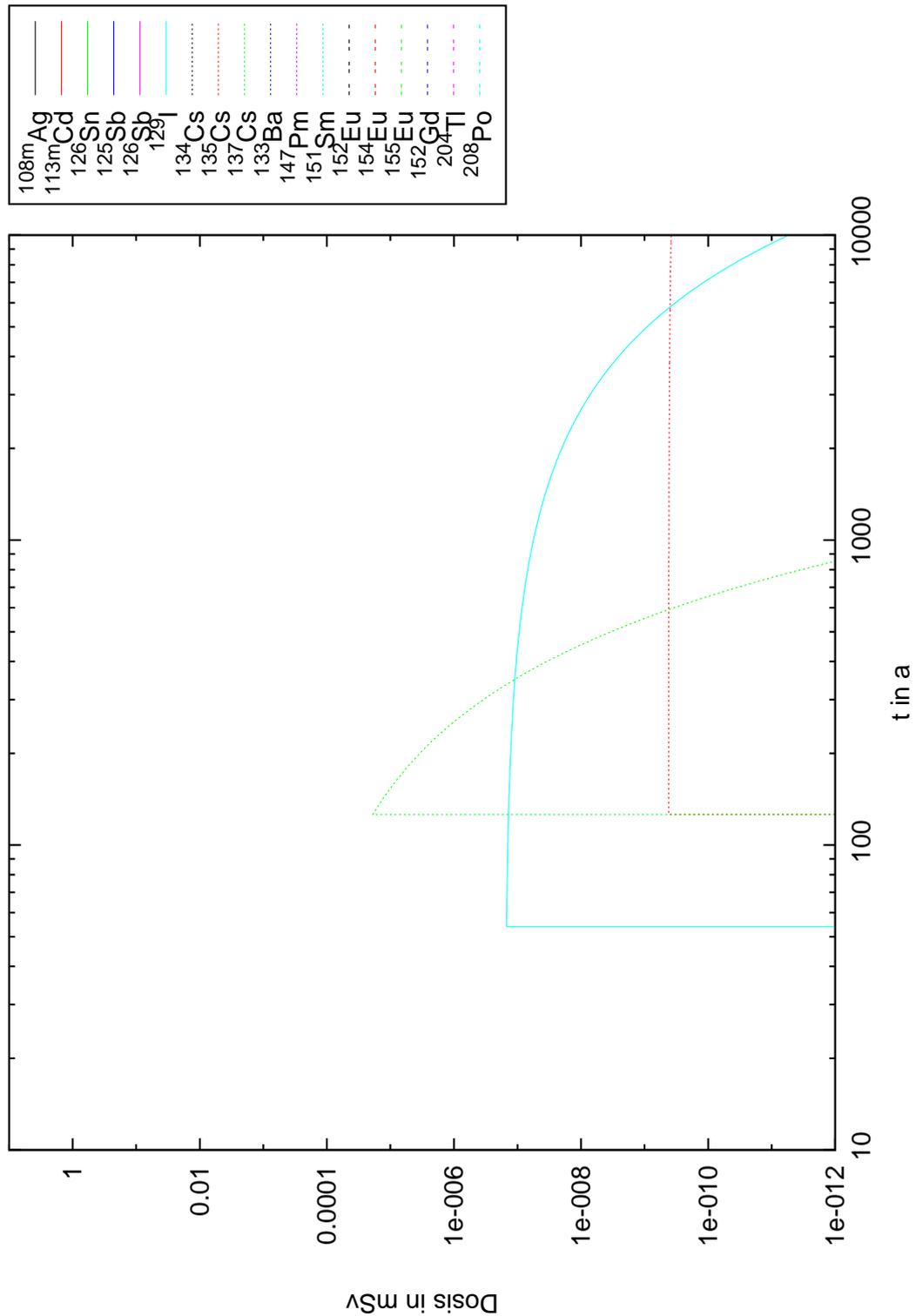


Abbildung B.23: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

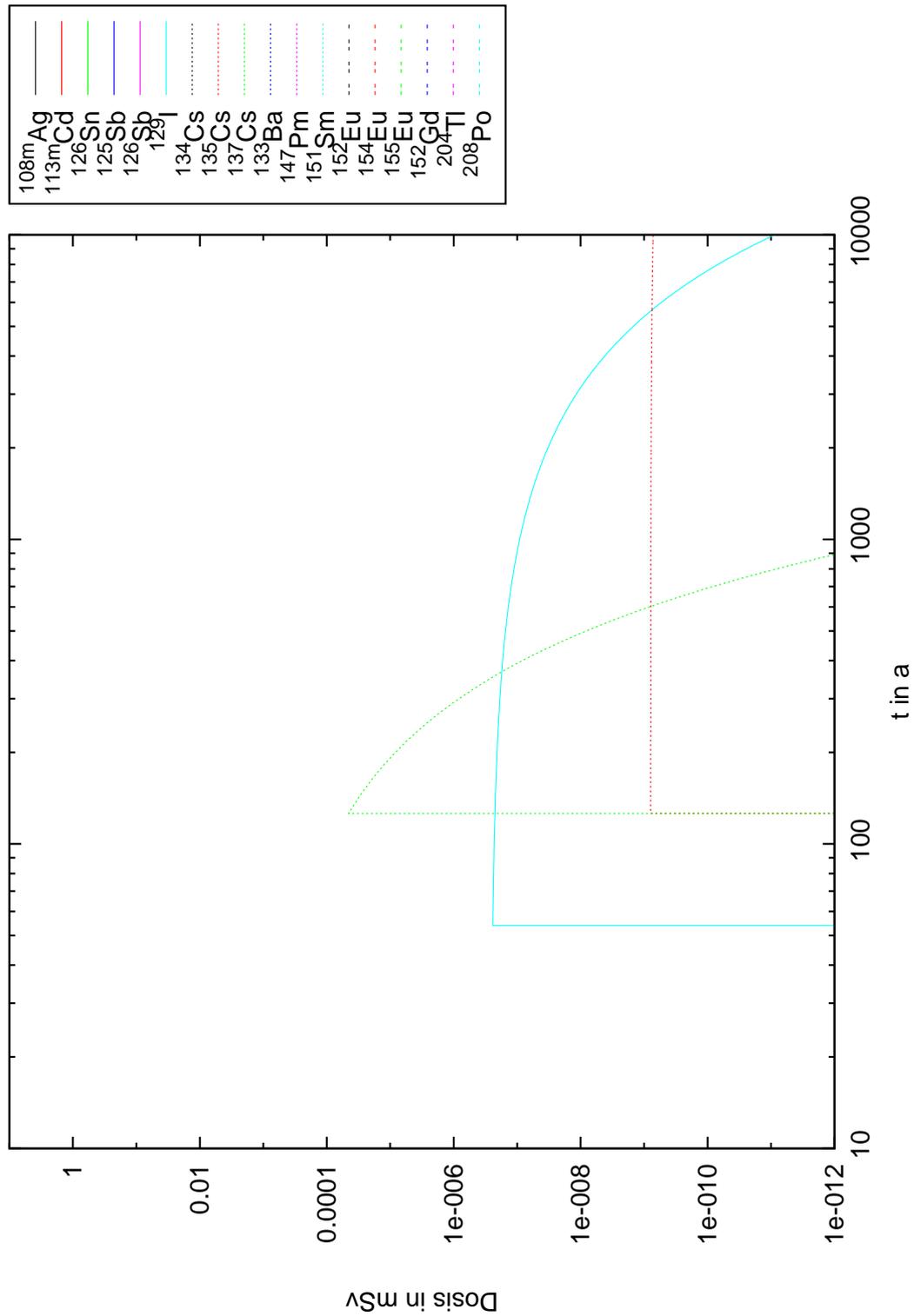


Abbildung B.24: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

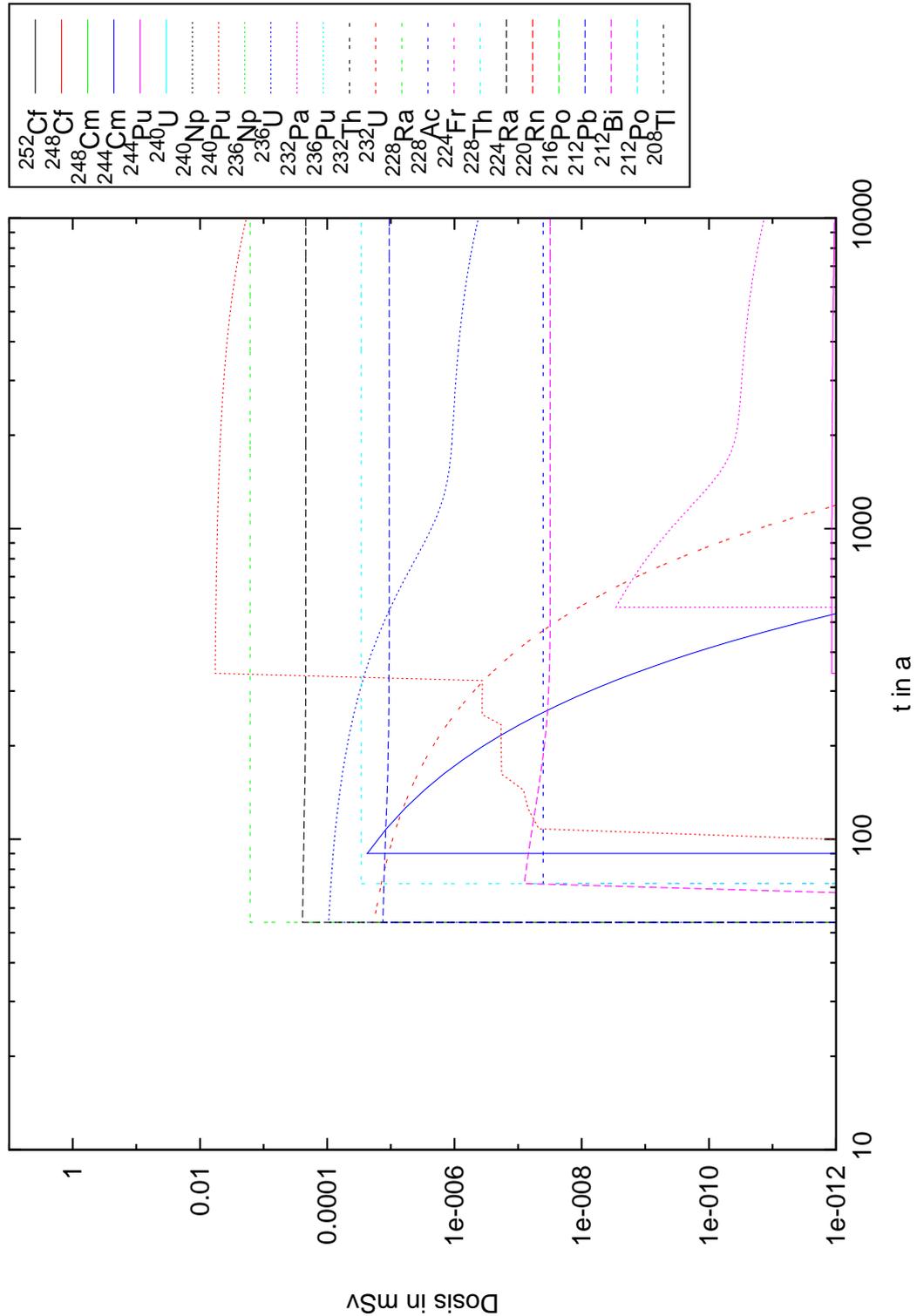


Abbildung B.25: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

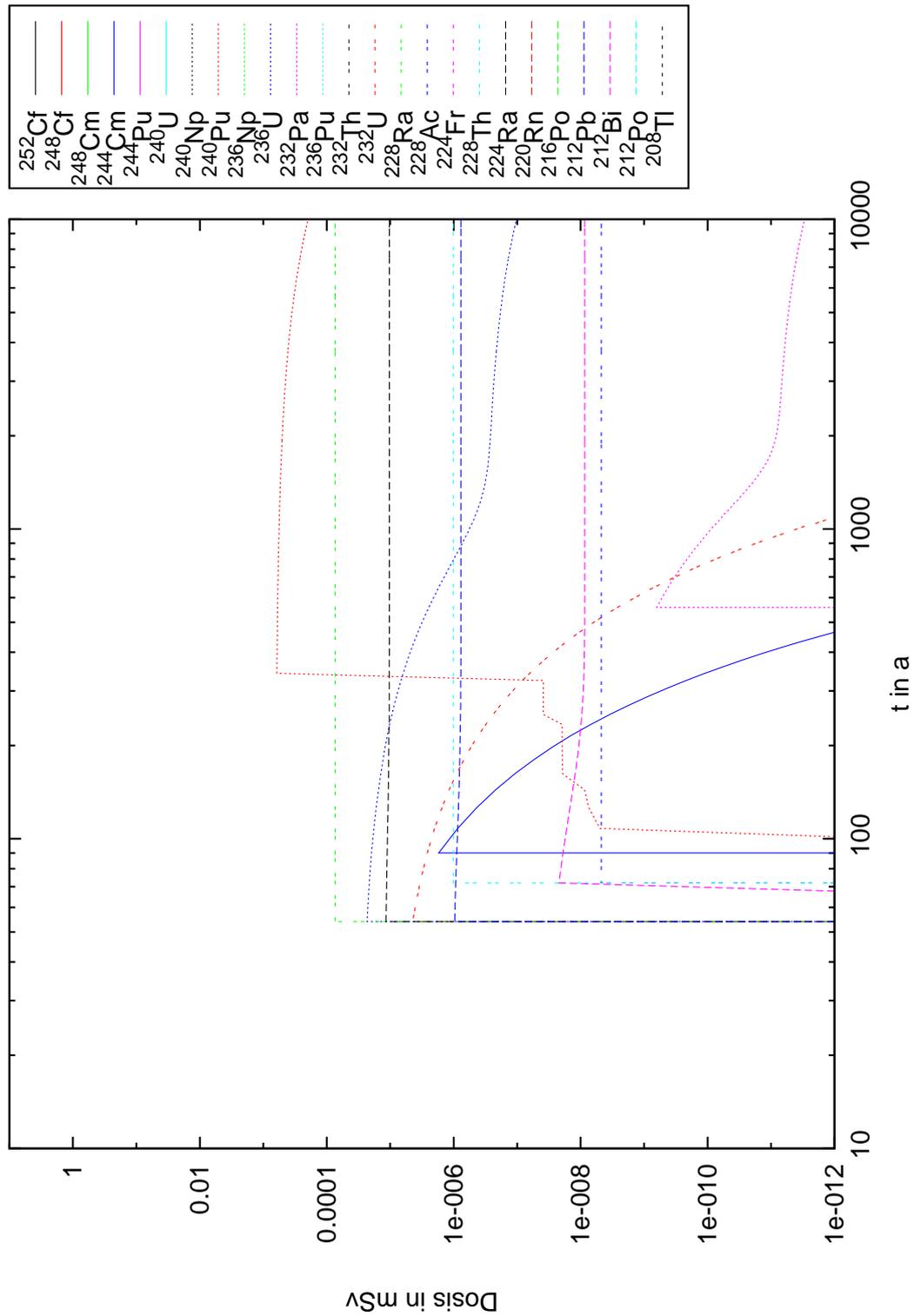


Abbildung B.26: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

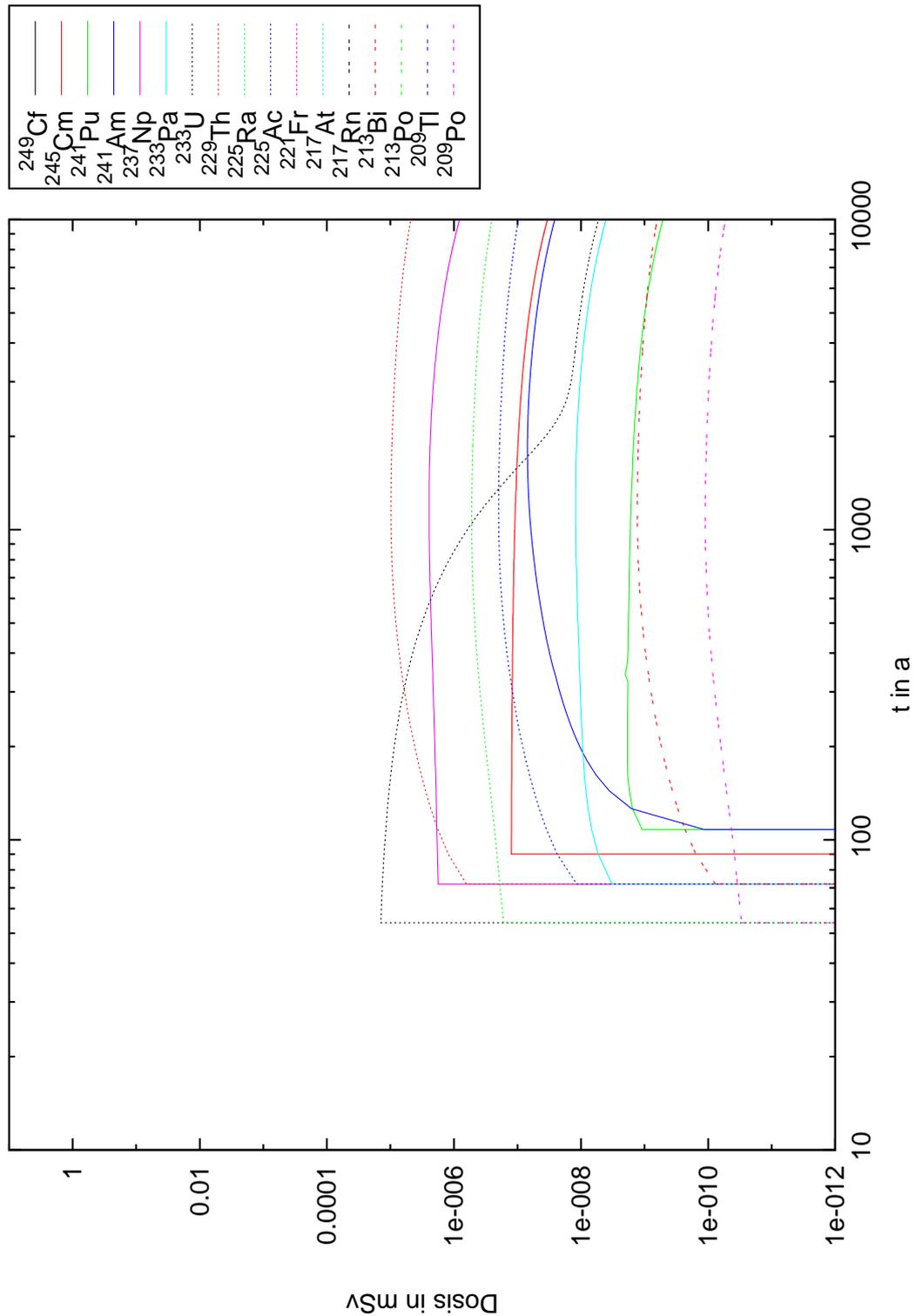


Abbildung B.27: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

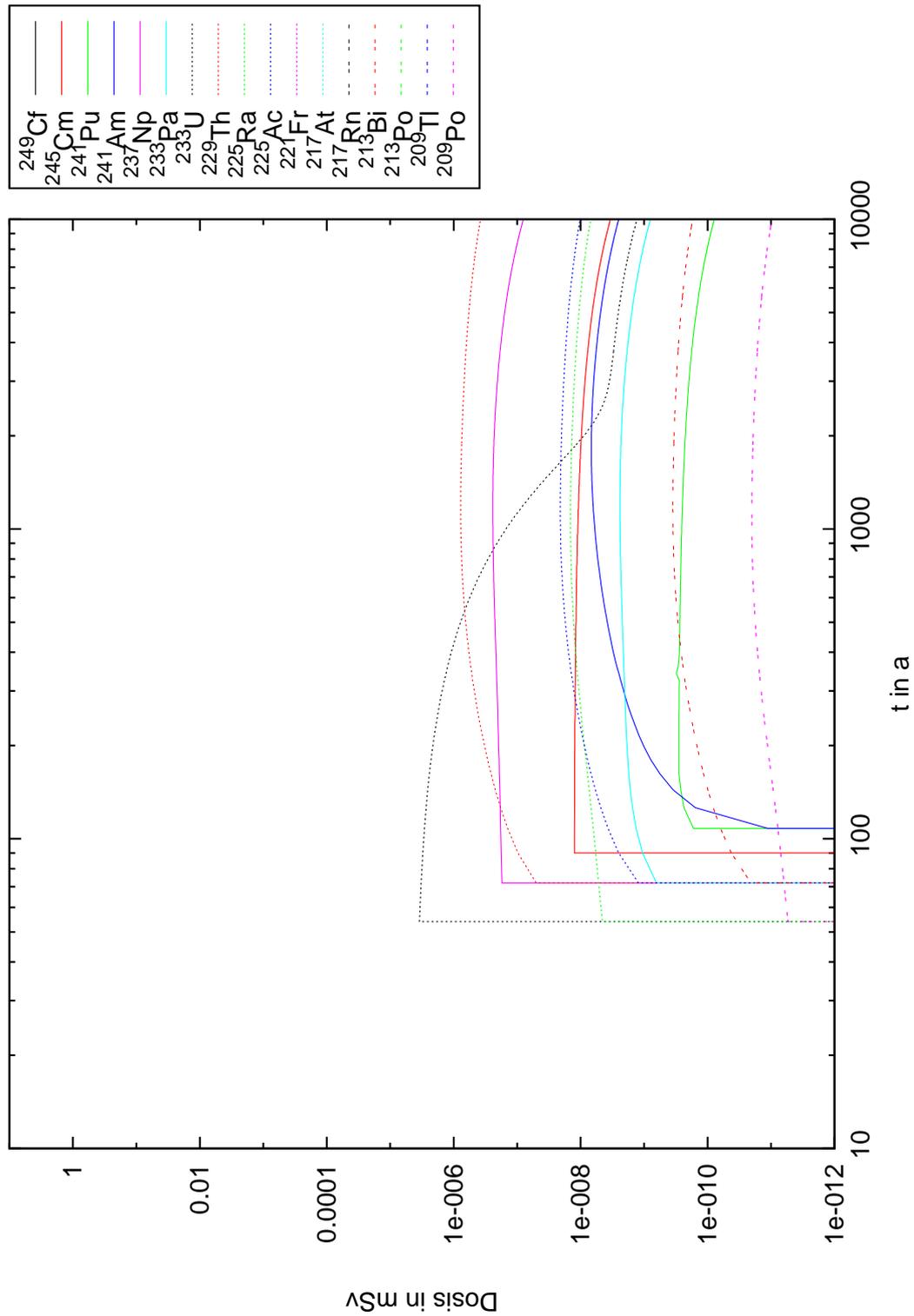


Abbildung B.28: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

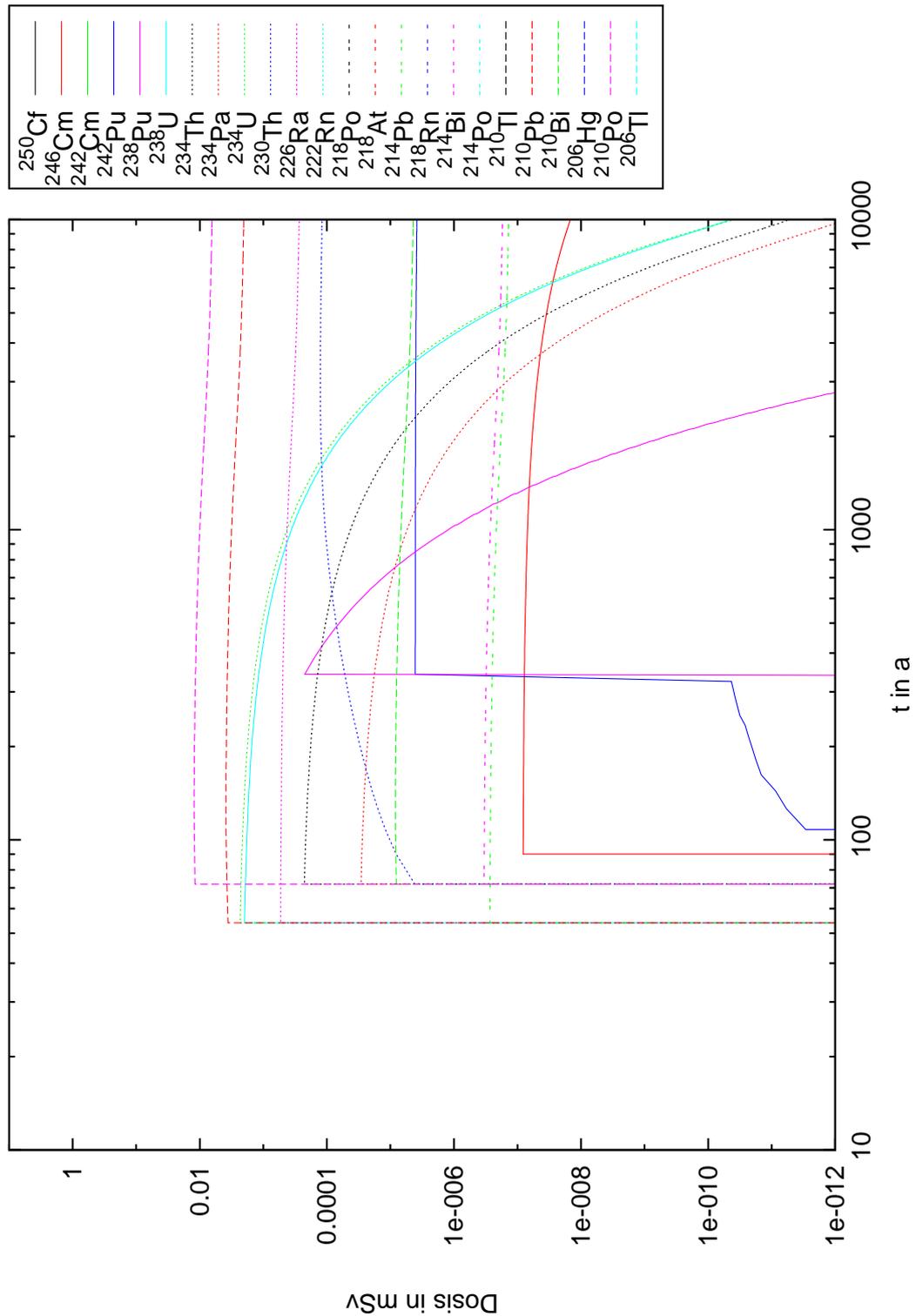


Abbildung B.29: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

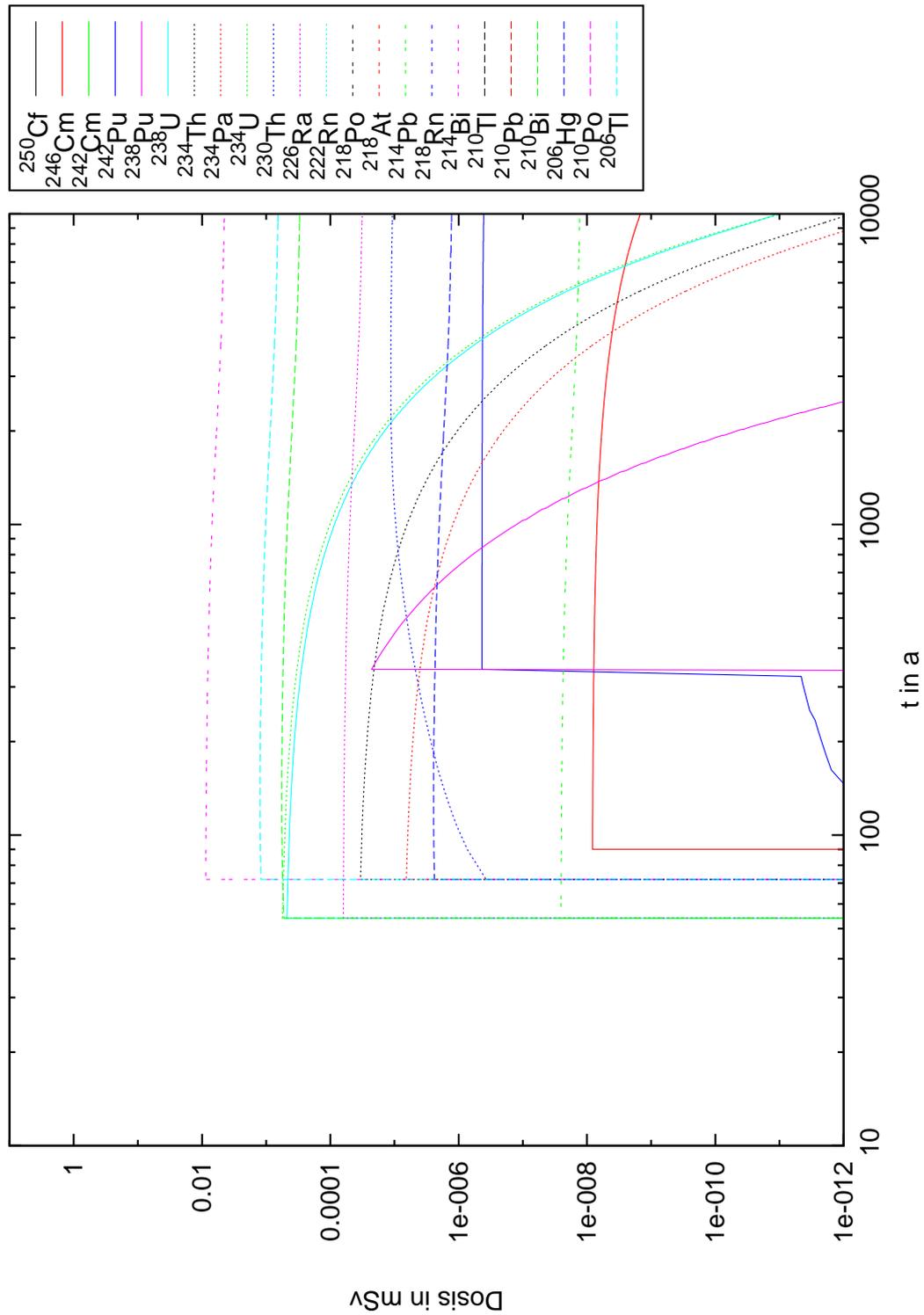


Abbildung B.30: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

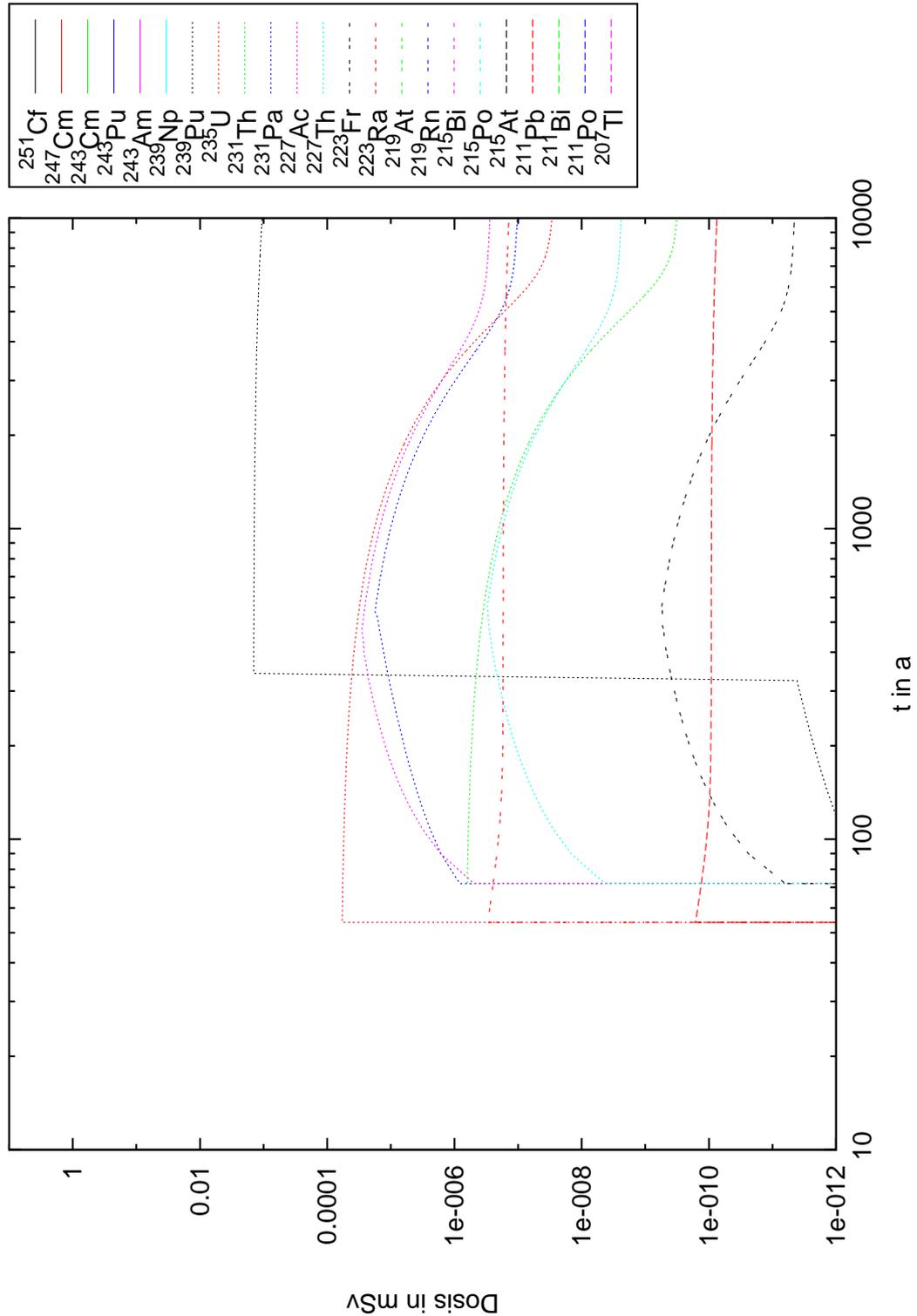


Abbildung B.31: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

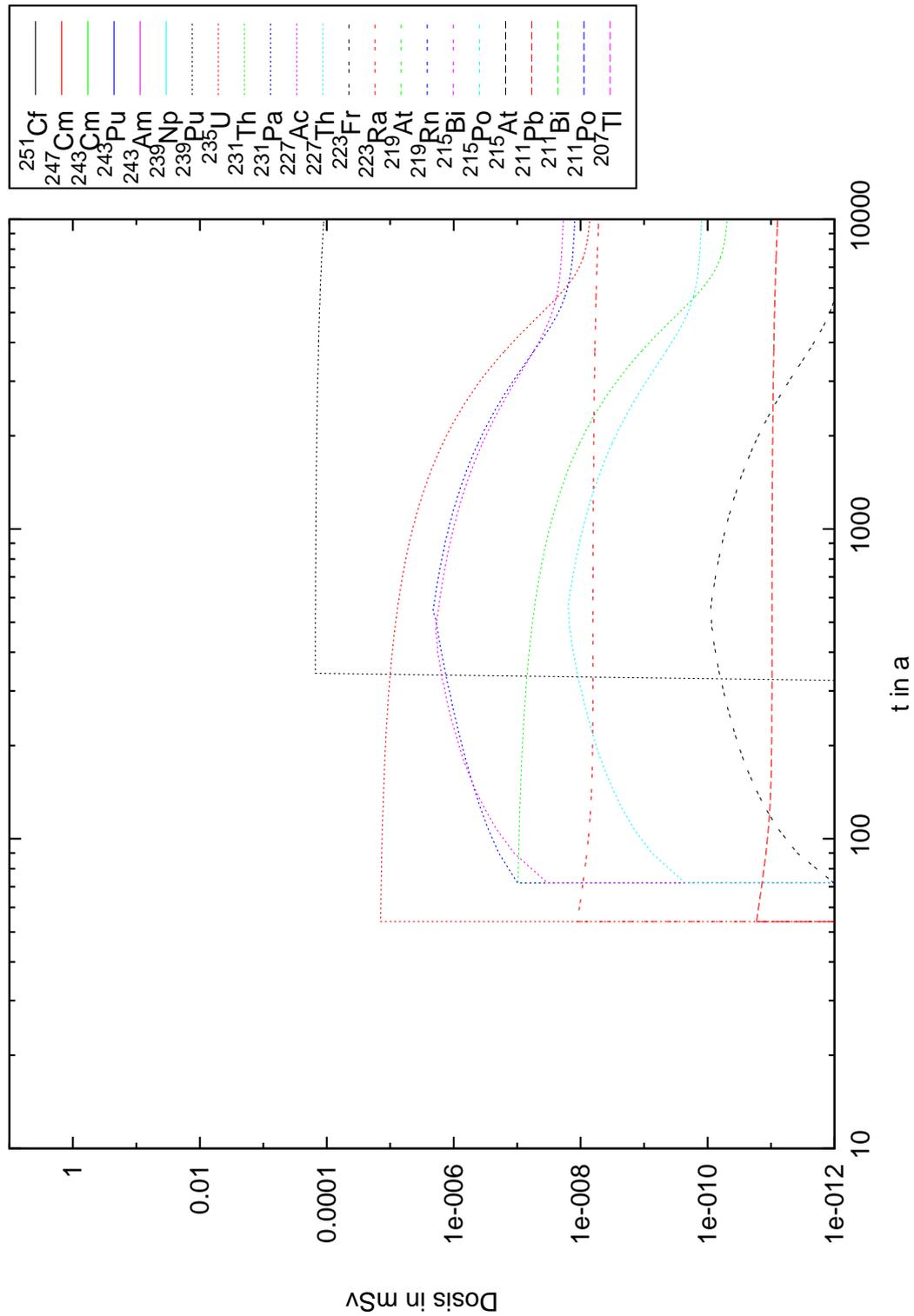


Abbildung B.32: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

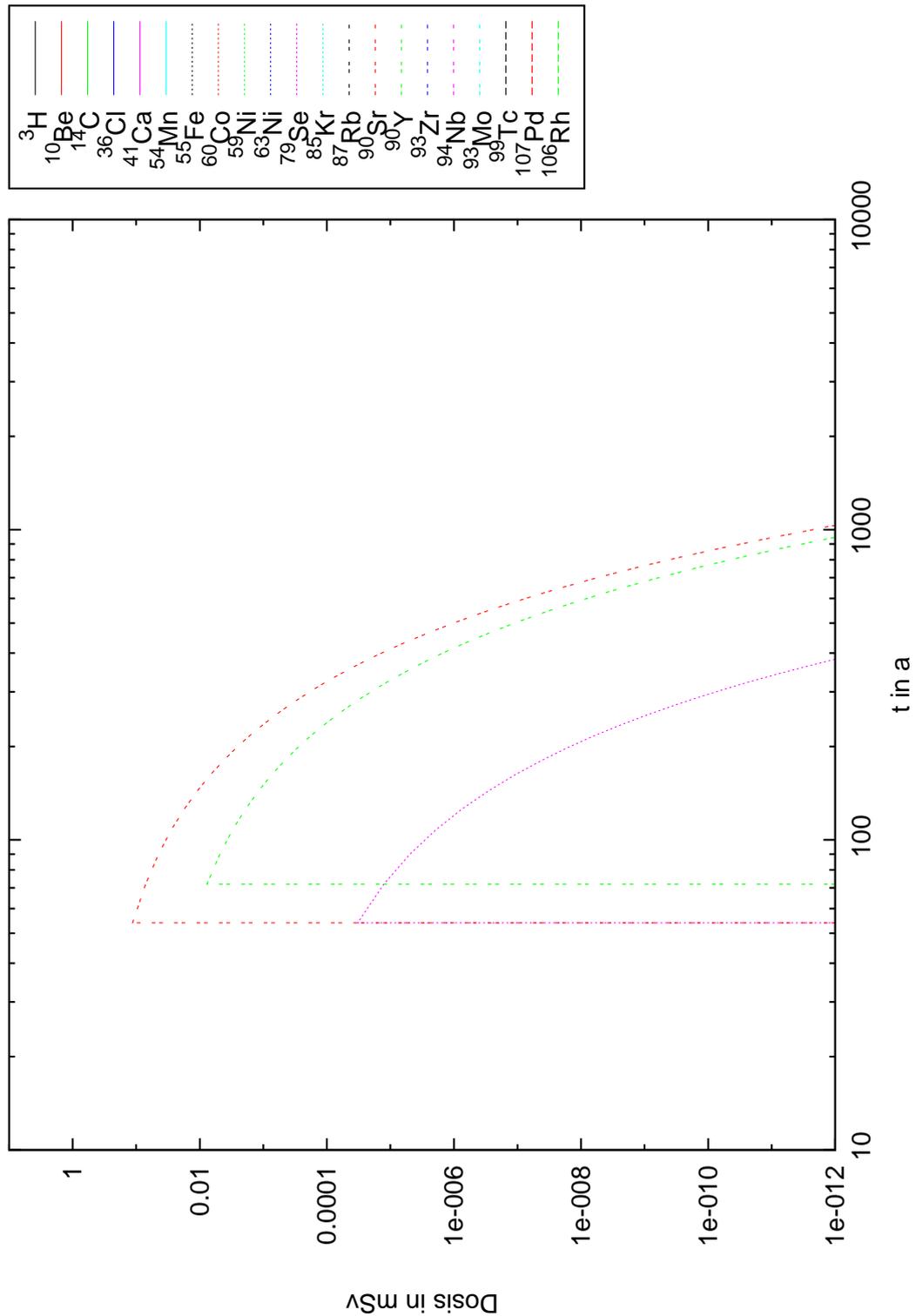


Abbildung B.33: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

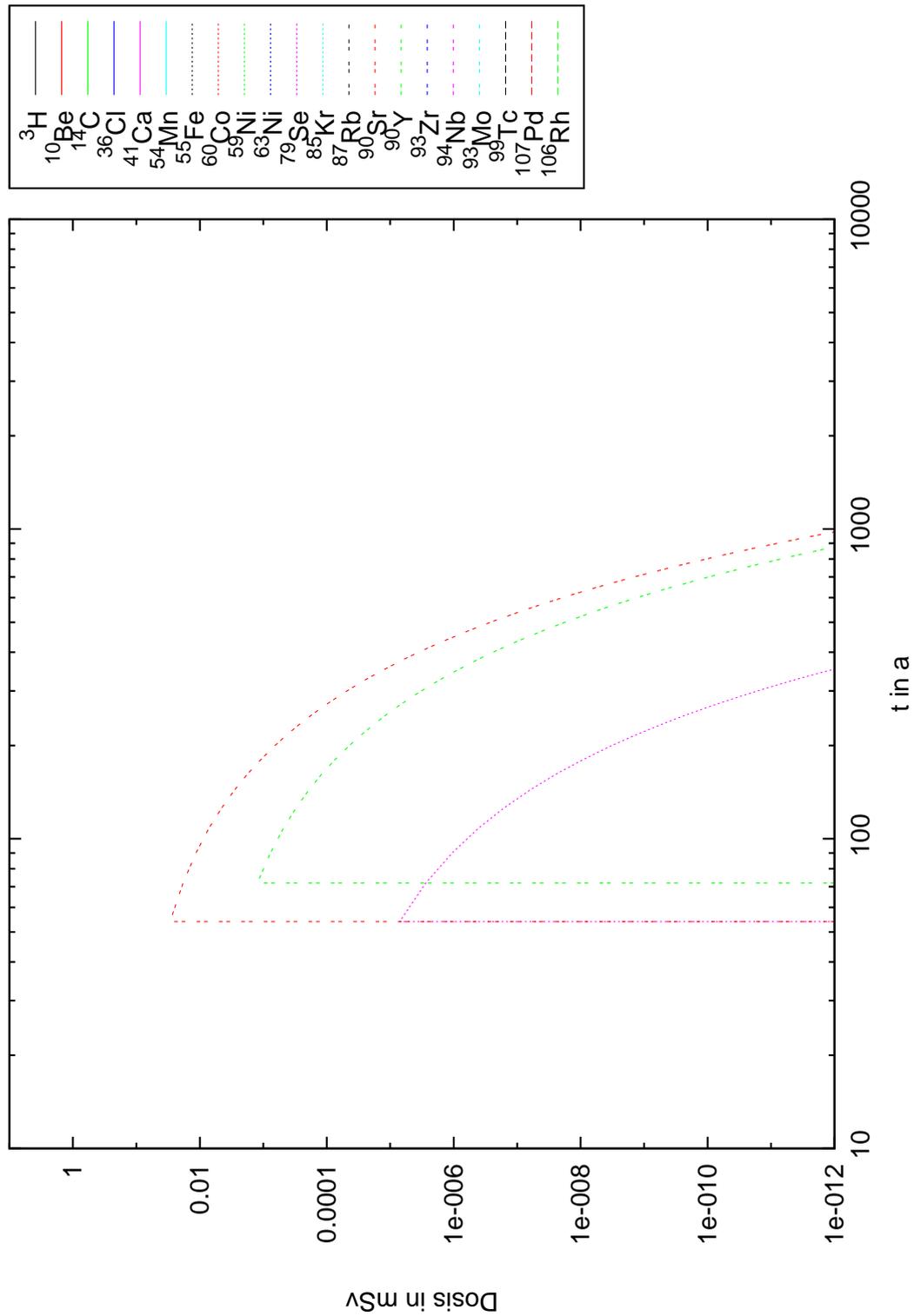


Abbildung B.34: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

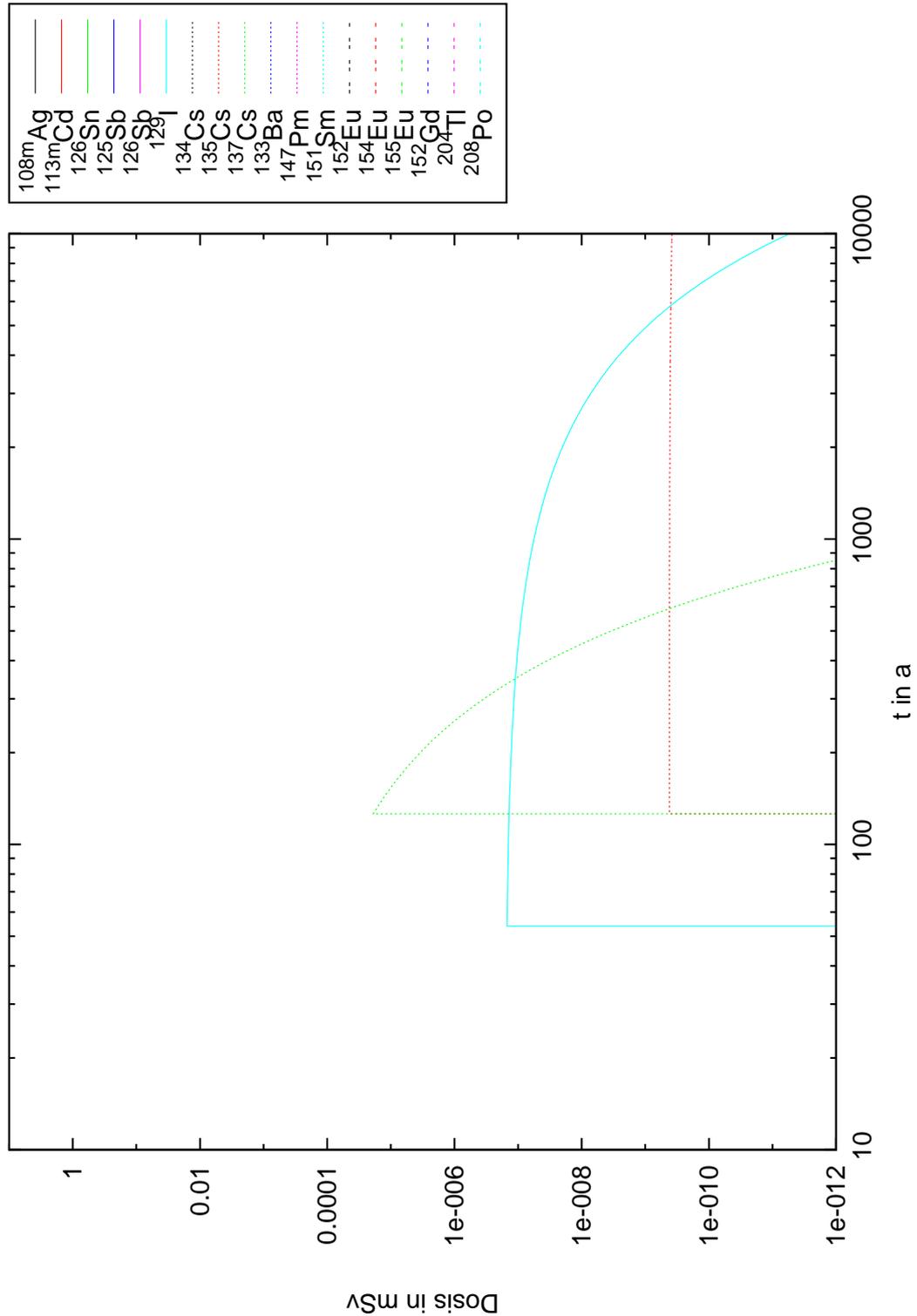


Abbildung B.35: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

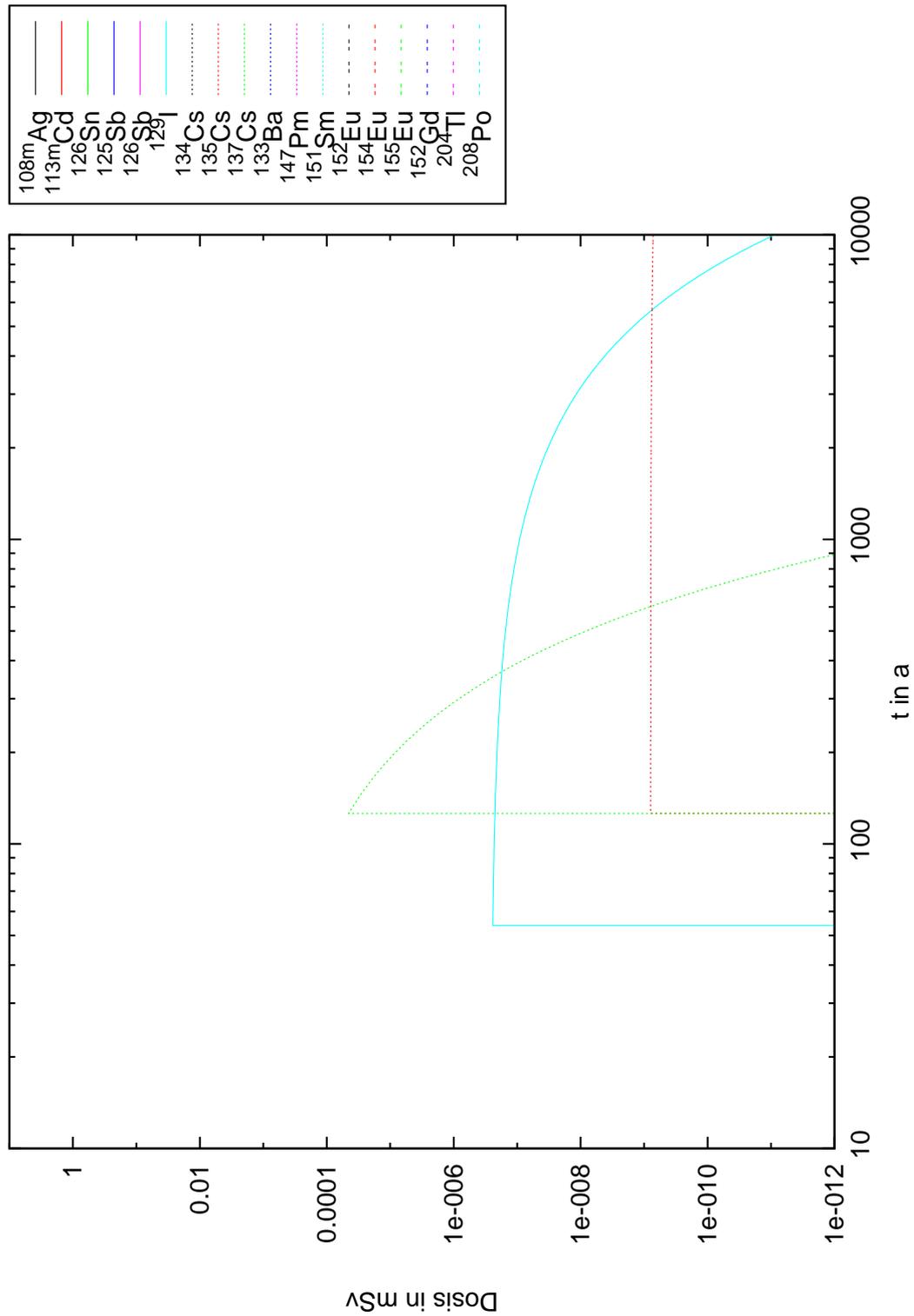


Abbildung B.36: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für oberen Muschelkalk.

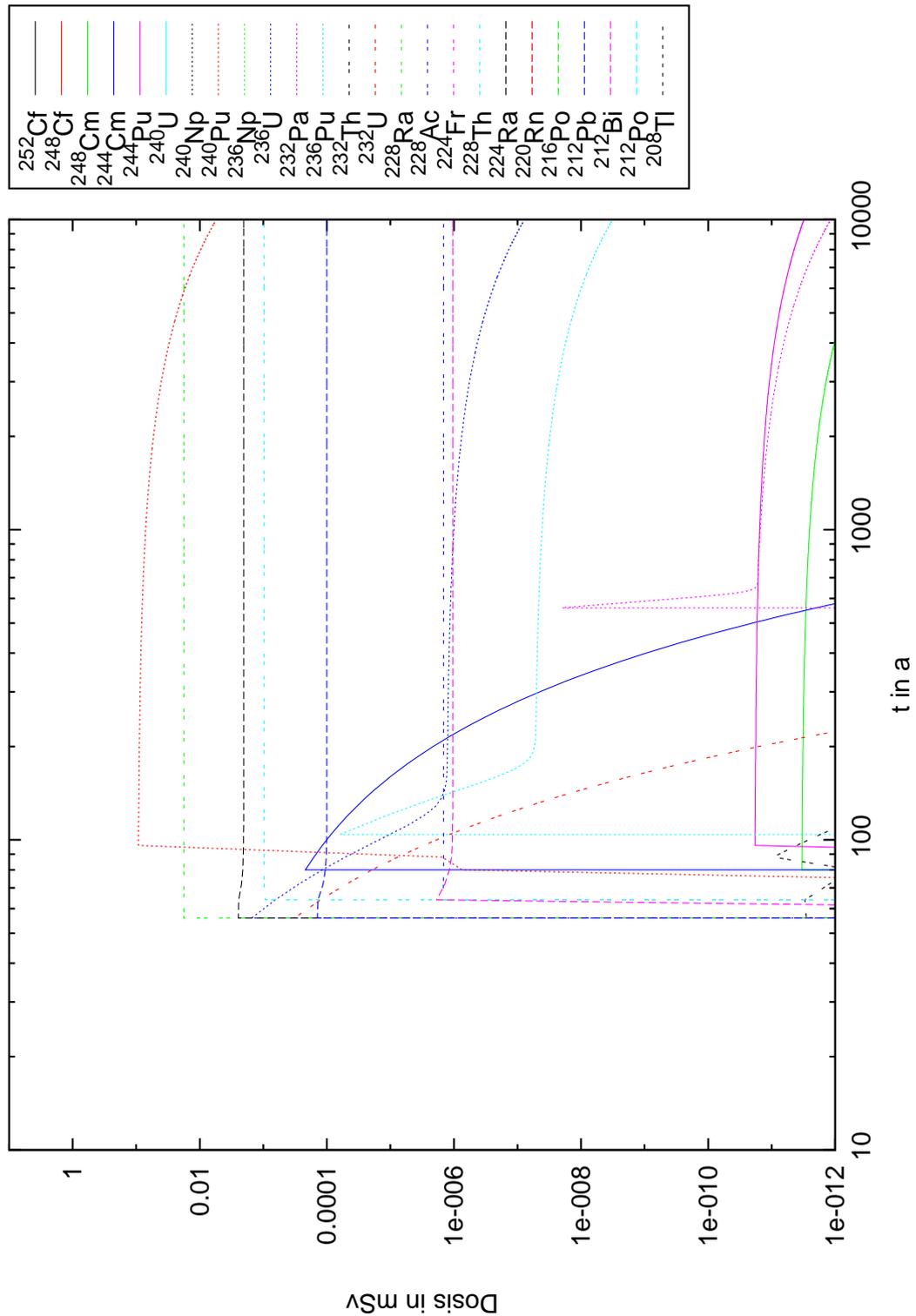


Abbildung B.37: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

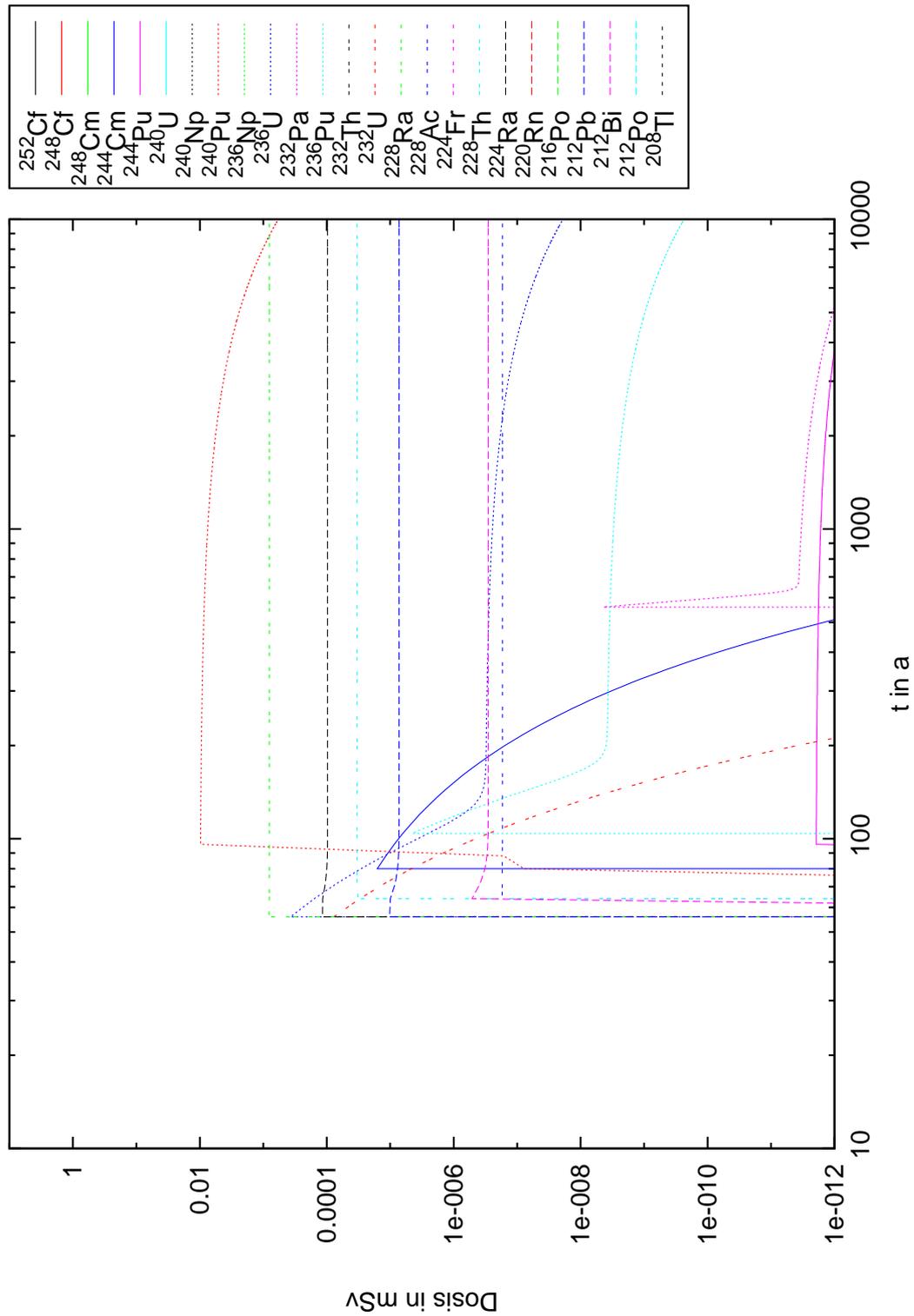


Abbildung B.38: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

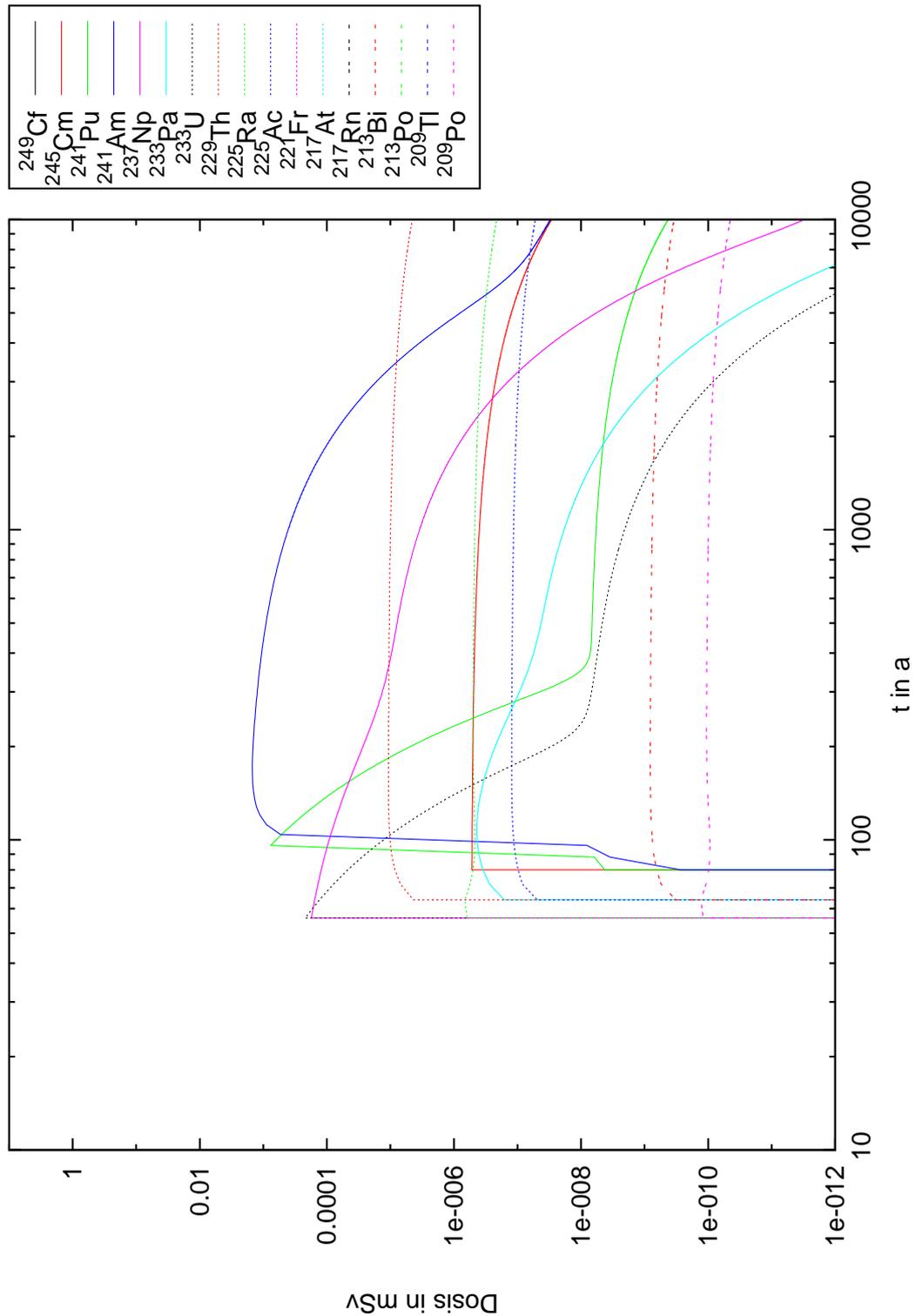


Abbildung B.39: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

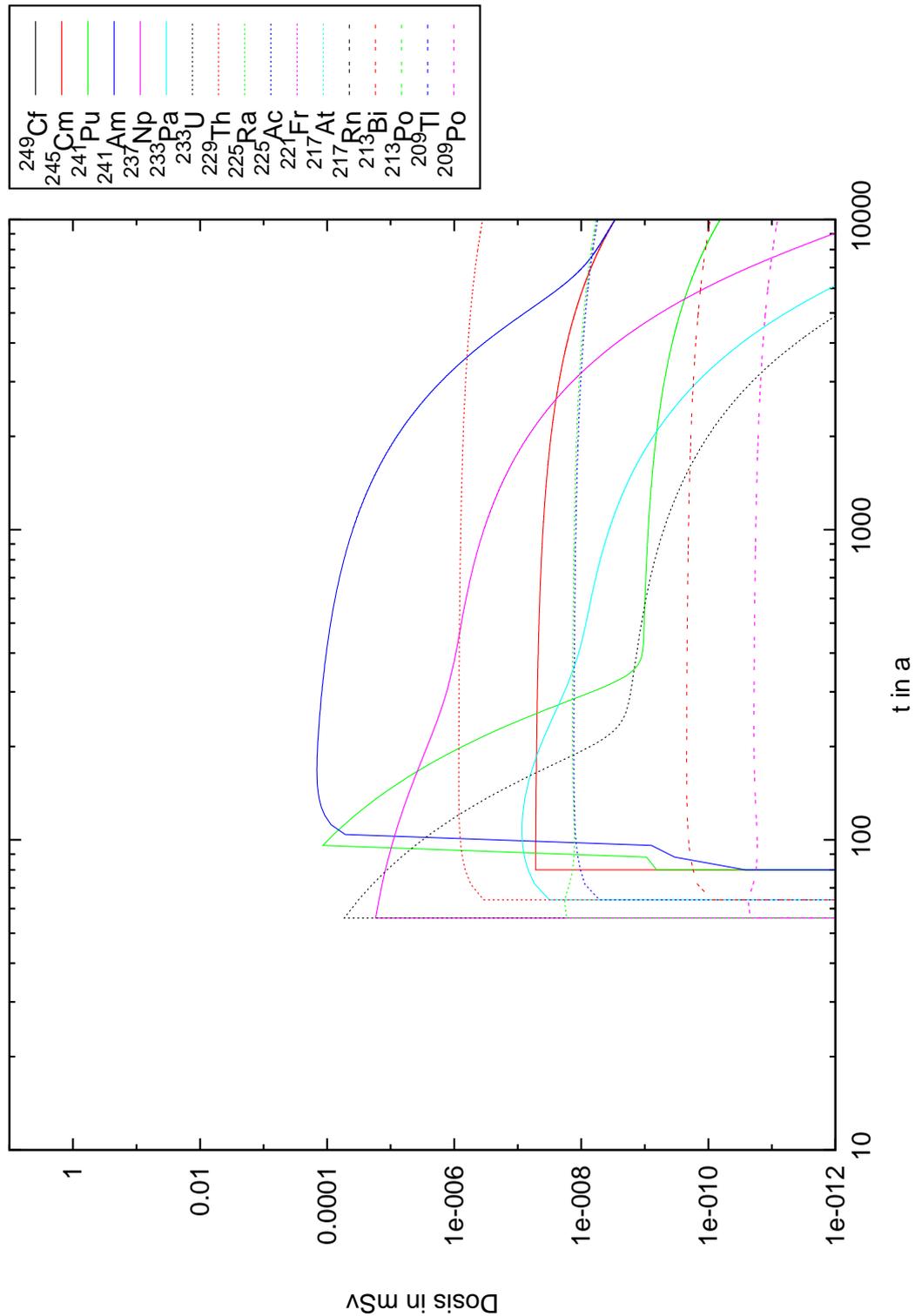


Abbildung B.40: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

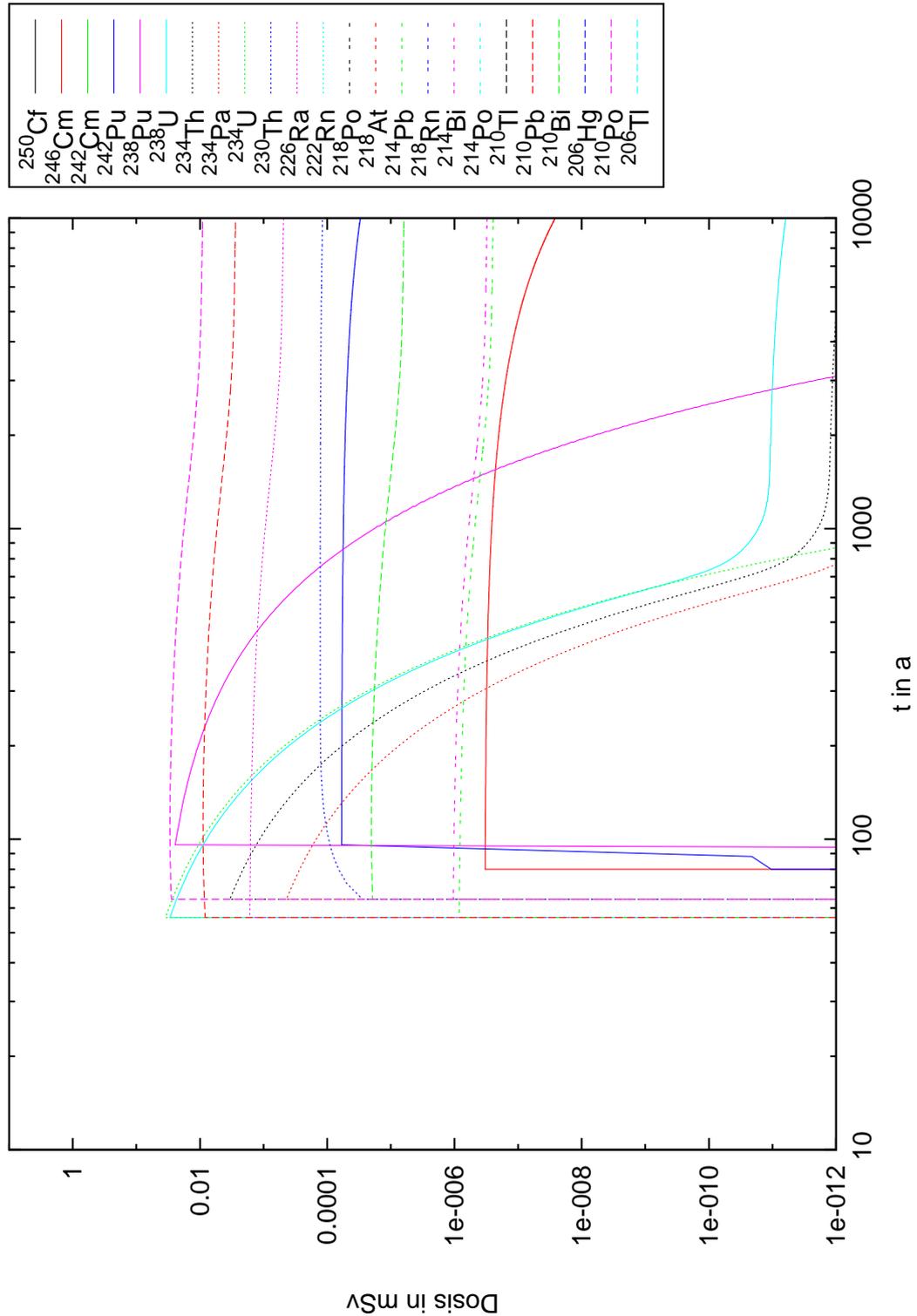


Abbildung B.41: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

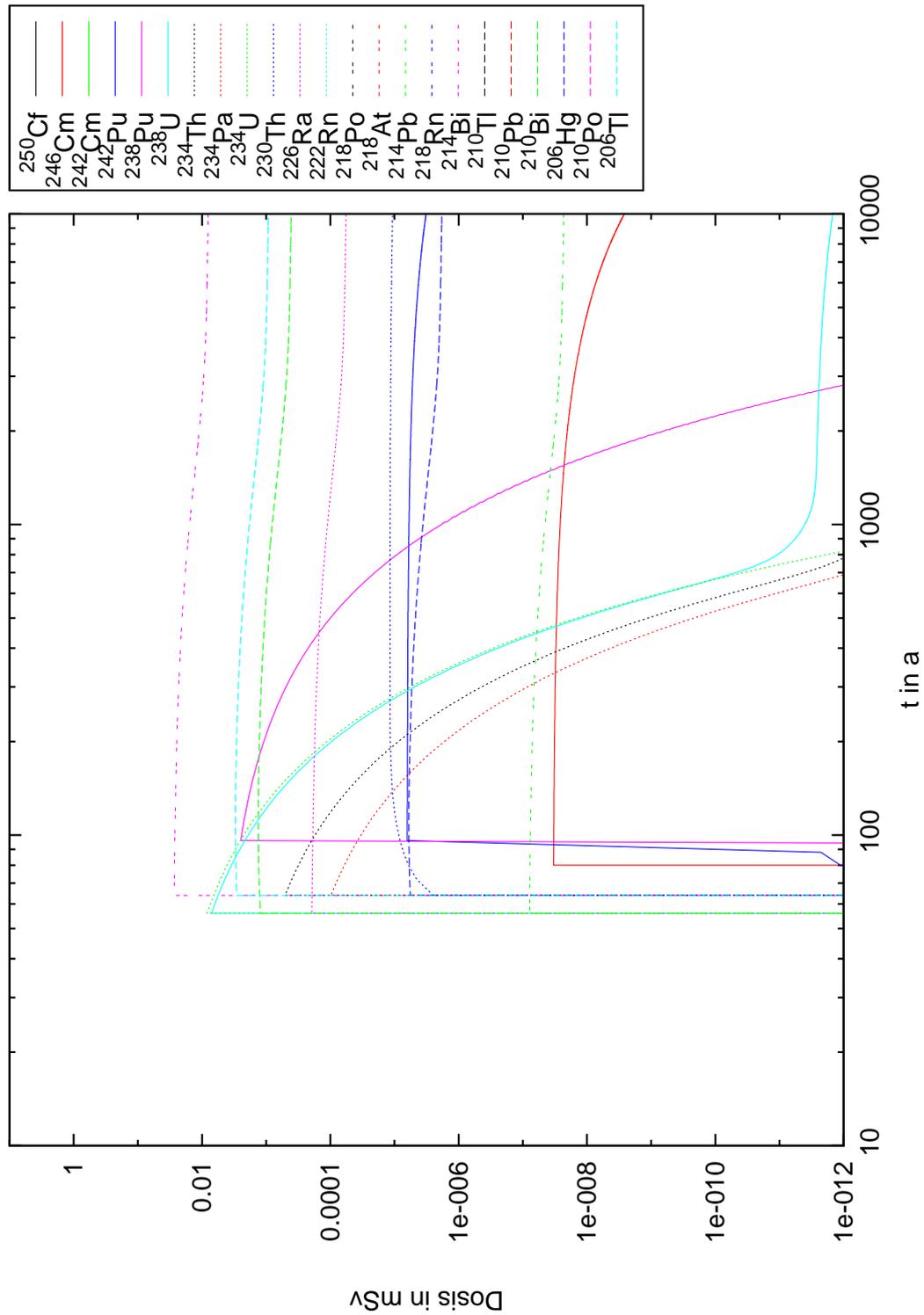


Abbildung B.42: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

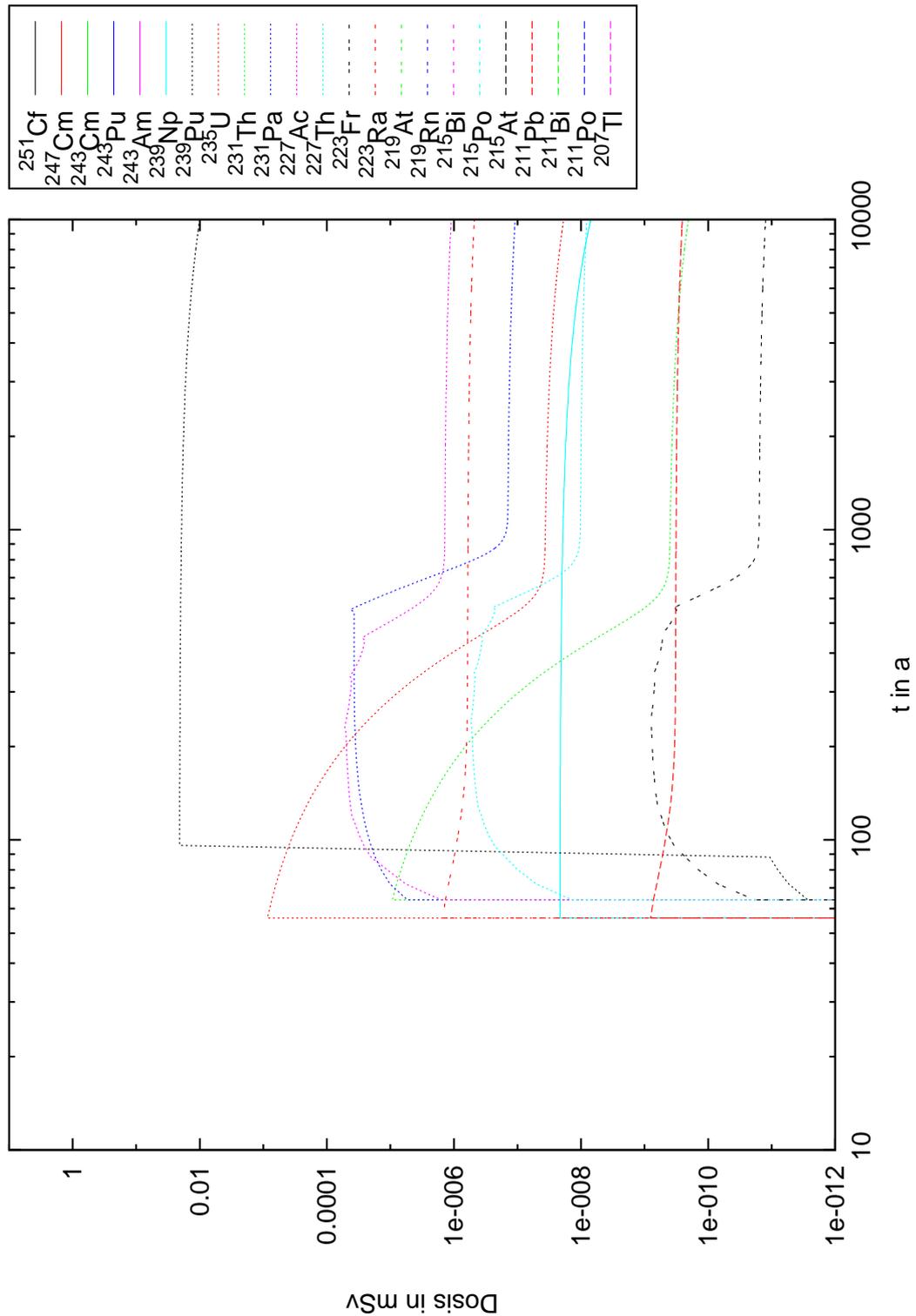


Abbildung B.43: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

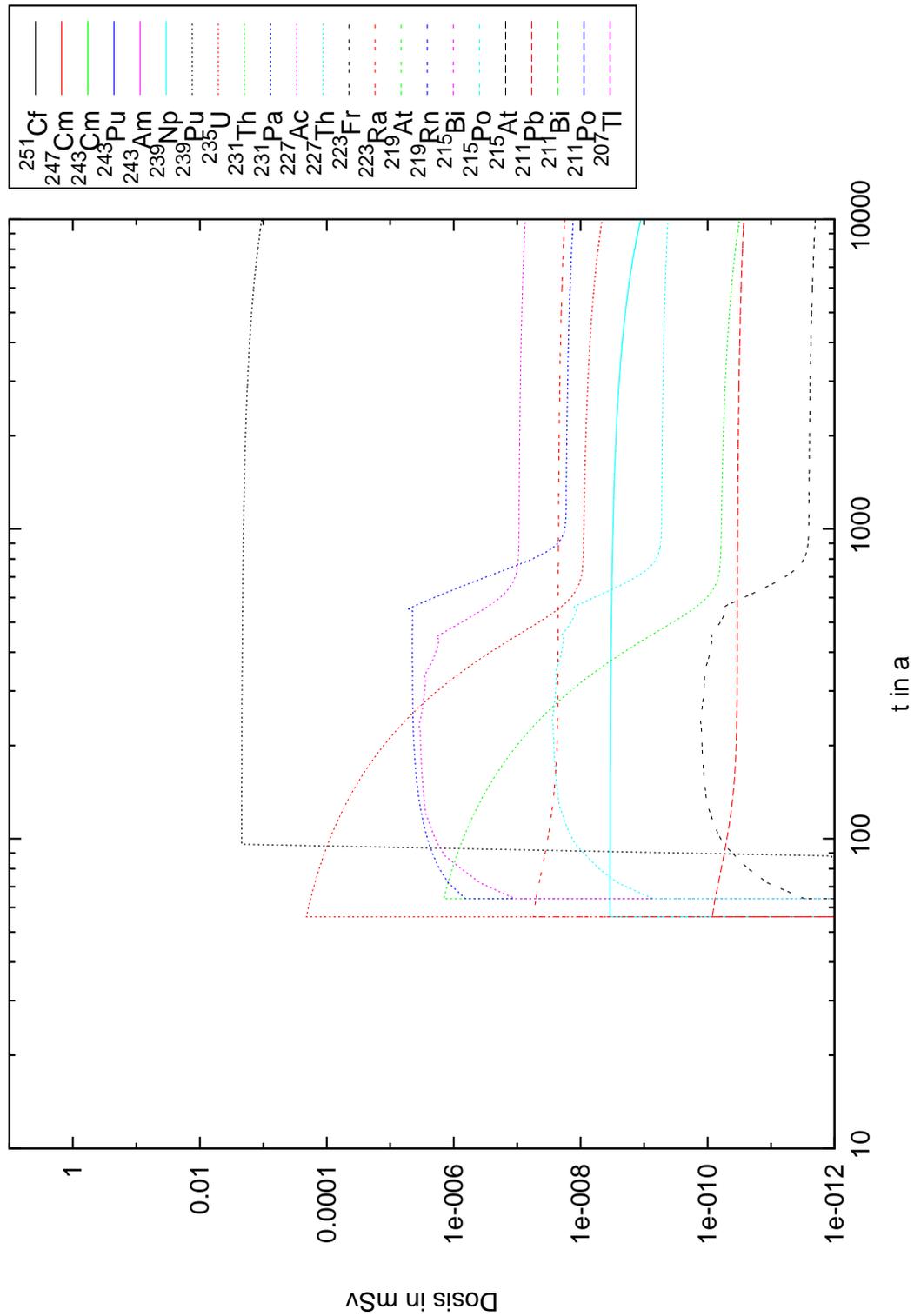


Abbildung B.44: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

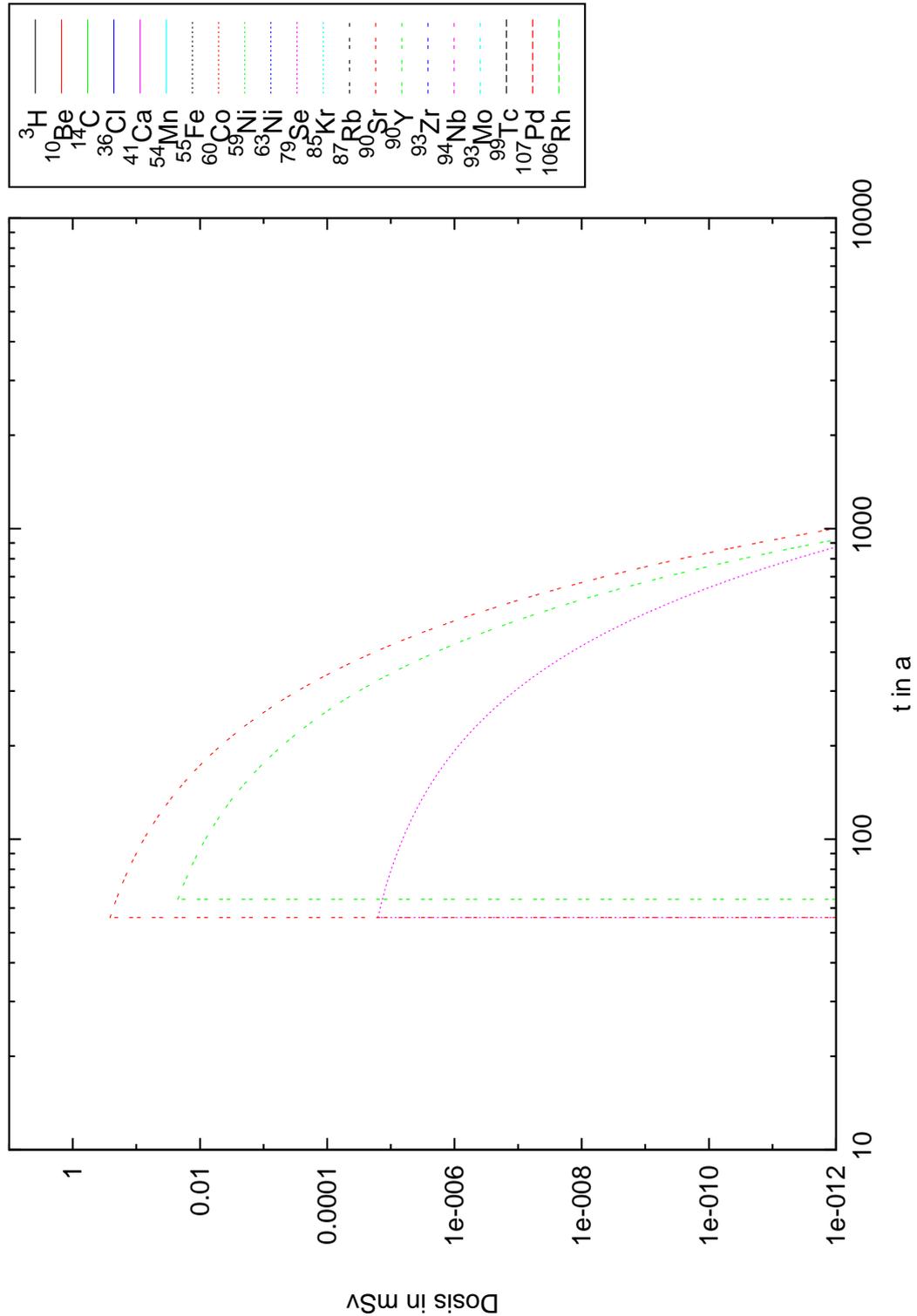


Abbildung B.45: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

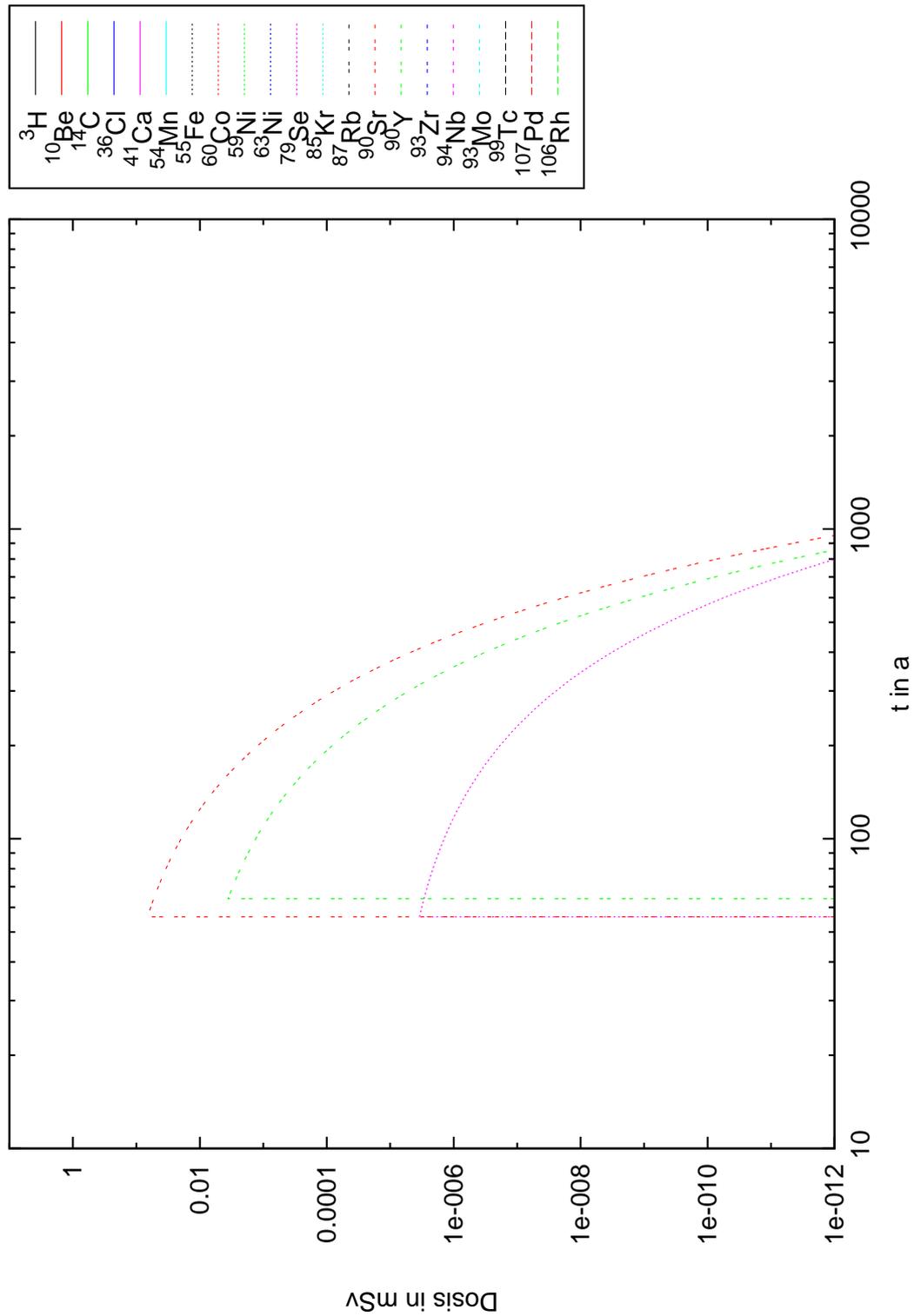


Abbildung B.46: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

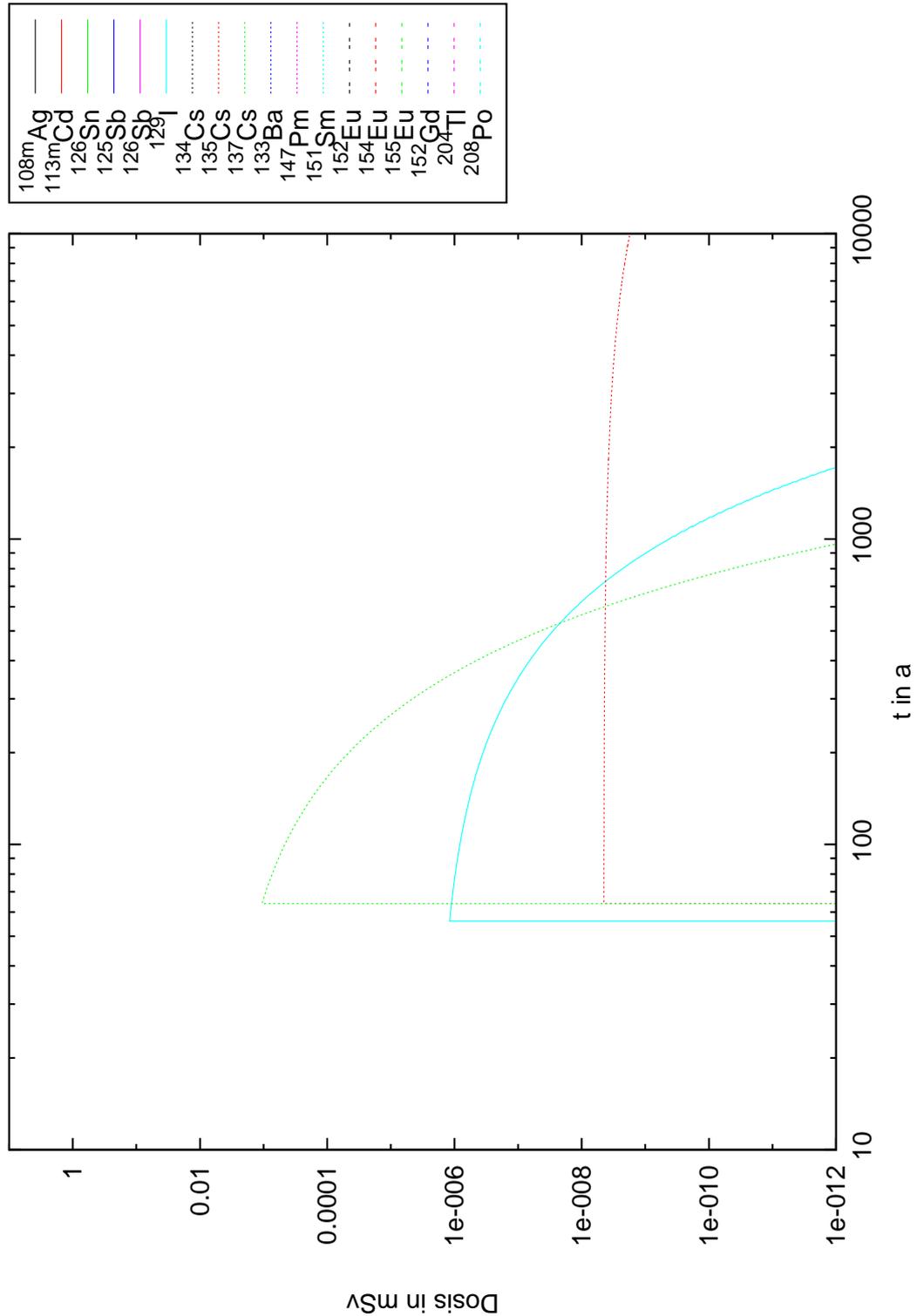


Abbildung B.47: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

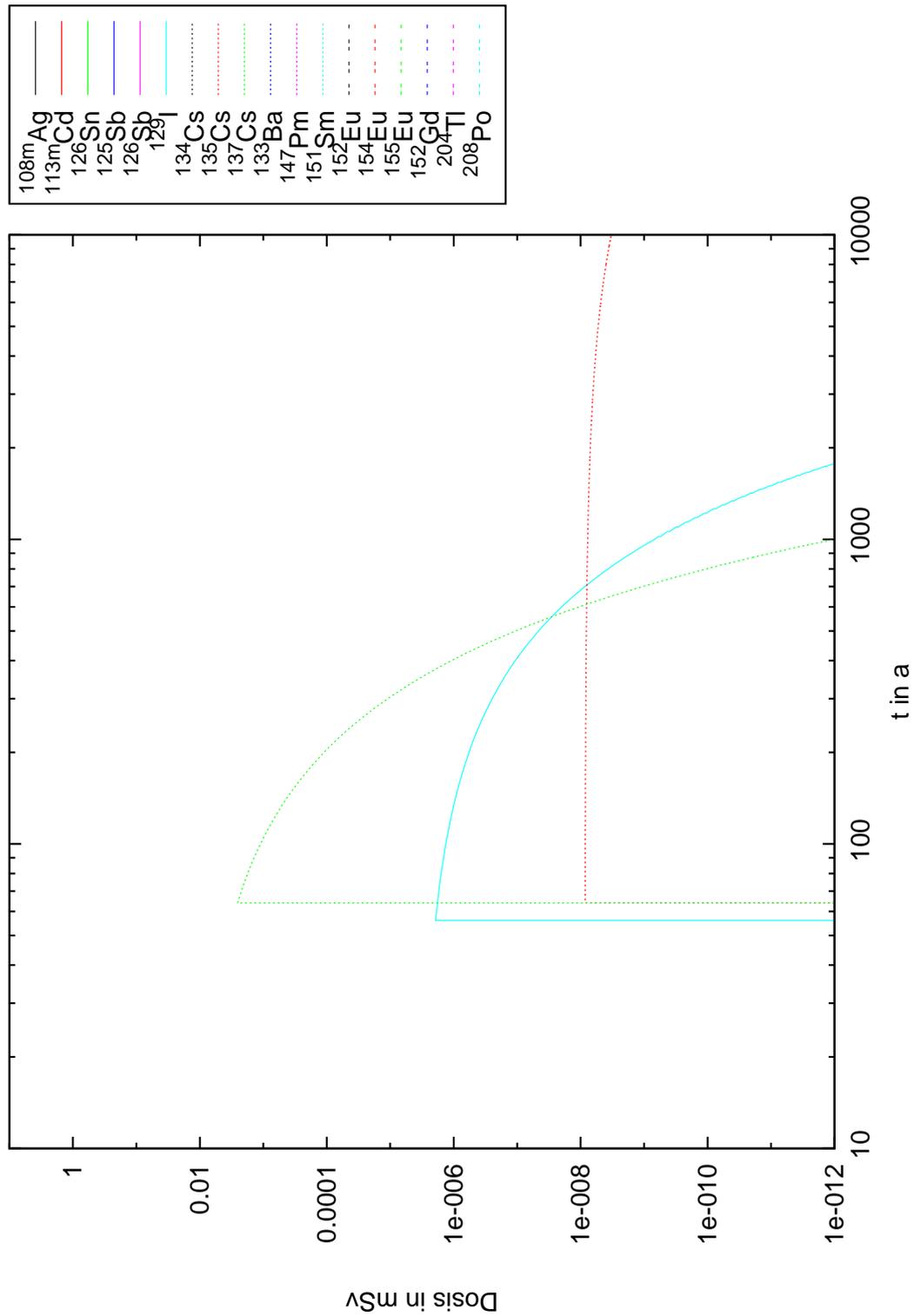


Abbildung B.48: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

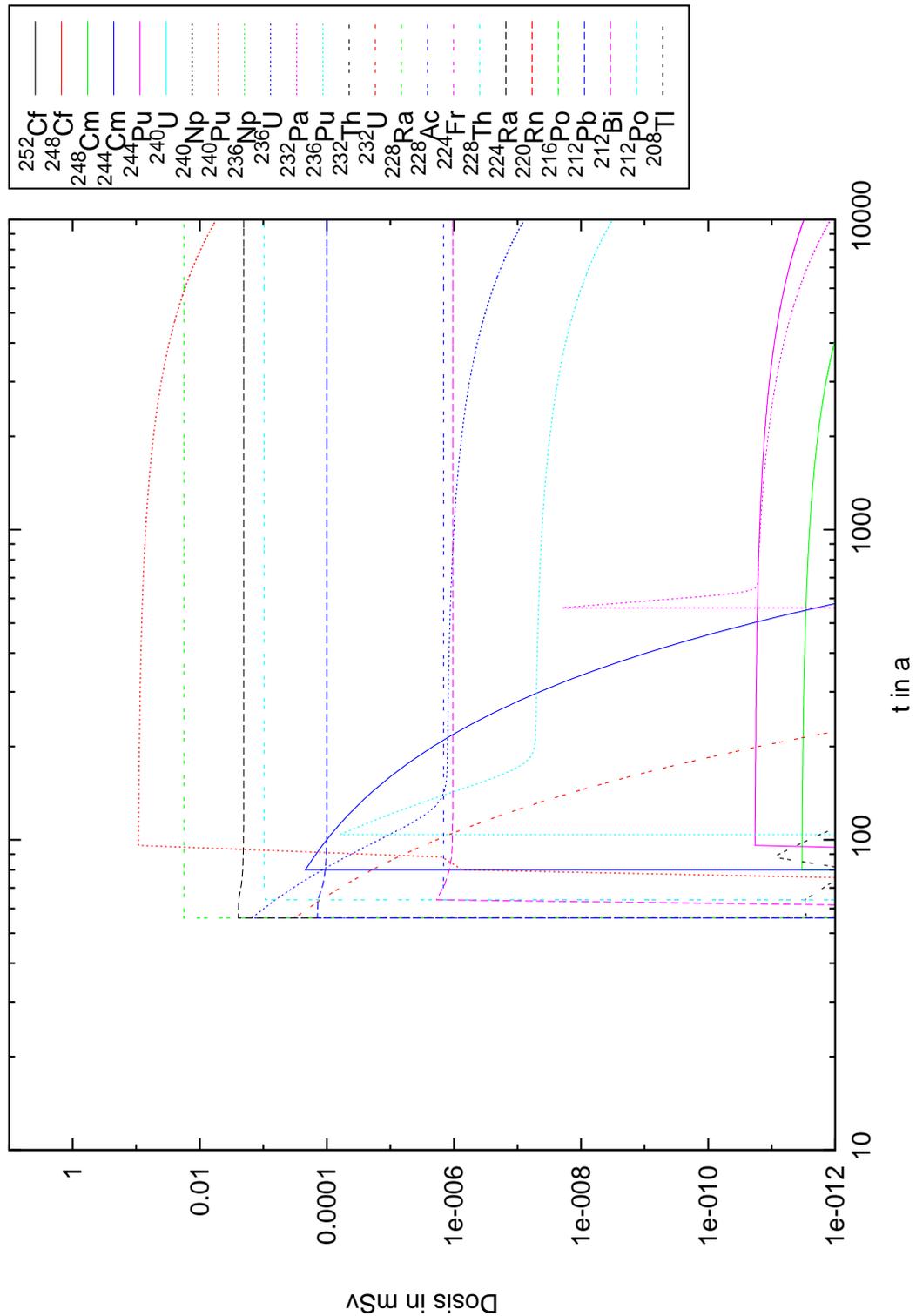


Abbildung B.49: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

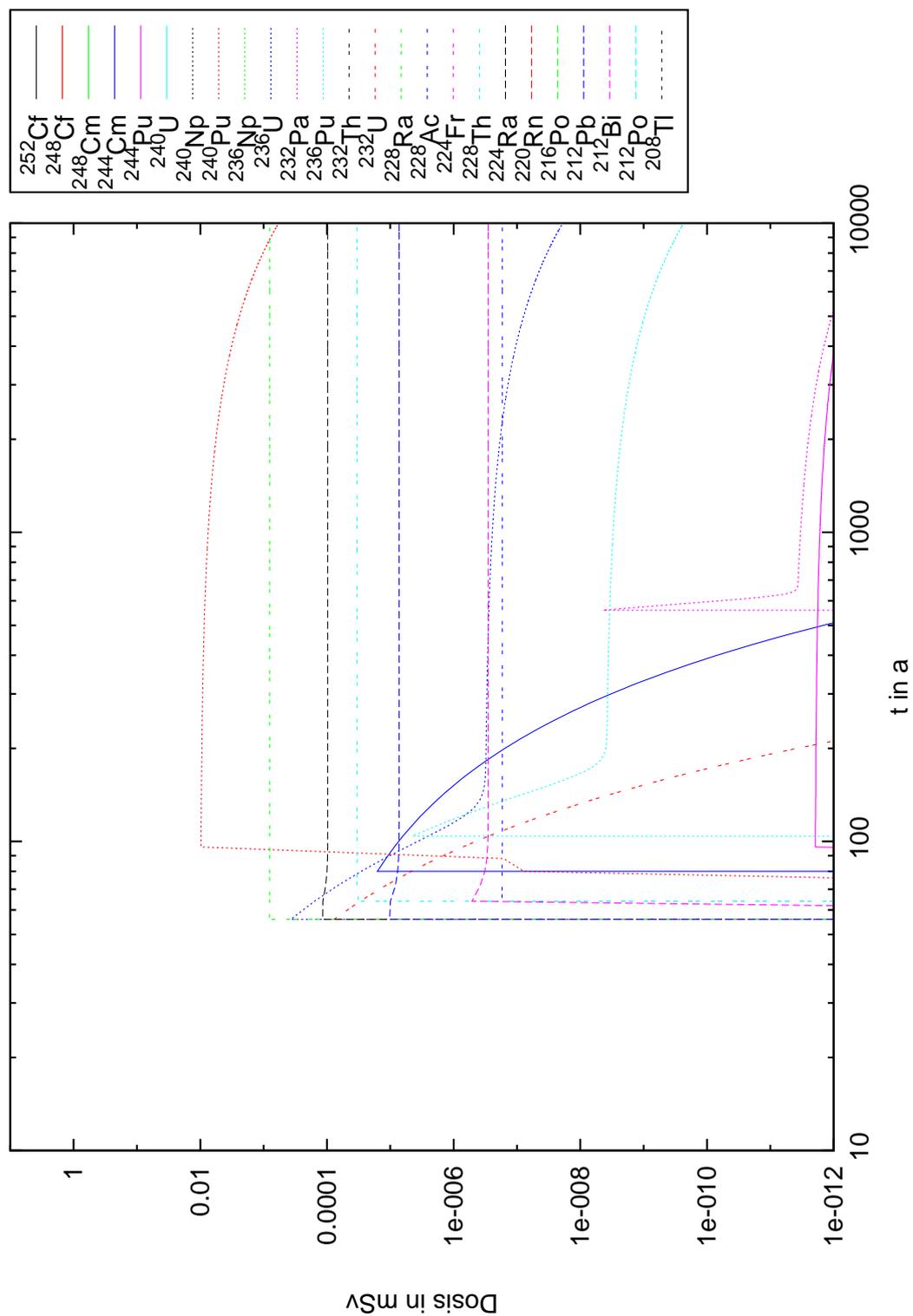


Abbildung B.50: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Thorium-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

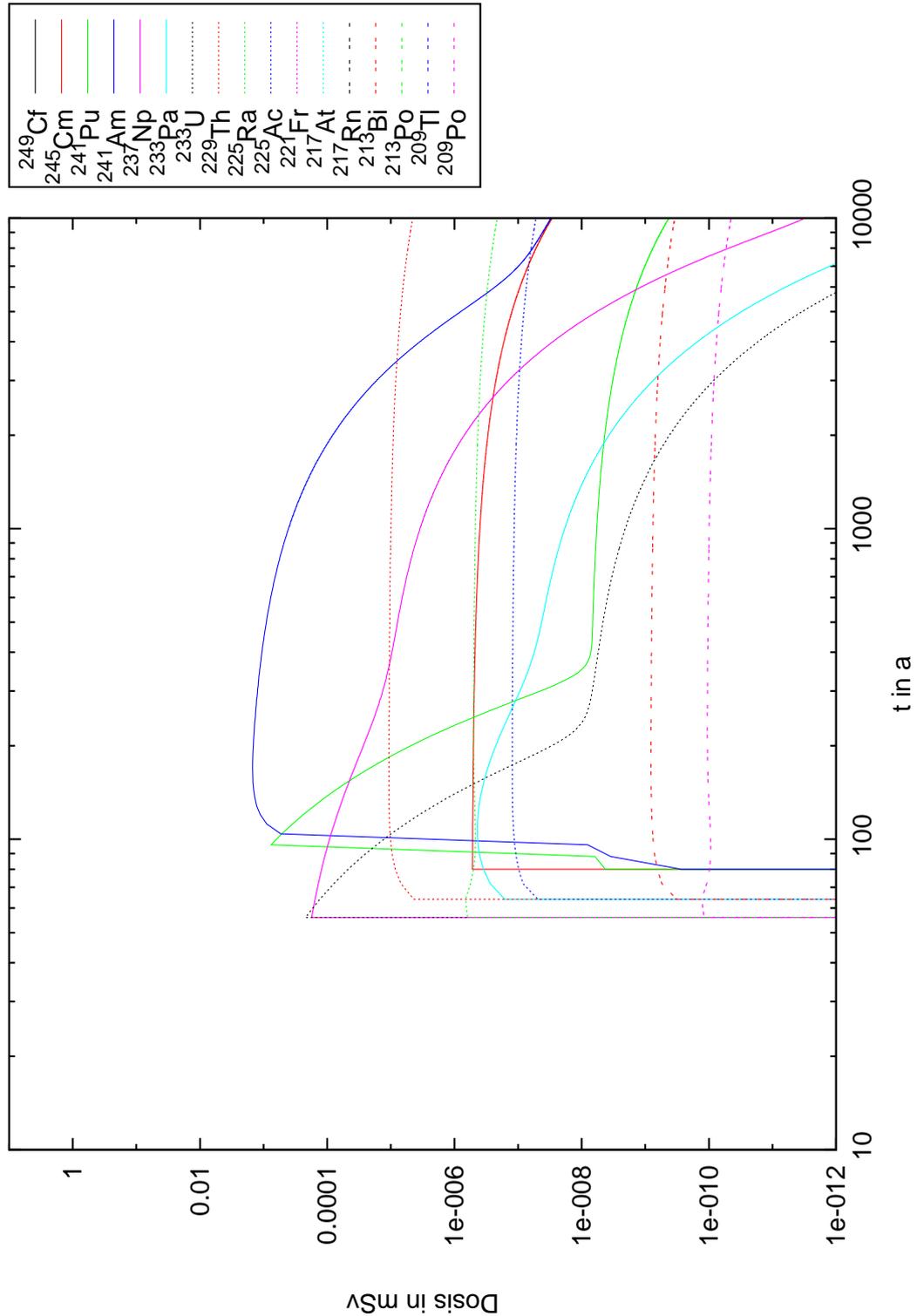


Abbildung B.51: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

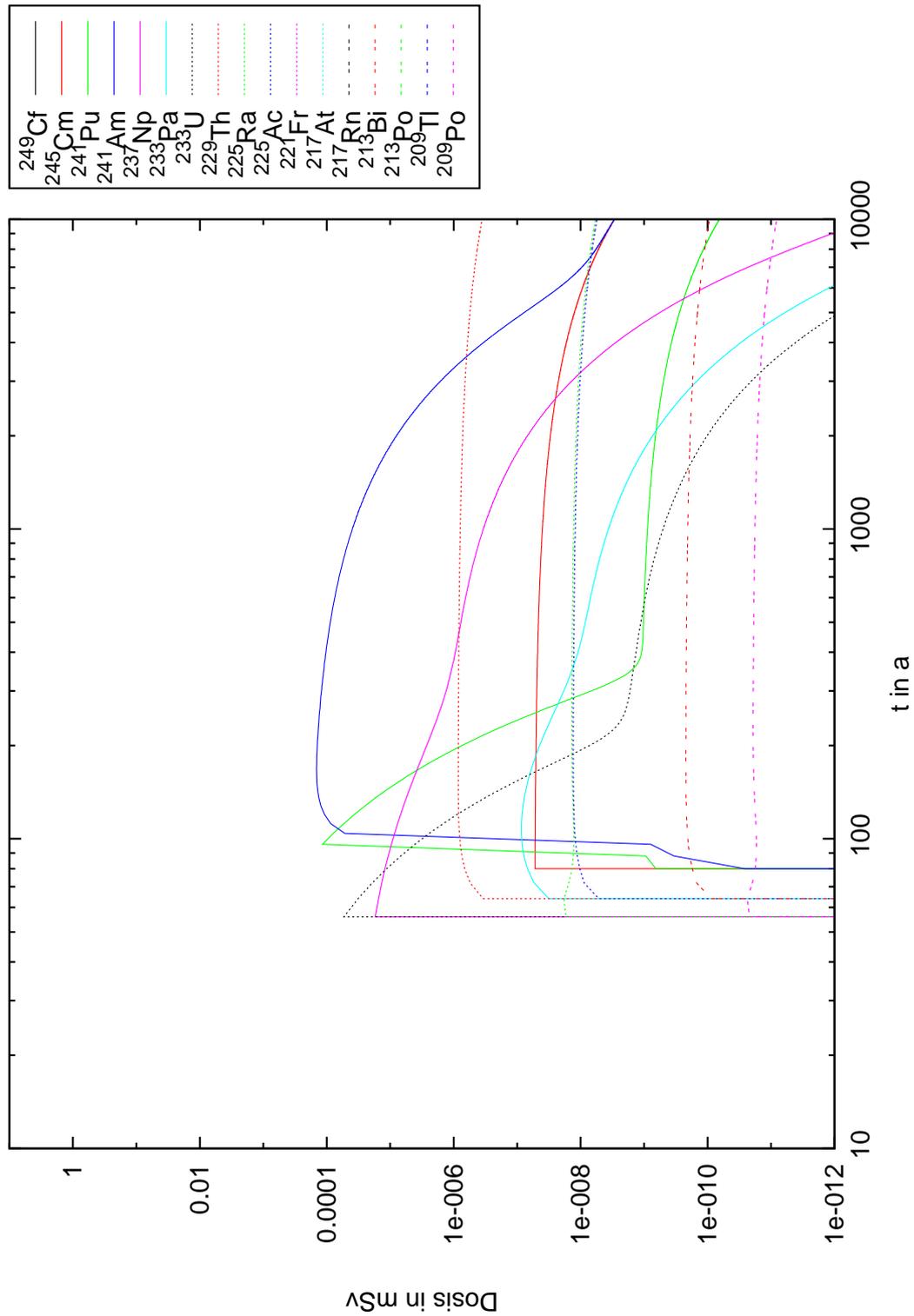


Abbildung B.52: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

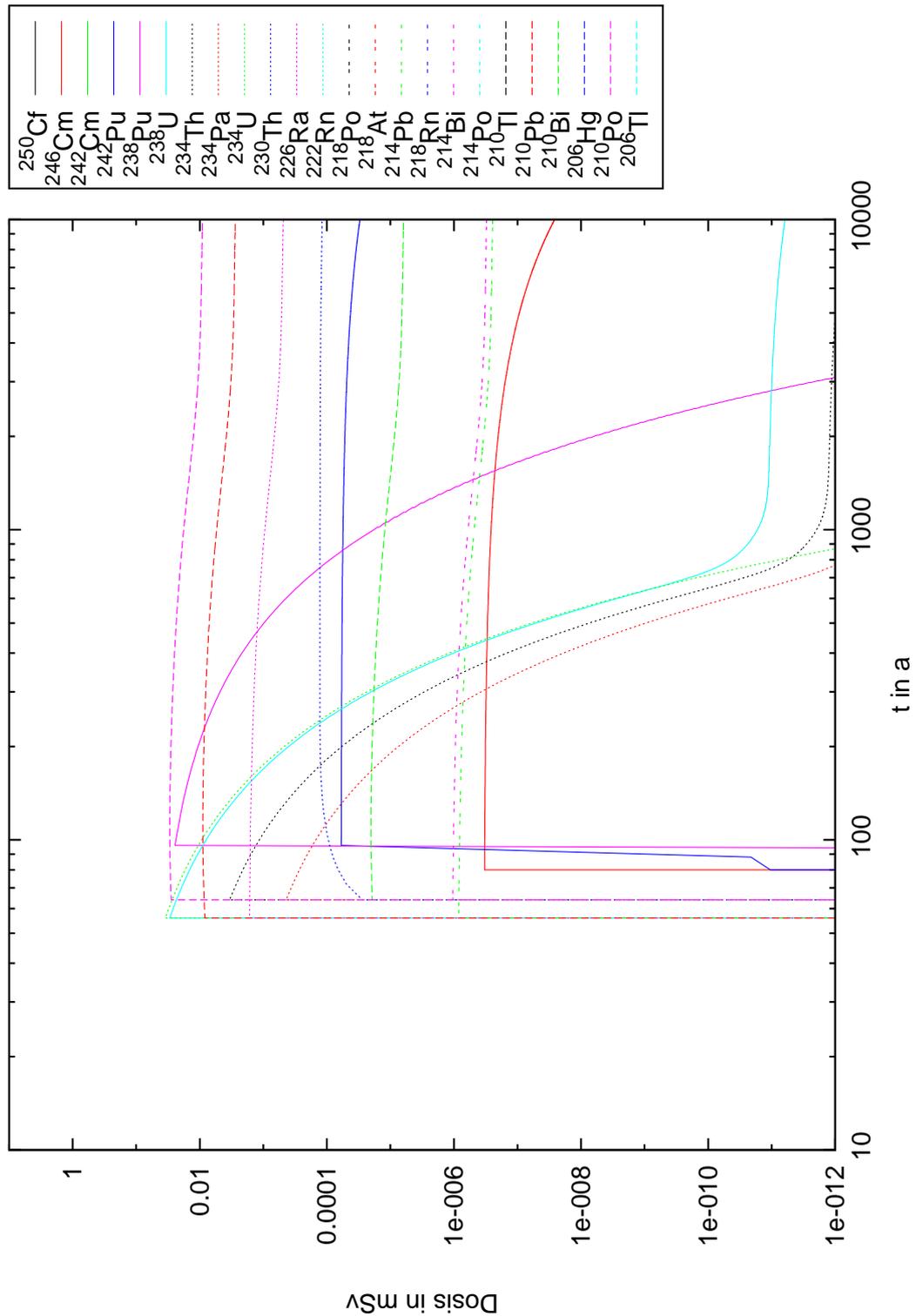


Abbildung B.53: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägiges Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

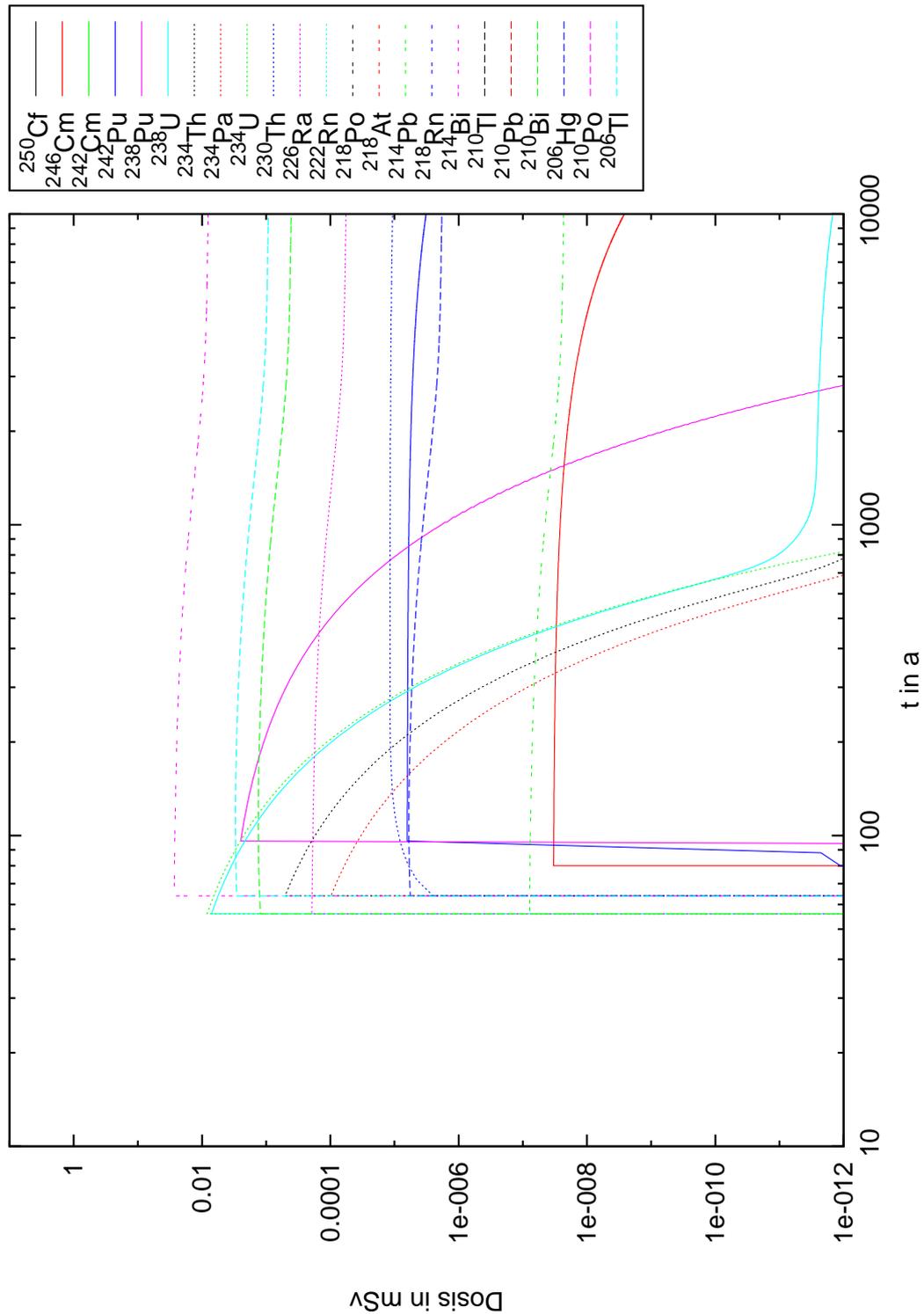


Abbildung B.54: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für ein untertägliches Lager. k_d -Werte nach [Ins10] für mittleren Muschelkalk.

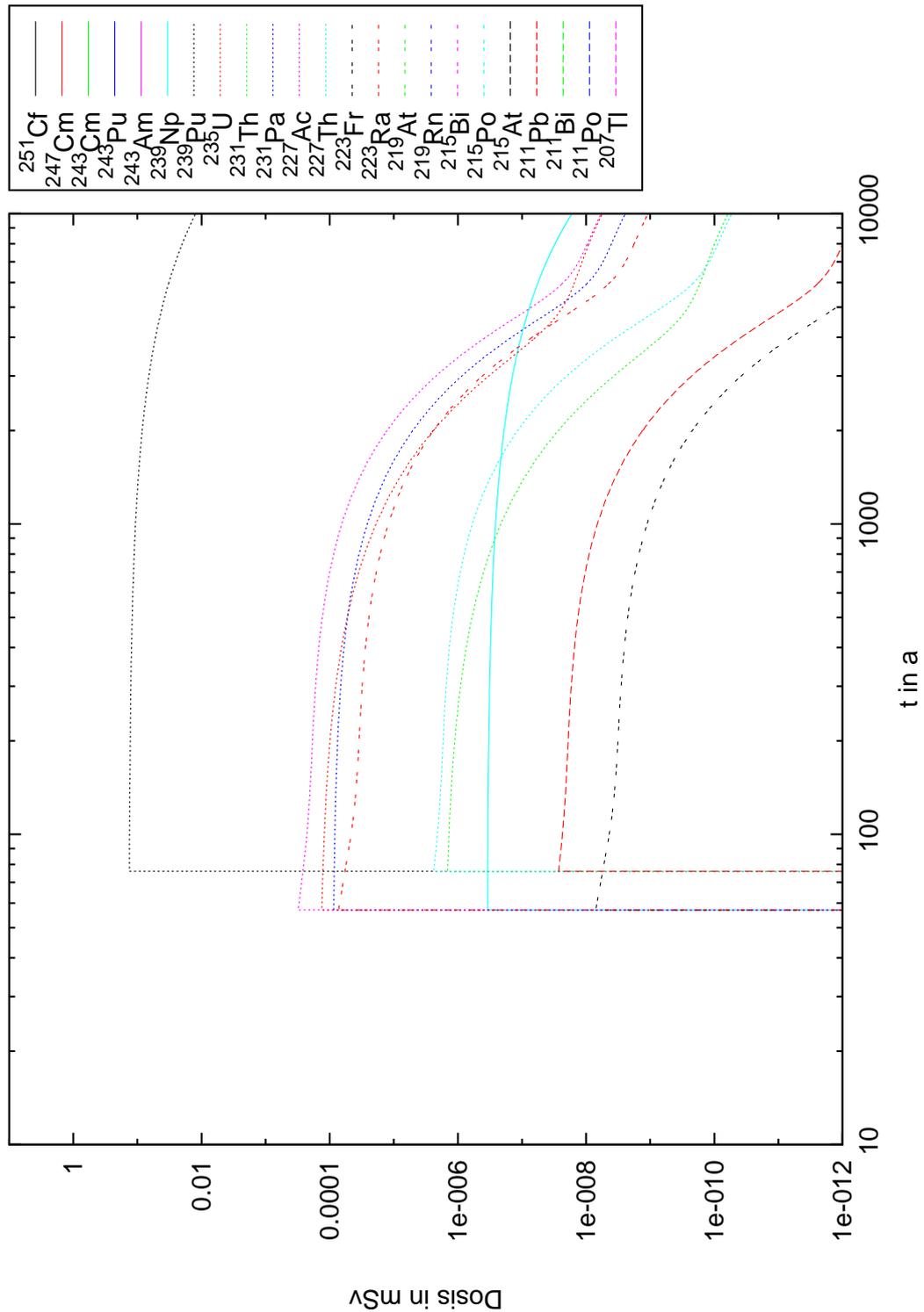


Abbildung B.55: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95].

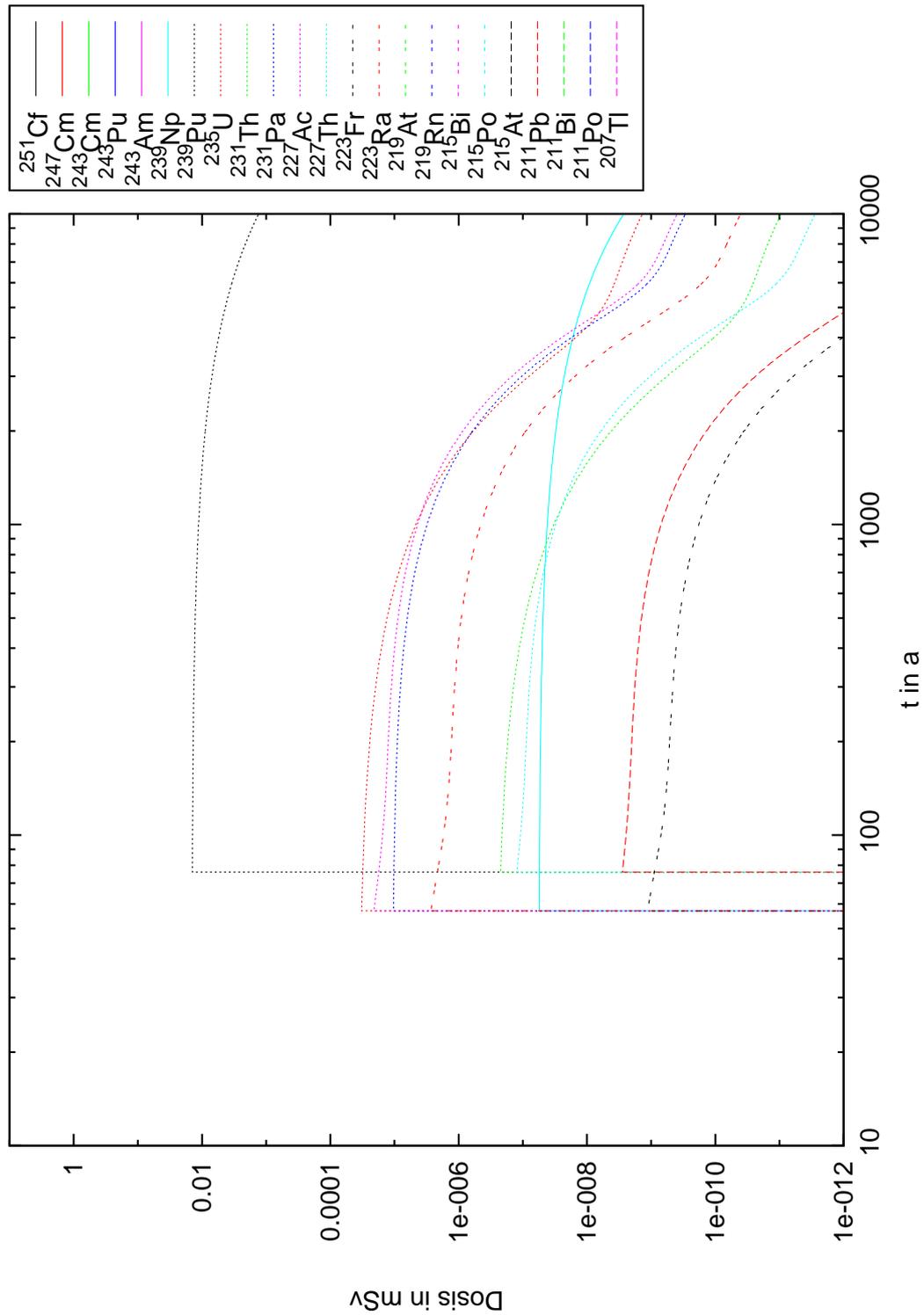


Abbildung B.56: Zusätzliche jährliche Dosis von Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95].

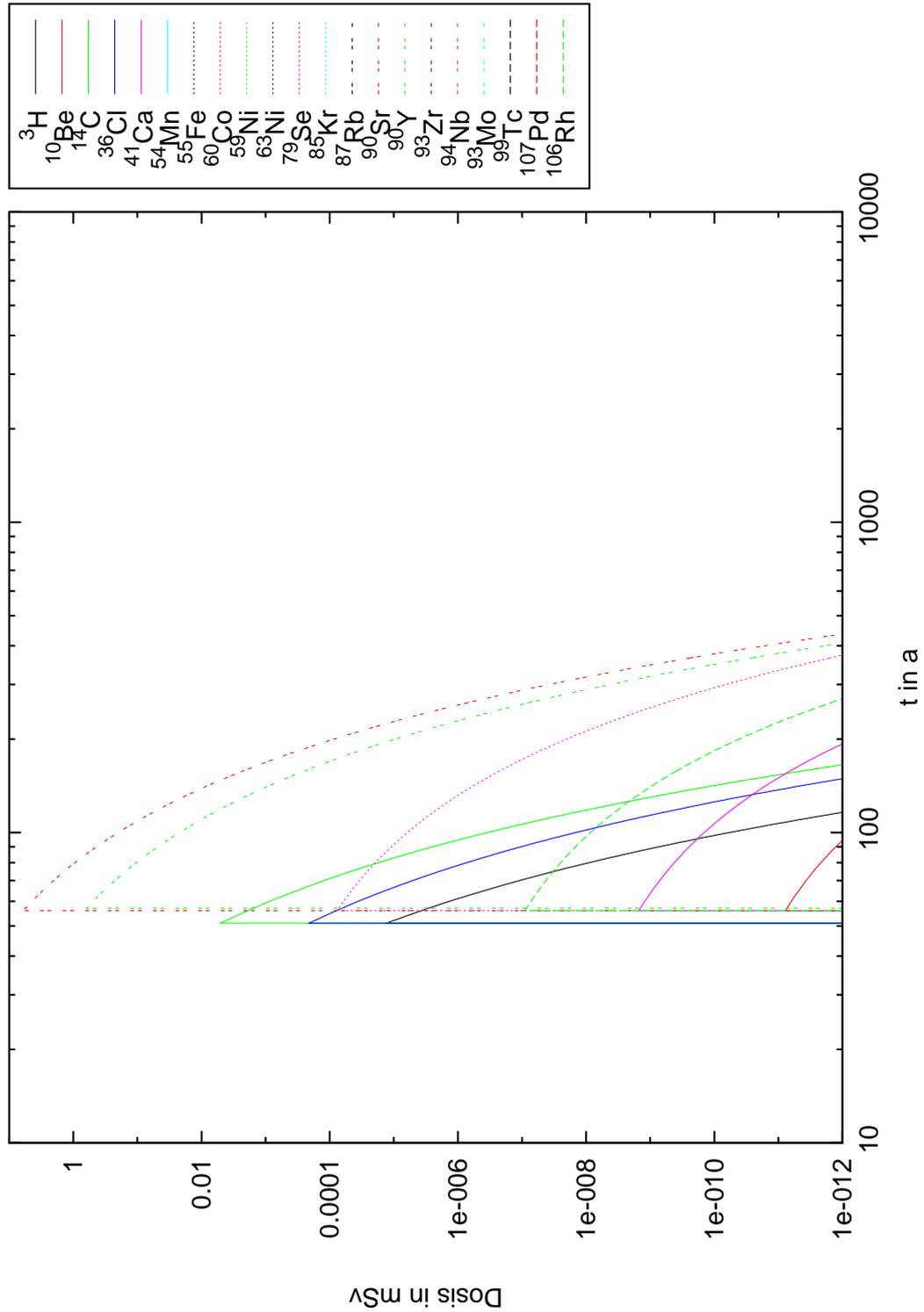


Abbildung B.57: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95] .

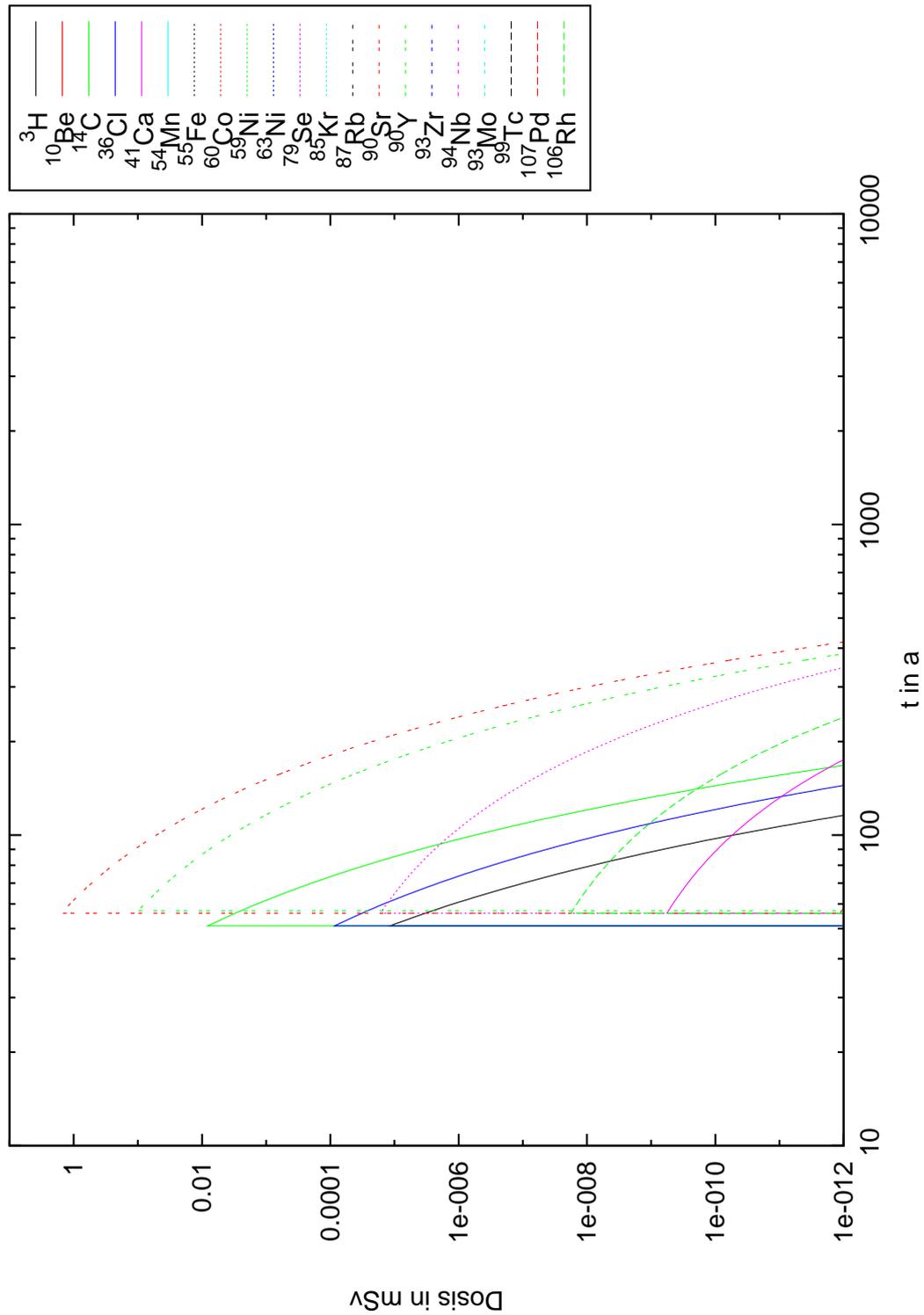


Abbildung B.58: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden H-3-Rh-106 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95] .

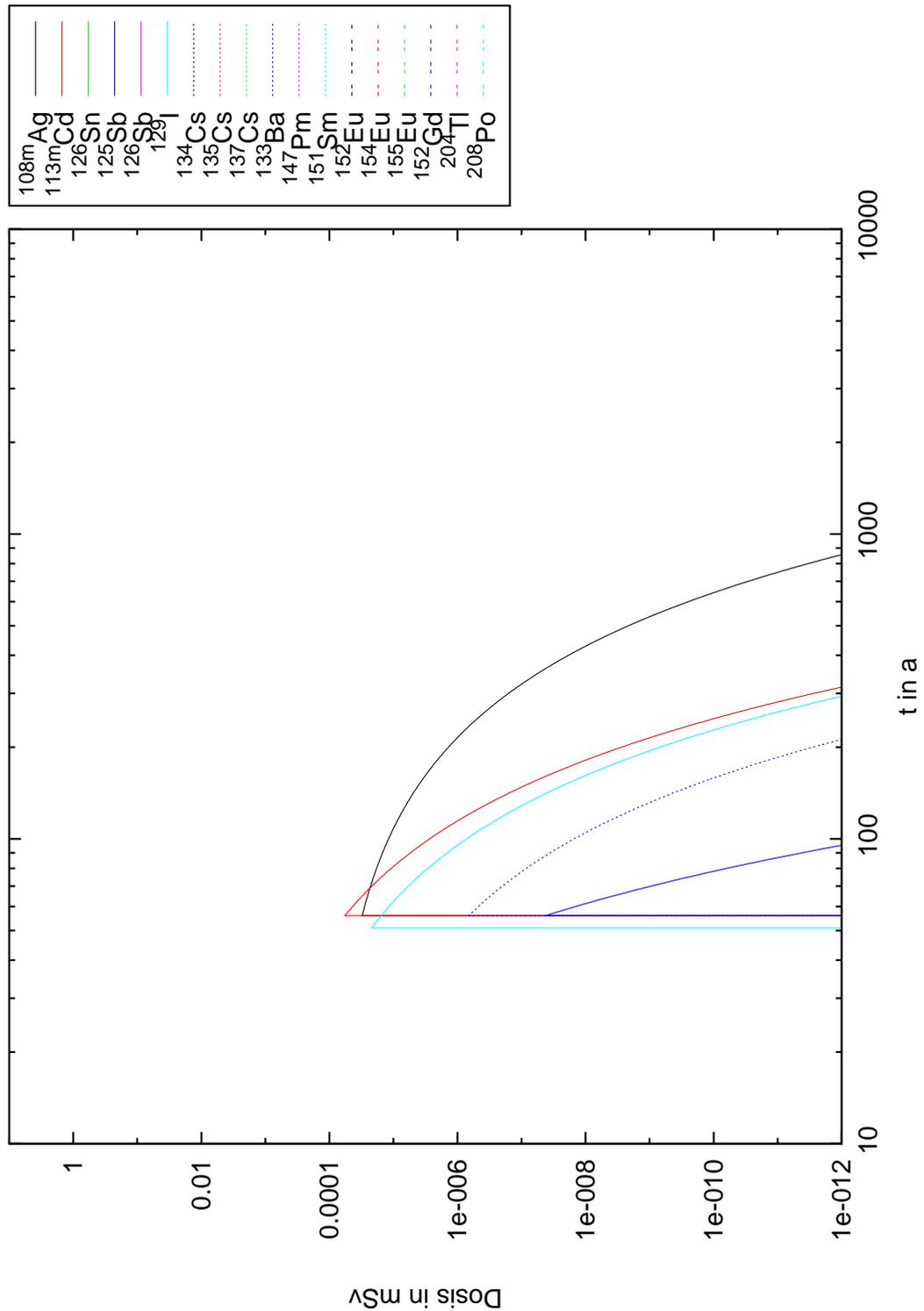


Abbildung B.59: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe 0-1 a und Ernährung mit Säuglingsmilchnahrung berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95].

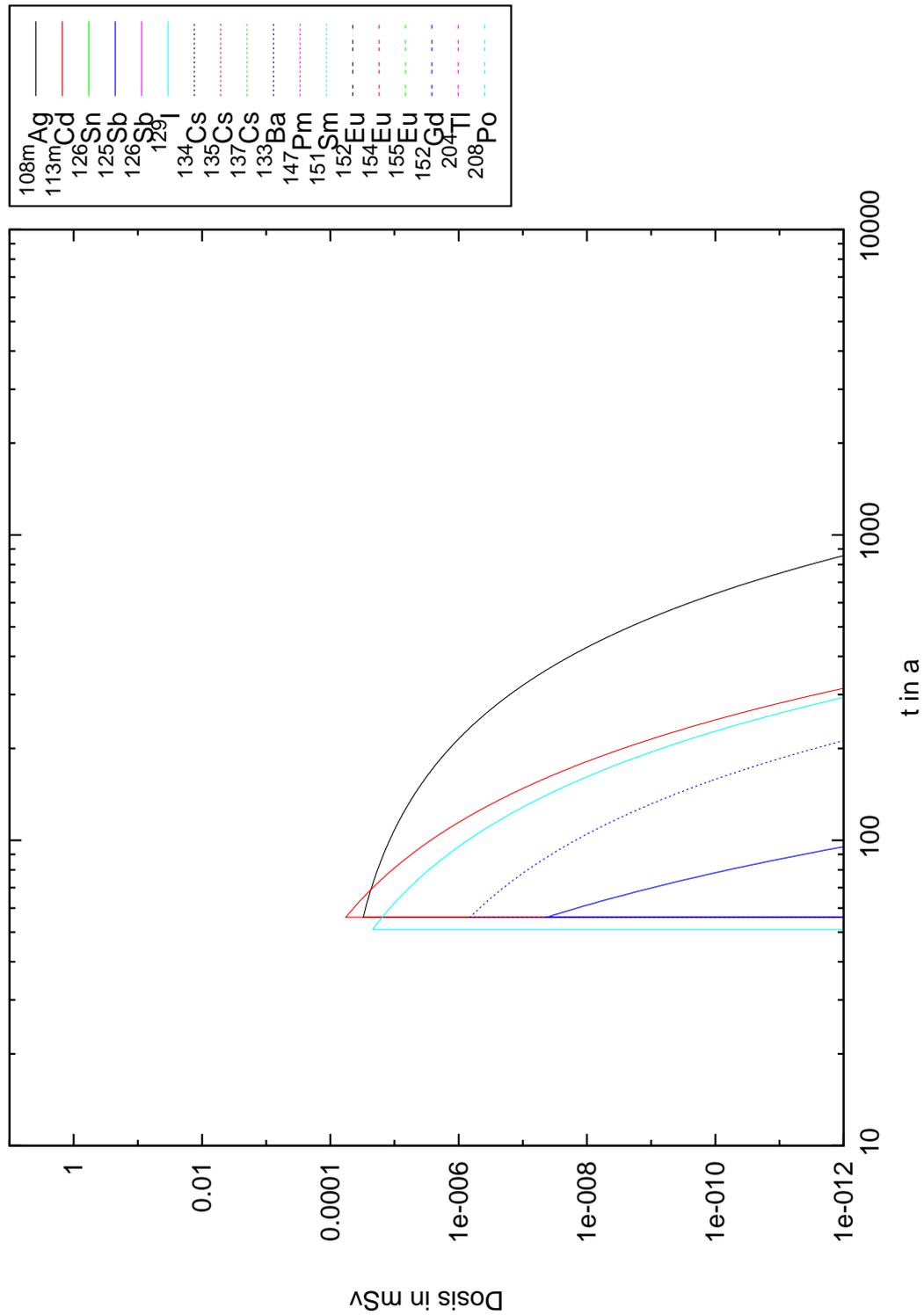


Abbildung B.60: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden Ag-108m-Po-208 für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für für eine Halde. k_d -Werte nach [BfS95] .

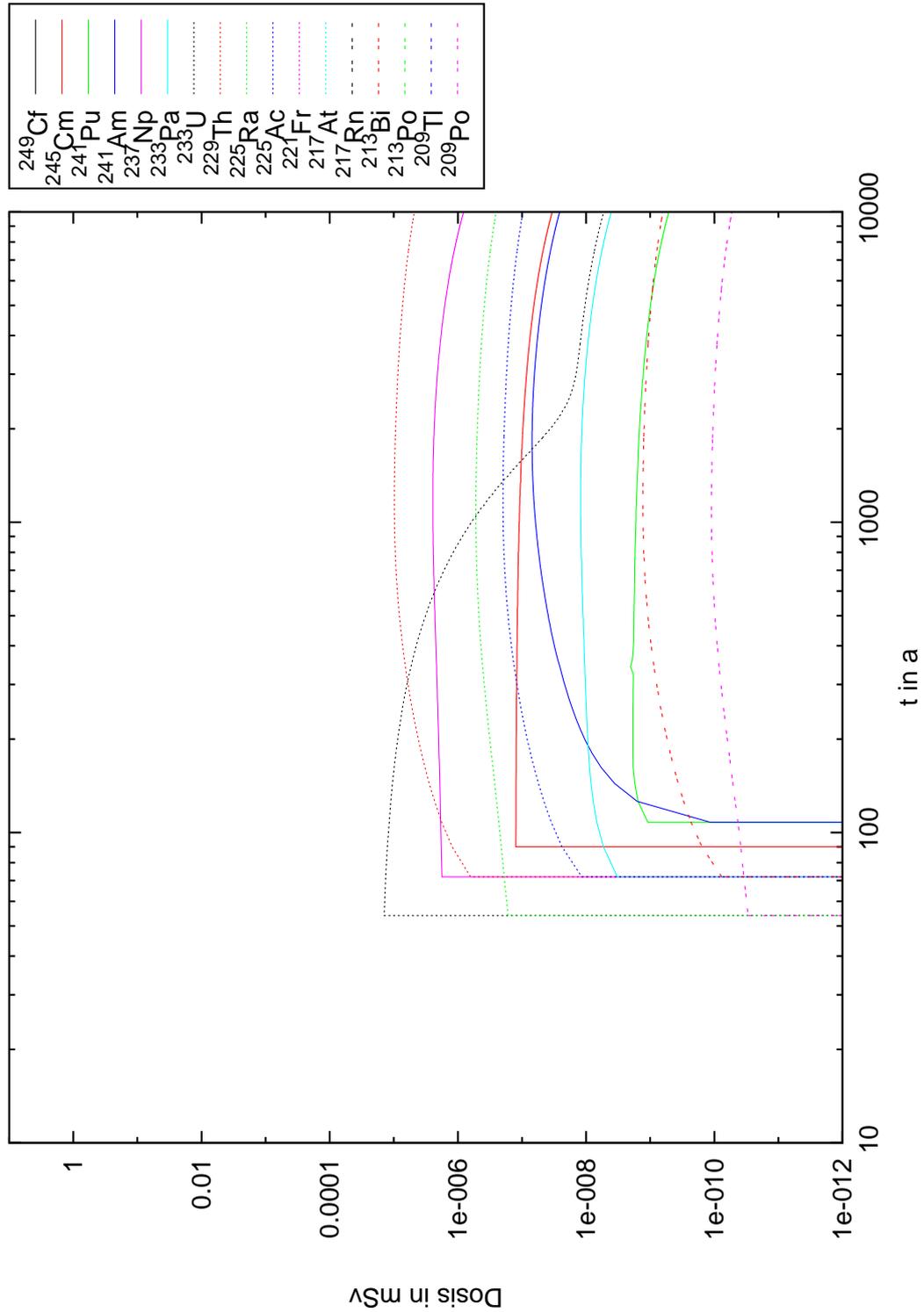


Abbildung B.61: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

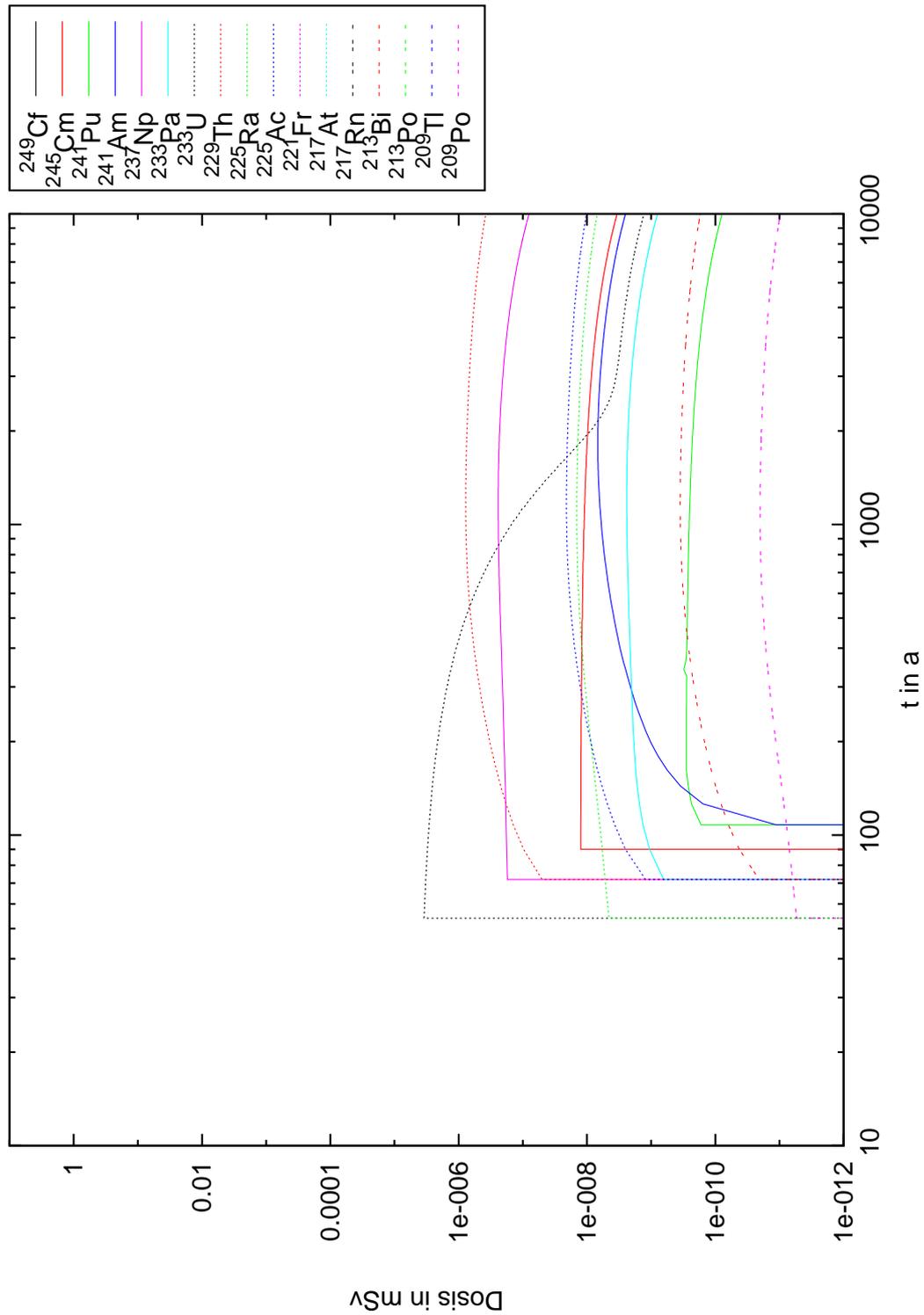


Abbildung B.62: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

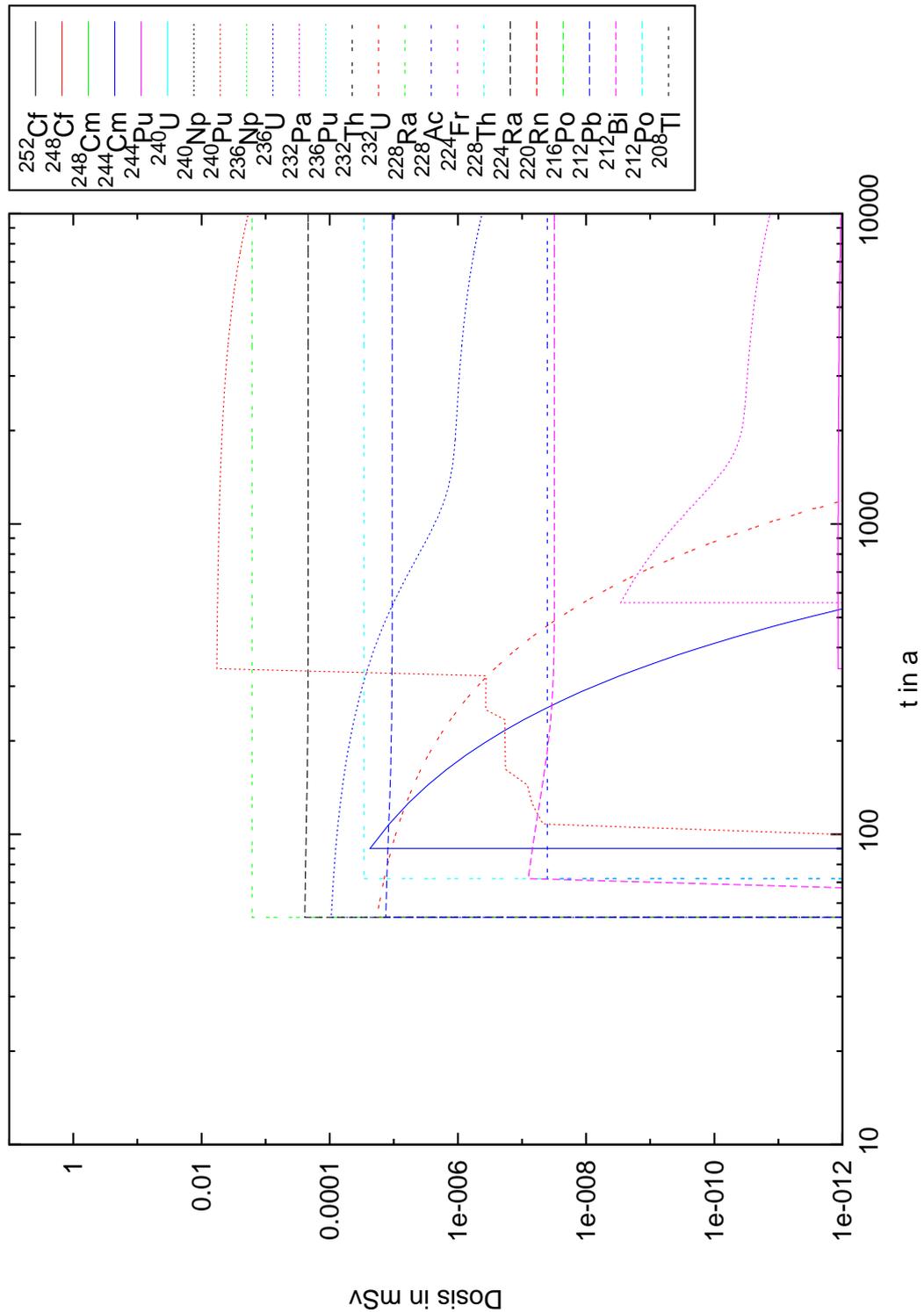


Abbildung B.63: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

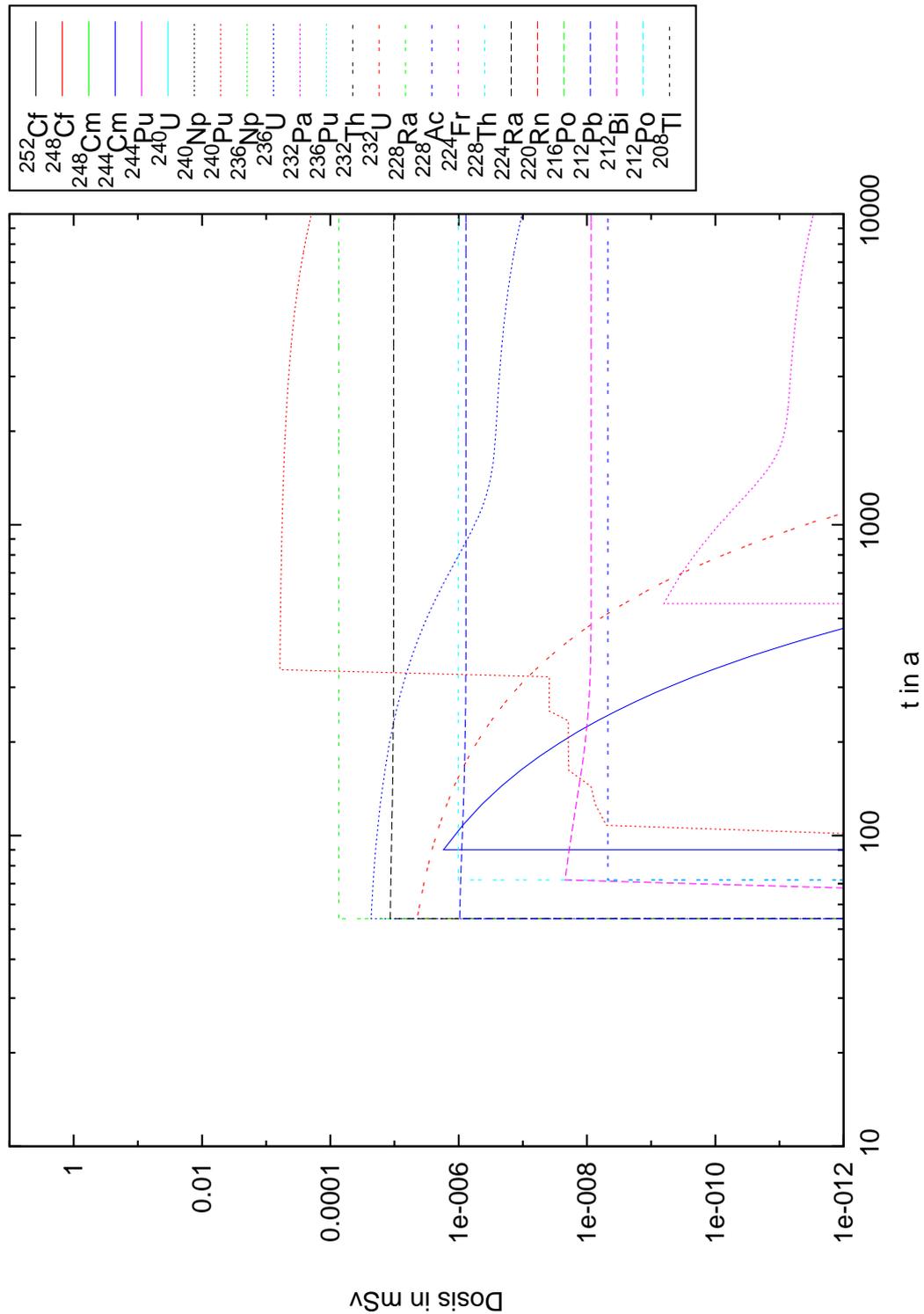


Abbildung B.64: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

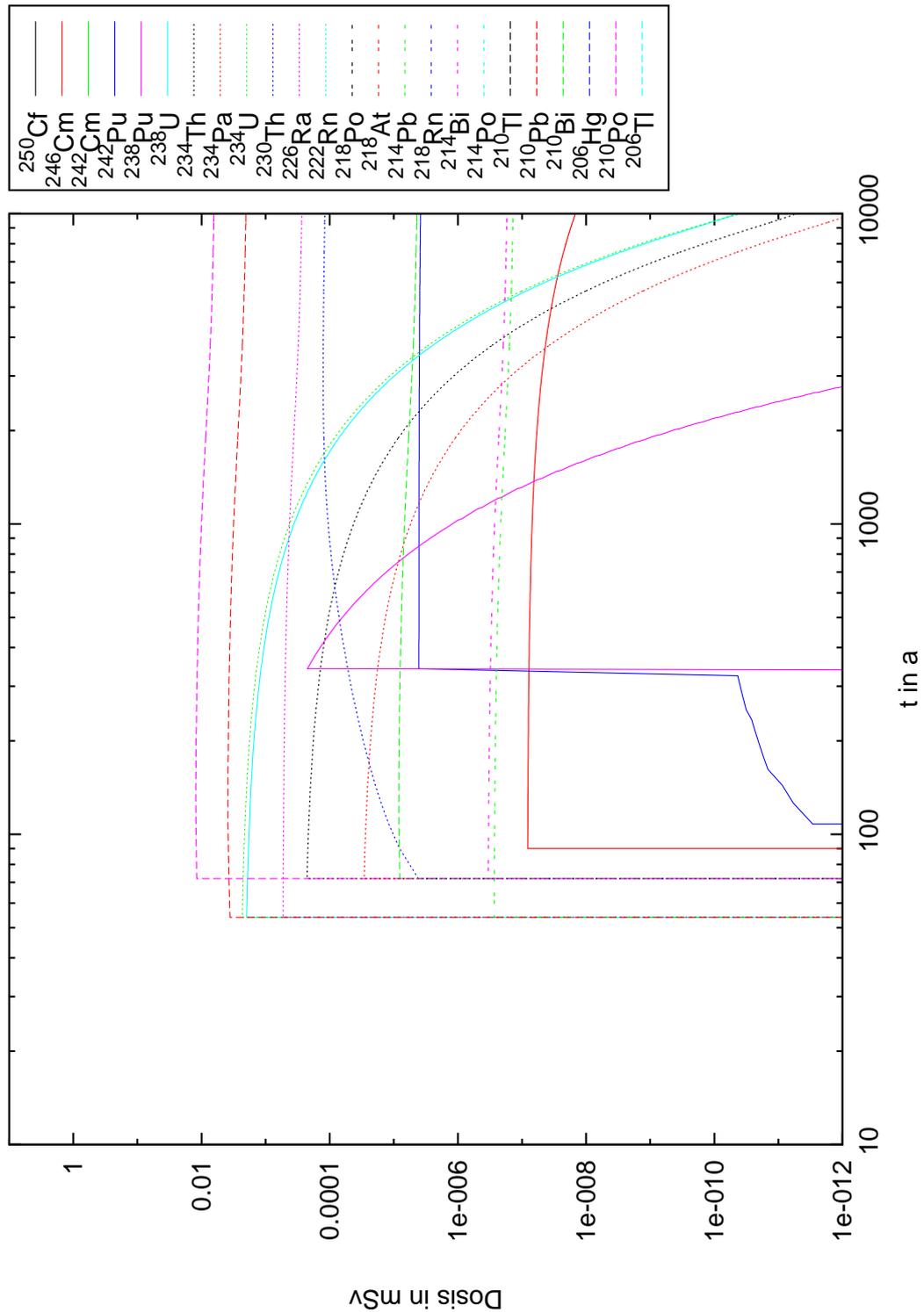


Abbildung B.65: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

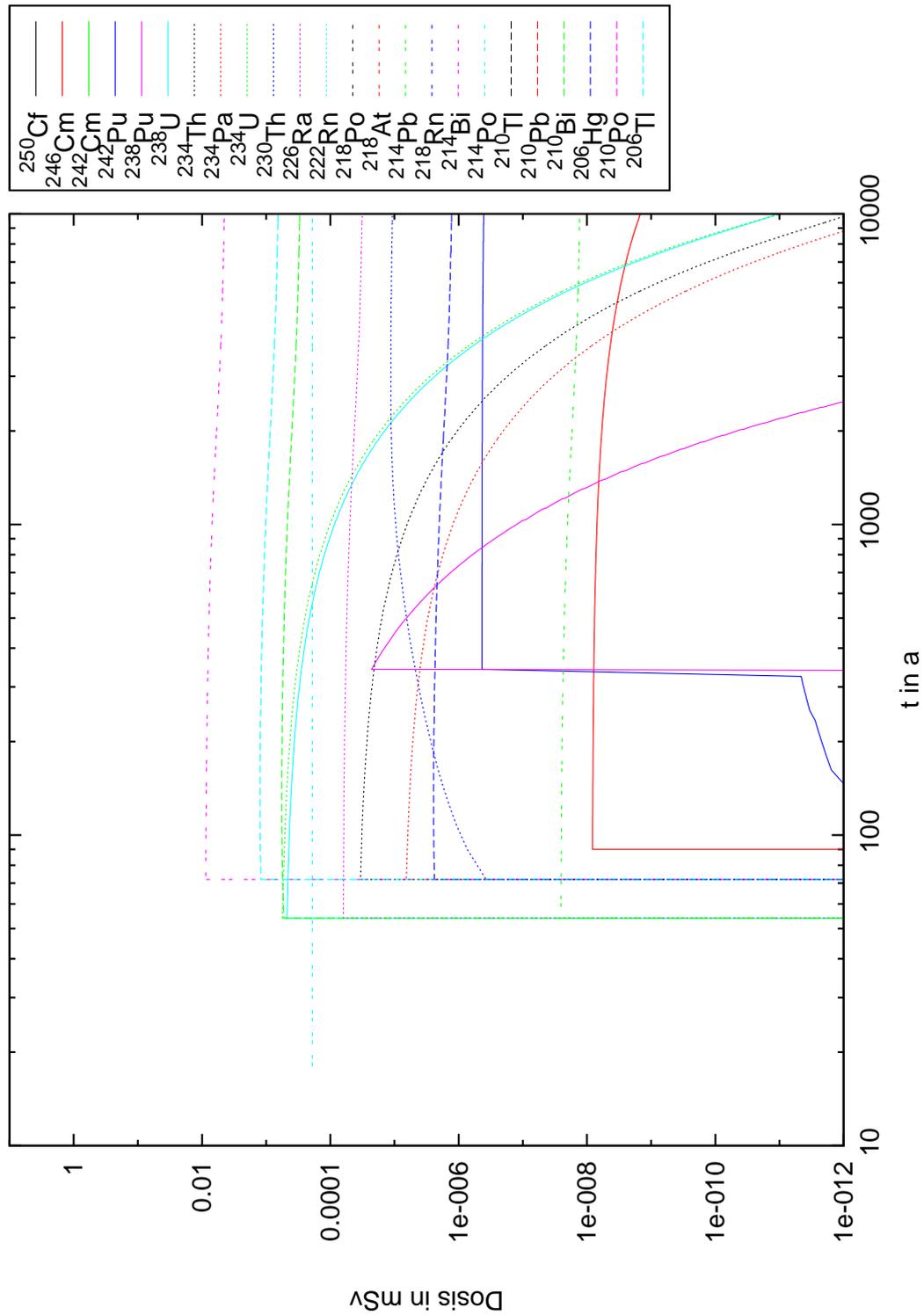


Abbildung B.66: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

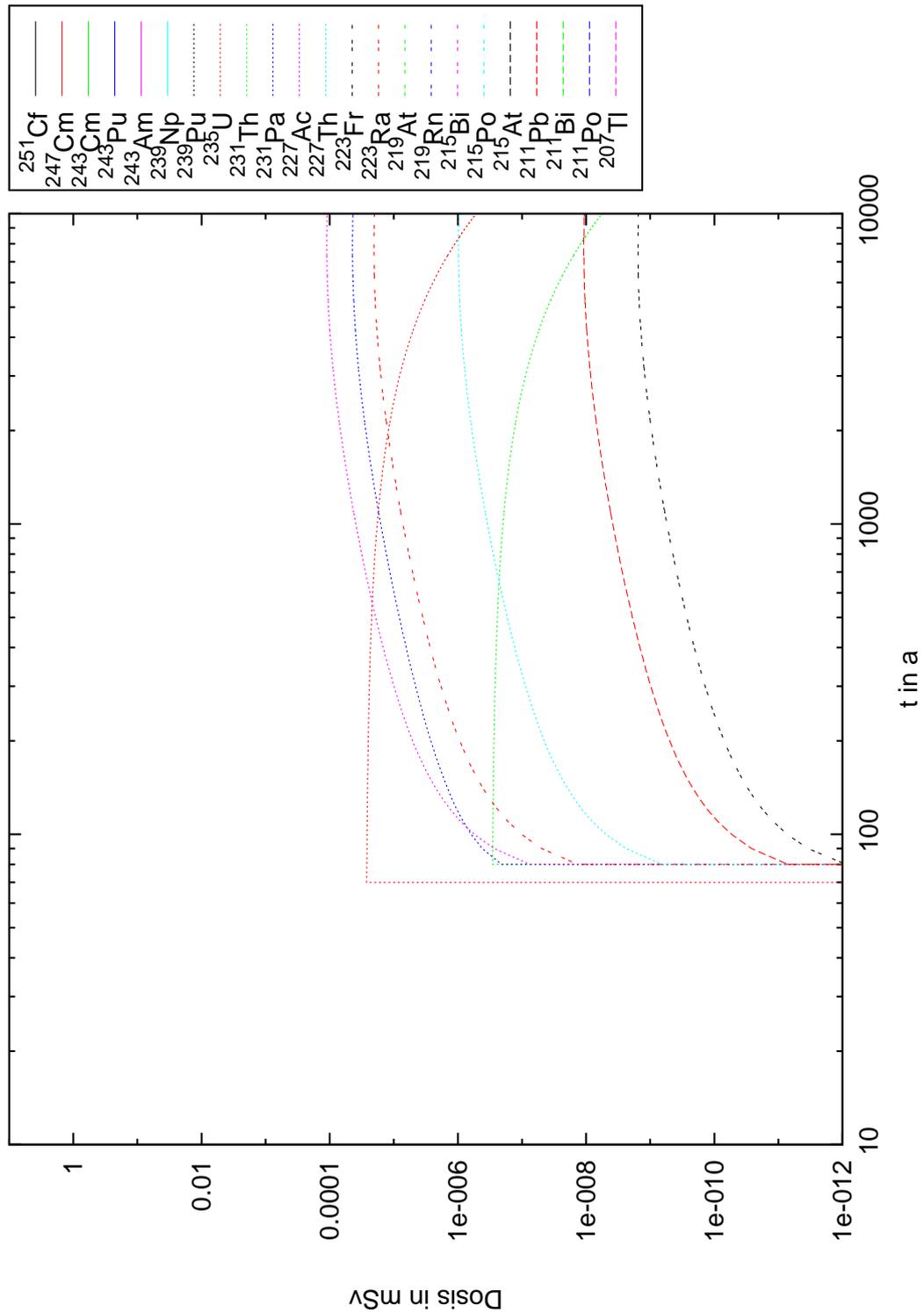


Abbildung B.67: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

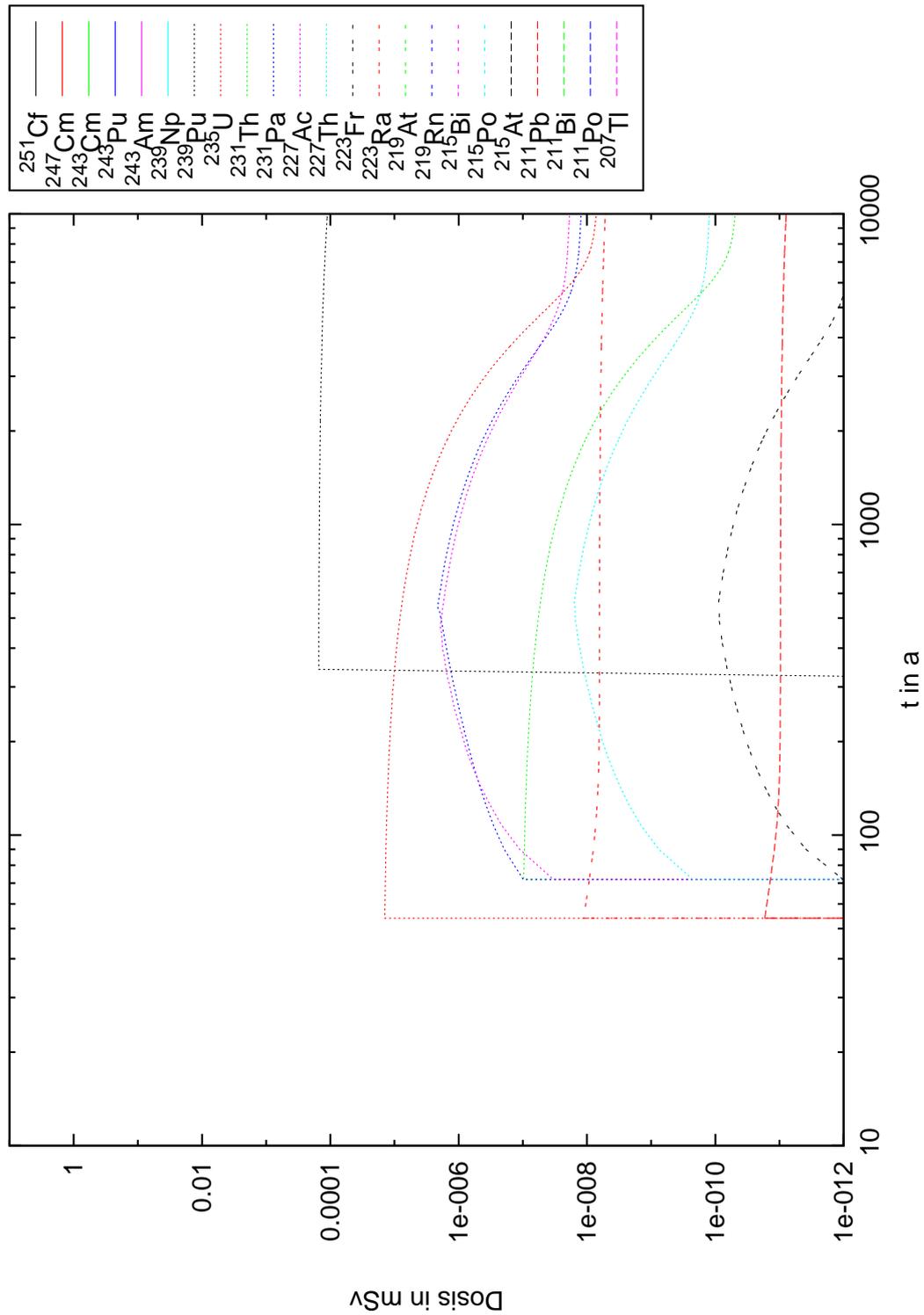


Abbildung B.68: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Sandschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

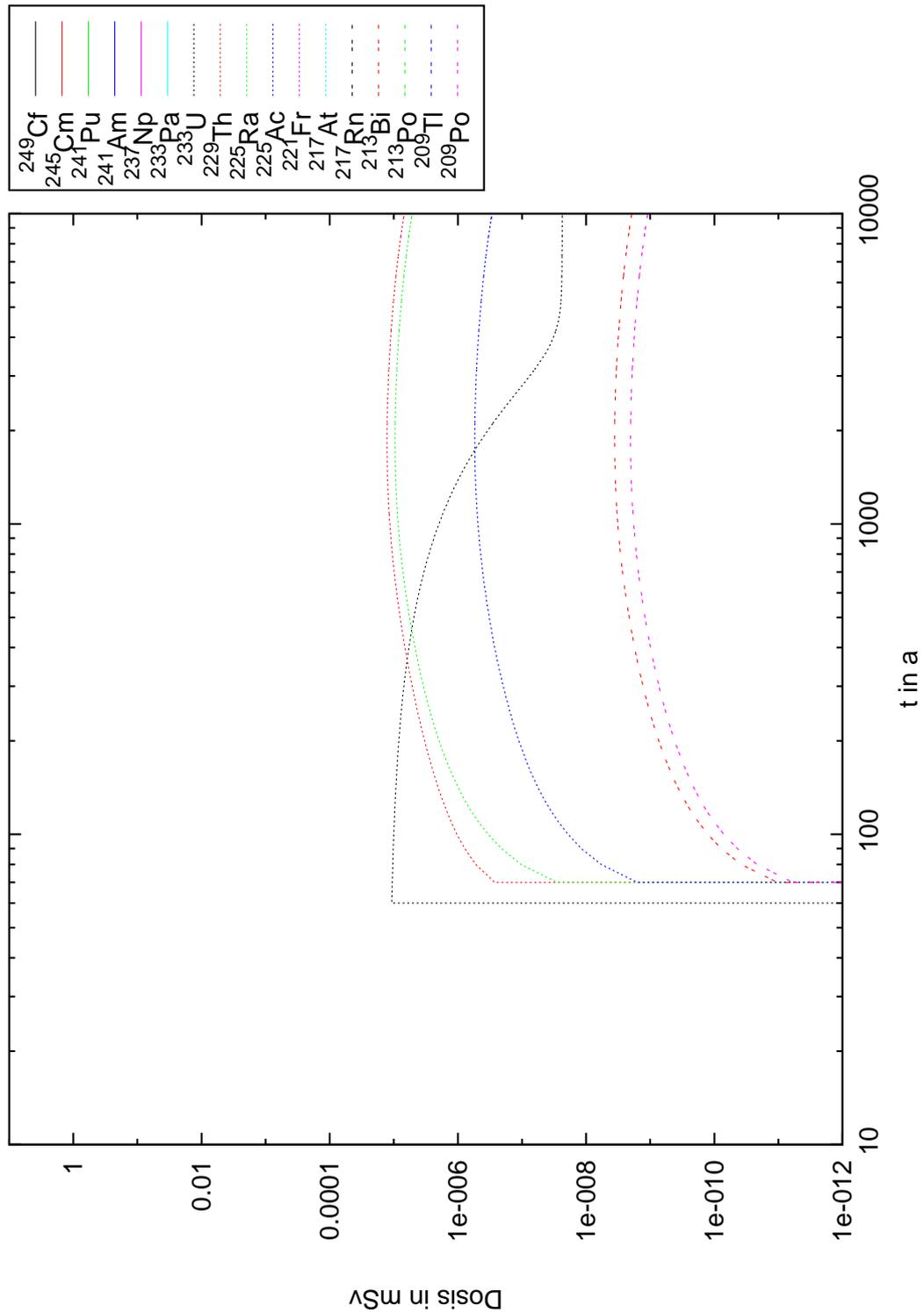


Abbildung B.69: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

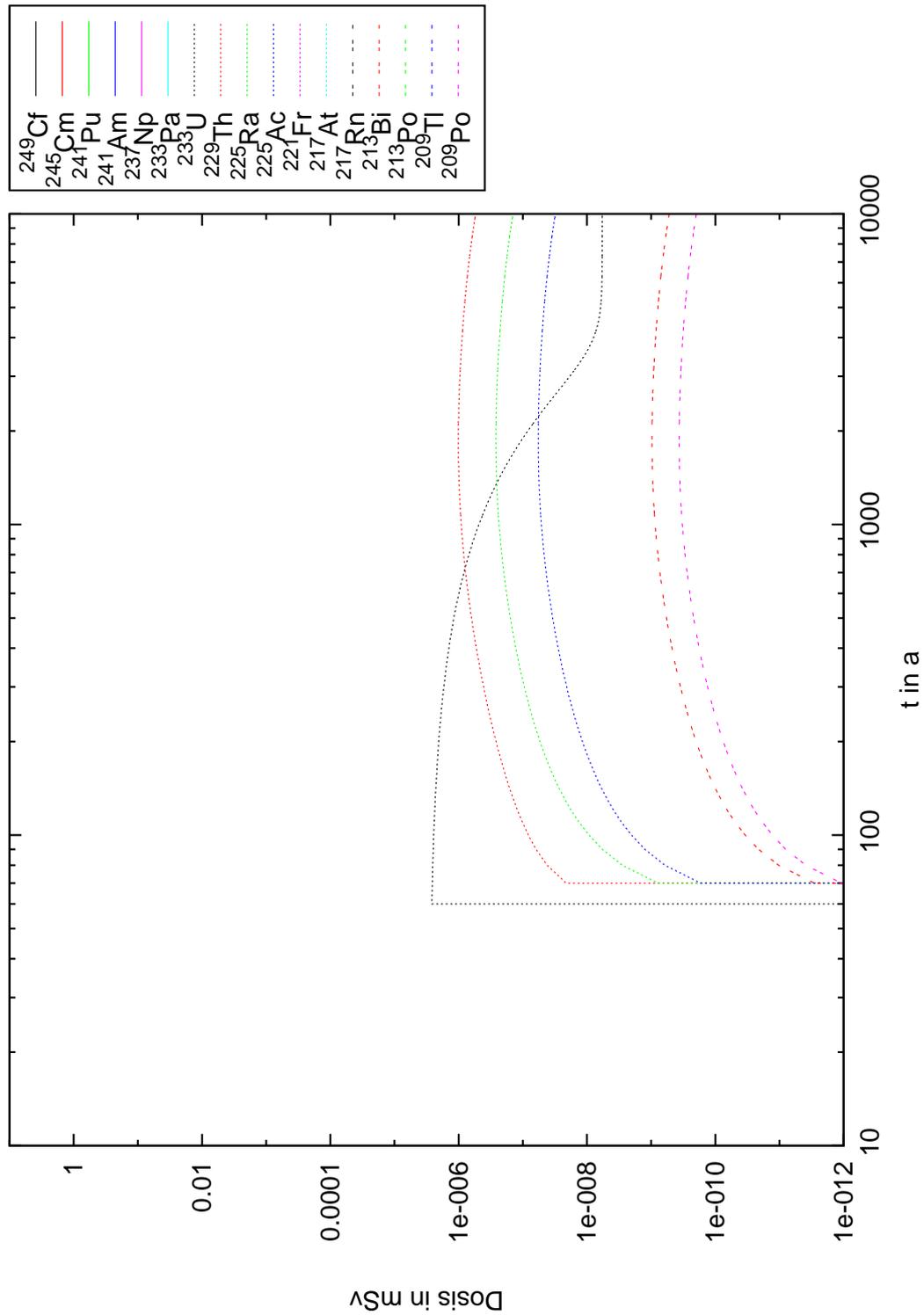


Abbildung B.70: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

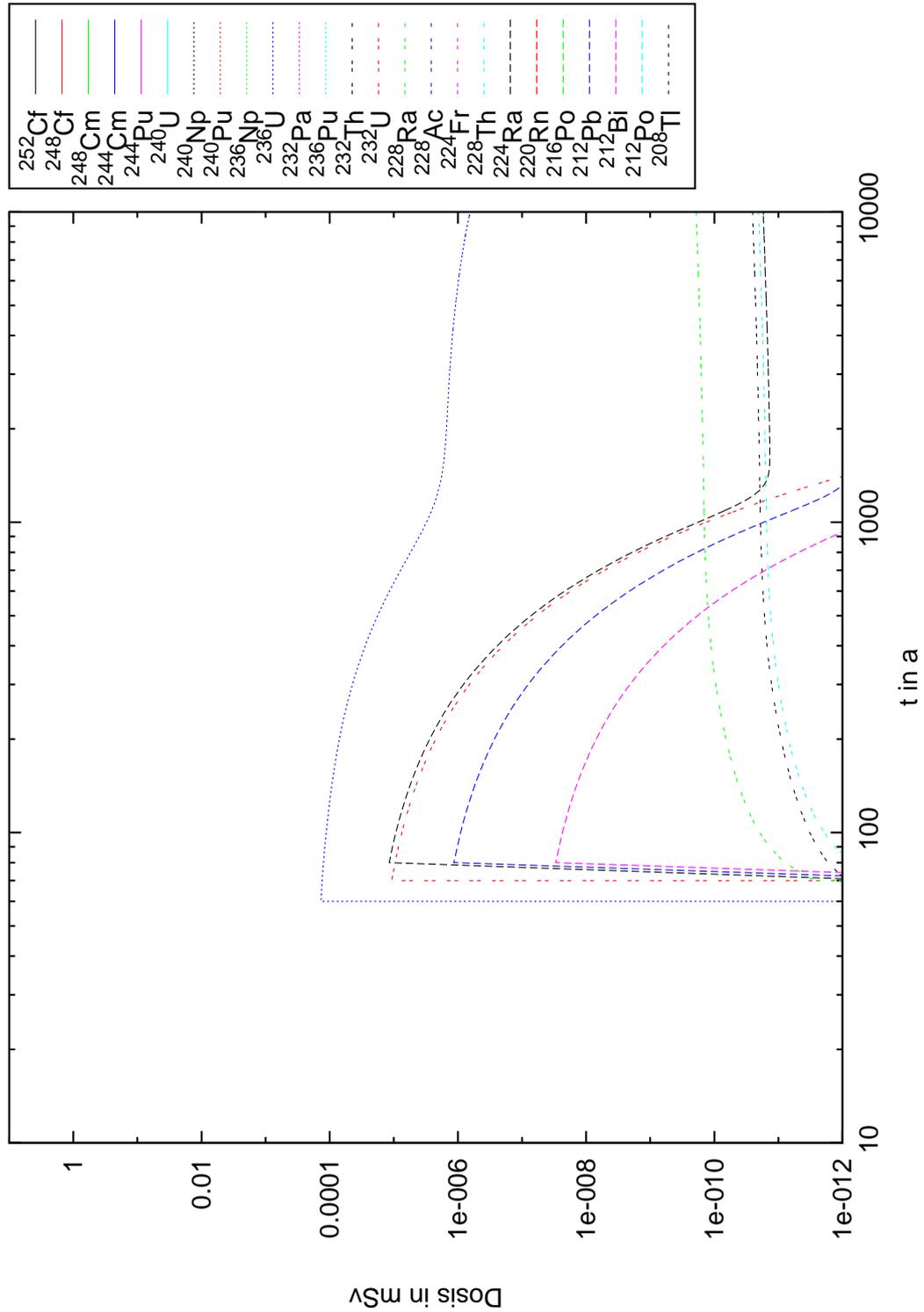


Abbildung B.71: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

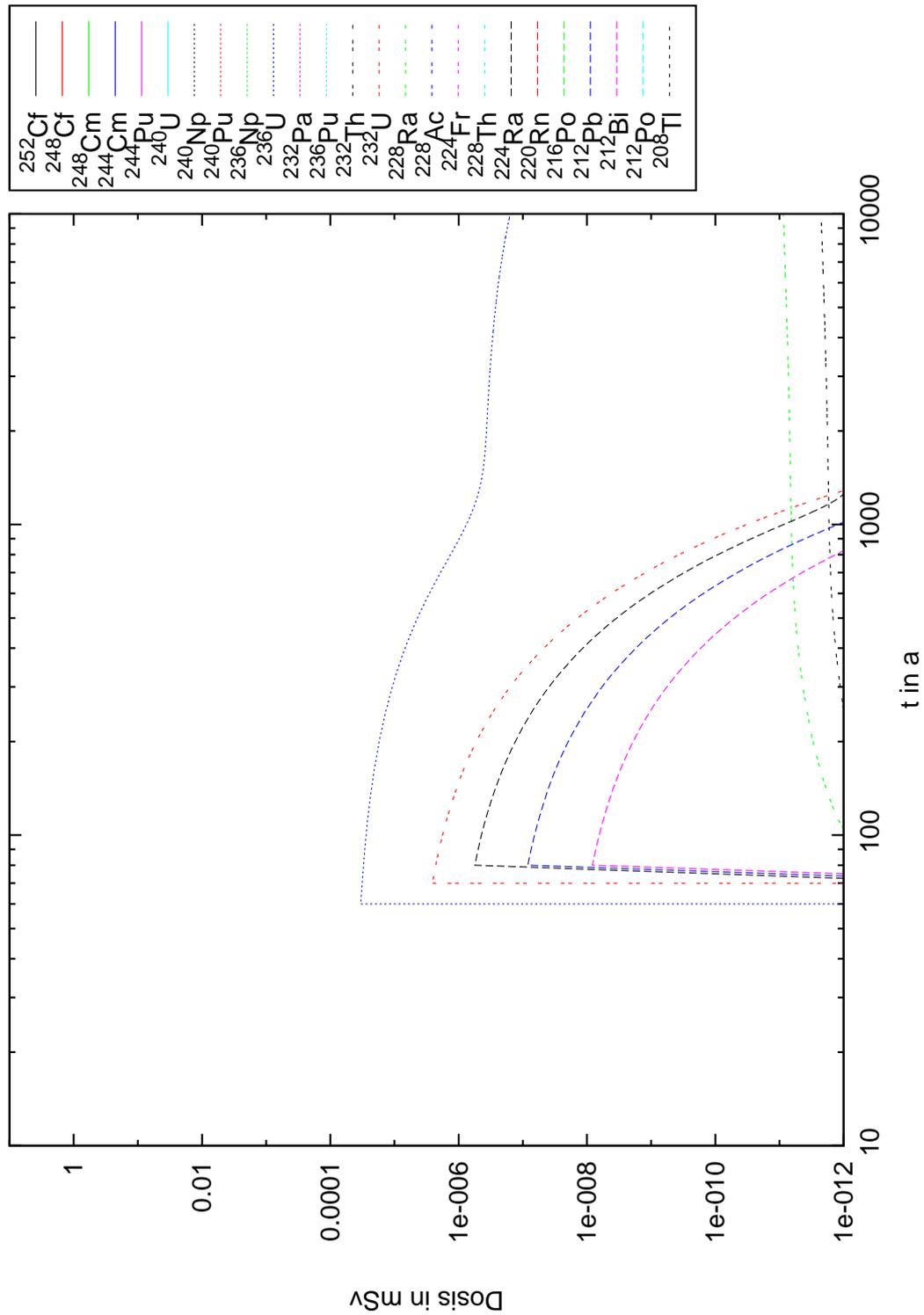


Abbildung B.72: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

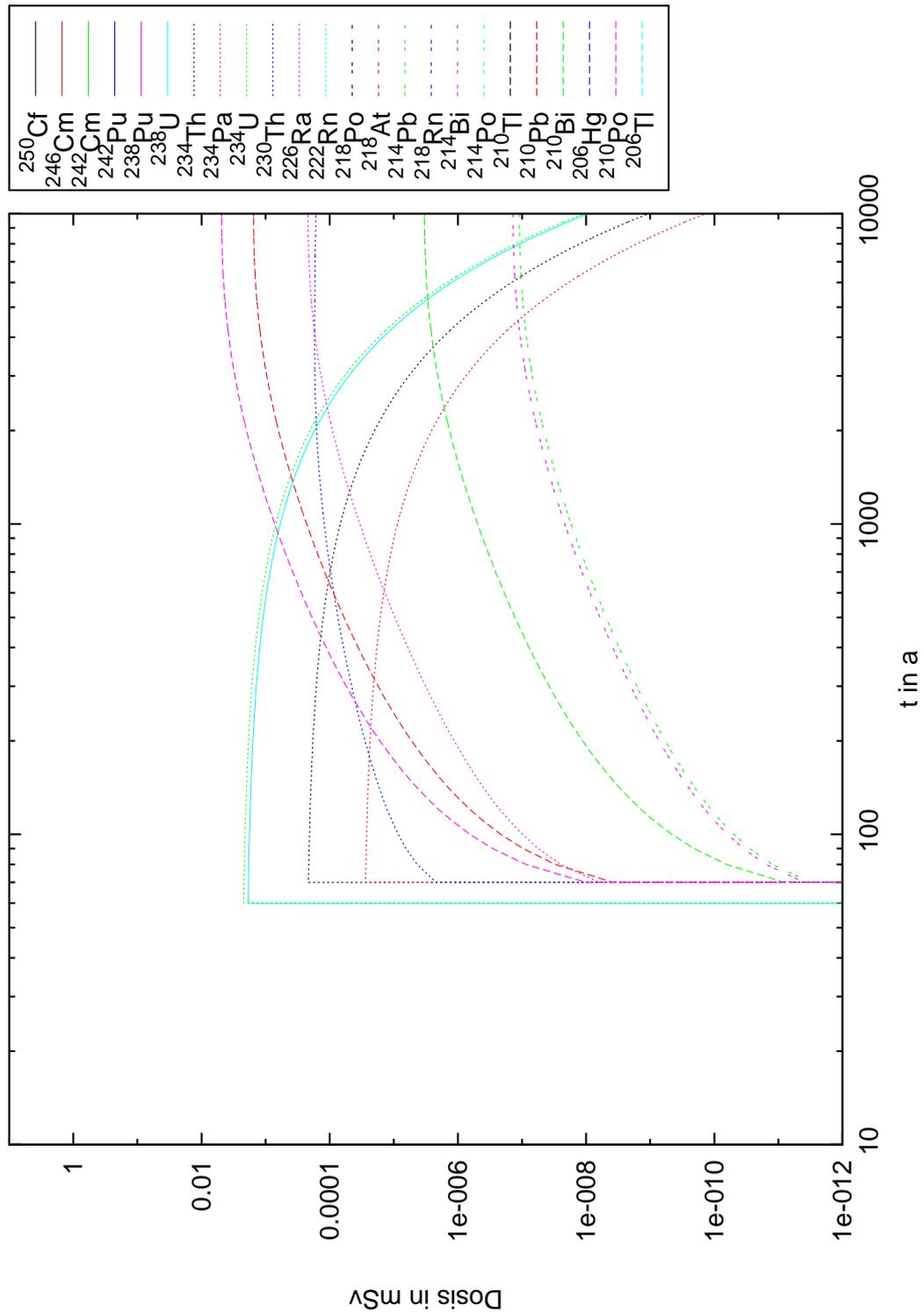


Abbildung B.73: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

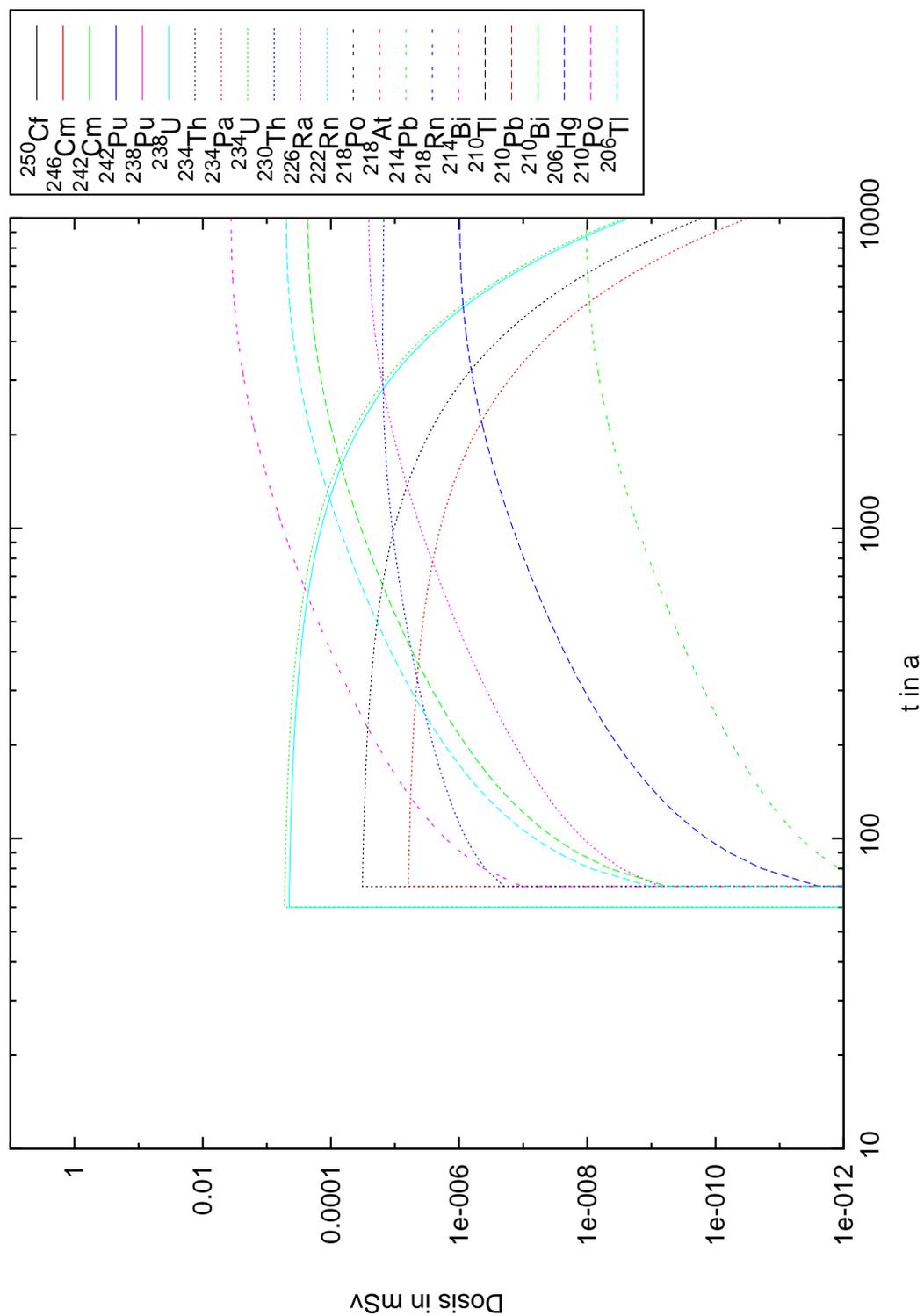


Abbildung B.74: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

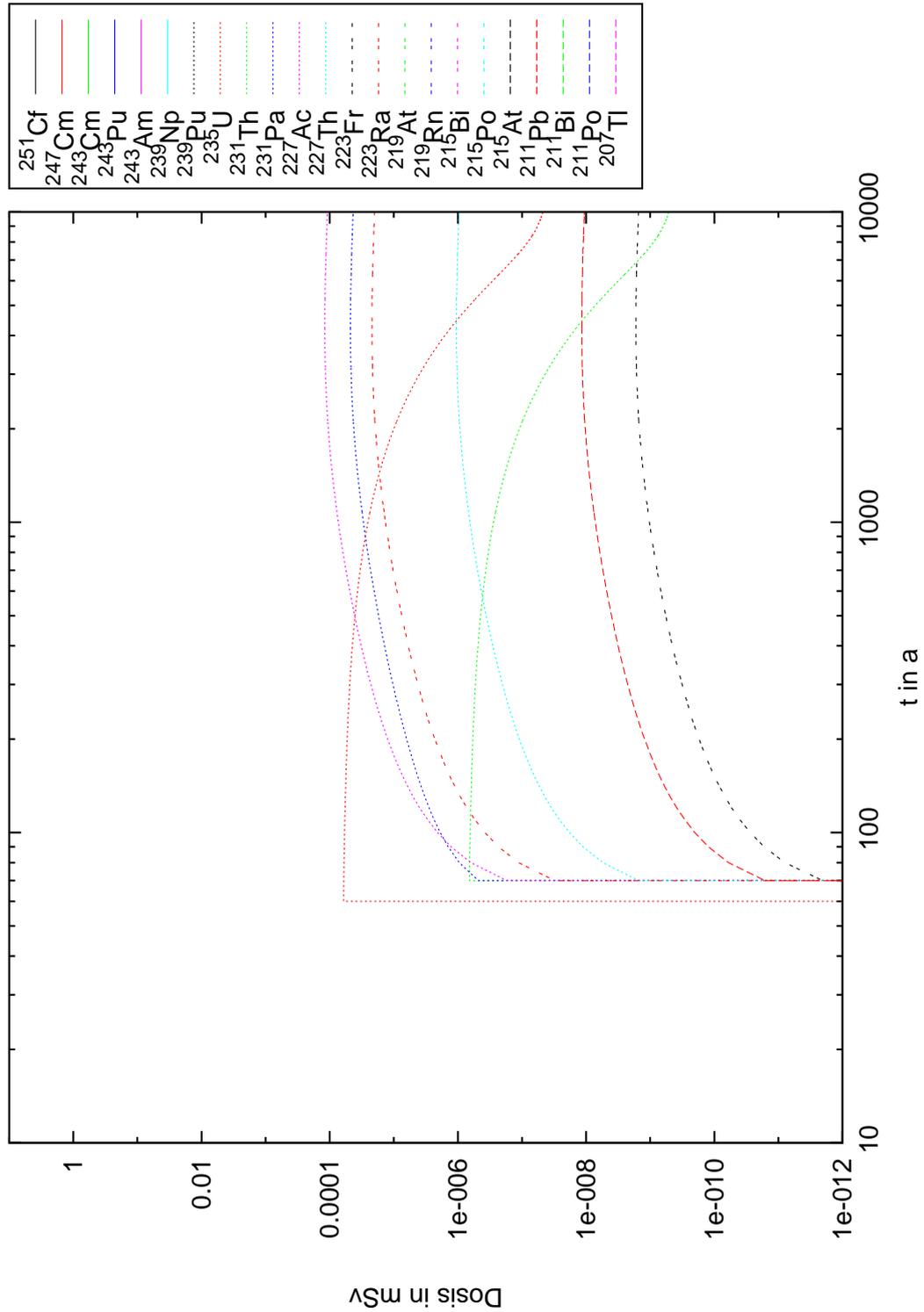


Abbildung B.75: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

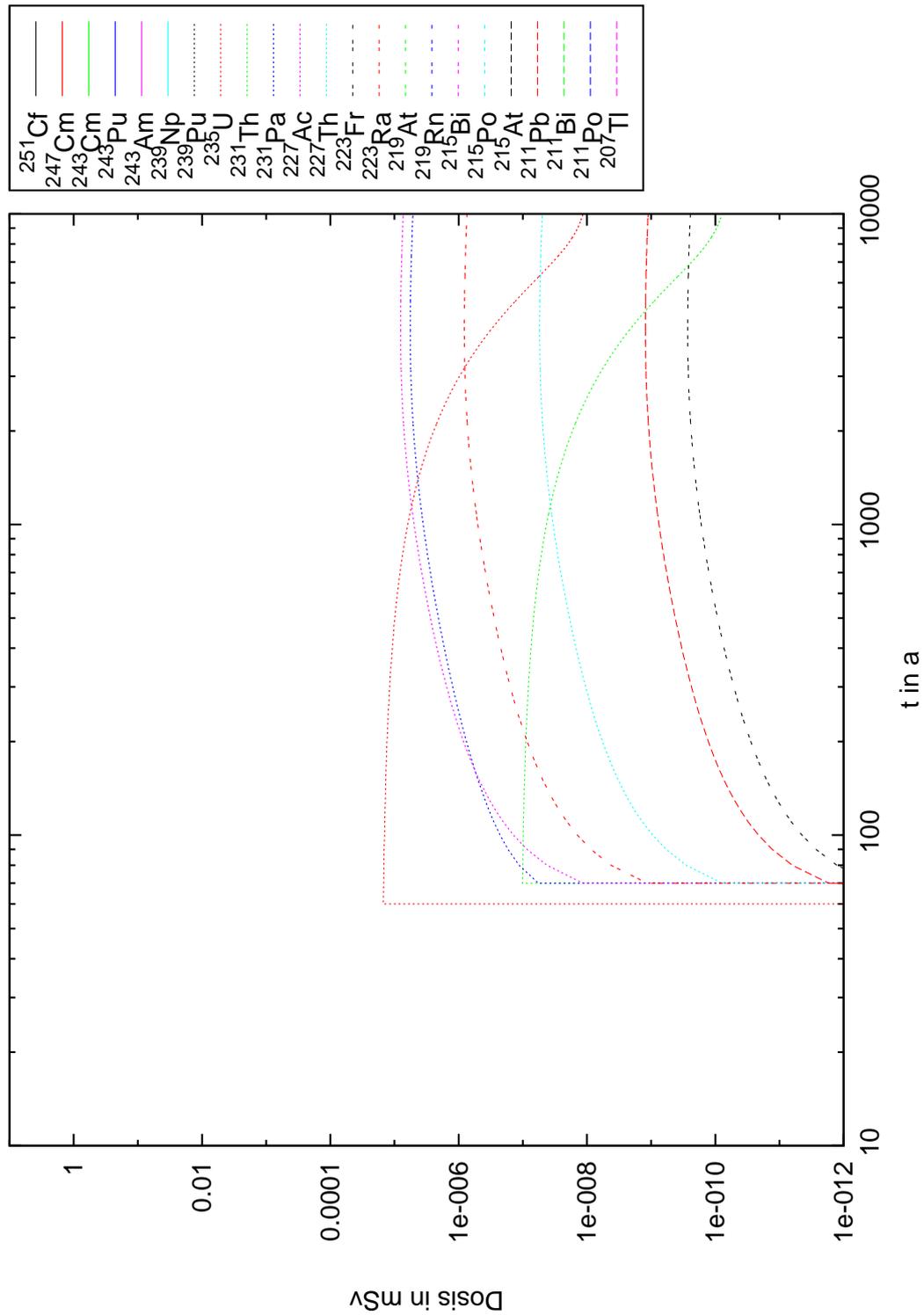


Abbildung B.76: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Lehmschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

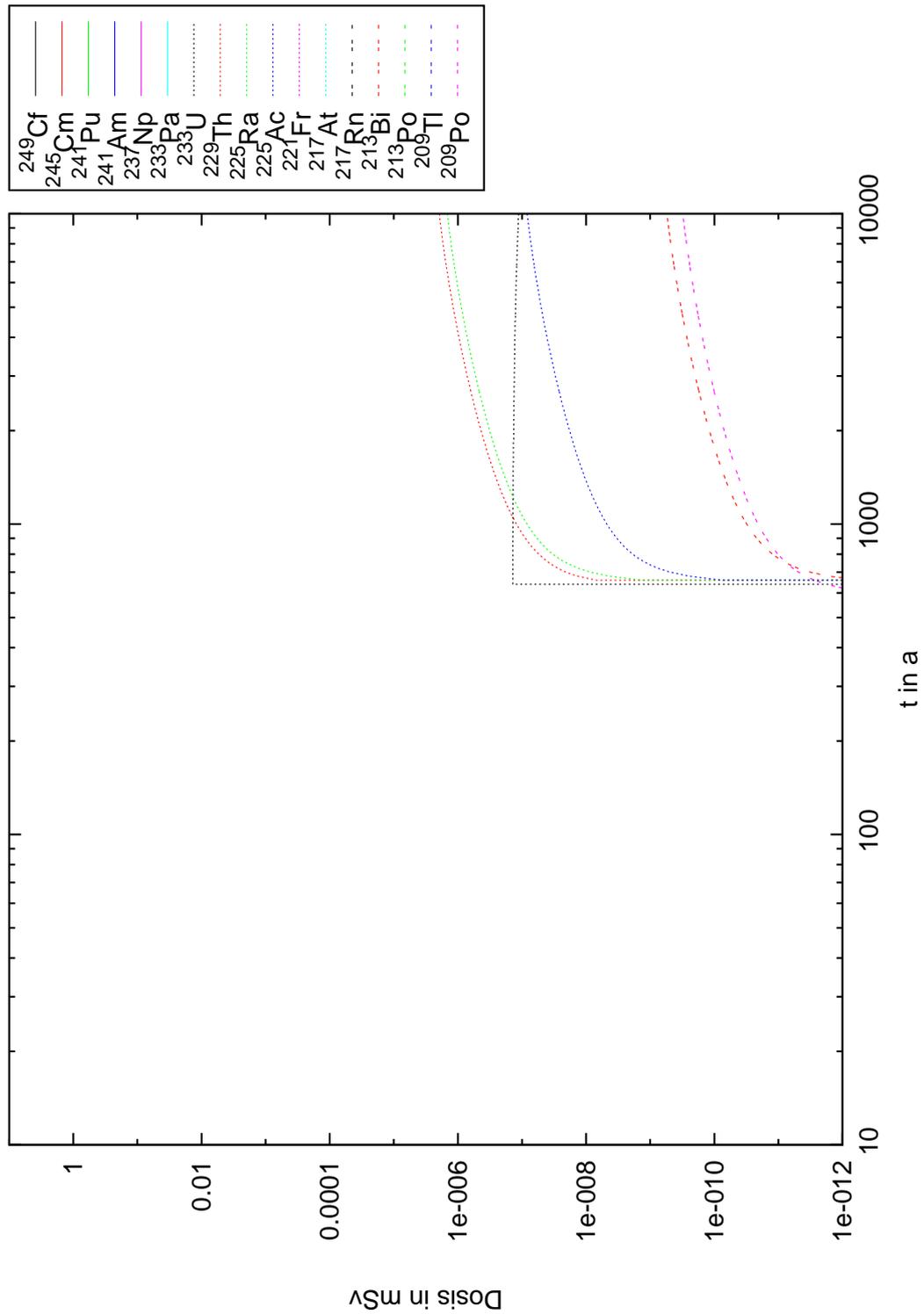


Abbildung B.77: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

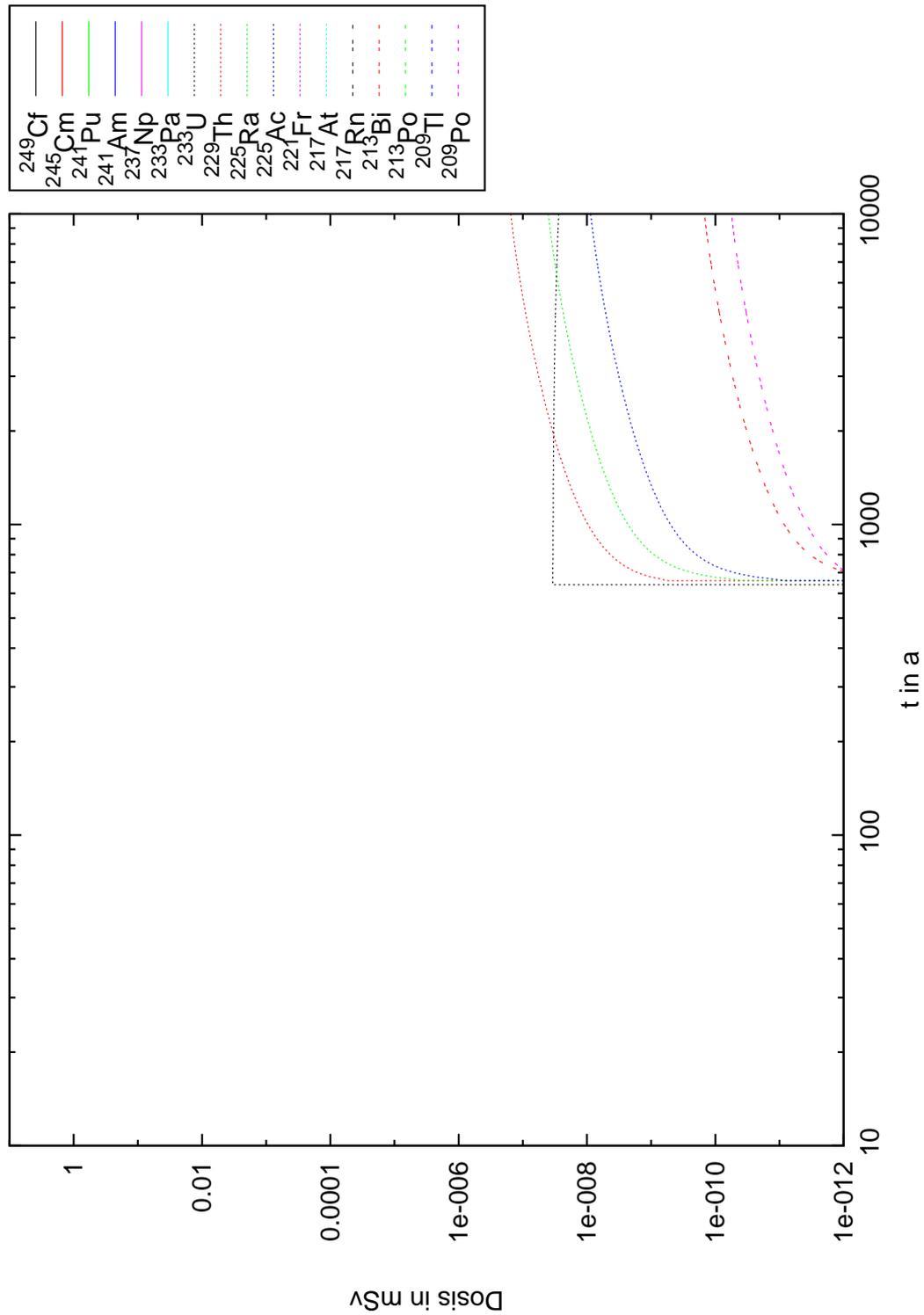


Abbildung B.78: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

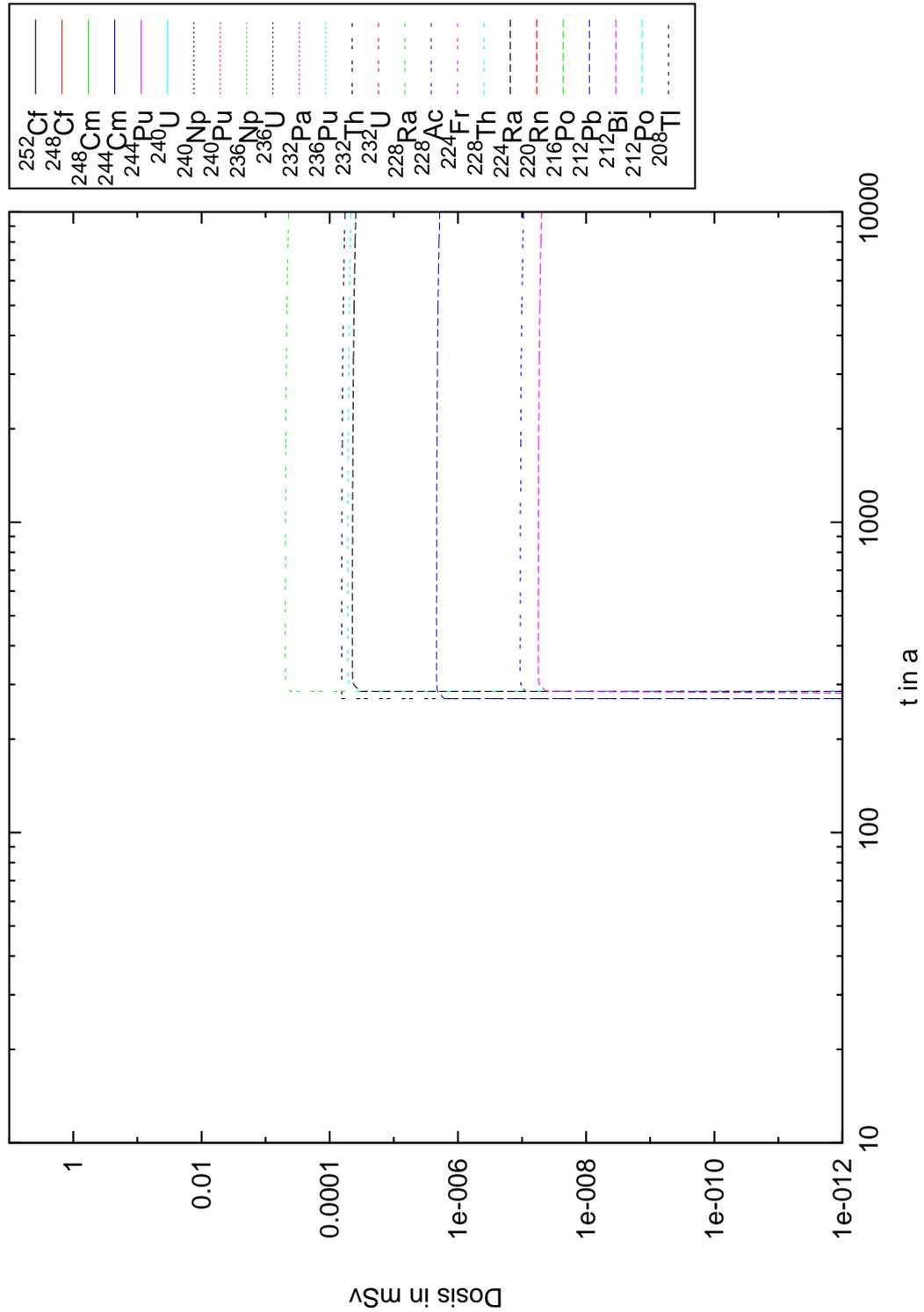


Abbildung B.79: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

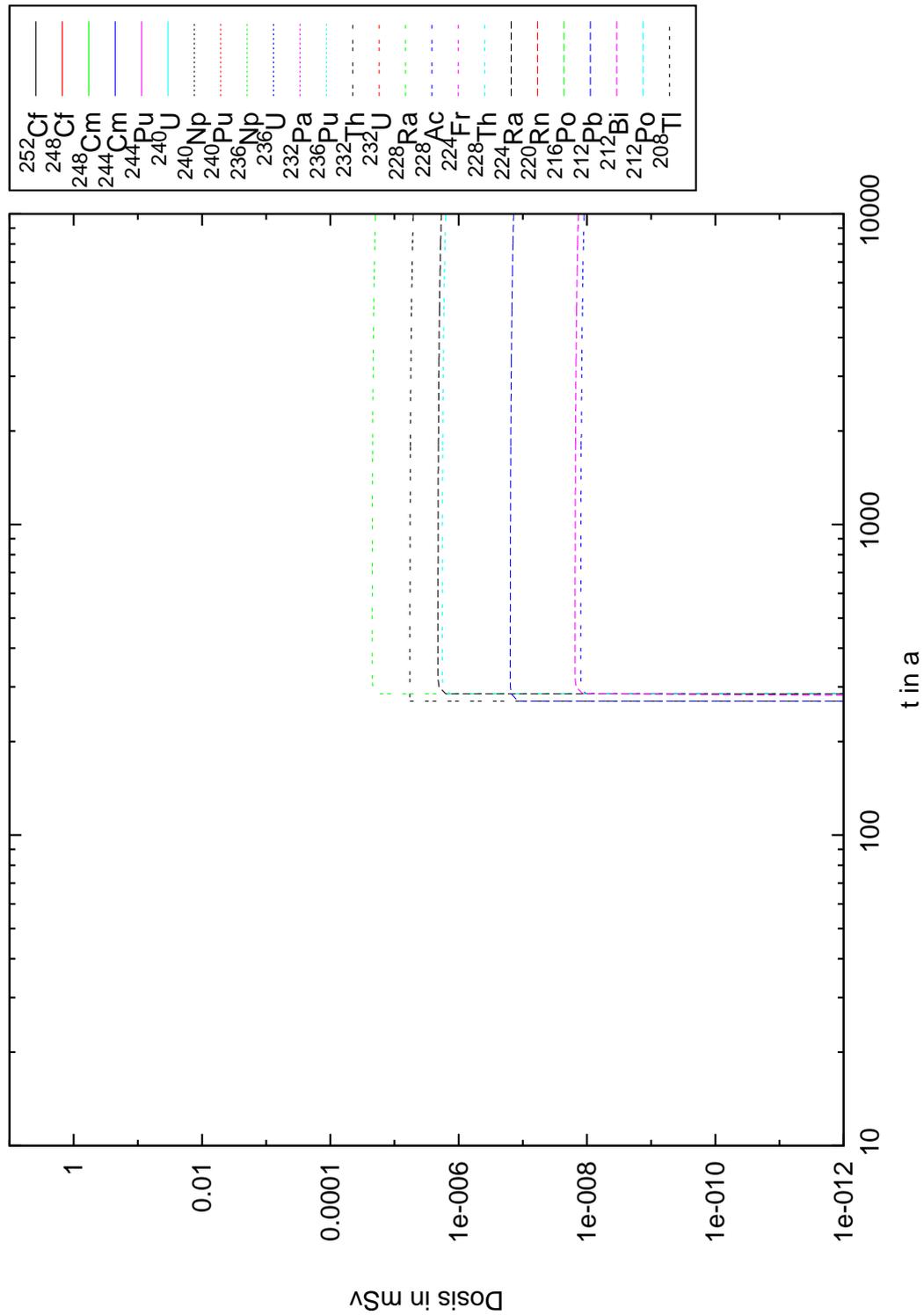


Abbildung B.80: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

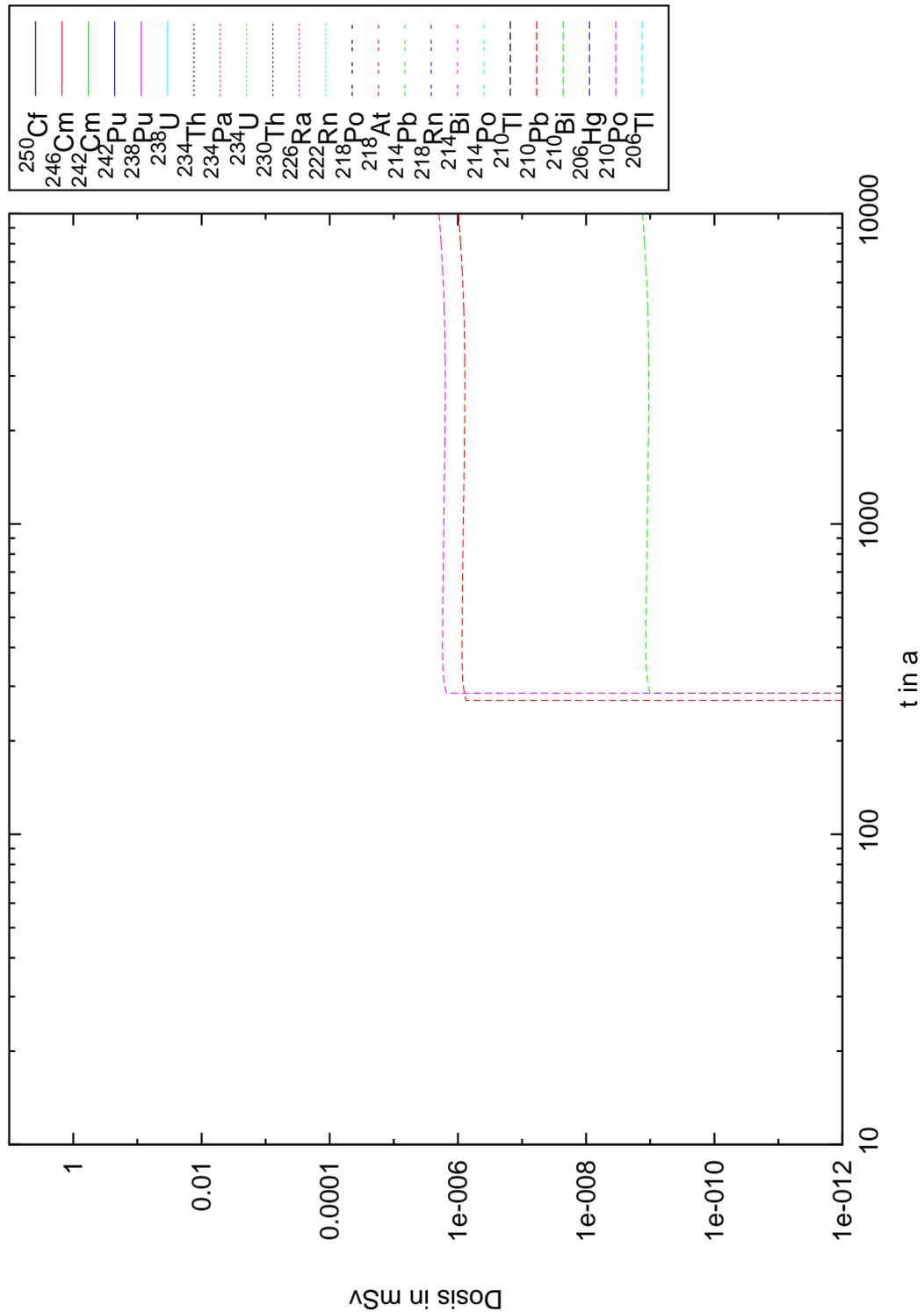


Abbildung B.81: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

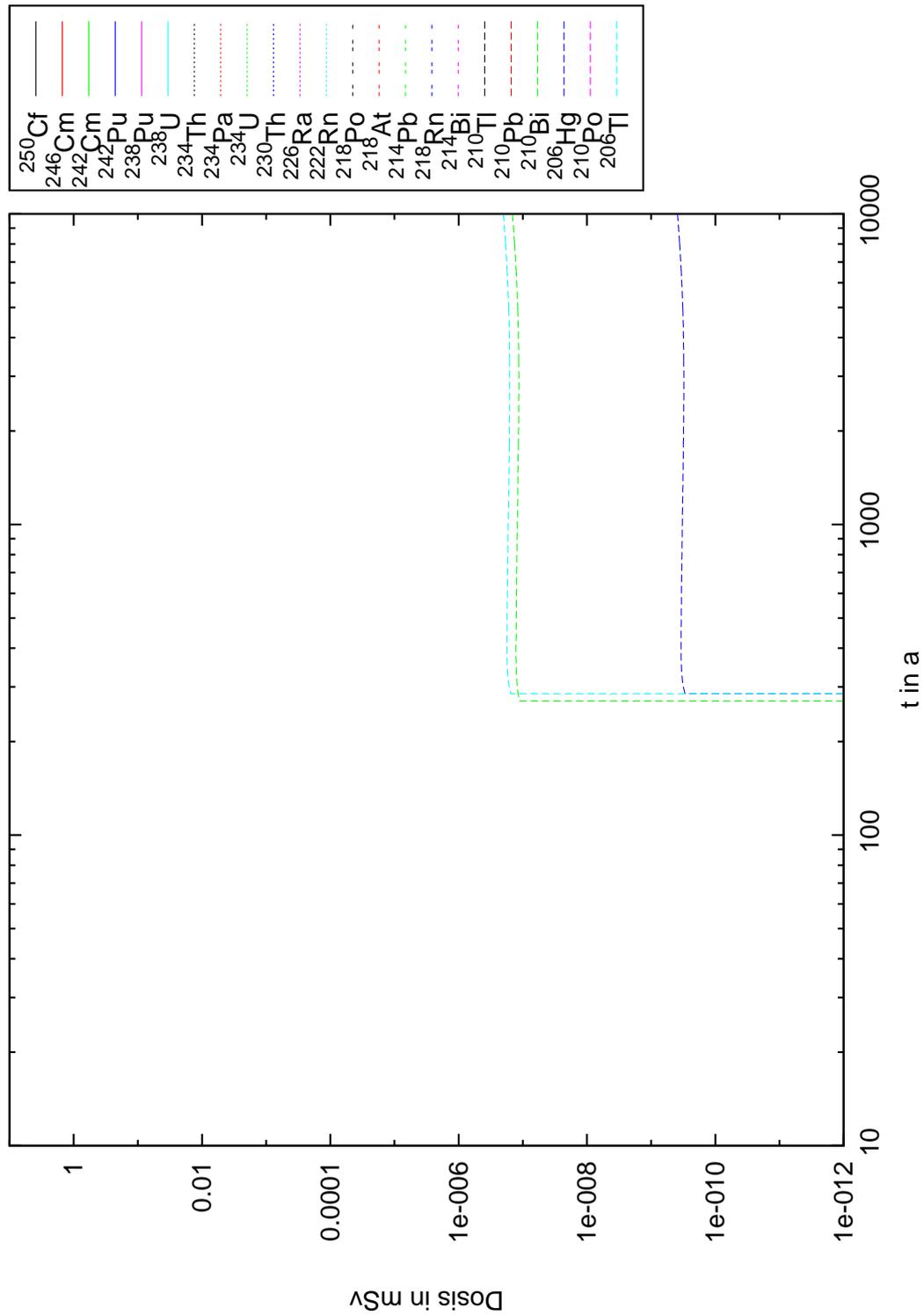


Abbildung B.82: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

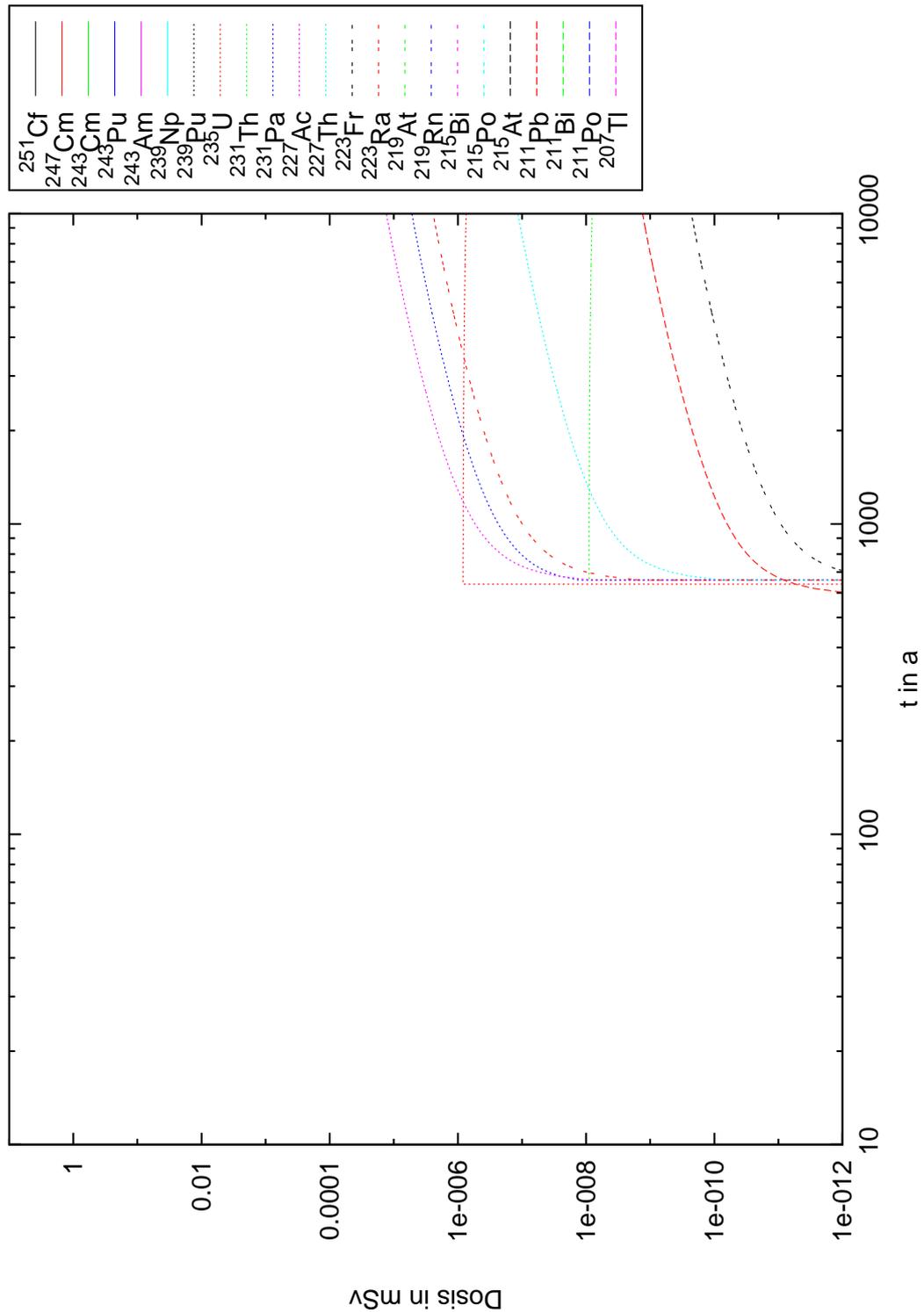


Abbildung B.83: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

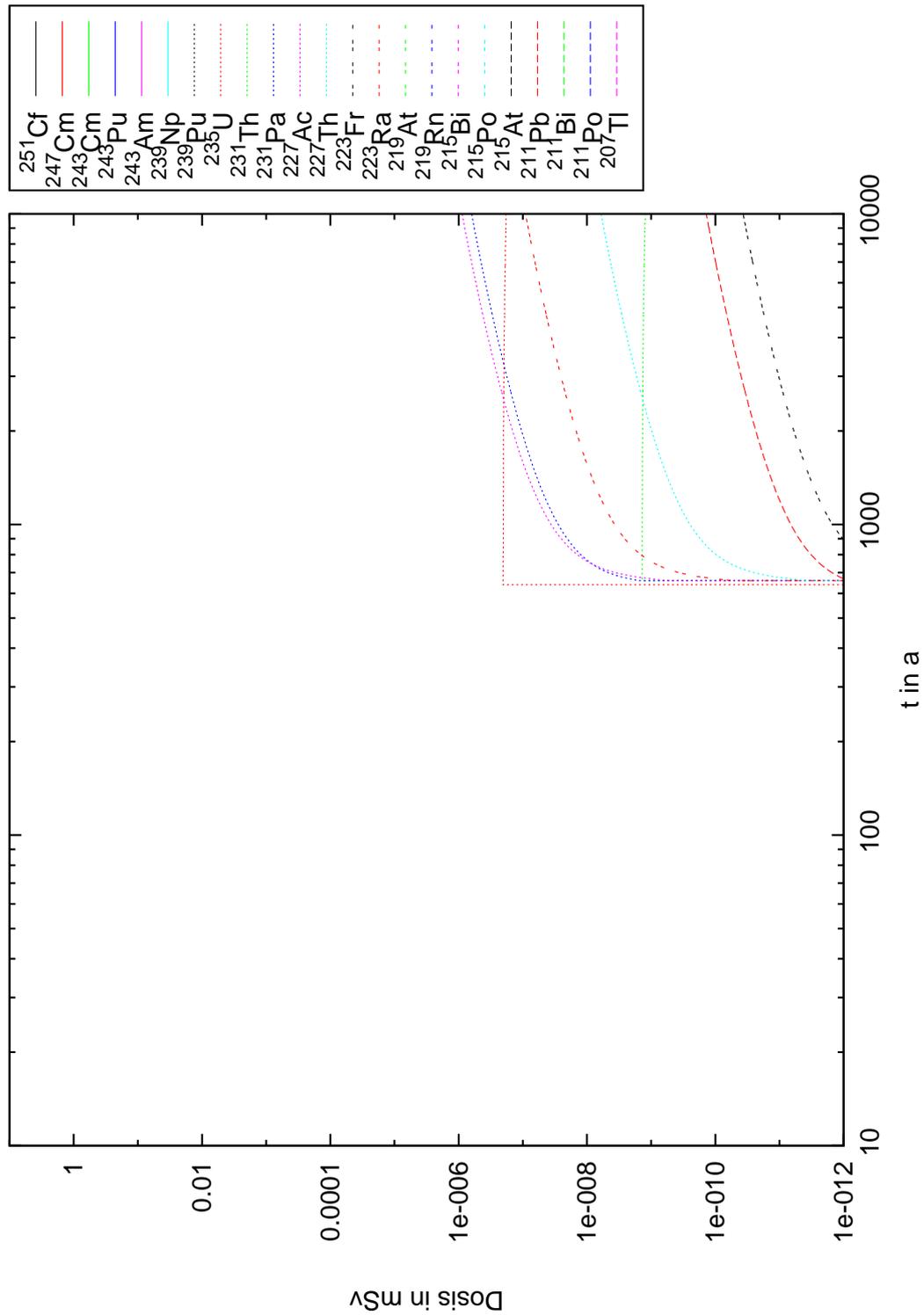


Abbildung B.84: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer Tonschicht. k_d -Werte nach [Sys06]

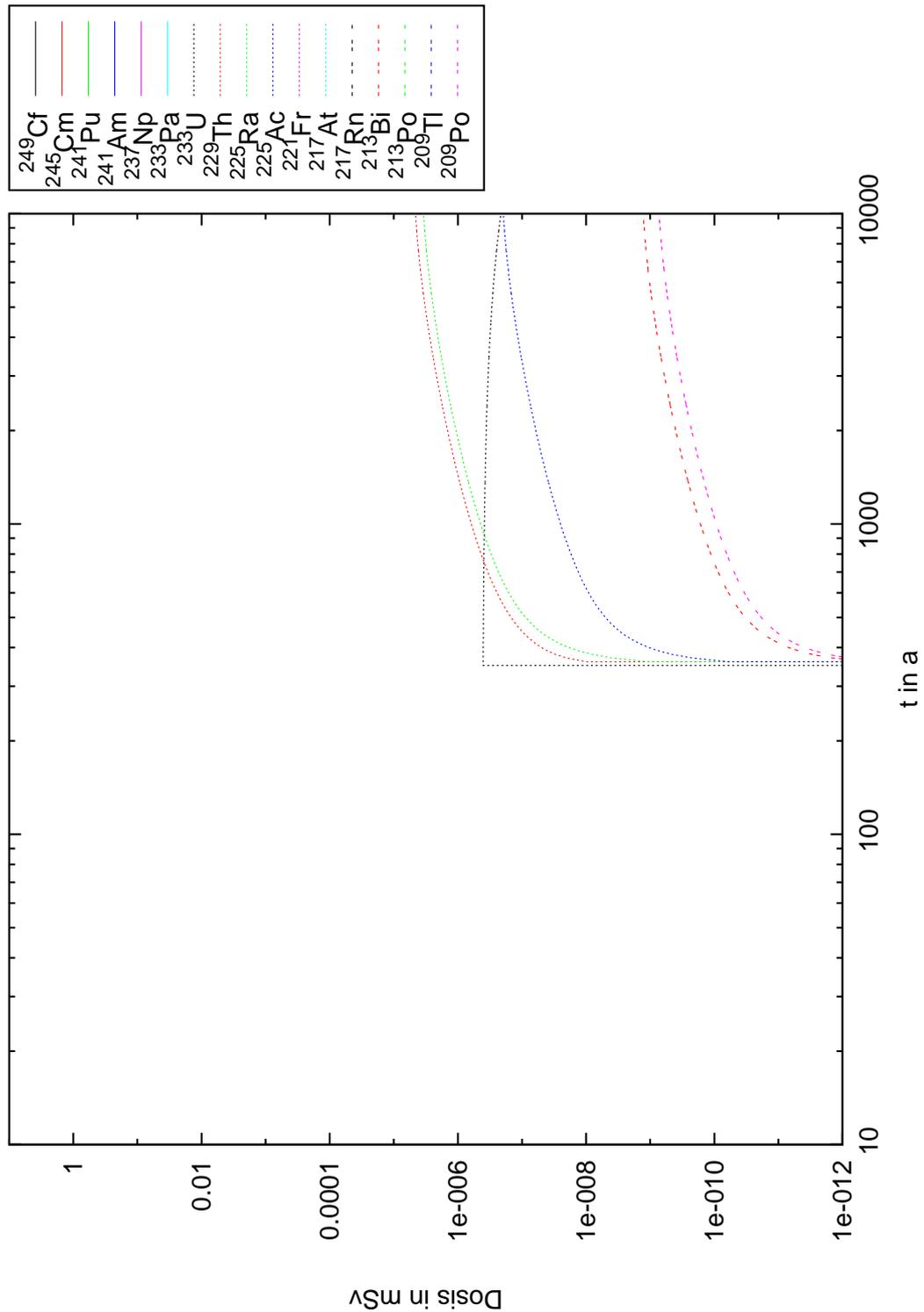


Abbildung B.85: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

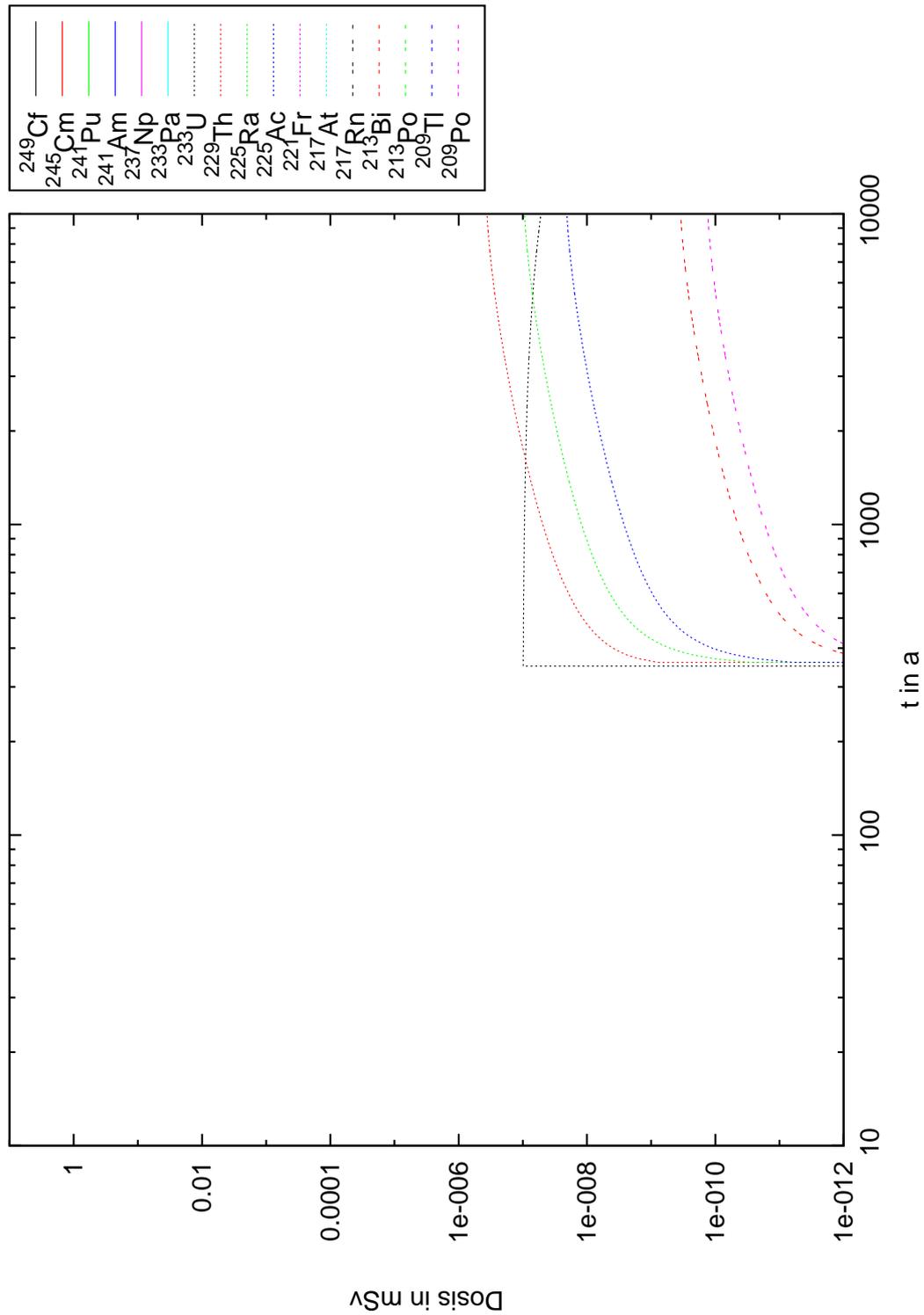


Abbildung B.86: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Np-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

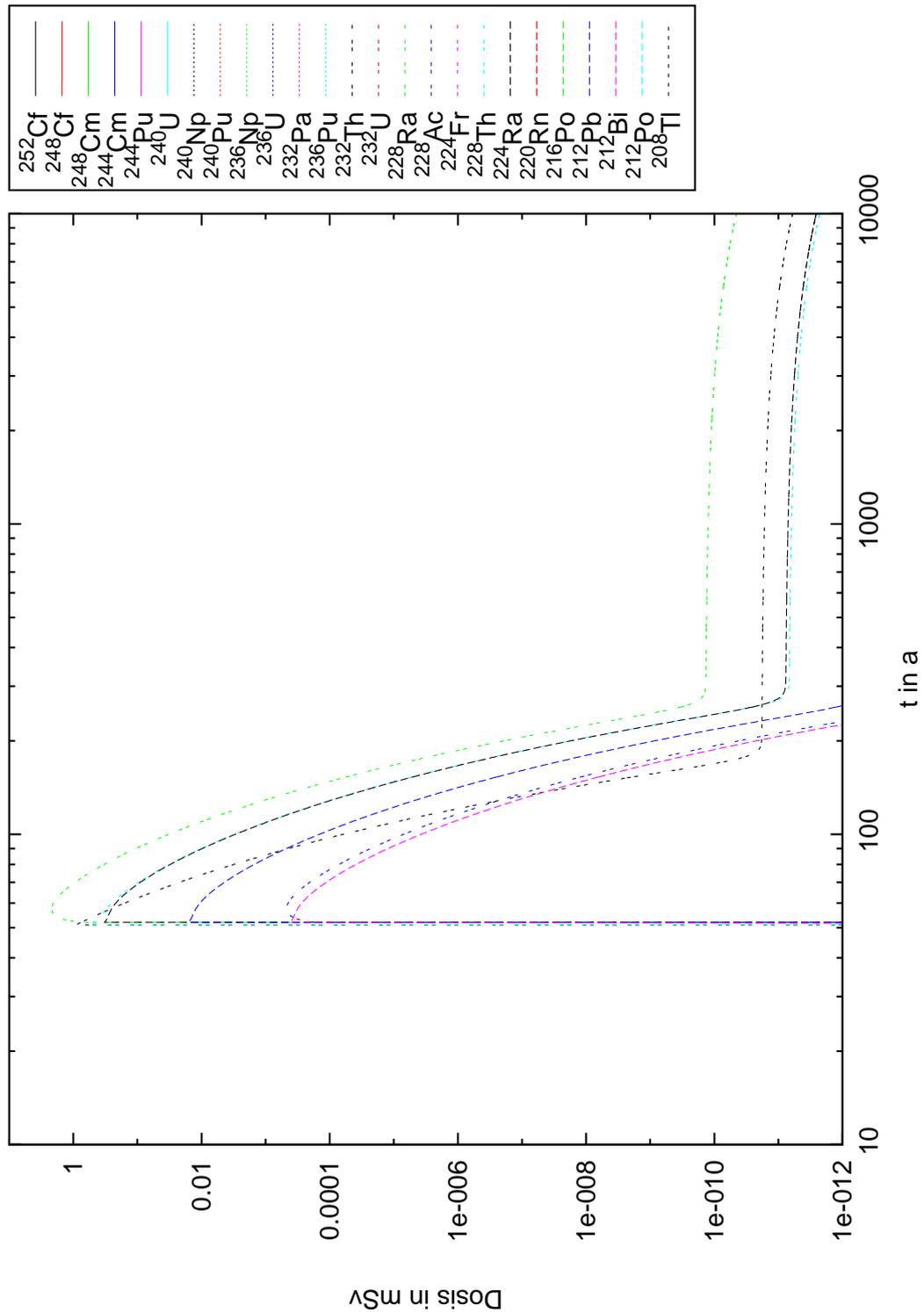


Abbildung B.87: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

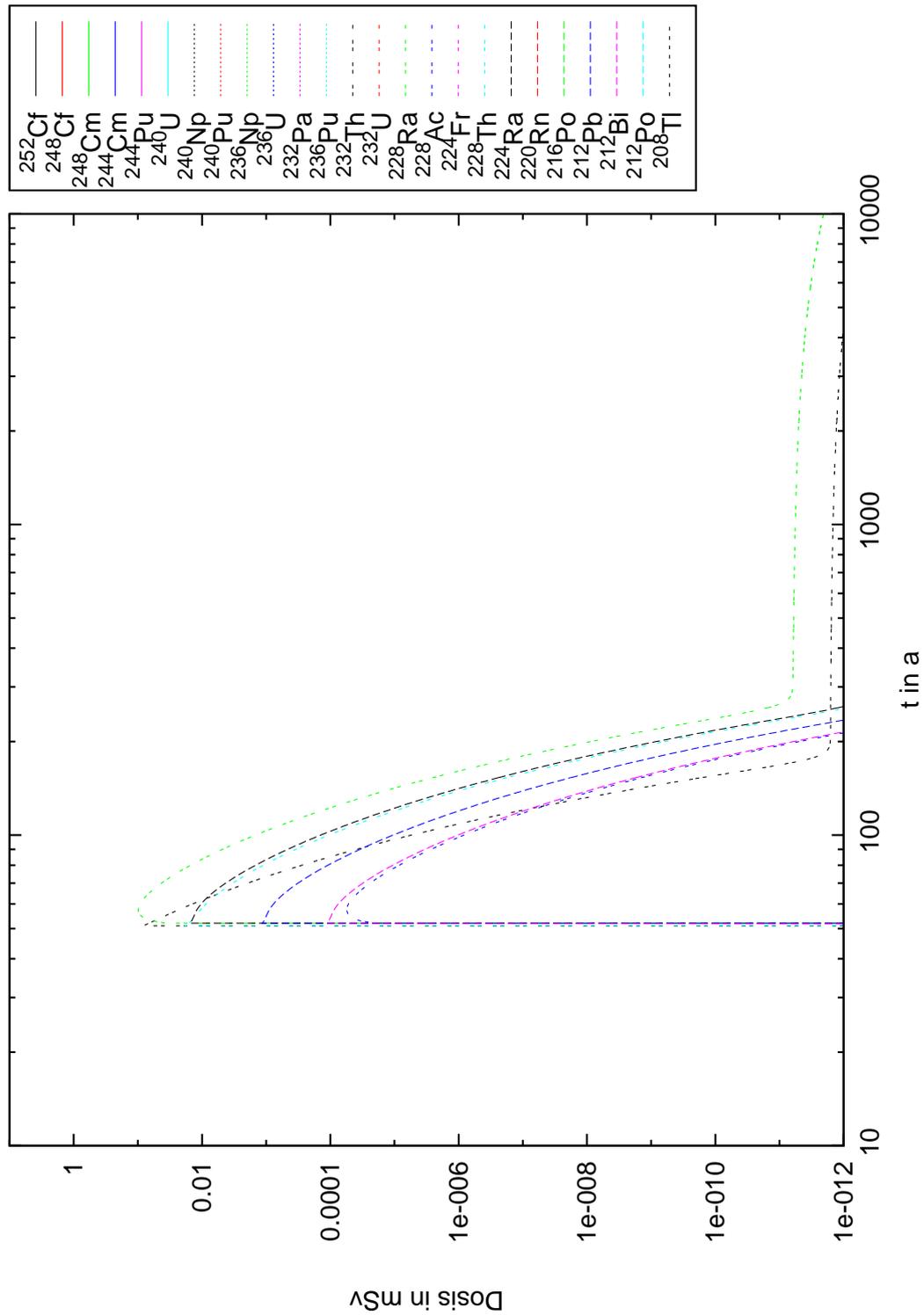


Abbildung B.88: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der Th-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

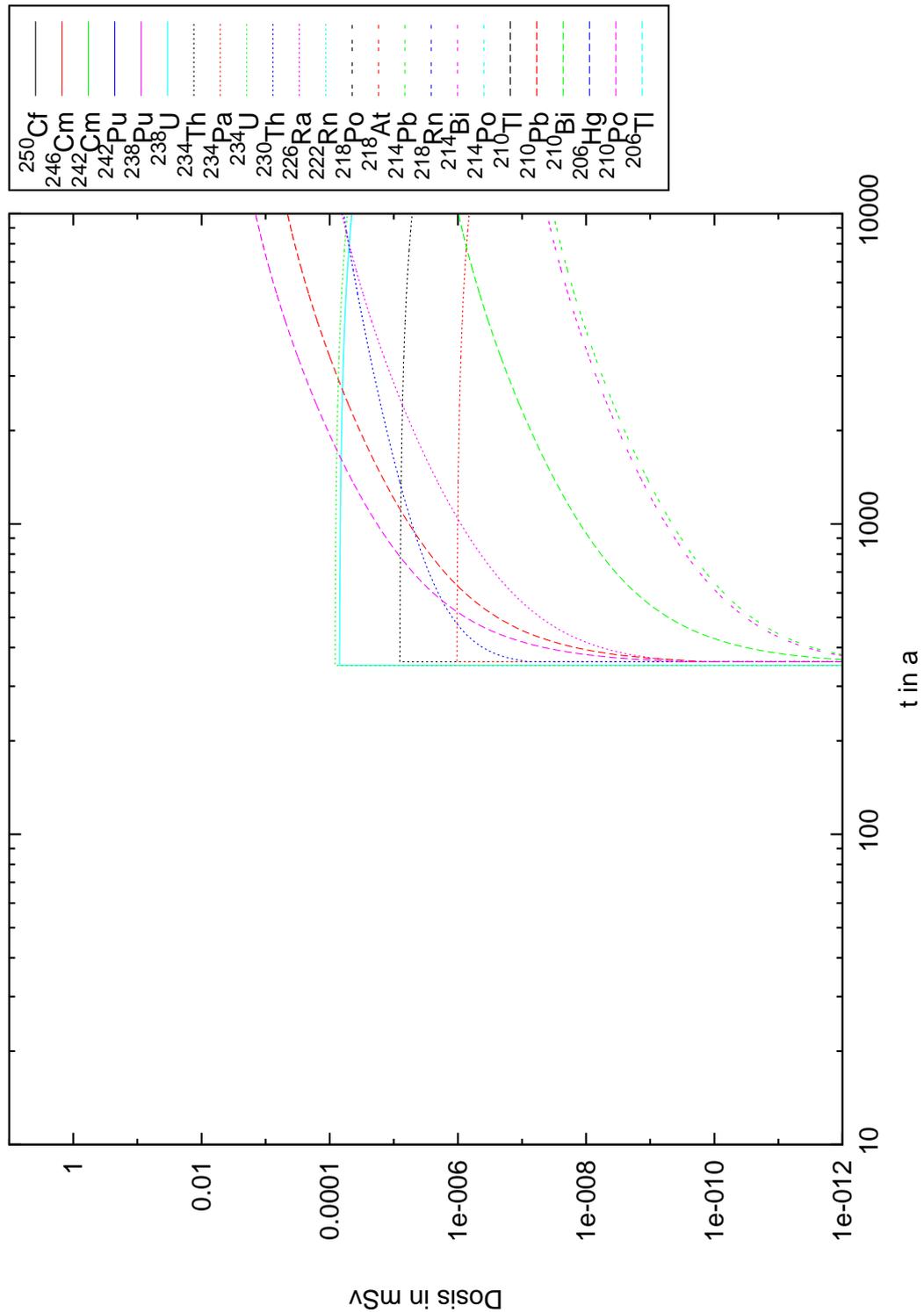


Abbildung B.89: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

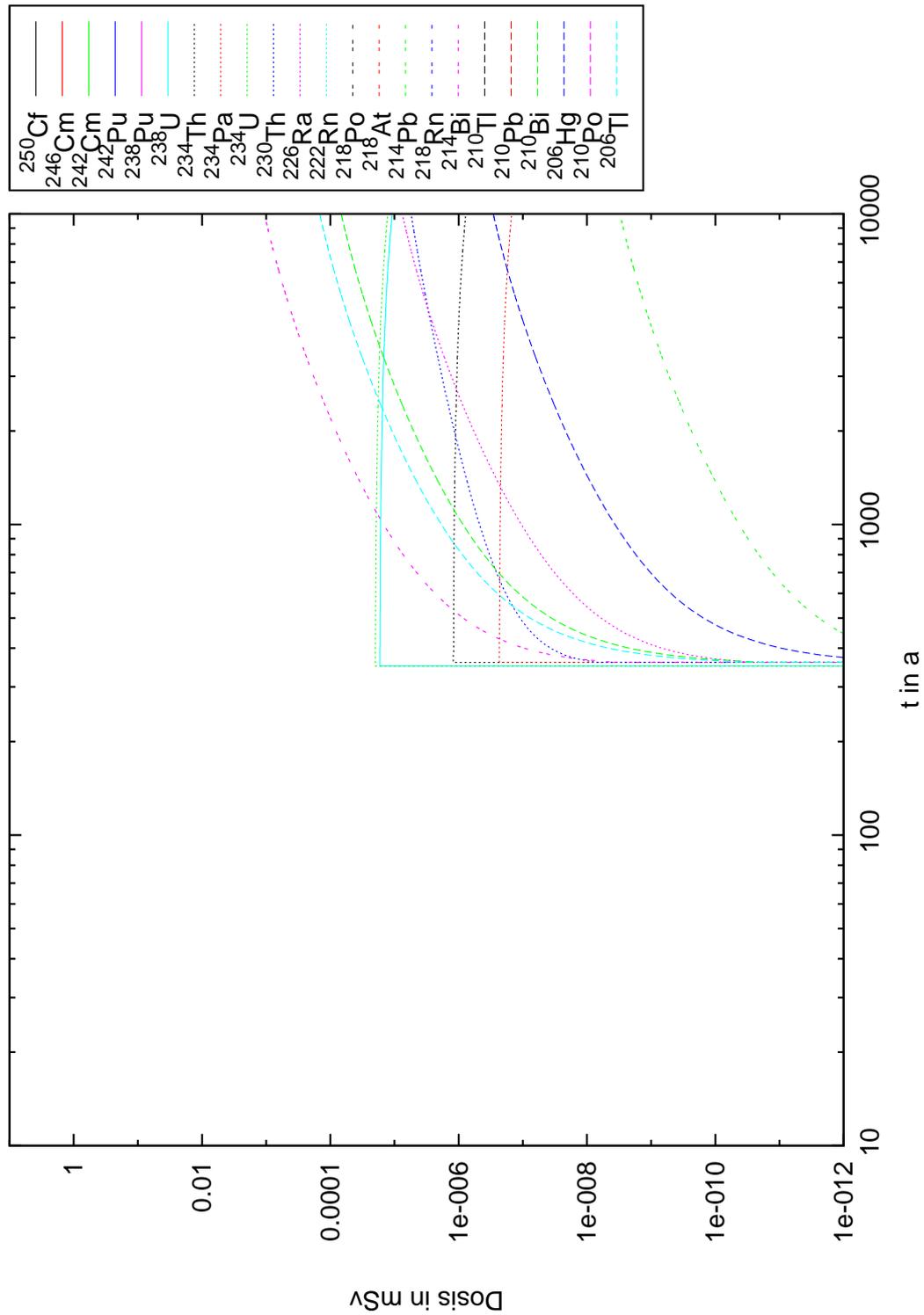


Abbildung B.90: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ra-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

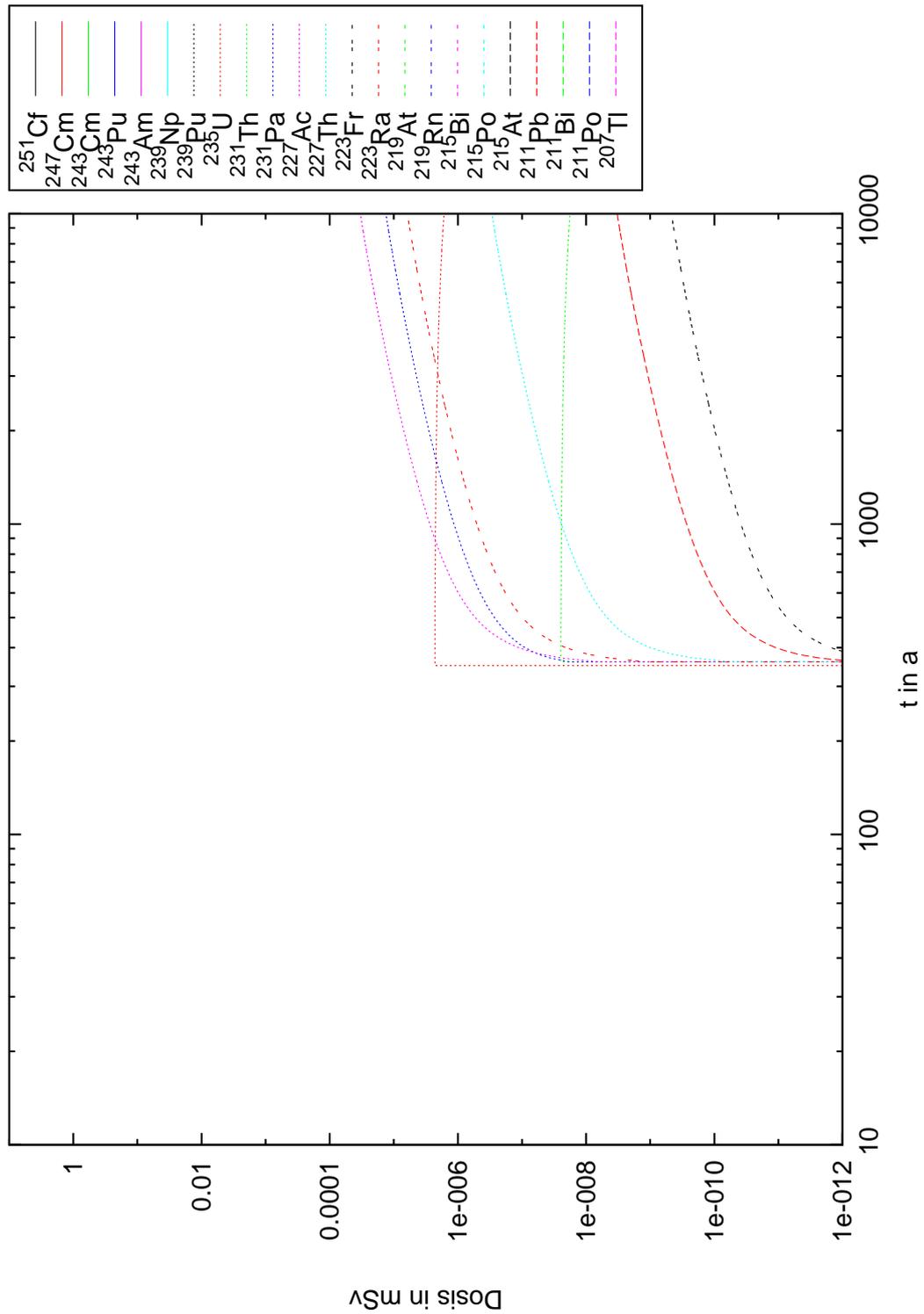


Abbildung B.91: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe 0-1 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

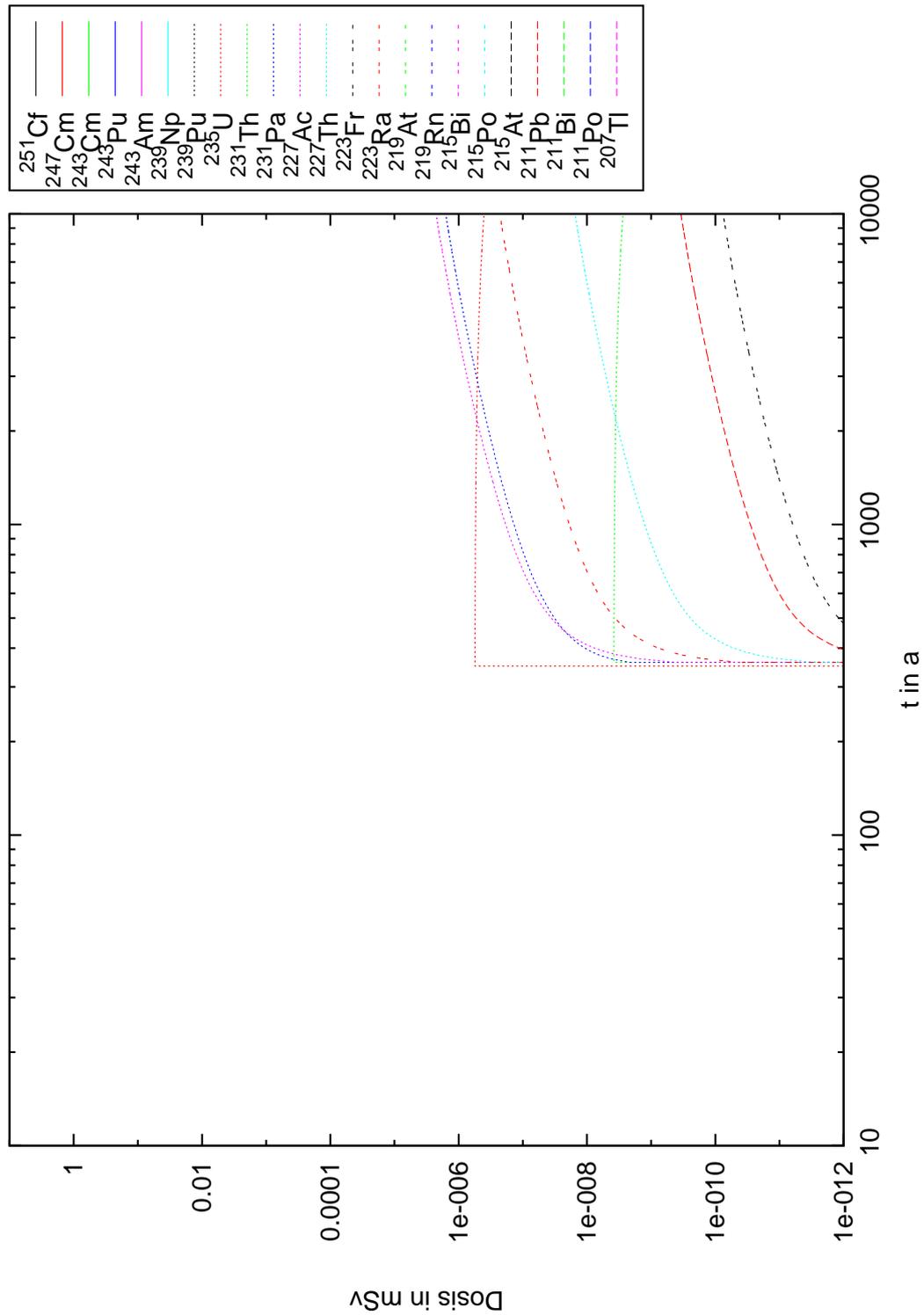


Abbildung B.92: Zusätzliche jährliche Dosis von den Radionukliden der U-Ac-Reihe für die Altersgruppe >17 a berechnet für einen Zeitraum von 10000 Jahren für eine Halde auf einer organischen Schicht. k_d -Werte nach [Sys06]

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Zu aller erst möchte ich Herrn Prof. Dr. Rolf Michel für das interessante Thema, aber nicht zuletzt für seine stets freundliche, hilfreiche und engagierte Betreuung während meiner Zeit am Institut für Radioökologie und Strahlenschutz danken.

Herrn PD Dr. Ingo Leya bin ich für die freundliche Übernahme des Korreferats dankbar.

Jan-Henryk Wicke, Christian Stieghorst, Stefan Bister und Natalia Braylovskaya danke ich für die vielen hilfreichen Tipps, sowie das sorgfältige Korrekturlesen dieser Diplomarbeit.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts für Radioökologie und Strahlenschutz bedanke ich mich außerdem für das ausgesprochen gute Arbeitsklima und den freundschaftlichen Umgang hier im Institut.

Ein besonderer Dank gilt meiner Partnerin Anna-Lena Stark und meiner Familie für ihren steten Rückhalt und Unterstützung während des Studiums.