

**Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der
Strahlenexposition durch Inhalation von Radon
und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten infolge
bergbaubedingter Umweltradioaktivität
(Berechnungsgrundlagen - Bergbau: Teil Radon)**

Gültig bis 31.05.2010

Ersetzt durch:

Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition
infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität
(Berechnungsgrundlagen - Bergbau)
vom März 2010 (BfS-SW-07/10)

Inhaltsverzeichnis

I. Teil: Allgemeine Grundsätze

- 1 Anwendungsbereich
- 2 Ziele und Grundsätze zur Ermittlung der Strahlenexposition
- 3 Ermittlung der bergbaubedingten Strahlenexposition

II. Teil: Berechnungsverfahren

1. Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten
2. Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-220 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten

III. Teil: Vereinfachtes Verfahren zur Prüfung des Ausschlußkriteriums nach Teil I., Ziffer [2.3.2 a\)](#)

1. Prüfverfahren für Quellenhäufungen gemäß Teil I., Ziffer [2.5.2.4 b\)](#)
2. Prüfverfahren für Einzelquellen gemäß Teil I., Ziffer [2.5.2.4 b\)](#)

IV. Teil: Abschätzung der Radon-222-Konzentration im Freien

1. Quellenhäufungen
2. Einzelquellen

[Anlage](#)

Teil: Allgemeine Grundsätze

1. Anwendungsbereich

Diese Berechnungsgrundlagen gelten für die Ermittlung der Strahlenexposition des Menschen¹⁾ durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte in

Interventionssituationen aufgrund bergbaulicher Hinterlassenschaften in den neuen Bundesländern (**bergbaubedingte Radondosis²⁾**), insbesondere in nachfolgenden **Anwendungsbereichen:**

- Nutzung, Stilllegung, Sanierung und Folgenutzung³⁾ bergbaulicher Anlagen und Einrichtungen ,
- Nutzung, Sanierung und Folgenutzung anderer Grundstücke, die durch bergbauliche Anlagen und Einrichtungen kontaminiert sind.

Die Berechnungsgrundlagen gelten nicht für die stoffliche Nutzung und Folgenutzung kontaminierter bergbaulicher Materialien, wie die Verwendung von Haldenmaterialien als Bauzuschlagstoff.

Die Berechnungsgrundlagen sind anzuwenden bei der Nachweisführung zur Einhaltung von Dosisgrenzwerten für Beschäftigte und von Dosisrichtwerten für Einzelpersonen der Bevölkerung, bei der Durchführung von Expositionsabschätzungen an bergbaulichen

¹⁾ Die Berechnungsgrundlagen sind für die Ermittlung von Kollektivdosen nicht anzuwenden.

²⁾ Bei der Bewertung von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten werden die Begriffe „Dosis“ und „Exposition“ wie folgt verwendet:

Dosis oder Radondosis ist die durch Inhalation von Radon (Rn-222, Rn-220) und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten bedingte effektive Dosis.

Unter Exposition („potentielle Alpha-Energie-Exposition“) ist das Zeitintegral der Konzentration an kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukten über die Expositionszeit zu verstehen. Wird die Konzentration an kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukten mithilfe der Radon-222-Konzentration und des Gleichgewichtsfaktors ermittelt, resultiert daraus die „Radon-222-Exposition“. Aus praktischen Gründen wird stets das Zeitintegral der Radon-222-Konzentration berechnet und gemeinsam mit dem Wert des Gleichgewichtsfaktors angegeben.

Unter dem Begriff „Strahlenexposition“ ist hier - wie auch in den Berechnungsgrundlagen-Bergbau - stets eine effektive Dosis zu verstehen.

³⁾ Unter Folgenutzung sollen Nutzung nach Sanierung oder Nutzungseinschränkung verstanden werden.

Hinterlassenschaften sowie bei der Planung und Optimierung expositionsverringender Maßnahmen.

2 Ziele und Grundsätze zur Ermittlung der Strahlenexposition

2.1 a) Diese Berechnungsgrundlagen dienen zur Ermittlung der **bergbaubedingten Radondosis**. Sie ergänzen die Berechnungsgrundlagen-Bergbau. Zur Ermittlung der **bergbaubedingten Strahlenexposition** ist die bergbaubedingte Radondosis zu der nach Berechnungsgrundlagen-Bergbau für alle sonstigen Expositionspfade berechneten Strahlenexposition zu addieren.

b) Soweit rechtlich zulässig und für den Anwendungsfall zweckmäßig, kann die Bewertung des Expositionspfad Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten auch an Hand anderer radiologischen Größen erfolgen.

2.2 Bei der Anwendung dieser Berechnungsgrundlagen sind von den unter Teil I., Ziffer 2.4 aufgeführten Szenarien nur die im Anwendungsfall **tatsächlich relevanten Expositionsszenarien** zu berücksichtigen. Die Auswahl dieser Szenarien hat vorrangig anhand qualitativer Bewertungen zu erfolgen. Zweifelsfälle sind durch vertiefende Untersuchungen der Standort- und Expositionsverhältnisse zu klären. Entsprechendes gilt für die Radonisotope und deren kurzlebige Zerfallsprodukte.

Von den in den Berechnungsgrundlagen aufgeführten Parameterwerten kann abgewichen werden, wenn dies durch Besonderheiten des Anwendungsfalls, des Standorts oder der bergbaulichen Hinterlassenschaften begründet ist.

2.3 Die Strahlenexposition ist für **Referenzpersonen an ungünstigsten Einwirkungsstellen** zu ermitteln.

2.3.1 a) **Referenzpersonen** sind Einzelpersonen der allgemeinen Bevölkerung¹⁾ und Beschäftigte, für die in der Anlage spezifische **Berechnungsparameter**

¹⁾ 6 Altersgruppen gemäß Richtlinie 96/29/EURATOM vom 13.5.1996

(Dosiskonversionskoeffizienten, Dosiskoeffizienten, Expositionsorte, Expositionszeiten) festgelegt sind.

- b) **„Beschäftigte“** sind Personen, die berufsbedingt bergbauliche Hinterlassenschaften stillen oder sanieren, sofern diese beruflichen Tätigkeiten oder Arbeiten der Überwachung unterliegen. Für die Berechnung der Strahlenexposition der Referenzperson „Beschäftigter“ sind die aufgrund der beruflichen Tätigkeit oder Arbeit zu berücksichtigenden Expositionsszenarien, Radionuklide und Berechnungsparameter nach den Gegebenheiten des konkreten Einzelfalls festzulegen. Für diese beruflichen Tätigkeiten oder Arbeiten, die sowohl an unterirdischen Arbeitsplätzen als auch in Betriebsgebäuden oder auf Betriebsflächen im Freien stattfinden können, wird unterstellt, daß sie insgesamt maximal 2000 h pro Jahr ausfüllen (vgl. Anlage , [Tabelle A.1](#)). Die Strahlenexposition, die ein „Beschäftigter“ außerhalb seiner beruflichen Tätigkeit oder Arbeit erfährt, ist bei der Berechnung der bergbaubedingten Strahlenexposition nicht zu berücksichtigen. Für die Referenzperson „Beschäftigter“ ist bei der Ermittlung der effektiven Dosis aus Meßwerten der Anteil der natürlichen Umweltradioaktivität **nicht** abzuziehen.
- c) Personen, die berufliche Tätigkeiten oder Arbeiten im Zusammenhang mit bergbaulichen Hinterlassenschaften durchführen, ohne daß diese beruflichen Tätigkeiten oder Arbeiten der Überwachung unterliegen, sind der Referenzperson **„Erwachsener“** („> 17 a“) zuzuordnen. Für diese Tätigkeiten oder Arbeiten wird unterstellt, daß sie maximal 2.000 h pro Jahr ausfüllen. Ein weiterer, freizeitbedingter Aufenthalt ist für diese Personen nur soweit zu berücksichtigen, wie die in der Anlage, [Tabelle A.1](#) für „> 17 a“ angegebenen Expositionszeiten für den Aufenthalt in Gebäuden und im Freien nicht bereits durch berufliche Tätigkeit oder Arbeit ausgeschöpft werden.
- 2.3.2 a) **Einwirkungsstellen** sind die Orte auf oder in der Umgebung bergbaulicher Anlagen und Einrichtungen, an denen sich Referenzpersonen aufhalten können. Orte mit bergbaubedingter Radon-222-Konzentration bis 5 Bq m^{-3} gelten nicht als Einwirkungsstellen (**Ausschlußkriterium**). Entsprechend ist der Aufenthalt

an solchen Orten bei der Ermittlung der bergbaubedingten Radondosis nicht zu berücksichtigen.

- b) **Ungünstigste Einwirkungsstellen** sind die Einwirkungsstellen, an denen für die zu betrachtenden Expositionsszenarien unter Berücksichtigung realistischer Nutzungen und Verhaltensweisen jeweils die höchste Strahlenexposition der Referenzperson zu erwarten ist. Die ungünstigsten Einwirkungsstellen sind im konkreten Anwendungsfall zu bestimmen. Dabei sind je nach Anwendungsbereich und -fall aktuelle Nutzungen zu berücksichtigen und/oder mögliche künftige Nutzungen einzubeziehen.
- c) Bei der Bestimmung möglicher **künftiger Nutzungen** sind planungsrechtliche Festsetzungen, im übrigen die Prägung des Gebiets unter Berücksichtigung der absehbaren Entwicklung zu beachten. Soweit Nutzungen durch behördliche Maßnahmen (z.B. Nutzungseinschränkung) oder durch Maßnahmen des Inhabers der bergbaulichen Hinterlassenschaft (z.B. Zugangsbeschränkung) unterbunden werden, bleiben sie bei der Ermittlung der Strahlenexposition außer Betracht. Das gleiche gilt für Nutzungen, die aufgrund der ökologischen Verhältnisse am Standort oder der zeitlichen Begrenzung des Anwendungsfalls ausgeschlossen werden können.

2.4 Die Berechnungsgrundlagen berücksichtigen den **Expositionspfad**:

- Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten

und die **Expositionsszenarien**:

- Aufenthalt in Gebäuden (Wohngebäude¹⁾, Betriebsgebäude),
- Aufenthalt im Freien,
- Aufenthalt an unterirdischen Arbeitsplätzen.

¹⁾ „Wohngebäude“ ist als Sammelbegriff für alle Typen von Gebäuden (z.B. auch Schulen, Kindergärten, Sporthallen) zu verstehen, die von der allgemeinen Bevölkerung genutzt werden können.

- 2.5 Bei der Anwendung der Berechnungsgrundlagen ist folgendes zu beachten:
- 2.5.1a) In der Regel wird die bergbaubedingte Radondosis maßgeblich durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten bestimmt. Auf diesen Fall beziehen sich die Ziffern [2.5.2](#), [2.5.3](#) und [2.5.4](#).
- b) Zusätzlich kann beim Aufenthalt an Arbeitsplätzen die Inhalation kurzlebiger Zerfallsprodukte des Radonisotops Rn-220 zur bergbaubedingten Radondosis beitragen. Die Relevanz i.S.v. Teil I., Ziffer [2.2](#) ist im konkreten Einzelfall zu prüfen. Dabei sind realistische Aufenthaltszeiten zugrunde zu legen. Teil I., Ziffer [2.3.1 b\)](#) bzw. [c\)](#) sind zu beachten.
- 2.5.2 In die Prüfung des **Ausschlußkriteriums** nach Teil I., Ziffer [2.3.2 a\)](#) sind grundsätzlich alle bergbaulichen Anlagen und Einrichtungen eines Standortes einzubeziehen. Teil I., Ziffer [2.5.2.5](#) ist zu beachten. Der Wert der bergbaubedingten Radon-222-Konzentration an Aufenthaltsorten von Referenzpersonen kann durch Messungen, mithilfe von Rechenmodellen oder als Schätzwert gemäß Teil IV ermittelt werden. Dabei ist folgendes zu beachten:
- 2.5.2.1 Das Ausschlußkriterium gilt absolut. Eine differenzierte Anwendung unter Berücksichtigung modifizierender Faktoren wie Aufenthaltszeit oder Gleichgewichtsfaktor am Expositionsort ist nicht zulässig.
- 2.5.2.2 Meßwerte enthalten neben dem bergbaubedingten Anteil auch die natürlicherweise vorhandene Radon-222-Konzentration. Für letztere ist gemäß Teil I., [Ziffer 3 b\)](#) 20 Bq m^{-3} ein repräsentativer Wert. Entsprechend gilt das Ausschlußkriterium bei Meßwerten bis 25 Bq m^{-3} als erfüllt. Zur bergbaubedingten Radondosis von Referenzpersonen der allgemeinen Bevölkerung tragen nur Aufenthalte an Expositionsorte bei, für die der repräsentative Meßwert der Radon-222-Konzentration 25 Bq m^{-3} übersteigt. Für Beschäftigte ist Teil I., [Ziffer 2.3.1 b\)](#) zu beachten.
- 2.5.2.3 Für die Anwendung von Freisetzungs- und Transportmodellen ist Teil I., Ziffer [2.5.6](#) zu beachten.

- 2.5.2.4a) Das vereinfachte Verfahren gemäß Teil III dient zur konservativen Eingrenzung von Aufenthaltsorten, für die eine bergbaubedingte Radon-222-Konzentration größer 5 Bq m^{-3} nicht ausgeschlossen werden kann. Eine genauere Klärung der tatsächlichen Verhältnisse an einem Standort kann durch Messung nach Ziffer [2.5.2.2](#) oder - soweit angemessen - durch Berechnung nach Ziffer [2.5.2.3](#) erfolgen.
- b) Das Verfahren kann für räumlich isolierte bergbauliche Hinterlassenschaften (**Einzelquellen**), aber auch für **Quellenhäufungen**, die dadurch charakterisiert sind, daß die Gesamtheit aller bergbaulichen Anlagen und Einrichtungen eines Standortes zum Überschreiten des Ausschlußkriteriums von 5 Bq m^{-3} führt, angewendet werden. Ermittelt wird die bergbaubedingte Radon-222-Konzentration auf und in der Umgebung bergbaulicher Anlagen und Einrichtungen.
- c) Das vereinfachte Verfahren basiert auf einer Verallgemeinerung standortspezifischer Modellrechnungen, die für Halden des Uranerzbergbaus durchgeführt wurden. Es berücksichtigt neben dem Haldentyp auch die unterschiedlichen meteorologischen und topographischen Gegebenheiten der Standorte. Das Verfahren kann für Halden¹⁾ und andere flächige Hinterlassenschaften, aber auch für Radon-222-Emittenten anderer Art (z.B. Schächte, Stollen) angewendet werden. Für gebirgiges Gelände und Aufenthaltsorte in unmittelbarer Nähe von Einzelquellen weist das Verfahren die größte Konservativität auf.
- d) Das vereinfachte Verfahren gemäß Teil III., Ziffer [1.](#) und [2.](#) zur Prüfung des Ausschlußkriteriums basiert auf der Kenntnis repräsentativer Werte der bergbaubedingten Radon-222-Exhalationsrate. Diese Werte können durch Messungen oder mittels Freisetzungsmodellen gewonnen oder mithilfe von Näherungsformeln, die ebenfalls im Teil III angegeben sind, aus repräsentativen

¹⁾ Das vereinfachte Verfahren ist nicht anzuwenden für Halden, in denen sich - z.B. durch hohe Pyritgehalte - Haldenbrände bilden können. Der damit verbundene erhöhte Radonaustrag durch Konvektion ist von den verwendeten Modellen nicht abgedeckt.

Meßwerten der spezifischen Ra-226-Aktivität oder der Gamma-Ortsdosisleistung abgeschätzt werden. Vom jeweils verwendeten Meßwert ist der Anteil der natürlicherweise vorhandenen Umweltradioaktivität abzuziehen. Sofern keine standortspezifischen Werte der natürlichen Umweltradioaktivität vorliegen, können die allgemeinen Werte aus Teil I, Ziffer 3 b) dieser Berechnungsgrundlagen bzw. aus den Tabellen IV. 1 und IV. 4 der Berechnungsgrundlagen-Bergbau verwendet werden.

2.5.2.5 Das Ausschlußkriterium gilt für alle bergbaulichen Anlagen und Einrichtungen, die nachfolgenden Bedingungen genügen, als erfüllt:

- Fläche > 1 ha und mittlere Radon-222-Emissionsrate < 2 kBq s⁻¹ oder
- Fläche < 1 ha und Radon-222-Exhalationsrate < 0,2 Bq m⁻² s⁻¹ oder
- Abstand vom Expositionsort > 4000 m beim Standorttyp ebenes Gelände oder
- Abstand vom Expositionsort > 10000 m beim Standorttyp gebirgiges Gelände.

Entsprechend brauchen diese bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen weder bei der Prüfung des Ausschlußkriteriums noch bei der ggf. erforderlichen Ermittlung der bergbaubedingten Radondosis berücksichtigt zu werden. Das gilt grundsätzlich für alle Expositionsorte auf und außerhalb (in der Umgebung) bergbaulicher Anlagen und Einrichtungen mit nicht zu großen Inhomogenitäten der Radon-222-Exhalationsrate.

2.5.3 a) Beim **Expositionsszenario Aufenthalt in Gebäuden** sind für die Ermittlung der Radon-222-Konzentration in der Raumluft (Atemluft) für die Referenzperson der allgemeinen Bevölkerung zu berücksichtigen:

- Eintritt radonhaltiger **Bodenluft** aus dem Gebäudeuntergrund, sofern sich das Gebäude **auf oder in unmittelbarer Umgebung** einer bergbaulichen Anlage oder Einrichtung befindet;

- Eintritt der radonhaltigen **Außenluft**, sofern sich das Gebäude **auf oder in der Umgebung** einer bergbaulichen Anlage oder Einrichtung befindet. Teil I., Ziffer [2.3.2 a\)](#) ist zu beachten.
- b) Die Berechnung der Strahlenexposition durch Eintritt der radonhaltigen Außenluft in das Gebäude erfolgt auf der Grundlage von Meßwerten bzw. Transportrechnungen für einen in unmittelbarer Gebäudenähe liegenden Aufpunkt im Freien. Teil I., Ziffer [2.5.6](#) ist zu beachten. Für die Radon-222-Konzentration in der Raumluft ist der für Freiluft ermittelte Wert zugrunde zu legen. Für den Gleichgewichtsfaktor gelten die in der Anlage, [Tabelle A.3](#) genannten Werte.
- c) Der Beitrag des anderen unter a) aufgeführten Pfades ist, soweit dieser im Sinne von Teil I., Ziffer [2.2](#) relevant sein kann, auf der Grundlage standortspezifischer Untersuchungen im konkreten Einzelfall zu ermitteln.
- d) Für die Berechnung der Strahlenexposition von Beschäftigten sind realistische Aufenthaltszeiten zugrunde zu legen. Teil I., Ziffer [2.3.1 b\)](#) ist zu beachten.

Für Referenzpersonen der allgemeinen Bevölkerung ist in der Regel insgesamt eine Aufenthaltszeit in Wohngebäuden (siehe Fußnote unter Teil I., Ziffer [2.4](#)) von maximal 7000 h pro Jahr zugrunde zu legen. Dabei ist ggf. zu berücksichtigen, daß der Aufenthalt nicht ausschließlich in einem Wohngebäude, das sich auf der „ungünstigsten Einwirkungsstelle“ befindet, erfolgen muß.

- 2.5.4 a) Beim **Expositionsszenario Aufenthalt im Freien** ist die Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten im Sinne von Teil I., Ziffer [2.2](#) relevant, wenn sich die Referenzperson **auf oder in der Umgebung** einer bergbaulichen Anlage oder Einrichtung befindet. Teil I., Ziffer [2.3.2 a\)](#) ist zu beachten.
- b) Erfolgt die Ermittlung der Strahlenexposition unter Zugrundelegung von Meßwerten der Radon-222-Konzentration oder konservativen Schätzwerten gemäß

Teil IV, so gelten für den Gleichgewichtsfaktor des bergbaubedingten Radons die in der Anlage, [Tabelle A.3](#) genannten Werte.

- c) Für die Berechnung der Strahlenexposition von Beschäftigten sind realistische Aufenthaltszeiten zugrunde zu legen. Teil I., Ziffer [2.3.1 b\)](#) ist zu beachten.

Für Referenzpersonen der allgemeinen Bevölkerung ist in der Regel insgesamt eine Aufenthaltszeit von maximal 2000 h im Jahr zugrunde zu legen. Dabei ist ggf. zu berücksichtigen, daß der Aufenthalt im Freien nicht ausschließlich an einem Expositionsort, der sich auf der „ungünstigsten Einwirkungsstelle“ befindet, erfolgen muß.

2.5.5 Beim **Expositionsszenario Aufenthalt an unterirdischen Arbeitsplätzen** hat die Berechnung der Strahlenexposition grundsätzlich auf der Basis von arbeitsplatzbezogenen Untersuchungen zu erfolgen.

2.5.6 a) Die Expositionsberechnung basiert für alle Expositionsszenarien auf der Kenntnis repräsentativer Werte der **Radonzerfallsprodukt-Konzentration bzw. potentiellen Alpha-Energie-Konzentration** (in der Maßeinheit $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{mJ}\cdot\text{m}^{-3}$ oder WL) oder der **Radon-Konzentration** (in der Maßeinheit $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) **mit dem entsprechenden Gleichgewichtsfaktor**. Diese Werte können durch Messungen oder mit Hilfe von Rechenmodellen ermittelt werden. Dabei sind Rechnungen insbesondere dann durchzuführen, wenn

- eine Messung technisch nicht möglich oder die Meßergebnisse nur schwer interpretierbar sind,
- der für eine Messung erforderliche Aufwand unangemessen hoch wäre,
- zukünftige Nutzungen zu berücksichtigen sind,
- Veränderungen von Emissions- und Immissionsparametern anzunehmen sind,

- bei einer räumlichen Häufung von Expositionsquellen eine einzelquellenbezogene Ermittlung der Strahlenexposition erforderlich ist.

b) Diese Berechnungsgrundlagen enthalten keine Freisetzungs- und Transportmodelle.

3 Ermittlung der bergbaubedingten Radondosis

a) Zur vereinfachten Prüfung der Einhaltung von relevanten Dosiswerten (Dosisgrenz- bzw. Dosisrichtwerte) der bergbaubedingten Strahlenexposition kann das unter Teil I., Ziffer 3 der Berechnungsgrundlagen-Bergbau beschriebene zweistufige Verfahren zum Abzug der natürlichen Umweltradioaktivität von den repräsentativen Meßwerten verwendet werden¹⁾.

b) Für den zweiten Verfahrensschritt sind beim Expositionspfad Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten folgende **allgemeine Werte der natürlichen Umweltradioaktivität** bezogen auf Freiluftmessungen zu verwenden:

- Radon-222-Konzentration: 20 Bq m^{-3} ,
- potentielle Alpha-Energie-Konzentration der kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte (unter Verwendung eines Gleichgewichtsfaktors von 0,4): $4,44 \cdot 10^{-8} \text{ J m}^{-3}$.

¹⁾ Für „Beschäftigte“ ist Teil I., Ziffer 2.3.1. b) zu berücksichtigen.

II. Teil: Berechnungsverfahren

1. Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten

Die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten erfolgt auf der Grundlage der in der Richtlinie 96/29/Euratom vom 13. Mai 1996 genannten **Dosiskonvention** der ICRP 65, die es gestattet, aus der potentiellen Alpha-Energie-Exposition die effektive Dosis zu ermitteln. Die potentielle Alpha-Energie-Exposition kann entweder aus Werten der **Radon-222-Konzentration** (bei Kenntnis von Gleichgewichtsfaktor und Aufenthaltszeit) oder der **potentiellen Alpha-Energie-Konzentration** (bei Kenntnis der Aufenthaltszeit) bestimmt werden.

1.1 Berechnung der Strahlenexposition auf der Grundlage von Werten der Radon-222-Konzentration

Die effektive Jahresdosis $H_{Rn,j}$ der Referenzperson j ist aus Werten der Radon-222-Konzentration $C_{Rn,s}$ wie folgt zu berechnen:

$$H_{Rn,j} = g_{EEC,j} \sum_s (C_{Rn,s} - C_{Rn,s}^U) F_{Rn,s} t_{Exp,j,s} \quad (1.1)$$

Hierbei bedeuten:

$H_{Rn,j}$: Effektive Jahresdosis¹⁾ durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten für die Referenzperson j in Sv

¹⁾ „Effektive Jahresdosis“ bedeutet im folgenden immer nur die bergbaubedingte effektive Jahresdosis.

$C_{Rn,s}$: Radon-222-Konzentration in der Freiluft für den Expositionsort s in Bq m^{-3}

$C_{Rn,s}^U$: Radon-222-Konzentration des natürlichen Untergrundes in der Freiluft für den Expositionsort s in Bq m^{-3} , s. Teil I., Ziffer 3 b)
(Diese Größe ist Null zu setzen, wenn $C_{Rn,s}$ aufgrund von Modellrechnungen nur den bergbaubedingten Beitrag enthält)

$F_{Rn,s}$: Faktor zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen dem bergbaubedingten Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten am Expositionsort s (Gleichgewichtsfaktor), dimensionslos, s. Anlage, [Tabelle A.3](#)

$g_{EEC,j}$: Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für das Produkt¹⁾ aus Radon-222-Exposition und Gleichgewichtsfaktor in $\text{Sv m}^3 \text{Bq}^{-1} \text{h}^{-1}$,
s. Anlage, [Tabelle A.2](#)

$t_{Exp,j,s}$: Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h,
s. Anlage, [Tabelle A.1](#)

1.2 Berechnung der Strahlenexposition auf der Grundlage von Werten der potentiellen Alpha-Energie-Konzentration der kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte

Die effektive Jahresdosis $H_{Rn,j}$ der Referenzperson j ist aus Werten der potentiellen Alpha-Energie-Konzentration $C_{pot,s}$ wie folgt zu berechnen:

$$H_{Rn,j} = g_{pot,j} \sum_s (C_{pot,s} - C_{pot,s}^U) t_{Exp,j,s} \quad (1.2)$$

Hierbei bedeuten:

¹⁾ Das Produkt aus Radon-222-Konzentration und Gleichgewichtsfaktor wird auch als gleichgewichtsäquivalente Radon-222-Konzentration bezeichnet (equilibrium equivalent concentration, abgekürzt EEC).

$H_{Rn,j}$: Effektive Jahresdosis durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten für die Referenzperson j in Sv

$C_{pot,s}$: Potentielle Alpha-Energie-Konzentration der kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte in der Freiluft für den Expositionsort s in $J m^{-3}$

$C_{pot,s}^U$: Potentielle Alpha-Energie-Konzentration der kurzlebigen Radon-222-Zerfallsprodukte des natürlichen Untergrundes in der Freiluft für den Expositionsort s in $J m^{-3}$, s. Teil I., Ziffer 3 b)
(Diese Größe ist Null zu setzen, wenn $C_{pot,s}$ aufgrund von Modellrechnungen nur den bergbaubedingten Beitrag enthält)

$g_{pot,j}$: Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für die potentielle Alpha-Energie-Exposition kurzlebiger Radon-222-Zerfallsprodukte in $Sv m^3 J^{-1} h^{-1}$, s. Anlage, [Tabelle A.2](#)

$t_{Exp,j,s}$: Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h, s. Anlage, [Tabelle A.1](#)

2. Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-220 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten

Die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-220 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten erfolgt auf der Grundlage eines Dosiskoeffizienten, der auf dem dosimetrischen Lungenmodell nach ICRP 50 basiert. In diesen Berechnungsgrundlagen wird nur die Inhalation der kurzlebigen Zerfallsprodukte berücksichtigt, da das vom inhalierten Radon-220 verursachte Strahlenrisiko vernachlässigt werden kann. Der hier angegebene Dosiskoeffizient bezieht sich somit nur auf die kurzlebigen Zerfallsprodukte. Er gilt nur für die Berechnung der effektiven Dosis am Arbeitsplatz („Beschäftigte“ und Referenzpersonen „> 17a“ gemäß Teil I., Ziffer 2.3.1 b).

Die effektive Jahresdosis $H_{Th,j}$ für die Referenzperson j ist aus Werten der potentiellen Alpha-Energie-Konzentration $C_{pot(Rn220),s}$ wie folgt zu berechnen:

$$H_{Rn220,j} = g_{pot(Rn220),j} \sum_s (C_{pot(Rn220),s} - C_{pot(Rn220),s}^U) t_{Exp,j,s} \quad (2.1)$$

Hierbei bedeuten:

$H_{Rn220,j}$: Effektive Jahresdosis durch Inhalation von Radon-220 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten für die Referenzperson j in Sv

$C_{pot(Rn220),s}$: Potentielle Alpha-Energie-Konzentration der kurzlebigen Radon-220-Zerfallsprodukte in der Atemluft am Expositionsort s in $J m^{-3}$

$C_{pot(Rn220),s}^U$: Potentielle Alpha-Energie-Konzentration der kurzlebigen Radon-220-Zerfallsprodukte des natürlichen Untergrundes in der Atemluft am Expositionsort s in $J m^{-3}$, s. Teil I., Ziffer 2.5.1 b)
(Diese Größe ist Null zu setzen, wenn $C_{pot(Rn220),s}$ aufgrund von Modellrechnungen nur den bergbaubedingten Beitrag enthält.)

$g_{pot(Rn220),j}$: Dosiskoeffizient der Referenzperson j für die potentielle Alpha-Energie-Exposition kurzlebiger Radon-220-Zerfallsprodukte in $Sv m^3 J^{-1} h^{-1}$.
(Am Arbeitsplatz gilt $g_{pot(Rn220),j} = 0,5 Sv m^3 J^{-1} h^{-1}$.)

$t_{Exp,j,s}$: Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h, s. Anlage, [Tabelle A.1](#)

III. Teil: Vereinfachtes Verfahren zur Prüfung des Ausschlußkriteriums nach Teil I., Ziffer 2.3.2 a)

1. Prüfverfahren für Quellenhäufungen gemäß Teil I., Ziffer 2.5.2.4 b)

Für einen Standort mit n bergbaulichen Anlagen und Einrichtungen gilt das Ausschlußkriterium nach Teil I., Ziffer 2.3.2 a) für alle Expositionsorte s als erfüllt, wenn die nach Gleichung (1.1 a) bzw. (1.1 b) ermittelte Radon-Konzentration den Wert von 5 Bq m⁻³ nicht überschreitet. Teil I., Ziffer 2.5.2.5 ist zu beachten.

a)

Befindet sich der Expositionsort s **außerhalb** (in der Umgebung) von bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen i, gilt folgende Gleichung:

$$C_{Rn,s} = 377 \sum_{i=1}^n Q_i \left(\frac{a_i}{r_{i,s}} \right)^{1,58} \quad (1.1 a)$$

Hierin bedeuten:

$C_{Rn,s}$: Mittlere Radon-Konzentration am Expositionsort s in Bq m⁻³

Q_i : Radon-Emissionsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i in kBq s⁻¹, s. Teil III., Ziffer 1.1

$r_{i,s}$: Abstand des Expositionsortes s vom nächstgelegenen Rand der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i, in m

a_i : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen und topographischen Standortbedingungen der bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen i und der Abweichung von der Punktquellengeometrie, dimensionslos, s. Teil III., Ziffer 1.2

b)

Befindet sich der Expositionsort s **auf** der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j, gilt folgende Gleichung:

$$C_{Rn,s} = 11 J_j \ln(1 + 1,7 F_j) + 377 \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n Q_i \left(\frac{a_i}{r_{i,s}} \right)^{1,58} \quad (1.1 \text{ b})$$

Hierin bedeuten:

$C_{Rn,s}$: Mittlere Radon-Konzentration am Expositionsort s in Bq m^{-3}

J_j : Radon-Exhalationsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$

F_j : Fläche der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in ha

Q_i : Radon-Emissionsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i in kBq s^{-1} , s. Teil III., Ziffer 1.1

a_i : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen und topographischen Standortbedingungen der bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen i und der Abweichung von der Punktquellengeometrie, dimensionslos, s. Teil III., Ziffer 1.2

$r_{i,s}$: Abstand des Expositionsortes s vom nächstgelegenen Rand der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i, in m

1.1 Berechnung der Radon-Emissionsrate Q_i in Gl.(1.1 a) bzw. (1.1. b)

Die Radon-Emissionsrate Q_i kann aus der Radon-Exhalationsrate J_i der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i wie folgt abgeschätzt werden:

$$Q_i = 10(J_i - J^U) F_i \quad (1.2)$$

Hierin bedeuten:

Q_i : Radon-Emissionsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i in kBq s^{-1} ,

s. Teil III., Ziffer 1.1

J_i : Radon-Exhalationsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j
in $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$

J^U : Radon-Exhalationsrate des natürlichen Untergrundes am Standort in $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$
(Diese Größe ist Null zu setzen, wenn J_i aufgrund von Modellrechnungen oder
in Anwendung der Gleichungen (1.3) oder (1.4) nur den bergbaubedingten
Beitrag enthält).

F_j : Fläche der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in ha

Hinweise:

a)

Die Radon-Exhalationsrate J_i für **Halden** kann mittels eines Umrechnungsfaktors aus der
spezifischen Ra-226-Aktivität des Haldenmaterials wie folgt abgeschätzt werden:

$$J_i = (C_{Ra,i} - C_{Ra}^U) b_i \quad (1.3)$$

Hierin bedeuten:

$C_{Ra,i}$: Spezifische Ra-226-Aktivität des Materials der Halde i in Bq g^{-1}

C_{Ra}^U : Spezifische natürliche Untergrund-Aktivität des Radionuklides Ra-226 im
Boden am Standort in Bq g^{-1} (Sofern $C_{Ra,i}$ aufgrund von Modellrechnungen
oder in Anwendung der Gleichung (1.4) ausschließlich den bergbaubedingten
Anteil erfaßt, gilt $C_{Ra,i}^U \equiv 0$).

b_i : Umrechnungsfaktor zur Abschätzung der Radon-Exhalation aus der spezifi-
schen Ra-226-Aktivität des Materials der Halde i für verschiedene Haldentypen
und -mächtigkeiten (H) in $(\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1})/(\text{Bq g}^{-1})$

Für b_i gelten folgende Werte:

H in m	Typ 1	Typ 2	Typ 3
≥ 10	0,5	1	4
$5 \leq H < 10$	0,5	1	2
$2 \leq H < 5$	0,5	1	1
< 2	$0,5 \cdot \tanh(H)$	$\tanh(H)$	$\tanh(H)$

mit:

H : Mächtigkeit (mittlere Höhe) der Halde in m

Typ 1: Halde, bei der eine Freisetzung durch Konvektion ausgeschlossen werden kann und die Freisetzung durch Diffusion erschwert ist. Typ 1 ist in der Regel anzunehmen bei Halden mit hohem Schluffanteil (Beispielsfall: gewöhnliche Halden am Standort Seelingstädt).

Typ 2: Halde, bei der eine Freisetzung durch Diffusion anzunehmen ist und eine Freisetzung durch Konvektion nur unerheblich zum Radonaustrag beiträgt. Typ 2 ist in der Regel anzunehmen bei überwiegend sandigen Halden mit einem breiten Spektrum der Korngrößenverteilung (Beispielsfall: gewöhnliche Halden am Standort Ronneburg).

Typ 3: Halde, bei der neben der gewöhnlichen Freisetzung des Radons durch Diffusion auch ein erheblicher Radonaustrag durch Konvektion zu erwarten ist. Typ 3 ist in der Regel anzunehmen bei Halden mit hohem Kies-Stein-Anteil (Beispielsfall: gewöhnliche Halden am Standort Aue-Schlema).

b)

Sofern keine Meßwerte der spezifischen Ra-226-Aktivität des Materials einer Halde i vorliegen, kann $C_{Ra,i}$ nach der Beziehung

$$C_{Ra,i} = 2 \cdot 10^{-3} \left(\dot{H}_{x,i} - \dot{H}_x^U \right) \quad (1.4)$$

näherungsweise abgeschätzt werden.

Hierin bedeuten:

$C_{Ra,i}$: Spezifische Ra-226-Aktivität des Materials der Halde i in $Bq\ g^{-1}$

$\dot{H}_{x,i}$: Photonen-Äquivalentdosisleistung im Freien in 1 m Höhe über der ungedeckten Halde i in $nSv\ h^{-1}$

\dot{H}_x^U : Photonen-Äquivalentdosisleistung der natürlichen Gammastrahlung des Standortes im Freien in 1 m Höhe in $nSv\ h^{-1}$

Gleichung (1.4) gilt nicht für Halden, die mit einer die Photonenstrahlung abschirmenden Abdeckung versehen sind.

1.2 Berechnung der Korrekturfaktoren a_i in Gleichung (1.1 a) bzw. (1.1 b)

Der Korrekturfaktor a_i kann wie folgt berechnet werden:

$$a_i = k k_i(r, F) \quad (1.5)$$

Hierin bedeuten:

k : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen und topographischen Standortbedingungen für eine Punktquelle, dimensionslos

Es gilt: $k = k_E = 1,25$ für ebenes Gelände

$k = k_G = 3,0$ für gebirgiges Gelände

$k_i(r, F)$: Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Abweichung von der Punktquellengeometrie in Abhängigkeit von der Flächengröße F und dem Abstand r des Expositionsortes vom nächstgelegenen Rand der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i , dimensionslos

Hinweis:

Der Wert des Korrekturfaktors $k_i(r, F)$ kann durch folgende Gleichung näherungsweise bestimmt werden:

$$10^3 F_i \left(\frac{k_i(r, F)}{r_i} \right)^{1,58} \tan \left(\frac{\pi}{2} k_i(r, F) \right) = 1 \quad (1.6)$$

Für große Entfernungen ($r \rightarrow \infty$) strebt der Korrekturfaktor $k_i(r, F)$ gegen den Wert 1; für geringe Abstände ($r \rightarrow 0$) gegen den Wert 0.

In der Anlage, Abbildung A.1 sind Lösungen der Gl. (1.6) für Flächen von 0,1 bis 100 ha sowie für Abstände von 10 bis 10000 m dargestellt.

Für eine einfache, konservative Abschätzung kann der Korrekturfaktor $k_i(r, F) = 1$ gesetzt werden.

2. Prüfverfahren für Einzelquellen gemäß Teil I., Ziffer 2.5.2.4 b)

Für Einzelquellen gilt das Ausschlußkriterium nach Teil I., Ziffer 2.3.2 a) für alle Expositionsorte s mit einem Abstand größer $r_{i,s}^*$ von der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i als erfüllt, wobei $r_{i,s}^*$ durch folgende Gleichung bestimmt ist:

$$r_{i,s}^* = 15,4 a_i Q_i^{0,633} \quad (2.1)$$

Hierin bedeuten:

- $r_{i,s}^*$: Minimaler Abstand des Expositionsortes s, an dem eine bergbaubedingte Radon-222-Konzentration über 5 Bq m^{-3} ausgeschlossen werden kann, vom nächstgelegenen Rand der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i, in m
- a_i : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen und topographischen Standortbedingungen der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i und der Abweichung von der Punktquellengeometrie, dimensionslos, s. Teil III., Ziffer 1.2
- Q_i : Radon-Emissionsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i in kBq s^{-1} , s. Teil III., Ziffer 1.1

Das Ausschlußkriterium nach Teil I., Ziffer 2.3.2 a) gilt für alle Expositionsorte auf bergbaulichen Hinterlassenschaften i, die nachfolgender Ungleichung genügen, als erfüllt:

$$J_i \ln(1 + 1,7 F_i) \leq 0,45 \quad (2.2)$$

Hierin bedeuten:

J_i : Radon-Exhalationsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

F_i : Fläche der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in ha

IV. Teil: Abschätzung der Radon-222-Konzentration im Freien

Die Prüfvorschriften des Teils III können für eine konservative Abschätzung der bergbaubedingten Radon-222-Konzentration im Freien herangezogen werden. Teil I., Ziffer 2.5.2.5 ist zu beachten.

1. Quellenhäufungen

Für Expositionsorte auf und in der Umgebung bergbaulicher Anlagen oder Einrichtungen kann die mittlere Radon-222-Konzentration im Freien unmittelbar gemäß Gleichung (1.1 a) und (1.1 b) in Teil III., Ziffer 1. abgeschätzt werden.

2. Einzelquellen

a)

Für Expositionsorte s auf einer flächigen bergbaulichen Anlage oder Einrichtung kann die mittlere Radon-222-Konzentration im Freien wie folgt näherungsweise abgeschätzt werden:

$$C_{Rn,i} = 11 J_i \ln(1 + 1,7 F_i) \quad (3.1)$$

Hierin bedeuten:

$C_{Rn,i}$: Mittlere Radon-222-Konzentration auf der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i in Bq m^{-3}

J_j : Radon-222-Exhalationsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in $\text{Bq m}^{-2} \text{s}^{-1}$

F_j : Fläche der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung j in ha

b)

Für Expositionsorte s im Abstand $r_{i,s}$ vom nächstgelegenen Rand einer flächigen bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i kann die mittlere Radon-222-Konzentration im Freien wie folgt näherungsweise abgeschätzt werden:

$$C_{Rn,s} = 377 Q_i \left(\frac{a_i}{r_{i,s}} \right)^{1,58} \quad (3.2)$$

Hierin bedeuten:

$C_{Rn,s}$: Mittlere Radon-Konzentration in der Umgebung bergbaulicher Anlagen oder Einrichtungen i am Expositionsort s in Bq m^{-3}

Q_i : Radon-Emissionsrate der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i in kBq s^{-1} , s. Teil III., Ziffer 1.1

$r_{i,s}$: Abstand des Expositionsortes s vom nächstgelegenen Rand der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i, in m

a_i : Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der meteorologischen und topographischen Standortbedingungen der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i und der Abweichung von der Punktquellengeometrie, dimensionslos, s. Teil III., Ziffer 1.2

Anlage

Tabelle A.1

Jährliche Expositionszeit $t_{Exp,j,s}$ für verschiedene Expositionsorte s und Referenzpersonen j :

Expositionsort	Referenzperson	Expositionszeit $t_{Exp,j,s}$ [h]
1. In Gebäuden	Beschäftigter ¹⁾ Bevölkerung ²⁾	bis 2000 7000
2. Im Freien:	Beschäftigter ¹⁾ Bevölkerung ²⁾	bis 2000 bis 2000
Dabei entfallen für die Einzelperson der Bevölkerung, je nach örtlichen Gegebenheiten, auf:		
2.1 unkultivierte Halden	≤ 1 a 1 - 2 a 2 - 7 a 7 - 12 a 12 -17 a > 17 a	0 0 250 250 250 100
2.2 Gärten	Bevölkerung ²⁾	1000
2.3 Straßen, Plätze u.ä.	Bevölkerung ²⁾	1000
2.4 Spielplätzen, Parkanlagen u.ä.	Bevölkerung ²⁾	1000

¹⁾ Die Summe der Expositionszeiten bei Tätigkeiten im Freien und in Gebäuden darf insgesamt 2000 h nicht überschreiten.

²⁾ alle Altersgruppen

Tabelle A.2

Dosiskonversionskoeffizienten für die Referenzperson j:

- $g_{\text{pot},j}$ für die potentielle Alpha-Energie-Exposition kurzlebiger Radon-222-Zerfallsprodukte
- $g_{\text{EEC},j}$ für das Produkt aus Radon-222-Exposition und Gleichgewichtsfaktor

Referenzperson	Dosiskonversionskoeffizienten	
	$g_{\text{pot},j} [\text{Sv m}^3 \text{J}^{-1} \text{h}^{-1}]$	$g_{\text{EEC},j} [\text{Sv m}^3 \text{Bq}^{-1} \text{h}^{-1}]$
≤ 1 a	1,1	$6,1 \cdot 10^{-9}$
1 - 2 a	1,1	$6,1 \cdot 10^{-9}$
2 - 7 a	1,1	$6,1 \cdot 10^{-9}$
7 - 12 a	1,1	$6,1 \cdot 10^{-9}$
12 - 17 a	1,1	$6,1 \cdot 10^{-9}$
> 17 a	1,1	$6,1 \cdot 10^{-9}$
Beschäftigter	1,4	$7,8 \cdot 10^{-9}$

Tabelle A.3

Faktor $F_{Rn,s}$ zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen dem bergbaubedingten Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten am Expositionsort s (Gleichgewichtsfaktor), dimensionslos

Expositionsort	Gleichgewichtsfaktor $F_{Rn,s}$
<u>Auf</u> einer bergbaulichen Anlage oder Einrichtung:	
- Im Freien	0,2
- Im Gebäude	0,4
<u>In der Umgebung</u> einer bergbaulichen Anlage oder Einrichtung:	
- Im Freien	0,4
- Im Gebäude	0,4

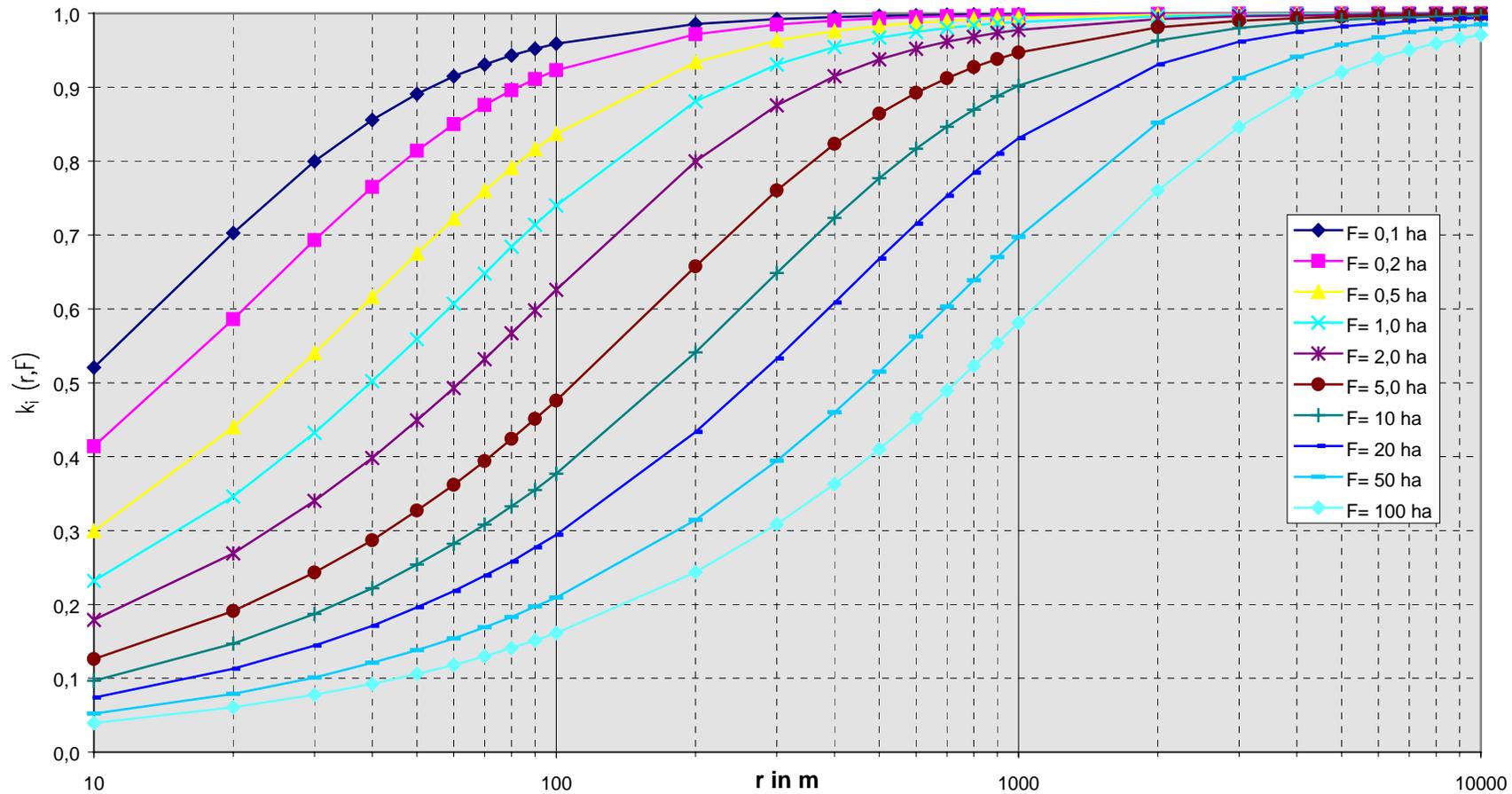


Abbildung A1

Nomogramm zur Ermittlung des Korrekturfaktors $k_i(r,F)$ in Teil III., Ziffer 1.2 in Abhängigkeit vom Abstand r_i zwischen Expositionsort s und nächstgelegtem Rand sowie von der Fläche F_i der bergbaulichen Anlage oder Einrichtung i