

Untersuchungsbericht BV Im Langen Lohe RnBoden 01-22



Quelle: www.google.de/maps

Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft BV Im Langen Lohe RnBoden 01-22

Termin: 18.01.2022
Auftraggeber: Hagener Erschließungs- und
Entwicklungsgesellschaft mbH (HEG)
Eilper Straße 132-136
58091 Hagen
Auftrag: WBH/34 vom 02.12.2021

Essen, 25.01.2022

Dr. Thomas Haumann
Radonanalytik und Baubiologie, Essen



**Sachverständigenbüro
für Radonanalytik und
Baubiologie, Essen**

Dr. rer. nat.
Thomas Haumann
Diplom-Chemiker
Radon-Fachperson
Baubiologie IBN, VDB zert.

Anerkannte Stelle für die
Messung von Radon in der Luft
an Arbeitsplätzen nach § 155
Abs. 4 Strahlenschutzverordnung

Am Ruhrstein 59
D-45133 Essen, Germany

Tel: +49 201 6159862
Fax: +49 201 6159863

haumann@radonanalytik.de
www.radonanalytik.de

Radon und Radioaktivität
Radon in der Raumluft
Radon in der Bodenluft
Radon am Arbeitsplatz
Radon Rn50-Test
Radon-Quellensuche
Materialprüfungen

Untersuchungen
Gutachten
Bewertung
Beratung
Fortbildung
Vorträge
Forschung

Mitgliedschaften:

Fachverband für
Strahlenschutz e.V.

Verband Baubiologie e.V.

Berufsverband Deutscher
Baubiologen, VDB e.V.

Berufsverband
Deutscher
Baubiologen e.V. **VDB**

Untersuchungsbericht

BV Im Langen Lohe RnBoden 01-22

Inhaltsverzeichnis

1.	EINLEITUNG	3
1.1	Allgemeines	3
1.2	Anlass und Untersuchungsaufgabe	3
1.3	Messverfahren und Untersuchungsparameter	3
2.	VORGEHENSWEISE UND METHODEN	4
2.1	Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft	4
2.2	Messungen der Gaspermeabilität in der Bodenluft	5
2.3	In-situ-Messungen des CO ₂ - und O ₂ -Gehaltes in der Bodenluft	6
2.4	Berechnung des geogenen Radonpotentials	7
2.5	Sonstiges (Klima, Höhe in NHN)	8
2.6	Radonprognose nach BfS Geoportal	8
3.	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE - MESSUNGEN DER BODENLUFT	9
3.1	Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft	13
3.2	Messungen der Gaspermeabilität in der Bodenluft	14
3.3	Berechnung des geogenen Radonpotentials	15
4.	EMPFEHLUNGEN ZUR WEITEREN VORGEHENSWEISE	16
5.	MESSPROTOKOLL	17
6.	BEWERTUNGSGRUNDLAGEN	20
7.	LITERATUR	22

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Datum der Messungen:	18.01.2022
Datum des Berichtes:	25.01.2022
Seitenzahl des Berichtes:	22
Verfasser des Berichtes:	Dr. Thomas Haumann
Messung und Prüfung vor Ort:	Dr. Thomas Haumann Uwe Münzenberg, Radonfachperson (Büro Dr. Haumann)

1.2 Anlass und Untersuchungsaufgabe

Auf dem derzeit un bebauten Baugrundstück sollen die Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft an 12 Messpunkten innerhalb des Baufeldes Im Langen Lohe (Ecke Lohstr.) in Hagen gemessen werden. Aus den Ergebnissen sollen Erkenntnisse über das geogene Radonpotential und ggf. zu planende Maßnahmen für den Radonschutz erhalten werden.

1.3 Messverfahren und Untersuchungsparameter

Messverfahren

- Messungen gemäß DIN EN ISO 11665-11:2020 „Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Teil 11: Verfahren zur Probenahme und Prüfung von Bodenluft“ (siehe **„Das geogene Radonpotential – Anleitung zur Messung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft im Rahmen einer regionalen Radonkartierung“**, Bonner Arbeitsgemeinschaft „Radon“. KEMSKI, J. et al. www.radon-info.de/pdf/Bodenluftmessung.pdf).

Durchführung Detailanforderungen

- Die genaue Lage der Messpunkte wurde in Abstimmung mit dem Auftragnehmer vorgenommen, es wurden 12 Messpunkte festgelegt
- Kurzzeitmessung mittels „aktivem“ Messverfahren gemäß DIN EN ISO 11665-11 (2020)
- Vermeidung der Frischluftkontamination durch Packersonde von Honold 40 mm (Dichtheitsprüfung mit CO₂/O₂)
- Messtiefe: In der Regel 1 m, Abweichungen bei steinig und feuchten Böden (0,8 m – 0,9 m) mit Korrekturfaktoren
- Vermeidung eines Thoron-Einflusses durch Alphaspektrometrie
- Bestimmung der in-situ-Gaspermeabilität mittels Differenzdruck- und Volumenstrommessung
- Beschreibung der Bodenfeuchte und Bodenbeschaffenheit (ca. Bodenart) je Messposition
- Erfassung der meteorologischen Faktoren (Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck)
- Protokollierung:
eindeutige Messpunktbezeichnung je Messposition mit graphischer Markierung auf dem Bau-
feld mit Angabe Datum/Uhrzeit der Probenahme, genaue Messtiefe je Messposition, Radon-
messwert je Messposition [kBq/m³], CO₂/O₂-Messwert je Messposition [ppm/%], Gaspermea-
bilitätswert je Messposition [m²], Berechnung des geogenen Radonpotentials je Messposition
[RP nach BfS], Angaben Bodenfeuchte und Bodenbeschaffenheit je Messposition, Angaben zur
Meteorologie (Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck)

2. Vorgehensweise und Methoden

2.1 Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

An den Messpunkten wird mit einem elektronischen Erdbohrer (30-40 mm) vorgebohrt und bis zur Messtiefe von 1 m mit einem Handbohrer Typ Edelman (40 mm) nachgebohrt. Anschließend wird eine Packersonde (Typ Honold, 40 mm, wie Bonner Sonde siehe DIN EN ISO 11665-11) eingeführt und der Packer mit einer Handpumpe verdichtet.

Vor jeder Messung wird die Dichtheit des Systems und der Anschlüsse sichergestellt und mit einer Handpumpe die Verfügbarkeit der Bodenluft überprüft.

Zur Radonmessung werden kontinuierliche Messungen mit Radon-Messgeräten mit integrierter Pumpe, Hochspannungsmesskammer und elektrostatischer Abscheidung auf einem Halbleiterdetektor mit anschließender Alphaspektrometrie eingesetzt (Radon-Thoron-Monitor RTM1688-2, Sarad). Durch die Alphaspektrometrie kann der Thoron-Einfluss direkt ausgeschlossen werden.

Vor jeder Messung wird das Messgerät vor Ort mindestens 5 Minuten mit Frischluft (Außenluft) gespült. Zur Messung wird der Probenahmeschlauch an die Sonde angeschlossen und erneut die Dichtheit des Systems sichergestellt.

Die Messung wird im Radon-fast-Modus (Auswertung über Po-218) des Gerätes im 5 Minuten Aufzeichnungsintervall gestartet. In den ersten 2 Messzyklen reichert sich die Messkammer bei einem Volumenstrom von ca. 0,15 L/min (dichter Boden) bis 0,4 L/min (gut durchlässiger Boden) mit Bodengas bis zur konstanten Radonkonzentration an. Anschließend folgt in weiteren mindestens 3 Messzyklen die Anreicherung des Radon-Folgeproduktes Po-218 in der Messkammer bis zur konstanten Aktivitätskonzentration. In der Regel wird nach 4 bis 6 Messzyklen die maximale Radonkonzentration angezeigt. Die Messung ist dann abgeschlossen, wenn der Messwert in weiteren Messzyklen nicht weiter ansteigt. Der Maximalwert ist der notierte und im Gerät abgespeicherte Messwert der Radon-Aktivitätskonzentration für den Messpunkt.

Nach Beendigung der Messung wird der Messaufbau erneut mit Frischluft gespült und an dem nächsten Messpunkt neu gestartet.

Messfehler: Der aufgrund der Zählstatistik auftretende Messfehler ist abhängig von der Höhe der Radon-Aktivitätskonzentration und liegt im Messbereich von 5 kBq/m³ bis 100 kBq/m³ bei kleiner 12 % bis unter 3 %.

Statistischer Messfehler für RTM1688-2 im Radon-fast-Modus und 5 Minuten Messintervall:

Radon-Aktivitätskonzentration	Sensitivität	Messzeit	Impulsausbeute	stat. Fehler (1s)	stat. Fehler (1s)	stat. Fehler (1s)
kBq/m ³	cts/min @ 1 kBq/m ³	min	cts	cts	%	kBq/m ³
5	3	5	75	8,7	11,5	0,6
10	3	5	150	12,2	8,2	0,8
20	3	5	300	17,3	5,8	1,2
50	3	5	750	27,4	3,7	1,8
100	3	5	1500	38,7	2,6	2,6

In den meisten Fällen liegen die Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft bei über 10 kBq/m³ und somit der Messfehler unter 10 %. Der Messfehler reduziert sich zudem bei längeren Messzeiten.

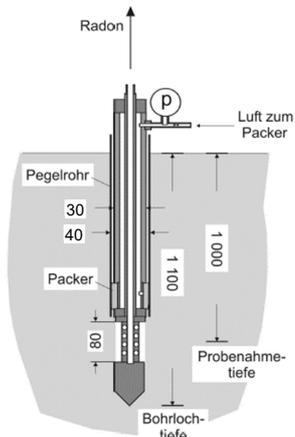


Abb. 1: Packer-Bodengassonde

Abb. 2: Erdbohrer im Einsatz

Abb. 3: Packersonde mit Radonmonitor

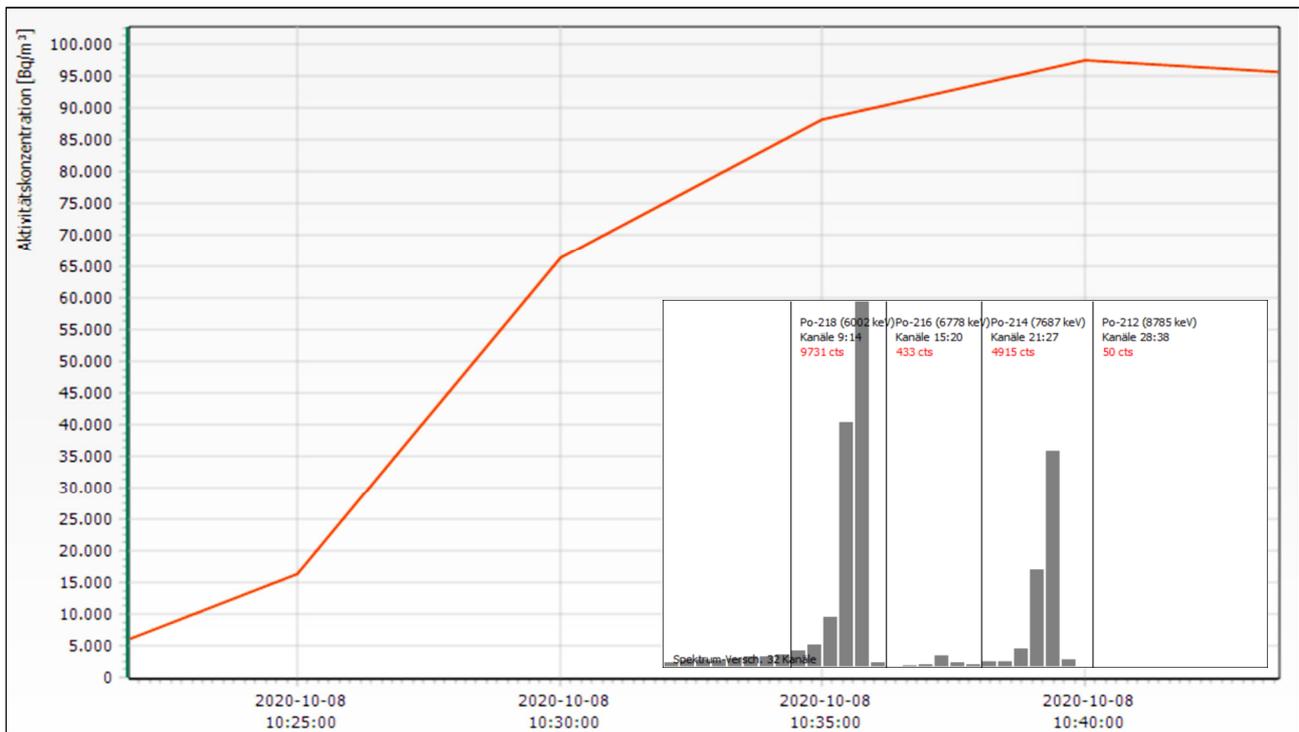


Abb. 4: Messung der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft inkl. Alphaspektrum (Beispiel)

2.2 Messungen der Gaspermeabilität in der Bodenluft

Die Messung der Gaspermeabilität im Erdreich wird unmittelbar nach der Radonmessung durchgeführt. Hierzu wird an die Sonde eine elektronische Laborpumpe mit integriertem Volumstromsensor (BiVOC-2, Holbach) und einem externen digitalen Barometer (GDH 12 AN, Greisinger Electronic) und einem digitalen Differenzdruck-Messgerät (TSI 5825) angeschlossen. Der hierbei im Überdruck ins Erdreich wirksame Volumenstrom wird stufenweise erhöht und der zugehörige Druck (Differenzdruck) gemessen. Zuvor wird der Differenzdruck der Sonde im Leerbetrieb vor Einführung in das Bohrloch mit Schlauchverbindungen in Abhängigkeit des Volumenstroms für das System bestimmt.

Aus den Messdaten Volumenstrom und Differenzdruck wird die Gaspermeabilität je Messpunkt berechnet [siehe Kemski & Partner, „**Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration**“ - Vorhaben 3609S10003, BfS-RESFOR-63/12-Bd.1 urn:nbn:de:0221-201203237824 (2012)]:

$$k = \frac{V \cdot \eta}{F \cdot p} \quad [\text{m}^2]$$

mit

k: Spezifische Gaspermeabilität am Messpunkt in m^2 V: Volumenstrom in m^3/sec (Messwert) η : dyn. Gasviskosität in Pa sec ($1,8 \cdot 10^{-5}$ @ 20 °C)

F: Geometriefaktor in m (0,37 für Packersonde Honold)

p: Druck in Pa (Messwert)

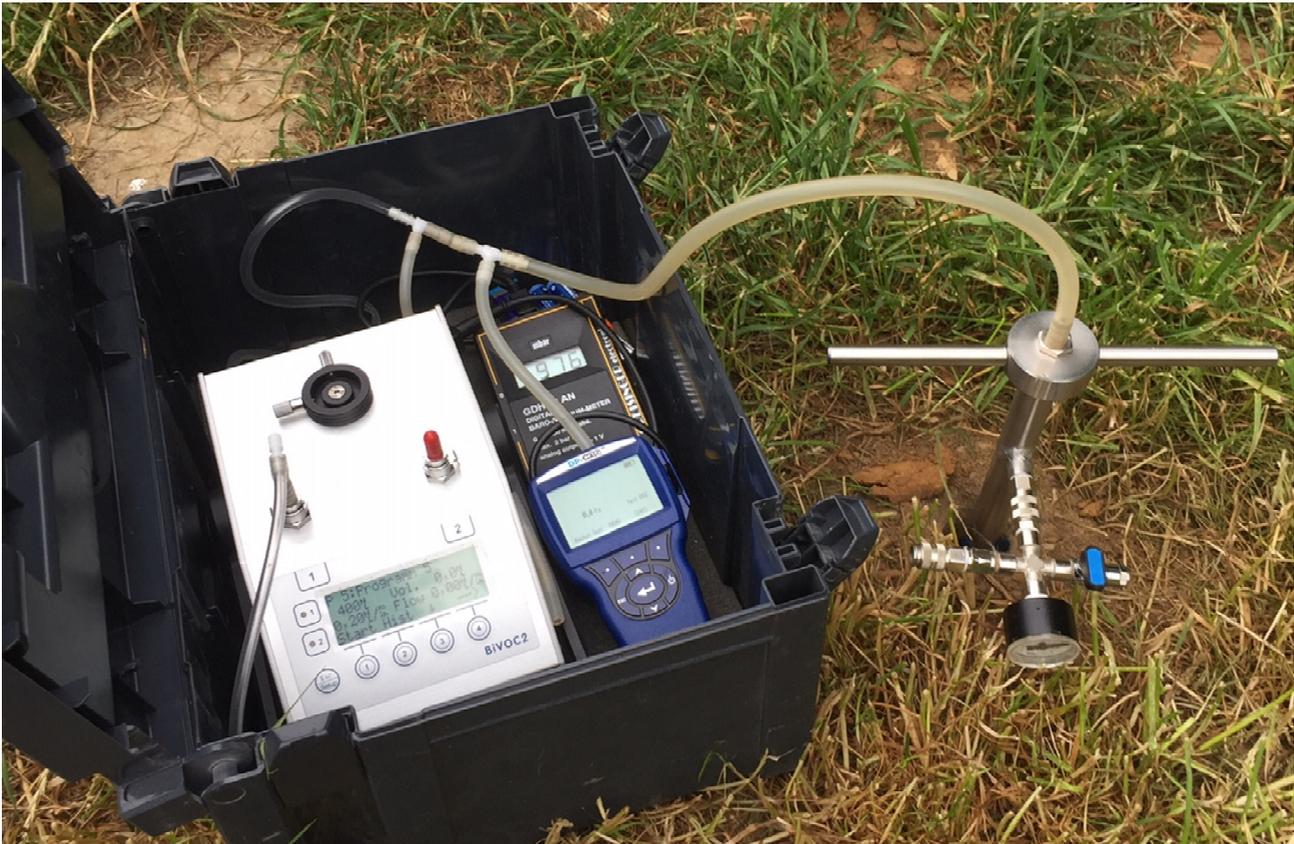


Abb. 5: Messung der Gaspermeabilität in der Bodenluft mit Laborpumpe und Differenzdrucksensor

Messfehler: Der gerätebedingte Messfehler liegt bei der Volumenstrommessung bei unter 10 % (1s) und bei der Differenzdruckmessung bei unter 1 Pascal. Bei den üblicherweise vorliegenden Differenzdruckverhältnissen (über 100 Pa) liegt der gesamte Messfehler in der Regel unter 10 %. Wiederholungsmessungen an einigen Messpunkten bestätigen diesen Wertebereich.

2.3 In-situ-Messungen des CO_2 - und O_2 -Gehaltes in der Bodenluft

Zur Kontrolle der Verfügbarkeit der Bodenluft und des Außenlufteinflusses wird der CO_2 - und O_2 -Gehalt während der gesamten Messung kontinuierlich aufgezeichnet. Hierbei werden die CO_2 - und O_2 -Messgeräte dem Radonmonitor nachgeschaltet. Erst bei konstanter und nicht wieder abfallender CO_2 - und O_2 -Konzentration ist die vollständige Spülung der Messkammern mit Bodenluft sichergestellt.

Bei einem Volumenstrom von 0,25 L/min ist das gesamte Probenahmevolumen des Radonmonitors mit vorgeschaltetem Wasserstop-Behälter, Messkammer und nachgeschalteter CO₂/O₂-Messkammer mit einem Gesamtvolumen von 0,7 L nach bereits 14 Minuten (840 s) bereits 5-fach gespült und annähernd die Maximalkonzentration erreicht. Die sehr deutlichen Konzentrationsverläufe und die Konzentrationskonstanz im weiteren Messverlauf bestätigen die Verfügbarkeit der Bodenluft und die Dichtheit des Messsystems gegenüber dem Außenlufteinfluss. Erwartungsgemäß steigt die CO₂-Konzentration in der Bodenluft gegenüber der Außenluft stark an. Die Werte in 1 m Tiefe liegen in der Regel bei über 5000 ppm (0,5 %) bis über 100000 ppm (10 %) aufgrund der Depotwirkung von CO₂-Gas im Erdreich. Bei Sauerstoff verhält es sich umgekehrt. Erwartungsgemäß sind die O₂-Konzentration in der Bodenluft gegenüber der Außenluft deutlich niedriger. Die Werte in 1 m Tiefe liegen in der Regel bei unter 19 % bis unter 3 % aufgrund des niedrigen Sauerstoffgehaltes im Erdreich.

Messgröße	Messgeräte	Serien-Nr.	Hersteller	Messfehler
CO ₂	GDX CO2	0Q104394	Vernier	< ± 10 % (0 - 50000 ppm) < ± 15 % (> 50000 ppm)
O ₂	GDX O2	0R1025A1	Vernier	< ± 1 % O ₂ -Konz.

2.4 Berechnung des geogenen Radonpotentials

Unter Einbezug der **Gaspermeabilität** in der Bodenluft wurde mit der Bestimmung des **geogenen Radonpotentials** ein neues Verfahren eingeführt, welches derzeit auch für die Festlegung der Radon-Vorsorgegebiete verwendet wird. Das Radonpotential (RP) ist eine dimensionslose, empirische und einfach zu berechnende, handhabbare Größe, die sich üblicherweise im Bereich von 1 bis 200 bewegt. Das geogene Radonpotential wurde als Variable im Gegensatz zu früheren Ansätzen, in denen nur die Bodenluftkonzentration verwendet wurde, gewählt, um auch dem Transport des Radons im Boden Rechnung zu tragen, der mit der Permeabilität quantifiziert werden kann. Mit der Einführung des **geogenen Radonpotentials** wurden die Korrelationen zwischen den bei Radon-Bodengasmessungen verfügbaren Messgrößen und den Innenraumkonzentrationen verbessert. Die Berechnung wurde nach den Vorgaben des BfS durchgeführt [siehe Bundesamt für Strahlenschutz, Bossew und Hoffmann, *„Die Prognose des geogenen Radonpotentials in Deutschland und die Ableitung eines Schwellenwertes zur Ausweisung von Radonvorsorgegebieten“* BfS-SW-24/18 urn:nbn:de:0221-2017122814454 (2018)]:

$$RP := \frac{C}{-\log_{10} k - 10}$$

mit C: Radon-Aktivitätskonzentration am Messpunkt in kBq/m³
 k: Spezifische Gaspermeabilität am Messpunkt in m²

Das mittlere Radonpotential am Messort errechnet sich durch die Mittelwerte des RP der Messpunkte.

Einteilung der Radon-Vorsorgegebiete (BfS-SW-24/18, 2018)

Klasse 1: RP unter 20	Referenzwert in nicht beträchtlicher Anzahl überschritten
Klasse 2: RP zwischen 20 und 44	Bewertung noch unsicher
Klasse 3: RP über 44	Referenzwert in beträchtlicher Anzahl überschritten

Die Klassifizierungen beschreiben statistische Wahrscheinlichkeiten, den aktuellen gesetzliche Referenzwert (derzeit 300 Bq/m³ im Jahresmittel) in Gebäuden zu überschreiten.

So wird für die Festlegung der Radonvorsorgegebieten nach §121 StrlSchG bei einem Radonpotentialwert von **unter 20 nicht** von einer Überschreitung von 300 Bq/m³ in einer beträchtlichen Anzahl von Gebäuden ausgegangen.

Bei Radonpotentialwerten zwischen **20 und 44** bestehen Unsicherheiten. Hier können nach dem derzeitigen Kenntnis- und Datenstand keine eindeutigen Zuordnungen abgeleitet werden. In diesen Regionen sind weitergehende Untersuchungen (Radonpotential/Raumluftkonzentrationen) notwendig.

Bei einem Radonpotentialwert von **über 44** wird mit einer Überschreitung von 300 Bq/m³ in einer beträchtlichen Anzahl von Gebäuden gerechnet, welcher definitionsgemäß laut Strahlenschutzgesetz als Kriterium für die Festlegung von Radon-Vorsorgegebieten gem. § 121 Absatz 1 StrlSchG gilt, sofern sich diese Beurteilung auf über 75 % der zu betrachtenden Gebietsfläche erstreckt.

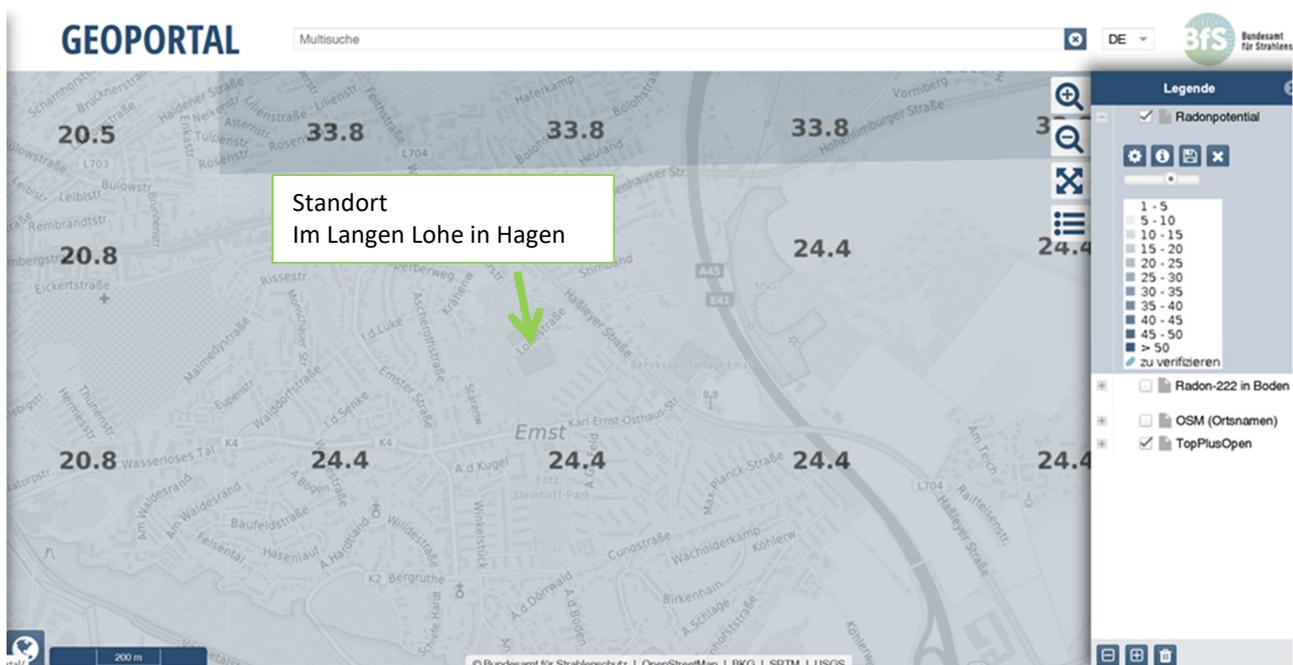
2.5 Sonstiges (Klima, Höhe in NHN)

Die Klimadaten werden vor Ort mit Thermo-Hygrometer ermittelt (°C und % r.F. mit Testo 445 und Dreifachsonde) und der Luftdruck in hPa in Bezug auf NHN von den nächstgelegenen Messtation (weather.com) herangezogen.

Die Angabe der Höhe in NHN erfolgte über GPS-Daten vor Ort (www.google-earth.com).

2.6 Radonprognose nach BfS Geoportal

In der Region liegt nach den bisherigen Bewertungen des Radon-Handbuchs Deutschland sowie der verfügbaren Radon-Karten für die Stadt Hagen ein evtl. erhöhtes **geogenes Radonpotential** vor (ca. Klasse II - III). Die Bodenluftkonzentration liegt wahrscheinlich im Bereich oder sogar über dem Bundesdurchschnitt (ca. 36 kBq/m³, BfS). Der Standort des Baufeldes liegt nach der Prognose des Radonpotentials (Geoportal BfS) in einer als **erhöht** gekennzeichneten Fläche (Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft ca. 40 - 100 kBq/m³) und Radonpotential RP 24,4.

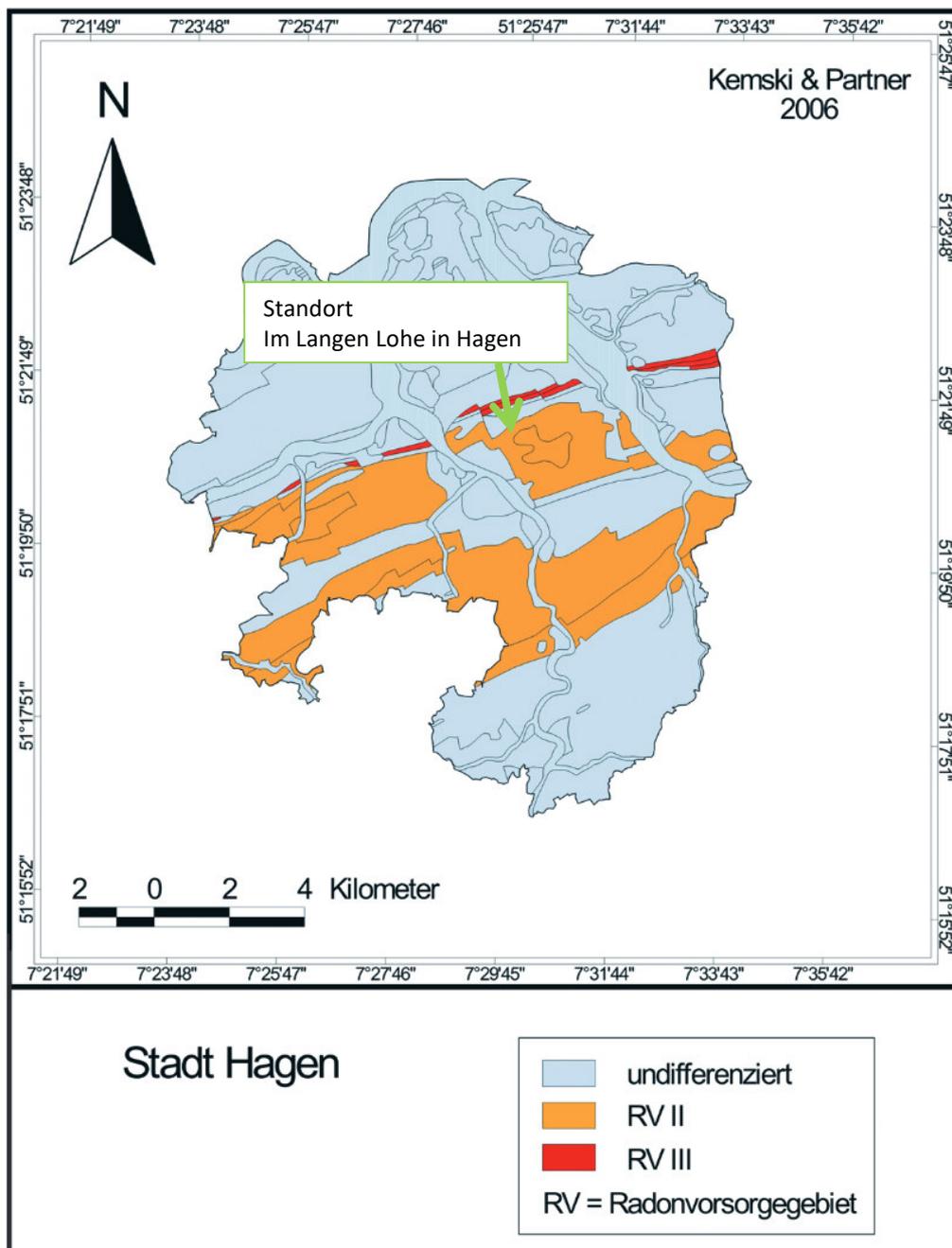


Detailkarte Radonprognose aus dem Geoportal des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS)

Hierbei ist zu beachten, dass die bisher verfügbaren Radon-Karten auf der Basis von vergleichsweise wenigen Messpunkten im gesamten Bundesgebiet (derzeit noch wenige tausend) abgeleitet wurden. Derzeit führen die Länder umfassendere Messkampagnen (Bodenluft, Raumluft) durch. Die Radon-Karte für Deutschland und die Prognose des Geoportals zeigen rein statistische Zusammenhänge bzw. Wahrscheinlichkeiten auf. Bei geologisch inhomogenen Gebieten treten deutliche örtliche Variationen auf. Für eine sichere Planung sind daher Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration vor Ort auf dem Baufeld notwendig.

Ein behördlich ausgewiesenes Radonvorsorgegebiet nach § 121 StrlSchG liegt bisher am Standort des Baufeldes derzeit **nicht** vor bzw. das Land NRW hat die Festlegung der Gebiete noch nicht bekanntgegeben.

Die Stadt Hagen stuft das Baugebiet als **Radonvorsorgegebiet II** (mittlere Stufe) ein:



Quelle: Stadt Hagen, Informationsflyer Radon in Gebäuden (<https://www.hagen.de>)

3. Untersuchungsergebnisse - Messungen der Bodenluft

Lage der Messpunkte



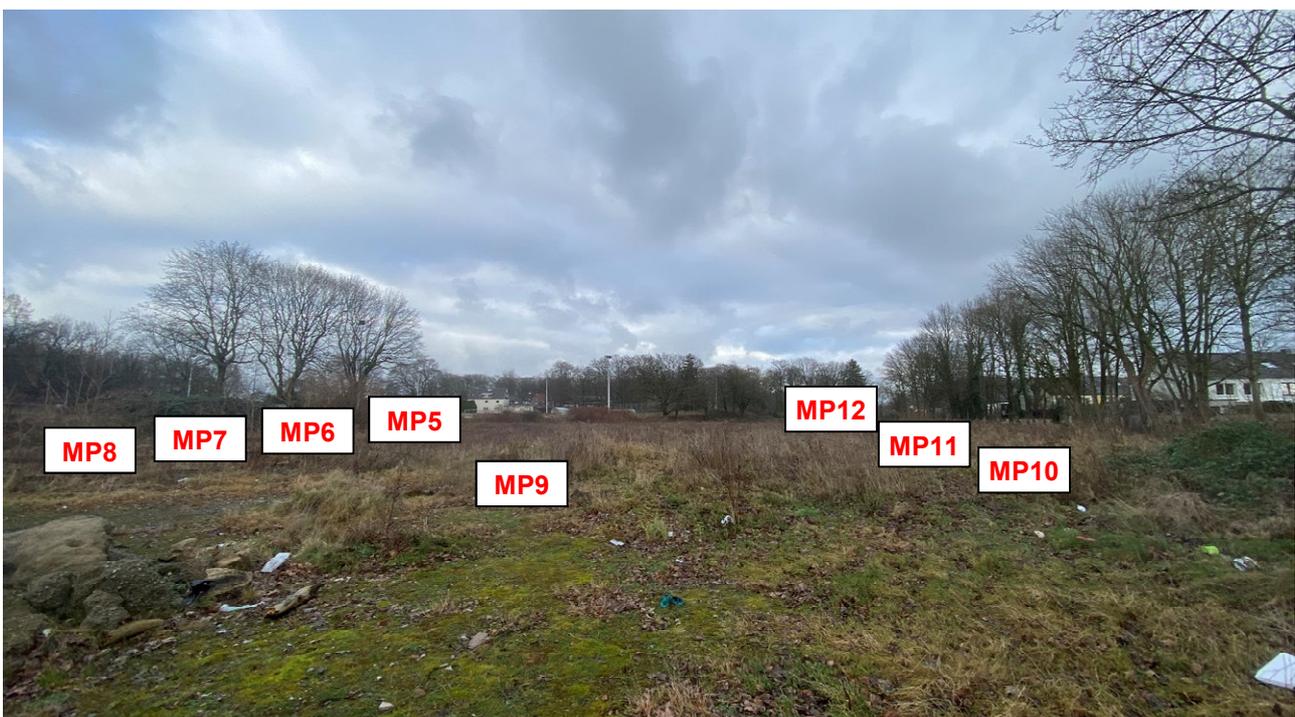
Es wurden 12 Messpunkte verteilt auf der geplanten Bebauungsfläche ausgewählt. Die Messpunkte 1 bis 4 liegen im Bereich des derzeitigen Sportplatzes und die Messpunkte 5 bis 12 liegen im Bereich der bisher unbebauten Wiese mit einer etwas niedrigeren GOK. Der Höhenunterschied liegt bei ca. 5 m (Ebene Sportplatz und Ebene Wiese, siehe Bilder der Fotodokumentation).

Fotodokumentation

Blick auf die Sportanlage mit Sportplatz (Messpunkte 1 bis 4)



Blick auf die Wiese (Messpunkte 5 bis 12)



Zusammenfassung der Ergebnisse

Die gemessene maximale Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft liegt bei **47 kBq/m³** und ist damit **leicht erhöht** gegenüber dem bisher statistisch ermittelten Mittelwertes im gesamten Bundesgebiet (36 kBq/m³ nach BfS) und der Prognose des Bundesamtes für Strahlenschutz für den Baufeldstandort. Der Maximalwert liegt am Messpunkt 10 auf der Wiese im unteren Bereich des Baugebietes vor. Sechs weitere Messpunkte (1, 2, 6, 8, 11 und 12) zeigen **Radon-Aktivitätskonzentration** in der Bodenluft **über 20 kBq/m³**. Der Mittelwert liegt bei **24,2 kBq/m³**. Für die Bewertung eines Baufeldes wird der Maximalwert herangezogen. Die Radonkonzentrationen zeigen in den eher naturgewachsenen Bodenbereichen auf der Wiesenfläche höhere Werte.

Die gemessene mittlere Gaspermeabilität k in m² in der Bodenluft liegt mit **8,0E-12 m²** im höheren Bereich der in Böden auftretenden Permeabilitäten (entspricht Typ Fein-, Mittelsand, gut durchlässig). Der Maximalwert mit der höchsten Gasdurchlässigkeit liegt an den Messpunkten 2, 4, 5 und 7 mit **1,5E-11 m²** vor. Insgesamt zeigen sich geringe Variationen auf dem Baufeld. Die Gaspermeabilitäten zeigen in den naturgewachsenen Bodenbereichen auf dem unteren Teil der Wiese zum Teil niedrigere Gasdurchlässigkeiten im etwas bindigeren Boden auf. Am Messpunkt 11 ist die Gaspermeabilität mit **8,2E-14 m²** vergleichsweise niedrig.

Das berechnete maximale geogene Radonpotential RP liegt bei **34** und liegt am Messpunkt 8 vor. An **keinem** Messpunkt liegt der RP-Wert **über 44**. Der Mittelwert liegt bei **18,5**. Nach BfS-Bewertung wäre davon auszugehen, dass der derzeit gültige gesetzliche Referenzwert für die Radon-Aktivitätskonzentration im Innenraum (Arbeitsplatz/Aufenthaltsraum) **wahrscheinlich nicht** in beträchtlicher Anzahl von Gebäuden überschritten wird.

Die gemessene mittlere CO₂-Konzentration in der Bodenluft liegt bei **9400 ppm** (0,94 %) und somit erwartungsgemäß deutlich **über** der Außenluftkonzentration (um 400 - 450 ppm bzw. 0,040 - 0,045 %). Die Messwerte liegen zwischen 2600 ppm (MIN) und 18000 ppm (MAX), sind vergleichsweise niedrig und deuten auf eine gute Entlüftung der oberen Bodenschichten durch meist hohe Gasdurchlässigkeiten (zum Teil schluffig-sandiger Boden) hin.

Die gemessene mittlere O₂-Konzentration in der Bodenluft liegt bei **18,9 %** und somit erwartungsgemäß deutlich **unter** der Außenluftkonzentration (um 21 %). Die Messwerte liegen zwischen 17,9 % (MIN) und 19,9 % (MAX), sind vergleichsweise hoch und lassen sich ebenso durch die gute Gasdurchlässigkeit an den meisten Messpunkten erklären.

Besonderheiten:

Die Baufelder liegen im geologischen System Devon und nach dem GEO-Portal NRW liegen im Boden bis in 2 m Tiefe stark toniger Schluff und schluffiger Lehm vor. Die Bodenart kann nach bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5, 2005 Abb. 17) dem Typ Lts bis Uls (Normallehme bis Lehmschluffe mit sandigen Anteilen) zugeordnet werden. Die Bodenfeuchte kann als schwach feucht bis feucht (ko2 – ko3) beschrieben werden.

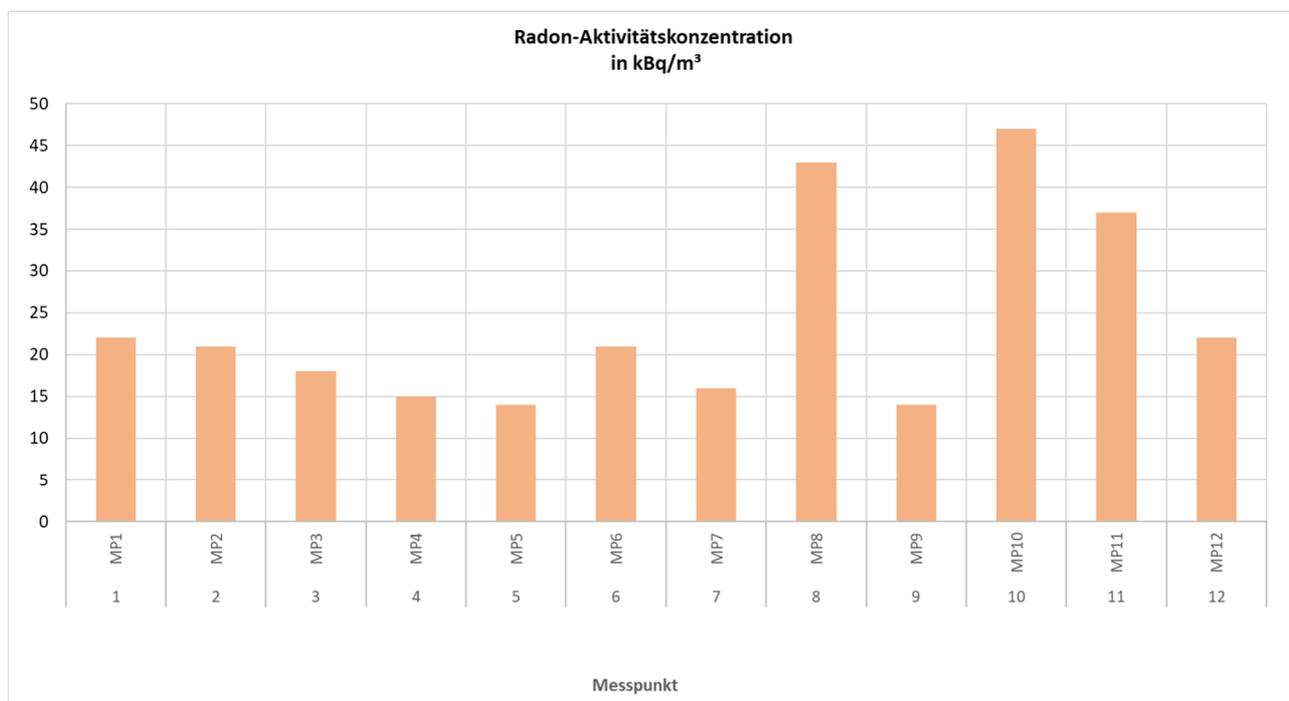
Auf dem oberen Teil des Baugebietes ist auf der Fläche des Sportplatzes mit Auffüllungen, Verdichtungen und Begradigungen zu rechnen. Die Messergebnisse der Radon-Aktivitätskonzentrationen sind jedoch plausibel in Bezug auf die bisherigen Messungen, Erkundungen und geologischen Kartierungen. In der Tiefe von 1 m wurden an allen Messpunkten schluffig-lehmiges und zum Teil auch sandiges Material vorgefunden.

Hinweis: Die Radonkonzentrationen und Radonpotentiale verteilen sich unregelmäßig auf dem Baufeldern, so dass keine stark unterschiedlichen Bereiche auf den Baufeldern zu erwarten sind. Tendenziell liegt im unteren Bereich (Wiese) ein minimal höheres Radonpotential vor.

3.1 Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

Anzahl Messpunkte: 12	Radon-Aktivitätskonzentration (in kBq/m ³)
Mittelwert	24,2
Standardabweichung	11,1
Maximalwert	47,0
Minimalwert	14,0

Diagramm 1: Messergebnisse Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft je Messpunkt



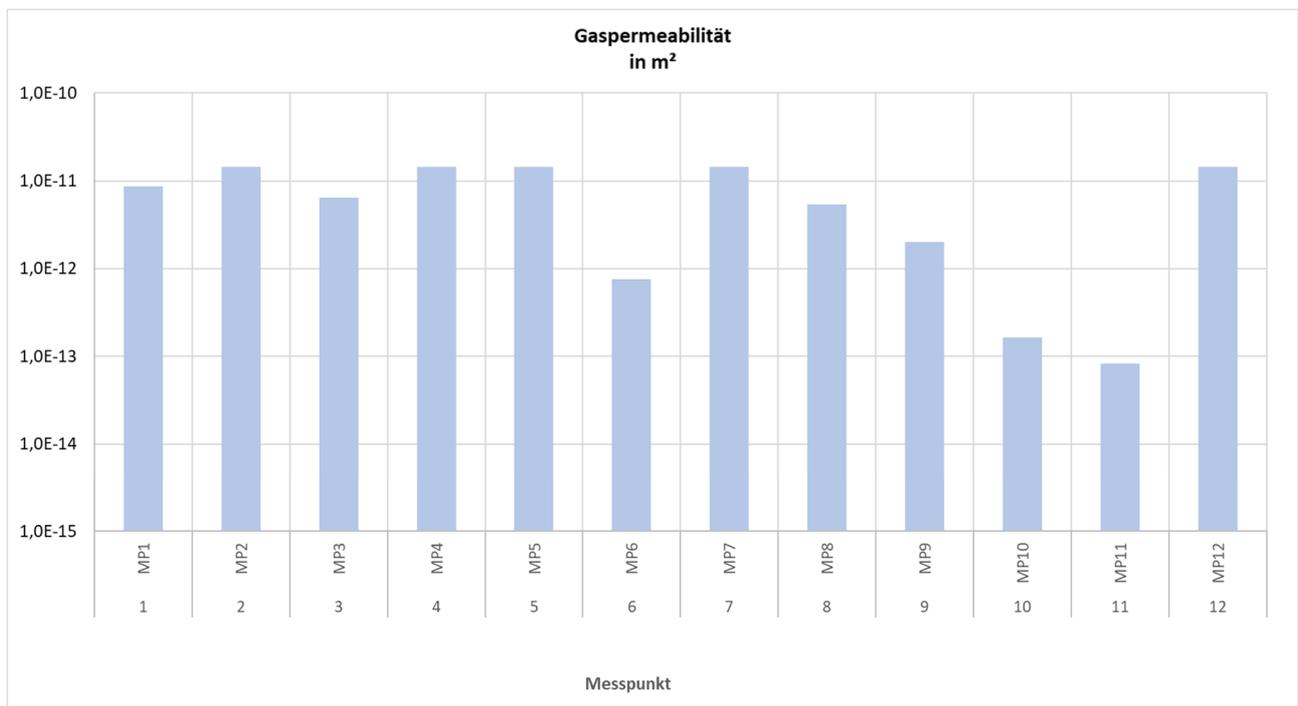
Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft	Anzahl Messpunkte	Anteil in Prozent
unter 20 kBq/m ³	5	42
zwischen 20 und 40 kBq/m ³	5	42
zwischen 40 und 100 kBq/m ³	2	16
über 100 kBq/m ³	0	0

➤ Detailauswertung, Einzelergebnisse und Randbedingungen siehe Messprotokoll

3.2 Messungen der Gaspermeabilität in der Bodenluft

Anzahl Messpunkte: 12	Gaspermeabilität (in m²)
Mittelwert	8,0E-12
Standardabweichung	6,0E-12
Maximalwert	1,5E-11
Minimalwert	8,2E-14

Diagramm 2: Messergebnisse Gaspermeabilität in der Bodenluft je Messpunkt



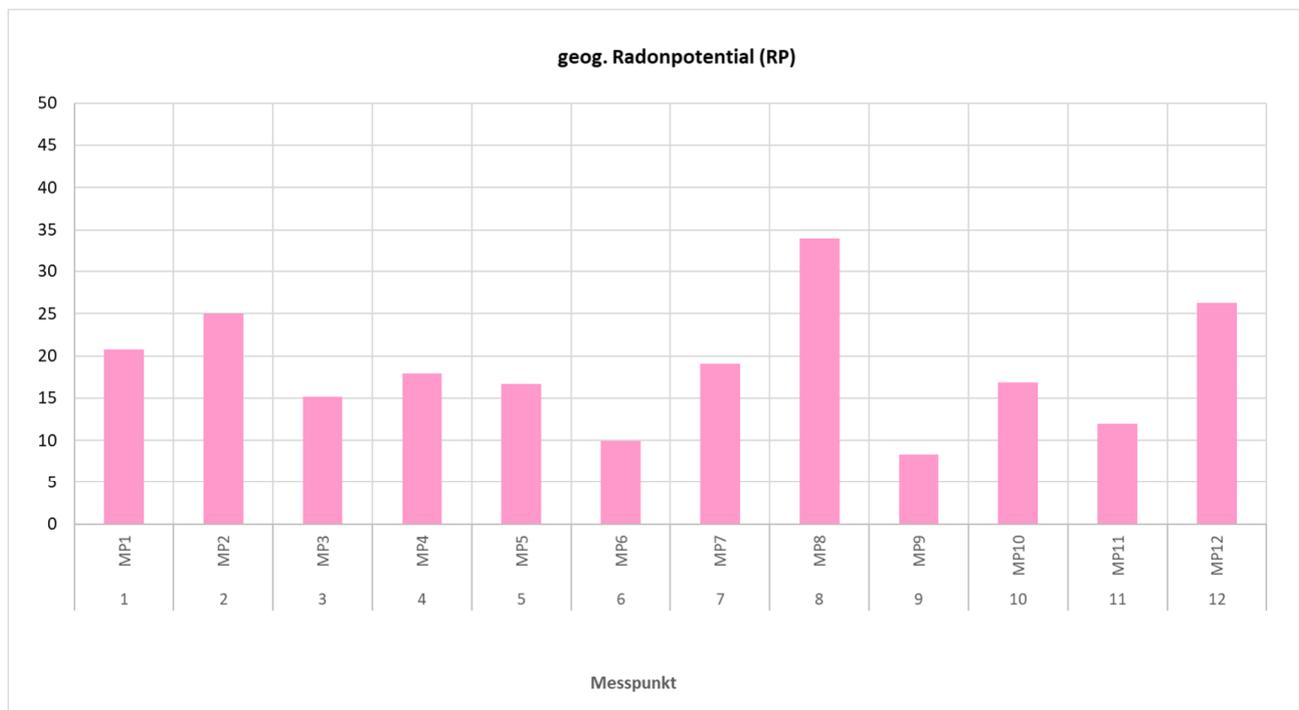
Gaspermeabilität in der Bodenluft	Anzahl Messpunkte	Anteil in Prozent
unter 1,0E-13 m ² (<i>schlecht durchlässig</i>)	1	8
zwischen 1,0E-13 und 5,0E-12 m ² (<i>mittel</i>)	3	25
über 5,0E-12 m ² (<i>gut durchlässig</i>)	8	67

➤ Detailauswertung, Einzelergebnisse und Randbedingungen siehe Messprotokoll

3.3 Berechnung des geogenen Radonpotentials

Anzahl Messpunkte: 12	Geogenes Radonpotential (RP)
Mittelwert	18,5
Standardabweichung	7,0
Maximalwert	34,0
Minimalwert	8,3

Diagramm 3: Werte des geogenen Radonpotentials je Messpunkt



Geogenes Radonpotential (RP)	Anzahl Messpunkte	Anteil in Prozent
Klasse 1: RP unter 20	8	67
Klasse 2: RP zwischen 20 und 44	4	33
Klasse 3: RP über 44	0	0

4. Empfehlungen zur weiteren Vorgehensweise

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse und der vergleichsweise niedrigen bis nur leicht erhöhten Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft sowie der daraus resultierenden überwiegend niedrigen Radonpotentialwerten besteht für die Bebauung auf diesen Baufeldern kein dringender zusätzlicher Handlungsbedarf für den baulichen Radonschutz. Als Mindestanforderung müssen die Vorgaben des Strahlenschutzgesetzes Beachtung finden.

Es ist **nicht** davon auszugehen, dass am Standort der Baufelder (Stadt Hagen) ein Radonvorsorgegebiet nach §121 StrlSchG festgelegt wird. Besondere bauliche Auflagen nach §154 StrlSchV und Messpflichten an Arbeitsplätzen nach §155 StrlSchV (EG und UG) sind daher **nicht** zu erwarten.

Gesetzliche Regelungen

Nach dem aktuell gültigen Strahlenschutzgesetz gilt u.a. folgende Grundregel:

- 1) **Wer ein Gebäude mit Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen errichtet, hat grundsätzlich geeignete Maßnahmen zu treffen, um den Zutritt von Radon aus dem Baugrund zu verhindern oder erheblich zu erschweren.**
- 2) *Wer im Rahmen der baulichen Veränderung eines Gebäudes mit Aufenthaltsräumen oder Arbeitsplätzen Maßnahmen durchführt, die zu einer erheblichen Verminderung der Luftwechselrate führen, soll die Durchführung von Maßnahmen zum Schutz vor Radon in Betracht ziehen, soweit diese Maßnahmen erforderlich und zumutbar sind.*

Anmerkungen

Nach StrlSchG gilt die Pflicht unter 1) als erfüllt, wenn bei Neubauten in nicht gesondert ausgewiesenen Radonverdachtsgebieten der normgerechte Feuchteschutz nach Stand der Technik ausgeführt wird. Hintergrund ist hierbei, dass eine Referenzwertüberschreitung im Jahresmittel (300 Bq/m^3) vermieden werden soll. Nach den Grundsätzen der Abdichtungstechnik erdberührter Bauteile nach der neuen DIN 18533 kann jedoch auch bei fachgerechter Abdichtung eines Neubaus gegen Bodenfeuchtigkeit **nicht in jedem Fall** ein Radoneintritt ausreichend verhindert werden. Wasserdicht bedeutet nicht immer auch gasdicht. So kann z.B. auch bei fachgerechter und mangelfreier Bauausführung bei Wassereinwirkungsklasse W1-E (Bodenfeuchtigkeit und nicht drückendes Wasser) ein merklicher Radoneintritt vorliegen [Schäfer 2017]. Hierbei sind daher zusätzliche Maßnahmen wie z.B. flächige Verklebungen oder Verschweißungen von Abdichtungsbahnen notwendig. Bei erhöhtem Schutz (z.B. Zielwert 100 Bq/m^3) sind Ausführungen gem. W1-E - je nach Radonpotential - besonders problematisch. Bei Abdichtungen nach W2-E (drückendes Wasser) kann bei durchschnittlichem Radonpotential zur Unterschreitung der gesetzlichen Referenzwertes und ggf. darüber hinaus von einer ausreichenden Radon-Dichtheit ausgegangen werden.

Im Falle eines höheren Schutzzieles (z.B. BfS-, UBA-, WHO-Empfehlung: $< 100 \text{ Bq/m}^3$ im Jahresmittel) sollten auch auf Baufeldern mit mittleren oder niedrigem Radonpotential (wie hier am Standort) sicherheitshalber bei der Bauplanung Maßnahmen zum vorbeugenden Radonschutz gegenüber konvektivem Radoneintritt eingeplant werden. Hierzu gehört z.B. ein höherer Feuchteschutz W2-E oder W1-E mit flächigen Verklebungen oder Verschweißungen von Abdichtungsbahnen und gasdichten Rohrdurchführungssystemen). Maßnahmen gegenüber diffusivem Radoneintritt erscheinen am Standort **nicht** erforderlich. Zusätzlich ist ein konsequentes Lüftungskonzept nach den Vorgaben der DIN 1946-6 mit technischer Unterstützung (ggf. Ventilatorgesteuert) empfehlenswert.

Nach Fertigstellung sollte zur Sicherheit eine Kontrollmessung in Bezug auf Radon in der Raumluft und/oder Dichtheitsprüfung im Unterdruck (R_{n50} -Test) vorgenommen werden.

5. Messprotokoll

Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

Kurzzeitmessung mittels „aktivem“ Messverfahren gemäß DIN EN ISO 11665-11:2020

Projektbezeichnung: BV Im Langen Lohe, Hagen

Adresse	Im Langen Lohe, 58093 Hagen (Lohstr. 19)		
Messungen vor Ort	Dr. Thomas Haumann, Uwe Münzenberg		
Bezeichnung Messort ID	BV Im Langen Lohe	Bebauungsplan	Nr. 4/19 (690)
Koordinaten WGS 84	51.35746 7.50745	Höhe in m NHN	206 – 208 m
Messdatum	18.01.2022	Messzeit	10:00 – 15:00
Landnutzung	Sportanlage, Wiesenfläche	Geologie (Serie)	Devon
Witterung bei Probenahme	trocken nach Regen	Luftdruck NN in hPa	1019
Lufttemperatur in °C	4 - 6	Luftfeuchte in % r.F.	94 - 95
Beschreibung Messfeld und Anmerkungen	Sportanlage, Sportplatz und Wiesenfläche unbebaut neben Wohn- und Waldgebiet		
Klassifizierung Boden und Bodenfeuchte	eo-es / ko2 – ko3 (nach KA5), schwach feucht bis feucht, stark toniger Schluff, schluffiger Lehm, sandige Anteile		
	Messpunkt 1	Messpunkt 2	Messpunkt 3
Datum	18.01.2022	18.01.2022	18.01.2022
Sonde / Messtiefe [cm]	Packer / 80	TS / 100	Packer / 100
Radonkonzentration [kBq/m ³]	22	21	18
Geogenes Radonpotential [RP]	20,8	25,1	15,2
Gaspermeabilität [m ²]	8,7E-12	1,5E-11	6,5E-12
CO ₂ [ppm]	5100	2600	2800
O ₂ [Vol %]	19,6	17,9	19,9
Ergebnis Kontrolle Frischluft	ok	ok	ok
Klassifizierung (KA5) Bodenfeuchte	schwach feucht	schwach feucht	schwach feucht
Klassifizierung (KA5) Bodenart / Hydromorphiemerkmale	Lts / eo-es	Lts / eo-es	Lts / eo-es
Bemerkungen	geringere Messtiefe durch steinigen Boden	auf dem Fußballfeld (Schotter verdichtet)	keine

Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

Kurzzeitmessung mittels „aktivem“ Messverfahren gemäß DIN EN ISO 11665-11:2020

Projektbezeichnung: BV Im Langen Lohe, Hagen

	Messpunkt 4	Messpunkt 5	Messpunkt 6
Datum	18.01.2022	18.01.2022	18.01.2022
Sonde / Messtiefe [cm]	Packer / 80	Packer / 100	Packer / 100
Radonkonzentration [kBq/m ³]	15	14	21
Geogenes Radonpotential [RP]	17,9	16,7	9,9
Gaspermeabilität [m ²]	1,5E-11	1,5E-11	7,5E-13
CO ₂ [ppm]	9700	5500	16000
O ₂ [Vol %]	18,9	19,3	18,6
Ergebnis Kontrolle Frischluft	ok	ok	ok
Klassifizierung (KA5) Bodenfeuchte	schwach feucht	schwach feucht	schwach feucht
Klassifizierung (KA5) Bodenart / Hydromorphiemerkmale	Uls / eo-es	Uls / eo-es	Sl4 / eo-es
Bemerkungen	geringere Messtiefe durch steinigen Boden	keine	keine

	Messpunkt 7	Messpunkt 8	Messpunkt 9
Datum	18.01.2022	18.01.2022	18.01.2022
Sonde / Messtiefe [cm]	Packer / 100	Packer / 100	Packer / 100
Radonkonzentration [kBq/m ³]	16	43	14
Geogenes Radonpotential [RP]	19,1	34,0	8,3
Gaspermeabilität [m ²]	1,5E-11	5,4E-12	2,0E-12
CO ₂ [ppm]	5000	12000	6000
O ₂ [Vol %]	19,4	18,8	18,9
Ergebnis Kontrolle Frischluft	ok	ok	ok
Klassifizierung (KA5) Bodenfeuchte	schwach feucht	schwach feucht	schwach feucht
Klassifizierung (KA5) Bodenart / Hydromorphiemerkmale	Uls / eo-es	Lts / eo	Lts / eo-es
Bemerkungen	keine	sandiger Unterboden unter Lehm/Ton	keine

Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft

Kurzzeitmessung mittels „aktivem“ Messverfahren gemäß DIN EN ISO 11665-11:2020

BV Im Langen Lohe, Hagen

	Messpunkt 10	Messpunkt 11	Messpunkt 12
Datum	18.01.2022	18.01.2022	18.01.2022
Sonde / Messtiefe [cm]	Packer / 100	Packer / 100	Packer / 80
Radonkonzentration [kBq/m ³]	47	37	22
geogenes Radonpotential [RP]	16,9	12,0	26,2
Gaspermeabilität [m ²]	1,6E-13	8,2E-14	1,5E-11
CO ₂ [ppm]	18000	14000	16000
O ₂ [Vol %]	18,4	18,1	18,7
Ergebnis Kontrolle Frischluft	ok	ok	ok
Klassifizierung (KA5) Bodenfeuchte	feucht	feucht	schwach feucht
Klassifizierung (KA5) Bodenart / Hydromorphiemerkmale	Ts3 / eo-es	Ts3 / eo-es	Lts / eo-es
Bemerkungen	keine	keine	geringere Messtiefe durch steinigen Boden

6. Bewertungsgrundlagen

Hintergrund

Die gesundheitliche Beurteilung von Radon ist wenig umstritten. Kaum ein anderer innenraumrelevanter Schadstoff ist so gut dokumentiert und untersucht. In Deutschland werden jährlich knapp 1900 Lungenkrebs-Todesfälle durch Radon in Innenräumen verursacht [Menzler 2006]. Unabhängig von den exakten Zahlenwerten und Todesfallstatistiken gilt Radon eindeutig als das in Wohnungen nach dem Tabakrauch wichtigste umweltbedingte Krebsrisiko für die Bevölkerung, deutlich vor Schadstoffen wie Asbest, Benzol, Dioxinen, Cadmium, Arsen, PAK, PCB und anderen Kanzerogenen. Bereits 1988 wurde Radon von der WHO (Weltgesundheitsorganisation) und der IARC (Internationale Agentur für Krebsforschung) als für den Menschen krebserzeugender Schadstoff eingestuft [WHO 2000, WHO 2009, WHO 2010]. Ein erhöhtes Lungenkrebsrisiko ab einer Radon-222-Aktivitätskonzentration (vereinfacht „Radonkonzentration“) im Jahresmittel von 100 Bq/m^3 ist epidemiologisch nachweisbar. Man geht zudem davon aus, dass es keinen Schwellenwert gibt, unterhalb dessen kein Risiko besteht. Je zusätzliche 100 Bq/m^3 im Innenraum erhöht sich das Lungenkrebsrisiko bereits signifikant um ca. 10 % und unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung sogar um 16 %.

Bewertung von Radonkonzentrationen im Erdreich

Die Freisetzung aus dem Boden ist die häufigste Ursache für Radonauffälligkeiten in Innenräumen. Die Universität Bonn hat im Rahmen eines Forschungsprojektes eine Radonkarte (siehe nachfolgende Karte) für Deutschland erstellt. Hierbei wurden Luftproben aus einer Tiefe von jeweils 1 m entnommen. Es zeigen sich erhöhte und hohe Radon-Aktivitäten vor allem in Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und folgenden Gebieten:

- bayerischer Wald, Oberpfalz, Fichtelgebirge, Thüringer Wald, Erzgebirge, südlicher Schwarzwald (u.a. durch granitische und vulkanische Gesteine)
- Vogtland, Sauerland (u.a. durch Schwarzschiefer)
- nördliches und östliches Schleswig-Holstein (durch nordische Gletschergesteine)
- einzelne eng begrenzte Gebiete in Mittel- und Süddeutschland

Die Korrelationen mit den Innenraummessungen der Radonkonzentration sind recht gut. Während in 1 m Tiefe im Boden sehr hohe Konzentrationen von ca. 10.000 bis über 600.000 Bq/m^3 vorherrschen, liegen die Innenraum-Konzentrationen ca. **Faktor 1000** niedriger. Ab ca. **20.000 Bq/m^3** Bodenluft-Konzentration kann daher bei schon bei ungünstiger Bauweise mit Radonauffälligkeiten in Häusern gerechnet werden. Das Bundesumweltministerium bereitet derzeit ein **Radonschutzgesetz** vor, das für den Zielwert **100 Bq/m^3** Maßnahmen für Neu- und Altbauten unter dem Aspekt der Vorsorge regeln soll. Hierfür werden **Radonverdachtsgebiete** definiert, in denen aufgrund einer erhöhten Radonkonzentration im Untergrund mit erhöhten Radonkonzentrationen in Gebäuden zu rechnen ist.

Einteilung der Radonverdachtsgebiete (Entwurf Radonschutzgesetz, 2004):

Klasse I:	20.000 Bq/m^3 bis 40.000 Bq/m^3
Klasse II:	40.000 Bq/m^3 bis 100.000 Bq/m^3
Klasse III:	über 100.000 Bq/m^3 Radon in der Bodenluft

Bei Neubauten (Planung) sind dabei entsprechend den Verdachtsgebieten Klasse I, II und III bauliche Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen. Die Planung hat so zu erfolgen, dass möglichst **100 Bq/m^3** nicht überschritten werden. Dies gilt für alle Neubauten. In bestehenden Gebäuden in Radon-Verdachtsgebieten der Klasse III ist grundsätzlich mit Radonkonzentrationen von mehr als **100 Bq/m^3** zu rechnen.

Bewertung des geogenen Radonpotentials RP (BfS-SW-24/18, 2018):

Klasse 1: RP unter 20	Referenzwert in nicht beträchtlicher Anzahl überschritten
Klasse 2: RP zwischen 20 und 44	Bewertung noch unsicher
Klasse 3: RP über 44	Referenzwert in beträchtlicher Anzahl überschritten

Eher seltener anzutreffen sind erhöhte Innenraumkonzentrationen von Radon ausgehend von **Baustoffen** oder Einrichtungsgegenständen. Wenn jedoch radiumhaltige Materialien eingesetzt wurden, kann es schnell zu Extremwerten (im Jahresmittel deutlich über 1000 Bq/m³) kommen. Besonders auffällig können hierbei z.B. folgende Materialien in Erscheinung treten: Chemiegips (Phosphorit), Blau-Beton (nordischer Leichtbeton mit bis zu 5000 Bq/kg Uran-238), Schlackenstoffe als Dämmschüttung in Decken (Verarbeitungsrückstände uranvererzter Steinkohlen), Naturbims, Uranglasierte Farben, Fliesen und Leuchtziffern, Baustoffe aus uranhaltigem Schwarzschiefer, großflächig eingesetzte Baustoffe mit Radiumgehalten über 100 Bq/kg (Ra-226).

Bewertung von Radonkonzentrationen im Innenraum

Das Umweltministerium legte im Jahr 2004 einen Entwurf eines Radonschutzgesetzes vor. Das Gesetz sollte Ende 2005 verabschiedet werden, es kam jedoch nicht durch den Bundesrat und durch den Bundestag. Darin enthalten ist/war ein Raumluft-Zielwert (Wunschwert) für Radon in Häusern von **100 Bq/m³**. Dieser Wert gilt derzeit als Empfehlung des Bundesamtes für Strahlenschutz, des Umweltbundesamtes (AIR) und der Weltgesundheitsorganisation WHO.

Auf der Basis der Erkenntnisse (u.a. Radonstudie 2004), die auch zum Entwurf zum Radonschutzgesetz geführt haben, liegt eine Stellungnahme der **Strahlenschutzkommission (SSK)** vor: "*Angesichts der statistisch gut abgesicherten Ergebnisse der europäischen Studie ist bei Entscheidungen über konkrete Maßnahmen zur Reduzierung von Radonkonzentrationen in Wohnungen auch der Bereich **unterhalb** von **250 Bq/m³** zu berücksichtigen.*" Durch einfache Maßnahmen, wie z.B. Änderung der Raumnutzung, Lüften oder Abdichten offensichtlicher Radon-Eintrittspfade, sollte ggf. eine Reduzierung der Radonkonzentration herbeigeführt werden. In Gebieten mit erhöhten Radon-Vorkommen empfiehlt die SSK, neue Häuser radongeschützt zu bauen.

Auf internationaler Ebene wurde im Dezember 2013 eine Neufassung der **EU-Basic Safety Standards (EU-BSS)** verabschiedet, in der erstmals Regelungen für die Begrenzung der Radonkonzentration in Gebäuden aufgenommen worden sind (siehe „Amtsblatt der Europäischen Union“). Für die nationalen Regelungen im Strahlenschutz werden sich hieraus wesentliche Änderungen ergeben. Vorgeschrieben sind **Referenzwerte** zum Schutz der Bevölkerung vor Radon in Wohnungen von maximal **300 Bq/m³** im Jahresmittel für Gebäude und ebenso 300 Bq/m³ für den Arbeitsplatz.

Im neuen **Strahlenschutzgesetz** (ab 2019 gültig) wurde dieser Wert trotz zahlreicher Einwände aufgrund des bereits recht hohen Lungenkrebsrisikos bei 300 Bq/m³ im Jahresmittel übernommen. Die Mitgliedstaaten sollen Gebäuderichtlinien einführen, um den Zutritt von Radon aus dem Boden und aus Baumaterialien zu verhindern. Die bisherigen *Richtwerte* der EU waren als Empfehlungen zu verstehen, die *Referenzwerte* werden dann einen deutlich verbindlicheren Charakter und mehr juristische Relevanz haben. Dadurch würde dem baulichen Radonschutz deutlich größere Bedeutung zukommen. Schwerpunkt der derzeitigen Diskussionen ist die Frage, welche Anforderungen auf das Bauwesen nach Einführung entsprechender nationaler Regelungen zum Radonschutz zukommen sowie welche Strategien hinsichtlich der Umsetzung der geplanten EU-Richtlinien durch die Bundesrepublik und die Bundesländer verfolgt werden.

Übersicht und internationale Bewertungen der Radonkonzentration im Innenraum (Jahresmittelwerte):

- **Deutschland:** **100 Bq/m³ (Empfehlung Bundesamt für Strahlenschutz, Empfehlung Umweltbundesamt AIR)**
300 Bq/m³ (Referenzwert für Arbeitsplätze und Aufenthaltsräume, StrlSchG)
- WHO: 100 Bq/m³ (Richtwert, Air Quality Guidelines)
- USA (EPA): 150 Bq/m³ (Empfehlung)
- GB/N/S: 200 Bq/m³ (Grenzwert bei Neubauten)

7. Literatur

1. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, **Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung; Jahresberichte**
2. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB: Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung „**Strahlenschutzgesetz**“, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 42, Bonn (www.bmub.de)
3. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; **Radonschutzgesetz (Entwurf 2004)**
4. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit + Bundesamt für Strahlenschutz; **Radon-Handbuch Deutschland**, 2019 (www.bfs.de)
5. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; „**Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten**“, Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission SSK, Band 47, BMU 2002
6. BVS 2017, Bundesverband öffentlich bestellter und vereidigter sowie qualifizierter Sachverständiger e. V. (BVS), **Standpunkt Radon in Gebäuden**, 02-2017
7. DIN/TS 18117, **Bauliche und Lüftungstechnische Maßnahmen zum Radonschutz**, Teil 1, Beuth-Verlag (Teil 2 noch in Bearbeitung)
8. DIN 18533, **Abdichtung von erdberührten Bauteilen**, Teile 1 bis 3, Beuth-Verlag 2017
9. DIN ISO 11665-11, Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt - Luft: Radon-222, Teil 11: **Verfahren zur Probenahme und Prüfung der Bodenluft**, Beuth Verlag 2013
10. European Commission; **Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials**, Radiation Protection 112 (1999)
11. EU-BSS 2013, **RICHTLINIE 2013/59/EURATOM** DES RATES vom 5. Dezember 2013, zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom
12. EU RP-122, Europäische Kommission, Radiation protection 112, "**Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials**" EU 1999
13. Menzler 2006, Menzler S., Schaffrath-Rosario A., Wichmann H.E. und Kreienbrock L.: Abschätzung des attributablen Lungenkrebsrisikos in Deutschland durch Radon in Wohnungen. Ecomed-Verlag Landsberg, 2006, bzw. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission SSK, 11./12. Juli 2006
14. Wichmann H.E. et al.; **Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (West)**, eco-med Verlag, Landsberg 1998
15. Weltgesundheitsorganisation, **WHO Air Quality Guidelines** 2nd edition (www.euro.who.int), Chapter 8.3 **Radon**
16. Weltgesundheitsorganisation, **WHO handbook on indoor Radon**, Radonhandbuch der WHO (WHO 2009)