

Hessens Dauermessstelle für Radon in der Bodenluft

15

DOMINIQUE RIES

Umwelt-Radioaktivität

Der Mensch ist in seinem täglichen Leben radioaktiver Strahlung ausgesetzt. Diese setzt sich zusammen aus natürlich vorkommender und zivilisatorisch bedingter Strahlung. Der zivilisatorische Anteil entsteht durch Anwendungen in der Medizin – zum Beispiel Röntgenaufnahmen oder nuklearmedizinische Diagnostik – und in geringem Maße durch technische Anwendungen, beispielsweise Geräte mit einem radioaktiven Strahler zur Materialprüfung. Die natürlich vorkommende Strahlenexposition setzt sich aus mehreren Faktoren zusammen. Ein großer Teil besteht aus der kosmischen Strahlung, bei der Teilchen aus dem Weltall (Protonen, Elektronen oder andere Ionen) auf die Erdatmosphäre treffen und einen Schauer aus Sekundärteilchen erzeugen, von dem ein Bruchteil den Erdboden erreicht. Ein weiterer Teil der natürlichen Strahlung ist die terrestri-

sche Strahlung. Sie entsteht durch natürlich vorkommende Nuklide in Boden und Gestein, die auch mit der Nahrung aufgenommen werden können. Zusätzlich gibt es das im Boden natürlich vorkommende Edelgas Radon, das eingeatmet wird und einen nicht unerheblich Anteil an der natürlichen Strahlenexposition hat.

In Deutschland beträgt die effektive Dosis für die zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition im Mittel 1,7 Millisievert (mSv) pro Jahr. Kosmische und terrestrische Strahlung tragen mit 0,7 mSv pro Jahr bei, durch mit der Nahrung aufgenommene Nuklide erhält der Mensch im Durchschnitt noch einmal 0,3 mSv pro Jahr und schließlich trägt das Einatmen von Radon 1,1 mSv pro Jahr bei (BfS 2019a).

Was ist Radon?

Durch ihre lange Halbwertszeit kommen die natürlichen Nuklide Uran-235, Uran-238 und Thorium-232 überall in der Erdkruste vor. Sie zerfallen jeweils in mehreren Schritten zu Isotopen von Radon, das wiederum über mehrere Schritte zu stabilem Blei zerfällt. Da Radon als einziges Glied in der Zerfallskette ein Edelgas ist, kann es sich im Erdboden mobilisieren und aus der Erdoberfläche austreten. Wenn es sich in geschlossenen Räumen ansammelt und mit der Atmosphäre vermischt, kann es unbewusst ein-

geatmet werden. Das radioaktive Edelgas ist geruch- und geschmacklos. Das potentielle Gesundheitsrisiko besteht dabei weniger durch das Radon selbst, als durch die Folgeprodukte seines Zerfalls, die sich an der Lunge ablagern können und dort weiter zerfallen. Die radioaktiven Zerfälle schädigen das Gewebe der Lunge. Heute gilt Radon als Hauptursache für die natürliche Strahlenexposition des Menschen und ist die zweithäufigste Ursache für Lungenkrebs nach Rauchen (ZEEB, H. 2009).

In der Regel ist Radon-222 das relevanteste Isotop für den Strahlenschutz, weil es mit 3,8 Tagen die längste Halbwertszeit (Zeit, in der die Hälfte der vorhandenen Atome zerfallen ist) der Radonisotope besitzt. Sein Ursprungselement ist das Uran-238. Durch die lange Halbwertszeit kann es im Erdboden weiter wandern als die anderen Isotope. Zudem hat es eine höhere Wahrscheinlichkeit aus dem Boden auszutreten und sich mit der Atmosphärenluft zu vermischen (KEMSKI, J. 2012).

Durch das im Boden befindliche natürliche Uran entsteht fortlaufend neues Radon. In der Folge ist die Radonaktivitätskonzentration im Boden um ein Vielfaches höher als in der Luft über dem Boden. Sie kann Werte von einigen 100 Becquerel pro Kubikmeter (abgekürzt Bq/m³: Anzahl der Zerfälle pro Sekunde und Kubikmeter) bis zu einigen Hunderttausend Becquerel pro Kubikmeter annehmen und hängt von der Messtiefe ab. In Böden mit sehr hohem Radiumgehalt sind auch Werte um die Milliarden Becquerel pro Kubikmeter möglich (DKE 2016).

Die hessische Radon-Strategie

Die Wahrscheinlichkeit, dass Radon aus dem Boden in undichte Keller eindringt, hängt von mehreren Faktoren ab. Diese können beispielsweise in einem Gebiet mit hohem Uranvorkommen im Erdboden und günstigen Transportbedingungen durch Durchlässigkeit und Nässe vorliegen. Man spricht vom „Radonpotenzial“ des Bodens, wenn man das Radonvorkommen im Boden und die Durchlässigkeit des Bodens zusammenfasst. Das Wort „Potenzial“ beschreibt daher nur die Möglichkeit des Bodens Radon in die Umgebung abzugeben. Die tatsächliche Konzentration in der Raumluft hängt maßgeblich von der Bauweise des Hauses und dem Lüftungsverhalten der Bewohner ab (BfS 2019b).

Im neuen Strahlenschutzgesetz wird für Wohnräume und Arbeitsplätze ein Referenzwert für die Aktivität von Radon-222 festgelegt, der bei 300 Bq/m³ Raumluft liegt. Die Länder sind verpflichtet Radonvorsorgegebiete auszuweisen, in welchen die über das ganze Jahr gemittelte Aktivitätskonzentration von 300 Bq/m³ für Radon-222 in „einer beträchtlichen Zahl von Gebäuden“ überschritten wird. Die Fest-

Von ganz erheblichem Einfluss ist die Beschaffenheit des Bodens (KEMSKI, J. 2012): Darunter fällt die Verteilung von Uran und Radium im Boden, die Korngröße, Porosität, Permeabilität, Dichte und Feuchte des Bodens. Der Transport des Radons im Boden wird beeinflusst von Rissen und Spalten, unterschiedlichen Schichten, im Boden vorhandenem Wasser oder Verwitterungsgraden von Gestein.

Die Radonkonzentration variiert jedoch nicht nur von Ort zu Ort, sie ist auch saisonalen Schwankungen unterworfen und kann sich sogar innerhalb eines Tages verändern. Temperatur und Luftdruck haben genauso Auswirkungen auf den Messwert wie Regen. Bisher ist jedoch ungeklärt, ob es eindeutige Tagesgänge der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft gibt und ob sich ein Jahresgang ausbildet. Weiterhin ist unklar, in welchem Maße sich die meteorologischen Gegebenheiten auf den Radonmesswert auswirken und ob es sich um einfache lineare Zusammenhänge handelt.

legung dieser Gebiete muss vom Land veröffentlicht und alle 10 Jahre überprüft werden (§ 121 StrlSchG).

Im Rahmen einer bundesweiten Messkampagne wurde im Jahr 2004 eine Radonkarte erstellt, die ganz Deutschland abdeckt. Hierbei wurde ein Gitter über das Bundesgebiet gelegt, das Quadrate mit einer Kantenlänge von 3 km einteilt. In jeder Zelle wurde die Aktivitätskonzentration von Radon in der Bodenluft vereinfacht farbkodiert dargestellt (KEMSKI, J. 2004).

Die Karte basiert auf Messungen an etwa 4000 Messorten, verteilt über die gesamte Bundesrepublik. Gemessen wurde die Aktivitätskonzentration von Radon in der Bodenluft in 1 Meter Tiefe. Die Auswahl der Orte orientierte sich an geologischen Gegebenheiten, so dass die Messpunkte nicht homogen verteilt sind. In Regionen mit stark wechselnder Geologie wurde häufiger gemessen als in Regionen, deren Untergrund relativ homogen gestaltet ist. Begründet wurde diese Maßnahme dadurch, dass die Aktivitätskonzentration von Radon stark vom vorliegenden Untergrund abhängt. Bei gleichen örtlichen

Gegebenheiten wurde die gleiche Radonkonzentration angenommen, so dass weniger Messpunkte in dem homogenen Gebiet aufgenommen wurden als in Gebieten mit abwechslungsreichem geologischen Untergrund (KEMSKI, J. 2004). Die flächendeckende Abschätzung der Radonkonzentration erfolgte durch eine abstandsgewichtete Interpolation zwischen den Messpunkten. Die Rechnungen und Erstellung der Karte wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz übernommen (BfS 2017).

In Hessen wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) ein neues und umfangreiches Messprogramm gestartet, um eine repräsentative Radonkarte zu erstellen. Es werden deutlich mehr Messungen vorgenommen, um eine belastbare Datengrundlage zu schaffen. Die Technische Hochschule Mittelhessen (THM) wurde mit der Durchführung der Messungen beauftragt. Die Abteilung Geologie und Boden des HLNUG wählt die insgesamt 750 Messpunkte in Hessen aus. Das Dezernat Strahlenschutz des HLNUG begleitet das Programm mit dem Aufbau einer Dauermessstelle in Fürth im Odenwald, um die Aussagekraft der Messkampagne zu erhöhen.

Die Radon-Dauermessstelle des HLNUG

Bei Einzelmessungen über einen kurzen Zeitraum oder einmalige tägliche Messungen ergeben sich Schwierigkeiten bei der Einordnung der Messergebnisse. Die Radonaktivitätskonzentration kann sich mitunter stündlich verändern (DKE 2016). Daher lässt sich ohne Hintergrundinformationen keine Aussage darüber treffen, ob das Messergebnis den Jahresmittelwert für den Messort repräsentiert oder in Relation dazu als eher hoch oder niedrig zu werten ist. Daher wurde vom HLNUG eine Dauermessstation konzipiert, die eine Einschätzung ermöglicht, ob die Radonaktivitätskonzentration tages- oder jahreszeitlich beeinflusst ist. Zudem soll die Messstation Einflüsse durch die lokalen bodenphysikalischen und meteorologischen Begebenheiten aufzeigen. Dazu gehören zum Beispiel Temperatur, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Niederschlagsmenge und die Sonneneinstrahlung. Darüber hinaus kann die Bodenfeuchte einen wichtigen Einfluss auf die gemessene Radonaktivitätskonzentration haben (KEMSKI, J. 2012).

Theoretisch steigt die Aktivitätskonzentration mit zunehmender Bodentiefe. In der Nähe der Oberfläche kann die Messung jedoch verfälscht werden, da die Bodenluft sich mit Luft aus der Atmosphäre verdünnen kann. Als praktikabel für eine Messung hat sich eine Tiefe von 1 Meter unter der Erdoberfläche erwiesen. Zur Bestimmung der Radonaktivitätskonzentration verwendet man eine spezielle Bodenluftsonde, durch die man mittels einer Pumpe Bodenluft aus der gewünschten Tiefe ansaugen kann. Die Ra-

donkonzentration in der Bodenluft kann dann über Szintillationskammern oder Ionisationskammern bestimmt werden. Es kann wahlweise eine einzelne Probe in eine evakuierte Zelle überführt werden, oder es erfolgt eine kontinuierliche Probenahme.

Alternativ lässt sich der Radongehalt auch über eine passive Langzeitmessung bestimmen. Hierbei wird ein Loch in den Boden gebohrt und mit einem Plastikrohr ausgekleidet, in dem der Detektor (z. B. eine Diffusionskammer mit Kernspurfolie) gestellt wird. Anschließend muss das Loch gegen Atmosphärenluft abgedichtet werden. Die Auswertung erfolgt nach einer festgelegten Messzeit (DKE 2016).

Zur Errichtung der Radon-Dauermessstelle wurde ein aktives Radonmessgerät aufgestellt, das über eine Bodenluftsonde die Luft aus einem Meter Tiefe ansaugt und analysiert. Es misst selbstständig und ohne Unterbrechungen im 10-Minuten-Takt die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft. Die Messstelle befindet sich bei Fürth im Odenwald auf einem vom HLNUG genutzten Grundstück, auf dem sich bereits auch eine Station des Luftmessnetzes Hessen und eine Erdbebenstation befinden.

Bei dem verwendeten Messgerät handelt es sich um einen AlphaGuard DF2000 (siehe Abbildung 1) des Herstellers Bertin. Es handelt sich dabei um ein mobiles Messgerät, das Alpha-Zerfälle in einer Ionisationskammer registriert. Es kann über Akkus oder



Abb. 1: Das Messgerät AlphaGuard DF2000 der Firma Bertin



Abb. 2: Die Bodenluftsonde vor dem Messcontainer ist über einen flexiblen Schlauch mit dem Messgerät im Container verbunden



Abb. 3: Zur Messung von Bodenluft wird mit einem schweren Schonhammer (oben) ein dickes Außenrohr (Mitte) in den Boden geschlagen, in das ein dünnes Rohr (unten) zum Absaugen der Bodenluft eingeführt wird.

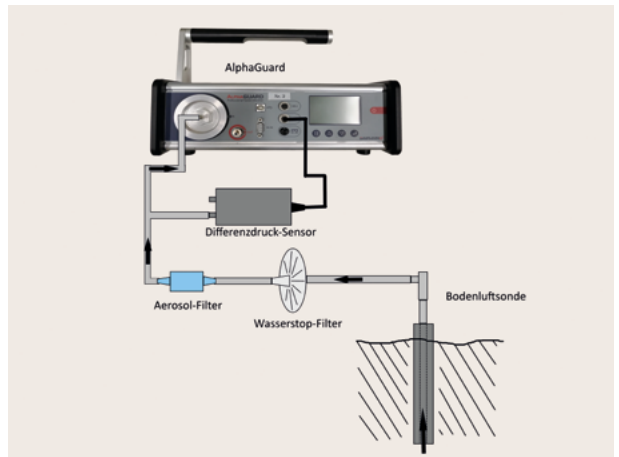


Abb. 4: Versuchsanordnung für die Bodenluftmessung

das Stromnetz betrieben werden und auch im Falle eines Stromausfalles weiterhin Daten aufzeichnen. Das Gerät ist wartungsarm, hat einen großen Messbereich und seine Kalibrierung bleibt über lange Zeit stabil. Über das Display lassen sich aktuelle Messwerte auslesen, Kurven ausgeben und verschiedene Messmodi auswählen, die in unterschiedlichen Situationen nützlich sind. Eine Pumpe ist im Gerät integriert. Durch sie lässt sich aktiv die zu messende Luft in die Messkammer befördern und die geförderte Menge bestimmen.

Bei der Messung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft wird ein spezieller Messmodus des Gerätes gewählt, der zwischen Radon-222

und Radon-220 (Thoron) diskriminieren kann. Radon-220 kann das Messergebnis verfälschen, besitzt aber eine viel kürzere Halbwertszeit von knapp einer Minute. Der AlphaGuard ist im vorhandenen Container des Luftmessnetzes aufgestellt. Hinter dem Container ist die Bodenluftsonde an einer festgelegten Stelle im Boden eingebracht. Die Bodenluft gelangt über einen Schlauch von der Sonde durch ein Loch im Boden des Containers zum Radonmessgerät (Abbildung 2).

Die Bodenluftsonde besteht aus einem dickwandigen Rohr mit einem Außendurchmesser von 22 mm und einer Wandstärke von 5 mm (siehe Abbildung 3, Mitte). Es hat eine spezielle Spitze mit

einer losen Bleiniete. Bei der Installation der Bodenluftsonde wird dieses Rohr mit einem schweren Schonhammer in den Boden geschlagen (Abbildung 3, Oben). Das Rohr wird anschließend ein kleines Stück aus dem Boden herausgezogen, so dass unter der Spitze des Rohres ein Hohlraum im Boden freigegeben wird, in dem sich die Bodenluft ansammelt. Dann wird ein dünneres Edelstahlrohr (Abbildung 3, Unten) mit einem Außendurchmesser von 6 mm eingeführt. Es stößt durch eine Membran in der Spitze des Außenrohres, die zur Abdichtung dient. Dann stößt es die Bleiniete in der Spitze des Außenrohres heraus und kann die sich dahinter ansammelnde Bodenluft aus dem Hohlraum absaugen.

Bei starken Regenfällen kann sich im Hohlraum an der Ansaugöffnung der Bodenluftsonde Wasser sammeln. Um zu verhindern, dass das Wasser in die Messkammer des AlphaGuards gelangt, wurden Gegenmaßnahmen installiert (siehe Abbildung 4). Ein Differenzdrucksensor kontrolliert die Pumpleistung und ein spezieller Filter zwischen Sonde und Mess-

gerät hält außerdem das Wasser zurück. Er kann jedoch nach starken Regenfällen mit Wasser volllaufen, das nicht mehr entweichen kann und den Ansaugschlauch blockiert. Der Differenzdrucksensor schaltet nun die Pumpe ab, um eine Beschädigung des Messgeräts zu vermeiden. Ein Aerosol-Filter vor dem AlphaGuard verhindert das Eindringen von Radonfolgeprodukten, welche innerhalb der Messkammer zu falschen Messwerten führen.

Die gewonnenen Daten werden im Messgerät gespeichert und einmal monatlich während der Wartungsarbeiten über den Servicelaptop abgerufen. Sie werden später mit den Wetterdaten zusammengeführt. Diese stammen von der Internetseite des HLNUG-Luftmessnetzes, das die Luftmessstation in Fürth betreut.

Ab dem 13.03.2019 werden außerdem die Bodenfeuchte und Temperatur des Bodens in ca. 1 m Tiefe erfasst. Dazu wurde jeweils eine Sonde links und rechts der Bodenluftsonde installiert.

Erste Auswertungen

Nach einem erfolgreichen Testbetrieb am Jahresende 2018 läuft die Radondauermessstelle ohne kritische Störungen. Daher ist festzuhalten, dass das Setup der Radondauermessstelle geeignet ist. Es gibt einige wenige Ausfälle von Stunden oder Tagen. Diese beschränken sich auf Starkregenereignisse, infolgedessen sich zu viel Wasser im Ansaugschlauch und im Filter gesammelt hat. Das Messgerät wurde bei diesen

Ereignissen zur Sicherheit automatisch abgeschaltet (siehe Abbildung 5, Ereignisse mit der Kennzeichnung a)). Eine Datenlücke im Juni ist der Tatsache geschuldet, dass der Messcontainer ausgetauscht werden musste (Abbildung 5, Ereignis b)). Ein weiterer Ausfall wurde vermutlich durch Nagetiere verursacht, die den Luftschlauch der Bodenluftsonde durchgebissen hatten (Abbildung 5, Ereignis c)).

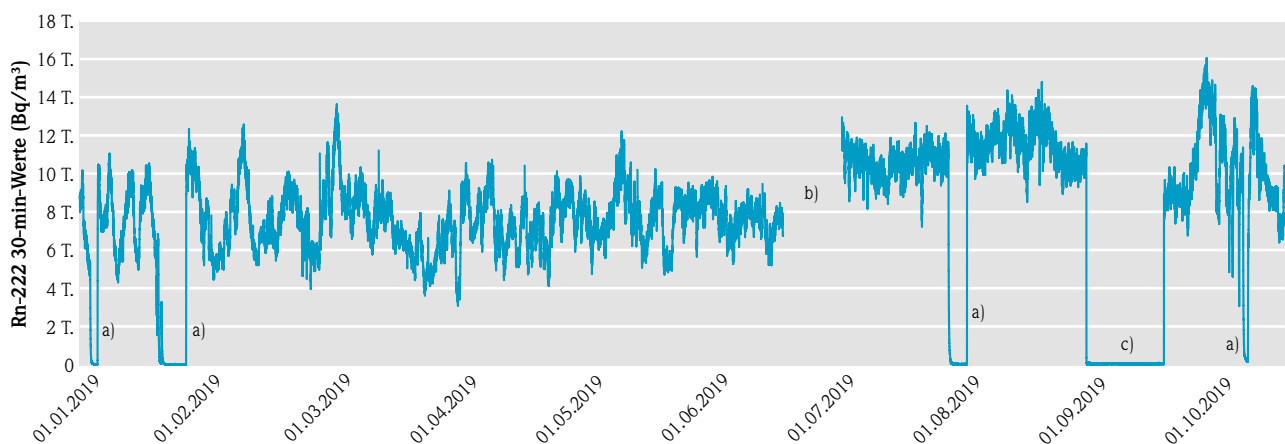


Abb. 5: Verlauf der gemessenen Radonaktivitätskonzentration von Januar bis Oktober

In regelmäßigen Abständen wurden während der Wartungsarbeiten an der Station mit einem separaten Messgerät Vergleichsmessungen vorgenommen. Dies dient der Qualitätssicherung und soll sicherstellen, dass das Messgerät in der Dauermessstelle weiterhin fehlerfrei funktioniert. Die aufgenommenen Vergleichswerte stimmten im Rahmen der Fehlertoleranz überein.

In der Zeit von Januar bis Oktober hat die Station einen mittleren Wert von $8\,677\text{ Bq/m}^3$ für die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft gemessen. Dieser Wert ist relativ niedrig, da in der Bodenluft auch Werte über $100\,000\text{ Bq/m}^3$ auftreten können (KEMSKI, J. 2001). Die Messwerte schwanken über die gesamte Zeit im Bereich von $3\,087\text{ Bq/m}^3$ bis zu einem Höchstwert von $16\,048\text{ Bq/m}^3$. Daraus ergibt sich bei stichprobenartigen Kurzzeitmessungen die generelle Herausforderung zu entscheiden, ob diese repräsentativ für den Jahresmittelwert sind oder Extremwerte innerhalb des Schwankungsbereichs darstellen. Durch Zuhilfenahme der meteorologischen Daten (z. B. Temperatur, Niederschlag, Luftdruck, etc.) werden an der Dauermessstelle Zusammenhänge untersucht, die eine Einschätzung des Messwertes ermöglichen.

Zur Beurteilung möglicher Zusammenhänge der Messwerte mit meteorologischen Ereignissen des ersten Halbjahres (Auswertung der Daten von Januar bis Juni) wurde der lineare Zusammenhang der gemessenen Radonaktivitätskonzentration mit einzel-

nen meteorologischen Messgrößen untersucht. Um objektiv einen Zusammenhang zu beurteilen, wird der sogenannte Pearson-Korrelationskoeffizient gebildet. Anhand des Wertes kann eine Einschätzung über eine positive und negative Korrelation erfolgen. Zusätzlich wurde das Bestimmtheitsmaß berechnet, das angibt, wie viel Prozent der Varianz beider Messwerte definiert ist. Die Bewertung erfolgt nach Cohen (1988): Ein Bestimmtheitsmaß von 0,01 wird als gering, 0,09 wird als mittel und 0,25 wird als hoch korrelierend gewertet.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt, es wurde jeweils auf drei Nachkommastellen gerundet.

Die Korrelationsergebnisse aus Tabelle 1 und 2 wirken auf den ersten Blick wenig signifikant. Daraus wird ersichtlich, dass es nicht eine einzige relevante meteorologische Einflussgröße gibt, die die Höhe des gemessenen Radonwertes vorrangig bestimmt. Im Folgenden wurden die Datenreihen zunächst zeitlich willkürlich geteilt und kalenderwochenweise untersucht. Dabei konnten Wochen bestimmt werden, in denen einzelne Messgrößen einen deutlichen Einfluss auf die Radonaktivitätskonzentration haben, den sie zum Teil in der darauffolgenden Woche nicht mehr haben. Welchen Einfluss stabile Wetterlagen und die willkürliche Aufteilung des Messzeitraums dabei haben ist noch näher zu untersuchen. Beispielhafte Ergebnisse werden nachfolgend präsentiert.

Tab. 1: Koeffizienten für das ganze Halbjahr, Januar bis Juni, Teil 1

Verglichene Variablen	Rn222 - Temperatur	Rn222 - Niederschlag	Rn222 - Luftdruck
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,035	0,105	-0,304
Bestimmtheitsmaß R^2	0,001	0,011	0,093

Tab. 2: Koeffizienten für das ganze Halbjahr, Januar bis Juni, Teil 2

Verglichene Variablen	Rn222 - Windgeschwindigkeit	Rn222 - rel. Luftfeuchte	Rn222 - Globalstrahlung
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,210	0,213	-0,082
Bestimmtheitsmaß R^2	0,044	0,045	0,007

Beispiel: KW 02

Tab. 3: KW 02, Teil 1, in der die Temperatur eine hohe Korrelation aufweist

Verglichene Variablen	Rn222 - Temperatur	Rn222 - Niederschlag	Rn222 - Luftdruck
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,658	0,428	-0,213
Bestimmtheitsmaß R^2	0,432	0,183	0,045

Tab. 4: KW 02, Teil 2. Es wird anhand dieser Daten ersichtlich, dass im Zeitraum der KW 02 die Windgeschwindigkeit und die rel. Luftfeuchte eine hohe Korrelation aufweisen.

Verglichene Variablen	Rn222 - Windgeschwindigkeit	Rn222 - rel. Luftfeuchte	Rn222 - Globalstrahlung
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,806	0,648	-0,088
Bestimmtheitsmaß R^2	0,649	0,420	0,008

Wie in Tabelle 3 und Tabelle 4 zu sehen ist, sind in der 2. Kalenderwoche Temperatur ($r=0,658$; $R^2=0,432$), Windgeschwindigkeit ($r=0,806$; $R^2=0,649$) und die

relative Luftfeuchtigkeit ($r=0,648$; $R^2=0,420$) die signifikanten Größen.

Beispiel: KW 09

Tab. 5: KW 09, Teil 1. Im Gegensatz zu KW 02 ist zu erkennen, dass in KW 09 vorrangig der Luftdruck eine hohe Korrelation aufweist.

Verglichene Variablen	Rn222 - Temperatur	Rn222 - Niederschlag	Rn222 - Luftdruck
Pearson-Korrelationskoeffizient r	-0,408	0,179	-0,874
Bestimmtheitsmaß R^2	0,166	0,032	0,764

Tab. 6: KW 09, Teil 2. Im Vergleich zu KW 02 wird ersichtlich, dass in KW 09 die Korrelation zwischen Rn222 und der Windgeschwindigkeit oder rel. Luftfeuchte abgenommen haben.

Verglichene Variablen	Rn222 - Windgeschwindigkeit	Rn222 - rel. Luftfeuchte	Rn222 - Globalstrahlung
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,589	0,682	-0,161
Bestimmtheitsmaß R^2	0,347	0,466	0,026

Entgegen dem vorgenannten Beispiel korreliert in der 9. Kalenderwoche vorwiegend der Luftdruck ($r=-0,874$; $R^2=0,764$) mit der Radonkonzentration und

nicht mehr die Temperatur. Relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit haben ebenso einen Einfluss, da hier R^2 über dem Wert 0,25 liegt.

Beispiel: KW 10

Tab. 7: KW 10, Teil 1. Im direkten Vergleich zu KW 09 wird aus den Daten der KW 10 ersichtlich, dass keine Korrelationen erkennbar sind.

Verglichene Variablen	Rn222 - Temperatur	Rn222 - Niederschlag	Rn222 - Luftdruck
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,002	0,038	0,004
Bestimmtheitsmaß R^2	0,000	0,001	0,000

Tab. 8: KW 10, Teil 2. Wie im ersten Teil ist auch hier eine Verringerung von r und R^2 zu erkennen.

Verglichene Variablen	Rn222 - Windgeschwindigkeit	Rn222 - rel. Luftfeuchte	Rn222 - Globalstrahlung
Pearson-Korrelationskoeffizient r	0,159	0,068	0,104
Bestimmtheitsmaß R^2	0,025	0,005	0,018

Ein Beispiel für starke Kontraste zur vorangegangenen Kalenderwoche bietet die Woche 10. Hier lassen sich keine so starken Korrelationen wie in den anderen beispielhaften Wochen erkennen. Dies wird vor allem an den geringen Werten für R^2 deutlich.

In der Kalenderwoche 9 war das Wetter während der ersten Wochenhälfte sonnig bei Tageshöchsttemperaturen zwischen 15 und 18 °C bei hohem Luftdruck. Zum Ende der Woche fiel der Druck und es wurde

bewölkt und regnerisch. In der Kalenderwoche 10 blieb es durchgängig bewölkt und regnerisch, bei maximal 12 °C. Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass bei Regenwetter keine Korrelationen zur Radonaktivitätskonzentration mehr auftreten. Ein Gegenbeispiel dafür bietet die Kalenderwoche 2, in der es ähnlich bewölkt war mit Niederschlagsereignissen wie in Kalenderwoche 10. Hier traten durchaus signifikante Korrelationen auf (siehe oben).

Beispiel: KW 16/17 - Tagesgänge der Radonaktivitätskonzentration

In der Zeit vom 18. bis 23. April wurde anhand des Programms „NASA Exoplanet Archive“ ein Tagesgang mit einer Periodenlänge von 23,75 Stunden identifiziert (siehe Abbildung 6). Die Radonaktivitätskonzentration schwankte an den einzelnen Tagen um 2000 bis 3000 Bq/m³. In diesen 5 Tagen wird ein Höchstwert von 8486 Bq/m³ und ein Minimalwert von 4118 Bq/m³ registriert. Der Mittelwert über diesen Zeitraum liegt bei 6412 Bq/m³. Während des ersten Halbjahres ist dies das einzige Ereignis, bei dem über mehrere Tage anhaltende Tagesgänge beobachtet wurden.

Insgesamt wurden 25 Kalenderwochen ausgewertet. Nachfolgend wird in Tabelle 9 dargestellt, in wie

vielen Wochen die jeweiligen meteorologischen Effekte in geringem, mittelmäßigem oder starkem Zusammenhang mit der Radonkonzentration stehen. Die Bewertung erfolgt wieder nach Cohen (1988): Ein Bestimmtheitsmaß von 0,01 wird als gering, 0,09 wird als mittel und 0,25 wird als hoch korrelierend gewertet.

Bei der Betrachtung fällt auf, dass Temperatur und Luftdruck oft stark korrelieren. Mit steigender Temperatur weisen die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass eine höhere Radonaktivitätskonzentration die Folge ist und bei steigendem Luftdruck eine niedrigere. Das stimmt mit den Forschungen von SMETANOVÁ (2009) und SINGH (1988) überein. In etwa

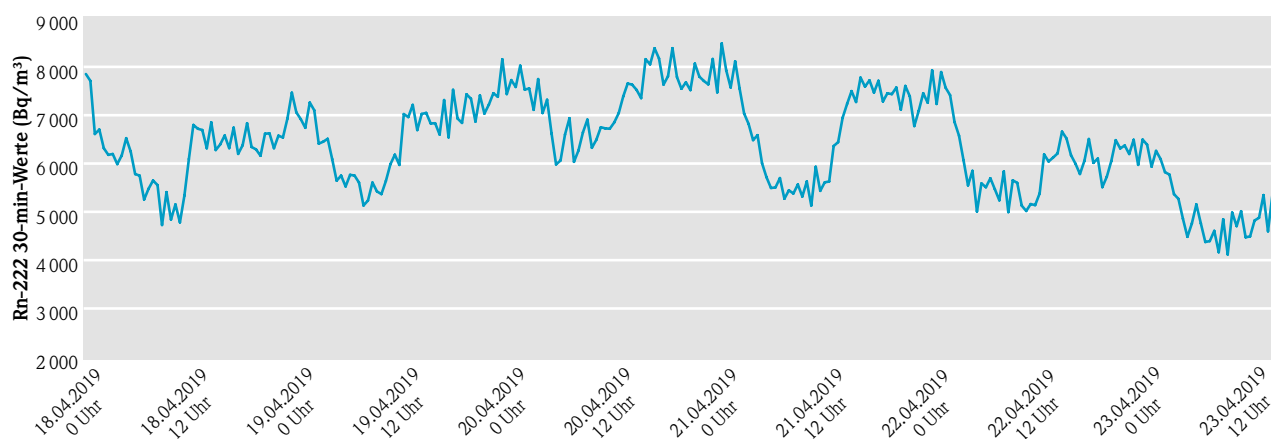


Abb. 6: Tagesgang der Radonaktivitätskonzentration

Tab. 9: Häufigkeit der dominanten Effekte in den betrachteten Wochen. Es ist erkennbar, dass Temperatur und Luftdruck bisher am meisten höhere R^2 Werte aufweisen.

Bestimmtheitsmaß R^2	Temperatur	Niederschlag	Luftdruck	Windgeschwindigkeit	rel. Luftfeuchte	Globalstrahlung
0,01	8	10	8	7	7	14
0,09	7	3	3	9	7	-
0,25	8	-	9	2	4	1

¼ der Fälle traten die Effekte umgekehrt auf. Die niedrige Radonkonzentration bei hohem Luftdruck lässt sich durch den lockeren, gut durchlüfteten Boden rund um die Radonstation erklären. Der hohe Luftdruck verhindert nicht nur ein Ausströmen der Bodenluft, er drückt auch atmosphärische Luft in den Boden. Die radonärmeren oberen Bodenluftschichten werden tiefer in den Boden gedrückt und somit weist die Radonaktivitätskonzentration einen niedrigeren Wert auf.

Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit sind häufiger mittelmäßig stark korrelierend. Dabei korrelieren sowohl Windgeschwindigkeit als auch relative Luftfeuchtigkeit in zwei Dritteln der Fälle positiv mit der Radonaktivitätskonzentration und zu einem Drittel negativ. Die Globalstrahlung und der Niederschlag zeigen bisher kaum Korrelationen. Jedoch kann der Niederschlag bis auf zwei Ausnahmen mit einer hohen Radonaktivitätskonzentration in Verbindung gebracht werden, die Globalstrahlung korreliert in ¾ der Fälle mit einer niedrigeren Radonaktivität. Nach SINGH (1988) kann Regenwasser die Poren der Erdoberfläche füllen, so dass sich die Bodenluft unterhalb staut und eine höhere Radonaktivitätskonzentration gemessen wird.

Bei der wochenweisen Auswertung über den Pearson-Koeffizienten gibt es keine meteorologische Größe, die ausschließlich in positiver oder negativer Korrelation mit der Radonaktivitätskonzentration in Verbindung gebracht werden kann. Als Ursache werden die Vielzahl der Variablen und die Komplexität des Systems vermutet. Dies weist daraufhin, dass in zukünftigen Auswertungen mehrere Faktoren gleichzeitig berücksichtigt werden müssen, da diese sich überlagern und gegenseitig verstärken oder auslösen können.

Die bisherigen Daten der Dauermessstation zeigen, dass die Radonbodenluftkonzentration starken Schwankungen unterliegt und Kurzzeitmessungen von Radonaktivitätskonzentrationen fehlerbehaftet sein können. Die Ergebnisse der Kalenderwoche 9 in den Tabellen 5 und 6 sowie der Kalenderwoche 10 in den Tabellen 7 und 8 zeigen die Komplexität der meteorologischen Einflüsse auf die Radonaktivitätskonzentration. Dies kann zu einer falschen Einschätzung des Radonpotenzials im gemessenen Gebiet führen. Es sind teilweise sehr starke Unterschiede in den Korrelationen der meteorologischen Parameter mit der Radonaktivitätskonzentration von Woche zu Woche zu beobachten. Die bisherigen Daten weisen

darauf hin, dass ein Zusammenspiel von mehreren meteorologischen Faktoren Einfluss auf die Radonaktivitätskonzentration besitzen und kein einzelner meteorologischer Parameter bestimmend ist. Um eine umfassendere Aussage zu erstellen, werden weitere Daten, auch an Messorten mit höheren Radon-

bodenluftkonzentrationen, und Auswertungen bei vergleichbaren Wetterlagen benötigt, wodurch einzelne Ausreißer statistisch gemittelt werden können und eine saisonale oder meteorologische Systematik im Idealfall identifiziert werden kann.

Literaturverzeichnis

- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2017): Die Radonkarte Deutschlands. [<http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/boden/radon-karte.html>]; Stand: 02.10.2017]
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2019a): Wie hoch ist die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland? [http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlenbelastung/natuerliche-strahlenbelastung_node.html]; Stand: 31.10.2019]
- BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2019b): Radon in der Boden-Luft in Deutschland. [<https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/karten/boden.html>]; Stand: 01.11.2019]
- COHEN, J. (1988): Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 2. Auflage, 79–80 S. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale.
- DKE – Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, DIN-Normenausschuss Radiologie (NAR) (2016): DIN ISO 11665-11, Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 – Teil 11: Verfahren zur Probenahme und Prüfung von Bodenluft (ISO 11665-11:2016). Berlin.
- KEMSKI, J., SIEHL, A., STEGEMANN, R. & VALDIVIA-MANCHEGO, M. (2001): Mapping the Geogenic Radon Potential in Germany. Science of The Total Environment, Volume 272. Elsevier Science B.V.
- KEMSKI, J. & KLINGEL, R. (2004): Die Radonkarte Deutschlands – Kurzinformation zu Radon in der Boden- und Raumluft. Bonn.
- KEMSKI, J., KLINGEL, R., SIEHL, A., NEZNAL, M. & MATOLIN, M. (2012): Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration; Bd. 2 Sachstandsbericht „Radonmessungen in der Bodenluft – Einflussfaktoren, Messverfahren, Bewertung“. Bundesamt für Strahlenschutz Forschungsvorhaben 3609S10003. Salzgitter.
- SINGH, M., RAMOLA, R.C., SINGH, S. & VIRK, R.H. (1988): The influence of Meteorological Parameters on Soil Gas Radon. Jour. Assoc. Expl. Geophys. Vol. IX, No. 2, pp. 85–90.
- SMETANOVÁ, I., HOLÝ, K., MÜLLEROVÁ, M. & POLÁSKOVÁ, A. (2009): The effect of meteorological parameters on radon concentration in borehole air and water. Akadémiai Kiadó. Budapest.
- Strahlenschutzgesetz StrlSchG: Gesetz zur Neuordnung des Rechts zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (27.06.2017): Artikel 1 Teil 4 Kapitel 2 Abschnitt 1 §§ 121–123. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2017 Teil I Nr. 42. Bonn 03.07.2017.
- ZEEB, H. & SHANNOUN, F., World Health Organization (2009): WHO Handbook on Indoor Radon – A Public Health Perspective. WHO Press.