

Einfluss des Untergrundes auf die Radonkonzentration in Gebäuden - dargestellt anhand einiger Beispiele.

Christian Böhm, Chur; 10. Oktober 2003 (www) - Individuelle praktische Arbeit im Rahmen der Anerkennung als "Sachverständiger Radon", z.Hd. Bundesamt für Gesundheit, Bern/CH.

Einleitung

Radon wird in erster Linie im Untergrund produziert [11]. Der Untergrund, die Geologie, ist der Ursprung für Radonprobleme, welche in bewohnten Räumen auftreten können. Die Höhe der Radonwerte im Gebäude wird massgeblich durch die Bauweise beeinflusst; dieser Themenkomplex wird in der vorliegenden Arbeit ausgeklammert, ist aber in verschiedenen Untersuchungen behandelt worden [1-4, 7].

Die Rechtslage betreffend Radon wird in der schweizerischen Strahlenschutzverordnung [21] geregelt. Massgebend sind die Jahresmittelwerte der Radonkonzentration, welche im Wohn- oder Arbeitsbereich gemessen werden. Ein Grenzwert von 1000 Bq/m³ im Wohnbereich respektive 3000 Bq/m³ am Arbeitsplatz darf nicht überschritten werden; ansonsten sind Sanierungsmassnahmen nötig. Ausserdem besteht ein Richtwert von 400 Bq/m³: im Wohnbereich ist anzustreben, dass die Radonkonzentration unter diesem Wert liegt. In Radongebieten ist durch vorbeugende Massnahmen (= radonsicheres Bauen) darauf zu achten, dass in Neubauten der Richtwert nicht übertroffen wird.

Im Folgenden soll aufgezeigt werden, welche geologischen Faktoren zu Radonproblemen in bestehenden Gebäuden sowie bei Neubauten führen können. Dies stellt eine Synthese verschiedener Arbeiten dar, welche eine ähnliche Zielsetzung hatten, nämlich den Zusammenhang zwischen Geologie und Radon in verschiedenen Regionen der Schweiz zu erhellen [1-6]. Die lokale Geologie muss in der Regel bei Radonsanierungen oder Neubauten berücksichtigt werden. Geologische Kenntnisse helfen bei der Suche nach "Radongebäuden" - das heisst Gebäuden, in welchen die Radonricht- oder -grenzwerte überschritten werden.

Wenn von Radon gesprochen wird, so wird, wenn nichts anderes erwähnt ist, das langlebigste Isotop Radon-222 (²²²Rn) gemeint. Die Grundlagen der Radonproblematik werden in verschiedenen Publikationen behandelt [11-14, 19]. Im Auftrag des

Bundesamtes für Gesundheit (BAG) durfte ich in den zurückliegenden Jahren verschiedentlich Arbeiten ausführen, in welchen Radonproblemen im geologischen Kontext nachgegangen wurde [1-9]. Allen beteiligten Mitarbeitern des BAG möchte ich dafür herzlich danken. Die vorliegende Arbeit stellt eine Synthese betreffend Geologie und Radon dar, in welcher aber nicht alle Aspekte des komplexen Themas dargestellt werden.

Geologie

Verschiedene geologische Faktoren beeinflussen die Höhe der Radonaktivität in der Bodenluft, welche dann zu Radonproblemen in Gebäuden führen kann. Grundsätzlich sind zwei Punkte von Belang:

- die Radiumkonzentration im Untergrund (Radium als Mutternuklid von Radon),
- die Durchlässigkeit des Untergrunds im Gebäudeumfeld.

Wenn von der **Radiumkonzentration** gesprochen wird, so spielen verschiedene Faktoren eine Rolle:

- Uran-Konzentration des Ausgangsgesteins
- An-/Abreicherungs Vorgänge während des radioaktiven Zerfalles
- Radium-Konzentration des Untergrundes
- Radiumemanation (das heisst Freisetzungsrates von Radon)

Radon-222 ist ein Nuklid der Uran-238-Zerfallsreihe (Anhang 1). Grundsätzlich sind hohe Radonkonzentrationen dann zu erwarten, wenn das Ausgangsgestein (Fels, Lockergestein, Boden) viel Uran enthält. Da beim radioaktiven Zerfall von Uran im Boden chemische An- und Abreicherungs Vorgänge stattfinden können, ist es schlussendlich wichtig, wie viel Radium, als Mutternuklid des Radons, vorhanden ist. Die Radium-Konzentration von Gesteinen variiert in der Regel zwischen 10 und 200 Bq/kg (im Mittel um 40 Bq/kg [1, 3, 4, 11, 16, 18]). Erhöhte Uran-, Radium- und Radongehalte sind, wie die verschiedenen Untersuchungen zeigen [u.a. 10, 15], an Kristallgebiete gebunden. Dort sind erhöhte Uran-Radium-Gehalte in erster Linie in den Alpen und Südalpen, in Gebieten mit granitischen Gesteinen (Orthogneisen) und andererseits in Verrucano-Gebieten anzutreffen (Figur 1, Tabelle 1). Für die genannten Gebiete besteht eine auffällige Korrelation mit erhöhten Radonaktivitäten in Wohngebäuden.

Figur 1: Tektonische Karte der Schweiz

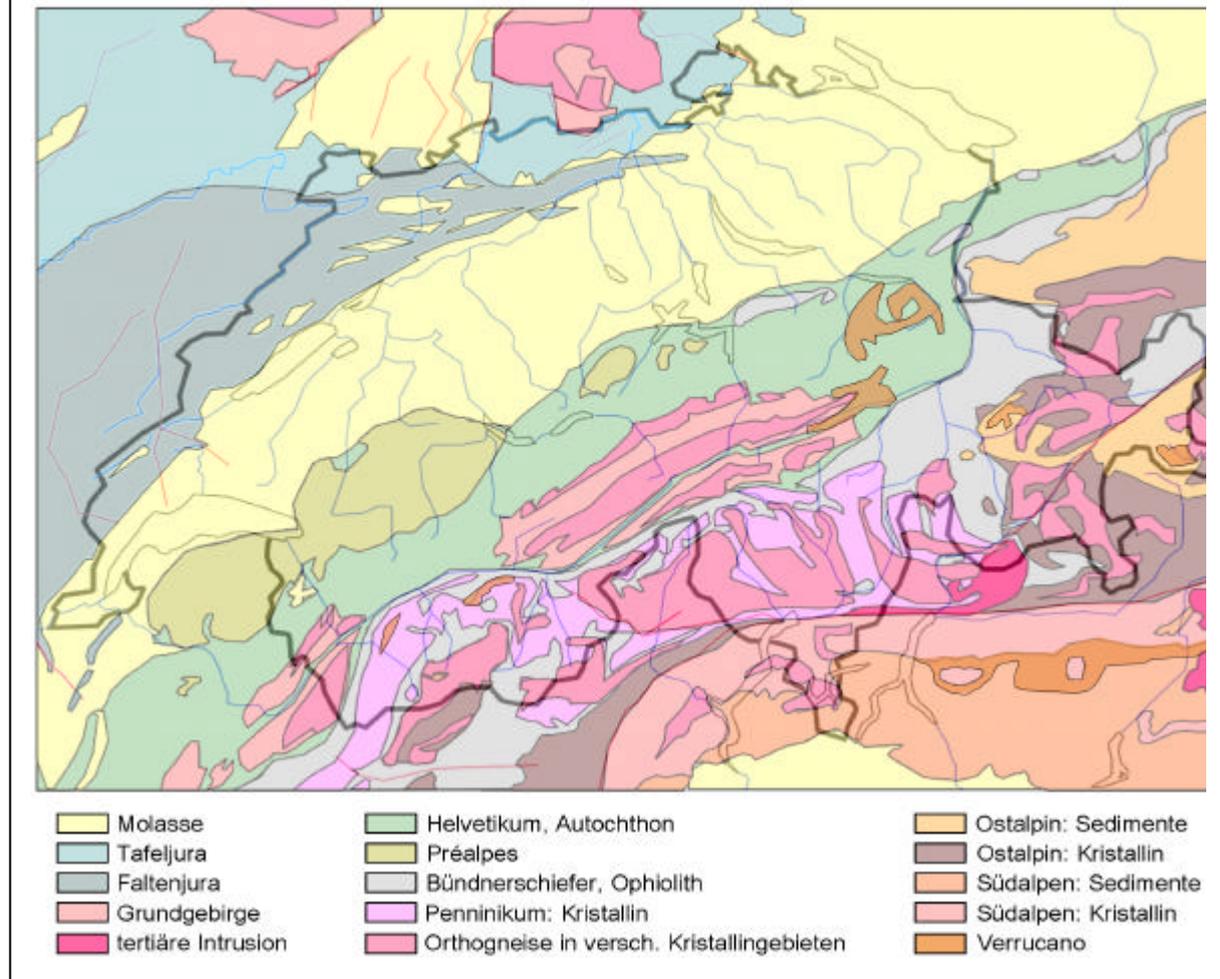


Tabelle 1: Uran-Radium-reiche Gesteine in der Schweiz

Tektonische Einheit	uranreicher Gesteinstyp	Gegend
Aiguilles-Rouges-, Arpillen-, Mont-Blanc-Massiv	granitische Gesteine	Unterwallis (Gegend Martigny)
Bernhard-Decke	granitische Gesteine	Mattertal (Teile)
Dent-Blanche-Decke	granitische Gesteine	Wallis; praktisch unbewohnt
Aar- und Gotthardmassiv	granitische Gesteine	Goms/VS, Berner Oberland, Uri, Surselva/GR
Lepontin	granitische Gesteine	Leventina, Vallemaggia, Locarnese
Südalpen	granitische Gesteine	Ceneri, Malcantone
südalpine Vulkanite	Vulkanite, Ganggesteine	Mendrisiotto (z.T.), Morcote
helvetischer Verrucano	Verrucano	Flums/SG - Engi/GL, um Ilanz/GR
Adula-, Suretta-Decke	granitische Gesteine	Misox/Calanca, Hinterrhein/Schams
Err-Bernina-Decke	granitische Gesteine	Oberengadin, Puschlav
Silvretta-Decke	granitische Gesteine	Davos, Unterengadin
Bergeller Granit	tertiäre Intrusiva	Bergell/GR
ostalpiner Verrucano	Verrucano	Münstertal/GR

In der tektonischen Karte der Schweiz (Figur 1) sind die Uran-Radium-reichen Gesteinstypen, welche als radonverdächtig zu gelten haben, in Rot- und Brauntönen gehalten. In der Geologie werden als kristalline Gesteine stärker metamorphe Sedimentgesteine und ursprünglich magmatische Gesteine wie Granite und Vulkanite zusammengefasst. Letztere - so genannte Orthogesteine/Orthogneise - werden in der Figur 1 in einem Pinkton speziell hervorgehoben. Zusammen mit tertiären Intrusionen und Verrucanogebieten sind sie besonders radonverdächtig. Die Übereinstimmung mit den Radongebieten gemäss Radonkarte [12 (Jg. 2002)] ist frappant.

Die Betrachtung des Festgesteinsuntergrundes stellt naturgemäss eine Vereinfachung dar. Die granitischen Gesteine wurden erodiert und als Geröll oder Geschiebe durch Flüsse und Gletscher ins Mittelland verfrachtet. Innerhalb der dortigen Sediment- oder Lockergesteine können lokal ähnlich hohe Radiumkonzentrationen erwartet werden. In der Regel sind die Radiumgehalte wegen der Vermischung mit verschiedenen Gesteinskomponenten niedriger als in den Alpen. Andererseits treten Radonprobleme auch in Gebieten ohne Kristallinuntergrund auf (Karstgebiete, Mittelland); dies ist, wie unten zu zeigen sein wird, auf die Durchlässigkeit des Untergrundes zurückzuführen.

Die **Radiumkonzentration** des Untergrundes kann um einen Faktor 20 variieren (siehe oben und Tabelle). Diese Spannweite entspricht ungefähr derjenigen, welche für Radon in der Bodenluft gemessen wird: 10 und 200 kBq/m³ (bisher von uns in der Schweiz gemessener Maximalwert: 1200 kBq/m³).

Tabelle 2: Wertebereiche Ra, Rn, Permeabilität

Radium	10 - 200 Bq/kg
Radon in Bodenluft	10 - 200 kBq/m ³
Permeabilität des Untergrundes	10 ⁻¹¹ - 10 ⁻⁷ m ²

Bei der **Durchlässigkeit des Untergrundes** ist mit bedeutend grösseren Schwankungen, nämlich von mehreren Zehner Potenzen, zu rechnen. Faktoren, welche die **Durchlässigkeit des Untergrundes** bestimmen, sind:

- Verwitterungsgrad der Gesteinspartikel
- Porenraum in Lockergesteinen und Fels
- Klüftung, Karsthohlräume im Fels
- Wassergehalt des Bodens
- Vorhandensein und Permeabilität der Deckschicht

Bei der Radium-Emanation (also der Radon-Freisetzung) kommt es auf die Porosität des Ausgangsmaterials drauf an; je stärker verwittert und deshalb porös ein Mineral- oder Gesteinskorn ist, desto mehr zerfallendes Radon kann freigesetzt werden. Die Luftdurchlässigkeit eines Bodens bestimmt, wie weit das produzierte Radon transportiert werden kann. In schlecht durchlässigen Böden bleibt die Bodenluft praktisch stationär; auch bei hoher Radonaktivität (zum Beispiel $200'000 \text{ Bq/m}^3$) kann nur eine beschränkte Luftmenge transportiert und in Gebäude gesogen werden, so dass tendenziell keine Radonprobleme zu erwarten sind. Im gegenteiligen Fall kann bei guter Luftdurchlässigkeit, durch einen geringen Unterdruck im Gebäude, eine grössere Luftmenge zuströmen, welche auch bei für Bodenluft niedriger Radonaktivität (zum Beispiel von $10'000 \text{ Bq/m}^3$) zu Radonproblemen führen kann.

Neben der eigentlichen Durchlässigkeit des Untergrundes spielt bei der Beurteilung von Radonsituationen immer auch das Vorhandensein oder die Abwesenheit einer Deckschicht eine Rolle. Eine feinkörnige Deckschicht ist oftmals feuchter als der tiefere Untergrund, die Poren sind teilweise mit Porenwasser gefüllt, so dass der Luftaustausch zwischen Atmosphäre und Untergrund durch die Deckschicht behindert wird.

Eine besonders gute Durchlässigkeit des Untergrundes ist in Karstgebieten, in Verbindung mit Karstspalten, Höhlen und Dolinen anzutreffen. Dies erklärt auch, warum im Jurabogen (siehe Figur 1) erhöhte Radonaktivitäten in Gebäuden beobachtet werden. Gebäude mit Verbindung zu einem offenen Karstsystem kann radonhaltige Luft in praktisch unbeschränkter Menge zuströmen; die Höhe der Radonaktivität der Bodenluft ist hierbei nicht massgebend.

Einen weiteren Untergrundfaktor stellt die Geländemorphologie dar. So können am Hangfuss, am Hang selbst oder auf einer Geländeerhebung andere Radonwerte resultieren, wobei im Sommer hohe Werte am Hangfuss und niedrige Werte oben am Hang und umgekehrt im Winter beobachtet werden [24].

Methodik

In den letzten Jahren wurden in verschiedenen Gegenden der Schweiz Gebäude, in welchen Radonmessungen ausgeführt worden waren, besucht, die Bauweise analysiert, die lokale Geologie erfasst sowie Bodengasmessungen im Hausumfeld ausgeführt. Bei den Bodengasmessungen wurde immer angestrebt, die Radonkonzentration der Bodenluft und die Permeabilität des Bodens zu bestimmen. Es wurden jeweils Bohrungen auf Fundamenttiefe abgeteuft [17]. Die Methodik wandelte sich über die Jahre. Heute werden mit einem Spiralbohrhammer Bohrlöcher von 3 cm Durchmesser und 1.9 m Tiefe erstellt. Ein Teil des Bohrgutes wird durch den Spiralbohrer gefördert und dient der geologischen Interpretation. Ins Bohrloch wird ein Aluminiumrohr mit aufgesetztem Fahrradschlauch versetzt. Der als Packer dienende Schlauch kann aufgeblasen werden und dichtet das Bohrloch ab. Aus dem Bohrloch wird mit einem Staubsauger Bodenluft abgesaugt, welche auf Radon hin untersucht wird. In der gleichen Art wie das erste Bohrloch werden im Abstand von einigen Dezimetern bis Metern weitere Bohrlöcher erstellt, abgedichtet und in ihnen der Unterdruck in Abhängigkeit der Distanz gemessen. Aus dem Druckabfall in Abhängigkeit der Distanz kann analog zu hydrogeologischen Methoden die Durchlässigkeit des Bodens und auch der Deckschicht bestimmt werden [8, 9]. Die absoluten Werte der Permeabilität konnten bisher noch nicht geeicht werden, sie sind aber untereinander konsistent.

Als sehr nützliches Werkzeug zur Beurteilung der Bodengasmessungen wurde der Radonverfügbarkeitsindex verwendet [1-9, 11, 17, 22]. Dieser stellt das Produkt von Radonaktivität der Bodenluft und Permeabilität respektive Wurzel der Permeabilität dar. Eine hohe Radonverfügbarkeit belegt, dass ein Standort potenziell radongefährdet ist.

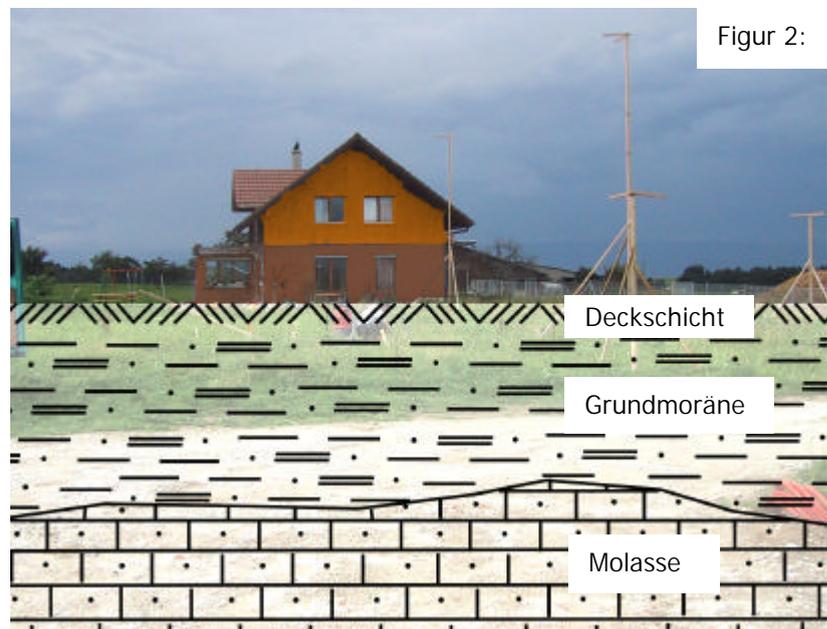
Beispiele für Untergrund und Radon in Gebäuden

In aller Regel ist der Untergrund im unmittelbaren Umfeld eines Gebäudes massgebend für die Höhe der im Gebäudeinnern möglichen Radonkonzentration. Geologische Situationen, welche potenziell niedrige oder hohe Radonkonzentrationen im Gebäudeinnern erwarten lassen, werden sich im Anhang 2 gegenübergestellt. Dort sowie in den folgenden Beispielen werden mit Strichsignaturen feinkörnige, tonig-siltige Lockergesteine, mit Punkt- und Kreissignaturen besser durchlässige Sande respektive Kies dargestellt.

Zum besseren Verständnis werden im Folgenden einzelne Objekte vorgestellt, für welche Kenntnisse des Untergrundes, Radondaten der Bodenluft wie auch der Wohnungsluft vorliegen (die Fotos wurden technisch bearbeitet). Der in den geologischen Profilen dargestellte Gebäudeuntergrund basiert so weit möglich auf den Bohruntersuchungen, ist sonst aber schematisiert worden. Die Tiefe der Felsoberfläche ist, wo eingezeichnet, nicht massstäblich zu verstehen.

Beispiel 1: Grundmoräne / Baugrunduntersuchung

Im Freiburger Mittelland, in Villarimboud, galt es eine Bauparzelle auf radongefährdenden Untergrund hin zu untersuchen (Figur 2). Das teilweise bereits überbaute Land befindet sich auf einem Molasserücken, der durch die eiszeitlichen Gletscher überformt worden ist und auf welchen eine Grundmoräne abgelagert



Figur 2:

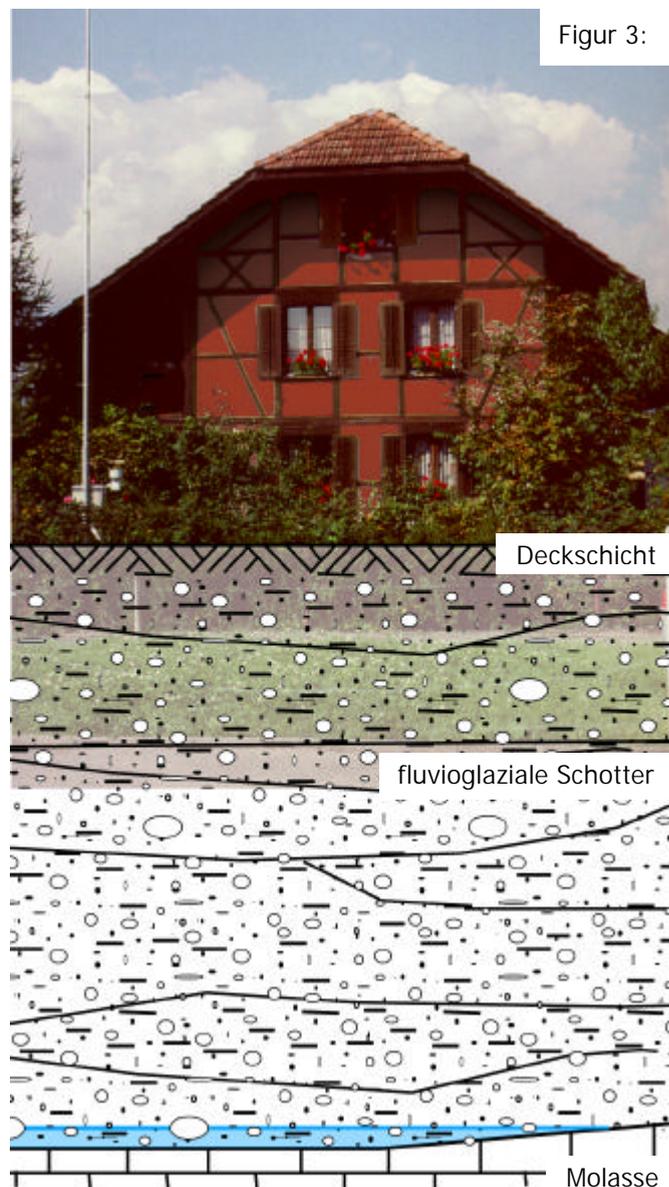
worden ist. In unseren Untersuchungen [9] wurde der Molassefels nicht erreicht; die Tiefe der Felsoberfläche ist nicht genau bekannt. Aufgrund der erbohrten, dicht gelagerten, lehmigen Grundmoräne war klar, dass an diesem Standort nicht mit Radonproblemen zu rechnen ist. Die Bodengasmessung ergab eine relativ schlechte

Permeabilität von $6 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ sowie Radonwerte von 15 kBq/m^3 . Radonmesswerte aus bewohnten Häusern lagen nicht vor.

Die Voruntersuchung, welche im Hinblick auf einen zu erstellenden Neubau ausgeführt wurde, ergab, dass am vorgesehenen Standort nicht mit Radonproblemen zu rechnen ist, dass sich bei "normaler" Bauweise spezielle Präventionsmassnahmen gegen Radon erübrigen. Die Einschränkung betreffend Bauweise wird vorgenommen, weil mit einzelnen Baumassnahmen ein äusserst starker Kamineffekt im Haus erzeugt werden könnte, welcher trotz schlechter Permeabilität und eher niedrigen Radonwerten zu erhöhten Radonwerten führen könnte. Um dem vorzubeugen müssen die Pläne des Bauobjektes kurz eingesehen werden.

Beispiel 2: Fluvioglaziale Schotter

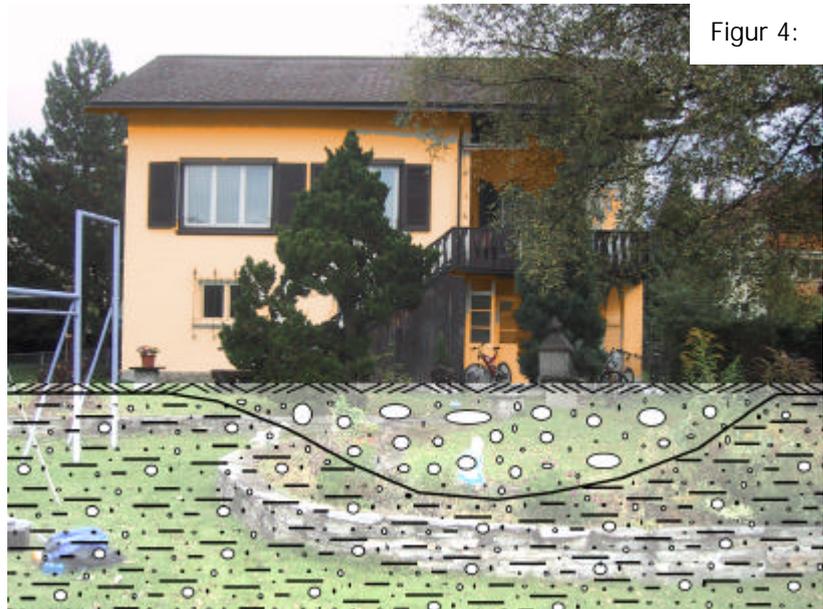
In Herzogenbuchsee (Kanton Bern) wurden Radonnachuntersuchungen in verschiedenen Ortsteilen ausgeführt [5]. Der Ort liegt im Stirnbereich des letzteiszeitlichen Aare-/Rhône-Gletschers. Der Felsuntergrund besteht aus Molasse. Während der Fels in einem grossen Teil von Herzogenbuchsee durch feinkörnige Moränenablagerungen bedeckt wird, wird er im Reckenberg-Quartier von bis zu 20 m mächtigen fluvioglazialen Schottern bedeckt (Figur 3). Bei diesen handelt es sich um eine Mischung aus Gletschergeschiebe und Bach-/Flussschottern, welche am Rand und im Vorfeld des Gletschers abgelagert und umgelagert worden sind. Die Schotter sind lagig aufgebaut und meist gut durchlässig. Grundwasser ist in geringer Mächtigkeit auf der Felsoberfläche vorhanden.



Während in den Gebieten von Herzogenbuchsee, in welchen feinkörnige Moräne als Untergrund auftritt, niedrige Radonwerte im Wohnbereich resultieren, wurden im Reckenberg-Quartier Winter-Radonwerte von bis zu 1200 Bq/m^3 im Wohnbereich und 1850 Bq/m^3 im Keller gemessen (die Sommerwerte lagen deutlich tiefer). In der Bodenluft wurden 22 kBq/m^3 Radon gemessen, bei einer äusserst guten Permeabilität von $2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$. Dies ergibt eine vorzügliche Radonverfügbarkeit. Zusätzlich ist die Deckschicht feinkörnig ($k=2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$) und unterbindet den Luftaustausch zwischen Atmosphäre und Untergrund. In Gebäuden, deren Untergeschoss die Deckschicht durchdringt, wird der ungehinderte Zustrom von radonreicher Bodenluft in den Keller und von dort in den Wohnbereich ermöglicht.

Beispiel 3: Flussschotter

In Felsberg, im Churer Rheintal (Kanton Graubünden) wird der Untergrund von Rheinschottern aufgebaut. Bei diesen handelt es sich um siltige Sande bis Kiessande. In einzelnen Rinnen sind gröbere Schotter mit vielen Steinen und vereinzelt Blöcken anzutref-



Figur 4:

fen (Figur 4). In früheren Zeiten floss der Rhein durch ein verzweigtes Flussnetz; einzelne Rinnen wurden durch ein Hochwasserereignis mit Schutt verfüllt. Daneben wurden feinkörnigere Überflutungssedimente abgelagert.

Während in den meisten Gebäuden in Felsberg niedrige Radonwerte beobachtet worden waren, wurden in einem Gebäude Radonwerte von 660 Bq/m^3 im Wohnbereich und 2000 Bq/m^3 im Keller gemessen [9]. Die Bodengasuntersuchung ergab, dass letzteres Objekt im Bereich einer mit Schottern verfüllten, ehemaligen Flussrinne liegt. Es wurden niedrige Radonwerte von 5 kBq/m^3 in der Bodenluft sowie eine Permeabilität $k = 2 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ bestimmt. Diese recht gute Permeabilität, gepaart mit einer deutlich schlechteren Durchlässigkeit der Deckschicht, kann auch bei niedrigen

Radonwerten der Bodenluft zu erhöhten Radonwerten im Gebäude führen. Die Tiefe der Radonwerte könnte durch einen "Luftkurzschluss" verursacht sein, das heisst, irgendwo ist die Deckschicht undicht und es strömt relativ viel Umgebungsluft zu.

Die genaue Ausdehnung der Schotterrinne im Bereich des Untersuchungsobjektes wurde nicht festgelegt. Das Beispiel zeigt, wie wichtig die Permeabilität des Untergrundes ist. Bei niedrigen Radonaktivitäten im Untergrund aber gut durchlässigem Untergrund können erhöhte Radonaktivitäten im Gebäude auftreten, und zwar auch dann, wenn nur ein Hausteil im Bereich der gut durchlässigen Rinne liegt. Dann können grössere Bodenluftmengen das undichte Betonfundament durchdringen.

Beispiel 4: Murgangschuttkegel / Voruntersuchung für Radonsanierung

Eine typische Situation für den Alpenraum stellen Murgangschuttkegel dar. In Ausserferrera (Kanton Graubünden; Figur 5) wurden zum Teil hohe Radonwerte gemessen. Über die Jahrhunderte wurde hier aus einem relativ kleinen Seitental mit vielen Murgangschüben Erosionsmaterial talwärts gebracht und im Schutt-



kegel abgelagert. Der Kegel weist heute ein Gefälle von 10 - 15° auf. Zum Gesteinsbestand des Einzugsgebietes gehören triadische Sedimente, vor allem Dolomit, sowie Rofnaporphyrigneis ("Andeerer Granit"). Letzterer weist mit 70 Bq Ra-226/kg nur leicht überdurchschnittliche Radiumgehalte auf; Bodenproben aus demselben Gebiet wiesen Ra-Werte von 80-90 Bq/kg auf [1]. Im Murgangschutt bestehen einzelne Lagen aus gröberen Komponenten, daneben und darüber folgen feinkörnige Überschwemmungsablagerungen. Die Modellvorstellung geht von ineinander verzahnten Linsen, Rinnen und Lagen aus.

Die Sondierungen und Bodengasuntersuchungen ergaben, dass der Untergrund aus einer Deckschicht von 1 m Mächtigkeit mit einer Permeabilität von $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ besteht. Darunter folgt eine teilweise sandige, meist aus Kiessand aufgebaute Lage mit einer mittleren Permeabilität $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$. Die Radonaktivität der Bodenluft ist mit 30 bis 45 kBq/m^3 vergleichsweise hoch. Zusammen mit der guten Permeabilität ergibt sich eine sehr gute Radonverfügbarkeit. Die gute Radonverfügbarkeit korreliert mit den gemessenen Grenzwertüberschreitungen für Radon in der Ortschaft (800 - 4000 Bq/m^3 im Wohnbereich). Für die hohen Radonwerte in Gebäuden mitverantwortlich ist die 1 m mächtige Deckschicht, welche einen Luftaustausch mit der Atmosphäre behindert. Da die Gebäude im vorderen Teil unterkellert sind, reichen sie dort und oftmals auch im hinteren Bereich in die gut durchlässige Schicht hinein, welche radonreiche Bodenluft ungehindert zuführt.

Die Boden- und Bodengasuntersuchung diente dazu die anstehende Sanierung vorzubereiten. Die Reichweite des mittels Bodenluftabsaugung erzeugten Unterdruckes konnte modelliert werden. Nun wird versucht, mit Hilfe von Radonbrunnen einen Unterdruck in der durchlässigen Lockergesteinslage zu erzeugen und so den Zutritt radonhaltiger Bodenluft ins Gebäude zu vermindern und die Radonwerte im Wohnbereich zu senken.

Beispiel 5: Bergsturzablagerung, Radonsanierung

Der Flimser Bergsturz gilt als der grösste Bergsturz der ganzen Alpen. Im Quartier Flims-Waldhaus werden verbreitet hohe Radonaktivitäten im Wohnbereich gemessen.

Sondierungen in einem Gebäude ergaben, dass im Keller Felsblöcke anstehen, während auf der andern Gebäudeseite Moränenablagerungen vorhanden sind (Figur 6). An einer Stelle sank der Bohrer in eine Spalte zwischen den Blöcken. Oberflächlich sind die Blöcke an dieser Stelle nicht sichtbar. In der Bodenluft aus den Blöcken

konnten Radonaktivitäten von 75 kBq/m^3 gemessen werden. Andererseits wies Bodenluft, welche unter der Fundationsplatte angesaugt wurde, praktisch Ausenluftwerte auf; wo diese radonarme Luft unter die Betonplatte gelangt, ist bisher nicht



bekannt. Die Sondierung und die Bodengasuntersuchung konnten wesentliche Hinweise im Hinblick auf die anstehende Radonsanierung des Gebäudes liefern.

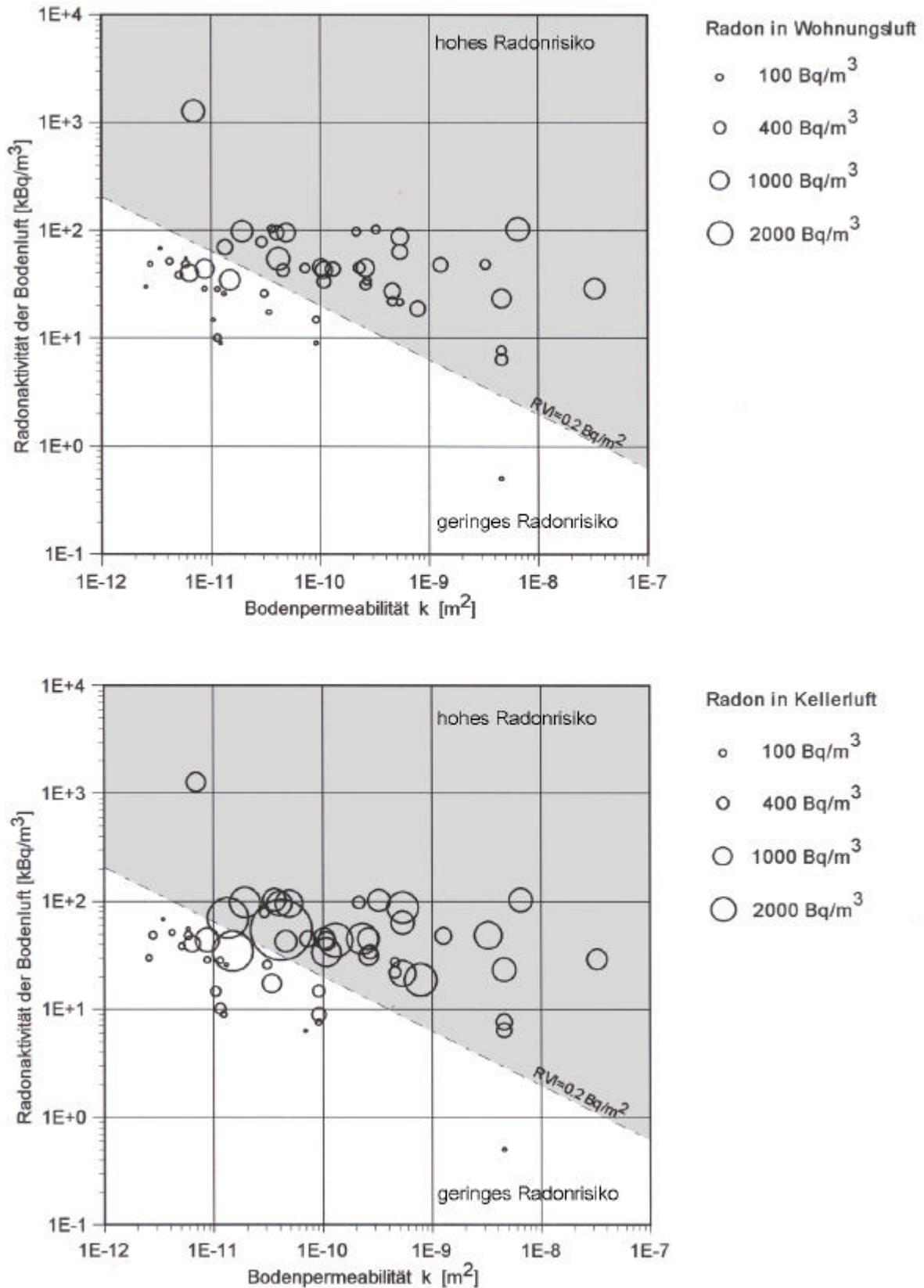
Bodengasuntersuchung und Radongefährdung

Mit den langjährigen und sowohl von der technischen Ausführung her als auch betreffend Auswertung immer weiter entwickelten Bodengasuntersuchungen können nun Prognosen über die Radongefährdung eines Untergrundes gemacht werden. Wie im Kapitel Methodik erläutert, werden jeweils die Radonkonzentration der Bodenluft sowie die Gasdurchlässigkeit des Bodens bestimmt. Als Radonverfügbarkeitsindex RVI wird das Produkt von Radonaktivität der Bodenluft und $\sqrt{\text{Permeabilität}}$ verstanden [22, 17].

$$\text{RVI} = \text{Rn} \times \sqrt{k}$$

In der Figur 7 sind die Resultate von Bodengasuntersuchungen aus der ganzen Schweiz aufgetragen. Für $\text{RVI} > 0.2 \text{ Bq/m}^2$ ist ein deutlicher Zusammenhang mit erhöhten Radonwerten in Wohnungsluft erkennbar, noch deutlicher ist dieser, da die Bauweise weniger stark ins Gewicht fällt, wenn die Radonwerte in der Kellerluft berücksichtigt werden.

Figur 7: Radonverfügbarkeit in Bodenluft $RVI = Rn \times \sqrt{k}$; Radon in Wohnungs- und Kellerluft



Als Quintessenz der verschiedenen im Auftrag des Bundesamtes für Gesundheit erstellten Berichte [1-9] lassen sich Schlüsse betreffend Radon in Bodenluft ziehen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Bodengasuntersuchung und radonsicherer-radonverdächtiger Untergrund

keine Radonprobleme zu erwarten (<400 Bq/m ³ im Wohnbereich)	Bodenpermeabilität <1×10 ⁻⁹ m ²
	Permeabilität Deckschicht = Bodenpermeabilität
	RVI < 0.2 Bq/m ²
Radonprobleme (>400 Bq/m ³ im Wohnbereich) vom Untergrund her zu erwarten	Bodenpermeabilität >1×10 ⁻⁹ m ² und Bodenpermeabilität > 5 × Permeabilität Deckschicht
	Radonaktivität Bodenluft > 200 kBq/m ³
	RVI > 0.5 Bq/m ²

Gemäss Tabelle 3 lassen sich aus Bodengasuntersuchungen Kriterien für radonverdächtigen oder radonsicheren Untergrund festlegen. Im Allgemeinen besteht zwischen den aufgeführten Ober- und Untergrenzen ein schmaler Unsicherheitsbereich für den keine eindeutige Zuordnung vorgenommen werden kann. Vorsicht ist dann geboten, wenn die Untersuchungen in Lockergesteinsmaterial ausgeführt wurden, welche zerklüfteten Fels, Karst oder Sturzblöcke bedecken; in diesen Fällen kann die bedeutend höhere Durchlässigkeit aus den Klüften für das Bauobjekt massgebend sein.

Mit den nun vorliegenden Kriterien lassen sich Prognosen machen, ob ein Baugrund radonverdächtig sei oder nicht, ob radonsicheres Bauen angezeigt sei oder nicht.

Zusammenfassung, Schlussfolgerung

Beim Betrachten der **Radonkarte** der Schweiz [12 (Jg. 2002)] fällt auf, dass sich die meisten Radonproblemgebiete in den Alpen und Südalpen mit Kristallingebieten, genauer mit **granitischem**, **vulkanischem** oder **Verrucano-Untergrund** decken. Neben dem **Radiumgehalt** des Ausgangsgesteins spielt im Einzelnen auch die Permeabilität des Untergrundes und die ganze Morphologie eine Rolle. Für die weiteren Radongebiete ist die Durchlässigkeit des Untergrundes entscheidend: zum Beispiel die **Verkarstung im Jura**, gute **Permeabilität in Schottern des Mittellandes**, häufig Schotter-

terrassen. Dass der Radiumgehalt des Ausgangsgesteins oder Bodens sowie der Radongehalt der Bodenluft, welche je um einen Faktor 20 variieren können, die Radonkonzentration in Gebäuden beeinflussen, ist evident. Schlussendlich wichtiger ist aber die Luftdurchlässigkeit des Untergrundes, welche um mehrere Zehner Potenzen variieren kann. So kommen auch bei niedriger Radonaktivität der Bodenluft, aber hoher Durchlässigkeit, gute Radonverfügbarkeiten und teilweise problematische Radonwerte in Wohnungsluft zustande.

Bodengasuntersuchungen und deren Auswertung erlauben es, Aussagen über die mutmassliche Radongefährdung eines Untergrundes zu machen. Hierbei dient das Hilfsmittel des so genannten **Radonverfügbarkeitsindexes** - Produkt von Radonaktivität der Bodenluft und Quadratwurzel der Permeabilität des Bodens - als Beurteilungskriterium. Die Kenntnis des Untergrundes erlaubt es, Prognosen über die maximal zu erwartende Radonbelastung in Gebäuden vorzunehmen. Wenn der Untergrund im unmittelbaren Gebäudeumfeld feinkörnig ist (tonig-siltig, $k < 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$) und der Radonverfügbarkeitsindex niedrig ist, so sind in der Regel keine Radonprobleme in Gebäuden zu erwarten. Umgekehrt sind in kiesigem Untergrund, bei hohen Permeabilitäten ($k > 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$), hohen Radonaktivitäten der Bodenluft ($> 200 \text{ kBq/m}^3$) oder hoher Radonverfügbarkeit ($\text{RVI} > 0.5 \text{ Bq/m}^2$) Radonprobleme im Wohnbereich möglich. Zu berücksichtigen ist immer auch das Vorhandensein oder die Abwesenheit einer **Deckschicht**. In den durchgeführten Untersuchungen wurden viele Hinweise auf günstige oder ungünstige **Bauweise** gemacht, diese beeinflusst die Höhe der Radonwerte massgeblich; dieser Themenkomplex gehört jedoch nicht in die vorliegende Arbeit.

Da Radonprobleme in Gebäuden immer in erster Linie auf den Untergrund zurückzuführen sind, sind geologische Überlegungen bei Radonsanierungen zwingend erforderlich. Oftmals ist es umgekehrt so, dass das Auffinden von erhöhten Radonwerten in Gebäuden zu einer spezifischeren Betrachtung des Untergrundes verleitet und so zu neuen geologischen Erkenntnissen führt.

Chur, 10. Oktober 2003

Christian Böhm
Beratender Geologe/Hydrogeologe

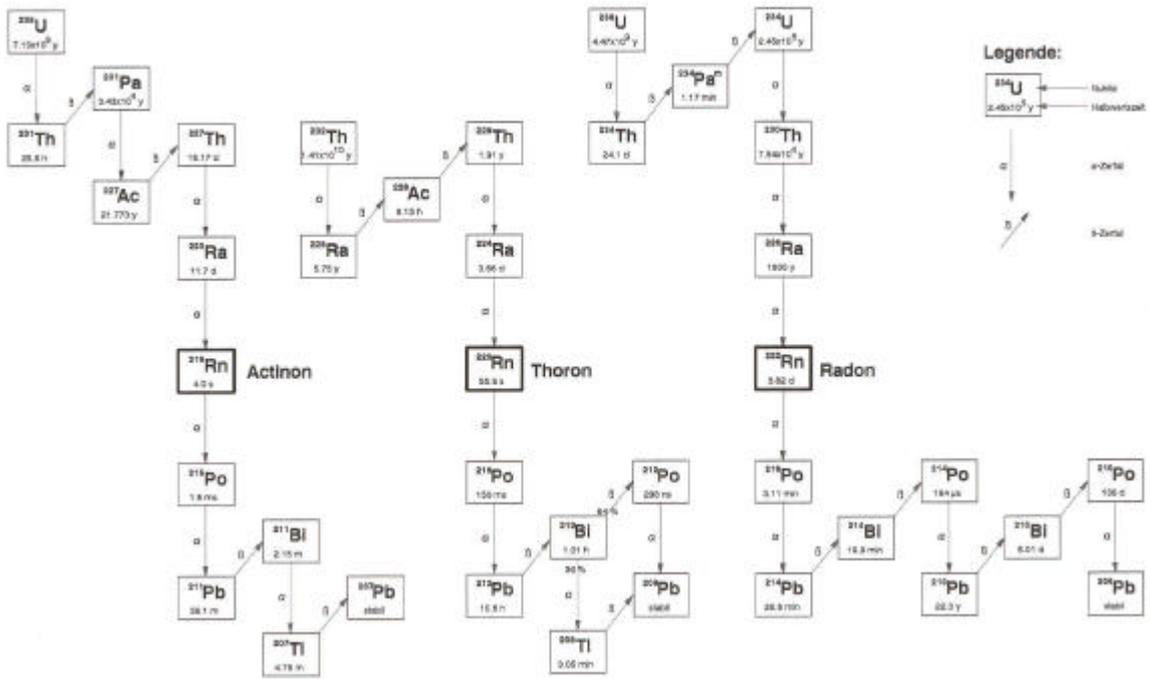
Literaturverzeichnis

- [1] Böhm, Ch. (1992): Radon-Nachuntersuchung in Graubünden. - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheitswesen.
- [2] Böhm, Ch. (1993): Radon-Nachuntersuchung im Kanton Wallis. - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheitswesen.
- [3] Böhm, Ch. (1995): Untersuchung über den Zusammenhang zwischen Geologie und Innenluft-Radonkonzentrationen in der Gemeinde Breil/Brigels (Kanton Graubünden). - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheitswesen.
- [4] Böhm, Ch. (1996): Untersuchung über den Zusammenhang zwischen Geologie, Bauweise und Innenluft-Radonkonzentrationen in der Gemeinde Cadro (TI) / Ricerca sulla relazione tra la geologia, il metodo di costruire e la concentrazione di radon nell'aria interna, Comune di Cadro (TI). - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheit.
- [5] Böhm, Ch. (1997): Radonnachuntersuchungen in Gadmen, Herzogenbuchsee (BE), im Wallis und im Münstertal (GR). - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheit.
- [6] Böhm, Ch. (1998): Radonnachuntersuchung 1998 in Graubünden. - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheit.
- [7] Böhm, Ch. (1999): Radonnachuntersuchung 1999 [Radonsanierungen]. - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheit.
- [8] Böhm, Ch. (2000): Radonnachuntersuchung 2000 [Miniradonbrunnen]. - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheit.
- [9] Böhm, Ch. (2001): Radonnachuntersuchung 2001 - Bodengasmessungen zur Dimensionierung von Radonbrunnen. - Unpubl. Gutachten z.Hd. Bundesamt für Gesundheit.
- [10] Böhm, Ch. (2002): Radon in Wasser - Überblick für den Kanton Graubünden. - Jber. Natf. Ges. Graubünden, 111, 49-79.
- [11] Bundesamt für Gesundheitswesen (heute: Bundesamt für Gesundheit; 1992): Radonprogramm Schweiz "RAPROS" - Bericht über die Ergebnisse der Jahre 1987 - 1991. - Bundesamt für Gesundheitswesen, Bern.
- [12] Bundesamt für Gesundheit (1993-2003): Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 1992 - 2002. - Bundesamt für Gesundheit, Bern/Fribourg.
- [13] Bundesamt für Gesundheit (1999): Radioaktivität und Strahlenschutz. - Bundesamt für Gesundheit, Bern; 311.322d.

- [14] Bundesamt für Gesundheit (1999): Radon. Informationen zu einem strahlenden Thema. - Bundesamt für Gesundheit, Bern.
- [15] Gilliéron, F. (1988): Zur Geologie der Uranmineralisation in den Schweizer Alpen. - Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Ser., 77.
- [16] Gundersen, L.C.S., Wanty, R.B. (eds. 1991): Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water. - U.S. Geol. Survey Bull., 1971.
- [17] Johner, H.-U., Surbeck, H. (1999): Soil gas measurements below foundation depth improve indoor radon prediction. - In: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 1998 (Hrsg.: BAG, Fribourg), B.2.12-B.2.14.
- [18] Nazaroff, W. W., Moed, B. A., Sextro, R. G. (1988): Soil as a Source of Indoor Radon: Generation, Migration, and Entry. - In: Nazaroff, W.W. and Nero, A.V. (eds.): Radon and its Decay Products in Indoor Air. - John Wiley & Sons, New York; 57-112.
- [19] Nazaroff, W. W., Nero, A. V. (eds.) (1988): Radon and its Decay Products in Indoor Air. - John Wiley & Sons, New York.
- [20] Neznal, M., Neznal, M. (2002): Measurement of radon exhalation rate from the ground surface: can the parameter be used for a determination of radon potential of soils? - In: Barnet, I., Neznal, M., Miksova, J. (Eds.): Radon investigations in the Czeck Republik IX / Geological Aspects of Radon Risk. Mapping. - Prague; 16-25.
- [21] Schweizerischer Bundesrat (1994): Strahlenschutzverordnung (StSV). - 22.6.1994; Stand 28.12.2001. - SR 814.501.
- [22] Surbeck, H. (1993): Ueberlegungen zum Radonrisiko eines Baugrundes. - Interner Bericht 1/93; Bundesamt für Gesundheitswesen/Sektion Ueberwachung der Radioaktivität/Gruppe Radon; unpubl.
- [23] Tanner, A. B. (1991): Methods of Characterization of Ground for Assessment of Indoor Radon Potential at a Site. - In: Field Studies of Radon in Rocks, Soils, and Water. - U.S. Geol. Surv. Bull., 1971, 1-18.
- [24] Wiegand, J. (2001): A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters. - Environ. Geol., 40/8, 949-963.

Anhang 1:

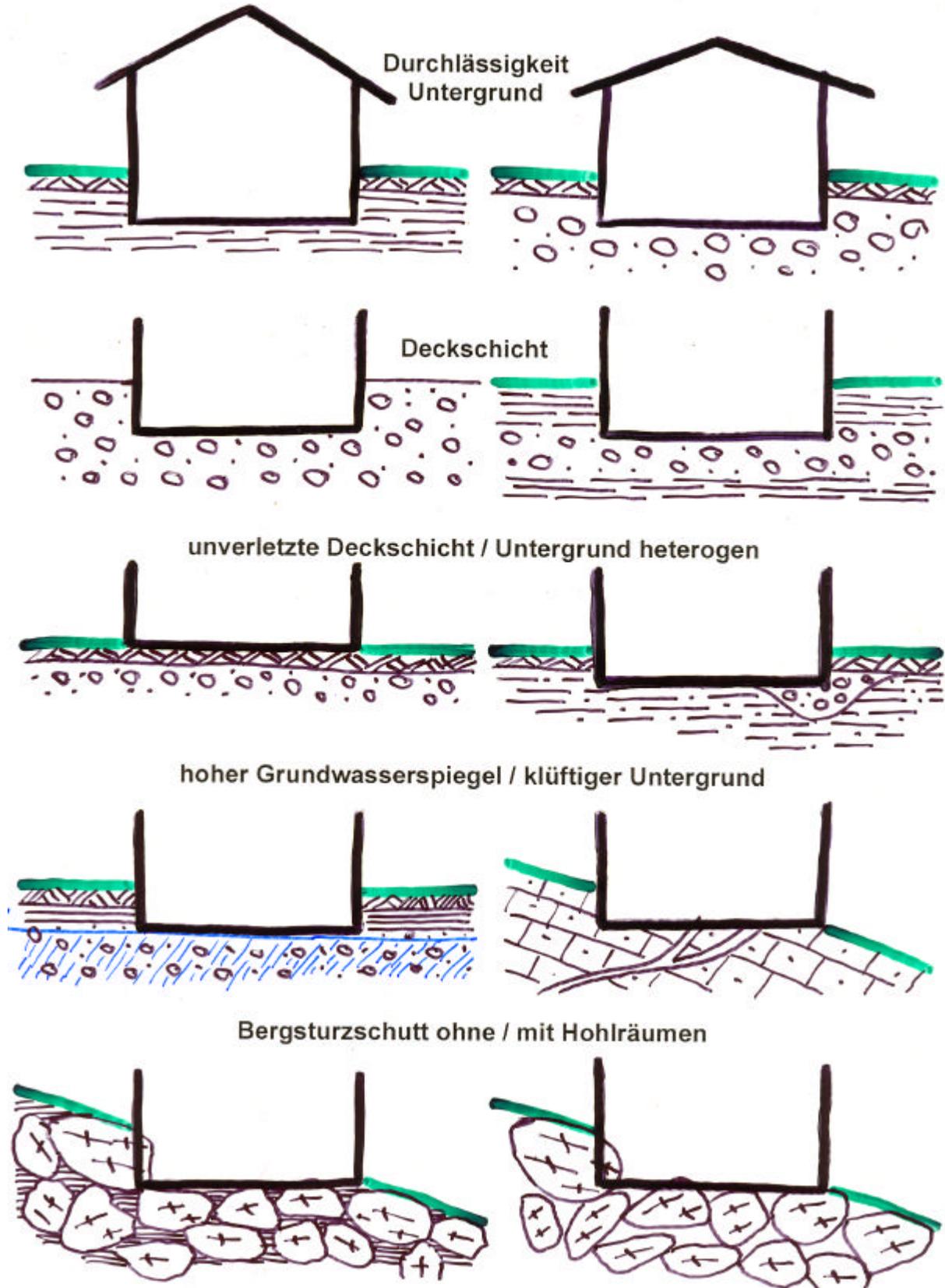
Uran-235-, Thorium-232- und Uran-238-Zerfallsreihe mit jeweiligen Radontöchtern



Anhang 2: Potenziell radonsicherer oder problematischer Untergrund

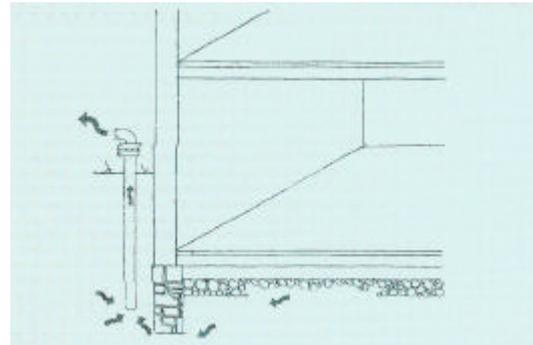
Radonsicher

Radonproblem



Anhang 3: Radonbrunnen als Sanierungsmassnahme

Ergänzend soll kurz eine Radonsanierungsmassnahme erläutert werden, welche massgeblich auf den im Text beschriebenen Bodengasuntersuchungen basiert - der so genannte Radonbrunnen (siehe auch BAG 2000: Radon: Technische Dokumentation [Radonhandbuch], S. VIII/6; daraus nebenstehende Figur).



Im Kapitel "Methodik" (S. 6) wurde beschrieben, wie ausgehend von einem Bohrloch, aus dem Luft abgesaugt wird, in Funktion der Distanz der Druckabfall im Boden gemessen wird. In den untersuchten Fällen war über mehrere Meter Distanz ein Unterdruck im Boden messbar. Der Druckabfall erfolgte exponentiell. Mit einem aus der Hydrogeologie entlehnten Modell (nach Hantush) werden die Bodengaswerte ausgewertet. Es werden die Permeabilität der Deckschicht und die Permeabilität des Untergrundes bestimmt. Dies zusammen mit Informationen über den Bodenaufbau, welche aus Baugrunduntersuchungen oder den durchgeführten Sondierungen gewonnen werden, erlauben es nun ein Bodenmodell aufzustellen. Mit einem Radonbrunnen wird angestrebt, neben einem zu sanierenden Gebäude einen Unterdruck im Boden zu erzeugen, welcher sich unter das Gebäude ausdehnt. Der Unterdruck soll den Zustrom radonhaltiger Bodenluft ins Gebäude unterbinden oder reduzieren. Zur Bodenluftabsaugung werden Ventilatoren eingesetzt.

Einige Faktoren sollten erfüllt sein, damit ein Radonbrunnen als Sanierungsmethode Erfolg versprechend angewandt werden kann:

- Vorhandensein einer Deckschicht: der im Boden erzeugte Unterdruck darf nicht in die Atmosphäre entweichen.
- Gut durchlässige Schicht auf Fundamenttiefe: Bodenluft kann unter dem Fundament durch dem Radonbrunnen zuströmen.
- Bei zu guter Permeabilität des Untergrundes erfolgt der Druckabfall auf wenigen Dezimetern Distanz. Der Brunnen müsste, damit er seine Wirkung entfalten kann, einen viel zu grossen Durchmesser aufweisen.
- In Leitungsgräben kann der erzeugte Unterdruck entweichen, ohne dass er sich in der erwünschten Art auswirkt.
- Falls nötig können mehrere Radonbrunnen um das Sanierungsobjekt herum platziert werden.
- Radonbrunnen können auch im Gebäudeinnern, z.B. in einem Naturbodenkeller oder unter der Fundationsplatte, erstellt werden.