

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der
Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur
Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration

- Vorhaben 3609S10003

Bd. 1 Abschlussbericht

Auftragnehmer:

Kemski & Partner, Beratende Geologen, Bonn

J. Kemski

R. Klingel

A. Siehl

M. Neznal

M. Matolin

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-63/12-Bd.1

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201203237824

Salzgitter, März 2012

BfS-Forschungsvorhaben 3609S10003

Erarbeitung fachlicher Grundlagen zur Beurteilung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messmethoden zur Bestimmung der Radonbodenluftkonzentration

Kemski, J.; Klingel, R.; Siehl, A.; Neznal, M.; Neznal, M.; Matolin, M.

Forschungsnehmer: Kemski & Partner
 Beratende Geologen
 Euskirchener Straße 54
 53121 Bonn
 Deutschland

unter Mitarbeit von: Radon v.o.s.
 Novakovych 6
 180 00 Praha 8
 Tschechien

Laufzeit: 1.1.2010 – 31.7.2011

Berichtsdatum: 22.9.2011

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zielstellung	1
2.	Konzept des Forschungsvorhabens	2
3.	Entwicklung eines passiven Verfahrens zur Bodenluftmessung	4
4.	Probenahme und Messverfahren	6
4.1	Allgemeines	6
4.2	Kurzzeitmessungen.....	8
4.3	Bestimmung der Gasdurchlässigkeit des Bodens.....	12
4.4	Integrierende Radonmessungen	15
4.5	Weitere Messungen	19
5.	Messflächen.....	20
5.1	Beschreibung der Messflächen	22
5.1.1	Messfläche 1: Burg Ledé.....	22
5.1.2	Messfläche 2: Messdorfer Feld	25
5.1.3	Messfläche 3: Lounovice.....	27
6.	Feldmessungen.....	30
6.1	Sichtung der Messergebnisse: Plausibilitätsprüfung.....	31
6.2	Kurzzeitmessungen mit Lucas-Zellen: Qualitätssicherung.....	32
7.	Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen	33
7.1	Burg Ledé	34
7.2	Messdorfer Feld	36
7.3	Lounovice.....	39
8.	Auswertung	41
8.1	Vorgehensweise.....	41
8.2	Zeitreihenanalysen	45
8.2.1	Periodogramme.....	45
8.2.2	Korrelationsberechnungen	46
9.	Ergebnisse der Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft sowie der meteorologischen und bodenphysikalischen Parameter.....	47
9.1	Pearson-Korrelationen	47
9.2	Zeitlicher Gang der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft.....	54
9.2.1	Burg Ledé	55
9.2.2	Messdorfer Feld	63

9.2.3	Lounovice.....	71
9.3	Meteorologische und bodenkundliche Parameter.....	81
10.	Auswertung.....	92
10.1	Saisonale Unterschiede.....	92
10.1.1	Burg Lede.....	93
10.1.2	Messdorfer Feld.....	97
10.1.3	Lounovice.....	101
10.1.4	Zusammenfassung saisonale Unterschiede.....	105
10.2	Räumliche Variation.....	106
10.3	Vergleich Kurzzeitmessungen - integrierende Radonmessungen.....	108
10.3.1	Burg Lede.....	109
10.3.2	Messdorfer Feld.....	112
10.3.3	Lounovice.....	115
10.3.4	Zusammenfassung Methodenvergleich.....	118
11.	Diskussion.....	120
11.1	Ausgangsbasis.....	120
11.2	Saisonale Variation.....	122
11.3	Methodenvergleich.....	125
12.	Zusammenfassung.....	127
13.	Empfehlungen.....	131
14.	Literatur.....	132

1. Zielstellung

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit mehreren Fragestellungen und demgemäß unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten:

1. Konzeption und Erprobung eines feldtauglichen Messverfahrens zur Bodenluftmessung mit passiven, integrierenden Exposimetern (Kernspurdetektoren), um Langzeitmittelwerte zu schätzen.
2. Kann ein charakteristischer Jahresmittelwert der Radonkonzentration in der Bodenluft aus 12-monatigen Messungen reproduzierbar ermittelt werden und ist ferner ein saisonaler Gang erkennbar der u.U. auch mit meteorologischen und bodenphysikalischen Parametern korreliert ist?
3. Vergleich von Messwerten der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft über ein Jahr hinweg an verschiedenen geologischen Standorten, die mit unterschiedlichen Messverfahren (Kurzzeitmessung – integrierende Messung) ermittelt wurden. Kann aus Kurzzeitmesswerten ein verlässlicher Langzeitmittelwert der einzelnen Standorte abgeleitet werden?

Der Aufbau des Abschlussberichtes orientiert sich im Wesentlichen an diesen Fragestellungen. Abschließend erfolgt eine Gesamtbetrachtung mit Fazit.

Unabhängig von den Ergebnissen des Forschungsvorhabens wurde ein Sachstandsbericht zum Thema „Radonmessungen in der Bodenluft - Einflussfaktoren, Messverfahren, Bewertung“ erstellt. Hier werden generell Anwendungen von Radonmessungen in den Geowissenschaften und verschiedene Radonmessverfahren beschrieben sowie räumliche und saisonale Einflussfaktoren auf die Radonkonzentration in der Bodenluft diskutiert.

2. Konzept des Forschungsvorhabens

Im Rahmen der Feldmessungen sollte an mehreren Standorten unterschiedlicher Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft sowie unterschiedlicher Permeabilität die Vergleichbarkeit verschiedener Radonmessverfahren untersucht werden. Im Ausschreibungstext wurde zwischen „aktiven“ und „passiven“ Messungen unterschieden. Gemäß dieses Textes entsprechen erstere **Kurzzeitmessungen**, letztere **integrierenden Radonmessungen**, die einen Mittelwert der Bodenluftkonzentration liefern sollen.

Sowohl die Radongehalte als auch die Permeabilität sollten weite Bereiche der natürlichen Schwankungsbreite abdecken. Während die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft im Jahresverlauf in aller Regel vergleichsweise geringen Variationen unterliegt, ist die Permeabilität eines Bodens stark von der Durchfeuchtung bzw. der Wasserführung im Boden abhängig. Je nach Entwicklung des Substrates kann es hier zu Schwankungen um bis zu zwei Größenordnungen kommen. Dabei gilt generell, dass diese Schwankungen umso geringer ausfallen, je durchlässiger ein Substrat ist.

Aufgrund des durch die vorgegebene Laufzeit des Projektes sehr engen Zeitrahmens für Planung, Voruntersuchungen und letztendlich Durchführung der eigentlichen 12-monatigen Messreihe sollten unter dem Gesichtspunkt eines optimalen Kosten/Nutzen-Effektes **drei Messflächen unterschiedlicher Radonaktivitätskonzentration** mit einer minimalen Bodenbildungstiefe von 1 m ausgesucht werden. Auf jeder dieser Flächen sollten **drei Teilflächen unterschiedlicher Permeabilität** untersucht werden. Hierfür kommen vor allem Braunerden und Parabraunerden mittlerer Entwicklungstiefe in Frage, deren Korngrößenspektrum im Schluff- und Sandbereich mit jeweils geringem Ton- und Skelettanteil variiert. Da im Jahresverlauf an den jeweiligen Teilflächen aufgrund der saisonal unterschiedlichen Durchfeuchtung deutlich variierende Permeabilitäten vorhanden sind, werden so Datenpaare großer Variabilität erzeugt. Insgesamt werden somit neun Teilflächen mit jeweils unterschiedlichen Radonkonzentrationen und Gasdurchlässigkeiten untersucht. Neben dem zeitlichen Gang der Radonkonzentration kann somit auch die laterale Variabilität der Radonwerte in der Bodenluft betrachtet werden.

Es sind jedoch zwei Einschränkungen zu machen.

Die Probenahmetechnik bei Kurzzeitmessverfahren erlaubt die Entnahme von Bodenluft über einen weiten Bereich an Permeabilitäten, allerdings sind wassergesättigte Böden, z.B. Pseudogleye, Gleye oder Böden der Talniederungen, in der Regel auch mit großem Aufwand nicht zu beproben. In diesen Fällen stellen sich zudem erhebliche Probleme bei einer Untersuchung mit integrierenden Verfahren (Exposimeter), deren Auswirkungen auf das Messergebnis nach aktuellem Wissensstand nicht ausreichend untersucht sind. Aus diesem Grund wurde auf die Beprobung von Böden mit sehr niedrigen Durchlässigkeiten und hoher Wassersättigung verzichtet, da die Resultate solcher Messungen erfahrungsgemäß nicht verwertbar sind.

Von der Untersuchung flachgründiger Böden (< 0,5 m) über dem unmittelbar anstehenden Festgestein wurde ebenfalls abgesehen, weil es sich hierbei um vollkommen andere geologisch-bodenkundliche Gegebenheiten handelt, die sich nicht befriedigend in das o.g. Kon-

zept einbinden lassen. Um hierzu eine ausreichende Datengrundlage zu erhalten, wäre die Untersuchung weiterer Messflächen unterschiedlicher Radonaktivitätskonzentration und Permeabilität mit mehreren Messpunkten notwendig. Gleichzeitig wäre die Frage nach einer geeigneten Probenahmestrategie zu klären, da in flachgründigen Böden andere Anforderungen an die Sondentechnik und die Einhaltung definierter Randbedingungen gestellt werden und meteorologische Veränderungen einen wesentlich größeren Einfluss haben.

Hinsichtlich der Beprobungshäufigkeit war seitens des Auftraggebers vorgegeben, jede Teilfläche jeweils einmal monatlich zu beproben. Aus Gründen der statistischen Sicherheit wurde allerdings diese Frequenz seitens des Auftragnehmers als nicht ausreichend angesehen. Sowohl eine höhere zeitliche als auch örtliche Beprobungsdichte sind erforderlich, um eine bessere Belastbarkeit der im Vorhaben gewünschten Aussagen zu erhalten. Zur Verbesserung der Datengrundlage wurde daher für die Beprobungen ein 14-tägiger Rhythmus gewählt und somit die Datenmenge verdoppelt. Mehrkosten für den Auftraggeber fielen nicht, diese wurden ausschließlich durch den Auftragnehmer getragen.

Vor der eigentlichen regelmäßigen Bodenluftbeprobung werden die Flächen mittels **Felduntersuchungen und Labormessungen** hinsichtlich der für das Radonpotential relevanten Parameter charakterisiert. Folgender Untersuchungsumfang war vorgesehen:

- geologisch-bodenkundliche Aufnahme (bis max. 2 m Tiefe) nach den Vorgaben der aktuellen bodenkundlichen Kartieranleitung
- Bodenphysik in drei Tiefen (0,5 m, 1,0 m, 1,5 m)
 - Korngrößenverteilung
 - Lagerungsdichte
 - Porosität
 - Gasdurchlässigkeit
- Bestimmung der spezifische Radionuklidaktivitäten des Bodens in drei Tiefen (0,5 m, 1,0 m, 1,5 m)
- Emanationskoeffizienten von Probenmaterial aus 1,0 m Tiefe

3. Entwicklung eines passiven Verfahrens zur Bodenluftmessung

Ziel der Untersuchungen mit passiven Messungen soll die Ermittlung von Langzeitwerten der Radonkonzentration in der Bodenluft sein. Darunter wird nach Aussagen des BfS der über ein Jahr gemittelte Radonwert in der Bodenluft verstanden. Ein standardisiertes Verfahren, das mit vertretbarem Aufwand und Kosten eines solches Ergebnis liefert, existiert bislang nicht (Sachstandsbericht, Kap. 5).

Laut Tenor des Ausschreibungstextes zum Forschungsvorhaben sind integrierend messende Kernspurfolien als passive Messungen anzusehen. Das hier vorgestellte Verfahren basiert daher auf diesem Messprinzip. Grundsätzlich muss aber – unabhängig von der genauen Vorgehensweise – die Reproduzierbarkeit der Messungen gegeben sein. Dies muss durch die Einhaltung definierter Randbedingungen gewährleistet werden.

Kernspurdetektoren liefern einen integrierten Wert über die jeweilige Expositionszeit. Aufgrund der Empfindlichkeit des Verfahrens ist aber bei allen handelsüblichen – und originär für den Einsatz für Raumlufmessungen bei wesentlich geringeren Radonkonzentrationen entwickelten - Detektoren abhängig von der tatsächlichen Bodenluftkonzentration von der Notwendigkeit eines Wechsels des Detektoren im Zeitraum von einer Woche bis vier Wochen auszugehen, um eine Überexposition ausschließen zu können.

Das einfache Vergraben der Detektoren mit anschließender Verfüllung des Grabloches mit dem vorher entnommenen Bohrgut stellt einen erheblichen Eingriff in das Bodengefüge dar. Nach Ende der Expositionszeit werden die Messgeräte ausgegraben und ggf. nach einem Wechsel der Detektoren unter erneut veränderten Bedingungen wieder eingegraben. Derart gewonnene Messwerte sind aufgrund dieser erheblichen Störung des Bodenluftaushaltes stark fehlerbehaftet und nur sehr schwer reproduzierbar. Dies zeigten entsprechende negative Erfahrungen systematischer Bodenluftuntersuchungen mit Hilfe mehrerer 100 Kernspurdetektoren (Typ Karlsruhe) aus den frühen 1990er Jahren an der Universität Bonn (Plate 1992, Werner 1993). Insbesondere eine nachweislich funktionierende und reproduzierbare Abdichtung des Detektors (z.B.: gegen Kontamination durch Atmosphärenluft, Kondensationswasser) ist bei dieser Vorgehensweise nicht gewährleistet.

In Abstimmung mit der Fachbetreuungsstelle des BfS wurden Kernspurdetektoren der Firma Gammadata Landauer aus Uppsala/Schweden für die passiven Bodenluftmessungen eingesetzt. Vor Beginn der eigentlichen Messungen wurden die Detektoren in mehreren Untersuchungsreihen bzw. Expositionsszenarien getestet. Vorrangig wurde die Dauer einer möglichen Exposition in der Bodenluft bei unterschiedlichen Radonkonzentrationen unter Feld- und Laborbedingungen untersucht; hierbei kamen unterschiedliche Halterungssysteme für die Detektoren zum Einsatz. Letztendlich wurde eine Mess- bzw. Detektorkonfiguration entwickelt, die es ohne Probleme erlaubt, Radonmessungen in der Bodenluft mit 14-tägiger Exposition in einem Radonkonzentrationsbereich zwischen ca. 20.000 und 100.000 Bq/m³, wie er im Vorhaben abgedeckt werden soll (s. Kap. 5), durchzuführen. Vor und nach den einjährigen Feldmessungen erfolgte jeweils eine Kalibrierung von 20 Halterungssystemen durch den Lieferanten Gammadata Landauer.

Das Vorhandensein einer Sättigungsgrenze für die Expositionszeit der Detektoren in der Bodenluft bedeutet, dass die Ermittlung des Langzeitwertes der Radonbodenluftkonzentration nur über eine lückenlose Beprobung durch regelmäßigen Austausch der Detektoren über den gesamten Jahresmesszeitraum zu gewährleisten ist. Hierbei muss der Einfluss der Bodenfeuchte berücksichtigt und eine Störung des Bodengefüges minimiert werden.

Bei der Platzierung und dem regelmäßigen Austausch der Detektoren im Boden ist daher eine Vorgehensweise zu wählen, die mittels einer möglichst einfachen Probenahmeeinrichtung

- einheitliche und über den gesamten Messzeitraum konstante Randbedingungen der Messungen gewährleistet,
- eine nachweisbare Abdichtung des eigentlichen Messraumes in 1 m Tiefe gegen Atmosphärenluft sicherstellt und
- einen gut handhabbaren Austausch der Messgeräte ohne Störung des Bodengefüges zulässt.

Einzelheiten zur Probenahme und zu den Pegeln (z.B.: Sonde, Detektorhalterung) sowie zur Durchführung der eigentlichen Messungen sind in Kapitel 4 beschrieben.

Anmerkung:

Aufgrund der begrenzten Laufzeit des Forschungsvorhabens war es nicht möglich, einerseits ein praktikables Messverfahren zur Bestimmung des Langzeitmittelwertes **systematisch neu** zu entwickeln sowie zu testen und andererseits gleichzeitig mittels dieses Verfahrens die geforderten Langzeitmessungen über ein Jahr hinweg auf den Messflächen durchzuführen. Ursprünglich war vorgesehen, auf ein bereits vorhandenes Messsystem zurückzugreifen, das in internationalen Publikationen bereits beschrieben wurde. Konkret handelt es sich um das Messverfahren, das von Dr. Karel Turek (Nuclear Physics Institute) in Prag/Tschechien entwickelt und vertrieben wird (Nezval, Matolin, Just, Turek, 2004; Turek, Bednar, Nezval, 1997). Geplant war, im Rahmen des Vorhabens dieses Verfahren methodisch weiter zu entwickeln, um längere Expositionszeiten in der Bodenluft (z.B.: > 3 Monate) zu ermöglichen. Bei den unmittelbar nach Projektbeginn erfolgten Gesprächen mit Dr. Turek stellte sich jedoch heraus, dass dieses Verfahren einige gravierende Nachteile aufweist, die aus den bekannten Veröffentlichungen nicht hervorgingen und die einen Einsatz in diesem Forschungsvorhaben mit den o.g. Ansprüchen an eine möglichst optimale Vergleichbarkeit der Randbedingungen letztendlich nicht möglich machten. Im Einzelnen handelte es sich hierbei um folgende Punkte:

- nicht quantifizierbare Thoronsensitivität,
- unzureichende Abdichtung der Detektorhalterungen gegenüber Atmosphärenluft,
- Möglichkeit einer Überexposition der Detektoren bei Bodenluftkonzentrationen > ca. 80.000 Bq/m³.

4. Probenahme und Messverfahren

4.1 Allgemeines

Oberste Priorität bei der Planung und Durchführung der einjährigen Messreihe sollte die Gewährleistung identischer Rahmenbedingungen bei den einzelnen Messungen haben. Bekanntermaßen können Fehler bei der Probenahme, mehr als bei der Messung selbst, zu Unterschieden bei Bodenluftmesswerten führen, die einen möglicherweise vorhandenen saisonalen Gang der Radonkonzentration in der Bodenluft um ein Vielfaches übersteigen.

Aus diesem Grund erfolgte an allen geplanten Bodenluftentnahmepunkten die Einrichtung stationärer **Bodenluftpegel** mit dauerhafter Verrohrung. Dies entspricht auch der in den Geowissenschaften und im Umweltbereich gängigen Vorgehensweise für eine Langzeitbeprobung von Bodenluft oder Grundwasser. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass die Randbedingungen der Probenahme einheitlich und kontrollierbar sind. Die Bodenluftsonden bzw. Detektorhalterungen können stets in dieselben Pegel mit identischer Geometrie abgelassen werden; die Störung des Bodenlufthaushaltes wird somit minimiert. Zudem verringert sich durch diese Vereinfachung der Probenahme mit exakt vorgegebenen Arbeitsschritten der zeitliche Aufwand im Feld.

Für die (aktiven) **Kurzzeitmessungen** wurden auf jeder der neun Teilflächen zwei separate stationäre Messpunkte (Pegel) eingerichtet, die jeweils 14-tägig über einen Zeitraum von einem Jahr beprobt wurden. Die Beprobung erfolgte mit Hilfe der Bonner Bodenluftsonde, die im Rahmen der Deutschland-Messkampagne entwickelt und eingesetzt wurde; auf der Messfläche Lounovice wurden zusätzlich Bodenluftproben mittels stationär eingebrachter Tschechischen Sonden gezogen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den nachfolgenden Kapiteln unter der Bezeichnung „Bonner Pegel“ bzw. „Tschechische Pegel“ geführt.

Für die (passiven) **integrierenden Radonmessungen** wurden auf jeder der neun Teilflächen ebenfalls zwei separate stationäre Messpunkte (Pegel) eingerichtet, in denen Kernspurdetektoren exponiert werden. Die Expositionszeit sollte jeweils zwei Wochen betragen, so dass über den Messzeitraum eines Jahres hinweg ein 26-maliger Wechsel der Messgeräte vorgesehen war. Dieses Schema wurde auch weitgehend eingehalten; lediglich im Spätsommer 2010 musste die Expositionszeit aus organisatorischen Gründen an den Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld an einigen wenigen Terminen geringfügig variiert werden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in den nachfolgenden Kapiteln unter der Bezeichnung „Kernspurdetektoren“ geführt. An jedem Detektorwechselermin wurde zusätzlich vor dem Einsetzen der neuen Detektoren mittels der Bonner Sonde aus den Pegeln Bodenluftproben zur Bestimmung der Radonkonzentration gezogen. Diese Resultate sind der Bezeichnung „Exposimeterpegel“ geführt.

Anmerkung:

Aus wissenschaftlicher Sicht wäre es wünschenswert gewesen, zusätzlich zu den aktiven und passiven Radonmessverfahren ein zeitauflösendes aktives Verfahren einzusetzen. Hiermit wäre die Datengrundlage für die Prognose der Langzeitkonzentration erheblich verbreitert worden. Es wäre nicht nur möglich gewesen, integrierende Langzeitmittelwerte über verschieden lange Zeiträume (bis hin zu einem Jahr) zu erheben,

sondern die Radondynamik im Jahresverlauf exakt zu bestimmen. Einem entsprechenden Vorschlag des Auftragnehmers, derartige kommerziell erhältliche Sonden zumindest an jeweils einem Messpunkt je Messfläche in 1 m Tiefe zu installieren, stimmte der Auftraggeber mangels finanzieller Möglichkeiten nicht zu.

Die Probenahme bzw. die Messungen sollten grundsätzlich in einer Tiefe von 1 m erfolgen, weil dies der in Deutschland üblichen Vorgehensweise entspricht.

Der Einfluss meteorologischer Parameter auf die Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. Bei einer Probenahmetiefe von 1 m variieren die relevanten Kenngrößen bei den in Deutschland auftretenden Böden bekanntermaßen nur noch mit geringer Bandbreite (Sachstandsbericht, Kap. 3.5). Die tiefenbezogene Variation der Radonaktivitätskonzentration ist aus der Literatur gut bekannt und sollte seitens des Auftraggebers im Rahmen des Forschungsvorhabens auch nicht überprüft werden (Sachstandsbericht, Kap. 7.2).

Allerdings wurden die wesentlichen meteorologischen Parameter (Lufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Niederschlagsmenge) auf jeder der drei Messflächen zeitauflösend erhoben, um mögliche Korrelationen zur Variation der Radonkonzentration überprüfen zu können. Hierbei ist eine kontinuierliche Messwerterhebung notwendig, da es nach bisherigen Erfahrungen nicht unbedingt auf die zum Zeitpunkt der Probenahme vorhandenen Witterungsbedingungen, sondern vielmehr auf den Verlauf und die Gradienten der einzelnen Messgrößen ankommt. So spielt beispielsweise der Anstieg oder die Abnahme des Luftdruckes eine wesentliche Rolle für die Radonmigration im Boden. Aus diesem Grund wurde auf jeder der drei Messflächen eine kontinuierlich arbeitende Wetterstation eingerichtet, die die o.g. Wetterdaten mit einstündigem Messintervall erfasste.

Nach den ersten Messzyklen zeigte sich bei der routinemäßigen Kontrolle der Sonden für die passiven Messungen, dass die Lufteinlassöffnungen am unteren Sondenende durch lehmig-toniges Bodenmaterial z.T. verschlossen waren, so dass ein ungehinderter Zutritt der Bodenluft zum Detektor nicht gewährleistet bzw. eine aktive Probenahme nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde das untere Ende der Sonde abgeschnitten, so dass der Luftzutritt zum Detektor über den gesamten, nunmehr freien zylindrischen Raum in der Tiefe erfolgen konnte.

4.2 Kurzzeitmessungen

Die Probenahmetechnik für Bodenluftmessungen ist in Deutschland im Bereich der Umweltgeologie, z.B. für Untersuchungen von Altlasten, reglementiert (VDI-Richtlinie 3865). Gleiches lässt sich für die Radonproblematik nicht sagen. Hier werden eine Reihe unterschiedlicher Methoden eingesetzt, denen gemeinsam ist, dass mit Hilfe einer Bodenluftsonde Bodenluft abgesaugt und anschließend gemessen wird. Probenahmetechnik, Probenahmetiefe und Messverfahren variieren dabei in weiten Bereichen. Eine Übersichtsdarstellung zum Themenbereich „Radonmessverfahren in der Bodenluft“ ist dem Sachstandsbericht (Kap. 5) zu entnehmen.

Bei internationalen Messvergleichen hat sich allerdings gezeigt, dass bei Beachtung vorgegebener Randparameter wie Probenahmetiefe, Vermeidung von Randläufigkeiten oder Ausschluss eines Thoronsignals die Kurzzeitmessverfahren weitgehend vergleichbare Resultate liefern. Aus diesem Grunde kommt für die aktiven Radonmessungen eine standardisierte Probenahme mittels einer **Bodenluftsonde** mit Packersystem (Bonner Sonde) und ein **Kurzzeitmessverfahren** zur Ermittlung der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft inkl. der anschließenden Bestimmung der Gasdurchlässigkeit des Bodens zum Einsatz (Kemski, Klingel, Siehl 1996). Für die Radonmessung wird ein Szintillationszähler mit Lucas-Zellen verwendet. Diese Vorgehensweise wurde vom Forschungsnehmer im Rahmen von Forschungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) entwickelt und stellt den Stand der Technik dar (Abb. 1). Sämtliche Messungen zur Erstellung der Deutschland-Karte der Radonkonzentration in der Bodenluft sind auf diese Art durchgeführt worden.

In Anlehnung an das oben beschriebene Verfahren wurde an Probenahmepunkten für die aktiven Radonmessungen jeweils eine Sondierung in eine Tiefe von 1,1 m niedergebracht. Die Sondierung wurde bis in eine Tiefe von 0,8 m mittels eines Kunststoffrohres dauerhaft verrohrt (Durchmesser: 32 mm) und nach oben durch eine dicht schließende Kappe verschlossen (Abb. 2). Vor der eigentlichen Beprobung wird die Kappe entfernt und die Bodenluftsonde in die Verrohrung eingebracht, so dass sich der Packer im Tiefenbereich zwischen 0,8 bis 0,9 m befindet. Dadurch wird der Entnahmeraum definiert abgegrenzt und eine gezielte Probenahme in einer Tiefe zwischen 0,95 und 1,05 m ermöglicht. Dieses Verfahren orientiert sich an der VDI-Richtlinie 3 865, Blatt 2, Tab. 1, Variante 2.

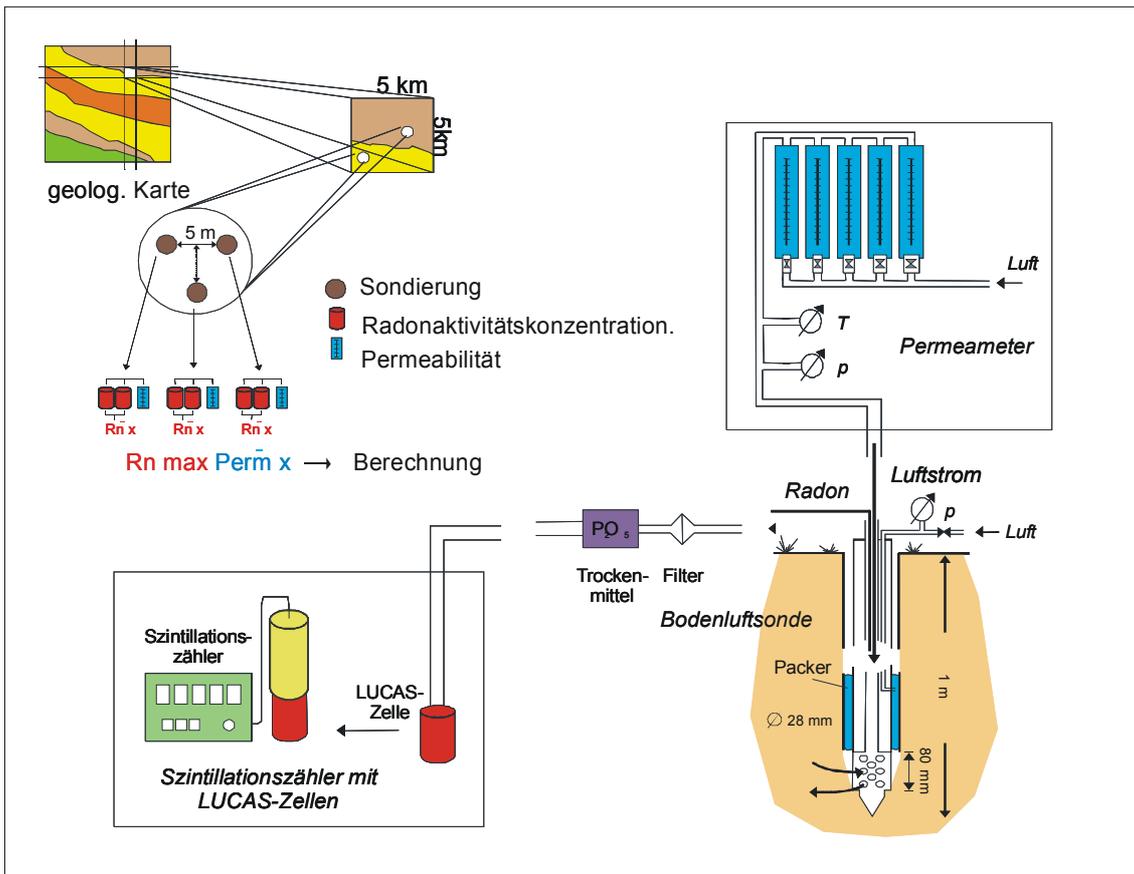


Abb. 1

Prinzipskizze von Probenahme und Radonmessung in der Bodenluft (konzipiert für regionale Übersichtsmessungen; aus Kemski, Klingel, Siehl 1996)

Die **Bonner Sonde** besteht aus zwei ineinander gesetzten Rohren (Kemski, Klingel, Siehl 1996). Das innere Rohr führt zur Sondenspitze mit der 8 cm langen Lufteinlass- bzw. -austrittsöffnung. Das äußere Rohr (Außendurchmesser: 25 mm) besitzt Verbindung zu einem Packer; dieser sitzt zwischen 80 und 90 cm Tiefe und besteht aus einem aufblasbaren Gummimantel, der um das Sondenrohr befestigt ist. Über ein Fahrradventil am oberen Ende der Sonde wird der Packer mit Luft befüllt. Der Gummimantel schmiegt sich allseitig an die Bohrlochwandung an und schließt das Bohrloch unmittelbar oberhalb der Lufteinlass- bzw. -austrittsöffnung luftdicht gegenüber der Atmosphäre ab. Über ein Manometer wird die Eignendichtigkeit des Packers kontrolliert.

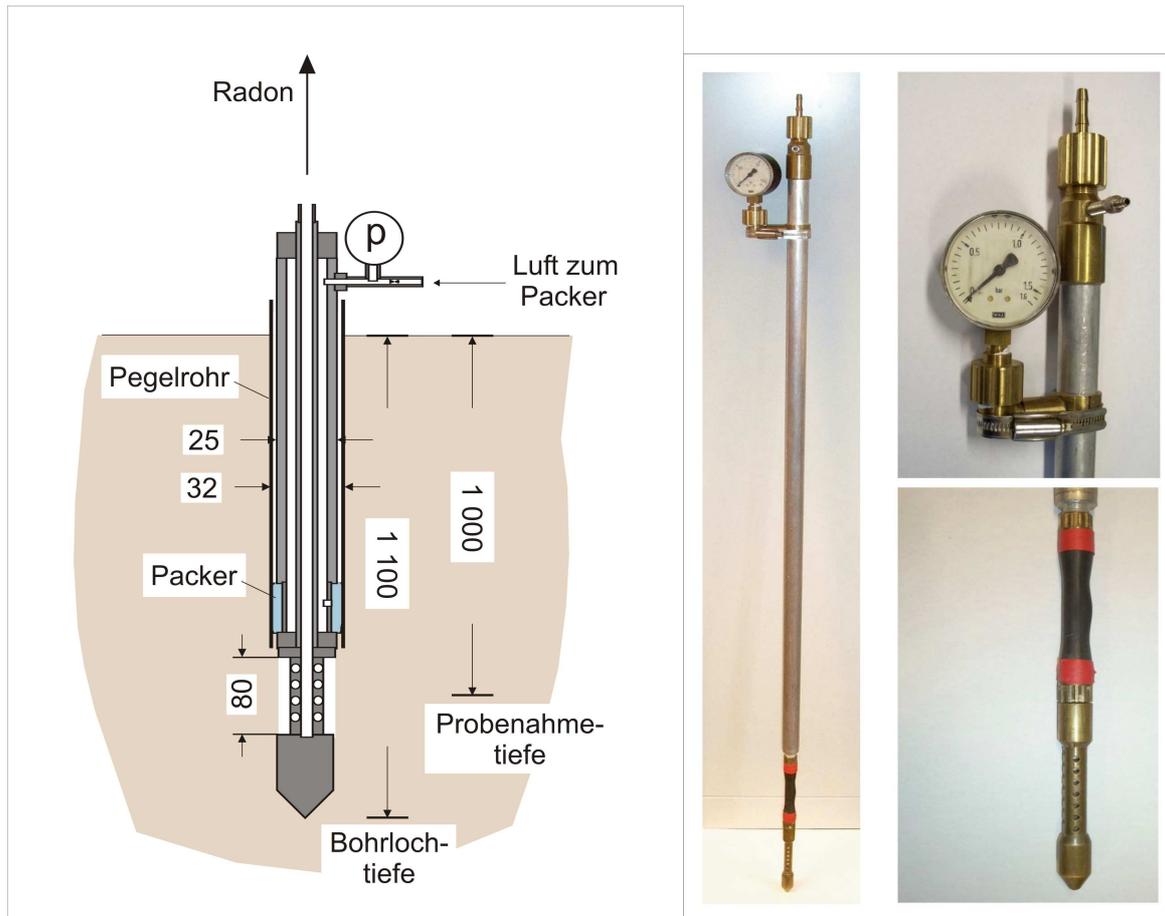


Abb. 2

links: Skizze der Bonner Sonde in Pegelrohr (unmaßstäblich; Abmessungen in mm; aus Kemski, Klingel, Siehl 1996); Mitte: Bonner Sonde, Gesamtansicht; rechts oben: Sondenkopf; rechts unten: Packer und darunter befindlicher Luft-einlass

Vor der Probenahme werden 10 l Bodenluft durch die gesamte Messkonfiguration vorgepumpt, um eine mögliche Kontamination der Bodenluft mit Atmosphärenluft beim Entfernen der Kappe und Einbringen der Bodenluftsonde auszuschließen. Bevor die Bodenluft in die Messkammer eingeleitet wird, werden Staub und feste Radonfolgeprodukte durch geeignete Filter zurückgehalten. Bei jeder Probenahme werden aus Qualitätssicherungsgründen zwei Bodenluftproben genommen und untersucht. Als Messkammern werden Lucas-Zellen verwendet. Die Messung erfolgt in einem Szintillationszähler nach Einstellung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Radon und seinen Folgeprodukten - also frühestens drei Stunden nach der Probenahme. Das Vorsaugen von 10 l Bodenluft gewährleistet die Messung des Durchschnitts aus einem größeren Bodenluftvolumen und verbessert damit die Repräsentativität der Radonmessung. Auch der praktische Bezug dieses Beprobungsverfahrens zum Eintritt von Radon in Häuser ist gegeben: Auch dort kann der Übergang vom Baugrund ins Haus aus einem größeren Bodenluftvolumen erfolgen.

Auch aus den stationären Pegeln der integrierenden Radonmessungen (s.u.) wurden an allen Probenahmetermi-nen jeweils zwei Bodenluftproben gezogen und wie oben beschrieben auf Radon untersucht.

Die auf der Messfläche Lounovice zusätzlich eingesetzte **Tschechische Sonde** besteht aus einem ca. 1,1 m langen Rohr mit einem Außendurchmesser von 12 mm (Neznal, Neznal & Smarda 1991; Abb. 3 a).

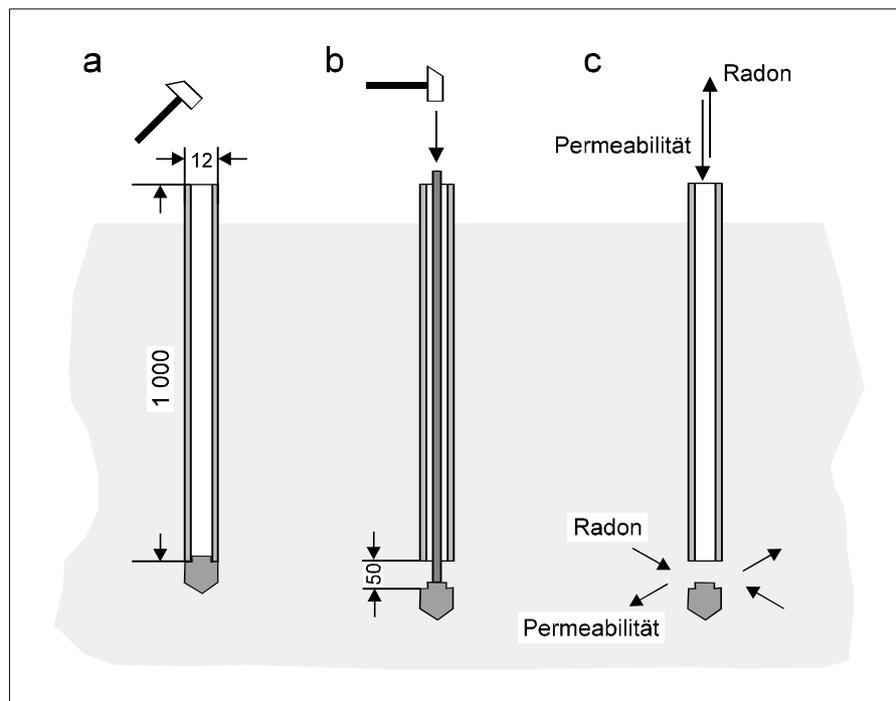


Abb. 3

Skizze der Tschechischen Sonde (nicht maßstabsgerecht, Maße in mm; aus Kemski, Klingel, Siehl 1996)

An einem Ende wird es mit einer Spitze verschlossen und 1,0 m tief in den Boden getrieben. Die Spitze wird anschließend mit Hilfe eines in das Rohr eingeführten Stabes um weitere 5 cm versenkt und verbleibt im Boden (Abb. 3 b). Der entstehende Hohlraum an der Sondenspitze stellt den „Messzylinder“ dar; die Bodenluft tritt über das untere Sondenende ein. Nachdem der Stab aus dem Rohr gezogen wurde, kann die Probenahme erfolgen (Abb. 3 c). Bei diesem Sondentyp besteht für die Messung nur über ein kleines Volumen an der Sondenspitze Kontakt zum umgebenden Boden. Während des Niederbringens der Sonde werden durch die Verdichtung der Bohrlochwandung und durch Verschmieren und Verkleben der Bodenpartikel an der Außenwandung der Sonde Randläufigkeiten und damit eine Kontamination der Bodenprobe durch Atmosphärenluft verhindert.

4.3 Bestimmung der Gasdurchlässigkeit des Bodens

Nach der Entnahme der Proben für die Radonmessung wird die Gasdurchlässigkeit mit Hilfe derselben Sonde bestimmt, um die Wegsamkeiten für die Bodenluft beurteilen zu können. Hierbei wird Luft in den Boden eingepresst und bei konstantem Druck die Durchflussrate gemessen. Unter Berücksichtigung eines sondenspezifischen Geometriefaktors und mit Hilfe des Darcy-Gesetzes wird die Durchflussrate unter der Annahme laminarer Transportbedingungen in die Gasdurchlässigkeit umgerechnet. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich in dem entsprechenden Forschungsbericht (Kemski, Klingel, Siehl 1996); nachfolgend werden noch einmal die wesentlichen Grundlagen beschrieben.

Allen Verfahren zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit von Böden liegt die Messung der Durchflussrate zugrunde. Bei den vorliegenden *in situ*-Permeabilitätsmessungen wird mit einem Permeameter gemessen, das sowohl für *in situ*- als auch für Labormessungen eingesetzt werden kann und am Geologischen Institut der Universität Bonn entwickelt wurde (Stegemann 1994).

Das Permeameter besteht aus fünf parallel geschalteten Durchflussrohren unterschiedlicher Kapazität (maximale Durchflussrate: ca. $75.000 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$), an jedem einzelnen kann der Gasdurchfluss durch ein Nadelventil reguliert werden (Abb. 4). Pressluft wird über die Durchflussrohre durch die Bodenprobe bzw. in den Boden geleitet; dabei ist darauf zu achten, dass der Betriebsdruck der Durchflussrohre von 1 bar nicht überschritten wird. Die bei einem konstanten Messdruck von 40 mbar an den geöffneten Rohren abgelesenen Skalenteile werden in die Durchflussrate umgerechnet.

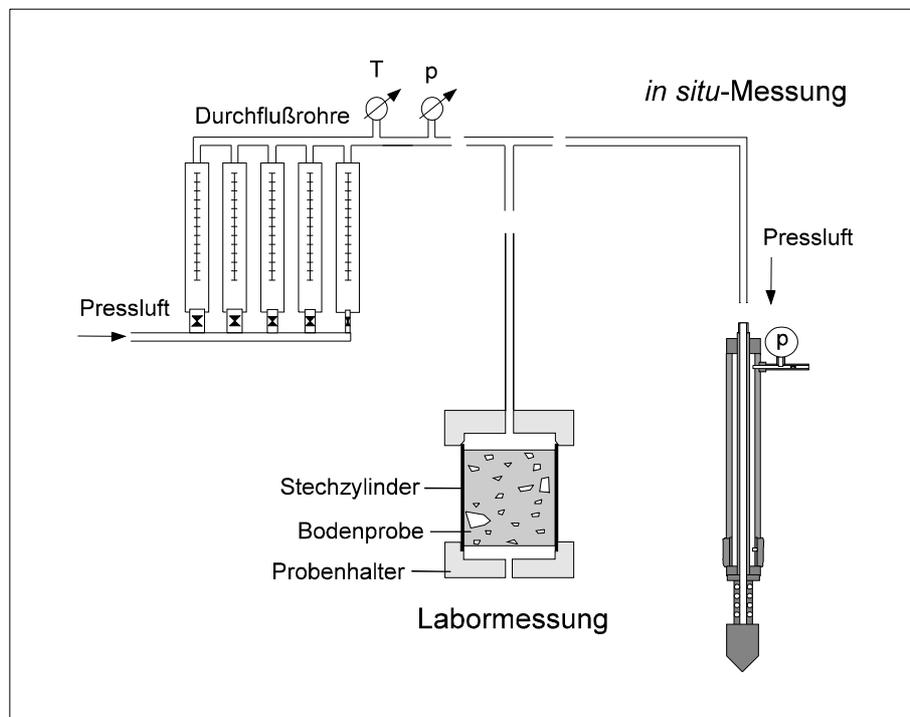


Abb. 4
Messung der Durchflussrate mit dem Permeameter bei einer *in situ*-Beprobung und an ungestört entnommenen Bodenproben (aus Kemski, Klingel, Siehl 1996)

Es können Gasdurchlässigkeiten zwischen ca. $5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ und ca. $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ gemessen werden. Diese Spanne überdeckt die normalerweise in natürlichen Böden auftretenden Gasdurchlässigkeiten (Tab. 1). Böden mit einer Gasdurchlässigkeit von $> 10^{-12} \text{ m}^2$ gelten als gut durchlässig, bei Werten zwischen 10^{-12} m^2 und 10^{-14} m^2 als mäßig durchlässig und bei einer Permeabilität von $< 10^{-14} \text{ m}^2$ als schlecht durchlässig.

Bodenart	Korngröße [mm]	spez. Gasdurchlässigkeit [m^2]
Ton	< 2	$< 10^{-16}$
siltiger Ton, Silt	2 - 20	$10^{-15} - 10^{-13}$
siltiger Sand	20 - 63	$10^{-13} - 5 \times 10^{-12}$
Fein-, Mittelsand	63 - 630	$5 \times 10^{-12} - 10^{-10}$
Grobsand, Kies	> 630	$> 10^{-10}$

Tab. 1
Korngrößenbereiche und spezifische Gasdurchlässigkeit häufig auftretender Bodenarten (aus Kemski, Klingel, Siehl 1996).

Der Berechnung der Gasdurchlässigkeit eines Bodens liegt die allgemeine Form des Darcy-Gesetzes zugrunde. In diesem stellt die Gasdurchlässigkeit einen materialabhängigen Proportionalitätsfaktor dar, der den Einfluss des Bodens bzw. seines Porensystems auf den Gasstrom kennzeichnet. Stellvertretende Feldmessgröße für die spezifische Gasdurchlässigkeit ist die Durchflussrate. Geht man von einem homogenen, isotropen Boden aus, so gilt für den Gasdurchfluss bei konstantem Druck und laminaren Transportbedingungen folgende abgewandelte Form des Darcy-Gesetzes:

$$V = \frac{A \cdot k \cdot p}{L \cdot \eta} \quad [\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}] \quad (1)$$

mit

V Gasdurchflussrate [$\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$]

A Größe der durchströmten Fläche [m^2]

k spezifische Gasdurchlässigkeit [m^2]

p Druck des strömenden Gases [Pa] (100 Pa = 1 mbar)

L Länge des Mediums [m]

η dynamische Gasviskosität [Pa sec], $\eta_{\text{Luft}} (20^\circ\text{C}) = 1,812 \times 10^{-5} \text{ Pa sec}$

Bei Labormessverfahren ist die räumliche Ausdehnung (Fläche und Länge) des beprobten Bodenkörpers bekannt, so dass sich aus (1) folgende Formel zur Berechnung der spezifischen Gaspermeabilität ergibt:

$$k = \frac{V \cdot L \cdot \eta}{A \cdot p} \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

Im Gegensatz zu Labormessungen können bei *in situ*-Permeabilitätsmessungen die Parameter A und L nicht direkt angegeben werden. Daher wird für den Quotienten A/L in (1) ein Geometriefaktor F („*shape factor*“) eingeführt, der von der verwendeten Messsonde und der Beprobungstiefe abhängig ist. Zur Bestimmung von F wird von der Annahme ausgegangen, dass sich das Druckfeld des strömenden Gases im Boden in Form eines Rotationsellipsoids ausdehnt (Damkjær & Korsbech 1992). Mathematisch lässt sich dies folgendermaßen beschreiben:

$$p = \frac{\eta}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot k} \cdot V \cdot \ln \left(\frac{2l}{d} \cdot \sqrt{\frac{4D-l}{4D+l}} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (3)$$

mit

l lange Achse des Rotationsellipsoids [m]

d kurze Achse des Rotationsellipsoids [m]

D Beprobungstiefe [m]

In der Praxis beschreiben l die Länge und d den Durchmesser des zylindrischen Hohlraumes an der Sondenspitze („Messzylinder“), über den der Kontakt zum Boden besteht. Einsetzen von (3) in (1) liefert die Formel zur Berechnung des Geometriefaktors, der für jede Sondenform separat ermittelt werden muss:

$$F = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln \left(\frac{2l}{d} \cdot \sqrt{\frac{4D-l}{4D+l}} \right)} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

mit

F Geometriefaktor [m]

Werte von l und d für die o.g. Bodenluftsonden:

	l [m]	d [m]
Bonner Sonde	0,08	0,028
Tschechische Sonde	0,05	0,012

Durch Einsetzen von F in (2) ergibt sich schließlich die analoge Formel zur Berechnung der Gasdurchlässigkeit bei *in situ*-Messungen:

$$k = \frac{V \cdot \eta}{F \cdot p} \quad [\text{m}^2] \quad (5)$$

4.4 Integrierende Radonmessungen

Die passiven Messungen erfolgen mittels integrierend messender **Kernspurdetektoren**. Ursprünglich für Raumluftmessungen vorgesehene Detektoren wurden für Bodenluftmessungen mit um Größenordnungen höheren Radonkonzentrationen adaptiert, um auch längere Expositionszeiten zu ermöglichen.

An den Messpunkten für die passiven Radonmessungen wurde jeweils eine Sondierung in eine Tiefe von 1,1 m niedergebracht. Die Sondierung wurde bis in die genannte Tiefe mittels eines Pegelrohres aus Kunststoff dauerhaft verrohrt (Außendurchmesser: 42 mm; Abb. 5). Die untersten 10 cm des Pegelrohres sind perforiert, um einen Bodenluftzutritt zum eigentlichen Detektor zu ermöglichen.

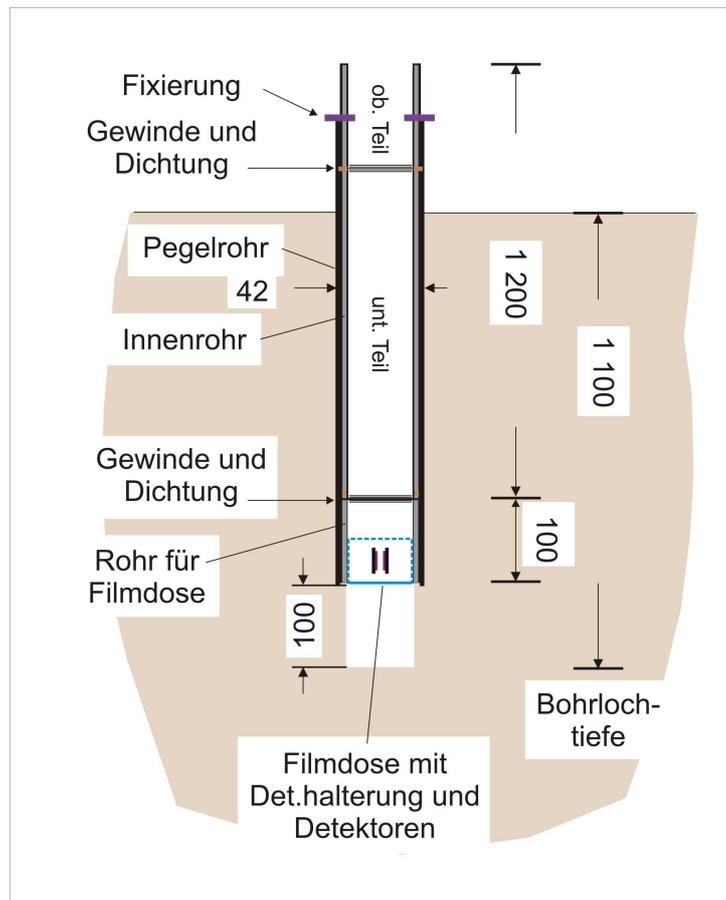


Abb. 5

Skizze eines Pegels für integrierende Bodenluftmessungen (unmaßstäblich; Abmessungen in mm)

Ein zweigeteiltes Halterungsrohr (Gesamtlänge: 120 cm; ob. Teil: 25 cm, unt. Teil: 95 cm) wird passgenau in das Pegelrohr eingebracht. Dichtungsringe stellen sicher, dass entlang der Kontaktfläche Außen-/Innenrohr keine Verbindung zwischen Atmosphärenluft und Probenahmeraum in der Tiefe besteht. Die beiden Teile des Innenrohres sind über eine Schraubverbindung miteinander verbunden. An ihren gegeneinanderstoßenden Enden sind sie geschlossen, d.h. es besteht kein Durchlass. Am unteren Ende des Innenrohres wird über ein Gewinde das ca. 10 cm lange Halterungsrohr angeschraubt, in dem sich das

Schutzgehäuse (s.u.) mit den Detektoren befindet. Ein Schutzgehäuse wurde als notwendig erachtet, um Kondensationseffekte auf der Detektoroberfläche zu verhindern. Zudem wird dadurch gewährleistet, dass Detektoren und Schutzgehäuse stets in derselben Geometrie in das Halterungsrohr eingesetzt werden. Dadurch wird die „Eintrittsfläche“ der radonhaltigen Bodenluft exakt definiert.

Das Pegelrohr wird zusätzlich nach oben durch eine dicht schließende Kappe verschlossen. Vor dem Detektorwechsel wird die Kappe entfernt und das Halterungsrohr mit den Detektoren gezogen. Nach dem Austausch der Detektoren wird das Halterungsrohr wieder in den Pegel eingesetzt.

Bei den routinemäßigen Überprüfungen des Pegelrohres während der ersten Messzyklen zeigte sich, dass die Perforationslöcher durch feinkörniges Bodenmaterial teilweise verstopft und verklebt waren. Um einen ungehinderten Bodenluftzutritt zum Detektor zu ermöglichen, wurde daher der perforierte Teil des Pegelrohres entfernt, so dass der Zutritt der Bodenluft über die gesamte untere Bohrlochwandung erfolgen kann.

Die Detektoren selbst sind mit doppelseitigem Klebeband in einer Aluminiumhalterung befestigt. Aus Qualitätssicherungsgründen werden stets zwei Detektoren mit einem Abstand von 10 mm einander gegenüberliegend in der Halterung platziert (Abb. 6).

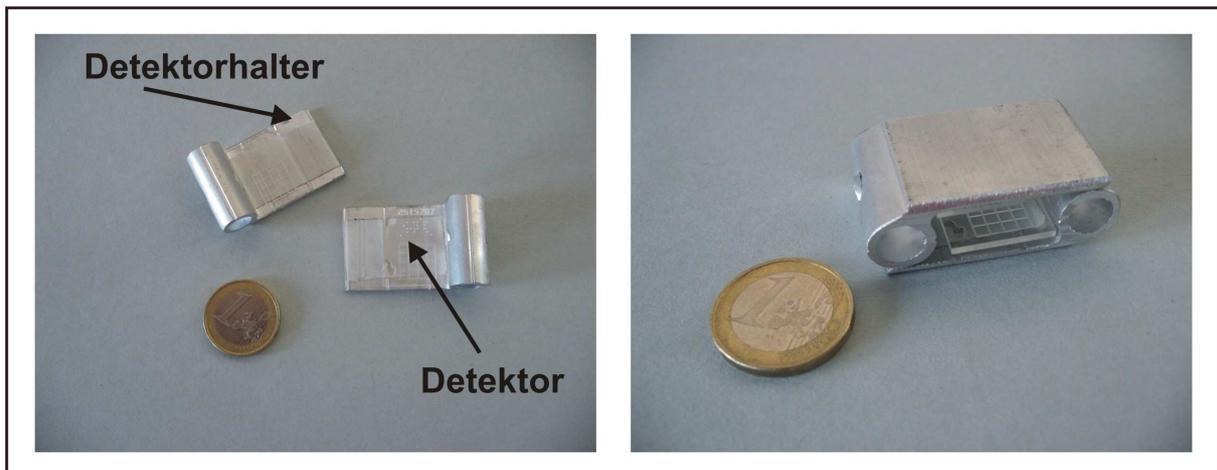


Abb. 6

links: geöffnete Detektorhalter mit eingesetzten Detektoren, rechts: geschlossener Detektorhalter

Die Halterung selbst befindet sich in einer handelsüblichen Filmdose (Abb. 7), die ihrerseits in das o.g. Halterungsrohr eingeschoben wird (Abb. 8). Dabei stellt der Deckel der Filmdose, der bündig mit dem unteren Ende der Halterung abschließt, die ausschließliche Kontaktfläche zur umgebenden Bodenluft dar („Radoneintrittsfenster“). In dieser Konfiguration erfolgte auch die Kalibrierung der Messeinrichtung.

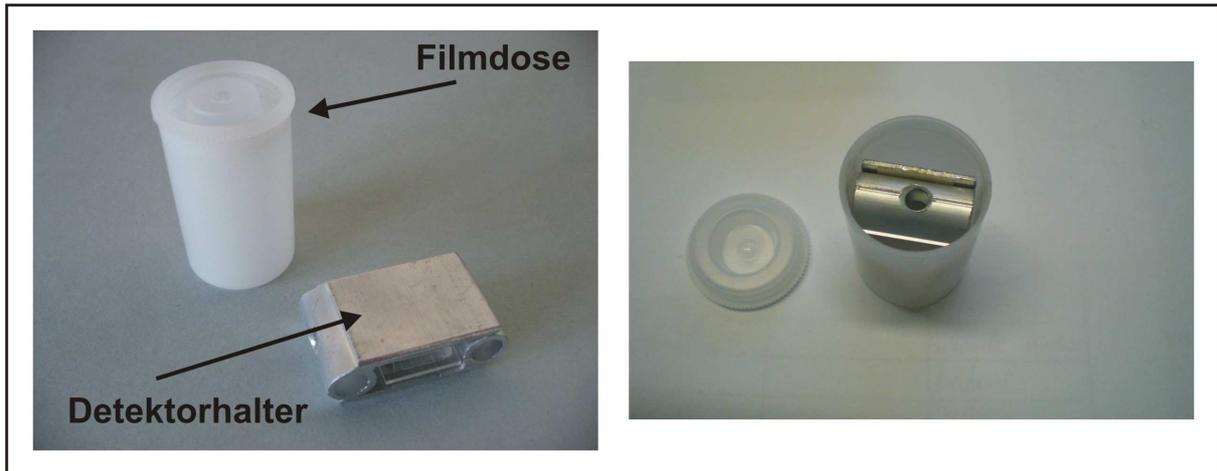


Abb. 7

links: Detektorhalter mit Filmdose, rechts: Detektorhalter in Filmdose

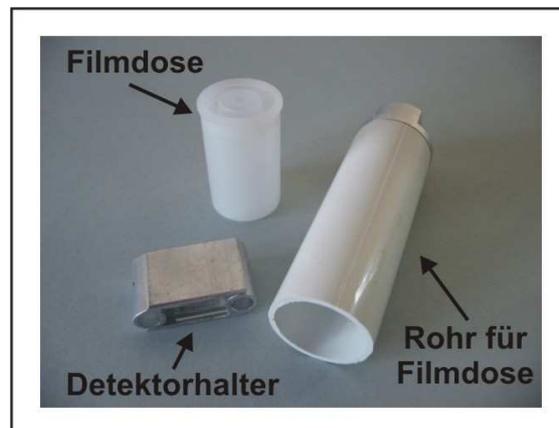


Abb. 8

Rohr für Filmdose (Kalibrationskonfiguration)

Die Filmdose mit Deckel stellt also das einheitliche Schutzgehäuse für den eigentlichen Detektor dar. Der Deckel verzögert einerseits den Luftzutritt aus dem Porenraum zum Detektor und hält somit Thoron zurück. Dies wurde durch Untersuchungen mit einer Thoriumquelle nachgewiesen; offene Detektoren waren thoronsensitiv, eingebracht in der Filmdose und Halterung lag die Spurendichte im Bereich des Untergrundes. Andererseits verhindert der Deckel das Eindringen von Bodenfeuchte, wodurch Kondensationseffekte auf der Detektoroberfläche (mit entsprechender Verringerung der Sensitivität) ausgeschlossen werden.

Die Kalibrierung in der o.g. Konfiguration ergab einen Kalibrierfaktor von ca. 1,4 Spuren/cm² h je kBq/m³.

Anmerkung:

Da aus zeitlichen Gründen keine Neuentwicklung bzw. kein Eigenbau eines Detektorschutzgehäuse möglich war, musste auf kommerziell erhältliche Produkte zurückgegriffen werden. Bei den verwendeten Film Dosen handelt es sich um Massenprodukte, die zu einem anderen Zweck mit darauf abgestimmten Qualitätsansprüchen und Herstellungstoleranzen gefertigt werden.

Die Feldmessungen haben gezeigt, dass in der Praxis an die Schutzgehäuse der

Radondetektoren höhere Ansprüche gestellt werden müssen, um eine exakte Anpassung auf die Halterungen zu gewährleisten. Geringfügige herstellungsbedingte Unterschiede zwischen einzelnen Dosen oder verschiedenen Chargen können zu Problemen beim Einbau in die Halterung (z.B.: Dose und Deckel stehen unter Spannung) mit daraus resultierenden Undichtigkeiten im Deckel führen, wodurch ein unkontrollierter Lufteintritt zum Detektor ermöglicht wird.

Vor jedem Wechsel der Detektoren wurden neue Filmdosen und Deckel verwendet; beide wurden optisch vorher auf Unversehrtheit überprüft. Nach Messende erfolgte eine Prüfung der Messeinrichtung auf Schäden und Undichtigkeiten an Filmdose und/oder Rohrhalterung. Wurde eine entsprechende Beschädigung (z.B.: Risse im Deckel) festgestellt, wurden die zugehörigen Messwerte verworfen.

4.5 Weitere Messungen

Auf jeder Messfläche wurden die spezifischen Radionuklidaktivitäten und ausgesuchte bodenphysikalische Parameter (Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Porosität, Gasdurchlässigkeit) in Bodenproben aus jeweils 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m ermittelt.

Da es sich bei den hierfür verwendeten Untersuchungsmethoden um Standardverfahren für die jeweiligen Fragestellungen handelt, wird auf eine ausführliche Methodenbeschreibung verzichtet und auf einschlägige Literatur bzw. entsprechende Messvorschriften verwiesen. Im Einzelnen kamen folgende Verfahren zum Einsatz:

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| - Radionuklidaktivität | Gammastrahlenspektrometrie (s.u.) |
| - Korngrößenverteilung | Siebung nach DIN 66 165 |
| - Lagerungs-/Trockendichte | Pyknometer nach DIN 52 102 |
| - Porosität | Bestimmung aus Stechzylinderproben |
| - Gasdurchlässigkeit | s. Kap. 4.3 |

Die Messungen der spezifischen Radionuklidaktivitäten erfolgten mittels hochauflösender Gammastrahlenspektrometrie. Nach Trocknung und Zerkleinerung auf Korngrößen von maximal 0,5 cm wurde das Probenmaterial gasdicht verschlossen. Die Messung erfolgte auf einem koaxialen Reinstgermanium-Detektor nach einer Wartezeit von mindestens sechs Wochen. Dies entspricht ca. 10 Halbwertszeiten von Rn-222, innerhalb der sich das radioaktive Gleichgewicht zwischen Ra-226 und Radon und seinen Folgeprodukten eingestellt hat. Die Messzeit pro Probe betrug jeweils 24 Stunden. Wegen dieser langen Messzeit werden von den Probenspektren Untergrundspektren der leeren Bleikammer abgezogen. Die Ra-226-Aktivität wurde unter Annahme des radioaktiven Gleichgewichtes aus seinen Folgeprodukten Pb-214 und Bi-214 bestimmt. Die Aktivitäten von Th-232 wurden über Ac-228, Pb-212 und Tl-208 bestimmt; zudem wurde die spezifische K-40-Aktivität ermittelt.

Auf jeder Messfläche wurde zudem der Emanationskoeffizient (jeweils in 1,0 m Tiefe) bestimmt. Hierzu wurde eine Bodenprobe definierter Masse in ein abgeschlossenes Gefäß definierten Volumens eingebracht und der Anstieg der Radonkonzentration im Gefäß bis zur Einstellung des Gleichgewichtszustandes gemessen. Bei bekannter Radionuklidaktivität und bekannter Probenmasse sowie bekanntem Messkammervolumen wurde daraus die Radonfreisetzungsrate berechnet.

Mittels einer professionellen Wettermessstation wurden auf jeder der drei Messflächen zeitauflösend ausgesuchte meteorologische Parameter (Lufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Niederschlagsmenge) erhoben. Zum Einsatz kam die Wetterstation Davis Vantage Pro 2, die die o.g. Wetterdaten mit einstündigem Messintervall erfasste. Zusätzlich wurden in diese Station Sensoren für die Aufnahme der Bodentemperatur und Bodenfeuchte integriert; die Messungen erfolgten in denselben Messintervallen in Tiefen von 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m, um mögliche tiefenabhängige Gradienten ermitteln zu können.

5. Messflächen

Vor der endgültigen Messflächeneinrichtung wurden umfangreiche Voruntersuchungen potenzieller Flächen über unterschiedlichen geologischen Substraten durchgeführt, jeweils mit Begehungen und den notwendigen Feldmessungen zur Bestimmung der Radonkonzentration und der Gasdurchlässigkeit des Bodens.

Unabhängig von den fachlich begründeten Anforderungen an die Messflächen musste die dauerhafte Einrichtung der geplanten Bodenluftpegel praktikabel sein. So war zum Schutz der Pegel und Messgeräte vor unbefugten Eingriffen, Vandalismus oder Diebstahl das unberechtigte Betreten der Fläche zu vermeiden. Dies ist am besten auf eingezäunten Privatgrundstücken zu gewährleisten, wozu jeweils die Zustimmung der Eigentümer zur Nutzung der Flächen für die geplante 12-monatige Messreihe einzuholen war. Notwendig war auch die Zufahrt für ein Messfahrzeug, um eine optimale Beprobung im Routinebetrieb zu ermöglichen.

In Absprache mit der fachbetreuenden Stelle des BfS wurden drei Messflächen mit Radonkonzentrationen in der Bodenluft zwischen 20.000 und 100.000 Bq/m³ mit einer minimalen Bodenbildungstiefe von 1 m für die Untersuchungen im Vorhaben ausgewählt.

Aufgrund der für die Fragestellung des Projektes günstigen geologischen Rahmenbedingungen und der langjährigen Erfahrung in Tschechien mit der Anlage und Betreuung von Referenzflächen wurde die Fläche mit den höchsten Radonaktivitätskonzentrationen nahe Prag eingerichtet, die Messflächen mit den durchschnittlichen und niedrigen Radonkonzentrationen liegen bei Bonn. Auf jeder dieser Messflächen wurden drei Teilflächen unterschiedlicher Permeabilität untersucht; insgesamt wurden also auf neun Teilflächen Messungen durchgeführt.

Die Betreuung der Fläche in Tschechien sowie die dort geplanten Messungen erfolgte durch die Firma Radon v.o.s. in Zusammenarbeit mit Prof. Matolin (Karls-Universität Prag). Die Betreuung der anderen beiden Flächen sowie die Durchführung der dortigen Messungen lagen in der Hand des Auftragnehmers.

Konkret wurden folgende drei Messflächen ausgewählt:

- | | |
|--------------------------|--|
| - Messfläche | Radonkonzentration in der Bodenluft |
| - Burg Lede | niedrig: ca. 20.000 bis 30.000 Bq/m ³ |
| - Messdorfer Feld | mittel: ca. 40.000 bis 60.000 Bq/m ³ |
| - Lounovice | hoch: ca. 80.000 bis 150.000 Bq/m ³ |

Die Messflächen sind durch unterschiedliche geologische Situationen gekennzeichnet. Die Flächen Burg Lede und Messdorfer Feld befinden sich über quartären Lockersedimenten (Terrassenablagerungen bzw. Löss; s. Kap. 5.1.1 bzw. 5.1.2), die den gefalteten paläozoischen Sedimentgesteinen des Rheinischen Schiefergebirges aufliegen. Die Fläche

Lounovice befindet sich über einem verwitterten Granit varizischen Alters in der Böhmisches Masse in Tschechien (s. Kap. 5.1.3).

Schematisch ist der Aufbau einer Messfläche mit Anzahl und Anordnung der Teilflächen unterschiedlicher Gasdurchlässigkeit und Messpunkte mit unterschiedlichen Pegeln in Abbildung 9 dargestellt.

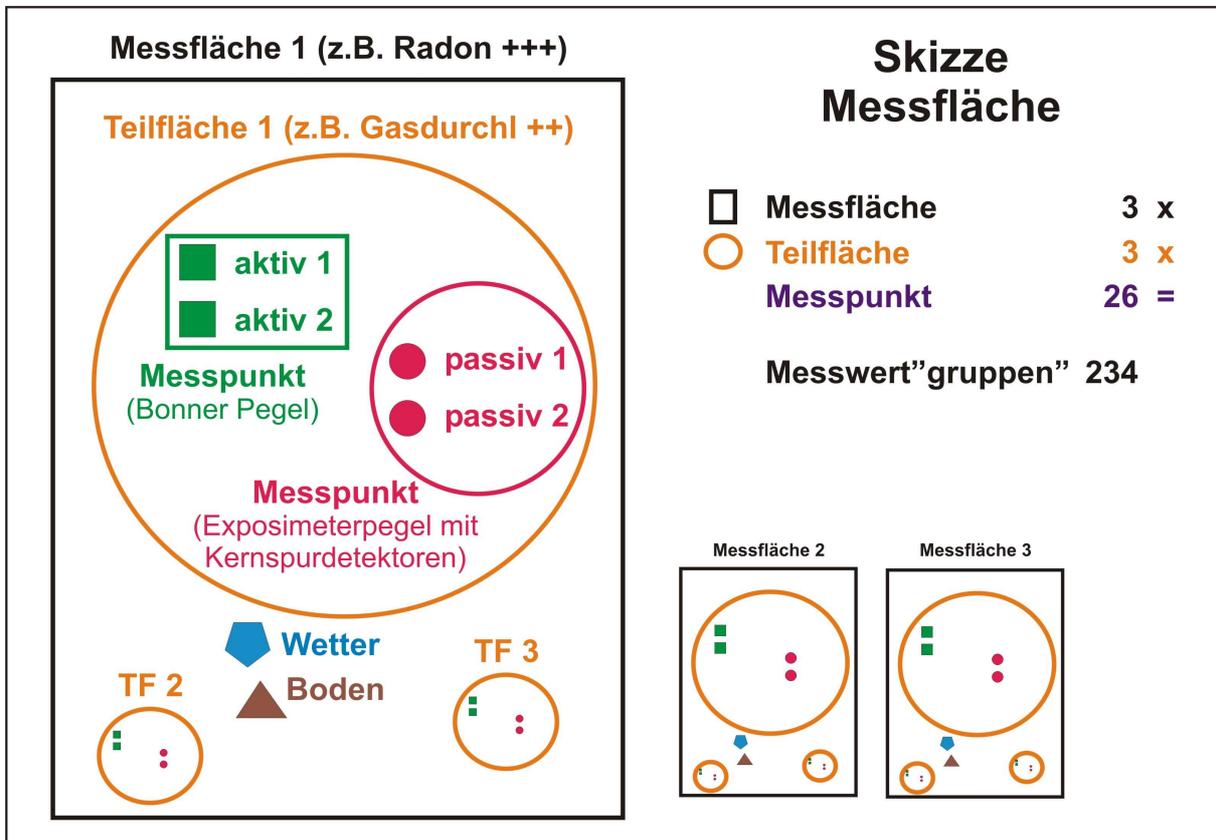


Abb. 9
Aufbau einer Messfläche mit Anzahl und Anordnung der Teilflächen unterschiedlicher Gasdurchlässigkeit und Messpunkte mit unterschiedlichen Pegeln

5.1 Beschreibung der Messflächen

5.1.1 Messfläche 1: Burg Lede

Lage (Koordinaten):

- | | | | |
|---------------|-------------|-----------|---------|
| - Länge: | 7,131309 ° | Breite: | |
| | 50,754307 ° | | |
| - Rechtswert: | 2579881 | Hochwert: | 5624952 |

Die Messfläche Burg Lede befindet sich im Stadtgebiet von Bonn.

Bonn liegt unmittelbar am Südrand der Niederrheinischen Bucht am nordwestlichen Rand des Rheinischen Schiefergebirges. Tertiäre Sedimente über einem devonischen Sockel werden von jungen quartären Ablagerungen überdeckt. Während des Tertiärs sank die Bucht an Randstörungen und in zahlreiche Schollen zerlegt in den Grundgebirgssockel ein. Bei Bonn tritt der Rhein aus den unterdevonischen Sedimentgesteinen, in die er sein Bett eingegraben hat, in die känozoischen Lockersedimente über. Beschreibungen der lokalen geologischen Verhältnisse sind den Erläuterungen der geologischen Kartenblätter GK 100 C 5506 Bonn (1987) und GK 25 5308 Bonn-Bad Godesberg (1980) zu entnehmen.

Im jüngeren Tertiär (Pliozän) begann eine Phase der Heraushebung des Schiefergebirgssockels gegenüber dem vorgelagerten Bereich der Niederrheinischen Bucht, die sich auch im älteren Quartär (Pleistozän) fortsetzte. Die gleichzeitig ablaufende Eintiefung der Flussläufe führte zur Ausbildung des heutigen Landschaftsbildes; dabei spielte auch der mehrfache Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten eine wichtige Rolle. Speziell am Ende der Kaltzeiten wurde in höheren Bereichen erodiertes und anschließend abtransportiertes Material in den tieferen Lagen des Vorlandes durch Flüsse in Form von Sand- und Kiesterrassen abgelagert. In wärmeren Klimaphasen schnitten sich die Flussläufe in diese Ablagerungen wieder ein, wodurch es zur Ausbildung verschiedener Terrassenstufen unterschiedlichen Alters (von alt nach jung: Haupt-, Mittel-, Niederterrasse) kam. Während der letzten Kaltzeit (Weichsel) wurde in der Phase der jüngsten Terrassenbildung (Niederterrasse) aus den weiten Schotterebenen das Feinmaterial ausgeblasen und als Löss wieder abgelagert. Im oberflächennahen Bereich ist dieser mittlerweile zu einem weitgehend entkalkten Lösslehm umgewandelt.

Die Messfläche Burg Lede liegt im rechtsrheinischen Teil von Bonn. Sandige Lehme mit Mächtigkeiten bis zu mehreren Dezimetern überlagern hier Sande und Kiese der Niederterrasse des Rheins. Aufgrund des jungen Alters dieser Ablagerungen ist keine Lössbedeckung vorhanden.

Die geologisch-bodenkundliche Aufnahme ergab folgendes Bild: Über den Niederterrassen des Rheins hat sich ein allochthoner brauner Auenboden (Vega) mit schwacher Verbraunung und deutlichen Grundwassereinflüssen in einem Ah-M-G-Profil entwickelt. Aufgrund der Lage der Fläche im alten Überflutungsbereich des Rheins kam es zur periodischen Ablagerung sandiger und schluffiger Komponenten in wechselnder Zusammensetzung. Die

Horizontbildung ist also weniger auf eine klassische Pedogenese als vielmehr auf wiederholte Überflutungen zurückzuführen. Im unteren Teil des Profils sind deutliche Hydromorphiemerkmale (Vernässung) zu erkennen, die die gelegentliche hohe Grundwasserführung widerspiegeln. Die wichtigsten bodenkundlichen Merkmale sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Burg Lede							
allochthoner brauner Auenboden (Vega) mit schwacher Verbraunung und Grundwassereinflüssen							
Untergrenze [cm]	Horizontsymbol	Bodenfarbe	Humusgehalt	Carbonatgehalt	Hydromorphie oxidativ	Hydromorphie reduktiv	Bodenfeuchte
-10	Ah	10 YR 5/4	H4	-	-	-	feu2
-33	AhBv	10 YR 4/3	H2	-	-	-	feu3
-73	(Bv)M1	10 YR 4/4	-	-	-	-	feu3
-108	(Bv)M2	10 YR 4/4	-	-	-	-	feu3
-150	MGo	10 YR 6/6	-	-	eh 2	-	feu3
	-(-)G		-	-	-	rg 2	feu3
Untergrenze [cm]	Horizontsymbol	Gefügestufe	Lagerungsart	Lagerungsdichte	Durchwurzelintensität	Substratsymbol	Bodenart
-10	Ah	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	w4	Lf, LoL	sL
-33	AhBv	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	w3	Lf	L
-73	(Bv)M1	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	w2	Lf	sL
-108	(Bv)M2	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	w1	Lf	uS
-150	MGo	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	-	Lf	uS
	-(-)G			Ld 2	-	Lf	sU

Tab. 2
Burg Lede: Bodenkundliche Merkmale

Die Höhe über NN beträgt 54 m. Das Gelände ist eben und wird als Wiese bzw. Obstwiese genutzt.

Abbildung 10 zeigt eine Skizze der Messfläche mit Teilflächen und Messpunkten.

5.1.2 Messfläche 2: Messdorfer Feld

Lage (Koordinaten):

- Länge: 7,064654 ° Breite:
50,729660 °
- Rechtswert: 2575319 Hochwert: 5622141

Auch die Messfläche Messdorfer Feld befindet sich im Stadtgebiet von Bonn. Die allgemeine geologische Situation ist in Kapitel 5.1.1 beschrieben. Die Messfläche Messdorfer Feld liegt im linksrheinischen Teil von Bonn. Eine stellenweise mehr als 3 m mächtige Lössbedeckung, z.T. bereits zu Lösslehm entkalkt, überlagert hier Sande und Kiese der Hauptterrasse des Rheins.

Die geologisch-bodenkundliche Aufnahme ergab folgendes Bild: Aus einer mächtigen Lössbedeckung (> 3 m) über den Hauptterrassenablagerungen des Rheins hat sich eine klassische Braunerde mit Ah-Bv-C-Profil entwickelt. Der Löss ist weitgehend entkalkt, in größerer Tiefe ist es an dem Standort möglich, noch Karbonatspuren festzustellen, allerdings waren sämtliche Profile auf der Messfläche karbonatfrei. Die Permeabilität des Materials ist trotz der vorwiegend im Schluffbereich liegenden Korngrößen vergleichsweise gut, so dass nur geringe Anzeichen einer periodischen Wasserführung zu erkennen sind. Der Löss ist partiell stark verlehmt, mit den typischen Lagerungsmerkmalen solcher Böden und der für die Verlehmung typischen lokal variierenden Permeabilität. Die wichtigsten bodenkundlichen Merkmale sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Messdorfer Feld							
Braunerde aus Löss/Lösslehm							
Untergrenze [cm]	Horizont- symbol	Bodenfarbe	Humus- gehalt	Carbonat- gehalt	Hydromorphie oxidativ reduktiv		Boden- feuchte
-10	Ah	10 YR 5/3	H4	-	-	-	f 1
-53	Bv1	10 YR 5/4	H2	-	-	-	f 1
-105	Bv2	10 YR 5/8	-	-	-	-	f 1
	C		-	-	eh1	-	f 1
Untergrenze [cm]	Horizont- symbol	Gefüge- form	Lagerungs- art	Lagerungs- dichte	Durchwurzel- intensität	Substrat- symbol	Bodenart
-10	Ah	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	w4	Lol	s'L
-53	Bv1	Polyeder	Einzelkorn	Ld 3	x3	Lol	sL
-105	Bv2	Polyeder	Einzelkorn	Ld 3	w1	Lol	sL
	C	Polyeder	Einzelkorn	Ld 3	-	Lol	s'U

Tab. 3
Messdorfer Feld: Bodenkundliche Merkmale

Die Höhe über NN beträgt 73 m. Das Gelände ist eben und wird als Wiese bzw. Garten genutzt.

Abbildung 11 zeigt eine Skizze der Messfläche mit Teilflächen und Messpunkten.

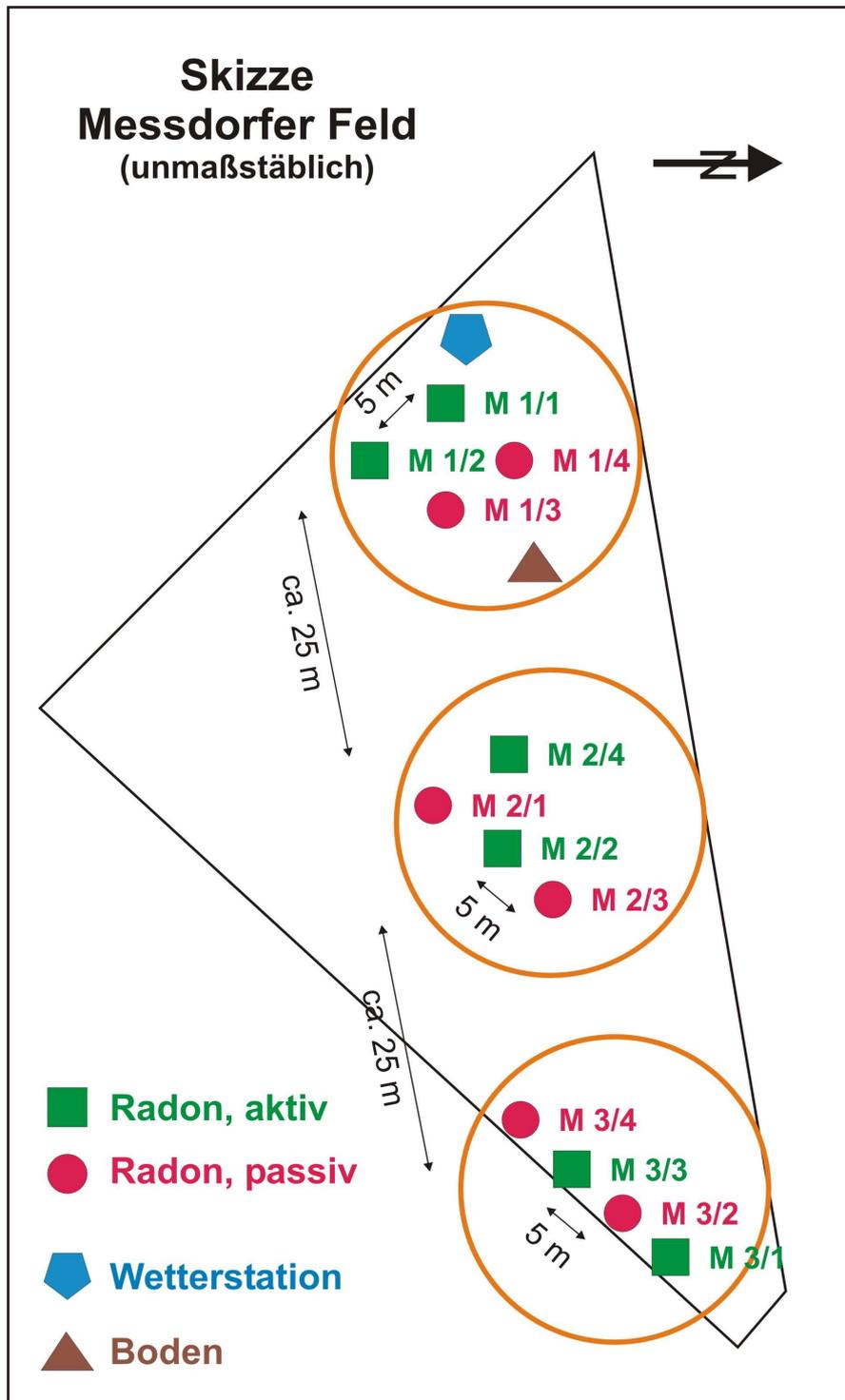


Abb. 11
Messdorfer Feld: Skizze der Messfläche mit Teilflächen und Messpunkten

5.1.3 Messfläche 3: Lounovice

Lage (Koordinaten):

- | | | | |
|---------------|-------------|-----------|---------|
| - Länge: | 14,757760 ° | Breite: | |
| | 49,983001 ° | | |
| - Rechtswert: | 4697752 | Hochwert: | 5542035 |

Die Messfläche Lounovice liegt in der gleichnamigen Ortschaft, ca. 30 km südöstlich von Prag/Tschechien.

Der Ort befindet sich im Grundgebirgsmassiv der Böhmisches Masse, die im Grenzbereich von Tschechien, Österreich und Bayern liegt. Das Massiv besteht zum überwiegenden Teil aus Kristallingesteinen wie Gneisen und Graniten. Der Untergrund in Lounovice wird von Graniten und hier speziell dem Ricany-Granit gebildet, der spätvarizischen Alters und dem zentralen Böhmisches Plutonitkomplex zuzurechnen ist. Petrographisch handelt es sich um einen Monzogranit. Der unverwitterte Granit ist mittelkörnig und weist ein deutliches porphyrisches Gefüger auf. Das Gestein ist intensiv und sehr gleichförmig verwittert; grobe und feine Gesteinsbruchstücke sowie lehmiges Material bilden die Verwitterungszone. Diese wird oftmals von fluviatilen quartären Sedimenten (sandige Lehme und lehmige Sande mit wechselndem Kiesanteil) überlagert. Bis zu mehrere Dezimeter mächtige sandig-siltige Lehme mit organischer Auflage bilden die obersten Bodenhorizonte.

Die geologisch-bodenkundliche Aufnahme ergab folgendes Bild: Es handelt sich um eine Braunerde mit schwach äolischem Anteil über *in situ*-Granitzersatz im klassischen Ah-Bv-C Profil. Über dem unterlagernden Granit ist infolge der Verwitterung die typische Vergrusung des Ausgangsmaterials zu erkennen, die zu einem vorwiegend in Sandkorngröße vorliegenden Substrat führt. Das Material ist bei Lagerungsdichten zwischen 1,5 und 1,7 g/cm³ mäßig bis dicht gepackt und zeigt vor allem im in Tiefen von mehr als 1,3 m Hydromorphiemerkmale (Vernässung), die auf die periodische Wasserführung von Hangzugswässern in dem Gebiet zurückzuführen sind. Diese hydromorphe Überprägung ist lokal unterschiedlich ausgebildet und führt zu deutlich variierenden Feuchtesituationen auf der Messfläche. Die wichtigsten bodenkundlichen Merkmale sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Lounovice							
Braunerde mit schwach äolischem Anteil über <i>in situ</i> -Granitzersatz							
Unter- grenze [cm]	Horizont- symbol	Bodenfarbe	Humus- gehalt	Carbonat- gehalt	Hydromorphie		Boden- feuchte
					oxidativ	reduktiv	
-10	Ah	10 YR 5/3	H4	-	-	-	feu2
-33	AhBv	10 YR 6/3	H2	-	-	-	feu3
-105	II Bv	10 YR 7/4	-	-	-	-	feu3
-150	Cv1	10 YR 7/3	-	-	eh 2	-	feu4
	Cv2		-	-	-	rs 2	feu5
Unter- grenze [cm]	Horizont- symbol	Gefüge- form	Lagerungs- art	Lagerungs- dichte	Durchwurzeln- intensität	Substrat- symbol	Bodenart
-10	Ah	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	w3	c, +G	uS, Gr
-33	AhBv	Polyeder	Einzelkorn	Ld 3	w2	c, +G	uS, Gr
-105	II Bv	Polyeder	Einzelkorn	Ld 3	-	c, +G	S, Gr, x
-150	Cv1	Polyeder	Einzelkorn	Ld 2	-	c, +G	S, Gr, x
	Cv2	Polyeder	Einzelkorn	Ld 4	-	c, +G	Gr, X

Tab. 4
Lounovice: Bodenkundliche Merkmale

Die Höhe über NN beträgt 437 m. Das Gelände ist eben und wird als Garten bzw. Obstwiese genutzt.

Abbildung 12 zeigt eine Skizze der Messfläche mit Teilflächen und Messpunkten.

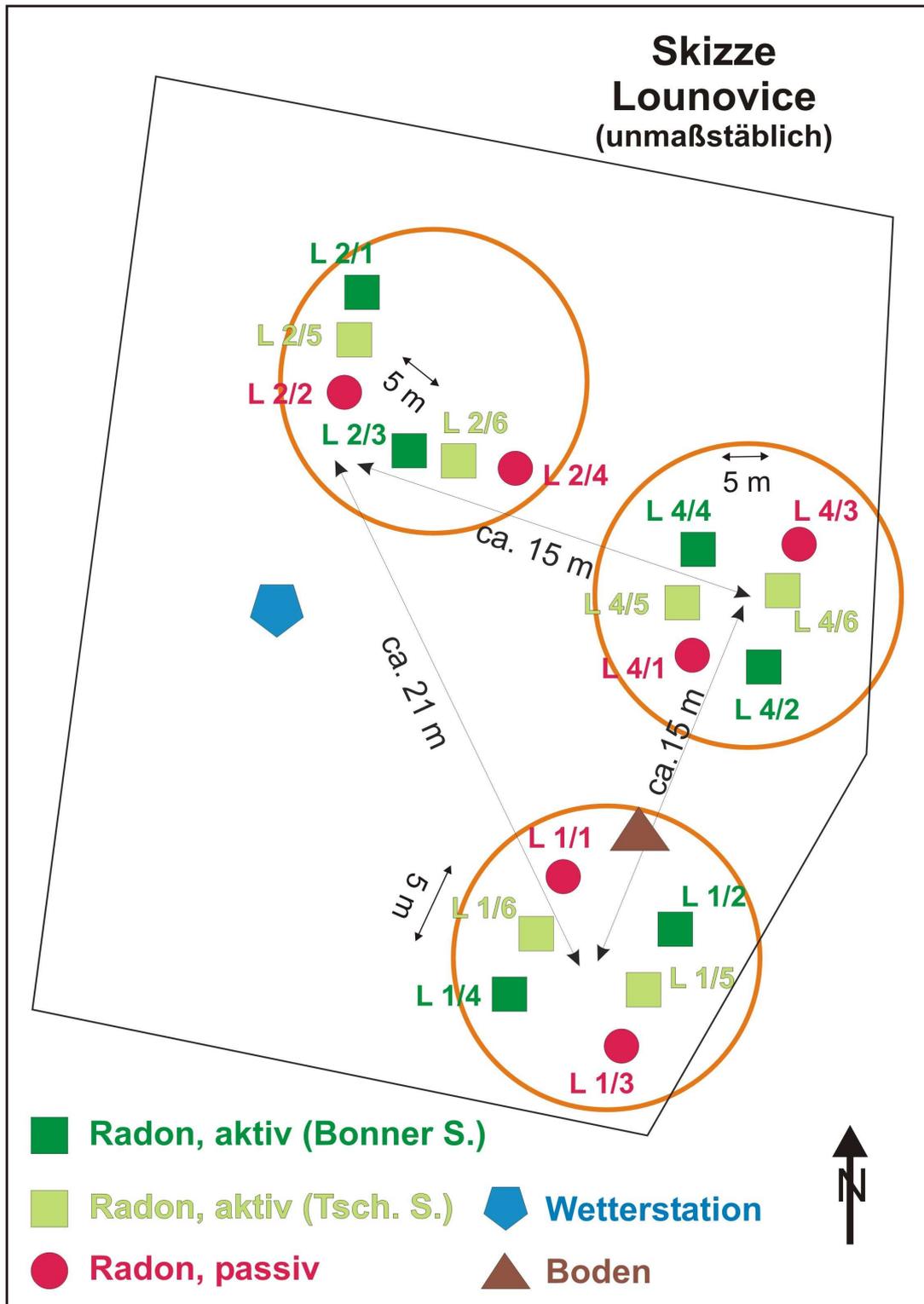


Abb. 12
Lounovice: Skizze der Messfläche mit Teilflächen und Messpunkten

6. Feldmessungen

Die Messungen auf den drei Messflächen begannen Mitte Mai 2010 und waren gemäß der einjährigen Dauer der Messreihe im Mai 2011 abgeschlossen. Der Zeitplan der Messungen ist Tabelle 5 zu entnehmen.

Feldmessungen										
Nr.	Messdorfer Feld/Burg Ledé				Tage	Lounovice				
	Beprobung am	Detektoren von		bis		Beprobung am	Detektoren von		bis	Tage
1	18.05.2010	18.05.2010	-	01.06.2010	14	19.05.2010	19.05.2010	-	02.06.2010	14
2	01.06.2010	01.06.2010	-	15.06.2010	14	02.06.2010	02.06.2010	-	16.06.2010	14
3	15.06.2010	15.06.2010	-	29.06.2010	14	16.06.2010	16.06.2010	-	30.06.2010	14
4	29.06.2010	29.06.2010	-	13.07.2010	14	30.06.2010	30.06.2010	-	14.07.2010	14
5	13.07.2010	13.07.2010	-	28.07.2010	15	14.07.2010	14.07.2010	-	28.07.2010	14
6	28.07.2010	28.07.2010	-	11.08.2010	14	28.07.2010	28.07.2010	-	11.08.2010	14
7	11.08.2010	11.08.2010	-	24.08.2010	13	11.08.2010	11.08.2010	-	25.08.2010	14
8	24.08.2010	24.08.2010	-	03.09.2010	10	25.08.2010	25.08.2010	-	08.09.2010	14
9	03.09.2010	03.09.2010	-	17.09.2010	14	08.09.2010	08.09.2010	-	22.09.2010	14
10	17.09.2010	17.09.2010	-	05.10.2010	18	22.09.2010	22.09.2010	-	06.10.2010	14
11	05.10.2010	05.10.2010	-	19.10.2010	14	06.10.2010	06.10.2010	-	20.10.2010	14
12	19.10.2010	19.10.2010	-	02.11.2010	14	20.10.2010	20.10.2010	-	03.11.2010	14
13	02.11.2010	02.11.2010	-	16.11.2010	14	03.11.2010	03.11.2010	-	17.11.2010	14
14	16.11.2010	16.11.2010	-	30.11.2010	14	17.11.2010	17.11.2010	-	01.12.2010	14
15	30.11.2010	30.11.2010	-	14.12.2010	14	01.12.2010	01.12.2010	-	15.12.2010	14
16	14.12.2010	14.12.2010	-	28.12.2010	14	15.12.2010	15.12.2010	-	29.12.2010	14
17	28.12.2010	28.12.2010	-	11.01.2011	14	29.12.2010	29.12.2010	-	12.01.2011	14
18	11.01.2011	11.01.2011	-	25.01.2011	14	12.01.2011	12.01.2011	-	26.01.2011	14
19	25.01.2011	25.01.2011	-	08.02.2011	14	26.01.2011	26.01.2011	-	09.02.2011	14
20	08.02.2011	08.02.2011	-	22.02.2011	14	09.02.2011	09.02.2011	-	23.02.2011	14
21	22.02.2011	22.02.2011	-	08.03.2011	14	23.02.2011	23.02.2011	-	09.03.2011	14
22	08.03.2011	08.03.2011	-	22.03.2011	14	09.03.2011	09.03.2011	-	23.03.2011	14
23	22.03.2011	22.03.2011	-	05.04.2011	14	23.03.2011	23.03.2011	-	06.04.2011	14
24	05.04.2011	05.04.2011	-	19.04.2011	14	06.04.2011	06.04.2011	-	20.04.2011	14
25	19.04.2011	19.04.2011	-	03.05.2011	14	20.04.2011	20.04.2011	-	04.05.2011	14
26	03.05.2011	03.05.2011	-	17.05.2011	14	04.05.2011	04.05.2011	-	18.05.2011	14
27	17.05.2011					18.05.2011				

Tab. 5
Zeitplan der Messungen

6.1 Sichtung der Messwerte: Plausibilitätsprüfung

Nach Abschluss aller Feldmessungen und vor der Analyse der Daten erfolgte eine Überprüfung und detaillierte Sichtung der erhobenen Messwerte mit einer umfangreichen Plausibilitätsprüfung.

Für einige Beprobungszeiten liegen keine Messwerte vor. Gründe für die fehlenden Daten sind im Einzelnen:

- Eine Bodenluftentnahme war nicht möglich, weil beispielsweise der Eintrittsbereich für die Bodenluft an der Sondenspitze verschlossen war (Bezeichnung „dicht“ in Ergebnistabellen in Anhang 1).
- Während der Probenahme kam es zu einer Kontamination mit Atmosphärenluft (Bezeichnung „kontaminiert“ in Ergebnistabellen in Anhang 1).
- Beim Entfernen der Detektoren aus der Halterung wurde diese nachhaltig beschädigt, so dass eine Auswertung im Labor nicht mehr möglich war (Bezeichnung „defekt.“ in Ergebnistabellen in Anhang 1).
- Bei der Prüfung der Messeinrichtung der Kernspurdetektoren nach Messende stellte sich heraus, dass diese Schäden und Undichtigkeiten an Filmdose und/oder Rohralterung aufwiesen, wodurch ein unkontrollierter Luftzutritt zum eigentlichen Detektor erfolgen konnte (Bezeichnung „undicht“ in Ergebnistabellen in Anhang 1).
- Zeitweise kam es zu einem technisch bedingten Ausfall der Wetterstation bzw. der Bodensensoren, so dass nicht durchgängig alle meteorologischen und/oder bodenphysikalischen Daten vorliegen. In Burg Ledé fehlen Daten vom 20.1. – 1.2.2011 (nur Bodentemperatur und -feuchte) sowie vom 5. – 19.4.2011, in Messdorf vom 19. – 30.4.2011 und in Lounovice vom 25. – 31.8.2010.

6.2 Kurzzeitmessungen mit Lucas-Zellen: Qualitätssicherung

Zur Qualitätssicherung wurden bei jeder Probenahme zwei Bodenluftproben (Lucas-Zellen) genommen und untersucht (s. Kap. 4.2). Die gegeneinander aufgetragenen Ergebnisse, unterschieden nach Messfläche, zeigt Abbildung 13.

Die Übereinstimmung der Doppelmessungen ist sehr gut. Das Bestimmtheitsmaß R^2 liegt für Burg Ledé bei 0,88, für das Messdorfer Feld bei 0,85 und für Lounovice bei 0,97.

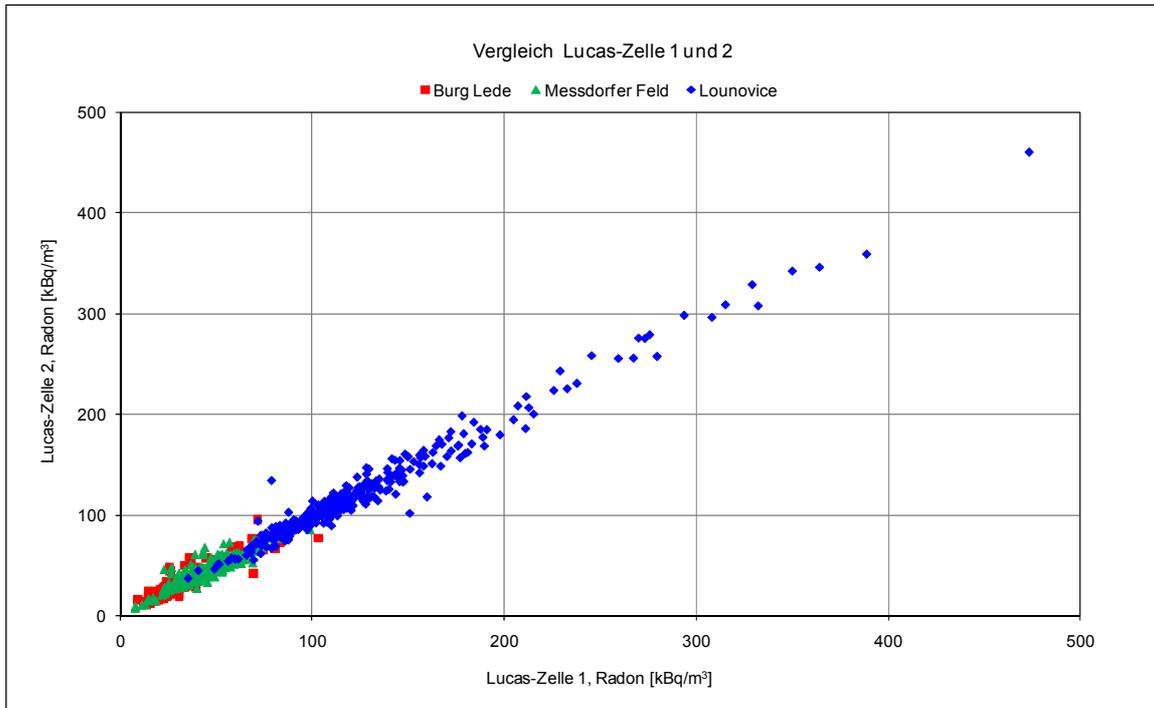


Abb. 13

Vergleich der Messwerte der Doppelmessungen mit Lucas-Zellen

7. Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen

Im Folgenden werden zunächst für jede Messfläche die wichtigsten Messergebnisse (Bodenphysik, Radon, Meteorologie) in beschreibender Form präsentiert. Vergleichbare Daten werden in identischer Weise in unterschiedlichen Standarddarstellungen (z.B.: Graphiken, Tabellen, Zeitreihen) zusammengefasst. In den Darstellungen nicht berücksichtigte Messwerte finden sich in Anhang 1.

Die in den nachfolgenden Tabellen aufgeführten Gasdurchlässigkeiten wurden stets im Labor an tiefenabhängig entnommenen Stechzylindern gemessen (s. Kap. 4.3), sie können daher von den Werten der Feldmessungen auf den Messflächen abweichen.

7.1 Burg Lede

Die Radionuklidaktivitäten und bodenphysikalischen Parameter (Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Porosität, Gasdurchlässigkeit) in jeweils 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m sowie Emanationskoeffizient (jeweils in 1,0 m Tiefe) sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

		Burg Lede		
		0,5 m	1,0 m	1,5 m
Radionuklidaktivitäten				
Ra-226	Bq/kg	29	16	17
Ra-228	Bq/kg	39	25	30
K-40	Bq/kg	502	473	481
Bodenphysik				
Lagerungsdichte, trocken	g/cm ³	1,7	1,5	1,7
Dichte Festsubstanz	g/cm ³	2,4	2,4	2,5
Porosität	%	33	37	32
Gasdurchlässigkeit	m ²	3,5E-12	4,4E-12	3,5E-13
Wasseranteil am Porenvol.	%	80	68	81
Emanationskoeffizient trocken	%	40	50	49

Tab. 6

Burg Lede: Radionuklidaktivitäten und bodenphysikalische Kennwerte

Die Radionuklidaktivitäten in 1,0 m Tiefe entsprechen den aus vergleichbaren Terrassenablagerungen bekannten Werten und sind daher erwartungsgemäß niedrig. Dichten und Porosität sind im erwarteten Spektrum solcher Böden; gleiches gilt für die Gasdurchlässigkeit, die als gut und im unteren Profilteil als mäßig zu bewerten ist. Der Emanationskoeffizient liegt bei ca. 50 % und damit in einem Bereich, der in feinkörnigen fluviatilen Sedimenten mit einem ca. 10 %igen Tonanteil (s.u.) zu erwarten ist.

Die Ergebnisse der Korngrößenanalysen sind in Abb. 14 dargestellt. Deutlich sind Unterschiede in den verschiedenen Tiefenniveaus zu erkennen. Oberflächennah (0,5 m Tiefe) stellt die Feinfraktion (i.W. Schluff) den größten Anteil (ca. 70 %), entsprechend dem Vorhandensein alluvialer Schwemmlerme mit geringfügigen Lössanteilen. In den beiden tieferen Niveaus (1,0 und 1,5 m Tiefe) mit Schwemmsanden bilden Fein- und Mittelsande mit ca. 70 % den größten Anteil am Kornspektrum; jeweils ergänzt um eine entsprechende Schlufffraktion.

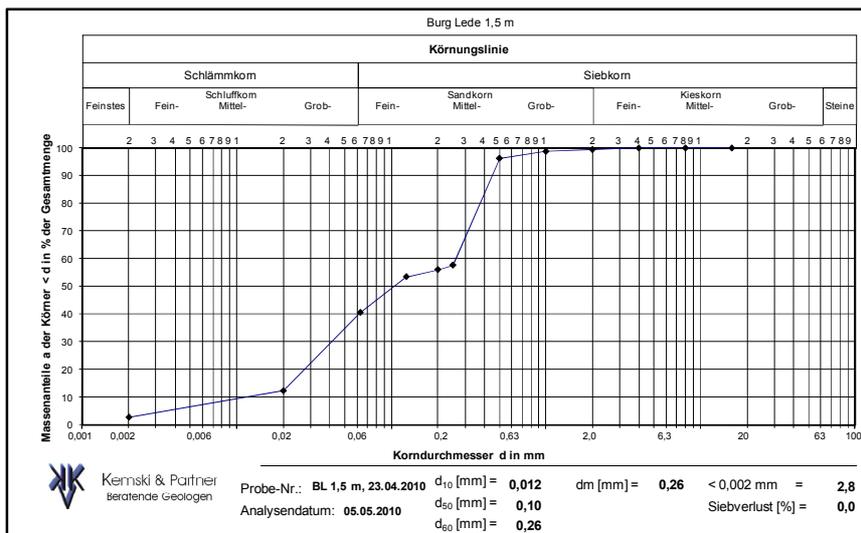
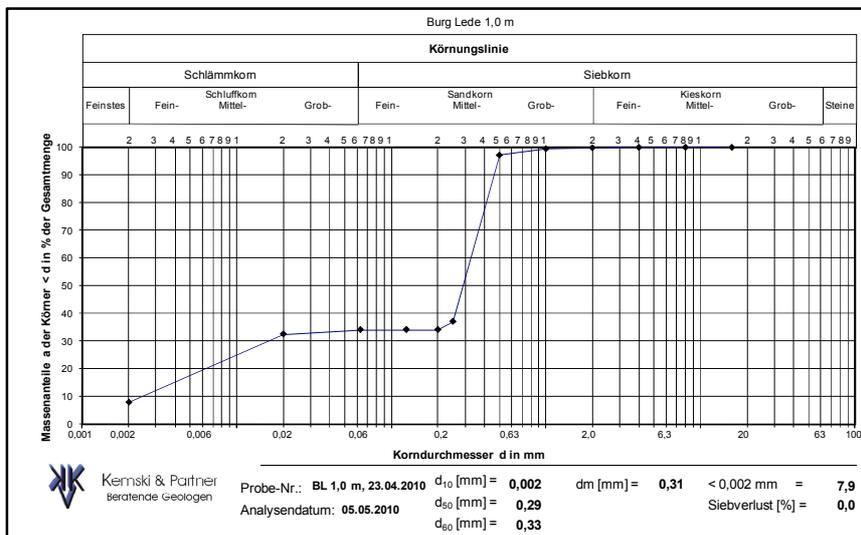
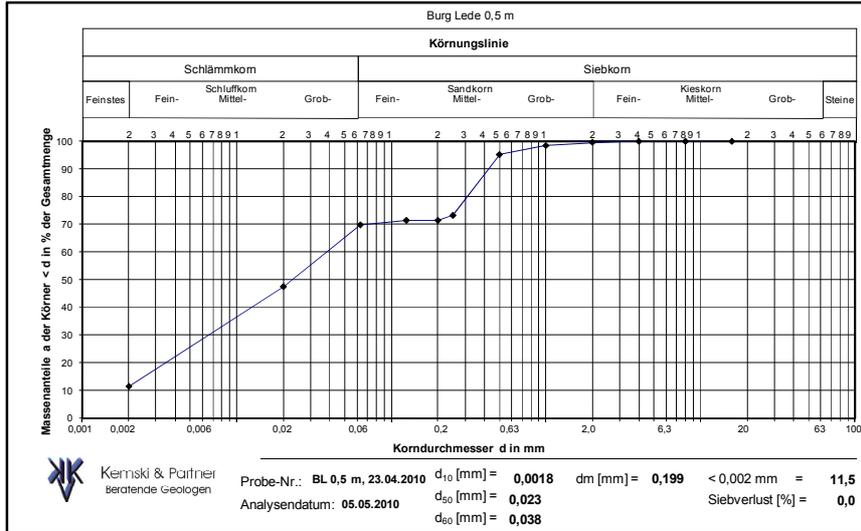


Abb. 14
Burg Lede: Körnungslinien (oben: 0,5 m, Mitte: 1,0 m, unten: 1,5 m Tiefe)

7.2 Messdorfer Feld

Die Radionuklidaktivitäten und bodenphysikalischen Parameter (Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Porosität, Gasdurchlässigkeit) in jeweils 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m sowie Emanationskoeffizient (jeweils in 1,0 m Tiefe) sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

		Messdorfer Feld		
		0,5 m	1,0 m	1,5 m
Radionuklidaktivitäten				
Ra-226	Bq/kg	35	40	37
Ra-228	Bq/kg	43	36	41
K-40	Bq/kg	561	408	312
Bodenphysik				
Lagerungsdichte, trocken	g/cm ³	1,5	1,6	1,6
Dichte Festsubstanz	g/cm ³	2,3	2,3	2,5
Porosität	%	41	41	42
Gasdurchlässigkeit	m ²	2,3E-12	8,3E-13	1,4E-12
Wasseranteil am Porenvol.	%	78	80	91
Emanationskoeffizient trocken	%	58	22	24

Tab. 7

Messdorfer Feld: Radionuklidaktivitäten und bodenphysikalische Kennwerte

Die Radionuklidaktivitäten in 1,0 m Tiefe als durchschnittlich zu bewerten und entsprechen den aus vergleichbaren Lössablagerungen bekannten Werten. Dichten und Porosität sind im erwarteten Spektrum solcher Böden. Die Gasdurchlässigkeit ist im gesamten Profil sehr einheitlich und als mäßig bis gut einzustufen. Der Emanationskoeffizient mit ca. 20 bis 25 % ist für Böden der vorliegenden Genese (Löss mit hohem Quarzanteil) und Körnung (s.u.) nicht ungewöhnlich.

Die Ergebnisse der Korngrößenanalysen sind in Abb. 15 dargestellt.

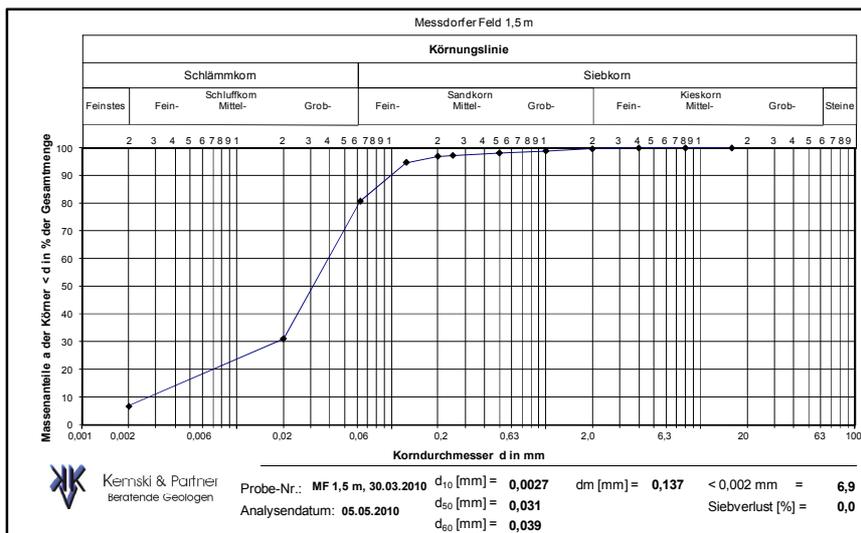
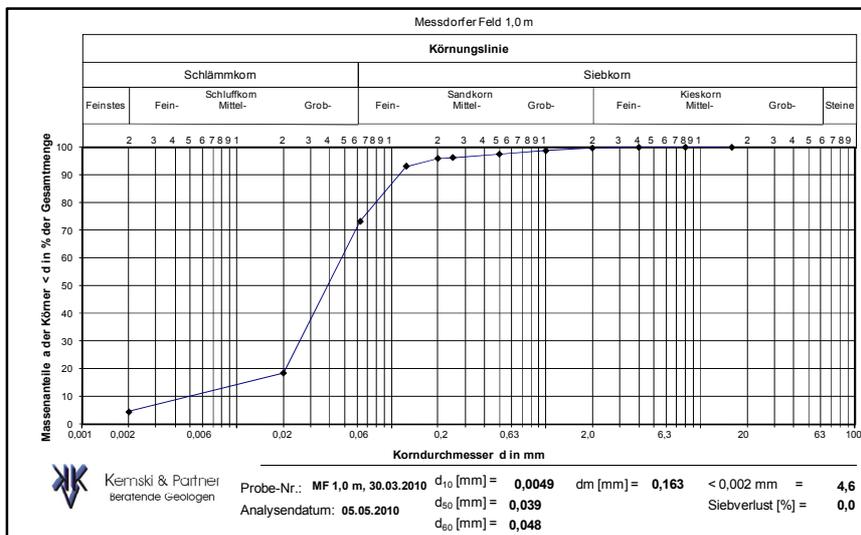
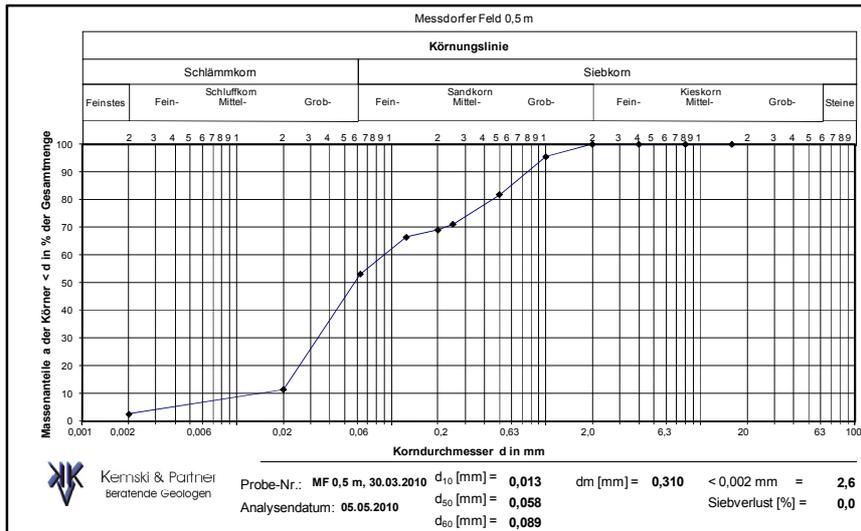


Abb. 15
 Messdorfer Feld: Körnungslinien (oben: 0,5 m, Mitte: 1,0 m, unten: 1,5 m Tiefe)

Hierbei handelt es sich um Lössprofil mit nur geringen Unterschieden in den Körnungslinien der verschiedenen Tiefen. Der Hauptteil des Kornspektrums (ca. 70 bis 80 %) wird durch die Grobschluff- und Feinsandfraktion gebildet. Im oberen Teil des Profils tritt ein etwas höherer Anteil an Mittel- und Grobsanden hinzu, bedingt durch jüngere Bodenbildungsprozesse und/oder anthropogene Beeinflussung (z.B.: Durchpflügung).

7.3 Lounovice

Die Radionuklidaktivitäten und bodenphysikalischen Parameter (Korngrößenverteilung, Lagerungsdichte, Porosität, Gasdurchlässigkeit) in jeweils 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m sowie Emanationskoeffizient (jeweils in 1,0 m Tiefe) sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

		Lounovice		
		0,5 m	1,0 m	1,5 m
Radionuklidaktivitäten				
Ra-226	Bq/kg	67	75	70
Ra-228	Bq/kg	163	143	184
K-40	Bq/kg	1536	1481	1463
Bodenphysik				
Lagerungsdichte, trocken	g/cm ³	1,5	1,7	1,8
Dichte Festsubstanz	g/cm ³	2,6	2,4	2,4
Porosität	%	41	36	34
Gasdurchlässigkeit	m ²	5,0E-12	3,7E-12	4,7E-13
Wasseranteil am Porenvol.	%	52	57	91
Emanationskoeffizient trocken	%	21	26	21

Tab. 8

Lounovice: Radionuklidaktivitäten und bodenphysikalische Kennwerte

Die Radium- bzw. Uranaktivitäten in 1,0 m Tiefe sind für Granite bzw. deren unmittelbare Verwitterungsprodukte eher als unterdurchschnittlich, die Thoriumaktivitäten dagegen als eher erhöht anzusehen. Dichten und Porosität sind im erwarteten Spektrum solcher Böden. Die Gasdurchlässigkeit ist im oberen Teil des Profils gut, in 1,5 m Tiefe nimmt sie ab und ist als mäßig zu bewerten. Der Emanationskoeffizient mit ca. 25 % kann für Böden erwartet werden, die einen höheren Sand- und Grobkornanteil aufweisen (s.u.).

Die Ergebnisse der Korngrößenanalysen sind in Abb. 16 dargestellt. In Lounovice sind die Körnungslinien in den drei Tiefen einander sehr ähnlich. Im Vergleich zu den beiden anderen Messflächen ist die Verteilung wesentlich breiter und umfasst nahezu den gesamten Bereich des Korngrößenspektrums vom Schluff bis zum Mittelkies. Diese Verteilungen bilden sehr gut einen tiefgründigen und einheitlichen Verwitterungsboden über einem Granit ab, in dem sich sowohl bereits sehr feinkörniges Zersetzungs- und Umwandlungsmaterial als auch noch grobkörnige und weitgehend unzersetzte Granitrückstände finden.

8. Auswertung

8.1 Vorgehensweise

In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen der Auswertung sind die Einzeldaten der Messungen auf den verschiedenen Mess- und Teilflächen und an den unterschiedlichen Pegeln wie folgt stets einheitlich benannt (Abb. 17):

- Bezeichnung der Messfläche
 - BL: Burg Lede
 - MF: Messdorfer Feld
 - Lou: Lounovice
- beprobter Pegel
 - Bonner Pegel: Kurzzeitmessung mit Bonner Sonde (Kürzel **a**)
 - Tschechischer Pegel: Kurzzeitmessung mit Tschechischer Sonde (nur Lounovice; Kürzel **acz**)
 - Exposimeterpegel: Kurzzeitmessung mit Bonner Sonde in Pegeln, in denen Kernspurdetektoren exponiert wurden (Kürzel **pa**)
 - Kernspurdetektoren: integrierende Messung mit Kernspurdetektoren (Kürzel **p**)
 - Zusatzkürzel **G**: Messung der Gasdurchlässigkeit; **pG**: Mittelwert der Gasdurchlässigkeit bei Messbeginn und -ende der jeweils zweiwöchigen Detektorexpositionszeit

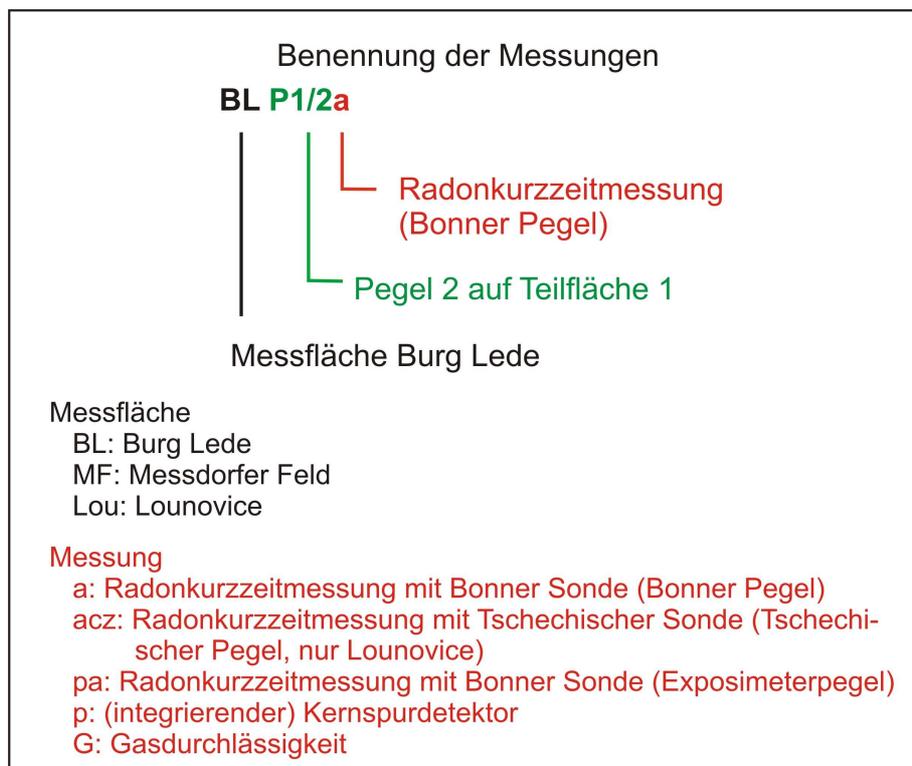


Abb. 17
 Beispiel zum Schema der Benennung von Messungen in Tabellen und Graphiken

Alle im Vorhaben über den einjährigen Messzeitraum erhobenen Einzeldaten (Radon, Gasdurchlässigkeit, Meteorologie, Bodenphysik) wurden für Auswertung zusammengefasst, um Abhängigkeiten, Korrelationen und Zeitgänge erkennen und bewerten zu können. Neben Tabellen und Graphik in Form von Ganglinien und Spannweiten- bzw. Boxplotdiagrammen wurden auch Zeitreihenanalysen durchgeführt.

In Tabelle 9 und 10 sind die Parameter, getrennt für Kurzzeitmessungen und integrierenden Messungen (Kernspurdetektoren), aufgeführt. In Anhang 2 ist diese Kurzdarstellung um ausführliche Erläuterungen (u.a. Kriterien für eine Zusammenfassung bzw. Berechnung) ergänzt.

Die Probenahme für die Radonkurzzeitmessungen erfolgte stets tagsüber. Für die vergleichende Betrachtung mit den kontinuierlich erhobenen meteorologischen und bodenphysikalischen Parametern (z.B.: Luft-, Bodentemperatur) wurde deren jeweiliger Mittelwert zwischen 10:00 und 21:59 Uhr gebildet und verwendet. In Darstellungen werden die Messwerte von Kurzzeitmessungen auf den Tag der Probenahme bezogen. Die integrierenden Radonmessungen erfolgten über einen Zeitraum von jeweils ca. 14 Tagen; die Messgeräte waren während der gesamten Zeit im Boden exponiert. Daher wurde hier für die o.g. vergleichende Betrachtung mit den meteorologischen und bodenphysikalischen Parametern deren jeweiliger Mittelwert über die 14 Tage gebildet und verwendet. In Darstellungen werden die Messwerte integrierender Messungen auf den Tag in der Mitte zwischen Messbeginn und Messende bezogen.

Kurzzeitmessungen			
Parameter	Abkürzung	Inhalt	Einheit
1	Datum	Datum der Probenahme	---
2	Tag	fortlaufender Tag seit Messbeginn (Tag 0: 18.5.2010)	---
3	Saison	Unterscheidung Sommer (Mai - Oktober) - Winter (November - April)	---
4	Lufttemperatur	Lufttemperatur (Tag)	°C
5	Lufttemperatur, Differenz Tag-Tag	Mittelwertdifferenz Lufttemperatur (Tag) (Messtag - Messtag(-1))	°C
6	Lufttemperatur, Differenz Tag-Nacht	Mittelwertdifferenz Lufttemperatur (Messtag (Tag) - Messtag (Nacht(-1)))	°C
7	Luftfeuchte	Luftfeuchte	rel. %
8	Windgeschwindigkeit	Windgeschwindigkeit	m/s
9	Windrichtung	Windrichtung	---
10	höchste Windgeschwindigkeit	Mittelwert der stündlichen Höchstwerte der Windgeschwindigkeiten	m/s
11	Luftdruck	Luftdruck	bar
12	Luftdruck, Differenz Tag-Nacht	Mittelwertdifferenz Luftdruck (Messtag (Tag) - Messtag (Nacht))	bar
13	Niederschlag Summe	Niederschlagsmenge	mm
14	Niederschlag (24 h)	Niederschlagsmenge (vorausgegangene 24 h, Bezugszeit: 14:00 Uhr)	mm
15	Niederschlag (48 h)	Niederschlagsmenge (vorausgegangene 48 h, Bezugszeit: 14:00 Uhr)	mm
16	Niederschlag (72 h)	Niederschlagsmenge (vorausgegangene 72 h, Bezugszeit: 14:00 Uhr)	mm
17	Niederschlagsrate	Niederschlagsrate	mm/h
18	Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe	Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe	centibar
19	Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe	Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe	centibar
20	Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe	Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe	centibar
21	Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe	Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe	°C
22	Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe	Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe	°C
23	Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe	Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe	°C
1. Messfläche, 1. Messpunkt			
24	Probenahmestelle 1/1 (Bonner Pegel)	P1/1a Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
25	Probenahmestelle 1/2 (Bonner Pegel)	P1/2a Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
26	Probenahmestelle 1 (Bonner Pegel)	P1aAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
27	Probenahmestelle 1/1 (Bonner Pegel)	P1/1aG Gasdurchlässigkeit	m ²
28	Probenahmestelle 1/2 (Bonner Pegel)	P1/2aG Gasdurchlässigkeit	m ²
29	Probenahmestelle 1 (Bonner Pegel)	P1aGAM arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
30	Probenahmestelle 1/3 (Exposimeterpegel)	P1/3pa Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
31	Probenahmestelle 1/4 (Exposimeterpegel)	P1/4pa Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
32	Probenahmestelle 1 (Exposimeterpegel)	P1paAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
1. Messfläche, 2. Messpunkt			
33	Probenahmestelle 2/1 (Bonner Pegel)	P2/1a Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
34	Probenahmestelle 2/2 (Bonner Pegel)	P2/2a Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
35	Probenahmestelle 2 (Bonner Pegel)	P2aAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
36	Probenahmestelle 2/1 (Bonner Pegel)	P2/1aG Gasdurchlässigkeit	m ²
37	Probenahmestelle 2/2 (Bonner Pegel)	P2/2aG Gasdurchlässigkeit	m ²
38	Probenahmestelle 2 (Bonner Pegel)	P2aGAM arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
39	Probenahmestelle 2/3 (Exposimeterpegel)	P2/3pa Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
40	Probenahmestelle 2/4 (Exposimeterpegel)	P2/4pa Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
41	Probenahmestelle 2 (Exposimeterpegel)	P2paAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
1. Messfläche, 3. Messpunkt			
42	Probenahmestelle 3/1 (Bonner Pegel)	P3/1a Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
43	Probenahmestelle 3/2 (Bonner Pegel)	P3/2a Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
44	Probenahmestelle 3 (Bonner Pegel)	P3aAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
45	Probenahmestelle 3/1 (Bonner Pegel)	P3/1aG Gasdurchlässigkeit	m ²
46	Probenahmestelle 3/2 (Bonner Pegel)	P3/2aG Gasdurchlässigkeit	m ²
47	Probenahmestelle 3 (Bonner Pegel)	P3aGAM arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
48	Probenahmestelle 3/3 (Exposimeterpegel)	P3/3pa Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
49	Probenahmestelle 3/4 (Exposimeterpegel)	P3/4pa Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
50	Probenahmestelle 3 (Exposimeterpegel)	P3paAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
1. Messfläche			
51	Probenahmestelle 1 - 3 (Bonner Pegel)	aAM arithmetischer Mittelwert Kurzzeitmessung Radon	kBq/m ³
52	Probenahmestelle 1 - 3 (Bonner Pegel)	aGAM arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
Zeilen 24 - 52 analog für 2. und 3. Messfläche			

Tab. 9
Erhobene Parameter bei Kurzzeitmessungen (ausführliche Erläuterungen s. Anhang 1)

integrierende Messungen (Kernspurdetektoren)			
Parameter	Abkürzung	Inhalt	Einheit
1 Datum	Datum	mittleres Datum zwischen Expositionsbeginn und -ende	---
2 Tag	Tag	fortlaufender Tag seit Messbeginn (Tag 0: 18.5.2010)	---
3 Saison	Sai	Unterscheidung Sommer (Mai - Oktober) - Winter (November - April)	---
4 Lufttemperatur, Mittelwert	LT Mittel	Lufttemperatur (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
5 Lufttemperatur, Maximum	LT Max	Lufttemperatur (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
6 Lufttemperatur, Minimum	LT Min	Lufttemperatur (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
7 Luftfeuchte, Mittelwert	LF Mittel	Luftfeuchte (mittleres Datum +- 7 Tage)	rel. %
8 Luftfeuchte, Minimum	LF Min	Luftfeuchte (mittleres Datum +- 7 Tage)	rel. %
9 Windgeschwindigkeit, Mittelwert	LW Mittel	Windgeschwindigkeit (mittleres Datum +- 7 Tage)	m/s
10 Windgeschwindigkeit, Maximum	LW Max	Windgeschwindigkeit (mittleres Datum +- 7 Tage)	m/s
11 Windrichtung	LWr	Windrichtung	---
12 höchste Windgeschwindigkeit, Mittelwert	LWmax Mittel	Mittelwert der stündlichen Höchstwerte der Windgeschwindigkeiten (+- 7 Tage)	m/s
13 höchste Windgeschwindigkeit, Maximum	LWmax Max	Maximum der stündlichen Höchstwerte der Windgeschwindigkeiten (+- 7 Tage)	m/s
14 Luftdruck, Mittelwert	LD Mittel	Luftdruck (mittleres Datum +- 7 Tage)	bar
15 Luftdruck, Maximum	LD Max	Luftdruck (mittleres Datum +- 7 Tage)	bar
16 Luftdruck, Minimum	LD Min	Luftdruck (mittleres Datum +- 7 Tage)	bar
17 Niederschlag Summe	LR	Niederschlagsmenge (mittleres Datum +- 7 Tage)	mm
18 Niederschlag Maximum	LR Max	stärkstes Niederschlagsereignis (mittleres Datum +- 7 Tage)	mm
19 Niederschlagsrate, Mittelwert	LRr Mittel	Niederschlagsrate (mittleres Datum +- 7 Tage)	mm/h
20 Niederschlagsrate, Maximum	LRr Max	Niederschlagsrate (mittleres Datum +- 7 Tage)	mm/h
21 Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe Mittelwert	BF05 Mittel	Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
22 Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe Maximum	BF05 Max	Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
23 Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe Minimum	BF05 Min	Bodenfeuchte, 0,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
24 Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe Mittelwert	BF10 Mittel	Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
25 Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe Maximum	BF10 Max	Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
26 Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe Minimum	BF10 Min	Bodenfeuchte, 1,0 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
27 Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe Mittelwert	BF15 Mittel	Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
28 Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe Maximum	BF15 Max	Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
29 Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe Minimum	BF15 Min	Bodenfeuchte, 1,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	centibar
30 Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe Mittelwert	BT05 Mittel	Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
31 Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe Maximum	BT05 Max	Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
32 Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe Minimum	BT05 Min	Bodentemperatur, 0,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
33 Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe Mittelwert	BT10 Mittel	Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
34 Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe Maximum	BT10 Max	Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
35 Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe Minimum	BT10 Min	Bodentemperatur, 1,0 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
36 Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe Mittelwert	BT15 Mittel	Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
37 Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe Maximum	BT15 Max	Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
39 Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe Minimum	BT15 Min	Bodentemperatur, 1,5 m Tiefe (mittleres Datum +- 7 Tage)	°C
1. Messfläche, 1. Messpunkt			
40 Probenahmestelle 1/3 (Exposimeterpegel)	P1/3p	integrierende Radonmessung	kBq/m ³
41 Probenahmestelle 1/4 (Exposimeterpegel)	P1/4p	integrierende Radonmessung	kBq/m ³
42 Probenahmestelle 1 (Exposimeterpegel)	P1pAM	arithmetischer Mittelwert integrierende Radonmessung	kBq/m ³
43 Probenahmestelle 1 (Exposimeterpegel)	P1pGAM	arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
1. Messfläche, 2. Messpunkt			
44 Probenahmestelle 2/3 (Exposimeterpegel)	P2/3p	integrierende Radonmessung	kBq/m ³
45 Probenahmestelle 2/4 (Exposimeterpegel)	P2/4p	integrierende Radonmessung	kBq/m ³
46 Probenahmestelle 2 (Exposimeterpegel)	P2pAM	arithmetischer Mittelwert integrierende Radonmessung	kBq/m ³
47 Probenahmestelle 2 (Exposimeterpegel)	P2pGAM	arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
1. Messfläche, 3. Messpunkt			
48 Probenahmestelle 3/3 (Exposimeterpegel)	P3/3p	integrierende Radonmessung	kBq/m ³
49 Probenahmestelle 3/4 (Exposimeterpegel)	P3/4p	integrierende Radonmessung	kBq/m ³
50 Probenahmestelle 3 (Exposimeterpegel)	P3pAM	arithmetischer Mittelwert integrierende Radonmessung	kBq/m ³
51 Probenahmestelle 3 (Exposimeterpegel)	P3pGAM	arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
1. Messfläche			
52 Probenahmestelle 1 - 3 (Exposimeterpegel)	pAM	arithmetischer Mittelwert integrierende Radonmessung	kBq/m ³
53 Probenahmestelle 1 - 3 (Exposimeterpegel)	pGAM	arithmetischer Mittelwert Gasdurchlässigkeit	m ²
Zeilen 40 - 53 analog für 2. und 3. Messfläche			

Tab. 10

Erhobene Parameter bei integrierenden Messungen mit Kernspurdetektoren
(ausführliche Erläuterungen s. Anhang 1)

8.2 Zeitreihenanalysen

8.2.1 Periodogramme

Zunächst wurden Zeitreihenanalysen der verschiedenen Radonmessreihen zur Herausfilterung charakteristischer, statistisch signifikanter Periodizitäten im Radonsignal, um Abhängigkeiten von meteorologischen und bodenphysikalischen Schwankungen zu erkennen und ggf. Hinweise auf steuernde Einflüsse zu erhalten. Hierzu wurde das online-Rechenprogramm „*Periodogram*“ der NASA Star and Exoplanet Database (NStED) verwendet (<http://nsted.ipac.caltech.edu/periodogram/cgi-bin/Periodogram/nph-simpleupload>; zuletzt besucht am 22.9.2011).

Periodogramme werden berechnet, um periodische Signale von Zeitreihendaten zu identifizieren. Die Berechnung eines Periodogramms ähnelt einer Fourier-Transformation, wobei die Eingabedaten aus der Zeitdomäne in die Frequenzdomäne transformiert werden. Die einer bestimmten Frequenz zugeordnete Leistung zeigt die Stärke (*power*) eines sich wiederholenden Signals in den Daten an.

Das verwendete Rechenprogramm gibt als Periodogramm die spektrale Leistungsdichte als Funktion der Frequenz aus, ferner eine Tabelle der Signifikanz der Maxima mit den dazugehörigen Irrtumswahrscheinlichkeiten. Es handelt sich dabei um eine Least-Squares-Spektralanalyse (LSSA), eine Methode zur Schätzung von Frequenzspektren durch Anpassung von Sinusoiden (Sinus- und Cosinusfunktionen) an Daten von Zeitreihen auf der Basis der kleinsten Quadrate, auch Lomb-Scargle-Methode genannt (Lomb 1976, Scargle 1982). Sie eignet sich, anders als die klassische Fast-Fourier-Transformation (FFT), für nicht gleichmäßig verteilte, lückenhafte Zeitreihen, so wie sie typischerweise im Forschungsvorhaben vorliegen. Zunächst für die Analyse astronomischer Daten eingesetzt, hat das Verfahren inzwischen Anwendung in mehreren Gebieten der Geowissenschaften gefunden (Schulz & Mudelsee 2002, Thiess 2009).

In den Beschreibungen zu den entsprechenden Abbildungen werden stets nur signifikante bzw. hoch signifikante Zusammenhänge ($p < 0,05$: signifikant; $p < 0,01$: hoch signifikant) erläutert. Oftmals zeigen die Periodogramme nicht signifikante Zyklen. In einigen Fällen spiegelt sich möglicherweise als Artefakt der Beprobungszyklus (ca. 28 Tage) wider. Grundsätzlich ist ein einziger Jahreszyklus aber nicht ausreichend lang, um Zufälligkeiten und Artefakte ausschließen zu können.

8.2.2 Korrelationsberechnungen

Des Weiteren wurden Korrelationen zur Prüfung der Zusammenhänge zwischen den erhobenen Parametern bestimmt. Hierbei wurde mit Hilfe des Programmes Statistica der Pearson-Korrelationskoeffizient für ein 5 %-Signifikanzniveau berechnet.

9. Ergebnisse der Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft sowie der meteorologischen und bodenphysikalischen Parameter

9.1 Pearson-Korrelationen

Die Ergebnisse der Korrelationsberechnungen (5 %-Signifikanzniveau) sind nachfolgend tabellarisch zusammengestellt, getrennt nach Kurzzeitmessungen und integrierenden Messungen (Burg Lede: Tab. 11 und 12, Messdorfer Feld: Tab. 13 und 14, Lounovice: Tab. 15 und 16). Positive Korrelationen sind orange unterlegt, negative Korrelationen blau. Lieferten die Korrelationsberechnungen ein nicht signifikantes Ergebnis, ist das Feld ohne Eintrag.

Für Kurzzeitmessungen sind auf den Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld vergleichbare Korrelationen in vergleichbarer Häufigkeit zu beobachten, in Lounovice existieren in weitaus weniger Fällen Beziehungen zwischen den verschiedenen Messgrößen.

Für die integrierende Messungen mit Kernspurdetektoren gilt ähnliches, wenn auch die Korrelationen oftmals das entgegengesetzte Vorzeichen besitzen.

Burg Lede

		Saison	LT	LF	LD	LR24	BF05	BF10	BF15	BT05	BT10	BT15
einzelne Bonner u. Expositimeterpegel	P1/2a		-0,60									
	P1/4a	0,65	-0,65		0,57	-0,49		-0,45	-0,46	-0,82	-0,84	-0,83
	P1/1pa	0,71	-0,64		0,62	-0,47			-0,48	-0,82	-0,85	-0,85
	P1/3pa		-0,70	0,53						-0,60	-0,52	
	P2/3a	0,62	-0,74		0,68	-0,46			-0,47	-0,81	-0,80	-0,81
	P2/4a	0,62	-0,60		0,72					-0,76	-0,77	-0,75
	P2/1pa	0,63	-0,71		0,52	-0,44		-0,60		-0,86	-0,88	-0,86
	P2/2pa											
	P3/2a	0,54	-0,57		0,70			-0,46	-0,60	-0,73	-0,78	-0,83
	P3/4a			-0,62	0,66			-0,44	-0,57	-0,48	-0,51	-0,56
	P3/1pa											
	P3/3pa		-0,44		0,64							
Bonner Pegel	P1a	0,69	-0,80		0,63	-0,49				-0,87	-0,82	-0,78
	P2a	0,64	-0,70		0,73	-0,45		-0,44	-0,46	-0,82	-0,82	-0,81
	P3a	0,46	-0,46	-0,55	0,70			-0,47	-0,60	-0,62	-0,66	-0,71
	a AM	0,63	-0,69		0,73	-0,44		-0,45	-0,50	-0,81	-0,81	-0,81
Exp.pegel	P1pa	0,70	-0,78		0,52	-0,44				-0,87	-0,86	-0,82
	P2pa	0,49	-0,69		0,59					-0,68	-0,61	-0,55
	P3pa				0,50							
	pa AM	0,57	-0,73		0,63					-0,71	-0,64	-0,57
		P1/2aG	P1/4aG	P2/3aG	P2/4aG	P3/2aG	P3/4aG	P1aG	P2aG	P3aG	aG AM	
einzelne Bonner u. Expositimeterpegel	P1/2a											
	P1/4a	-0,52	-0,47	-0,60	-0,53			-0,51	-0,58			-0,53
	P1/1pa	-0,46	-0,53	-0,62	-0,50		-0,45	-0,49	-0,57			-0,52
	P1/3pa											
	P2/3a			-0,56					-0,49			-0,44
	P2/4a			-0,52					-0,47			
	P2/1pa	-0,47	-0,50	-0,62	-0,52	-0,46	-0,51	-0,49	-0,59	-0,48	-0,54	
	P2/2pa		0,57					0,47				
	P3/2a	-0,57	-0,49	-0,67	-0,55	-0,55		-0,55	-0,62	-0,55	-0,60	
	P3/4a	-0,45		-0,49	-0,46	-0,48			-0,49	-0,48	-0,47	
	P3/1pa	0,48	0,57		0,45	0,45		0,52		0,46	0,47	
	P3/3pa											
Bonner Pegel	P1a			-0,51					-0,43			
	P2a			-0,56					-0,50			-0,44
	P3a	-0,52		-0,60	-0,52	-0,54		-0,49	-0,57	-0,53	-0,55	
	a AM	-0,44		-0,58	-0,45				-0,52			-0,47
Exp.pegel	P1pa			-0,58					-0,48			
	P2pa											
	P3pa		0,46									
	pa AM											

Tab. 11
 Burg Lede: Ergebnisse der Pearson-Korrelationen (5 %-Signifikanzniveau) für Bonner Pegel und Expositimeterpegel, Erläuterung der Abkürzungen: s. Kap. 8.1, Tab. 9

Burg Lede

		Saison	LT Mittel	LF Mittel	LW Mittel	LWr	LD Max	LR Sum.					
Einzelpegel	P1/1p												
	P1/3p	-0,65				-0,44	-0,55						
	P2/1p		0,52	-0,48			-0,53						
	P2/2p	-0,56			-0,60	-0,55							
	P3/1p				-0,49								
	P3/3p	-0,64	0,71			-0,44							
Kernspurdet	P1p			-0,50			-0,44						
	P2p	-0,54	0,43		-0,53		-0,54						
	P3p	-0,44			-0,47	-0,44	-0,50						
	p AM	-0,59	0,51			-0,46	-0,65						
		BF05 Mittel	BF10 Mittel	BF15 Mittel	BT05 Mittel	BT10 Mittel	BT15 Mittel	P1pG	P2pG	P4pG	pG AM		
Einzelpegel	P1/1p	0,58											
	P1/3p				0,49	0,49	0,46						
	P2/1p	0,47											
	P2/2p			0,45	0,47	0,52	0,53	0,46	0,44		0,45		
	P3/1p		0,70	0,51				0,58	0,51	0,63	0,57		
	P3/3p				0,78	0,75	0,69						
Kernspurdet	P1p	0,70											
	P2p				0,46	0,46	0,44						
	P3p		0,47	0,46	0,59	0,65	0,67	0,62	0,60	0,55	0,61		
	p AM	0,48			0,58	0,59	0,55		0,44				

Tab. 12

Burg Lede: Ergebnisse der Pearson-Korrelationen (5 %-Signifikanzniveau) für Kernspurdetektoren, Erläuterung der Abkürzungen: s. Kap. 8.1, Tab. 10

Messdorfer Feld

		Saison	LT	LF	LD	LR24	BF05	BF10	BF15	BT05	BT10	BT15
einzelne Bonner u. Expositimeterpegel	P1/3a	0,53	-0,68				-0,44			-0,66	-0,60	-0,49
	P1/4a	0,65	-0,77				-0,56	-0,53		-0,76	-0,71	-0,61
	P2/1a											
	P2/3a		-0,49			-0,49			-0,46	-0,59	-0,57	-0,56
	P3/2a		-0,56				-0,52	-0,47	-0,54	-0,62	-0,65	-0,67
	P3/4a	0,50	-0,62				-0,44			-0,65	-0,63	-0,60
	P1/1pa	0,65	-0,82				-0,59	-0,55		-0,83	-0,77	-0,68
	P1/2pa	0,60	-0,67				-0,47	-0,51		-0,74	-0,73	-0,67
	P2/2pa		-0,43									
	P2/4pa		-0,46									
	P3/1pa				0,44					-0,46	-0,44	-0,46
	P3/3pa		-0,47				-0,44			-0,62	-0,60	-0,59
Bonner Pegel	P1a	0,63	-0,77				-0,54	-0,50		-0,76	-0,70	-0,60
	P2a									-0,46	-0,45	-0,47
	P3a	0,46	-0,61				-0,50	-0,44	-0,46	-0,66	-0,66	-0,66
	a AM	0,47	-0,64				-0,44			-0,70	-0,68	-0,65
Exp.pegel	P1pa	0,64	-0,77				-0,55	-0,54		-0,81	-0,77	-0,70
	P2pa		-0,47									
	P3pa		-0,43							-0,59	-0,57	-0,58
	pa AM	0,46	-0,63							-0,66	-0,59	-0,53
		P1/3aG	P1/4aG	P2/1aG	P2/3aG	P3/2aG	P3/4aG	P1aG	P2aG	P3aG	aG AM	
einzelne Bonner u. Expositimeterpegel	P1/3a	-0,62							-0,45			
	P1/4a			-0,52		-0,58			-0,54	-0,48	-0,47	
	P2/1a											
	P2/3a			-0,47					-0,47			
	P3/2a			-0,58					-0,53		-0,45	
	P3/4a								-0,43			
	P1/1pa	-0,51		-0,57	-0,52	-0,57			-0,63	-0,47	-0,52	
	P1/2pa	-0,54		-0,58	-0,50	-0,51			-0,63	-0,46	-0,51	
	P2/2pa											
	P2/4pa		0,48									
	P3/1pa											
	P3/3pa											
Bonner Pegel	P1a	-0,55		-0,51		-0,47			-0,53			
	P2a		0,47									
	P3a			-0,53					-0,50			
	a AM	-0,48		-0,52					-0,52			
Exp.pegel	P1pa	-0,54		-0,59	-0,53	-0,56			-0,64	-0,48	-0,53	
	P2pa		0,45									
	P3pa											
	pa AM	-0,47	0,47									

Tab. 13
 Messdorfer Feld: Ergebnisse der Pearson-Korrelationen (5 %-Signifikanzniveau)
 für Bonner Pegel und Expositimeterpegel, Erläuterung der Abkürzungen: s. Kap.
 8.1, Tab. 9

Messdorfer Feld

		Saison	LT Mittel	LF Mittel	LW Mittel	LWr	LD Max	LR Sum.					
Einzelpegel	P1/1p				-0,47								
	P1/2p												
	P2/2p												
	P2/4p	-0,57	0,50		-0,47								
	P3/1p												
	P3/3p	-0,53						-0,47					
Kernspurdet	P1p					-0,51							
	P2p												
	P3p	-0,47											
	p AM	-0,48											
		BF05 Mittel	BF10 Mittel	BF15 Mittel	BT05 Mittel	BT10 Mittel	BT15 Mittel	P1pG	P2pG	P4pG	pG AM		
Einzelpegel	P1/1p												
	P1/2p												
	P2/2p												
	P2/4p	0,58	0,70		0,61	0,63	0,63		0,45	0,58	0,43		
	P3/1p		0,47						0,45	0,50	0,54		
	P3/3p	0,63	0,63	0,67	0,45	0,50	0,54		0,58	0,58	0,63		
Kernspurdet	P1p												
	P2p		0,46							0,47			
	P3p	0,46	0,59	0,57		0,44	0,48		0,55	0,62	0,66		
	p AM	0,49	0,63	0,48			0,46		0,49	0,64	0,63		

Tab. 14
 Messdorfer Feld: Ergebnisse der Pearson-Korrelationen (5 %-Signifikanzniveau)
 für Kernspurdetektoren, Erläuterung der Abkürzungen: s. Kap. 8.1, Tab. 10

Lounovice

		Saison	LT	LF	LD	LR24	BF05	BF10	BF15	BT05	BT10	BT15	
einzelne Bonner, Tschech. u. Exposimeterpegel	P1/2a												
	P1/4a												
	P1/1pa												
	P1/3pa			0,45									
	P2/1a												
	P2/3a												
	P2/2pa		-0,54					-0,51					
	P2/4pa												
	P4/2a				-0,45			0,50		-0,58	0,48	0,57	0,63
	P4/4a												
	P4/1pa												
	P4/3pa												
	P1/5cz		-0,47			-0,47				-0,74	0,59	0,64	0,67
	P1/6cz												
P2/5cz													
P2/6cz			-0,51	0,46				-0,64		-0,48	-0,45		
P4/5cz													
P4/6cz													
Bonn. P.	P1a												
	P2a												
	P4a												
	a AM												
Exp.p.	P1pa												
	P2pa		-0,49					-0,49					
	P4pa												
Tsch. P.	pa AM												
	P1cz				-0,45				-0,60	0,43	0,50	0,55	
	P2cz							-0,55					
	P4cz												
cz AM													
		P1/2aG	P1/4aG	P2/1aG	P2/3aG	P4/2aG	P4/4aG	P1aG	P2aG	P4aG	aG AM		
einzelne Bonner, Tschech. u. Exposimeterpegel	P1/2a												
	P1/4a												
	P1/1pa		0,53					0,43				0,43	
	P1/3pa							-0,46					
	P2/1a		-0,45	-0,54				-0,51					
	P2/3a												
	P2/2pa		-0,44	-0,70	-0,58	-0,68		-0,49	-0,57	-0,72	-0,45	-0,68	
	P2/4pa			-0,45									
	P4/2a		0,50		0,75	0,48	0,51	0,45	0,48	0,70	0,53	0,65	
	P4/4a												
	P4/1pa												
	P4/3pa												
	P1/5cz				0,64					0,46			
	P1/6cz												
P2/5cz		-0,51	-0,59		-0,46		-0,49	-0,57		-0,46	-0,47		
P2/6cz		-0,54	-0,59	-0,60	-0,71	-0,46	-0,48	-0,59	-0,75	-0,51	-0,72		
P4/5cz													
P4/6cz													
Bonn. P.	P1a												
	P2a		-0,48					-0,44					
	P4a												
	a AM												
Exp.p.	P1pa												
	P2pa		-0,46	-0,62	-0,51	-0,50			-0,55	-0,57		-0,58	
	P4pa												
Tsch. P.	pa AM												
	P1cz				0,54								
	P2cz		-0,62	-0,69		-0,70	-0,48	-0,57	-0,68	-0,62	-0,58	-0,71	
	P4cz												
cz AM													

Tab. 15

Lounovice: Ergebnisse der Pearson-Korrelationen (5 %-Signifikanzniveau) für Bonner und Tschechische Pegel sowie Exposimeterpegel, Erläuterung der Abkürzungen: s. Kap. 8.1, Tab. 9

Lounovice

		Saison	LT Mittel	LF Mittel	LW Mittel	LWr	LD Max	LR Sum.					
Einzelpegel	P1/1p												
	P1/3p	-0,70	0,67						0,44				
	P2/2p	-0,55	0,79	-0,45					0,49				
	P2/4p						0,48						
	P4/1p	-0,59	0,64	-0,66									
	P4/3p	-0,53	0,61	-0,72	-0,69				0,52				
Kernspurdet	P1p	-0,47	0,57						0,48				
	P2p												
	P4p	-0,60	0,62	-0,67	-0,48								
	p AM	-0,60	0,74	-0,46	-0,43								
		BF05 Mittel	BF10 Mittel	BF15 Mittel	BT05 Mittel	BT10 Mittel	BT15 Mittel	P1pG	P2pG	P4pG	pG AM		
Einzelpegel	P1/1p	0,48											
	P1/3p			-0,62	0,70	0,72	0,73						
	P2/2p				0,71	0,61	0,50						
	P2/4p												
	P4/1p	0,66			0,62	0,58	0,52	0,61	0,61		0,64		
	P4/3p	0,82		-0,62	0,65	0,64	0,59		0,62		0,44		
Kernspurdet	P1p			-0,51	0,62	0,63	0,63						
	P2p												
	P4p	0,72			0,62	0,59	0,53	0,53	0,64		0,62		
	p AM	0,65			0,73	0,68	0,61		0,47				

Tab. 16

Lounovice: Ergebnisse der Pearson-Korrelationen (5 %-Signifikanzniveau) für Kernspurdetektoren, Erläuterung der Abkürzungen: s. Kap. 8.1, Tab. 10

9.2 Zeitlicher Gang der Radonaktivitätskonzentration in der Bodenluft

Zunächst wird für alle Messflächen der Gang der Radonkonzentration über den einjährigen Messzeitraum hinweg gezeigt – getrennt nach Bonner Pegel und Exposimeterpegel sowie für Kernspurdetektoren. Für die Messfläche Lounovice werden zusätzlich die Ergebnisse der Tschechischen Pegel dargestellt.

Auf jeder Messfläche wurden drei Teilflächen mit jeweils zwei Bonner Pegeln und zwei Exposimeterpegeln beprobt; es liegen daher stets je sechs Messreihen vor. Diese werden zunächst einzeln und anschließend in Form der Mittelwerte für die drei Teilflächen mit dem Mittelwert für die gesamte Messfläche in Form von Ganglinien dargestellt. Periodogramme geben Auskunft über Periodizitäten im Radonsignal. Zusätzlich sind die Resultate der einzelnen Messpunkte in Spannweitendiagrammen bzw. Boxplots in Form der Minima und Maxima sowie des 1. und 3. Quartils (p_{25} bzw. p_{75}) einander gegenübergestellt. Innerhalb des Quartilbalkens liegen also 50 % der Messwerte. Ausgesuchte statistische Kennwerte der verschiedenen Messreihen finden sich in jeweils zugehörigen Tabellen.

Die Einzelmesswerte aller Messreihen sind in tabellarischer Form in Anhang 1 enthalten.

9.2.1 Burg Lede

Die Messungen in den **Bonner Pegeln** (Abb. 18) zeigen auf allen Teilflächen einen jahreszeitlichen Gang mit erhöhten Werten im Winter (November bis April) und niedrigeren Werten im Sommer (Mai bis Oktober).

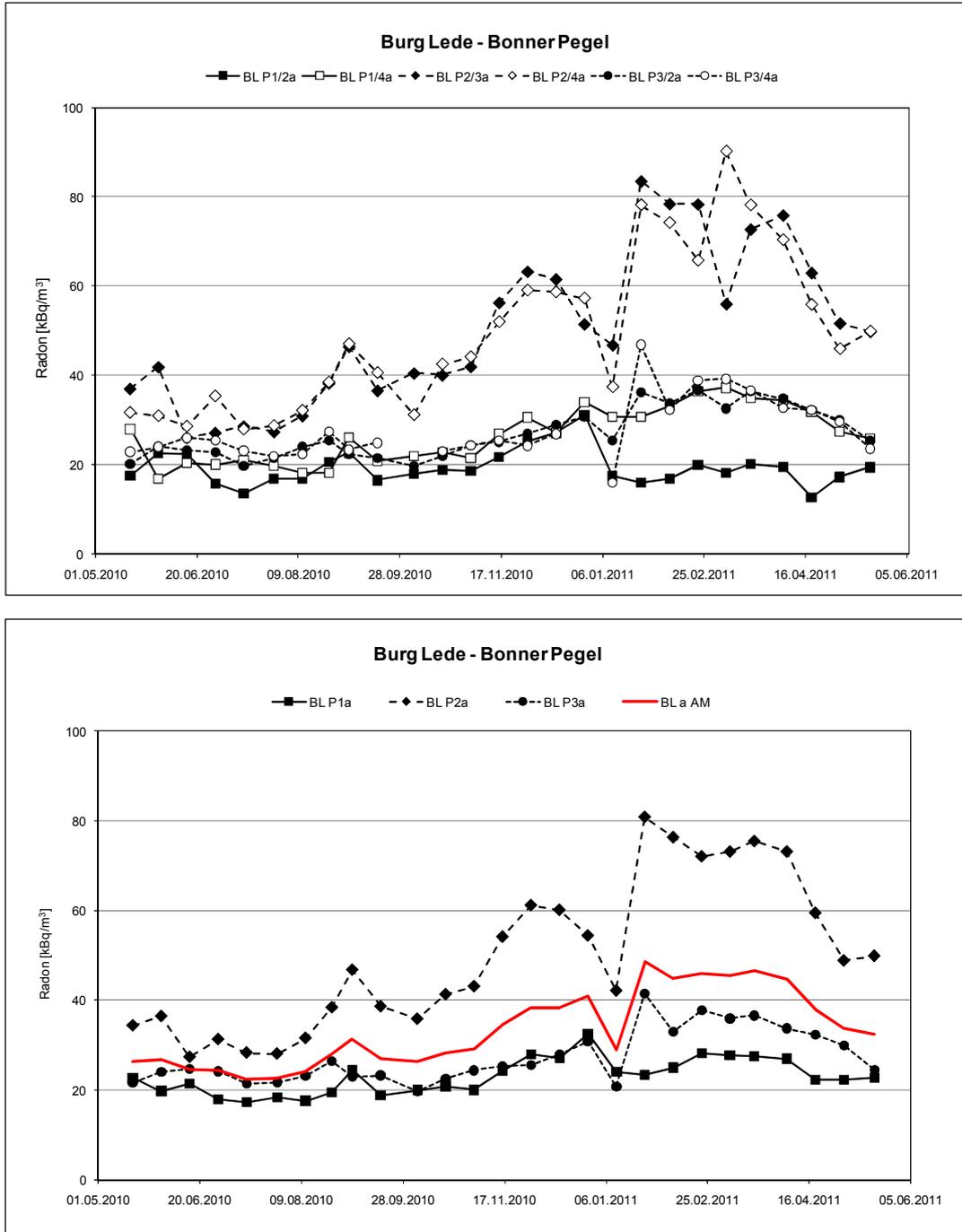


Abb. 18

Burg Lede - Kurzzeitmessungen an Bonner Pegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Die Konzentrationen variieren jedoch zwischen den Teilflächen: Mit 20 bis 40 kBq/m³ liegen sie auf den Teilflächen 1 und 3 deutlich unter den Werten der Teilfläche 2 (bis ca.

80 kBq/m³). Demgemäß ist der Gang auf den erstgenannten Flächen weniger deutlich als auf der letztgenannten Fläche ausgeprägt.

Auch das zugehörige Periodogramm zeigt den hoch signifikanten Jahresgang (Abb. 19).

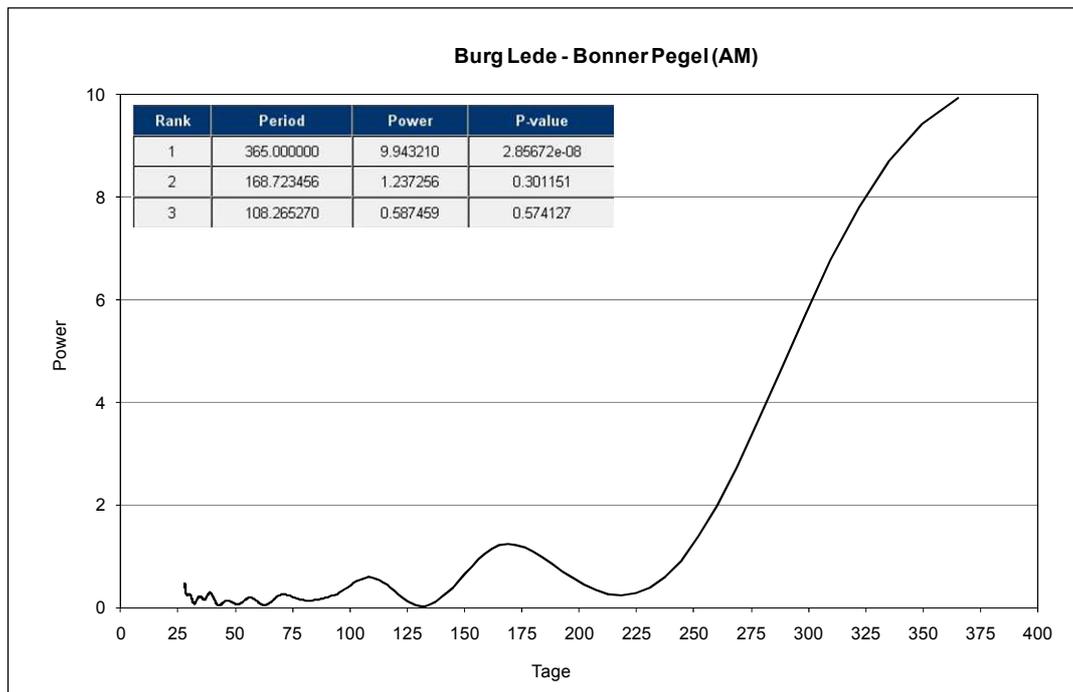


Abb. 19

Burg Lede – Periodogramm der Kurzzeitmessungen an Bonner Pegeln (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Messungen in den **Exposimeterpegeln** (Abb. 20) ergaben ein annähernd gleiches Bild. Auf den Teilflächen 1 und 2 ist ein Jahresgang zu beobachten, nicht aber auf Teilfläche 3. Die Radonkonzentrationen bewegen sich auf demselben Niveau wie an den Bonner Pegeln, auf Teilfläche 2 sind sie aber deutlich geringer (Maximum bis ca. 60 kBq/m³).

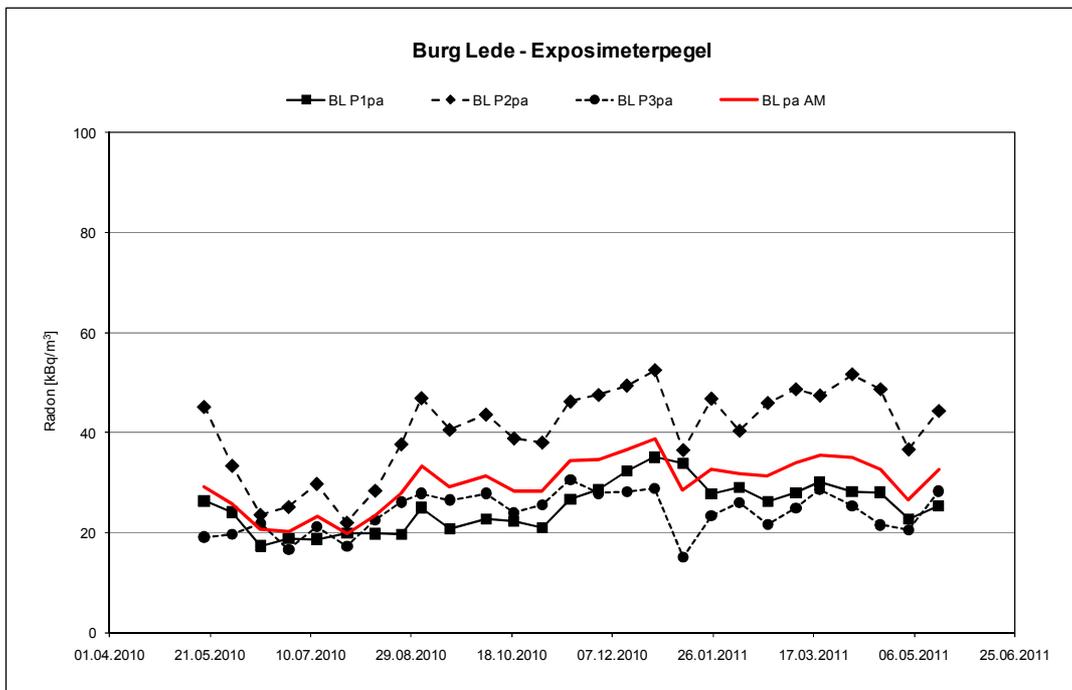
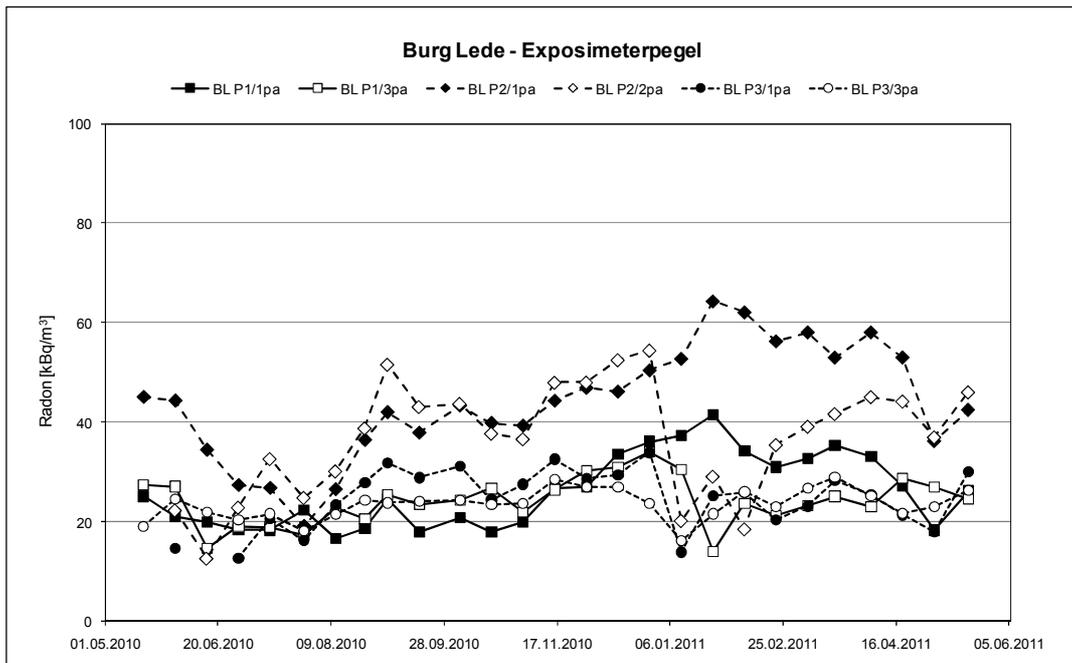


Abb. 20

Burg Lede - Kurzzeitmessungen an Exposimeterpegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Im Periodogramm ist auch hier ein hoch signifikanter Jahrgang erkennbar (Abb. 21).

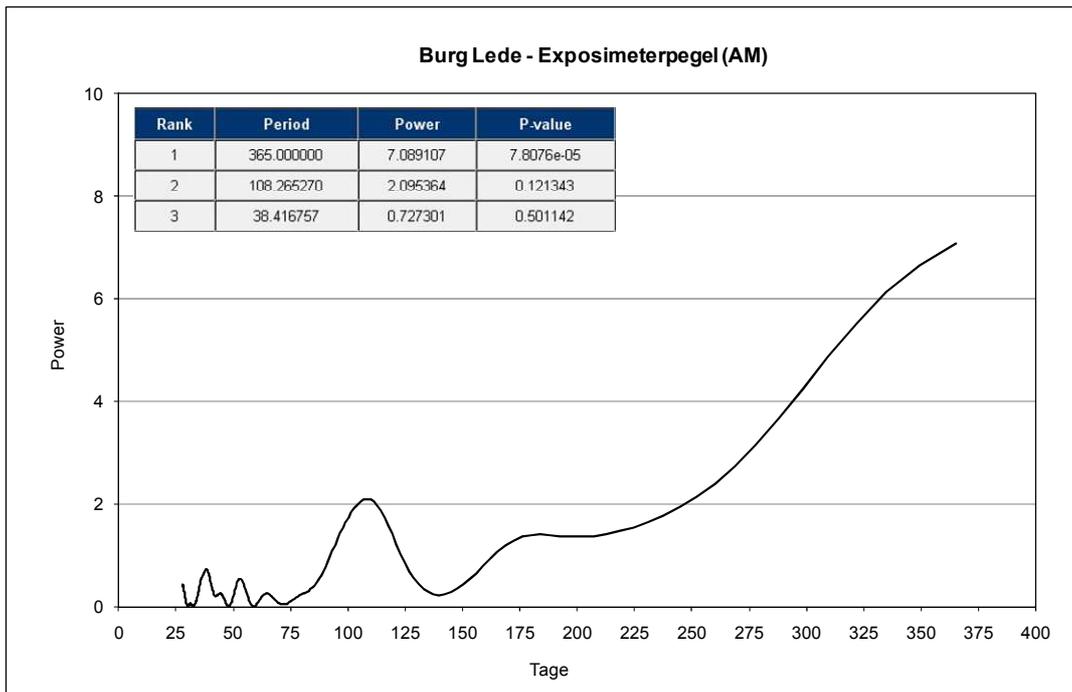


Abb. 21

Burg Lede – Periodogramm der Kurzzeitmessungen an den Exposimeterpegeln (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Messungen mit **Kernspurdetektoren** (Abb. 22) zeigen auf den Teilflächen 2 und 3 einen Jahresgang, der jedoch gegenläufig zu den o.g. Kurzzeitmessungen ist. Höheren Konzentrationen im Sommer zwischen Mai und Oktober stehen niedrigere Konzentrationen im Winter zwischen November und April gegenüber. Generell sind die Messwerte jedoch niedriger als bei den aktiven Messungen (10 bis 50 kBq/m³). Ein Jahresgang auf Teilfläche 1 war nicht zu beobachten.

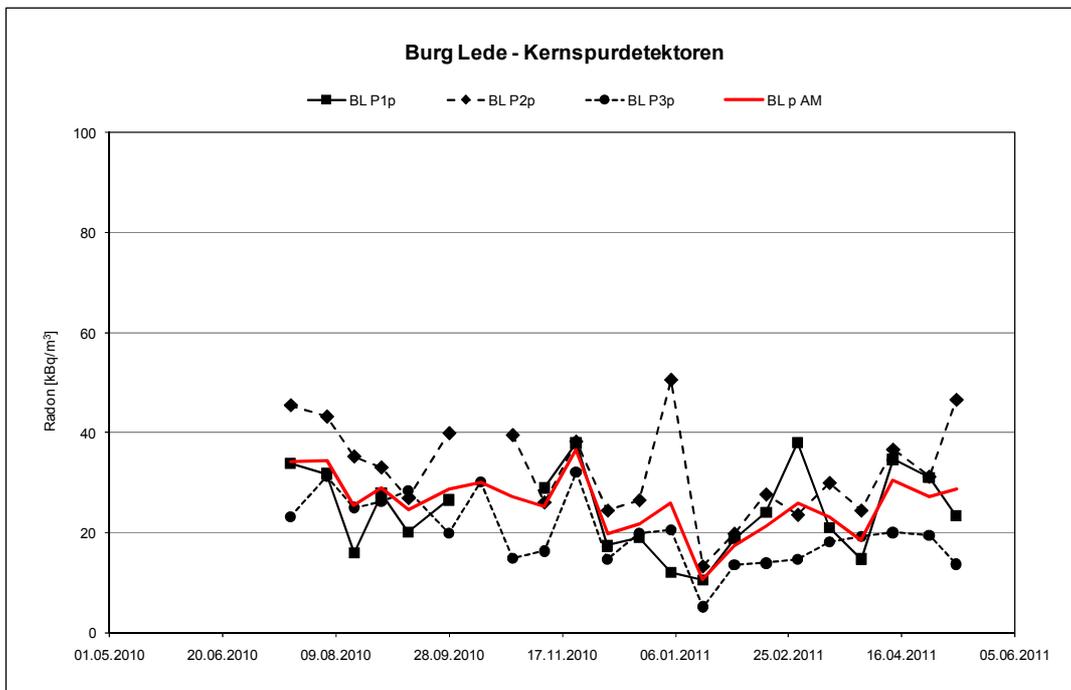
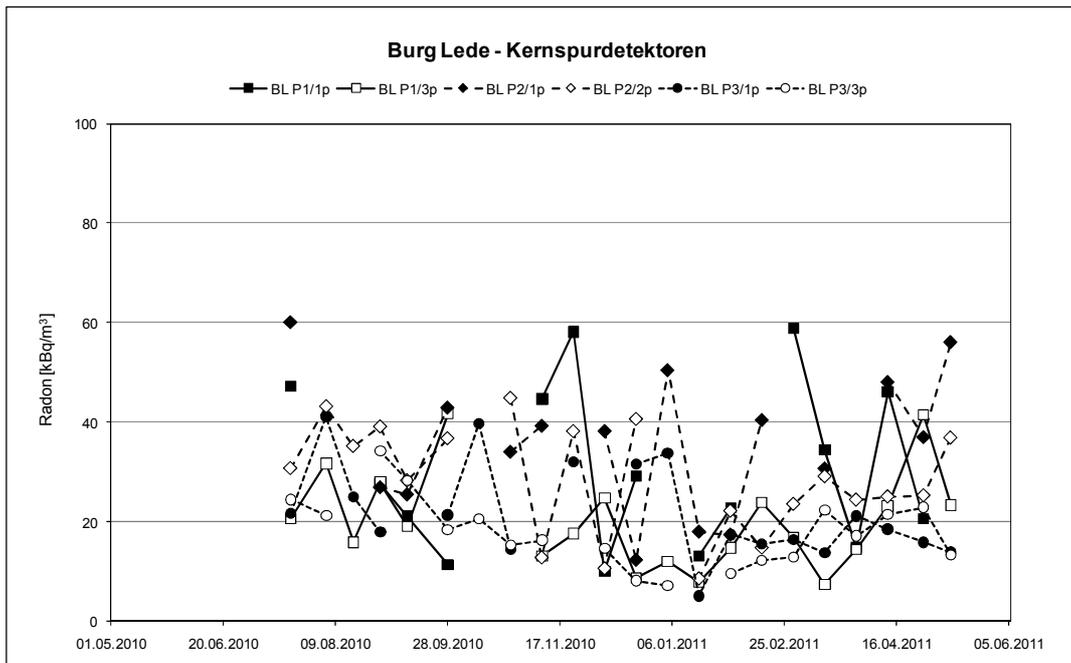


Abb. 22

Burg Lede - Radonmessungen mit Kernspurdetektoren, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche (Messwert jeweils bezogen auf Mitte der 14-tägigen Expositionszeit)

Das zugehörige Periodogramm zeigt einen signifikanten Jahrgang (Abb. 23). Auffällig ist jedoch die im Vergleich zu beiden o.g. Kurzzeitmessreihen wesentlich geringere *Power* der unterscheidbaren Frequenzen.

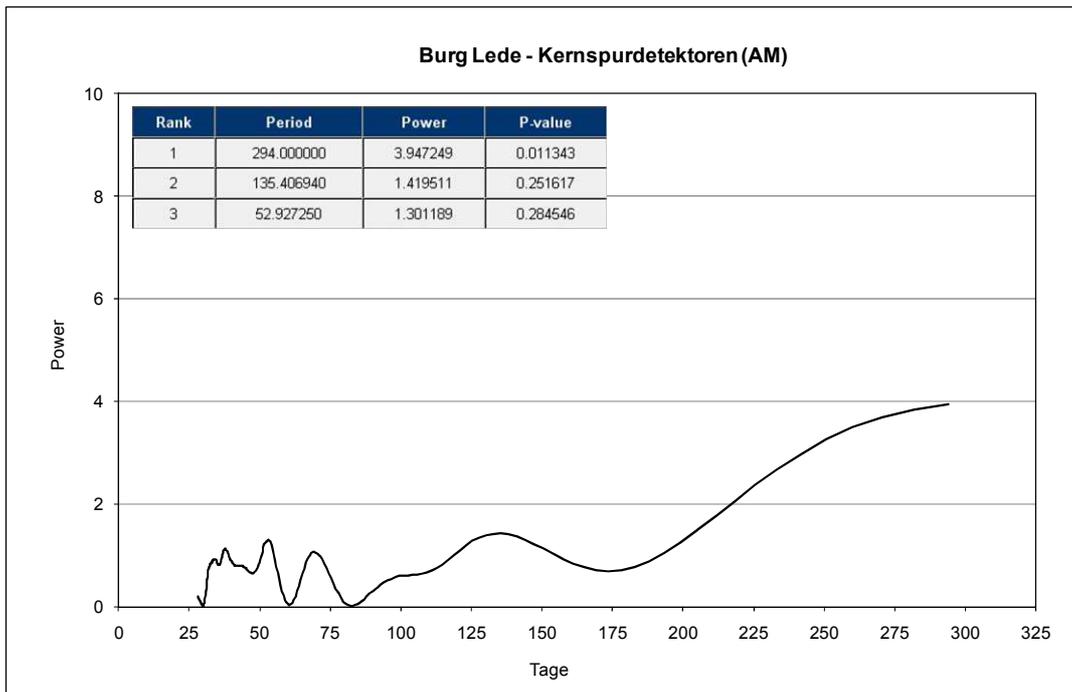


Abb. 23

Burg Lede – Periodogramm der Messungen mit Kernspurdetektoren (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Gegenüberstellung der jeweils zwei gleichen Pegel zeigt bei den Kurzzeitmessungen in allen Fällen eine gute Übereinstimmung (Abb. 24). Der Variationskoeffizient der einzelnen Pegelmessreihen als Maß für die Variabilität der Messwerte liegt fast ausnahmslos zwischen 20 und 30 %, lediglich auf Teilfläche 2 mit den saisonal am deutlichsten variierenden Werten bei ca. 35 %. Bei den Kernspurdetektoren sind auf den Teilflächen 1 und 3 etwas größere Abweichungen zu beobachten.

In Tabelle 17 sind ausgesuchte statistische Kennwerte der Messreihen zusammengestellt.

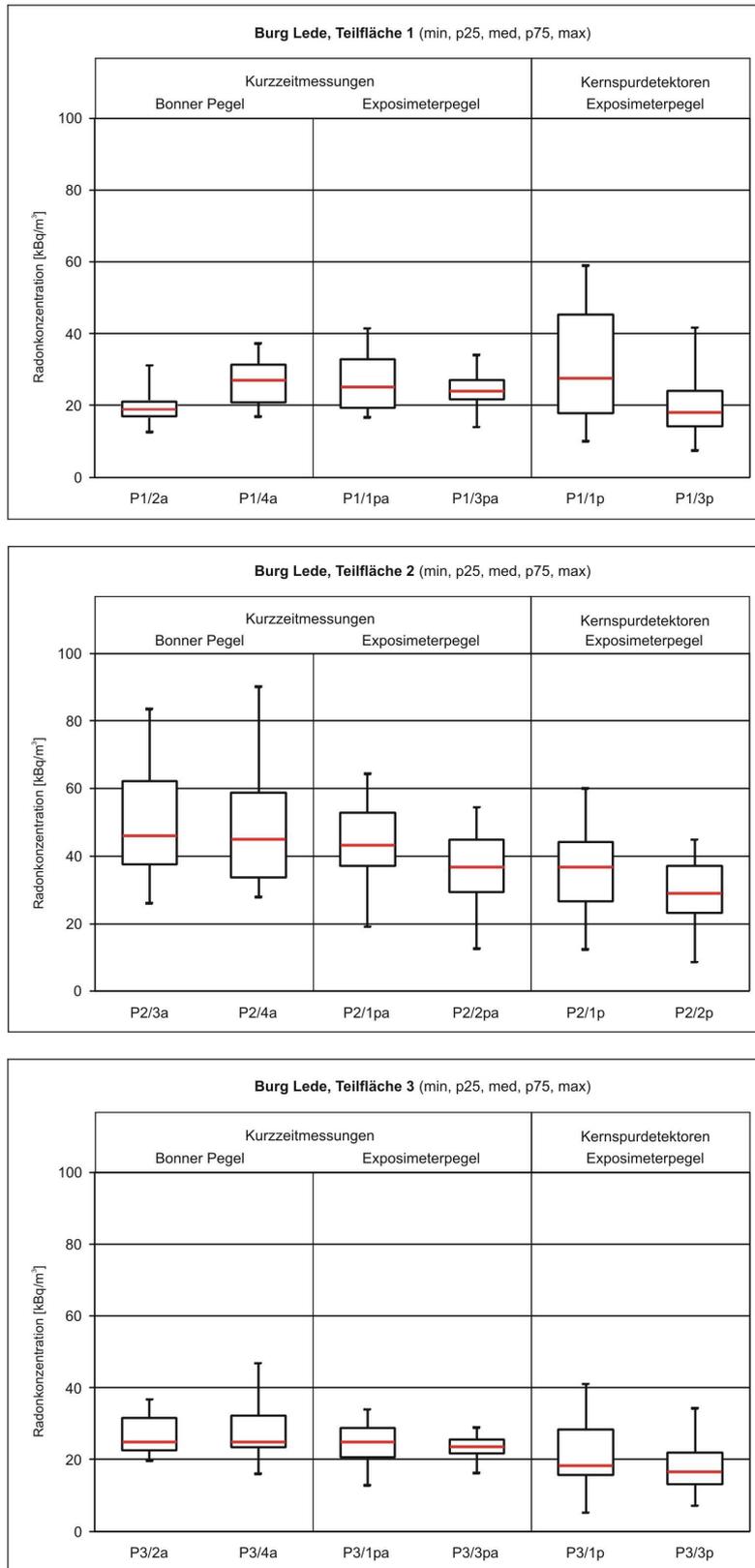


Abb. 24
 Burg Lede: Spannweiten der Radonkonzentration (Bonner Pegel, Exposimeterpegel, Kernspurdetektoren); dargestellt sind Minima, Maxima und Median sowie 1. und 3. Quartil (p25 bzw. p75)

Burg Lede	Anzahl	Rn AM [kBq m ⁻³]	Var.koeff. [%]	Rn Min [kBq m ⁻³]	Rn Pz25 [kBq m ⁻³]	Rn Med [kBq m ⁻³]	Rn Pz75 [kBq m ⁻³]	Rn Max [kBq m ⁻³]
Bonner Pegel								
1/2a	27	19	21	13	17	19	21	31
1/4a	27	27	23	17	21	27	31	37
1a	54	23	28	13	18	21	27	37
2/3a	27	50	34	26	38	47	62	84
2/4a	27	49	36	28	34	46	59	90
2a	54	50	35	26	37	47	61	90
3/2a	27	27	20	20	23	25	32	37
3/4a	25	28	25	16	23	25	32	47
3a	52	27	23	16	23	25	32	47
Exposimeterpegel								
1/1pa	27	26	28	17	19	25	33	41
1/3pa	27	24	20	14	22	24	27	34
1pa	54	25	25	14	20	25	28	41
2/1pa	27	44	26	19	37	44	53	64
2/2pa	26	37	31	13	29	38	45	54
2pa	53	40	29	13	34	42	48	64
3/1pa	25	25	25	13	21	25	29	34
3/3pa	27	24	13	16	22	24	26	29
3pa	52	24	20	13	22	24	27	34
Kernspurdetektoren								
1/1p	15	31	54	10	18	28	45	59
1/3p	20	20	48	7	14	18	24	42
1p	35	25	56	7	15	21	30	59
2/1p	16	36	38	12	27	38	44	60
2/2p	20	28	38	9	23	29	37	45
2p	36	32	40	9	24	32	40	60
3/1p	19	22	44	5	16	18	28	41
3/3p	19	18	39	7	13	17	22	34
3p	38	20	43	5	14	18	23	41

Tab. 17

Burg Lede: Statistische Kennwerte für Bonner Pegel, Exposimeterpegel und Kernspurdetektoren

9.2.2 Messdorfer Feld

Die Messungen in den **Bonner Pegeln** (Abb. 25) zeigten auf den Teilflächen 1 und 3 einen deutlichen Jahresgang mit erhöhten Werten im Winter (November bis April) und niedrigeren Werten im Sommer (Mai bis Oktober). Die absoluten Konzentrationen liegen durchgängig zwischen 30 und 60 kBq/m³, auf Teilfläche 1 sind sie niedriger mit 20 bis 40 kBq/m³.

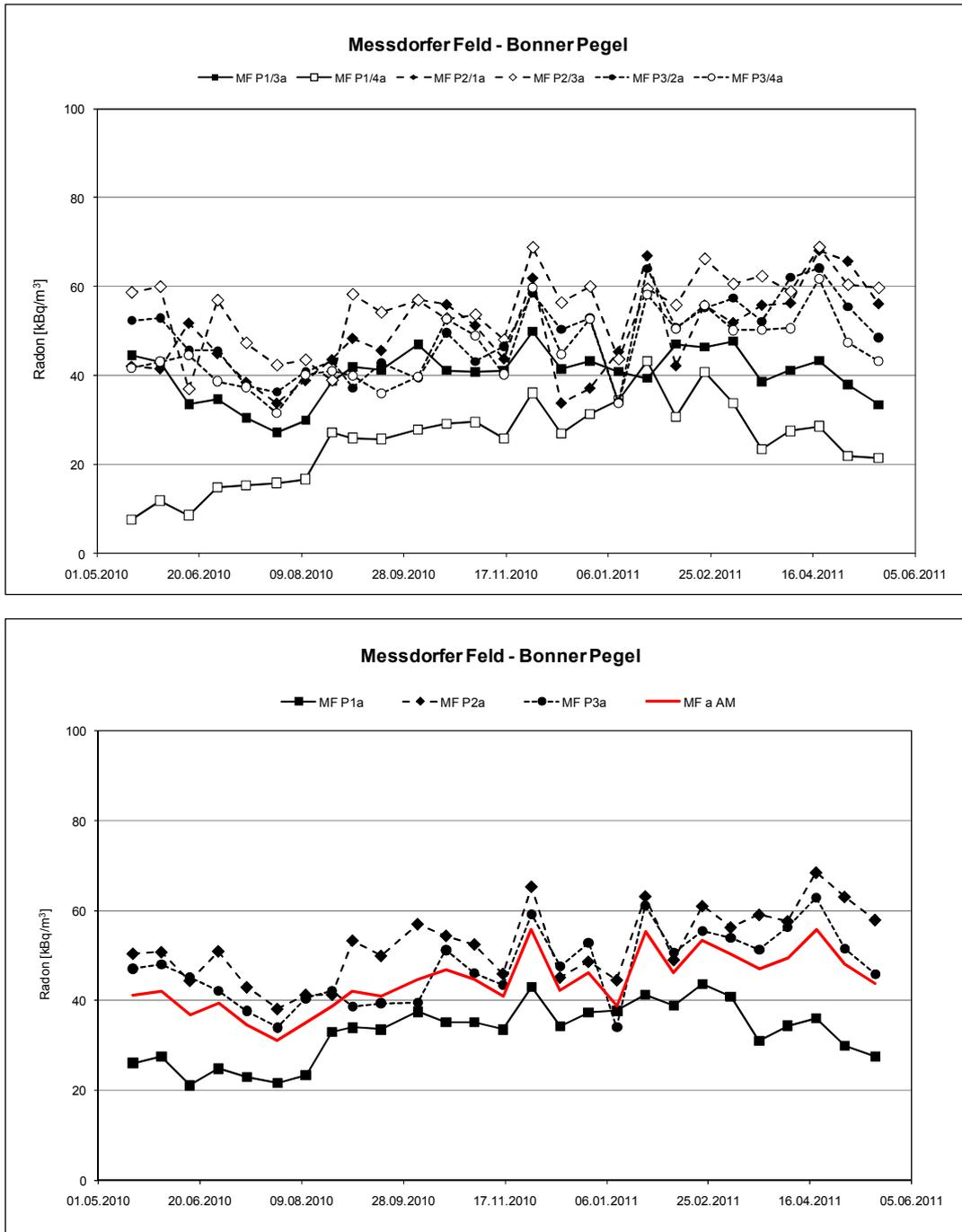


Abb. 25
Messdorfer Feld - Kurzzeitmessungen an Bonner Pegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Das zugehörige Periodogramm zeigt einen hoch signifikanten Jahres- und nicht signifikanten annähernden Halbjahresgang (Abb. 26).

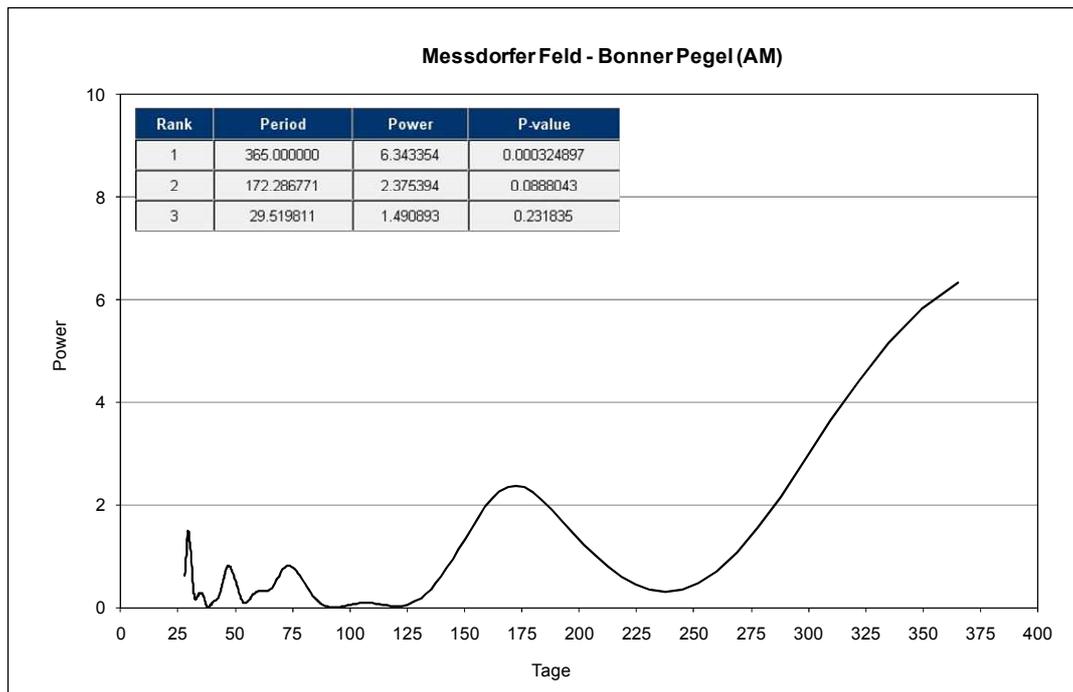


Abb. 26

Messdorfer Feld – Periodogramm der Kurzzeitmessungen an Bonner Pegeln (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Messungen in den **Exposimeterpegeln** (Abb. 27) ergaben ein vergleichbares Bild. Hier ist jedoch nur auf Teilfläche 1 ein Jahresgang festzustellen. Die Radonkonzentrationen bewegen sich auf demselben Niveau wie an den Bonner Pegeln, sind in der Spitze aber geringfügig höher (bis 70 kBq/m^3).

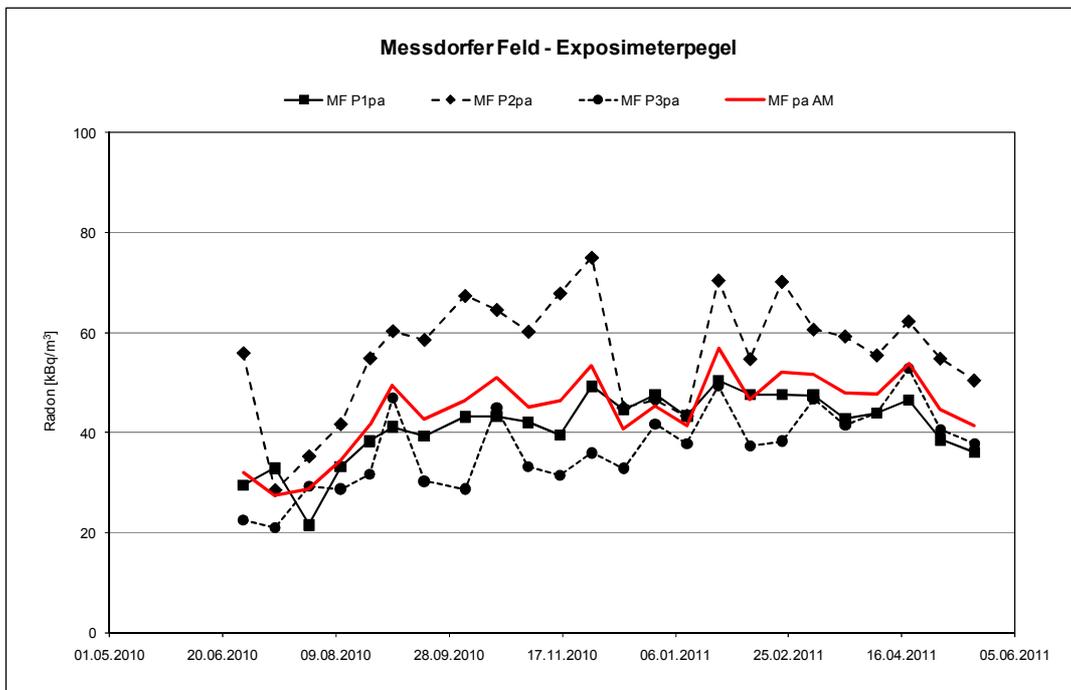
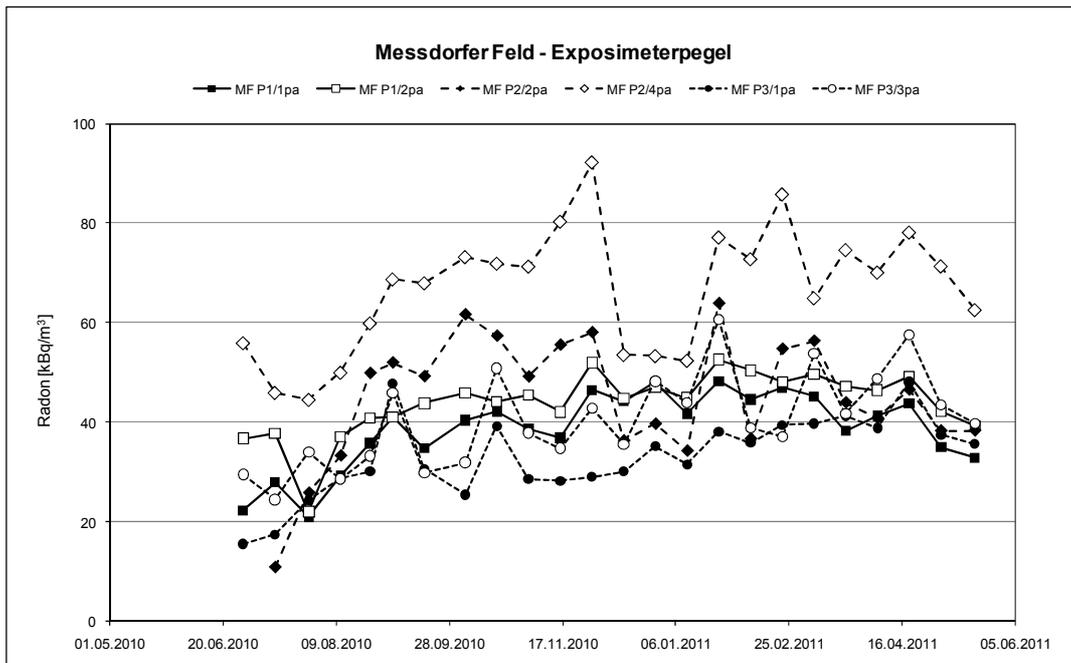


Abb. 27

Messdorfer Feld - Kurzzeitmessungen an Exposimeterpegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Im Periodogramm ist auch hier ein nicht signifikanter Halbjahresgang (ca. 160 Tage) erkennbar (Abb. 28).

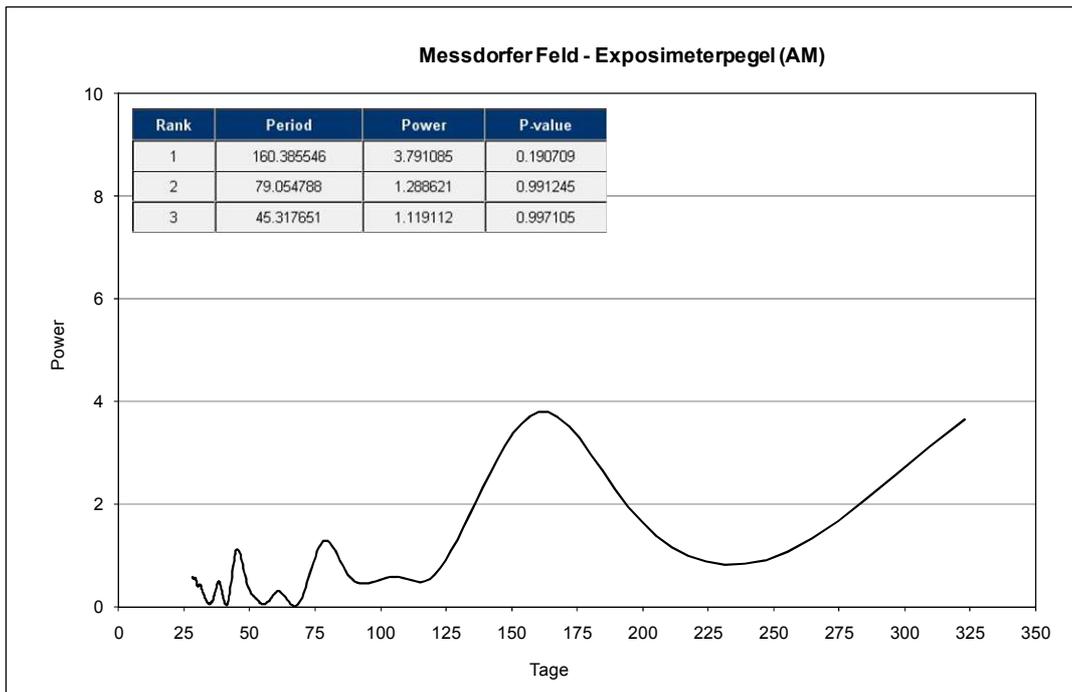


Abb. 28

Messdorfer Feld – Periodogramm der Kurzzeitmessungen an den Exposimeterpegeln (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Messungen mit **Kernspurdetektoren** (Abb. 29) ergaben lediglich auf Teilfläche 3 einen Jahresgang. Wie in Burg Ledeburg ist er im Vergleich zu o.g. Kurzzeitmessungen jedoch umgekehrt ausgebildet: Höhere Konzentrationen zwischen Mai und Oktober und niedrigere Konzentrationen zwischen November und April. Die Schwankungsbreite der Radonkonzentrationen ist gegenüber den Kurzzeitmessungen größer (10 bis 80 kBq/m³).

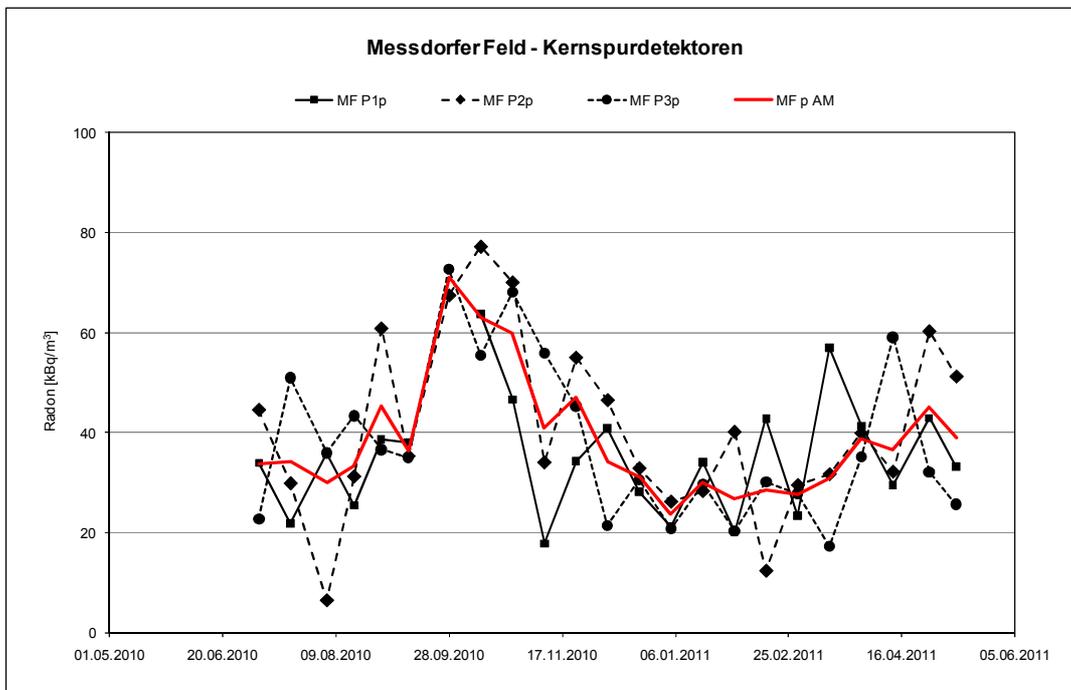
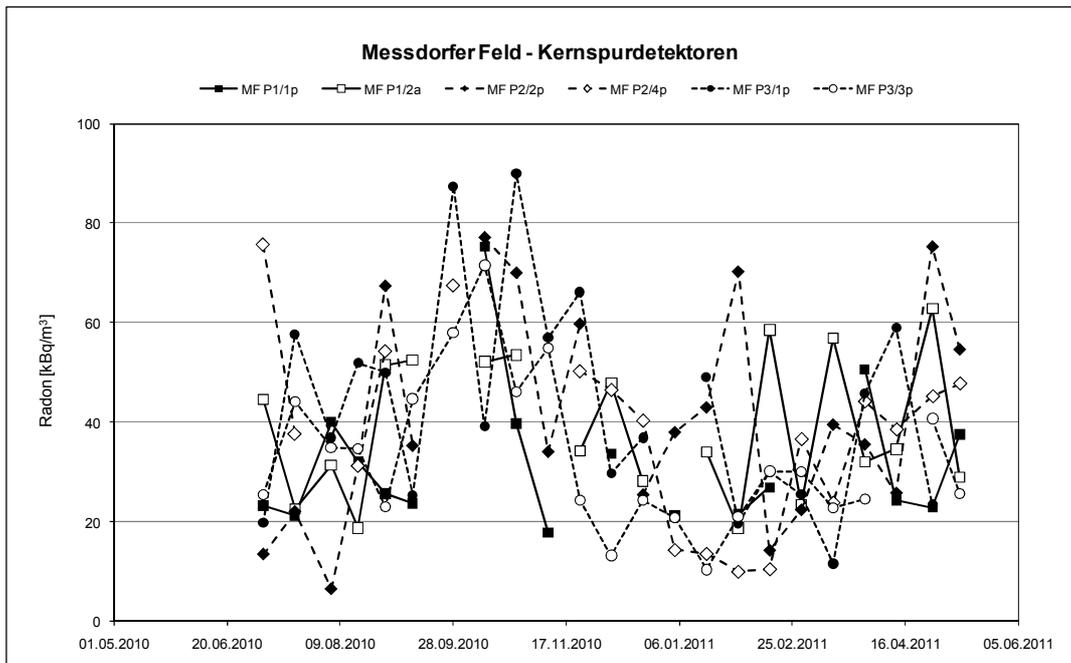


Abb. 29

Messdorfer Feld - Radonmessungen mit Kernspurdetektoren, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche (Messwert jeweils bezogen auf Mitte der 14-tägigen Expositionszeit)

Das zugehörige Periodogramm zeigt eine hoch signifikante Periode von bei ca. 235 Tagen mit unklarer Ursache; ein Jahresgang ist nicht nachweisbar (Abb. 30).

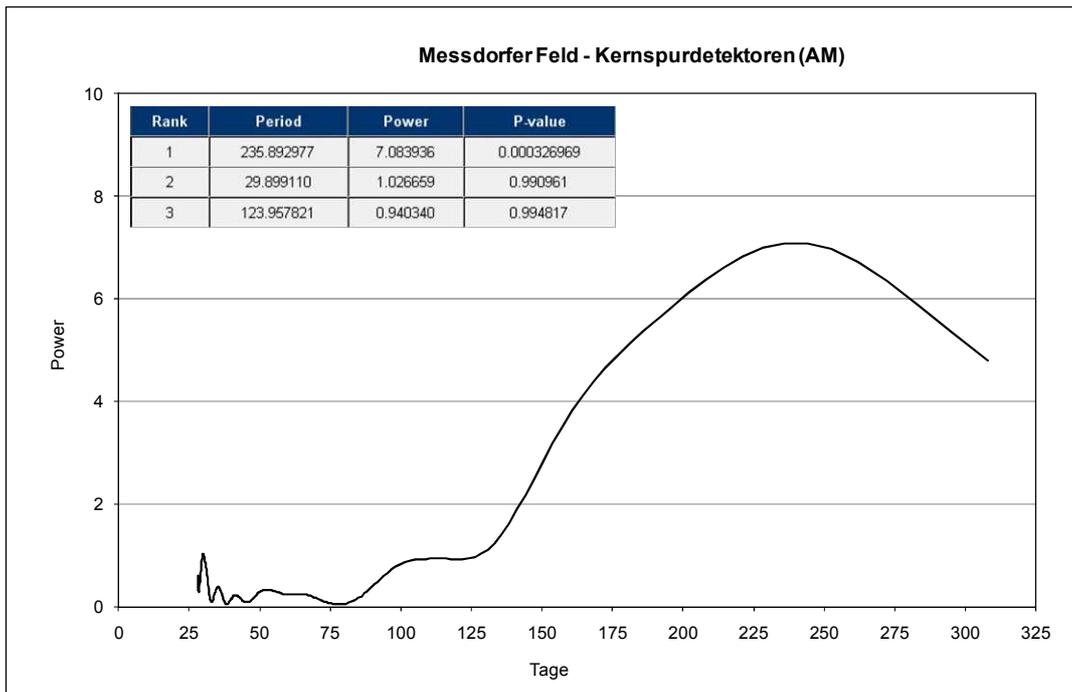


Abb. 30

Messdorfer Feld – Periodogramm der Messungen mit Kernspurdetektoren (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Gegenüberstellung von jeweils zwei Pegeln zeigt bei den Kurzzeitmessungen zumeist eine gute Übereinstimmung (Abb. 31). Der Variationskoeffizient der einzelnen Pegelmessreihen liegt fast ausnahmslos zwischen 15 und 30 %. Bei den Kernspurdetektoren sind auch auf dieser Messfläche größere Abweichungen zwischen den Pegeln zu beobachten.

In Tabelle 18 sind ausgesuchte statistische Kennwerte der Messreihen zusammengestellt.

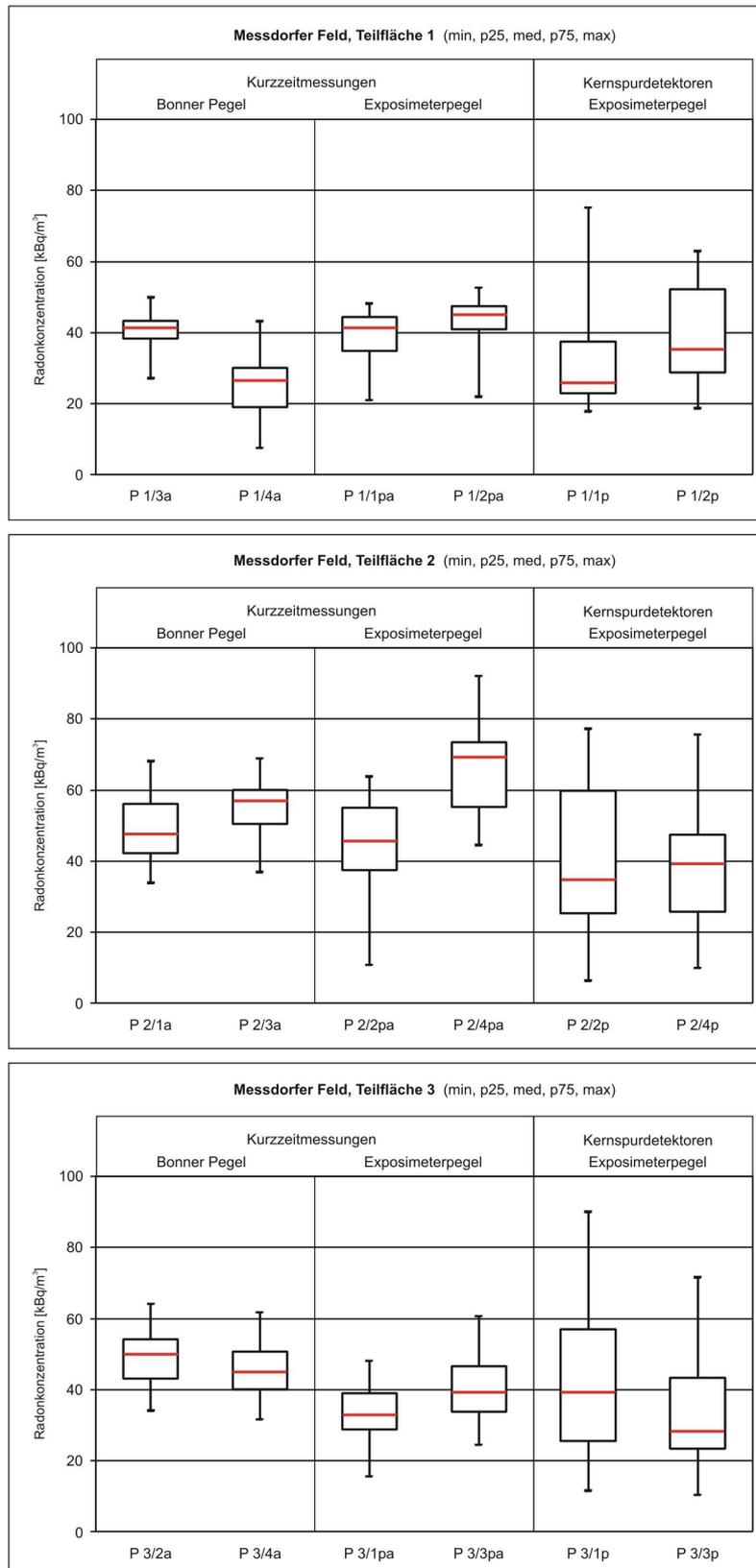


Abb. 31
 Messdorfer Feld: Spannweiten der Radonkonzentration (Bonner Pegel, Exposimeterpegel, Kernspurdetektoren); dargestellt sind Minima, Maxima und Median sowie 1. und 3. Quartil (pz25 bzw. pz75)

Messdorfer Feld	Anzahl	Rn AM [kBq m ⁻³]	Var.koeff. [%]	Rn Min [kBq m ⁻³]	Rn Pz25 [kBq m ⁻³]	Rn Med [kBq m ⁻³]	Rn Pz75 [kBq m ⁻³]	Rn Max [kBq m ⁻³]
Bonner Pegel								
1/3a	27	40	14	27	38	41	43	50
1/4a	27	25	36	8	19	27	30	43
1a	54	33	32	8	27	34	41	50
2/1a	27	49	20	34	42	48	56	68
2/3a	27	55	15	37	50	57	60	69
2a	54	52	18	34	44	55	59	69
3/2a	27	49	17	34	43	50	54	64
3/4a	27	46	17	32	40	45	51	62
3a	54	47	18	32	40	47	53	64
Exposimeterpegel								
1/1pa	24	39	20	21	35	41	44	48
1/2pa	24	44	15	22	41	45	47	53
1pa	48	41	18	21	38	42	46	53
2/2pa	23	45	28	11	37	46	55	64
2/4pa	24	67	19	45	55	69	73	92
2pa	47	56	30	11	45	56	69	92
3/1pa	24	33	24	16	29	33	39	48
3/3pa	24	41	23	24	34	39	46	61
3pa	48	37	26	16	30	37	42	61
Kernspurdetektoren								
1/1p	17	32	45	18	23	26	38	75
1/2p	20	39	36	19	29	34	52	63
1p	37	36	41	18	23	32	48	75
2/2p	21	41	53	6	25	35	60	77
2/4p	18	38	49	10	26	39	47	76
2p	39	40	51	6	25	38	52	77
3/1p	21	43	49	12	25	39	57	90
3/3p	22	33	46	10	23	28	43	72
3p	43	38	50	10	24	35	50	90

Tab. 18
Messdorfer Feld: Statistische Kennwerte für Bonner Pegel, Exposimeterpegel und Kernspurdetektoren

9.2.3 Lounovice

Die Radonkonzentrationen an einzelnen Messpunkten (P4/2a und P4/6acz) der Teilfläche 4 auf der Messfläche Lounovice variieren über den gesamten Messzeitraum hinweg in sehr starkem Maße und liegen deutlich über den Werten aller Messpunkte auf derselben sowie der beiden benachbarten Teilflächen. Die Gründe für die zeitliche Variation können in einer wechselnden Wasserführung des Bodens, auch im oberflächennahen Bereich, liegen; die Abweichungen zu den räumlich benachbarten Messpunkten können ihre Ursache in Inhomogenitäten der spezifischen Radiumaktivitäten haben, die ihrerseits durch lokale Unterschiede im Zersetzungsgrad des anstehenden Granits bedingt sind. In den Einzeldarstellungen dieses Kapitels sind stets alle Messpunkte berücksichtigt; die o.g. Messpunkte sind aufgrund der starken Messwertschwankungen in den Abbildungen in Kapitel 10 nicht berücksichtigt.

Die Messungen in den **Bonner Pegeln** (Abb. 32) zeigten auf keiner Teilfläche einen Jahresgang. Die Radonkonzentrationen liegen durchgängig zwischen 70 und 160 kBq/m³, am Messpunkt P4/2a reichen sie im Maximum bis 450 kBq/m³.

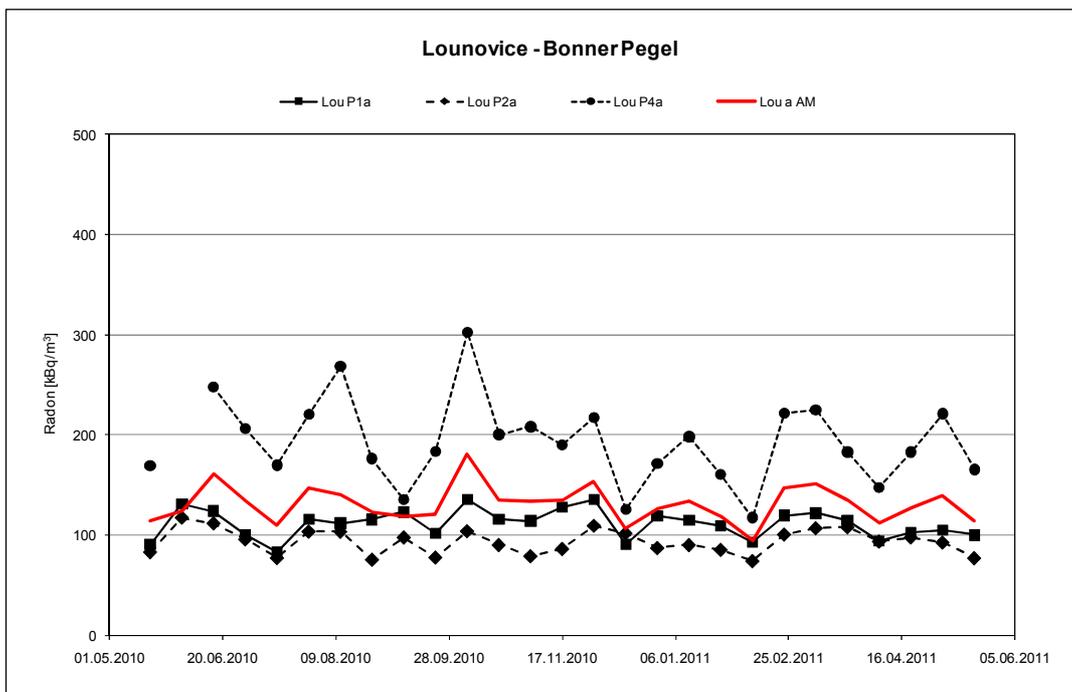
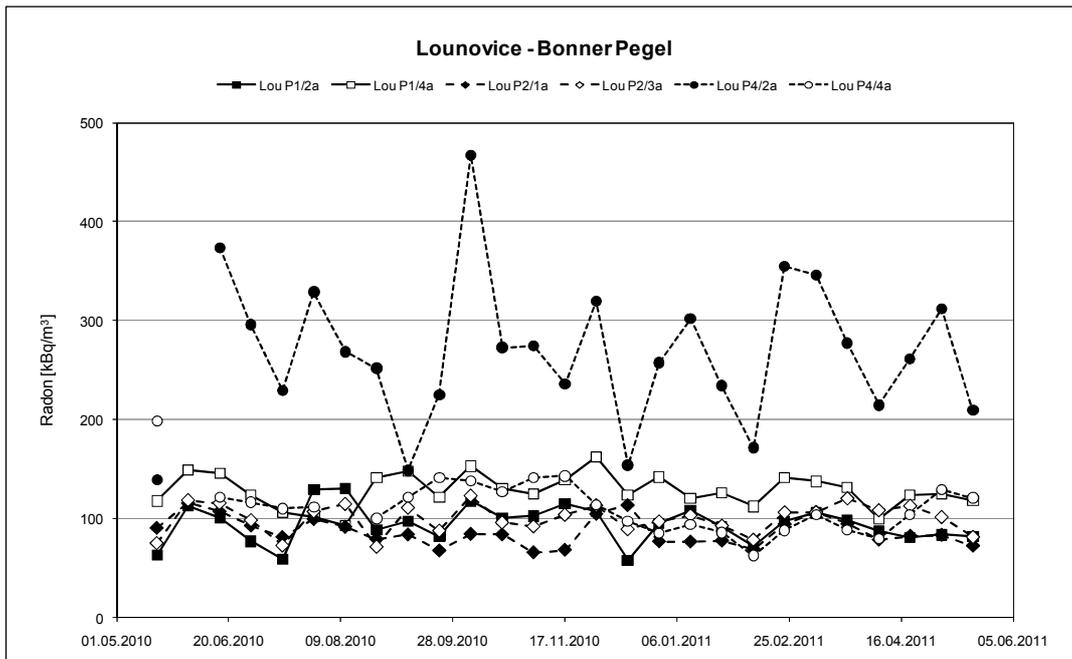


Abb. 32

Lounovice - Kurzzeitmessungen an Bonner Pegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Das Periodogramm bestätigt dies: Ein Jahrgang ist nicht nachweisbar (Abb. 33). Eine hoch signifikante ca. 52 Tage dauernde Periode stellt möglicherweise das Artefakt des doppelten Beprobungszyklus dar.

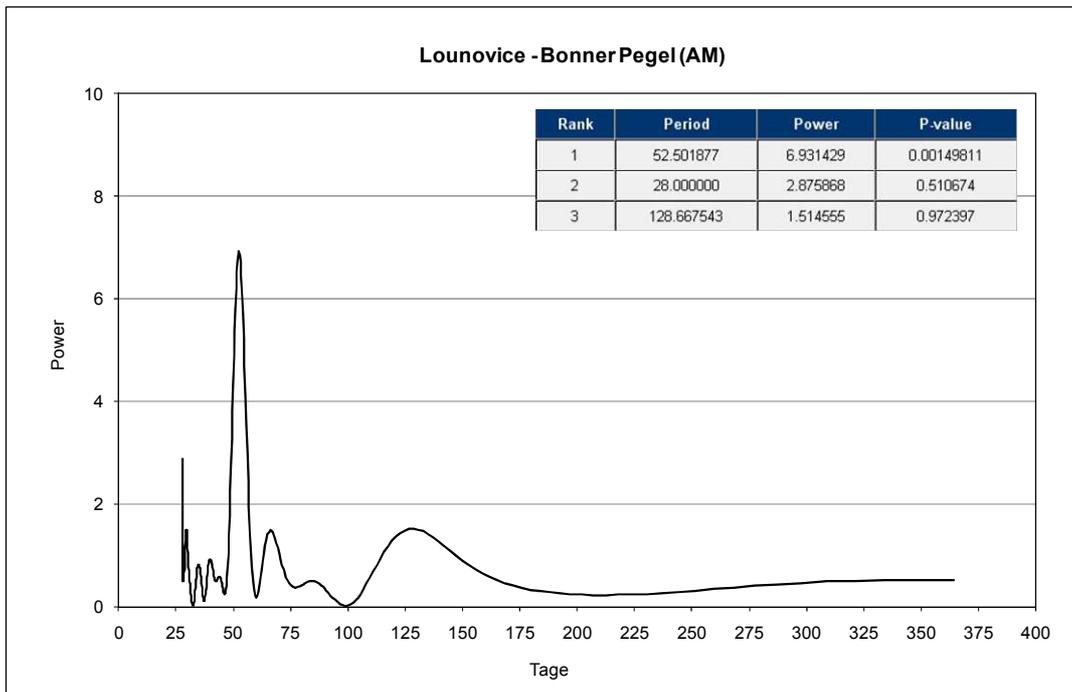


Abb. 33

Lounovice – Periodogramm der Kurzzeitmessungen an den Bonner Pegeln (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Die Messungen in den **Tschechischen Pegeln** (Abb. 34) zeigten ein vergleichbares Bild. Auch hier ist kein Jahrgang zu beobachten. Die absoluten Konzentrationen sind im Vergleich zu den Bonner Pegeln aber durchgängig höher (80 bis 300 kBq/m³, am Messpunkt P4/6acz erreichen sie im Maximum 700 kBq/m³).

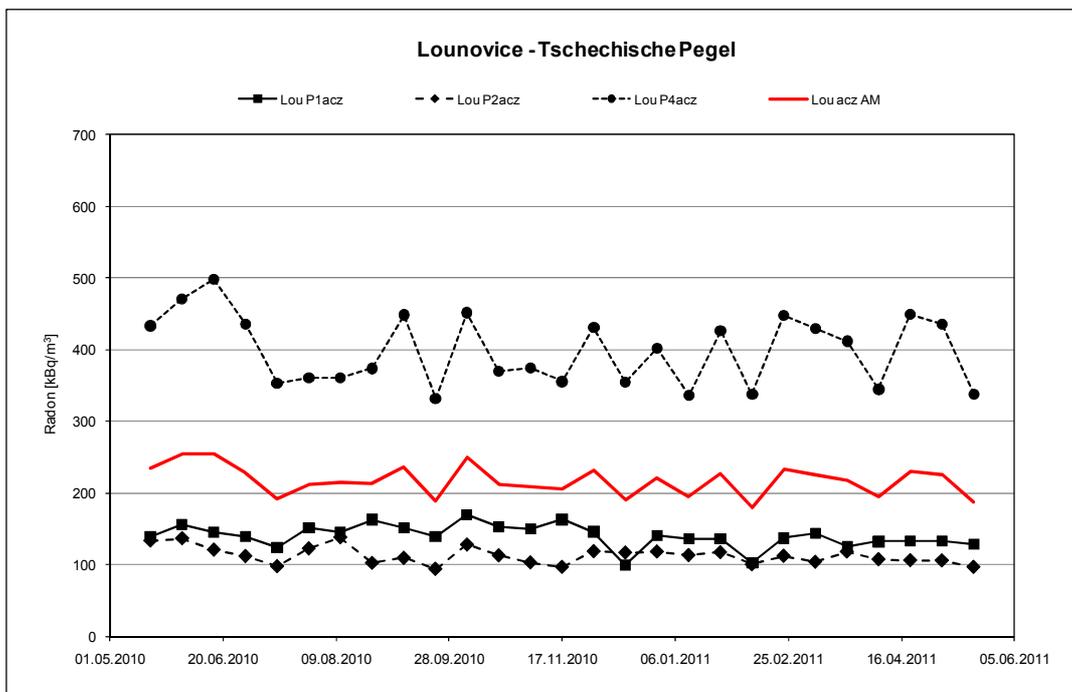
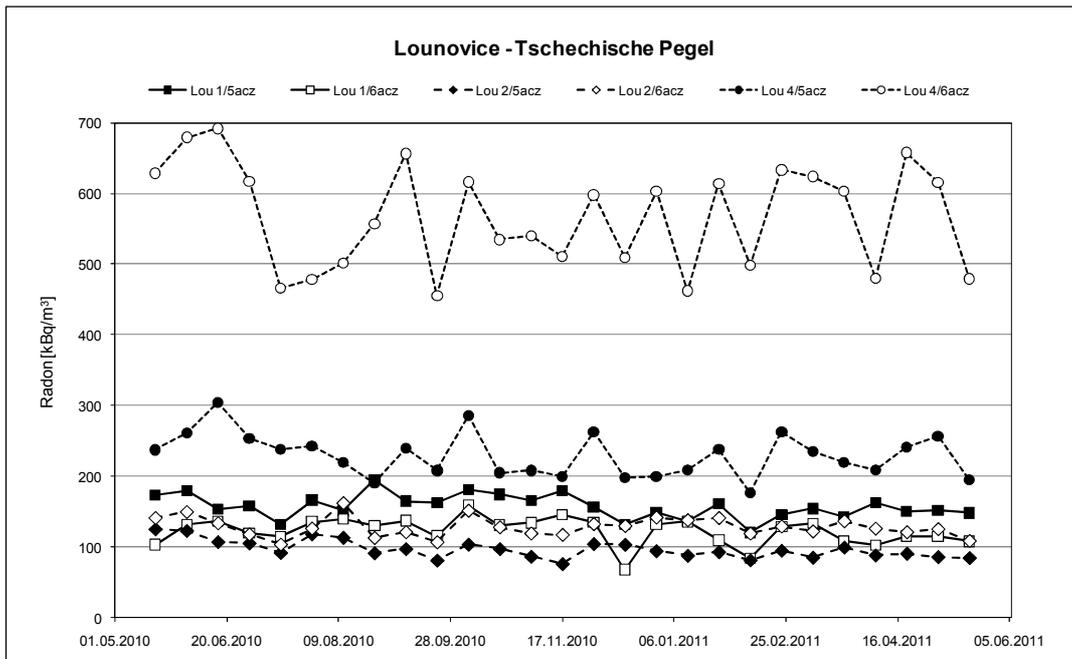


Abb. 34
Lounovice - Kurzzeitmessungen an Tschechischen Pegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Die Messungen in den **Exposimeterpegeln** (Abb. 35) sind denen der Bonner Pegel sowohl im Verlauf als auch in der absoluten Höhe (50 bis 200 kBq/m³) sehr ähnlich. Auch hier wurde kein Jahresgang beobachtet.

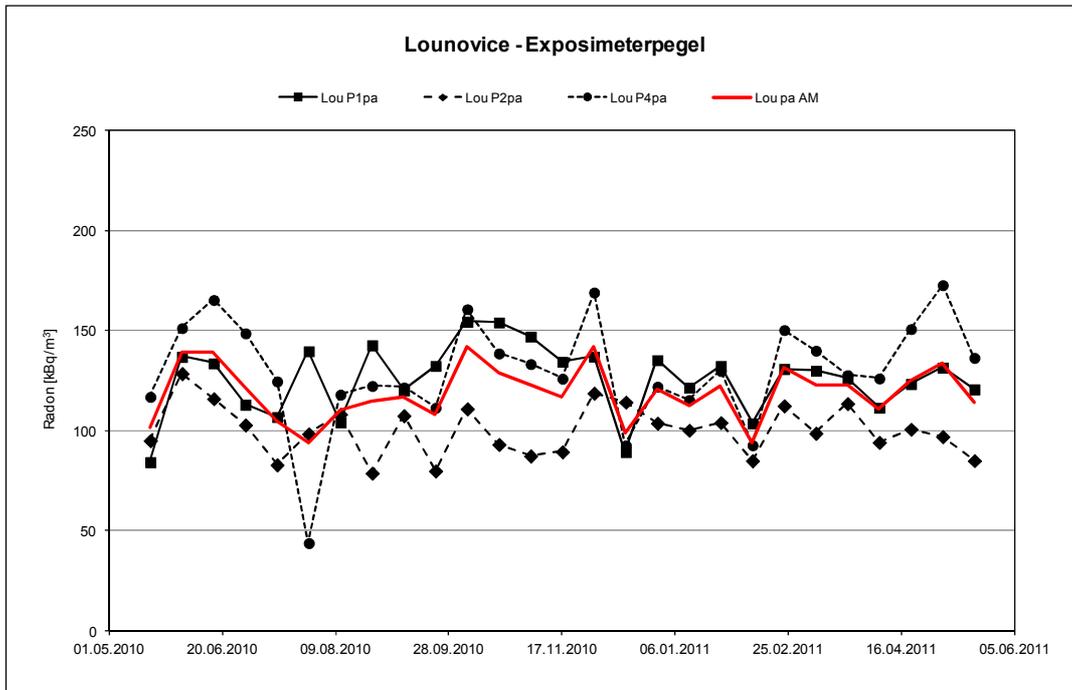
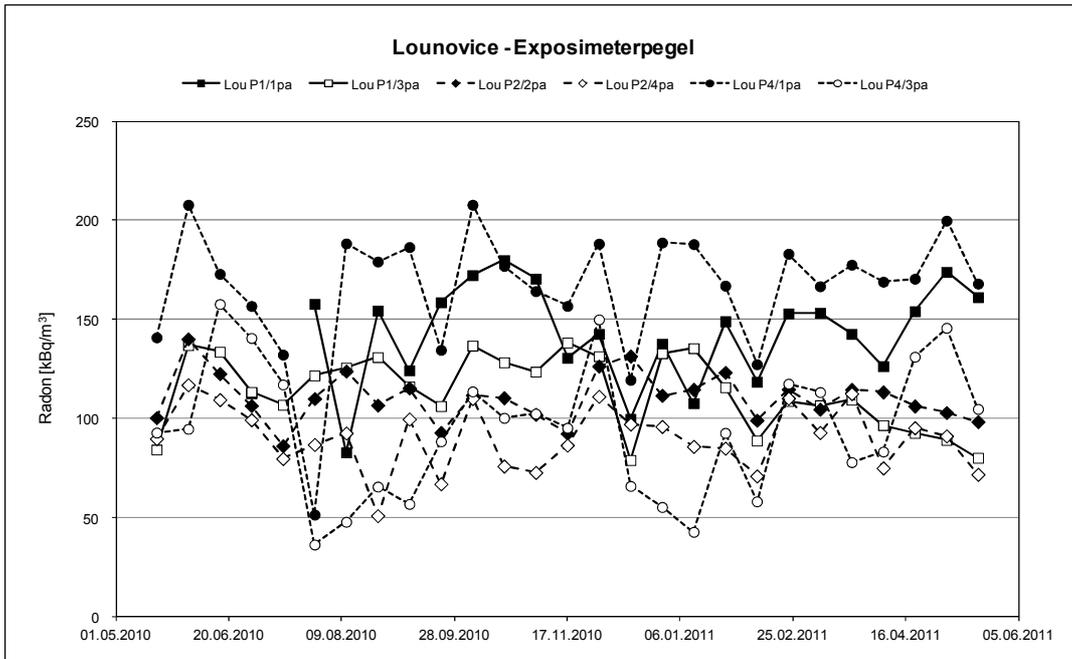


Abb. 35

Lounovice - Kurzzeitmessungen an Exposimeterpegeln, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche

Das Periodogramm bestätigt diese Beobachtung auch für diese Pegel: Ein Jahresgang ist nicht nachweisbar (Abb. 36).

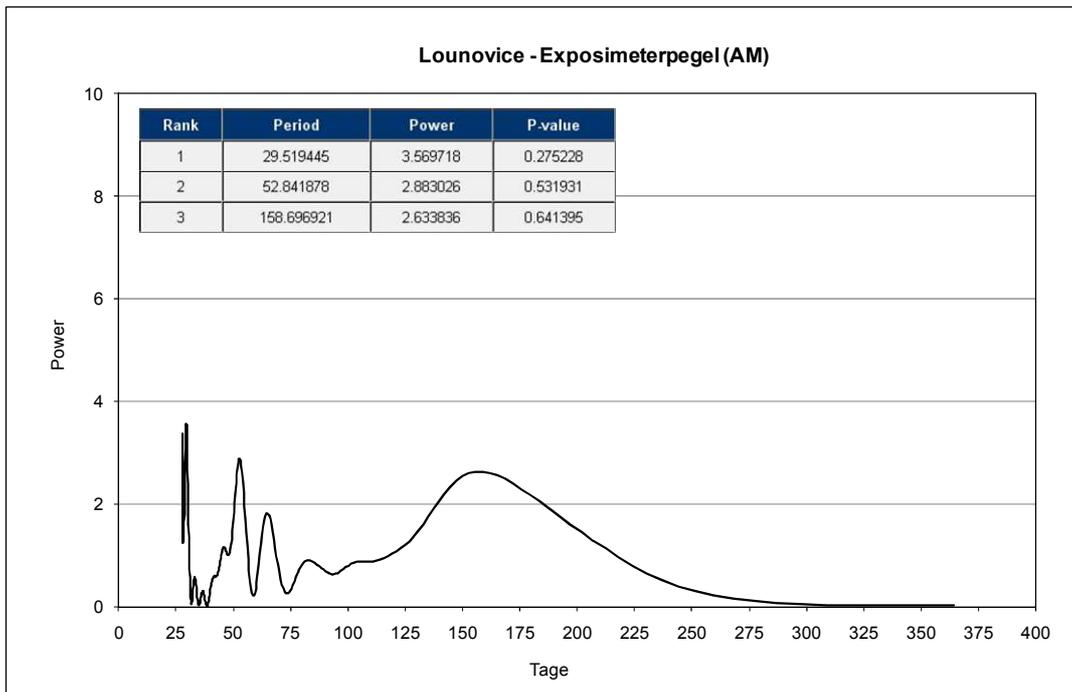


Abb. 36

Lounovice – Periodogramm der Kurzzeitmessungen an den Exposimeterpegeln (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Auch die Messungen mit **Kernspurdetektoren** (Abb. 37) lassen für die Teilflächen 1 und 4 einen Jahrgang erkennen. Zudem fällt auf, dass die Messwerte im Vergleich zu den o.g. Kurzzeitmessungen deutlich niedriger sind (ca. 20 bis 80 kBq/m³); lediglich auf Teilfläche 4 wurden vereinzelt höhere Konzentrationen (bis ca. 150 kBq/m³) festgestellt.

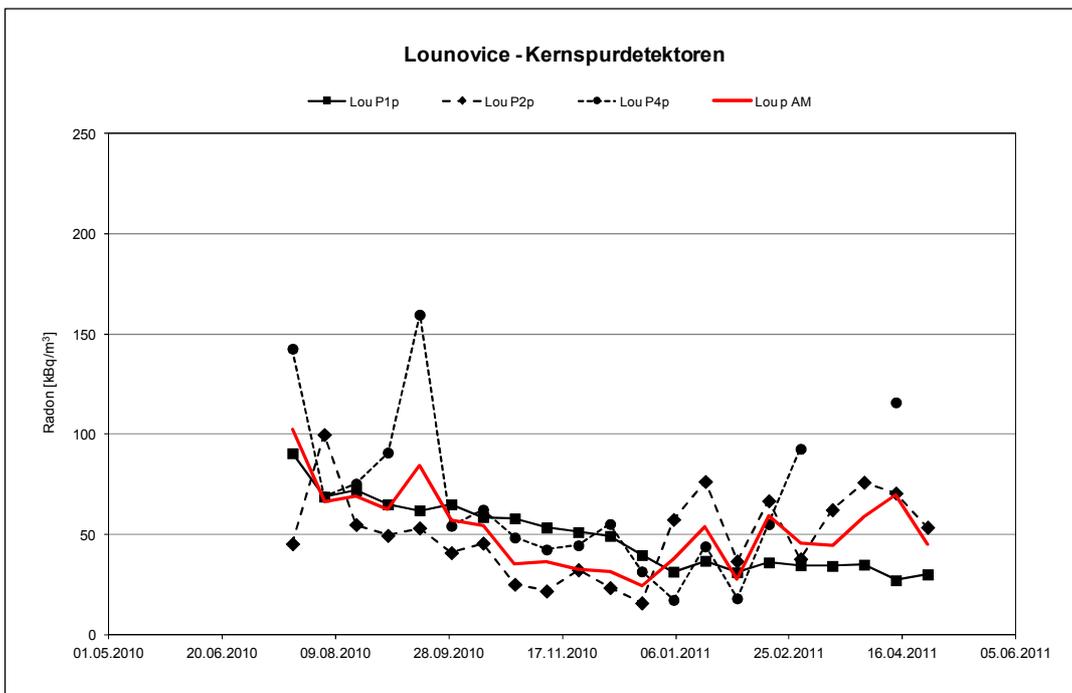
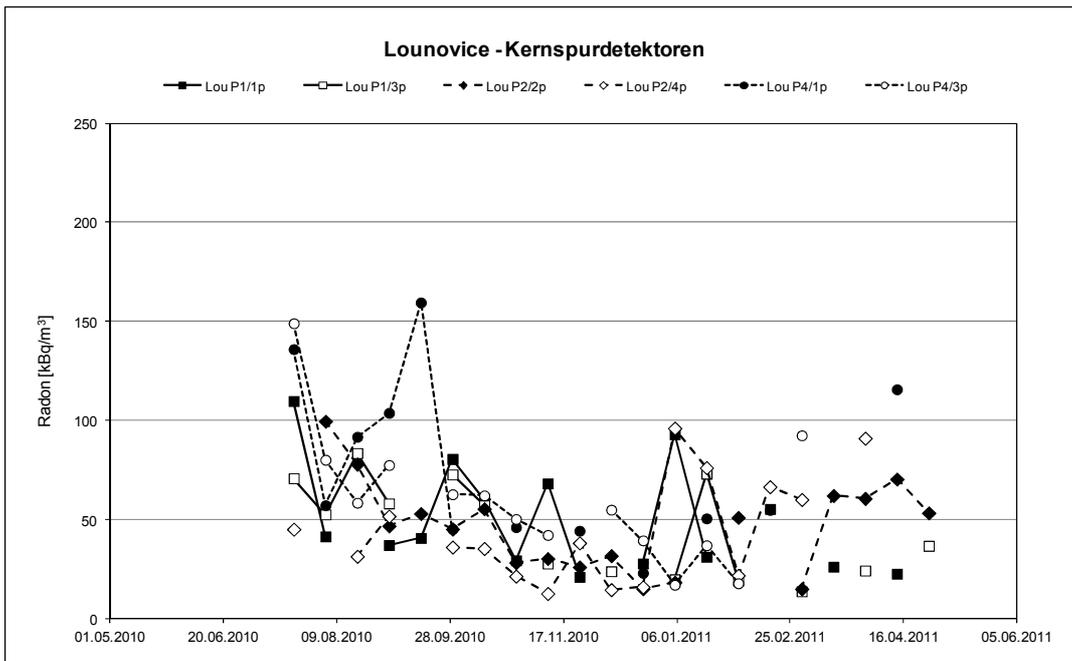


Abb. 37

Lounovice - Radonmessungen mit Kernspurdetektoren, oben: Einzelmessungen auf den drei Teilflächen, unten: Mittelwerte der Teilflächen und der Messfläche (Messwert jeweils bezogen auf Mitte der 14-tägigen Expositionszeit)

Das zugehörige Periodogramm zeigt einen hoch signifikanten Gang mit einer Periode von 280 Tagen mit unklarer Ursache (Abb. 38).

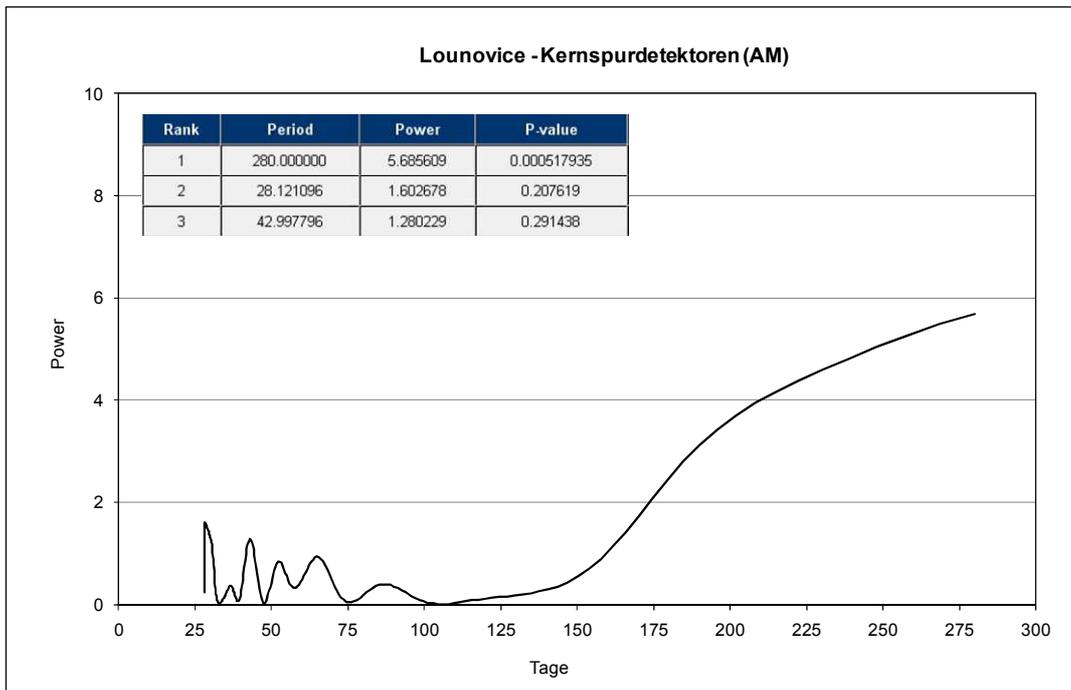


Abb. 38

Lounovice – Periodogramm der Messungen mit Kernspurdetektoren (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

Ohne Berücksichtigung von Teilfläche 4, zeigt die Gegenüberstellung von jeweils zwei Pegeln bei den Kurzzeitmessungen zumeist eine generelle Übereinstimmung (Abb. 39). Der Variationskoeffizient der einzelnen Pegelmessreihen liegt aber fast ausnahmslos zwischen 10 und 20 %. Die Unterschiede bei den Tschechischen Pegeln sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Art der Probenahme zurückzuführen. Bei den Kernspurdetektoren sind auf dieser Messfläche die Unterschiede geringer. Deutlich fallen die wesentlich niedrigeren Konzentrationen gegenüber den Kurzzeitmessungen auf.

In Tabelle 19 sind ausgesuchte statistische Kennwerte der Messreihen zusammengestellt.

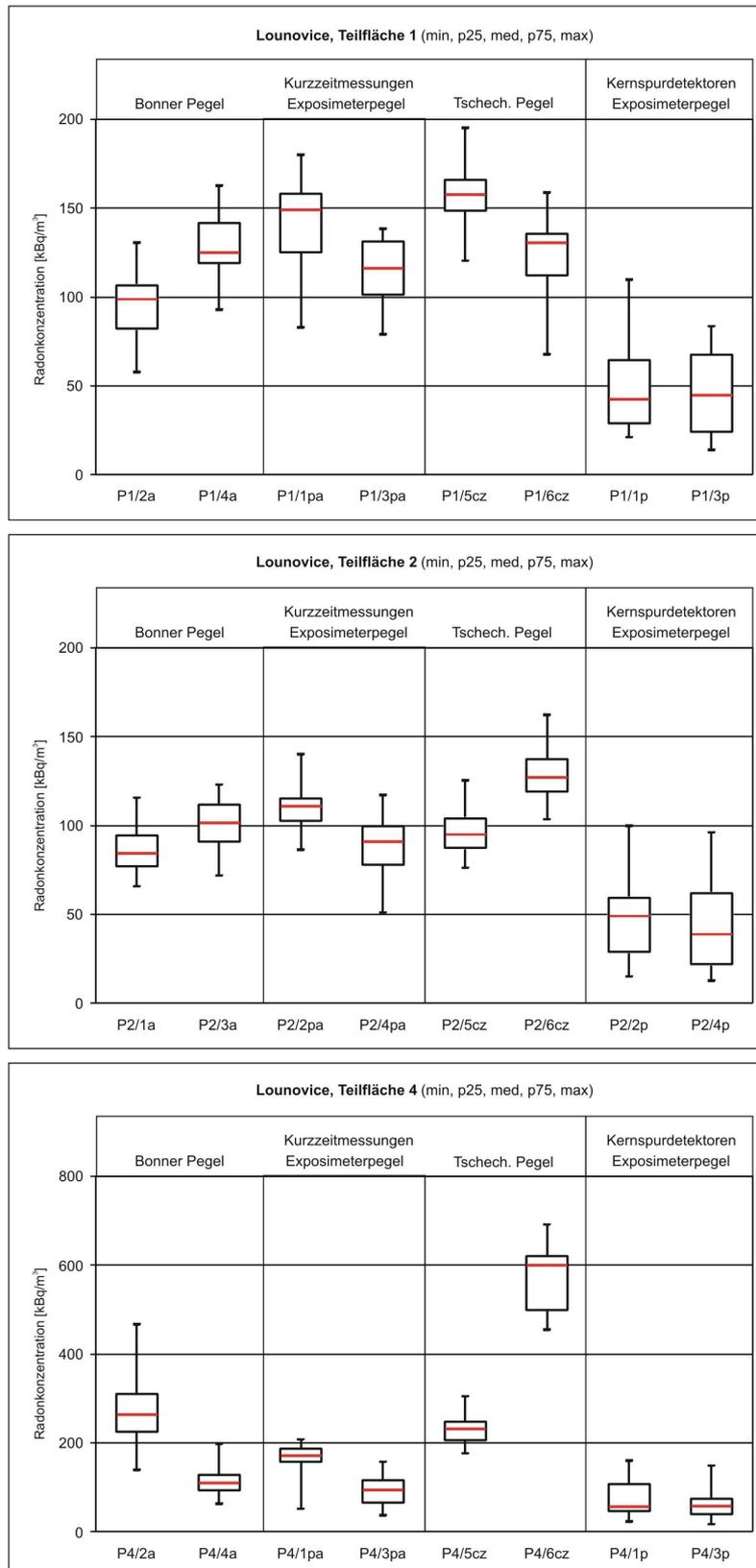


Abb. 39

Lounovice: Spannweiten der Radonkonzentration (Bonner Pegel, Exposimeterpegel, Tschech. Pegel, Kernspurdetektoren); dargestellt sind Minima, Maxima und Median sowie 1. und 3. Quartil (pz25 bzw. pz75)

Lounovice	Anzahl	Rn AM [kBq m ⁻³]	Var.koeff. [%]	Rn Min [kBq m ⁻³]	Rn Pz25 [kBq m ⁻³]	Rn Med [kBq m ⁻³]	Rn Pz75 [kBq m ⁻³]	Rn Max [kBq m ⁻³]
Bonner Pegel								
1/2a	27	94	20	58	82	97	107	131
1/4a	27	128	13	93	119	125	142	163
1a	54	111	22	58	96	113	129	163
2/1a	27	87	16	66	77	84	95	116
2/3a	27	100	15	72	91	103	112	123
2a	54	93	17	66	80	93	107	123
4/2a	26	266	28	139	226	265	310	467
4/4a	25	113	25	63	94	112	127	199
4a	51	191	50	63	113	149	265	467
Tschechische Pegel								
1/5acz	27	157	11	120	149	156	166	195
1/6acz	27	123	16	68	112	130	135	159
1acz	54	140	18	68	129	137	157	195
2/5acz	27	97	13	76	87	95	104	126
2/6acz	27	128	11	103	119	126	137	162
2acz	54	113	18	76	95	113	126	162
4/5acz	27	230	13	177	207	235	248	305
4/6acz	27	567	13	455	500	598	621	692
4acz	54	398	45	177	235	380	588	692
Exposimeterpegel								
1/1pa	23	142	18	83	125	149	158	180
1/3pa	27	114	17	79	102	116	131	138
1pa	50	127	21	79	108	127	143	180
2/2pa	27	111	11	86	103	111	115	140
2/4pa	27	90	18	51	78	91	100	117
2pa	54	100	17	51	90	101	112	140
4/1pa	27	166	20	52	157	171	187	208
4/3pa	27	95	36	37	66	95	115	158
4pa	54	130	37	37	93	133	170	208
Kernspurdetektoren								
1/1p	15	50	55	21	29	41	64	110
1/3p	14	45	53	14	24	45	68	84
1p	29	48	54	14	26	41	68	110
2/2p	18	47	49	15	29	49	59	100
2/4p	16	45	60	13	22	37	62	96
2p	34	46	53	13	27	45	61	100
4/1p	12	77	55	23	46	56	107	160
4/3p	14	60	56	17	40	57	74	149
4p	26	68	56	17	45	56	89	160

Tab. 19

Lounovice: Statistische Kennwerte für Bonner Pegel, Tschechische Pegel, Exposimeterpegel und Kernspurdetektoren

9.3 Meteorologische und bodenkundliche Parameter

Für die drei Messflächen wird nachfolgend der Gang ausgesuchter meteorologischer und bodenphysikalischer Parameter über den einjährigen Messzeitraum hinweg dargestellt. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um Lufttemperatur, Luftdruck, Niederschlag, Bodentemperatur (in 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m Tiefe), Bodenfeuchte (in 0,5 m, 1,0 m und 1,5 m Tiefe) und die Gasdurchlässigkeit des Bodens. Die Ganglinien weiterer Parameter (Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit) sind in Anhang 1 enthalten.

Die Daten der Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld wurden mit denen der ca. 20 km entfernt gelegenen Station 10513 Köln-Bonn des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verglichen. Wesentliche Unterschiede zu den Ganglinien der o.g. Messflächen zeigten sich hierbei nicht.

Beim zeitlichen Gang der **Lufttemperatur** zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Messflächen in Bonn und Tschechien (Abb. 40). Stets ist ein deutlicher Jahresgang mit höheren Werten im Sommer und niedrigeren Werten im Winter zu beobachten, wie es für unsere mitteleuropäischen Breiten charakteristisch ist. Auch die absoluten Temperaturwerte sowie die Spannweiten sind vergleichbar; letztere ist in Tschechien geringfügig größer (-15 bis +35 °C) als in Bonn (-10 bis +35 °C).

Auch beim **Luftdruck** sind keine Unterschiede zwischen den Messflächen erkennbar (Abb. 41). Absolutwerte wie auch die Spannbreite sind vergleichbar (ca. 980 bis 1.040 hPa, normiert auf Meereshöhe). Ein Jahresgang ist nicht erkennbar. Saisonale großräumige, überregionale Wettersituationen spiegeln sich in diesem Datenbestand nicht wider; die Luftdruckunterschiede dürften ihre Ursache in der jeweiligen regionalen Wetterlage haben

Auch bei der Verteilung des **Niederschlages** lassen die Daten keinen Jahresgang erkennen (Abb. 42). Erhöhte Niederschläge sind lokale Ereignisse; Spitzen sind auf entsprechende kurzzeitige Starkregenereignisse zurückzuführen.

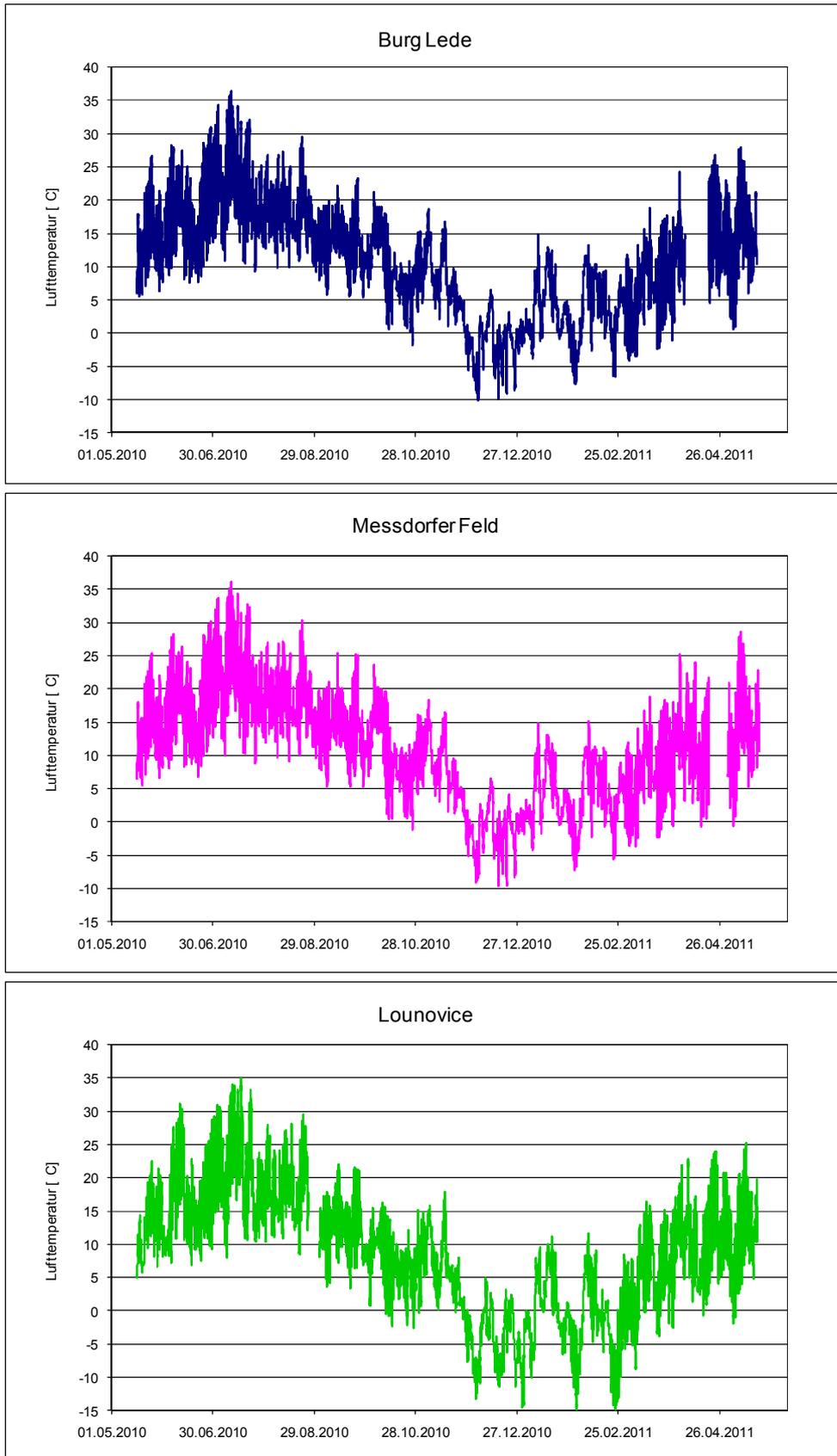


Abb. 40
Zeitlicher Gang der Lufttemperatur auf den drei Messflächen

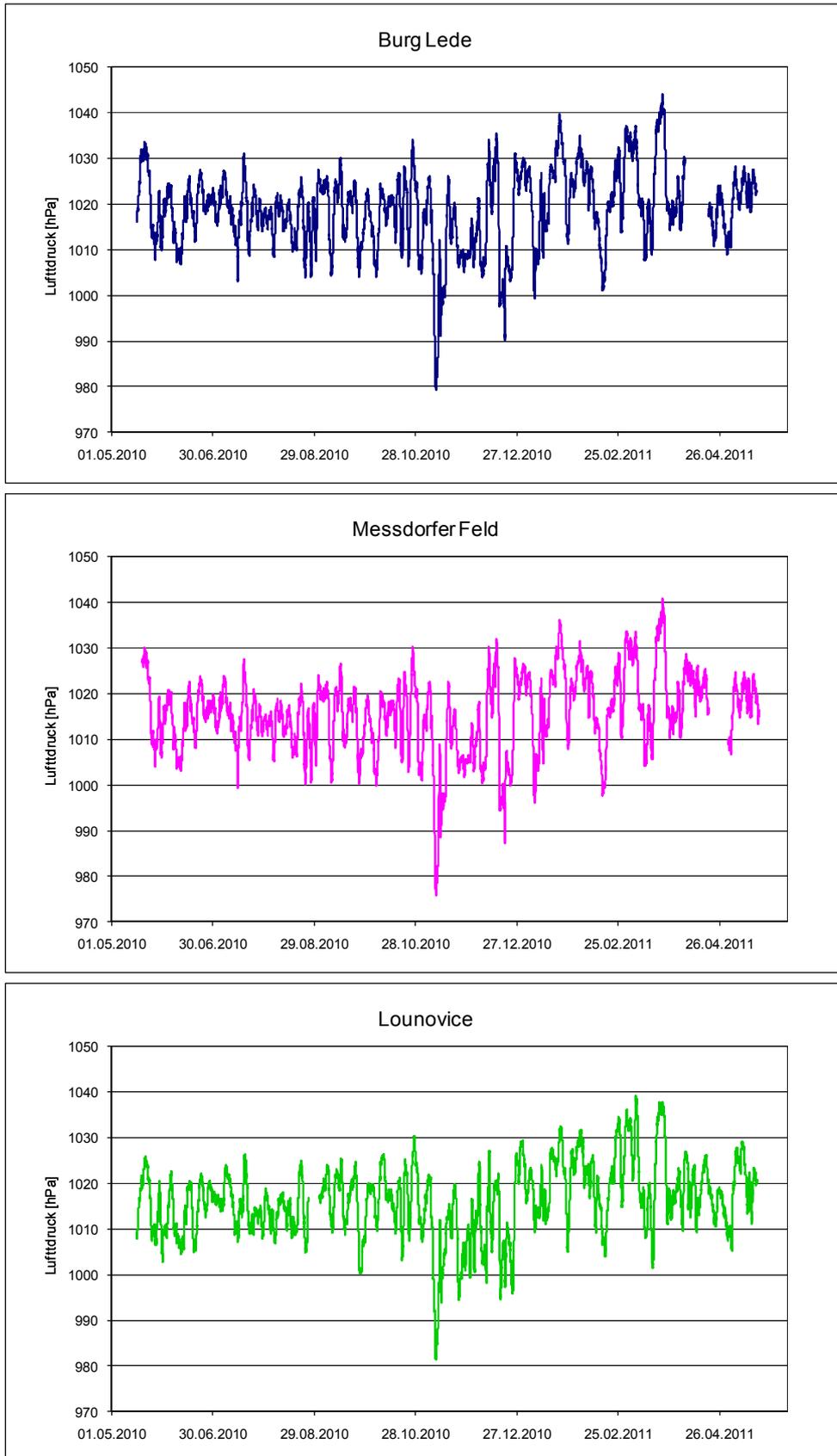


Abb. 41
Zeitlicher Gang des Luftdruckes auf den drei Messflächen

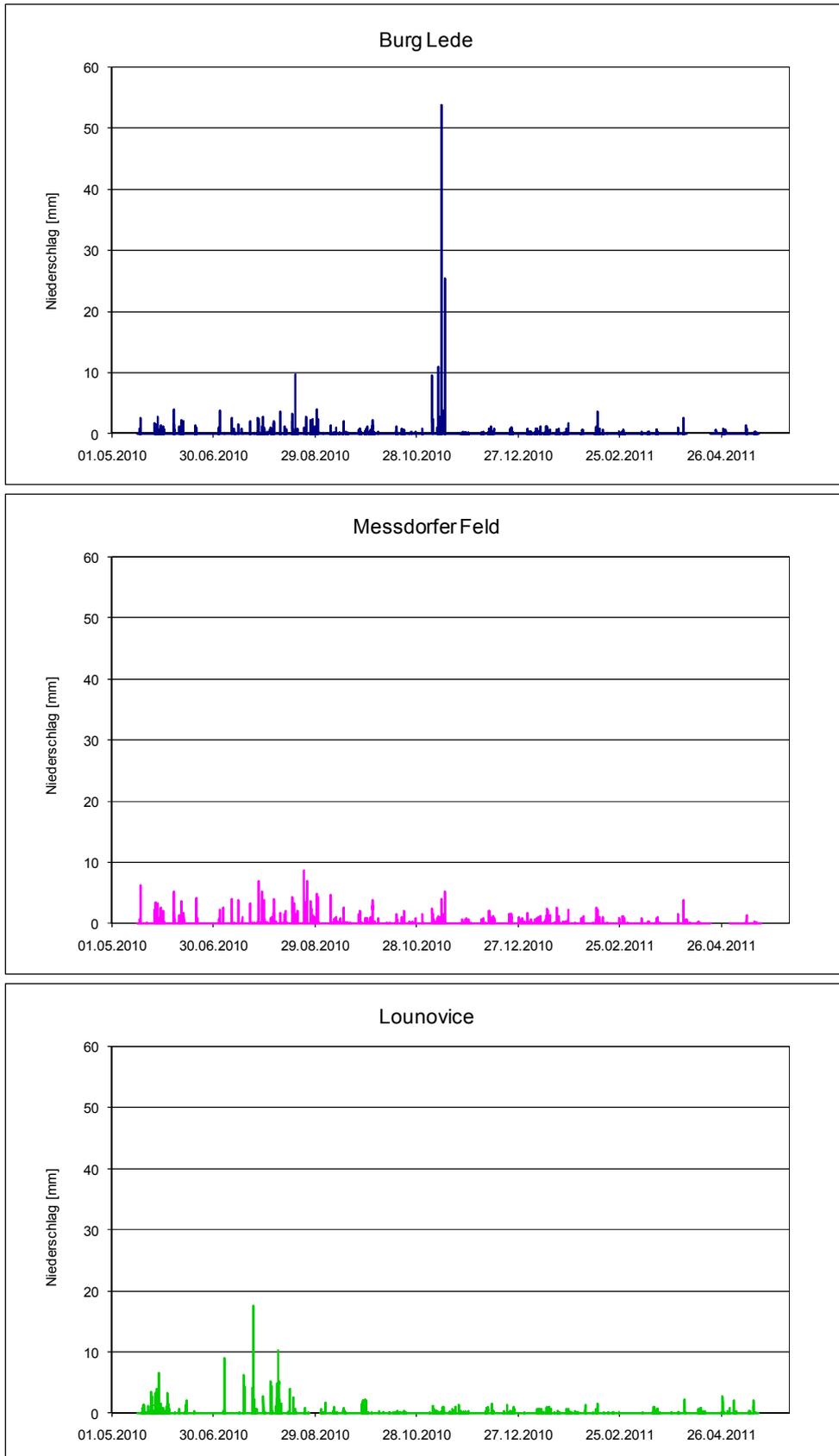


Abb. 42
Niederschlagsereignisse auf den drei Messflächen

Auf allen Messflächen erfolgten in drei unterschiedlichen Tiefen (0,5 m, 1,0 und 1,5 m) Messungen der **Bodentemperatur** (Abb. 43). Unterschiede im jahreszeitlichen Gang dieses Parameters zwischen den einzelnen Flächen waren nicht festzustellen. Erwartungsgemäß folgt die Bodentemperatur der Lufttemperatur: Höhere Temperaturen im Sommer stehen niedrigeren Werten im Winter gegenüber. Die Amplituden des Jahresganges sind im oberflächennäheren Niveau größer und nehmen mit größerer Tiefe ab. Der jahreszeitliche Verlauf glättet sich somit. Die absoluten Werte und die Spannweiten auf den drei Messflächen sind generell ähnlich. In 1,0 m Tiefe, aus der die Bodenluftproben für die Radonmessungen stammen, ist die Spannweite in Tschechien geringfügig größer (+3 bis +18 °C) als in Bonn (+5 bis +16 °C).

Parallel zur Bodentemperatur wurde an allen Messflächen in drei unterschiedlichen Tiefen (0,5 m, 1,0 und 1,5 m) auch die **Bodenfeuchte** ermittelt (Abb. 44; hier zusätzlich auch Niederschlagsereignisse dargestellt).

Anmerkung:

Die Einheit der Bodenfeuchte ist centibar. Hierbei handelt es sich um den Unterdruck, den eine Pflanze aufwenden muss, um gegen die Kapillarkraft Wasser aus dem umgebenden Boden anzusaugen. Ein niedriger centibar-Wert steht für feuchte, ein hoher Wert für trockene Bedingungen.

Hier gibt es im Vergleich zur Bodentemperatur ein anderes Bild, weil die Bodenfeuchte - insbesondere in den oberflächennahen Niveaus - u.a. auch durch lokale Niederschlagsereignisse mit anschließender Versickerung des Regenwassers beeinflusst und gesteuert wird. Dementsprechend kann man unterschiedliche Verläufe auf den Messflächen beobachten, sowohl im Grad der Bodendurchfeuchtung als auch im Tiefenverlauf. Auf dem Messdorfer Feld und in Lounovice ist die Variation in der Regel im oberflächennahen Niveau (0,5 m) am höchsten, im tiefsten Niveau (1,5 m) am geringsten. In Burg Lede überlagern sich die Verläufe in 1,0 und 1,5 m Tiefe, d.h. zeitweise ist die Bodenfeuchte in 1,0 m Tiefe am höchsten, zeitweise in 1,5 m Tiefe. Änderungen in der Höhe des Grundwasserspiegels nahe des Rheins können eine Erklärung sein. In Burg Lede und auf dem Messdorfer Feld sind saisonale Unterschiede in der Bodenfeuchte erkennbar: Von Juli bis November/Dezember ist die Bodenfeuchte in 1,0 und 1,5 m Tiefe vergleichsweise gering, z.T. aber stark schwankend. Von Dezember bis Mai ist eine vergleichsweise hohe Durchfeuchtung mit nur geringen Schwankungen zu beobachten. In Lounovice waren die niedrigsten Werte mit nur geringen Schwankungen festzustellen. Die größte Variation erfolgte im oberflächennahen Niveau (0,5 m). Zeitweise sind Korrelationen mit Niederschlagsereignissen erkennbar, insbesondere im Juli/August 2010. Ein Jahresgang existiert aber nicht.

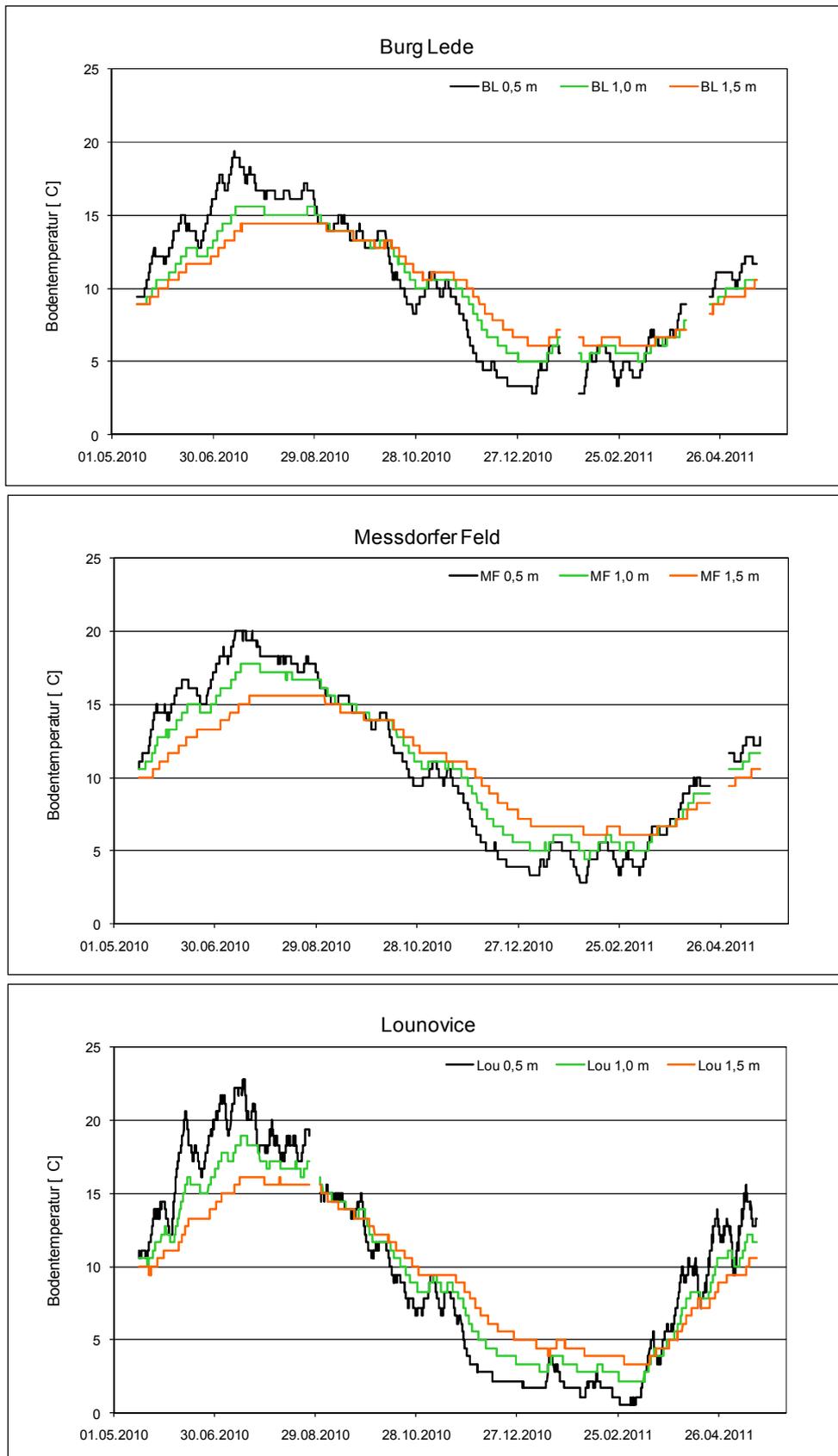


Abb. 43
Gang der Bodentemperatur (0,5 m, 1,0 m und 1,5 m Tiefe) auf den drei Messflächen

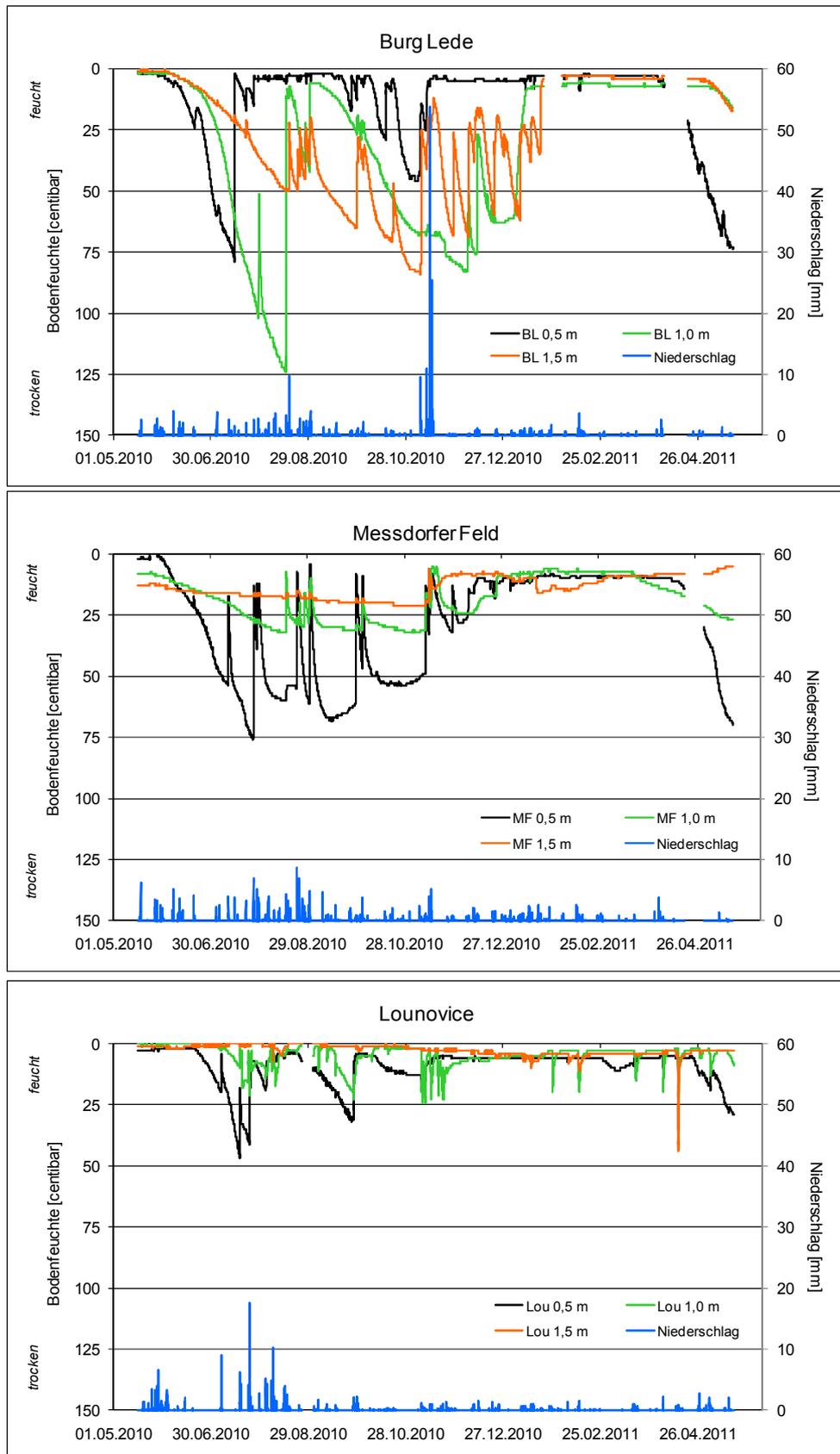


Abb. 44
 Gang der Bodenfeuchte (0,5 m, 1,0 m und 1,5 m Tiefe; linke Skala)
 auf den drei Messflächen mit Niederschlagsmengen (rechte Skala)

Die **Gasdurchlässigkeit** (Abb. 45) zeigt auf den drei Messflächen ein unterschiedliches Verhalten. In Burg Lede ist auf allen drei Teilflächen ein deutlicher Jahresgang mit erhöhter Durchlässigkeit von Juli bis Januar und verringerter Durchlässigkeit zwischen Februar und Juni erkennbar. Die dazwischen liegenden „Übergangszeiten“ sind durch sehr kurzdauernde (steile) Anstiege bzw. Abfälle gekennzeichnet. Die Spannbreite der Gasdurchlässigkeit beträgt ca. eine halbe Größenordnung. Auf dem Messdorfer Feld dagegen ist kein Jahresgang erkennbar. In Lounovice variiert die Gasdurchlässigkeit auf jeder der drei Teilflächen am deutlichsten. Ein Jahresgang ist aber auch hier nicht erkennbar.

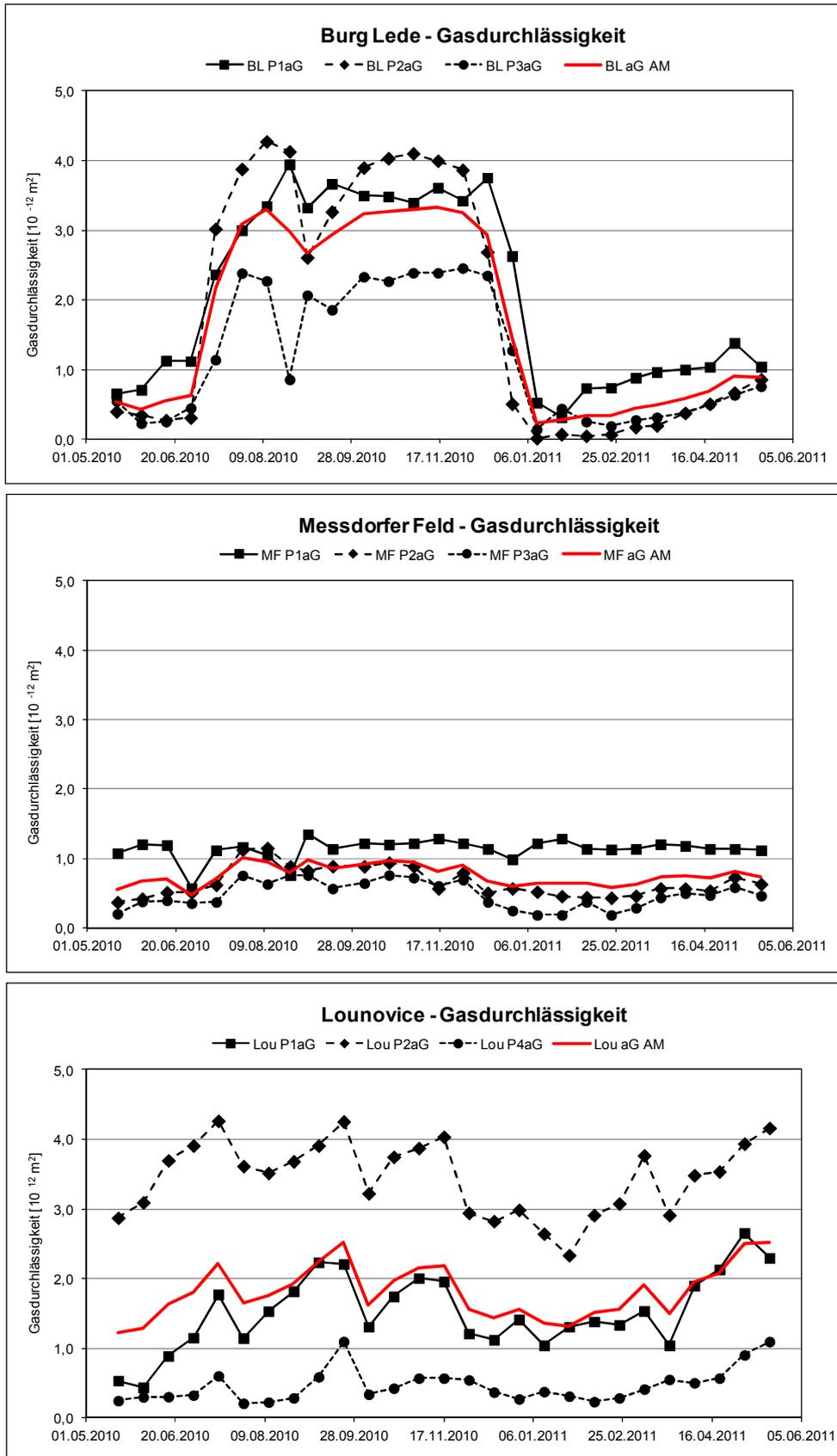


Abb. 45
Gang der Gasdurchlässigkeit des Bodens auf den drei Messflächen

Für die Messfläche Burg Lede zeigt das Periodogramm den hoch signifikanten Gang für eine 335-Tagesperiode, die als Jahresgang interpretiert werden kann (Abb. 46). Für die Messflächen Messdorfer Feld und Lounovice dagegen sind hoch signifikante Gänge mit kürzeren Perioden (278 bzw. 252 Tage) zu beobachten, deren Ursachen unklar sind (Abb. 47 und 48).

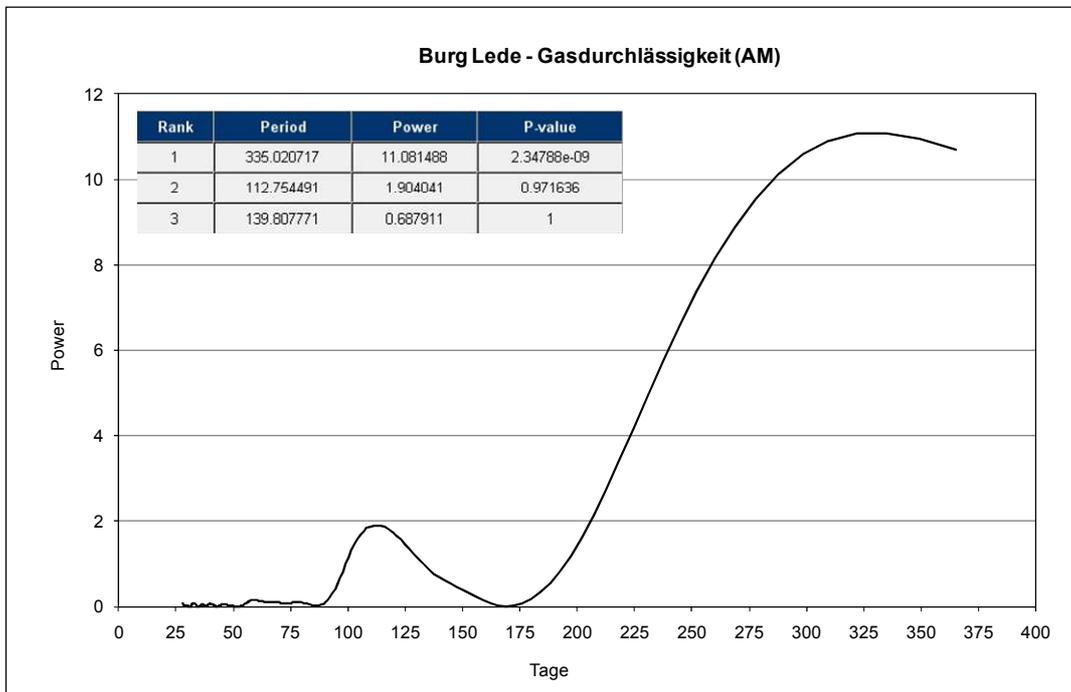


Abb. 46

Burg Lede – Periodogramm der Messungen der Gasdurchlässigkeit des Bodens (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

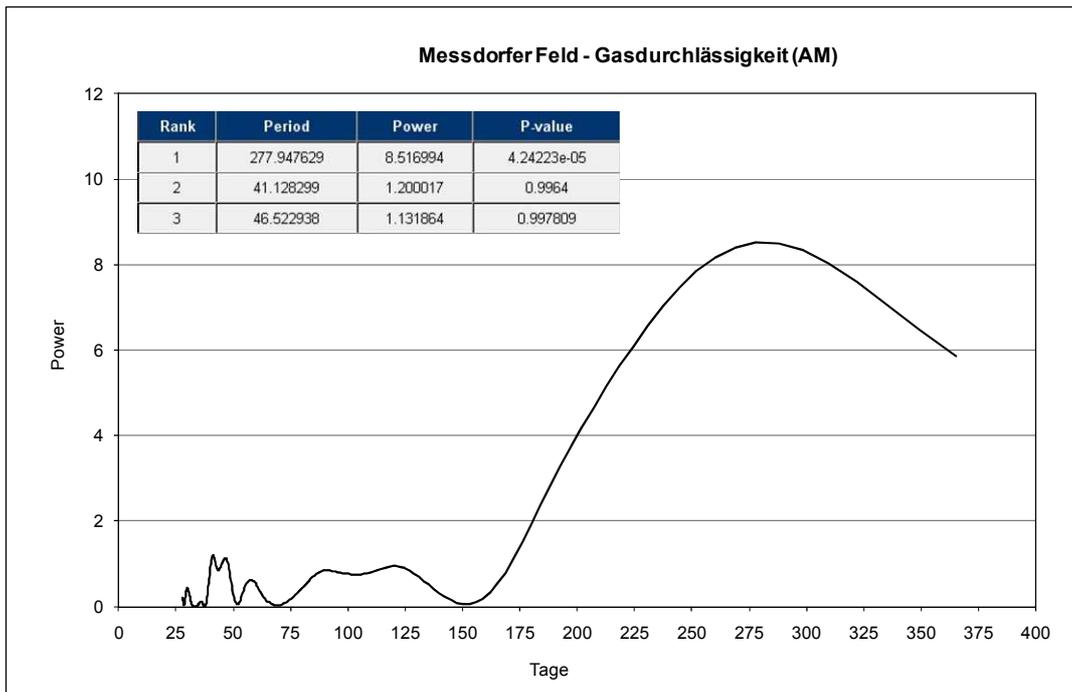


Abb. 47
 Messdorfer Feld – Periodogramm der Messungen der Gasdurchlässigkeit des Bodens (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

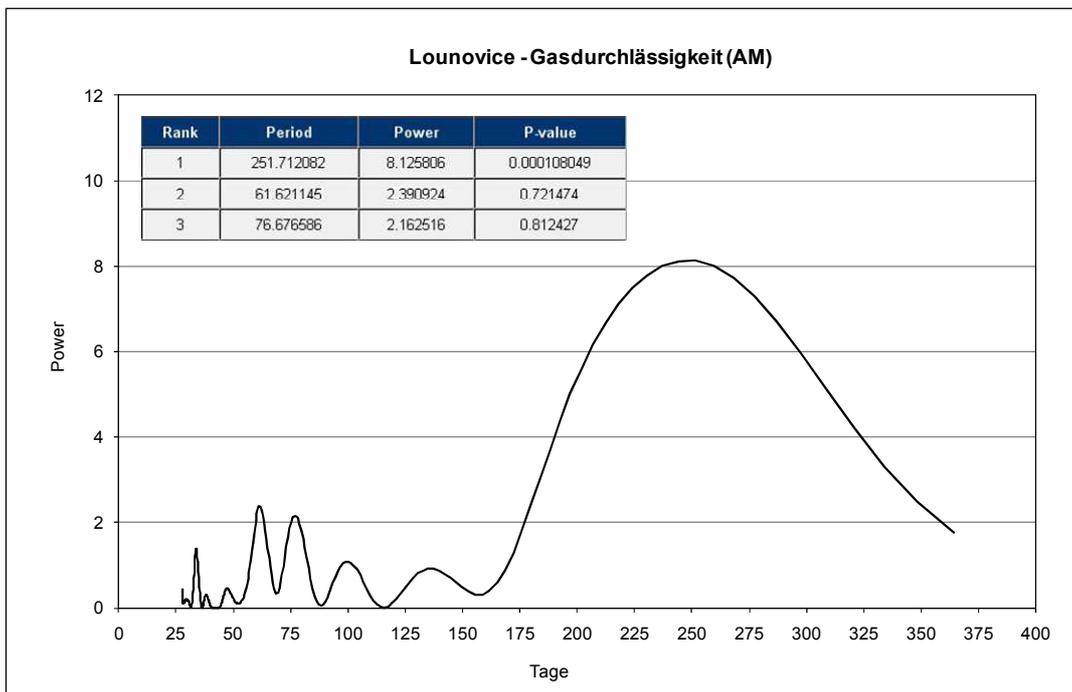


Abb. 48
 Lounovice – Periodogramm der Messungen der Gasdurchlässigkeit des Bodens (arithmetischer Mittelwert der drei Teilflächen)

10. Auswertung

10.1 Saisonale Unterschiede

Zur Klärung einer möglichen saisonalen Abhängigkeit der Radonkonzentration in der Bodenluft wurden die Ergebnisse der einzelnen Messpunkte unterschieden zwischen Sommer- (Mai bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis April) betrachtet. In Boxplots sind die Resultate in Form der Minima und Maxima sowie des 1. und 3. Quartils (p₂₅ bzw. p₇₅) einander gegenübergestellt, wobei innerhalb des Quartilbalkens also 50 % der Messwerte liegen. Aus den arithmetischen Mittelwerten der einzelnen Messreihen wurden jeweils die Quotienten Winter/Sommer berechnet. Des Weiteren sind die Beziehungen zwischen Radon (Kurzzeitmessungen und integrierende Messungen mit Kernspurdetektoren) und der Luft- bzw. Bodentemperatur (1,0 m Tiefe) sowie zur Gasdurchlässigkeit des Bodens dargestellt.

Vorab sei angemerkt, dass eine einzige 12-monatige Messkampagne selbstverständlich nicht ausreichend lang ist, um allgemeingültige Aussagen über einen Jahresgang der Radonkonzentration in der Bodenluft sowie dessen mögliche Abhängigkeit von meteorologischen und/oder bodenphysikalischen Parametern treffen zu können. Da auch die genannten Parameter durchaus von Jahr zu Jahr Variationen unterliegen, müssten die Messreihen zeitlich auf mehrere Jahre ausgedehnt werden, um eine ausreichende Datengrundlage für belastbare Aussagen über einen möglichen Radongang in der Bodenluft und dessen mögliche Abhängigkeit(en) zu haben. Unterschiede von Jahr zu Jahr sind von Langzeituntersuchungen der Radonkonzentration in der Raumluft durchaus bekannt. In identischen Häusern können die über mehrere Jahre hinweg erhobenen Jahresmittelwerte deutlich variieren (Martz et al. 1991; Denman et al. 2007). Die vorliegenden Ergebnisse können daher nur einen ersten Eindruck vermitteln. Sie zeigen immerhin auf, dass an unterschiedlichen Messorten und bei Einsatz unterschiedlicher Messverfahren durchaus unterschiedliche Jahresgänge auftreten.

10.1.1 Burg Lede

In Burg Lede ist an fast allen Pegeln ein jahreszeitlicher Trend der Radonkonzentration zu beobachten (Abb. 49). Besonders deutlich wird er bei den Bonner Pegeln auf Teilfläche 2; das Verhältnis Winter/Sommer fällt hier mit dem Faktor von ca. 1,5 auch am höchsten aus. Auf den Teilflächen 1 und 3 ist die Erhöhung im Winter geringer (durchschnittlicher Faktor Winter/Sommer: ca. 1,2). Hier ist zu berücksichtigen, dass auf diesen beiden Teilflächen die durchschnittlich niedrigsten Radonkonzentrationen auftreten (ca. 20 bis 40 kBq/m³) und daher bereits geringe Schwankungen der Absolutwerte eine erhebliche prozentuale Veränderung bedeuten.

Die Messungen mit Kernspurdetektoren sind im Winter fast ausnahmslos niedriger als im Sommer; der Quotient Winter/Sommer schwankt zwischen ca. 0,5 und 1,0.

In Abbildung 50 sind die Radonkonzentrationen der **Kurzzeitmessungen** in den Bonner Pegeln und den Exposimeterpegeln auf der Messfläche Burg Lede den Ganglinien der Luft- sowie der Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe gegenübergestellt. Die beiden Temperaturgänge zeigen denselben Verlauf mit jeweils einem Maximum im Sommer und einem Minimum im Winter (im Boden mit geringerer Schwankungsbreite). Die Radonkonzentrationen sind der Temperatur gegenläufig, beide Parameter also negativ miteinander korreliert, besonders gut erkennbar an der Ganglinie von Teilfläche 2.

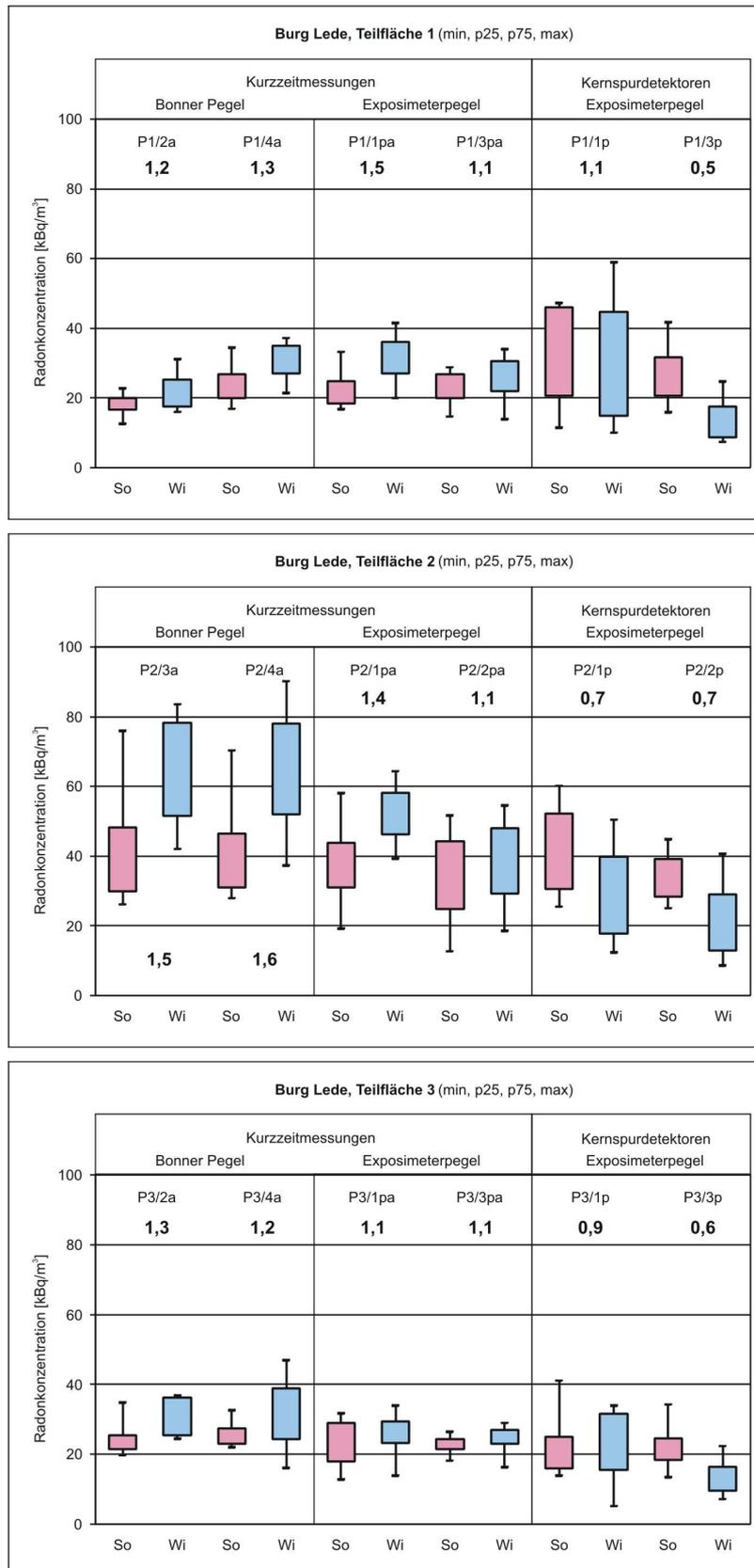


Abb. 49
 Burg Lede: Saisonale Spannweiten der Radonkonzentration mit Angabe der Quotienten der arithmetischen Mittel Winter/Sommer

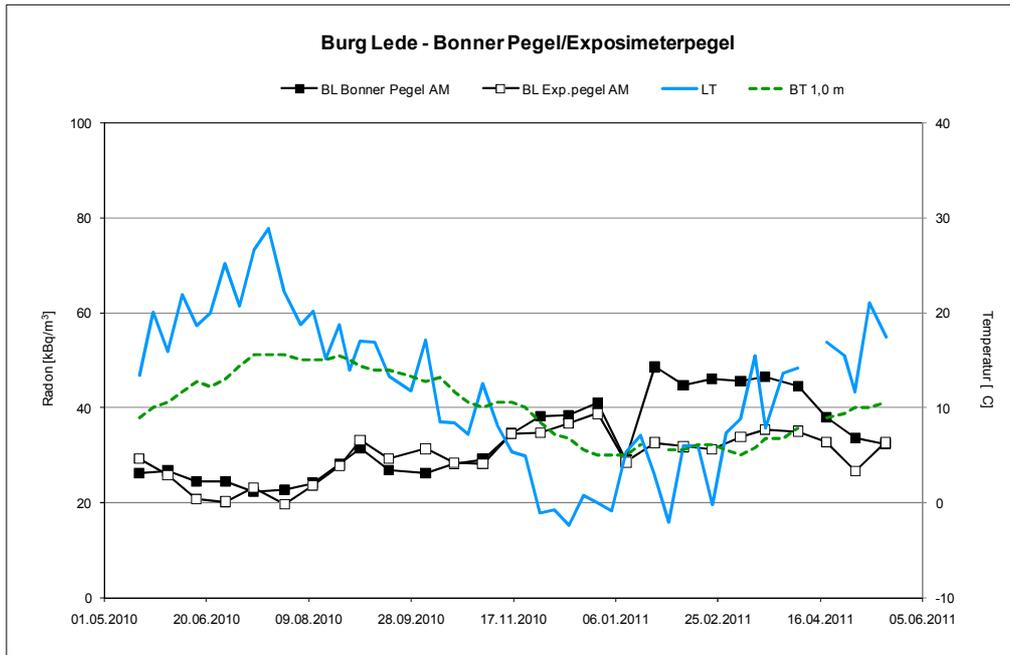


Abb. 50

Burg Lede: Vergleich Radonkurzzeitmessungen an Bonner Pegeln und Exposimeterpegeln (jeweils arithmetischer Mittelwert; s. Abb. 18 unten und Abb. 20 unten) mit Lufttemperatur (LT) und Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (BT)

Bei den Messungen mit **Kernspurdetektoren** besteht auf der Messfläche Burg Lede lediglich für Teilfläche 2 eine (positive) Korrelation zur Lufttemperatur und für die Teilflächen 2 und 3 eine (positive) Korrelation zur Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (Abb. 51; s.a. Tab. 12). Im Sommer wurden hier also höhere Radonkonzentrationen als im Winter gemessen.

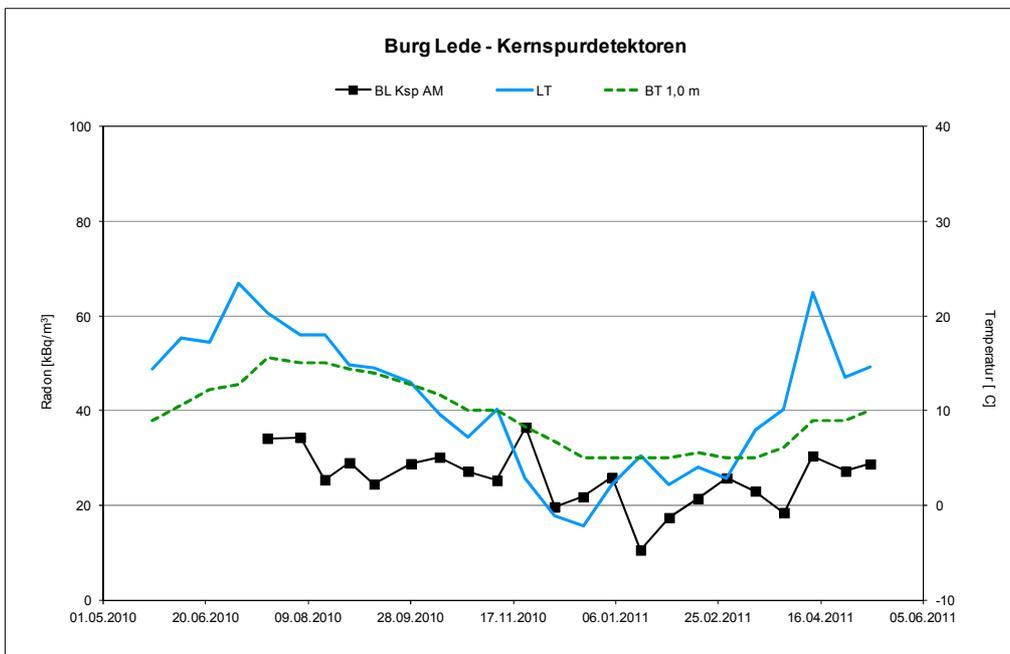


Abb. 51

Burg Lede: Vergleich Kernspurdetektoren (arithmetischer Mittelwert; s. Abb. 22 unten) mit Lufttemperatur (LT) und Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (BT)

Die Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte aller Kurzzeitmessungen sowie der Kernspurdetektoren und der arithmetischen Mittelwerte der **Gasdurchlässigkeiten** des Bodens liefert ein unterschiedliches Bild (Abb. 52). Für die Kurzzeitmessungen ergibt sich eine negative Korrelation. Hier sind bei erhöhten Gasdurchlässigkeiten im Sommer die Radonkonzentrationen tendenziell geringer, bei undurchlässigeren Böden im Winter tendenziell höher. Zwischen den Gasdurchlässigkeiten und den Messwerten der Kernspurdetektoren besteht keine Korrelation.

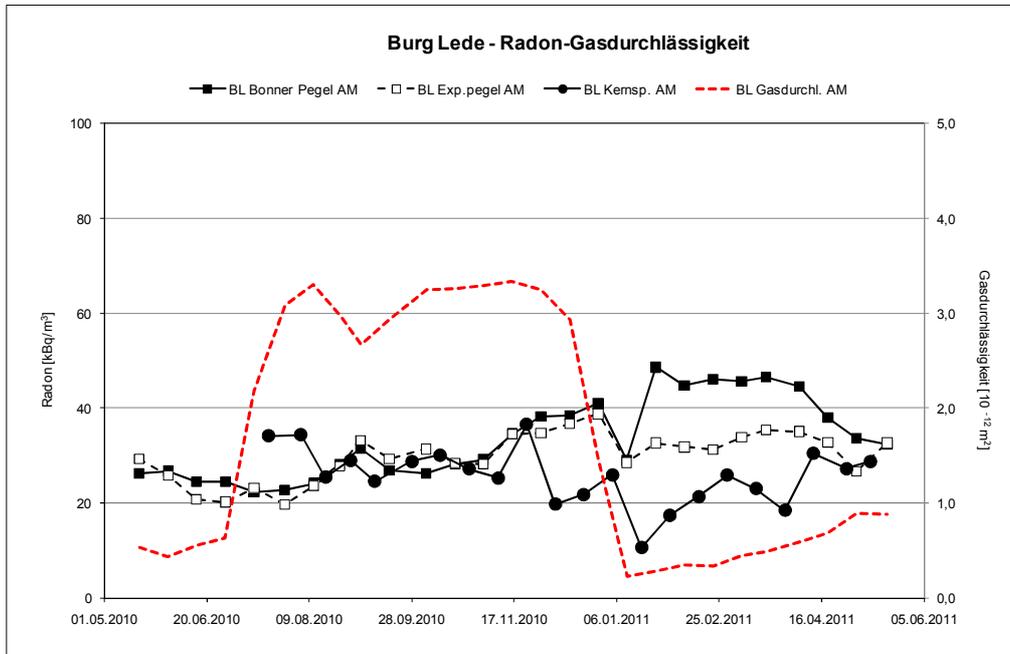


Abb. 52

Burg Lede: arithmetische Mittelwerte der Kurzzeitmessungen und der integrierenden Messungen mit Kernspurdetektoren sowie der Gasdurchlässigkeit (s. Abb. 18 unten, Abb. 20 unten, Abb. 22 unten und Abb. 45 oben)

10.1.2 Messdorfer Feld

Auch auf der Messfläche Messdorfer Feld ist ein jahreszeitlicher Trend zu beobachten (Abb. 53), aber weniger gut ausgeprägt als in Burg Lede. Die winterliche Erhöhung variiert zumeist zwischen ca. 1,0 und 1,2; nur in einem Fall reicht sie bis ca. 1,6.

Für die Messungen mit Kernspurdetektoren gelten dieselben Beobachtungen wie in Burg Lede: Im Winter fast ausnahmslos niedrigere Werte als im Sommer (Faktor Winter/Sommer: ca. 0,6 bis 0,9).

Abbildung 54 zeigt für das Messdorfer Feld den Zusammenhang zwischen den Radonkonzentrationen der **Kurzzeitmessungen** in den Bonner Pegeln und den Exposimeterpegeln sowie den beiden Temperaturganglinien. Es zeigen sich dieselben Abhängigkeiten wie in Burg Lede (negative Korrelation), wenngleich der saisonale Gang der Radonkonzentration hier weniger deutlich zu Tage tritt.

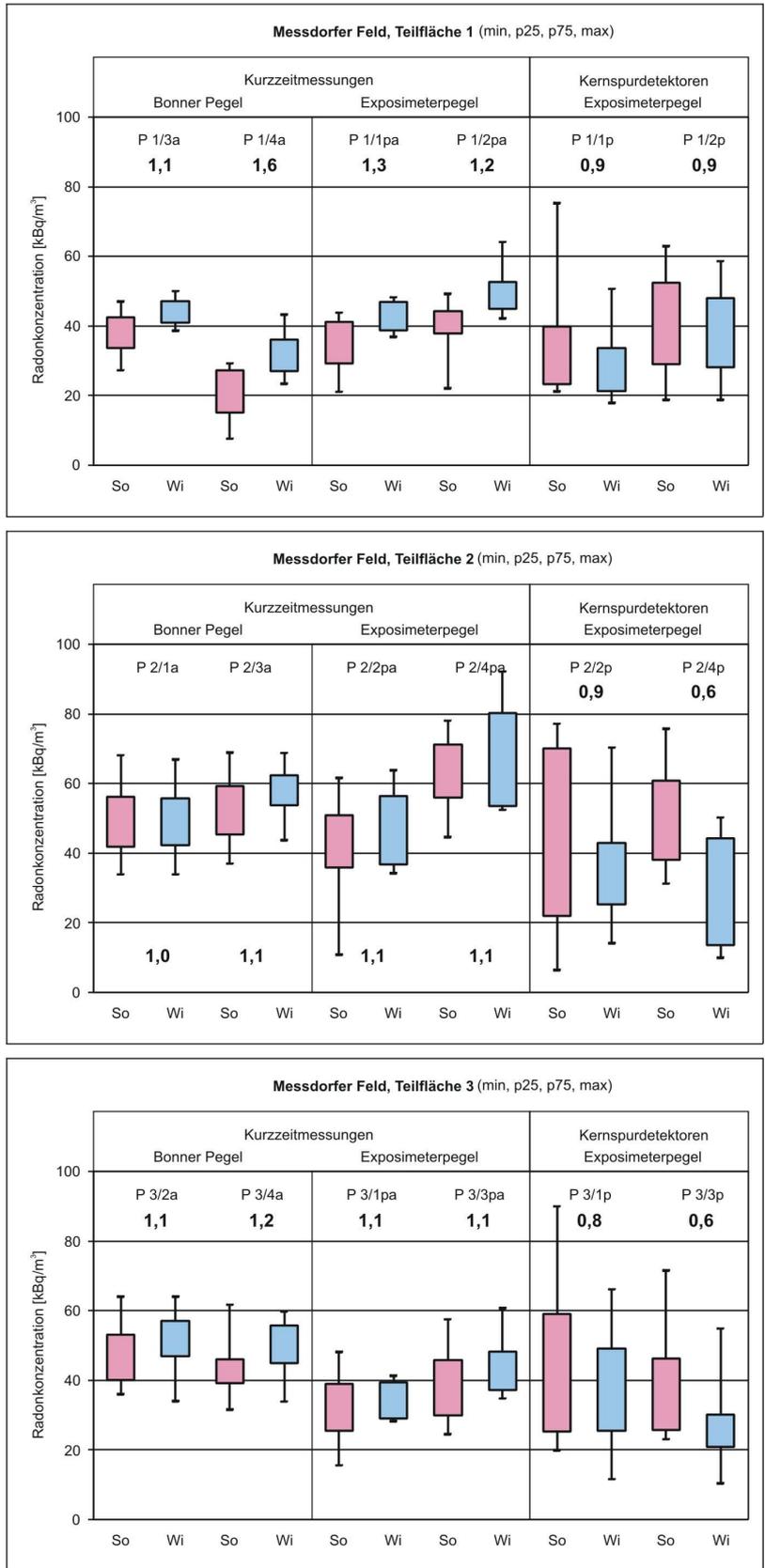


Abb. 53
 Messdorfer Feld: Saisonale Spannweiten der Radonkonzentration mit Angabe der Quotienten der arithmetischen Mittel Winter/Sommer

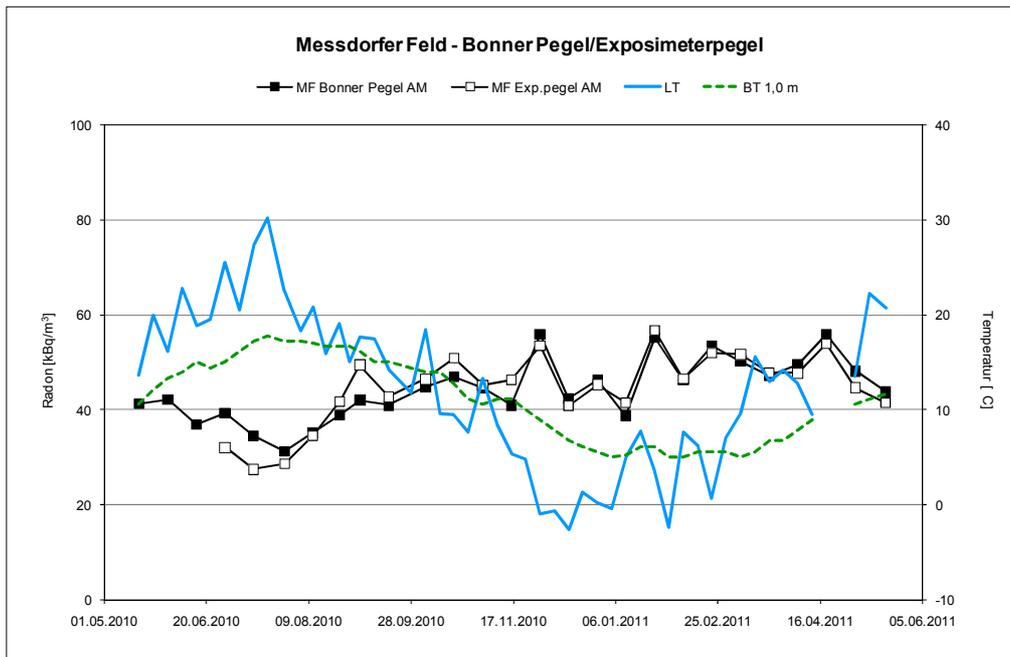


Abb. 54
 Messdorfer Feld: Vergleich Radonkurzzeitmessungen an Bonner Pegeln und Exposimeterpegeln (jeweils arithmetischer Mittelwert; s. Abb. 25 unten und Abb. 27 unten) mit Lufttemperatur (LT) und Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (BT)

Bei den Messungen mit **Kernspurdetektoren** lässt sich auf dem Messdorfer Feld lediglich für Teilfläche 3 eine (positive) Korrelation zur Bodentemperatur feststellen (Abb. 55; s. Tab 14).

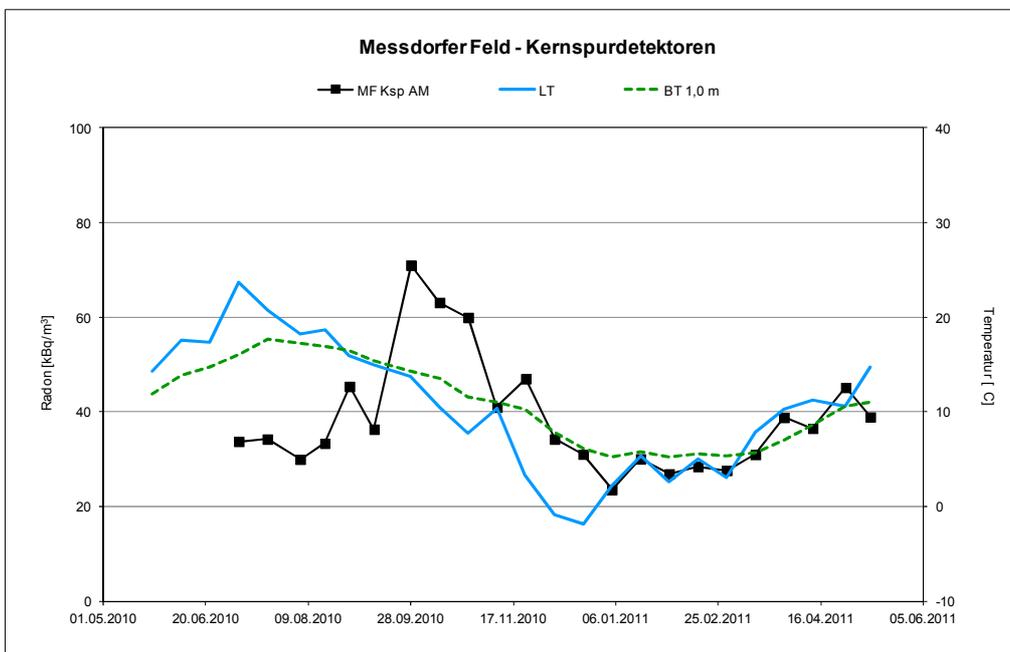


Abb. 55
 Messdorfer Feld: Vergleich Kernspurdetektoren (arithmetischer Mittelwert; s. Abb. 29 unten) mit Lufttemperatur (LT) und Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (BT)

Auch hier liefert die Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte aller Kurzzeitmessungen sowie der Kernspurdetektoren und der arithmetischen Mittelwerte der **Gasdurchlässigkeiten** des Bodens ein unterschiedliches Bild (Abb. 56). Im Gegensatz zu Burg Lede existiert für die Kurzzeitmessungen keine Korrelation, dagegen eine positive Korrelation zu den Ergebnissen der Kernspurdetektoren. Erhöhte Gasdurchlässigkeiten im Sommer gehen mit tendenziell höheren Radonkonzentrationen einher.

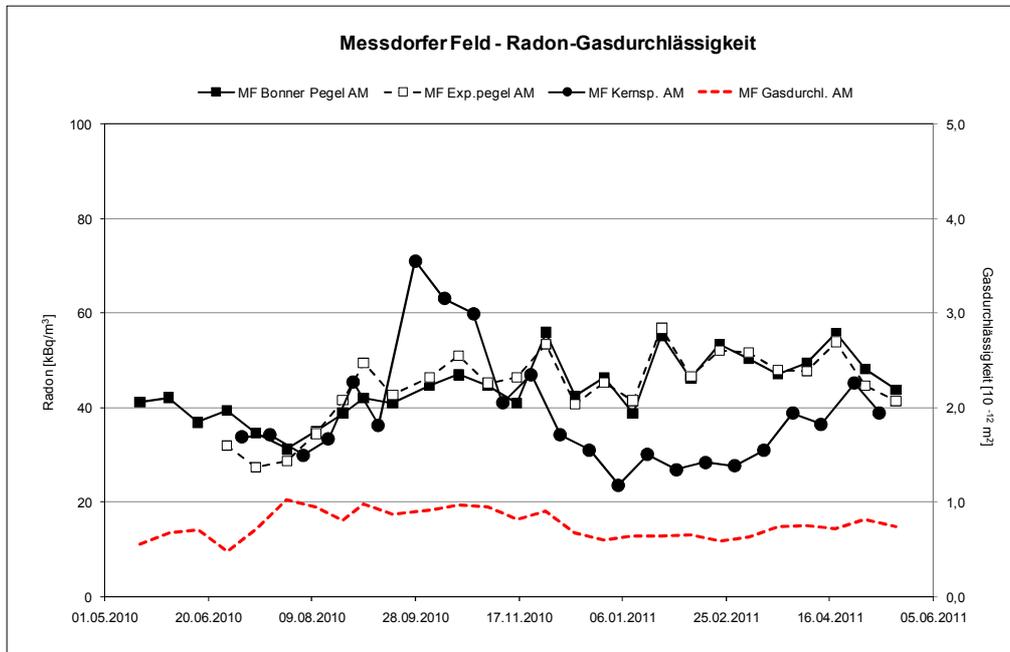


Abb. 56

Messdorfer Feld: arithmetische Mittelwerte der Kurzzeitmessungen und der integrierenden Messungen mit Kernspurdetektoren sowie der Gasdurchlässigkeit (s. Abb. 25 unten, Abb. 27 unten, Abb. 29 unten und Abb. 45 Mitte)

10.1.3 Lounovice

Auf der Messfläche Lounovice ist bei den Kurzzeitmessungen kein jahreszeitlicher Trend festzustellen (Abb. 57). Die Konzentrationen im Sommer- und Winterhalbjahr stimmen an allen Pegeln gut überein, variieren aber natürlich zwischen den einzelnen Pegeln. Der Faktor Winter/Sommer schwankt demgemäß auch nur zwischen ca. 0,9 und 1,1.

Bei den Messungen mit Kernspurdetektoren dagegen wurde derselbe Trend wie auf den beiden anderen Teilflächen beobachtet. Auch hier liegen die Winterwerte z.T. deutlich unter denen des Sommers (Faktor Winter/Sommer: ca. 0,5, bis 0,7). Lediglich an einem Pegel ist ein umgekehrtes Verhalten festzustellen.

Ins Auge fällt, dass die Radonkonzentrationen, die mit Kernspurdetektoren ermittelt wurden, deutlich unter denen der Kurzzeitmessungen liegen.

Auf der Messfläche Lounovice ist wegen des nicht vorhandenen saisonalen Ganges der Radonkonzentration keine Korrelation zwischen **Kurzzeitmessungen** und der Luft- bzw. Bodentemperatur zu beobachten (Abb. 58).

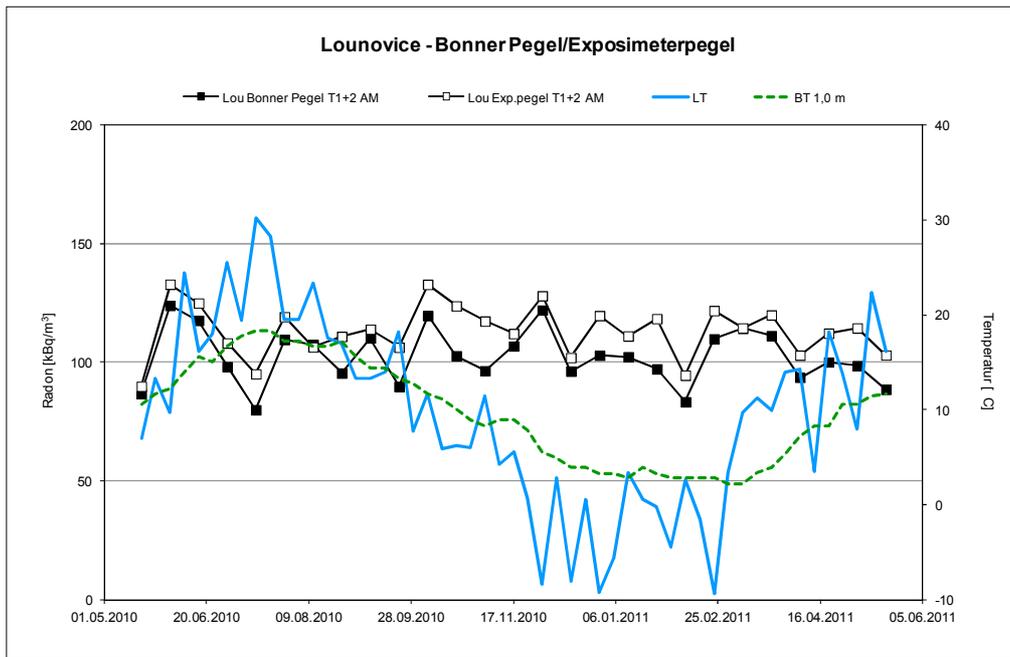


Abb. 58

Lounovice: Vergleich Radonkurzzeitmessungen an Bonner Pegeln und Exposimeterpegeln (Teilfläche 1 und 2; jeweils arithmetischer Mittelwert; s. Abb. 32 unten und Abb. 35 unten) mit Lufttemperatur (LT) und Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (BT)

Bei den Messungen mit **Kernspurdetektoren** existieren in Lounovice für die Teilflächen 1 und 4 (positive) Korrelationen zur Lufttemperatur und zur Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (Abb. 59; s. Tab. 16).

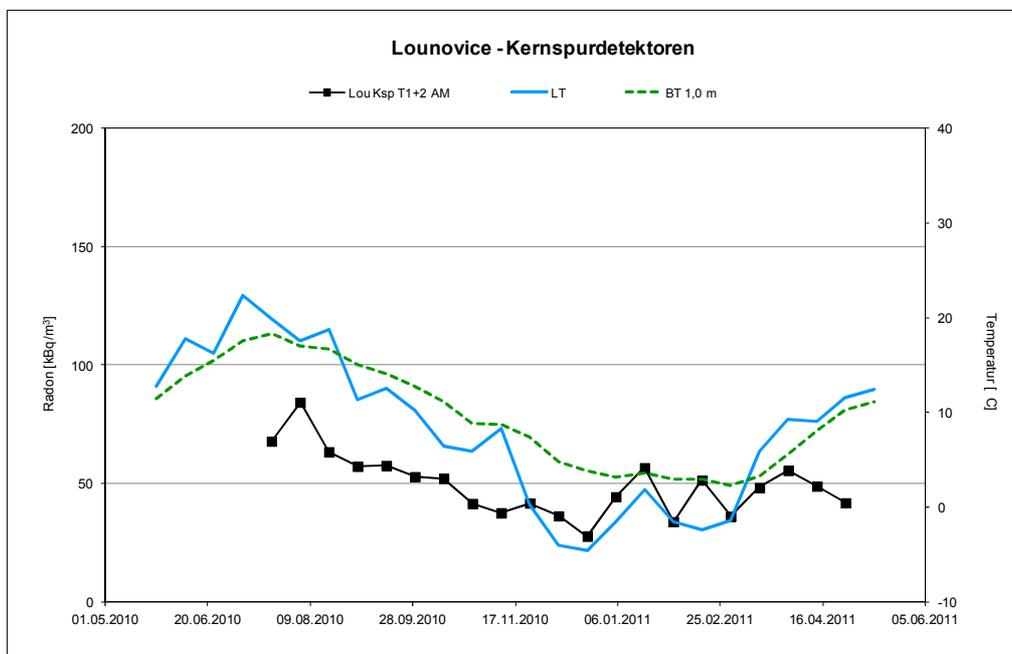


Abb. 59

Lounovice: Vergleich Kernspurdetektoren (Teilfläche 1 und 2; arithmetischer Mittelwert; s. Abb. 37 unten) mit Lufttemperatur (LT) und Bodentemperatur in 1,0 m Tiefe (BT)

Für Lounovice existiert keine Korrelation zwischen den **Gasdurchlässigkeiten** des Bodens und den Kurzzeitmessungen bzw. den Messungen mit Kernspurdetektoren (Abb. 60).

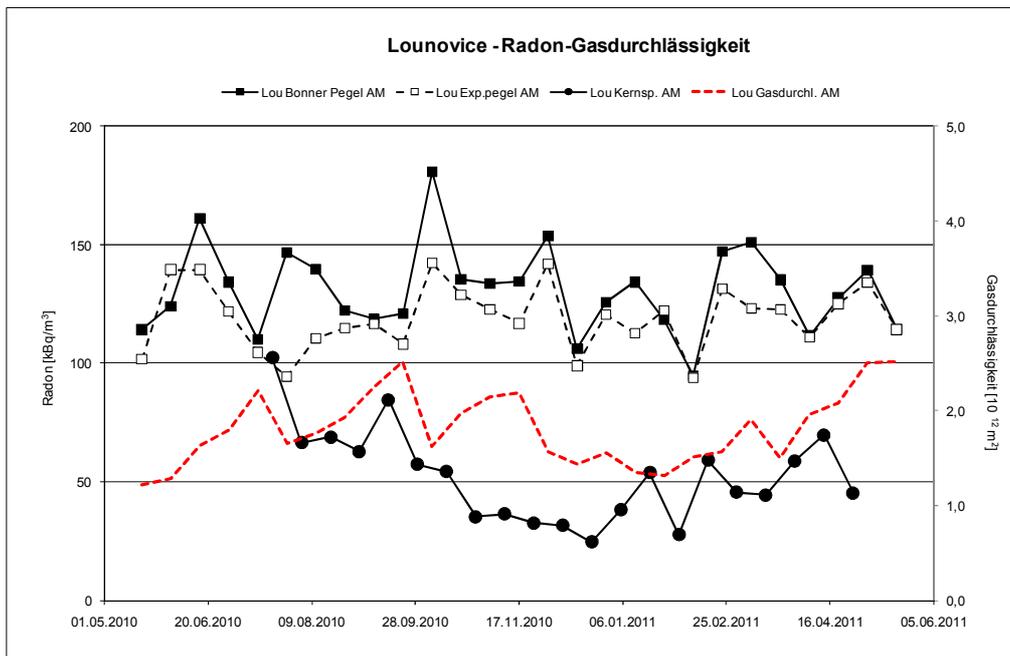


Abb. 60

Lounovice: arithmetische Mittelwerte der Kurzzeitmessungen und der integrierenden Messungen mit Kernspurdetektoren sowie der Gasdurchlässigkeit (s. Abb. 32 unten, Abb. 35 unten, Abb. 37 unten und Abb. 45 unten)

10.1.4 Zusammenfassung saisonale Unterschiede

Ein einheitlicher saisonaler Gang der Radonkonzentration in der Bodenluft konnte nicht beobachtet werden.

Auf den Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld treten an einigen Messpunkten saisonale Unterschiede zwischen den beiden Halbjahresmessreihen auf. Dabei zeigen sich stets vergleichbare Trends, die jedoch in unterschiedlichem Maße ausgebildet sind. Kurzzeitmessungen liefern im Winter tendenziell höhere Messwerte als im Sommer. Messungen mit Kernspurdetektoren weisen das umgekehrte Verhalten auf: Höhere Konzentrationen im Sommer, niedrigere im Winter. Die Korrelationen sind weniger deutlich und auch an weniger Pegeln zu beobachten. In Lounovice zeigen die Kurzzeitmessungen keinen saisonalen Gang.

Zudem liefern Messungen mit Kernspurdetektoren oftmals niedrigere Werte als Kurzzeitmessungen (s. Kap. 10.3).

Während in Burg Lede die Gasdurchlässigkeit im Winter relativ niedrig ist und die Radonwerte der Pegel stärker schwanken (s. Kap. 10.1.1, Abb. 52), sind auf dem Messdorfer Feld bei konstanter Gasdurchlässigkeit keine Beziehungen erkennbar (s. Kap. 10.1.2, Abb. 56). In Lounovice sinkt mit abnehmender Gasdurchlässigkeit die mit Kernspurdetektoren gemessene Radonkonzentration ab (s. Kap. 10.1.3, Abb. 60). Es ist offenkundig, dass dieses lokal geprägte Verhalten nicht verallgemeinbar ist.

10.2 Räumliche Variation

Neben Aussagen zu einem zeitlichen Gang der Radonkonzentration erlauben Messanordnung und -durchführung auch Abschätzungen zur räumlichen Variation.

Auf jeder Teilfläche wurden in identischer Weise jeweils zwei Bonner Pegel und zwei Exposimeterpegel (zur Aufnahme der Kernspurdetektoren) gesetzt und beprobt (s. Kap. 4). Der Vergleich der Radonmittelwerte der zwei jeweils identischen Pegel ist in Abbildung 61 dargestellt. Die Ergebnisse von 16 Pegelpaaren mit Kurzzeitmessungen (die Werte der Teilfläche 4 auf der Messfläche Lounovice wurden nicht berücksichtigt; s. Kap. 9.2.3) und 9 Pegelpaaren mit Kernspurdetektoren stimmen gut überein. Die Abweichungen betragen durchschnittlich ca. 20 %; dies gilt sowohl für Kurzzeitmessungen als auch für integrierende Messungen mit Kernspurdetektoren.

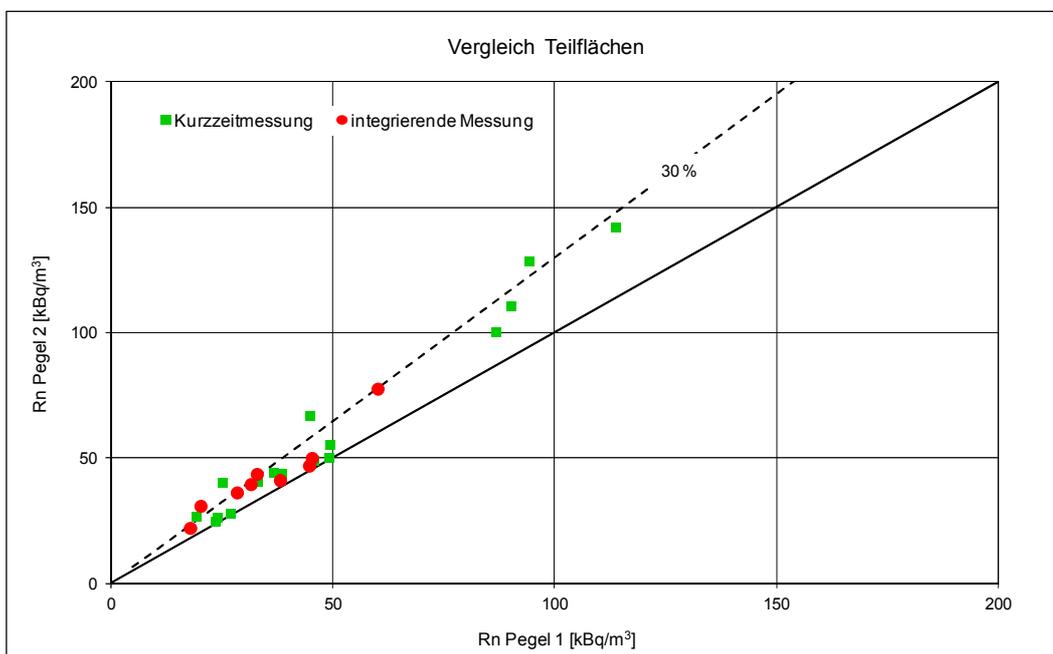


Abb. 61
Vergleich der arithmetischen Radonmittelwerte an identischen Pegeln (ohne Lounovice Teilfläche 4)

Ein anderes Bild bietet die Betrachtung der Variation innerhalb der Messflächen (Abb. 62). Auf der dem Betrachter zugewandten langen Achse (BL T1 bis Lou T4) sind die Mittelwerte der verschiedenen Teilflächen abgetragen. Hier zeigen sich auch innerhalb derselben Messfläche deutliche Unterschiede, die den Faktor 2 erreichen können (z.B.: BL T1 – BL T2). Diese Unterschiede sind bei allen Pegeltypen zu beobachten, bei den Kurzzeitmessungen (Pegel B und E) aber stärker ausgeprägt als bei den integrierenden Messungen (Pegel K).

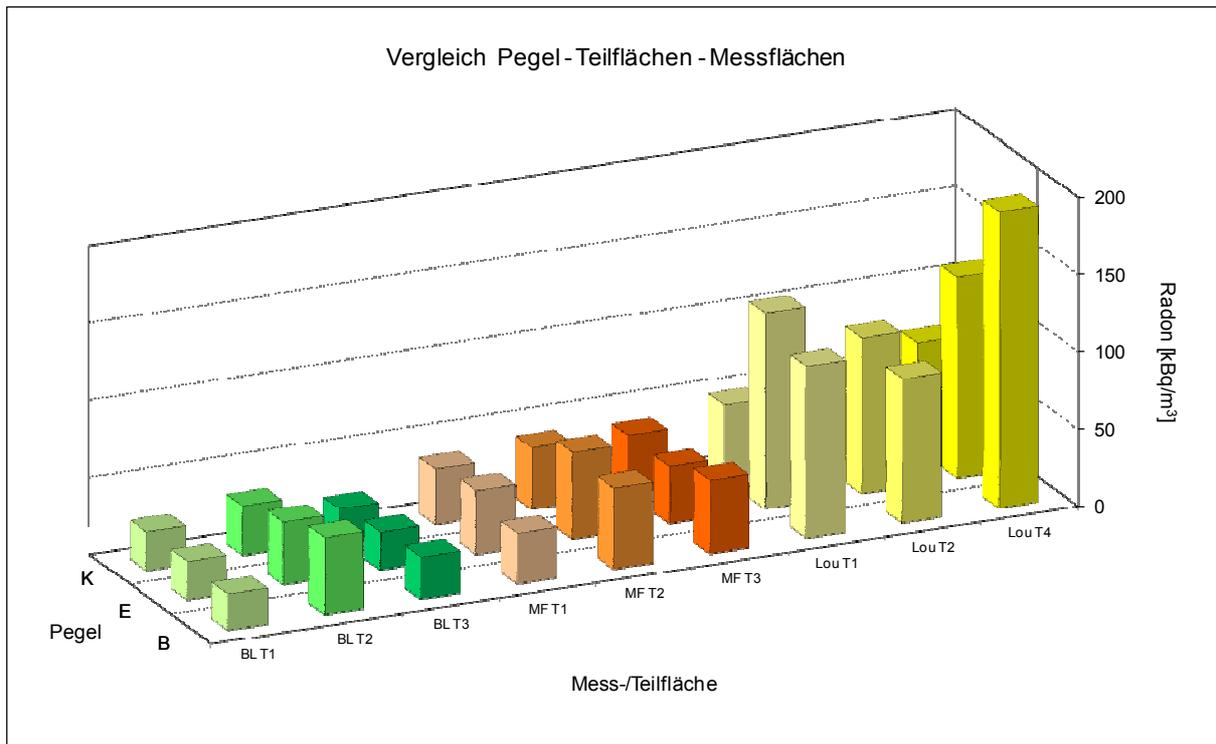


Abb. 62

Vergleich der arithmetischen Mittelwerte der Teilflächen (jeweils T1 bis T3) auf den drei Messflächen (BL, MF, Lou), unterschieden nach Pegeltyp (B = Bonner Pegel mit Kurzzeitmessung, E = Exposimeterpegel mit Kurzzeitmessung, K = Kernspurdetektor)

Grundsätzlich lässt sich zudem das unterschiedliche Niveau der Radonkonzentration in der Bodenluft auf den drei Messflächen erkennen: Burg Lede mit den niedrigsten, Messdorfer Feld mit mittleren und Lounovice mit den höchsten durchschnittlichen Konzentrationen. Zudem zeigen sich die auch oftmals niedrigen Radonkonzentrationen der integrierenden Messungen mit Kernspurdetektoren (Pegel K).

Diese Beobachtungen stützen die in Deutschland angewandte standardisierte Vorgehensweise zur Bodenluftmessung mit einer Mehrfachbeprobung und Kurzzeitmessungen. Räumliche Variationen innerhalb derselben Messfläche um den Faktor 2 zeigen deutlich, dass zur Bewertung von Standorten immer mehrere Messungen der Radonkonzentration in der Bodenluft erforderlich sind. Wegen dieser lokalen Unterschiede erlauben Einzelmessungen keine seriöse Aussage über die lokale Radonbelastung, ebenso wenig lassen sich daraus allgemeingültige Beziehungen zu meteorologischen und/oder bodenphysikalischen Kenngrößen ableiten.

10.3 Vergleich Kurzzeitmessungen - integrierende Radonmessungen

Zur Beurteilung der Vergleichbarkeit von Kurzzeitraddonmessungen und integrierenden Messungen wurden entsprechende Bodenluftmessungen zeitlich parallel durchgeführt.

In den nachfolgenden Abbildungen sind für die jeweils drei Teilflächen einer jeden Messfläche die Ganglinien der jeweils vier Kurzzeitmessungen (je zwei Messungen an Bonner Pegeln und Exposimeterpegeln) und der jeweils 14-tägigen integrierenden Messungen (zwei Messungen mit Kernspurdetektoren) dargestellt. Die Messwerte der integrierenden Messungen sind als Balken dargestellt, der die jeweils 14-tägige Messperiode überdeckt.

Es ist zu beachten, dass durch die o.g. technischen Probleme bei den Messungen mit Kernspurdetektoren eine Verfälschung der Messwerte zu höheren Konzentrationen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann (s. Kap. 4.4).

10.3.1 Burg Lede

Auf der Messfläche Burg Lede liefern die Radonmessungen mit den beiden unterschiedlichen Verfahren tendenziell vergleichbare Ergebnisse, Absolutgehalte variieren jedoch zu meist stark (Abb. 63). Auf Teilfläche 1 fällt die weitaus größere Streuung der integrierend ermittelten Konzentrationen auf. Für Teilfläche 2 gilt dasselbe, die saisonal erhöhten Kurzzeitmesswerte werden durch die Kernspurdetektoren nicht nachgezeichnet. Teilfläche 3 zeigt eine gute Übereinstimmung der Messreihen.

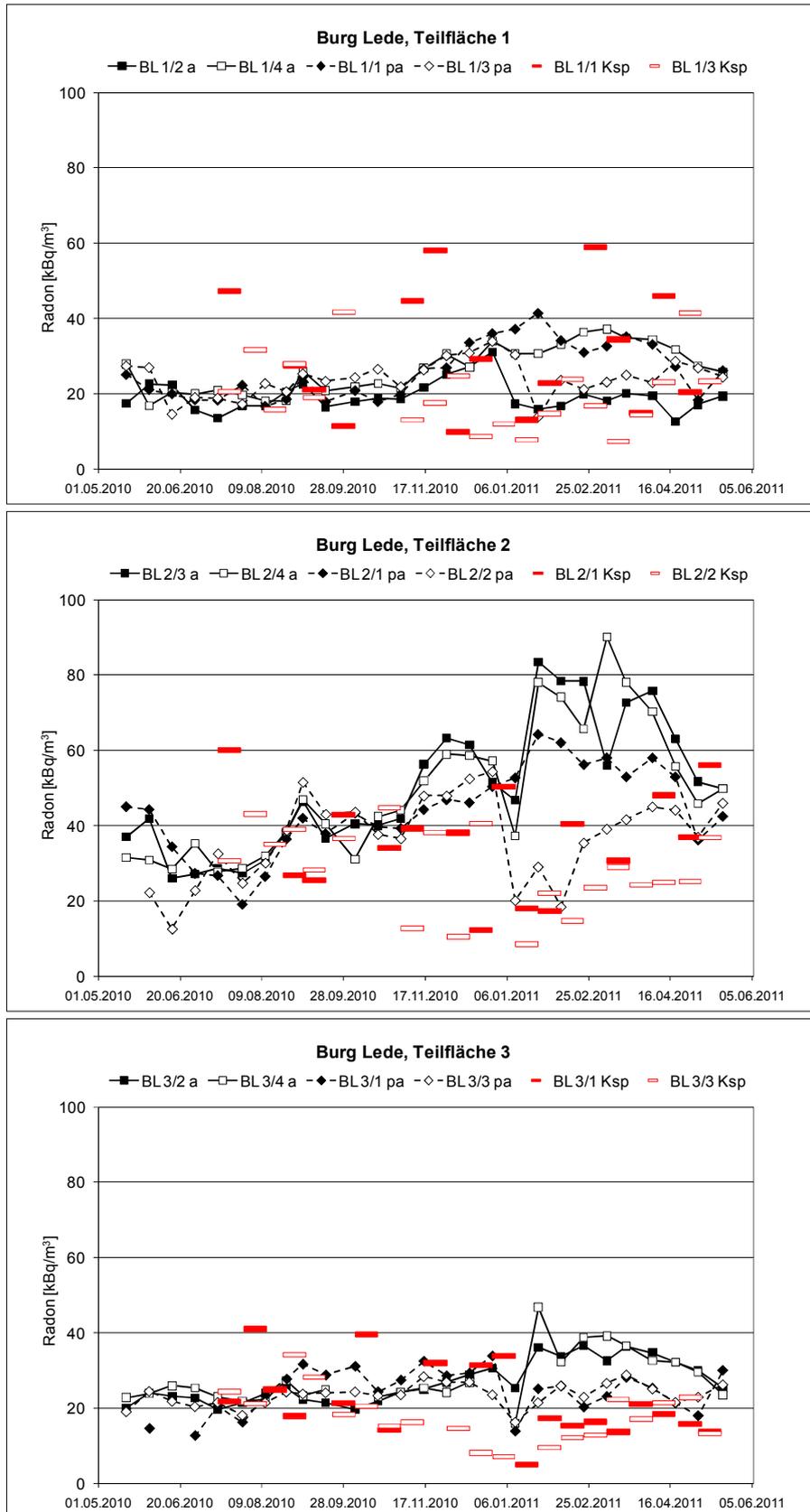


Abb. 63
 Burg Lede: Gegenüberstellung von Kurzzeitmessungen und jeweils 2-wöchigen Messungen mit Kernspurdetektoren

Übersichtlicher wird das Bild bei der Gegenüberstellung der arithmetischen Mittelwerte der drei Pegel für alle Teilflächen (Abb. 64). Die Kurvenverläufe der Kurzzeitmessungen aus dem Bonner Pegel und dem Exposimeterpegel sind über große Teile des Messzeitraumes nahezu deckungsgleich, die Werte der integrierenden Radonmessungen sind im Winterhalbjahr fast durchgängig niedriger.

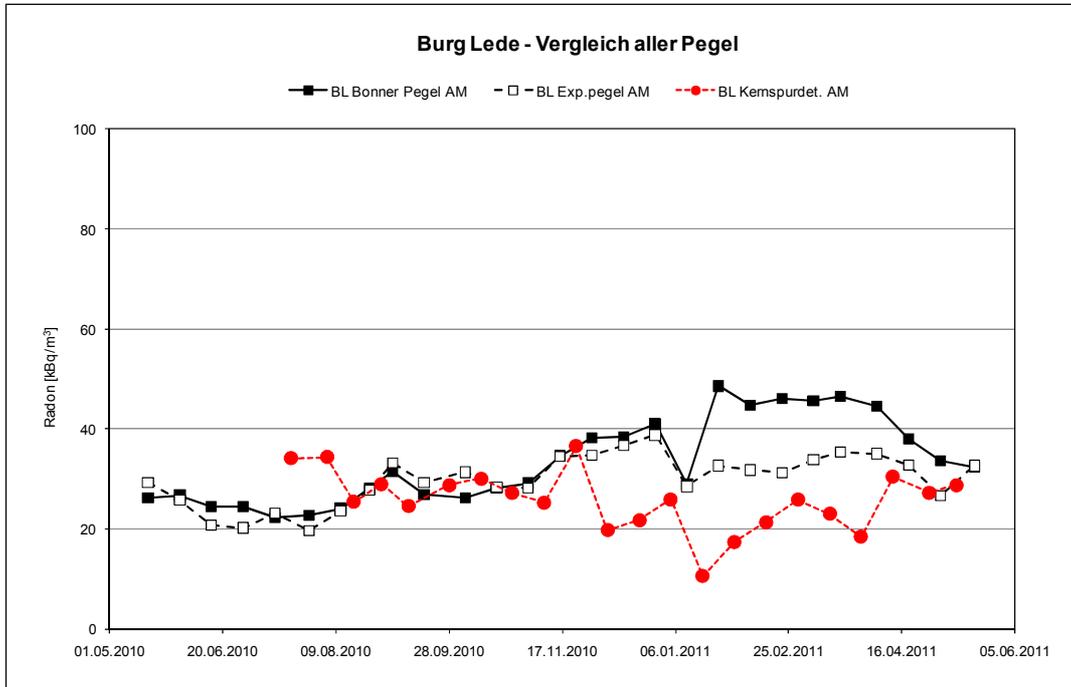


Abb. 64

Burg Lede: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte von Bonner Pegeln, Exposimeterpegeln und Kernspurdetektoren

10.3.2 Messdorfer Feld

Für die Messfläche Messdorfer Feld gilt prinzipiell dasselbe wie für die Messfläche Burg Lede. Die Streuung der Werte der Kernspurdetektoren ist größer (Abb. 65). Auf den Teilflächen 2 und 3 sind, speziell in der 2. Hälfte der einjährigen Messreihe, die Werte der integrierenden Messungen tendenziell niedriger als die Kurzzeitmesswerte.

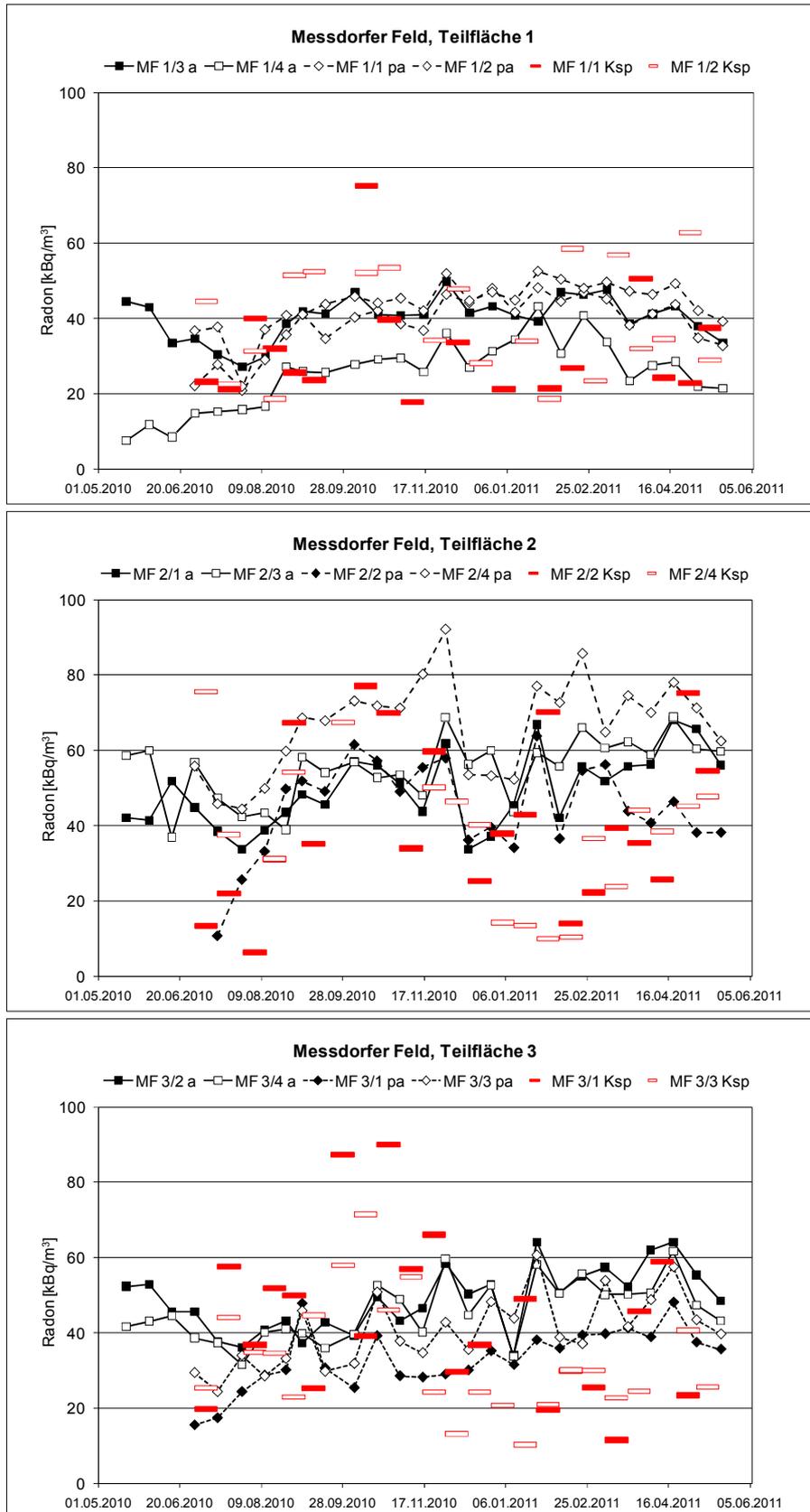


Abb. 65
 Messdorfer Feld: Gegenüberstellung von Kurzzeitmessungen und jeweils 2-wöchigen Messungen mit Kernspurdetektoren

Die oben für Burg Lede beschriebenen Ergebnisse lassen sich nahezu vollständig auf die Messfläche Messdorfer Feld übertragen. Die arithmetischen Mittelwerte der Kurzzeitmessungen zeigen nahezu identische Werte, die Kernspurdetektoren liefern im Winterhalbjahr fast durchgängig niedrigere Konzentrationen (Abb. 66).

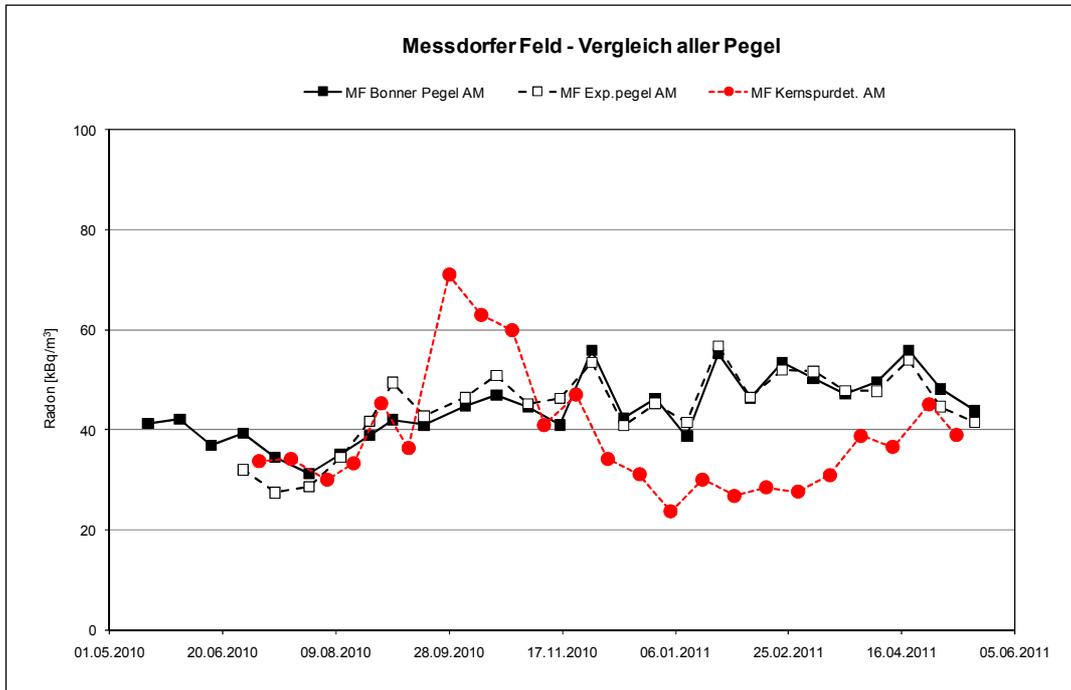


Abb. 66

Messdorfer Feld: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte von Bonner Pegeln, Exposimeterpegeln und Kernspurdetektoren

10.3.3 Lounovice

Auf der Messfläche Lounovice unterliegen die Messwerte beider Verfahren einer unsystematischen Streuung über das Jahr hinweg, die Ergebnisse der integrierenden Messungen sind aber fast ausnahmslos niedriger (Abb. 67).

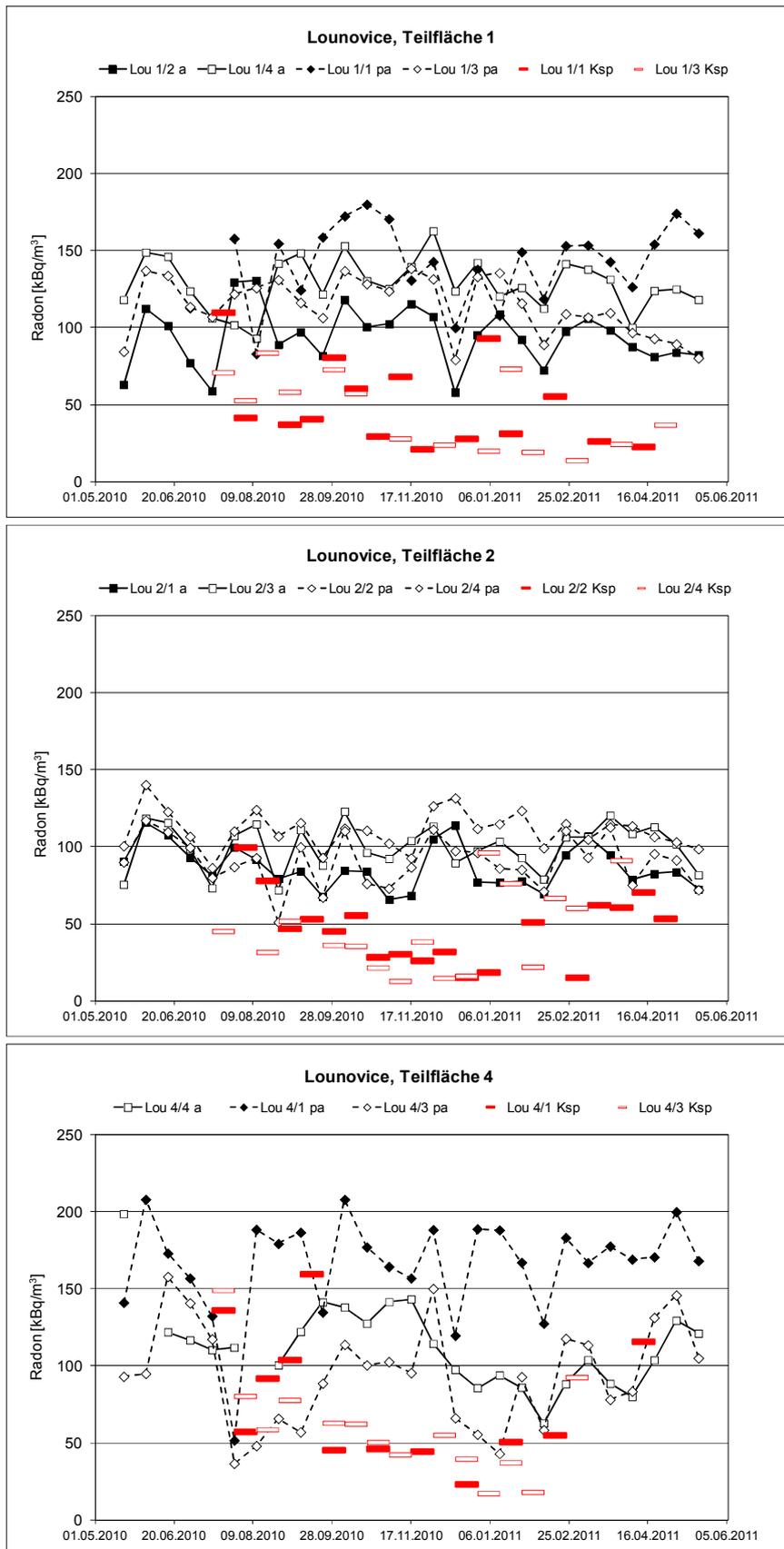


Abb. 67
Lounovice: Gegenüberstellung von Kurzzeitmessungen und jeweils 2-wöchigen Messungen mit Kernspurdetektoren

Auch in Lounovice finden sich die oben bereits beschriebenen Zusammenhänge wieder: Nahezu identische Werte der Kurzzeitmessungen und durchgängig niedrigere Konzentrationen der Kernspurdetektoren (Abb. 68). Zusätzlich sind in der Abbildung die Mittelwerte der Tschechischen Pegel dargestellt.

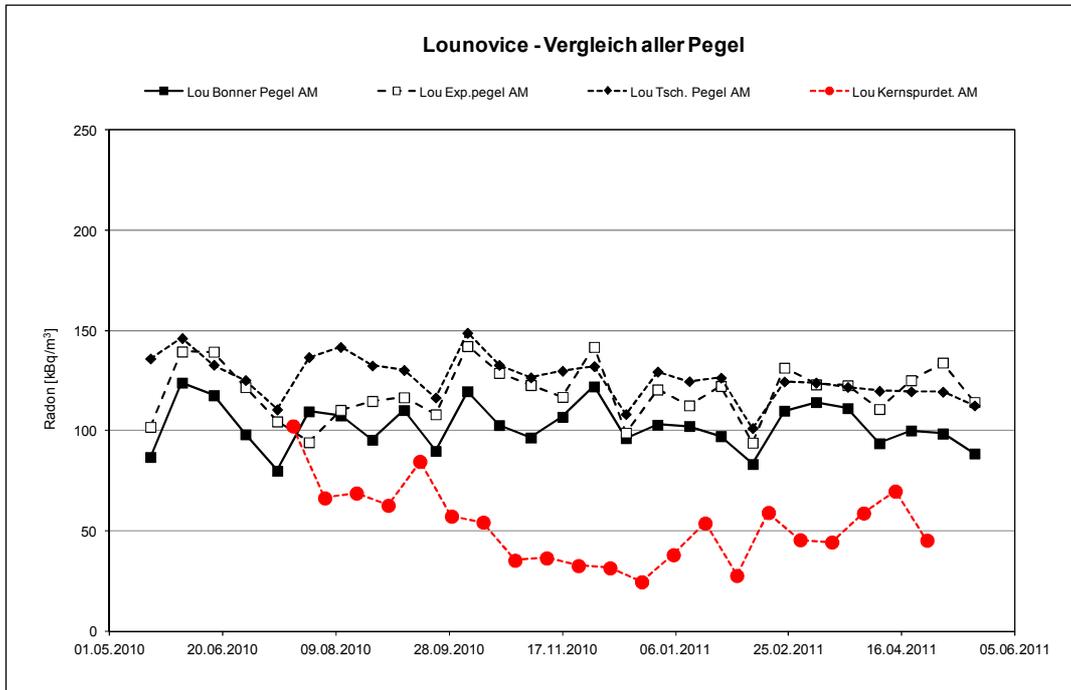


Abb. 68

Lounovice: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte von Bonner Pegeln (ohne P4/2), Exposimeterpegeln, Tschechischen Pegeln (ohne P4/6) und Kernspurdetektoren

10.3.4 Zusammenfassung Methodenvergleich

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Vergleichsmessungen in Abbildung 69 dargestellt. Unterschieden nach den drei Messflächen sind die arithmetischen Mittelwerte der Kurzzeitmessungen der Bonner Pegel gegen die arithmetischen Mittelwerte der jeweils 14-tägigen integrierenden Messungen mit Kernspurdetektoren abgetragen. Die für die Darstellung verwendeten Werte der Bonner Pegel sind aus dem Messwert zu Beginn und zum Ende der dazwischen liegenden 14-tägigen Messperiode der Kernspurdetektoren gemittelt. Die rote Linie markiert identische Messwerte. Punkte oberhalb der roten Linie bedeuten, dass integrierende Messungen höhere Werte als die Kurzzeitmessungen geliefert haben; Punkte unterhalb der roten Linien zeigen an, dass die Kurzzeitmessungen höhere Resultate ergaben. Um den Grad der Abweichung abschätzen zu können, sind Bereiche mit Unterschieden von ± 10 , ± 30 bzw. ± 50 % gekennzeichnet.

Im Bereich von Aktivitätskonzentrationen zwischen ca. 25 und 50 kBq/m^3 kommt es in zahlreichen Fällen zu einer Unterschätzung des Kurzzeitmesswertes durch Kernspurdetektoren, z.T. von mehr als 50 %. Auf der Messfläche Lounovice lieferten die Kurzzeitmessungen ausnahmslos höhere Werte mit Abweichungen weit über 50 %. Somit wird sehr deutlich, dass nur in wenigen Fällen integrierende Messungen mit Kernspurdetektoren höhere Resultate lieferten als Kurzzeitmessungen. Diese Abweichungen (= Überschätzung des Kurzzeitmesswertes) liegen hier bis auf wenige Ausnahmefälle innerhalb von 30 %.

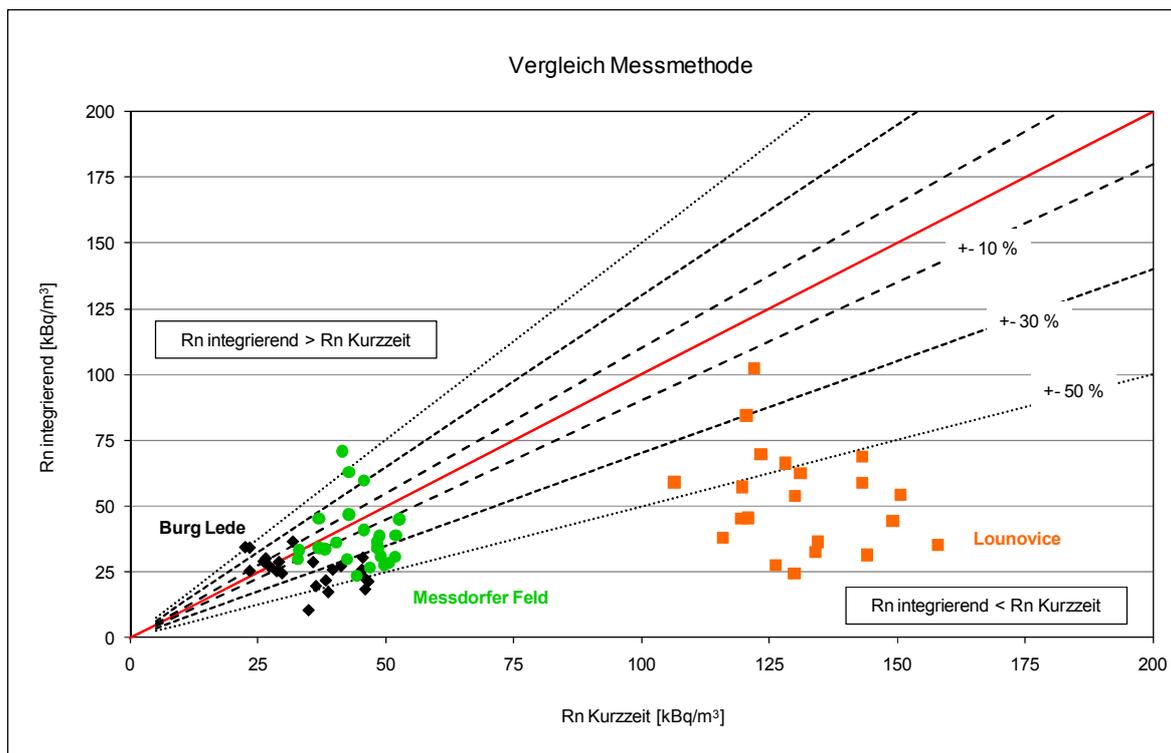


Abb. 69
Vergleich Kurzzeitmessung (Bonner Pegel) – integrierende Messung (Kernspurdetektoren)

Daraus lassen sich zwei Aussagen ableiten: Kurzzeitmessungen an verschiedenen Pegeln ergeben bei identischen Randbedingungen weitgehend übereinstimmende Resultate, Messungen mit Kernspurdetektoren liefern dagegen oftmals wesentlich niedrigere Werte, die im Hinblick auf eine Gefährdungsabschätzung irreführend sein können.

11. Diskussion

11.1 Ausgangsbasis

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte untersucht werden, ob und wenn ja, in welchem Maße die Radonkonzentration in der Bodenluft einem saisonalen Gang unterliegt. Zudem sollte die Vergleichbarkeit von Messwerten, die mit unterschiedlichen Verfahren gewonnen wurden, geprüft und im Hinblick auf die Möglichkeit einer Ermittlung repräsentativer Langzeitmittelwerte bewertet werden.

Die Ergebnisse einer entsprechenden Literaturlauswertung sind im Sachstandsbericht enthalten. Zu beiden Themenkomplexen stellt sich kein einheitliches Bild dar, sondern es handelt sich um sehr unterschiedliche Szenarien mit z.T. konträren Aussagen über vermeintliche Abhängigkeiten der Radonkonzentration. Dass eine Vielzahl von Faktoren in ganz unterschiedlicher Art und Weise und auch in wechselndem Ausmaß Einfluss auf die Höhe der Radonkonzentration in der Bodenluft nimmt, ist gut bekannt. Allerdings werden Vergleiche von Fallbeispielen dadurch erschwert, dass die Randbedingungen der Messungen sehr unterschiedlich waren. Oftmals nur wenige Messpunkte oder kurze Messreihen stellen einen unzureichenden Datenbestand dar, um Ergebnisse zu verallgemeinern. Unterschiedliche Messtiefen haben einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis und Korrelationen mit meteorologischen Parametern sind in oberflächennahen Niveaus eher nachweisbar und auch stärker ausgeprägt. Aktive Kurzzeitmessungen sind grundsätzlich kaum mit passiven, integrierenden Exposimetermessungen vergleichbar. Insofern können Aussagen über das Vorhandensein oder Fehlen von Zusammenhängen zwischen Parametern nicht von vornherein als „allgemeingültig“ und für andere Szenarien ebenfalls als zutreffend angesehen werden. Oftmals dienen pauschale nicht quantifizierte Aussagen ohne eigens erhobene Messwerte (z.B.: erhöhte Bodenfeuchte im Sommer/Winter, Temperaturanstieg im Monat x) als Erklärungsversuch für die beobachteten Unterschiede oder Trends.

Weltweit werden seit vielen Jahrzehnten Kurzzeitmessungen der Radonkonzentration in der Bodenluft in großem Umfang und routinemäßig in mehr oder weniger standardisierten Verfahren zur Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen (z.B.: Kartierungen, Flächenbewertungen) eingesetzt. Dabei ist eine fachlich fundierte Planung und Auswertung der Messungen durch Geowissenschaftler für seriöse Aussagen unerlässlich.

Nicht alle Messverfahren sind gleichermaßen geeignet, repräsentative Radondaten der Bodenluft zu liefern. Das im Rahmen der Erstellung der flächendeckenden Deutschland-Karte der Radonkonzentration in der Bodenluft entwickelte und angewandte Verfahren ergibt durch die Standardisierung einer Mehrfachbeprobung und die durch das Vorsaugen bedingte Mittelung über ein größeres Einzugsvolumen erfahrungsgemäß gut reproduzierbare Ergebnisse.

Dieses in Deutschland übliche Kurzzeitmessverfahren, das den Stand der Technik darstellt, wird gelegentlich kritisch hinterfragt. Repräsentativität und Reproduzierbarkeit der so gewonnenen Ergebnisse werden wegen vermeintlich nicht berücksichtigter saisonaler Schwankungen der Bodenluftkonzentration angezweifelt. Hierbei wird eine sehr stark vereinfachte Ar-

gumentationskette verwendet. Im Boden lassen sich saisonale Variationen bzw. periodische Gänge von Bodeneigenschaften (z.B.: Bodentemperatur, -feuchte) nachweisen, die meist meteorologischen Ursprungs (z.B.: Luftdruckänderungen, Niederschlagsereignisse) sind. Die Radonkonzentration in der Bodenluft kann durchaus durch diese Faktoren beeinflusst werden, jedoch ist der Schluss unzulässig, dass auch die Radonkonzentration in derselben Weise und Größenordnung einem saisonalen Gang unterliegen müsste.

11.2 Saisonale Variation

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens zeigen, dass kein deutlicher und überall gleichartiger Jahresgang der Radonkonzentration in der Bodenluft existiert.

Offenkundig bestehen keine einfachen Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen der Radonkonzentration in der Bodenluft und anderen (meteorologischen und/oder bodenphysikalischen) Parametern. Deutliche Änderungen in der Bodenfeuchte oder saisonale Variationen in der Bodentemperatur wirken sich nicht unbedingt in gleichem Maße und mit demselben Vorzeichen auf die Höhe der Bodenluftkonzentration aus! Die lokalen Verhältnisse und Bedingungen im Boden bzw. in der Bodenluft sind ebenso von Bedeutung wie auch die Art der Probenahme und des Messverfahrens.

In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Abschätzung eines „Erwartungswertes“ der Radonkonzentration in der Bodenluft beschrieben (s. Sachstandsbericht, Kap. 3.2). Dabei werden u.a. auch der Wasseranteil am Porenvolumen und das temperaturabhängige Verteilungsgleichgewicht von Radon in der Gas- und Wasserphase berücksichtigt. Washington & Rose (1990) verwenden folgende Formel zur Abschätzung der Radonkonzentration in der Bodenluft:

$$C_{Rn} = \frac{10^3 \times c_{Ra} \times E}{\left[\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_p} \right] \times [w \times (k_t - 1) + 1]} \quad (6)$$

mit c_{Ra} = spezifische Radiumaktivität [Bq/kg], E = Emanationskoeffizient [%], ρ_b = Lagerungsdichte [kg/m³], ρ_p = Dichte der Festsubstanz [kg/m³], w = Wasseranteil am Porenvolumen [%] und k_t = temperaturabhängiger Gas/Wasser-Verteilungskoeffizient von Radon (Ostwald'scher Verteilungskoeffizient) [%].

Nachfolgend sollen diese Abhängigkeiten an einem konkreten Beispiel diskutiert werden, weil daraus die im Forschungsvorhaben beobachtete Phänomene z.T. erklärt werden können.

Die Ausgangsdaten entsprechen Werten, die auf der Messfläche Messdorfer Feld ermittelt wurden. Die spezifische Radiumaktivität beträgt 30 Bq/kg, der Emanationskoeffizient liegt bei 30 %, die Lagerungsdichte bei 1,7 g/cm³ und die Dichte der Festsubstanz bei 2,4 g/cm³. Wassersättigung (Wasseranteil am Porenvolumen) und Bodentemperatur – und damit auch der Ostwald'sche Verteilungskoeffizient - werden in der folgenden Betrachtung variiert. Die Bodentemperatur schwankt dabei zwischen 5 und 17 °C, für die Wassersättigung werden Werte zwischen 30 und 90 % angenommen. Die sich aus der Formel (6) ergebenden Zusammenhänge sind in Abbildung 70 graphisch dargestellt.

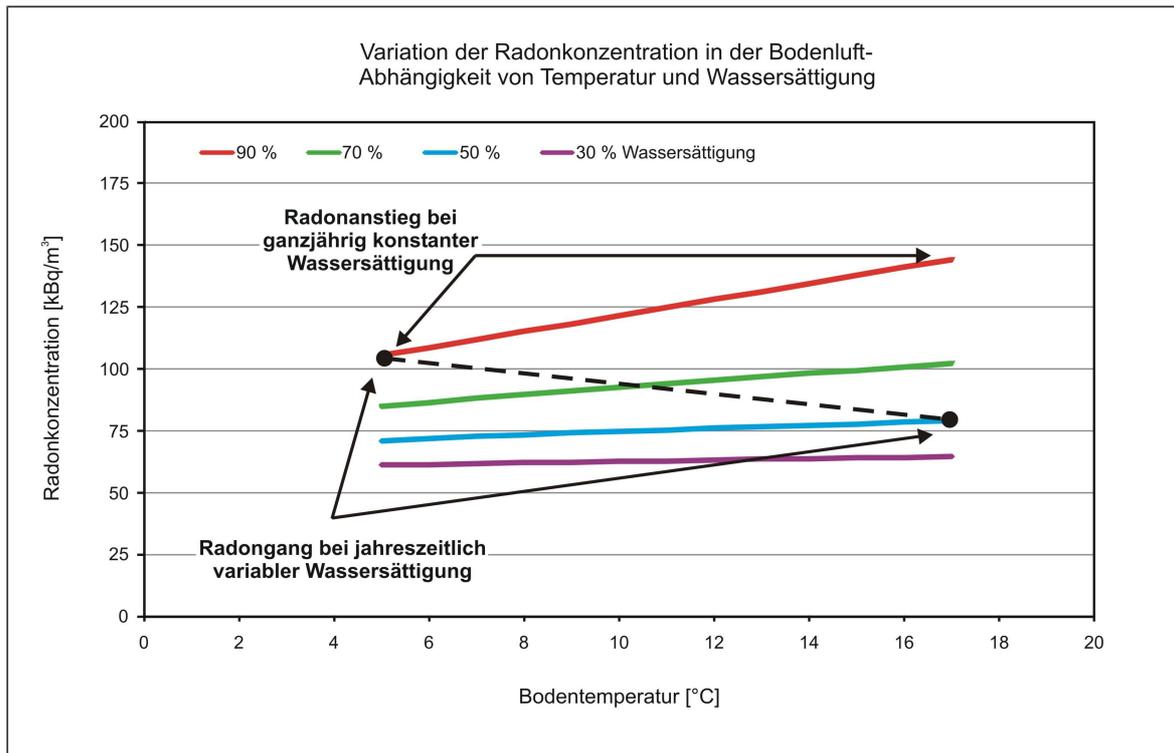


Abb. 70

berechnete Variation der Radonkonzentration in der Bodenluft in Abhängigkeit von Bodentemperatur und Wassersättigung

Bei ganzjährig konstanter Wassersättigung im Boden, d.h. bei unverändertem Wasseranteil am Porenvolumen, variiert die Radonkonzentration in der Bodenluft in Abhängigkeit von der Temperatur in unterschiedlich starkem Maße (Steigung der Gerade für Wasseranteile zwischen 30 und 90 %). Bei geringer Wassersättigung ist ein nur geringer Anstieg der Radonkonzentration zu verzeichnen, bei hoher Wassersättigung eine größere Zunahme. So nimmt beispielsweise bei einem Wasseranteil am Porenvolumen von 50 % die Radonkonzentration bei einem Temperaturanstieg von 5 auf 17 °C von ca. 70 auf ca. 80 kBq/m³ zu, bei einem Wasseranteil von 90 % erfolgt eine Zunahme von 106 auf 144 kBq/m³ (vgl. rote Kurve in Abb. 70). Dies bedeutet, dass bei identischen „Randbedingungen“ im Boden allein durch die Änderung der Bodentemperatur und die damit verbundene unterschiedliche Löslichkeit von Radon in der Gas- bzw. Wasserphase eine deutliche Variation der Radonkonzentration in der Bodenluft einhergeht. Prinzipiell ließen sich dadurch niedrigere Werte im Winter und höhere Werte im Sommer erklären, wie es beispielsweise bei den integrierenden Bodenluftmessungen beobachtet wurde.

Im Falle einer jahreszeitlich variablen Wassersättigung ist die Situation anders. Bei einer hohen Wassersättigung im Winter werden hohe Radonkonzentrationen beobachtet. Durch eine Abnahme des Wasseranteils am Porenvolumen mit zunehmendem Anstieg der Bodentemperatur und damit einhergehender Austrocknung des Bodens nimmt die Radonkonzentration in der Bodenluft ab. So beträgt die Radonkonzentration bei einem Wasseranteil am Porenvolumen von 90 % im Winter ca. 100 kBq/m³, bei einer Abnahme der Wassersättigung im Sommer auf 50 % nimmt die Radonkonzentration auf ca. 80 kBq/m³ ab (gestrichelte schwarze Linie in Abb. 70). Bei identischen „Randbedingungen“ im Boden verursacht

also allein die Änderung des Wasseranteils am Porenvolumen eine deutliche Variation der Radonkonzentration in der Bodenluft. Prinzipiell würden dadurch höhere Werte im Winter und niedrigere Werte im Sommer erklärbar, wie es beispielsweise bei den Kurzzeitmessungen beobachtet wurde.

Aus diesen einfachen Überlegungen wird ersichtlich, dass Schwankungen von Temperatur und Bodenfeuchte durchaus gegenläufige Effekte auf die Variation der Radonkonzentration haben können, abhängig von der lokalen Situation und dem saisonalen Witterungsverlauf im betreffenden Jahr. In der Praxis kommt man daher nicht umhin, Standardprognosen aus gezielt angesetzten Messungen abzuleiten.

11.3 Methodenvergleich

Die vergleichenden Untersuchungen von Kurzzeitmessungen und integrierenden Radonmessungen mit Kernspurdetektoren haben gezeigt, dass beide Verfahren zwar grundsätzlich zur Bestimmung der Radonkonzentration in der Bodenluft geeignet sind, eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Ergebnisse jedoch nicht gegeben ist! Die Messwerte weisen oft systematische Unterschiede auf, deren Ursachen vielschichtig sein dürften. Hier sei auf die analoge Problematik bei Raumluftmessungen hingewiesen; auch dabei können Kurzzeitmesswerte nur sehr bedingt mit Mittelwerten aus integrierenden Verfahren in Einklang gebracht oder ineinander überführt werden. Unabdingbare Voraussetzung für Messwertvergleiche ist, dass jeweils **standardisierte Randbedingungen bei Probenahme und Messung** definiert und im Feld eingehalten werden!

Für Kurzzeitmessungen existiert in Deutschland bereits eine standardisierte Vorgehensweise, die auch als Grundlage für eine Messanleitung dienen kann. Für integrierende Radonmessungen wurde im Vorhaben ein erster Vorschlag für ein Feldmessverfahren gemacht. Vor einem routinemäßigen Praxiseinsatz sind jedoch noch Verbesserungen notwendig.

Für die Bewertung von Kurzzeitmessungen, bei denen aktiv Bodenluft abgesaugt wird, kann man von folgendem Szenario ausgehen: Radon wird im festen Mineralverband durch den Zerfall von Radium gebildet. In Abhängigkeit von der räumlichen Position der Radiummutternuklide und der Rückstoßreichweite der gebildeten Radonotope gelangt es in den Porenraum. Letzterer bildet in natürlichen Böden kein homogenes und geometrisch einheitliches Gefüge, sondern ist charakterisiert durch ein Neben- und Miteinander von Poren unterschiedlicher Größe, die miteinander in unterschiedlicher Weise verbunden (Tortuosität), aber auch in sich geschlossen ohne Kontakt zu benachbarten Poren sein können. In Böden, wie sie in Mitteleuropa normalerweise anzutreffen sind, kann von Porositäten zwischen 25 und 50 % ausgegangen werden. Ein Teil dieses Porenraumes ist mit Wasser, ein Teil mit Bodenluft gefüllt. Der Wasseranteil am Porenvolumen in 1 m Tiefe schwankt in der Regel zwischen 30 und 60 %. Bei angenommenen Durchschnittswerten für die Porosität von 30 % und für die Wassersättigung von 50 % stehen 15 % des gesamten Bodenvolumens (feste, wässrige und gasförmige Phase) für eine Bodenluftbewegung zur Verfügung.

Für Kurzzeitmessungen werden je nach Verfahren zwischen ca. 100 ml und 10 l (aktives Vorsaugen) Bodenluft entnommen. Diesen Mengen entspricht unter den oben getroffenen Annahmen ein (idealer) kugelförmiger Entnahmeraum mit einem Durchmesser von maximal einigen Dezimetern. Die entnommene Bodenluft stammt also stets aus der näheren Entfernung der Sonde. Inhomogenitäten bzw. ein schichtiger Aufbau im Boden mit unterschiedlichen horizontalen und/oder vertikalen Durchlässigkeiten sind bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt; die Größe des Entnahmebereiches kann sich ggf. richtungsabhängig ändern. Der Radon"zutritt" aus dem Boden in die Messkammer bzw. zum Messgerät wird bei dieser Vorgehensweise durch Pumpen oder Ansaugen bewusst forciert, in dem eine aktive Bodenluftbewegung aufgrund von Druckunterschieden initiiert wird. Angemerkt sei, dass diese Bedingungen der Situation in einem bebauten Baugrund ähneln, wenn aufgrund von Druck-

unterschieden zwischen Raum- und Bodenluft (hier: $p_{\text{Raumluft}} < p_{\text{Bodenluft}}$) eine „aktive“ Radonbewegung aus dem Boden durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle ins Haus hinein erfolgt. Auf diese Art und Weise durchgeführte Messungen stellen für Bewertungen des geogenen Radonpotenzials o.ä. also einen realistischen Ansatz dar.

Ein signifikanter Einfluss der Menge der entnommenen Bodenluft auf die Höhe des Messwertes kann nicht nachgewiesen werden. Dies zeigen die Resultate der mit unterschiedlichen Sonden entnommenen Bodenluftproben für Kurzzeitmessungen. Die Messwerte der Radonkonzentration sind gut miteinander vergleichbar und zeigen identische Variationen in Raum und Zeit. Die statistischen Kennwerte entsprechender Messreihen stimmen in der Regel gut miteinander überein.

Im Falle integrierender Radonmessungen mittels Kernspurdetektoren wird das Messgerät direkt in den Boden eingebracht und keine Bodenluft aktiv entnommen. Es ist davon auszugehen, dass Radon ausschließlich diffusiv zum Detektor gelangt. Die Bodenart und die phasenbedingt (fest-flüssig-gasförmig) unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten bestimmen die Diffusionsweite von Radon im Boden; diese kann zwischen wenigen Zentimetern (in sehr feinkörnigem tonigem Substrat) und wenigen Metern (in sehr grobkörnigem sandig-kiesigem Substrat) betragen (s. Sachstandsbericht, Kap. 2.2). Der Detektor selbst wird stets in einen künstlich geschaffenen Hohlraum im Boden eingebracht. Die Größe und Form des Hohlraumes variieren. Hierbei wird also die Radonmenge bestimmt, die durch den Emanationsprozess in den luftegefüllten Porenraum freigesetzt wird und rein diffusiv zum Detektor gelangt. Auf dem Weg von seinem Entstehungsort im Mineralverband durch den Porenraum und über den zusätzlichen Weg durch den künstlich geschaffenen Hohlraum zum Detektor zerfällt eine bestimmte Menge an Radon.

Dies kann zwei Beobachtungen erklären: Einerseits die gegenüber den Kurzzeitmesswerten tendenziell niedrigeren Radonkonzentrationen – ein Phänomen, das auch in der Literatur häufig beschrieben wird – und andererseits die positive Korrelation mit der Luft- bzw. Bodentemperatur und den daraus resultierenden saisonalen Gang der Radonkonzentration. Mit steigender Temperatur nimmt die Radonfreisetzung zu, weil sich die Beweglichkeit der Radonatome und damit auch die Diffusion erhöht (s. Sachstandsbericht, Kap. 2.1).

12. Zusammenfassung

Die Bewertung der Ergebnisse dieses Vorhabens führt zu den nachfolgend aufgeführten Schlussfolgerungen. Diese gelten primär zunächst nur für die jeweils betrachteten Szenarien, Verallgemeinerungen wären zunächst nur spekulativ.

Für **Kurzzeitmessungen** lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Probenahme und Kurzzeitmessungen in der Bodenluft sind bis auf Ausnahmefälle ganzjährig möglich.
- Die Radonmesswerte an den einzelnen Messpunkten (Unterscheidung Messpunkt – Teilfläche – Messfläche s. Kap. 5, Abb. 9) zeigen in der Regel nur geringe zeitliche Schwankungsbreiten (Quotient Winter/Sommer etwa 1,1 bis 1,6, s.u.). Variationen innerhalb des Jahres um den Faktor 5 und größer, wie sie vereinzelt diskutiert werden, treten nicht auf.
- Innerhalb einer Teilfläche variieren die an unterschiedlichen Messpunkten erhobenen Radonmesswerte in der Regel nur in geringem Maße (maximal ca. 30 %).
- Die räumliche Variation innerhalb der Messflächen ist größer als die zeitliche Variation.
- Auf den Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld wurde ein saisonaler Gang der Radonkonzentration in der Bodenluft festgestellt. Im Sommer wurden niedrigere, im Winter höhere Werte beobachtet. Das Verhältnis Winter/Sommer lag dabei im Mittel bei ca. 1,2 und schwankte zwischen ca. 1,1 und 1,6. Die höchsten Schwankungsbreiten wurden bei den geringsten Konzentrationen beobachtet.
Auf der Messfläche Lounovice wurde kein saisonaler Gang beobachtet.
- Die Gasdurchlässigkeit der Böden variierte zwischen ca. $0,5$ und $4,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, d.h. innerhalb einer Größenordnung.
Saisonal deutliche Unterschiede wurden nur auf der Messfläche Burg Lede festgestellt (erhöhte Durchlässigkeit von Juli bis Januar, verringerte Durchlässigkeit zwischen Februar und Juni).
- Für die meteorologischen und bodenphysikalischen Daten (Lufttemperatur, -druck, -feuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, -richtung, Bodentemperatur, -feuchte) konnte nur in wenigen Fällen eine gleichartige und auch an der Mehrzahl der Messpunkte nachweisbare signifikante Korrelation mit der Radonkonzentration in der Bodenluft beobachtet werden.
Auf den Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld wurden negative Korrelationen der Radonmesswerte mit der Luft- und den Bodentemperaturen festgestellt. An einigen Messpunkten war ebenfalls eine negative Korrelation mit der Gasdurchlässigkeit (je dichter, desto höher) und der Bodenfeuchte (je feuchter, desto höher) zu beobachten. Korrelationen zu anderen der o.g. Parameter existierten nur in wenigen Ausnahmefällen und zeigten dabei keinerlei Systematik. Auf den Messflächen Burg Lede und Messdorfer Feld trat teilweise eine negative Korrelation zur Niederschlagsintensität auf: Starke Niederschlagsereignisse bedingten niedrige Radonkonzentrationen. Auf der Messfläche Lounovice war keine diesbezügliche Korrelation feststellbar. Auf der Messfläche Burg Lede war eine positive Korrelation zum Luftdruck zu beobachten.

Für die Messungen mit **Kernspurdetektoren** lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Radonmessungen in der Bodenluft mittels Kernspurdetektoren sind bis auf Ausnahmefälle ganzjährig möglich.
- Wie auch bei Kurzzeitmessungen muss ein standardisiertes Probenahme- und Messverfahren zum Einsatz kommen. Das im Forschungsvorhaben eingesetzte System (Verrohrung, separate Detektorhalterungen) ist hierfür grundsätzlich geeignet, weil es den eigentlichen Messraum in der Tiefe gegen die Atmosphärenluft wirksam abdichtet und ggf. einen schnellen und einfachen Wechsel des Detektors erlaubt. Es muss jedoch für einen routinemäßigen Einsatz modifiziert und nachgebessert werden (z.B.: Entwicklung eines besser geeigneten Aufbewahrungsgehäuses für die Detektorhalterung). Der hierfür notwendige zeitliche und finanzielle Aufwand dürfte nicht sehr hoch sein.
Vor einem routinemäßigen Einsatz sind systematische Tests zur Ermittlung der optimalen Expositionszeit der Detektoren, insbesondere im Hinblick auf die Verwendung in hoch radonbelasteten Böden durchzuführen.
- Die Radonmesswerte an den einzelnen Messpunkten sind in der Regel zeitlich stabil und zeigen nur geringe Schwankungsbreiten (Quotient Winter/Sommer etwa 0,4 bis 0,9, s.u.). Variationen innerhalb des Jahres um den Faktor 5 oder mehr treten nicht auf.
- Innerhalb einer Teilfläche variieren die an unterschiedlichen Messpunkten erhobenen Radonmesswerte in der Regel nur in geringem Maße (maximal ca. 30 %).
- Auf allen Messflächen wurde ein saisonaler Gang festgestellt. Im Sommer wurden höhere, im Winter niedrigere Werte beobachtet. Das Verhältnis Winter/Sommer lag dabei im Mittel bei ca. 0,7 und schwankte in der Regel zwischen ca. 0,4 und 0,9 (nur an zwei Messpunkten betrug der Quotient 1,1 bzw. 1,3). Dieser Gang ist entgegengesetzt zu dem bei den Kurzzeitmessungen beobachteten Gang.
- Für die parallel erhobenen meteorologischen und bodenphysikalischen Daten konnten folgende signifikante Korrelationen mit der Radonzentration in der Bodenluft nachgewiesen werden:
Auf allen Messflächen wurden positive Korrelationen der Radonmesswerte mit den Bodentemperaturen festgestellt; in den meisten Fällen gilt dies auch für die Lufttemperatur. Ebenfalls positiv war die Korrelation mit der Gasdurchlässigkeit (je dichter, desto niedriger) und der Bodenfeuchte (je trockener, desto höher). Diese Beobachtungen sind denen der Kurzzeitmessungen entgegengesetzt (s.o.) und stehen auch im Widerspruch zu der o.g. modellhaften Abschätzung, die bei geringerer Wassersättigung („trocken“) niedrigere Radonkonzentrationen postuliert.
Korrelationen zu anderen der o.g. Parameter existieren auch hier nur ausnahmsweise und zeigen dabei keinerlei Systematik. Zur Niederschlagsintensität existierte auf keiner Messfläche eine Abhängigkeit. Auf der Messfläche Burg Lede war eine negative Korrelation zum Luftdruck zu beobachten. Vereinzelt traten negative Korrelationen zur Luftfeuchte und zur Windgeschwindigkeit auf.

Zum **Vergleich verschiedener Messverfahren** lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Kurzzeitmessungen liefern bei standardisierten Randbedingungen für Probenahme und Messung konsistente und reproduzierbare Ergebnisse. Art und Bauweise der Sonde spielen hierbei keine entscheidende Rolle. Ein entsprechendes Verfahren existiert in Deutschland bereits.
Integrierende Radonmessungen in der Bodenluft mit Kernspurdetektoren sind grundsätzlich möglich. Voraussetzung ist aber, dass auch hier standardisierte Randbedingungen für Probenahme und Messung definiert werden. Hierfür existiert jedoch noch kein entsprechendes Verfahren. Im Forschungsvorhaben wurde ein erster Ansatz getestet, dieser muss aber für einen routinemäßigen Einsatz noch weiterentwickelt werden.
- Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Messvergleiche der beiden Verfahren zeigten, dass die Messwerte z.T. auch deutlich voneinander abweichen. Tendenziell streuen die Werte integrierender Messungen stärker. Die mit Kernspurdetektoren gemessenen Radonkonzentrationen in der Bodenluft liegen bei niedrigen und mittleren Konzentrationen etwa auf dem gleichen Niveau der mit Kurzzeitmessverfahren ermittelten Werte, bei hohen Konzentrationen (s. Messfläche Lounovice) aber deutlich darunter.

Diese Ergebnisse lassen sich in den folgenden allgemeingültigen **Kernaussagen** zusammenfassen:

- Ein saisonaler Gang der Radonkonzentration in der Bodenluft kann nicht immer und überall beobachtet werden. Unterschiede treten, wenn vorhanden, zwischen der Sommer- und Winterperiode auf. Innerhalb der beiden Perioden sind die Werte annähernd konstant.
- Tritt eine zeitliche Variation der Radonkonzentration in der Bodenluft auf, beträgt der Quotient Winter/Sommer etwa 1,1 bis 1,6 (Kurzzeitmessungen) bzw. 0,4 bis 0,9 (integrierende Messungen). Variationen innerhalb des Jahres um den Faktor 5 und größer, wie sie vereinzelt diskutiert werden, treten nicht auf.
- Ein Jahresmittelwert der Radonkonzentration in der Bodenluft müsste situationsabhängig definiert werden.
Abhängig von den Randbedingungen bzgl. Geologie, Witterung u.ä. wäre dies mit entsprechendem Messaufwand und ausreichend langer Messzeit (mindestens zwei Jahre) möglich, würde aber auch nur für die jeweils betrachteten lokalen Gegebenheiten gelten. Zweck und Aussagekraft solcher Angaben wären kritisch zu hinterfragen.
Die systematische Ableitung eines Langzeitmittelwertes aus Kurzzeitmessungen ist demnach nicht sinnvoll, eine Abschätzung der Größenordnung ist dagegen möglich.
- Geologische und bodenkundliche Verhältnisse sowie meteorologische und bodenphysikalische Parameter haben einen Einfluss auf die Höhe der Radonkonzentration in der Bodenluft. Dieser Einfluss kann unterschiedlich stark sein. Da die genannten Faktoren lokal und zeitlich schwanken, können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Für bestimmte Szenarien und Messverfahren können wahrscheinliche Trends benannt werden.
Unabhängig davon sollte bei allen Radonmessungen in der Bodenluft eine Mindest-

probenahmetiefe von 1 m nicht unterschritten werden, um die o.g. möglichen Einflüsse zu minimieren.

- Die kleinräumliche Variation der Radonkonzentration in der Bodenluft (z.B. im Bereich einer Messfläche) ist deutlich größer als die zeitliche Variation.
- Identische Probenahme- und Messverfahren liefern bei Einhaltung definierter Randbedingungen konsistente und reproduzierbare Messwerte. Eine systematische Vergleichbarkeit von Ergebnissen, die mit verschiedenen Verfahren ermittelt wurden, ist zur Zeit noch nicht möglich.
- Das in Deutschland etablierte und standardisierte Kurzzeitmessverfahren liefert konsistente und reproduzierbare Werte. Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Sondentypen zeigten keine signifikanten Unterschiede.

Anmerkung: Der Nachweis saisonal konstanter Werte (s.o.) bestätigt die uneingeschränkte Verwendbarkeit der Ergebnisse der Bodenluftmessungen, die zur Erstellung der Deutschland-Karte durchgeführt wurden. Die Messungen erfolgten fast ausnahmslos in der Sommerperiode, innerhalb der keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Radonkonzentration beobachtet wurden.

- Für integrierende Bodenluftmessungen mit Kernspurdetektoren existiert noch kein Standardverfahren. Die Einrichtung eines Bodenluftpegels – wie auch bei anderen Bodenluftuntersuchungen üblich - sollte hierbei unabdingbare Voraussetzung sein. Ein erster erfolgversprechender Ansatz wurde im Forschungsvorhaben getestet, muss aber im Detail noch verbessert werden.
Tendenziell führen Messungen mit Kernspurdetektoren zu niedrigen Radonkonzentrationen als Kurzzeitmessungen, bei denen aktiv Bodenluft abgesaugt wird.

Alle Aussagen decken sich mit den praktischen Erfahrungen des Forschungsnehmers und seines tschechischen Kooperationspartners aus Feldmessungen in den vergangenen 20 Jahren und sind auch konsistent mit den Angaben aus der Literatur (s. Sachstandsbericht).

Das **Fazit** lautet also:

- Eine Feldmessung der Bodenluft mit einem standardisierten aktiven Probenahme- und Messverfahren unter definierten Randbedingungen ist die beste und auch einfachste Möglichkeit zur repräsentativen Erhebung der Radonaktivitätskonzentration.
- Die zeitgleiche Bestimmung der Gasdurchlässigkeit des Bodens kann bei Flächenbewertungen und Baugrundbegutachtungen hilfreich sein, weil sie Aussagen über eine potenzielle Gasmigration im oberflächennahen Boden erlaubt.
- Die (zeitgleiche) Messung anderer meteorologischer und/oder bodenphysikalischer Parameter kann für wissenschaftliche Fragestellungen hilfreich sein, für eine praxisbezogene Radonmessung in der Bodenluft und deren Interpretation ist sie nicht notwendig.

13. Empfehlungen

Aus den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens lassen sich einige einfache Empfehlungen für eine weitere Vorgehensweise ableiten. Im Einzelnen sind dies:

- Erstellung einer Messanleitung für standardisierte Kurzzeitmessverfahren; der aktuelle Erfahrungs- und Wissensstand ist hierfür ausreichend.
- Durchführung weiterer Feldmessungen zum Jahresgang über unterschiedlichen Substraten (z.B.: mesozoische Sedimentgesteine, Sockelgesteine im Schiefergebirge), in jedem Fall mittels Kurzzeitmessungen, wahlweise auch ergänzt um integrierende Messungen.
- Entwicklung eines standardisierten integrierenden Bodenluftmessverfahrens mit Kernspurdetektoren, wenn dies für Vergleichszwecke gewünscht wird.
- Erweiterung der Datengrundlage zur Vergleichbarkeit verschiedener Bodenluftmessverfahren, u.a. auch mit Hilfe von Messreihen kontinuierlich aufzeichnender Geräte.

14. Literatur

- Denman, A.R., Crockett, R.G.M., Groves-Kirkby, C.J., Phillips, P.S., Gillmore, G.K., Woolridge, A.C. (2007): The value of seasonal correction factors in assessing the health risk from domestic radon - A case study in Northamptonshire, UK.- *Environm. Int.*, 33: 34-44
- Kemski, J., Klingel, R., Siehl, A. (1996): Geogene Faktoren der Strahlenexposition unter besonderer Berücksichtigung des Radon-Potentials (Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4062).- Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1996-470, 76 S.
- Lomb, N.R. (1976): Least-squares frequency analysis of unequally spaced data.- *Astrophysics and Space Science*, 39: 447-462.
- Martz, D.E., Rood, A.S., George, J.L., Pearson, M.D., Langner Jr., G.H. (1992): Year-to-year variations in annual average indoor ^{222}Rn concentrations.- *Health Phys.*, 61, 3: 409-413
- Neznal, M., Matolin, M., Just, G., Turek, K. (2004): Short-term temporal variations of soil gas radon concentration and comparison of measurement techniques.- *Rad. Prot. Dosim.*, 108, 1: 55-63.
- Plate, B. (1992): Geologisch-bodenkundliche Untersuchungen zur Radon-Konzentration in der Bodenluft über der aufgelassenen Uranerzlagerstätte Bühlkopf/Ellweiler.- unveröffentl. Diplomarb. Univ. Bonn, 90 S.
- Scargle, J.D. (1982): Studies in Astronomical Time Series Analysis II: Statistical Aspects of Spectral Analysis of Unevenly Spaced Data.- *Astrophysical Journal*, 263: 835-853.
- Schulz, M., Mudelsee, M. (2002) : REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series.- *Computers & Geosciences*, 28: 421-426.
- Thies, B. (2009): Instationarität und räumliche Variabilität in Abflusszeitreihen aus Süddeutschland.- *BayCEER-online*, 4/2009: 1-131, <http://opus.ub.uni-bayreuth.de/volltexte/2009/614/>; zuletzt besucht am 22.9.2011)
- Turek, K., Bednar, J., Neznal, M. (1997): Parallel track-etch detector arrangement for radon measurement in soil.- *Rad. Meas.*, 28, 1-6: 751-754.
- VDI-Richtlinie 3865, Blatt 2 (1998): Messen organischer Bodenverunreinigungen. Techniken für die aktive Entnahme von Bodenluftproben.- 57 S.
- Werner, T. (1993): Konzentration und Migration von Radon in Böden und Lockergesteinen am Fallbeispiel Bühlkopf bei Ellweiler.- unveröffentl. Diplomarb. Univ. Bonn, 92 S.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz