

Gutachter:

1. Prof. Dr. Georg Büchel, FSU Jena, CGF, Institut für Geowissenschaften
2. Priv.-Doz. Dr. Jens Wiegand, Universität Duisburg-Essen

Tag der öffentlichen Verteidigung: 25.06.2003

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1 Zusammenfassung.....	1
2 Problemstellung und Zielsetzung.....	3
3 Untersuchungsgebiet Gessental.....	8
3.1 Geologischer Überblick	10
3.2 Historie des Bergbaus und der Sanierung	11
3.2.1 Ausmaße der anthropogenen Überprägung	11
3.2.2 Stand der Sanierung	13
3.3 Hydrochemische Charakterisierung des Grund- und Oberflächenwassers im Gessental	13
3.4 Schematische Darstellung des Untersuchungsgebietes für die konzeptionelle Planung der Gasmessungen	15
4 Einleitung, Grundlagen der Gasmigrationsmessungen.....	17
4.1 Umweltrelevante Gase und ihre Eigenschaften	17
4.1.1 Radon und Radioaktivität	17
4.1.2 Kohlendioxid	19
4.2 Gasvorkommen in der gesättigten und ungesättigten Zone - Transportmechanismen	20
4.3 Einflussfaktoren auf den Gashaushalt	22
4.3.1 Meteorologische Parameter	22
4.3.2 Geogene Bedingungen	24
4.3.3 Anthropogene Beeinflussung	26
4.3.4 Biogene Einflüsse	26
5 Messmethoden.....	28
5.1 Radon-Messungen	28
5.1.1 Radon-Messungen in Bodengas	29
5.1.2 Radonmessungen im Wasser	30
5.1.2.1 Probenahme mit Gaswaschflaschen	31
5.1.2.2 PYLON-Wasserentgasungsmethode	32
5.2 CO ₂ -O ₂ -Bodengas-Messungen	33
5.2.1 Probenahme in Rammkernsondierungen und mit der Schlagsonde	34
5.3 Seitens der Wismut GmbH zur Verfügung gestellte Daten	35

6	Probenahme, Gelände- und Laborarbeiten.....	36
6.1	Probenahmeplan	37
6.2	Radon-Messungen	38
6.2.1	Bodengas-Messungen	38
6.2.2	Messung von Radon in Wasser	39
6.2.2.1	Radongehalte in Grundwasser	39
6.2.2.2	Radongehalte in Sickerwasser	40
6.2.2.3	Radongehalte in Oberflächenwasser	41
6.2.2.4	Stichtagsbeprobung	42
6.3	Bestimmung des Radiumgehaltes im Wasser	42
6.4	Radionuklidgehalte in Sedimenten	42
6.5	CO ₂ - und O ₂ -Messungen	43
6.6	Klimadaten	43
6.7	Flutungsdaten des Grubengebäudes	43
7	Auswertung und Diskussion der Untersuchungen.....	47
7.1	Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Messwerte - Fehlerbetrachtung	47
7.2	Messmethodenvergleich PYLON-WG1001 - Probenahme in Gaswaschflaschen	49
7.3	Vergleich der Messergebnisse bei gefilterten und ungefilterten Wasserproben	52
7.4	Verknüpfung der Messwerte mit den Klimadaten	54
7.5	Radongehalte in den bergbaubeeinflussten Wässern des Gessental und ihre gegenseitige Beeinflussung	57
7.5.1	Radongehalte des Grundwassers im Gessental	62
7.5.2	Radonanreicherungen im Haldensickerwasser	71
7.5.3	Variabilität der Radongehalte im Oberflächenabfluss	75
7.5.4	Kartierung der Radonkonzentration in Wasser	78
7.5.5	Radon-Transportwege im Wasser	80
7.6	Influenz – Effluenz – Untersuchungen	82
7.7	Korrelation anderer Radionuklidgehalte bzw. chemisch analoger Elemente mit den gemessenen Radonkonzentrationen	85
7.8	Radionuklidkonzentrationen in Sedimenten des Gessenbaches	89
7.9	Auswertung der Bodengasprofile - Korrelationen der Bodengaszusammensetzung	93
8	Resultate und Schlussfolgerungen.....	101
9	Literaturverzeichnis.....	106

1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das Gessental als Teil des Sanierungsgebietes der ehemaligen ostthüringischen Uranbergbauregion ausgewählt, um Gasmigrationsmessungen unter dem Einfluss von untertägigen Grubenbauen, der laufenden Flutung dieser Auffahrungen und unter dem Einfluss von Schadstoffen aus den Haldenkörpern durchführen zu können. Ziel der Arbeit war die Untersuchung der Beeinflussung der Radonmigration durch den Bergbau und die Sanierung, die mögliche Nutzung von Radon als Tracer für die Aufdeckung von Quellen und Senken bei Transport und Austrag von Radionukliden, Schwermetallen und anderen bergbaubürtigen Stoffen. Es wurden Radonkonzentrationen im Grundwasser, Haldensickerwasser, Oberflächenwasser und Bodengas bestimmt und durch die Messung des Kohlendioxid- und Sauerstoffgehaltes im Bodengas ergänzt. Auf der Grundlage von Zeitreihen, Stichtagsanalysen und flächenhaften Kartierungen wurden neue Aussagen über den Austrag und die Transportprozesse von Radon in Uranbergbaugebieten in Abhängigkeit von der ehemaligen bergbaulichen Tätigkeit und der aktuellen Sanierung gewonnen.

In den Grundwassermessstellen mit Anbindung an das regionale hydraulische Regime findet in Abhängigkeit von der Jahresniederschlagsverteilung eine Aufkonzentration von Radon bei fallendem Grundwasserspiegel statt und umgekehrt eine Verdünnung. Bei Grundwassermessstellen im schwebenden Grundwasserleiter findet nur eine Verdünnung bei sehr kurzfristigen Infiltrationsereignissen durch Niederschlag statt.

Grundwassermessstellen innerhalb des Depressionstrichters in Haldennähe zeigen höhere Radongehalte als Messstellen außerhalb mit regionaler Anbindung an den Grundwasserspiegel. Dieses Verhältnis kehrt sich ab Frühjahr 2002 bei insgesamt leicht fallender Tendenz um, womit sich der erfolgreiche Einfluss der Sanierungstätigkeit zeigt.

In der haldennäheren Grundwassermessstelle 80/00 korreliert der Radon-Gehalt mit dem Redoxpotenzial, dem Mangangehalt und weniger deutlich mit der Gesamtmineralisation und ist antikorrelat zum Sauerstoffgehalt. Diese Korrelationen zeigen, dass bei reduzierenden Verhältnissen, bei denen der Schwermetalltransport im Grundwasser generell höher ist, höhere Radonwerte auftreten. Hiermit wird der Einfluss der Haldensickerwässer auf die Radongehalte im Grundwasser ähnlich wie bei den Seltenen-Erden-Elementen deutlich. Eine solche Abhängigkeit zeigt sich in der haldenferneren Grundwassermessstelle 10/00 außerhalb des Depressionstrichters nicht.

Die Haldensickerwässer der Nordhalde weisen teilweise die höchsten Radongehalte im Untersuchungsgebiet auf. Sie dienen deshalb als Quellen der Radongehalte im Oberflächen- und Grundwasser. Innerhalb der Haldensickerwässer treten jedoch in Abhängigkeit von der lokalen Haldenzusammensetzung und dem Haldenabtrag große Unterschiede auf. Die

Abhängigkeit der Radonkonzentration im Sickerwasser vom Niederschlag lässt auf ein kommunizierendes Porensystem im Inneren der Halde ähnlich einem Karstaquifer schließen. Die Oberflächenwasserproben zeigen mit Ausnahme weniger Messstellen normale Radongehalte. Erhöhte Werte weisen auf einen Zutritt von Haldensickerwasser, Bodenluft bzw. Grundwasser hin. Im Oberflächenwasser gelöstes Radon entgast sehr schnell durch turbulentes Fließen. Der Radon-Austrag in gelöster Form ist vernachlässigbar.

Eine Stichtagsbeprobung im Gessental zeigt Anomalien bei den Messstellen Q4 und G6, in denen Radon und Radium angereichert sind. Hier finden sich auch die höchsten U-238-, die dritthöchsten Ra-226- und Pb-210-Gehalte in den Sedimenten des Gessenbaches. Mit einer Ausnahme (G14) zeigen alle 12 Sedimentproben von Gessenbach und Badergraben das gleiche Radionuklidverhältnis. Das heißt, es ist bergbaubedingt keine spezifische Anreicherung eines Nuklids zu erkennen. Die Korrelation der U-238- und Ra-226-Konzentrationen mit den Pb-210-Gehalten deutet darauf hin, dass es sich um alte Depositionen bzw. neu umgelagerte alte Depositionen handelt.

Bodengasuntersuchungen im Uferbereich des Gessenbaches zeigen keinen Einfluss von Kontaminationen durch infiltriertes Bachwasser. Jedoch schwanken die Radongehalte in der Talau zwischen 100 Bq/l und mehr als 250 Bq/l.

Bodengasmessungen in Rammkernsondierungen zeigen bezüglich CO₂ drei markante Maxima deutlich über 10 %. Entsprechend gering sind in diesen Bereichen die O₂-Gehalte. Es besteht keine Korrelation der Bodengaszusammensetzung mit den durch die Wismut GmbH im Bereich der offenen Bohrlöcher gemessenen Ortsdosisleistung und der in den Bohrlöchern gemessenen γ -Strahlung. Ob diese Maxima Migrationsbereiche der Grubenluft darstellen, konnte somit nicht bestätigt werden. Vielmehr besteht möglicherweise ein Zusammenhang zwischen der Lithologie der Auesedimente und dem CO₂-Gehalt der Bodenluft.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Sanierung der ehemaligen ostthüringischen Uranbergbauregion inmitten einer dicht besiedelten Landschaft stellt hohe Anforderungen an Wissenschaft und Technik, um mit einem vertretbaren finanziellen Aufwand einen größtmöglichen und dauerhaft wirksamen Sanierungserfolg zu erzielen. Dieser Aufgabe hat sich die Wismut GmbH zusammen mit Gutachtern, Landes- und Bundesbehörden gestellt. Andererseits bietet sich hier die seltene Gelegenheit, ungewöhnliche anthropogen modifizierte geologische, chemische und hydrogeologische Situationen sanierungsbegleitend im Feldversuch für die Forschung nutzen zu können. In dieser Arbeit betrifft es das Uranbergbau-typische Edelgas Radon.

Radon-222 wurde 1900 von Ernst Dorn in Halle entdeckt. Schon kurz danach begann man, Radonbestimmungen für die Lagerstättenforschung nach Uranmineralien, zur Klärung praktisch-geologischer Fragen in der Umgebung von medizinisch wichtigen radioaktiven Heilquellen und für die Detektion von bis dicht zu Tage streichenden Verwerfungen und Klüften bei Baugrunduntersuchungen für Talsperren, große Industriebauten und Tunnelbauten zu nutzen (PIEPMAYER & CO 1927). Neben der immer detaillierteren Erforschung seiner eigenen Eigenschaften und Reaktionsmechanismen (GUNDERSEN & WANTY 1971) wird Radon heute für verschiedene geologische, medizinische und industrielle Fragestellungen genutzt. Im Folgenden sind hierzu einige Beispiele aufgeführt:

1. Die Lokalisierung von geologischen Störungen mit Hilfe von Radonmessungen wird u.a. von PIEPMAYER & CO (1927), KOCH et al. (1984), KEMSKI (1993), SCHIFFER (1997), GUERRA & ETIOPE (1999) und ATALLAH et al. (2001) an Beispielen beschrieben. Die Erkundung gas- und flüssigkeitsdurchlässiger Zonen des Untergrundes als potenzielle Migrationspfade für mögliche Kontaminationen, Untersuchungen des geologischen Untergrundes über geochemische Analysen des Bodengases und die Kenntnis der Lage und Orientierung von Durchlässigkeitszonen sind Ziele dieser Arbeiten.
2. Für die Kartierung von Wassereinzugsgebieten, Infiltrationen und Kontaminationen werden Radonmessungen bei HOEHN & VON GUNTHERN (1989), CHOUBEY et al. (2000) und GEOPHYSIK GGD (2000) eingesetzt. Radonmessungen geben Aufschluss über die Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser und umgedreht, ermöglichen die Zuordnung bzw. Unterscheidung der Wassereinzugsgebiete von Quellen durch Analyse der Quellwasser-Radonkonzentrationen und bieten eine Möglichkeit zur Erfassung von Kohlenwasserstoffkontaminationen im Boden. Auch MATTHEß (1994) beschreibt die Ortung von Grundwasserzutritten in oberirdischen Gewässern durch örtlich erhöhte Radonkonzentrationen im Flußwasser. PRITCHARD et al. (2003) und PRITCHARD & HERCZEG (2003) nutzen Radon zur Lokalisierung von Quellen in einem alluvialen Aquifer und zur Ermittlung saisonaler Schwankungen des Grundwasserzutritts zum

Oberflächenabfluss. Als natürlicher Tracer wird Radon in den Arbeiten von HOEHN et al. (1992), EISENLOHR & SURBECK (1995), DEHNERT et al. (1997), DEHNERT et al. (1999), DEWAYNE CECIL & GREEN (1999) und KAFRI (2001) genutzt. Anwendungsbeispiele sind die Untersuchung von Transportprozessen, die Bestimmung von Verweilzeiten, Fließgeschwindigkeiten und Infiltrationsgeschwindigkeiten von Wasser und die Ermittlung optimaler Abpumpzeiten von Grundwassermessstellen.

3. Die Arbeiten von HEINICKE et al. (1993), KOCH & HEINICKE (1994) und HEINICKE & KOCH (1995) beschäftigen sich mit der Korrelation von Schwankungen in den Radonkonzentrationen mit dem Auftreten von Erdbeben. Bei kontinuierlichen Radonmessungen im Bad Brambacher Quellwasser wird Radon als Tracer für seismische Informationen von der Erdkruste genutzt. Radonanomalien treten simultan mit Erdbeben auf. Als Trägergas für Radon fungiert hier CO₂. Ursache der Radonanomalien sind Untergrundvibrationen (Rayleigh-Wellen) während des Erdbebens. Die gemessenen Schwankungen der Radonkonzentration sind ein Erdbebenvorläufer-Effekt.
4. WILLIAMS-JONES et al. (2000) und Su & Huh (2002) untersuchten Zusammenhänge zwischen gemessenen Radonkonzentrationen und Vulkanausbrüchen und versuchten, Radonmessungen in die Prognostik von Vulkanausbrüchen einzubinden. Po-210-Blasen als Zerfallsprodukt von Rn-222 sind ein Indikator für frisch aufgestiegene Magma als Zeichen für eine mögliche baldige Eruption von Vulkanen. Bei Gasmessungen in der Umgebung von Stratovulkanen wurde festgestellt, dass sie als Punkte in der kontinentalen Kruste fungieren, die eine magmatische Entgasung in Richtung der Krater-Fumarolen, Störungen und den unteren fraktionierten Flanken der Vulkane fokussieren. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der diffuse Austritt von magmatischen Gasen in den oberen Flanken dieser Vulkane vernachlässigbar gering ist und dass mehr Gas in den unteren Flanken der Vulkane auftritt, da hier größere Störungen und Risse in der älteren Lava mehr Wegsamkeiten für das magmatische Gas zum Aufstieg an die Oberfläche bieten.
5. Als Gesundheitsfaktor spielt Radon in mehreren Lebensbereichen eine Rolle. Dabei werden hauptsächlich negative, aber auch positive Wirkungen beschrieben und analysiert. Der positive Einfluss von Radon-Heilbädern auf die Reparaturleistung der menschlichen Körperzellen durch energetische Stimulierung ist in KURREPORT (1999) dargestellt. Andererseits liefert die Inhalation des Edelgases Radon in der Bundesrepublik Deutschland wie in den meisten Ländern den Hauptbeitrag zur natürlichen Strahlenexposition des Menschen. Die Strahlenexposition durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte stellt den zweitgrößten Risikofaktor für Lungenkrebs nach dem Rauchen dar (WICHMANN et al. 1997, KELLER 1997). Erhöhte

Radonkonzentrationen können an Arbeitsplätzen untertage, in Radon-Heilbädern und Wasserwerken, aber auch in der Innenluft von Wohnhäusern und im Zusammenhang mit speziellen medizinischen Behandlungen auftreten (siehe Abb. 2.1). Deshalb werden in den letzten Jahren Untersuchungen zu Radon in Wohngebäuden (BMUNR 1999, STEHL et al. 1999, KELLER 2002, KEMSKI et al. 2002), Radon im Trinkwasser (AURAND & RÜHLE 1997) und Radon in Medizin und Technik (KELLER 1997, GILLMORE et al. 2002) forciert.

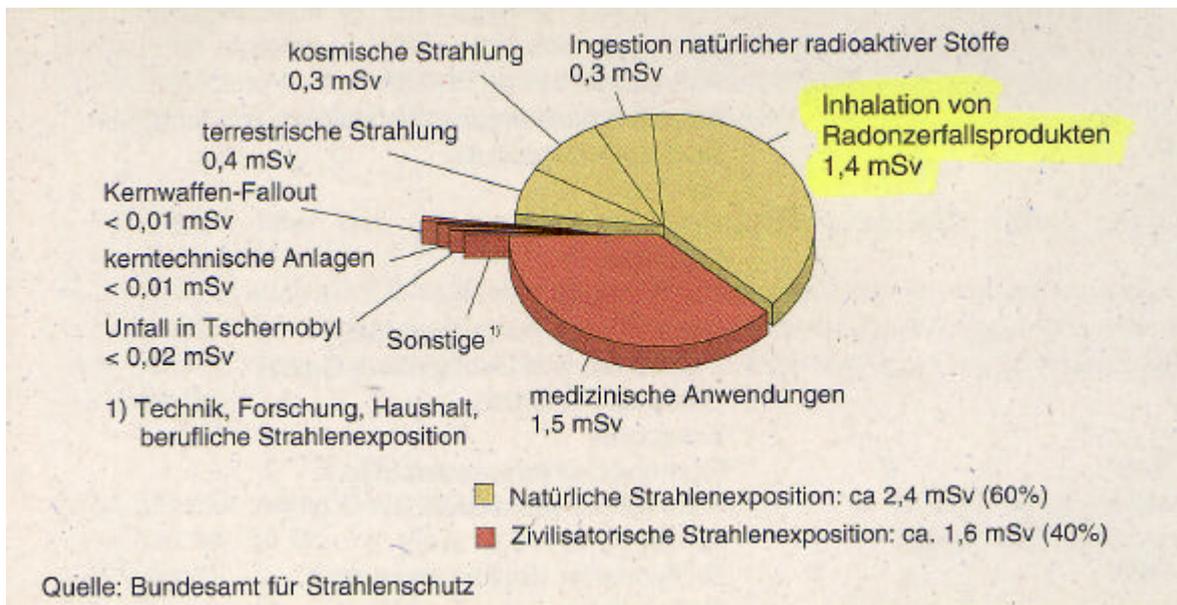


Abb. 2.1: Mittlere Strahlenbelastung der Bevölkerung 1996 in Deutschland

6. Sanierungsbegleitende und überwachende Radonmessungen in ehemaligen Uranbergbauregionen zur Abschätzung möglicher regionaler Gefahrenpotenziale werden in FURUTA et al. (2002), KÜMMEL (2002) und MARTENS & THIELEN (2002) vorgestellt. Dabei geht es um Radonkartierungen und Zeitreihenmessungen zur Abschätzung von möglichen besonderen Gefahrenpotenzialen in diesen Gebieten und um aktuelle Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Radontransports in der Atmosphäre in Bergbaugebieten.

Die unter Punkt 1, 2 und 6 genannten Anwendungsbeispiele für Forschungsgebiete auf der Grundlage von Radonmessungen haben Bezug zur vorliegenden Arbeit. Die Erkundung gas- und flüssigkeitsdurchlässiger Zonen des Untergrundes als potenzielle Migrationspfade für mögliche Kontaminationen, die Erkundung von Wassereinzugsgebieten und Infiltrationswegen, die Untersuchung von Transportprozessen im Wasser und sanierungsbegleitende Radonmessungen zur Abschätzung und Bewertung von Sanierungserfolgen waren Ziele dieser Arbeit.

An der Friedrich-Schiller-Universität Jena beschäftigen sich Geowissenschaftler und Geografen, Biologen und Chemiker mit den Hinterlassenschaften des Uranbergbaus in Thüringen. Mehrere ineinandergreifende bzw. aufeinander aufbauende Forschungsprojekte untersuchen das chemische Potenzial und Reaktionsvermögen der hier in hohen Konzentrationen auftretenden bergbaubedingten Schadstoffe, ihr Transport- und Austragsverhalten und ihre Wirkungen auf Pflanzen, Tiere und den Menschen.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Gessental als Teil des Sanierungsgebietes der ehemaligen ostthüringischen Uranbergbauregion ausgewählt, um Gasmigrationsmessungen unter dem Einfluss von untertägigen Grubenbauen, der laufenden Flutung dieser Auffahrungen und unter dem Einfluss von Schadstoffen aus den Haldenkörpern durchführen zu können. Das Gessental ist prognostiziertes Hauptentlastungsgebiet für die aufsteigenden Flutungswässer. Der Gessenbach ist der wichtigste Vorfluter, der aus dem Ronneburger Bergbaurevier führt. Der Oberlauf des Gessenbaches und der zufließende Badergraben liegen über dem Grundwasserabsenkungstrichter des untertägigen Grubengebäudes und fließen am Haldenfuß der Nordhalde und an der Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde entlang.

Radon soll in der vorliegenden Arbeit als Tracer für die Verteilung, den Transport und Austrag von Radium genutzt werden. Eine Kartierung der Radonkonzentrationen in verschiedenen Grundwasserleitern, Sickerwasseraustrittsstellen, Oberflächenwassermessstellen im Gessenbach und Badergraben und im Bodengas der Talaue ermöglicht eine vergleichende Einordnung des Untersuchungsgebietes in Bezug zu natürlichen Radonwerten in unterschiedlichen Kompartimenten. Die Bestimmung der Radonkonzentrationen in verschiedenen Wassertypen ermöglicht Aussagen über den Grad der gegenseitigen Beeinflussung von Grundwasser, Sickerwasser und Oberflächenabfluss in Abhängigkeit von der Geologie und dem Stand der Sanierung. Schadstoffquellen und -senken können aufgedeckt werden. Die Verfolgung des Transportpfades von Radon aus den Halden in das Oberflächenwasser und Grundwasser ist Grundlage für eine Abschätzung realer Transportwege in der Talaue. Im Vergleich mit den hydrochemischen Untersuchungen von GELETNEKY (2002) kann das Transportverhalten von Radon beim Austrag im Vergleich zum reaktiven und konservativen Transportverhalten von gelösten Stoffen wie Eisen, Uran oder Sulfat charakterisiert werden. Radon wird als Tracer für den hydrochemischen Austrag bergbaubürtiger Schadstoffe getestet. Aussagen über den Grad der Beeinflussung der gemessenen Radonkonzentrationen durch natürliche meteorologische Faktoren und anthropogene bergbauliche Einflüsse sind dabei Grundlage für die Interpretation der Messergebnisse. Das Radonpotenzial ermöglicht eine Charakterisierung der verschiedenen Umweltkompartimente dieses extrem stark belasteten Bergbaugesbietes und lässt Aussagen über den Erfolg von Sanierungsmaßnahmen in diesem Teilbereich zu. Weiterhin soll Radon

zusammen mit der Bestimmung der Kohlendioxid- und Sauerstoff-Konzentrationen im Bodengas Einflüsse der Bergbautätigkeit und der laufenden Sanierung auf die Zusammensetzung des Bodengases aufzeigen.

Zurückgegriffen werden kann auf die schon abgeschlossenen Promotionsarbeiten von BRUNE (2000) zu rezenten vertikalen Erdkrustenbewegungen im Bergbaugesamt und GELETNEKY (2002) zur Hydrogeologie des Gessenbaches vor der Flutung und auf die laufende Arbeit von Senitz zum Thema "Grundwasser- und Stoffdynamik quartärer Talsedimente während der Flutung des unterirdischen Grubengebäudes im ehemaligen Ronneburger Bergbaurevier (Ostthüringen)". Hier liegen zwei Zwischenberichte vor (SENITZ et al. 2002, 2003).

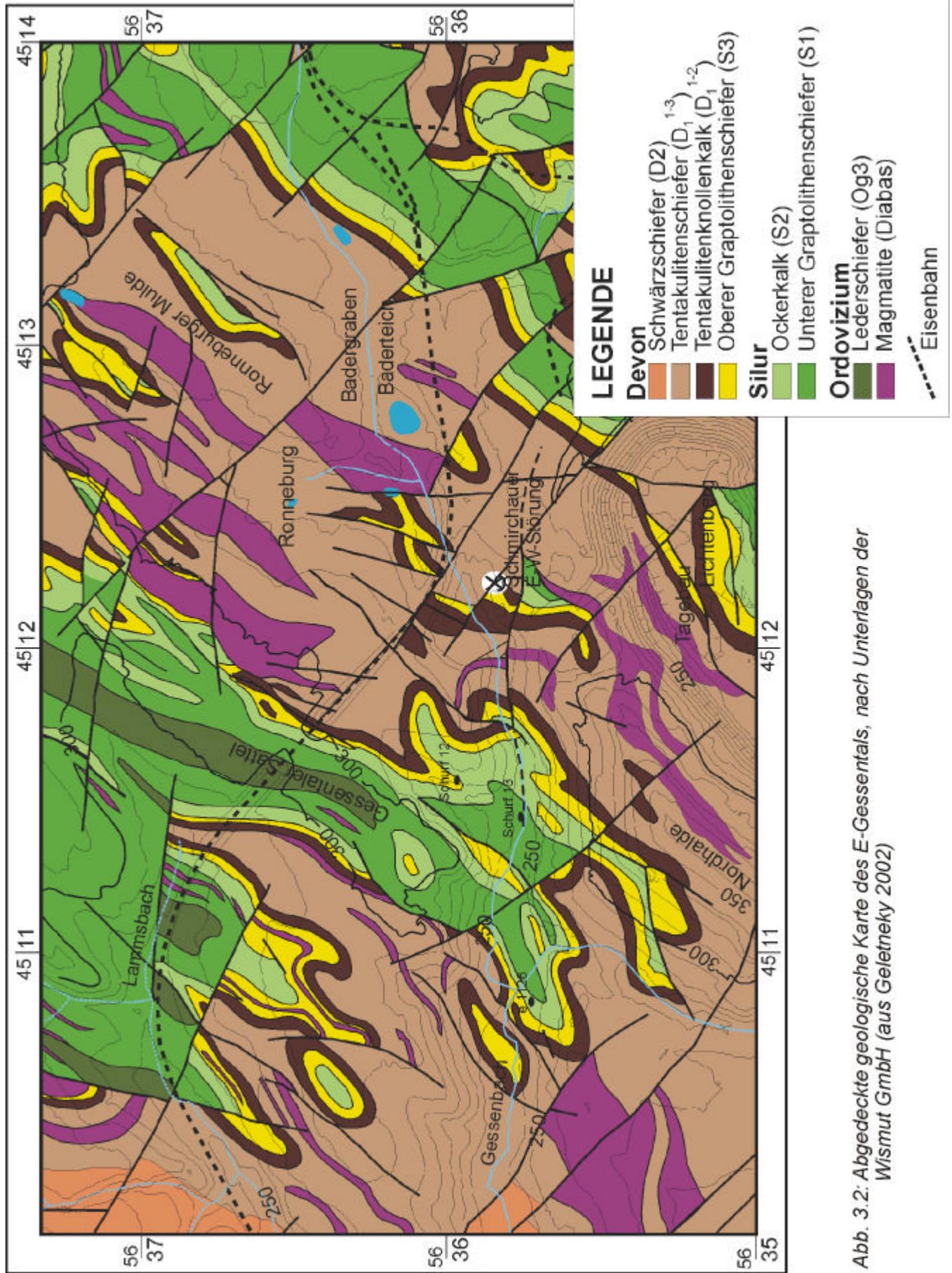


Abb. 3.2: Abgedeckte geologische Karte des E-Gessental, nach Unterlagen der Wismut GmbH (aus Geletnky 2002)

3.1 Geologischer Überblick

Das ostthüringische Uranbergbaugebiet befindet sich im Überschneidungsbereich des variszisch deformierten Altpaläozoikums der NW-Flanke des Bergaer Sattels mit der saxonischen, NW/SE-streichenden Kyffhäuser-Gera-Joachimsthaler (Jachymov)-Störungszone sowie mit seismisch aktiven, N/S- und E/W-orientierten Störungsbereichen. Eine detaillierte Darstellung der regionalgeologischen Situation, der stratigrafischen Gliederung, der Strukturgeologie und Lagerstättenengese auf der Grundlage weitreichender Recherchen ist in GELETNEKY (2002) enthalten.

Regionalgeologisch gehört die Uran-Lagerstätte Ronneburg zum Thüringisch-Fränkischen Schiefergebirge. Eines seiner Faltelemente ist das SW/NE-streichende Bergaer Antiklinorium, in dessen als Ronneburger Horst bezeichnetem NE-Bereich der Hauptteil der Lagerstätte liegt (WISMUT 1999). In seinem Kern wird das Bergaer Antiklinorium aus ordovizischen, an den Flanken aus silurischen und devonischen Gesteinsserien aufgebaut.

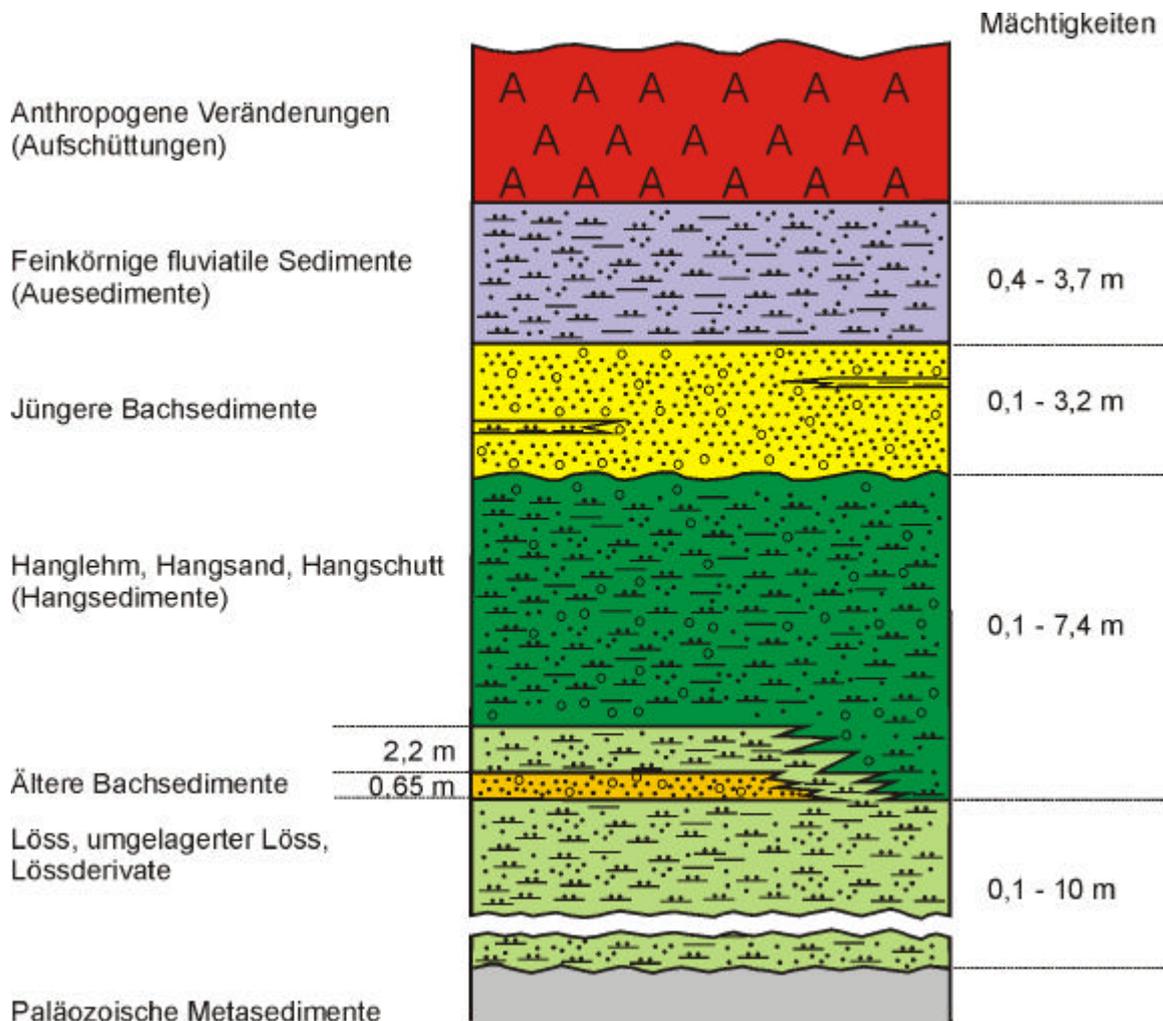


Abb. 3.3: Normalprofil der quartären Sedimente des östlichen Gessentals im Hangenden der paläozoischen Metasedimente (aus GELETNEKY 2002)

Im E-Gessental zwischen Ronneburg und der Mündung des Lammsbaches streichen mehrfach gefaltete Metasedimente des Silurs bis Devons sowie intrusive und effusive magmatische und pyroklastische Gesteine des Mittel/Oberdevons aus (siehe Abb. 3.2). Das tektonische Inventar setzt sich aus Falten mit Schieferung und Klüften und Störungstektonik zusammen (WISMUT 1999). Das Gebiet ist durch NNE/SSW-laufende Sattel- und Muldenstrukturen geprägt, die von NW/SE und N/S verlaufenden Störungs- und Überschiebungszonen durchschnitten sind (GELETNEKY 2002). Die Uranvererzung ist im wesentlichen an ein ca. 250 m mächtiges Schichtpaket vom obersten Ordovizium (Ashgil) bis zum Unterdevon (Eifel) gebunden. Die Trennflächen wurden in Bezug auf rezente Erdkrustenbewegungen weiter untersucht (BRUNE 2000).

Die im Bereich des Gessentals anstehenden quartären Sedimente sowie die anthropogenen Aufschüttungen sind heterogen aufgebaut. Die Sedimente können in unterschiedliche Lithotypen gegliedert werden, die in Abb. 3.3 dargestellt sind. Den Talsedimenten kommt nach GELETNEKY (2002) in der laufenden Flutung z.B. durch ihre Pufferwirkung auf das saure Haldensickerwasser und voraussichtlich im Post-Flutungszeitraum als Grundwasserleiter eine entscheidende Bedeutung zu.

3.2 Historie des Bergbaus und der Sanierung

Aus der Ronneburger Uranbergbauregion stammt etwa die Hälfte des gesamten gewonnenen Urans der SDAG Wismut. Die geologischen und bergmännischen Arbeiten der Wismut im Raum Ronneburg begannen 1950. Insgesamt wurden hier 4 Tagebaue mit einer Gesamtfläche von 274 ha angelegt. Der größte ist der Tagebau Lichtenberg mit einer Fläche von 160 ha, einem Volumen von 84 Mio. m³ und einer ursprünglichen Tagebautiefe von 240m. Das unterirdische Grubengebäude hat eine Ausdehnung von 74 km². Es besteht aus ca. 3000 km aufgefahrenen Strecken, 40 Tagesschächten, 23 Sohlen in einer Teufe von 30 bis 940 m unter Geländeoberkante (GOK) und einem Gesamthohlvolumen von 27 Mio. m³. Es wurden insgesamt 17 Halden mit einer Aufstandsfläche von 466 ha und einem Volumen von 200 Mio. m³ aufgeschüttet. 2 kleine Absetzbecken mit einer Fläche von 8 ha hatten einen Inhalt von 0,22 Mio. m³ (WISMUT 1999).

3.2.1 Ausmaße der anthropogenen Überprägung

Abb. 3.4 zeigt sehr deutlich die übertägigen Ausmaße der bergbaulichen Überprägung. Die Landschaft wurde zu über 50 % durch den aktiven Bergbau verändert, so dass von einer natürlichen Umgebung nicht mehr gesprochen werden kann. Die Flächen der Nordhalde, Zentralhalde mit Absetzerhalde und die beiden Doppel-Spitzkegelhalden fallen genau so wie der Tagebau Lichtenberg ins Auge, ebenso die umgeleitete Bahnlinie und die Autobahn.

Das Gessental als morphologisch tiefster Bereich und seine Seitenarme sind charakterisiert durch steile nördliche Talflanken mit tiefen Erosionsrinnen in NE/SW-Richtung und eine flach

verlaufende und weniger gegliederte südliche Talflanke. Der Oberlauf des Gessenbaches und der Badergraben grenzen direkt an Haldenflächen. Die Talflanken des morphologisch leicht höher gelegenen Wipsetals sind ähnlich ausgeprägt.

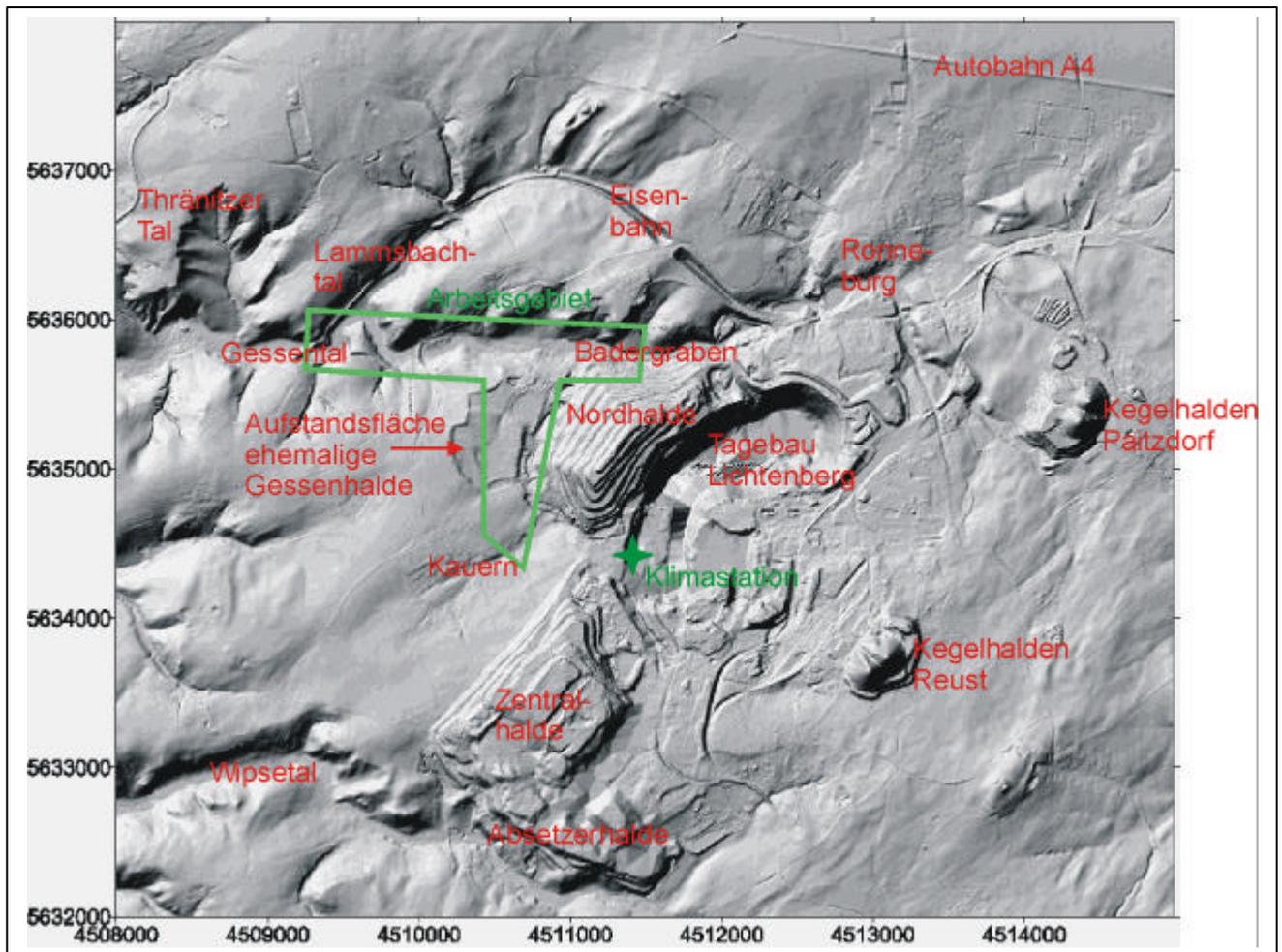


Abb. 3.4: Digitales Geländemodell des Einzugsgebietes des Gessenbaches, berechnet aus Rasterdaten (DGM 10, Höhengenaugigkeit ± 1 m bis ± 2 m, Gitterweite 10 m) des Thüringer Landesvermessungsamtes aus dem Jahr 1998 (Hoch- und Rechtswerte in m).

Das für die Untersuchung des Migrationsverhaltens von Radon ausgewählte Arbeitsgebiet ist in Abb. 3.4 eingezeichnet. Die Messungen haben im Gessental und Badergraben stattgefunden. Messstellen befanden sich am nördlichen und westlichen Fuß der Nordhalde, im Gessenbach zwischen Nordhalde und Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde, im Badergraben, im weiteren Verlauf des Gessenbaches bis zum Lammsbach und in der Talauie des Gessentals. Die Nordhalde ist in Abb. 3.4 noch in unangetastetem Zustand zu sehen. Inzwischen wurde sie in den Tagebau Lichtenberg verbracht.

Die Nordhalde hat eine ca. 84 ha große Aufstandsfläche und wurde zwischen 1958 und 1971 aufgefahren. Bis 1966 wurde unter anderem kohlenstoffreiches, z.T. zu endogenen Bränden

neigendes Material verkippt, wobei sich zeitweise lokale Brandherde bildeten. Ab 1969 wurde Abraum aus quartären Deckschichten, unterdevonischen Tentakulithenschiefern, Kalktonschiefen und Diabasen mit geringem Säurebildungspotenzial geschüttet.

Die Gessenhalde mit einer Aufstandsfläche von 28,7 ha wurde speziell für die schwefelsaure Laugung von armen Erzen geschüttet. Sie war eine Produktionshalde zur Laugung hauptsächlich silikatischer Erze und war durch eine verdichtete Lehmschicht zum Untergrund hin abgedichtet. Die Haldenlaugung wurde von 1971 bis 1978 durch Aufgabe von sauren Grubenwässern (pH-Wert 2,7 – 2,8) durchgeführt. Nach Einstellung der Urangewinnung und damit auch der Laugungsarbeiten der Gessenhalde wurde 1990 der erste Antrag zur Verbringung der Gessenhalde in das Tagebaurestloch gestellt. Die Gesamtumlagerung von 4,6 Mio m³ in das Tagebautiefste war 1995 abgeschlossen. Heute ist die Aufstandsfläche neu konturiert und abgedeckt.

3.2.2 Stand der Sanierung

Ende 1990 wurde der Uranerzbergbau der SDAG Wismut eingestellt und mit den Sanierungsarbeiten zur Beseitigung der Hinterlassenschaften begonnen. Bis Ende 2002 wurde der größte Teil der Grubenbaue, Schächte und Tagesöffnungen abgeworfen, verfüllt bzw. verwahrt. 92 % aller Gebäude und Anlagen wurden abgebrochen, 67 % der Halden abgetragen und umgelagert und 41 % der Betriebsflächen saniert (<http://www.wismut.de>, WISMUT 2001). Der Tagebau Lichtenberg war zu 69 % verfüllt durch den Einbau von ca. 83 Mio. m³ Haldenmaterial, hauptsächlich von der Absetzerhalde und der Nordhalde. Die Flutung der Grubenfelder südlich der Autobahn A4 verlief planmäßig innerhalb des prognostizierten Bereiches (siehe Abb. 6.4) (GATZWEILER et al. 2002, PAUL et al. 2002). Mit dem Bau der Wasserbehandlungsanlage Ronneburg wurde im Februar 2001 begonnen. Inzwischen ist sie fertiggestellt und getestet. Sie dient bei fortgeschrittener Flutung der Behandlung der aufsteigenden schadstoffbelasteten Grundwässer vor Abgabe an die Vorflut. Die behandelten Wässer sollen über den Wipsegraben abgeleitet werden.

3.3 Hydrochemische Charakterisierung des Grund- und Oberflächenwassers im Gessental

Das Gessental gehört zum Einzugsgebiet der Weißen Elster und hat ein ca. 30 km² großes orohydrografisches Einzugsgebiet. Die natürliche Topografie des Gessentals und seiner Umgebung ist massiv anthropogen überprägt, wie das digitale Geländemodell von 1998 (Abb. 3.4) eindeutig zeigt. Die Topografie des untersuchten oberen Teiles des Gessentals ist in Abb. 6.5 aus der genauen Vermessung der Rammkernsondierungspunkte durch die Wismut GmbH abzulesen.

Der ursprüngliche Verlauf des Bachbettes von Gessenbach und seinen Zuflüssen wurde durch den Bergbau verändert. Heute fließen Gessenbach und Badergraben teils in quasi-

natürlichem, teils in künstlichem Bachbett entlang der Haldenfüße. Die chemische Zusammensetzung der Wässer wird dadurch vom Bergbau und Haldenmaterial geprägt.

Das Gessental liegt bis vor dem Zufluss des Lammsbaches über dem ehemaligen Grundwasserabsenkungstrichter des Grubengebäudes, dessen Flutung seit 1998 kontrolliert stattfindet (Abb. 3.1). Bei Abschluss der Flutung gehört das Gessental im Mündungsbereich des Badergrabens in den Gessenbach aufgrund seiner Morphologie zu den prognostizierten Flutungswasseraustrittsstellen.

Der Chemismus der Oberflächenwässer und Grundwässer des Gessentals wurde von GELETNEKY (2002) untersucht. Die Arbeit enthält eine Übersicht und Klassifikation der Haldensickerwässer, Oberflächenwässer und des oberflächennahen Grundwassers. Bergbaubeeinflusste Oberflächen- und Grundwässer sind dem Typ 1, nicht direkt bergbaubeeinflusste Bereiche sind dem Typ 2 zugeordnet.

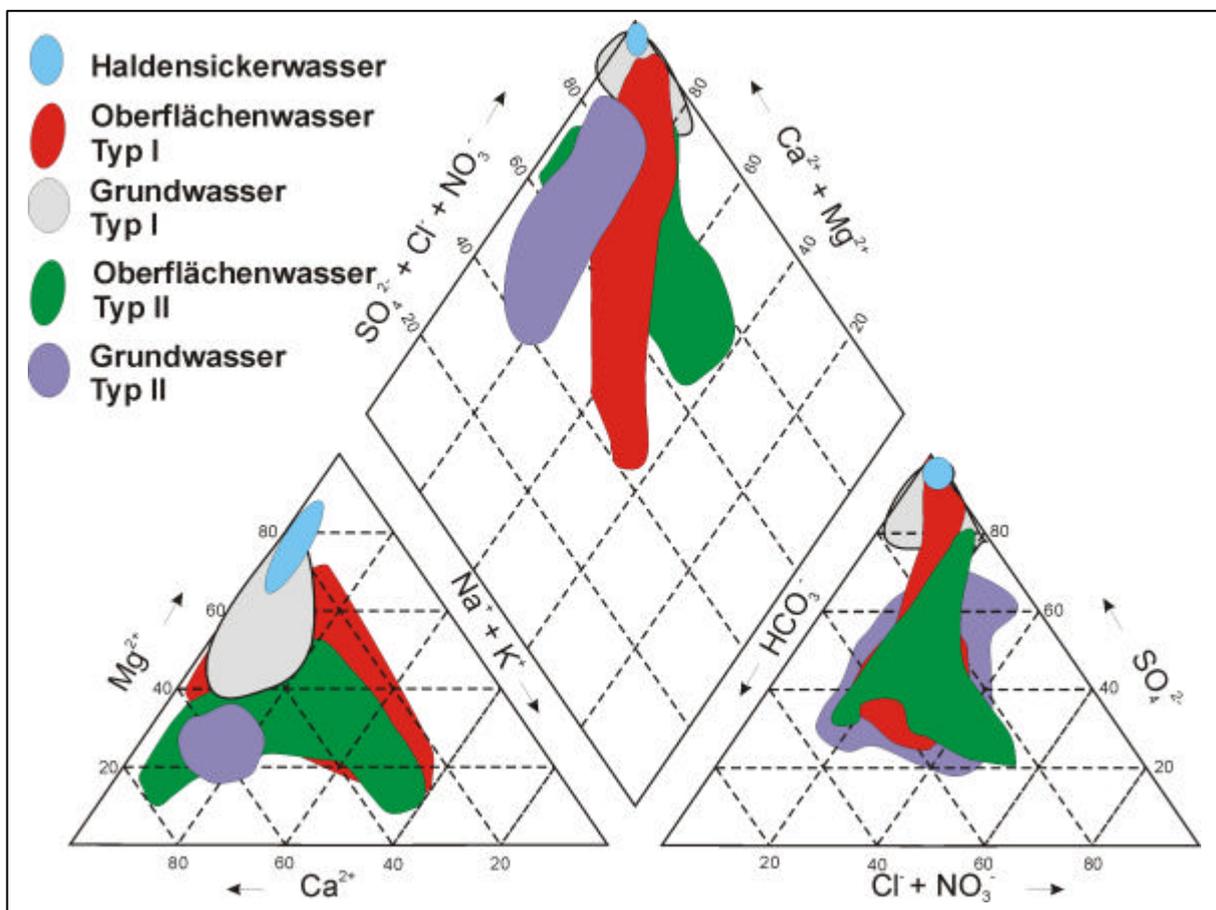


Abb. 3.5: Piper-Diagramm der unterschiedlichen Wassertypen im Gessental (GELETNEKY 2002)

Das Haldensickerwasser hat einen pH-Wert von 2,4 bis 3,6 und eine mittlere elektrische Leitfähigkeit von 12 mS/cm und beeinflusst den Chemismus des bergbaubeeinflussten

Grundwassers (Typ1) in den schwebenden Grundwasserleitern wie auch die Zusammensetzung des bergbaubeeinflussten Oberflächenwassers Typ 1. Abb. 3.5 zeigt die relative Konstanz in der Zusammensetzung des Sickerwassers und des Grundwassers Typ 1. Die Messwerte im Oberflächenabfluss schwanken in Abhängigkeit von dem Abstand der Messstellen zu einem Sickerwasserzutritt, von der Abflussmenge sowie von der Jahreszeit und haben eine ähnliche Zusammensetzung wie das bergbauunbeeinflusste Grundwasser Typ 2.

Typisch für die Oberflächen- und Grundwässer vom Typ 1 sind die Entkopplung vom großräumigen und lokalen hydrogeologischen Regime, grundsätzliche Verminderung der Abflussverhältnisse zwischen oberirdischem und unterirdischem Abfluss, die Abkopplung der Vorfluter von natürlichen Quellen, die Speisung der Vorfluter vorwiegend durch kommunale Abwässer und Niederschlagswässer sowie influente Verhältnisse in den Talsedimenten und der Zutritt von Haldensickerwasser. Die Vorfluter des Typs 2 bilden Systeme mit direkter Ankopplung an das hydrogeologische Regime ohne direkten Zustrom von bergbaubeeinflusstem Wasser mit effluenten Verhältnissen. Die Beeinflussung durch kommunale Abwässer ist nur gering, es werden quasinatürliche Verhältnisse repräsentiert. Chemisch sind die Typ 2 – Wässer als niedrigmineralisierte Ca-Mg-HCO₃-Typen charakterisiert, die als typische Grundwasservorkommen im Ronneburger Horst gelten (GELETNEKY 2002).

3.4 Schematische Darstellung des Untersuchungsgebietes für die konzeptionelle Planung der Gasmessungen

Das Gessental mit seinen geologischen und bergbaulichen Besonderheiten ist ein interessantes reales Objekt zur Untersuchung des Radonpotentials und der Gasmigration. Die in den oberen Bodenschichten und in den durch den Bergbau zusätzlich geschaffenen Grenzbereichen zwischen Gestein und Atmosphäre entstehenden Bodengase und ihre Ausbreitung können in Abhängigkeit von natürlichen Einflüssen und unter wechselnden Sanierungsbedingungen untersucht werden. Dabei ist die Einbeziehung sehr detaillierter Untersuchungen der Zusammensetzung und Struktur der Talsedimente im Rahmen der Bergbautätigkeit und der Sanierung, geoelektrischer Sondierungen und eines Rammkernsondierungsprogrammes 2000 der Wismut GmbH und eigener Untersuchungen der Arbeitsgruppe Angewandte Geologie im Gessental möglich.

Die in Wasserproben gemessenen Radonkonzentrationen sind ein Indikator für Radium im Boden bzw. im Wasser. Sie erlauben Rückschlüsse auf Transportwege von gelösten und ungelösten Frachten. Außerdem können die ermittelten Radonkonzentrationen den physikochemischen Parametern und der Hydrochemie der verschiedenen Wässer gegenübergestellt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, neue Korrelationen zwischen verschiedenen Eigenschaften der Proben aufzudecken bzw. auszuschließen. Abb. 3.6 zeigt eine schematische Darstellung der unterschiedlichen Untersuchungsareale.

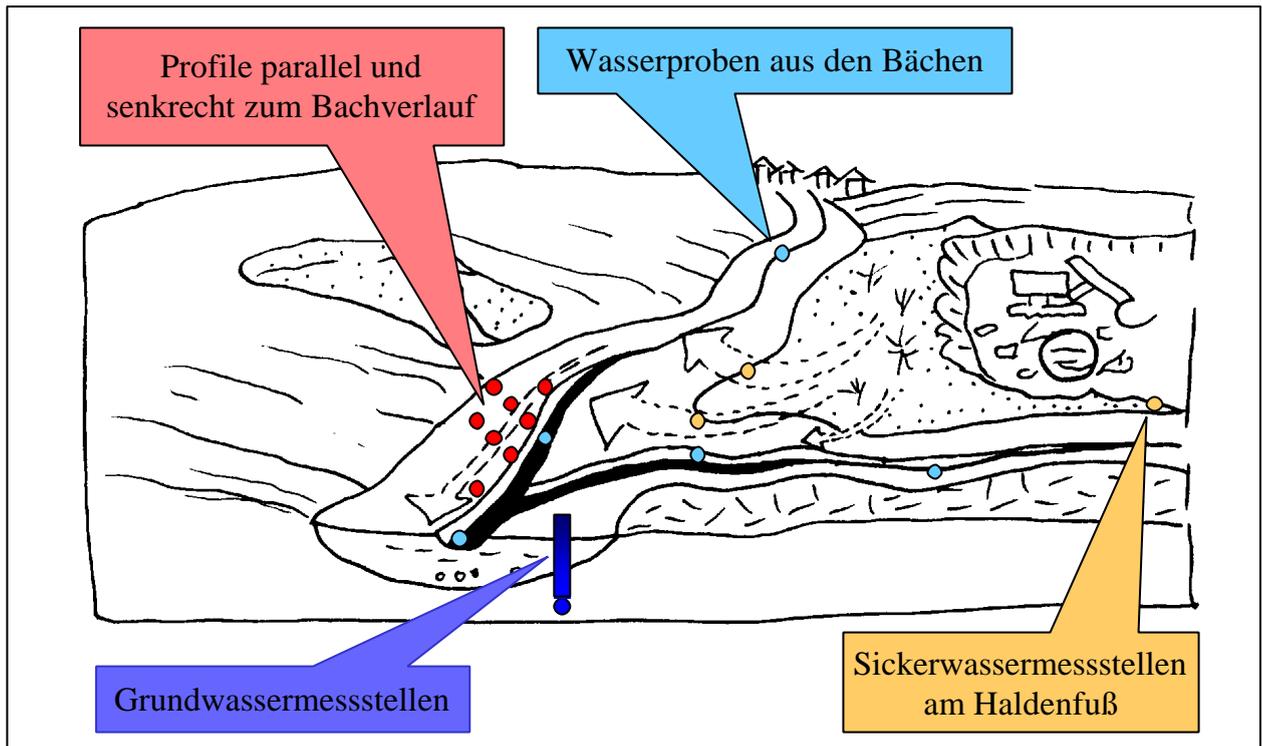


Abb. 3.6: Schematische Darstellung der Gasmigrationsmesspunkte im Gessental

Das vorgestellte Untersuchungsgebiet stellt somit ein hervorragendes Objekt dar, um die bergbaulichen Eingriffe in den Stoffhaushalt wie Massenumlagerungen von Haldenmaterial und die Flutung des Grubengebäudes begleitend zu beobachten und ihre Auswirkungen wissenschaftlich unter dem Gesichtspunkt der Radonmigration zu analysieren.

4 Einleitung, Grundlagen der Gasmigrationsmessungen

4.1 Umweltrelevante Gase und ihre Eigenschaften

Die Zusammensetzung des Bodengases und der Luft auf der Erde sind geochemisch und klimatisch bedingt und stellen einen wichtigen Baustein des Lebens dar. Die Untersuchung der Zusammensetzung der Gase und der Auswirkungen von Veränderungen in deren Zusammensetzung ist mit Blick auf die zunehmende anthropogene Veränderung der Luft und ihre möglichen klimatischen Folgen seit längerer Zeit massiv in das Interesse der wissenschaftlichen Forschungsarbeiten gerückt (RENNERT et al. 1986, MATSCHULLAT et al. 1997, WELLBURN 1997, BERNER et al. 1995, GEHR et al. 1997). Die Migrationsbestimmungen in dieser Arbeit sind speziell auf das Edelgas Radon ausgerichtet. Dies resultiert aus den Besonderheiten des zu untersuchenden Gebietes, das in der ostthüringischen Uranbergbauregion liegt. Hieraus erwachsen die ausgezeichneten Möglichkeiten der Erforschung der Tracereigenschaften und des Austrags des Radon-Gases in stark anthropogen überprägter Umgebung. Begleitend zu den Radon-Untersuchungen wurden bei Bodengasmessungen auch Messungen von Kohlendioxid und Sauerstoff mit durchgeführt.

4.1.1 Radon und Radioaktivität

Unter Radioaktivität versteht man die Eigenschaft instabiler Atomkerne, spontan und durch äußere Einwirkungen nicht beeinflussbar zu zerfallen und dabei ionisierende Strahlung auszusenden. Der radioaktive Zerfall ist ein statistischer Prozess. Die für jedes Element charakteristische Zeit bis zum Zerfall ist die Halbwertszeit und beschreibt den Zeitraum, in dem die Hälfte des vorhandenen Materials zerfallen ist. Bei der ionisierenden Strahlung unterscheidet man Alpha-, Beta- und Gammastrahlung. Alphastrahlung ist ein Teilchenstrom von Kernen des Elements Helium (bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen). Betastrahlung ist ein Teilchenstrom von negativ oder positiv geladenen Elektronen und wird z.B. in Aluminium oder im menschlichen Gewebe absorbiert. Gammastrahlung ist kurzwellige, elektromagnetische Strahlung.

Zerfällt ein Atom, so kann ein stabiles Element entstehen. Wenn nicht, geht der Zerfall weiter. Es entstehen Zerfallsreihen. Die überwiegende Mehrzahl der 45 natürlichen radioaktiven Elemente gehören zu vier Zerfallsreihen. Die Muttersubstanz als erstes Element der Reihe liefert der Reihe immer neue Atome. Wenn sich die Muttersubstanz nicht merklich verringert, bildet sich innerhalb der Reihe ein Gleichgewicht heraus. Elemente mit großen Halbwertszeiten sind in größerer Menge vorhanden als Elemente mit kleineren Halbwertszeiten.

Bei der Beschreibung der Radioaktivität und deren Wirkungen spielen mehrere Kenngrößen eine Rolle. Grundlegend ist die **Aktivität** der Radionuklide. Darunter versteht man die Anzahl der Zerfälle je Zeiteinheit.

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit (Sekunde)}} = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bequerel (Bq)} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Curie (Ci)}$$

1 Curie ist als die Aktivität von 1 Gramm Radium (Ra-226) definiert. Die Konzentration der Radionuklide wird in Aktivität pro Volumen angegeben. Für die Bestimmung der biologischen Wirkung wird mit der **Energie-Dosis** und der Äquivalentdosis gearbeitet.

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{Absorbierende Strahlungsmenge (Joule)}}{\text{Masse (Kilogramm)}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ ---} = 1 \text{ Gray (Gy)}$$

Ein Gray entspricht der gesamten absorbierten Strahlungsenergie-Abgabe an die bestrahlte Materie. Die **Äquivalentdosis** entspricht der absorbierten Energie, multipliziert mit einem dimensionslosen Faktor der biologischen Wirksamkeit und wird in Sievert (Sv) angegeben. Die mittlere jährliche Strahlendosis aus natürlichen Strahlungsquellen beträgt in der Bundesrepublik Deutschland 2,4 mSv/a und schwankt territorial zwischen 0,5 und 5 mSv/a. Davon entfallen 1,3 mSv/a auf Strahlung der Uran-Radium-Zerfallsreihe.

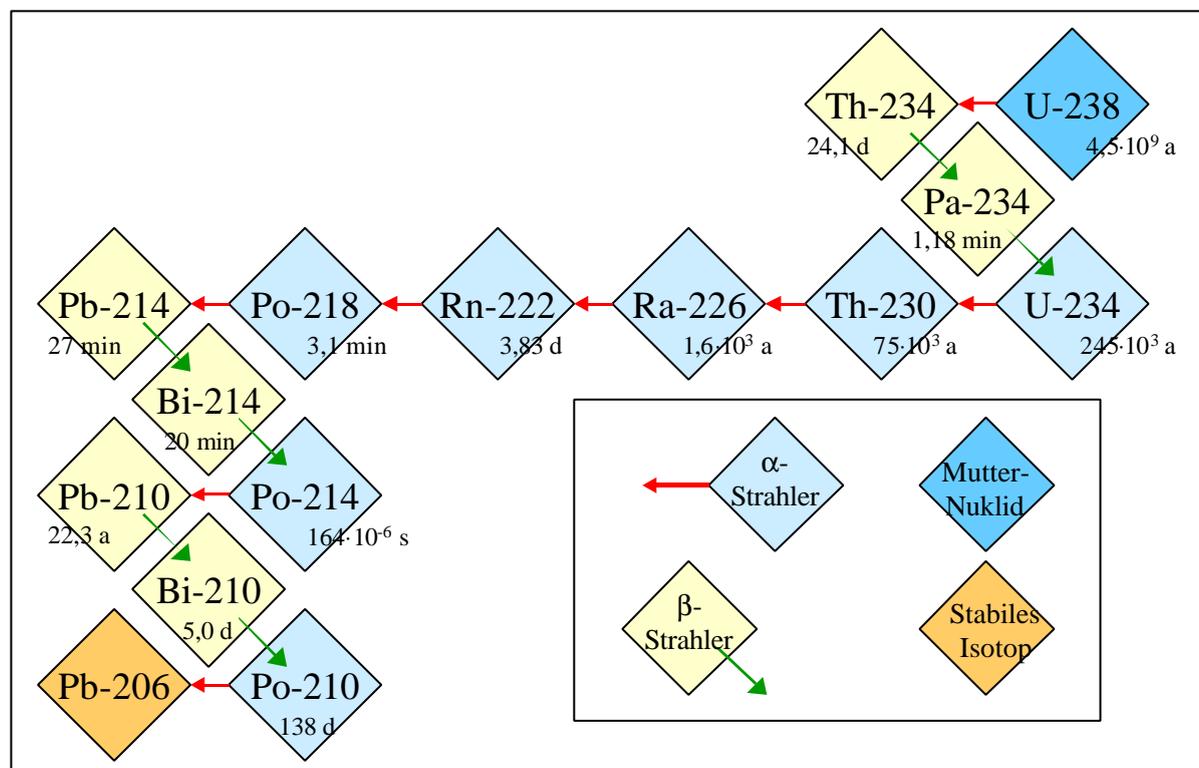


Abb. 4.1: vereinfachte Darstellung der U-238 Zerfallsreihe mit Halbwertszeiten

Uran zählt zu der Elementgruppe der Actiniden. Es gibt drei Uran-Isotope, das U-238 und U-234 aus der Uran-Zerfallsreihe und das U-235 aus der Actinium-Zerfallsreihe. Alle drei Isotope sind α -Strahler. U-238 hat eine Halbwertszeit von 4,5 Milliarden Jahren, seit Entstehung der Erde ist also ca. die Hälfte des ursprünglichen Isotops zerfallen. Endglied der Zerfallsreihe ist das stabile Blei-206 (siehe Abb. 4.1).

In der ostthüringischen Uranbergbauregion wurde aus dem geförderten Gestein lediglich der größte Teil des Urans extrahiert. In dem angefallenen Abraummateriale sind noch die restlichen Radionuklide der Zerfallsreihe enthalten.

Radon ist ein natürlich vorkommendes, geruch-, geschmack- und farbloses Edelgas und chemisch weitestgehend inert. Natürlich vorkommende Nuklide des Radons sind in Tab. 4.1 aufgeführt.

Tab. 4.1: Natürlich vorkommende Nuklide des Edelgases Radon

Isotop	Bezeichnung	Halbwertszeit	Zerfallsreihe
Rn-222	Radon	3,83 Tage	U-238
Rn-220	Thoron	55 Sekunden	Th-232
Rn-219	Actinon	4 Sekunden	U-235

Die Radon-Isotope können sich als einzige gasförmige Elemente innerhalb der Zerfallsreihen von ihrem Entstehungsort entfernen und migrieren. Durch die Ablagerung ihrer festen Zerfallsprodukte bedingen sie eine induzierte Radioaktivität (KEMSKI 1993). In dieser Arbeit wird speziell das Nuklid Rn-222 betrachtet. Rn-222 ist ein Radionuklid aus der Zerfallsreihe von Uran-238. Es entsteht aus Radium-226 und hat eine Halbwertszeit von 3,83 Tagen. Radon zerfällt unter Aussendung von α -Strahlung in das kurzlebige Po-218.

Die Radonkonzentrationen in der Außenluft, in der Luft in Häusern, im Boden oder im Grundwasser können sehr verschieden sein. Im Freien findet man die geringsten Radonkonzentrationen zwischen 1 Bq/m^3 und 20 Bq/m^3 , da sich das Radon in der Atmosphäre schnell verdünnt. Durchschnittlich gemessene Radonkonzentrationen in der Bodenluft bewegen sich zwischen 30 und 100 Bq/l ; Radonkonzentrationen im Grundwasser betragen ca. 4 bis 40 Bq/l und im Oberflächenwasser weniger als 40 Bq/m^3 (MATTHEß 1994, WIEGAND 1999).

4.1.2 Kohlendioxid

Gasförmige anthropogene Luftbeimengungen absorbieren vor allem im Bereich der terrestrischen Strahlung mit der Tendenz, den atmosphärischen Treibhauseffekt zu

verstärken. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass anthropogene Luftbeimengungen über Veränderungen des Strahlungshaushaltes in den Wärmehaushalt und damit in den komplexen Umweltfaktor Klima verändernd eingreifen. Das gilt besonders für das atmosphärische CO₂ (GEHR et al. 1997), das infolge ständig zunehmender Verbrennung fossiler Energieträger im globalen Maßstab seit Beginn der Industrialisierung mit einer gegenwärtigen jährlichen Konzentrationszunahme von etwa 0,4 % ansteigt (QUELLE: UMWELTBUNDESAMT, MESSSTELLE SCHAUINSLAND).

Durch die bergbaulichen Aktivitäten im Zusammenhang mit der Urangewinnung wurde die reaktive Oberfläche der anstehenden Gesteine extrem vergrößert. Die Absenkung des Grundwasserspiegels, der Vortrieb unterirdischer Auffahrungen, das Brechen des Gesteins im Tagebaubetrieb und die Aufbereitung durch chemische Verfahren wie Laugung führten zu einer Vervielfachung der potentiellen Angriffsflächen und damit des Reaktionspotentials der geogenen Materialien gegenüber der atmosphärischen Luft. Daraus resultiert die Möglichkeit lokal erhöhter CO₂-Werte im Bergbaubereich. Im Zusammenhang mit den in diesem Forschungsprojekt dominierenden Radonmessungen soll die Bestimmung der CO₂-Konzentration in der Bodenluft über dem Grubengebäude Aufschlüsse über mögliche Korrelationen zwischen den CO₂- und Radonkonzentrationen geben bzw. ergänzende Aussagen zu kleinräumigen Variationen der Bodengaszusammensetzung im Untersuchungsgebiet ermöglichen. Begleitend zu den CO₂-Messungen wird die sich antikorrelat verhaltende Sauerstoffkonzentration mit bestimmt.

4.2 Gasvorkommen in der gesättigten und ungesättigten Zone – Transportmechanismen

Bodengase befinden sich in allen Poren- und Hohlräumen unterhalb der Geländeoberfläche. Sie können eingeschlossen sein oder in Verbindung und Austausch mit anderen Poren oder der Erdoberfläche stehen. Das Volumenverhältnis von Gesteinsmaterial und Gasen hängt von der Art des Gesteins und seinem Verdichtungsgrad ab. Sehr dichte Gesteine, die besonders in größeren Tiefen anzutreffen sind, enthalten kaum Gase. Je poröser ein Material wird, desto höher steigt das Gasvolumen der Porenräume.

Der Transport von Bodengasen (auch **Migration** genannt) wird durch die Prozesse der Emanation, Diffusion und Konvektion beschrieben (Abb. 4.2) (JIA et al. 2002, www.med-rz.uni-sb.de/med_fak/biophys/ag-kell/radon.html). Bei dem Zerfall von Radium bekommt sowohl das dabei entstandene Alpha-Teilchen, als auch das Radon einen Rückstoß. Dadurch bewegt sich das Radon durch das Mineralkorn und kann, wenn es in der Nähe einer Pore gebildet wurde, in diese heraustreten. Dies wird **Emanation** genannt. Wenn das Radon in dieser Pore zur Ruhe kommt, kann es durch die Poren des Gesteins an die Erdoberfläche gelangen. Ein Teil des Radons hat allerdings in der Pore noch eine so große Energie, dass es diese durchquert und in das Nachbarkorn eindringt. Wasser in den Poren

kann dazu führen, dass diese Radonotope, die sonst in das Nachbarmineral wieder eindringen würden, in den Poren abgebremst werden und somit auch an die Oberfläche gelangen können. Typischerweise gelangt in sandigen oder lehmigen Böden nur ca. 30%, in Felsgestein sogar nur jedes zehnte Radonatom in die Poren.

Die Bewegung des Radons durch den Boden ist ein **Diffusionsprozess**. Gas hat das Bestreben, sich im Boden gleichmäßig zu verteilen. Dadurch bewegt es sich von Bereichen hoher Konzentration im Boden zu Gebieten geringerer Konzentration, z. B. in die Nähe der Oberfläche oder in die freie Atmosphäre. Neben der Diffusion spielt die **Konvektion** eine Rolle. Dabei wird Radon mit der gesamten Porenluft an die Oberfläche bewegt. Ursache dafür sind Druckunterschiede zwischen der Bodenluft und der freien Atmosphäre, verursacht z.B. durch Wind und Temperaturdifferenzen.

Die Gasmigration wird durch eine Erhöhung der Gaswegsamkeit im Untergrund begünstigt. Dadurch kann es an Verwerfungen, Bergbausenkungen oder an der Grenze zweier Gesteinsarten zu einer lokal erhöhten Radonkonzentration kommen.

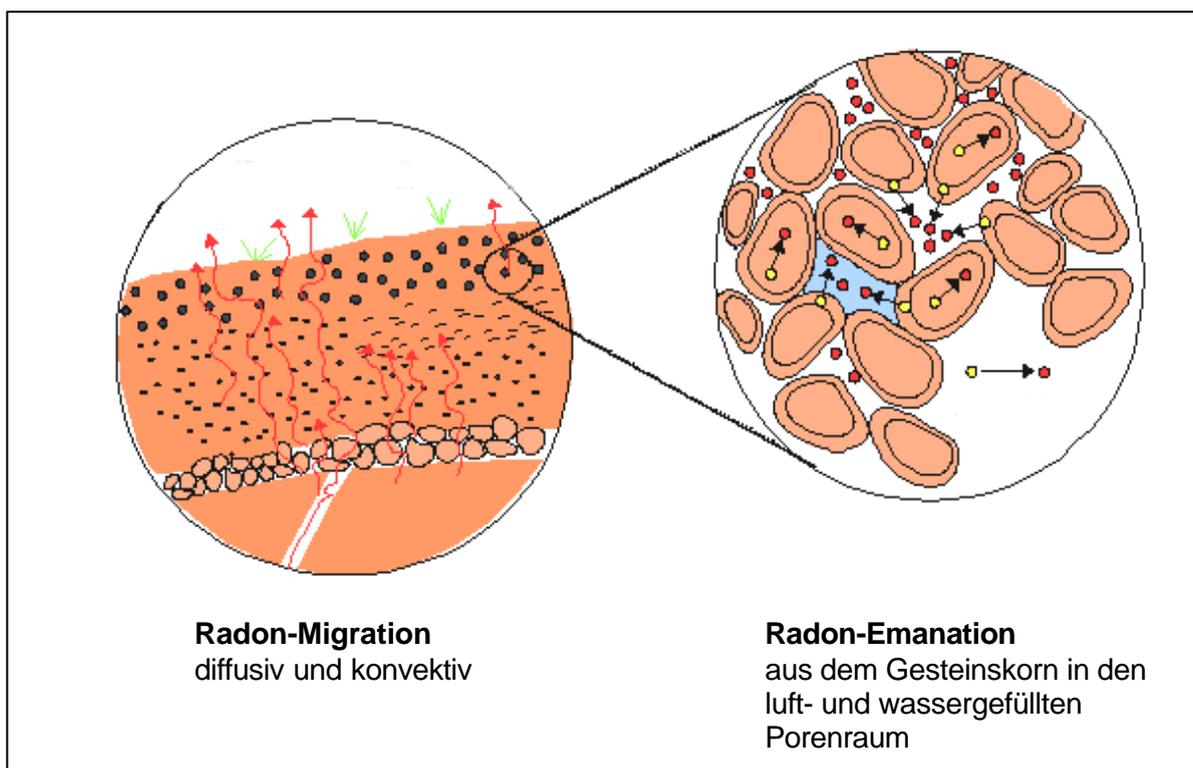


Abb. 4.2: Bodengas-Transportmechanismen – (nach SIEHL et al. 1999)

● Radium ● Radon

Radium zerfällt zu Radon. Radon bleibt entweder im Gesteinskorn gebunden oder gelangt durch den Rückstoßeffekt des α -Zerfalls in die Poren zwischen den Gesteinskörnern. Die Poren können wassergefüllt sein. Radon bewegt sich entweder im und mit dem Bodengas oder wird in Wasser gelöst und transportiert.

Eine wichtige Rolle für den Stofftransport spielt das Wasser. Dabei muss zwischen dem Transport gelöster Stoffe und dem Sediment- und Schwebstofftransport unterschieden werden. Radium ist nicht leicht wasserlöslich und wird im Wasser hauptsächlich mit Sedimentfrachten bewegt. Radon ist wasserlöslich und kann entsprechend seiner Halbwertszeit und der Fließgeschwindigkeit des Wassers über unterschiedliche Strecken transportiert werden. Im Oberflächenwasser wird der Transport durch Entgasung aufgrund von Turbulenzen verringert (SAMMARCO & SAMMARCO 2002).

4.3 Einflussfaktoren auf den Gashaushalt

Die Transportmechanismen der Bodengase und speziell von Radon werden durch verschiedene Faktoren sehr komplex beeinflusst. Mehrere Arbeiten befassen sich mit diesem Thema am Beispiel der Bodengaskonzentration von Radon und allgemeinen Bodengasuntersuchungen, u.a. WORM (1986), REHS (1999), WIEGAND (2001), WINKLER et al. (2001), WIEGAND & FEIGE (2002) und ALTEVOGT et al. (2003). Meteorologische, geologische und biologische Bedingungen wirken sich sehr unterschiedlich auf die Radonkonzentration im Bodengas aus und werden im Untersuchungsgebiet Gessental noch durch anthropogene bergbauliche Bedingungen überprägt. Dadurch können die Bodengaskonzentrationen sehr starke Schwankungen aufweisen, aber eine genaue Ursache – Wirkung – Analyse ist nach dem heutigen Stand der Forschung nur eingeschränkt möglich. Die wichtigsten Einflussfaktoren sollen hier kurz umrissen und in ihrer Einzelwirkung dargestellt werden.

4.3.1 Meteorologische Parameter

Der Einfluss meteorologischer Parameter auf den Radon-Transport im Boden wurde bisher detailliert, aber nicht abschließend u.a. in WORM (1986), KEMSKI (1993), REHS (1999), WIEGAND (1999) und ALTEVOGT et al. (2003) untersucht. Für eine exakte Analyse von Korrelationen und Zusammenhängen sind Laboruntersuchungen unter definierten Bedingungen und eine sehr dichte bis kontinuierliche Messwertaufnahme erforderlich. In der hier vorliegenden Arbeit geht es ausschließlich um Probenahme im Gelände. Für eine Interpretation der zeitlichen Variabilität der Messwerte ist eine Gegenüberstellung mit den realen meteorologischen Parametern Grundvoraussetzung.

Eine grundlegende meteorologische Einflussgröße auf die Radonkonzentration im Bodengas und im Wasser ist der **Niederschlag**. Niederschlag führt zu einer Auswaschung des Radons aus den Porenräumen. Hohe Niederschlagsintensitäten bewirken eine Verdünnung der Radonkonzentration im Bodengas. Weiterhin ist ein größerer Teil der Porenräume mit Wasser gefüllt. Dadurch gelangt mehr Radon beim Zerfallsprozess von Radium direkt in das Wasser. Das Radon, das schon im Bodengas ist, wird durch Auffüllung der unteren Porenräume mit steigendem Grundwasser und Durchnässung und Verstopfung der oberen

Poren durch den fallenden Niederschlag aufkonzentriert. Eine steigende Exhalation kann dem entgegenwirken (WORM 1986).

Eine Folge hoher Niederschläge ist auch ein verändertes Fließverhalten im Oberflächenabfluss. Neben einer Verdünnung bewirkt eine Zunahme der Turbulenz im Abfluss eine stärkere Entgasung und eine Abnahme der Radonkonzentration im Oberflächenwasser. Im Grundwasser führen Niederschläge zu einer Anhebung des Grundwasserspiegels durch Zufuhr von versickerndem Radon-armem Niederschlag und verstärktem Zutritt von Oberflächenwasser. Dadurch kommt es zu einer Verdünnung des Grundwassers in Bezug auf seine Radonkonzentration.

Der mit dem Niederschlag im Zusammenhang stehende Bodenwassergehalt zeigt eine positive Korrelation mit dem Radon-Emanationskoeffizienten. Die Emanationsrate zwischen einem trockenen und einem wassergesättigten Boden kann sich bis zu einem Faktor 30 unterscheiden (WIEGAND 1999).

Die **Temperatur** spielt besonders bei der Messung von Radonkonzentrationen in Wasserproben eine große Rolle. Die Löslichkeit von Radon im System Wasser – Luft, ausgedrückt als Löslichkeitskoeffizient a , ist temperaturabhängig (Abb. 4.3). Der Löslichkeitskoeffizient berechnet sich allgemein in einem Zweiphasensystem aus Gas und Flüssigkeit mit den Volumina V und Konzentrationen c nach:

$$a = \frac{c_{\text{Gas}} * V_{\text{Flüssigkeit}}}{c_{\text{Flüssigkeit}} * V_{\text{Gas}}}$$

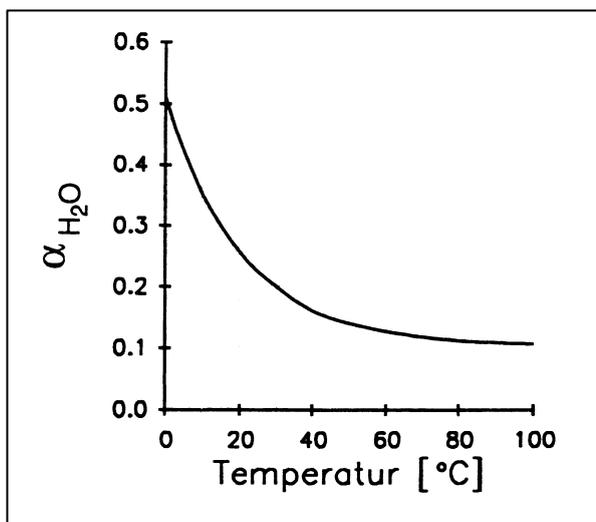


Abb. 4.3: Temperaturabhängige Löslichkeit von Radon im System Wasser – Luft (KEMSKI 1993)

Bei der Messung der Radonkonzentration in Bodengasen spielt die Temperatur in Bezug auf die Konvektion eine Rolle. Der Temperaturgradient in der Erdkruste beeinflusst die Konvektion, analog beeinflusst das Temperaturverhältnis zwischen Boden und Atmosphäre die Exhalation. Ein positiver Temperaturgradient (wärmerer Boden) begünstigt die Radon-Konvektion in die Atmosphäre. Eine Erwärmung des Bodens führt zu ansteigenden Exhalationsraten, was auf eine aufwärtsgerichtete Bodenluftbewegung und das Nachströmen von radonreicher Bodenluft zurückgeführt wird (WIEGAND 1999).

Der **Luftdruck** wirkt sich in seinen Veränderungen auf die Radonkonzentration in der Bodenluft aus. Druckschwankungen beeinflussen den Gas-Transport in porösen Medien (ALTEVOGT et al. 2003). Bei steigendem Luftdruck wird bodennahe radonarme Atmosphärenluft in den Boden gedrückt und dadurch eine Radonexhalation vermindert. Fallender Luftdruck führt zum Entweichen radonreicher Luft aus dem Boden, das heißt einer höheren Exhalationsrate. Neben dem Luftdruck muss auch die Windstärke mit berücksichtigt werden. Anhaltender Wind führt über eine Reduzierung des Luftdrucks am Boden zu einer Sogwirkung. Dadurch steigt die Exhalationsrate.

Alle beschriebenen meteorologischen Einflussfaktoren auf die Radonkonzentrationen wurden hier nur in grundlegenden Zügen dargestellt, so weit es im Rahmen dieser Arbeit notwendig und relevant ist. Alle Einflussgrößen wurden und werden in einer hier nicht genannten Vielzahl von Arbeiten untersucht und zum Teil sehr kontrovers diskutiert.

Bei den Arbeiten im Gelände wurde eine Minimierung des meteorologischen Einflusses durch Probenahme der Bodengasproben in 0,8 m Tiefe unter GOK angestrebt. Hier sind Änderungen des Luftdrucks und der Temperatur nur in abgeschwächter Form wirksam. Die Wasserprobennahme wurde im wesentlichen in der Frostperiode unterbrochen. Der Niederschlag ist in der Auswertung die meteorologische Haupteinflussgröße.

4.3.2 Geogene Bedingungen

Die geogenen Gegebenheiten eines Untersuchungsgebietes sind lokal, aber nicht zeitlich variabel. Sie können starke Auswirkungen auf die Messergebnisse haben, ihr Einfluss stellt aber in Zeitreihen eine konstante Größe dar. Ausschlaggebend für die Beeinflussung der Gasmigration sind außer der Art und chemischen Zusammensetzung der anstehenden Gesteine oder Sedimente besonders die Bodenbeschaffenheit der obersten zwei Meter unter Geländeoberkante und die tektonischen Besonderheiten (KEMSKI et al. 1996).

Abb. 4.4 zeigt deutlich, dass die Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft von den unterlagernden **Gesteinsarten** beeinflusst wird. Bei Graniten sind die Medianwerte der Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft generell hoch, aber auch Sedimentgesteine können ein hohes geogenes Radon-Potential aufweisen. Es lassen sich sowohl regionale als auch gesteinspezifische Trends innerhalb einzelner Gebiete erkennen, so dass jede Region ihre eigene "Radon-Signatur" aufweist und somit eine Extrapolation der

Ergebnisse auf Arealen mit Gesteinen, die gleich alt und unter ähnlichen Bildungsbedingungen entstanden sind, nicht ohne weiteres möglich ist (CHOUBEY & RAMOLA 1997, CHOUBEY et al. 2001).

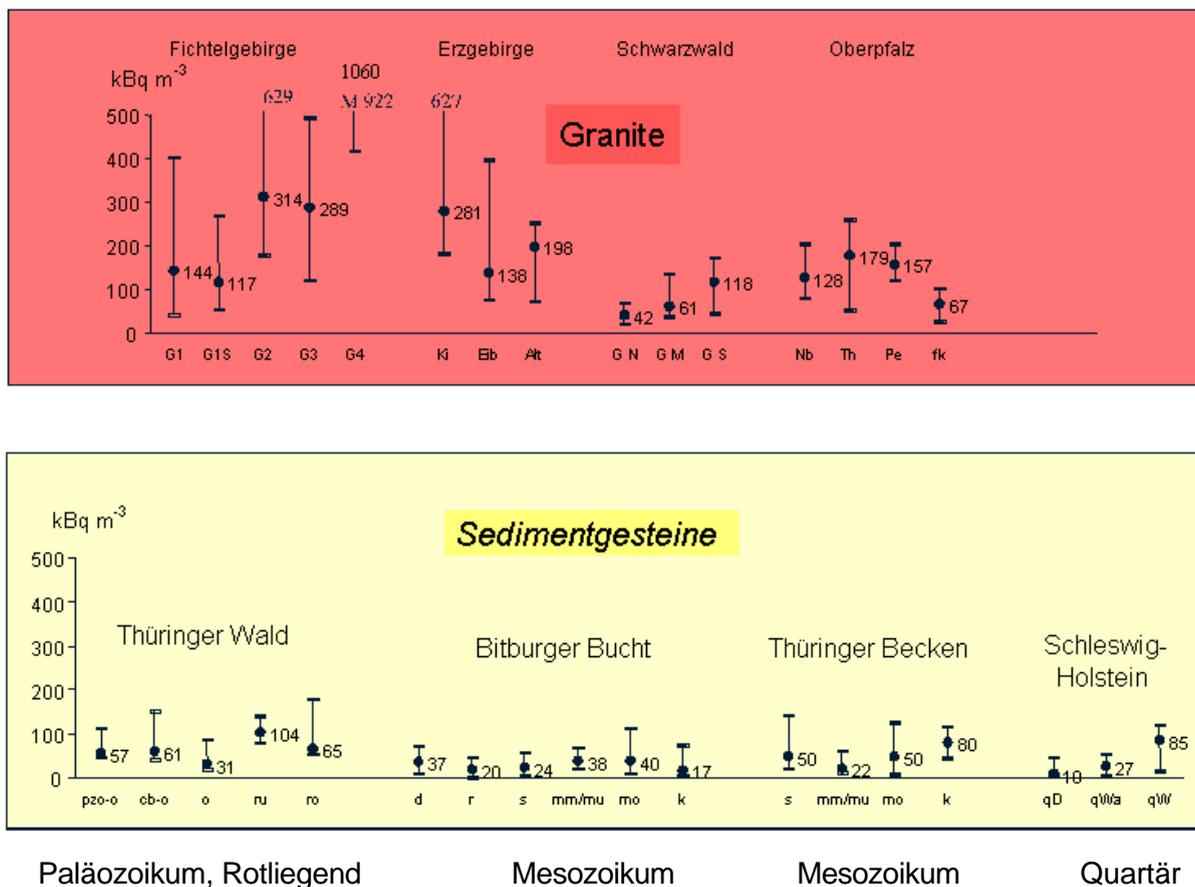


Abb 4.4: Radon-Aktivitätskonzentrationen in der Bodenluft (Median, 10 und 90 Perzentile) über verschiedenen Gesteinen (nach SIEHL et al. 1999). 1 Bq/l = 1 kBq/m³.

Die Detailansicht der Radonemanation in Abb. 4.2 zeigt, wie wichtig das Verhältnis von Gesteinsvolumen zu Porenvolumen und die Verteilung der Porenräume im Gesteinsverband für die Freisetzung von Radon sind. Generell wird davon ausgegangen, dass bei sandigen oder lehmigen Böden ca. 30% der Rn-Atome in die Poren gelangen, im Festgestein dagegen nur ca. 10% (WIEGAND 1995, WIEGAND & BÜCHEL 1997, WIEGAND 1999).

Wichtig für die Gasmigration und -exhalation ist außer der Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft die Gasdurchlässigkeit (**Permeabilität**) des Bodens. Hier wirken sich außer geogenen Faktoren wie Korngrößenverteilung, Porosität und dem daraus resultierenden Durchlässigkeitsbeiwert wieder meteorologische Einflüsse aus, die eine Variabilität der Durchfeuchtung des Bodens bedingen. Weiterhin spielt für die Gasmigration die chemische

Zusammensetzung des Bodens in Bezug auf das Vorhandensein chemischer Barrieren und dadurch induzierte Ausfällungsreaktionen für bestimmte Gasanteile eine Rolle.

Tektonische Störungen stellen oft gute Wegsamkeiten für Flüssigkeiten und Gase dar. Sie ermöglichen meist eine verbesserte Konvektion und damit ein schnelleres Aufsteigen von Bodengasen. Die für Radon durch seine kurze Halbwertszeit eingeschränkte Reichweite wird an tektonischen Störungen vergrößert. Diese Tatsache wird ausgenutzt, indem man Radon in der oberflächennahen Bodenluft als Tracer zur Lokalisierung von Störungen verwendet. Umfangreiche Untersuchungen hierzu enthält u.a. die Arbeit von KEMSKI (1993).

4.3.3 Anthropogene Beeinflussung

Charakteristisch für das in dieser Arbeit zu untersuchende Areal ist außer den natürlichen Gegebenheiten die anthropogene Überprägung der Talau und der Talflanken durch den Bergbau. Der Abbau im Tagebaubetrieb, die Anlage und ständige Erweiterung von untertägigen Auffahrungen, die damit verbundene Einrichtung und der Betrieb eines Grundwasserabsenkungstrichters, die Laugung und weitere Verarbeitung der geförderten Gesteine, die Lagerung des Bergematerials auf Halden und der Aufbereitungsrückstände in Tailings und weitere in Verbindung mit der Bergbautätigkeit notwendige topographische Veränderungen wie die Umlegung von Gewässern und die Veränderung ihrer Wassereinzugsgebiete stellen insgesamt einen grundlegenden Eingriff in das lokale geologische System dar. Die anthropogenen Veränderungen schaffen durch die Anlage neuer Gaswegsamkeiten und durch die vielfache Vergrößerung der reaktiven Oberfläche der Gesteine völlig neue Voraussetzungen für die Gasmigration.

Den erfolgten bergbaulichen Veränderungen wirkt heute die Sanierungstätigkeit der Wismut GmbH entgegen. Der Abtrag der Halden, die Verfüllung der untertägigen Auffahrungen und des Tagebaus und die Flutung des Grubengebäudes bedeuten einen erneuten Eingriff in das existierende geologische System und seinen Gashaushalt.

Eine Darstellung der im Gessental wirkenden anthropogenen Faktoren enthält Kapitel 3.2 dieser Arbeit.

4.3.4 Biogene Einflüsse

Biogene Einflüsse auf den Gashaushalt und speziell die Radonkonzentration werden in der vorliegenden Arbeit nicht mit berücksichtigt, sollen hier aber der Vollständigkeit halber genannt sein:

- Die Durchwurzelung des Bodens und das spätere Absterben der Pflanzen und des Wurzelgeflechts führt zur Auflockerung des Bodens und der Schaffung neuer Migrationswege für Bodengase, Niederschlagswasser und influentes Oberflächenwasser.
- Die Pflanzen nehmen über die Wurzeln Wasser und im Wasser gelöste Nährstoffe und Spurenelemente auf. Auf diesem Wege gelangt auch gelöstes Radium und Radon in die

Pflanze. Radon zerfällt aufgrund seiner kurzen Halbwertszeit, Radium wird gespeichert. Nach dem Absterben der Pflanze wird das Radium und die aus dem Radon entstandenen festen Zerfallsprodukte (Pb-210) durch Verrottung und Bodenbildung wieder rückgeführt.

- Pflanzen wirken als Sammelstelle von sekundärer Radioaktivität – das heißt, die Tochternuklide des in der Atmosphäre zerfallenden Radons sinken nicht zu Boden, sondern lagern sich während der Vegetationsperiode auf den Blattflächen ab. Von hier gelangen sie erst durch meteorologische Einflüsse wie Regen und Wind oder am Ende der Vegetationsperiode durch das Abwerfen der Blätter auf den Boden zurück.
- Evaporation und Transpiration als Einflussgrößen der Grundwasserneubildungsrate und damit der Radonkonzentration des Grundwassers sind abhängig vom Pflanzenbewuchs der Untersuchungsfläche.

5 Messmethoden

5.1 Radon-Messungen

Radonmessungen werden heute mit Hilfe von verschiedenen aktiven und passiven Methoden durchgeführt (AURAND & RÜHLE 1997, DEUS et al. 2000, PAPASTEFANOU 2002). Bei den hier durchgeführten Messungen erfolgte die Radon-Konzentrationsbestimmung mittels Probenahme des zu untersuchenden Gases in mit Zinksulfid beschichteten Messzellen. Die Alpha-Teilchen, die durch den Zerfall von Radon oder der Tochternuklide entstehen, haben genug Energie, um z.B. in einem Halbleiterdetektor Ladungsimpulse oder in einer Szintillationsschicht Lichtimpulse zu erzeugen. Aus der Anzahl der gemessenen Impulse und der Messzeit lässt sich dann auf die Radonkonzentration im Boden schließen.

Die **Pylon Model 300A Lucas Zellen** sind luftdichte Metallzylinder mit durchsichtigem Fenster. Sie fassen ein Gasvolumen von 270 ml und haben zwei Anschlüsse zum Füllen, Reinigen und Evakuieren des Messraumes. In den Scintillationszellen wird der Zerfall von Radon (Rn-222), Thoron (Rn-220) und Actinon (Rn-219) gemessen. Die beim Zerfall entstehenden Alpha-Teilchen regen das silberaktivierte Zinksulfid ZnS(Ag) an. Hierbei werden Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Bei Rückkehr in den Normalzustand werden Photonen (Lichtimpulse) emittiert.



Abb. 5.1: Pylon AB-5 Transportabler Strahlungsmonitor mit Lucas-Zellen

Der transportable **Pylon AB-5 Strahlungsmonitor** (siehe Abb. 5.1) registriert die Lichtimpulse. Eine Lichtvervielfacher-Röhre (Photo-Multiplier) verstärkt sie und ein Zähler

quantifiziert die Impulse. Die Anzeige erfolgt über ein 8-stelliges LCD-Display. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl der Lichtimpulse und der Konzentration des Radongases in der Zelle.

Die Messung der Gasproben in den PYLON-Zellen erfolgt in drei 5-Minuten-Zyklen. Daraus wird ein durchschnittlicher 1-Minuten-Messwert ermittelt. Nach dem Ende der Messung müssen die Zellen gründlich mit Atmosphärenluft gespült (mindestens 10 Spülzyklen) und im evakuierten Zustand mehrere Stunden gelagert werden, damit vorhandene Restanregungen abklingen können.

Wichtig vor jeder Messung ist die Bestimmung des Blindwertes (**background**) der verwendeten Messzellen. Dafür wird jede Zelle vor der Probenahme im evakuierten Zustand 5 Minuten gemessen. Wichtig für die Auswertung ist die Probenahmezeit. Sie muss immer notiert werden.

5.1.1 Radon-Messungen in Bodengas

Die Probenahme von Bodenluft zur Messung des Radongehaltes erfolgt aus einer Tiefe von 0,8m. Das ermöglicht die weitgehende Minimierung der Wirkung meteorologischer Faktoren und der Zumischung von Radon-armer Atmosphärenluft bei gleichzeitig vertretbarem technischem Aufwand für die Probenahme.

Die Messzelle mit dem Volumen von 270 ml wird, wie in Abb. 5.2 dargestellt, mit Hilfe der Vakuumpumpe evakuiert. Durch Öffnung des Ventils saugt die Zelle Bodenluft durch den Schlitz in der Bodengas-Schlagsonde an.

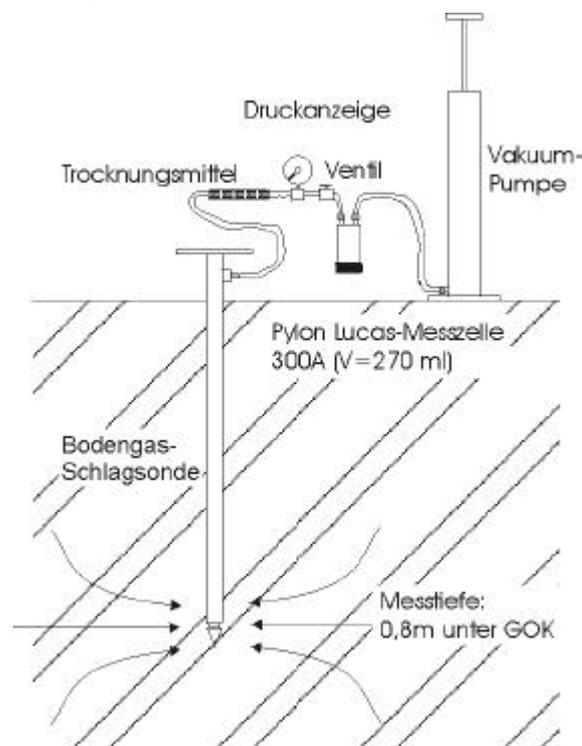


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Probenahme für Bodengasmessungen

Die Zelle wird 5 mal mit Bodenluft gespült, um eine repräsentative Probe zu erhalten.
 Vor der Messung muss die Gasprobe in der Zelle mindestens 3,5 h gelagert werden, damit sich Rn-222 und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte im radioaktiven Gleichgewicht befinden.
 Die Berechnung der Radonkonzentration im Bodengas erfolgt nach PYLON (1989):

$$\text{Rn-222-Konz. [Bq/l]} = \frac{\text{NCPM} \cdot \text{C}}{3 \cdot 2,22 \cdot \text{E} \cdot \text{V} \cdot \text{A}} \cdot 0,037$$

- NCPM Nettoimpulse pro Minute = gemessene Impulse - background
- C Korrekturfaktor für Messintervall (Tab. in PYLON 1989)
= 1,00094 für 3*5 Minuten Messdauer
- 3 Zahl der Emittenten
- 2,22 Umrechnungsfaktor DPM - pCi
- E Effizienzwert der Zelle = 0,742
- V Gas-Volumen in der Zelle = 0,257 l
- A Korrekturfaktor für die Zeit von der Probenahme bis zur Messung (Tab. PYLON 1989)
- 0,037 Umrechnungsfaktor von pCi/l in die SI-Einheit Bq/l

In gleicher Weise wie bei der beschriebenen und in Abb. 5.2 gezeigten Probenahme zur Bestimmung der Radonkonzentration im Bodengas wurden Bodengasproben zur Bestimmung der CO₂- und O₂-Konzentration genommen. Dafür wurde am oberen Ende der Schlagsonde der Schlauch des Deponiegas-Messgerätes angeschlossen. Das ermöglicht einen direkten Vergleich der gemessenen CO₂-, O₂- und Radonwerte.

5.1.2 Radon-Messungen im Wasser

Die Bestimmung der Konzentration des im Wasser gelösten Radons erfolgt auf indirektem Wege. Im Gelände wird eine Wasserprobe genommen und die Probenahmezeit notiert. Diese Probe wird in die Messzelle (siehe Bodengasmessungen) hinein entgast, vorschriftsmäßig gelagert und gemessen (Abb. 5.3). In dieser Arbeit wurden zwei Methoden der Wasserprobenahme und Entgasung angewendet und sollen hier kurz vorgestellt werden.

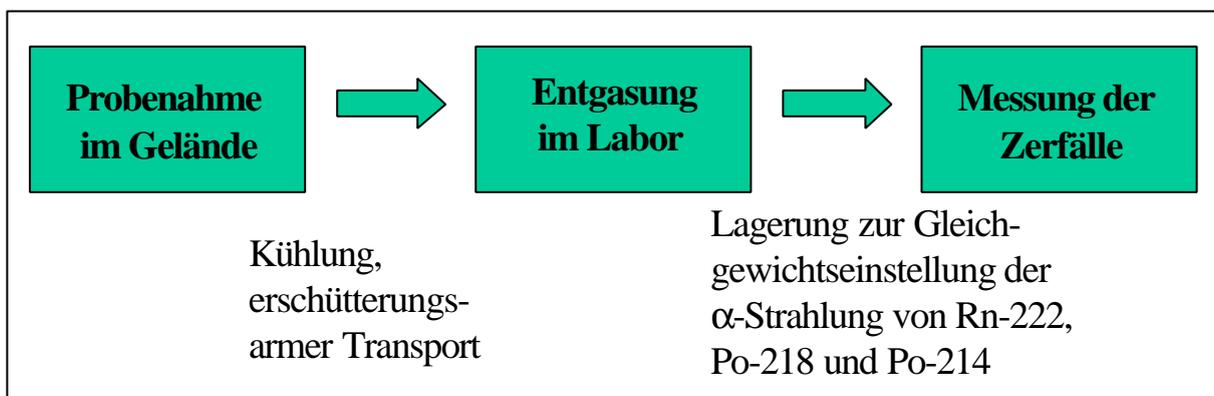


Abb. 5.3: Bestimmung des Radongehaltes in Wasserproben, Hauptschritte der Analytik

5.1.2.1 Probenahme mit Gaswaschflaschen

Im Frühjahr 2001 wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. habil. Jens Wiegand von der Universität Duisburg-Essen erste Bestimmungen der Radonkonzentration der Wässer im Gessental durchgeführt. Dafür kamen Gaswaschflaschen der Universität Duisburg-Essen zur Anwendung (Abb. 5.4). Die Gaswaschflaschen bestehen aus einem Messzylinder mit Schriff und Graduierung und einem Aufsatz mit Schliff, Glasfritte und zwei gasdicht verschließbaren Hähnen. Die Flaschen werden evakuiert. Bei der Probenahme im Gelände wird eine Öffnung der Gaswaschflasche in die zu beprobende Flüssigkeit getaucht. Durch Öffnen des Ventils wird die Probe ohne Kontakt mit der atmosphärischen Luft in die Flasche gesaugt. Nach erfolgtem Druckausgleich muss die Flasche wieder gasdicht verschlossen werden. So kann Radon zwar unter Umständen schon aus dem Wasser entgasen, aber nicht die Gaswaschflasche verlassen.



Abb. 5.4: Gaswaschflaschen der Universität Essen

Die Wasserprobe wird in der Gaswaschflasche durch Einleitung quasi radonfreier Atmosphärenluft über die Fritte entgast. Das erhaltene Messgas strömt in die Lucas-Zelle und muss dort analog zu den Bodengasmessungen gelagert werden.

Eine detaillierte Darstellung der Probenahme von Wasserproben zur Bestimmung der Radonkonzentration mit Gaswaschflaschen ist in WIEGAND et al. (2000) enthalten.

5.1.2.2 PYLON-Wasserentgasungsmethode

Bei der Bestimmung der Radonkonzentration in Flüssigkeiten nach der PYLON-Methode wird eine 500 ml-Wasserprobe genommen und im Labor mit Hilfe des Vakuum-Entgasungssystems WG 1001 in eine Model 300A Lucas Zelle entgast. Die Wasserprobe muss möglichst entgasungsfrei (ohne Strudel und andere Turbulenzen) in die Glasflasche gefüllt werden. Die Flasche ist maximal zu füllen und muss gut verschlossen und erschütterungsarm transportiert werden.

Für die Entgasung wird ein Standzylinder mit 180 ml Probe zu ca. 2/3 gefüllt und luftdicht verschlossen. Auf dem Boden des Standzylinders befindet sich ein Blubbler, durch den quasi radonfreie Atmosphärenluft in Form von ganz kleinen Bläschen in die Wasserprobe gelangen und darin aufsteigen kann. Die Lucas-Zelle wird evakuiert und in das Entgasungssystem eingeschaltet. Sie erzeugt einen Unterdruck und saugt über Verbindungsschläuche und den Blubbler quasi radonfreie Außenluft an. Die feinen Luftbläschen „waschen“ 90 % aller im Wasser enthaltenen Gase aus und gelangen entsprechend angereichert über ein Trocknungsröhrchen in die Messzelle. Der Durchströmungsprozess dauert ca. 4 bis 5 Minuten und kann über ein Dosierungsventil für die einströmende Atmosphärenluft gesteuert werden. Die Entgasungsvorrichtung ist in Abb. 5.5 zu sehen.

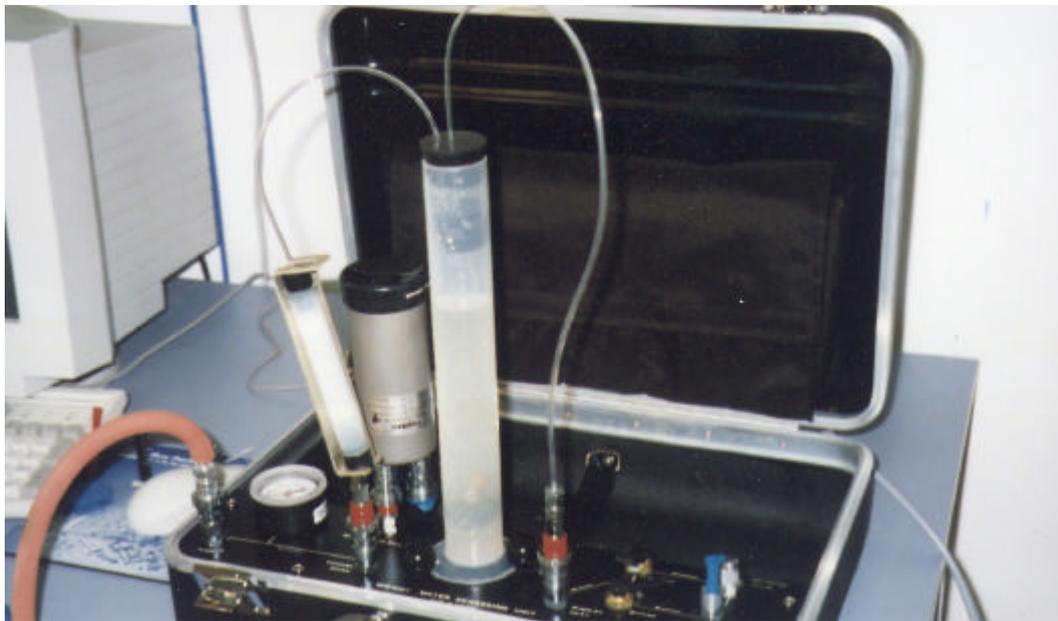


Abb. 5.5: Wasserentgasungssystem WG 1001 der Firma PYLON mit Lucas-Zelle, Wasserprobe im Standzylinder, Trocknungsröhrchen, Manometer und Schlauch der Vakuumpumpe

Die Zelle muss nun vor der Messung mindestens 3,5 h gelagert werden, damit sich Rn-222 und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte im radioaktiven Gleichgewicht befinden.

Die Berechnung der Radonkonzentration in Wasserproben erfolgt nach PYLON (1991):

$$\text{Rn-222-Konz. [Bq/l]} = \frac{\text{NCPM} * 1000}{\text{E} * 6,66 * \text{D} * \text{A} * \text{V}} * 0,037$$

- NCPM Nettoimpulse pro Minute = gemessenen Impulse - background
- E Effizienz des Impulszählers = 0,745 (d.h. jeder 4. Impuls wird nicht registriert)
- D Effizienz der Entgasung = 0,9 (das entspricht 90 %)
- A Korrekturfaktor des Radon-Zerfalls von der Probenahme bis zur Messung siehe Tabelle in (PYLON 1991)
- V Wasserproben-Volumen in ml = 180 ml

5.2 CO₂-O₂-Bodengas-Messungen

Die Messungen erfolgten mit dem Deponiegas-Messgerät airTOX von Fresenius Umwelttechnik GmbH. Es ist ein klassisches Einküvetten-IR-Spektrometer. Die über einen Strahler erzeugte breitbandige Infrarotstrahlung wird über ein zeitgesteuertes Blendenrad durch eine mit Messgas gefüllte Küvette geführt. Die Messkomponenten absorbieren dabei in substanzspezifischer Weise bestimmte Wellenlängenbereiche der Strahlung. Das Ausmaß dieser Absorption ist ein Maß für die Konzentration der jeweiligen Komponente. Die am Ende der Küvette verbleibende Intensität wird nach Durchgang durch einen schmalbandigen Filter mit einem Detektor gemessen. Bei gleichzeitiger Messung von mehreren Komponenten kommt eine entsprechend große Anzahl von Filter / Detektorkombinationen zum Einsatz (FRESENIUS UMWELTTECHNIK GMBH 1995). Außer CO₂ werden auch die Gehalte an CH₄, H₂S und O₂ bestimmt. In den in Tab. 5.1 angegebenen Bereichen kann gemessen werden:

Tab. 5.1: Messkomponenten und Messbereiche des airTOX Gas-Messsystems von Fresenius

Parameter	Messbereich
Methan CH ₄	0,1 – 70 %
Kohlendioxid CO ₂	0,05 – 50 %
Sauerstoff O ₂	0,1 – 21 %
Schwefelwasserstoff H ₂ S	1 – 200 ppm

Jede Einzelmessung umfasst die Schritte Füllen, Messen, Pumpen, Referenzieren (Dauer ca. 20 s). Alle 20 s erfolgt eine Messwertaktualisierung. Mehrere Messzyklen werden abgewartet, bis sich die Messwerte stabilisieren.

5.2.1 Probenahme in Rammkernsondierungen und mit der Schlagsonde

Im Sommer 2000 wurde von der Wismut GmbH ein Rammkernsondierungsprogramm im Gessental mit 145 Bohrpunkten durchgeführt. Ziel war die Einbindung geoelektrischer Messungen über die Aufnahme von Bohrprofilen bis zum Anstehenden. Die trockenen Rammkernsondierungen wurden mit einem Durchmesser von 80 mm bzw. 60 mm abgeteuft und bis auf wenige Ausnahmen direkt nach Abschluss der Probenahme und Messungen wieder verfüllt. Einige wasserführende Bohrungen wurden über mehrere Wochen für Messzwecke offengehalten. Die Rammkernsondierungspunkte 02/00, 10/00, 80/00 und 95/00 wurden von der Universität Jena verrohrt und als Grundwassermessstellen ausgebaut. Die Lage der Sondierungen ist in Abb. 6.5 dargestellt. Die Auswertung der gezogenen Kerne ist in GELETNEKY (2002) dokumentiert.

In diesen unterschiedlich tiefen Bohrungen wurden Bodengasmessungen analog Abb. 5.6 durchgeführt. Ziel der Messungen war eine Bodengaskartierung des Gessentals. Während des Messvorganges saugte das Messgerät Bodenluft durch den Schlauch in der Bohrung an.

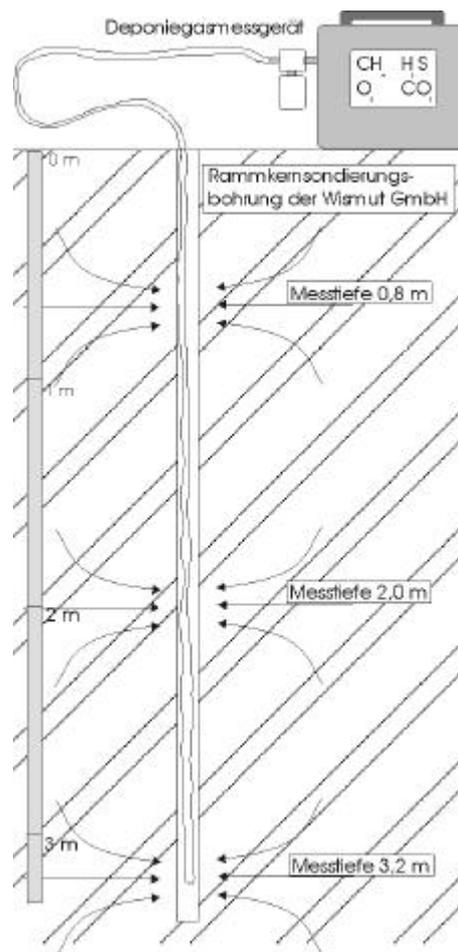


Abb. 5.6: Schematische Darstellung der Gas-Probenahme in Rammkernsondierungen

Mehrere Messzyklen wurden abgewartet, bis sich die Messwerte stabilisierten bzw. ein Maximum oder Minimum erreicht wurde. Durch die Gasmessungen in definierten Tiefen von 0,8m, 2,0m und 3,2m nacheinander von oben nach unten sollte eine größenordnungsmäßige Abschätzung der Abhängigkeit der Gasgehalte des Bodengases von der Tiefe möglich gemacht werden, die Bohrlöcher waren während der Messungen oben offen.

Die Wismut GmbH nutzte die Bohrungen gleichzeitig für die Messung der γ -Strahlung in Abhängigkeit von der Tiefe im 20 cm – Raster. Außerdem wurde über jeder Bohrung die Ortsdosisleistung in nGy/h bestimmt.

Im Gegensatz zur beschriebenen Probenahme in Rammkernsondierungen wurden auch Bodengas-Proben an den Messstellen der Radonmessungen im Boden der Auesedimente des Gessentals mit Hilfe der Schlagsonde in 0,8 m Tiefe genommen (siehe Abb. 3.6 und Abb. 5.2). Dafür wurde am oberen Ende der Schlagsonde der Schlauch des Deponiegas-Messgerätes angeschlossen. Die Messzyklen wurden analog der Gasmessung in Rammkernsondierungen eingehalten. Das ermöglicht einen direkten Vergleich der CO₂- und Radon-Messwerte.

5.3 Seitens der Wismut GmbH zur Verfügung gestellte Daten

Dankenswerter Weise wurden mir von der Wismut GmbH ausgewählte **Wetterdaten** der Messstation Kippbereich 3 im Tagebau Lichtenberg für den Zeitraum von Juli 2000 bis Juli 2002 zur Verfügung gestellt (UGT 2001). Diese Klimastation befindet sich in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes im westlichen Bereich des Tagebaus (Koordinaten RW 4511500, HW 5634445, siehe Abb. 3.2) und bietet dadurch eine gute und sichere Datengrundlage für die Auswertung der Gasmessungen im Gessental. Gemessen wurden die Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und der Niederschlag. Es handelt sich um Tagesmittelwerte, zum Teil ergänzt durch Tagesmaximal- und –minimalwerte und Tagessummen.

Für eine Gegenüberstellung der Gasmessungen mit dem Flutungsverlauf des untertägigen Grubengebäudes wurden von der Wismut GmbH gemessene **Höhen des Grundwasserstandes** in m NN von vier in der Nähe des Untersuchungsgebietes gelegenen Messstellen mit direktem Grubenanschluss für die Zeit seit Januar 1998 bereitgestellt (Wismut 2002). Die Lage und technische Ausstattung der Flutungswassermessstellen ist in Tab. 6.1 zusammengefasst.

Die durch Mitarbeiter der Wismut GmbH im Rahmen des Rammkernsondierungsprogramms in den Bohrungen alle 20 cm bestimmten Messwerte der **g-Strahlung** und über den Bohrungen gemessenen **Ortsdosisleistungen** stehen der Universität Jena auch zur Verfügung, wurden in diese Arbeit jedoch nur auszugsweise mit einbezogen (vgl. Abb. 7.28).

6 Probenahme, Gelände- und Laborarbeiten

Die Geländearbeiten erfolgten in der Zeit von Juni 2000 bis Juli 2002. Im Sommer 2000 wurde das Rammkernsondierungsprogramm der Wismut GmbH für erste Bodengasmessungen mit dem Deponiegasmessgerät genutzt. Im Herbst 2000 und Frühjahr 2001 folgten Bodengasmessungen mit der Schlagsonde zur Bestimmung von CO₂, O₂ und Radon. Mit Radonmessungen in Wasser wurde im November 2000 begonnen. Ab Sommer 2001 wurde die Probenahme auf Wasserproben von Grundwassermessstellen mit und ohne Anschluss an die regionalen Grundwasserleiter, Sickerwassermessstellen am West- und Nordfuß der Nordhalde und Oberflächenwassermessstellen im Gessenbach und Badergraben fokussiert.

In Abb. 6.1 und Abb. 6.2 ist die vorherrschende anthropogen modifizierte Situation in der Umgebung des Gessentals schematisch dargestellt. Wichtige im Zusammenhang mit dem Uranbergbau entstandene Schadstoffquellen und ihre möglichen Einflüsse auf die Umgebung zeigen die Notwendigkeit und Brisanz einer detaillierten Untersuchung und Bewertung ihres Einflusses auf die natürliche Umwelt.

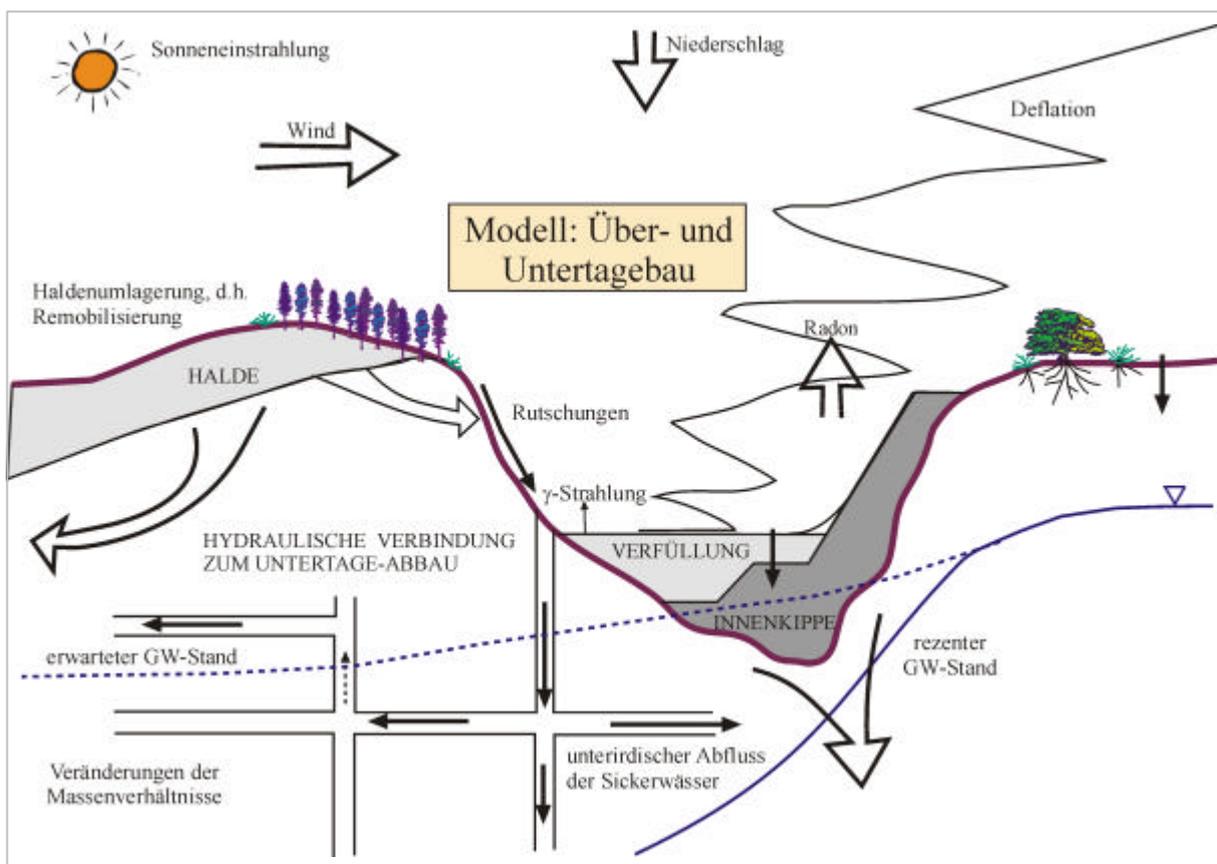


Abb. 6.1: Schematische Darstellung der Grubenbaue von Ronneburg. Der Tagebau Lichtenberg schließt sich ohne hydraulische Sperren an die Grubenbaue an. Die dargestellte Halde entspricht der Nordhalde, die 2003 in den Tagebau verbracht worden ist.

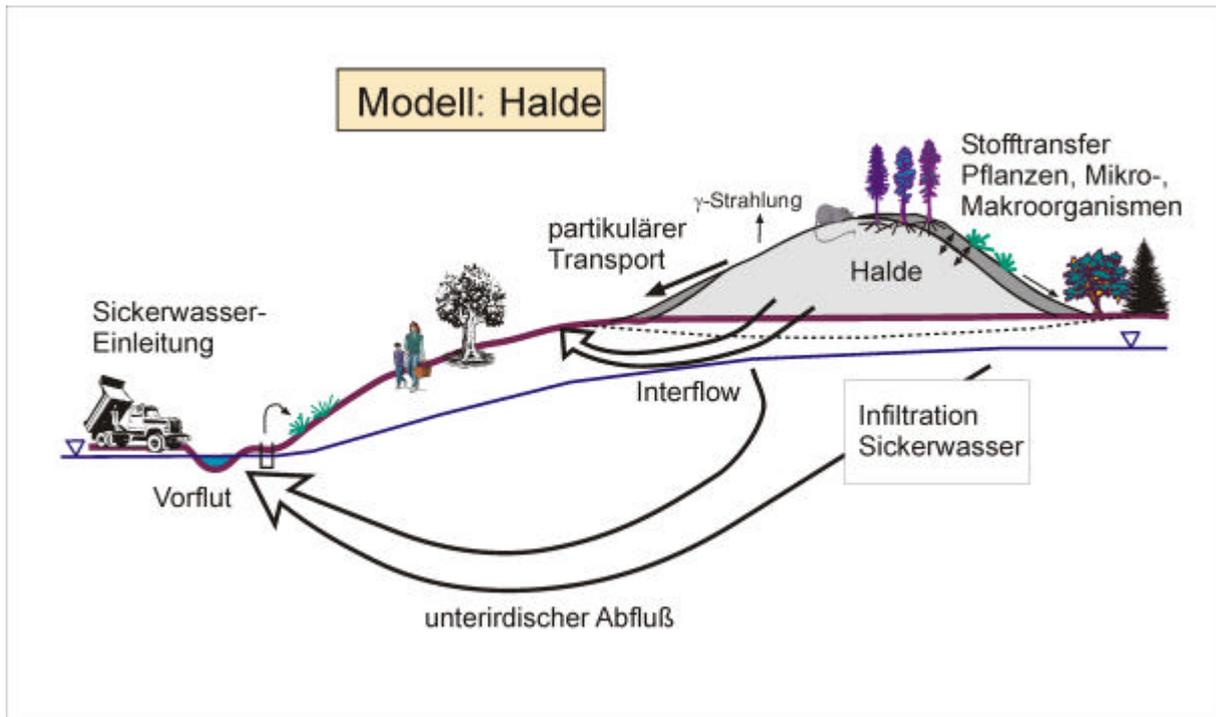


Abb. 6.2: Schematische Darstellung eines Haldenkörpers mit seinen wichtigsten Stoffflüssen. Am Fuß der Halde befinden sich Sickerwasseraustrittsstellen, die in die Vorflut entwässern.

Die Schadstoffquellen Halde, Tagebau und Grubengebäude erfordern ein breit gefächertes Probenspektrum für die Quantifizierung von Transportprozessen und deren zeitlicher Variabilität.

6.1 Probenahmeplan

Einen schematischen Überblick über das Probenspektrum gibt Abb. 6.3. Die Bodengasproben für die Bestimmung von Radon, CO_2 , und O_2 wurden bei den Talprofilen an den gleichen Messstellen direkt nacheinander genommen.

An vielen geplanten Probenahmestellen in den Auesedimenten des Gessentals konnten keine Bodengasproben mit der Schlagsonde genommen werden, da der Untergrund durch hohe Bodenwassergehalte und vermutlich anthropogene Aufschüttungen nicht gasdurchlässig genug war. Für die Bestimmung der CO_2 - und O_2 -Konzentration muss in der Messphase das zu messende Gas einen Druck von minimal 0,7 Bar haben. Sonst kommt es zur Verfälschung der Messwerte und das Messgerät reagiert mit Fehleranzeige. Auch für die Probenahme mit der Lucaszelle zur Radonbestimmung ist eine gewisse Mindestpermeabilität des Bodens Voraussetzung. Zu lange Probenahmezeiten führen verstärkt zur Kontamination durch Atmosphärgas über Porositäten zwischen Schlagsonde und Boden.

Einige vorgesehene Probenahmestellen in der Talaue und am Talrand konnten nicht verwendet werden, da bei der Probenahme aus 0,8 m Grundwasser angesaugt wurde.

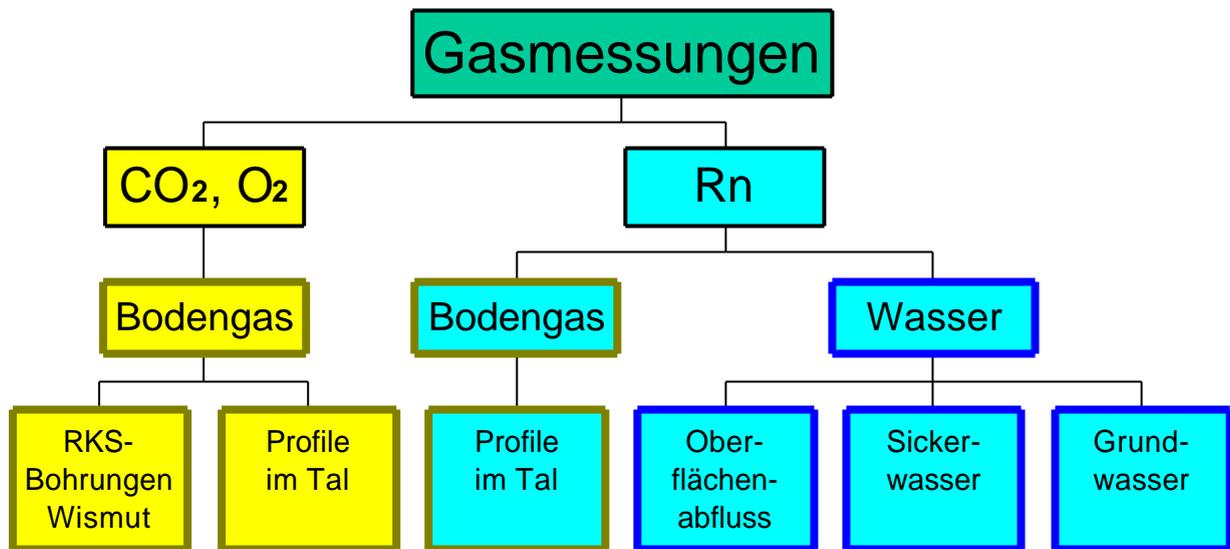


Abb. 6.3: Organigramm der im Gessental genommenen Proben für Gasmessungen

6.2 Radonmessungen

Radon als erstes gasförmiges Element in der Uran-238-Zerfallsreihe kann sich wie schon beschrieben unter bestimmten Voraussetzungen vom Ort seiner Entstehung fortbewegen. Es kommt dabei entweder zur Mischung mit anderen Gasen oder zur Lösung bzw. zum Transport in Wasser. Die Radonmessungen wurden deshalb an Bodengasproben und Wasserproben durchgeführt. Abb. 6.6 zeigt die Lage der Probenahmestellen im Gessental.

6.2.1 Bodengas-Messungen

Ziel der Radonmessungen im Bodengas war eine radiologische Kartierung des Tales in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Talsedimente, vom Verlauf geologischer Störungen, vom Bachverlauf und von der Beeinflussung durch das untertägige Grubengebäude und dessen laufende Flutung. Deshalb wurden mehrere Profile entlang des Baches und senkrecht zum Bachverlauf gelegt. Die Messstellen befinden sich über dem Grundwasser-Absenkungstrichter. Weiterhin sollte das Untersuchungsgebiet in Bezug zu natürlichen Radonwerten in unterschiedlichen Kompartimenten vergleichend eingeordnet werden. Zusammen mit der Bestimmung der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen im Bodengas sollten Einflüsse der Bergbautätigkeit und der laufenden Sanierung auf die Zusammensetzung des Bodengases aufgezeigt werden. Die Zusammensetzung der Talsedimente ist im Rahmen des Rammkernsondierungsprogramms und der geologischen Kernaufnahme von GELETNEKY (2002) und SENITZ et al. (2002) beschrieben worden.

Die Bodengasmessungen wurden durch eine stellenweise sehr hohe Bindigkeit der Böden stark eingeschränkt. Eine Messwertaufnahme war nur an wenigen Punkten mit guter Permeabilität möglich. Durch anthropogene Aufschüttungen in der Talaue wurde eine sehr inhomogene Situation geschaffen, deren Rauschen es unmöglich macht, vermutete Signale der ansteigenden Flutungsfront und Störungen zu erkennen. Aufgrund der verbreitet schlechten Permeabilität der Auesedimente und der extremen bergbaulich bedingten Überprägung der natürlichen Talaue war es nicht möglich, ein dichtes Netz von Messwerten zu schaffen. Die Möglichkeit der Störungsindikation mittels Radonmessungen ist in der Literatur schon ausreichend beschrieben (KEMSKI 1993, GUERRA & ETIOPE 1999, ATALLAH et al. 2001). Auf der Grundlage all dieser Details wurden die Bodengasmessungen im Frühjahr 2001 beendet. Die Lage der für die Auswertung nutzbaren Bodengasmessstellen und –profile mit der Schlagsonde ist in Abb. 6.5 und Abb. 6.6 dargestellt.

6.2.2 Messung von Radon in Wasser

Nach dem Abschluss der Radonmessungen im Bodengas wurde die Bestimmung der Radonkonzentration im Wasser zum Hauptziel der Geländearbeiten, weil die Radonkonzentration in Wasser als räumlich integrierender Parameter gut für die Untersuchung und Beschreibung von Transportprozessen und von Quellen und Senken der Radionuklide im Uranbergbauggebiet geeignet ist. Es wurden über den Zeitraum von 1,5 Jahren Radonmessungen im Grundwasser, Haldensickerwasser und Oberflächenabfluss des Gessenbaches und des Badergrabens durchgeführt. Die unterschiedliche Hydrochemie und die Radonmessungen wurden an den Probenahmestellen in Zeitreihen analysiert. Eine hydrochemische Charakterisierung der Wässer wurde von GELETNEKY (2002) vorgelegt.

6.2.2.1 Radongehalte in Grundwasser

Bei den Grundwassermessstellen musste zwischen schwebenden Grundwasserleitern über dem Absenkungstrichter (Messstellen 80/00 und 95/00) und Grundwasser in den Talsedimenten (Messstellen 02/00 und 10/00) unterschieden werden.

Die Messstellen 02/00 und 10/00 befinden sich im westlichen Bereich des Arbeitsgebietes. Der mittlere Grundwasserpegelstand lag ca. 1 m unter GOK und schwankte jahreszeitlich bedingt langperiodisch von 0,7 bis 1,4 m unter GOK. Die Wassertemperatur schwankte zwischen 6,0 und 12,1 °C. Die Messstellen wurden dem Grundwasser vom Typ 2 zugeordnet (siehe Kapitel 3.3) und chemisch als niedrigmineralisierter Ca-Mg-HCO₃-Typ charakterisiert. Das Wasser der Messstelle 10/00 hatte einen mittleren pH-Wert von 7 und eine mittlere Leitfähigkeit von 550 µS/cm. Die Radongehalte sind durch den lokalen geogenen Hintergrund bedingt.

Im Gegensatz dazu zeigte die Messstelle 80/00 über dem Grundwasser-Absenkungstrichter des Grubengebäudes keinen jahreszeitlich bedingten Gang des Pegelstandes, sondern eine

wesentlich stärkere kurzperiodige Reaktion auf Niederschlag und Sickerwasserzutritte. Der Grundwasserpegel lag durchschnittlich bei 4,3 m unter GOK. Die Wassertemperatur schwankte zwischen 6,0 und 12,1 °C. Die Messstellen wurden dem Grundwasser vom Typ 1 zugeordnet und sind vom großräumigen und lokalen hydrogeologischen Regime entkoppelt (siehe Kapitel 3.3). Das Wasser der Messstelle 80/00 wies einen langsam aus dem sauren Milieu ansteigenden pH-Wert von 4,0 im Februar 2001 und von 5,5 im Sommer 2002 und eine im gleichen Zeitraum langsam abnehmende Leitfähigkeit von 1900 bis 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf. Es besteht die Möglichkeit des Sickerwasserzutritts aus der Nordhalde und von der Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde. Die Messstelle 95/00 konnte nur selten beprobt werden.

Die Rechts- und Hochwerte der Grundwasserstellen sind in Tab. 6.1 enthalten.

Tab. 6.1: Rechts- und Hochwerte der für die Bestimmung der Radonkonzentration genutzten Grundwassermessstellen im Gessental

Grundwassermessstelle	Rechtswert	Hochwert
02/00	4510032,50	5635767,70
10/00	4510103,20	5635800,20
80/00	4510813,20	5635794,40
95/00	4510897,80	5635814,50

6.2.2.2 Radongehalte in Sickerwasser

Die Sickerwassermessstellen befinden sich am nördlichen und westlichen Fuß der Nordhalde. Durch den laufenden Abtrag der Nordhalde und die Verfüllung in den Tagebau Lichtenberg während des Untersuchungszeitraumes konnten Sickerwassermessstellen nur eine begrenzte Zeit genutzt werden.

Die Messungen wurden ständig außer von meteorologischen Faktoren vom Haldenabtrag beeinflusst. Ständig abnehmende Mächtigkeiten des Haldenmaterials im Wassereinzugsgebiet der Messstellen und wechselnde Befahrung der Haldenaufstandsfläche mit schwerer Technik führten zu variierenden Dichte- und Druckverhältnissen und damit zu Schwankungen der Rn-Migration.

Die Messstelle Q4 lag am westlichen Haldenfuß in einem bewaldeten Bereich in einer Höhe von ca. 270 m NN. Sie war eine natürliche Sickerwasseraustrittsstelle mit sehr geringen Schüttungen aus dem Hangbereich über eine Länge von ca. 100 m. Der gesamte Sickerwasserbereich fällt durch Eisenoxidkrusten und andere Ausfällungen auf. Ein Teil des

Sickerwassers sammelte sich in einer ca. 1,5m x 3m großen Vertiefung, die als Probenahmestelle genutzt wurde. Der Gessenbach floss von Kauern kommend in einem Abstand von 3 bis 10 m am Sickerwasserbereich entlang. Eine Dokumentation der Sickerwassermessstelle Q4 ist Bestandteil der Arbeit von ZEGGEL (2001). Die Sickerwassermessstelle Q4 zeigte bis zu ihrer Zerstörung im Sommer 2001 relativ konstante Rn-Konzentrationen von 30 ± 10 Bq/l. Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten sind heute an der Stelle von Q4 keine signifikanten Sickerwasser-Radonkonzentrationen mehr messbar.

Die Messstellen Q8 und Q9 entstanden im Sommer 2001 an frisch angelegten Schürfen der Wismut GmbH am nördlichen Haldenfuß. Sie liegen in der Talau des Badergrabens auf einer Höhe von 245 bis 250 m NN. Abb. 7.13 zeigt einen Blick von der Haldenabtragsfläche in einen Schurf mit Markierung der Probenahmestelle Q8. Die Schürfe von Q8 und Q9 waren in mehreren Abstufungen mit Höhen von je ca. 3-4 m angelegt und reichten ca. 25 m in den Haldenfuß hinein. Am Rand der freigelegten Fläche sammelte sich Sickerwasser von den Hangbereichen. Die gemessenen Radonkonzentrationen gingen nach anfänglichen Maxima von bis zu 130 Bq/l bei einem Urangehalt von ca. 1 mg/l im Laufe des Haldenabtrags ständig zurück. Der Abtrag an der Messstelle Q9 war eher abgeschlossen als der Abtrag bei Q8. Beide Messstellen existieren nicht mehr.

6.2.2.3 Radongehalte in Oberflächenwasser

Für die Bestimmung der Radonkonzentration im Oberflächenwasser wurde ein Teil des bestehenden Messstellennetzes der Universität Jena zur regelmäßigen Erfassung der physikochemischen und hydrochemischen Parameter im Gessenbach und seinen Zuflüssen ausgewählt. Es ist in GELETNEKY (2002) dokumentiert. Die Radongehalte im Oberflächenwasser von Gessenbach und Badergraben weisen eine starke Abhängigkeit von der Art des Bachbetts, der Nähe der Sickerwasserzutritte, geologischen Störungen und dem Wechsel zwischen influenten und effluenten Verhältnissen auf. Sie schwanken zwischen 0 und 7 Bq/l und zeigen, dass Radon im fließenden Wasser schnell entgast.

Die Messstelle G14 liegt in unmittelbarer Nähe von Q4 und ist davon bis Sommer 2001 stark beeinflusst worden. Nach Sanierungsabschluss in diesem Bereich sind die Werte von G14 gesunken und haben die gleiche Größenordnung wie Q4 nach der Sanierung. Die Messstelle B1 befindet sich ca. 200 m entfernt von Q8 in der Talsenke und erhält auch einen Sickerwasser-Input.

Zwischen den Messstellen G5 und G6 wechseln influente und effluente Verhältnisse durch den Rand des Grundwasserabsenkungstrichters. Bei Effluenz tritt Grundwasser an permeablen Stellen in den Bach und führt zu einer Erhöhung der Radonkonzentration im Bachwasser. Durch Entgasung sinkt der Messwert innerhalb weniger Meter wieder ab.

Bei B3 und G7 fließen Gessenbach und Badergraben in künstlichen Bachbetten. Betonplatten am Boden und an den Seiten verhindern jeden Zutritt von Radon aus dem

Untergrund. Diese Messstellen fallen durch extrem niedrige Messwerte auf. Der erhöhte Messwert Mitte Januar 2001 stammt von einer „Wassereis“-Probe mit 0°C. Sie zeigt den Einfluss des Temperaturfaktors auf die Löslichkeit von Radon im Wasser (Oswald-Koeffizient) und auf die geringere Entgasung bei langsamerer Fließgeschwindigkeit.

Alle regelmäßig beprobten Oberflächenwassermessstellen außer G6 liegen über dem Grundwasserabsenkungstrichter.

6.2.2.4 Stichtagsbeprobung

Alle gemessenen Radonkonzentrationen im Wasser können als Zeitreihen für die einzelnen Probenahmepunkte aufgetragen und ausgewertet werden. Für eine Optimierung der Vergleichbarkeit der verschiedenen Beprobungsstellen und für eine Kartierung des Radongehaltes im Wasser des Gessentals wurde eine Stichtagsbeprobung am 26.06.2001 durchgeführt. An diesem Tag wurden der Oberflächenabfluss, die Sickerwassermessstellen und die Grundwassermessstellen 02/00 und 10/00 hydrochemisch und auf ihren Radongehalt hin beprobt. Außerdem wurden Wasserproben für die Bestimmung des Radiumgehaltes und an ausgewählten Stellen Sedimentproben genommen. Als in hydrochemischer Hinsicht bergbaulich unbeeinflusster Zufluss des Gessenbaches wurde der Lammsbach beprobt.

6.3 Bestimmung des Radiumgehaltes im Wasser

Die Radonkonzentration im Wasser ist in erster Näherung und ohne mögliche Entgasungen zu beachten ein Maß für die Radiumkonzentration in der Umgebung und im Wasser selbst. Um beide Anteile trennen zu können, wurden im Rahmen der Stichtagsbeprobung auch Wasserproben zur Radiumbestimmung genommen. Die Radiumbestimmung erfolgte analog der Radonmessung im Wasser. Da aber die Radiumkonzentrationen um ein vielfaches geringer waren, musste eine größere Probenmenge genommen und durch eindampfen aufkonzentriert werden. Danach lässt man die Probe so lange stehen, bis das bei der Probenahme enthaltene Radon zerfallen ist und sich durch den Zerfall des vorhandenen Radiums neues Radon in der Probe gebildet hat.

6.4 Radionuklidgehalte in Sedimenten

An den bei der Stichtagsbeprobung genommenen Sedimentproben wurden durch Dr. habil. Jens Wiegand von der Universität Essen die Radionuklidkonzentrationen von U-238, Ra-226 und Pb-210 bestimmt. Die Proben wurden am Gessenbach bei den Oberflächenwassermessstellen G13, G14, G7, G5, G6, G8 und G1; am Badergraben bei B50 (NE von Q9), B51 (N von Q8) und B1 und am Lammsbach bei L2 genommen. Eine Fe-Ocker-Probe stammt von der Sickerwassermessstelle Q4. Die Radionuklidkonzentrationen

wurden in zwei verschiedenen Fraktionierungen des Sediments (Ton/Schluff-Fraktion <0,063 mm und Sand-Fraktion 0,063 – 2 mm) bestimmt.

6.5 CO₂- und O₂-Messungen

Die CO₂- und O₂-Messungen wurden nach drei verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt. Im Rahmen des Rammkernsondierungsprogramms wurde regelmäßig in 0,8m Tiefe der Gehalt an CO₂ und O₂ im Bodengas gemessen. Weiterhin wurde je nach Bohrlochtiefe in 2,0m und 3,2m Tiefe die Messung wiederholt. So ist eine Talkartierung des CO₂- und O₂-Gehaltes in 0,8m Tiefe möglich und die Abhängigkeit der Bodengaszusammensetzung von der Tiefe unter GOK kann für ausgewählte Punkte dargestellt werden. Die Lage der Rammkernsondierungspunkte ist in Abb. 6.5 dargestellt.

Die im Zusammenhang mit der Bestimmung der Radonkonzentration in der Bodenluft durchgeführten CO₂- und O₂-Messungen mit der Schlagsonde ermöglichen eine direkte Gegenüberstellung der Variationen der Radonkonzentrationen und der CO₂- und O₂-Konzentrationen in den Profilen.

6.6 Klimadaten

Die Radonkonzentrationen sind wie in Kapitel 4.3 beschrieben von der Temperatur, dem Luftdruck, der Feuchte und anderen Umweltparametern abhängig. Für die realistische Interpretation der gemessenen Werte müssen deshalb immer die Klimadaten mit erfasst werden. Die Wismut GmbH betreibt seit Juli 2000 eine Klimastation im Kippbereich 3 des Tagebaus Lichtenberg. Die in Kapitel 5.3 aufgeführten gemessenen Parameter wurden von dem Mitarbeiter der Wismut GmbH als Tagesmittelwerte aufbereitet und übergeben. Für die Auswertung der Gasmessungen wird auf ausgewählte Daten zum Teil in Form von Wochenmittelwerten zurückgegriffen, da die Messung der Radonkonzentration auch in Zeitabständen von minimal einer Woche erfolgt ist.

6.7 Flutungsdaten des Grubengebäudes

Flutungsdaten des untertägigen Grubengebäudes wurden durch die Wismut GmbH von vier Messstellen zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um die in Tab. 6.2 näher charakterisierten Punkte e-1260, e-1299, e-1302 und e-1320. Sie haben alle direkten Grubenanschluss und es liegen in Abhängigkeit vom Flutungsfortschritt monatliche bis tägliche Messergebnisse des Grundwasserstandes in m NN vor. Da sich der Verlauf der Flutung auf alle Messstellen ähnlich auswirkt, werden in der Auswertung nur die Messwerte der Messstelle e-1260 verwendet. Die in unregelmäßigen Abständen erhobenen Daten wurden in tägliche Änderungen des Grundwasserspiegels umgerechnet. In Abb. 6.4 ist die dem Grundwasserstand entsprechende Flutungsgeschwindigkeit in m/Tag dargestellt. Deutlich zu erkennen ist im August 2002 das Starkregenereignis, das in weiten Teilen

Deutschlands zu verheerenden Überschwemmungen geführt hat. Die zu Flutungsbeginn zu beobachtende hohe Flutungsgeschwindigkeit wurde durch die Verringerung der untertägig aufgefahrenen Volumina mit zunehmender Tiefe des Grubengebäudes verursacht.

Tab. 6.2: Lage und technische Ausstattung der Flutungswassermessstellen

Messstelle	Rechtswert	Hochwert	Daten seit	Bemerkungen
e-1260	4511363,8	5636190,8	22.01.98	Für teufenorientierte Schichtbeprobung, Nähe Schacht und Halde 381, 400m nördlich vom Badergraben
e-1299	4511423,9	5635581,8	23.04.99	Mit Drucksonden ausgerüstet, 200m südlich vom Badergraben am Rand der Nordhalde
e-1302	4513029	5634797,5	28.05.99	ca. 2 km nordöstlich vom Badergraben im Betriebsgelände
e-1320	4511335,35	5635264,7	09.12.99	ca. 600m südlich vom Badergraben auf der Nordhalde

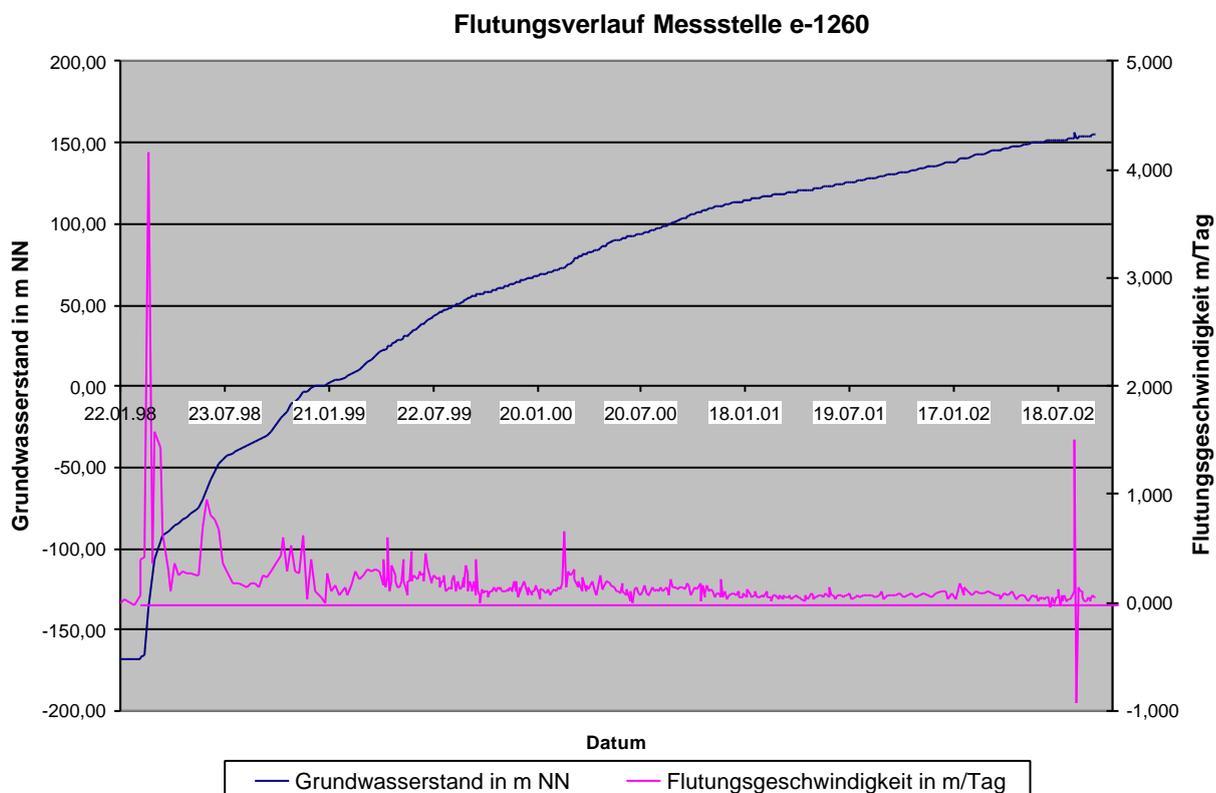


Abb. 6.4: Flutungsverlauf der Messstelle e-1260 nach Daten der Wismut GmbH (WISMUT 2002)

**Topographie des Gessentals mit Rammkernsondierungs-
punkten der Wismut GmbH und Bodengasmessstellen
mit der Schlagsonde zur Bestimmung der Radonkonzentration
und des CO₂-Gehaltes**

Maßstab 1 : 5000

- ◆ Bodengasmessstelle mit der Schlagsonde
- ◆ Rammkernsondierungspunkt, der zur Grundwassermessstelle
ausgebaut worden ist
- + Rammkernsondierungspunkte der Wismut GmbH

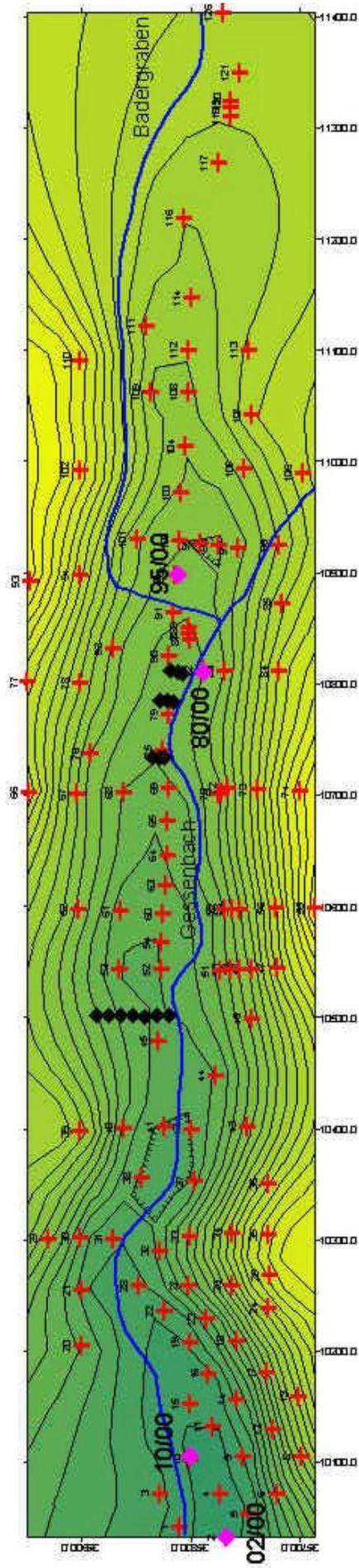
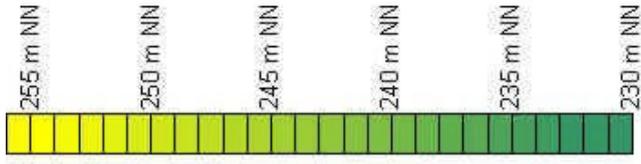
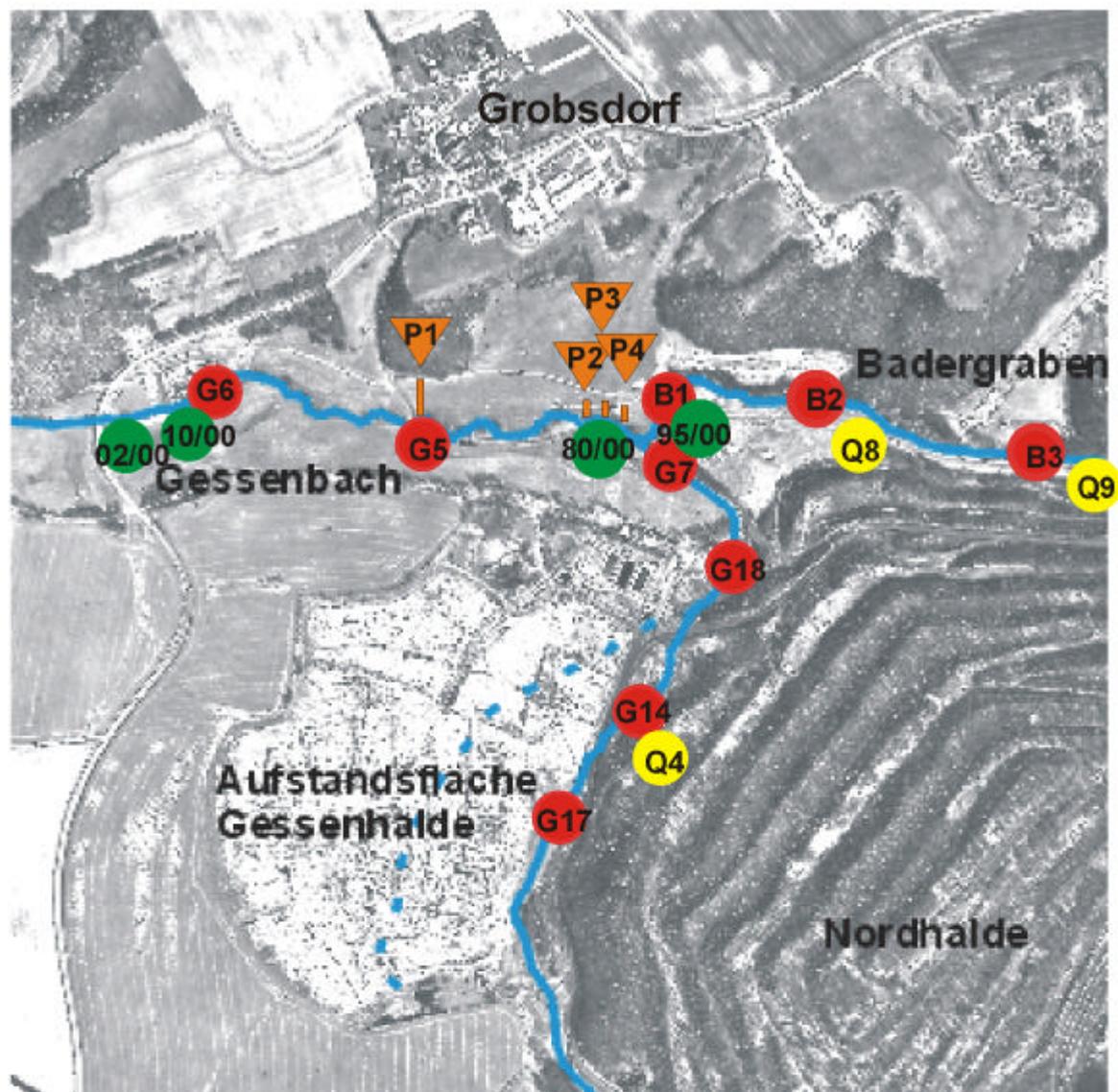


Abb. 6.5: Lage der Rammkernsondierungen der Wismut GmbH im Sommer 2000 und der Bodengasmessstellen mit der Schlagsonde



- Grundwassermessstellen
- Sickerwassermessstellen
- Oberflächenwassermessstellen
- ▼ Bodengasprofile senkrecht zum Bach



Abb. 6.6: Übersicht der Lage aller Probenahmestellen für Radon (außer Stichtagsbeprobung) und CO_2/O_2 (außer Rammkernsondierungspunkte) im Gessental

7 Auswertung und Diskussion der Untersuchungen

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messungen von Gasen in den Talsedimenten, in Oberflächenwasser, Haldensickerwasser und Grundwasser des Gessentales repräsentieren eine sanierungsbegleitende Untersuchung einer extrem belasteten Bergbaufolgelandschaft. Sie stellen einmal eine Dokumentation der Gesamtsituation eines mit Radionukliden und Schwermetallen belasteten Beispielgebietes (Fallbeispiel Gessental) in Form von flächenhaften Kartierungen, Zeitreihen und Stichtagsanalysen dar. Zum anderen steht das Hauptziel, aufbauend auf diesen Dokumentationen neue Aussagen über den Austrag und die Transportprozesse von Radon in Uranbergbaugebieten in Abhängigkeit von der ehemaligen bergbaulichen Tätigkeit und der aktuellen Sanierungstätigkeit zu gewinnen.

7.1 Abschätzung der Reproduzierbarkeit der Messwerte - Fehlerbetrachtung

Um eine qualitätsmäßige Beurteilung der erhobenen Messwerte und eine Abschätzung der Messgenauigkeit zu erreichen, wurde eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Wichtige Einflussgrößen auf die Messwerte sind neben natürlichen Schwankungen durch unterschiedliche geologische Gegebenheiten und klimatische Bedingungen der technische Ablauf der Probenahme und Probenaufbereitung und die Fehlergrenzen der Messgeräte. Der Einfluss der Klimafaktoren Temperatur, Niederschlag und Luftdruck wird in Kapitel 7.4 kurz dargestellt und analysiert.

Der Ablauf der Probenahme ist eine sehr empfindliche Einflussgröße auf das Messergebnis. Die Missachtung nachfolgend aufgeführter Punkte kann besonders bei der Bestimmung der Radonkonzentration in Wasser bis zur völligen Unbrauchbarkeit des Messergebnisses führen:

- Wasser-Proben wurden immer an exakt den gleichen Messpunkten genommen. Flächige Sickerwassermessstellen zeigten starke Unterschiede im Radongehalt im Abstand von wenigen Metern.
- Die Probenflaschen wurden möglichst entgasungsfrei mit der Probe gefüllt, d.h. das Wasser lief gleichmäßig und strudelfrei mit möglichst wenig Gefälle in die Flasche. Die Probenflaschen wurden randvoll gefüllt und wenn möglich unter Wasser luftblasenfrei verschlossen.
- Die genommenen Proben wurden auf dem Weg in das Labor möglichst wenig erschüttert und in einer Kühlbox gelagert.
- Die Entgasung wurde gemäß Arbeitsanleitung (PYLON) unter Einhaltung konstanter Luftdurchflussmengen und damit einer gleichen Entgasungsdauer durchgeführt.

Bei der Bestimmung der Radonkonzentration in Bodengas ist eine gewisse Mindestpermeabilität des Bodens Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Probenahme. Zu lange Füllzeiten der Lucas-Zellen führen meist zum Ansaugen von Außenluft über Gas-

Wegsamkeiten zwischen Schlagsonde und Boden und damit zur unkontrollierten Verdünnung der Bodengasprobe.

Das PYLON-Messgerät und die Lucas-Zellen arbeiten in folgenden Toleranzbereichen:

- Model 300A Volume 270 ± 3 ml (reales Zellenvolumen)
- Model AB-5 *Counting Efficiency* $0,76 \pm 0,02$ cpm

In Abhängigkeit vom Vakuum in der Model 300A-Lucaszelle wurde ein Probenvolumen von 257 ± 13 ml Gasprobe angesaugt. Das entspricht einem Fehler von 5%. In Bezug auf die *Counting Efficiency* sind die Angaben von PYLON widersprüchlich. Im Unterschied zum oben angegebenen Toleranzbereich wird bei der Berechnungsformel mit einer Effizienz von 0,74 gearbeitet, die Genauigkeit wird für die Fehlerrechnung mit 5% eingeschätzt.

Eine entscheidende Fehlergröße bei der Bestimmung der Radonkonzentration ist die statistische Abhängigkeit der Anzahl der gemessenen Zerfälle pro Zeiteinheit in der Lucas-Zelle von der absoluten Anzahl der Zerfälle (siehe Abb. 7.1).

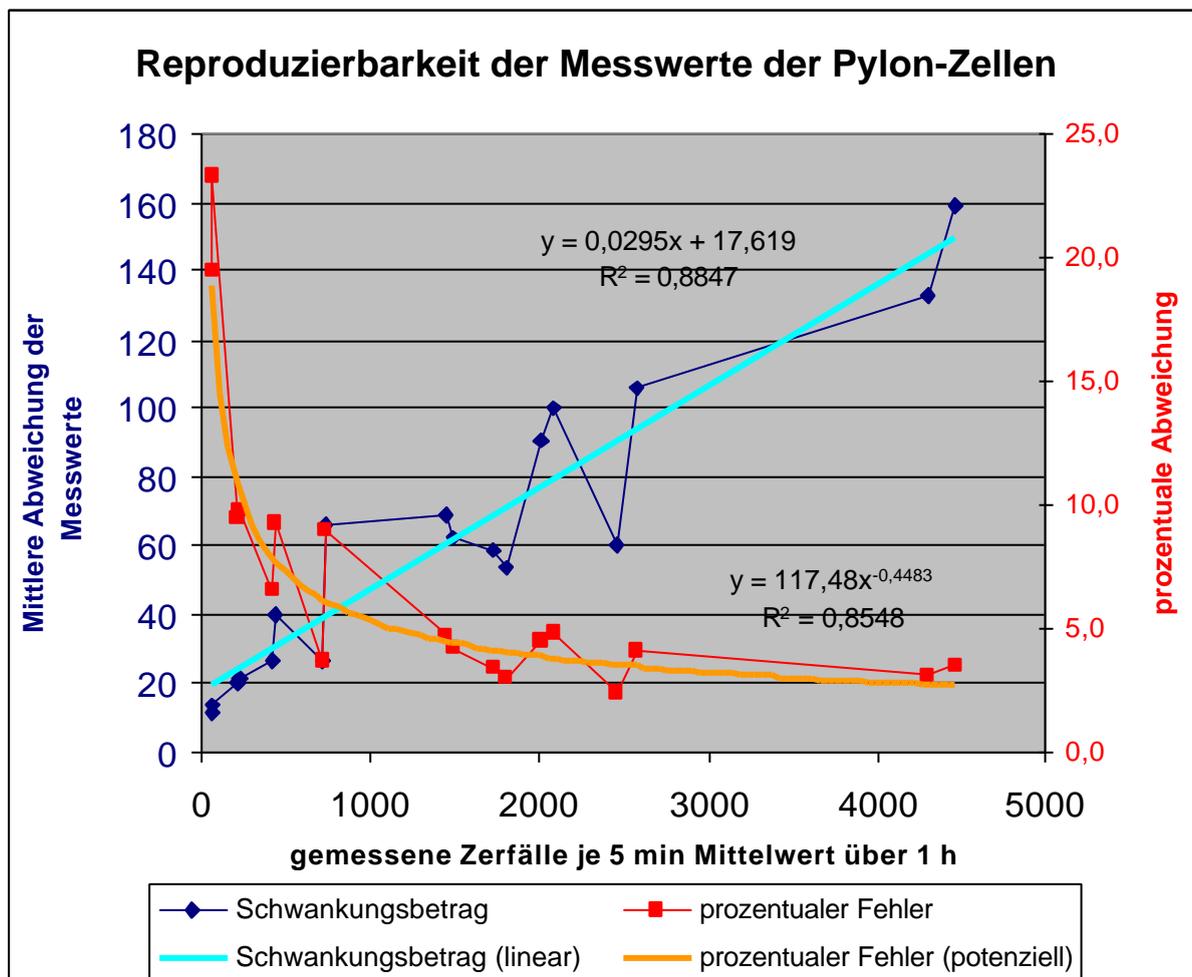


Abb.7.1: Zusammenhang zwischen dem absoluten Messwert und der Reproduzierbarkeit dieses Messwertes bei Radonbestimmungen mit Pylon Model 300A Zellen und Model AB-5 Monitor in Abhängigkeit von der absoluten Größe des Messwertes

Je niedriger die Anzahl der gemessenen Zerfälle pro Zeiteinheit ist, desto größer wird die prozentuale Schwankung der Messwerte bei Wiederholungsmessungen. Die Reproduzierbarkeit der Messwerte verschlechtert sich mit abnehmenden Radonkonzentrationen. Dadurch ist es nicht möglich, alle gemessenen Werte mit einem einheitlichen Unsicherheitsbereich zu diskutieren. Proben mit 1000 und mehr Zerfällen je 5 Minuten haben eine Genauigkeit von 95%, Proben mit 200 bis 1000 Zerfällen je 5 Minuten sind mit 90% gut reproduzierbar. Problematisch wird die Bewertung von Proben mit sehr geringen Radonkonzentrationen, das betrifft einen großen Teil der Oberflächenwassermessstellen. Hier wurde auf eine längere Messzeit der Proben übergegangen. Den Radonkonzentrationen des Oberflächenwassers von maximal 6,8 Bq/l entsprechen 612 registrierte Zerfälle je 5 Minuten Messzeit, das heißt ca. 122 *counts per minute*. 200 Zerfälle je 5 Minuten entsprechen einer Radonkonzentration von ca. 2,1 Bq/l. Die Background-Rate für den Monitor AB-5 beträgt nominal 0,4 *counts per minute*. Langzeitversuche über 20 Stunden mit einer gespülten und gelagerten Zelle ergaben schwankende Messwerte zwischen 0 und 3 *counts per minute* und einen Mittelwert von 1,5 *counts per minute*. Bei der Entgasung von Wasserproben wurde mit einem Wasserprobenvolumen von 180 ml gearbeitet. Das Volumen kann auf ± 2 ml genau abgemessen werden.

Der relative statistische Gesamtfehler setzt sich aus dem Fehler der Effizienz, dem Volumenfehler der Probenmenge in den Lucas-Zellen, der Impulsfehlerrate und bei Wasserproben dem Volumenfehler der Wasserprobe zusammen.

$$f_S = \sqrt{\left[\left(f_E / E \right)^2 + \left(f_V / V \right)^2 + \left(f_I / I \right)^2 + \left(f_W / W \right)^2 \right]}$$

f_S	relativer statistischer Gesamtfehler		
f_E	Fehler der Effizienz	E	Effizienz des Impulszählers
f_V	Volumenfehler der Lucaszellen	V	Volumen der Lucaszellen
f_I	Impulszählfehler	I	Anzahl der Impulse
f_W	Volumenfehler der Wasserprobe	W	Wasservolumen

Daraus ergibt sich ein relativer statistischer Gesamtfehler von 8% für Proben mit einer Radonkonzentration ≥10 Bq/l. Für Proben mit weniger als 10 Bq/l beträgt der Fehler 12%.

7.2 Messmethodenvergleich PYLON-WG1001 - Probenahme in Gaswaschflaschen

In dem Zeitraum Mai – Juni 2001 konnte bei der Wasserprobenahme außer der Methode nach PYLON auch auf die Probenahme mit Gaswaschflaschen (GWF) der Universität

Duisburg-Essen zurückgegriffen werden. Es wurden insgesamt 21 vergleichbare Proben genommen. Nach der Auswertung der Messungen ergibt sich ein Verhältnis der Messergebnisse von

Radon in Wasser (Gaswaschflaschenprobe) ----- Radon in Wasser (Pylon-Entgasung)	$\cong 1,4$
---	-------------

Ursache des Validierungsfaktors ist die in Kapitel 5.1.2.1 und 5.1.2.2 beschriebene unterschiedliche Technologie der Probenahme, des Transports und der Probenaufbereitung für die Entgasung. Während die in den Gaswaschflaschen genommenen Proben ab dem Moment der direkten Probenahme bis zum Entgasungsbeginn gasdicht verschlossen sind, kann bei der Methode nach PYLON eine unkontrollierte Entgasung der Proben beim Transport und beim Umfüllen in den Standzylinder für die Entgasung nicht verhindert werden. Tab. 7.1 zeigt Ergebnisse von durchgeführten Vergleichsmessungen.

Tab. 7.1: Messwerte der Radonkonzentration in Wasser zum Methodenvergleich der Wasserprobennahme in Gaswaschflaschen oder Laborglasflaschen. Bei Grundwasserproben und Sickerwasserproben stehen die gemessenen Radonkonzentrationen im Verhältnis 1,4 (GWF) / 1 (PYLON). Oberflächenwasser eignet sich aufgrund der schlechten Probenreproduzierbarkeit und der geringen Radonkonzentrationen nicht für einen Methodenvergleich.

Datum	Rn-222 - Konzentration in Bq/l									
	Oberflächenwasser						Sickerwasser	Grundwasser		
	B1	G5	G7	G18	G14	G17	Q4 b	02/00	10/00	80/00
16.05.01Pylon			0,0	1,3	4,3	2,8				
16.05.01GWF			1,4	0,6	4,8	5,0	54,3			
21.05.01Pylon					2,7		32,8	55,2	40,4	74,7
21.05.01GWF					4,9		47,6	82,2	52,7	107,6
28.05.01Pylon	2,1	0,3	0,0		3,9		39,0			
28.05.01GWF	1,9	1,4	0,9		5,3					
11.06.01Pylon	0,6	0,1	0,0		3,3		32,1			
11.06.01GWF	0,0	0,9	0,0		2,3		48,9			
18.06.01Pylon	0,3	0,4	0,1		1,4		36,1			
18.06.01GWF		0,7			1,1		40,7			

Für die Validierung der Messsysteme eignen sich besonders die Ergebnisse der Grundwasserproben. Auch im Sickerwasser ist trotz der inhomogenen Zusammensetzung der Wässer eine gute Übereinstimmung der beiden Messmethoden unter Berücksichtigung des Validierungsfaktors vorhanden. Die Oberflächenwasserproben eignen sich durch ihre geringen Radonkonzentrationen und ihre inhomogene Verteilung der Radongehalte infolge Entgasung nicht für einen Messmethodenvergleich. Als Schlussfolgerung aus der notwendigen Bestimmung eines Validierungsfaktors wäre eine Änderung der PYLON-Gebrauchsanweisung zu empfehlen.

Ein weiterer Unterschied der beiden Messmethoden liegt in dem untersuchten Probenvolumen und dem Verhältnis von Probenvolumen zu durchströmender Luft beim Überleiten des in Wasser gelösten Gases aus der Wasserprobe in die Messzelle. Hierbei wird ein bestimmtes Volumen an Außenluft durch die Wasserprobe geleitet, um das Radonenthaltende Gas aus dem Probenwasser aufzunehmen. Das Verhältnis von Wasserprobenvolumen zu durchgeleiteter Außenluft schwankt bei der Probenahme mit Gaswaschflaschen von ca. 20 bis 25 ml Wasser zu 270 ml Luft im Gegensatz zu 180 ml Wasser zu 270 ml Luft bei der Entgasungsmethode nach PYLON. Bei einer geringeren Durchströmung der Wasserprobe mit Außenluft könnte eine schlechtere Entgasung der Wasserprobe erfolgen. Die hierfür durchgeführten Entgasungsversuche bestätigen diese Vermutung jedoch nicht (siehe Tab. 7.2).

Tab. 7.2: Messungen zur Überprüfung der Entgasungs-Efficiency von PYLON WG 1001

Datum	<i>Messstelle, Bemerkungen</i>	Rn-222-Konz. in Bq/l
15.08.01	G17 180 ml 1. Entgasung	4,97
15.08.01	G17 180 ml 2. Entgasung	0,47
15.08.01	G17 180 ml 3. Entgasung	0,04
15.08.01	G14 180 ml 1. Entgasung	6,77
15.08.01	G14 180 ml 2. Entgasung	0,38
15.08.01	G14 180 ml 3. Entgasung	0,03
15.08.01	Q4 180 ml 1. Entgasung	8,82
15.08.01	Q4 180 ml 2. Entgasung	1,52
15.08.01	Q4 180 ml 3. Entgasung	0,10

Die Ergebnisse der Tab. 7.2 bestätigen mit durchschnittlich 91 ± 5 % den in der Bedienungsanleitung angegebenen Entgasungsfaktor von 90 % für die Methode nach PYLON. Der Entgasungsfaktor der Gaswaschflaschen beträgt ebenfalls 90 %. Die

Vermutung, dass der Grund für die unterschiedlichen Messergebnisse der Transferfaktor der Entgasung ist, konnte somit nicht bestätigt werden.

Die Ursache für die höheren Radon-Messwerte in den mit Gaswaschflaschen genommenen Proben muss folglich in der ab der Probenahme gewährleisteten gasdichten Lagerung und Transport der Proben liegen. Alles aus der Wasserprobe entgaste Radon bleibt in der Gaswaschflasche und wird im Entgasungsprozess in die Scintillationszellen überführt. Da die Probenahme von fließendem Oberflächenwasser am stärksten von Entgasungsprozessen begleitet wird, sind hier die größten Schwankungen im Verhältnis der Messwerte nach beiden Methoden zu verzeichnen.

Nach Abschluss der Vergleichsuntersuchungen beider Probenahme-Methoden für Radonmessungen in Wasserproben wurden alle Wasser-Messungen im Rahmen dieser Arbeit nach der Methode von PYLON durchgeführt. Die Probenahme erfolgte wie in 5.1.2.2 beschrieben. Somit ist eine gute Vergleichbarkeit aller Ergebnisse gewährleistet. Bei einem Vergleich der in dieser Arbeit gewonnenen Messergebnisse mit anderen Radonmessungen, bei denen die Probenahme mit Gaswaschflaschen durchgeführt wurde, müssen die Radonmesswerte mit dem Faktor 1,4 multipliziert werden.

Inzwischen verfügt die Universität Jena über eine genügende Ausstattung an Gaswaschflaschen. Bei weiteren Arbeiten zur Bestimmung der Radonkonzentration in Wasserproben wird die Anwendung dieser Probenahmemethode empfohlen.

7.3 Vergleich der Messergebnisse bei gefilterten und ungefilterten Wasserproben

Die in den Wasserproben gemessenen Radonkonzentrationen setzen sich aus dem im Wasser gelösten und transportierten Radon und dem beim Zerfall des partikulär und gelöst transportierten Radiums entstehenden Radon zusammen. Die Messergebnisse werden immer durch Korrekturfaktoren auf die Radonkonzentration zum Zeitpunkt der Probenahme zurückgerechnet. Dabei tritt eine Verfälschung der Messergebnisse durch eventuell in der Probe vorhandenes Radium und die fortlaufende Bildung von Radon während des Zerfalls auf. Das Vorhandensein von Radium sollte zu erhöhten Messergebnissen führen. Der Messfehler hängt sowohl von der Radiumkonzentration als auch von der Zeitdifferenz zwischen Probenahme und Entgasung ab.

Radium ist in Wasser sehr schlecht löslich. Um den ungelösten transportierten Anteil aus der Probe zu eliminieren, wurden einige Proben exemplarisch mit 0,45 µm Satorius Minisart Membranfiltern aus Zelluloseazetat gefiltert. Eine Grundwasserprobe am 15.05.02 konnte direkt bei der Probenahme im Gelände gefiltert werden. Die Messergebnisse der Radonkonzentration in der gefilterten und ungefilterten Probe zeigen den gleichen Wert. Daraus muss man schlussfolgern, dass in der Probe kein partikuläres Radium größer 0,45 µm vorhanden war. Andererseits wurde die Probe bis zur Entgasung 6 Stunden gelagert (übliche praktizierte Lagerungszeiten liegen zwischen 3 und 24 Stunden). Aufgrund der

Halbwertszeit von Rn-222 stellt sich bei Vorhandensein von Ra-226 in der Probe erst nach drei Wochen ein Gleichgewicht der Zerfallsprodukte von Ra-226 ein. Es kann also bei Anwendung der üblichen beschriebenen Messmethode keine Aussage über die Wirkung der Filterung gemacht werden. Ein Einfluss von partikulärem Ra-226 in den Wasserproben auf die bestimmten Rn-222-Konzentrationen kann aufgrund der durchgeführten Probenbehandlung und Messmethode und aufgrund der unterschiedlichen Halbwertszeiten der Zerfallsprodukte ausgeschlossen werden.

Mehrere andere Proben wurden im Gelände doppelt genommen und im Labor vor der Entgasung gefiltert. Hier zeigt sich ein sehr differenziertes Bild der Messwertverhältnisse. Die gefilterten Proben enthalten zwischen 10 und 97 % der Radonkonzentration der ungefilterten Vergleichsproben (siehe Tab. 7.3). Die extremsten Differenzen treten bei Wasserproben in der Umgebung der Gessenbach-Messstelle G6 auf. Hier liegen die Messwert-Verhältnisse bei 10, 16 und 97 %. Bei den Proben der Sickerwassermessstellen Q8 und Q9 enthalten die gefilterten Proben zwischen 35 und 85 % der Radonkonzentration der ungefilterten Vergleichsproben.

Tab. 7.3: Vergleich der Radonkonzentrationen von gefilterten und ungefilterten Wasserproben

Datum	Probenahme- stelle	Rn-Konz. in Bq/l ungefiltert	Rn-Konz. in Bq/l gefiltert	Prozentuales Verhältnis
15.05.2002	10/00	30,5	30,4	100
29.05.2002	G6 – 17,5 m	3,0	0,3	10
29.05.2002	Q8	94,0	69,5	74
05.06.2002	G6	4,9	0,8	16
05.06.2002	Q9	13,4	6,3	47
05.06.2002	Q8	17,3	6,0	35
17.06.2002	Q8	53,6	45,3	85
17.06.2002	Q9	2,5	1,3	52
17.06.2002	G6	3,2	3,1	97

Ursache der unterschiedlich starken Abnahme der Radonkonzentration bei Filterung der Proben dürfte der Filterprozess selbst sein. Er bietet ungewollte Entgasungsmöglichkeiten beim Ansaugen der Probe in die Filterspritze, beim Durchgang der Probe durch die Filterporen und beim Einströmen der gefilterten Probe in das Entgasungsgefäß. Auch eine Sorption von Ra-226 an den Filterwänden kann nicht ausgeschlossen werden.

7.4 Verknüpfung der Messwerte mit den Klimadaten

Der Einfluss der meteorologischen Faktoren Temperatur, Niederschlag und Luftdruck auf die gemessenen Radonkonzentrationen in Bodengas und Wasser ist unumstritten und wird in der Literatur im Detail kontrovers diskutiert (REHS 1999, WORM 1986). Die Überlagerung der Einflussgrößen führt zu erheblichen Interpretationsproblemen im Einzelfall. Hier soll nur der prinzipielle Zusammenhang betrachtet werden, indem die an Geländeproben gewonnenen Radon-Messwerte mit den meteorologischen Daten der Klimastation der Wismut GmbH im Tagebau Lichtenberg (UGT 2001) verglichen werden. Für beinahe den gesamten Zeitraum der Messwertaufnahme für diese Arbeit (außer Juni 2000) liegen von Juli 2000 bis Juli 2002 die Messwerte bzw. ausgewerteten Daten der mittleren Tagestemperatur, des mittleren Luftdrucks pro Tag und der Tagesniederschlagssumme vor. Die Daten wurden aufbereitet und in Abb. 7.2 einander gegenübergestellt. Die Tagesmitteltemperaturen zeigen den typischen mitteleuropäischen Gang. Sie schwanken zwischen -9°C im Winter und $+29^{\circ}\text{C}$ im Sommer. Die Niederschlagsmengen variieren zwar in einem recht großen Bereich von 0 bis ca. 28mm pro Tag, zeigen aber außer einem leichten Peak im Sommer keine prägnanten jahreszeitlichen Schwankungen in dieser Auflösung (Abb. 7.2). Bei Betrachtung der monatlichen Niederschlagssummen werden Maxima des Niederschlages im Sommer und Minima im Winter deutlich. Der gemessene mittlere Luftdruck zeigt Hauptmaxima im Winter und kleinere Maxima im Sommer. Frühjahr und Herbst sind durch geringeren Luftdruck gekennzeichnet.

Beim Luftdruck spielt weniger der Absolutwert als die Änderung pro Zeit eine Rolle. Eine Luftdruckabnahme bedingt eine verstärkte Entgasung aus dem Boden durch Diffusion und Konvektion (WORM 1986, WIEGAND 1999). Luftdruckunterschiede spielen also hauptsächlich für die Bodengasmessungen eine Rolle. Dabei können Einflüsse auf Bodengasmessungen mit der Schlagsonde vernachlässigt werden, da das Messloch nach oben durch die Schlagsonde verschlossen ist und die Luftdruckunterschiede sich in 0,8 m Tiefe kaum noch auswirken (WIEGAND 1999). Die Rammkernsondierungen im Sommer 2000 wurden bei relativ konstanten Witterungsverhältnissen und geringen Luftdruckschwankungen durchgeführt. Im Verhältnis zur Genauigkeit der kartierenden Bodengasmessungen kann auch hier der Fehler durch Luftdruckänderungen vernachlässigt werden. Analoges gilt für den Einfluss der Windgeschwindigkeit.

Die Temperatur hat direkten Einfluss auf die Radonkonzentration im Wasser über den temperaturabhängigen Löslichkeitskoeffizienten α (siehe Kapitel 4.3.1). Mit steigender Temperatur nimmt der Radongehalt in der gasförmigen Phase zu. Die Temperatur wirkt sich am deutlichsten auf das Oberflächenwasser aus. Da die Radonkonzentrationen des Oberflächenwassers aber so niedrig und schwankend sind, kann kein genereller signifikanter Einfluss festgestellt werden. Eine Stichtags-Beobachtung bzgl. der Auswirkung der

Temperatur auf die Radonkonzentration im Oberflächenwasser kann anhand der Messwerte vom 17.01.2001 (siehe Tab. 7.4) gemacht werden. Das Gessenbach-Wasser hatte an diesem Tag eine Temperatur um 0°C. Dadurch war erstens die Löslichkeit von Radon in Wasser sehr hoch und zweitens die Fließgeschwindigkeit und damit die Entgasung durch Turbulenzen gering. Die Sickerwassermessstelle Q4 und die Infiltrationsstelle des Sickerwassers in den Gessenbach G14 zeigten normale Messwerte, aber die bachabwärts befindliche Oberflächenwasser-Messstelle G7 zeigte im Vergleich zu anderen dort genommenen Proben mehrfach höhere Werte (1,4 Bq/l im Vergleich zum Jahresmittel von 0,1 Bq/l). Die Messstelle G7 befindet sich am Ende eines ca. 50 m langen Abschnittes des Gessenbaches mit künstlichem Bachbett. Das durch Turbulenzen in der Fließbewegung entgasende Radon kann hier nicht durch Migration aus dem Untergrund ersetzt werden. Das Messergebnis vom 17.01.2001 zeigt den Temperatureinfluss auf die Radonkonzentration im Wasser durch einen geänderten Löslichkeitskoeffizienten und ein ruhigeres Fließverhalten durch Eisbildung.

Die Niederschlagsmengen wirken sich auf die Bodengasmessungen (siehe Kapitel 4.3.1) und die Radonkonzentrationen im Wasser aus. Oberflächenabfluss, Sickerwasser und Grundwasser werden in angegebener Reihenfolge durch die Zumischung von Niederschlagswasser direkt und zeitverzögert verdünnt, das heißt die Radonkonzentrationen nehmen entsprechend der Verdünnung ab. Bei Sickerwasser kann Niederschlag auch zu einer Erhöhung der Radonkonzentration führen, da sich das Wasser bei Durchdringung des Haldenkörpers stark mit Radon aus den Porenräumen zwischen dem aufgehaldeten Material anreichern kann. Eine detaillierte Darstellung der Reaktion der Radonkonzentration von Sickerwasserproben auf Niederschlag folgt in Kapitel 7.5.2.

Der Zusammenhang zwischen den Niederschlägen, Pegelständen und gemessenen Radonkonzentrationen ist in Abb. 7.3 für die Grundwassermessstellen 10/00 und 80/00 dargestellt. Die GW-Messstelle 10/00 ist eine Porengrundwassermessstelle mit Anbindung an das regionale hydraulische Regime, an der GW-Messstelle 80/00 wird ein schwebender Porengrundwasserleiter beprobt. Der Grundwasserspiegel des schwebenden GW-Leiters reagiert nicht auf jahreszeitliche Schwankungen. Zu viel zutretendes Niederschlagswasser fließt in das Grubengebäude ab. Dafür ist aber die kurzfristige Reaktion des Grundwasserspiegels auf Starkregenereignisse aufgrund eines geringeren effektiven Porenraums und geringerer Retention wesentlich stärker zu beobachten. Die Radonkonzentration zeigt bei beiden Messstellen einen ähnlichen zeitlichen Verlauf. Beide Kurven sind unterschiedlich gedämpft und weisen in großen Abschnitten eine gewisse Parallelität auf. Niedrigere Radonkonzentrationen mit schwächer ausgeprägten Amplituden der Porengrundwassermessstelle stehen höheren Radonkonzentrationen mit stärkeren Amplituden im schwebenden Grundwasserleiter gegenüber. Eine Korrelation der Radonkon-

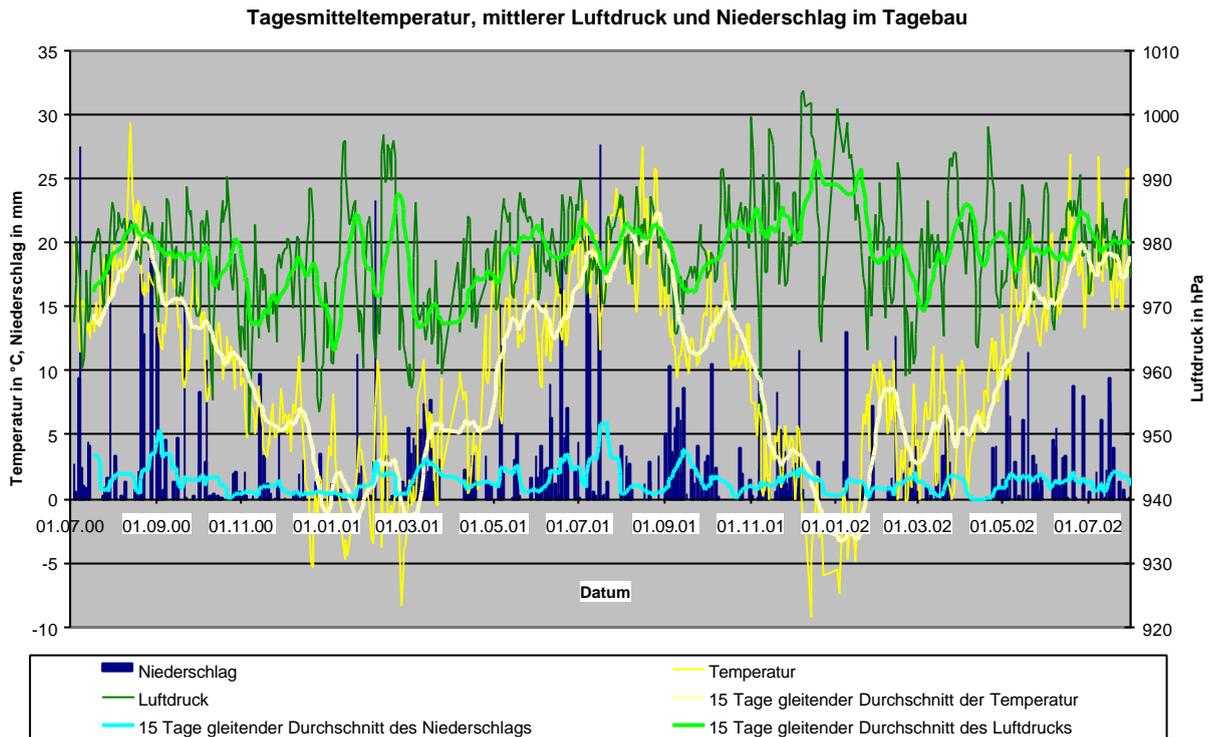


Abb. 7.2: Tagesmitteltemperaturen, tägliche Niederschlagsmengen und täglicher mittlerer Luftdruck der Klimastation im Tagebau (UGT 2001)

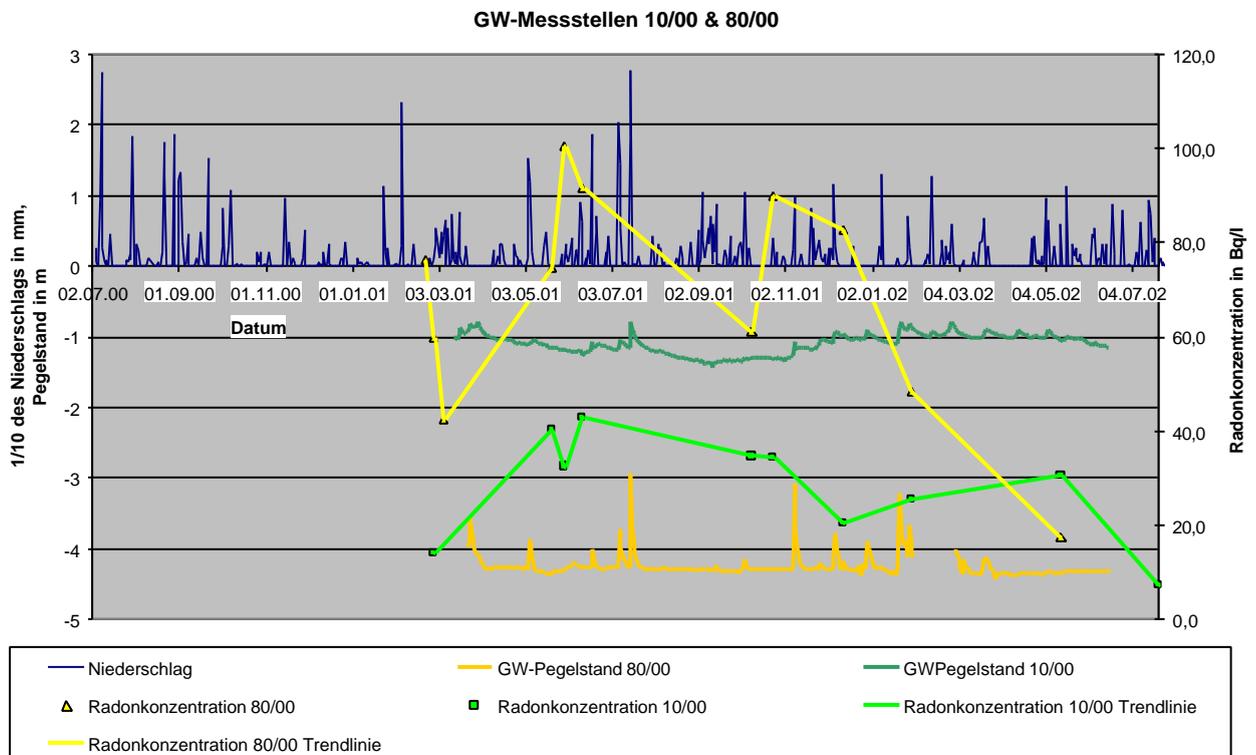


Abb. 7.3: Korrelation der GW-Pegelstände mit den Niederschlägen und den Radonkonzentrationen

zentrationen mit dem Niederschlag ist in dieser Abbildung nicht erkennbar. Wesentliches Problem bei der Auswertung ist hier die geringe Datendichte der Radonmessungen im Vergleich zu den Schwankungen der meteorologischen Parameter. Im Kapitel 7.5.1 folgt eine detaillierte Analyse des Zusammenhanges zwischen Niederschlag und Radonkonzentration im Grundwasser mit Einbeziehung des Grundwasserpegelstandes und Oberflächenabfluss durch eine zeitlich stark gestreckte Betrachtung der Gesamtsituation bis 10 Tage vor der Probenahme für die Bestimmung der Radonkonzentration. Der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Radonkonzentrationen im Sickerwasser wird in Kapitel 7.5.2 dargestellt. Ein signifikanter Einfluss der anderen meteorologischen Parameter auf die gemessenen Radonkonzentrationen in den unterschiedlichen Wassertypen und dem Bodengas kann ausgeschlossen werden. Meteorologische Einflüsse werden im untersuchten Gebiet durch geogene und anthropogene bergbauliche und sanierungsbedingte Faktoren überprägt.

7.5 Radongehalte in den bergbaubeeinflussten Wässern des Gessentals und ihre gegenseitige Beeinflussung

Hauptbestandteil der Geländearbeiten war die Bestimmung von Radonkonzentrationen in Wasserproben aus Grundwassermessstellen, Sickerwassermessstellen und Oberflächenwassermessstellen und die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Radonkonzentration in den Wasserproben der einzelnen Messstellen. Die gemessenen Radonkonzentrationen in Wasserproben sind in Abb. 7.5 und Abb. 7.6 zusammenfassend dargestellt. Tab. 7.4 enthält alle Probenahmezeiten und Messstellen mit den Messwerten als Übersicht.



Abb. 7.4: Übersicht der für die verschiedenen Wassertypen verwendeten Symbole

Abb. 7.4 zeigt eine Legende der in den folgenden grafischen Auswertungen verwendeten Symbole für die einzelnen Wassertypen. Gessenbach und Badergraben repräsentieren den Oberflächenabfluss. Diese Symbolik wird in der gesamten Auswertung beibehalten, wenn es um die Gegenüberstellung verschiedener Probenahmestellen und ihrer Charakteristika geht. Sie soll den direkten Vergleich mehrerer Auswertungen ermöglichen und die Zuordnung verschiedener Werte zu Wassertypen erleichtern.

Datum	Rn-222 - Konzentration in Bq/l, Probenahme 180 ml Wasser für WG1001															
	Badergraben			Gessenbach						Sickerwasser			Grundwasser			
	B1	B3	B4	G6	G5	G7	G18	G14	G17	Q4	Q8	Q9	02/00	10/00	80/00	95/00
22.11.00		0,0			0,3	0,0		5,7		34,4						
11.12.00	0,4	0,0			0,1	0,0		3,1		28,1						
19.12.00	0,5	0,1				0,1		2,5		28,4						
17.01.01						1,4		3,9		32,3						
21.02.01															76,5	
27.02.01					0,2	0,2		1,1		23,6			18,8	14,1	59,7	
06.03.01										19,4					42,6	
16.05.01						0,0	1,3	4,3	2,8							
21.05.01								2,7		32,8			55,2	40,4	74,7	
28.05.01	2,1				0,3	0,0		3,9		39,0						
30.05.01													56,8	32,5	100,5	
11.06.01	0,6				0,1	0,0		3,3		32,1						
12.06.01													69,6	42,8	91,5	49,8
18.06.01	0,3				0,4	0,1		1,4		36,1						
15.08.01								6,8	5,0							
01.10.01	0,7	0,1	1,0	2,4	0,4	0,1	1,6			65,1						
09.10.01						0,1	1,2							34,7	61,3	
15.10.01	1,2	0,1		3,6	0,7	0,1				95,6						
22.10.01	1,1	0,1		3,8						69,3						
24.10.01			1,1							99,5	114,4	60,5	34,6	90,1	70,5	
07.11.01				2,1				1,6		5,3	135,4					
20.11.01	1,7	0,4		2,3	0,4	0,1			3,9		112,5	131,7				
28.11.01	0,5	0,4		1,2							64,2	89,2				
05.12.01	1,2			2,1				1,5		3,5	77,9	106,7				
12.12.01													40,7	20,3	82,8	59,3
19.12.01	0,9			2,3				1,7		2,1	24,9	77,0				
29.01.02													14,3	25,4	48,4	
15.05.02				0,9								48,6	87,8	30,5	17,5	1,4
29.05.02				3,7							94,0					
05.06.02				4,9				2,3		0,8	17,3	13,4				
17.06.02				3,2							53,6	2,5				
23.07.02													26,3	7,5		
Anz. Messwerte	12	8	2	12	9	13	3	15	3	14	11	9	9	10	11	4
arithmet. Mittel	0,9	0,2	1,1	2,7	0,3	0,2	1,4	3,1	3,9	22,7	70,4	79,9	47,8	28,3	67,8	45,3
Mittel ab 9/01	1,0	0,2	1,1	2,7	0,5	0,1	1,4	1,8	3,9	2,9	70,4	79,9	45,9	25,5	60,0	43,7
Mittel bis 8/01								3,5		30,6						

Tab. 7.4: Radon-Gehalte in den bergbaubeeinflussten Wässern des Gessentals - Zusammenfassung der Messwerte.

(Die Keile in den Spalten von G14 und Q4 stellen den Abschluss des Haldenabtrags in diesem Bereich dar. Danach wird von G14 neu und Q4 neu gesprochen. Die Mittel-werte sind für verschiedene Zeiträume berechnet und zeigen Entwicklungstendenzen der Radonkonzentrationen an den einzelnen Messstellen.)

Radonkonzentrationen in Wasserproben des Gessentals - zusammenfassende Darstellung aller Messwerte nach der PYLON-Methode

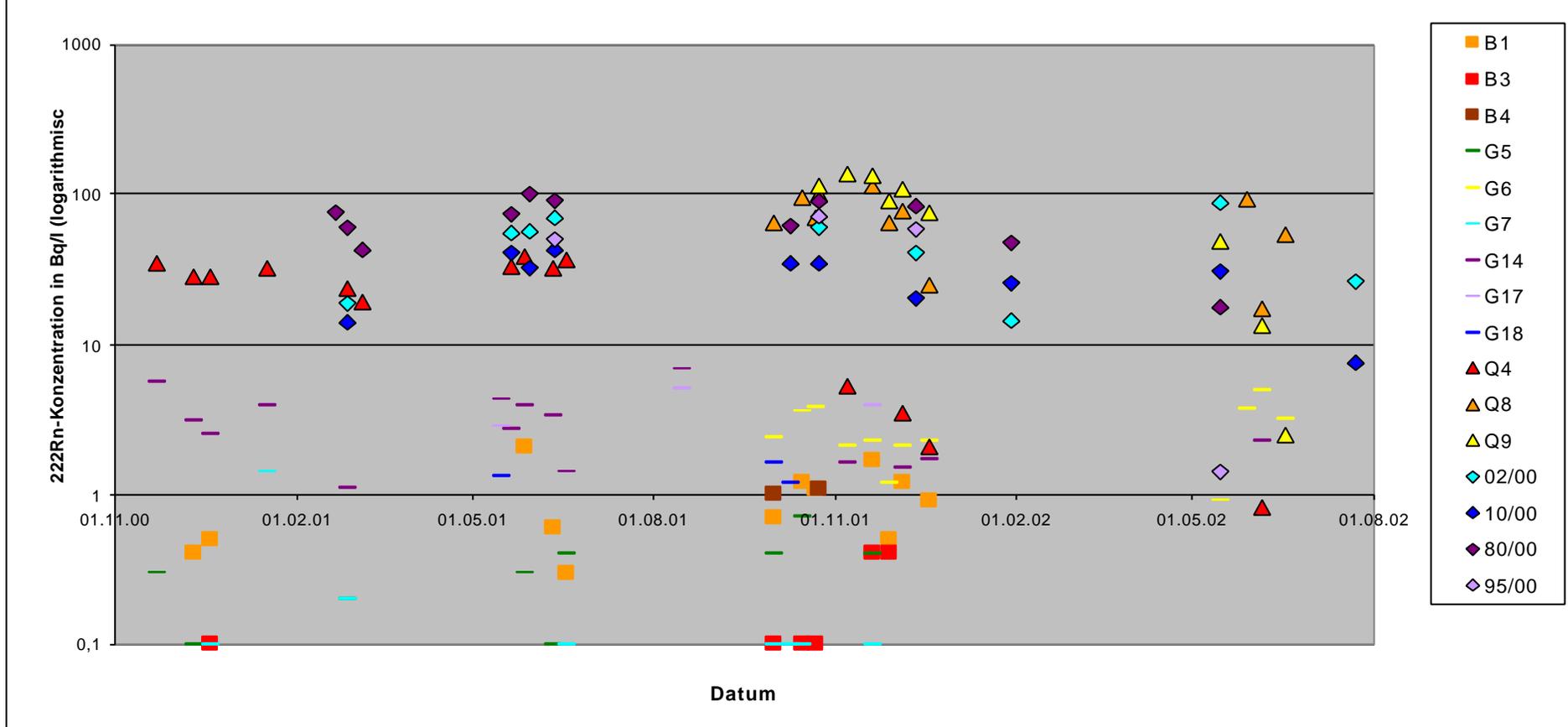


Abb. 7.5: logarithmische Darstellung aller in Wasserproben (Grundwasser, Sickerwasser, Oberflächenwasser) gemessenen Radonkonzentrationen im Gessental.

Die Radonkonzentrationen des Oberflächenwassers variieren zwischen 0 und maximal 6,8 Bq/l. Grundwasserproben zeigen bis auf 2 Ausnahmen Radongehalte von 14 bis 100 Bq/l. Das Haldensickerwasser weist teilweise die höchsten Radongehalte im Untersuchungsgebiet auf und variiert stark.

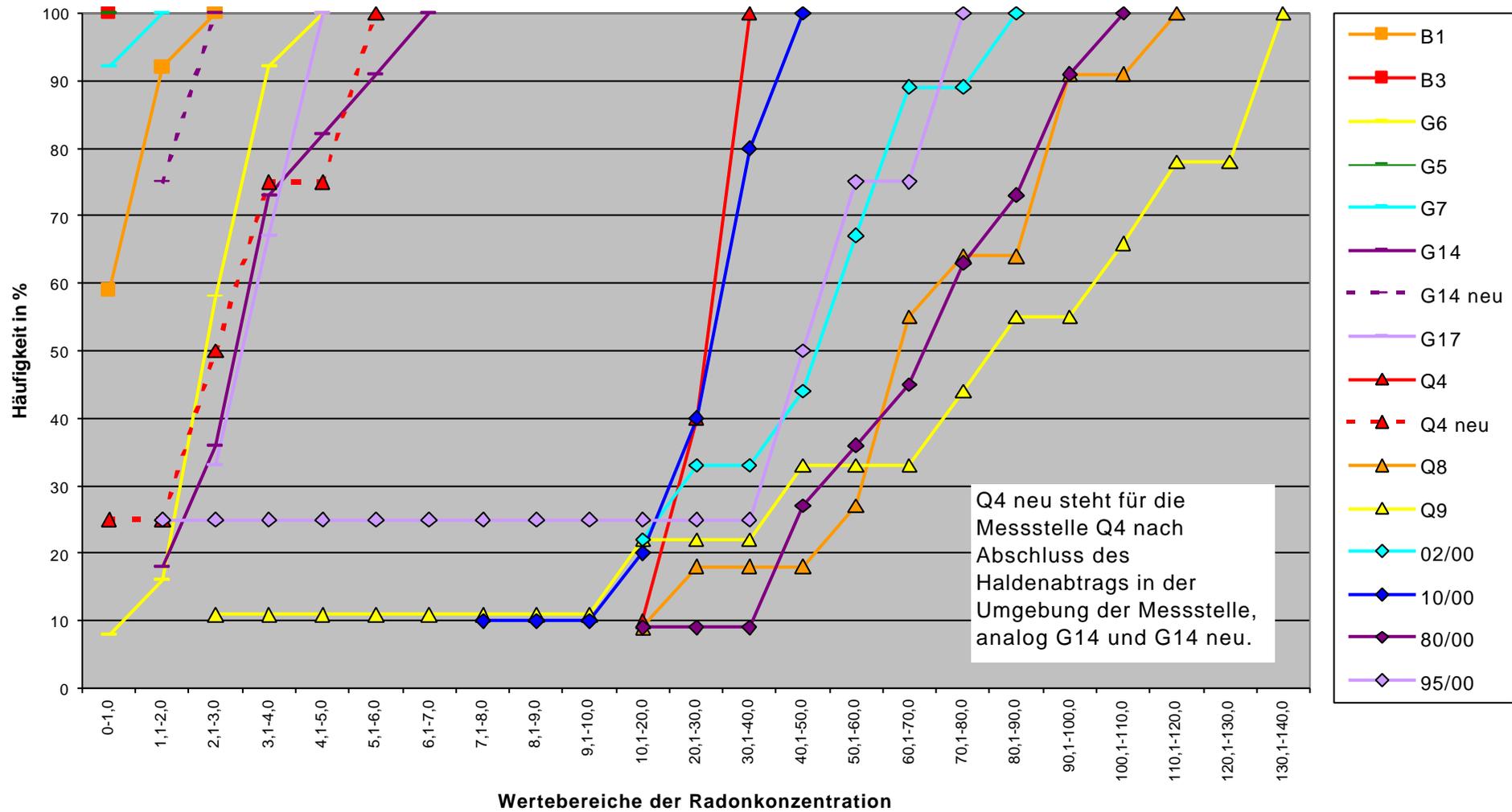


Abb. 7.6: Darstellung der Summenkurven der Häufigkeitshistogramme der Radonkonzentration in verschiedenen Wassertypen

Abb. 7.5 zeigt die zeitliche Variation der Radonkonzentrationen für die einzelnen Messstellen. Man sieht deutlich, dass Oberflächenwasser und Grundwasser Radonkonzentrationen in unterschiedlichen Größenordnungen enthält. Die Werte für Grundwasser liegen um das 100fache höher als für Oberflächenwasser. Das Oberflächenwasser des Gessenbachs zeigt an den Messstellen G14, G17 und G6 höhere Radonkonzentrationen als das Wasser des Badergrabens. Die Radonkonzentration im Sickerwasser hängt von vielen bergbaulichen Faktoren wie lokale Haldenzusammensetzung und Fortschritt des Haldenabtrags ab. Sie zeigt Maximalwerte über den Grundwasserwerten und sinkt bei Abschluss des Abtrags der Nordhalde in der Umgebung der Messstellen um ein bis zwei Größenordnungen, wie die Messwerte von Q4 ab Oktober 2001 und der letzte Messwert von Q9 vom 17.06.02 deutlich zeigen. Auch die gemessenen Radonkonzentrationen der Grundwassermessstellen sinken am Ende des Untersuchungszeitraumes und sind ein Hinweis auf den Sanierungsfortschritt. Eine genaue Beschreibung der Charakteristika der unterschiedlichen Wassertypen in Bezug auf ihre Radonkonzentration und deren zeitliche Variation folgt in den nächsten Abschnitten.

Auch in Abb. 7.6 ist die größenordnungsmäßige Trennung der Radonkonzentration im Grund- und Oberflächenwasser deutlich zu sehen. Die Summenkurven der Häufigkeitshistogramme der Radonkonzentration in Wasser unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Lage bzgl. der Wertebereiche und hinsichtlich ihrer Steilheit. Grund- und Oberflächenwassermessstellen schwanken in ihren jeweiligen Radonkonzentrationen nur geringfügig und zeigen dadurch steile Kurvenverläufe. Der Wertebereich der Oberflächenwässer liegt bei maximal 7 Bq/l. Dabei kann genau zwischen Messstellen im Bereich eines künstlich ausgebauten Bachbettes (B3, G7), natürlichen Oberflächenwassermessstellen (B3, G14 neu) und Messstellen im Einflussbereich von Sickerwasserzutritten (G14 alt, G17) oder anderen Einflussgrößen (G6) unterschieden werden. Bei den Grundwassermessstellen fallen tendenziell höhere Radonkonzentrationen der schwebenden Porengrundwassermessstellen (80/00, 95/00) gegenüber den Messstellen im Porengrundwasserleiter mit Anbindung an das regionale hydraulische Regime (02/00, 10/00) auf. Die Grundwassermessstelle 95/00 konnte nur sehr selten beprobt werden und steht stark unter dem Einfluss des Nordhalden-Sickerwassers. Ein Wert der Radonkonzentration im Wertebereich 1,1 – 2,0 vom 15.05.2002 (siehe Tab. 7.4) ist für den flachen Verlauf am Kurvenanfang bestimmend.

Die Sickerwassermessstellen Q8 und Q9 fallen durch Kurven mit geringem Anstieg auf. Die gemessenen Radonkonzentrationen schwanken in einem großen Bereich zwischen Maximalwerten von 130 Bq/l oberhalb der höchsten im Grundwasser gemessenen Werte bis zu Werten unter 20 Bq/l bei entsprechendem Sanierungsfortschritt beim Haldenabtrag. Die Sickerwassermessstelle Q4 und die in unmittelbarer Nähe gelegene Gessenbach-Messstelle

G14 wurden in der Analyse der Messwerte in zwei Zeitabschnitte vor (alt) und nach (neu) dem Sanierungsabschluss des westlichen Haldenfußes der Nordhalde getrennt. Allgemein fällt an allen Summenkurven auf, dass bei Summenkurven der Messstellen mit höheren Radonkonzentrationen die Steilheit der Kurven abnimmt. Grund dafür ist die Sanierungstätigkeit und die dadurch sinkenden Radonkonzentrationen in den Sickerwässern und den durch die Sickerwässer beeinflussten Grundwässern. Ausnahmen bilden die Messstellen Q4 und 10/00. Sie zeigen die geringsten Radonkonzentrationen der Sickerwasser- bzw. Grundwassermessstellen und auch die geringsten Schwankungen im Untersuchungszeitraum.

7.5.1 Radongehalte des Grundwassers im Gessental

Bei der Betrachtung der Radonkonzentrationen im Grundwasser und deren zeitlicher Entwicklung muss zwischen den schwebenden Grundwasserleitern über dem Absenkungstrichter (80/00 und 95/00) und den Grundwassermessstellen am Rand des Absenkungstrichters mit Anbindung an regionale Grundwasserleiter (02/00 und 10/00) unterschieden werden.

Prinzipiell zeigen alle Messstellen einen ähnlichen zeitlichen Verlauf (siehe Abb. 7.7). Mit Ausnahme weniger Messwerte kann von einer gewissen Parallelität der Kurvenverläufe gesprochen werden. Dabei fällt auf, dass die Radonkonzentration in den Wasserproben des schwebenden Grundwasserleiters bis Februar 2002 fast ausnahmslos über der Radonkonzentration in dem Porengrundwasserleiter mit Anbindung an das regionale hydraulische Regime liegt. Ab Mai 2002 ist das Verhältnis der Radonkonzentrationen umgekehrt.

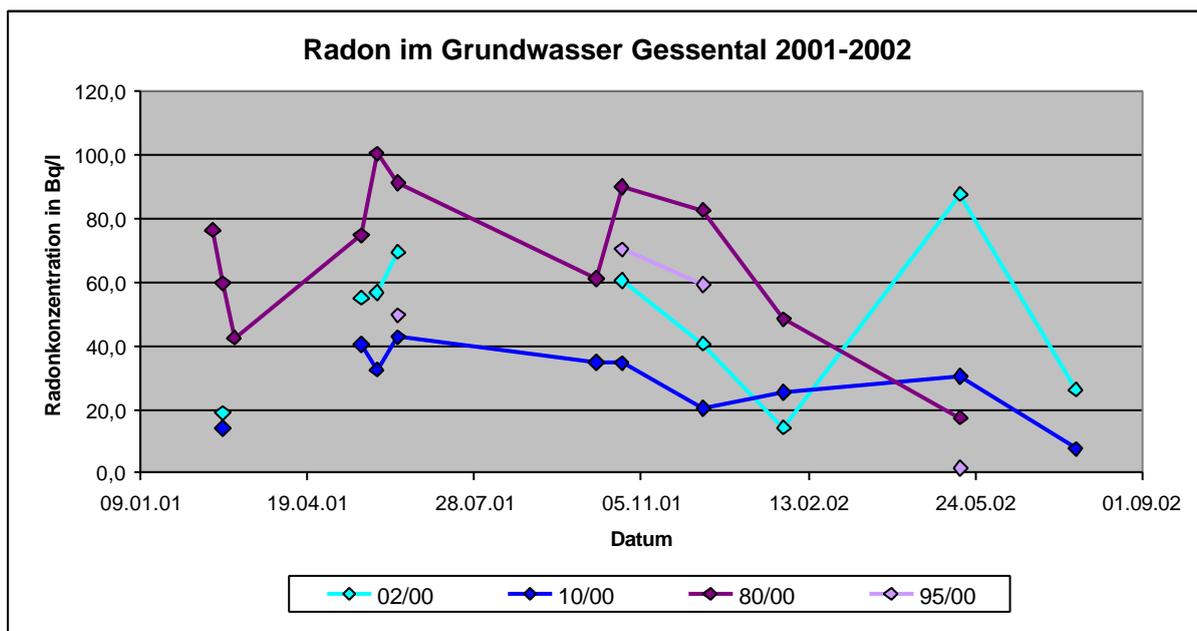


Abb. 7.7: Radonkonzentrationen im Grundwasser

Die Messstelle 80/00 zeigt nach einem tendenziellen Anstieg der Messwerte im Jahr 2001 im folgenden Jahr bis zur Beendigung der Messungen einen auffälligen Rückgang der Radonkonzentration. Eine direkte Beeinflussung der Radonkonzentration im Wasser durch die Flutung kann ausgeschlossen werden. Der schwebende Grundwasserleiter basiert auf einer wasserundurchlässigen Schicht über dem Grubengebäude, die von unten eine Grubengasmigration verhindert. Eine mögliche Quelle für die hohen Radonkonzentrationen stellen die Sickerwasseraustritte am Fuß der Nordhalde und Sickerwasser aus den Laugungsbecken der ehemaligen Gessenhalde dar. Der zügige Abtrag der Nordhalde im Laufe der Jahre 2001 und 2002 führte im Jahre 2002 zu einer starken Abnahme der Radonkonzentrationen im Sickerwasser (siehe Kapitel 7.5.2). Damit erklärt sich aller Wahrscheinlichkeit nach auch der Rückgang der Radonkonzentration im Grundwasser der Messstelle 80/00.

Die reale Möglichkeit des Sickerwasserzutritts hängt von der Fließgeschwindigkeit des Sickerwassers in den Talsedimenten des Gessentales ab. Bei einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-4} bis 10^{-6} m/s und der Halbwertszeit von Radon mit 3,83 Tagen wird das Radon in einer Halbwertszeit zwischen 0,33 und 33 m weit transportiert. Die Messwerte der Messstelle 95/00 erlauben eine analoge Interpretation, sind aber aufgrund ihrer geringen Anzahl bei weitem nicht so aussagekräftig. Da die Messstelle 95/00 etwas näher an der Nordhalde liegt und immer geringere Radonkonzentrationen als die Messstelle 80/00 aufweist, muss davon ausgegangen werden, dass der Sickerwassereinfluss von der Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde gegenüber dem Einfluss von Nordhalden-Sickerwasser überwiegt. Die Messstellen 02/00 und 10/00 zeigen einen leichten jahreszeitlichen Gang mit höheren Radongehalten im Sommer/Herbst und niedrigeren Messwerten im Winter/Frühling. Die Wassertemperaturen beider Messstellen schwanken im Laufe des Jahres zwischen 6,0 und 12,1 °C und haben damit keine dominierende Änderung der Löslichkeit von Radon in Wasser zur Folge. Der Grundwasserspiegel schwankt jährlich und erreicht im Sommer sein Minimum. Der niedrige Grundwasserspiegel im Sommer führt zu einer Aufkonzentration des Radons im Grundwasser. Eine plausible Erklärung für die Abnahme der Radonkonzentration in beiden Messstellen am Ende des Untersuchungszeitraumes im Sommer 2002 konnte noch nicht gefunden werden. Ein Zusammenhang mit den Sanierungsarbeiten muss in Erwägung gezogen werden. Dabei könnte die Verlagerung des Randes des Grundwasserabsenkungstrichters durch die laufende Flutung talaufwärts eine Rolle spielen. Eine Korrelation der Radonkonzentrationen mit den Grundwasserpegelständen zum Zeitpunkt der Probenahme zeigt für die Messstelle 10/00 eine Abnahme der Radonkonzentration bei steigendem Grundwasserspiegel. Ursache hierfür sind Verdünnungseffekte infolge direkter Infiltration von Regenwasser bzw. der indirekten Infiltration über influentes Bachwasser (Abb. 7.8). Bei der Analyse der Abhängigkeit der

Radonkonzentration vom Grundwasser-Pegelstand muss zwischen dem jahreszeitlichen langperiodischen Gang und dem niederschlagsabhängigen kurzperiodischen Gang unterschieden werden. Wie bei Abb. 7.7 schon diskutiert, zeigt der Porengrundwasserleiter bei Messstelle 10/00 den typischen jahreszeitlichen Gang. Die jahreszeitlich schwankenden Niederschlagssummen und der Wechsel von kleiner Grundwasserneubildungsrate im Sommer durch starke Evaporation und Transpiration und eine entsprechend größere Grundwasserneubildungsrate im Winter sind Ursachen des langperiodischen Jahresganges des Grundwasserpegelstandes. Dieser jahreszeitliche Gang zeigt sich auch im Verhältnis der Radonkonzentration der Porengrundwasser-Messstelle 10/00 zum Pegelstand.

Der Pegelstand des schwebenden Grundwasserleiters bei Messstelle 80/00 hängt nicht von der Jahreszeit ab, wird aber wesentlich stärker als die Grundwassermessstelle 10/00 von Niederschlagsereignissen beeinflusst. Das zeigen wiederum auch die Ergebnisse in Abb. 7.8. Prinzipiell variiert die Radonkonzentration bei konstantem Grundwasserpegel, es besteht also keine direkte Abhängigkeit. Die Radonkonzentration von 48,4 Bq/l am 29.01.2002 bei einem Grundwasserpegelstand von 3,9 m unter Geländeoberkante bei der Grundwassermessstelle 80/00 ist die Reaktion auf starken Niederschlag und zeigt den direkten kurzfristigen Verdünnungseffekt durch Regenwasser (vgl. Abb. 7.3 und Tab. 7.4).

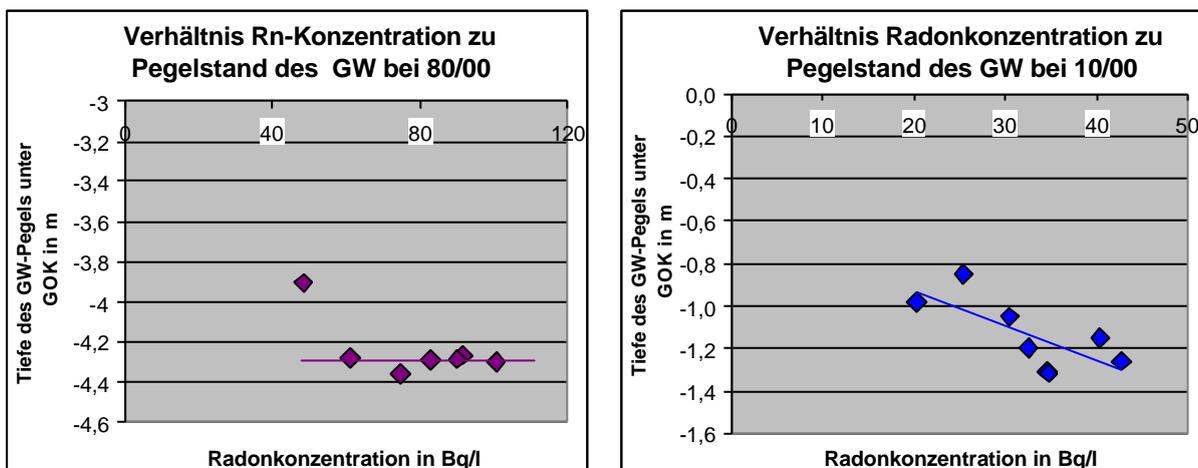


Abb. 7.8: Korrelation von Radonkonzentrationen im Grundwasser mit den Grundwasserpegelständen zum Zeitpunkt der Probenahme

In Abb. 7.8 sind für beide Grundwassermessstellen Pegelschwankungen von ca. 0,5 m erfasst. Die Radonkonzentration schwankt bei dem schwebenden Grundwasserleiter im Bereich von 48 Bq/l bis 100 Bq/l und bei der Messstelle 10/00 zwischen 20 und 43 Bq/l. Beide Messstellen zeigen bei niedrigem Pegelstand eine Verdopplung der Radonkonzentration im Gegensatz zu hohem Grundwasserpegelstand. Die absolute Abnahme der Radonkonzentration im Verhältnis zum Anstieg des Grundwasserspiegels ist bei der Grundwassermessstelle 10/00 doppelt so hoch wie bei der Grundwassermessstelle

80/00. Das dem schwebenden Grundwasserleiter zutretende Wasser muss demnach zeitweise höhere Radonkonzentrationen enthalten als das der Grundwassermessstelle 10/00 zuströmende Niederschlagswasser. Gründe für die geringere Abnahme der Radonkonzentration im schwebenden Grundwasserleiter können sein:

- Der Zutritt eines Teils des Niederschlagswassers kann auf dem Weg über die Haldenoberfläche und den Haldenkörper als Radon-angereichertes Sickerwasser erfolgen.
- Der Weg des Niederschlagswassers durch die Talsedimente beträgt an der Messstelle 10/00 nur durchschnittlich 1,1 m, der Pegel des schwebenden Grundwasserleiters hat eine Tiefe unter Geländeoberkante von ca. 4,2 m. Auf dem längeren Weg durch die Talsedimente kann sich das Niederschlagswasser aufgrund der längeren Sickerpassage stärker mit Radon anreichern.
- Bei starken Niederschlägen „läuft der schwebende Grundwasserleiter über“. Ein Teil des Niederschlagswassers fließt sofort in den Grundwasser-Absenkungstrichter ab.

Aussagen über die Beeinflussung des schwebenden Grundwasserleiters durch Sickerwasser können mit Hilfe der Seltenen-Erden-Elemente (SEE) getroffen werden. Nach Ergebnissen von MERTEN et al. (2002) hat das Grundwasser der Messstelle 80/00 die SEE-Signatur von Haldensickerwasser der Messstelle Q4. Es handelt sich zwar um eine Mischsignatur, in der verschiedene Wassertypen enthalten sind, doch ist die Haldensignatur qualitativ zu erkennen. Die Signaturen deuten auf den Einfluss von Haldensickerwasser hin.

Niederschlag, Abfluss und Grundwasserpegelstand stehen in einem direkten Verhältnis zueinander. Wie schon gezeigt, hängt die Radonkonzentration im Grundwasser je nach Grundwassertyp vom Pegelstand ab. Um diesbezüglich die Beeinflussung der gemessenen Radonkonzentrationen in den Grundwasserproben durch Niederschlag genauer zu untersuchen, wurden die Tagessumme des Niederschlags, der alle 10 Minuten gemessene Grundwasserstand am Beispiel der Grundwassermessstelle 10/00 und der ebenfalls im 10-Minutentakt registrierte Abfluss an der Messstelle G7 für den Zeitraum 10 Tage vor der Radonmessung bis zum Messtag in dem Beispiel-Diagramm Abb. 7.9 aufgetragen. Der Zeitraum von 10 Tagen wurde aufgrund der Halbwertszeit von Rn-222 gewählt. Die Abbildung zeigt, wie schnell der Abfluss im Gessenbach auf die Niederschläge reagiert. Mit nur geringer Verzögerung von 1,5 bis 2 h reagiert der Grundwasserstand. Der Abfluss geht sehr schnell auf seinen Ausgangswert vor dem Niederschlagsereignis zurück, der Pegelstand des Grundwassers klingt zeitverzögert langsamer und unschärfer ab. Es handelt sich um typische Abflusskurven und Pegelstandsvariationen eines quellnahen kleinräumigen hydraulischen Regimes mit effluenten Verhältnissen und gut durchlässigen Bereichen in den Auesedimenten. Der oberirdische Abfluss bewirkt ein schnelles Ansteigen des Abflusses im Vorfluter. Der Grundwasserstand zeigt eine vorfluternahe Reaktion durch geringes

Retentionsvermögen im Bereich der Messstelle und geringen Flurabstand. Die Daten der GW-Pegelstände und die Abflussdaten wurden von SENITZ (unveröff.) erfasst.

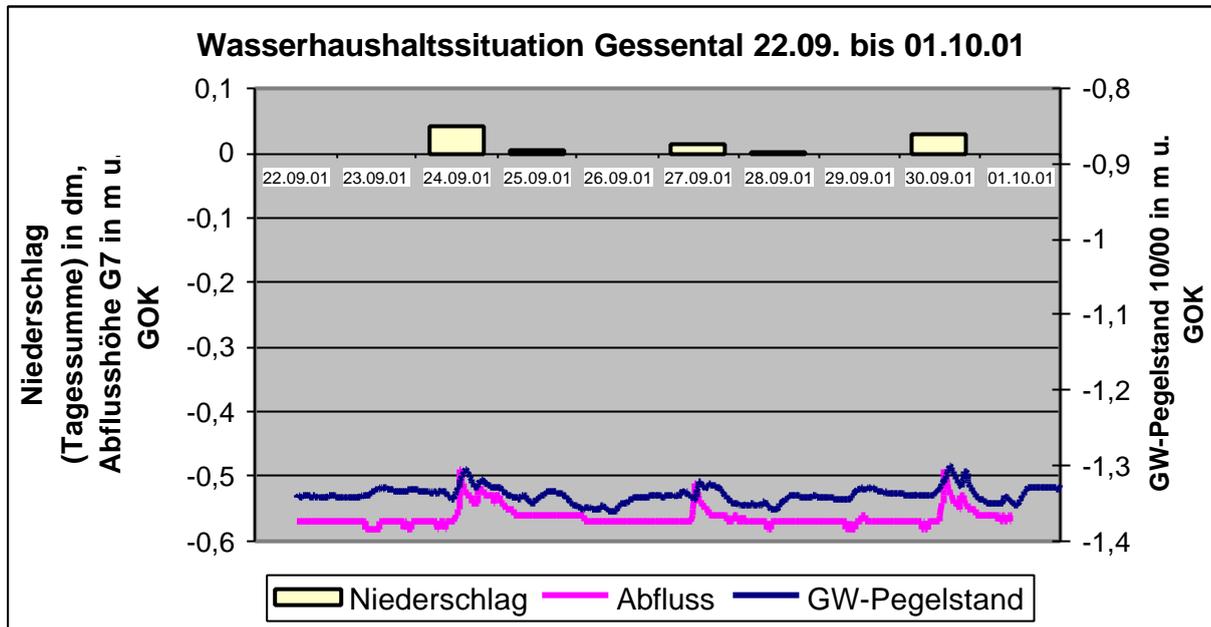


Abb. 7.9: Relation zwischen Niederschlag, Abfluss bei G7 und Grundwasserpegelstand bei 10/00 im Gessental vom 22.09.01 bis 01.10.01

Abb. 7.10 zeigt drei Beispiele für 10-Tages-Analysen analog der Abb. 7.9, verteilt über den Verlauf eines Jahres. Der Grundwasser-Pegelstand des Porengrundwasserleiters bei der Messstelle 10/00 schwankt im Laufe des Jahres zwischen 0,85 m im Winter bis Frühjahr und 1,35 m im Spätsommer unter Geländeoberkante. Im Gegensatz dazu variiert der Abfluss im Gessenbach an der Messstelle G7 nur um maximal 0,18 m Pegelhöhe. Bei Starkregenereignissen kommt es bei 0,4 m unter GOK zum Überlauf des Messwehres. Der niedrige Pegelstand in Bild 1 der Abb. 7.10 bedingt eine hohe Radonkonzentration. Der in Bild 2 gestiegene Pegelstand der Grundwassermessstelle zeigt den Verdünnungseffekt durch eine verringerte Radonkonzentration. In Bild 3 wäre wieder eine hohe Radonkonzentration zu erwarten gewesen. Hier wird der dominierende Einfluss der Sanierungsarbeiten im Bergbaubereich anhand der minimalen Radonkonzentration sichtbar. Neben der Korrelation der Radonkonzentrationen mit den Grundwasserpegelständen ist auch eine Gegenüberstellung der gemessenen Radonkonzentrationen mit physikochemischen und hydrochemischen Parametern von Interesse. Für die Grundwassermessstellen 10/00 und 80/00 wurden die gemessenen Radonkonzentrationen mit den physikochemischen Parametern pH-Wert, Wassertemperatur, Leitfähigkeit, Redoxpotenzial und Sauerstoffgehalt verglichen. Außerdem erfolgte eine Analyse des Verhältnisses der Radonkonzentration zu verschiedenen Ionenkonzentrationen in den

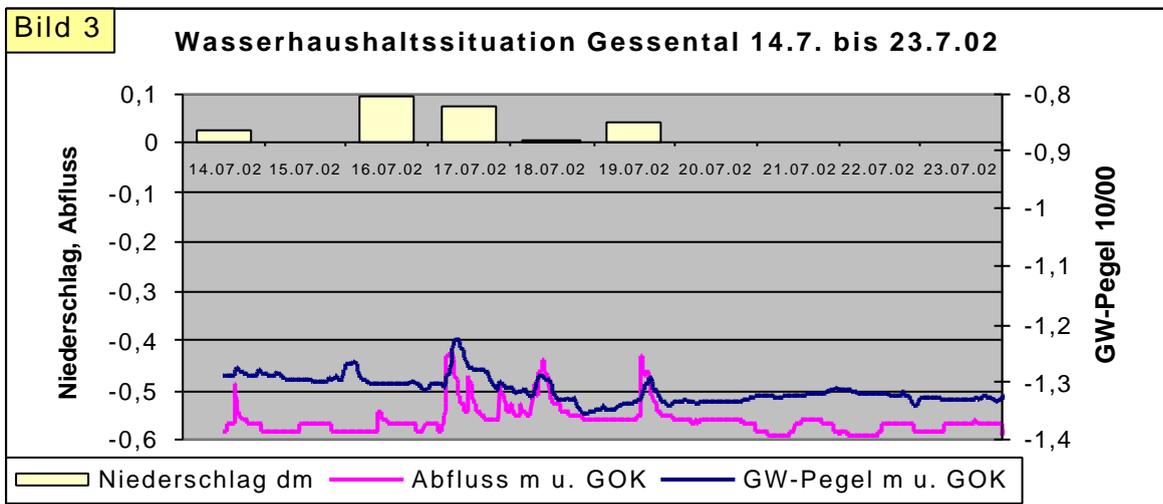
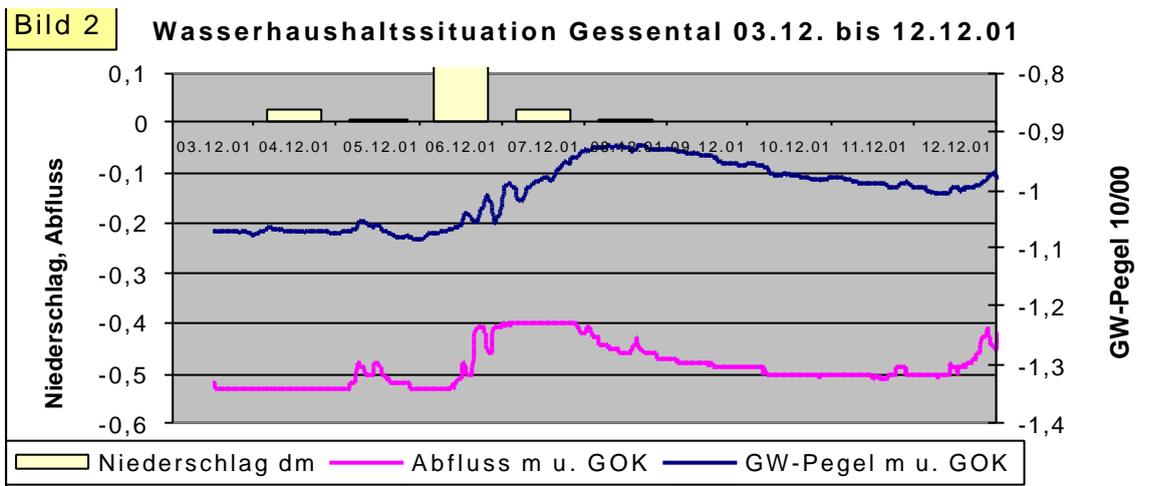
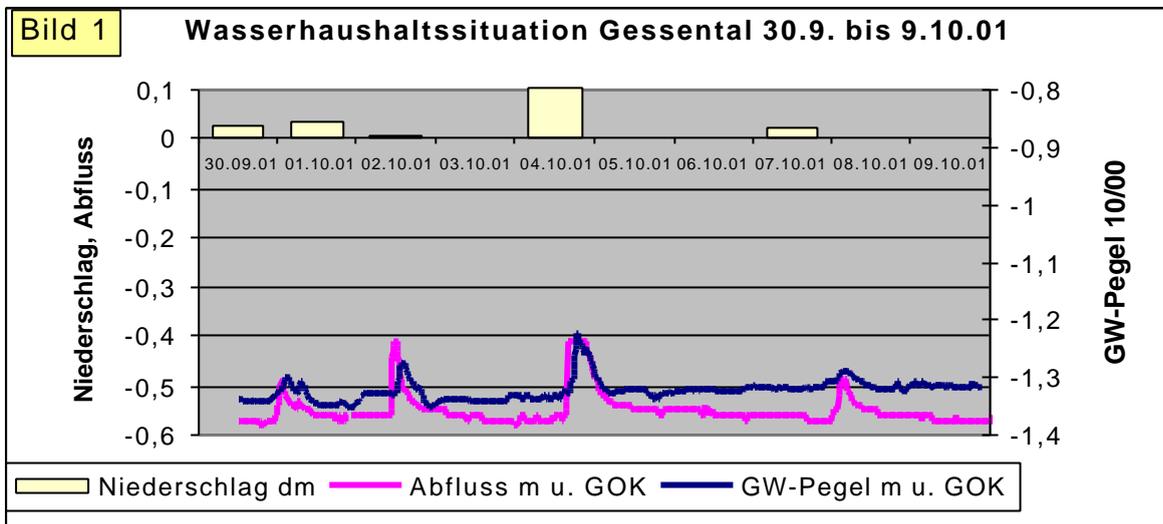


Bild 1, 2 und 3 zeigen beispielhaft hydrogeologische Szenarien der Wasserhaushaltssituation des Gessentals in Abhängigkeit von der Jahreszeit und den tatsächlichen täglichen Niederschlagssummen. Am letzten Tag der dargestellten 10-Tages-Zyklen wurden jeweils Wasserproben an der Grundwassermessstelle 10/00 genommen und die Radonkonzentration bestimmt.

Bild 1: 09.10.01 Rn-222-Konzentration = 34,7 Bq/l
 Bild 2: 12.12.01 Rn-222-Konzentration = 20,3 Bq/l
 Bild 3: 23.07.02 Rn-222-Konzentration = 7,5 Bq/l

Abb. 7.10: Gegenüberstellung der Variation der hydrologischen Situation im Gessental im Laufe des Jahres mit der Variation der Radonkonzentration im Grundwasser

Wasserproben. Die Proben für die Bestimmung der Radonkonzentration und für die hydrochemischen Analysen wurden immer gleichzeitig genommen. Alle Ionenkonzentrationen sind in mg/l angegeben (GELETNEKY 2002, SENITZ unveröff.).

Das Porengrundwasser der Messstelle 10/00 ist gekennzeichnet durch relative Konstanz des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 7.11). Die Temperaturkurve bildet die jahreszeitlichen Schwankungen ab. Die Radonkonzentration folgt näherungsweise der Temperaturkurve. Hiermit spiegelt sich nicht die direkte Temperaturabhängigkeit der Radongehalte wider, sondern eine Aufkonzentration der Radongehalte durch fallende Grundwasserpegelstände in der warmen Sommerzeit (vgl. Abb. 7.8 und Abb. 7.10). Die Werte für den Gehalt an Na, Ca, Fe und Mg schwanken im Untersuchungszeitraum genau so wenig wie die Konzentration von SO_4 (SENITZ unveröff.). Die Gehalte an Ba und Sr zeigen 2001 nahezu identische Entwicklungstendenzen, 2002 ist jedoch eine entgegengesetzte Korrelation zueinander zu beobachten. Die gemessenen Werte für den Sauerstoffgehalt, das Redoxpotenzial und den Mangangehalt schwanken im Untersuchungszeitraum, zeigen aber keine deutlichen Analogien zur Variation des Radongehaltes in den Wasserproben. Der Sauerstoffgehalt verhält sich antikorrelat zur Wassertemperatur (siehe Abb. 7.11).

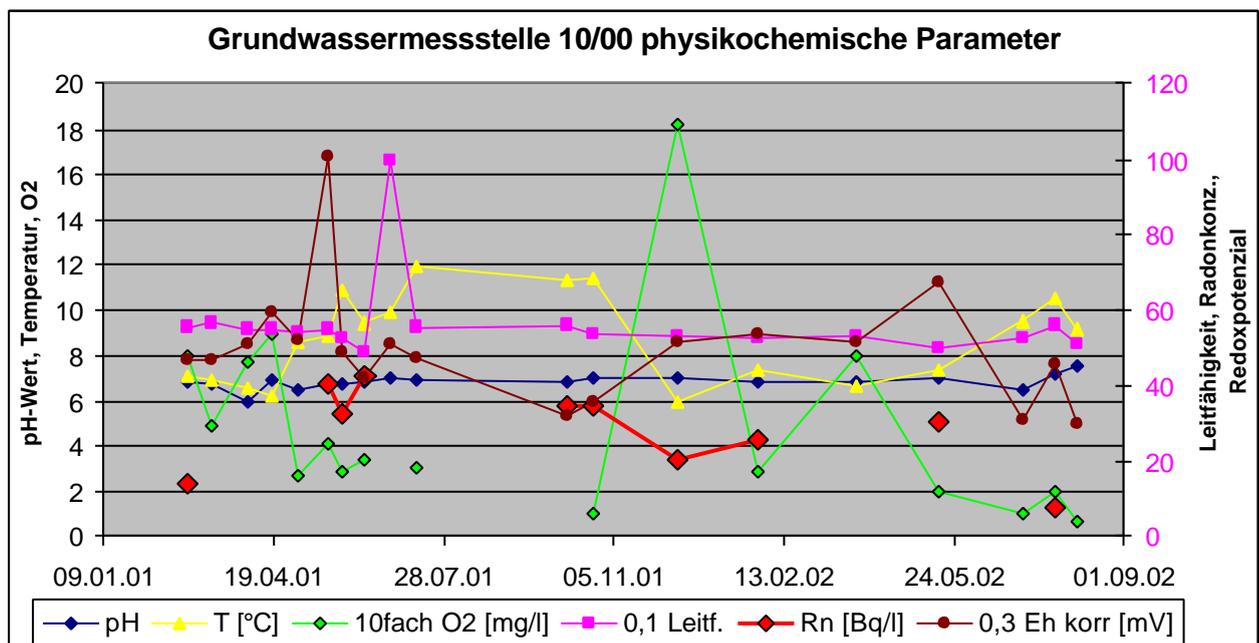


Abb. 7.11: Vergleich der Radonkonzentration mit den physikochemischen Parametern der Grundwassermessstelle 10/00. Die Leitfähigkeit wurde in $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen.

Eine Gegenüberstellung der Ionen-Konzentrationsverläufe und Variation der physikochemischen Parameter mit der Radonkonzentration wird bei der Messstelle 10/00 auch durch die geringe Anzahl gemeinsamer Probenahmetage erschwert. Dadurch können

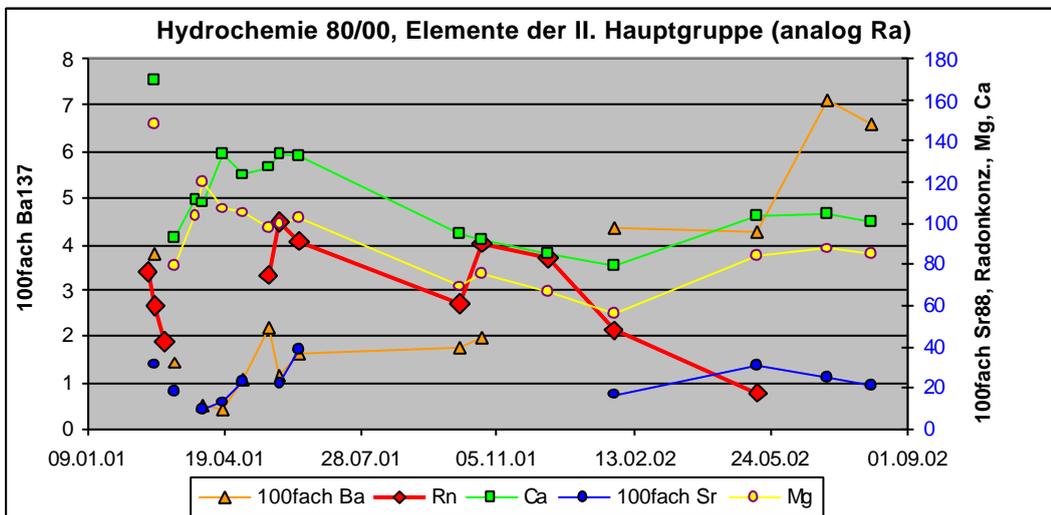
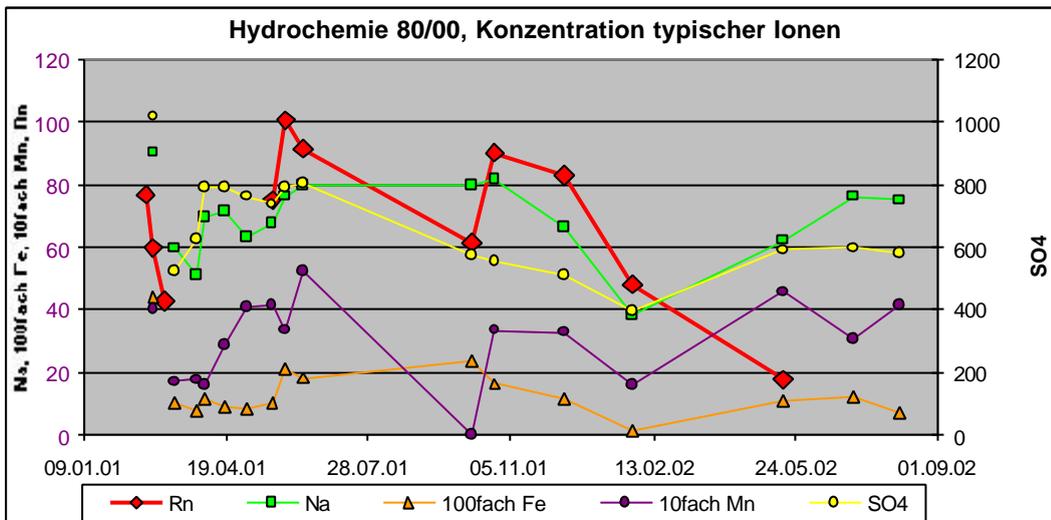
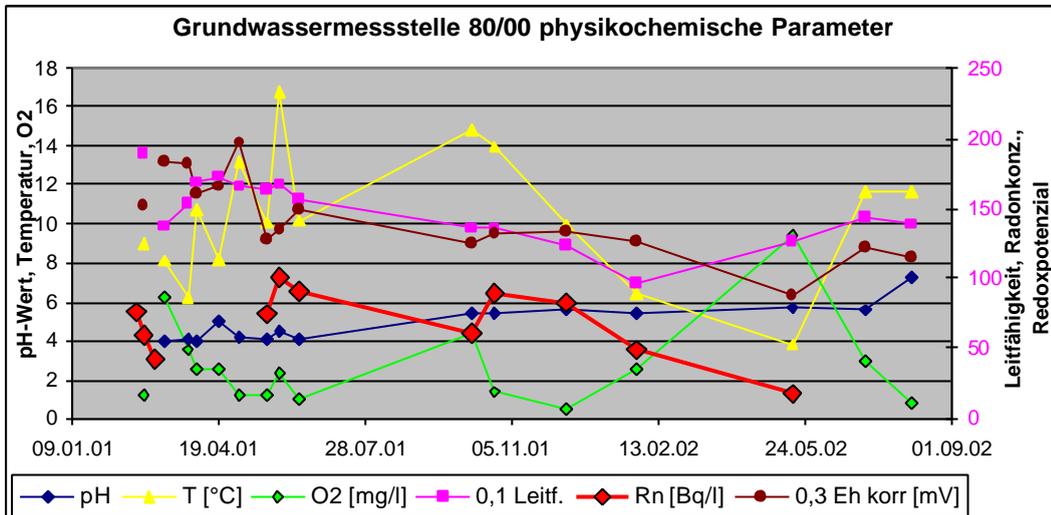


Abb. 7.12: Gegenüberstellung der zeitlichen Variation der Radonkonzentration der Grundwassermessstelle 80/00 mit den physikochemischen Parametern und ausgewählten Ionenkonzentrationen der Wasserproben. Die Ionenkonzentrationen sind in mg/l angegeben, die Radonkonzentration in Bq/l. Die elektrische Leitfähigkeit wurde in $\mu\text{S}/\text{cm}$ gemessen.

eventuelle Abhängigkeiten und Zusammenhänge von Ionenkonzentrationen oder physikochemischen Parametern mit den gemessenen Radonkonzentrationen nicht aufgedeckt werden und eine Interpretation in Bezug auf die Radonkonzentration ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Das Wasser des schwebenden Grundwasserleiters an der Messstelle 80/00 ist durch den Bergbau und die laufenden Sanierungstätigkeiten geprägt (Abb. 7.12). Der pH-Wert steigt im Untersuchungszeitraum durch langfristige Regenerierungsprozesse nach Abschluss der bergbaulichen Aktivitäten langsam aus dem sauren in den neutralen Bereich an und die elektrische Leitfähigkeit hat generell rückläufige Tendenz. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur sind stärker als bei der Messstelle 10/00. Eine Korrelation der **Temperatur** mit der Radonkonzentration ist zeitweise zu beobachten. Der **Sauerstoffgehalt** des Wassers verhält sich überwiegend antikorrelat zur Variation der Radonkonzentration, dagegen zeigen die Kurvenverläufe der Radonkonzentration und des **Redoxpotenzials** hier eine gute Korrelation im Gegensatz zur Messstelle 10/00. Charakteristisch für dieses Wasser sind hohe Gehalte an SO_4 und Fe, die Gehalte an Na, Ca und Mg sind zum größten Teil erhöht und unterliegen großen Schwankungen. Der Ba-Gehalt ist im schwebenden Grundwasser sehr gering, der Sr-Gehalt liegt in der gleichen Größenordnung wie in der Messstelle 10/00. Die Tendenz beider Ionen zueinander ist wieder widersprüchlich. Der **Mangangehalt** ist im schwebenden Grundwasserleiter doppelt so hoch wie im Porengrundwasserleiter und zeigt bis zum Frühjahr 2002 eine gute Korrelation zu der Radonkonzentration. Danach sinkt der Radongehalt im Grundwasser stark ab, was als Hinweis auf den Sanierungsfortschritt gewertet werden muss. Eine starke Konzentrationszunahme am Ende des Untersuchungszeitraumes wurde bei Barium gemessen.

Abschließend muss festgestellt werden, dass nur wenige eindeutige Korrelationen eines physikochemischen Parameters oder eines Elementgehaltes der beiden Grundwassertypen zu den ermittelten Radonkonzentrationen im Untersuchungszeitraum vorliegen. Eine bessere Korrelation der Radonkonzentration mit hydrochemischen Parametern und Ionenkonzentrationen liegt bei der haldennäheren Messstelle 80/00 vor. Die Korrelation von Radongehalten mit dem Redoxpotenzial, dem Mangangehalt und weniger deutlich mit der Gesamtmineralisation bei gleichzeitiger Antikorrelation zum Sauerstoffgehalt zeigt, dass bei reduzierenden Verhältnissen, bei denen der Schwermetall-Transport im Grundwasser generell erhöht ist, höhere Radonwerte auftreten. Hiermit wird der Einfluss der Haldensickerwässer auf die Radongehalte im Grundwasser ähnlich wie bei den Seltenen-Erden-Elementen deutlich. Es wird jedoch auch deutlich, dass gegen Ende der Messerhebungen in der Grundwassermessstelle 80/00 der Mangangehalt und die Gesamtmineralisation ansteigt, obwohl sich die Radongehalte entsprechend dem

Sanierungsfortschritt deutlich erniedrigen. Eine Erklärung hierfür konnte bisher nicht gefunden werden.

7.5.2 Radonanreicherungen im Haldensickerwasser

Sickerwasserproben wurden von den Messstellen Q4, Q8 und Q9 am Fuß der Nordhalde genommen (Abb. 6.6). Q4 befand sich an der westlichen Flanke der Halde in einem bewaldeten Bereich und entspricht dem Haldensickerwassermesspunkt e-443 der Wismut GmbH. Es handelt sich um einen oberirdischen flächigen Sickerwasseraustritt mit geringer Schüttung, vor dem sich eine ganzjährig wassergefüllte Mulde ausgebildet hatte. Die Wasserproben wurden aus der Mulde genommen. Es war der wichtigste Haldensickerwasseraustritt im Westen der Nordhalde. Die Probenahmepunkte Q8 und Q9 sind Sickerwassermessstellen am nördlichen Fuß der Halde im Bereich von im Jahre 2001 durch die Wismut GmbH angelegten frischen Schürfen (Abb. 7.13).



Abb. 7.13: Schurf mit Sickerwassermessstelle Q8 am Nordfuß der Nordhalde. Blick von der Haldenabtragsfläche in den Schurf mit in Pfützen auftretendem Sickerwasser - Mai 2002.

Das Haldensickerwasser der Nordhalde ist geprägt durch den Uranbergbau, durch die für die Urangewinnung notwendigen technologischen Prozesse und die dadurch bedingt entstehenden Abfall- und Reststoffe. Die Sickerwassermessstellen wurden zu verschiedenen

Zeiten an den drei oben genannten Punkten des Haldenkörpers beprobt. Das Haldenmaterial hat eine sehr inhomogene Zusammensetzung und besteht hauptsächlich aus Abraum des Tagebaus Lichtenberg, der von 1958 bis 1971 in mehreren Etappen aufgeschüttet wurde. Bis 1966 wurde unter anderem kohlenstoffreiches, z.T. zu endogenen Bränden neigendes Material verkippt, der Abraum von 1969 bis 1971 besteht aus quartären Deckschichten, unterdevonischen Tentakulithenschiefern, Kalktonschiefern und Diabasen mit geringem Säurebildungspotenzial (GELETNEKY 2002). Die beprobten Messstellen zeigen unterschiedliche Wertebereiche der Radonkonzentration. Die stark variierenden Radonkonzentrationen der Wasserproben aus den Messstellen Q8 und Q9 sind gegenüber den relativ konstanten Messwerten der Proben von Q4 um den Faktor 2 bis 4 erhöht. Ursachen dafür können außer der inhomogenen Zusammensetzung des Haldenmaterials die unterschiedliche Höhe der Messstellen in m über NN und der Messstellentyp sein.

Die Messstelle Q4 an der Westflanke der Halde war eine natürliche Sickerwasseraustrittsstelle aus dem Haldenfuß in einer Höhe von ca. 270 m über NN. Sie zeigte bis zu ihrer Zerstörung im Sommer 2001 trotz entsprechenden Fortschritts des Haldenabtrags relativ konstante niedrige Radonkonzentrationen von 30 ± 10 Bq/l (siehe Abb. 7.14). Die nach Abtrag des ehemals aufgeschütteten Haldenmaterials durch die Wismut GmbH im Gebiet der Messstelle Q4 ab Herbst 2001 genommenen Proben zeigen bei ähnlicher Schüttung das positive Ergebnis der Sanierung. Die Messwerte verringerten sich um den Faktor 10.

Ab Herbst 2001 konnten zwei neu eingerichtete Sickerwassermessstellen in Form von frisch angelegten Schürfen am nördlichen Haldenfuß in einer Höhe von 245 bis 250 m über NN beprobt werden. Der in Abb. 7.14 dargestellte Verlauf der Radonkonzentrationen an den beiden Probenahmestellen Q8 und Q9 ist während der gesamten Beprobungsdauer sehr ähnlich, nur gegen Ende wird er vermutlich wegen des weit fortgeschrittenen Haldenabtrags unterschiedlich.

Die beiden Messstellen Q8 und Q9 wiesen von Oktober bis Anfang Dezember 2001 im Vergleich zum Grundwasser und zu Q4 erhöhte Radonkonzentrationen von 85 bzw. 110 Bq/l mit großen Schwankungen der Messwerte von ± 20 Bq/l auf. Danach kam es bei schnell vorangehendem Haldenabtrag zu einem tendenziellen Sinken der Messwerte mit großen Schwankungen. Der Abtrag der Halde in mehreren Abtragsstufen führte allmählich zu einer geringer werdenden Mächtigkeit des Haldenmaterials über den Sickerwasseraustrittsstellen. Andererseits verkürzten sich die Durchflusstrecken und damit die Verweilzeiten und Reaktionsmöglichkeiten des in den Haldenkörper eindringenden Niederschlagswassers. Transportwege für gelöste Frachten wurden kürzer. Die Überlagerung aller Faktoren bedingte die registrierten Schwankungen der Messwerte. Der endgültige Abtrag des Haldenkörpers im

Bereich der Schürfe führte im Sommer 2002 bei Abschluss der Radonmessungen zu dem Minimalwert von 2,5 Bq/l bei Q9. Die Messstelle Q8 bestand einige Wochen länger als Q9.

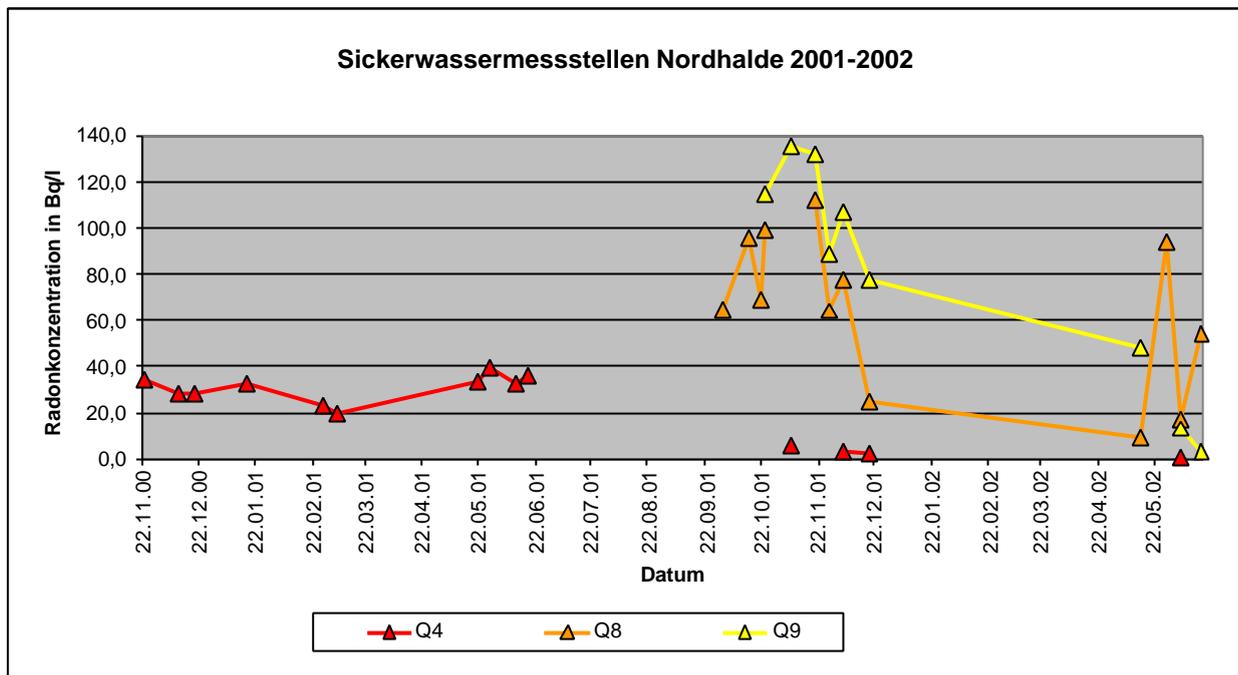


Abb.7.14: Radonkonzentrationen im Sickerwasser der Nordhalde in Abhängigkeit vom Abtrag der Nordhalde. Die an der Westflanke gelegene Messstelle Q4 existierte in ihrer natürlichen Form bis zum endgültigen Haldenabtrag in diesem Bereich im Sommer 2001 und wurde dann durch einen Sickerwasseraustritt aus dem neu konturierten Gelände an gleicher Stelle ersetzt. Q8 und Q9 sind Sickerwasseraustritte aus im Sommer 2001 neu angelegten Schürfen an der Nordflanke der Halde. Die Probenahme erfolgte auch hier bei fortschreitendem Haldenabtrag, wodurch die gemessene Radonkonzentration tendenziell ständig abgenommen hat.

In Analogie zu der Abhängigkeit der Radonkonzentrationen im Grundwasser vom Niederschlag und dem Grundwasserpegelstand ist eine Auswertung der gemessenen Radonkonzentrationen im Haldensickerwasser in Abhängigkeit von den Niederschlagswerten durchgeführt worden. Eine Gegenüberstellung der gemessenen Radonkonzentrationen mit den Tages-Niederschlagssummen am Tag der Probenahme und den Vortagen zeigt, dass nur der Niederschlag am Tag der Probenahme einen Einfluss auf die gemessenen Radonkonzentrationen in den Sickerwasserproben hat. Tendenzuell treten höhere Radonkonzentrationen in den Sickerwässern auf, wenn Niederschläge am Messtag zu verzeichnen sind. Dafür kommen zwei Ursachen in Betracht:

- Zum einen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Halde extrem gut wasserdurchlässig ist. Niederschlagswasser bewegt sich sehr schnell durch die Porenräume

und Klüfte des Haldenmaterials. Das führt zu einer schnellen Durchdringung des Haldenkörpers und zu kurzen möglichen Reaktionszeiten mit dem Haldenmaterial.

Abb. 7.15 zeigt exemplarisch für die Sickerwassermessstellen Q8 und Q9 das Verhältnis von Niederschlag und Radonkonzentration. Wenn man die gemessenen Radonkonzentrationen in den Wasserproben im Verhältnis zu dem Niederschlag des Probenahmetages betrachtet, dann erhält man eine ansteigende Kurve, allerdings mit geringem Korrelationskoeffizient. Bei steigenden Niederschlägen erhöht sich somit tendenziell die Radonkonzentration der Proben. Erhöhter Niederschlag führt zu verstärkter Auswaschung des Radons aus dem Haldenmaterial und seiner Anreicherung im Sickerwasser.

Das Haldenmaterial ist stark Ra-226-haltig, da dem Gestein nur Uran entzogen wurde. Rn-222 wird so ständig neu gebildet und füllt die Hohlräume der Halde. Die Erhöhung der Radonkonzentration im Sickerwasser muss sogar noch stärker sein als in Abb. 7.15 zu sehen ist, weil der Niederschlag ja auch direkt in die Sickerwassermessstelle gelangt und damit eine Verdünnung bewirkt.

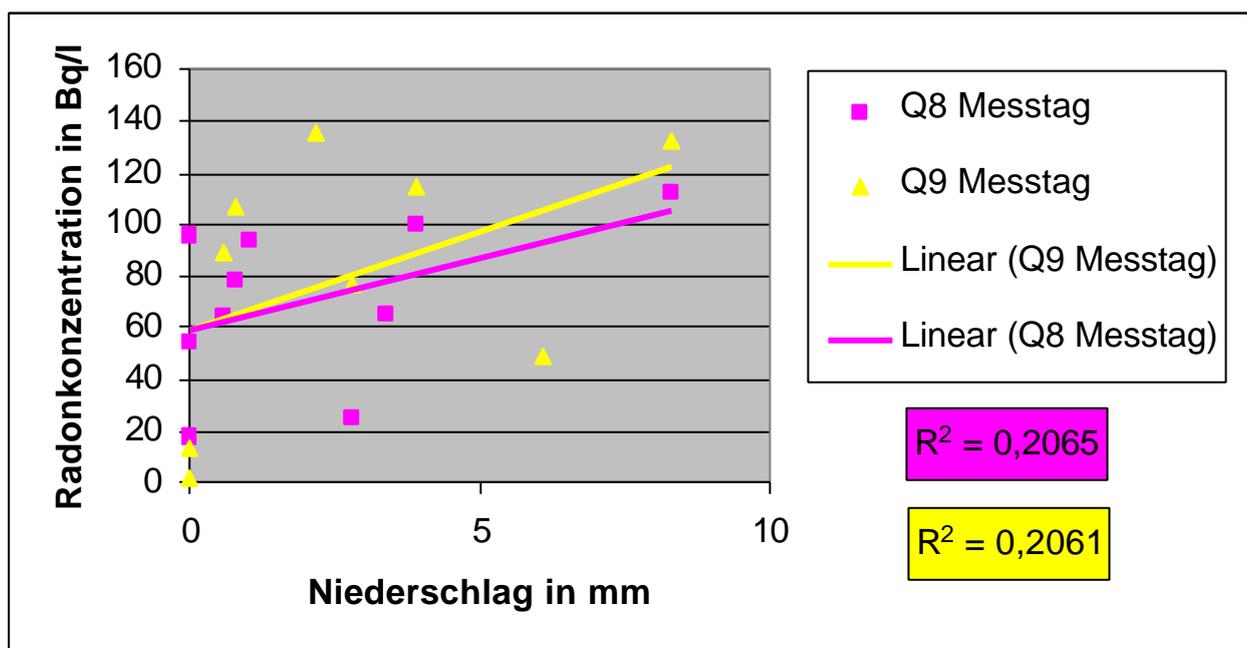


Abb. 7.15: Darstellung der Abhängigkeit der Radonkonzentration von Sickerwasserproben vom Niederschlag am Probenahmetag

- Eine andere, eher plausible Erklärung für die direkt mit dem Niederschlagsereignis steigende Radonkonzentration in den Sickerwassermessstellen wäre ein kommunizierendes Porensystem im Inneren der Halde ähnlich einem Karstaquifer. Wie in EISENLOHR & SURBECK (1995) beschrieben, sind die Porenräume des Karstsystems mit Wasser gefüllt, das sich entsprechend seines Alters und daraus resultierender Kontaktzeiten mit Radon anreichern kann. Niederschlag bewirkt einen Impuls auf das Wasser in den Porenräumen.

„Altes“ Wasser mit hohen Radonkonzentrationen wird in einem ersten Schub abgegeben. Dabei kommt es zu einem Auswaschungseffekt und danach niedrigeren Radonkonzentrationen im Sickerwasser durch nachströmendes neues Niederschlagswasser. An der Sickerwassermessstelle Q4 zeigen die Radonkonzentrationen kaum eine Abhängigkeit vom Niederschlag. Ursachen dafür können die natürliche Struktur der Messstelle, ihre Lage in einem bewaldeten Bereich und die im Vergleich zu Q8 und Q9 um ca. 20 m höhere Lage der Messstelle sein. Dadurch verkürzt sich der Weg und die Aufenthaltszeit des Niederschlagswassers im Porensystem der Halde.

7.5.3 Variabilität der Radongehalte im Oberflächenabfluss

Für die Bestimmung der Radonkonzentration im Oberflächenabfluss des Gessentals wurden in Verbindung mit den laufenden hydrochemischen Untersuchungen der Wässer vier Messstellen im Gessenbach und zwei im Badergraben mit unterschiedlichen Charakteristiken ausgewählt. Die gemessenen Radonkonzentrationen sind in Abb. 7.16 dargestellt. Die Lage der Messstellen kann Abb. 6.6 entnommen werden.

G7 und B3 sind Messstellen in Bereichen mit künstlichem Bachbett in Form von U-förmigen Betonplatten, die nur an den Nahtstellen eine Anreicherung mit aufsteigendem Bodengas bzw. Zutritt von Wasser erlauben. Das im Wasser gelöste Radon entgast in die Luft und von unten kann nur eine äußerst geringe Menge an Radon infolge von Diffusion dem Bachwasser zugeführt werden. B3 liegt im Zuflussbereich des Badergrabens, 600 m vor dem Zusammenfluss mit dem Gessenbach. G7 liegt im Zuflussbereich des Gessenbaches 70 m vor dem Zusammenfluss. 18 Messungen haben ergeben, dass die Radonkonzentration des Bachwassers hier nur maximal 0,2 Bq/l beträgt. Der Radongehalt liegt bei minimalen Werten zwischen 0 und 0,2 Bq/l.

Eine Ausnahme bildet der Messwert G7 vom 17.01.2001 mit einer Radonkonzentration von 1,4 Bq/l. Die Probe wurde bei einer Wassertemperatur von 0°C genommen. Hier wirkt sich die hohe Löslichkeit von Radon in Wasser bei niedrigen Temperaturen aus. Weiterhin war eine stark verringerte Fließgeschwindigkeit des kalten Wassers unter dem teilweise überdeckenden Eis zu beobachten und das Eis verringerte zusätzlich die Entgasung des Wassers. Eine weitere Ausnahme sind die Messwerte vom 20.11. und 28.11.2001 bei B3. Sie fallen zeitlich mit den Maxima der Radongehalte in den Sickerwassermessstellen Q8 und Q9 am ca. 25 m entfernten anderen Talrand zusammen (siehe Abb. 7.5 und Tab. 7.4). Hier könnte der Infiltrations-Einfluss des Sickerwassers auf das Bachwasser oberhalb des künstlichen Bachbettes so groß gewesen sein, dass bei B3 noch eine Radonkonzentration von 0,4 Bq/l gemessen werden konnte.

Die Messstelle B1 ist die letzte Messstelle des Badergrabens vor dem Zusammenfluss mit dem Gessenbach. B1 zeigt am 20.11. und 28.11.2001 gleichsinnig zu B3 erhöhte Radon-

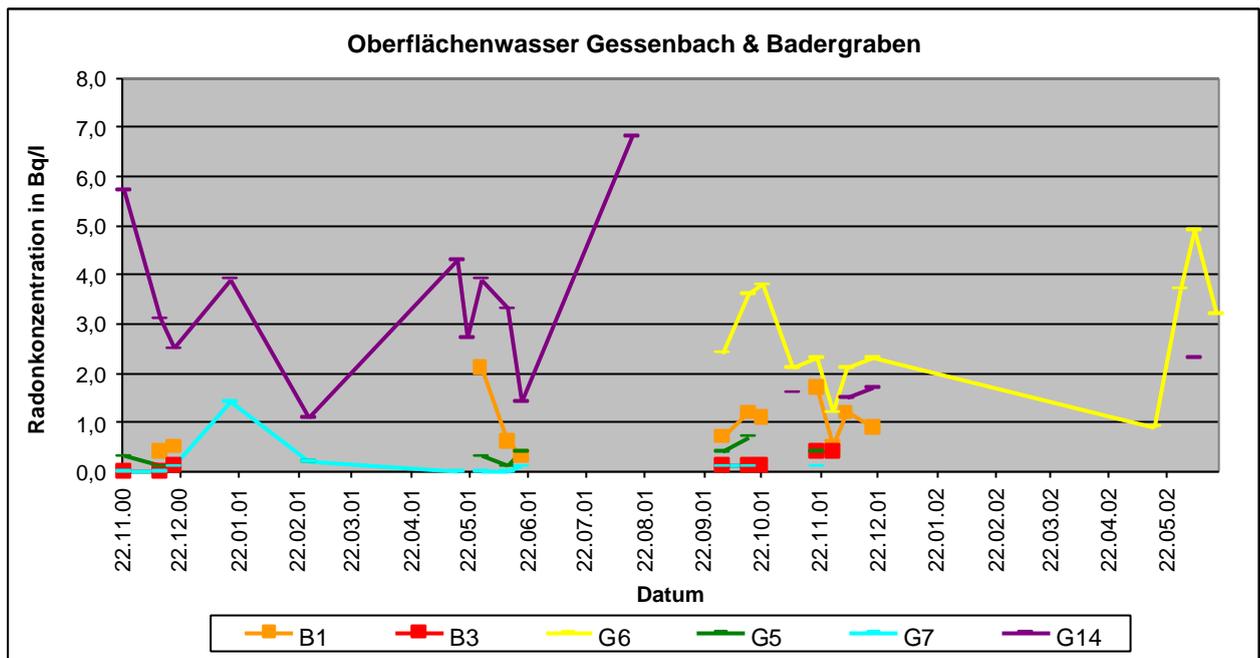


Abb. 7.16: Radonkonzentrationen im Oberflächenwasser von Gessenbach und Badergraben

gehalten. Es besteht deshalb die Vermutung, dass hier ebenfalls Sickerwasser vom NW-Rand der Nordhalde verstärkt in die Auesedimente des Gessentals eingedrungen ist und schließlich Radon in das Oberflächenwasser des Badergrabens konvektiv bzw. mittels Bodenwasser gelangt ist. Bei einer geschätzten Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in der Talaue von 1 bis 2 m am Tag (rechnerisch mögliche Fließgeschwindigkeit von 0,1 bis 8,6 m pro Tag) ist aber anzunehmen, dass von dem durch versickerndes Niederschlagswasser in der Halde aufgenommenen Radon nicht viel im Bach nachgewiesen werden kann. Unklar ist der Einfluss des alten vorbergbaulichen Bachbettes des Gessenbaches als Fließweg des Sickerwassers. Weiterhin kommen als Wegsamkeiten des Sickerwassers größere von Mäusen und anderen Tieren geschaffene Hohlräume im Boden in Frage.

Neben der Möglichkeit der zeitweiligen Effluenz von Haldensickerwasser aus der Nordhalde kann auch ein Sickerwasserpfad von der Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde nicht ausgeschlossen werden. Größer dürfte der Einfluss der Entgasung aus dem Boden bzw. dem Grubengebäude und dadurch in den Talsedimenten aufgenommenem Radon sein. Die Radonkonzentration im Bodengas und damit im Grubengebäude liegt mit 150 bis 200 Bq/l über normalen Radonkonzentrationen in der Bodenluft und kann auch zu einer Radonanreicherung im Oberflächenabfluss beitragen.

Die Messstelle G5 liegt im Gessenbach nach dem Zufluss des Badergrabens 350 m nach dem Zusammenfluss bachabwärts auf halber Strecke zur Messstelle G6. Die gemessenen Radonkonzentrationen von 0,1 bis 0,7 Bq/l bewegen sich entsprechend den durchschnittlichen Radongehalten im Oberflächenwasser (WIEGAND 1999) und unter

Berücksichtigung der geogenen Gegebenheiten im oberen Normalbereich und zeigen somit keine bergbaulichen Einflüsse.

An der Messstelle G6 würde man ähnliche Messwerte wie bei G5 erwarten. Sie befindet sich ca. 300 m bachabwärts von G5 in der gleichen geologischen Umgebung der Auesedimente. Doch zeigt sie auffallend hohe Messwerte zwischen 0,9 und 4,9 Bq/l. Infolge dessen wurde die Umgebung dieser Messstelle genauer untersucht. So wurde um G6 im Bach bachaufwärts und –abwärts ein Profil mit Probenahmepunkten im 10 m-Abstand gelegt. Messungen auf diesem Profil zeigen an einigen Tagen ein Maximum der Radonkonzentration im Oberflächenwasser von bis zu 8,7 Bq/l 10 m bachaufwärts von G6 (siehe Abb. 7.17). Diese erhöhten Werte scheinen mit der hydrogeologischen Gesamtsituation zusammenzuhängen. Zwischen den Messstellen G5 und G6 befindet sich der Rand des Grundwasserabsenkungstrichters. Es erfolgt somit ein Wechsel von vorwiegend influenten Verhältnissen des Gessenbaches im Bereich des Absenkungstrichters zu effluenten Verhältnissen bachabwärts oberhalb der Messstelle G6. Durch Zutritt von Grundwasser in den Bach wird das Oberflächenwasser mit Radon angereichert. Mögliche Ursachen für die unterschiedliche Ausprägung des Maximums 10 m bachaufwärts von G6 sind im Zusammenhang mit dem variierenden Grundwasserpegelstand jahreszeitliche Schwankungen der Radonkonzentration im zutretenden Grundwasser und eine Punktquelle 10 m oberhalb G6 im Bach, die als Wegsamkeit für einen Grundwasserzutritt dienen kann und über einen scheinbar hydraulischen Mechanismus gesteuert wird (siehe Kapitel 7.6).

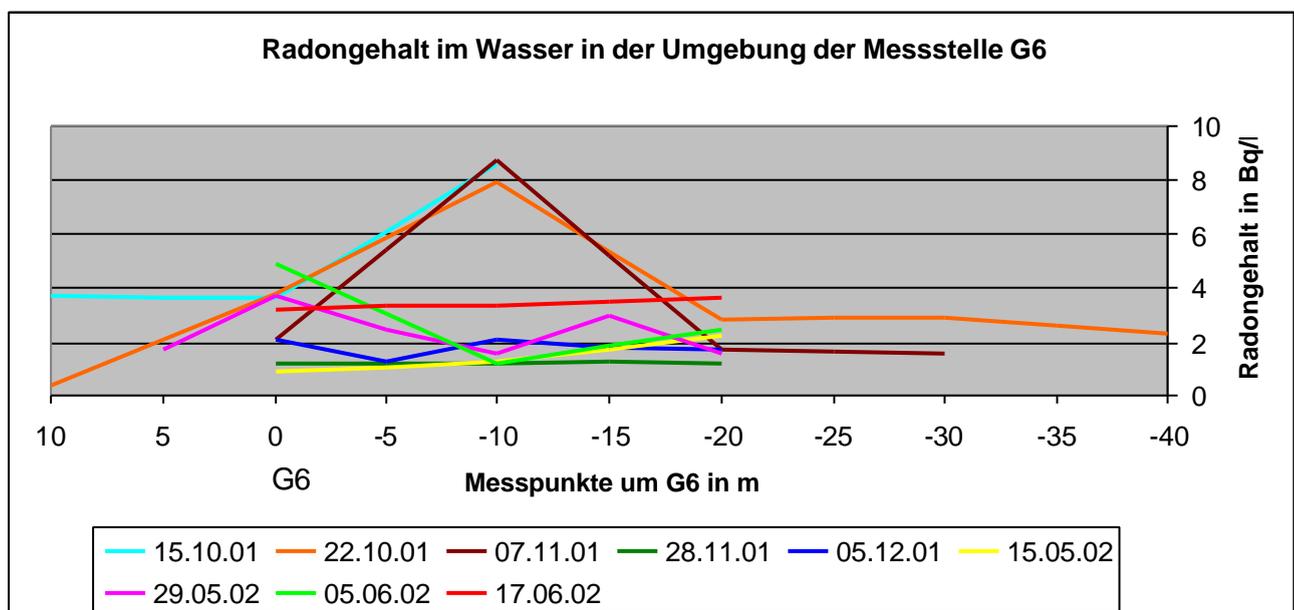


Abb. 7.17: Radonkonzentrationen im Oberflächenwasser auf einem Profil bei G6

Die am stärksten durch den Bergbau beeinflusste Oberflächenwassermessstelle ist G14. Der Gessenbach fließt am westlichen Fuß der Nordhalde entlang. Die Messstelle G14 liegt

wenige Meter entfernt von der Sickerwassermessstelle Q4 und zeigt die Infiltration des Sickerwassers in den Bach. Ein Sprung in den Messwerten ist im Sommer 2001 im Zusammenhang mit dem Abschluss des Haldenabtrags im Bereich von Q4 und dem Abschluss der Sanierungsarbeiten an dieser Stelle zu sehen. Ursache für die im August 2001 gemessene hohe Radonkonzentration von 6,8 Bq/l vor dem Abschluss der Sanierungsarbeiten kann ein geringer Trockenwetterabfluss bei konstanter Zumischung von Haldensickerwasser sein. Der Bachverlauf und die Lage der Messstelle G14 wurden durch die Sanierung nicht verändert.

7.5.4 Kartierung der Radonkonzentration in Wasser

In Ergänzung zu der Messwertaufnahme in Zeitreihen wurde am 26.06.2001 vor dem Abtrag des nördlichen Bereiches der Nordhalde eine Stichtagsbeprobung an den im Vorfeld beschriebenen Messstellen von Grundwasser, Sickerwasser und Oberflächenwasser und weiteren für die hydrogeologische Charakterisierung des Untersuchungsgebietes wichtigen Wasser-Messstellen durchgeführt. Die Ergebnisse der Radonmessungen sind in Abb. 7.18 zusammenfassend dargestellt. Für eine Zuordnung der Messstellennummern kann Abb. 6.6 verwendet werden. Die Probenahme erfolgte bei der Stichtagsbeprobung aufgrund der hohen Zahl der Probenahmestellen mit Gaswaschflaschen.

Die Verhältnisse der gemessenen Radonkonzentrationen der einzelnen Messstellen zueinander entsprechen den in Kapitel 7.5.1, 7.5.2 und 7.5.3 beschriebenen Größenordnungen und Verhältnissen. Die typischen Charakteristika der verschiedenen Probenahmestellen zeigen sich in der räumlichen Verteilung der gemessenen Radonkonzentrationen. Durch die Probenahme mit Gaswaschflaschen liegen die gemessenen Absolutwerte der Radonkonzentration (wie in Kapitel 7.2 erläutert) über den in Tabelle 7.4 zusammengefassten Messwerten nach der PYLON-Methode.

Die Messstelle am Lammsbach repräsentiert einen vom Bergbau unbeeinflussten, regional geprägten Vorfluter. Bei Q4 wurde ein nördlich gelegener kleiner Sickerwasseraustritt mit beprobt, bei G14 wurden vor und nach der regulären Probenahmestelle in jeweils 25 m Abstand ergänzende Proben genommen. Dieses verdichtete Messstellennetz zeigt deutlich, wie stark die Messwerte von lokalen Sickerwasserzutritten beeinflusst sind und wie stark die Sickerwasserzusammensetzung in Abhängigkeit vom durchströmten Haldenmaterial und dessen inhomogener Struktur variiert.

Der Gessenbach erreicht bergbauunbeeinflusst mit einer Radonkonzentration von 0,5 Bq/l das Untersuchungsgebiet. Auf dem Weg entlang der Westflanke der Nordhalde kommt es durch Sickerwasserzutritte zu einer signifikanten Erhöhung der Radonkonzentration auf maximal 38,4 Bq/l. Die Radonkonzentration klingt auf dem weiteren Fließweg durch Entgasung schnell auf einen nur leicht erhöhten Wert von 1,5 Bq/l ab und erreicht dann den ca. 100 m langen Bereich mit künstlich ausgebautem Bachbett. Hier erreicht die Radonkon-

Stichtagsbeprobung
Gessental
26.06.01

Oberflächenabfluss:

- Gessenbach
- Badergraben
- Lammsbach

Sickerwasser:

- Nordhalde W
- Nordhalde N

Grundwasser:

- RKS 02/00
- RKS 10/00

Radonmessungen,
Angaben in Bq/l

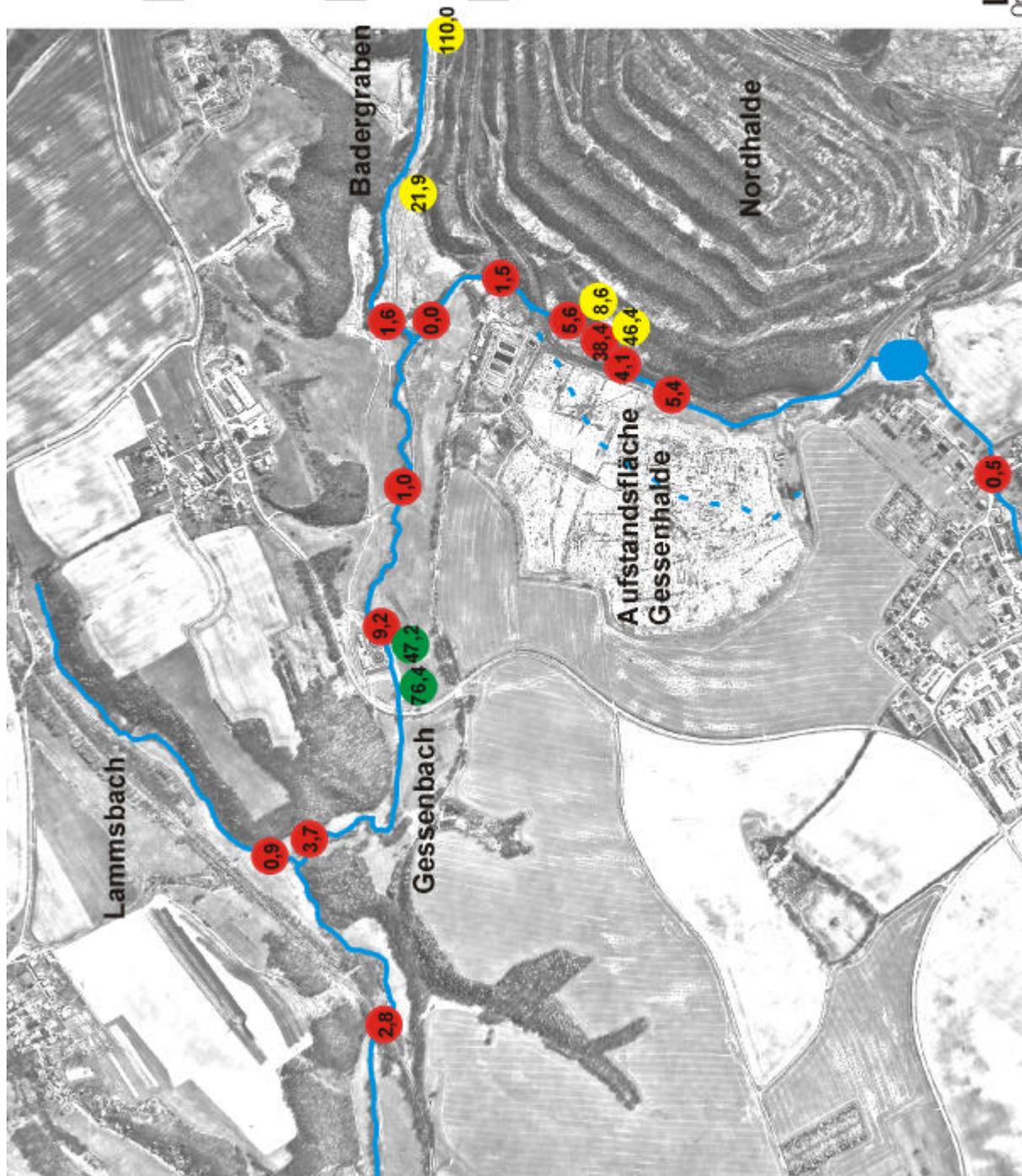


Abb. 7.18: Ergebnisse der Radonmessungen der Stichtagsbeprobung im Gessental am 26.06.2001. Die Proben wurden mit Gaswaschflaschen genommen. Insofern sind die Werte gegenüber vergleichbaren Messwerten mit Probenahme nach der PYLON-Methode um den Faktor 1,4 erhöht.

zentration mit 0 Bq/l ihr Minimum. Nach Zufluss des Badergrabens mit einer Radonkonzentration von 1,6 Bq/l fließt der Gessenbach im natürlichen Bachbett im Bereich des Grundwasserabsenkungstrichters talabwärts mit einer für den Gessenbach typischen Radonkonzentration von 1 Bq/l. Bei der Messstelle G6 steigt wie schon in Kapitel 7.5.3 beschrieben die Radonkonzentration erheblich an und klingt danach durch Entgasung und Zufluss des Lammsbaches langsam wieder ab. Zwischen den Messstellen G5 und G6 liegt der Rand des Grundwasserabsenkungstrichters. In diesem Bereich kommt es zum Wechsel von influenten zu effluenten Verhältnissen.

Die im Sickerwasser der Nordhalde gemessenen Radonkonzentrationen fallen durch ihre große Streuung auf. Sowohl die chemische Zusammensetzung des Haldenmaterials als auch die Kompaktion der Aufschüttung sind lokal sehr stark differenziert. Deshalb ist es nicht möglich, aus Messwerten der Radonkonzentration einer Sickerwassermessstelle auf andere Messstellen zu schließen. Generell sind die Werte unerwartet gering, häufig liegen sie im Bereich von normalen Grundwässern. Sie variieren aufgrund ihrer unterschiedlichen lokalen Lithologie infolge der Haldenschüttungen und aufgrund der unterschiedlichen Entgasungen auf ihren unterschiedlich langen und schnellen Fließwegen.

Die zwei beprobten Grundwassermessstellen im Kluft- und Porengrundwasserleiter mit Anbindung an das regionale hydraulische Regime zeigen regional typische hohe Radonkonzentrationen von 76,4 Bq/l und 47,2 Bq/l. Sie sind in Bezug auf die Radongehalte aller Voraussicht nach, obwohl die Haldenaufstandsfläche der Gessenhalde nur gut 400 m entfernt ist, sickerwasserunbeeinflusst. Die Grundwassermessstellen 80/00 und 95/00 konnten aus technischen Gründen leider nicht beprobt werden.

7.5.5 Radon - Transportwege im Wasser

Die Interpretation der einzelnen Messwerte der Radonkonzentrationen in Grundwasser, Sickerwasser und Oberflächenwasser hat gezeigt, dass die einzelnen Kompartimente nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Radon wird vom Wasser transportiert. Das kann auf verschiedenen Wegen erfolgen und ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Der Transport von Radon ist durch seine Halbwertszeit im Vergleich zu den Fließgeschwindigkeiten des Wassers sehr eingeschränkt. Der Radontransport im Grundwasser beträgt in Abhängigkeit vom k_f -Wert einige Meter; im Sickerwasser sind je nach Verdichtung des Haldenmaterials mehrere 10er Meter Transportstrecke möglich. Im Oberflächenabfluss wirkt dem Transport mit hohen Fließgeschwindigkeiten die Entgasung entgegen. Ein direkter Radonaustrag aus dem Untersuchungsgebiet findet hauptsächlich durch Entgasung statt. Beispiele für den kleinräumigen Transport von Radon sind die Korrelationen zwischen den Messwerten bei Q4 und G14 (siehe Abb. 7.19) und die hohen Messwerte im Oberflächenabfluss in der Umgebung der Messstelle G6. Eine Ursache für die hohen Radonkonzentrationen bei G6 ist der effluente Einfluss

des Grundwassers außerhalb des Grundwasserabsenkungstrichters auf das Oberflächenwasser.

- Abb. 7.19 zeigt einen Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Radonkonzentrationen der Sickerwassermessstelle Q4 und der in unmittelbarer Nähe liegenden Gessenbach-Messstelle G14. Bis zum Sommer 2001 tritt Haldensickerwasser mit einer Radonkonzentration von 30 ± 10 Bq/l in den Gessenbach und führt dort zu erhöhten Radonkonzentrationen von 4 ± 3 Bq/l im Oberflächenabfluss. Die Variation in der Radonkonzentration des Haldensickerwassers prägt deutlich die Radonkonzentrationsschwankungen im Bach. Starke Variationen der Radonkonzentration im Sickerwasser führen zu einer gedämpften Konzentrationsänderung im Bachwasser. Nach Abschluss der Sanierungsarbeiten am westlichen Haldenfuß und Neukonturierung der Haldenflanke werden an der Stelle von ehemals Q4 (jetzt Q4 neu) nur noch Radonkonzentrationen von 3 ± 2 Bq/l mit abnehmender Tendenz gemessen. Entsprechend sinkt auch die Radonkonzentration im unverändert gebliebenen Bachbett auf 2 ± 1 Bq/l.

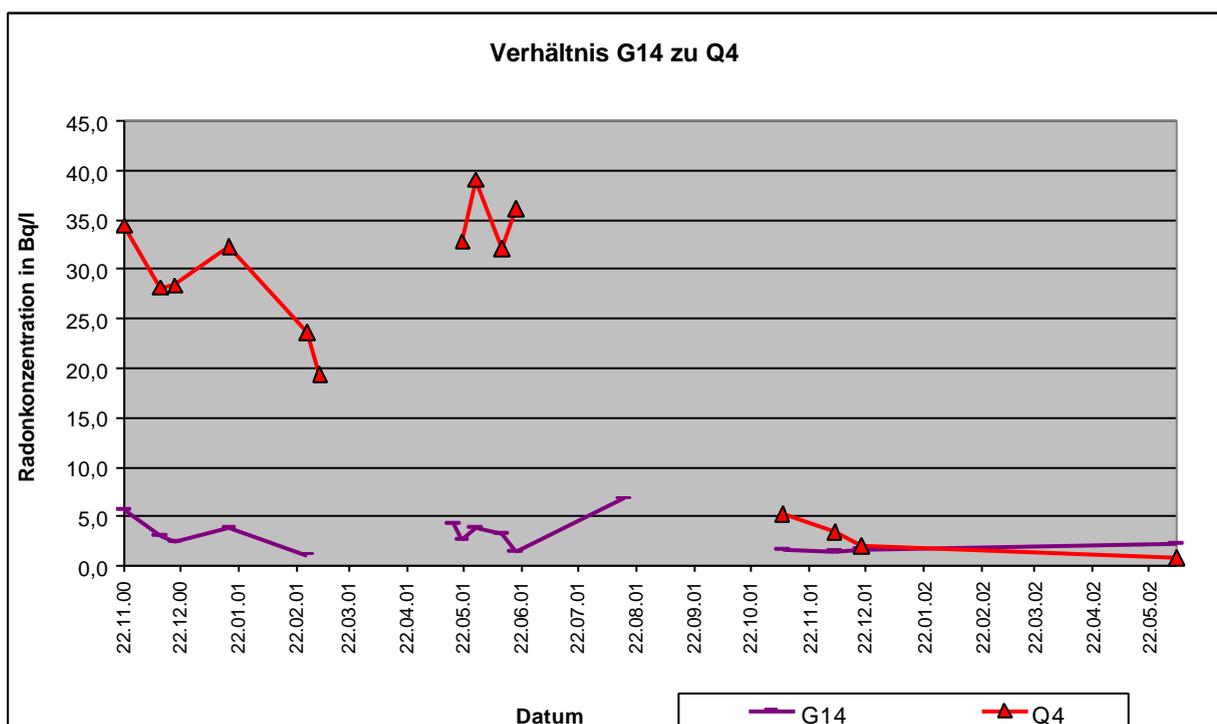


Abb. 7.19: Gegenüberstellung der Radonkonzentrationen der Sickerwassermessstelle Q4 und der Oberflächenwassermessstelle G14 während des Haldenabtrags und nach dem Abschluss der Sanierungsmaßnahmen in der Umgebung der Messstellen

- Es muss immer zwischen dem Transport von Radon und Radium unterschieden werden. Radium kann bei entsprechenden Fließgeschwindigkeiten weit transportiert werden. Der Transport wird aber durch eine unter oxidierenden Bedingungen sehr schlechte

Löslichkeit in Wasser stark eingeschränkt. Ein Radiumaustrag spielt deswegen vorwiegend im Zusammenhang mit dem Sedimentaustag eine Rolle. Hier werden bei Starkregenereignissen große Frachten transportiert. Der Zerfall des Radiums führt dann indirekt zu einem Austrag an Radon.

Die Ursachen für die hohen Radon-Messwerte im Oberflächenabfluss in der Umgebung der Messstelle G6 werden in Kapitel 7.6 genauer untersucht.

7.6 Influenz – Effluenz – Untersuchungen

Die hydrogeologische Gesamtsituation eines Tales ist geprägt durch das Vorherrschen influenter oder effluenter Verhältnisse. Influyente und effluente Verhältnisse können im Talverlauf wechseln und die Lage der Grenze variiert unter Umständen je nach Jahreszeit und Niederschlagssituation. Die hohen Radonkonzentrationen im Oberflächenabfluss in der Umgebung der Messstelle G6 mit zeitweise auftretenden lokalen Maxima lassen auf eine meteorologisch bedingte Variation des Verhältnisses von Oberflächenabfluss zu zutretendem Grundwasser und eine ständige gegenseitige Beeinflussung schließen. Bei einer Tendenz zu influenten Verhältnissen muss eine Abnahme der Radonkonzentrationen im Oberflächenwasser durch Verringerung des zutretenden Grundwassers bzw. sogar ein Verdünnungseffekt der Radonkonzentration des Grundwassers bei Influenz auftreten. Bei Effluenz wird die Radonkonzentration im Bachwasser durch verstärkten Zutritt von Grundwasser erhöht. In der Nähe der Messstelle G6 liegt der Rand des Grundwasserabsenkungstrichters. Durch die seit 1998 laufende Flutung kommt es zu einer langsamen Verlagerung des Absenkungsrandes in Richtung Depressionszentrum.

Eine Analyse der Wasserhaushaltssituation in der Umgebung der Oberflächenwassermessstelle G6 ist durch die Auswertung der Pegelstände der wenige Meter entfernten Grundwassermessstelle 10/00 möglich. Abb. 7.20 zeigt gemessene Grundwasserstände der Messstelle 10/00 und das zweimal vermessene Bachniveau um G6 zu den Zeiten der Radon-Probenahme. Der Grundwasserspiegel schwankte innerhalb eines Jahres um maximal 0,65 m (siehe Abb. 7.3). Mit den ohne Berücksichtigung des Grundwasserpegelstandes gewählten Probenahmezeiten für die Bestimmung der Radonkonzentration im Wasser wurde ein zufälliger Schwankungsbereich des Grundwassers von 0,3 m abgedeckt.

Der Wasserspiegel des Baches zeigt abgesehen von extremen Starkregenereignissen kaum Schwankungen. Bei einem Vergleich des Grundwasserspiegels mit dem Wasserspiegel des Baches fallen die niedrigen Grundwasserstände am 15.10.01, 22.10.01 und 07.11.01 auf. Sie entsprechen den in Abb. 7.17 auffallenden Kurven mit Maxima der Radonkonzentration im Oberflächenwasser 10 m oberhalb von G6. Bei Auswertung der ganzjährigen Daten des Grundwasserpegelstandes ist zu sehen, dass an der Messstelle G6 mehr oder weniger permanent effluente Verhältnisse herrschen. Nur im Spätsommer und Herbst besteht in

Trockenzeiten die Möglichkeit, dass der Grundwasserspiegel auf die Höhe des Bachniveaus absinkt. Im Laufe des gesamten Jahres wurden bei G6 auffällig hohe Radonkonzentrationen im Oberflächenabfluss gemessen; in Situationen mit einem niedrigen Grundwasserpegel in Bachniveau-Höhe wurde zusätzlich ein Maximum der Radonkonzentration 10 m Bach aufwärts von G6 registriert. Dieses Maximum fällt bachabwärts bis G6 sehr schnell wieder ab. Hier können Vermischungsprozesse und Entgasungseffekte eine Rolle spielen.

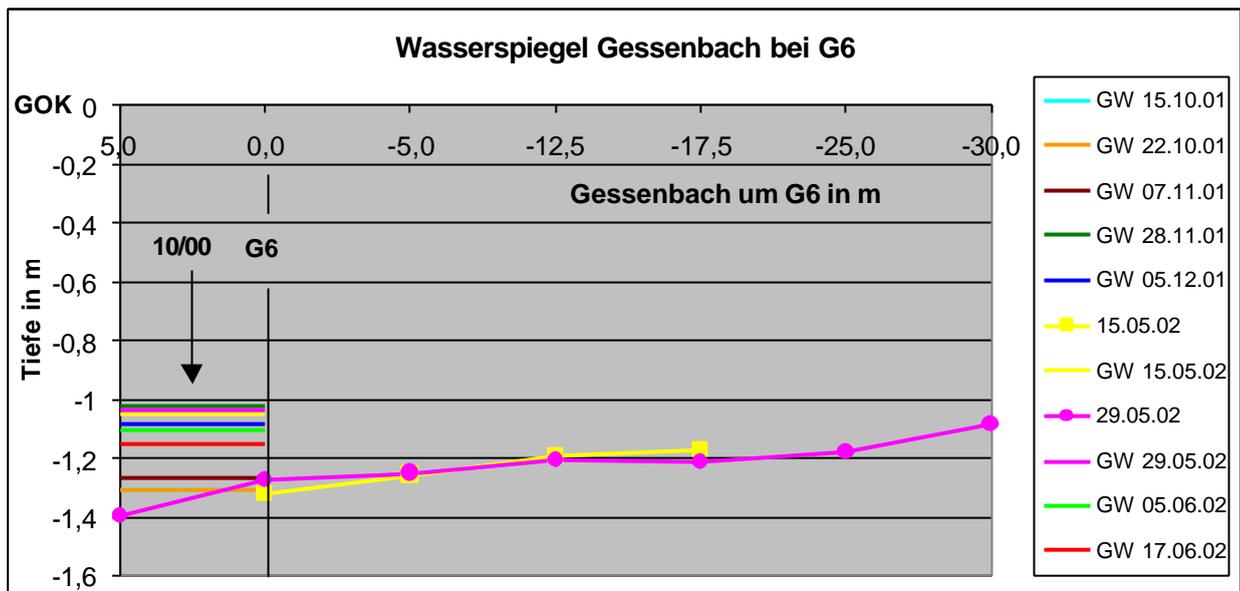


Abb. 7.20: Gegenüberstellung des Grundwasserspiegels (gemessen in 10/00) mit dem Wasserspiegel des Gessenbachs in der Umgebung der Messstelle G6. Die Grundwasserstände vom 15.10.01 und vom 22.10.01 überdecken sich in der Abbildung.

Bei einem genaueren Vergleich der Abb. 7.17 und 7.20 fällt auf, dass bei steigendem Grundwasserspiegel der Messstelle 10/00 die Radonkonzentrationen des gemessenen Profils erst das markante Maximum verlieren und bei hohem Grundwasserspiegel insgesamt über den Profilverlauf einheitlicher werden und auf ein Niveau von 1 Bq/l absinken. Der scheinbar sprunghafte Übergang von Messtagen mit einem markanten Maximum der Radonkonzentration 10 m oberhalb G6 zu Messtagen ohne Radonmaximum im Profilverlauf entspricht dem Sprung des Grundwasserpegelstandes von 1,267 m unter GOK auf 1,149 m unter GOK. Der dazwischen liegende Bereich der Pegelstände wurde bei der Probenahme für die Radonbestimmung im Gessenbach nicht erfasst. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass das Maximum der Radonkonzentration bei steigendem Grundwasserpegelstand nicht sprunghaft, sondern kontinuierlich zurückgeht.

Offen bleibt die Frage nach der Ursache für die Ausprägung des signifikanten Maximums bei niedrigem Grundwasserpegelstand. Der Grundwasserstand und die Höhe des Maximums verhalten sich gegenläufig und zeigen eine Antikorrelation. Im Regelfall muss davon

ausgegangen werden, dass bei Verringerung des Grundwassereinflusses auf das Bachwasser die Radonkonzentration im Oberflächenabfluss niedriger wird. Dem gegenüber ist Grundwasser bei niedrigem Grundwasserspiegel radonreicher als bei hohem Grundwasserspiegel. Im Spätsommer und Herbst ergänzen sich geringe Niederschläge und hohe Evapotranspiration als Faktoren zur Absenkung des Grundwasserspiegels und damit zur Erhöhung der Radonkonzentration im Grundwasser. Alle diskutierten Einflüsse dürften aber nicht ausreichen, um eine Erhöhung der Radonkonzentration im Bachwasser in der gemessenen Größenordnung zu bewirken. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich 10 m oberhalb von der Messstelle G6 eine Punktquelle bzw. eine lineare Quelle senkrecht zum Bachverlauf mit einer lokal erhöhten Permeabilität befindet, die als Wegsamkeit für einen Grundwasserzutritt dienen kann. Vorstellbar wäre ein scheinbar hydraulischer Mechanismus für den Zutritt von Grundwasser bei Absenkung des Grundwasserspiegels. Schichtgrenzen und Störungen im anstehenden Gestein sind in der Umgebung des Messpunktes bekannt.

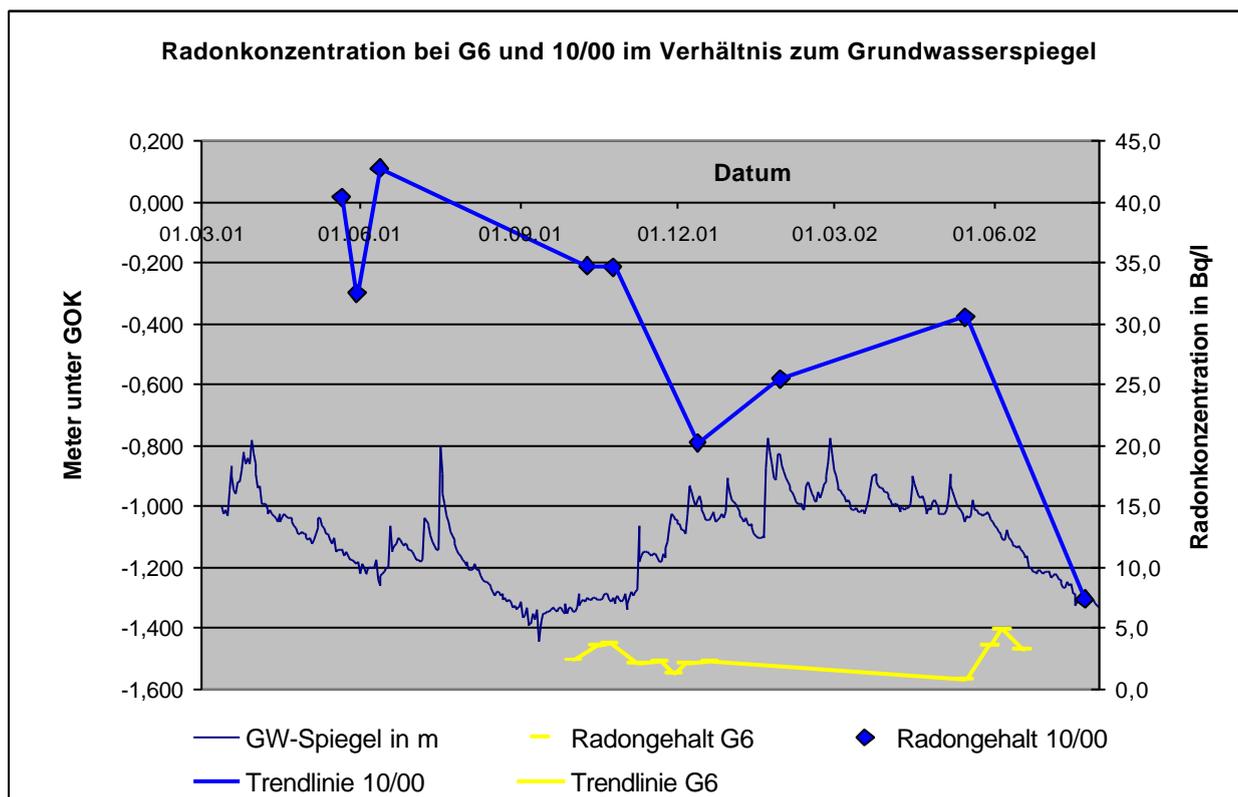


Abb. 7.21: Darstellung der zeitlichen Schwankungen der Radonkonzentrationen bei G6 und 10/00 gegenüber dem Jahresgang des Grundwasserspiegels bei 10/00

Interessant wäre hier eine quantitative Gegenüberstellung der zeitlichen Variation der Radonkonzentrationen der Grundwassermessstelle 10/00 und der Oberflächenwassermessstelle G6. Ein solcher Vergleich war nicht möglich, weil zur Gewährleistung einer guten

Vergleichbarkeit der Ergebnisse eine gleichzeitige Probenahme (am gleichen Tag) erfolgen muss. Die Grundwassermessstelle war in Abhängigkeit vom analytischen Programm der laufenden hydrogeologischen Untersuchungen nicht immer für eine Probenahme zugänglich. Abb. 7.21 zeigt im Vergleich zur Schwankung des Grundwasserpegels die gemessenen Radonkonzentrationen im Grundwasser von 10/00 und im Oberflächenabfluss bei G6. Es ist kein Zusammenhang zwischen dem Pegelstand und den gemessenen Radonkonzentrationen zu erkennen. Der Radongehalt des Oberflächenwassers scheint abgesehen von natürlichen Schwankungen relativ konstant zu bleiben. Genaue Aussagen sind aufgrund der langen Messpause im Winter nicht möglich. Der Radongehalt des Grundwassers zeigt die jahreszeitliche Schwankung und durch den letzten niedrigen Messwert eine insgesamt abnehmende Tendenz. Der auffallend niedrige letzte Messwert vom Sommer 2002 ist nicht erklärbar (wie schon in Kapitel 7.5.1 ausgeführt).

Detailuntersuchungen des Zusammenhanges von Grundwasserpegelstand, Oberflächenabfluss, Niederschlag und Radonkonzentration wurden in Kapitel 7.5.1 ausführlich bei der Interpretation der Grundwassermesswerte dargestellt.

7.7 Korrelation anderer Radionuklidgehalte bzw. chemisch analoger Elemente mit den gemessenen Radonkonzentrationen

Das Vorkommen von Rn-222 beruht immer auf dem Vorhandensein und Zerfall des Mutternuklids Ra-226 aus der U-238-Zerfallsreihe. Radium ist in seinen chemischen Eigenschaften dem Barium sehr ähnlich. So ist Radiumsulfat (RaSO_4) ebenso wie Bariumsulfat (BaSO_4) in Wasser schwer löslich. Die Ra-226-Konzentration der Gesteine und Böden kann mit γ -Spektroskopie ermittelt werden.

Die Ra-226-Konzentrationen der Wässer werden über die Konzentration des Ra-226-Zerfallsproduktes Rn-222 emanometrisch bestimmt. Dafür wurden im Gelände jeweils 250 ml Wasserproben mit 0,45 μm Satorius Minisart Membranfiltern aus Zelluloseazetat gefiltert und in Glasflaschen gefüllt. Im Labor wurden die gefilterten Proben mit jeweils 10 ml 37%iger HCl angesäuert und durch Eindampfen auf ca. 35 ml eingengt. Das erhaltene Probenkonzentrat wurde in gasdichte Gaswaschflaschen gefüllt, um nach 14-tägiger Wartezeit das aus Ra-226 nachgewachsene Rn-222 in die Lucas-Zellen zu überführen. Nach einer gasdichten Lagerung der Proben von mindestens 2 Wochen ist das bei der Probenahme im Wasser gelöste Radon zerfallen und Ra-226 und das neu gebildete Rn-222 befinden sich im radioaktiven Gleichgewicht. Jetzt kann über eine Radonmessung die Radiumkonzentration der Probe bestimmt werden. Aufgrund der allgemein niedrigen Radiumkonzentrationen im Oberflächenwasser von <2 bis 30 mBq/l und im Grundwasser von 4 bis 400 mBq/l ist die Einengung der Proben durch Eindampfen notwendig (WIEGAND et al. 2000). Außerdem muss

die Messzeit der Lucaszellen im Vergleich zu direkten Radonmessungen vervielfacht werden. So kann eine Nachweisgrenze von ca. 10 mBq/l erreicht werden.

Die entgasten Proben werden bei Bedarf aus den Gaswaschflaschen in Glasflaschen gefüllt und im Kühlschrank aufbewahrt. Für die Wiederholungsmessung werden die Proben erneut in die gasdichten Gaswaschflaschen gefüllt und nach 14-tägiger Lagerung das neu gebildete Rn-222 durch Entgasung in die Lucaszellen zur Radonmessung überführt.

Tab. 7.5: gemessene Radiumkonzentrationen im Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser. Die Probenahmepunkte sind mit den Radonmessstellen aus Abb. 7.18 identisch.

Messstelle	Probenahme	1. Messung	1. Messwert mBq/l	2. Messung	2. Messwert mBq/l	Mittelwert mBq/l
02/00	26.06.2001	22.08.01	5			5
10/00	26.06.2001	22.08.01	54	20.12.2001	118	86
Q4a	26.06.2001	22.08.01	28	20.12.2001	86	57
Q4b	26.06.2001	22.08.01	0			0
Q8	26.06.2001	22.08.01	31	20.12.2001	123	77
Q9	26.06.2001	22.08.01	9			9
G13	26.06.2001	22.08.01	21	20.12.2001	58	40
G17	26.06.2001	08.08.01	0			0
G14c	26.06.2001	06.08.01	27	20.12.2001	51	39
G14b	26.06.2001	02.08.01	14	20.12.2001	45	30
G14a	26.06.2001	06.08.01	1			1
G18	26.06.2001	06.08.01	0			0
G7	26.06.2001	08.08.01	2			2
G5	26.06.2001	06.08.01	0			0
G6	26.06.2001	08.08.01	59	20.12.2001	15	37
G8	26.06.2001	08.08.01	20	20.12.2001	17	18
G1	26.06.2001	08.08.01	11	20.12.2001	0	6
B1	26.06.2001	22.08.01	108	20.12.2001	45	76
L2	26.06.2001	22.08.01	5			5

Zur Bestimmung der Radium-Konzentration in den Wässern des Gessentals wurden am 26.06.2001 im Rahmen der Stichtagsbeprobung 19 Wasserproben genommen und in der beschriebenen Art und Weise behandelt. Tab. 7.5 zeigt die Messergebnisse. Ein Teil der Proben wurde nach 6 Monaten Lagerung ein zweites Mal gemessen. Die Ergebnisse der Wiederholungsmessung decken sich nicht mit den Ergebnissen der Erstmessung. Das Verhältnis der beiden Messergebnisse schwankt um den Faktor 0,25 bis 4. Ursache dafür

können chemische Prozesse während des Eindampfens sowie der Lagerung der Proben wie z.B. Fällungsreaktionen sein. Durch die Arbeit im Bereich der Nachweisgrenze können Messfehler nicht ausgeschlossen werden.

Für die Auswertung der Messungen und eine Gegenüberstellung mit den Radiumgehalten in den Sedimentproben (siehe Abschnitt 7.8, Abb. 7.25) wurden bei doppelter Messung Mittelwerte gebildet. Die bestimmten Mittelwerte der Ra-226-Konzentration in den Wasserproben liegen in den oben angegebenen Normalbereichen und decken sich größenordnungsmäßig mit den Ergebnissen der zur Sanierungsüberwachung durchgeführten jährlichen Radium-Messungen der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie im Uranbergbausanierungsgebiet (TLUG 2002).

Weitere Elementkonzentrationen wurden für die Proben vom 26.06.2001 im hydrogeologischen Labor unseres Institutes und mit der ICP-MS bestimmt. Die Messwerte sind in Abb. 7.22 zusammengefasst. Sie zeigt Analyseergebnisse der bei der Stichtagsbeprobung genommenen Wasserproben hinsichtlich des Gesamtgehaltes an radioaktivem Uran und Thorium, der radioaktiven Isotope Ra-226 und Rn-222 (siehe U-238 Zerfallsreihe) und den mit Ra-226 chemisch korrelierenden Elementen Ba und Sr. Der höchste Urangehalt wurde in der Wasserprobe der Sickerwassermessstelle Q4 gemessen.

Messstelle	G1	L2	G8	G6	G5	B1	G7	G18	G14a	G14b	G14c	G17	G13
Uges in µg/l	5,825	1,397	5,993	12,05	6,067	7,78	28,44	15,22	18,68	809,3	38,4	11,15	2,464
Th in ng/l										3202	26		
Ra in mBq/l	6	5	18	37	0	76	2	0	1	30	39	0	40
Rn in Bq/l	2,8	1	3,7	9,9	1	1,6	0	1,5	5,6	38,5	4,1	5,4	0,6
Ba in µg/l	9,863	24,89	13,64	19,08	25,18	55,51	11,17	9,921	27,3	18,68	16,15	16,06	44,24
Sr in µg/l	145	206,5	156,2	223,4	208,2	226,5	266,7	274,3	291,7	168,9	310,6	290,6	228,5
SO4 in mg/l	196	183	275	608	722	271	1620	1705	1690	9750	549	331	158

Messstelle	02/00	10/00		
Uges in µg/l				
Th in ng/l				
Ra in mBq/l	5	86		
Rn in Bq/l	76,4	47,2		
Ba in µg/l				
Sr in µg/l	194	158,8		
SO4 in mg/l	240	71		

	Q8	Q9		
Uges in µg/l	132,3	111,7		
Th in ng/l	614			
Ra in mBq/l	77	9		
Rn in Bq/l	21,9	110		
Ba in µg/l	20,84	8,95		
Sr in µg/l	325,8	432		
SO4 in mg/l	6600	7702		

	Q4a	Q4b
Uges in µg/l	900,9	855,3
Th in ng/l	121	655
Ra in mBq/l	57	0
Rn in Bq/l	8,6	46,4
Ba in µg/l		
Sr in µg/l	40,76	225,3
SO4 in mg/l	12260	12125

Abb.7.22: Radionuklide und chemisch analoge Elemente im Gessenbach mit Zufluss Badergraben und Lammsbach (Fließrichtung G13@G1); Zutritt von Haldensickerwasser und Grundwasser in den durch Pfeile gekennzeichneten Abschnitten. Die Probenahme erfolgte im Rahmen der Stichtagsbeprobung am 26.06.2001.

Erhöhte Urangelhalte liegen ansonsten nur bei den anderen Haldensickerwasseraustritten Q8 und Q9 und bei der Gessenbachmessstelle G14 in direkter Nähe von Q4 vor. Das zeigt zum wiederholten Male den Eintrag von Schadstoffen aus der Halde in den Vorfluter.

Insgesamt fallen die Sickerwasserproben am stärksten durch hohe Konzentrationen der gemessenen Elemente auf. Bei B1 korrelieren Maximalwerte von Ra-226 und Ba.

Auffällig hohe Radiumkonzentrationen wurden in allen Wassertypen an einzelnen Messstellen festgestellt. Neben den Sickerwasseraustritten und ihrer direkten Umgebung müssen hier die Grundwassermessstelle 10/00 und die Oberflächenwassermessstellen G6 und B1 genannt werden. Die Oberflächenwassermessstellen G13, G14b und G14c am Haldenfuß und die Messstelle G6 zeigen gegenüber normalen geogenen Backgroundwerten erhöhte Messergebnisse. Die im Grundwasser gemessenen Werte liegen im normalen Bereich. Aufgrund der Messwertverhältnisse von Uran zu Radium ist zu sehen, dass das sulfatüberlastete Bergematerial der Nordhalde eine Senke für Radium darstellt.

Hohe Radiumkonzentrationen in einer Wasserprobe decken sich nicht automatisch mit hohen Radonkonzentrationen. Hier spielen besonders die unterschiedlichen Porositäten und Korngrößenverteilungen der Gesteine und Sedimente in der gesättigten Zone und die wechselnden Transport- und Entgasungsbedingungen der einzelnen Wassertypen und Messstellen eine Rolle.

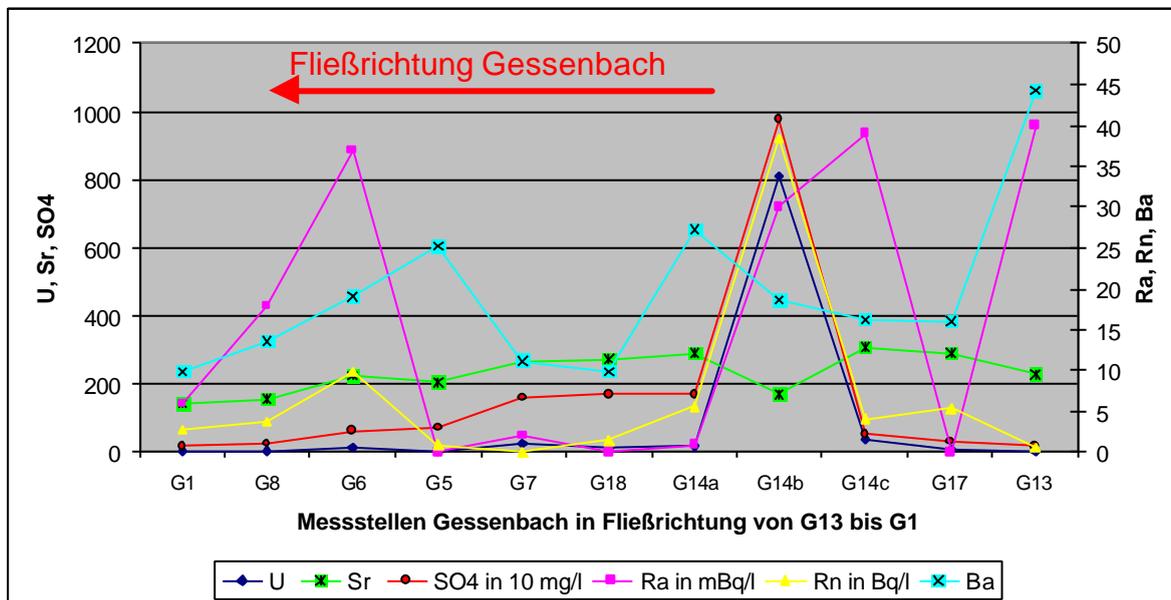


Abb. 7.23: Variation der Gehalte an Uran, Strontium, Sulfat, Radium, Radon und Barium im Oberlauf des Gessenbaches am 26.06.2001. Die Konzentrationen von Uran, Strontium und Barium sind in µg/l angegeben.

Abb. 7.23 zeigt grafisch die Konzentrationsänderungen der in Abb. 7.22 enthaltenen Elemente und chemischen Verbindungen im Oberlauf des Gessenbaches unter dem Einfluss

der Sickerwasser- und Grundwasserzutritte und mit dem Einfluss der Zuflüsse Badergraben und Lammsbach. Ganz deutlich ist ein ähnliches Verhältnis der Konzentrationen von Uran, Radon und Sulfat an allen Messstellen zu erkennen. Haupteintragsbereich ist die in unmittelbarer Bachnähe gelegene Sickerwasserstelle Q4 am westlichen Fuß der Nordhalde. Danach gehen die Konzentrationen aller drei Komponenten schnell wieder zurück. Der Sulfatwert bleibt am längsten erhöht, wird aber durch relativ sulfatarmes Wasser des Badergrabens verdünnt. Im Badergraben wie auch bei G6 wird Sulfat durch hohe Radium- und Bariumkonzentrationen gebunden. Eine detaillierte Analyse der Sulfatgehalte der Wässer ist Inhalt der Arbeit von GELETNEKY (2002). Die Kurve der Radiumkonzentrationen markiert deutlich Zutritte von Grundwasser und Sickerwasser. G13 und G6 sind die jeweils ersten Messstellen außerhalb des Grundwasserabsenkungstrichters. Innerhalb des Grundwasserabsenkungstrichters liegen die Maxima im Bereich der Sickerwasserzutritte von Q4 und im Badergraben mit starkem Einfluss von Q8 und Q9. Barium und Strontium zeigen nur eine geringe Beeinflussung durch den Bergbau. Auffällig sind die Wechselwirkungen von Strontium und Sulfat bei G14b und die schon genannte Beeinflussung von Barium und Sulfat bei B1. Der hohe Anfangswert von Barium bei G13 hat seine Ursache in kommunalen Abwässern der Gemeinde Kauern.

7.8 Radionuklidkonzentrationen in Sedimenten des Gessenbaches

Die im Wasser gemessenen Radionuklidkonzentrationen zeigen, dass Uran-238 und seine Zerfallsprodukte in unterschiedlicher Weise im Wasser gelöst und transportiert werden. Besonders der Oberflächenabfluss bewirkt in Fließrichtung die Umlagerung der Radionuklide zusammen mit anderen gelösten und ungelösten Frachten. Im Quellgebiet bei G13 werden im Sediment Uran- und Radiumkonzentrationen in Höhe des bergbauunbeeinflussten Hintergrundniveaus gemessen. Abstromig kommt es in Abhängigkeit vom Chemismus zufließender Wässer, den Fließgeschwindigkeiten und der Zusammensetzung der Talsedimente zu einer mehr oder weniger starken Anreicherung der transportierten Stoffe im Wasser oder Ablagerungen in den Sedimenten.

Für die Untersuchung der Radionuklidgehalte der Bachsedimente im Gessental wurden im Rahmen der Stichtagsbeprobung am 26.06.2001 insgesamt 11 Sedimentproben vom Gessenbach, Badergraben und Lammsbach und eine Eisen-Ocker-Probe von der Sickerwassermessstelle Q4 genommen und durch Dr. Jens Wiegand an der Universität Duisburg-Essen analysiert. Mit Hilfe der γ -Spektroskopie wurden die Konzentrationen von U-238, Ra-226 und Pb-210 ermittelt. Bei den Analysen wurde zwischen der Ton/Schluff-Fraktion <0,063 mm und der Sand-Fraktion 0,063 – 2 mm unterschieden. In Tabelle 7.6 sind die Probenahmestellen und die gemessenen Radionuklidkonzentrationen, unterteilt nach den genannten Fraktionen, aufgelistet.

Die Messwerte in Tab. 7.6 zeigen, dass die Radionuklide in der Ton/Schluff-Fraktion ungefähr um den Faktor 1,5 stärker angereichert sind als in der Sandfraktion. Vor allem die U-238- aber auch die Ra-226-Konzentrationen sind in den Sedimenten von Gessenbach und Badergraben erhöht. Die Sedimente des Lammsbaches besitzen Hintergrundniveau, ebenso die Probe von der Gessenbach-Messstelle G13.

Tab.7.6: Radionuklidkonzentrationen der Sedimentproben. Die Messstellen B50 und B51 befinden sich direkt oberhalb des Anfangs der Betonrinne des künstlichen Bachbettes des Badergrabens und direkt unterhalb des Endes der Betonrinne. Die sonst beprobte Messstelle B3 liegt zwischen B50 und B51.

Probenahme bei	Fraktion	U-238 [Bq/kg]	Ra-226 [Bq/kg]	Pb-210 [Bq/kg]
G13	<0.063 mm	212	36	
	0.063-2 mm	163	37	
G14	<0.063 mm	614	442	667
	0.063-2 mm	435	406	718
G7	<0.063 mm	671	81	54
	0.063-2 mm	473	44	71
G5	<0.063 mm	1027	185	358
	0.063-2 mm	600	120	234
G6	<0.063 mm	2203	414	647
	0.063-2 mm	2086	346	559
G8	<0.063 mm	1460	449	759
	0.063-2 mm	824	189	269
G1	<0.063 mm	1075	319	408
	0.063-2 mm	673	124	179
B50	<0.063 mm	362	85	189
	0.063-2 mm	348	72	96
B51	<0.063 mm	1205	187	461
	0.063-2 mm	184	42	
B1	<0.063 mm	733	338	430
	0.063-2 mm	404	141	248
L2	<0.063 mm		44	
	0.063-2 mm	143	49	96
Q4				
	0-2 mm	68	19	

Die Eisen-Ocker-Probe von der Sickerwassermessstelle Q4 zeigt keine auffälligen U-238-Konzentrationen und enthält kaum Ra-226. Sie kann nicht mit den anderen Sedimentproben

verglichen werden, sondern repräsentiert die aus dem Sickerwasser bei Sauerstoffkontakt gefällten und blättrig an der Haldenfuß-Oberfläche abgelagerten Eisenoxidkrusten. Das Maximum der Radionuklidkonzentration tritt bei G6 auf. Abstromig bleibt die Radionuklidkonzentration auf hohem Niveau.

Mit Ausnahme der Probe G14 zeigen alle Proben die gleichen Radionuklid-Verhältnisse, das heißt es ist bergbaubedingt keine spezifische Anreicherung eines Nuklids zu erkennen. Uran ist generell um den Faktor 4 – 5 mehr in Proben vorhanden als Radium. Die Sedimente im Badergraben und im oberen Gessenbach am Fuß der Nordhalde anstromig vom Zusammenfluss Badergraben und Gessenbach haben in etwa gleich hohe Radionuklidkonzentrationen.

Die Gegenüberstellung der gemessenen Urankonzentrationen in den Sedimenten und im Wasser entlang des Gessenbaches zeigt Quellen und Senken des Urans (siehe Abb. 7.24).

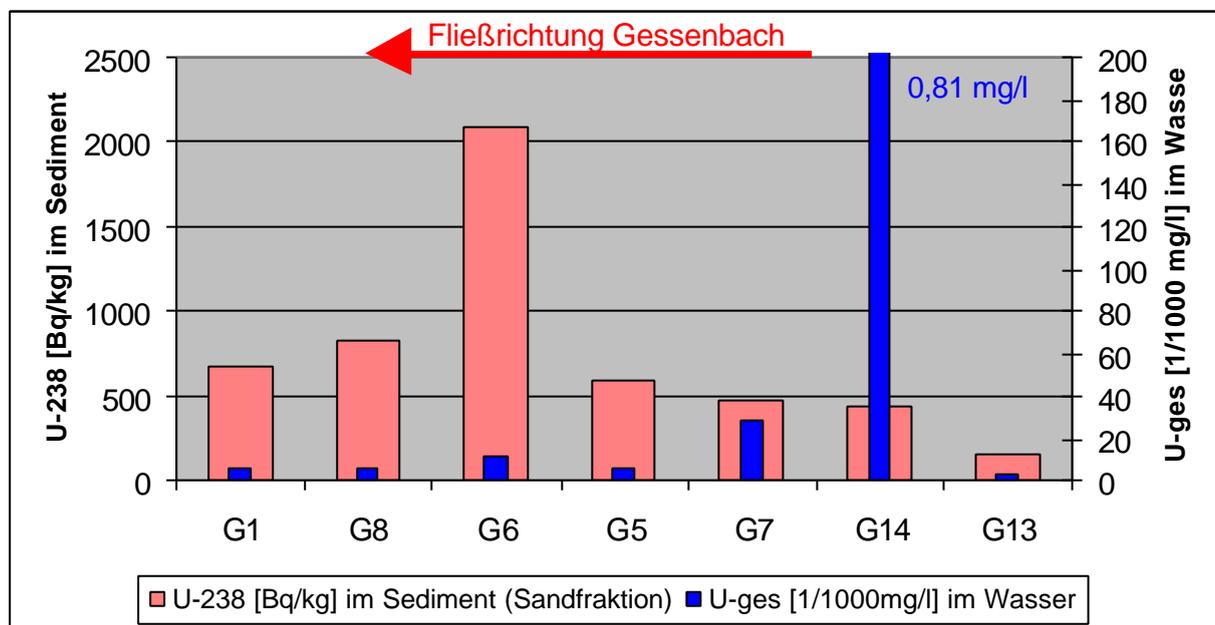


Abb. 7.24: Urankonzentrationen im Wasser und Sediment des Gessenbaches

Bei G13 herrschen reduzierende Verhältnisse (GELETNEKY 2002). U-238 ist unter reduzierenden Verhältnissen immobil und es kann bei G13 kaum ein U-238-Eintrag in das Bachwasser festgestellt werden. Bei G14 erfolgt ein starker U-238-Eintrag über das Sickerwasser aus der Nordhalde und der Übergang zu oxidierenden Verhältnissen. U-238 bleibt im weiteren Verlauf des Gessenbaches mobil. Entlang des Fließweges über dem Grundwasserabsenkungstrichter sinkt die U-238-Konzentration im Wasser hauptsächlich durch Verdünnungseffekte. Es erfolgt bis G6 kein weiterer U-238-Eintrag. Im Sediment ist eine allmähliche langsame U-238-Anreicherung zu beobachten.

Bei G6 ist das Maximum der U-238-Konzentration im Sediment zu beobachten. Der Anstieg der U-238-Konzentration ist wesentlich höher als der Anstieg der Ra-226-Konzentration im

Sediment (siehe Tab. 7.6 und Abb. 7.25). Dieses radioaktive Ungleichgewicht zeigt, dass hier ein U-238-Eintrag erfolgt ist. Bei G6 erfolgt ein U-238-Eintrag im Sediment durch neuen Grundwasserzutritt außerhalb des Grundwasserabsenkungstrichters. Außer dem Einfluss des Randes des Grundwasserabsenkungstrichters könnte hier für die hohen U-238-Konzentrationen im Sediment auch eine punktuelle Quelle analog der Diskussionen in Kapitel 7.6 eine Rolle spielen. Weiterhin kommen als Ursache der hohen Urankonzentrationen im Sediment bei G6 die Spätfolgen eines Produktionsunfalls im Rahmen der Uranproduktion in Betracht, bei dem eines der Laugungsbecken der Gessenhalde ausgelaufen ist. Laut mündlicher Information staute sich der Inhalt des Laugungsbeckens in der Talau bei G6 am Rand der Straßenböschung. Zur Schadenseingrenzung wurde ein Teil der Auesedimente abgetragen. Die Höhe der verbliebenen Restkontamination ist nicht bekannt.

Das Uran-angereicherte Sediment wird dann weiter bachabwärts verteilt. Nach G6 erfolgt ein Abfall der U-238-Konzentration im Wasser und Sediment mit Tendenz zu Hintergrundniveau-Werten. Die U-238-Konzentrationen im Wasser zwischen G6 und G1 resultieren aus den Konzentrationen des Sediments.

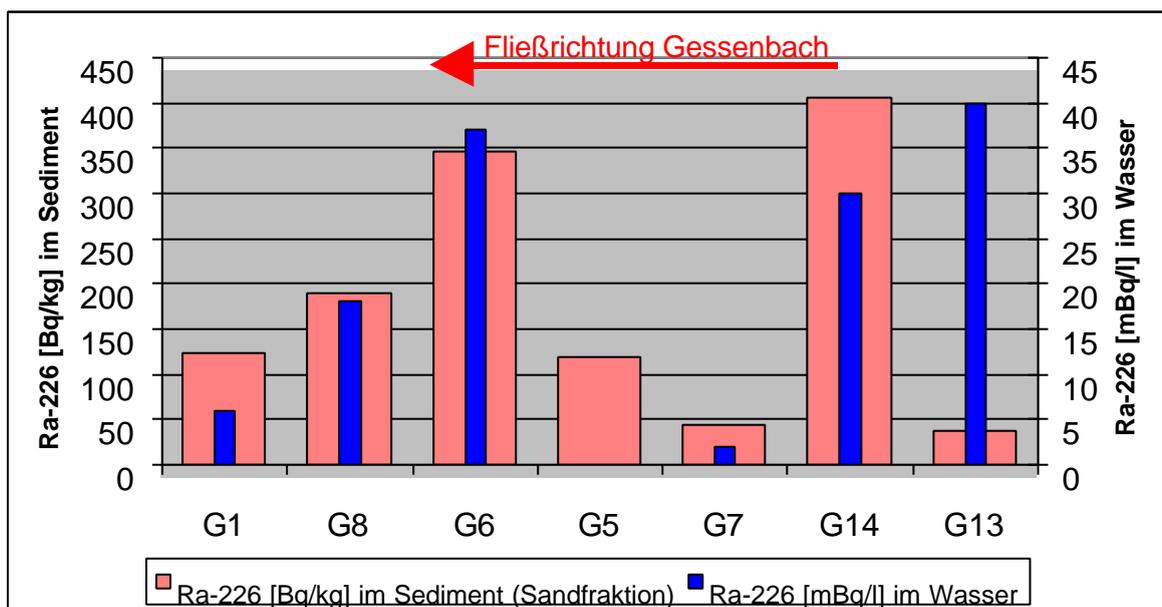


Abb. 7.25: Radiumkonzentrationen im Wasser und Sediment des Gessenbaches

Die in Abb. 7.25 dargestellten Radiumkonzentrationen im Wasser und Sediment zeigen teilweise Abweichungen von den Uragehalten. Der Haupteintrag von Radium im Wasser ist bei G13 anhand der hohen Ra-226-Konzentration im Wasser und des niedrigen Messwertes im Sediment durch Zutritt von Grundwasser außerhalb des Grundwasserabsenkungstrichters und bei G14 durch Zutritt von Haldensickerwasser zu erkennen. Aufgrund der bei G13 herrschenden reduzierenden Verhältnisse bleibt Ra-226 mobil. Es erfolgt keine Anreicherung

im Sediment. Die Ra-226-Konzentration im Sediment hat Hintergrundniveau. Im weiteren Bachverlauf wird Ra-226 unter oxidierenden Verhältnissen ausgefällt. Es kommt zu einer Anreicherung im Sediment. Bei G6 erfolgt ein Ra-226-Eintrag durch erneuten Grundwasserzutritt. Ab G6 ist das Verhältnis zwischen Ra im Wasser und im Sediment nahezu gleich und die Ra-226-Konzentrationen im Wasser und Sediment sinken mit Tendenz zu Hintergrundniveau. Die Ra-226-Konzentrationen im Wasser zwischen G6 und G1 resultieren analog den U-238-Konzentrationen aus den Konzentrationen des abgelagerten Sediments.

Die bestimmten Pb-210-Konzentrationen ermöglichen im Vergleich mit den Radiumkonzentrationen eine Aussage über den Zeitraum, in dem das Radium gefällt wurde. Wie man an den Konzentrationsverhältnissen sieht, steht Pb-210 an allen Probenahmestellen mehr oder weniger im Gleichgewicht mit Ra-226. Aufgrund der Halbwertszeit von Pb-210 von 22,3 Jahren kann man aus dem Gleichgewicht zwischen Ra-226 und Pb-210 darauf schließen, dass die Prozesse, die das Ra-226 zur Fällung führten, nicht neu, sondern gut 1 – 3 Halbwertszeiten alt sind. Das bedeutet einen Zeitraum von 22 bis 66 Jahren vor der Probenahme. Die Korrelation der U-238- und Ra-226-Konzentrationen mit den Pb-210-Gehalten deutet darauf hin, dass es sich um alte Depositionen bzw. neu umgelagerte alte Depositionen handelt.

7.9 Auswertung der Bodengasprofile - Korrelationen der Bodengaszusammensetzung

Ziel der Radonmessungen im Bodengas war in Verbindung mit der Bestimmung der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentrationen eine Abschätzung der Einflüsse der Bergbautätigkeit und der laufenden Sanierung auf die Zusammensetzung des Bodengases. Es sollten Überlegungen messtechnisch überprüft werden, ob sich die Migration von Radon aus dem unterirdischen Grubengebäude in die Auesedimente bei steigender Flutung von der natürlichen Bodengasmigration unterscheidet und Aussagen über den Flutungsverlauf ermöglicht. Weiterhin sollte der Frage nachgegangen werden, ob es durch Infiltration von Radium-führendem Bachwasser infolge influenter Verhältnisse über dem Grundwasserabsenkungstrichter zur Anreicherung von Ra-226 in den Makroporen beiderseits des Baches kommt. Hierbei könnte sich im Bachwasser gelöstes Radium infolge Fällung akkumulieren bzw. es könnte zu einem lateralen Einschwemmen von Radiumhaltigen Sedimentpartikeln in die Poren des ufernahen Sediments kommen.

Aufgrund der verbreitet schlechten Permeabilität der Auesedimente und der extremen bergbaulich bedingten Überprägung der natürlichen Talau war es nicht möglich, ein dichtes Netz von Bodengasmessstellen zu schaffen (siehe Kapitel 6.2.1 und 6.5). Die Konzentrationen von Radon, Kohlendioxid und Sauerstoff konnten mit Hilfe der Schlagsonde im Bodengas nur exemplarisch gemessen werden

Zur Untersuchung oben genannter Fragestellungen wurden die in Abb. 6.6 gekennzeichneten Bodengasprofile P1 bis P4 mit der Schlagsonde beprobt und die von der Wismut GmbH im Rahmen eines Rammkernsondierungsprogramms im Gessental angelegten 145 Rammkernbohrungen für Bodengasmessungen genutzt (siehe Abb. 7.28). Die Rammkernsondierungen eignen sich nur zur Bestimmung der CO₂- und O₂-Konzentration. Radon tritt langsamer in die Atmosphäre und wird schnell so stark vermischt, dass eine aktive Radonmessung mit Lucas-Zellen keinen Radon-Nachweis mehr liefert.

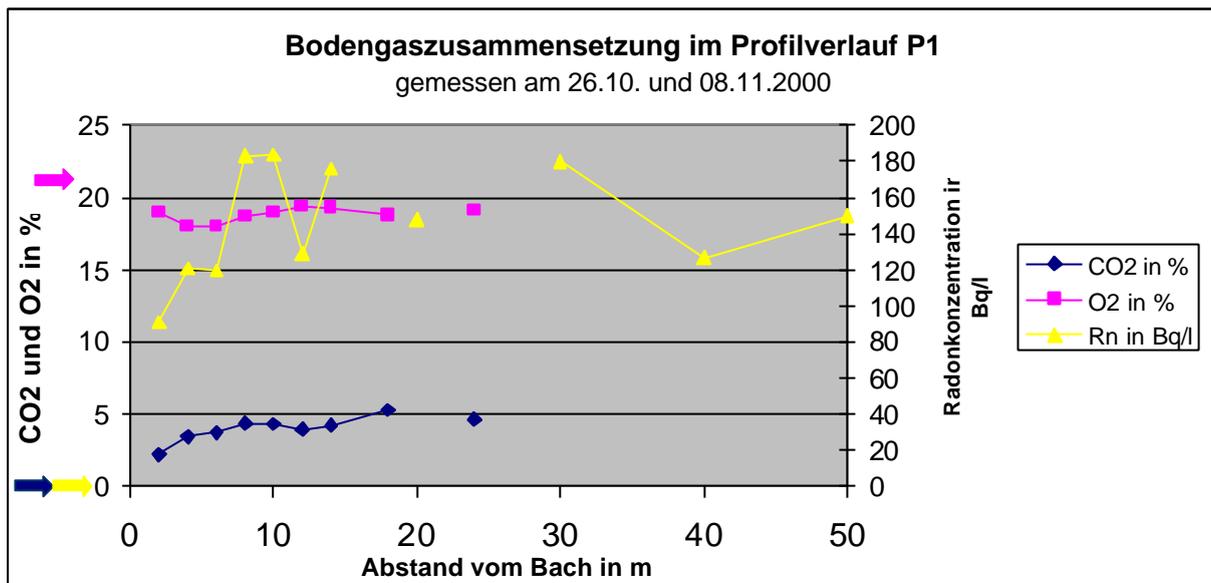


Abb. 7.26: Bodengasprofil P1 senkrecht zum Verlauf des Gessenbaches in Höhe der Oberflächenwassermessstelle G5. Bestimmung der Bodengaskonzentrationen durch Probenahme mit der Schlagsonde (Messtiefe 0,8 m). zur Lage des Profils siehe Abb. 6.6.

Das Profil P1 senkrecht zum Verlauf des Gessenbaches in Höhe der Oberflächenwassermessstelle G5 wurde am 26.10.2000 im 2-Meter-Raster mit der Messung von Rn-222, CO₂ und O₂ begonnen und am 08.11.2000 durch Radonmessungen im Abstand von 10 m, 20 m, 30 m, 40 m und 50 m vom Gessenbach erweitert. Für den an beiden Tagen gemessenen Wert der Radonkonzentration 10 m vom Bach entfernt wurde der Mittelwert in der Auswertung verwendet. Das Profil zeigt eine in unmittelbarer Ufernähe niedrige Radonkonzentration von 91 Bq/l und schwankt sonst um 152 ± 32 Bq/l. Der CO₂-Wert nähert sich mit zunehmendem Abstand vom Ufer dem Wert von 5 % und der Sauerstoffgehalt des Bodengases schwankt zwischen 18,0 und 19,4 %. Alle drei in Abb. 7.26 dargestellten Kurven zeigen in Ufernähe einen Trend zu den in der Atmosphäre vorherrschenden Gaskonzentrationen. Hauptgrund dafür ist die Gasdiffusion. Radon und CO₂ bewegen sich bevorzugt in Richtung der Oberfläche und in die freie Atmosphäre, O₂ tritt von der Seite in die Talsedimente ein und verdrängt CO₂ und Radon. Die Radonkonzentration in der

Bodenluft liegt geologisch bedingt über den Normalwerten von 30 – 100 Bq/l. In Abb. 7.26 sind außerdem die Normalkonzentrationen von Rn-222, CO₂ und O₂ in der Außenluft zur Orientierung mit Pfeilen markiert.

Die Bodengaskonzentrationen dieses Profils P1 können mit weiteren Profilen verglichen werden, die weiter talaufwärts mit jeweils drei Messpunkten im Abstand von 2, 4 und 6 m vom Gessenbach aufgenommen wurden. Alle Profile liegen über dem Grundwasser-Absenkungstrichter. In Abb. 7.27 ist deutlich zu sehen, dass sich die Konzentrationen von CO₂ und O₂ in den einzelnen Profilen nur unwesentlich unterscheiden.

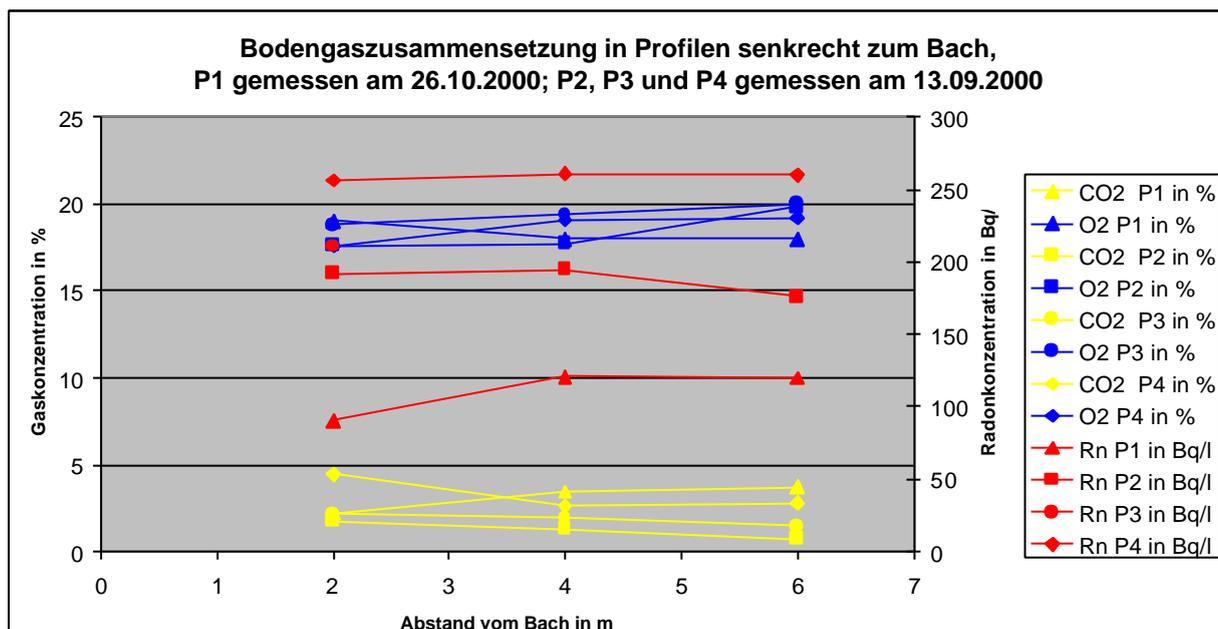


Abb. 7.27: Gegenüberstellung der Bodengaskonzentrationen von Rn-222, CO₂ und O₂ in den Messpunkten der Profile P1, P2, P3 und P4 (Messtiefe 0,8 m). zur Lage der Messprofile siehe Abb. 6.6.

Bei den gemessenen Radonkonzentrationen ist ein eindeutiger Trend zu steigenden Werten in der Bodenluft talaufwärts von P1 über P2 und P3 bis zu P4 (siehe Abb. 6.6) zu beobachten. Dies entspricht einer Annäherung an die Halden und Haldenaufstandsflächen und gleichzeitig einer Bewegung in Richtung Zentrum des Grundwasserabsenkungstrichters. Die Bodengaszusammensetzung im untersuchten Gebiet ist somit nicht konstant. Während die Gehalte von O₂ und CO₂ konstant bleiben, steigt die Radonkonzentration talaufwärts um mehr als den Faktor 2. Auf einer Strecke von ca. 300 m zwischen den Profilen P1 und P4 steigt die Radonkonzentration in der Bodenluft von 110 Bq/l auf 260 Bq/l.

Die Bodengasuntersuchungen im Uferbereich des Gessenbaches mit der Schlagsonde zeigen keinen Einfluss von Kontaminationen durch infiltriertes Bachwasser. Eine vermutete Anreicherung von Ra-226 in den Makroporen beiderseits des Baches kann nicht

nachgewiesen werden. Die Radonkonzentration im Bodengas zeigt in den Profilverläufen eine relative Konstanz. Die Zunahme der Radonkonzentration im Bodengas bachaufwärts deckt sich auch nicht mit den in den Sedimentproben gemessenen Ra-226-Konzentrationen (siehe Kapitel 7.8). Messungen der CO₂- und O₂-Konzentration in den 145 Rammkernsondierungen der Wismut GmbH im Sommer 2000 ermöglichen Aussagen über die Variation der Bodengaszusammensetzung in der Talaue. In den jeweils bis in das anstehende Gestein gebohrten und dadurch unterschiedlich tiefen Sondierungen mit einem Durchmesser von 80 mm bzw. 60 mm wurde direkt nach Abschluss der Bohrarbeiten durch Mitarbeiter der Wismut GmbH die γ -Strahlung im 20-cm-Abstand in den Bohrungen gemessen. Die Ortsdosisleistung wurde in unmittelbarer Nähe der Bohrung in ein Meter Höhe ohne Beachtung des Windeinflusses bestimmt. Danach erfolgte mit dem Deponiegasmessgerät des Instituts die Registrierung der CO₂- und O₂-Konzentration in Tiefen von 0,8 m und wenn möglich auch in 2,0 und 3,2 m. Alle Messergebnisse sind in den Abb. 7.28, 7.29 und 7.30 in Form von Surfer-Plots dargestellt. Als Grundlage für die Topographie dienten die Vermessungsdaten der Wismut GmbH für die Einmessung der Rammkernsondierungspunkte. Der Verlauf von Gessenbach und Badergraben dient in allen Abbildungen als Orientierungshilfe. Bei der Auswertung der gemessenen γ -Strahlung wurden exemplarisch die Messwerte in einer Tiefe von 0,8 m herausgegriffen. Hier fällt genau so wie bei den gemessenen Ortsdosisleistungen der Einfluss des Bergematerials der Nordhalde durch einen signifikanten Anstieg der Messwerte auf. In der Talaue unterliegen die Ortsdosisleistung und die γ -Strahlung nur geringen Schwankungen.

Der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt der Bodenluft in den Sondierungen weist im Untersuchungsgebiet markante Maxima und Minima auf, die sich mit zunehmender Messtiefe klar herauskristallisieren. Der Sauerstoffgehalt in 0,8 m Tiefe zeigt insgesamt nur geringe Schwankungen. Im Osten hat er abnehmende Tendenz. Der auffällig geringe Messwert des Rammkernsondierungspunktes 15 muss als fehlerhaft betrachtet werden. Mit zunehmender Messtiefe in 2,0 m und 3,2 m unter Geländeoberkante fallen drei lokale Minima des Sauerstoffgehaltes auf. Dazwischen liegen Bereiche, in denen der Sauerstoffgehalt mit zunehmender Messtiefe kaum abnimmt. Der Kohlendioxidgehalt zeigt in mehreren Bereichen eine deutliche Antikorrelation zu dem Sauerstoffgehalt. Die schon in einer Messtiefe von 0,8m auffallenden lokalen Maxima treten in größerer Tiefe stärker hervor und decken sich in 3,2 m Tiefe mit den Minima des Sauerstoffgehaltes. Die räumliche Verteilung der CO₂-Maxima und O₂-Minima in der Talaue und am Talrand des Gessentals geben keinen Hinweis auf bergbauliche Beeinflussung der Bodengaszusammensetzung. Auch der Rand des Grundwasserabsenkungstrichters, der zum Zeitpunkt der Messungen ungefähr zwischen den Rammkernsondierungs-Profilen 29 – 33 und 36 – 38 (siehe Abb.

7.28 Topographie Gessental mit Rammkernsondierungspunkten) gelegen hat, ist anhand der Bodengasmessungen im Gessental nicht nachweisbar.

Eine Korrelation der CO₂- und O₂-Gehalte der Bodenluft in den Rammkernsondierungen mit der im Bereich der offenen Bohrlöcher durch die Wismut GmbH gemessenen Ortsdosisleistung und der in den Bohrlöchern gemessenen γ -Strahlung ist nicht gegeben. Es gibt somit keine Bestätigung dafür, dass die drei gefundenen Variationsmaxima von CO₂ und O₂ Migrationsbereiche der Grubenluft darstellen. Vielmehr besteht möglicherweise ein Zusammenhang zwischen der Lithologie der Auesedimente und dem CO₂-Gehalt der Bodenluft.

Es muss eingeschätzt werden, dass sich die Migration von Radon aus dem unterirdischen Grubengebäude in die Auesedimente bei steigender Flutung nicht von der natürlichen Bodengasmigration unterscheidet. Mit Hilfe von Bodengasmessungen über dem Grundwasserabsenkungstrichter können keine Aussagen über den Flutungsverlauf gemacht werden.

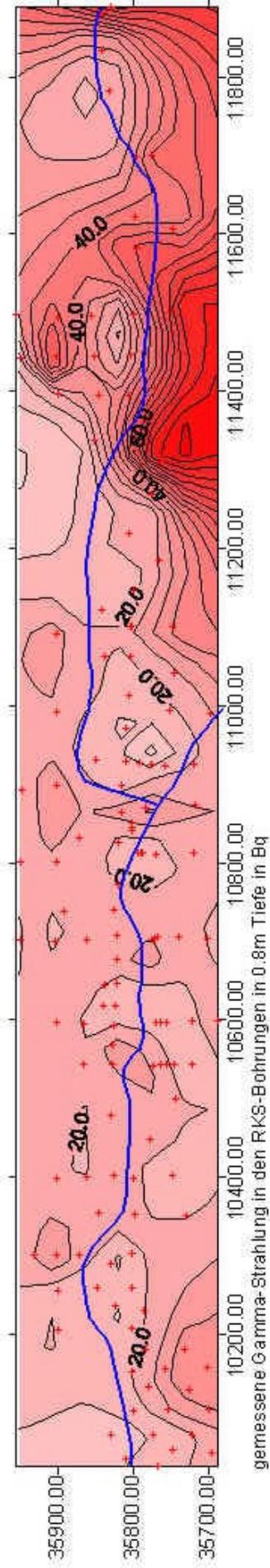
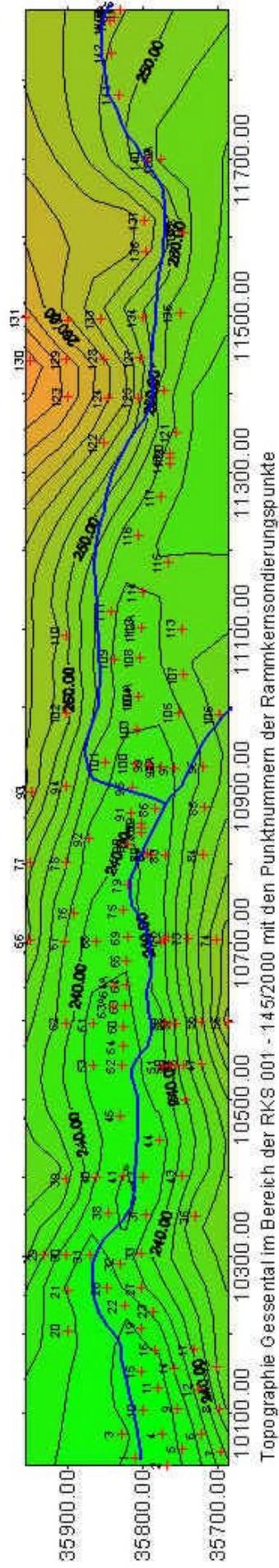
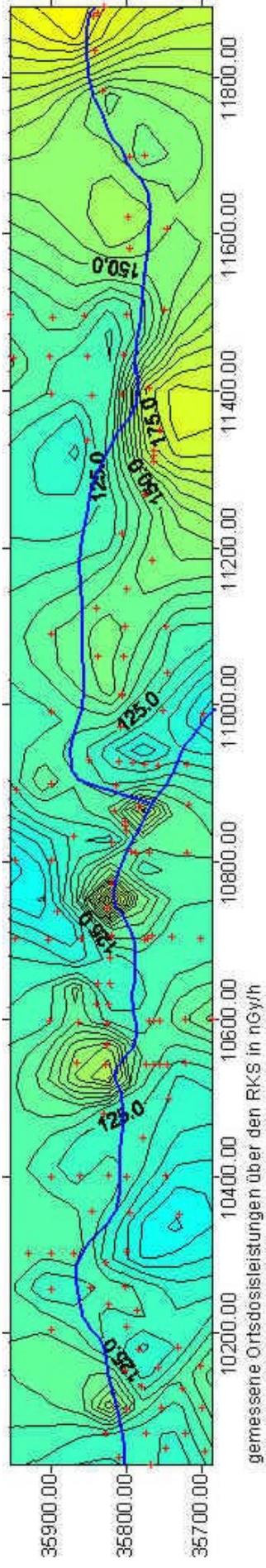


Abb. 7.28: Topographie des Gessentals mit Lage der Rammkernsondierungspunkte, Interpolation der Ortsdosisleistung und der Gamma-Strahlung. Die Messwerte zur Ortsdosisleistung und Gamma-Strahlung wurden freundlicherweise von der Wismut GmbH zur Verfügung gestellt.

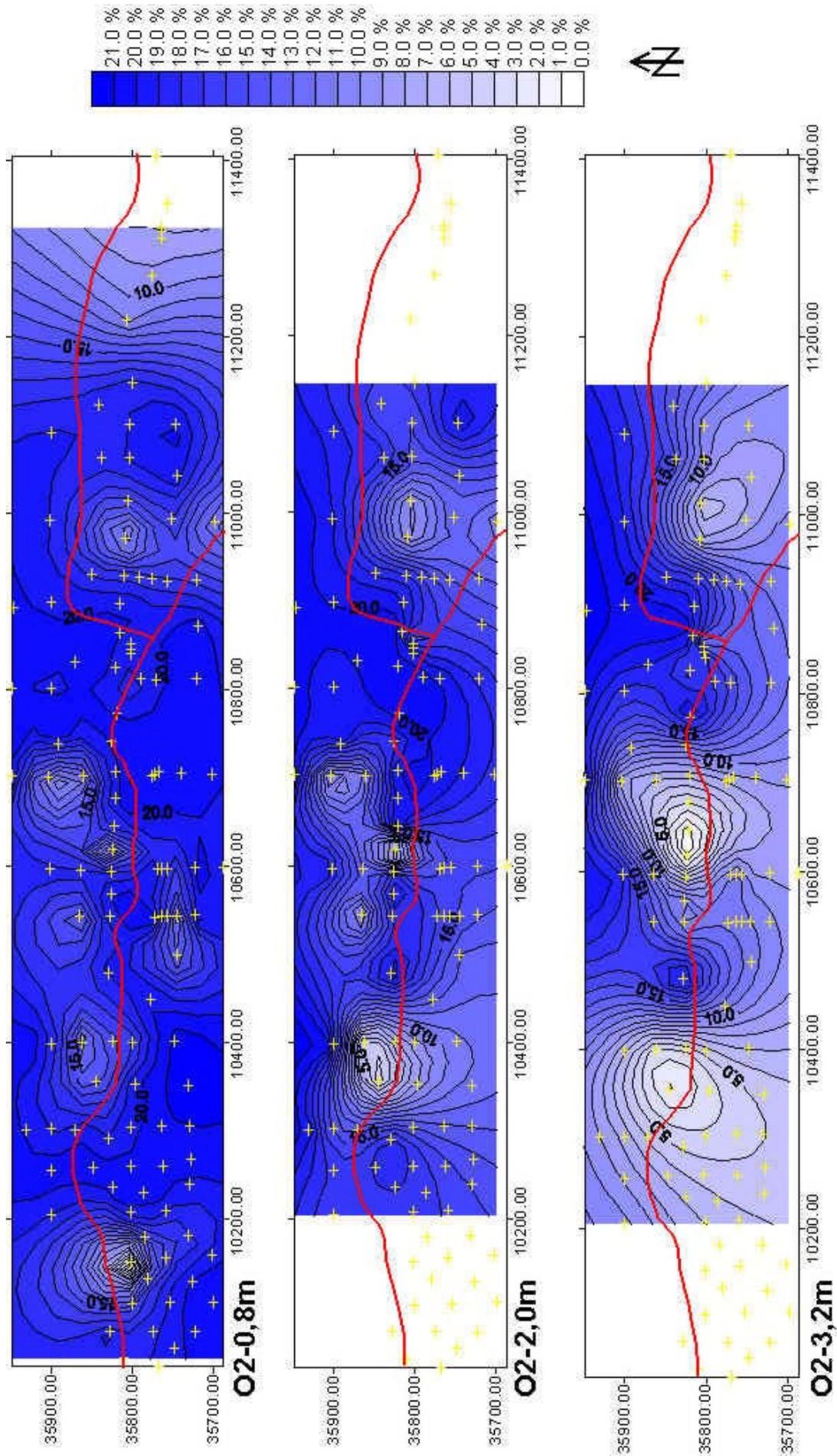


Abb. 7.29: O₂-Gehalte der Bohrlöcher der Rammkernsondierungen in 0,8m, 2,0m und 3,2m Tiefe

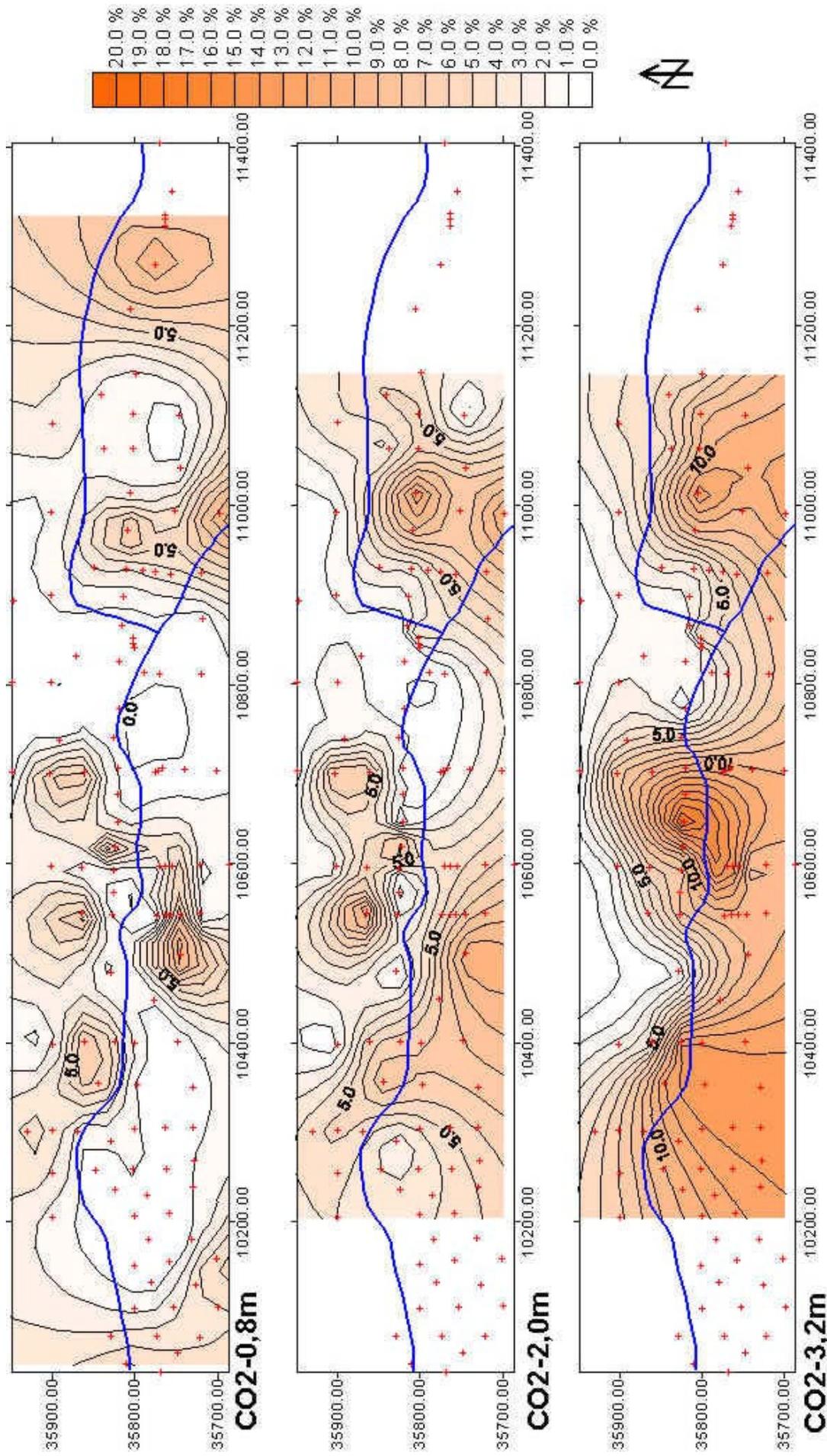


Abb. 7.30: CO₂-Gehalte der Bohrlöcher der Rammkernsondierungen in 0,8m, 2,0m und 3,2m Tiefe

8 Resultate und Schlussfolgerungen

Ziel der Arbeit war eine Beurteilung der Tracereigenschaften von Radon in einem Uranbergbau-Sanierungsgebiet zur Analyse von Transportprozessen von Radionukliden und anderen bergbaurelevanten Stoffen im gesamten System, der Aufdeckung von Quellen und Senken und der Quantifizierung des Austrags der Stoffe aus dem Bergbauegebiet.

Das gewählte Arbeitsgebiet Gessental ist ein Beispiel für hohe geogene Uran- und andere Radionuklidbelastungen und starke anthropogene Überprägung durch über- und untertägigen Bergbau und seine Hinterlassenschaften.

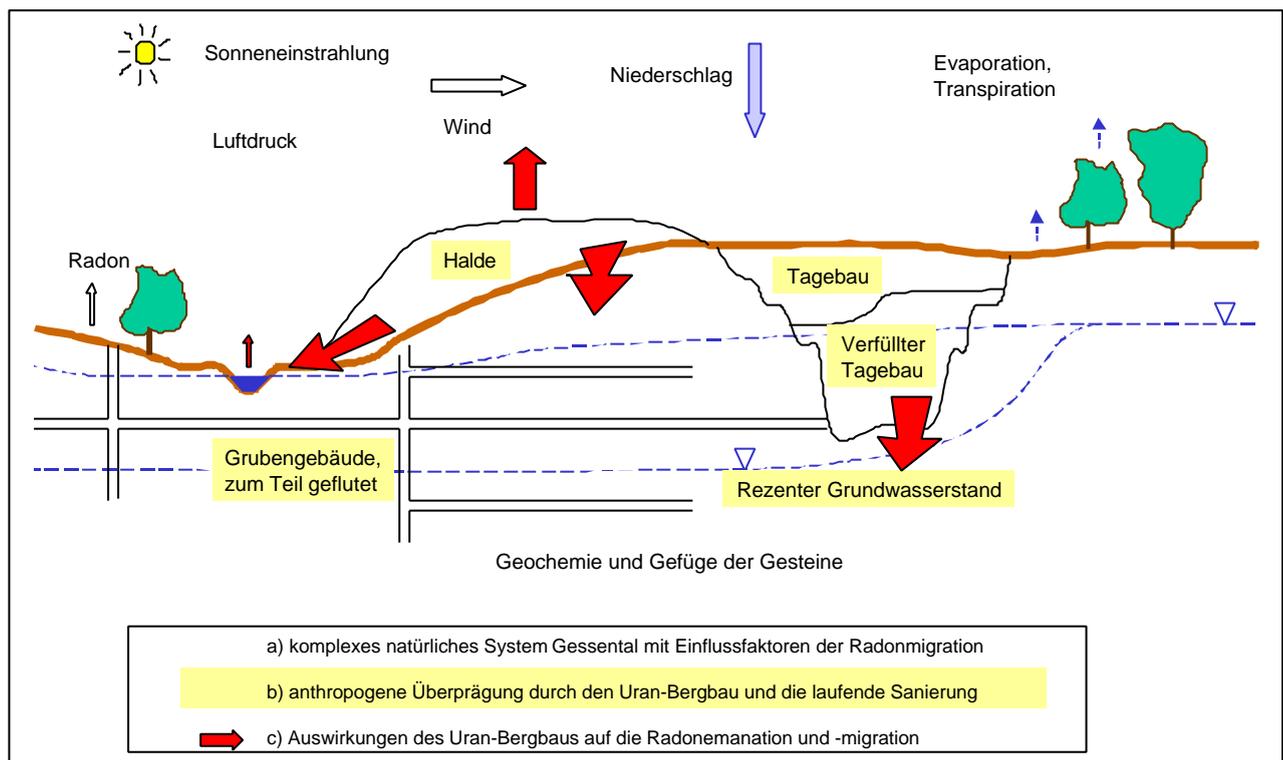


Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines komplexen natürlichen Systems mit den wichtigsten Einflussfaktoren auf die natürliche Radonemanation, -migration und -exhalation, beeinflusst durch den Uranbergbau.

Abb. 8.1 zeigt modellhaft ein komplexes natürliches System mit den die Radonkonzentration im Bodengas und Wasser bestimmenden geogenen, meteorologischen und biogenen Einflussfaktoren. Überlagert wird dieses System von (zur besseren Veranschaulichung gelb unterlegten) anthropogenen Einflüssen durch Bergbau und Sanierung der bergbaulichen Hinterlassenschaften. Folge des anthropogenen Eingriffs ist die durch rote Pfeile dargestellte vermehrte Radonmigration und -exhalation und ein umfassender bergbautypischer Stofftransport in gelöster Form oder als Sedimentfracht.

Zur Untersuchung des Migrationsverhaltens von Radon unter den speziellen Bedingungen der Sanierung eines Uranbergbaugebietes wurden in einem Zeitraum von zwei Jahren vier Grundwassermessstellen, drei Haldensickerwassermessstellen und neun Oberflächenwassermessstellen im Gessental beprobt und in ihrer zeitlichen Variation beobachtet. Die Auswertung der Messungen ermöglicht eine Gegenüberstellung und globale Einordnung der Uranbergbauregion im Verhältnis zu natürlichen Durchschnittswerten der Radonkonzentration, eine detaillierte Charakterisierung der Wässer in Bezug auf ihre typischen Radonkonzentrationen und Aussagen bezüglich der gegenseitigen Infiltration und Kontamination der verschiedenen Wässer. Dabei wird Radon als Tracer genutzt. Die langfristige Beprobung der Messstellen ermöglicht auch eine Bewertung des Erfolgs von Sanierungsmaßnahmen.

Außerdem wurde die Radonkonzentration in Bodengasprofilen der Talaue gemessen und durch die Bestimmung der Kohlendioxid- und Sauerstoffkonzentration ergänzt.

Eine Bestimmung der Radiumkonzentration wurde in Wasser- und Sedimentproben vorgenommen, um direkte Aussagen über das Transportverhalten von Radium zu erhalten.

Die gemessenen Radonkonzentrationen wurden im Zusammenhang mit meteorologischen Daten, Messwerten des Flutungsfortschritts im untertägigen Grubengebäude, physikochemischen Parametern und hydrochemischen Analysen der Grundwasserproben, Pegelständen der Grundwasser- und Oberflächenwassermessstellen und einem Rammkernsondierungsprogramm der Wismut GmbH mit 145 Bohrungen und Kernausswertungen in der Talaue des Gessentals ausgewertet.

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Ergebnissen der Arbeit gezogen werden:

Die gemessenen Radonkonzentrationen in der Bodenluft, im Grundwasser und Oberflächenwasser des Gessentals liegen allgemein im oberen Bereich bzw. oberhalb der Durchschnittswerte für Radonkonzentrationen nach WIEGAND (1999). Tab. 8.1 enthält eine Gegenüberstellung der Durchschnittswerte mit den im Gessental gemessenen Radonkonzentrationen.

Tab. 8.1: Gegenüberstellung der Durchschnittswerte für Radonkonzentrationen mit den im Gessental gemessenen Werten

Rn-222 Konzentration	Durchschnittswert	Gessental
in der Bodenluft	30 – 100 Bq/l	85 – 260 Bq/l
in Grundwasser	4 – 40 Bq/l	1 – 100 Bq/l
in Oberflächenwasser	< 0,040 Bq/l	0,0 – 6,8 Bq/l

Sowohl im Grundwasser als auch in der Bodenluft treten um den Faktor 2,5 erhöhte Maximalwerte auf. Die hohen Radonkonzentrationen im Grundwasser und lokale Sickerwasserzutritte aus den Halden bewirken im Oberflächenwasser sogar eine maximale Erhöhung der Radonkonzentrationen um den Faktor 150.

Es besteht eine Abhängigkeit der Radonkonzentration von **meteorologischen Faktoren**. Eine Abhängigkeit der Radongehalte vom Niederschlag konnte im Sickerwasser und im Grundwasser festgestellt werden. In den Grundwassermessstellen mit regionaler Anbindung an den Grundwasserleiter findet eine Aufkonzentration von Radon bei fallendem Grundwasserspiegel im Jahresgang statt und umgekehrt ein Verdünnungseffekt. Grundwassermessstellen im schwebenden Grundwasserleiter zeigen diese Abhängigkeit kaum. Hier findet nur eine Verdünnung bei sehr kurzfristigen Infiltrationsereignissen durch Niederschlag statt. Temperaturänderungen haben insbesondere beim Oberflächenwasser einen Einfluss. Es wurde keine Abhängigkeit von Luftdruckschwankungen festgestellt.

Die Radongehalte der **Grundwassermessstellen** zeigen innerhalb des Messzeitraumes von Februar 2001 bis Juli 2002 eine leicht fallende Tendenz. Grundwassermessstellen innerhalb des Depressionstrichters zeigen höhere Radongehalte als Messstellen außerhalb mit regionaler Anbindung an den Grundwasserspiegel. Dieses Verhältnis kehrt sich ab Frühjahr 2002 um, womit sich der erfolgreiche Einfluss der Sanierungstätigkeit zeigt. Ebenfalls lässt sich der Sanierungserfolg im steigenden pH-Wert der Grundwassermessstelle 80/00 bemerken.

In der haldennäheren Grundwassermessstelle 80/00 korreliert der Radon-Gehalt mit dem Redoxpotenzial, dem Mangangehalt und weniger deutlich mit der Gesamtmineralisation und ist antikorreliert zum Sauerstoffgehalt. Eine solche Abhängigkeit zeigt sich in der haldenferneren Grundwassermessstelle 10/00 außerhalb des Depressionstrichters nicht.

Die Korrelation von Radongehalten mit dem Redoxpotenzial, dem Mangangehalt und weniger deutlich mit der Gesamtmineralisation bei gleichzeitiger Antikorrelation zum Sauerstoffgehalt zeigt, dass bei reduzierenden Verhältnissen, bei denen der Schwermetall-Transport im Grundwasser generell erhöht ist, höhere Radonwerte auftreten. Hiermit wird der Einfluss der Haldensickerwässer auf die Radongehalte im Grundwasser ähnlich wie bei den Seltenen-Erden-Elementen deutlich.

Die Grundwassermessstelle 80/00 weist immer höhere Radonkonzentrationen als die Grundwassermessstelle 95/00 auf. Beide Grundwassermessstellen liegen über dem Grundwasserabsenkungstrichter. Aufgrund ihrer Lage zu den Haldenflächen muss davon ausgegangen werden, dass der Eintrag von Radon im Haldensickerwasser aus der Aufstandsfläche der ehemaligen Gessenhalde höher ist als im Sickerwasserzutritt von der Nordhalde.

Die **Haldensickerwässer** der Nordhalde weisen teilweise die höchsten Radongehalte im Untersuchungsgebiet auf. Sie dienen deshalb als Quellen der Radongehalte in Oberflächen-

und Grundwasser. Innerhalb der Haldensickerwässer treten jedoch große Unterschiede auf. Der natürliche Haldensickerwasseraustritt Q4 weist nur gering erhöhte Radongehalte auf, die vor dem Abtrag des Haldenmaterials einen nahezu konstanten Verlauf zeigen. Dagegen sind die Radongehalte der im Jahr 2001 neu geschaffenen Haldensickerwasseraustrittsstellen Q8 und Q9 deutlich erhöht und in Abhängigkeit des nicht eingestellten Fließgleichgewichts und des Haldenabtrags sehr variabel. Inzwischen existieren alle drei genannten Haldensickerwasseraustrittsstellen nicht mehr.

Die Abhängigkeit der Radonkonzentration im Sickerwasser vom Niederschlag lässt auf ein kommunizierendes Porensystem im Inneren der Halde ähnlich einem Karstaquifer schließen. Die **Oberflächenwasser**proben zeigen mit Ausnahme weniger Messstellen normale Radongehalte. Dort, wo erhöhte Werte auftreten, kann ein zeitlich variierender Zutritt von Haldensickerwasser, Bodenluft bzw. Grundwasser angenommen werden. Eine Unterscheidung der Einflussgrößen ist jedoch schwierig. Dem Gessenbach direkt zufließendes Sickerwasser der Nordhalde entgast auf einer Strecke von ca. 500 m. Direkte Infiltration von infolge der aufsteigenden Flutungsfront ausgetriebener Radonreicher Grubenluft konnte nicht festgestellt werden.

Ein Radonaustrag aus dem Bergbaugebiet erfolgt hauptsächlich durch Bodengas-Exhalation und durch Entgasung des Oberflächenwassers. Ein Austrag von in Wasser gelöstem Radon spielt keine Rolle.

Der Zutritt von Grundwasser wirkt sich stärker auf die Radonkonzentration im Oberflächenwasser aus als aufsteigendes Bodengas. Somit wird die Radonkonzentration im Oberflächenwasser stark durch den Grundwasserabsenkungstrichter bestimmt.

Eine **Stichtagsbeprobung** im Gessenbach und Badergraben zeigt insbesondere zwei Anomalien, in denen Radon und Radium angereichert sind. Es sind dies die bekannten Bereiche der Sickerwassermessstelle Q4 und zusätzlich der Bereich um die Oberflächenwassermessstelle G6. Hier finden sich auch die höchsten U-238-, die dritthöchsten Ra-226- und Pb-210-Gehalte in den Sedimenten des Gessenbaches von insgesamt 12 gemessenen Sedimentproben im Gessenbach und Badergraben. Die Oberflächenwassermessstelle G6 liegt am Rand des Grundwasserabsenkungstrichters.

In den **Sedimentproben** des Gessenbaches korrelieren die U-238-, Ra-226- und Pb-210-Gehalte sehr gut. Uran ist generell um den Faktor 4-5 angereichert gegenüber Radium. Die Korrelation der U-238- und Ra-226-Konzentrationen mit den Pb-210-Gehalten deutet darauf hin, dass es sich um alte Depositionen bzw. neu umgelagerte alte Depositionen handelt.

Bodengasuntersuchungen im Uferbereich des Gessenbaches zeigen keinen Einfluss von Kontaminationen durch infiltriertes Bachwasser. Jedoch zeigen sich in Profilen senkrecht zum Bachverlauf, die in unterschiedlichen Positionen nach dem Zusammenfluss von

Badergraben und Gessenbach gemessen wurden, erhebliche Schwankungen der Radon-
gehalte von etwa 100 Bq/l bis auf Werte von über 250 Bq/l.

Bodengasmessungen in den 145 von der Wismut GmbH abgeteufte Rammkernsondierungen zeigen bezüglich CO₂ in 3,2 m Tiefe insbesondere drei markante Maxima, in denen der CO₂-Gehalt der Bodenluft z.T. deutlich über 10 % liegt. Entsprechend gering sind in diesen Bereichen die O₂-Gehalte. Eine Korrelation mit der im Bereich der offenen Bohrlöcher durch die Wismut GmbH gemessenen Ortsdosisleistung und der in den Bohrlöchern gemessenen γ -Strahlung ist nicht gegeben. Ob diese Maxima Migrationsbereiche der Grubenluft darstellen, konnte somit nicht bestätigt werden. Vielmehr besteht möglicherweise ein Zusammenhang zwischen der Lithologie der Auesedimente und dem CO₂-Gehalt der Bodenluft.

Die Auswertung der Radonmessungen im Grundwasser, Haldensickerwasser, Oberflächenwasser und Bodengas des Gessentals zeigt die starke Abhängigkeit der Messwerte von den speziellen kleinräumigen geogenen und besonders den anthropogenen bergbau- und sanierungsbedingten Faktoren. Eine Regionalisierung und Übertragung der Ergebnisse auf andere Untersuchungsgebiete ist deshalb nur sehr eingeschränkt und situationsbedingt möglich.

9 Literaturverzeichnis

- Altevogt, A. S., Rolston, D.E., Venterea & R.T. (2003): Density and pressure effects on the transport of gas phase chemicals in unsaturated porous media.- *Water Resources Research* **39**(3): 1061.
- Atallah, M., Al-Bataina, B. & Mustafa, H. (2001): Radon emanation along the Dead Sea transform (rift) in Jordan.- *Environmental Geology* **40**(11/12): 1440-1446.
- Aurand, K. & Rühle, H. (1997): *Radon und Trinkwasser*.- 181 S., Eigenverlag Verein WaBoLu, Berlin.
- Berner, U., Delisle, G. & Streif, H. (1995): Klimaveränderungen in geologischer Zeit.- *Zeitschrift für Angewandte Geologie* **41**(2), 69-82.
- BMUNR (1999): Radon: Merkblätter zur Senkung der Radonkonzentration in Wohnhäusern.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, 24 S.
- Brune, S. (2000): Nachweis und Interpretation rezenter vertikaler Erdkrustenbewegungen im Ronneburger Uranbergbauegebiet.- Diss., Univ. Jena, 86 S.
- Choubey, V. M., Bartarya & Ramola (2000): Radon in Himalayan springs: a geohydrological control.- *Environmental Geology* **39**(6), 523-530.
- Choubey, V. M., Bartarya, Saini & Ramola (2001): Impact of geohydrology and neotectonic activity on radon concentration in groundwater of intermontane Doon Valley, Outer Himalaya, India.- *Environmental Geology* **40**(3), 257-266.
- Choubey, V. M. & Ramola (1997): Correlation between geology and radon levels in groundwater, soil and indoor air in Bhilangana Valley, Garhwal Himalaya, India.- *Environmental Geology* **32**(4), 258-262.
- Dehnert, J., Nestler, W., Freyer, K. & Treutler, H.-Ch. (1999): Messung der Infiltrationsgeschwindigkeit von Oberflächenwasser mit Hilfe des natürlichen Isotops Radon-222.- *Grundwasser* **4**(1), 18-30.
- Dehnert, J., Nestler, W., Freyer, K., Treutler, H.-Ch., Neitzel, P., Walther, W. u.a. (1997): Radon-222 - ein neuer Leitkennwert zur Bestimmung optimaler Abpumpzeiten von Grundwassermeßstellen.- *Grundwasser* **2**(1), 25-33.
- Deus, P., Ettenhuber, E., Lehmann, R. & Ullmann, W. (2000): Übersicht über die Messung von Radon und Radonzerfallsprodukten.- In: *Fortschritte im Strahlenschutz* (edited by F. f. S.e.V.). Bundesamt für Strahlenschutz, Berlin, 125.
- DeWayne Cecil, L. & Green, J.R. (1999): Radon-222.- In: *Environmental tracers in subsurface hydrology* (edited by Cook, P. G., Herczeg, A.L.). Kluwer Academic Publishers, Glen Osmond, 175-194.
- Eisenlohr, L. & Surbeck, H. (1995): Radon as a natural tracer to study transport processes in a karst system - an example in the swiss jura.- *comptes rendus de l'academie des sciences serie II fascicule a-sciences de la terre et des planetes* **321**(9), 761-767.
- Fresenius, U. G. (1995): airTOX Gasmesssystem, Herten, 20 S.

- Furuta, S., Ito, K. & Ishimori, Y. (2002): Measurements of radon around closed uranium mines.- *Journal of Environmental Radioactivity* **62**(1), 97-114.
- Gatzweiler, R., Jakubick, A.T., Meyer, J., Paul, M. & Schreyer, J. (2002): Flooding of the WISMUT mines - learning by doing or applying a comprehensive systematic approach?- In: *Uranium Mining and Hydrogeology III* (edited by Merkel, B. J., Planer-Friedrich, Britta, Wolkersdorfer, Christian). Springer, Freiberg, 745-754.
- Gehr, P., Kost, C. & Stephan, G. (1997): *CO₂ - Eine Herausforderung für die Menschheit*.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 208 S.
- Geletneky, J. W. (2002): Hydrogeologische/Hydrologische Untersuchung einer Prä-Flutungssituation am Beispiel des Gessentals im ehemaligen ostthüringischen Uranbergbauegebiet.- Diss., Univ. Jena, 263 S.
- Geletneky, J. W. & Büchel, G. (1998): Hydrogeological evaluation of the of a pre-flooding scenario: a case study of a tributary in the catchment area of the former Uranium mining region of Ronneburg, Thuringia.- *GeoCongress* **5**, 555-564.
- Geophysik GGD (2000): Schlußbericht zu dem Verbundvorhaben Erfassung von Kohlenwasserstoffkontaminationen im Boden durch Messung des Radongehaltes in der Bodenluft.- Verbund-Nr. 01010416, Geophysik GGD, Leipzig.
- Gillmore, G. K., Grattan, J., Pyatt, F. B., Phillips, Paul S., Pearce & Gillian (2002): Radon, water and abandoned metalliferous mines in UK: Environmental and Human Health implications.- In: *Uranium Mining and Hydrogeology III* (edited by Merkel, B. J., Planer-Friedrich, Britta, Wolkersdorfer, Christian). Springer, Freiberg, 65-76.
- Guerra, M. & Etiope, G. (1999): Effects of gas-water partitioning, stripping and channelling processes on radon and helium gas distribution in fault areas.- *Geochemical Journal* **33**, 141-151.
- Gundersen, L. C. S. & Wanty, R.B. (1971): *Field Studies of Radon in Rocks, Soils and Water*.- U.S. Geological Survey Bulletin, Washington, 334 S.
- Heinicke, J. & Koch, U. (1995): CO₂ and Radon measurements in the Vogtland area (Germany) - a contribution to earthquake prediction research.- *Geophysical research letters* **22**(7), 771-774.
- Heinicke, J., Koch, U. & Krbetschek, M. (1993): Zusammenhänge zwischen Radonanomalien und Schwarmbeben im oberen Vogtland.- *Isotopenpraxis* **28**, 337-348.
- Hoehn, E. & von Gunten, H.R. (1989): Radon in Groundwater: A Tool to Assess Infiltration from Surface to Aquifers.- *Water Resources Research* **25**(8), 1795-1803.
- Hoehn, E., von Gunten, H.R., Stauffer, F. & Dracos, Th. (1992): Radon-222 as a groundwater tracer. A laboratory study.- *Environmental Science and Technology* **26**(4), 734-738.
- Jia, W. Y., Fang, F., Zhou, R.S., Ma, Y.J., Le, R.C. & Wang, X.Q. (2002): The abnormal behavior of radon migration in different media and "alpha"-decay.- *Journal of the Chengdu Institute of Technology* **29**(5), 561-566.
- Kafri, U. (2001): Radon in groundwater as a tracer to assess flow velocities: two test cases from Israel.- *Environmental Geology* **40**(3), 392-398.

- Keller, G. (1997): Epidemiologische Studie zum Lungenkrebsrisiko durch Radon in Westdeutschland.- In: *Forschung zum Problemkreis "Radon" - 10. Statusgespräch* (edited by BMUNR), Berlin, 6 S.
- Keller, G. (2002): Sanierungsstrategien von Altbauten. In: *Forschung zum Problemkreis "Radon" 15. Statusgespräch* (edited by BMUNR), Berlin, 6 S.
- Kemski, J. (1993): Radonmessungen in der Bodenluft zur Lokalisierung von Störungen im Neuwieder Becken (Mittelrhein).- *Bonner Geowiss. Schriften*, **8**, Bonn, 148 S.
- Kemski, J., Klingel, R & Siehl, A. (1996): Das geogene Radonpotential.- In: *Umweltradioaktivität* (edited by Siehl, A.). Ernst & Sohn, Berlin, 179-222.
- Kemski, J., Klingel, R., Stegemann, R. & Siehl, A. (2002): Transferfaktor Bodenluft - Raumluft.- In: *Forschung zum Problemkreis "Radon" 15. Statusgespräch* (edited by BMUNR), Berlin, 9S.
- Koch, U., Gast, H. & Stolz, W. (1984): Radongehalt der Bodenluft in der Umgebung der Radonquelle von Bad Brambach.- *Z. Physiother.* **36**, 59-65.
- Koch, U. & Heinicke, J. (1994): Radon behaviour in mineral spring water of Bad Brambach (Vogtland, Germany) in the temporal vicinity of the 1992 Roermond earthquake, the Netherlands.- *Geologie en Mijnbouw* **73**, 399-406.
- Kümmel, M. (2002): Ergebnisse der Radon-Messungen in Bergbaugebieten.- In: *15. Statusgespräch Forschung zum Problemkreis "Radon"* (edited by BMUNR), Berlin, 10 S.
- Kurreport (1999): Radon - eines der wirksamsten Heilmittel.- 2 S.
- Martens, R. & Thielen, H. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung des Radon-Transportes in Bergbaugebieten.- In: *15. Statusgespräch Forschung zum Problemkreis "Radon"* (edited by BMUNR), Berlin, 11 S.
- Matschullat, J., Tobschall, H.J. & Voigt, H.J. (1997): *Geochemie und Umwelt*.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 442 S.
- Mattheß, G. (1994): *Lehrbuch der Hydrogeologie Band 2: Die Beschaffenheit des Grundwassers*.- Bornträger, Berlin, Stuttgart, 499 S.
- Merten, D., Geletneky, J.W., Senitz, S. & Büchel, G. (2002): Pre-flooding investigations with special emphasis on rare-earth elements at the former uranium-mining region of Ronneburg, Germany.- In: *Uranium Deposits: From their genesis to their environmental aspects* (edited by B. Kribek, J. Z.), Czech Geological Survey, Prag, Poster.
- Papastefanou, C. (2002): An overview of instrumentation of measuring radon in soil gas and groundwaters.- *Journal of Environmental Radioactivity* **63**(3), 271-283.
- Paul, M., Gengnagel, M., Vogel, D. & Kuhn, W. (2002): Four years of flooding WISMUT's Ronneburg uranium mine - a status report.- In: *Uranium Mining and Hydrogeology III* (edited by Merkel, B. J., Planer-Friedrich, Britta, Wolkersdorfer, Christian). Springer, Freiberg, 775-784.
- Piepmeyer & Co., K.-G. (1927): *Geophysikalische Lagerstättenforschung*.- Kassel-Wilhelmshöhe, 45 S.

- Pritchard, J. L. & Herczeg, A.L. (2003a): Tracing sources of water to an alluvial aquifer using Strontium isotopes and Radon.- In: *EGS-AGU-EUG* (edited by European Geophysical Society), 5/ 03325, Geophysical Research Abstracts, Nice, France.
- Pritchard, J. L., Herczeg, A.L. & Lamontagne, S. (2003b): Tracing seasonal groundwater contributions to stream flow using a suite of environmental isotopes.- In: *EGS-AGU-EUG* (edited by European Geophysical Society), 5/ 03333, Geophysical Research Abstracts, Nice, France.
- PYLON (1989): Instruction manual for using Pylon Model 110A and 300A Lucas cells with the Pylon model AB-5.- Canada, 57 S.
- PYLON (1991): Instruction manual for vakuum water degassing system.- Canada, 12 S.
- Rehs, B. (1999): Der Einfluß meteorologischer Parameter auf den Radon-Transport im Boden.- Math.-Mat. Fak., Univ. Göttingen, 113 S.
- Rennert, P., Schmiedel, H. & Weißmantel, Ch. (1986): *Physik (Kleine Enzyklopädie)*.- Bibliographisches Institut, Leipzig, 727 S.
- Sammarco, G. & Sammarco, O. (2002): Gases released by water: impact on underground mines and on the surface.- In: *Uranium Mining and Hydrogeology III* (edited by Merkel, B. J., Planer-Friedrich, Britta, Wolkersdorfer, Christian). Springer, Freiberg, 973-984.
- Schiffer, R. (1997): Ermittlung überdeckter Durchlässigkeitzonen durch die Bestimmung des Heliumgehaltes der oberflächennahen Bodenluft.- In: *Tagung junger Geochemiker* (edited by Kluge, A., Beuge, P.) 7. Wissenschaftliche Mitteilungen TU Freiberg, Freiberg, 213-219.
- Senitz, S., Büchel, G. & Gaupp, R. (2002): Die Funktion quartärer Talsedimente für den Austrag von Schwermetallen , Radionukliden nach der Flutung des Ronneburger Reviere. Zwischenbericht zum Bündelantrag Geo-Bio-Interaktion.- Inst. F. Geowiss. d. Univ. Jena, 27 S.
- Senitz, S., Büchel, G. & Gaupp, R. (2003): Die Funktion quartärer Talsedimente für den Austrag von Schwermetallen / Radionukliden nach der Flutung des Ronneburger Reviere. 2. Zwischenbericht zum DFG-Projekt BU 748/5-1 Bündelantrag Geo-Bio-Interaktion.- Inst. f. Geowiss. d. Univ. Jena, 27 S.
- Siehl, A. (1996): Grundlagen und geowissenschaftliche Aspekte der Umweltradioaktivität.- In: *Umweltradioaktivität* (edited by Siehl, A.). *Geologie und Ökologie im Kontext* Ernst & Sohn, Berlin, 1-30.
- Siehl, A., Kemski, J., Stegemann, R. & Valdivia-Manchego, M. (1999): Regionale Belastungssituation in Deutschland.- In: *Seminarband XXV Kapitel 4* (edited by Siehl, A.). Univ., Geol.Inst., Bonn.
- Su, C.-C. & Huh, C.-A. (2002): Atmospheric Po-210 anomaly as a precursor of volcano eruptions.- *Geophysical research letters*.
- TLUG (2002): Bericht zur Entwicklung der Umwelt in Thüringen 2002.- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Erfurt, CD.
- UGT (2001): Projekt-Dokumentation, Tagebau Lichtenberg, Kippbereich 3: Geräte und Messstationen.- Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg.

- Wellburn, A. R. (1997): *Luftverschmutzung und Klimaveränderung - Auswirkungen auf Flora, Fauna und Mensch*.- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 289 S.
- Wichmann, H. E., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Gerken, M., Dingerkus, G., Wellmann, J., Keller, G. & Kappel, R. (1997): Lungenkrebsrisiko durch Radon in der Bundesrepublik Deutschland (West).- In: *Forschung zum Problemkreis "Radon" - 10. Statusgespräch* (edited by BMUNR), Berlin, 14 S.
- Wiegand, J. (1995): Radionuklid-Verteilung in Gesteinen, Böden und Wässern im Unterkarbon des nördlichen Rheinischen Schiefergebirges.- In: *GeoCongress 1, Uranium Mining and Hydrogeology*, Freiberg, 565-572.
- Wiegand, J. (1999): Das Radonpotential urbaner Gebiete.- Habilitationsschrift, Univ. GH Essen, 243 S.
- Wiegand, J. (2001): A guideline for the evaluation of the soil radon potential based on geogenic and anthropogenic parameters.- *Environmental Geology* **40**(8), 949-963.
- Wiegand, J. & Büchel, G. (1997): Radon: Geogene und anthropogene Faktoren der Verfügbarkeit.- In: *Umweltqualitätsziele - Schritte zur Umsetzung* (edited by Ges. f. UmweltGeowissenschaften). Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 65-76.
- Wiegand, J. & Feige, S. (2002): A simple and universal method to evaluate the soil radon potential: The "10-point-system".- In: *GEO 2002* (edited by Niebuhr, B.) **21**. Schriftenr. dt. geol. Ges., Würzburg, 353.
- Wiegand, J., Gellermann, R., & Schott, B. (2000): Measuring Radon and Radium in water.- In: *III. International Workshop on 13th-14th May 1999* 1. Strahlenschutzpraxis, Thale, Harz Mountains, Germany, 54-57.
- Williams-Jones, G., Stix, J., Heiligmann, M., Charland, A., Sherwood, B., Arner, N., Garzon, Barquero, J. & Fernandez, E. (2000): A model of diffuse degassing at three subduction-related volcanoes.- *Bulletin of Volcanology* **62**(2), 130-142.
- Winkler, R., Ruckerbauer, F., Trautmannsheimer, M., Tschiersch, J. & Karg, E. (2001): Diurnal and seasonal variation of the equilibrium state between short-lived radon decay products and radon gas in ground-level air.- *Radiation and Environmental Biophysics* **40**(2), 115-123.
- Wismut (1999): *Chronik der Wismut*, Chemnitz, CD.
- Wismut (2001): 10 Jahre Umweltüberwachung und Sanierungstätigkeit an den Standorten der Wismut GmbH in den Freistaaten Sachsen und Thüringen.- Unternehmensleitung der WISMUT GmbH, Chemnitz, 150 S.
- Wismut (2002): Umweltdatenbank der Wismut GmbH.- (unveröffentlicht), Stand September 2002.
- Worm, R. (1986): Das gaskinetische Verhalten von Radon unter dem Einfluss von Bodenwasser in Lockergesteinen über verdeckten Uranvorkommen.- Diss., TU Berlin, 204 S.
- Zeggel, L. (2001): Untersuchungen zur Hydrologie und Beschaffenheit von Grund- und Oberflächenwasser im Gessental bei Ronneburg (ehemaliges ostthüringisches Uranbergbaugebiet).- Diplomarbeit, Univ. Jena, 104 S.

	Seite
Abbildungsverzeichnis	
Abb. 2.1: Mittlere Strahlenbelastung der Bevölkerung 1996 in Deutschland	5
Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Ronneburger Reviers der ostthüringischen Uranbergbauregion mit Lage des Arbeitsgebietes der Radon-Migrationsmessungen	8
Abb. 3.2: Abgedeckte geologische Karte des E-Gessentals, nach Unterlagen der Wismut GmbH (aus GELETNEKY 2002).	9
Abb. 3.3: Normalprofil der quartären Sedimente des östlichen Gessentals im Hangenden der paläozoischen Metasedimente (aus GELETNEKY 2002)	10
Abb. 3.4: Digitales Geländemodell des Einzugsgebietes des Gessenbaches, berechnet aus Rasterdaten (DGM 10, Höhengenaugigkeit ± 1 m bis ± 2 m, Gitterweite 10 m) des Thüringer Landesvermessungsamtes aus dem Jahr 1998, Hoch- und Rechtswerte in m	12
Abb. 3.5: Piper-Diagramm der unterschiedlichen Wassertypen im Gessental (GELETNEKY 2002)	14
Abb. 3.6: Schematische Darstellung der Gasmigrationsmesspunkte im Gessental	16
Abb. 4.1: vereinfachte Darstellung der U-238 Zerfallsreihe mit Halbwertszeiten ..	18
Abb. 4.2: Bodengas-Transportmechanismen – (nach SIEHL et al. 1999)	21
Abb. 4.3: Temperaturabhängige Löslichkeit von Radon im System Wasser – Luft (KEMSKI 1993)	23
Abb. 4.4: Radon-Aktivitätskonzentration in der Bodenluft (Median, 10 und 90 Perzentile) über verschiedenen Gesteinen (nach SIEHL et al. 1999) ...	25
Abb. 5.1: Pylon AB-5 Transportabler Strahlungsmonitor mit Lucas-Zellen	28
Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Probenahme für Bodengasmessungen	29
Abb. 5.3: Bestimmung des Radongehaltes in Wasserproben, Hauptschritte der Analytik	30
Abb. 5.4: Gaswaschflaschen der Universität Essen	31
Abb. 5.5: Wasserentgasungssystem WG 1001 der Firma PYLON mit Lucas-Zelle, Wasserprobe im Standzylinder, Trocknungsröhrchen, Manometer und Schlauch der Vakuumpumpe	32
Abb. 5.6: Schematische Darstellung der Gas-Probenahme in Rammkernsondierungen	34
Abb. 6.1: Schematische Darstellung der Grubenbaue von Ronneburg. Der Tagebau Lichtenberg schließt sich ohne hydraulische Sperren an die Grubenbaue an. Die dargestellte Halde entspricht der Nordhalde, die 2003 in den Tagebau verbracht worden ist.	36
Abb. 6.2: Schematische Darstellung eines Haldenkörpers mit seinen wichtigsten Stoffflüssen. Am Fuß der Halde befinden sich Sickerwasseraustrittsstellen, die in die Vorflut entwässern.	37
Abb. 6.3: Organigramm der im Gessental genommenen Proben für Gasmessungen	38
Abb. 6.4: Flutungsverlauf der Messstelle e-1260 nach Daten der Wismut GmbH (WISMUT 2002)	44
Abb. 6.5: Lage der Rammkernsondierungen der Wismut GmbH im Sommer 2002 und der Bodengasmessstellen mit der Schlagsonde.	45
Abb. 6.6: Übersicht der Lage aller Probenahmestellen für Radon (außer Stichtagsbeprobung) und CO ₂ /O ₂ (außer Rammkernsondierungspunkte) im Gessental.	46

Abb.7.1: Zusammenhang zwischen dem absoluten Messwert und der Reproduzierbarkeit dieses Messwertes bei Radonbestimmungen mit Pylon Model 300A Zellen und Model AB-5 Monitor in Abhängigkeit von der absoluten Größe des Messwertes	48
Abb. 7.2: Tagesmitteltemperaturen, tägliche Niederschlagsmengen und täglicher mittlerer Luftdruck der Klimastation im Tagebau (UGT 2001)	56
Abb. 7.3: Korrelation der GW-Pegelstände mit den Niederschlägen und den Radonkonzentrationen	56
Abb. 7.4: Übersicht der für die verschiedenen Wassertypen verwendeten Symbole	57
Abb. 7.5: logarithmische Darstellung aller in Wasserproben (Grundwasser, Sickerwasser, Oberflächenwasser) gemessenen Radonkonzentrationen im Gessental.	59
Abb. 7.6: Darstellung der Summenkurven der Häufigkeitshistogramme der Radonkonzentration in verschiedenen Wassertypen	60
Abb. 7.7: Radonkonzentrationen im Grundwasser	62
Abb. 7.8: Korrelation von Radonkonzentrationen im Grundwasser mit den Grundwasserpegelständen zum Zeitpunkt der Probenahme	64
Abb. 7.9: Relation zwischen Niederschlag, Abfluss bei G7 und Grundwasserpegelstand bei 10/00 im Gessental vom 22.09.01 bis 01.10.01.	66
Abb. 7.10: Gegenüberstellung der Variation der hydrologischen Situation im Gessental im Laufe des Jahres mit der Variation der Radonkonzentration im Grundwasser	67
Abb. 7.11: Vergleich der Radonkonzentration mit den physikochemischen Parametern der Grundwassermesssstelle 10/00.....	68
Abb. 7.12: Gegenüberstellung der zeitlichen Variation der Radonkonzentration der Grundwassermesssstelle 80/00 mit den physikochemischen Parametern und ausgewählten Ionenkonzentrationen der Wasserproben.....	69
Abb. 7.13: Schurf mit Sickerwassermesssstelle Q8 am Nordfuß der Nordhalde. Blick von der Haldenabtragsfläche in den Schurf mit in Pfützen auftretendem Sickerwasser - Mai 2002.	71
Abb.7.14: Radonkonzentrationen im Sickerwasser der Nordhalde in Abhängigkeit vom Abtrag der Nordhalde	73
Abb. 7.15: Darstellung der Abhängigkeit der Radonkonzentration von Sickerwasserproben vom Niederschlag am Probenahmetag	74
Abb. 7.16: Radonkonzentrationen im Oberflächenwasser von Gessenbach und Badergraben	76
Abb. 7.17: Radonkonzentrationen im Oberflächenwasser auf einem Profil bei G6	77
Abb. 7.18: Ergebnisse der Radonmessungen der Stichtagsbeprobung im Gessental am 26.06.01	79
Abb. 7.19: Gegenüberstellung der Radonkonzentrationen der Sickerwassermesssstelle Q4 und der Oberflächenwassermesssstelle G14 während des Haldenabtrags und nach dem Abschluss der Sanierungsmaßnahmen in der Umgebung der Messstellen	81
Abb. 7.20: Gegenüberstellung des Grundwasserspiegels (gemessen in 10/00) mit dem Wasserspiegel des Gessenbachs in der Umgebung der Messstelle G6.	83
Abb. 7.21: Darstellung der zeitlichen Schwankungen der Radonkonzentrationen bei G6 und 10/00 gegenüber dem Jahresgang des Grundwasserspiegels bei 10/00	84
Abb.7.22: Radionuklide und chemisch analoge Elemente im Gessenbach mit Zufluss Badergraben und Lammsbach (Fließrichtung G13→G1); Zutritt von Haldensickerwasser und Grundwasser in den durch Pfeile gekennzeichneten Abschnitten	87
Abb. 7.23: Variation der Gehalte an Uran, Strontium, Sulfat, Radium, Radon und Barium im Oberlauf des Gessenbaches am 26.06.2001.....	88

Abb. 7.24: Urankonzentrationen im Wasser und Sediment des Gessenbaches ..	91
Abb. 7.25: Radiumkonzentrationen im Wasser und Sediment des Gessenbaches ..	92
Abb. 7.26: Bodengasprofil P1 senkrecht zum Verlauf des Gessenbaches in Höhe der Oberflächenwassermessstelle G5. Bestimmung der Bodengaskonzentrationen durch Probenahme mit der Schlagsonde (Messtiefe 0,8 m). Lage des Profils siehe Abb. 6.6 ..	94
Abb. 7.27: Gegenüberstellung der Bodengaskonzentrationen von Rn-222, CO ₂ und O ₂ in den Messpunkten der Profile P1, P2, P3 und P4 (Messtiefe 0,8 m). ..	95
Abb. 7.28: Topographie des Gessentals mit Lage der Rammkernsondierungspunkte, Interpolation der Ortsdosisleistung und der Gamma-Strahlung ..	98
Abb. 7.29: O ₂ -Gehalte der Bohrlöcher der Rammkernsondierungen in 0,8m, 2,0m und 3,2m Tiefe ..	99
Abb. 7.30: CO ₂ -Gehalte der Bohrlöcher der Rammkernsondierungen in 0,8m, 2,0m und 3,2m Tiefe ..	100
Abb. 8.1: Schematische Darstellung eines komplexen natürlichen Systems mit den wichtigsten Einflussfaktoren auf die natürliche Radonemanation, -migration und -exhalation, beeinflusst durch den Uranbergbau ..	101

Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Natürlich vorkommende Nuklide des Edelgases Radon ..	19
Tab. 5.1: Messkomponenten und Messbereiche des airTOX Gas-Messsystems von Fresenius ..	33
Tab. 6.1: Rechts- und Hochwerte der für die Bestimmung der Radonkonzentration genutzten Grundwassermessstellen im Gessental.	40
Tab. 6.2: Lage und technische Ausstattung der Flutungswassermessstellen	44
Tab. 7.1: Messwerte der Radonkonzentration in Wasser zum Methodenvergleich der Wasserprobennahme in Gaswaschflaschen oder Laborglasflaschen.	50
Tab. 7.2: Messungen zur Überprüfung der Entgasungs-Efficiency von PYLON WG 1001 ..	51
Tab. 7.3: Vergleich der Radonkonzentrationen von gefilterten und ungefilterten Wasserproben ..	53
Tab. 7.4: Radon-Gehalte in den bergbaubeeinflussten Wässern des Gessentals – Zusammenfassung der Messwerte.	58
Tab. 7.5: gemessene Radiumkonzentrationen im Grund-, Sicker- und Oberflächenwasser.	86
Tab.7.6: Radionuklidkonzentrationen der Sedimentproben.	90
Tab. 8.1: Gegenüberstellung der Durchschnittswerte für Radonkonzentrationen mit den im Gessental gemessenen Werten.	102

Dank

Die Entstehung und Vollendung dieser Arbeit war nur durch die vielfache und breit gefächerte Unterstützung durch meinen betreuenden Hochschullehrer Herrn Professor Dr. Georg Büchel und die Kollegen am Institut für Geowissenschaften, meinen externen fachlichen Betreuer Herrn Privat-Dozent Dr. Jens Wiegand, die Mitarbeiter der Wismut GmbH und meine Familie möglich.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Georg Büchel für die Anregung zu dieser Dissertation, seine Beharrlichkeit in Bezug auf den Werdegang der Arbeit und die Anstellung im Institut für Geowissenschaften der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Herrn Privatdozent Dr. Jens Wiegand danke ich insbesondere für die fachliche Unterstützung bei der Einarbeitung in die wissenschaftliche Fragestellung und bei den Gelände- und Laborarbeiten sowie für die wertvollen Anregungen und Diskussionen.

Bei allen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Angewandte Geologie möchte ich mich ganz herzlich für die Diskussionsbereitschaft, die Hilfe bei Gelände- und Laborarbeiten, die Bereitstellung von Datenmaterial und das gute Arbeitsklima bedanken.

Der Wismut GmbH danke ich für die gute Zusammenarbeit, die Überlassung von Datenmaterial und die Kooperation bei Geländearbeiten. Besonderer Dank gilt hier Herrn Dr. Paul, Herrn Fengler, Herrn Gengnagel, Herrn Höpfner und Herrn Snagowski.

Last but not least wäre an eine Fertigstellung der Dissertation ohne das Verständnis und die Unterstützung meiner Familie nicht zu denken gewesen.

Danke schön

TABELLARISCHER LEBENS LAUF KERSTIN HORN

BERUFSERFAHRUNG

seit 1996 Friedrich-Schiller-Universität Jena

wissenschaftliche Mitarbeiterin

- Gasmigrations-Messungen in der Bodenluft und im Wasser, Vermessung.
- Lehrveranstaltung Geologische Fernerkundung.
- Organisations- und Koordinierungsaufgaben, Präsentationen, Arbeit am PC mit BS Windows (Office-Paket, Grafik-Programme, GIS) und Mac.

1988 - 1994 VEB Carl-Zeiss Jena / Jenoptik GmbH Jena

Technologin

- Technologische Produktionssteuerung, Anlagenbetreuung und Qualitätssicherung der Entspiegelungsbedampfung von optischen Bauelementen.

Überführung neu entwickelter Beläge in die Großserienproduktion.

Ausbildung von Fachkräften für die Bedienung der Hochvakuum-Bedampfungsanlagen.

Enge Zusammenarbeit mit den Fachleuten der Belagsentwicklung, der Optik-Kontrolle und der Service-Abteilungen.

1983 VEB Carl-Zeiss Jena Jena

Feinoptikerin

- Rundoptik-Produktion.

AUSBILDUNG

1995-1996 Busch & Partner GmbH Jena

- Weiterbildung GIS - Spezialist

1983-1988 Friedrich-Schiller-Universität Jena

- Hochschulstudium Physik

1980-1983 VEB Carl-Zeiss Jena Jena

- Feinoptiker-Lehre mit Abitur

INTERESSEN

Familie, Sport, Musik

PRIVATES

- geboren am 29.12.1963 in Jena
- verheiratet, 2 Kinder (12 und 19 Jahre alt)
- Führerschein Klasse B, M

Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen angefertigt habe.

Jena, den 10.06.2003