

Forschungsbericht BWPLUS

**Natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung in
Baden-Württemberg: Hat die Nutzung von
Erdwärme für Wohnhäuser einen Einfluss auf diese
Exposition?**

von

B. Sc. Danica Melzer
Karlsruher Institut für Technologie, Campus Nord

KIT Sicherheitsmanagement – Analytische Labore
Physikalisches Messlabor

Förderkennzeichen: BWE 28003

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Mai 2010

Abschlussbericht:

Natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung in
Baden-Württemberg: Hat die Nutzung von
Erdwärme für Wohnhäuser einen Einfluss auf diese
Exposition?

B. Sc. Danica Melzer
KIT Sicherheitsmanagement – Analytische Labore
Physikalisches Messlabor

Projektkennzeichen: BWE 28003
Projektleiter: Dipl. – Ing. (FH) Chr. Wilhelm

Zusammenfassung

Für das BWPlus Projekt (Projektkennzeichen: BWE 28003) wurde die Möglichkeit einer signifikanten Erhöhung der natürlichen Strahlenexposition der Bevölkerung infolge von oberflächennahen Bohrungen zum Zwecke der privaten Erdwärmenutzung untersucht.

Zur Erörterung der Fragestellung wurden in Baden-Württemberg zehn Bohrvorhaben in geologisch interessanten Gebieten analytisch messtechnisch begleitet. Um verschiedene Expositionspfade zu betrachten wurden vor Beginn der Bohrungen die Radonkonzentration in der Raumluft der Wohnhäuser und an der Bohrstelle in der Umgebungsluft bestimmt. Außerdem wurde die Konzentration von Uran, Thorium und Radium im Boden an der Bohrstelle ermittelt. Während den Bohrungen wurden Proben des Bohrlochaushubs entnommen, um den Gehalt der natürlichen Nuklide in den durchbohrten Gesteinsschichten zu bestimmen. Nach Beendigung der Anschlussarbeiten wurden vergleichende Messungen der Radonkonzentration in der Raumluft des Wohnhauses durchgeführt.

Basierend auf den gewonnenen Messdaten wurde die maximal zu erwartende zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen im Kalenderjahr infolge von Geothermiebohrungen konservativ ermittelt. Dabei wurden die Expositionspfade Luft, Wasser, Boden-Pflanze-Mensch und die bodennahe Gammastrahlung betrachtet.

Die Ergebnisse zeigten keine signifikante Erhöhung der natürlichen Strahlenexposition durch geothermische Energienutzung.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Projektlauf	1
3	Bestimmung möglicher Expositionspfade	2
4	Standortsuche der Bohrvorhaben	3
4.1	Vorgehensweise	3
4.2	Gefundene Bohrvorhaben	4
5	Probenentnahme und begleitende Messungen	6
6	Untersuchung des Bodenaushubs	8
6.1	Grenzwerte für die Verwertung und Beseitigung des Bohrlochaushubs	8
6.2	Probenaufbereitung	9
6.3	Kalibrierung zur Messung des Bodenaushubs	9
6.4	Auswertung der Gammaskpektrometrie	10
6.5	Hochrechnung der effektiven Dosis	11
6.5.1	Expositionspfad: Gamma-Bodenstrahlung	11
6.5.2	Expositionspfad: Boden-Pflanze-Mensch	13
7	Untersuchung des Expositionspfades Wasser	17
7.1	Grenzwerte für natürliche Radionuklide im Bohrspülwasser	17
7.2	Probenaufbereitung und Durchführung	18
7.3	Messergebnisse der α -Gesamt-Messungen	20
7.4	GIK-Messung	23
7.5	Betrachtung der Grenzwerte	24
7.6	Hochrechnung der möglichen Strahlenexposition	26
8	Betrachtung des Expositionspfades Luft	26
8.1	Messung mittels Kernspurdetektoren in Diffusionskammern	26
8.1.1	Durchführung der Rn-222 Messung	26
8.1.2	Auswertung der Kernspurdetektoren	27
8.2	Aktive Messungen mittels AlphaGUARD	30
8.2.1	Durchführung der AlphaGUARD-Messungen	30
8.2.2	Auswertung der AlphaGUARD -Messung	30
8.3	Strahlenexposition durch Rn-222 bei privater Erdwärmenutzung	32
8.3.1	Berechnung der Strahlenexposition der Hausbewohner	32
8.3.2	Strahlenexposition des Bohrpersonals	33
9	Zusammenfassung der Ergebnisse	34
10	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	36
11	Literatur	38
12	Anhang	41
12.1	Informationsblatt für Bauherren	41
12.2	Geologische Profile der Bohrungen	42

12.3	Ergebnisse der gammaspektrometrischen Auswertung.....	52
12.4	Ermittelte Dosisleistungsmesswerte während der Bohrung.....	64
12.5	Zusammenfassung der spezifischen Aktivitäten der Nuklide U-238, Th-232 und K-40 für alle ausgewählten Proben.....	65
12.6	Messergebnisse Kernspurdetektoren.....	68
12.7	Messergebnisse der AlphaGUARD-Messungen während den Bohrungen.....	72

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 4-1:	Übersicht der messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben in Baden-Württemberg mit ihrer Gebietszuordnung und Projektnummer	4
Tab. 5-1:	Probenaufkommen der einzelnen Bohrvorhaben mit den jeweils durchgeführten Analysen	8
Tab. 6-1:	Zusammensetzung verschiedener Gesteine. Ausschnitt aus [10], ursprünglich aus [11][12].	10
Tab. 6-2:	Abweichungen verschiedener Gesteine zur gewählten Matrix m46 concrete (Beton-Bauschutt) bei ausgewählten Energien. Ausschnitt aus [10].	10
Tab. 6-3:	Effektive Dosis der Referenzgruppen durch Gamma-Bodenstrahlung	12
Tab. 6-4:	Gemittelte Aktivitätskonzentrationen der Nuklide Th-232, U-238 und K-40 für die einzelnen messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben mit den nach Gl. 1 ermittelten zusätzlich zum natürlichen Untergrund effektiven Dosis bezogen auf die Referenzgruppe >17a und <1 a.	13
Tab. 6-5:	Vergleich der Aktivitätskonzentrationen und deren Unsicherheiten gemessener Radionuklide im Boden vor und nach Ableitung des Bohrspülwassers auf ein Feld	14
Tab. 6-6:	Effektive Dosis durch Ingestion lokal erzeugter pflanzlicher Produkte für die Referenzgruppen	16
Tab. 7-1:	Aktivitätskonzentrationen C_i aus Strahlenschutzbereichen (Ausschnitt aus StrlSchV Anlage VII D Nr. 1.1 und 2 [9])	18
Tab. 7-2:	Vergleich der α -Gesamt-Aktivitätskonzentration in 200 ml Probenwasser mit und ohne vorangegangenes Schütteln der Proben in den bei BV #35 durchbohrten geologischen Schichten. Nicht geschüttelte Proben sind mit einem „x“ gekennzeichnet.	19
Tab. 7-3:	Ergebnisübersicht der α -Gesamt Aktivitätskonzentration der ausgewählten Proben in Bezug auf deren Gesteinsschichten	20
Tab. 7-4:	Median- und Maximalwerte der Aktivitätskonzentrationen für Rohwasser in Abhängigkeit der Wasserherkunft und der Gesteinsart der wasserführenden Grundwasserschicht, Ausschnitt aus [23]	22
Tab. 7-5:	Vergleich der Summe der nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen mit den Messergebnissen der α -Gesamt Messungen	24
Tab. 7-6:	Vorgehensweise bei der Ermittlung der anhand der Mächtigkeiten der Gesteinsschichten gewichteten gemittelten Alpha-Aktivitätskonzentrationen C_α für BV#8	25
Tab. 7-7:	Vorgehensweise bei der Ermittlung der anhand der Mächtigkeiten der Gesteinsschichten gewichteten gemittelten Aktivitätskonzentrationen C_α für BV #23	25
Tab. 8-1:	Bestimmung der gewichteten mittleren Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung im Wohnhaus für BV #35	33
Tab. 12-1:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #1	52
Tab. 12-2:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #4	53
Tab. 12-3:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #8	54
Tab. 12-4:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #21 Teil 1	55
Tab. 12-5:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #21 Teil 2	56

Tab. 12-6:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #23	57
Tab. 12-7:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #26	58
Tab. 12-8:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #31	59
Tab. 12-9:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #33	60
Tab. 12-10:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #34	61
Tab. 12-11:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #35 Teil 1	62
Tab. 12-12:	Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #35 Teil 2	63
Tab. 12-13:	Übersicht der spezifischen Aktivität von Th-232, U-238 und K-40 in den ausgewählten Proben in Bezug zu den geologischen Schichten.	65

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 3-1	Pfade von natürlichen Radionukliden die zu einer erhöhten Strahlenexposition für Mensch und Umwelt durch Geothermiebohrungen führen können.	3
Abb. 4-1	Geografische Darstellung der messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben	5
Abb. 4-2	Geologische Reliefkarte von Baden-Württemberg mit den messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben. Karte stark vereinfacht. Quartäre Sedimente außerhalb des Oberrheingrabens und des Alpenvorlandes sind weggelassen (Löß, Junge Talfüllung usw.). [4]	6
Abb. 5-1	Unterlegbrett von BV #21 zur Probenabfüllung in die Kautex-Flaschen. Das Farbspiel entsteht durch Füllung der Kautex-Flaschen bis zum Überlauf.	7
Abb. 6-1	Bodenprobe B bei BV #21 nach Abschluss der Bohrarbeiten mit Feststoffablagerung	14
Abb. 7-1	Links: Ableitung des Schlammwassers aus dem Aushubsammelcontainer auf ein Feld; Bohrvorhaben #21. Rechts: Auffanggrube zur Sammlung des Schwemmwassers bei einer Geothermiebohrung; Bohrvorhaben #1.	17
Abb. 7-2	Filterung der 200 ml Überstandwassers	19
Abb. 7-3	Links: Spektrum der GIK-Messung von Probe 46-8	23
Abb. 8-1	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #8	28
Abb. 8-2	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #21	28
Abb. 8-3	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #23	29
Abb. 8-4	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #35	30
Abb. 8-5	Positionierung der Messgeräte während der Bohrung bei BV #35	30
Abb. 8-6	Gegenüberstellung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Nähe des Bohrlochs bei den BV #23 und #35	31
Abb. 12-1	Informationsblatt das den Landratsämtern zur Weitergabe an die Hausbesitzer übermittelt wurde.	41
Abb. 12-2	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #1 Heidelberg - Handschuhsheim	42
Abb. 12-3	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #4 Grenzach - Wyhlen	43
Abb. 12-4	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #8 Friedrichshafen	44
Abb. 12-5	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #21 Aalen - Dewangen	45
Abb. 12-6	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #23 Bad Wurzach	46
Abb. 12-7	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #26 Öhringen - Cappel	47
Abb. 12-8	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #31 Linkenheim	48
Abb. 12-9	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #33 Fellbach (grafische geologische Schichtendarstellung wurde nicht übermittelt. Schichtenverzeichnis nur in schlechter Fax-Qualität verfügbar.	49
Abb. 12-10	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #34 Buchenbach - Unteribental	50
Abb. 12-11	Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #35 Kirchheim am Ries	51
Abb. 12-12	Veränderung der Dosisleistung während der Bohrung am Bohrloch der BV #1, #4, #8, #21, #23 und #26. Messintervall $t = 3$ min.	64
Abb. 12-13	Veränderung der Dosisleistung während der Bohrung am Bohrloch der BV #31, #33, #34 und #35. Messintervall $t = 3$ min.	65
Abb. 12-14	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #1, #4, #8	68
Abb. 12-15	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #21, #23, #26	69

Abb. 12-16	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #31, #33, #34	70
Abb. 12-17	Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #35, #39, #40	71
Abb. 12-18	Veränderung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft während der Bohrungen der BV #1, #8, #21	72
Abb. 12-19	Veränderung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft während der Bohrungen der BV #31, #33 und #34	72

1 Einleitung

Bei der Gewinnung geothermischer Energie für Wohnhäuser werden für das Einbringen eines Wärmetauschers in unmittelbarer Nähe oder direkt unter der Bodenplatte von Häusern Bohrsonden in Tiefen bis zu maximal 400 m niedergebracht. In Baden-Württemberg gibt es Gebiete, in welchen natürliche radioaktive Stoffe in erhöhten Konzentrationen im geogenen Untergrund vorkommen. Durch geothermische Bohrungen könnten natürliche radioaktive Stoffe wie Uran, Thorium, Radium, Radon, Polonium und Blei aus „tieferen“ Erdschichten lokal eng begrenzt an die Oberfläche gelangen. Als eines der Folgeprodukte in den natürlichen Zerfallsreihen von Uran und Thorium gelangt dann auch vermehrt das Edelgas Radon an die Oberfläche. Die Inhalation von kurzlebigen gasförmigen Radon und seiner Folgeprodukte gilt als wesentliche Quelle für die natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung.

2 Projektablauf

Laut der Aufgabenstellungen des BWPlus Projektes (Projektkennzeichen: BWE 28003) sollten in Baden-Württemberg in fünf Gebieten mit geologisch auffälligem Untergrund jeweils drei Bohrvorhaben messtechnisch begleitet werden. Ziel der Untersuchungen war die Erkundung, in wie weit geothermische Bohrungen für Wohnhäuser zu einer erhöhten Strahlenexposition für Mensch und Umwelt führen können.

Für das Projekt wurde eine Studienarbeit mit dem Titel „Vorkommen und Analytik natürlicher Radionuklide bei der Erdwärmennutzung“ [1] geschrieben, mit deren Hilfe die Wahl der Standorte spezifiziert werden konnte. In einer Bachelor Arbeit mit dem Thema „Natürliche Strahlenexposition durch Sondereinbringung für die private Erdwärmennutzung“ [2] wurden die in diesem Bericht zusammengefassten Ergebnisse erarbeitet. Begleitend zu diesem Projekt wurde eine Masterarbeit mit dem Thema „Betrachtung der Strahlenexposition von Mensch und Umwelt durch geothermische Energienutzung für Wohnhäuser in Baden Württemberg“ [3] an der Universität Rostock durchgeführt.

Im Sachstandsbericht vom April 2009 wurden bereits die am Forschungsvorhaben Geothermie beteiligten Labore Radonlabor (RL) und Physikalisches Messlabor (PML) vorgestellt. Die einzelnen Schritte des Projektes wurden geplant und die Verantwortlichkeiten und Kompetenzen der Arbeitsfelder „Standortsuche“, „Radon“ und „Probenentnahme“ aufgeteilt.

Die Findung der fünf Gebiete wurde anhand geologischer Gesichtspunkte (Nuklidvorkommen in oberflächennahen Gesteinen, Permeabilitäten), den Radonkonzentrationen in Bodenluft und in Trinkwasser, den Radionuklidkonzentrationen im Trinkwasser und der Ortsdosisleistung vorgenommen.

Um eine Veränderung der Strahlenexposition feststellen zu können wurde vor Beginn der Untersuchung die Radonkonzentration in der Raumluft des Wohnhauses sowie an der Bohrstelle in der Umgebungsluft gemessen, Außerdem sollte die Konzentration von Uran, Thorium und Radium im Boden an der Bohrstelle ermittelt werden. Während der Bohrungen sollten die gleichen Probenahmen und Messungen begleitend durchgeführt werden. Abschließend war eine Betrachtung der Radonkonzentration in der Raumluft des Wohnhauses nach Beendigung der Baumaßnahmen bzw. der Anschlussarbeiten vorgesehen.

Die gesuchten Bohrvorhaben sollten mittels Kontaktaufnahme mit den in Baden-Württemberg tätigen Bohrfirmen ausfindig gemacht werden. Zusätzlich waren die Landratsämter angeschrieben worden, mit der Bitte, ein Informationsblatt über das Forschungsvorhaben an die Antragsteller weiter zu geben

und sich bei Interesse mit dem Institut für Strahlenforschung¹ - Physikalisches Messlabor in Verbindung zu setzen. Die Kontaktaufnahme mit den Bauherren war zudem sowohl durch zeitliche als auch durch organisatorische Gründe erschwert.

Ebenso ergaben sich Komplikationen bei der Koordination der ausgewählten Bohrvorhaben. Die Messung der Radonaktivitätskonzentration vor Bohrbeginn in der Raumluft des Wohnhauses erforderte eine Vorlaufzeit von mindestens drei Wochen, um die Radonexposition mittels Kernspurdetektoren in Radondiffusionskammern zu ermitteln. Zu weiteren Unwägbarkeiten kamen von Seiten der Architekten und Bohrfirmen Bedenken hinsichtlich zeitlicher Verzögerungen des Vorhabens und grundsätzliche Vorbehalte gegen die geplanten Messungen im häuslichen Bereich, wodurch sich die Auswahlmöglichkeiten weiter reduzierten. Des Weiteren ergaben sich diverse unvorhergesehene Kosten. Z.B. zeigte die Erfahrung, dass die Anschlüsse der Erdwärmesonde an das Wohnhaus in der Regel nicht in der gleichen Woche wie die Bohrung durchgeführt werden. Dadurch entstanden ungeplante zusätzliche Fahrtkosten zum Wechsel der Kernspurdetektoren; der Austausch war eigentlich für den Tag der Bohrung vorgesehen.

Bei den Kontakten mit den Bohrfirmen und Bauherren war stets umfangreiche Aufklärungsarbeit zu leisten und dennoch wurde uns häufig kurzfristig die Teilnahme an einem Bohrvorhaben (BV) verwehrt.

3 Bestimmung möglicher Expositionspfade

Für die Bestimmung und Bewertung möglicher Expositionspfade bei der Einbringung von Erdwärmesonden für geothermische Zwecke sind die Nuklide der natürlichen Zerfallsreihen zuzüglich des Kalium-40 und deren radio- und geochemischen Eigenschaften zu betrachten. In der Studienarbeit [1] wurden die Einflussgrößen der Radionuklide auf die radioaktiven Gleichgewichtszustände im Gestein und in grundwasserführenden Schichten erörtert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die unterschiedliche Mobilität und Löslichkeit der Radionuklide der Zerfallsreihen eine Vorhersage der Aktivitätskonzentration in Gestein, Bodenluft und Grundwasser erschwert. Allgemein kann nicht von radioaktiven Gleichgewichten im Gestein oder den Medien Luft und Grundwasser ausgegangen werden.

Basierend auf dem Verhalten der natürlichen Radionuklide im Erdboden und in Gesteinen sind in Abb. 3-1 Pfade der natürlichen Radionuklide dargestellt; diese können zu einer erhöhten Strahlenexposition für Mensch und Umwelt durch Geothermiebohrungen führen.

Über den Bohrlochaushub ist zum Einen eine Exposition über den Boden-Pflanze-Mensch-Pfad durch die natürlichen Isotope des Uran, Thorium, Radium und Blei, sowie über den Wasser-Pfad durch die Isotope des Uran, Radium, Radon nicht auszuschließen. Des Weiteren ist eine erhöhte Exposition durch Gamma-Bodenstrahlung beim Verbleib des Aushubs am Ort der Bohrung denkbar. Auch die Weiterverwendung des ausgehobenen Sandes auf Spielplätzen oder die Verwendung von Kies als Baumaterial ist zu betrachten.

Eine Exposition über den Luftpfad durch Radon ist über viele Wege vorstellbar. Es ist zu prüfen, ob Radon aus tieferen Schichten in die Erdwärmesonde diffundieren kann und somit bevorzugt ins Haus befördert und dort über das Heizsystem verteilt wird. Alternativ wäre auch eine allgemeine Erhöhung der Radon-Aktivitätskonzentration in der oberflächennahen Bodenluft um das Bohrloch vorstellbar, die

¹ Ausgliederung der analytischen Labore des Instituts für Strahlenforschung in das KIT Sicherheitsmanagement während der Ausführung dieses Forschungsvorhabens.

aber nicht direkt über das Heizsystem, sondern durch allgemein bekannte Diffusionswege, wie z.B. Fundament oder Kellerwände ins Wohnhaus gelangt. Des Weiteren ist eine Exposition des Bohrpersonals durch Ausgasung von Radon, z.B. durch das Durchbohren vergleichsweise radondichter Lehmschichten, aus dem Bohrloch während der Bohrung nicht ausgeschlossen.

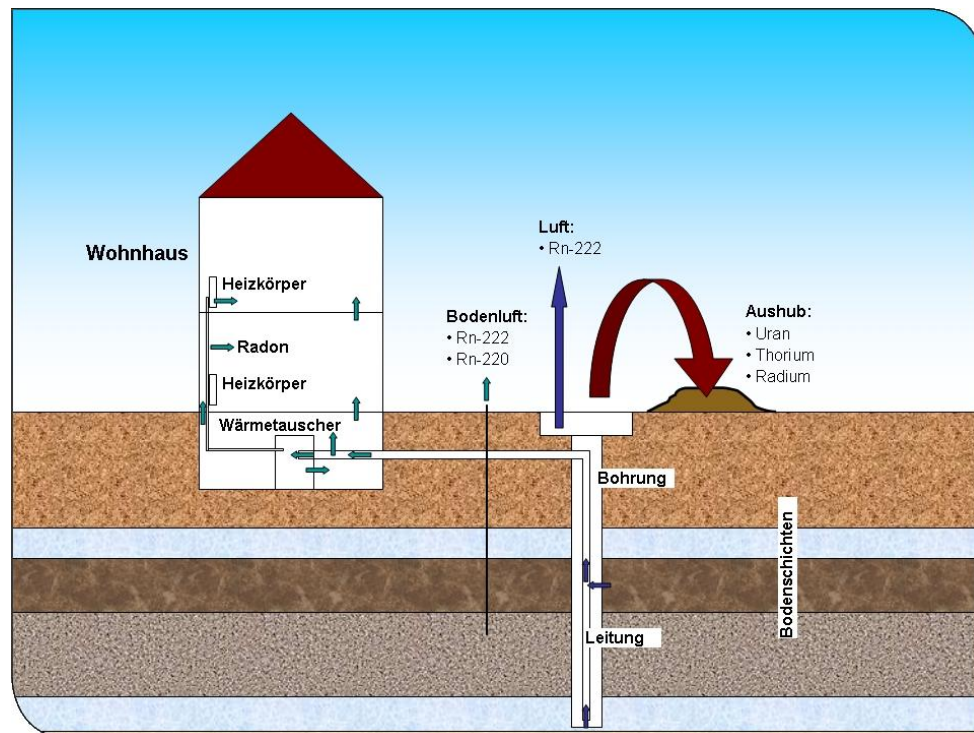


Abb. 3-1 Pfade von natürlichen Radionukliden die zu einer erhöhten Strahlenexposition für Mensch und Umwelt durch Geothermiebohrungen führen können.

4 Standortsuche der Bohrvorhaben

4.1 Vorgehensweise

Basierend auf geologischen Gesichtspunkten, den Radonkonzentrationen in Bodenluft und in Trinkwasser, den Radionuklidkonzentrationen im Trinkwasser und der Ortsdosisleistung wurde die Auswahl von fünf für das Forschungsvorhaben repräsentativen Gebieten in Baden-Württemberg getroffen (siehe Studienarbeit II [1]). Diese sind im Folgenden aufgelistet.

- Gebiet 1: Hohenlohekreis, Kreis Schwäbisch Hall, Rems-Murr-Kreis, Ostalbkreis
- Gebiet 2: Kreis Rastatt, Baden-Baden, Karlsruhe, Kreis Karlsruhe
- Gebiet 3: Mannheim, Heidelberg, Rhein-Neckar-Kreis
- Gebiet 4: Freiburg, Kreis Breisgau-Hochschwarzwald, Kreis Lörrach, Waldshut
- Gebiet 5: Bodensee-Kreis, Kreis Sigmaringen, Kreis Ravensburg

Zur Festlegung von je drei interessanten Bohrvorhaben in den jeweiligen Gebieten wurden in Zusammenarbeit mit dem Umweltministerium Baden-Württemberg die Landratsämter in diesen Gebieten, sowie bekannte ortsansässige Bohrfirmen angeschrieben. In diesen Schreiben wurde anhand eines Informationsblattes über das Forschungsvorhaben informiert (Anhang 12.1), welches an die Bauher-

Standortsuche der Bohrvorhaben

ren und Hausbesitzer geeigneter Bohrvorhaben weiterzureichen war. Folgende Auswahlkriterien sollten hierbei erfüllt sein:

- Bis zum Beginn der Bohrung verbleiben noch mindestens vier Wochen.
- Eine Bohrtiefe von mehr als 40 Meter.

Das bestehende Wohnhaus sollte möglichst ein Altbau sein. Bei Neubauten sollte ein Baustadium erreicht sein, das ein Schließen der Fenster und Türen ermöglichte. Die Vorlaufzeit von mindestens vier Wochen ist für die Radonmessung mit Kernspurdetektoren unbedingt notwendig, um Vergleichswerte der Radonkonzentration vor der Bohrung im Wohnhaus zu erhalten. Dabei waren drei Wochen als minimale Auslegezeit der Detektoren eingeplant sowie eine Woche für die Organisation (Dienstwagen, Personal, Exposimeter und Protokolle vorbereiten etc.).

Die interessante Bohrtiefe wurde nicht wie im Antrag des Forschungsvorhabens beschrieben auf bis zu 100 m festgelegt, da sich zeigte, dass dies für Baden-Württemberg nicht repräsentativ ist. Ein großer Teil der Bohrungen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie liegt im Bereich von mehr als 100 m Bohrtiefe. Ursächlich für die Begrenzung einer Bohrung auf < 100 m sind regional höher gelegene grundwasserführende Schichten die nicht durchbohrt werden dürfen.

4.2 Gefundene Bohrvorhaben

Es wurden zehn der 15 Bohrvorhaben sondiert, messtechnisch begleitet und ausgewertet. Außerdem wurde bei zwei weiteren Bohrvorhaben die Radonexposition vor und nach dem Anschluss der Erdwärmesonde bestimmt. Für eine bessere Lesbarkeit werden in diesem Bericht die Bohrvorhaben in Tab. 4-1 einmal vollständig aufgelistet und fortlaufend mit den jeweils vergebenen Projektnummern beschrieben.

Tab. 4-1: Übersicht der messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben in Baden-Württemberg mit ihrer Gebietszuordnung und Projektnummer

Projektnummer	Ort des Bohrvorhabens	Bohrtiefe [m]	Gebietszuordnung
1	Heidelberg - Handschuhshheim	65	3
4	Grenzach - Wyhlen	77	4
8	Friedrichshafen	145	5
21	Aalen - Dewangen	100	1
23	Bad Wurzach	160	5
26	Öhringen - Cappel	85	1
31	Linkenheim	44	2
33	Fellbach	99	1
34	Buchenbach - Unteribental	160	4
35	Kirchheim am Ries	190	1
39*	Schwäbisch Gmünd	70	1
40*	Aalen	unbekannt	1

* nur Messung der Rn-222 Exposition vor und nach Anschluss der Erdwärmesonde

Die vorgenommene Nummerierung entspricht der Reihenfolge der Kontaktaufnahmen mit dem Karlsruher Institut für Technologie. Da aber bei Weitem nicht alle Bohrvorhaben für das Forschungsvorhaben geeignet waren, oder kurzfristig abgesagt wurden, ist die Nummerierung nicht fortlaufend.

In Abb. 4-1 sind die einzelnen Projekte geografisch eingezeichnet. Rote Markierungen stellen vollständig begleitete Bohrvorhaben dar. Das heißt, es wurden vor und nach der Bohrung Radonexposimeter ausgelegt, während der Bohrung begleitende Messungen der Radon-

Aktivitätskonzentration in der bohrlochnahen Luft und Ortsdosisleistungsmessungen (ODL) durchgeführt sowie alle zwei Meter eine Probe des Bohrlochaushubs gezogen.

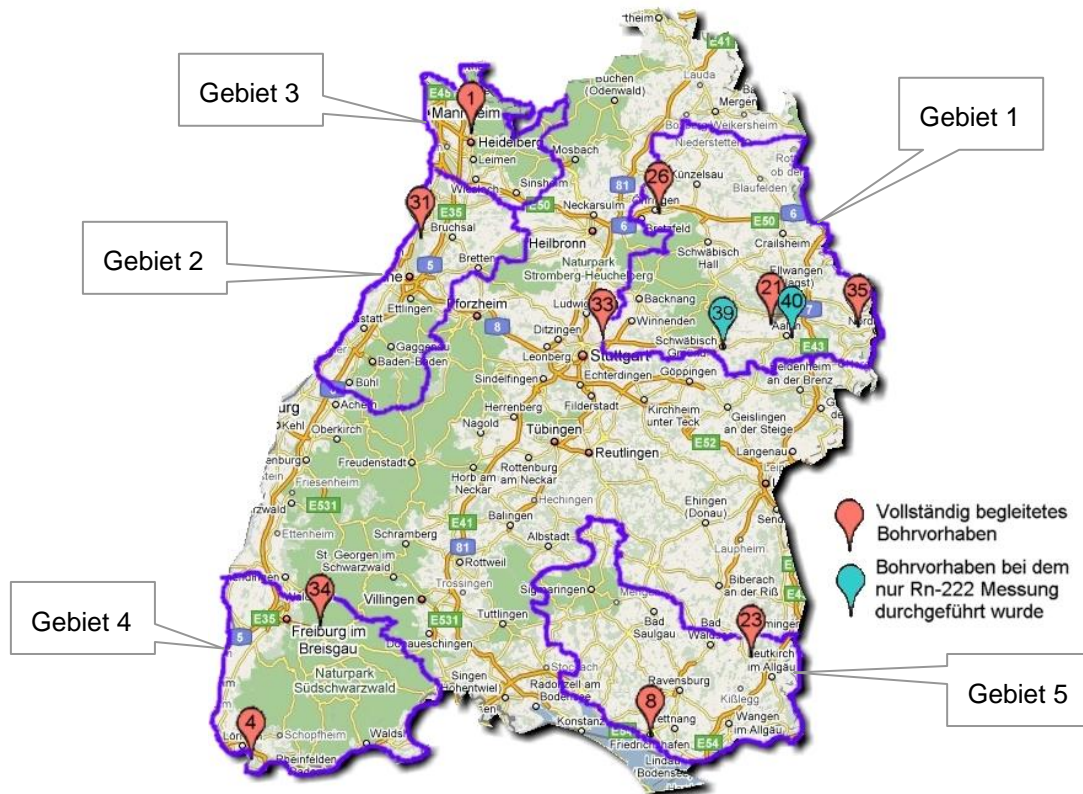


Abb. 4-1 Geografische Darstellung der messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben

Die erfassten Bohrvorhaben decken einen Großteil der in Baden-Württemberg auftretenden Gesteinsschichten ab. Für den besseren Überblick sind die Bohrvorhaben in die geologische Reliefkarte [4] in Abb. 4-2 geografisch eingetragen worden.

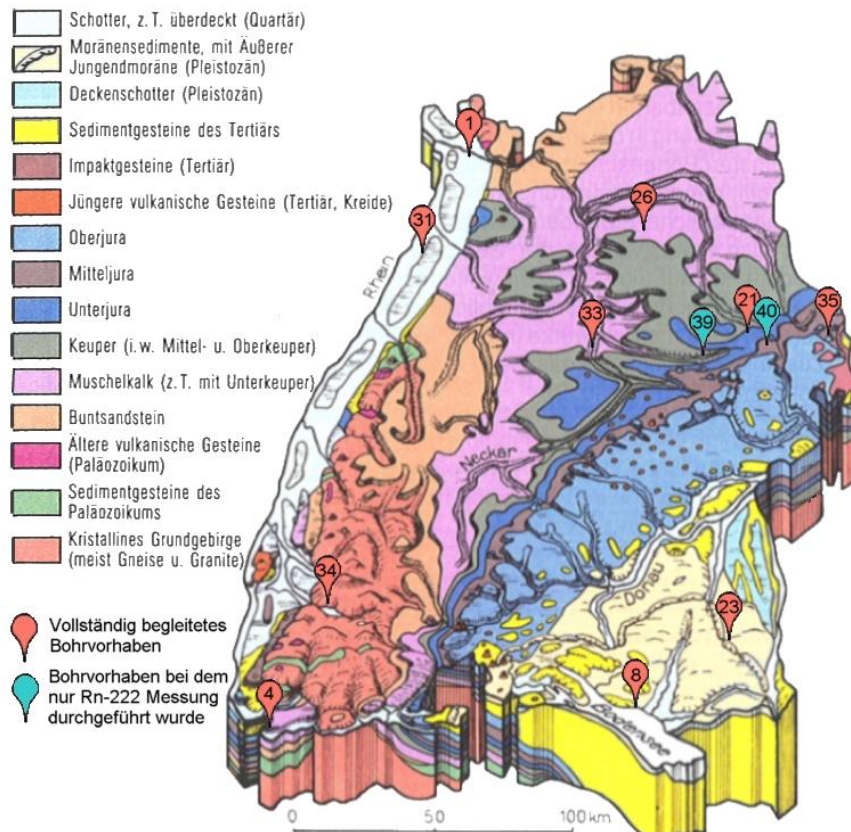


Abb. 4-2 Geologische Reliefkarte von Baden-Württemberg mit den messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben. Karte stark vereinfacht. Quartäre Sedimente außerhalb des Oberrheingrabens und des Alpenvorlandes sind weggelassen (Löß, Junge Talfüllung usw.). [4]

Auf der geologischen Reliefkarte sind regional eng begrenzte Varianzen nicht erfasst. Sie dient nur als grober Überblick. Für die Auswertung der Messdaten und Bodenproben ist eine Zuordnung zu den geologischen Schichtverzeichnissen unabdingbar. Eine Nutzung des Kartenservers des Regierungspräsidiums Freiburg ISONG [5] wurde als nicht zielführend angesehen, da hier die Tiefenprofile häufig extrapoliert werden und um bis zu zehn Meter Tiefe und Mächtigkeit verschoben sein können. Zur Auswertung der Proben wurde daher das geologische Profil der durchgeführten Bohrung herangezogen.

Aus Zeitgründen mussten die Tiefenprofile direkt von den Geologen der Bohrfirmen angefordert werden, da es aufgrund der Datenflut im Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg häufig nicht zeitnah zu einer Eintragung neuer Bohrungen in die Datenbank kommt. Die jeweiligen Tiefenprofile der Bohrungen befinden sich in Anhang 12.2.

5 Probenentnahme und begleitende Messungen

Die Proben wurden parallel zu der bei geothermischen Bohrungen stets durchgeführten Probenentnahmen zur Bestimmung der Schichtenfolge entnommen. Im „Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden“ des Umweltministeriums Baden-Württemberg wird auf die Vorschrift verwiesen, dass bei der Bohrung angetroffene Schichtenfolgen durch „eine sorgfältige Probenahme (Beprobung gemäß DIN 4021, Probenahme alle Meter, mindestens jedoch alle 2 m) Aufnahme der Schichtenfolge (gemäß DIN 4022), deren Darstellung (gemäß DIN 4023) sowie durch eine geologische Gliederung

des Bohrprofils“ [6] zu dokumentieren sind. Daher wurde für die bessere Vergleichbarkeit mit den geologischen Schichtenfolgen auch alle zwei Meter eine Probenahme durchgeführt.

Die Probenahme erfolgte bei allen Bohrvorhaben (außer BV #1) am Einlauf des Auffangcontainers. Bei BV #1 wurde der Bohraushub in einer gegrabenen Auffangmulde gesammelt. Alle Proben wurden jeweils beim vollständigen Versenken jedes Zwei-Meter-Bohrgestänges entnommen. Aufgrund der Bohrtechnik handelt es sich bei allen entnommenen Proben um Mischproben über eine nicht ganz klar definierte Meterzahl.

Bereits bei der ersten Bohrung (BV #21) zeigte sich, dass sich unterschiedliche Boden- und Gesteinsschichten durch Betrachtung der veränderten Materialaushubfarbe auch von Geologie-Laien grob unterscheiden lassen. In Abb. 5-1 ist exemplarisch das Unterlegbrett von BV #21 zur Probenabfüllung in die 1L-Kautex-Flaschen gezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass sich das Bohrwasser der einzelnen Schichten in seinem Aussehen stark unterscheidet.



Abb. 5-1 Unterlegbrett von BV #21 zur Probenabfüllung in die Kautex-Flaschen. Das Farbspiel entsteht durch Füllung der Kautex-Flaschen bis zum Überlauf.

Innerhalb einer Gesteinsschicht wurde mit einer weitestgehend konstanten Nuklidzusammensetzung gerechnet. Daher wurden die begleiteten Bohrvorhaben mittels ihrer Farbschichten nach Abgleich mit den geologischen Schichtverzeichnissen auf ihre deutlichen Schichtwechsel reduziert. Je Schichtwechsel sollten dann jeweils mindestens zwei Proben messtechnisch analysiert werden. Mit dieser Vorgehensweise wurde die Zahl der zu messenden Proben auf ein knappes Fünftel reduziert.

In Tab. 5-1 sind die durchgeführten Messungen für die einzelnen Bohrvorhaben in Bezug auf das gesamte Probenaufkommen je Bohrvorhaben aufgelistet. Die Auswahl der Proben für die Gammaskopimetrie wurde anhand zweier Kriterien getroffen. Die beiden Proben je Gesteinsschicht sollten wenn möglich einen Wasseranteil von mindestens 200 ml aufweisen und gleichzeitig einen hohen Feststoffanteil besitzen, um ein ausreichendes Probenvolumen für die gammaskopimetrische Analyse zu stellen. So sollte gewährleistet werden, dass ein Zusammenhang zwischen Aktivitätskonzentration im Boden und im Überstandswasser betrachtet werden konnte. Die Volumina wurden wie beschrieben festgelegt, um einen Kompromiss für die Gammaskopimetrie und die α -Gesamtanalyse zu schließen. Mit der getroffenen Wahl der Volumina können für beide Messverfahren hinreichend niedrige Nachweisgrenzen erzielt und Unsicherheiten gering gehalten werden.

Tab. 5-1: Probenaufkommen der einzelnen Bohrvorhaben mit den jeweils durchgeführten Analysen

BV	Proben Bohraushub Gesamt	davon in 1L-Kautex-Flaschen	davon in Folien-beuteln	γ -Spektrometrie	α -Gesamt Messung	GIK-Messung
#1	63	35	28	9	--	--
#4	36	35	1	13	7	--
#8	69	47	22	13	13	1
#21	55	55	--	17	15	--
#23	55	55	--	9	10	1
#26	42	40	2	7	8	--
#31	25	25	--	7	5	--
#33	50	47	3	14	4	--
#34	61	55	6	11	--	--
#35	92	92	--	17	24	--
Summe	548	486	62	117	86	2

Außerdem wurden die Proben so gewählt, dass sie nach Möglichkeit nicht direkt an den Schichtübergängen lagen, sondern einige Tiefenmeter Abstand zu diesen hatten. Bei den BV #1 und #34 waren alle Proben ohne nennenswerten Wasseranteil, so dass auf eine α -Gesamt-Messung des Wasseranteils verzichtet werden musste. Für die BV #4, #31 und #33 konnte nur bei einigen Schichten das benötigte Probenwasser entnommen werden. Die anderen Schichten waren nahezu trocken.

Bei den übrigen Bohrvorhaben wurden in einigen Schichten eine zusätzliche dritte Wasserprobe entnommen und ausgewertet. Die Proben mit den gemessenen maximalen Werten über alle Bohrvorhaben wurden zur nuklidspezifischen Bestimmung mittels alphaspektrometrischer Untersuchung in einer Gitterionisationskammer (GIK-Messung) analysiert.

6 Untersuchung des Bodenaushubs

Für die Analyse des Bodenlochaushubs wurde das Verfahren zur „Bestimmung von Radionukliden mittels Gammaskpektrometrie“ gemäß der internen Methodenbeschreibung des Physikalischen Messlabors (KIT) MB ISF 001 [7], welches nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert ist, durchgeführt. Die Probenaufbereitung wurde entsprechend der Empfehlungen der Messvorschrift zur gamma-spektrometrischen Bestimmung von natürlichen Radionukliden in Bodenproben (K- γ -SPEKT-BODEN-01) [8] vorgenommen.

In den folgenden Kapiteln werden die gewählten Proben nicht in fortlaufender Nummerierung gelistet, sondern die Originalbezeichnungen der Bohrvorhaben verwendet. Dabei entspricht die erste Zahl der Gestängenummer, die zweite Zahl der Nummer des Bohrvorhabens. Bei allen Bohrvorhaben außer BV #34 wurden für die gesamte Bohrung zwei Meter lange Bohrgestänge verwendet. Folglich kann an der Probenbezeichnung die Tiefenlage der Probe abgelesen werden, indem man die erste Ziffer mit dem Faktor 2 multipliziert. Bei BV #34 waren es ab dem 28sten Meter drei Meter lange Bohrgestänge.

6.1 Grenzwerte für die Verwertung und Beseitigung des Bohrlochaushubs

In Teil 3 der Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) [9] wird in Kapitel 3 der „Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen“ und hier insbesondere in § 97 StrlSchV die Überwachung von Rückständen geregelt. Gemäß § 97 Abs. 2 bis 4 in Verbindung mit Anlage XII Teil A StrlSchV fallen die bei geothermi-

schen Bohrungen anfallenden Rückstände nicht unter die Regelungen der StrlSchV. Im Rahmen dieses Vorhabens soll gezeigt werden, ob die Untersuchung von Rückständen erforderlich ist, um die Einhaltung des Grenzwertes für Einzelpersonen der Bevölkerung für die effektive Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr gemäß § 97 StrlSchV durch das Anfallen von „überwachungsbedürftigen Rückständen“ zu bestätigen.

Geprüft werden soll, ob die spezifischen Aktivitäten für jedes Radionuklid der Nuklidketten U-238^{sec} und Th-232^{sec} unter 0,2 Bq/g liegen, um wiederum nicht als überwachungsbedürftiger Rückstand im Sinne der §§ 97 bis 102 zu gelten. Hierbei steht „sec“ für die in Anlage III Tabelle 2 StrlSchV aufgelisteten Tochternuklide der Zerfallsreihen.

6.2 Probenaufbereitung

Die ausgewählten Proben lagen größten Teils, wie zuvor beschrieben, in 1-L-Kautex-Flaschen mit nicht zu vernachlässigendem Wasseranteil vor. Auch die Proben in Folienbeuteln waren feucht. Für die Berechnung der Aktivitätskonzentration des Bodenaushubs waren die Proben zur Bestimmung der Trockenmasse (TM) zu trocknen und in eine Geometrie zu bringen, für die eine mathematische Kalibrierung der verwendeten Reinst-Germanium-Detektoren erstellt werden konnte.

Zum Trocknen wurden die einzelnen Proben in Keramik-Eindampfschalen gegeben und bei einer Temperatur von 100°C bis zu einem Restfeuchteanteil kleiner ein Prozent getrocknet. Anschließend wurden die Proben zerkleinert und homogenisiert, in 1-L-Kautex-Flaschen gefüllt, die Trockenmasse, sowie der Füllstand der Probenflasche dokumentiert und daraus die Schüttdichte des Flascheninhaltes bestimmt.

6.3 Kalibrierung zur Messung des Bodenaushubs

Zur Auswertung der aufgenommenen Spektren des Bohrlochaushubs mussten einige Kompromisse eingegangen werden. Streng genommen hätte für jede beprobte Bodenschicht eine Bestimmung der elementaren Zusammensetzung durchgeführt werden müssen, um eine exakte Kalibrierung für diesen Boden zu erstellen zu können. Dies hätte einen großen analytischen Aufwand bedeutet, der aus wirtschaftlichen Gründen nicht gerechtfertigt war. Die Abweichung die sich durch diese Näherungen ergeben sind vertretbar und werden in diesem Kapitel dargelegt.

Gewählt wurde die bereits erstellte Kalibrierung für Beton-Bauschutt (Interne Laborbezeichnung: m46 concrete) für 1L-Kautex-Flaschen. Ursächlich für die Wahl war die ähnliche elementare Zusammensetzung und Prozentanteile an SiO₂ und Calciumcarbonat. Für die Kalibrierung m46 concrete war folgende Zusammensetzung hinterlegt: Wasserstoff (0,56%), Kohlenstoff (15,42%), Sauerstoff (35,75%), Magnesium (2,68%), Silizium (18,77%) und Kalzium (26,82%).

In Tab. 6-1 sind typische Zusammensetzungen für Gesteine aufgelistet, die unter anderem auch bei den Bohrungen beprobt wurden.

² Expositionen durch Radionuklide der U-235-Zerfallsreihe sind dabei berücksichtigt und müssen nicht gesondert betrachtet werden.

Tab. 6-1: Zusammensetzung verschiedener Gesteine. Ausschnitt aus [10], ursprünglich aus [11][12].

Stein	Granit	Schiefer	Sedimentgestein Mittelwert	Sandstein (1)	Sandstein (2)	Kalkstein (1)	Kalkstein (2)
SiO ₂	72.21%	58.98%	54.04%	78.42%	70.71%	5.20%	8.55%
Al ₂ O ₃	13.79%	15.63%	15.09%	4.78%	8.28%	0.81%	2.29%
Fe ₂ O ₃	0.85%	4.08%	3.91%	1.07%	2.53%	0.54%	1.04%
MgO	0.52%	2.48%	2.99%	1.16%	1.92%	7.91%	8.03%
CaO	1.29%	3.16%	6.64%	5.51%	4.34%	42.66%	42.22%
Na ₂ O	3.07%	1.32%	1.27%	0.45%	0.59%	0.05%	0.00%
K ₂ O	5.46%	3.29%	3.22%	1.31%	2.12%	0.33%	0.00%
TiO ₂	0.37%	0.66%	0.64%	0.25%	0.86%	0.06%	0.00%
MnO	0.06%	-	-	-	0.06%	-	0.07%
P ₂ O ₅	0.18%	0.17%	0.15%	0.08%	0.10%	0.04%	0.07%
FeO	1.69%	2.49%	2.34%	0.30%	1.52%	0.00%	0.71%
CO ₂	-	2.67%	6.06%	5.04%	3.94%	41.63%	37.01%
H ₂ O	0.53%	5.08%	3.64%	1.63%	3.03%	0.77%	0.00%

Um Aussagen über den erzeugten Fehler durch Verwendung der Kalibrierung 46m concrete zu geben, wurde in Zusammenarbeit mit Frau Annika Jakobi [10], unter zu Hilfenahme der Werte aus Tab. 6-1 Spalten 1, 6 und 8 die relativen Abweichungen der Effizienz bei der Messung von Granit-, Sandstein- und Kalkstein-Matrizen in 1L-Kautex-Flaschen bei einer Schüttdichte von 1,2 g/cm³ bestimmt. Nähere Informationen zur Vorgehensweise und Berechnung sind Quelle [10] zu entnehmen.

In Tab. 6-2 sind die ermittelten relativen Abweichungen der Effizienzen gegenüber der gewählten Matrix m46 concrete für die verschiedenen Energien zusammengefasst. Es wird deutlich, dass für Sandstein und Granit die Messergebnisse im niederen Energiebereich bis ca. 100 keV überschätzt werden und für höhere Energien die Wahl der Matrix eine untergeordnete Rolle spielt. Für Kalkstein wird die Wahl der Matrix eine Unterschätzung der Aktivitätskonzentrationen zur Folge haben, wobei diese eher gering ist. Folglich führt die Wahl der Kalibriermatrix m46 concrete eher zu einer konservativen Berechnung der Aktivitätskonzentrationen des Bodenaushubs.

Tab. 6-2: Abweichungen verschiedener Gesteine zur gewählten Matrix m46 concrete (Beton-Bauschutt) bei ausgewählten Energien. Ausschnitt aus [10].

	46.5 keV	59.5 keV	81.0 keV	105.3 keV	122.1 keV	136.5 keV	165.9 keV
Kalkstein	-4,4%	-2,7%	-1,2%	-0,5%	-0,2%	-0,1%	0,1%
Sandstein	15,7%	10,1%	5,1%	2,7%	1,9%	1,5%	0,9%
Granit	18,6%	12,1%	6,3%	3,4%	2,4%	1,9%	1,3%

	238.6 keV	364.5 keV	583.2 keV	661.7 keV	911.1 keV	1173.2 keV	1460.8 keV
Kalkstein	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Sandstein	0,5%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Granit	0,7%	0,5%	0,4%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%

6.4 Auswertung der Gammaskpektrometrie

In Anhang 12.5 sind für alle ausgewählten Proben der begleiteten Bohrvorhaben die aus den gammaskpektrometrischen Analysen berechneten spezifischen Aktivitäten von Th-232 und U-238 als Mutternuklide der interessierenden Zerfallsreihen, sowie für K-40 zusammengefasst. In mehreren

Fällen musste die Aktivität des U-238 aus den Messwerten des Ra-226 bestimmt werden, da Pa-234m nicht ausgewertet werden konnte. Konservativ wurde von Gleichgewichten innerhalb der Zerfallsreihen ausgegangen. Im Falle sich überlagernder Linien wurden die Werte konservativ überschätzt und mit einem Sternchen kenntlich gemacht.

Die Messergebnisse erscheinen plausibel. Beim Vergleich der einzelnen Aktivitätskonzentrationen mit den jeweiligen geologischen Schichten wird deutlich, dass die Annahme einer homogenen Nuklidverteilung innerhalb von Gesteinsschichten weitestgehend zutreffend war. Es zeigte sich jedoch, dass leichte Farbvarianzen bereits Hinweise auf eine Verschiebung der Nuklidverhältnisse geben können. Besonders deutlich zeigt sich dies bei BV #1 in den beiden letzten Schichten. Die Proben 11-1 und 15-1 sind der Schicht Sandstein-Tonstein der Farbgebung rot-gelb zugeordnet und die Proben 25-1 und 32-1 der Schicht Sandstein-Tonstein mit der Farbgebung rot-grau. Beim Vergleich der Messergebnisse dieser beiden Schichten zeigt sich, dass die Thoriumkonzentration in der unteren Schicht bis zu zehnmal größer ist als in der darüber liegenden. Für Uran und Kalium unterschieden sich die beiden Schichten ca. um den Faktor 2-3.

Insgesamt wurden nur wenige Schichten mit leicht erhöhten Radionuklidkonzentrationen beprobt. Die Höchstwerte der spezifischen Aktivitäten liegt bei 0,133 Bq/g Th-232 in Probe 32-1, bei 0,096 Bq/g U-238 in Probe 61-35 und bei 1,85 Bq/g K-40 in Probe 25-1.

Somit wurde gezeigt, dass für alle Proben unter Annahme radioaktiver Gleichgewichte für alle Nuklide der Zerfallsketten Th-232sec und U-238sec der in Anlage XII Teil A der StrlSchV [9] angegebene Wert von 0,2 Bq/g unterschritten wurde. Somit wäre der Bodenaushub auch dann kein überwachungsbedürftiger Rückstand im Sinne der StrlSchV, wenn in Anlage XII Teil A Bohrungen zum Zwecke geothermischer Erdwärmennutzung aufgelistet wären.

6.5 Hochrechnung der effektiven Dosis

Im Folgenden soll für die beiden Expositionspfade Gamma-Bodenstrahlung und Boden-Pflanze-Mensch rechnerisch nachgewiesen werden, dass die maximale zu erwartende zusätzliche effektive Dosis, die durch geothermische Bohrungen entstehen kann, für Einzelpersonen der Bevölkerung deutlich kleiner 1 mSv ist.

Beim Expositionspfad Gamma-Bodenstrahlung zeigten Messungen mittels Digitalem Ratemeter FHT 1100 (V5.1) der Firma FAG KUGELFISCHER (für BV #35 wurde Dosisleistungsmessgerät der Firma AUTOMESS eingesetzt), dass während der Bohrung für das Bohrpersonal keinerlei Erhöhung der Strahlenexposition nachweisbar ist. Die Messergebnisse der Ortddosisleistungsmessung während der Bohrung sind im Anhang 12.4 zu finden. Der Mittelwert aller Messwerte lag bei 110 nSv/h

6.5.1 Expositionspfad: Gamma-Bodenstrahlung

Zur Berechnung ist ein Worst-Case-Szenario betrachtet worden in dem davon ausgegangen wurde, dass die Proben mit den höchsten nachgewiesenen Aktivitätskonzentrationen repräsentativ für den Bohrlochaushub sind und dieser an einer Stelle die Oberfläche mit einer Dicke von 30 cm bedeckt und dort als ungünstigste Einwirkungsstelle zu sehen ist. Eine derartige Überschätzung ist im Rahmen des Forschungsvorhabens sinnvoll, da zum einen nur eine geringe Zahl von Bohrprojekten betrachtet werden kann und außerdem nicht garantiert ist, dass die begleiteten Bohrvorhaben tatsächlich mögliche Maximalwerte abdecken.

Wegen der Ähnlichkeit der Fragestellung wurden die Berechnungen anhand der Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität [13] durchgeführt.

Untersuchung des Bodenaushubs

Bestimmt wurde die zusätzlich zu erwartende maximale effektive Dosis für Personen der darin definierten sechs Referenzgruppen (Tab. 6-3). Anzunehmen sind gemäß der Berechnungsgrundlage Bergbau, weiterhin verschiedene Aufenthaltsorte wie Gärten, Spielplätze oder unkultivierte Halden. Die maximale Aufenthaltszeit im Freien $t_{Exp,j,s}$ kann zur Betrachtung des möglichen Maximums nach Anlage I Tab.I.2 der Berechnungsgrundlage [13] mit 2000 h für alle Referenzgruppen angenommen werden.

Zur Berechnung der zusätzlich zum natürlichen Untergrund entstehenden effektiven Jahresdosis durch Gamma-Bodenstrahlung $\Delta H_{E,j}$ im Freien in 1 m Höhe aus der spezifischen Aktivität der oberen Bodenschichten wurde Gl. 1 verwendet:

$$\Delta H_{E,j} = f_{Kon,j} \cdot \sum_s ((C_{Bo,s} \cdot g_{ext} - C_{Bo}^U \cdot g_{ext}) \cdot t_{Exp,j,s} \cdot a_{x,s}) \quad \text{Gl. 1}$$

Hierbei ist

- $f_{Kon,j}$ Umrechnungsfaktor von Photonenäquivalenzdosis in effektive Dosis für die Referenzperson j
- $C_{Bo,s}$ Spezifische Aktivität eines Radionuklids im radioaktiven Gleichgewicht in der oberen Bodenschicht (0-30cm) für den Expositionsort s in Bq/kg (TM)
- C_{Bo}^U Spezifische natürliche Untergrund eines Radionuklids im radioaktiven Gleichgewicht in der oberen Bodenschicht (0-30cm) für den Expositionsort s in Bq/kg (TM)
- g_{ext} Konversionsfaktor für die Umrechnung der spezifischen Aktivität des Bodens in die Photonen-Äquivalentdosis im Freien in 1 m Höhe in Svkg/Bqh
- $t_{Exp,j,s}$ Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h
- $a_{x,s}$ Faktor zur Berücksichtigung der Abschirmwirkung am Expositionsort s auf Gammastrahlung im Freien, dimensionslos. Für den Aufenthalt im Freien gleich 1.

Für den Konversionsfaktor wurde für U-238 $g_{ext} = 5,3 \cdot 10^{-10}$ Svkg/Bqh, für Th-232 $g_{ext} = 7,3 \cdot 10^{-10}$ Svkg/Bqh und für K-40 $g_{ext} = 5,0 \cdot 10^{-11}$ Svkg/Bqh entsprechend dem ICRU Report 53 [14] verwendet. Hierbei musste jedoch vorerst die im Report angegebene Kermaleistung mittels Dosiskonversionsfaktor umgerechnet werden. Des Weiteren geht die Berechnungsgrundlage Bergbau in Anlage VI Tab.VI.3 von einer spezifischen natürlichen Untergrundaktivität von $C_{Bo}^U = 50$ Bq/kg für die U-238 Zerfallsreihe und von $C_{Bo}^U = 40$ Bq/kg für die Thorium Zerfallsreihe aus. Kalium wird in der Berechnungsgrundlage nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde für K-40 ein Wert von 500 Bq/kg angenommen entsprechend den Angaben der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) [15]. Entsprechend der Berechnungsgrundlage wurde außerdem der Umrechnungsfaktor $f_{Kon,j}$ für die Referenzperson j nach Anlage I Tab I.1 [13] angewendet.

In Tab. 6-3 sind die für die sechs Referenzgruppen ermittelten zusätzlichen effektiven Dosen im Kalenderjahr durch Gammabodenstrahlung gezeigt. Gewählt wurden die Proben mit den jeweils höchsten Aktivitätskonzentrationen für die U-238- Zerfallsreihe, Th-232 Zerfallsreihe und K-40. Zusätzlich wurde das Worst-Case Szenario dahingehend erweitert, dass die maximal gemessenen Konzentrationen für U-238, Th-232 und K-40, alle in ein und derselben Probe angenommen wurden.

Tab. 6-3: Effektive Dosis der Referenzgruppen durch Gamma-Bodenstrahlung

Pr.-ID	$\Delta H_{E,j}$ [μ Sv] für Referenzgruppe j					
	<1 a	1-2 a	2-7 a	7-12 a	12-17 a	>17 a
25-1	1,65E+02	1,45E+02	1,45E+02	1,45E+02	1,24E+02	1,24E+02
32-1	1,71E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,28E+02	1,28E+02
61-35	7,11E+01	6,22E+01	6,22E+01	6,22E+01	5,33E+01	5,33E+01
Worst-Case	2,57E+02	2,25E+02	2,25E+02	2,25E+02	1,93E+02	1,93E+02

Folglich ist die maximale zu erwartende Strahlenexposition bei einer Aufenthaltszeit im Freien von 2000 h/a für die Referenzgruppe <1 a auf einer homogenen Fläche mit der maximal gemessenen Aktivität in einer Probe mit $\Delta H_{E,j} = 257 \mu\text{Sv}$ anzugeben. Auch hier gilt zu bedenken, dass in der Bohrpraxis der Aushub vermengt wird und somit derartige Aktivitätskonzentrationen anhand der vorliegenden Messdaten eigentlich ausgeschlossen sind. Außerdem ist die anhand der Worst-Case-Betrachtung ermittelte zusätzliche Strahlenexposition im Vergleich zu der natürlichen Strahlenexposition von 2,1 mSv/a unerheblich.

Wenn man die gemessenen Aktivitätskonzentrationen aller Proben für die jeweiligen Bohrvorhaben mittelt und diesen gemischten Bohrlochaushub als Bodenuntergrund der ungünstigsten Einwirkungsstelle annimmt und die zusätzliche effektive Dosis $\Delta H_{E,j}$ von Einzelpersonen der Bevölkerung im Kalenderjahr berechnet, ergeben sich die in Tab. 6-4 gelisteten Werte unter Weiterverwendung der bereits getroffenen konservativen Annahmen.

Damit ergibt sich rechnerisch nach Gl. 1 lediglich für die BV #1, #21 und #34 eine zusätzliche Strahlenexposition für Einzelpersonen der Bevölkerung durch den gemittelten Bohrlochaushub von maximal 35,4 $\mu\text{Sv/a}$ für die Referenzgruppe < 1 a. Ursächlich sind jeweils leicht erhöhte Th-232 und K-40 Aktivitätskonzentrationen gegenüber den durchschnittlichen Untergrundwerten.

Dosen in der Größenordnung von 10 bis 100 $\mu\text{Sv/a}$ sind aus Sicht des Strahlenschutzes außer Acht zu lassen, da sie als unerheblich bezeichnet werden können [16]. Diese Feststellung kann über die Schwankungsbreite der natürlichen äußeren Strahlenexposition begründet werden, welche im Mittel mit 700 $\mu\text{Sv/a}$ angegeben wird [17], oder dadurch, dass unter Zugrundelegung der ICRP Risiko Faktoren lediglich mit einem akzeptablen jährlichen Risiko zu rechnen ist [18].

Tab. 6-4: Gemittelte Aktivitätskonzentrationen der Nuklide Th-232, U-238 und K-40 für die einzelnen messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben mit den nach Gl. 1 ermittelten zusätzlich zum natürlichen Untergrund effektiven Dosis bezogen auf die Referenzgruppe >17a und <1 a.

BV	$C_{\text{Th-232}}$ [Bq/kg]	$C_{\text{U-238}}$ [Bq/kg]	$C_{\text{K-40}}$ [Bq/kg]	$\Delta H_{E,>17a}$ [μSv]	$\Delta H_{E,<1a}$ [μSv]
1	55,5	42,6	800,1	26,6	35,4
4	21,8	36,2	479,4	-26,3	-35,0
8	28,1	54,7	445,0	-10,6	-14,1
21	50,4	51,4	683,8	21,0	28,0
23	27,1	41,9	442,3	-20,8	-27,7
26	24,8	38,0	771,0	-5,0	-6,6
31	17,0	30,2	380,4	-40,3	-53,8
33	21,0	43,7	611,9	-14,0	-18,7
34	42,7	62,2	729,6	24,2	32,3
35	33,8	48,0	421,8	-9,6	-12,8

6.5.2 Expositionspfad: Boden-Pflanze-Mensch

Für die Betrachtung der Ingestionsdosis durch geothermische Bohrungen ist zu berücksichtigen, dass der Aushub aus den Gesteinsschichten nicht als Untergrund für eine landwirtschaftliche Nutzung geeignet ist. Hochrechnungen anhand der Aktivitätskonzentrationen in den Gesteinsschichten wären daher nicht sinnvoll.

Da bei einem der begleiteten Bohrvorhaben (BV #21) das Bohrwasser aus dem Auffangcontainer auf das angrenzende Feld geleitet wurde, sollen die Messwerte der dort entnommenen Bodenproben für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden.

Untersuchung des Bodenaushubs

Vor Bohrbeginn wurde auf dem Feld eine ungestörte Bodenprobe A entnommen und nach Abschluss der Bohrarbeiten vier weitere Proben B-E.

Die drei entnommenen Proben wurden entlang der Fließrichtung des Bohrwassers auf dem Feld mit einer jeweiligen Ausstechtiefe von ca. 5 cm entnommen. Probe B wurde direkt dort entnommen, wo das Schlauchende der ersten 30 Bohrmeter positioniert war. Dann wurde der Schlauchauslauf ca. 5 Meter parallel zur Abflussrichtung auf dem Feld durch das Bohrteam verlegt. Probe C wurde am neuen Ausflusspunkt entnommen. Probe D wurde in der Mitte der kontaminierten Fläche; ca. zehn Meter in Fließrichtung vom Auslauf entfernt, ausgestochen. Die letzte Probe E wurde am Rand der kontaminierten Fläche am Ende des Bohrwasserstroms entnommen.



Abb. 6-1 Bodenprobe B bei BV #21 nach Abschluss der Bohrarbeiten mit Feststoffablagerung

Die Proben wurden gammaspektrometrisch untersucht und mit der vor der Bohrung entnommenen Bodenprobe verglichen. Die Messergebnisse sind in Tab. 6-5 zusammengefasst.

Tab. 6-5: Vergleich der Aktivitätskonzentrationen und deren Unsicherheiten gemessener Radionuklide im Boden vor und nach Ableitung des Bohrspülwassers auf ein Feld

		Nuklid	Probe A Nullprobe	Probe B	Probe C	Probe D	Probe E
Thorium-Reihe	Ac-228	Bq/kg %	58,6 12,4	60,9 11,1	59,4 12,7	65 11,6	64,3 12,7
	Ra-224	Bq/kg %	63 19	62,5 16,6	66 17,1	70,1 16,5	66,6 18,8
	Pb-212	Bq/kg %	61,7 14,8	60,7 13,4	60 13,4	62,9 14	65,2 14,8
	Bi-212	Bq/kg %	56,6 21	61,5 16	60 17,2	57,9 16,8	58,9 20,1
	Tl-208	Bq/kg %	20,9 14,6	21 12,3	21,7 12,3	22,8 12,4	20,3 15,1
Uran-Reihe	Pa-234m	Bq/kg %	<41,8	<31,6	<32,9	<38,5	<46,1
	U-234	Bq/kg %	<147	<197	<182	<179	<144
	Th-230	Bq/kg %	<42,7	<45,2	<45,7	<42,1	<36,5
	Ra-226	Bq/kg %	<6,77	101 17,9	104 17,9	86,7 41,7	90,5* 20,6
	Pb-214	Bq/kg %	42,7 13,4	48 12,2	47,6 12,2	52,1 12,1	44,7 13,3
	Bi-214	Bq/kg %	41,9 13	48,8 11,2	49,5 11,2	50,1 11,3	42,4 13,3
	Pb-210	Bq/kg %	51,7 27,6	58,8 26,3	59,5 26,7	74,9 25,3	21,9 49,5
	K-40	Bq/kg %	515 18,4	589 12,2	582 12,2	554 12,2	560 18,4

* Wert überschätzt wegen Interferenz mit U-235

Die Messwerte zeigen, dass die Aktivitätskonzentration des Ra-226 nach dem Ableiten des Bohrwassers deutlich erhöht ist. Außerdem liegen in den Proben keine radioaktiven Gleichgewichte der Zerfallsreihen vor. Da im Übrigen die Radionuklidkonzentrationen der gammaspektrometrisch nachgewiesenen Nuklide alle vergleichbar sind, ist die Erhöhung der Ra-226 Aktivitätskonzentration auf die Ableitung des Bohrwassers auf das Feld zurück zu führen.

Betrachtet man nun weiter die Ra-226 Messwerte, ist eine Abnahme dieser entlang der Fließrichtung nicht nachweisbar. Daher wurde die Fläche für die weiteren Betrachtungen als homogen kontaminiert angenommen.

Basierend auf der Berechnungsgrundlage Bergbau [13] kann die zusätzliche effektive Jahresdosis $\Delta H_{\text{Ing},j}$ von Referenzpersonen j durch Ingestion lokal erzeugter Lebensmittel wie folgt berechnet werden:

$$\Delta H_{\text{Ing},j} = \sum (p_n \cdot U_{n,j} \cdot \sum ((C_{n,r} - C_{n,r}^U) \cdot g_{\text{Ing},r,j})) \quad \text{Gl. 2}$$

Hierbei ist:

$C_{n,r}$	Spezifische Aktivität in Bq/kg des Radionuklids r in Lebensmitteln n
$C_{n,r}^U$	Spezifische natürliche Untergrund Aktivität des Radionuklids r in Bq/kg in Lebensmitteln n
n	Index zur Kennzeichnung der Lebensmittel
Bl	Blattgemüse
Pf	Pflanzliche Produkte außer Blattgemüse
P_n	Anteil an lokaler Produktion des Lebensmittels n am Jahresverbrauch, dimensionslos
$U_{n,j}$	Jahresverbrauch des Lebensmittels n durch die Referenzperson j in kg (Anlage VII Tab.1 StrlSchV [9], Anlage III Tab.III.2 [13])
$g_{\text{Ing},r,j}$	Ingestionskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzgruppe j in Sv/Bq (Anlage III Tab.III.1 Berechnungsgrundlage Bergbau [13])

In der Hochrechnung der Ingestionsdosis soll in erster Linie der Verzehr von pflanzlichen Produkten betrachtet werden. Die Nuklidkonzentration nimmt beim Transfer innerhalb der Expositionspfade immer weiter ab [19]. Außerdem haben pflanzliche Produkte an den zugrunde zu legenden Verzehrgewohnheiten [9][13][20] den größten Anteil. Daher ist zu erwarten, dass eine Nutzung der mit Bohrspülwasser beaufschlagten Flächen zum Anbau pflanzlicher Produkte zur höchsten Ingestionsdosis führen könnte.. Daher werden die Lebensmittel Fleisch, Fisch und Milch nicht näher betrachtet.

Da jedoch nur Messwerte der spezifischen Aktivitäten der Bodenproben vorlagen, musste zunächst die spezifische Aktivität der Lebensmittel, die zukünftig auf der mit Bohrspülwasser kontaminierten Fläche angebaut werden, bestimmt werden. Da nach Tab. 6-5 lediglich ein Anstieg der Ra-226 Aktivitätskonzentration festgestellt werden konnte wird im Folgenden nur dieses Nuklid und seine Folgeprodukte in die Berechnung einbezogen. Für die Folgeprodukte soll ferner angenommen werden, dass sich radioaktive Gleichgewichte einstellen.

Zur Abschätzung der spezifischen Aktivität des Nuklids im Lebensmittel $C_{n,r}$ wurde folgende Formel angewendet.

$$C_{n,r} = C_{D,n,r} + C_{B,n,r} \quad \text{Gl. 3}$$

Mit:

$C_{D,n,r}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Pflanze n über den Bodenpfad
$C_{B,n,r}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Pflanze n über den Wasserpfad (Beregnung)

Dabei ist der Einfluss durch Beregnung oder Begießung der Pflanzen als nachrangig einzustufen. Die Pflanze würde in der Wachstumsperiode nur einmalig über einen kurzen Zeitraum oder überhaupt

nicht mit Bohrwasser begossen. Der Anteil durch Beregnung wird daher vernachlässigt. Damit ergibt sich die spezifische Aktivität des Nuklids r im Lebensmittel $C_{n,r}$ zu:

$$C_{n,r} = C_{D,n,r} = T_{n,r} (C_{Bo,r} - C_{Bo,r}^U) \quad \text{Gl. 4}$$

Dabei bedeuten:

- $T_{n,r}$ Transferfaktor vom Boden in die Pflanze n über Wurzel Aufnahme und Aktivitätsablagerung auf oberirdischen Pflanzenteile für das Radionuklid r in Bq/kg (TM) des Bodens
- $C_{Bo,r}$ Repräsentativer Wert der spezifischen Aktivität des Radionuklids r in der oberen Bodenschicht (0-10 cm für Weideböden, 0-20 cm für Garten und Ackerboden) in Bq/kg (TM)
- $C_{Bo,r}^U$ Spezifische natürliche Untergrund Aktivität des Radionuklids r in der oberen Bodenschicht (0-10 cm für Weideböden, 0-20 cm für Garten und Ackerboden) in Bq/kg (TM)

Zur konservativen Betrachtung wird die Aktivitätskonzentration die für eine Ausstechtiefe von 5 cm bestimmt wurde für eine Bodentiefe von 20 cm homogen angenommen. Als Transferfaktor vom Boden in die Pflanze wurde entsprechend der Berechnungsgrundlagen [13][20] für das Radionuklid Ra-226 $T_{Pf} = T_{Bi} = 5 \cdot 10^{-3}$ angenommen. Nimmt man nun weiter an, dass vor der Bohrwasserableitung auf das Feld kein Ra-226 im Boden war (Messwert Probe 0-21 <6,77 Bq/kg), ist $C_{Bo,r}^U$ gleich Null zu setzen.

Damit ergibt sich die spezifische Aktivität von pflanzlichen Produkten inklusive Blattgemüse durch Ra-226 unter Verwendung des gemessenen Maximalwertes $C_{D,n,r} = 104$ Bq/kg zu $C_{Pf,Ra226} = C_{Bi,Ra226} = 0,52$ Bq/kg Frischmasse (FM).

Zur Berücksichtigung des radioaktiven Gleichgewichtes sind entsprechend der Berechnungsgrundlage die Nuklide Pb-210 und Po-210 zu berücksichtigen. Die Transferfaktoren für diese Nuklide in pflanzliche Produkte wurden mit $T_{Pf,Pb210} = T_{Bi,Pb210} = 7 \cdot 10^{-3}$ und $T_{Pf,Po210} = T_{Bi,Po210} = 5 \cdot 10^{-3}$ angenommen entsprechend Anlage III Tab.III.3 [13]. Für die spezifische natürliche Untergrundaktivität der Radionuklide Pb-210 und Po-210 in der oberen Bodenschicht wurde nach Anlage IV Tab.IV.4 jeweils ein Wert von 50 Bq/kg verwendet. Bezogen auf die tatsächlich gemessenen Werte ist diese Annahme zutreffend.

Des Weiteren sind entsprechend der Berechnungsgrundlage Bergbau der Anteil an lokaler Produktion des Lebensmittels am Jahresverbrauch mit $P_{Pf} = P_{Bi} = 0,25$ anzunehmen. Die spezifische natürliche Untergrundaktivität der Lebensmittel ist als $C_{Pf,Ra-226}^U = C_{Bi,Ra-226}^U = 0,1$ Bq/kg, $C_{Pf,Pb210}^U = C_{Bi,Pb210}^U = 0,06$ Bq/kg und $C_{Pf,Po210}^U = C_{Bi,Po210}^U = 0,15$ Bq/kg berechnet worden.

Tab. 6-6: Effektive Dosis durch Ingestion lokal erzeugter pflanzlicher Produkte für die Referenzgruppen

Nuklid	$H_{ing,j}$ [$\mu\text{Sv/a}$]					
	<1 a	1-2 a	2-7a	7-12 a	12-17 a	>17 a
Ra-226	37,0	13,9	14,8	21,8	42,7	7,4
Pb-210	49,5	39,0	39,4	38,7	40,5	13,7
Po-210	100,6	62,6	51,7	34,8	22,4	15,6
Summe	187,2	115,5	105,9	95,3	105,5	36,7

Demnach ist anhand der begleiteten Bohrvorhaben die maximal zu erwartende effektive Dosis lokal erzeugter Lebensmittel für Einzelpersonen im Kalenderjahr infolge von Ingestion mit 0,19 mSv/a für die Referenzgruppe < 1 a und 0,04 mSv/a für Erwachsene anzugeben.

Nach den im Wissenschaftsbericht der Vereinten Nationen UNSCEAR-Report 2000 international üblichen Vorgaben zum mittleren Altersanteil der Bevölkerungsgruppen [18] lässt sich anhand Tab. 6-6 ein altersgewichteter Mittelwert in Höhe von 0,07 mSv/a für die zusätzliche Ingestionsdosis bilden, wenn für Erwachsene 65%, für Kinder 30% und für Kleinkinder 5% zugrunde gelegt werden. Dies ist

ein relativ geringer Beitrag an der gesamten Strahlenexposition der Bevölkerung durch natürliche Strahlenquellen, wenn man einen Mittelwert von 2,1 mSv/a für die gesamte natürliche Strahlenexposition in Deutschland zugrunde legt [17].

7 Untersuchung des Expositionspfades Wasser

Von den zehn messtechnisch begleiteten Bohrungen waren acht Spülbohrungen. Bei sechs wurde das Spülwasser in die Kanalisation geleitet, bei einer wurde ein nahegelegenes Feld beaufschlagt und bei einer Weiteren wurde das Spülwasser mittels Auffanggrube teilrecykliert (Abb. 7-1).

In diesem Kapitel wird der Frage nachgegangen, ob das Spülwasser, durch die Kontaktzeit mit den natürlichen Radionukliden im Gestein während der Bohrung oder der Verweilzeit im Container mit dem Bohraushub, erhöhte Radionuklidgehalte aufweisen kann.

Für das Spülwasser wurde für die Untersuchung die Methodenbeschreibung des Physikalischen Messlabors MB ISF 003 [21] zur „Bestimmung der Alpha-/Beta-Gesamt-Aktivität“ angewandt.

Zur Bestimmung der im Wasser gelösten Radionuklide wurden an ausgewählten auffälligen Proben mit erhöhten α -Gesamt Aktivitätskonzentrationen alphaspektrometrische Messungen mittels einer Gitterionisationskammer durchgeführt.



Abb. 7-1 Links: Ableitung des Schlammwassers aus dem Aushubsammelcontainer auf ein Feld; Bohrvorhaben #21. Rechts: Auffanggrube zur Sammlung des Schwemmwassers bei einer Geothermiebohrung; Bohrvorhaben #1.

7.1 Grenzwerte für natürliche Radionuklide im Bohrspülwasser

Eine Betrachtung der Grenzwerte für Trinkwasser aus der anstehenden Novellierung der Trinkwasserverordnung [22] ist nicht zielführend, da nicht von einem direkten Verzehr des Bohrwassers auszugehen ist. Da es keine gesetzlichen Regelungen für die Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide aus der Umwelt im Abwasser gibt, soll hier die Betrachtung als Ableitung aus Strahlenschutzbereichen angenommen werden, um die Notwendigkeit einer gesonderten Entsorgung abzuschätzen. In der Strahlenschutzverordnung [9] sind Grenzwerte für die Ableitung aus Strahlenschutzbereichen aufgeführt. Diese Grenzwerte werden für die folgenden Annahmen unterstellt. Wenn diese Grenzwerte, die eine zivilisatorisch bedingte Strahlenexposition durch das Abwasser ausschließen sollen, unterschritten werden sind auch keine Bedenken gegen die Ableitung des Bohrwassers anzuführen.

In Anlage VII Teil D Nr. 2 Tabelle 4 StrISchV werden maximal zulässige Aktivitätskonzentrationen für die Ableitung von Radionukliden (Luft, Wasser) aus Strahlenschutzbereichen angegeben. Beim Vergleich mit den Messwerten des Bohrspülwassers sind die auftretenden Wassermengen der einzelnen

Bohrungen zu berücksichtigen und die mittleren Aktivitätskonzentrationen zu bestimmen. Eine Mittelung erscheint sinnvoll, da die Grenzwerte für große Gesamtvolumina ausgelegt sind und nicht für Wassermengen von nur wenigen Kubikmetern. Gemäß Anlage VII Teil C Nr.3 StrlSchV sind „bei Ableitungen mit Wasser [...] der Berechnung langjährige Mittelwerte zugrunde zu legen“. In Tab. 7-1 sind die erlaubten Ableitungen aus Strahlenschutzbereichen für Abwasser der denkbaren Radionuklide im Bohrwasser aufgeführt.

Die maximale Aktivitätskonzentration die mit dem Wasser aus Strahlenschutzbereichen in Abwasserkanäle eingeleitet wird, darf laut Anlage VII Teil D Nr. 2 StrlSchV für Abwassermengen $< 1,0 \text{ E}+05 \text{ m}^3/\text{a}$ nicht höher sein als das Zehnfache der in Tab. 7-1 aufgelisteten Werte bzw. für Abwassermengen $> 1,0 \text{ E}+05 \text{ m}^3/\text{a}$ nicht höher sein als die dort aufgelisteten Werte. Da jedes Bohrvorhaben als eigenständiger Emittent zu verstehen ist und die Wassermengen um einige Größenordnungen geringer sind als der genannte Schwellenwert, wird im Folgenden mit dem zehnfachen Wert gerechnet.

Tab. 7-1: Aktivitätskonzentrationen C_i aus Strahlenschutzbereichen (Ausschnitt aus StrlSchV Anlage VII D Nr. 1.1 und 2 [9])

Nuklid	Strahlenart	Halbwertszeit	Erlaubte Aktivitätskonzentration C_i [Bq/m ³]
U-238	α	4,468 10^9 a	3E+03
Ra-226	α	1600 a	2E+02
Ra-228	α	5,75 a	3E+01
U-235	α	2,455 10^5 a	3E+03
Ra-224	α	3,66 d	3E+02

Beim Vorhandensein mehrerer Radionuklide sind mittels der Summenformel (Gl. 5) die Verhältniszahlen zu ermitteln und sicherzustellen, dass der Summenwert den Wert 1 nicht überschreitet. [9]

$$\sum_i \frac{\bar{C}_{i,a}}{C_{i,max}} \leq 1 \quad \text{Gl. 5}$$

Hierbei ist:

$\bar{C}_{i,a}$ Mittlere Konzentration des Nuklids i im Wasser in Bq/m³ je Bohrung

$C_{i,max}$ Maximal zulässige Aktivitätskonzentration des Nuklids i aus Tab. 7-1 bzw. Tabelle 4 oder 5 der StrlSchV, wobei i das jeweilige Radionuklid ist.

Andere Radionuklide müssen nur dann berücksichtigt werden, wenn der Anteil aller unberücksichtigten Radionuklide 10% der Gesamtsumme übersteigt. Davon ist aufgrund der relativen Häufigkeiten, Halbwertszeiten und Löslichkeiten der Radionuklide der Thorium- oder Uran-Actinium Reihe nicht auszugehen [1]. Dies soll durch Messungen bestätigt werden.

7.2 Probenaufbereitung und Durchführung

Für die Analyse der α -Gesamt-Aktivitätskonzentration der Proben wurden anhand der geologischen Schichtverzeichnisse und der zur Verfügung stehenden Probenvolumina eine oder mehrere Proben je geologischer Schicht ausgewählt. Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, wurde die benötigte Probenmenge auf 200 ml und die Messzeit zum Erreichen geeigneter Nachweisgrenzen auf 60 min festgelegt.

Zur Bestimmung der α -Gesamt-Aktivitätskonzentration in Wasser wurden die ausgewählten Proben vor der Entnahme des Probenwassers geschüttelt und dann erneut zum Sedimentieren einen Tag

abgestellt. Es wurde vermutet, dass aufgrund der längeren Standzeiten von bis zu drei Wochen nach Probenentnahme an der Bohrstelle durch Auslaugungsprozesse und α -Rückstoßprozesse im Wasseranteil des abgelagerten Feststoffes höhere Aktivitätskonzentrationen vorliegen als im Überstandswasser.

Um zu bestimmen wie groß der Schütteleinfluss ist, wurde dies exemplarisch anhand BV #35 untersucht. BV #35 wurde ausgewählt weil es sich mit einer Bohrtiefe von 190 m um die tiefste begleitete Bohrung mit den meisten Proben handelte. So war es vergleichsweise unproblematisch je Schicht drei Proben mit ausreichend wasserähnlichen Feststoffanteil zu wählen. Von den drei Proben je Schicht wurden zwei vor Entnahme der 200 ml Wasser geschüttelt. Die Dritte wurde direkt beprobt.

Im Übrigen wurden die Proben identisch behandelt. Sie wurden zur Abscheidung von Feststoffanteilen (Abb. 7-2) gefiltert und anschließend unter Heizpilzen auf Eindampfschalen getrocknet. Eine optische Kontrolle zeigte, dass die Flächenbelegung hinreichend dünn war.

In Tab. 7-2 sind die Ergebnisse dieses Versuchs zusammengefasst dargestellt. Die mit „x“ gekennzeichneten Proben wurden vor der Probenentnahme nicht geschüttelt. Es wird deutlich, dass vor allem in Schichten mit vergleichsweise hohen α -Gesamt Aktivitätskonzentrationen das Schütteln einen Einfluss hat. So sind die Proben 49-35x, 74-35x, 81-35x und 91-35x in Bezug zu den geschüttelten Proben aus ihrer Schicht in etwa um den Faktor 2 kleiner.



Abb. 7-2 Filterung der 200 ml Überstandwassers

Ursächlich könnten auch leichte Varianzen in der Nuklidzusammensetzung der einzelnen Proben der jeweiligen Schicht sein. Dennoch wurde somit gezeigt, dass die Vorgehensweise eine konservative Betrachtung bedeutet.

Tab. 7-2: Vergleich der α -Gesamt-Aktivitätskonzentration in 200 ml Probenwasser mit und ohne vorangegangenes Schütteln der Proben in den bei BV #35 durchbohrten geologischen Schichten. Nicht geschüttelte Proben sind mit einem „x“ gekennzeichnet.

Pr ID	Aktivitätskonzentration [Bq/l]	Unsicherheit [%]	EG [Bq/l]	NWG [Bq/l]	Bezeichnung Gesteinsschicht
6-35x	0,18	22,9	0,09	0,16	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
7-35	0,11	35,8	0,11	0,18	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
16-35	<EG		0,10	0,17	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
21-35	0,11	33,4	0,10	0,17	Oberer Jura/ Kalkstein mit schwarzen Flecken - grau
23-35x	<EG		0,10	0,17	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
27-35	<EG		0,09	0,16	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
34-35	0,30	16,3	0,08	0,14	Oberer Jura/ Oxford Ton - schwarzbraun
35-35x	0,23	19,1	0,09	0,15	Oberer Jura/ Oxford Ton - schwarzbraun
37-35	0,34	15,5	0,08	0,14	Oberer Jura/ Oxford Ton - rotbraun
42-35	0,47	13,7	0,08	0,14	Oberer Jura/ Oxford Ton gelegentl. feinsandige Zwischenlagen - grau
49-35x	0,14	29,3	0,11	0,18	Oberer Jura/ Oxford Ton gelegentl. feinsandige Zwischenlagen - grau
50-35	0,42	14,6	0,10	0,17	Oberer Jura/ Oxford Ton gelegentl. feinsandige Zwischenlagen - grau
61-35	0,44	14,5	0,09	0,16	Unterer Jura/ Ornatenton - dunkelgrau
64-35	0,45	14,4	0,09	0,16	Unterer Jura/ Ornatenton - dunkelgrau
67-35x	0,33	16,5	0,09	0,16	Unterer Jura/ Ornatenton - dunkelgrau

Pr ID	Aktivitätskonzentration [Bq/l]	Unsicherheit [%]	EG [Bq/l]	NWG [Bq/l]	Bezeichnung Gesteinsschicht
71-35	0,43	14,2	0,08	0,14	Unterer Jura/ Tonstein Quarzgerölle – grau
73-35	0,53	13,2	0,08	0,14	Unterer Jura/ Tonstein Quarzgerölle – grau
74-35x	0,25	19,7	0,10	0,17	Unterer Jura/ Tonstein Quarzgerölle - grau
80-35	0,47	14,3	0,10	0,17	Sandstein – tonig – rot, teilw. grünweiß
81-35x	0,21	21,0	0,09	0,16	Sandstein – tonig – rot
83-35	0,39	15,2	0,09	0,16	Sandstein – tonig - rot
85-35	0,64	12,6	0,08	0,14	Sandstein – feinsandig - braun
89-35	0,46	14,5	0,10	0,17	Sandstein – grobsandig - hellbraun
91-35x	0,25	18,1	0,09	0,15	Sandstein – grobsandig - hellbraun

Das Schütteln der Proben führt zu einer äußerst konservativen Betrachtung und entspricht einem Worst-Case-Szenario. Sollten bis zu drei Wochen nach Standzeit der Proben keine grenzwertüberschreitenden Radionuklidkonzentrationen im Wasser festgestellt werden, kann der Expositionspfad Wasser als unbedenklich eingestuft werden.

7.3 Messergebnisse der α -Gesamt-Messungen

In Tab. 7-3 sind die mittels α -Gesamt-Messung ermittelten Aktivitätskonzentrationen der ausgewählten Proben der Bohrvorhaben in Bezug auf die zugeordnete Gesteinsschicht dargestellt.

Bei den BV #1 und #34 war der Wasseranteil der Proben zu gering, um ein Probenvolumen von 200 ml zu entnehmen. Bei den BV #4, #31 und #33 konnten nicht aus jeder Schicht zwei Proben entnommen werden, da nur sehr wenige Proben ausreichend Überstandswasser beinhalteten.

Die Bezeichnung der Gesteinsschichten wurde den geologischen Schichtenverzeichnissen in Anhang 12.2 entnommen. Zur besseren Übersicht sind die unterschiedlichen Schichten farblich von einander abgehoben.

Tab. 7-3: Ergebnisübersicht der α -Gesamt Aktivitätskonzentration der ausgewählten Proben in Bezug auf deren Gesteinsschichten

PrID - BV	Aktivitätskonzentration [Bq/l]	Unsicherheit [%]	EG [Bq/l]	NWG [Bq/l]	Bezeichnung Gesteinsschicht
05-4	0,10	34,7	0,09	0,15	Keuper/ Ton – rotbraun, grau
14-4	0,25	19,6	0,10	0,18	Keuper/ Feinsandstein – grau
17-4	0,42	14,9	0,10	0,16	Keuper/ Feinsandstein – grau
21-4	0,43	14,3	0,08	0,14	Keuper/ Feinsandstein, Schluffstein – grau
25-4	0,34	15,8	0,08	0,15	Keuper/ Feinsandstein, Schluffstein - grau
27-4	0,45	14,2	0,09	0,15	Keuper/ Feinsandstein – grau
29-4	0,40	14,8	0,09	0,15	Keuper Feinsandstein z.T. Tonstein – grau, rotbraun
8-8	0,42	15,1	0,10	0,17	Beckenablagerung, Ton – grau
17-8	0,21	20,3	0,09	0,15	Beckenablagerung, Ton – grau
45-8	0,44	14,2	0,08	0,14	Moräne/ Fein- bis Mittelkies – bunt
46-8	1,45	10,8	0,10	0,18	Moräne/ Fein- bis Mittelkies – bunt
47-8	0,60	13,0	0,09	0,16	Moräne/ Fein- bis Mittelkies – bunt braun
49-8	0,52	13,3	0,08	0,13	Molasse/ Mergel z.T. Sandstein – graubraun
57-8	0,59	13,1	0,09	0,16	Molasse/ Mergel z.T. Sandstein – graubraun
63-8	1,00	11,5	0,10	0,17	Molasse/ Feinsandstein – graubraun
66-8	0,81	11,9	0,09	0,15	Molasse/ Feinsandstein - graubraun
69-8	0,11	34,5	0,10	0,18	Molasse/ Mergel, kiesig – bunt
70-8	0,39	15,0	0,09	0,15	Molasse/ Mergel, kiesig – bunt

Untersuchung des Expositionspfades Wasser

2-21	<EG		0,09	0,15	Mergel kalkhaltig - hellgrau
3-21	<EG		0,09	0,16	Mergel kalkhaltig - hellgrau
5-21	0,13	30,0	0,10	0,18	Mergel kalkhaltig - dunkelgrau
6-21	<EG		0,10	0,17	Mergel kalkhaltig - dunkelgrau
7-21	<EG		0,10	0,18	Kalkstein, mergelig - dunkelgrau
9-21	0,23	19,8	0,09	0,15	Mergel - dunkelgrau
15-21	0,12	31,7	0,10	0,17	Tonstein, Mergelstein - hellbraun-grau
19-21	0,24	19,0	0,09	0,15	Tonstein - violettrot
23-21	0,38	15,1	0,09	0,15	Tonstein - violettrot
30-21	0,10	36,2	0,09	0,16	Sandstein - hellgrau
32-21	0,15	23,3	0,08	0,13	Sandstein - hellgrau
35-21	0,20	21,5	0,93	0,16	Sandstein - hellgrau
37-21	0,20	20,0	0,08	0,13	Sandstein - hellgrau
45-21	0,15	27,7	0,10	0,18	Sandstein - grau-rötlich
49-21	0,16	24,8	0,09	0,15	Sandstein - grau-rötlich
1-23	<EG		0,10	0,17	Verwitterungsdecke, Schluff – braun
3-23	<EG		0,10	0,17	Moräne/ Kies – bunt
4-23	<EG		0,10	0,17	Moräne/ Kies - bunt
10-23	<EG		0,09	0,15	Moräne/ Kies – bunt
22-23	<EG		0,10	0,17	Moräne/ Kies – bunt
24-23	0,20	20,7	0,09	0,15	Moräne/ Kies – bunt
33-23	0,39	15,4	0,10	0,17	Molasse/ Tonmergel – hellgrau, ocker
47-23	0,39	15,5	0,10	0,17	Molasse/ Feinsandstein - hellgrau
61-23	2,30	10,2	0,09	0,15	Molasse/ Feinsandstein - olivgrau
79-23	0,91	11,5	0,07	0,13	Molasse/ Mergel – hellgrau, ocker
3-26	<EG		0,10	0,17	Verwitterter Gipskeuper/ Tonstein, -mergel – graugrün
7-26	0,63	12,8	0,09	0,15	Unterer Keuper/ Tonstein – grau
10-26	0,50	14,1	0,10	0,17	Unterer Keuper/ Tonstein – grau
12-26	0,40	15,5	0,10	0,18	Unterer Keuper/ Tonstein – grau
13-26	0,37	15,4	0,09	0,15	Unterer Keuper/ Tonstein – grau
15-26	0,35	15,8	0,09	0,15	Unterer Keuper/ Tonstein – grau
31-26	0,24	19,0	0,09	0,15	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein – grau
36-26	0,15	22,4	0,07	0,13	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein – grau
2-31	<EG		0,10	0,17	Kies/ Sand - hellgrau
3-31	<EG		0,09	0,15	Kies/ Sand - hellgrau
7-31	0,23	20,5	0,10	0,17	Kies/ Sand - hellgrau
10-31	0,14	29,1	0,10	0,18	Kies/ Sand - hellgrau
18-31	0,15	25,0	0,09	0,15	Kies/ Sand - grau
21-33	0,30	18,3	0,11	0,18	Oberer Muschelkalk/ dolomitischer Kalkstein – ockerbraun-grau
31-33	0,17	22,3	0,08	0,14	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein, Dolomit – dunkelgrau
38-33	0,21	19,3	0,08	0,14	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein, Dolomit – dunkelgrau
46-33	0,13	29,2	0,09	0,16	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein mit Schalen-trümmern
7-35	0,11	35,8	0,11	0,18	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
16-35	<EG		0,10	0,17	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
20-35	0,11	33,4	0,10	0,17	Oberer Jura/ Kalkstein mit schwarzen Flecken - grau
27-35	<EG		0,09	0,16	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
34-35	0,30	16,3	0,08	0,14	Oberer Jura/ Oxford Ton – schwarzbraun
37-35	0,34	15,5	0,08	0,14	Oberer Jura/ Oxford Ton – rotbraun
42-35	0,47	13,7	0,08	0,14	Oberer Jura/ Oxford Ton gelegentl. feinsandige Zwischenlagen – grau
50-35	0,42	14,6	0,10	0,17	Oberer Jura/ Oxford Ton gelegentl. feinsandige Zwischenlagen – grau
61-35	0,44	14,5	0,09	0,16	Unterer Jura/ Ornaten-Ton – dunkelgrau

Untersuchung des Expositionspfades Wasser

PrID - BV	Aktivitätskonzentration [Bq/l]	Unsicherheit [%]	EG [Bq/l]	NWG [Bq/l]	Bezeichnung Gesteinsschicht
64-35	0,45	14,4	0,09	0,16	Unterer Jura/ Ornaten-Ton – dunkelgrau
71-35	0,43	14,2	0,08	0,14	Unterer Jura/ Tonstein Quarzgerölle – grau
73-35	0,53	13,2	0,08	0,14	Unterer Jura/ Tonstein Quarzgerölle – grau
80-35	0,47	14,3	0,10	0,17	Sandstein – tonig – rot, teilw. grünweiß
83-35	0,39	15,2	0,09	0,16	Sandstein – tonig - rot
85-35	0,64	12,6	0,08	0,14	Sandstein – feinsandig - braun
89-35	0,46	14,5	0,10	0,17	Sandstein – grobsandig - hellbraun

Insgesamt sind die Messergebnisse innerhalb einer Gesteinsschicht mit wenigen Ausnahmen gut vergleichbar. Bemerkenswert ist dass einzelne wenige Proben, wie beispielsweise 46-8 oder 61-23, nicht nur stark von dem Vergleichswert der jeweiligen Schicht abweichen, sondern darüber hinaus bezogen auf die Gesamtheit der Messwerte erhöht erscheinen.

Die maximal gemessene α -Gesamt-Aktivitätskonzentration von 2,3 Bq/l bei Probe 61-23 erscheint zunächst aufgrund der geologischen Schicht Feinsand nicht logisch. Außerdem ist der Wert im Vergleich zu anderen BV sehr hoch. Zur Erläuterung kann der Anfang 2009 publizierte Trinkwasserbericht des Bundesamtes für Strahlenschutz [23] herangezogen werden. In diesem wurden Median- und Maximalwerte der Aktivitätskonzentrationen für Rohwasser in Abhängigkeit zur Gesteinsart der wasserführenden Grundwasserschichten aufgelistet. Demnach treten vornehmlich in Sandstein höhere Nuklidkonzentrationen von Ra-226, U-238 und α -Gesamt im durchfließenden Wasser auf. Die verzeichneten Medianwerte sind jedoch für alle gelisteten Gesteinsschichten ähnlich gering (vgl. Tab. 7-4).

Tab. 7-4: Median- und Maximalwerte der Aktivitätskonzentrationen für Rohwasser in Abhängigkeit der Wasserherkunft und der Gesteinsart der wasserführenden Grundwasserschicht, Ausschnitt aus [23]

	Probenzahl	Aktivitätskonzentrationen in mBq/l (Radon-222 in Bq/l)													
		Radium-226		Radium-228		Uran-238		Blei-210		Polonium-210		Radon-222		Gesamt-Alpha	
		Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max	Med	Max
Art des Gesteins															
Basalt	12	1,0	2,8	<0,81	5,4	<0,74	5,7	1,9	20	0,99	5,6	25	180	<18	26
Gneis	5	2,2	7,0	4,3	7,8	<0,74	15	7,8	29	1,8	8,3	6,5	190	<18	50
Granit	15	12	98	11	29	1,2	53	9,5	70	2,0	19	20	540	31	230
Kalkstein	28	5,9	160	5,4	110	6,0	210	3,2	23	1,3	18	14	83	39	570
Sand	167	7,1	36	6,7	46	3,6	120	2,1	18	1,3	19	7,4	82	28	300
Schiefer	17	2,6	27	3,7	26	1,1	97	2,1	19	1,8	9,4	6,2	120	20	330
Sandstein	117	12	380	9,3	210	17	590	3,6	31	2,9	630	24	330	89	1300
Sonstiges Gestein	204	8,0	300	7,5	130	2,5	620	4,1	270	2,0	410	22	1500	37	1200

Betrachtet man nun die Gesamtheit der α -Gesamt-Messwerte der Bohrwasserproben in Bezug auf die Gesteinsart in der sie auftreten, zeigt sich dass vornehmlich in Feinsandstein bzw. Sandstein erhöhte Messwerte aufgetreten sind. Insgesamt wurden nur vier Proben mit einer Aktivität > 0,8 Bq/l gefunden. Drei von Vier stammen aus einer Sandsteinschicht. Die Vierte ist im geologischen Schichtverzeichnis als Fein- bis Mittelkies deklariert worden.

Die im Trinkwasserbericht angegebenen α -Gesamt-Maximalwerte sind kleiner als die im Rahmen des Geothermie Forschungsvorhabens im Spülwasser Nachgewiesenen. Dies bestätigt die Annahme einer konservativen Probenbehandlung.

Bemerkenswert ist, dass die Bodenproben, denen das Wasser entnommen wurde, in der gamma-spektrometrischen Untersuchung als eher unauffällig eingestuft wurden. Zur Bestimmung der Nuklidvorkommen und -verhältnisse im Bohrwasser mussten nuklidspezifische Untersuchungen durchgeführt werden.

7.4 GIK-Messung

Zur nuklidspezifischen Untersuchung wurde die Messung mittels Gitterionisationskammer gewählt, da hierfür keine erneute Aufbereitung der Proben notwendig war. Die Auswertung wurde entsprechend der Methodenbeschreibung MB ISF 005 [24] zur „Bestimmung von Alpha-Strahlern mittels GIK-Spektrometrie“ durchgeführt.

Es sollte ein Überblick über die Verhältnisse der natürlichen Radionuklide in den Proben gewonnen werden. Hierfür wurden die Proben 46-8 und 61-23 wegen ihrer deutlich erhöhten α -Gesamt-Werte ausgesucht, und zum Erreichen möglichst niedriger Nachweisgrenzen 240.000 Sekunden gemessen.

Es zeigte sich, dass wie erwartet Ra-226 und U-238 die größten Anteile an der α -Gesamt Aktivitätskonzentration in der Probe haben.

Die ermittelten Aktivitätskonzentrationen mittels Peak-Suche im Auswerteprogramm ALPS V2.34 ergeben in Summe, im Rahmen der zählstatistischen Unsicherheiten die gleichen Werte wie die α -Gesamt Messungen. Die zur Auswertung verwendeten Spektren sind in Abb. 7-3 gezeigt. Hierbei entspricht die gelbe Linie dem Ra-226 Peak, die rote Linie dem U-238-Peak und die weiße der gefitteten Summenfunktion.

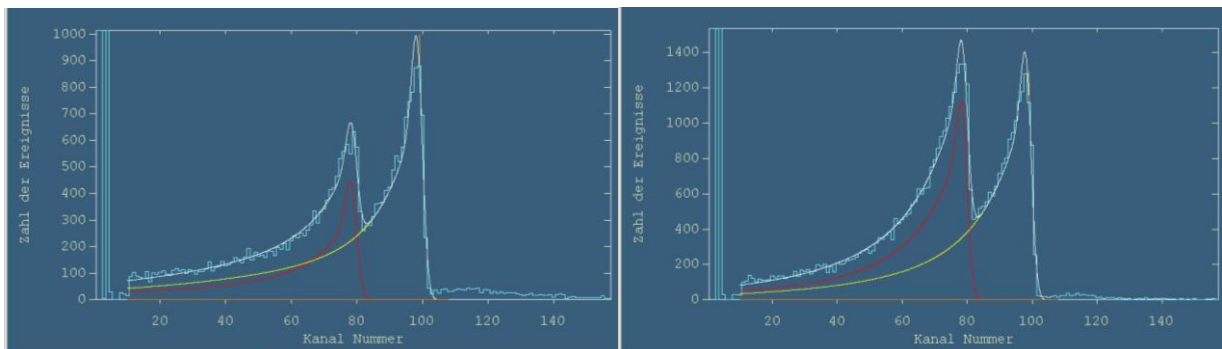


Abb. 7-3 Links: Spektrum der GIK-Messung von Probe 46-8
 Rechts: Spektrum der GIK-Messung von Probe 61-23
 Dargestellt in gelb: Ra-226, rot: U-238, weiß: Summenfunktion

Tab. 7-5 zeigt die errechneten Aktivitäten der einzelnen Radionuklide. Tendenziell sind die Summenwerte der Aktivitätskonzentrationen der GIK-Messung kleiner als die Messergebnisse der α -Gesamt Messungen. Ursächlich sind vermutlich in geringen Mengen vorkommende Nuklide, die nicht nachgewiesen werden können.

Tab. 7-5: Vergleich der Summe der nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen mit den Messergebnissen der α -Gesamt Messungen

	Nuklid	Aktivitätskonzentration [Bq/l]	Unsicherheit [Bq/l]
46-8	U-238	0,384	$\pm 0,054$
	Ra-226	0,867	$\pm 0,115$
	(U+Ra)	1,251	$\pm 0,169$
	Werte α -Gesamt	1,449	$\pm 0,140$
61-23	U-238	0,923	$\pm 0,097$
	Ra-226	1,157	$\pm 0,122$
	(U+Ra)	2,080	$\pm 0,219$
	Werte α -Gesamt	2,303	$\pm 0,230$

Da die Differenz im Rahmen der Unsicherheiten kleiner zehn Prozent der gemessenen α -Gesamt-Aktivitätskonzentration ist, wären die darin enthaltenden Radionuklide in der Summenformel Gl. 5 ohnehin wegen der Zehn-Prozent-Regel der StrlSchV nicht zu berücksichtigen.

Beim Betrachten der Nuklidverhältnisse fällt auf, dass U-238 und Ra-226 nur bei Probe 61-23 im radioaktiven Gleichgewicht sind. Bei der Probe 46-8 ist der Anteil der Tochter Radium-226 im Wasser doppelt so groß wie jener der Mutter U-238.

Grund können bereits gestörte Gleichgewichte in der Gesteinsprobe sein oder unterschiedliche Auslaugung der Nuklide aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit.

7.5 Betrachtung der Grenzwerte

Uran und Radium sind unterschiedlich gut wasserlöslich und sind daher nicht im gleichen Verhältnis im Bohrwasser zu finden; dies wurde durch die durchgeführten GIK-Messungen bestätigt. Außerdem ist wahrscheinlich, dass während der Bohrung aufgrund der Spülvorgänge und starken Wasserumwälzungen das Radon weitest gehend verloren geht. Auch nach einer längeren Standzeit des Spülwassers im Aushubcontainer ist wegen der hohen Mobilität des Radons nicht mit einer erneuten Gleichgewichtseinstellung zu rechnen.

Um den Worst-Case zu berücksichtigen, wurde bereits bei der Probenaufbereitung eine lange Standzeit gewählt, um die Auslaugung der Radionuklide zu begünstigen.

Aus den bisherigen Überlegungen (vgl. Kapitel 7.1) ergibt sich aus Gl. 5 folgende Summenformel:

$$\frac{\bar{c}_{U-238}}{10 \cdot c_{U-238}} + \frac{\bar{c}_{Ra-226}}{10 \cdot c_{Ra-226}} \leq 1 \quad \text{Gl. 6}$$

Hierbei ist:

$\bar{c}_{i,a}$ Mittlere Konzentration des Nuklids i im Wasser in Bq/m³ je Bohrung

$c_{i,max}$ Maximal zulässige Aktivitätskonzentration des Nuklids i aus Tab. 7-1

Weitere Nuklide, die in Summe einen Aktivitätskonzentrationsanteil der Gesamtsumme größer als 10% ergeben, sind aufgrund der Messergebnisse nicht zu berücksichtigen.

Da das Spülwasser in der Realität aufgrund der Sammlung im Aushubsammelcontainer gemischt wird, ist es sinnvoll für die Betrachtung der Einhaltung der Grenzwerte auch einen anhand der Mächtigkeiten der Gesteinsschichten gewichteten Mittelwert der gemessenen Aktivitätskonzentrationen C_α der einzelnen Schichten zu betrachten. Hierzu wurden die Angaben der geologischen Schichtenverzeichnisse verwendet. In Tab. 7-6 ist die Vorgehensweise bei der Bildung des gewichteten Mittelwertes der Aktivitätskonzentration für die beiden auffälligen Bohrvorhaben #8 und #23 gezeigt.

Tab. 7-6: Vorgehensweise bei der Ermittlung der anhand der Mächtigkeiten der Gesteinsschichten gewichteten gemittelten Alpha-Aktivitätskonzentrationen C_a für BV#8

Gesteinsschicht	Pr ID	C_a [Bq/l]	Bohrtiefe [m]	Mächtigkeit d [m]	$C_{a,mittel}$ je Schicht [Bq/l]	$C_{a,mittel} \times d$ [Bqm/l]
Beckenablagerung	8-8	0,42	0 - 76	76	0,31	23,83
	17-8	0,21				
Moräne	45-8	0,44	76 - 94	18	0,83	14,94
	46-8	1,45				
	47-8	0,60				
Molasse Mergel	49-8	0,52	94 - 115	21	0,56	11,67
	57-8	0,59				
Molasse Feinsandstein	63-8	1,00	114 - 134	19	0,91	17,25
	66-8	0,81				
Molasse Mergel	69-8	0,11	134 - 145	11	0,25	2,77
	70-8	0,39				
Summe:				145		70,45
Gewichtete mittlere Aktivitätskonzentration [Bq/l]						0,49

Tab. 7-7: Vorgehensweise bei der Ermittlung der anhand der Mächtigkeiten der Gesteinsschichten gewichteten gemittelten Aktivitätskonzentrationen C_a für BV #23

Gesteinsschicht	Pr ID	C_a [Bq/l]	Bohrtiefe [m]	Mächtigkeit d [m]	$C_{a,mittel}$ je Schicht [Bq/l]	$C_{a,mittel} \times d$ [Bqm/l]
Verwitterungsdecke	1-23	0,10*	0 - 4	4	0,10	0,40
	3-23	0,10*				
Moräne	4-23	0,10*	4 - 52	48	0,12	5,81
	10-23	0,09*				
	22-23	0,09*				
	24-23	0,20				
Molasse	33-23	0,39	52 - 160	108	1,00	107,60
	47-23	0,39				
	61-23	2,30				
	79-23	0,91				
Summe:				160		113,80
Gewichtete mittlere Aktivitätskonzentration [Bq/l]						0,81

* = Messwert war kleiner EG, daher hier EG verwendet

Im schlimmsten Fall kann das Nuklidverhältnis von U-238 zu Ra-226 zwischen 1:1 und 0:1 schwanken. Wegen der besseren Löslichkeit von Radiumverbindungen gegenüber Uranverbindungen ist der Fall 1:0 nicht anzunehmen. Nach Gl. 6 ergeben sich für beide Extremfälle folgende Summenformeln in Bezug auf das Bohrvorhaben 23.

$$\frac{\bar{C}_{U-238}}{10 \cdot C_{U-238}} + \frac{\bar{C}_{Ra-226}}{10 \cdot C_{Ra-226}} = \frac{0,4Bq/l}{10 \cdot 3Bq/l} + \frac{0,4Bq/l}{10 \cdot 0,2Bq/l} = 0,21 \leq 1 \quad \text{Für } 1_{U-238} : 1_{Ra-226} \quad \text{BV \#23} \quad \text{Gl. 7}$$

$$\frac{\bar{C}_{U-238}}{10 \cdot C_{U-238}} + \frac{\bar{C}_{Ra-226}}{10 \cdot C_{Ra-226}} = \frac{0Bq/l}{10 \cdot 3Bq/l} + \frac{0,8Bq/l}{10 \cdot 0,2Bq/l} = 0,4 \leq 1 \quad \text{Für } 0_{U-238} : 1_{Ra-226} \quad \text{BV \#23} \quad \text{Gl. 8}$$

Die Summenformel wird unter den gegebenen Annahmen eingehalten. Die alphaspektrometrische Analyse mittels Gitterionisationskammer hat für diese Probe ein Nuklidverhältnis von 5:6 U-238 zu Ra-226 ergeben. Die Summenformel ergibt, unter der Annahme das Probe 61-23 repräsentativ für das gesamte Bohrwasser ist bei Verwendung des Nuklidverhältnisses keinen Wert größer 1.

7.6 Hochrechnung der möglichen Strahlenexposition

Eine Hochrechnung der maximalen zu erwartenden Strahlenexposition durch den Wasserpfad kann an dieser Stelle nicht durchgeführt werden. Zu betrachten wären zum Einen eine Exposition die durch das Einleiten des Bohrwassers in die Kanalisation entstehen könnte, sowie eine Exposition durch das Versickern dieses Wassers ins Grundwasser.

In beiden Fällen ist jedoch mit einer so großen Verdünnung der Radionuklidkonzentrationen zu rechnen, dass eine Berechnung nicht zielführend wäre. Ohnehin steht für eine Berechnung kein ausreichend großes Datenvolumen zu Verfügung. Um ansatzweise realistische Abschätzungen machen zu können müsste die Gesamtzahl der Geothermiebohrungen im Umkreis von Kläranlagen bzw. Wasserwerken und die hierbei anfallenden Bohrwassermengen im Bezug zu den Mischungsverhältnissen bekannt sein.

Es kann daher an dieser Stelle nur gesagt werden, dass durch das Bohrwasser nicht mit einer zusätzlichen effektiven Dosis für Einzelpersonen im Kalenderjahr von > 1 mSv gerechnet werden muss. Grund für diese Annahme ist der geführte Nachweis der Einhaltung der Summenformel nach Gl. 5 bei dem nicht von einer Verdünnung des Bohrwassers ausgegangen wurde.

8 Betrachtung des Expositionspfades Luft

Aktuell existiert noch keine gesetzlich verbindliche Regelung bezüglich der Radonexposition in Wohnräumen in Deutschland. Im Februar 1990 wurde von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften eine „Empfehlung zum Schutz der Bevölkerung vor Radonexposition innerhalb von Gebäuden“ veröffentlicht [25]. Demnach sollte die jahresdurchschnittliche Radonkonzentration in bestehenden Wohnräumen einen Wert von 400 Bq/m^3 , in Neubauten von 200 Bq/m^3 nicht überschreiten. [26]

Ausschlaggebend für die Radon-Raumluftkonzentration sind zwei Faktoren. Die örtlich geologisch bedingte Bodenluftkonzentration des Rn-222 und die beim Hausbau verwendeten Baustoffe. Wie wahrscheinlich das Auftreten erhöhter Radonkonzentrationen ist, hängt u.a. vom Alter und vom Zustand des Gebäudes ab. [27]

Aktuelle epidemiologische Studien zeigen, dass zwischen Lungenkrebsrisiko und Radonexposition ein nachweislicher Zusammenhang besteht [28][29]. Da allgemein von einem linearen Zusammenhang ohne Schwellenwert ausgegangen wird, sollte jede unnötige Exposition soweit wie möglich reduziert werden. [26]

8.1 Messung mittels Kernspurdetektoren in Diffusionskammern

8.1.1 Durchführung der Rn-222 Messung

Um nachzuweisen ob der Anschluss einer Erdwärmesonde die Radon-Aktivitätskonzentration im Wohnhaus erhöhen kann, wurden als passive Messgeräte Kernspurdetektoren eingesetzt. Diese haben den Vorteil dass sie klein und vollkommen strom- und geräuschlos funktionieren und somit die Bewohner der untersuchten Häuser nicht beeinträchtigen..

Für das Forschungsvorhaben wurden Kernspurdetektoren der Firma BAYER (300 μm Makrofol DE 1-4, Polycarbonat) eingesetzt und im „Radon Messlabor“ des Forschungszentrums Karlsruhe, welches als sachverständige Stelle zur Überwachung der Radonexposition nach § 95 StrlSchV anerkannt ist, ausgewertet.

Es wurden insgesamt 250 Kernspurdetektoren in Radondiffusionskammern (Exposimeter) an den zwölf Bohrvorhaben ausgelegt, von denen 232 ausgewertet werden konnten. Die Differenz entstand durch Verlust oder Defekt der Radonexposimeter, aufgrund der „rauen“ Baustellenumgebung.

Drei bis vier Wochen vor dem geplanten Bohrbeginn wurde an den Standorten die erste Charge Exposimeter ausgelegt, um den Ist-Stand vor Anschluss der Erdwärmesonde an das Wohnhaus zu dokumentieren. Nach Abschluss der Anschlussarbeiten wurde die erste Charge Exposimeter durch eine Zweite ersetzt.

Die Auslegezeiten der Exposimeter variieren aufgrund der unvorhersehbaren terminlichen Verschiebungen des Bohrtermins bzw. der Durchführung der Anschlussarbeiten. Sie betrug aber mindestens drei Wochen.

Die Auslegung der Radonexposimeter wurde so vorgenommen, dass ein Exposimeter unter einer vor Regen schützenden Schutzglocke außerhalb des Hauses positioniert wurde um Auskunft über die Umgebungs-Radonexposition zu erhalten. Ein weiteres Messgerät wurde immer im Raum der späteren Wärmetauscher-Anlage ausgelegt. Zusätzlich wurde je Stockwerk des Wohnhauses mindestens ein Exposimeter platziert. Bei jedem begleiteten Bohrvorhaben wurden jeweils 10 bis 13 Exposimeter vor und nach der Bohrung deponiert, welche primär auf den Keller und das Erdgeschoss verteilt wurden.

Von den zwölf begleiteten BV waren lediglich fünf Altbauten, der Rest waren Neubauten. Aufgrund der sich ständig verändernden Bauverhältnisse bei Neubauten war nicht zu gewährleisten, dass das eine oder andere Exposimeter aus Unwissenheit mit dem Bauschutt oder Müll entsorgt wurde. Aus dem gleichen Grund kam es beim BV #21 vor, dass die zweite Charge Exposimeter in den richtigen Räumen, jedoch auf dem Fußboden in den Raumecken wiedergefunden wurden. Bei BV #1 wurden von den zehn ausgelegten Exposimetern nur vier an ihrem ursprünglichen Expositionsort eingesammelt. Die Übrigen lagen zusammen in einer Kiste im Hausflur. Daher stehen zur Auswertung von BV #1 nur vier Exposimeter zuzüglich der Diffusionskammer aus dem Garten zur Verfügung.

8.1.2 Auswertung der Kernspurdetektoren

In den Grafiken Abb. 8-1 bis Abb. 8-4 sind die Messergebnisse der Rn-222 Aktivitätskonzentration mit ihren Messunsicherheiten vor und nach Anschluss der Erdwärmesonde dargestellt.

Farblich nicht hinterlegte Balken zeigen an, dass der Messwert kleiner als die Nachweisgrenze³ (NWG) war. Stellvertretend wurde hier die NWG eingetragen. Dort wo Balken fehlen ist das Exposimeter nicht am vorgesehenen Expositionsort aufgefunden worden oder ging verloren.

Die orange gestrichelte Linie entspricht dem zu Beginn des Kapitels diskutierten Grenzwert für die Rn-222 Aktivitätskonzentration in Wohnhäusern (Neubauten) von 200 Bq/m^3 . Die Skalierung der y-Achsen wurde bis zu 400 Bq/m^3 gewählt, da dies dem Grenzwert für Altbauten entspricht.

Die ermittelten Rn-222 Aktivitätskonzentrationen der BV #1, #26, #31, #34, #39 und #40 sind vollkommen unauffällig und bedürfen keiner weiteren Kommentierung. Es sind keinerlei Veränderungen zwischen den Werten vor und nach Anschluss der Erdwärme ersichtlich. Die Ergebnisse sind zur Ansicht in Anhang 12.6 hinterlegt.

Für die Bewertung der Ergebnisse ist zu bedenken, dass die Rn-222 Aktivitätskonzentration aufgrund von Wetter und den damit verbundenen unterschiedlichen Lüftungsverhältnissen im Wohnhaus stark schwanken kann. Da die Auslegedauer zwischen drei und sechs Wochen betrug, sind kleinere Va-

³ NWG und EG berechnet nach DIN 25482-1

rianzen der Messwerte nicht über zu bewerten. Dennoch war die Auslegezeit ausreichend, um eventuelle signifikante Änderungen in der Strahlenexposition durch Rn-222 nachweisen zu können.

Bei BV #8 (Abb. 8-1) fällt der erhöhte Messwert nach Anschluss der Erdwärmesonde am Expositions-ort „Vorraum Sauna“ ins Auge. Dieser ist jedoch durch veränderte Lüftungsverhältnisse zu erklären. Im Übrigen sind die Messwerte in diesem Altbau unauffällig.

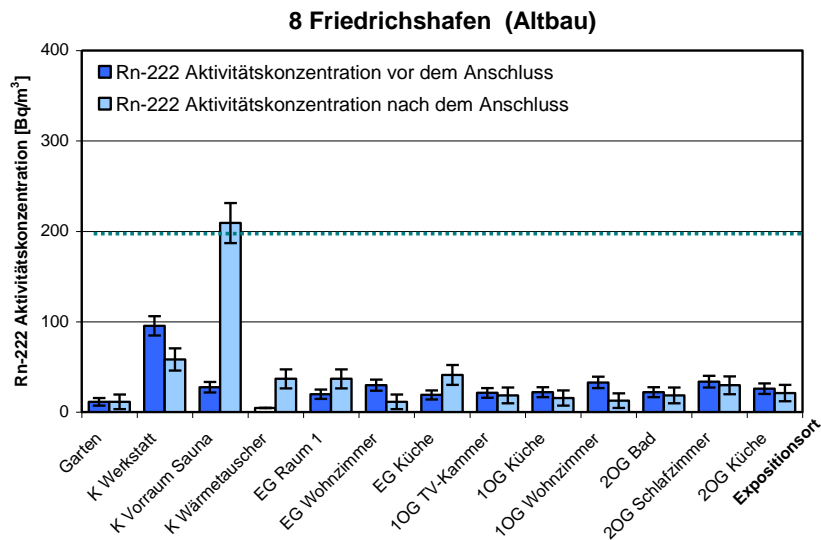


Abb. 8-1 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #8

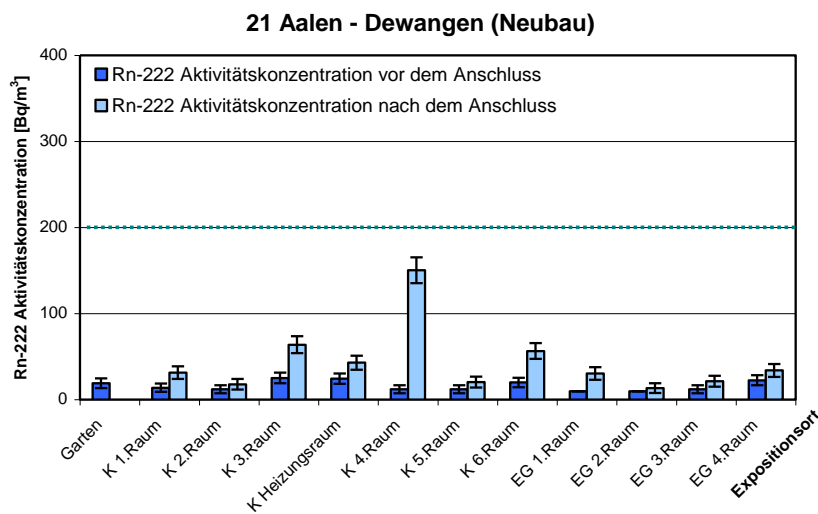


Abb. 8-2 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #21

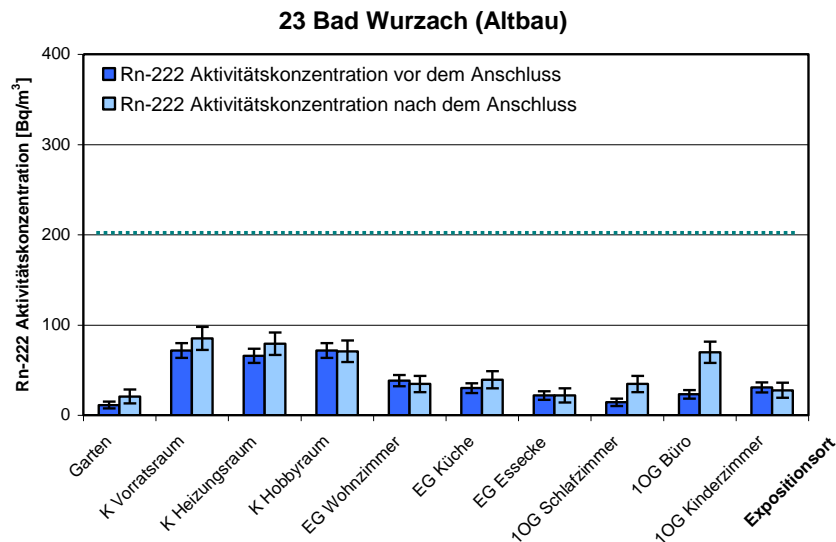


Abb. 8-3 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #23

Auch beim Neubau BV #21 (Abb. 8-2) sind vermutlich stark variierende Lüftungsverhältnisse während der Expositionszeit ursächlich für die tendenzielle Erhöhung der Rn-222 Aktivitätskonzentration nach Anschluss der Erdwärmesonde an das Wohnhaus. Vor den Anschlussarbeiten war deutlich besseres Wetter und es wurden viele Gips-, Maler- und Estricharbeiten durchgeführt. Daher standen Türen und Fenster permanent offen. Später beim Einsammeln der Exposimeter waren diese Arbeiten bereits abgeschlossen und es wurden Fliesenarbeiten zu dieser Zeit durchgeführt. Die Fenster und Türen waren zum Zeitpunkt der Begehung alle geschlossen.

Die Messergebnisse von BV #23 (Abb. 8-3) vor und nach Anschluss der Erdwärmesonde sind, mit Ausnahme des Expositionsortes „1OG Büro“, alle im Rahmen der zählstatistischen Unsicherheiten gleich. Da die Abweichung gering ist, weist sie nicht direkt auf einen Zusammenhang zwischen Rn-222 Aktivitätskonzentration und Anschluss der Erdwärmesonde hin. Wenn dem so wäre, müssten auch im Keller und im Erdgeschoss ähnliche Abweichungen aufgetreten sein.

Das auffälligste aller begleiteten Bohrvorhaben ist BV #35 (Abb. 8-4). Hier liegen die Messwerte nach Anschluss der Erdwärmesonde (Messreihe 1), vor allem im Keller, signifikant höher als vor dem Anschluss. Einzige Ausnahme bildet hier der Keller-Flur, der kein geschlossener Raum ist, sondern direkt mit dem Treppenhaus verbunden ist, in welchem auch eine leichte Erhöhung nachgewiesen werden konnte. Der höchste Messwert wurde im Schlafzimmer im Erdgeschoss gemessen. Das Schlafzimmer liegt direkt über dem Raum, in welchem sich die Geothermieanlage befindet. Auch dies kann als Indiz für einen Zusammenhang zwischen Geothermiebohrung und Rn-222-Aktivitätskonzentration angesehen werden. Zur genaueren Untersuchung wurden nach Erhalt der Messdaten unter Absprache mit dem Hauseigentümer erneut Exposimeter ausgelegt (Messreihe 2). Auf diesem Weg sollte geprüft werden, ob es sich nicht um ein kurzfristiges Phänomen handelt. Die Ergebnisse der Nachmessung ergaben eine Normalisierung der Radonaktivitätskonzentration. Damit wurde die Vermutung einer nur kurz anhaltenden Radonkonzentrationserhöhung bestätigt.

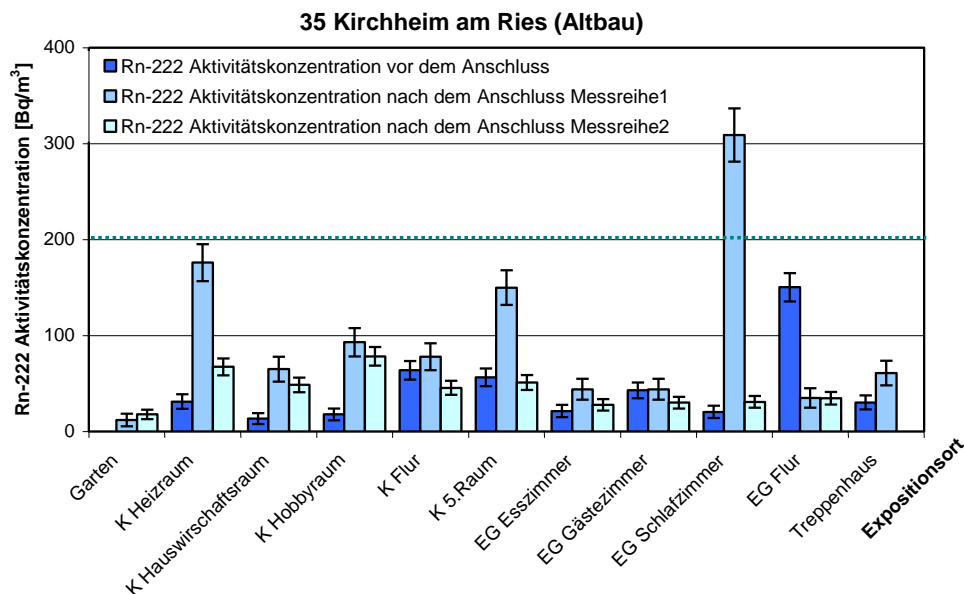


Abb. 8-4 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #35

8.2 Aktive Messungen mittels AlphaGUARD

Während der Bohrungen wurden begleitende Messungen mittels eines aktiven, kontinuierlich arbeitenden Radonmonitors (AlphaGUARD PQ2000 PRO von GENITRON INSTRUMENTS) zur Dokumentation der Veränderungen der Rn-222-Aktivitätskonzentration durchgeführt.

8.2.1 Durchführung der AlphaGUARD-Messungen

Bei der Radonmessung wurde das Messgerät (AlphaGUARD) möglichst nah hinter das Bohrloch in Windrichtung positioniert. Allerdings ergab sich wegen der Empfindlichkeit des Messgerätes gegen Feuchtigkeit und dem Bewegungsradius der Bohrtruppe um das Bohrloch häufig das Problem, dass zwischen Bohrloch und Messgerät einige Meter lagen.

In Abb. 8-5 ist beispielhaft die Positionierung des AlphaGUARDS und einer DL-Messsonde unter dem Bohrkran bei BV #35 gezeigt.

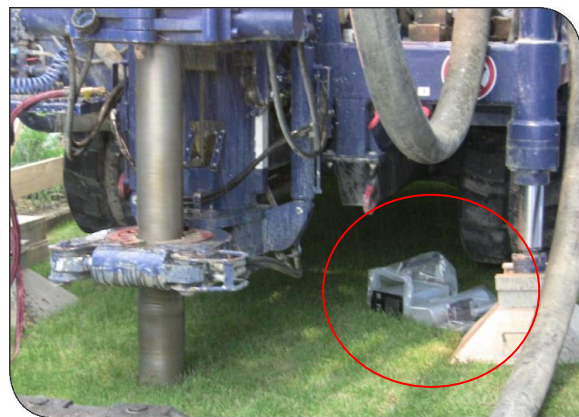


Abb. 8-5 Positionierung der Messgeräte während der Bohrung bei BV #35

8.2.2 Auswertung der AlphaGUARD -Messung

Die Messergebnisse der BV #1, #8, #21, #31, #33, und #34 bedürfen keiner Kommentierung, da sie vollkommen unauffällig sind (vgl. Anhang 12.7). Für die BV #4 und #26 können keine Messwerte des AlphaGUARDS aufgezeigt werden. Bei BV #26 hatte eine Fehleinstellung des Geräts (Messintervall $t = 1$ min an Stelle von $t = 10$ min), eine Messung mit einer ausreichend kleinen Nachweisgrenze verhindert. Bei BV #4 versagten trotz vorheriger Prüfung die Batterien während der Bohrung. Messtechnische Auffälligkeiten zeigten sich lediglich bei den BV #23 und #35.

In den Abb. 12-18 und Abb. 12-19 sind die Veränderung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft während der Bohrungen entlang der jeweiligen Bohrtiefe dargestellt. Für die bessere Vergleichbarkeit wurde die Skalierung stets gleich gewählt und an die für alle BV maximal aufgetretenen Werte angepasst. Die AlphaGUARD-Messung wurde über ein Messintervall von $t = 10$ min gemittelt.

Bei der Betrachtung der Messaufzeichnungen von BV #23 fällt der Anstieg der Radon-Aktivitätskonzentration in den ersten Bohrmeter auf. Hier steigt die Aktivitätskonzentration auf ca. 80 Bq/m^3 wohingegen diese zuvor und auch für den Rest der Bohrung stets im Bereich der Nachweisgrenze war. Da es sich nicht nur um einen, sondern um zwei Messwerte in Folge mit einer Mittelung des Messwertes über ein Zeitintervall von zehn Minuten handelt, kann von einer stattgefunden kurzfristigen Erhöhung der Radon-Aktivitätskonzentration ausgegangen werden. Vergleicht man die erhaltenen Werte mit dem Schichtenverzeichnis der Bohrung (Anhang Abb. 12-6) besteht ein Zusammenhang zwischen der Durchbohrung der Verwitterungsdeckschicht in die Moräne Kiesschicht und der gemessenen Radon-Aktivitätskonzentration am Bohrloch. Die Deckschicht besteht aus vier Meter mächtigem Schluff, welcher nicht Radon dicht, aber zumindest weniger durchlässig ist als viele andere Deckschichten. Beim Bohren in den nachfolgenden Moräne-Kies mit steigendem Sandanteil kann das dort gesammelte Radon freigesetzt werden. Da der Verlauf der Temperatur, der Feuchte und des Drucks der Luft stets mit gemessen wurde und weitestgehend stabil war, sind Wettereinflüsse als Ursache für die Schwankungen eher auszuschließen.

Beim BV #35 wurden Rn-222-Aktivitätskonzentrationen von bis zu 140 Bq/m^3 gemessen. Allerdings sind hier die Messergebnisse weniger eindeutig. Zum Einen waren die Wetterverhältnisse am Tag der Bohrung sehr wechselhaft. Es war wechselseitig windig und es regnete gelegentlich. Zum Anderen wurden die 190 Meter Bohrtiefe so schnell erreicht, dass auf das gewählte Messintervall von $t = 10$ min nicht selten acht Meter Bohrtiefe entfallen. Daher ist eine Zuordnung zum geologischen Schichtprofil eher schwierig. Es kann keine klare Aussage getroffen werden, ob der wiederholte Anstieg und Abfall der Messwerte durch Wechsel der Windrichtung verursacht wurde oder ggf. doch durch eher radonarme Ton- und Schluff-Schichten bedingt wurde. So sinken die Radonwerte beispielsweise beim Eindringen in die obere „Oxford-Ton“-Schicht und schwanken dann wiederum stark in der folgenden 44 m mächtigen Schicht für die im geologischen Schichtverzeichnis gelegentliche feinsandige Zwischenlagen eingetragen sind (vgl. Anhang Abb. 12-11). Die wiederkehrende Höhe einzelner Messwerte lässt vermuten, dass eine Rn-222 Exposition am Bohrloch stattgefunden hat. Diese Einschätzung wird unterstützt, wenn als Vergleich das Messergebnis des Kernspurdetektors im Garten hinzugezogen wird (Abb. 8-4), welcher über einen Expositionszeitraum von 29 Tagen eine mittlere Rn-222 Aktivitätskonzentration von lediglich 12 Bq/m^3 detektiert hat. Vergleicht man die-

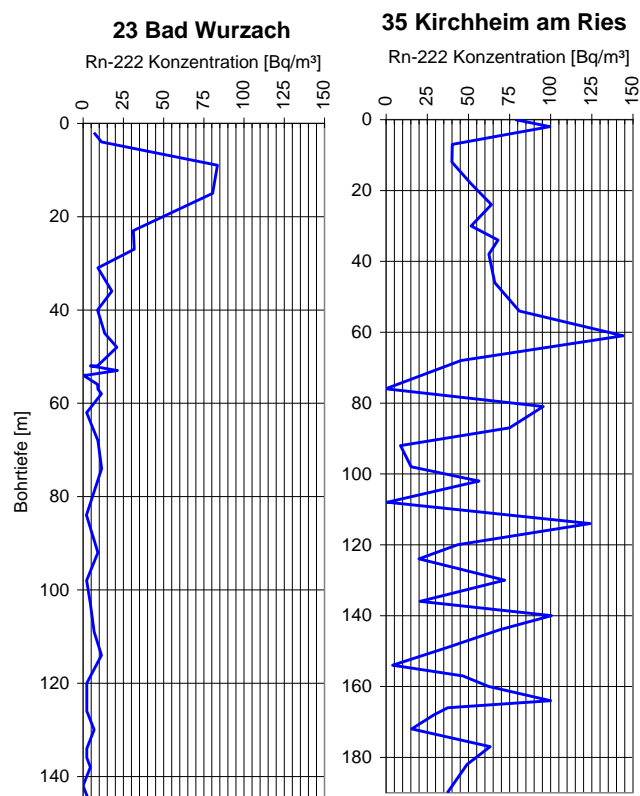


Abb. 8-6 Gegenüberstellung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Nähe des Bohrlochs bei den BV #23 und #35

sen Wert mit der mittleren Radonaktivitätskonzentration während der Bohrung von $54,6 \text{ Bq/m}^3$, ist dieser gegenüber dem Kernspurdetektor-Wert um den Faktor 4,5 erhöht.

8.3 Strahlenexposition durch Rn-222 bei privater Erdwärmenutzung

Ein Zusammenhang zwischen oberflächennahen Bohrungen zur privaten Erdwärmenutzung und der Steigerung der Strahlenexposition der Hauseigentümer durch Rn-222 und seine Folgeprodukte ist nicht zu vermuten. Die gemessenen Erhöhungen im Wohnhaus liegen alle unter den empfohlenen Grenzwerten die Sanierungsmaßnahmen erforderlich machen. Zu betrachten ist lediglich der kurzzeitige Anstieg der Radonexposition bei BV #35.

8.3.1 Berechnung der Strahlenexposition der Hausbewohner

Als Grundlage für die Berechnung einer zusätzlichen Strahlenexposition durch Radoninhalation infolge von geothermischen Bohrungen können nur die Messergebnisse von BV #35 herangezogen werden.

Um Aussagen über die zusätzliche effektive Dosis machen zu können, müssen unterschiedliche Expositionsbedingungen betrachtet werden, wie Aufenthaltszeiten $t_{\text{Exp},j}$ am Expositionsort oder die Gleichgewichtslage von Rn-222 mit seinen Folgeprodukten in der Raumluft. Die Gleichgewichtslage hängt stark von den aktuellen Bedingungen in der Umgebung (z.B. Feuchte, Aerosolkonzentration in der Luft usw.) ab. Rechnerisch muss dies durch Einbeziehung eines Gleichgewichtsfaktors $F_{\text{Rn},s}$ berücksichtigt werden. Üblicherweise werden Werte von $F_{\text{Rn},s} = 0,2$ bis $0,6$ verwendet [30]. Für die weiteren Berechnungen wird der mittlere Wert $F = 0,4$ entsprechend der Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und seiner Folgeprodukte [31], verwendet. Allgemein kann die zusätzliche effektive Dosis durch Rn-222 in der Raumluft nach dem Anschluss der Erdwärmesonde mittels Gl. 9 ermittelt werden.

$$\Delta H_{\text{Rn},j} = g_{\text{EEC},j} \cdot (\bar{C}_{\text{Rn},s,\text{nach}} - \bar{C}_{\text{Rn},s,\text{vor}}) \cdot F_{\text{Rn},s} \cdot t_{\text{Exp},j,s} \quad \text{Gl. 9}$$

Hierbei ist:

$\Delta H_{\text{Rn},j}$	Zusätzliche effektive Dosis durch den Anschluss der Erdwärmesonde
$g_{\text{EEC},j}$	Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für das Produkt aus Radon-222 Exposition und Gleichgewichtsfaktor in Svm^3/Bqh
$C_{\text{Rn},s,\text{vor}}$	mittlere Rn-222-Konzentration in der Raumluft im Wohnhaus vor dem Anschluss der Erdwärmesonde in Bq/m^3
$C_{\text{Rn},s,\text{nach}}$	mittlere Rn-222-Konzentration in der Raumluft im Wohnhaus nach Anschluss der Erdwärmesonde in Bq/m^3
$F_{\text{Rn},s}$	Faktor zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten am Expositionsort (Gleichgewichtsfaktor), dimensionslos
$t_{\text{Exp},j,s}$	mittlere prozentuale Aufenthaltszeit im Wohnhaus in a

Der Dosiskonversionskoeffizient $g_{\text{EEC},j}$ und die jährliche Expositionszeit $t_{\text{Exp},j,s}$ für die Bevölkerung in Gebäuden sind entsprechend Tabelle A.1 und A.2 in der Berechnungsgrundlagen – Bergbau (Teil II Radon) [31] mit $g_{\text{EEC},j} = 6,1 \cdot 10^{-9} \text{ Svm}^3/\text{Bqh}$ und $t_{\text{Exp},j,s} = 7000 \text{ h/a}$ an zu nehmen. Da die Erhöhung der Radonkonzentration bei BV #35 nur maximal zwei Monate andauerte, ist $t_{\text{Exp},j,s} = 1167 \text{ h/a}$ zu verwenden.

Die Bestimmung der mittleren Radonaktivitätskonzentration im Haus, vor und nach Anschluss der Erdwärmesonde, wurde mittels Bildung zeitlich gewichteter Mittelwerte der einzelnen Expositionsorte im Wohnhaus vorgenommen. Hierfür sind Wohnräume sinnvoll zusammengefasst und die Messergebnisse gemittelt worden. So wurde beispielsweise das Treppenhaus mit den Fluren im Keller und

dem Erdgeschoss zusammengefasst, da diese im Wohnhaus tatsächlich miteinander verbunden sind und ähnliche Aufenthaltswahrscheinlichkeiten haben. In Tab. 8-1 sind die angenommenen Aufenthaltsverteilungen an den untersuchten Expositionsorten in Bezug zu den gemessenen Rn-222 Aktivitätskonzentrationen, sowie die sich daraus ergebenden Wichtungsanteile der Aktivitätskonzentrationen vor und nach der Bohrung dargestellt.

Damit ergibt sich vor der Bohrung eine gewichtete mittlere Rn-222-Aktivitätskonzentration von 26,6 Bq/m³ und nach Anschluss der Erdwärmesonde von 146,6 Bq/m³. Hierbei hat vor allem der auffällige Messwert im Schlafzimmer hohes Gewicht.

Tab. 8-1: Bestimmung der gewichteten mittleren Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung im Wohnhaus für BV #35

Expositionsort	Wichtung je Einheit	C _{Rn,s,vor} [Bq/m ³]	C _{Rn,s,nach} [Bq/m ³]	C _{Rn,s,vor,gew} [Bq/m ³]	C _{Rn,s,nach,gew} [Bq/m ³]
EG Schlafzimmer	8/24	20	309	6,8	103,0
EG Flur		150	35		
Treppenhaus	1/24	30	61	3,4	2,4
K Flur		64	78		
K Hauswirtschaftsraum	3/24	13	65	1,7	8,1
K Hobbyraum	3/24	18	93	2,2	11,6
K Heizraum	1/24	31	176	1,8	6,8
K 5.Raum		56	150		
EG Esszimmer	8/24	21	44	10,7	14,7
EG Gästezimmer		43	44		
Summe der gewichteten mittleren Rn-222-Aktivitätskonzentrationen [Bq/m ³]:				26,6	146,6

Unter Verwendung aller getroffenen Annahmen lässt sich, unter Berücksichtigung der Berechnungsgrundlage-Bergbau (Teil II – Radon) [31], die maximal zu erwartende zusätzliche effektive Dosis, die Einzelpersonen der Bevölkerung im Wohnhaus durch Betreiben einer geothermischen Heizanlage im Kalenderjahr infolge von Inhalation von Radon und seinen Folgeprodukten in BV #35 erhalten können, entsprechend Gl. 9 zu 0,34 mSv/a ermitteln.

Eine Erhöhung der effektiven Dosis durch Radon im Wohnhaus im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung sollte nicht überbewertet werden. Bei einem Umzug muss ebenfalls mit einem ähnlichen Vorher-Nachher-Effekt gerechnet werden. Die durchschnittliche Radonkonzentration in Aufenthaltsräumen beträgt in Deutschland ca. 50 Bq/m³. Nach Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz ist in 11% der Haushalte von einem Wert über 100 Bq/m³ und in ca. 2% der Haushalte von Werten größer 400 Bq/m³ auszugehen [32], was einer zusätzlichen effektiven Dosis von 0,85 mSv/a bzw. 6 mSv/a gegenüber dem Durchschnittswert entspricht.

8.3.2 Strahlenexposition des Bohrpersonals

Da die während der Bohrungen am Bohrloch gemessenen Rn-222-Aktivitätskonzentrationen sehr kurzzeitig bzw. eher die Ausnahme waren, ist nicht von einer Strahlenexposition des Bohrpersonals auszugehen. Die gemessenen Werte lassen nicht befürchten, dass bei einer Arbeitszeit von 2000 h/a das Produkt aus Rn-222-Aktivitätskonzentration am Arbeitsplatz und Aufenthaltszeit den Wert von 2·10⁶ Bq/a überschreitet. Demnach ist nach §95 Abs.2 [9] nicht davon auszugehen, dass durch eine Rn-222-Exposition eine effektive Dosis von 6 mSv für das Bohrpersonal überschritten wird. Selbst wenn man unterstellen möchte, dass der maximale Messwert in BV #35 von 150 Bq/m³ repräsentativ für alle Bohrungen ist, ergäbe sich hiermit nur eine Gesamtexposition von 2·10⁵ Bq/a.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch Abwandlung von Gl. 9 lässt sich die effektive Dosis des Bohrpersonals im Kalenderjahr infolge der Arbeiten am Bohrloch wie folgt ermitteln:

$$\Delta H_{Rn,j,Bohr} = g_{EEC,j} \cdot (\bar{C}_{Rn,Bohr} - \bar{C}_{Rn,U}) \cdot F_{Rn,s} \cdot t_{Exp,j,s} \quad \text{Gl. 10}$$

Hierbei bedeuten:

$\Delta H_{Rn,j,Bohr}$ Zusätzliche effektive Dosis durch das Arbeiten am Bohrloch

$g_{EEC,j}$ Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für das Produkt aus Radon-222 Exposition und Gleichgewichtsfaktor in Sv m^3 /Bqh

$\bar{C}_{Rn,Bohr}$ Mittelwert der maximalen am Bohrloch gemessenen Rn-222-Aktivitätskonzentration der acht Messreihen der Bohrvorhaben in Bq/ m^3

$\bar{C}_{Rn,U}^U$ Mittelwert der mittels Kernspurdetektoren gemessenen Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Umgebung der Bohrvorhaben in Bq/ m^3

$F_{Rn,s}$ Faktor zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten am Expositionsort (Gleichgewichtsfaktor), dimensionslos

$t_{Exp,j,s}$ Expositionszeit der Referenzperson am Expositionsort

Für die Berechnung sind entsprechend den Tabellen A.1 bis A.3 der Berechnungsgrundlage - Bergbau: Teil II Radon [31] folgende Werte zu verwenden: $g_{EEC,j} = 7,8 \cdot 10^{-9}$ Sv m^3 /Bqh, $F_{Rn,s} = 0,2$ und $T_{Exp,j,s} = 2000$ h.

Damit ergibt sich nach Gl. 10 die zusätzliche effektive Dosis durch das Arbeiten am Bohrloch bei einer angenommenen durchschnittlichen Rn-222-Aktivitätskonzentration von $C_{Rn,Bohr} = 150$ Bq/ m^3 zu $\Delta H_{Rn,j,Bohr} = 0,47$ mSv/a, wenn die natürliche Umgebungskonzentration außer acht gelassen wird.

Realistischer ist es jedoch die Radonkonzentrationen während der Bohrung #35 zu mitteln, abzüglich der natürlichen Untergrund-Radonexposition. Die durchschnittliche Rn-222-Aktivitätskonzentration während der Bohrung ergibt sich dann rechnerisch zu $\bar{C}_{Rn,Bohr} = 54,6$ Bq/ m^3 und die durchschnittliche Untergrundkonzentration des Radons zu $\bar{C}_{Rn,U}^U = 12$ Bq/ m^3 . Damit ergibt sich nach Gl. 10 die zusätzliche effektive Dosis durch das Arbeiten am Bohrloch zu $\Delta H_{Rn,j,Bohr} = 0,13$ mSv/a.

Dieser Wert entspricht einer konservativen Betrachtung, da der verwendete Mittelwert von BV #35 der größte aller Bohrvorhaben ist. Die Messgeräte waren während der Bohrung so positioniert, dass sie die Radonkonzentration des Bohrpersonals am Arbeitsplatz repräsentieren können. Die Höhe des errechneten Wertes rechtfertigt keine Überwachung des Bohrpersonals während der Bohrphase.

9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Untersucht wurde die Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung und des Bohrpersonals infolge von oberflächennahen Bohrungen zum Zwecke privater Erdwärmennutzung. Eine Betrachtung der rechtlichen Grundlagen in Deutschland ergab, dass Erdwärmesondenbohrungen wie auch alle anderen oberflächennahen Bohrungen nicht dem Geltungsbereich der Strahlenschutzverordnung unterliegen. Da eine relevante Erhöhung der Strahlenexposition nicht ausgeschlossen war, wurden für die Expositionspfade Luft, Wasser, Boden-Pflanze-Mensch und Boden-Gammastrahlung Dosisberechnungen durchgeführt.

Die Resultate basieren auf zwölf in den ausgewählten Gebieten gefundenen und messtechnisch begleiteten Bohrvorhaben. Davon waren sieben Neubauten und fünf Altbauten. Insgesamt wurden 250 Kernspurdetektoren eingesetzt und während den Bohrungen 548 Bohrlochaushubproben entnommen. Davon wurden 117 gammaspektrometrisch untersucht und bei 86 Proben wurden zusätzlich Alpha-Gesamt-Messungen am Überstandswasser vorgenommen. Die Auswahl der Proben erfolgte anhand

der geologischen Schichtenverzeichnisse die von den an den Bohrungen beteiligten Geologen erstellt wurden.

Für die untersuchten Expositionspfade ergaben sich die in nachstehender Tabelle zusammengestellten Ergebnisse für die zusätzliche effektive Dosis infolge der Erdwärmesondenbohrung. Für die Ermittlung der Werte wurden konservative Annahmen getroffen in Form von Worst-Case-Betrachtungen. Diese Vorgehensweise war notwendig, da bei einer so geringen Anzahl an Projekten nicht sichergestellt ist, dass evtl. auftretende Maximalwerte dem Forschungsvorhaben entgangen sind.

Auch durch sehr konservative Annahmen ergaben die denkbaren Expositionspfade einen unerheblichen Beitrag bezogen auf die mittlere natürliche Strahlenexposition der Bevölkerung von 2,1 mSv/a. Die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten geothermischen oberflächennahen Einzelsonden (bis maximal 4 Bohrsonden) in Privathäusern lassen keine grundsätzliche Aussage für Häuser in einer Region zu.

Um Fehler bei der Installation zu vermeiden, wurde gemeinsam von Umweltministerium und Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg eine neue Broschüre zur „Fehlervermeidung bei Wärmepumpen- und Erdsonden-Heizsystemen“ herausgegeben [33].

Expositionspfad	ΔH [mSv/a]	Getroffene Annahmen
Luft Hausbesitzer	0,34	Expositionszeit 1167 h/a Aufenthaltszeit in den Wohnräumen konservativ gewichtet bezogen auf die gefundenen Höchstwerte
Luft Bohrapersonal	0,47	Einzelner gemessener Radonhöchstwert aller Bohrungen bezogen auf 2000 h/a
Wasser	<<1 (nicht kalkulierbar)	Maximal-Probe ist repräsentativ für das gesamte Bohrwasser Keine Verdünnung in Kanalisation
Boden-Pflanze-Mensch	0,19 (Gruppe <1 a) 0,04 (Gruppe >17 a)	25% der verzehrten Lebensmittel stammen von der mit Bohrwasser lokal kontaminierten Fläche Verzehrgewohnheiten nach AVV zu §47 Oberflächenkontamination angenommen für 30 cm Bodentiefe
Gamma-Bodenstrahlung	0,26 (Gruppe <1 a) 0,19 (Gruppe >17 a)	Aufenthaltszeit im Freien 2000 h/a In allen Proben gefundene max. Werte für U-238, Th-232, K-40 in einer Probe angenommen. Diese bedeckt homogen eine unendliche Fläche bis in 30 cm Tiefe

10 Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

AVV	Allgemeine verwaltungsvorschrift
$a_{x,s}$	Faktor zur Berücksichtigung der Abschirmwirkung am Expositionsort s auf Gammastrahlung im Freien, dimensionslos.
BV	Bohrvorhaben
BW	Baden-Württemberg
C_α	gewichtete, mittlere Alpha-Aktivitätskonzentration
$C_{\alpha,mittel}$	mittlere Alpha-Aktivitätskonzentration
$C_{B,n,r}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Pflanze n über den Wasserpfad (Beregnung)
$C_{Bo,r}$	Repräsentativer Wert der spezifischen Aktivität des Radionuklids r in der oberen Bodenschicht (0-10 cm für Weideböden, 0-20 cm für Garten und Ackerboden) in Bq/kg (TM)
$C_{Bo,s}$	Spezifische Aktivität eines Radionuklids im radioaktiven Gleichgewicht in der oberen Bodenschicht (0-30cm) für den Expositionsort s in Bq/kg (TM)
$C_{Bo,r}^U$	Spezifische natürliche Untergrund Aktivität des Radionuklids r in der oberen Bodenschicht (0-10 cm für Weideböden, 0-20 cm für Garten und Ackerboden) in Bq/kg (TM)
$C_{Bo,s}^U$	Spezifische natürliche Untergrund eines Radionuklids im radioaktiven Gleichgewicht in der oberen Bodenschicht (0-30cm) für den Expositionsort s in Bq/kg (TM)
$C_{D,n,r}$	Spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Pflanze n über den Bodenpfad
C_i	Die Freizugebende spezifische Aktivität wobei i das jeweilige Radionuklid ist.
$C_{i,max}$	Maximal zulässige Aktivitätskonzentration des Nuklids i [1]
$\bar{C}_{i,a}$	Mittlere Konzentration des Nuklids i im Wasser in Bq/m ³ je Bohrung
$\bar{C}_{Rn,Bohr}$	Mittelwert der maximalen am Bohrloch gemessenen Rn-222-Aktivitätskonzentration der acht Messreihen der Bohrvorhaben in Bq/m ³
$\bar{C}_{Rn,Bohr}^U$	Mittelwert der mittels Kernspurdetektoren gemessenen Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Umgebung der Bohrvorhaben in Bq/m ³
$C_{Rn,s,nach}$	mittlere Rn-222-Konzentration in der Raumluft im Wohnhaus nach dem Anschluss der Erdwärmesonde in Bq/m ³
$C_{Rn,s,vor}$	mittlere Rn-222-Konzentration in der Raumluft im Wohnhaus vor dem Anschluss der Erdwärmesonde in Bq/m ³
$C_{n,r}$	Spezifische Aktivität in Bq/kg des Radionuklids r in Lebensmitteln n
$C_{n,r}^U$	Spezifische natürliche Untergrund Aktivität des Radionuklids r in Bq/kg in Lebensmitteln n
d	Mächtigkeit
DIN	Deutsches Institut für Normung
EG	Erkennungsgrenze
EW	Erdwärme
EWS	Erdwärmesonde
$f_{Kon,j}$	Umrechnungsfaktor von Photonenäquivalenzdosis in effektive Dosis für die Referenzperson j
FM	Frischmasse

$F_{Rn,s}$	Faktor zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Radon und seinen kurzlebigen Folgeprodukten am Expositionsort (Gleichgewichtsfaktor), dimensionslos
$g_{EEC,j}$	Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für das Produkt aus Radon-222 Exposition und Gleichgewichtsfaktor in $Sv\ m^3/Bq\ h$
g_{ext}	Konversionsfaktor für die Umrechnung der spezifischen Aktivität des Bodens in die Photonen-Äquivalentdosis im Freien in 1 m Höhe in $Sv\ kg/Bq\ h$
$g_{Ing,r,j}$	Ingestionskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzgruppe j in Sv/Bq
GIK	Gitterionisationskammer
GOK	Gelände Oberkante
GW	Grundwasser
$\Delta H_{E,j}$	Zusätzlich zum natürlichen Untergrund entstehende effektive Jahresdosis durch Gamma-Bodenstrahlung im Freien in 1 m Höhe
$H_{Ing,j}$	Effektive Jahresdosis von Referenzpersonen j durch Ingestion lokal erzeugter Lebensmittel
$\Delta H_{Rn,j}$	Zusätzliche effektive Dosis durch den Anschluss der Erdwärmesonde
$\Delta H_{Rn,j,Bohr}$	Zusätzliche effektive Dosis durch das Arbeiten am Bohrloch
ISONG	Informationssystem oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LGRB	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg
n	Index zur Kennzeichnung der Lebensmittel, BI = Blattgemüse, Pf = Pflanzliche Produkte außer Blattgemüse
NWG	Nachweisgrenze
ODL	Ortsdosisleistung
PE	Polyethylen
PML	Physikalisches Messlabor
P_n	Anteil an lokaler Produktion des Lebensmittels n am Jahresverbrauch, dimensionslos
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung bei bergbaulichen Tätigkeiten (REI-Bergbau)
R_i	Freigabewert der einzelnen Radionuklide i gemäß Anlage III Tabelle 1 Spalte 5 StrlSchV
RL	Radon Labor
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SW	Schichtwasser
$t_{Exp,j,s}$	Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h
TM	Trockenmasse
$T_{n,r}$	Transferfaktor vom Boden in die Pflanze n über Wurzelaufnahme und Aktivitätsablagerung auf oberirdischen Pflanzenteile für das Radionuklid r in Bq/kg (TM) des Bodens
$U_{n,j}$	Jahresverbrauch des Lebensmittels n durch die Referenzperson j in kg

11 Literatur

- [1] Danica Melzer, Studienarbeit II 14.06.2009, Duale Hochschule Baden-Württemberg
Vorkommen und Analytik natürlicher Radionuklide bei Erdwärmenutzung
- [2] Danica Melzer, Bachelorarbeit 15.09.2009, Duale Hochschule Baden-Württemberg
Natürliche Strahlenexposition durch Sondeneinbringung für die private Erdwärmenutzung
- [3] Brigitte Hahn, Masterarbeit 03.08.2009, Universität Rostock
Betrachtung der Strahlenexposition von Mensch und Umwelt durch geothermische Energienutzung für Wohnhäuser in Baden Württemberg
- [4] Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i.Br 1998, 12
Auflage
Geologische Schulkarte von Baden-Württemberg 1:1000000
- [5] Geodatendienst des LGRB, Informationssystem oberflächennahe Geothermie für Baden-
Württemberg (ISONG)
<http://www.lgrb.uni-freiburg.de/lgrb/Produkte/geodaten-dienste/isong>
- [6] Umweltministerium Baden-Württemberg;
„Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden“, 5. Auflage 2005
<http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/11150/>
- [7] Methodenbeschreibung Physikalisches Messlabor MB ISF 001
Bestimmung von Radionukliden mittels Gammaspektrometrie
- [8] Der Bundesminister für Umwelt und Reaktorsicherheit (Hrsg.)
Messanleitungen für die Überwachung der Radioaktivität in der Umwelt und zu Erfassung radi-
oaktiver Emissionen aus kerntechnischen Anlagen
Messanleitung Umweltradioaktivität 7. Lfg./2006
Gustav Fischer Verlag; Stuttgart, Jena, München
- [9] Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (StrlSchV)
Vom 20.Juli 2001, BGBl. III 751-1-8
- [10] Annika Jakobi September 2009, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe
Bachelor Thesis: Estimation of Uncertainties with the Creation of Mathematical Efficiency Cali-
brations in Gamma-Ray Spectrometry
- [11] Scheffer, F. / Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde,
Heidelberg, 2002, 15th edition
- [12] Pettijohn, F.J.: Sedimentary Rocks, New York, 1975
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz: Berechnungsgrundlage Bergbau – Teil I
Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge Bergbaubedingter Um-
weltradioaktivität (Berechnungsgrundlage Bergbau)
Stand 30.07.99
- [14] International Commission of Radiation Units and Measurements Report 53
Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, Dez. 1994
- [15] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
Radioaktivität in Baden-Württemberg, Jahresbericht 1998-2001
- [16] Rolf Michel, Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie, Universität Hannover
Freigrenzen, Freigabewerte und Überwachungsgrenzen: Hintergrund zu den Regelungen der
StrlSchV über Freigabe von radioaktiven Stoffen und überwachungsbedürftigen Rückständen
- [17] Parlamentsbericht: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2007
<http://www.bfs.de/de/bfs/druck/uus/parlamentsbericht07.pdf> , gelesen am 29.07.09

- [18] International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, 1991 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- [19] Bundesamt für Strahlenschutz 21.07.2005
Natürliche Radioaktivität in Nahrungsmitteln
<http://www.bfs.de/de/ion/nahrungsmittel/nahrung.html> , gelesen am 20.08.09
- [20] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §47 Strahlenschutzverordnung:
Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen
Stand 13.05.05
- [21] Methodenbeschreibung Physikalisches Messlabor MB ISF 003
Bestimmung der Alpha- / Beta-Gesamt-Aktivität
- [22] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001)
vom 21. Mai 2001 (BGBl. I S. 959), die durch Artikel 363 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407) geändert worden ist
- [23] Bundesamt für Strahlenschutz 2009
Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide im Trinkwasser in der Bundesrepublik Deutschland
http://www.bfs.de/de/ion/nahrungsmittel/TW_Bericht_2009.pdf (gelesen am 01.09.09)
- [24] Methodenbeschreibung Physikalisches Messlabor MB ISF 005
Bestimmung von Alpha-Strahlern mittels GIK-Spektrometrie
- [25] Kommission der Europäischen Gemeinschaft: "Empfehlung zum Schutz der Bevölkerung vor Radonexposition innerhalb von Gebäuden",
Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L80/26, 1990.
- [26] Bernd Hoffman 2004
Dissertation: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über die Emanation und Migration von Radon in Baustoffen und Bauwerksabdichtungen
- [27] http://www.bfs.de/de/ion/radon/radon_boden/radonkarte.html
(gelesen am 03.08.09)
- [28] Schaffrath-Rosario, A., Heid, I.M., Kreienbrock, L., Heinrich, J., Wellmann, J., Gerken, M., Kreuzer, M., Steinwachs, A., Langer, B., Brüske-Hohlfeld, I., Wichmann, H.E:
Bewertung des Lungenkrebsrisikos durch Radon in Wohnungen in Deutschland mit Hilfe statistisch-epidemiologischer Modelle.
Abschlussbericht an das Bundesamt für Strahlenschutz und den Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Vorhaben StSch 4237, Neuherberg, Hannover, 2004
- [29] Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J.M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Schaffrath-Rosario, A., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H.E., Doll, R.:
Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies; BMJ (British Medical Journal) published 21 December 2004
<http://www.bmj.com/cgi/content/abstract/330/7485/223> (gelesen am 09.08.09)
- [30] Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, 169 Sitzung am 31.10.00
Epidemiologische Untersuchungen zum Lungenkrebsrisiko nach Expositionen gegenüber Radon

- [31] Bundesamt für Strahlenschutz: Berechnungsgrundlage Bergbau – Teil II
Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität
Stand 30.07.99
- [32] Bundesamt für Strahlenschutz, Informationen zu Radon in Häusern
http://www.bfs.de/en/ion/radon/radon_in_haeusern.html (gelesen am 10.08.09)
- [33] Wirtschaftsministerium und Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg:
Qualitätsmanagement – Fehlervermeidung bei Wärmepumpen- und Erdsonden-Heizsystemen.
Broschüre, 39 S., 2. Aufl., Stuttgart, 2010.

12 Anhang

12.1 Informationsblatt für Bauherren


Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Strahlenforschung


Infoblatt

Forschungsvorhaben Geothermie


**Organisatorischer Ablauf der Messungen
auf Ihrem Grundstück und in Ihrem Haus**

- Drei Wochen vor Bohrbeginn werden im Haus - entweder Altbau oder Neubau mit Fenster und Türen – pro Etage bis zu drei Radon-Dosimeter aufgehängt oder ausgelegt. 

Radon ist ein in der Natur vorkommendes radioaktives Edelgas. Es ist farblos und man kann es weder riechen noch schmecken. Radon kommt aus dem Boden und ist mehr oder weniger überall vorhanden auch in Innenräumen.



Ein Radon-Dosimeter ist eine kleine schwarze Plastikdose von 4 cm Durchmesser und wenige Gramm schwer. Es benötigt keinen Strom und braucht nach dem Auslegen nicht weiter beachtet werden und ist dabei völlig geräusch- und geruchlos sowie selbstverständlich wartungsfrei. Das Aufhängen der Dosimeter wird von uns zu einem mit Ihnen vereinbarten Termin vorgenommen.

- Begleitend zur Erdsondenbohrung werden Messungen in der Nähe des Bohrlochs vorgenommen. Parallel der sowieso alle zwei Meter erforderlichen geologischen Probenahme werden auch wir unsere Beprobung durchführen.
- Am Ende der Bohrarbeiten werden die Radon-Dosimeter im Haus ausgewechselt. Sie verbleiben für weitere 3 Wochen. Nach dieser Zeit werden die Dosimeter von unseren Mitarbeiter wieder eingesammelt. 

Nach Auswertung der Messungen und Analysen der Proben im Institut für Strahlenforschung werden Ihnen die Ergebnisse mitgeteilt.

Für die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen entstehen für Sie keinerlei Kosten und durch die Probenahmen und Messungen während der Bohrung kommt es auch zu keinen Zeitverzögerungen.

**Ihre Ansprechpartnerin im
Institut für Strahlenforschung:**
Frau Karin Schultze
Telefon: 07247 82-4862
Email: karin.schultze@isf.fzk.de






Abb. 12-1 Informationsblatt das den Landratsämtern zur Weitergabe an die Hausbesitzer übermittelt wurde.

12.2 Geologische Profile der Bohrungen

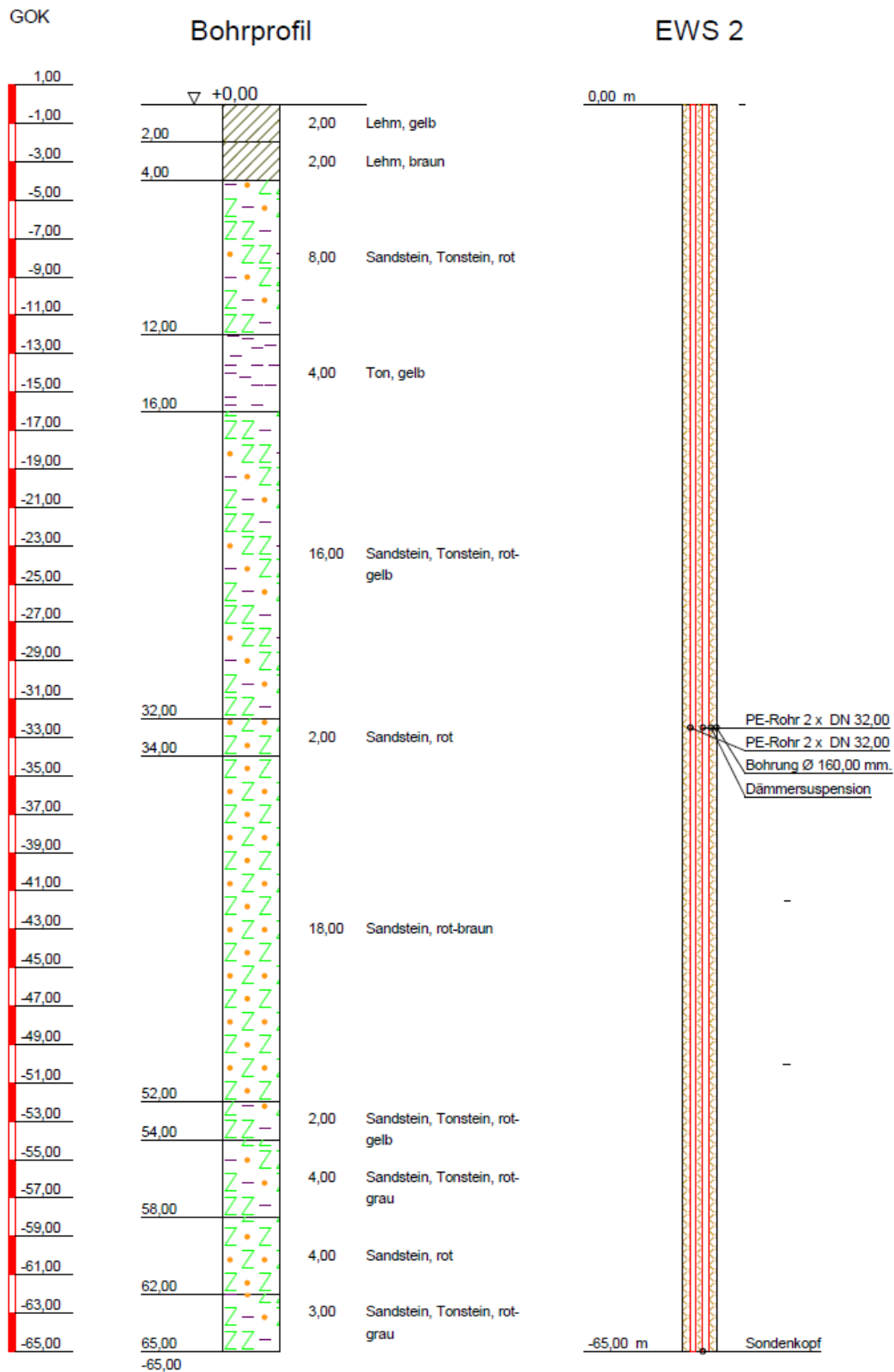
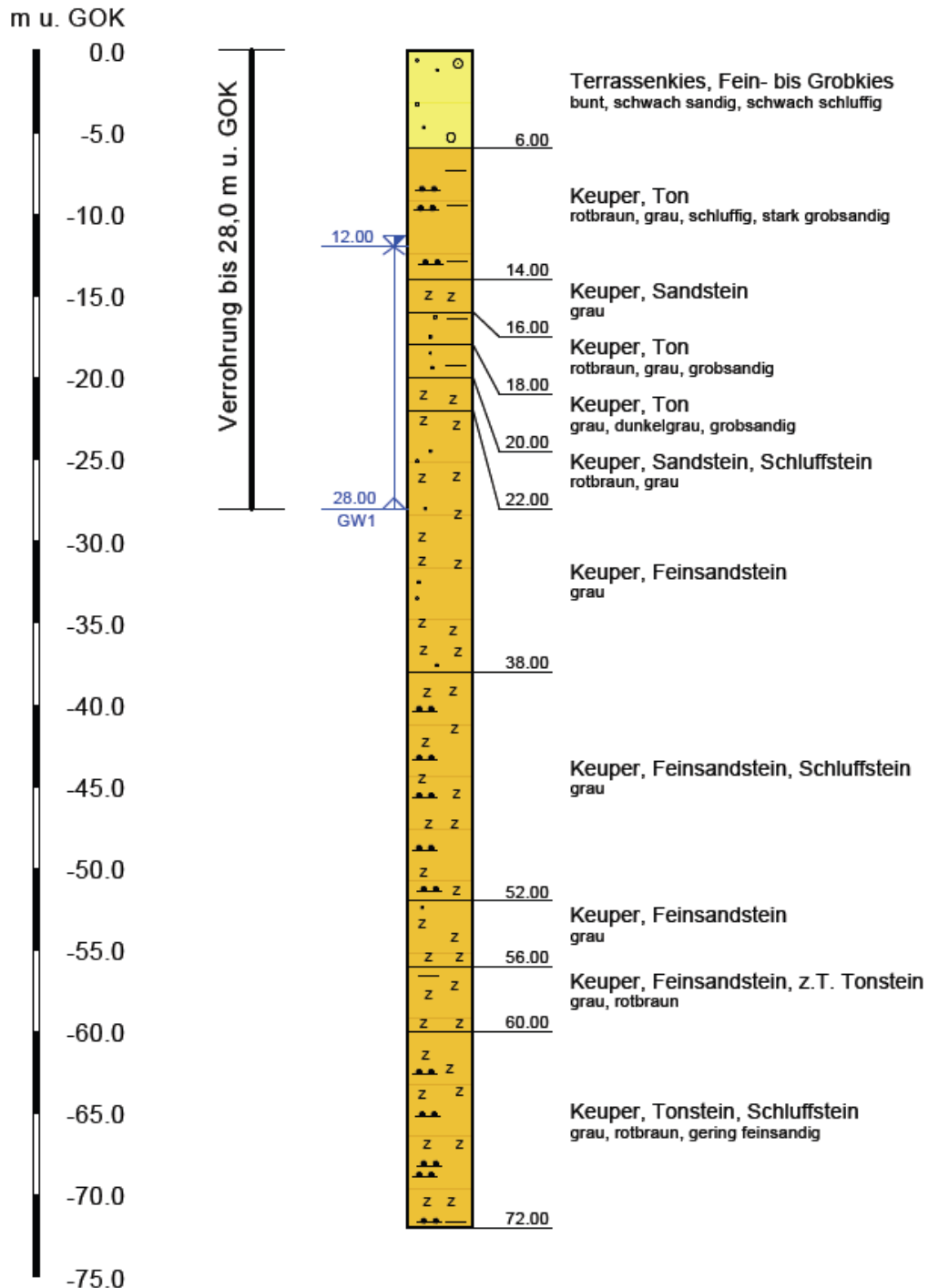


Abb. 12-2 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #1 Heidelberg - Handschuhsheim


Maßstab d. H. 1:400

EW1/09

278 m ü. NN



Legende

 Terrassenkies


 Keuper

Abb. 12-3 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #4 Grenzach - Wyhlen

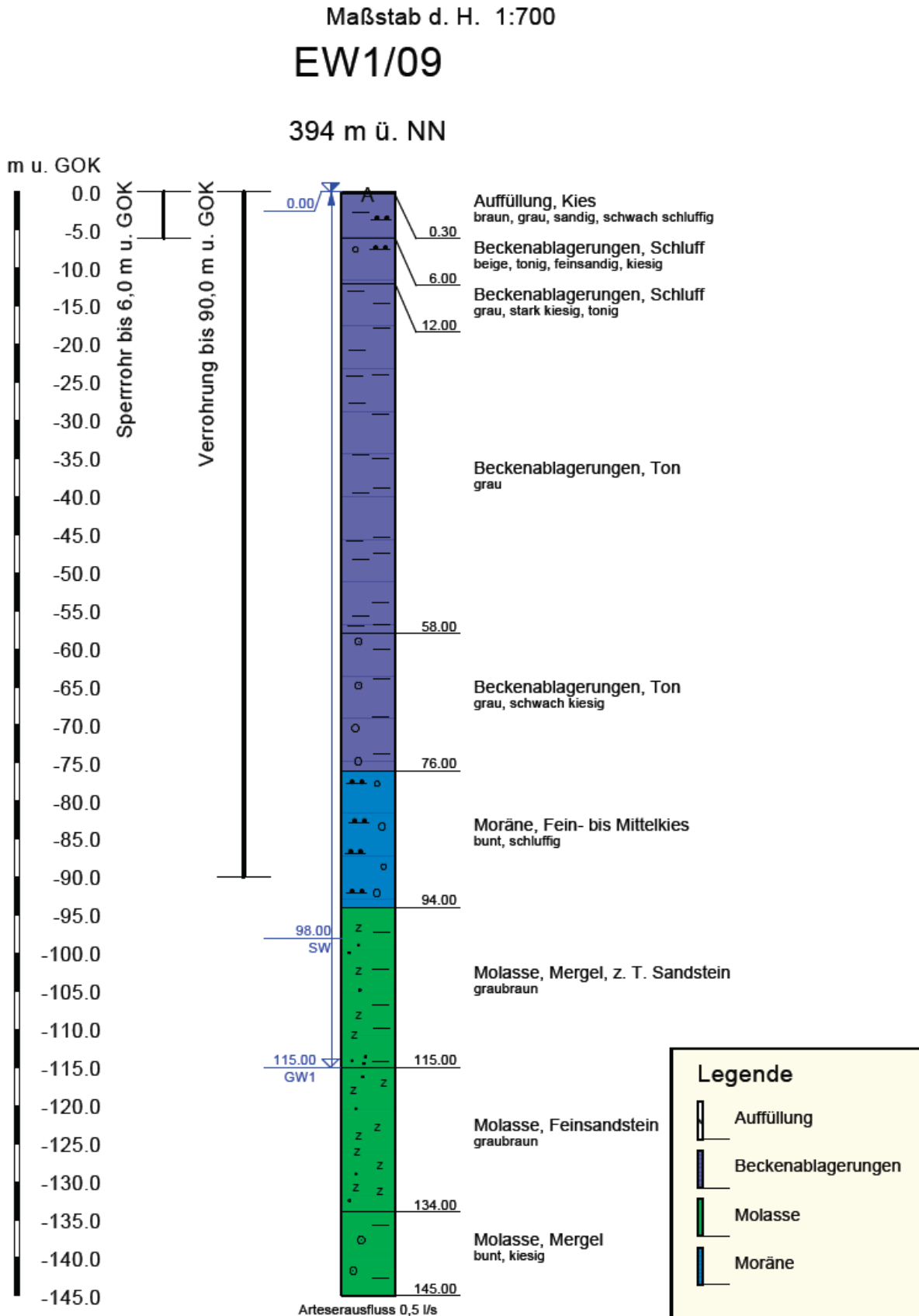


Abb. 12-4 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #8 Friedrichshafen

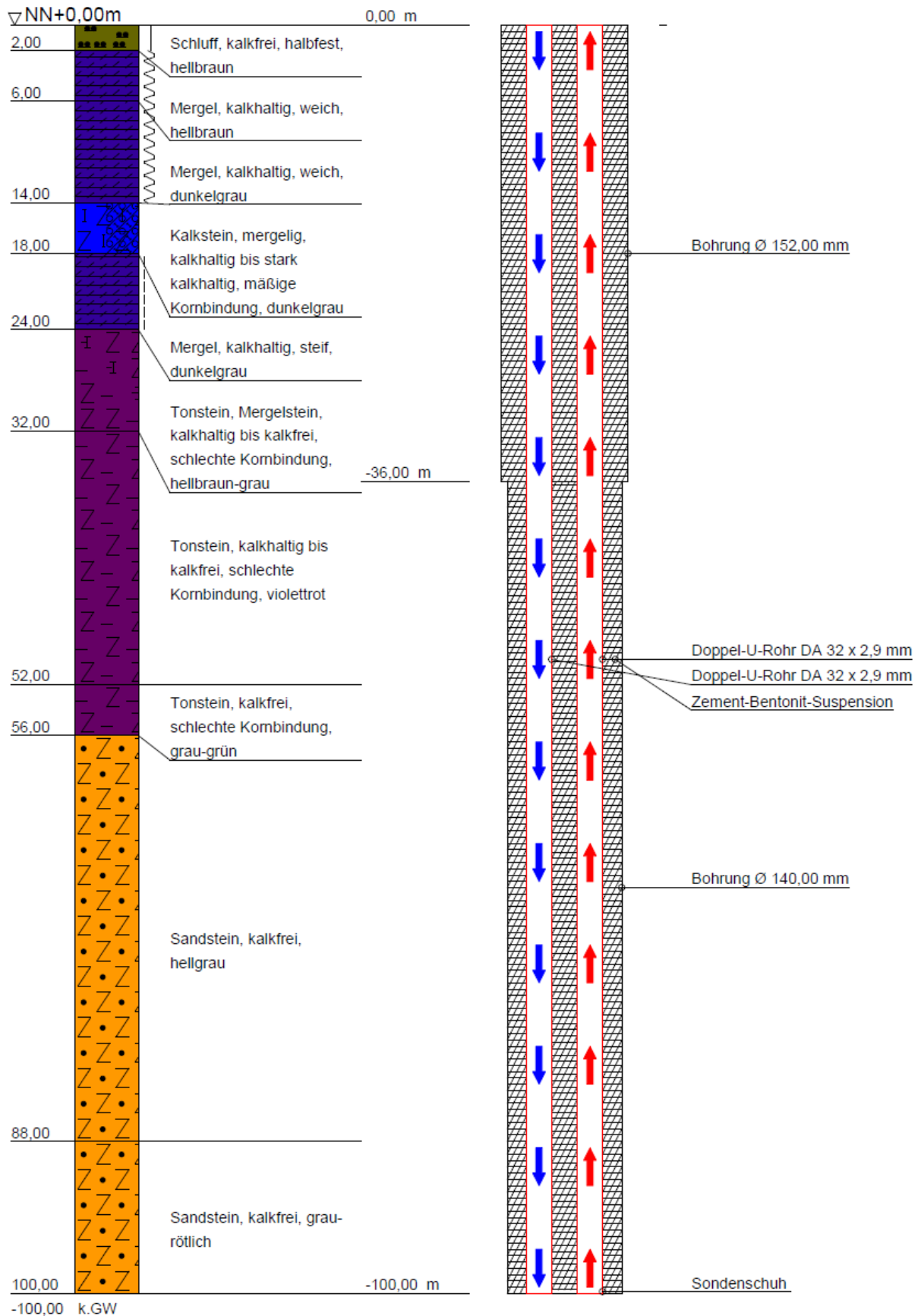


Abb. 12-5 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #21 Aalen - Dewangen

Maßstab d. H. 1:800

EW1/09

661 m ü. NN

Legende

- Verwitterungsdecke
- Molasse
- Moräne

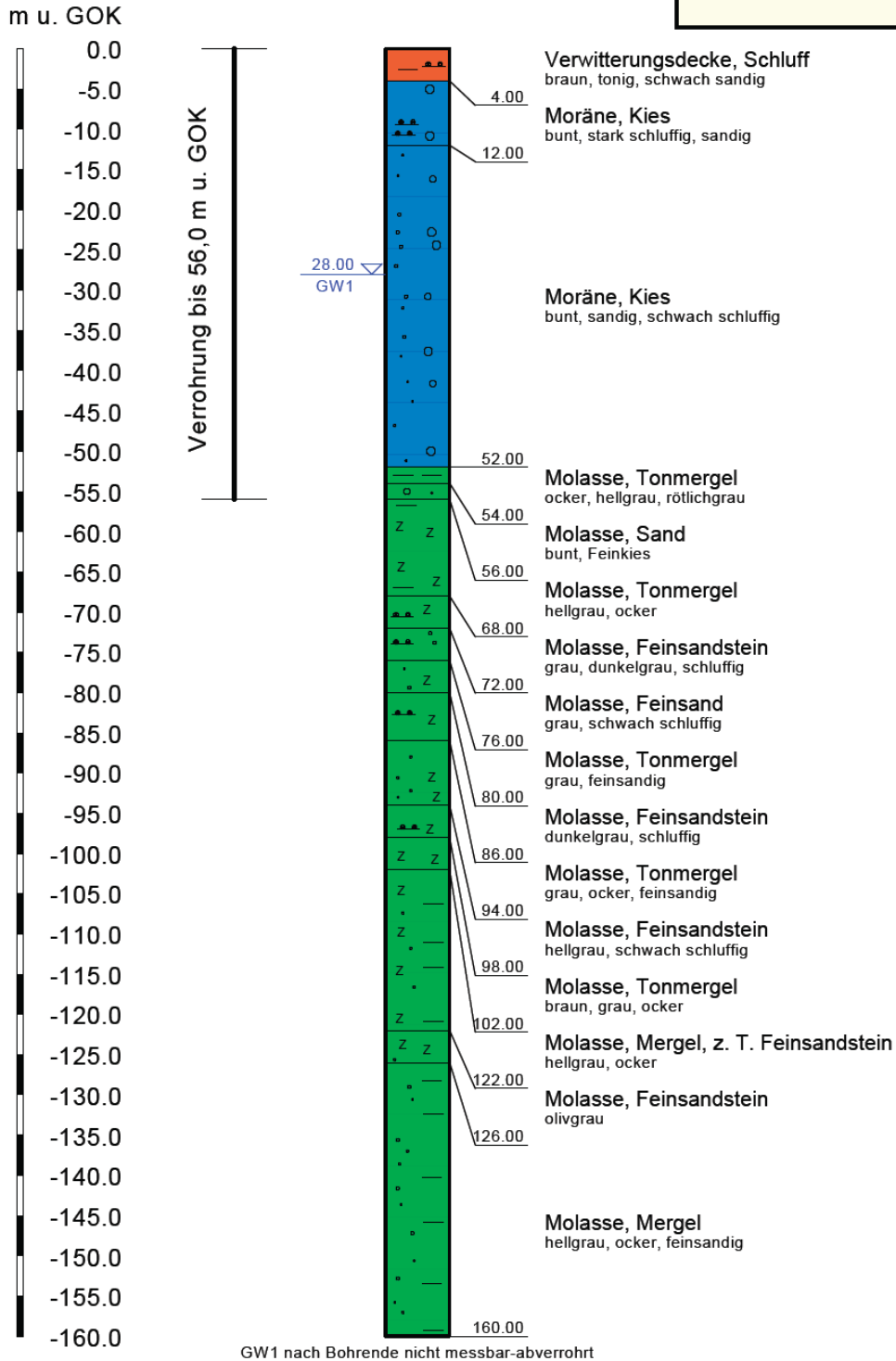


Abb. 12-6 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #23 Bad Wurzach

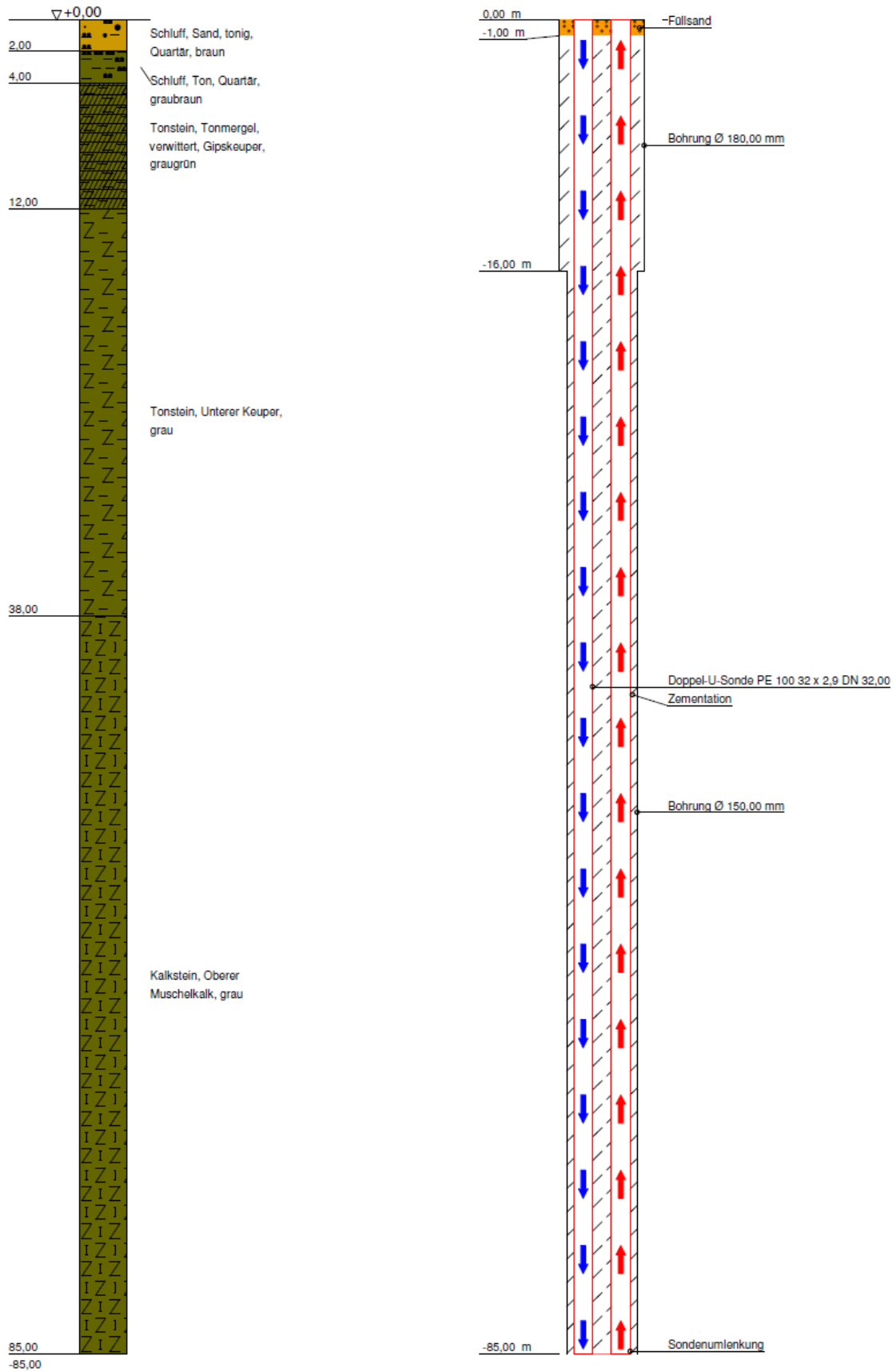


Abb. 12-7 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #26 Öhringen - Cappel

EWS 1-3

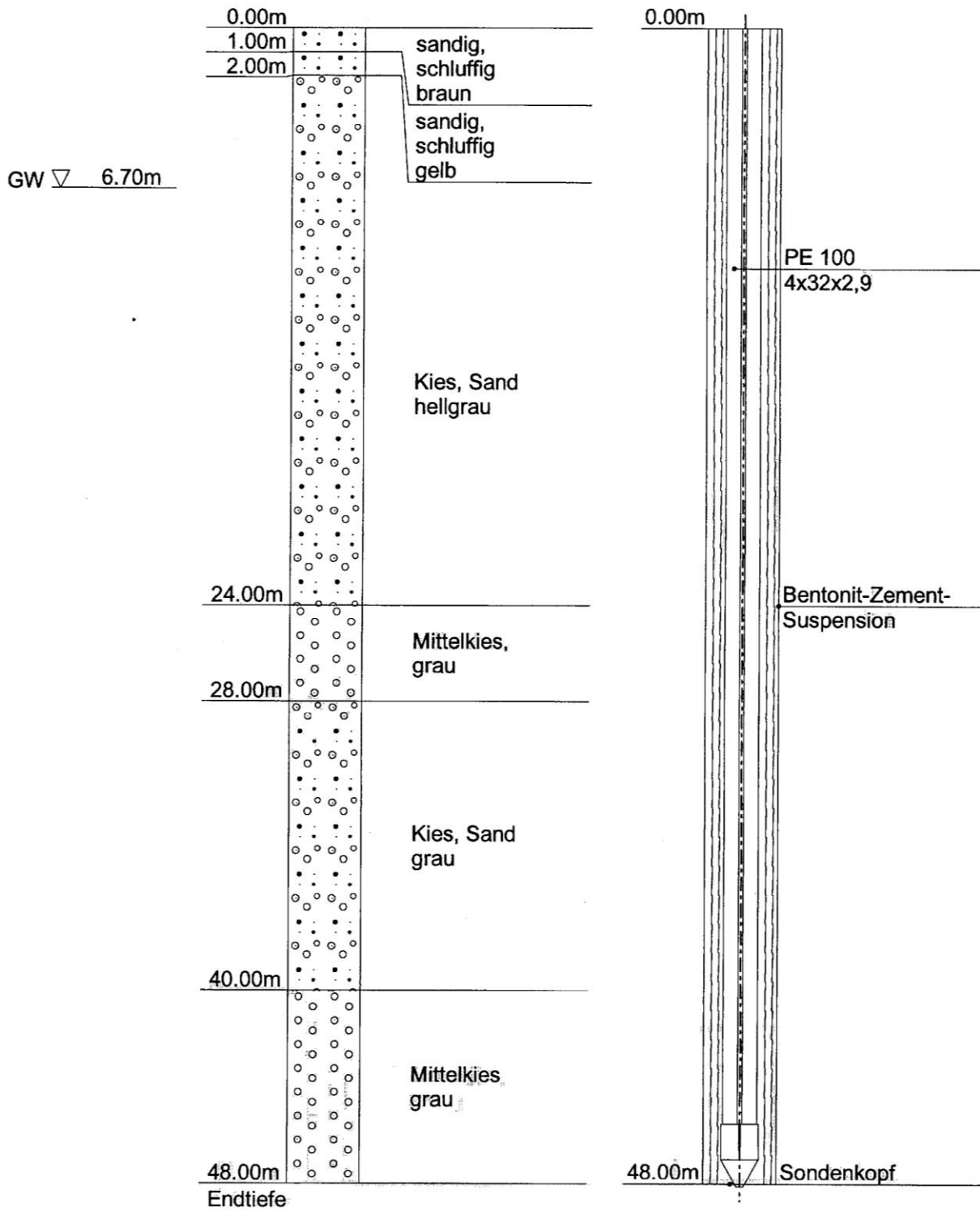


Abb. 12-8 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #31 Linkenheim

0 – 9 m	Ton, schluffig, sehr schwach steinig, ocker - hellbraun
9 – 12 m	Ton, schluffig, kiesig, Schneckenschalen, weiss
12 – 14 m	Ton, schluffig, steinig(Tonstein, grau, grünlichgrau, grauviolett) Schneckenschalen, weiss
-----Decklehm/Talablagerungen/km1-Verwitterungslehm	
14 – 30 m	Tonstein, grau, grünlichgrau, graubraun, z.T. etwas grauviolett (Nachfall?) mit Dolomit, ockergelb-ockerbraun
30 – 31 m	Tonstein, grau etwas grünlichgrau, mit Dolomit/dolomitischen Tonmergel, ocker
31 – 34 m	Ton, schluffig, ocker, mit Dolomit, ockerorange u. Tonstein, grau - grünlichgrau
-----Lettenkeuper (ku)	
34 – 39 m	Dolomit, ockerbeige – ockerorange, <<5% Tonstein, grau
39 – 48 m	dolomitischer Kalkstein/Dolomit, ockerbraun, ockergrau, z.T. ockergelb
-----Trigonodusdolomit (mod)	
48 – 50 m	Kalkstein, grau, mit dolomitischer Kalkstein/Dolomit, ocker
50 – 53 m	Kalkstein, grau – graubraun, mit Schalenrümern
53 – 60 m	Kalkstein, dunkelgrau - grau
60 – 62 m	Kalkstein, dunkelgrau, etwas Dolomit/dolomitischer Tonstein, ockerbraun, Reste Tonstein/Tonmergelstein, grünlichgrau und Dolomit ocker
62 – 72 m	Kalkstein, dunkelgrau, etwas Dolomit/dolomitischer Tonstein, ockerbraun
72 – 75 m	Kalkstein, dunkelgrau
75 – 98 m	Kalkstein, dunkelgrau, etwas Dolomit/dolomitischer Tonstein, ockerbraun
98 – 99 m	Kalkstein, grau – graubraun, mit Schalenrümern
----- Oberer Muschelkalk (mo2/mo1)	

Abb. 12-9 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #33 Fellbach (grafische geologische Schichtendarstellung wurde nicht übermittelt. Schichtenverzeichnis nur in schlechter Fax-Qualität verfügbar.

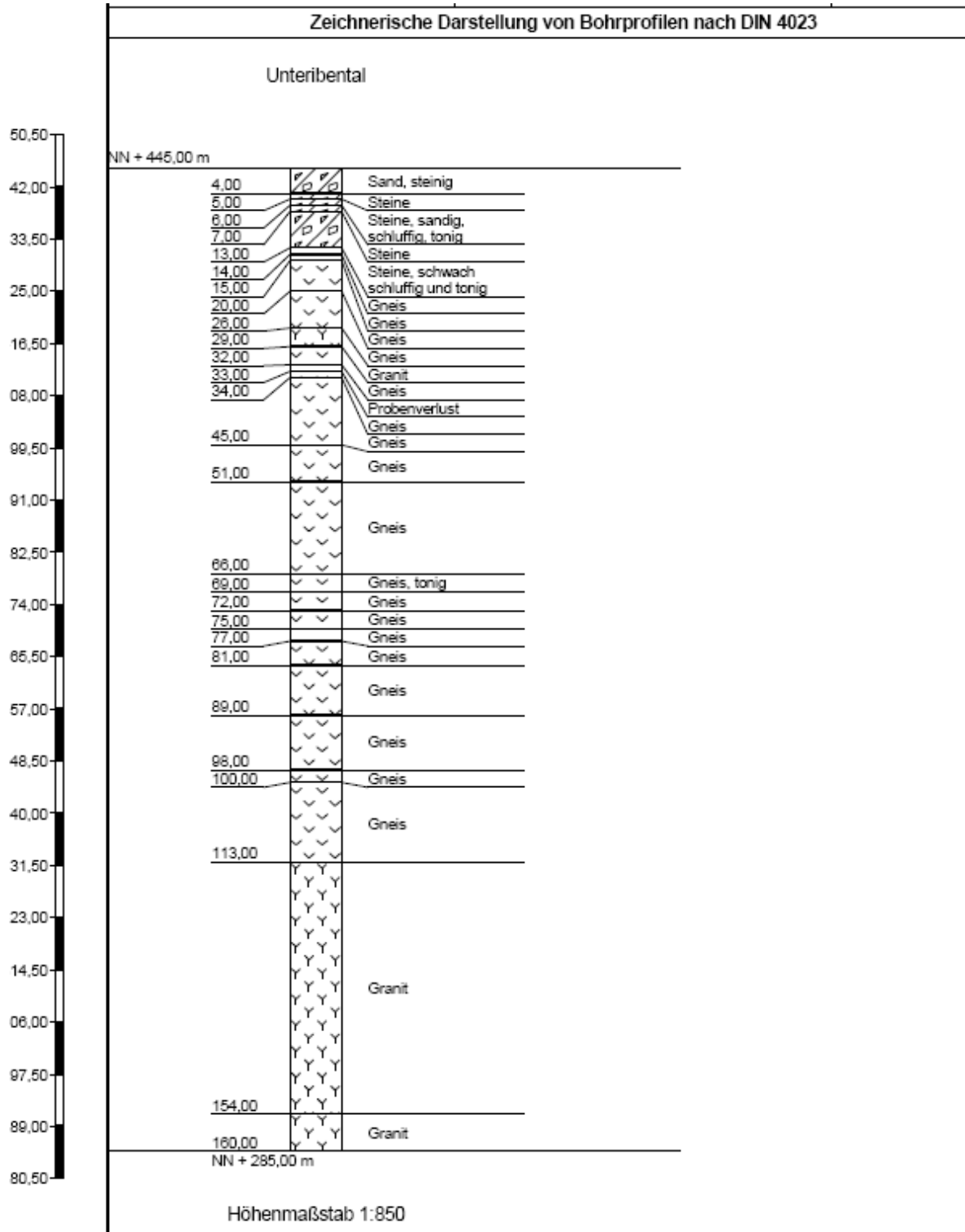


Abb. 12-10 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #34 Buchenbach - Unteribental

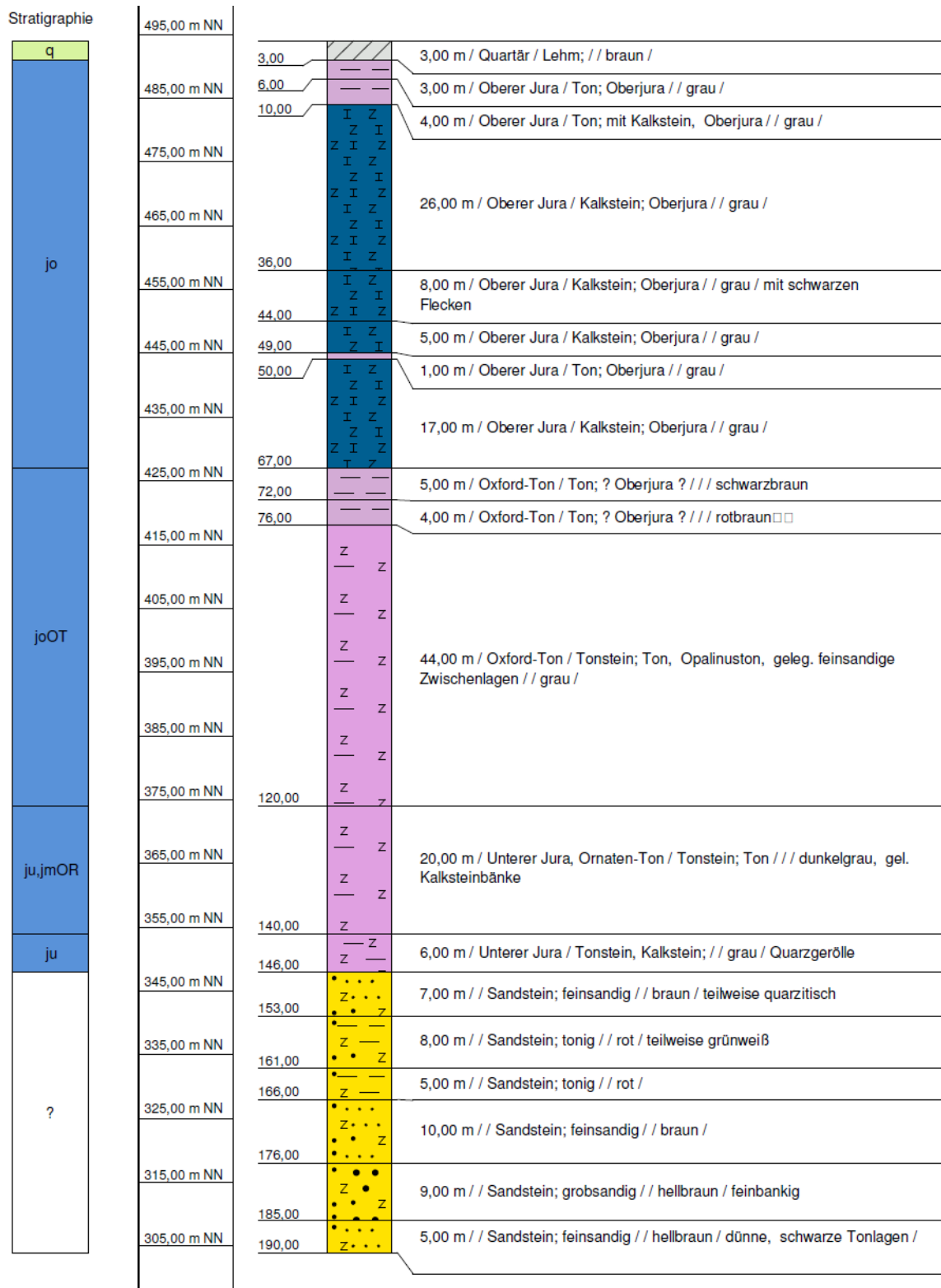


Abb. 12-11 Geologisches Tiefenprofil der Bohrung #35 Kirchheim am Ries

12.3 Ergebnisse der gammaskopimetrischen Auswertung

Tab. 12-1: Messergebnisse der Gammaskopimetrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #1

Pr.ID Nuklid	0-1	1-1	2-1	6-1	7-1	11-1	15-1	25-1	32-1	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	50,8 11,2	60,8 11,6	61,8 11,1	17,9 12,4	44,2 11,5	12,1 12,3	16,2 12,1	98 12,6	133 11
	Ra-224	46,6 17,2	56,6 16,9	61,1 17,1	14,7 22,1	42,7 17,9	12,4 23,2	16,9 21,9	105 18,1	136 15,4
	Pb-212	52,6 13,6	56,9 13,3	62,3 13,6	17 14,3	43,2 13,6	12,2 15,4	16,6 15	95,9 15,1	130 13,7
	Bi-212	52,8 16,9	59,6 17,1	62,8 15,3	20,9 23,5	47,5 17	11,4 28,7	16,7 24,2	92,2 19,5	123 13,4
	Tl-208	17,7 12,3	20,6 12,3	21,5 12,3	6,19 13,6	15,3 12,4	4,2 14,1	5,58 13,8	33,4 14,4	46,2 11,7
Actinium-Reihe	U-235	4,67 17,6	1,56 88,6	5,38* 22	1,46 24,5	3,96 17,8	1,3* 24,2	1,03* 27,8	4,81 20,4	9,09 16,9
	Pa-231	<5,13	<5,62	<5,86	<3,67	<4,87	<3,14	<3,44	<7,64	<5,57
	Th-227	<1,26	3,11 31,5	<1,48	<0,91	<1,25	<0,77	<0,87	<1,83	3,94 24,3
	Ra-223	<1,32	2,87 88,2	2,33 103,5	1,84 51,3	<1,4	<0,94	1,59 84,4	<1,93	<1,63
	Rn-219	<1,73	<1,95	<1,94	<1,15	<1,64	<0,96	<1,07	<2,52	<1,96
	Pb-211	<4,64	<5,24	<5,17	<3,28	<4,5	<2,77	<2,97	<6,92	<5,27
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<29,4	<32,2	<32,4	<22,3	<28	<20,5	<21,9	<58,1	66,3 52,7
	U-234	<143	<181	<219	<111	<188	<120	<110	<175	<185
	Th-230	<41,6	<45,3	<47,6	<30,8	<41,5	<26,4	<29,8	<51,1	<46,6
	Ra-226	<5	70,2 38,3	85,7* 22,1	<4,21	<4,37	20,7* 24,2	16,5* 27,9	<7,08	<8,91
	Pb-214	40,3 12,4	51,5 12,1	48,4 12,3	14,3 22,1	32,8 12,3	9,27 13,7	10,1 12,9	38,7 13,7	61,5 12
	Bi-214	40,3 11,2	50,3 11,2	49,6 11,2	14,7 12,1	33,3 11,4	9,17 12,8	9,24 13,1	36,7 13,6	59,6 11,1
	Pb-210	42,5 28,1	50,2 27,6	69,3 25	17,2 42,3	35,6 30,9	14 47,8	11,4 63	43,7 34,5	89,3 24,7
K-40	510 12,2	542 12,2	582 12,2	534 12,1	616 12,2	489 12,1	629 12,1	1850 18,2	1160 12,1	
	Cs-137		2,7 15,8	1,52 19,7	<0,18	<0,25	<0,15	<0,17	<0,41	<0,3

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-2: Messergebnisse der Gammaskopimetrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #4

Pr.ID Nuklid	0-4	4-4	5-4	8-4	10-4	14-4	17-4	21-4	25-4	27-4	29-4	32-4	33-4	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	39,5 11,7	33,9 11,7	39,4 11,7	23,6 11,8	28,3 14,3	18,3 12	12,2 15,2	16,9 13,8	16 14	9,57 13,7	15,2 12,3	19,9 12,2	27,9 12,1
	Ra-224	38,6 18	34,9 17,8	34,4 18,1	22,3 21	33,6 20,3	17,2 22,2	14,5 26	17,4 21,7	14,8 27,8	9,99 21,6	15,8 20,7	20,2 18,6	26,9 18,2
	Pb-212	39,9 13,5	34 13,5	36,4 13,5	23,5 14	28,8 15,9	19,3 14	14 16	17 13,9	17,3 15,9	9,37 14,7	16,6 14,9	19,9 14,7	27,4 14,6
	Bi-212	36,9 19,9	37,1 19	40,3 17	20,9 33,3	30,3 24,9	20,8 24,6	16,7 31,6	17,2 30,8	13,3 37,9	13 25,2	16,5 24,3	21,2 19,8	26,4 20,3
	Tl-208	14,3 12,6	11,8 12,7	13,5 12,5	8,5 13,2	10,5 15,8	6,3 13,7	4,96 17,6	6,52 13,9	5,68 17,3	3,57 14,6	5,35 13,9	6,73 13,2	10 12,9
Actinium-Reihe	U-235	2,02 113,2	4,59 17,3	2,52 32,9	1,41 103,9	1,84 94,2	2,99* 19,6	2,24* 22,7	0,77 90,6	2,68* 22,5	0,8 96,8	0,91 114,8	1,92* 20,4	<0,22
	Pa-231	<5,02	<4,47	<4,71	<4,73	<5,27	<4	<4,2	<4,1	<4,59	<2,45	<2,91	<2,89	<3,44
	Th-227	<1,26	<1,16	<1,17	<1,17	<1,3	<1,01	<1	<1,02	<1,11	<0,59	<0,72	<0,71	<0,85
	Ra-223	<1,25	<1,16	<1,21	2,34	3,77 45,6	1,5 97,1	2,11 79,6	1,84 58,9	<1,06	<0,71	1,43 76,2	<0,85	1,66 81,6
	Rn-219	<1,66	<1,5	<1,56	70,6	<1,7	<1,28	<1,3	<1,28	<1,41	<0,75	<0,95	<0,95	<1,09
	Pb-211	<4,59	<4,11	<4,2	<4,17	4,9	<3,71	<3,99	<3,83	<4,41	<2,28	<2,82	<2,75	<3,26
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<28,8	<27,8	38,5 81,6	<29,6	<40	<24,9	<32,4	<25,4	<34,5	<17,4	<17,9	<21,3	<24,9
	U-234	<201	<154	<130	<184	<125	<126	<86,5	<140	<95,2	<72,6	<84,6	<106	<116
	Th-230	<42,3	<37,6	<36,8	<40,6	<34,8	<30,3	<25	<30	<26,9	<16,7	<19,7	<21,9	<26
	Ra-226	44,1 87,3	<4,82	34,1 50,4	66,1 41,2	28,2 105,4	47,6* 19,6	35,7* 22,7	31 44,3	42,8* 22,6	15,8 83,5	20,5 86,2	30,6* 20,5	50,9 18,4
	Pb-214	42 12,1	29,6 12,2	29,2 12,2	49,8 12,1	25,1 14,1	23,7 12,3	18 13,7	20,7 12,4	20,8 13,7	13,2 12,4	17,2 12,4	18,2 12,3	25 12,3
	Bi-214	42,1 11,7	29,7 11,5	28,1 11,6	50,2 11,1	23,1 14	24,2 11,7	16 14,3	20,1 12	18,9 14,1	13 12,1	17,2 12	18,1 11,7	24,5 11,5
	Pb-210	59,7 25,3	32,1 30	30,2 31,1	49,6 27,5	22 40,2	25,8 29,2	11,8 46,1	16,8 42,2	22,7 34,4	10,5 39,8	22,9 28	16,1 35,4	25,7 30,4
K-40	539 12,2	628 12,4	673 12,1	834 12,1	788 18,3	397 12,3	256 18,7	346 12,4	305 18,6	186 12,5	313 12,3	421 12,2	606 12,1	

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-3: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #8

Pr.ID	0-8	8-8	17-8	25-8	33-8	45-8	47-8	49-8	54-8	56-8	57-8	63-8	69-8	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	23,8 15,1	36,2 13,4	32,4 13,6	36,5 11,6	30 13,6	22,7 12,2	15,3 12,7	33,9 11,2	36,7 12,2	27,3 11,6	15,2 15,2	22,8 13,6	28,4 14,4
	Ra-224	26,5 22,7	38,8 19,9	32,6 20,9	33,9 18,6	31,3 20,2	28,1 18,8	13 26,1	33,9 19,1	36,1 18,8	28,4 18,3	14 25,9	26,3 22	27,2 22,2
	Pb-212	27,5 15,4	37,3 15,4	32,4 15,2	35,4 13,7	29 15,5	22,8 14	14,3 15,1	34,2 13,8	36,6 13,9	26,3 14,9	15,4 16,2	22,4 16,1	28,4 15,6
	Bi-212	24,2 29,2	36,6 24,9	30,7 24,2	39 17,9	29 25,6	20,2 23,9	16,1 25,5	33,4 18,1	33,7 19,4	27,7 20	14,1 34,9	20,3 33,6	29,6 28,8
	Tl-208	8,67 16,2	12,8 15,5	12,4 15,3	12,4 12,6	11 15,4	8,08 13,1	4,99 14	11,7 12,8	13,1 12,7	10,1 13,1	4,79 17,5	8,52 15,9	9,93 16,3

Actinium-Reihe	U-235	2,74* 22,5	4,33* 20,8	4,3* 20,8	1,53 44,1	3,15* 21,6	1,83 65,8	<0,26	2,54 60,5	1,92 81,7	<0,23	2,31 22,1	1,48 118,8	<0,35
	Pa-231	<5,71	<5,59	<5,13	<4,42	<4,92	<4,03	<3,49	<5	<4,83	<3,61	<4,16	<5,2	<5,61
	Th-227	<1,33	<1,34	<1,27	<1,1	<1,18	<1	<0,89	<1,24	2,56 33,3	<0,89	<1,02	<1,26	<1,31
	Ra-223	2,37 83,3	<1,48	2,03 103,4	<1,11	<1,39	<1	2,09 71	<1,25	3,94 52,2	2,33 58,4	<1,03	3,77 51,9	3,02 70,4
	Rn-219	<1,78	<1,79	<1,68	<1,45	<1,58	<1,31	<1,11	<1,6	<1,62	<1,16	<1,34	<1,66	<1,81
	Pb-211	<5,76	<5,19	<4,77	<4	<4,39	<3,72	<3,18	<4,48	<4,58	<3,45	<3,94	<4,74	<5,22

Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<38,6	<38,9	<36,7	<26,9	<31,8	<24,5	<21,5	58,9 51,8	47,9 79,7	<27,5	<30,6	<37	<41,7
	U-234	<153	<175	<116	<187	<110	<170	<126	<183	<148	<118	<123	<148	<108
	Th-230	<31,6	<36,5	<34,1	<41,7	<32,9	<38	57 87,5	77,9 97,9	<46,1	<25,5	<26,2	<31,7	<31,9
	Ra-226	43,6* 22,6	69* 20,9	68,5* 20,9	32,4 50,8	50,2* 21,7	39,2 55,6	50,6 19	81,6 38,7	67,2 43,6	51,2 18,5	<3,88	60,6 52,6	63,4 21,4
	Pb-214	27,6 13,6	35 13,6	32,6 13,4	26 12,3	23,6 13,6	31,9 12,4	25,2 12,3	59,8 12,2	48 12,3	25 12,3	21,9 14	37,6 13,5	25,5 13,7
	Bi-214	28,5 13,6	33,7 13,3	31 13,4	25,3 11,6	23,1 13,6	33,1 11,3	16,1 25,5	59,6 11	46,9 11,2	23,9 11,7	19,7 13,9	35,1 13,2	25,3 13,9
	Pb-210	62,8 25,1	38 29,9	34,8 30,1	29 30,7	25,5 34,5	35 28,8	30,7 29	72,2 23,5	56,2 26	24 31,7	27,6 30,7	50,9 25,8	30,6 30,8

K-40	331 18,6	621 18,4	507 18,4	642 12,1	381 18,4	378 12,3	239 12,4	495 12,2	601 12,2	508 12,2	256 18,7	303 18,6	405 18,6
------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$
 * = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-4: Messergebnisse der Gammaskopimetrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #21 Teil 1

Pr.ID		0-21	2-21	5-21	7-21	9-21	15-21	19-21	23-21	27-21
Nuklid		[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %
Thorium-Reihe	Ac-228	58,6 12,4	56,7 12,6	51,4 11	20,1 14,3	66,5 11,4	56,4 11,3	58,8 13,4	83,9 10,8	66,9 11,5
	Ra-224	63 19	67,5 18,3	52,3 16,4	23,8 26,8	64,2 16,3	61,7 16,6	65 18,9	87,3 15,8	64,5 16
	Pb-212	61,7 14,8	55,7 14,5	49,9 13,9	20,5 16	62,9 13,5	52 13,9	60,1 15,4	80,7 13,5	61,4 13,7
	Bi-212	56,6 21	55,9 22,5	52,9 15,5	19,6 37,6	66,6 16,5	51,6 18,4	63,2 19,2	81,8 14,9	69 15,3
	Tl-208	20,9 14,6	19,9 13,4	17,8 12,4	6,8 16,6	21,6 12,5	21,2 12,7	20,4 14,8	30,2 11,9	23,2 12,3
Actinium-Reihe	U-235	5,27 20,1	4,77* 20,6	1,57 86,2	2,26 96,9	2,8 65,6	1,29 67,9	<0,4	1,94 64,2	1,94 74,1
	Pa-231	<6,15	<7,88	<4,09	<6,79	<5,13	<4,79	<6,33	<5,1	<4,87
	Th-227	<1,57	<1,83	<1,02	<1,53	<1,31	<1,19	<1,55	<1,26	<1,19
	Ra-223	<1,57	3,9 76,9	<1,12	4,3 52,7	<1,56	1,55 105	3,86 67,8	<1,46	<1,38
	Rn-219	<2,16	<2,79	<1,37	<2,13	<1,8	<1,73	<2,17	<1,64	<1,65
	Pb-211	<6,05	<8,01	<3,88	<6,56	<5,41	<5,12	<6,01	<4,83	<4,74
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<41,8	<63,9	<29,2	<53,1	<43,5	<39,9	<47,5	31 106	<34,7
	U-234	<147	<133	<124	<148	<111	<120	<180	<169	<167
	Th-230	<42,7	<41,1	<29,1	<34,9	<34,7	<30,1	<40,6	<36,5	116 56,3
	Ra-226	<6,77	76,1* 20,7	43 56,1	54,9 69	38,7 81,4	46 38,8	78,2 21	58,6 41,2	72,7 38,1
	Pb-214	42,7 13,4	32,8 13,2	30,5 12,2	45,4 12,4	38,4 12,2	31 12,3	31,9 13,9	40 12,1	46,4 12,1
	Bi-214	41,9 13	30,7 12,8	29,4 11,6	41,7 12	40,9 11,6	32,4 12	30 13,7	39,7 11,4	46,8 11,3
	Pb-210	51,7 27,6	36,6 29,8	31,7 29,4	49,2 26	40,6 26	36,8 27	34,9 32,3	39,8 29,3	67,7 24,7
K-40	515 18,4	674 12,5	632 12,1	271 13,3	881 12,2	541 12,3	563 18,4	925 12,1	872 12,1	

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-5: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #21 Teil 2

Pr.ID Nuklid	32-21	37-21	45-21	49-21	B	C	D	E	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	29 11,5	38,5 11,4	45 14,1	64,3 12,7	31,9 11,6	60,9 11,1	59,4 12,7	65 11,6
	Ra-224	25,1 18,2	34,6 18,8	49,4 19,8	66,6 18,8	31,8 19,9	62,5 16,6	66 17,1	70,1 16,5
	Pb-212	27,7 14,4	36,1 13,7	46,1 15,1	65,2 14,8	31 14,6	60,7 13,4	60 13,4	62,9 14
	Bi-212	31,6 20,5	38,9 20,5	45,8 23,6	58,9 20,1	35,6 21,7	61,5 16	60 17,2	57,9 16,8
	Tl-208	10,2 13	12,5 13,1	16,5 15,5	20,3 15,1	10,3 13,3	21 12,3	21,7 12,3	22,8 12,4

Actinium-Reihe	U-235	2,64* 19,4	1,6 47,7	2,93* 23,3	5,68* 20,6	2,26* 22,7	<0,39	<0,4	1,89 103,8
	Pa-231	<3,41	<5,52	<6,31	<6,66	<4,95	<5,68	<5,71	<5,6
	Th-227	<0,85	<1,34	<1,52	<1,4	<1,19	<1,44	<1,5	<1,38
	Ra-223	1,43 95,8	<1,37	3,14 84,9	<1,79	<1,23	4,22 55,4	4,67 53,4	3,95 67,3
	Rn-219	<1,15	<1,81	<2,23	<2,3	<1,62	<1,98	<1,97	<1,87
	Pb-211	<3,33	<5,15	<5,77	<6,59	<4,55	<5,15	<5,38	<5,6

Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<25,8	<37,8	<47,4	<46,1	<36	<31,6	<32,9	<38,5
	U-234	<117	<125	<126	<144	<127	<197	<182	<179
	Th-230	<24,9	<37,9	<37,3	<36,5	<36,8	<45,2	<45,7	<42,1
	Ra-226	42,1* 19,4	23,6 64,2	46,7* 23,4	90,5* 20,6	36* 22,7	101 17,9	104 17,9	86,7 41,7
	Pb-214	18,8 12,4	23,4 12,5	24,6 13,8	44,7 13,3	18,8 13,3	48 12,2	47,6 12,2	52,1 12,1
	Bi-214	18,3 12,1	23,5 12,4	23,3 14,5	42,4 13,3	18,5 12,7	48,8 11,2	49,5 11,2	50,1 11,3
	Pb-210	24,5 31	32,4 30,9	23,8 40	21,9 49,5	25,6 35,4	58,8 26,3	59,5 26,7	74,9 25,3

K-40	392 12,3	850 12,2	659 18,4	560 18,4	945 12,1	589 12,2	582 12,2	554 12,2
------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-6: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #23

Pr.ID Nuklid	0-23	1-23	3-23	10-23	22-23	33-23	47-23	61-23	79-23	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	34,8 6,9	46 11,6	16,8 13,7	13,3 11,9	8,3 16	34,9 12	47,2 11,2	26,1 11,7	23,3 13,6
	Ra-224	33,6 11,8	41,5 18,3	20 22	13,1 19,2	7,69 29,2	33,4 18,7	43,4 17,4	27 19,4	26,3 22
	Pb-212	36,8 8	43 13,9	18,4 16,1	13,6 14,5	8,98 16,1	31,3 14,2	45,6 13,7	27,4 15,1	25,2 15,7
	Bi-212	30,2 24,9	48,2 16,9	17,7 29,5	14,4 22,7	7,33 38,8	33,6 20	46 17,3	25,5 23	25,1 25,4
	Tl-208	13,4 8,1	15,3 12,7	6,5 17	4,84 13,5	3,34 17,2	12,2 13	16,1 12,7	9,77 13,1	8,65 16,3
Actinium-Reihe	U-235	4,4* 11,4	2,23 76,4	1,92 23,8	1,55 19,7	1,17* 25,7	1,14 97,4	4,93* 18	2,68 47,6	2,13 92,1
	Pa-231	<7,51	<5,2	<4,37	<2,41	<2,87	<5,3	<5,46	<3,87	<5,03
	Th-227	<1,74	<1,24	<1	<0,58	<0,71	<1,3	<1,35	3 22,8	<1,23
	Ra-223	3,47 39,6	<1,38	<1,08	1 87,6	<0,79	<1,41	<1,42	5,54 31,8	3,21 62,2
	Rn-219	<2,25	<1,75	<1,39	<0,74	<0,89	<1,69	<1,85	<1,28	<1,66
	Pb-211	<7,67	<4,82	<4,06	<2,21	<2,55	<4,76	<4,92	<3,81	<4,7
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	40,6 50,3	<34,2	<31,3	<16,4	<16,6	40,4 104,9	<35,1	56,1 64,6	<37,9
	U-234	<170	<162	<102	<91,5	<70	<208	<167	<133	<151
	Th-230	<36,8	<42,8	<29,3	<18,7	<19,8	<38,4	<42,1	<74,6 68,6	<32,5
	Ra-226	70,2* 11,4	40,8 72,5	<3,99	<2,39	18,7* 25,8	53,3 40	78,5* 18,1	70,5 36,6	35,8 93,9
	Pb-214	35,1 7,1	33,8 12,6	15,4 14,4	14,9 12,3	9,8 13,9	34,9 12,5	36 12,4	44,6 12,2	30,8 13,8
	Bi-214	32,2 7,1	33,9 11,6	14,2 14,5	14,7 11,7	9,44 14,4	35,3 11,6	36,6 11,6	43,1 11,2	27,8 13,5
	Pb-210	73,5 12,6	48,1 26,5	28,6 31	17,2 33	<2,67	43,8 27,4	48,4 27,2	55,5 24,7	42,7 27,4
Be-7	6,18 32,6	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
K-40	364 9,5	569 12,2	403 18,5	241 12,3	81,5 19,2	540 12,3	832 12,1	480 12,2	392 18,5	
Cs-137	76,1 8	0,58 35,7	<0,23	<0,13	<0,15	<0,26	<0,26	<0,2	<0,28	

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-7: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #26

Pr.ID		0-26	3-26	5-26	10-26	15-26	31-26	36-26
Nuklid		[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %
Thorium-Reihe	Ac-228	42,5 13,9	23,9 15	34,5 13,5	31,2 14,4	33,7 13,6	10,9 13,9	14,3 12,8
	Ra-224	49,2 20,7	19,2 24,2	33,7 20,9	30,8 22,1	32,4 20,7	9,16 31	14,8 21,2
	Pb-212	46,9 16	27 15,7	35,2 15,5	31,2 15,9	33,8 15,4	10,6 14,5	14,7 14,3
	Bi-212	58,9 21,1	26,4 27,2	41,8 25,7	39,4 22,6	38,3 24,4	10,4 33,4	16,3 24,6
	Tl-208	16,7 15,2	9,21 16,1	12,2 15,6	10,9 16,1	11,4 16,4	3,73 14,9	4,95 13,7
Actinium-Reihe	U-235	2,37 50,3	1,84 97	2,17 41,4	4,35* 20,6	4,1* 21,2	2,09 20,3	1,88 25,6
	Pa-231	8,12 55,5	<5,36	<5,74	<5,56	<5,38	<3,29	<3,39
	Th-227	<1,52	<1,31	<1,41	<1,36	<1,36	<0,83	<0,84
	Ra-223	5,29 42,5	4,68 47,4	<1,61	2,87 80,4	<1,54	1,43 88,1	<0,82
	Rn-219	<2,12	<1,74	<1,78	<1,79	<1,7	<0,99	<1,04
	Pb-211	<5,84	<4,99	<5,21	<5,19	<4,98	<2,9	<2,96
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<45,8	<28,2	<45,8	<44,4	<42,7	<18,9	<20,7
	U-234	<161	<161	<185	<135	<188	<132	<113
	Th-230	<38,3	<33,9	<37,3	<36,9	<37,6	<27,2	<27,7
	Ra-226	34,9 66,5	43,4 72,2	17 103,8	69,3* 20,6	65,3* 21,2	<3,56	<5,48
	Pb-214	40,7 13,8	35,6 13,7	28,3 13,8	34,9 13,8	32,2 13,7	17,7 12,7	15,3 12,9
	Bi-214	39,4 13,1	34 13,3	27,7 13,7	33,1 13,5	29,5 13,5	17,9 11,6	17 11,7
	Pb-210	63,2 26,1	43,9 27,4	27,2 37,3	30,2 35,1	30 35,1	17,1 38,8	10,2 57,3
K-40	530 18,5	574 18,4	1140 18,3	983 18,3	1020 18,3	393 12,2	516 12,1	

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-8: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #31

Pr.ID Nuklid	0-31	2-31	5-31	10-31	12-31	13-31	16-31	18-31	21-31	23-31	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	24,3 12,1	11,1 16,9	19,1 14	19,8 13,1	22,6 12,8	16,2 12,7	17,7 16,6	17 12,3	12,8 17,3	16,7 12,5
	Ra-224	20,7 20,5	12 24,8	22,7 19,9	21 20,8	23,1 19,7	15,5 24	18,9 25,9	14,4 22,7	13,3 26,7	15 29
	Pb-212	23,3 14,1	10,9 16,9	19,3 14,8	19,8 15,5	22,2 14,6	18 14,2	19,4 15,8	18,7 14,5	14,5 16,1	16,2 16,2
	Bi-212	19,9 22,4	12,2 34,9	15 34,4	18 30,5	21,2 29,8	14,9 32,6	18,2 38,9	22,8 24,2	14,9 34,2	20,9 26,2
	Tl-208	8,33 13,1	4,51 17,3	6,82 14,6	6,9 14,2	7,78 14,2	5,85 14,7	6,65 17,1	5,94 14,1	5,31 17,5	5,77 15,2

Actinium-Reihe	U-235	1,25 106,1	1,14* 29,4	1,43 51,8	1,64 36,6	3,16 18,5	2,52* 20,9	2,9* 22,4	1,24 67,3	2,23* 23,9	2,65* 20,8
	Pa-231	<3,97	<3,74	<4,32	<3,63	<4,16	<4,3	<4,9	<3,37	<4,49	<4,17
	Th-227	<1,02	<0,86	<1,03	<0,89	<0,96	<1	<1,23	<0,82	<1,04	<0,99
	Ra-223	<0,98	1,92 80,5	1,7 67,1	<0,92	<1,03	<1,04	1,99 112,7	<0,87	<1,09	<1,12
	Rn-219	<1,3	<1,13	<1,39	<1,23	<1,37	<1,36	<1,63	<1,16	<1,4	<1,31
	Pb-211	<3,74	<3,26	<4,39	<3,81	<4,09	<3,98	<5,16	<3,51	<4,21	<4,01

Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<23,7	<27,8	<36,7	<31,5	<34	<30	<40,3	<29,2	<32,6	<27,5
	U-234	<125	<88,9	<107	<107	<115	<104	<104	<103	<90,8	173 102,2
	Th-230	49 104,3	<24,9	<26,1	<23,7	<27,2	<30,6	<29,7	<22,3	<26,9	<29
	Ra-226	21,6 103,5	18,2* 29,4	28,6 51,3	21,2 56,9	<3,85	40,2* 21	46,1* 22,5	24,8 61,3	35,6* 24	42,2* 20,8
	Pb-214	22,2 12,7	10,8 14	23,6 12,4	21,2 12,5	25,3 12,4	19,7 12,5	23,5 13,7	20,2 12,4	19,1 13,7	20,6 12,6
	Bi-214	22,6 11,6	10,5 14,8	24 12,1	20,6 12,3	25 12	20,1 12,2	20,4 14,4	20,9 12,2	18,3 14,1	20,1 12,2
	Pb-210	25,7 33,6	16,6 41,3	31,5 26,3	25,4 29,2	27,6 29,1	26,4 31,1	23,2 34,4	25,5 28,7	22 33,2	23,5 30,3

K-40	563 12,1	414 18,4	342 12,6	352 12,5	449 12,4	453 12,3	367 18,6	375 12,4	282 18,7	390 12,4
------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-9: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #33

Pr.ID Nuklid	0-33	4-33	5-33	12-33	16-33	18-33	21-33	26-33	31-33	33-33	38-33	46-33	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	37,7 13,7	45,1 11,7	47,1 13,4	10,4 13	38,6 13,4	28,3 13	26,5 13,7	6,65 19,6	1,63 13,1	10,1 14,1	10,1 17,2	6,2 16,1
	Ra-224	42,3 20,7	46,8 37,1	51,5 19,3	9,62 27,6	36,5 20,9	29,4 19,7	20,1 24	<3,48	15,5 22,5	10,2 25	10,6 30,3	6,88 36
	Pb-212	41,3 15,2	41,9 19,5	51 14,9	10,2 14,8	39,6 15,1	27,4 14,1	26,9 14,2	7,07 19,5	16,1 14,2	11 14,5	11,1 17,8	68,6 18
	Bi-212	37,9 24,2	44,8 16,2	50 22,5	9,57 37,5	41,8 21,9	33,2 24	35,5 24,9	7,98 43,9	14,8 27,9	12,9 27,3	11 39	91,2 28,9
	Tl-208	13,5 15,2	16,6 12,4	17,9 14,8	3,69 14,8	13,1 15,7	9,47 13,9	8,89 14,2	2,63 19,9	5,92 13,5	3,38 14,9	3,8 18,3	2,26 16,3

Actinium-Reihe	U-235	4,25 20,4	<0,32	<0,41	2,01* 21,5	1,75 106,4	<0,32	<0,36	2,6* 21,7	0,86 79,8	1,13 101,3	1,75* 23,2	0,92 30,3
	Pa-231	<5,52	<0,49	<6,09	<3,29	<6,34	<5,72	<5,84	<3,38	<3,82	<3,18	<3,64	<2,88
	Th-227	<1,38	<1,25	<1,48	<0,82	<1,58	<1,31	<1,41	<0,87	<0,96	<0,8	<0,9	0,82 61,3
	Ra-223	2,13 100	3,46 60,5	5,01 41,6	2,03 65,3	<1,67	3,21 68,4	3 72	1,37 90,2	1,7 60,3	1,61 69,3	1,41 105,5	<0,73
	Rn-219	<1,84	<1,62	<1,98	<1,02	<2,02	<1,76	<1,83	<1,05	<1,19	<0,98	<1,1	<0,9
	Pb-211	<5,09	<4,44	<5,67	<3,05	<6,07	<5,29	<5,44	<3,2	<3,4	<2,91	<3,43	<2,56

Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<39,1	<28,5	<41,3	<20,4	<51,6	45,9 79,1	<44,5	17,7 114,8	<23,1	29 79,8	<26,4	20,9 74,3
	U-234	<158	<183	<142	<97,6	<142	<126	<162	<85,5	<135	<137	<89,4	<89,8
	Th-230	<36	<40,1	<41,3	<27	<40,7	<37,6	<38,8	<24	<31,4	<26,9	<24,2	<24,9
	Ra-226	<5,74	73 18,4	77,8 21,1	32* 21,6	31,8 100,7	65,6 19	61,2 20	41,4* 21,7	35,3 39,4	25,9 75,8	27,9* 23,3	25 35,5
	Pb-214	3,66 13,4	40,6 13,5	41,2 13,4	15,7 12,8	29,6 13,6	29,7 12,3	28,4 12,8	21,3 14,2	25,3 12,2	19,6 12,2	17,2 14,3	20,5 12,5
	Bi-214	3,59 13,3	39,5 11,3	37,7 13,3	15,3 12	27,8 13,9	31,1 11,9	27,7 12,3	20,8 13,4	24,1 11,5	19,9 11,6	15,7 14	20 11,5
	Pb-210	37,7 30,1	46,8 27,1	40,4 30,3	17,3 38,3	31,5 36,1	32 31,1	40,6 29,8	17 38,6	24 34,5	17,6 41	16,9 39,8	17,6 41

K-40	470 18,4	479 12,2	554 18,4	470 12,2	1410 18,3	1020 12,1	1140 12,1	214 18,6	656 12,1	387 12,2	378 18,4	22,4 12,3
------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-10: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #34

Pr.ID Nuklid	0-34	4-34	6-34	15-34	25-34	29-34	33-34	38-34	41-34	47-34	55-34	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	41,6 11,2	39,5 13,8	36,9 12,3	50 12,7	51,6 11	48,4 11,4	34,6 13,7	42,6 12,1	37,9 13,8	47 13,3	38,3 13,5
	Ra-224	40,3 17,5	43,5 19,6	37,8 16,5	55,3 19,1	51,9 16,5	48,2 16,7	37,2 19,8	43,1 16,5	39,8 19,7	49,8 19,1	39,7 20,3
	Pb-212	40,8 13,4	43,4 14,9	35,5 14	51,2 15,2	49,5 13,4	46,1 13,3	35,8 15,4	42 13,9	40 15,2	47,6 15,1	39,7 15,1
	Bi-212	41,1 18,2	42 23,7	38,5 16,4	40,6 20,3	48,1 17,5	46,7 16,9	35,3 23,8	43,4 15,6	39,2 22,7	43,7 19,4	35,2 22,6
	Tl-208	14,7 12,4	14,6 14,9	13,1 12,5	18,2 14,7	18 12,2	16,8 12,3	12,9 15,1	15,6 12,2	14,2 15,1	16,9 14,7	13,5 15
Actinium-Reihe	U-235	1,05 84	<0,37	<0,25	5,95* 20,1	<0,31	4,87* 18,1	4* 21	3,92* 18,2	4* 20,9	2,34 90,1	3,26* 22,7
	Pa-231	<4,75	<5,45	<3,84	<6,11	<4,73	<4,98	<5,18	<3,76	<5,21	<5,73	<5,18
	Th-227	<1,21	<1,36	<0,97	2,6 40,7	<1,24	<1,2	<1,28	<0,97	<1,33	<1,44	<1,29
	Ra-223	2,92 52,5	4,57 54,5	2,49 64,3	3,68 78,2	3,31 46,7	<1,22	2,96 91,5	1,67 102,3	3,46 68,3	<1,56	<1,51
	Rn-219	<1,59	<1,77	<1,23	<1,97	<1,58	<1,61	<1,63	<1,2	<1,66	<1,81	<1,62
	Pb-211	<4,48	<5,13	<3,55	<5,43	<4,18	<4,41	<4,59	<3,6	<4,75	<5,07	<4,59
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	46,5 71,3	43,7 79,7	<29,7	<39,1	<25	<27,6	<31,3	<25,8	44,9 83,3	<36,7	<32,3
	U-234	<192	<195	<141	<166	<227	<199	<197	<160	<324	<218	<141
	Th-230	<40,1	91,3 82,5	<31,4	<46,4	<46,5	<46,3	<39,2	<32,1	<40,3	<43,3	<38,5
	Ra-226	56,6 32,9	87,3 20,1	68,3 17,7	94,9* 20,1	77,1 17,9	77,7* 18,2	63,7* 21,1	62,5* 18,3	63,7* 20,9	37,2 97,2	51,9* 22,8
	Pb-214	38,3 12,1	39,1 13,3	34,6 12,1	49,1 13,5	45,8 12,2	42,6 12,1	33,8 13,6	33,4 12,1	31,8 13,6	40,4 13,5	32,4 13,4
	Bi-214	38,2 11,2	36,9 13,1	33,4 11,2	46,2 12,8	47,5 11	42,9 11,1	30,6 13,2	31,6 11,3	30,7 13,2	38,7 13	30,2 13,2
	Pb-210	52,1 26	41,4 30,1	30,1 32,7	48,2 31,2	46,5 29	40,1 32,9	31,2 36,5	41,8 28,1	28,9 38,1	43,4 31,6	36,4 30,7
K-40	651 12,1	661 18,3	710 12,1	897 18,3	648 12,1	981 12,1	566 18,3	783 12,1	698 18,3	774 18,3	578 18,3	

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-11: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #35 Teil 1

Pr.ID Nuklid	1-35	7-35	16-35	21-35	27-35	34-35	37-35	42-35	50-35	
	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	[Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	16,7 12,5	5,9 16,8	1,7 30,4	14,2 13,1	5,01 14,5	52,4 12,9	45,6 12,4	45,3 11,5	48,4 13,8
	Ra-224	15 29	7,79 35	2,79 73,3	14,1 20,5	4,81 34,4	59,9 19,3	52,2 19,7	43,1 17,4	53,1 19,3
	Pb-212	42,9 15,3	6,96 17,1	1,82 37,3	15,1 15	4,96 22,6	52 15,6	49,4 15	43,1 13,4	52,4 14,9
	Bi-212	46,6 22,8	6,23 44,1	7,52 15	15 22,8	5,2 43	57,2 22,6	48,7 23,5	42,4 17,9	48,9 20,9
	Tl-208	15,5 16,6	2,23 19,6	0,542 36,7	4,68 14	1,87 16,2	20,2 15,1	16 15,3	15,3 12,5	17,7 15,1

Actinium-Reihe	U-235	4,36* 21,5	1,07* 27,9	0,964* 26,6	2,42* 18,6	0,87* 22,8	<0,45	1,47 88,3	1,86 40,8	3,98* 21,8
	Pa-231	<6,04	<3	<2,45	<2,62	<1,9	<6,91	<5,51	<4,77	<5,97
	Th-227	<1,51	<0,77	<0,6	<0,69	<0,44	<1,7	<1,34	<1,16	<1,43
	Ra-223	2,36 108,4	1,18 91	<0,57	1,42 80,8	<0,52	3,53 77,5	<1,47	<1,25	3,54 74,1
	Rn-219	<2	<0,91	<0,73	<0,87	<0,56	<2,33	<1,93	<1,63	<2,03
	Pb-211	<5,89	<2,61	<2,22	<2,63	<1,76	<6,63	<5,28	<4,37	<5,59

Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	<43,1	<19,6	<16,6	<21	<13,4	<59,2	36 91,8	<28,8	<45,3
	U-234	<189	<64,5	<54,1	<75,7	<47,8	<133	<152	<136	<126
	Th-230	<39,2	<17,9	<15	<19,4	<12,8	<40,4	<33,6	<41,1	<36,4
	Ra-226	69,5* 21,5	17,1* 28	15,4* 26,7	38,6* 18,7	13,9* 22,9	59,2 23,5	23,5 97,1	30,5 50,7	63,4* 21,9
	Pb-214	35,4 13,6	9,51 15,3	8,74 15	17,9 12,4	5,52 13,6	26,1 14,3	21,7 13,8	27,1 12,3	28,9 13,5
	Bi-214	34,3 13,4	9,08 14,9	7,52 15	17,8 11,8	5,36 13,2	25,5 14,4	19,8 14,6	27,3 11,9	26 14,1
	Pb-210	36 31,5	5,05 78,8	7,66 47,5	16,8 33,8	<1,81	23,2 39,5	20,8 40,4	34,8 28,3	32,7 31,1

K-40	497	109	54,2	315	174	1040	379	594	596
	18,5	19	19,9	12,3	12,4	18,3	18,6	12,2	18,4

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

Tab. 12-12: Messergebnisse der Gammaskpektrometrie anhand des geologischen Schichtenverzeichnisses ausgewählter Proben von BV #35 Teil 2

Pr.ID Nuklid	61-35 [Bq/kg] %	64-35 [Bq/kg] %	71-35 [Bq/kg] %	73-35 [Bq/kg] %	80-35 [Bq/kg] %	83-35 [Bq/kg] %	85-35 [Bq/kg] %	89-35 [Bq/kg] %	
Thorium-Reihe	Ac-228	31,2 12,7	34,7 13,3	44,3 11,5	43,4 13,8	49,9 11,2	29,2 11,3	68 12,1	22 11,2
	Ra-224	34,8 19,1	36,6 19,9	44,9 17	44,6 19,5	53,3 16,7	27 19,1	75,9 17,5	21 18
	Pb-212	32,4 14,7	34 15,2	41,1 13,7	46,6 15,2	49,6 13,9	2,86 13,9	67,8 13,6	21,3 14,5
	Bi-212	28,9 25,1	32,8 22,4	42,2 20,5	37,1 24	50,5 16,8	27,7 19,2	63,1 22,4	20,4 20
	Tl-208	11,4 13,5	12,7 15,1	15,2 12,6	15,1 15,2	17,3 12,5	10,1 12,7	24,7 13,2	7,4 13,1
Actinium-Reihe	U-235	3,09 46,9	3,1* 22,5	1,63 86	<0,32	1,47 116,3	1,47 99,4	<0,51	2,31 18,3
	Pa-231	<5,15	<4,94	<4,61	<5,23	<4,54	<3,99	<9,24	<2,79
	Th-227	<1,25	<1,23	<1,15	<1,29	<1,16	<0,99	<2,19	<0,71
	Ra-223	3,56 52,5	<1,3	<1,25	2,86 2,53	5,46 44,7	<1	<2,49	<0,82
	Rn-219	<1,64	<1,64	<1,61	<1,81	<1,53	<1,3	<3,16	<0,91
	Pb-211	<5,32	<4,61	<4,27	<5	<4,38	<3,49	<9,02	<2,64
Uran-Radium-Reihe	Pa-234m	73,8 57,7	<35	<29,4	<34	<32,9	<22,7	<75,4	<19,2
	U-234	<136	<149	<123	<154	<115	<159	<207	<185
	Th-230	<32,3	<31,9	<41,8	<34,3	<33,8	<37,3	<49,4	<23,4
	Ra-226	96 32,4	49,4* 22,5	34,1 71,7	68,6 20,6	61,3 49,5	41,5 61,3	87,1 20,1	<2,96
	Pb-214	73,2 12,1	25,7 13,5	32 12,4	35,5 13,6	39,7 12,2	29,5 12,2	42,2 12,4	17,3 12,3
	Bi-214	77,7 11,1	23 13,8	32,7 11,5	33,3 13,3	39,2 11,3	29,8 11,3	38,9 12,5	16,9 11,7
	Pb-210	48,4 25,4	20,4 40,2	37,3 29,3	43,9 27,4	44 27,7	38,9 28,1	36,5 31,4	19,5 33,3
K-40	389 12,4	376 18,5	549 12,2	181 18,9	486 12,2	334 12,3	839 12,4	333 12,2	

NWG und EG nach DIN 25482.5, mit $k(1-\alpha)=1,645$, $k(1-\beta)=1,645$, $k(1-\gamma)=1,960$

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

12.4 Ermittelte Dosisleistungsmesswerte während der Bohrung

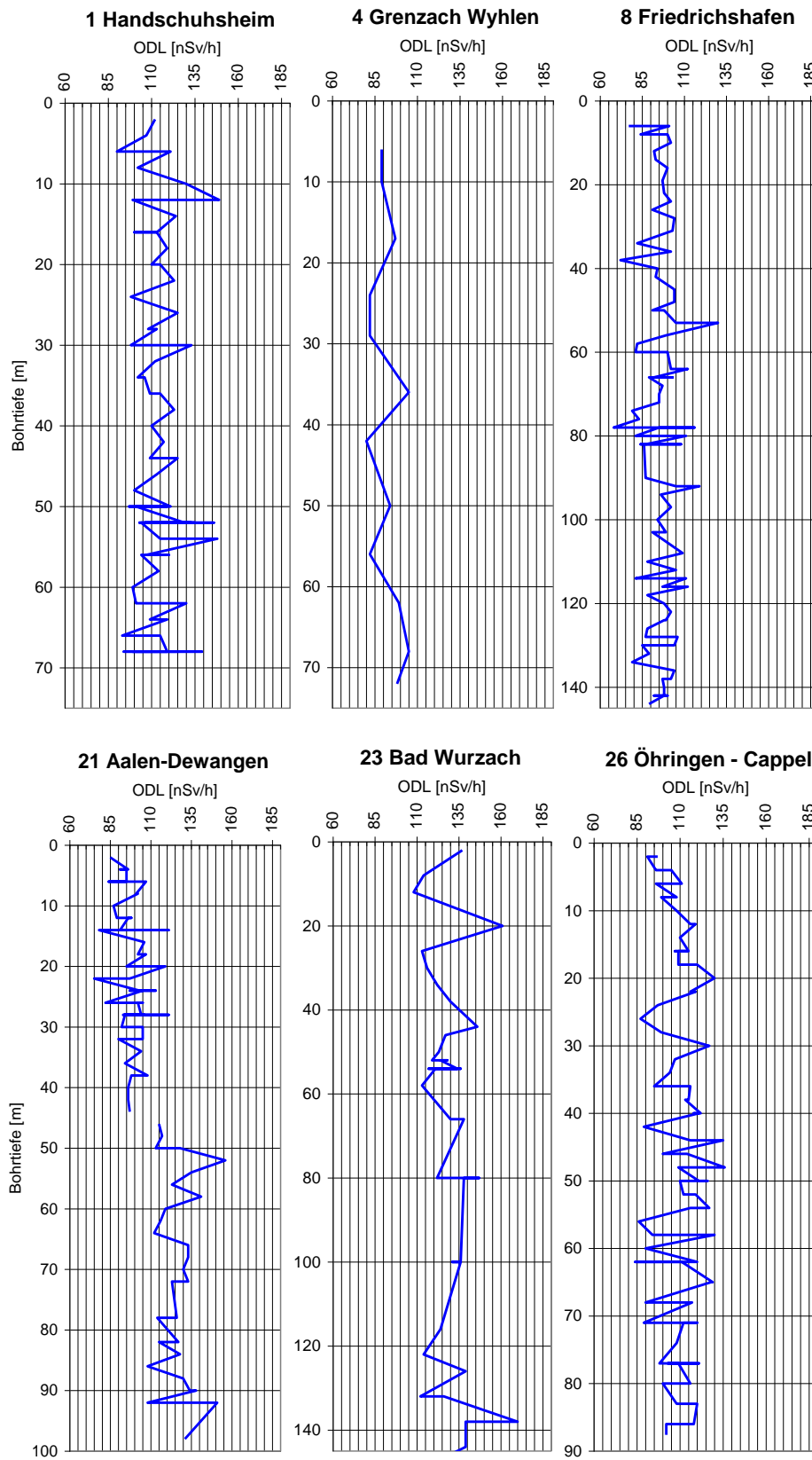


Abb. 12-12 Veränderung der Dosisleistung während der Bohrung am Bohrloch der BV #1, #4, #8, #21, #23 und #26. Messintervall $t = 3$ min.

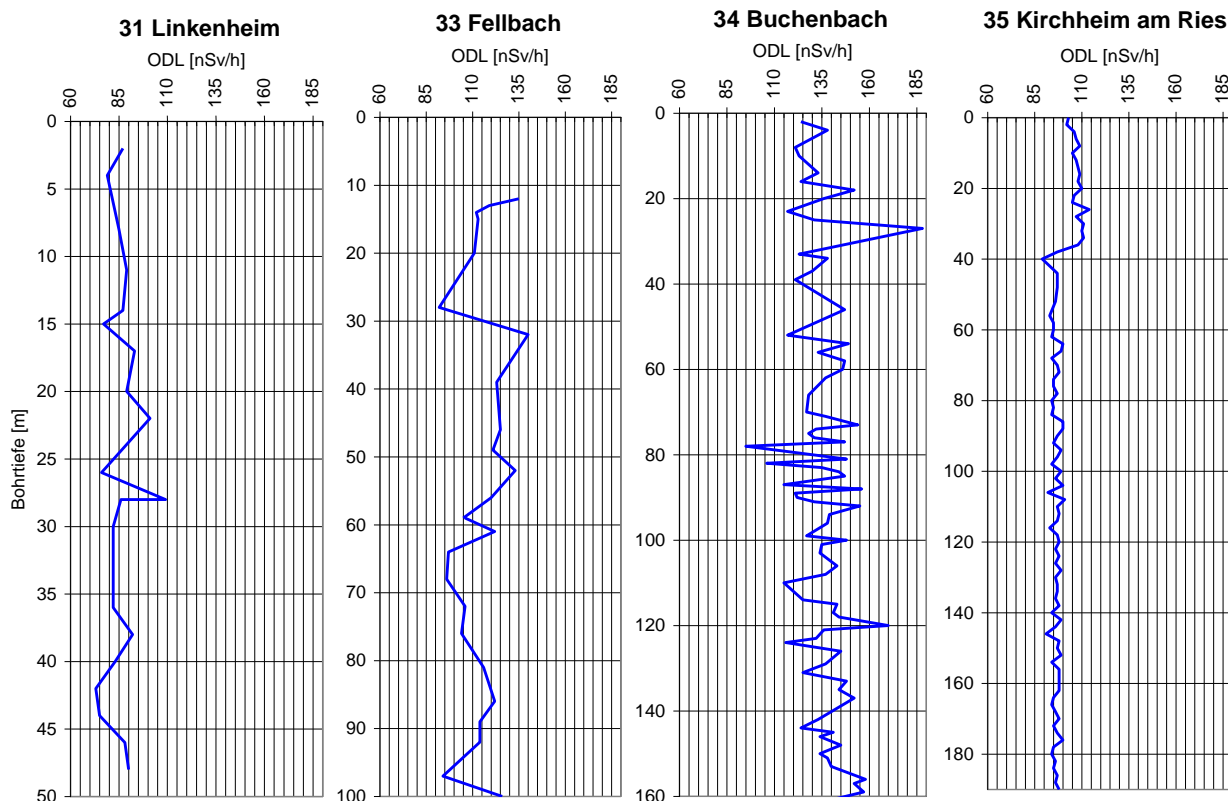


Abb. 12-13 Veränderung der Dosisleistung während der Bohrung am Bohrloch der BV #31, #33, #34 und #35. Messintervall $t = 3$ min.

12.5 Zusammenfassung der spezifischen Aktivitäten der Nuklide U-238, Th-232 und K-40 für alle ausgewählten Proben

Tab. 12-13: Übersicht der spezifischen Aktivität von Th-232, U-238 und K-40 in den ausgewählten Proben in Bezug zu den geologischen Schichten.

Pr-ID	Th-232		U-238		K-40		Gesteinsschicht
	C [Bq/kg]	Unsi-cherheit [%]	C [Bq/kg]	Unsi-cherheit [%]	C [Bq/kg]	Unsi-cherheit [%]	
NE-1	50,8	11,2	40,3	12,4	510	12,2	Ungestörte Bodenprobe
1-1	60,8	11,6	70,2	38,3	542	12,2	Lehm – gelb
2-1	61,8	11,1	85,7*	22,1	582	12,2	Lehm – braun
6-1	17,9	12,4	14,3	22,1	534	12,1	Sandstein, Tonstein - rot
7-1	44,2	11,5	32,8	12,3	616	12,2	Ton - gelb
11-1	12,1	12,3	20,7*	24,2	489	12,1	Sandstein, Tonstein - rot-gelb
15-1	16,2	12,1	16,5*	27,9	629	12,1	Sandstein, Tonstein - rot-gelb
25-1	98	12,6	38,7	13,7	1850	18,2	Sandstein – rot-grau
32-1	133	11	61,5	12	1160	12,1	Sandstein, Tonstein – rot-grau
NE-4	39,5	11,7	42	12,1	539	12,2	Ungestörte Bodenprobe
4-4	33,9	11,7	29,6	12,2	628	12,4	Keuper/ Ton, schluffig – rotbraun, grau
5-4	39,4	11,7	38,5	81,6	673	12,1	Keuper/ Ton, schluffig – rotbraun, grau
8-4	23,6	11,8	66,1	41,2	834	12,1	Keuper/ Sandstein - grau
10-4	28,3	14,3	25,1	14,1	788	18,3	Keuper/ Ton– grau, dunkelgrau
14-4	18,3	12	47,6*	19,6	397	12,3	Keuper/ Feinsandstein - grau
17-4	12,2	15,2	35,7*	22,7	256	18,7	Keuper/ Feinsandstein - grau
21-4	16,9	13,8	31	44,3	346	12,4	Keuper/ Feinsandstein, Schluffstein - grau

Pr-ID	Th-232		U-238		K-40		Gesteinsschicht
	C [Bq/kg]	Unsi- cherheit [%]	C [Bq/kg]	Unsi- cherheit [%]	C [Bq/kg]	Unsi- cherheit [%]	
25-4	16	14	42,8*	22,6	305	18,6	Keuper/ Feinsandstein, Schluffstein - grau
27-4	9,57	13,7	15,8	83,5	186	12,5	Keuper/ Feinsandstein – grau
29-4	15,2	12,3	20,5	86,2	313	12,3	Keuper/ Feinsandstein, z.T. Tonstein – grau, rotbraun
32-4	19,9	12,2	30,6*	20,5	421	12,2	Keuper/ Tonstein, Schluffstein – grau, rotbraun
33-4	27,9	12,1	50,9	18,4	606	12,1	Keuper/ Tonstein, Schluffstein – grau, rotbraun
NE-8	23,8	15,1	43,6*	22,6	331	18,6	Ungestörte Bodenprobe
8-8	36,2	13,4	69*	20,9	621	18,4	Beckenablagerung/ Ton - grau
17-8	32,4	13,6	68,5*	20,9	507	18,4	Beckenablagerung/ Ton - grau
25-8	36,5	11,6	32,4	50,8	642	12,1	Beckenablagerung/ Ton - grau
33-8	30	13,6	50,2*	21,7	381	18,4	Beckenablagerung/ Ton - grau
45-8	22,7	12,2	39,2	55,6	378	12,3	Moräne/ Fein- bis Mittelkies – bunt
47-8	15,3	12,7	50,6	19	239	12,4	Moräne/ Fein- bis Mittelkies – bunt
49-8	33,9	11,2	81,6	38,7	495	12,2	Molasse/ Mergel z.T. Sandstein - graubraun
54-8	36,7	12,2	67,2	43,6	601	12,2	Molasse/ Mergel z.T. Sandstein - graubraun
56-8	27,3	11,6	51,2	18,5	508	12,2	Molasse/ Mergel z.T. Sandstein - graubraun
57-8	15,2	15,2	21,9	14	256	18,7	Molasse/ Feinsand - graubraun
63-8	22,8	13,6	60,6	52,6	303	18,6	Molasse/ Feinsand - graubraun
69-8	28,4	14,4	63,4	21,4	405	18,6	Molasse/ Mergel, kiesig - bunt
NE-21	58,6	12,4	<6,77	0	515	18,4	Ungestörte Bodenprobe
2-21	56,7	12,6	76,1*	20,7	674	12,5	Mergel- hellbraun
5-21	51,4	11	43	56,1	632	12,1	Mergel- dunkelgrau
7-21	20,1	14,3	54,9	69	271	13,3	Kalkstein - dunkelgrau
9-21	66,5	11,4	38,7	81,4	881	12,2	Mergel- dunkelgrau
15-21	56,4	11,3	46	38,8	541	12,3	Tonstein/ Mergelstein – hellbraun-grau
19-21	58,8	13,4	78,2	21	563	18,4	Tonstein - violettrot
23-21	83,9	10,8	58,6	41,2	925	12,1	Tonstein - violettrot
27-21	66,9	11,5	72,7	38,1	872	12,1	Tonstein – grau-grün
32-21	29	11,5	42,1*	19,4	392	12,3	Sandstein - hellgrau
37-21	38,5	11,4	23,6	64,2	850	12,2	Sandstein - hellgrau
45-21	45	14,1	46,7*	23,4	659	18,4	Sandstein – grau-rötlich
49-21	31,9	11,6	36*	22,7	945	12,1	Sandstein – grau-rötlich
NE-23	34,8	6,9	40,6	50,3	364	9,5	Ungestörte Bodenprobe
1-23	46	11,6	40,8	72,5	569	12,2	Verwitterungsdecke, Schluff - braun
3-23	16,8	13,7	15,4	14,4	403	18,5	Moräne/ Kies, stark schluffig, sandig - bunt
10-23	13,3	11,9	14,9	12,3	241	12,3	Moräne/ Kies, sandig, schwach schluffig - bunt
22-23	8,3	16	18,7*	25,8	81,5	19,2	Moräne/ Kies, sandig, schwach schluffig - bunt
33-23	34,9	12	53,3	40	540	12,3	Molasse/ Tonmergel – hellgrau, ocker
47-23	47,2	11,2	78,5*	18,1	832	12,1	Molasse/ Tonmergel feinsandig – grau, ocker
61-23	26,1	11,7	70,5	36,6	480	12,2	Molasse/ Mergel, z.T. Feinsandstein – hellgrau, ocker
79-23	23,3	13,6	35,8	93,9	392	18,5	Molasse/ Mergel, feinsandig – hellgrau, ocker
NE-26	42,5	13,9	34,9	66,5	530	18,5	Ungestörte Bodenprobe
3-26	23,9	15	43,4	72,2	574	18,4	Verwitterter Gipskeuper/ Tonmergel - graugrün
5-26	34,5	13,5	17	103,8	1140	18,3	Verwitterter Gipskeuper/ Tonmergel - graugrün
10-26	31,2	14,4	69,3*	20,6	983	18,3	Unterer Keuper/ Tonstein - grau
15-26	33,7	13,6	65,3*	21,2	1020	18,3	Unterer Keuper/ Tonstein - grau
31-26	10,9	13,9	17,7	12,7	393	12,2	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein - grau
36-26	14,3	12,8	15,3	12,9	516	12,1	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein - grau
NE-31	24,3	12,1	22,2	12,7	563	12,1	Ungestörte Bodenprobe
2-31	11,1	16,9	18,2*	29,4	414	18,4	Kies, Sand - hellgrau

Pr-ID	Th-232		U-238		K-40		Gesteinsschicht
	C [Bq/kg]	Unsi-cherheit [%]	C [Bq/kg]	Unsi-cherheit [%]	C [Bq/kg]	Unsi-cherheit [%]	
3-21	13,7	13,3	19,9*	30	429	12,4	Kies, Sand - hellgrau
5-31	19,1	14	28,6	51,3	342	12,6	Kies, Sand - hellgrau
10-31	19,8	13,1	21,2	56,9	352	12,5	Kies, Sand - hellgrau
12-31	22,6	12,8	25,3	12,4	449	12,4	Mittelkies - grau
13-31	16,2	12,7	40,2*	21	453	12,3	Mittelkies - grau
16-31	17,7	16,6	46,1*	22,5	367	18,6	Kies, Sand – grau
18-31	17	12,3	24,8	61,3	375	12,4	Kies, Sand – grau
21-31	12,8	17,3	35,6*	24	282	18,7	Mittelkies - grau
23-31	16,7	12,5	42,2*	20,8	390	12,4	Mittelkies - grau
NE-33	37,7	13,7	<5,74	0	470	18,4	Ungestörte Bodenprobe
4-33	45,1	11,7	73	18,4	479	12,2	Decklehm/ Ton – ocker-hellbraun
5-33	47,1	13,4	77,8	21,1	554	18,4	Decklehm/ Ton mit Schneckenschalen – weiß
12-33	10,4	13	32*	21,6	470	12,2	Lettenkeuper/ Tonstein – grau, grünlich-grau, graubraun
16-33	38,6	13,4	31,8	100,7	1410	18,3	Lettenkeuper/ Ton mit Dolomit - ockerorange teils grünlichgrau
18-33	28,3	13	45,9	79,1	1020	12,1	Oberer Muschelkalk/ Dolomit - ockerorange
21-33	26,5	13,7	61,2	20	1140	12,1	Oberer Muschelkalk/ dolomitischer Kalkstein – ockerbraun, ocker grau
26-33	6,65	19,6	41,4*	21,7	214	18,6	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein mit Schalenrümern – grau bis graubraun
31-33	1,63	13,1	35,3	39,4	656	12,1	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein - dunkelgrau
33-33	10,1	14,1	29	79,8	387	12,2	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein - dunkelgrau
38-33	10,1	17,2	27,9*	23,3	378	18,4	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein - dunkelgrau
46-33	6,2	16,1	25	35,5	22,4	12,3	Oberer Muschelkalk/ Kalkstein - dunkelgrau
NE-34	41,6	11,2	46,5	71,3	651	12,1	Ungestörte Bodenprobe
4-34	39,5	13,8	43,7	79,7	661	18,3	Steine, schwach schluffig und tonig
6-34	36,9	12,3	68,3	17,7	710	12,1	Steine, schwach schluffig und tonig
15-34	50	12,7	94,9*	20,1	897	18,3	Granit
25-34	51,6	11	77,1	17,9	648	12,1	Gneis
29-34	48,4	11,4	77,7*	18,2	981	12,1	Gneis
33-34	34,6	13,7	63,7*	21,1	566	18,3	Gneis
38-34	42,6	12,1	62,5*	18,3	783	12,1	Gneis
41-34	37,9	13,8	44,9	83,3	698	18,3	Gneis
47-34	47	13,3	37,2	97,2	774	18,3	Granit
55-34	38,3	13,5	51,9*	22,8	578	18,3	Granit
NE-35	16,7	12,5	69,5*	21,5	497	18,5	Ungestörte Bodenprobe
7-35	5,9	16,8	17,1*	28	109	19	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
16-35	1,7	30,4	15,4*	26,7	54,2	19,9	Oberer Jura/ Kalkstein - grau
21-35	14,2	13,1	38,6*	18,7	315	12,3	Oberjura/ Kalkstein, mit schwarzen Flecken - grau
27-35	5,01	14,5	13,9*	22,9	174	12,4	Oberjura/ Kalkstein - grau
34-35	52,4	12,9	59,2	23,5	1040	18,3	Oberer Jura/ Oxford-Ton - schwarzbraun
37-35	36	91,8	23,5	97,1	379	18,6	Oberer Jura/ Oxford-Ton - rotbraun
42-35	45,3	11,5	30,5	50,7	594	12,2	Oberer Jura/ Oxford-Ton, gelegentl. Feinsandige Zwischenlagen - grau
50-35	48,4	13,8	63,4*	21,9	596	18,4	Oberer Jura/ Oxford-Ton, gelegentl. Feinsandige Zwischenlagen - grau
61-35	73,8	57,7	96	32,4	389	12,4	Unterer Jura/ Ornaten-Ton - dunkelgrau
64-35	34,7	13,3	49,4*	22,5	376	18,5	Unterer Jura/ Ornaten-Ton - dunkelgrau
71-35	44,3	11,5	34,1	71,7	549	12,2	Unterer Jura/ Tonstein, Kalkstein – grau, Quarzgerölle
73-35	43,4	13,8	68,6	20,6	181	18,9	Unterer Jura/ Tonstein, Kalkstein – grau, Quarzgerölle
80-35	49,9	11,2	61,3	49,5	486	12,2	Sandstein, tonig – rot, teilweise grünweiß
83-35	29,2	11,3	61,3	49,5	334	12,3	Sandstein, tonig – rot
85-35	68	12,1	87,1	20,1	839	12,4	Sandstein, feinsandig - braun
89-35	22	11,2	<2,96	0	333	12,2	Sandstein, grobsandig – hellbraun

* = Nuklid kann nicht eindeutig identifiziert werden. Wert daher überschätzt.

12.6 Messergebnisse Kernspurdetektoren

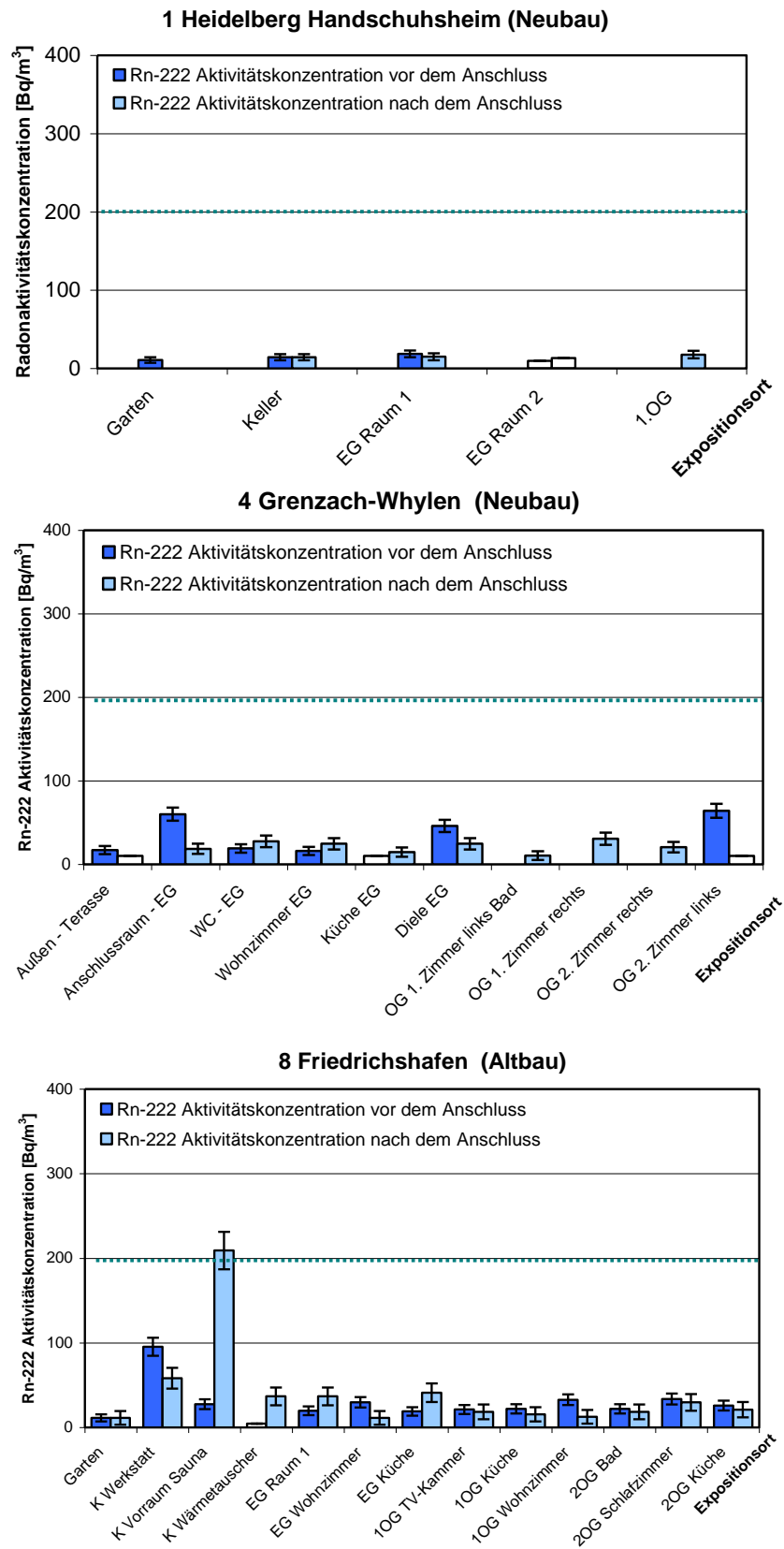


Abb. 12-14 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #1, #4, #8

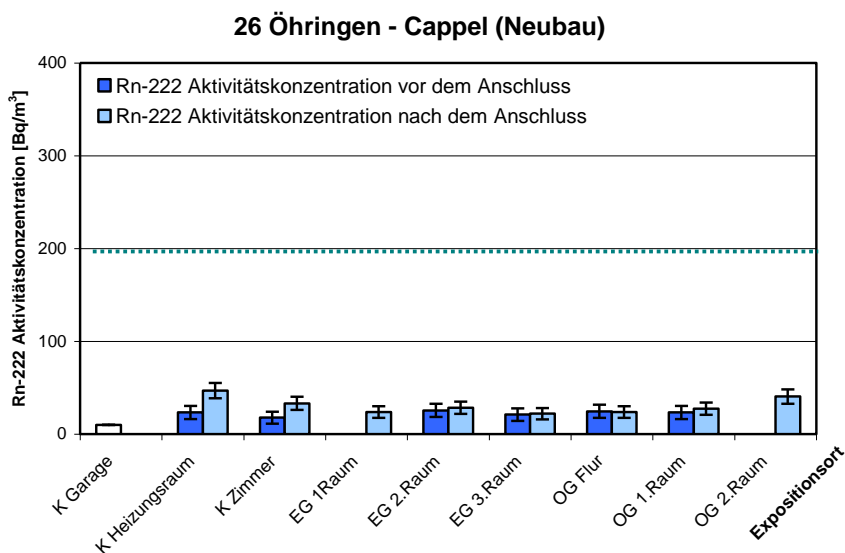
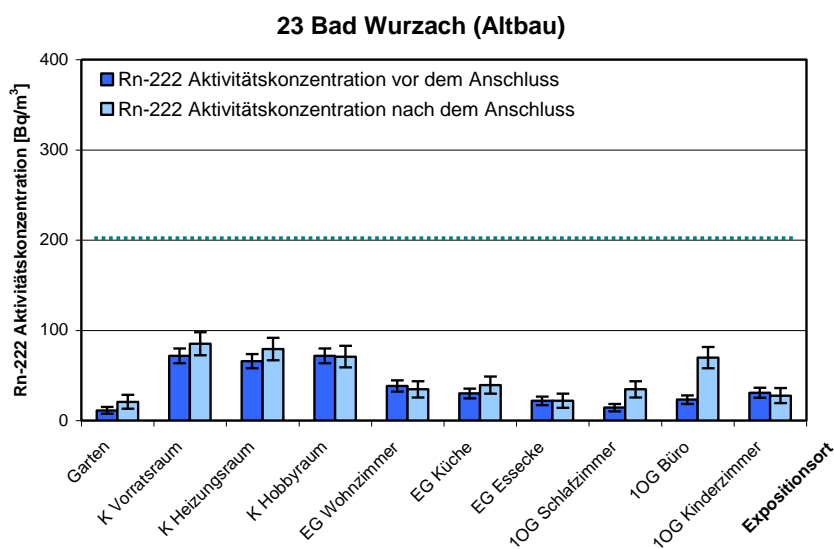
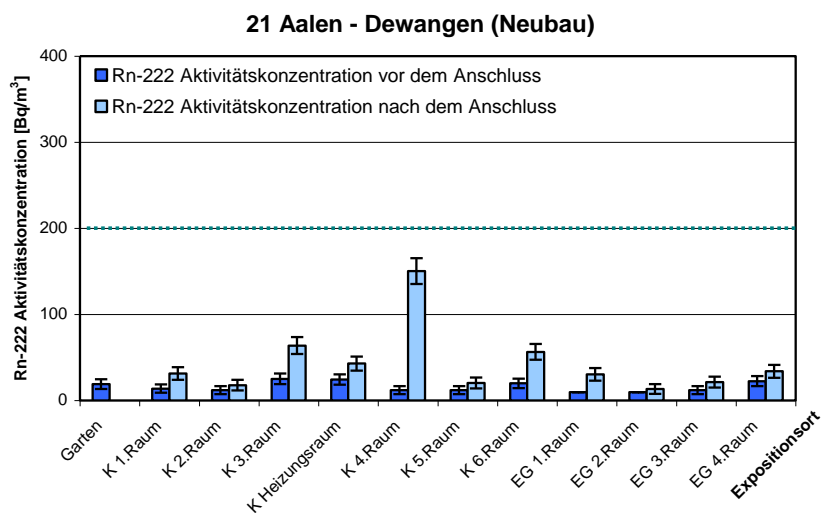
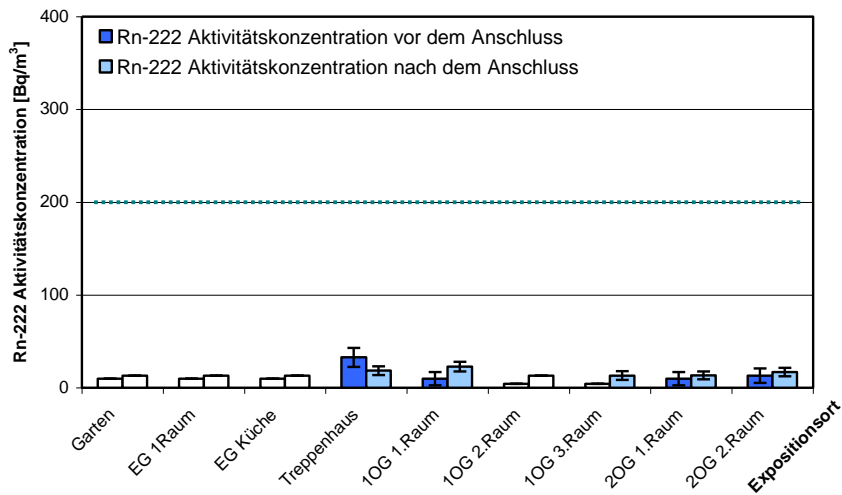
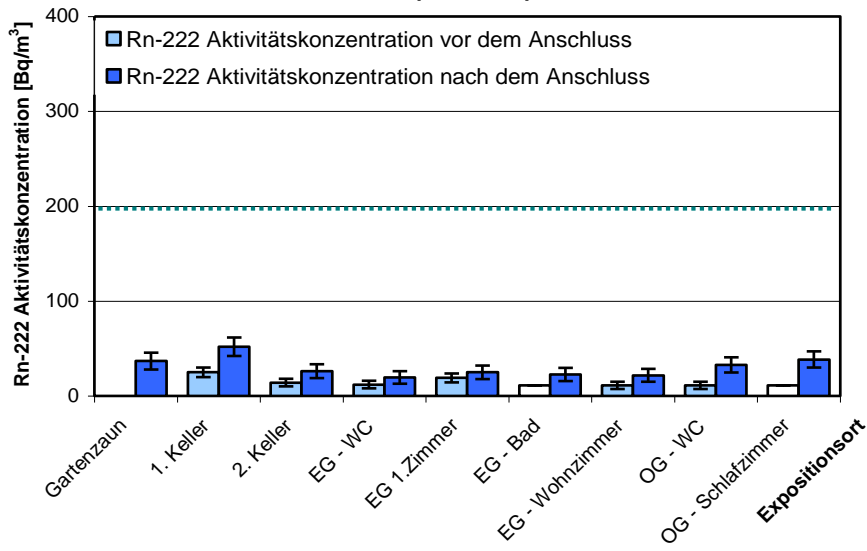


Abb. 12-15 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #21, #23, #26

31 Linkenheim (Neubau)



33 Fellbach (Neubau)



34 Buchenbach (Neubau)

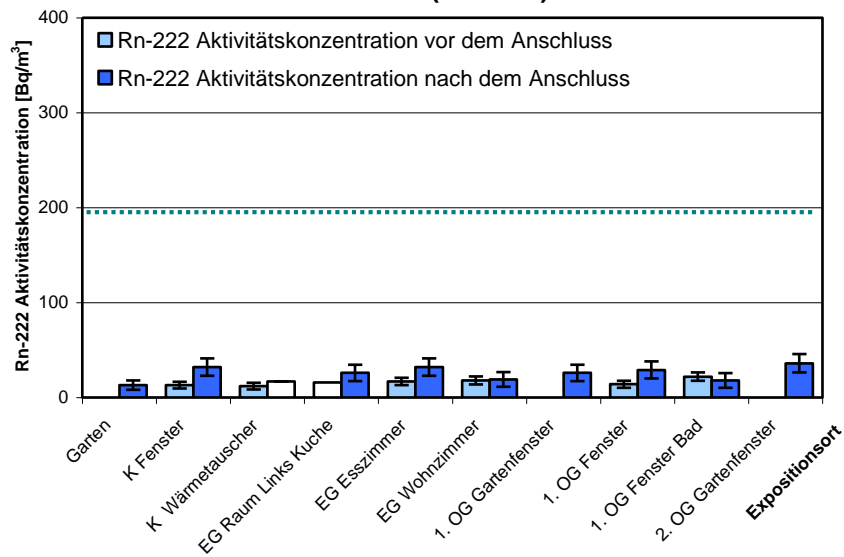


Abb. 12-16 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #31, #33, #34

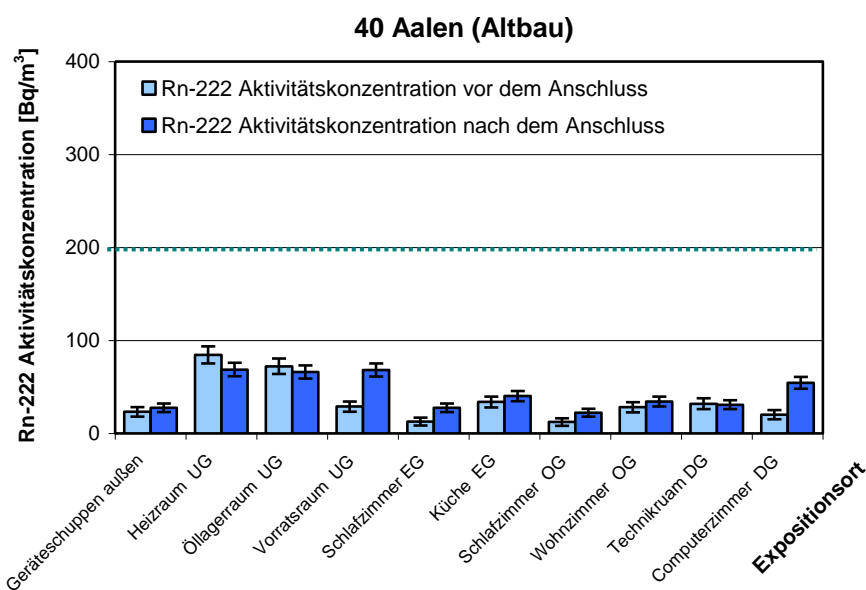
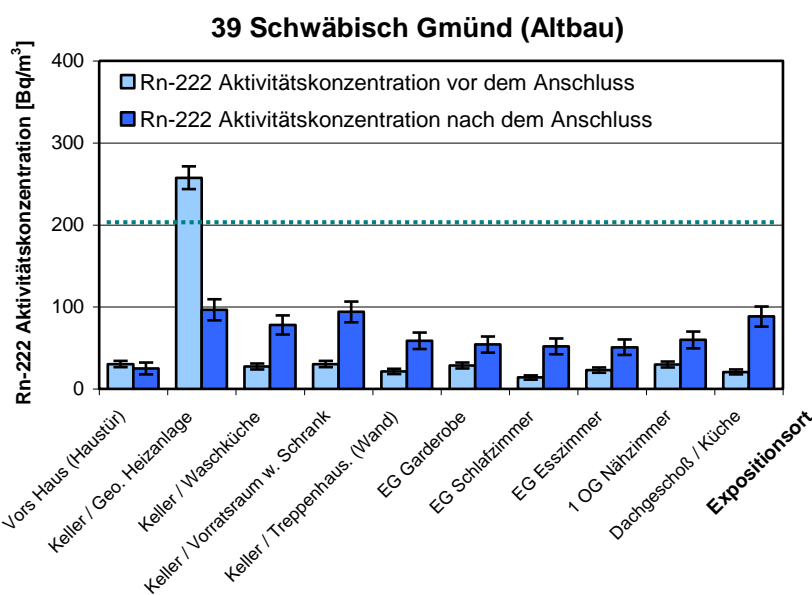
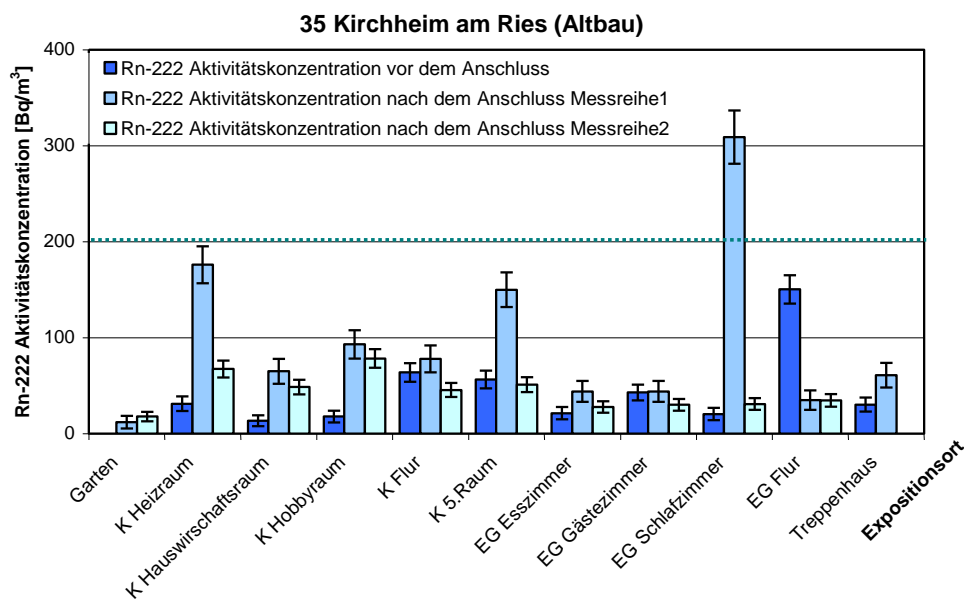


Abb. 12-17 Rn-222 Aktivitätskonzentration vor und nach der Bohrung der BV #35, #39, #40

12.7 Messergebnisse der AlphaGUARD-Messungen während den Bohrungen

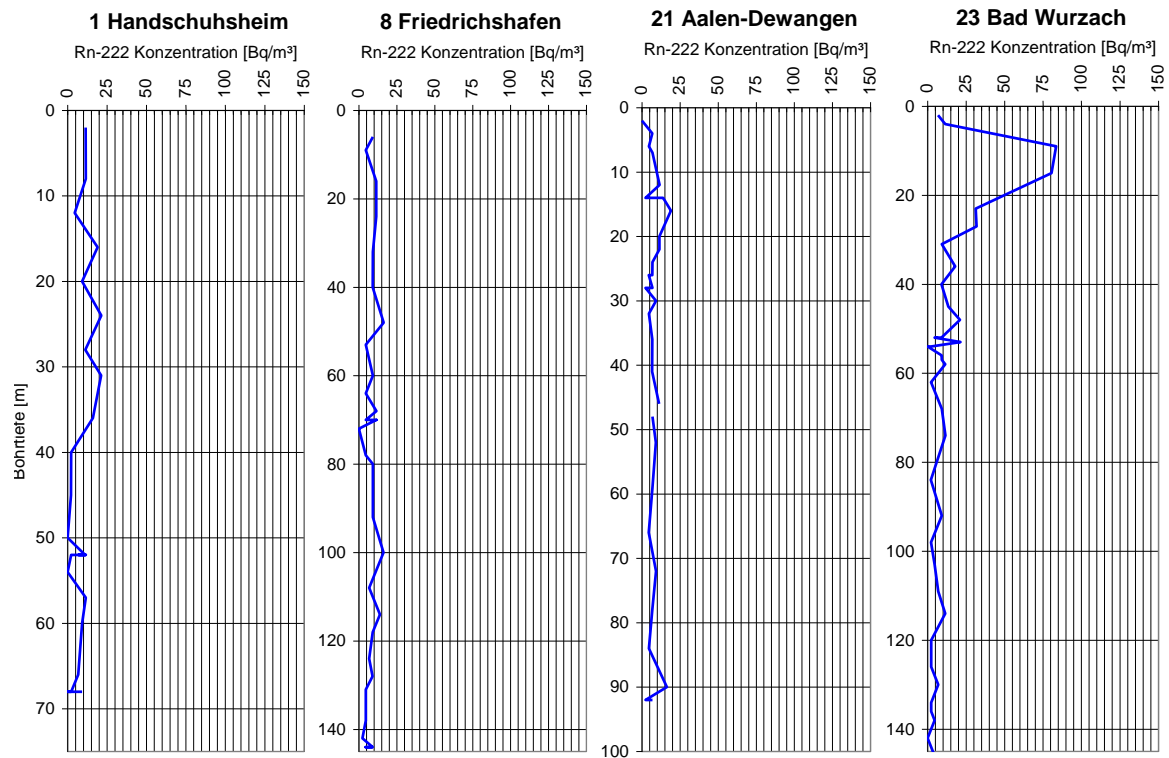


Abb. 12-18 Veränderung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft während der Bohrungen der BV #1, #8, #21

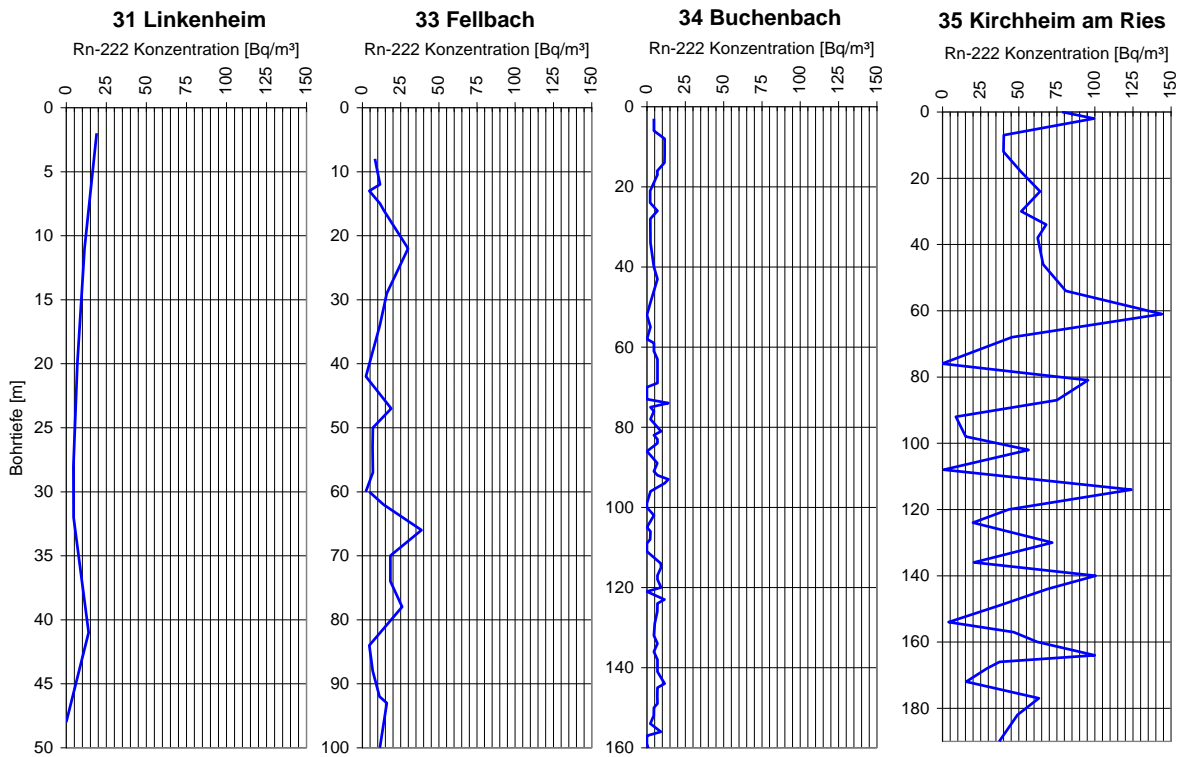


Abb. 12-19 Veränderung der Rn-222 Aktivitätskonzentration in der Luft während der Bohrungen der BV #31, #33 und #34