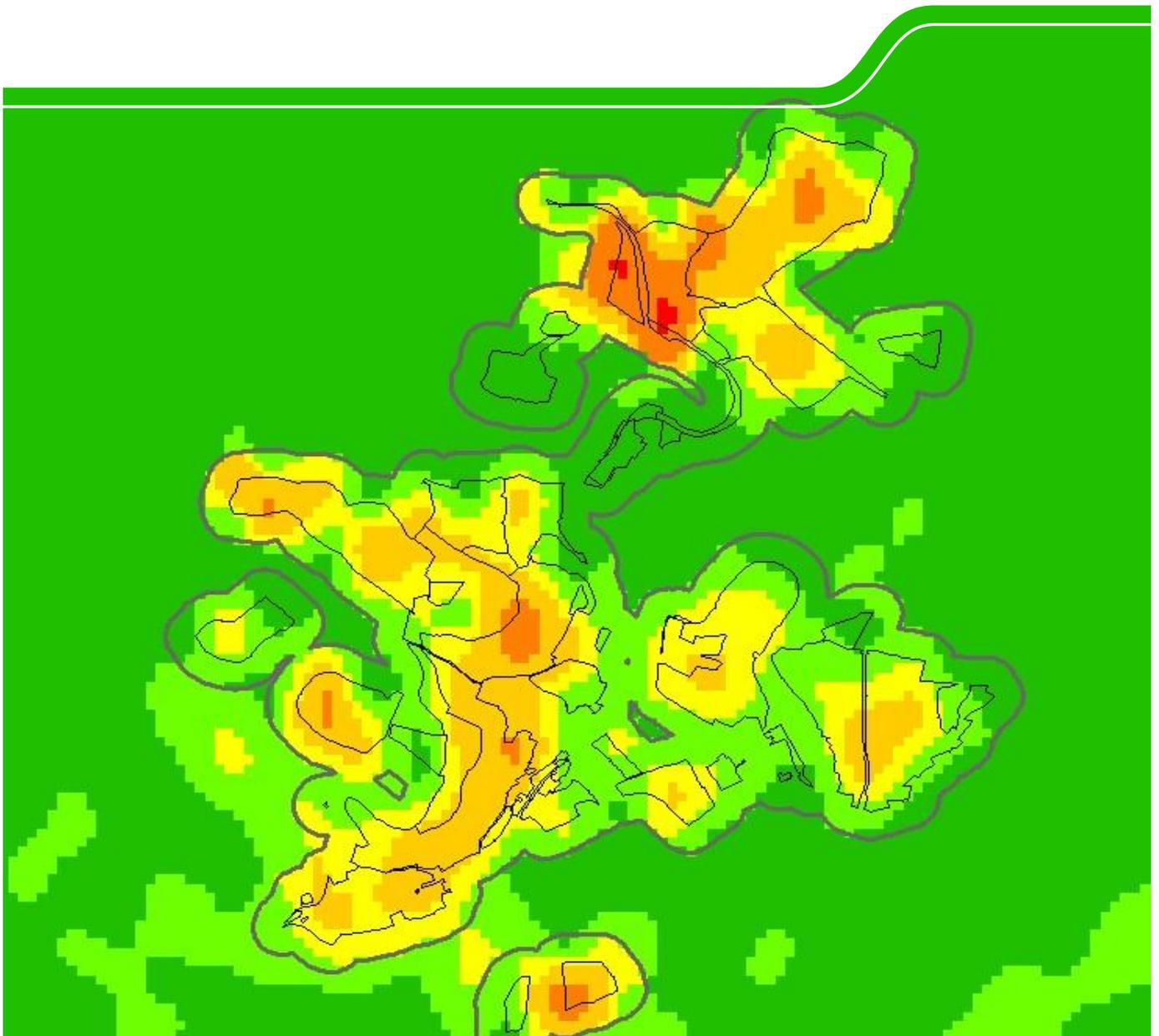


Aerogammaspektrometrie 1982–2010 im Erzgebirge

Schriftenreihe, Heft 12/2015



Auswertung von aerogamma- spektrometrischen Befliegungen der Gebiete des ehemaligen Uranerzbergbaus im Freistaat Sachsen

Dr. Thomas Hertwig, Dr. Karl-Otto Zeißler

1	Einleitung	8
1.1	Vorbemerkungen	8
1.2	Ziel- und Aufgabenstellung	8
2	Daten der Befliegungskampagnen.....	10
3	Datenvorbereitung.....	12
3.1	Gelieferte Daten: Punkt- und Flächendaten	12
3.2	Messzeitpunktbezogene Untersuchungsflächen	13
3.3	Punktdaten	15
3.4	Gruppierung und Buffering der Wismut-Objekte.....	15
3.5	Berechnungsmasken.....	18
3.6	Vergabe der Wismut-Objekt-Charakteristiken an die Messpunkte	19
4	Statistische Auswertungen	19
4.1	Parameter und Messzeitpunkte	19
4.2	Teilgebiet Aue	21
4.2.1	Statistische Maßzahlen	21
4.2.2	Histogramme	22
4.2.3	Vergleichende Betrachtungen der Einzelparameter	24
4.2.4	Paarweise Parameterbetrachtungen	25
4.3	Teilgebiet Johannegeorgenstadt	27
4.3.1	Statistische Maßzahlen	27
4.3.2	Histogramme	28
4.3.3	Vergleichende Betrachtungen der Einzelparameter	30
4.3.4	Paarweise Parameterbetrachtungen	31
4.4	Teilgebiet Zwickau.....	33
4.4.1	Statistische Maßzahlen	33
4.4.2	Histogramme	34
4.4.3	Vergleichende Betrachtungen der Einzelparameter	36
4.4.4	Paarweise Parameterbetrachtungen	37
5	Räumliche Auswertungen	39
5.1	Auswahl des geeigneten Auswerteverfahrens.....	39
5.2	Erstbewertung mittels Voronoi-Mosaik	42
5.2.1	Beispiel Uran-238 in Aue.....	42
5.2.2	Thorium-232-Abhängigkeit vom geologischen Untergrund.....	44
5.2.3	Systematische Messfehler der Befliegung 2003.....	45
5.2.4	Lageverschiebung der Daten bei der Befliegung 1999.....	47
5.3	Interpolation mit Kriging.....	48
5.3.1	Verwendetes Verfahren und Software.....	48
5.3.2	Homogene Raumeinheiten.....	49
5.3.3	Medianverschiebung	49
5.3.4	Modellparameter	51
5.3.5	Ausgewählte Kriging-Ergebnisse.....	54
5.3.6	Untersuchungen zu notwendigen Messwerttransformationen	57
6	Vergleich von Aerogammadaten und durchgeführten Sanierungsmaßnahmen	59
6.1	Zusammenstellung der Sanierungsmaßnahmen	59
6.2	Teilgebiet Aue	63
6.2.1	Sanierungsarbeiten	63
6.2.2	Zusammenfassende quantitative Darstellungen.....	65
6.3	Teilgebiet Johannegeorgenstadt	68
6.3.1	Sanierungsarbeiten	68

6.3.2	Zusammenfassende quantitative Darstellungen.....	70
6.4	Teilgebiet Zwickau.....	72
6.4.1	Sanierungsarbeiten	72
6.4.2	Zusammenfassende quantitative Darstellungen.....	74
7	Zusammenfassung	77
8	Literaturverzeichnis	80

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel der Untersuchungsfläche Zwickau 1997.....	13
Abbildung 2:	Untersuchungsflächen Aue – 1982 (rot); 1999 (orange); 2003 (grün); 2010 (blau).....	14
Abbildung 3:	Untersuchungsflächen Johanngeorgenstadt – 1982 (rot); 2003 (grün); 2010 (blau).....	14
Abbildung 4:	Untersuchungsflächen Zwickau – 1997 (rot); 1999 (orange); 2003 (grün); 2010 (blau).....	15
Abbildung 5:	Teilgebiet Aue – Objektgruppen der Wismut-Objekte mit 150-m-Puffer	17
Abbildung 6:	Teilgebiet Johanngeorgenstadt – Objektgruppen der Wismut-Objekte mit 150-m-Puffer	17
Abbildung 7:	Teilgebiet Zwickau – Objektgruppen der Wismut-Objekte mit 150-m-Puffer.....	18
Abbildung 8:	Berechnungsmaske Aue 1999 mit überlagerten Grenzen der Wismut-Objekte und ihres Puffers	18
Abbildung 9:	IDW im Vergleich mit Voronoi-Mosaik und Universal Kriging (Zwickau, U-238, 2003).....	41
Abbildung 10:	Aue – Voronoi-Mosaik mit den U-238-Messwerten von 1982–1988	42
Abbildung 11:	Aue – Voronoi-Mosaik mit den arithmetischen Mitteln aus den U-238-Messwerten von 1982–1988.....	43
Abbildung 12:	Aue – Voronoi-Mosaik mit den Standardabweichungen aus den U-238-Messwerten von 1982–1988....	43
Abbildung 13:	Aue – Voronoi-Mosaik mit den arithmetischen Mitteln aus den Th-232-Messwerten von 1982–1988 mit Grenzen ausgewählter geologischer Einheiten	44
Abbildung 14:	Johanngeorgenstadt – Voronoi-Mosaik mit den arithmetischen Mitteln aus den Th-232-Messwerten von 1982–1988 mit der Grenze des Eibenstocker Granits.....	45
Abbildung 15:	Aue – Voronoi-Mosaik mit den U-238-Messwerten von 2003	46
Abbildung 16:	Aue – Voronoi-Mosaik mit den U-238-Messwerten von 2003 - Detailansicht.....	46
Abbildung 17:	Zwickau – Voronoi-Mosaik mit den ODL-Messwerten von 2003.....	47
Abbildung 18:	Aue (links); Zwickau (rechts) – Lageverschiebungen der U-238-Maxima zu den Wismut-Objekten	48
Abbildung 19:	Johanngeorgenstadt, U-238, 2003 und 2010, Kriging-Ergebnisse ohne erweiterte Transformation	50
Abbildung 20:	Johanngeorgenstadt – U-238, 2003 und 2010, Kriging-Ergebnisse mit erweiterter Transformation	51
Abbildung 21:	Geostatistical Analyst – Auswahl Universal Kriging	52
Abbildung 22:	Geostatistical Analyst – Methodeneigenschaften.....	52
Abbildung 23:	Geostatistical Analyst – Variogramm-Modellierung.....	53
Abbildung 24:	Geostatistical Analyst – in die Berechnung einbezogene Nachbarpunkte	53
Abbildung 25:	Geostatistical Analyst – Kreuzvalidierung	54
Abbildung 26:	Aue – Kriging-Schätzwerte über die U-238-Messwerte von 1982–1988.....	55
Abbildung 27:	Aue – Kriging-Schätzwerte über die Th-232-Messwerte von 1982–1988	55
Abbildung 28:	Aue – Kriging-Schätzfehler über die U-238-Messwerte von 1982-1988	56
Abbildung 29:	Aue – Kriging-Schätzwerte über die ODL-Messwerte von 2010	56
Abbildung 30:	Aue, 1982–1988, U-238 – Vergleich Universal Kriging mit unlogarithmierten und logarithmierten Messwerten.....	58
Abbildung 31:	Aue (Ausschnitt) – äquivalente spezifische Aktivitäten Uran-238 von 1982/88, 1999, 2010	63
Abbildung 32:	Aue – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten	66
Abbildung 33:	Aue – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten.....	67
Abbildung 34:	Aue – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der ODL-Werte	68
Abbildung 35:	Johanngeorgenstadt (Ausschnitt) – äquivalente spezifische Aktivitäten Uran-238 von 1982/88, 2003, 2010.....	68
Abbildung 36:	Johanngeorgenstadt – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten.....	70
Abbildung 37:	Johanngeorgenstadt – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten	71
Abbildung 38:	Johanngeorgenstadt – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der ODL-Werte.....	72
Abbildung 39:	Zwickau (Ausschnitt) – äquivalente spezifische Aktivitäten Uran-238 von 1997, 1999, 2003, 2010	72
Abbildung 40:	Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten (logarithmiert) ..	74
Abbildung 41:	Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten (Ausschnitt)	75
Abbildung 42:	Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten	76
Abbildung 43:	Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der ODL-Werte	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Daten zu den Befliegungskampagnen	10
Tabelle 2:	Daten zu den Messspektren	10
Tabelle 3:	Übergebene Primärdaten.....	12
Tabelle 4:	Objektgruppen der Wismut-Objekte.....	16
Tabelle 5:	Messzeitbezogener Primärdatenbestand für die statistischen Auswertungen	20
Tabelle 6:	Statistische Maßzahlen (Hintergrundwerte).....	21
Tabelle 7:	Statistische Maßzahlen (Pufferbereich der Wismut-Objekte).....	21
Tabelle 8:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen U-238-Histogramme.....	22
Tabelle 9:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen Th-232-Histogramme	23
Tabelle 10:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen ODL-Histogramme	24
Tabelle 11:	Grafische Übersicht der paarweisen Abhängigkeiten U-238 – Th-232 – ODL.....	25
Tabelle 12:	Statistische Maßzahlen (Hintergrundwerte)	27
Tabelle 13:	Statistische Maßzahlen (Pufferbereich der Wismut-Objekte).....	27
Tabelle 14:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen U-238-Histogramme.....	28
Tabelle 15:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen Th-232-Histogramme	29
Tabelle 16:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen ODL-Histogramme	30
Tabelle 17:	Grafische Übersicht der paarweisen Abhängigkeiten U-Th-ODL.....	31
Tabelle 18:	Statistische Maßzahlen (Hintergrundwerte)	33
Tabelle 19:	Statistische Maßzahlen (Pufferbereich der Wismut-Objekte).....	33
Tabelle 20:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen U-238-Histogramme.....	34
Tabelle 21:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen Th-232-Histogramme	35
Tabelle 22:	Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen ODL-Histogramme	36
Tabelle 23:	Grafische Übersicht der paarweisen Abhängigkeiten U-Th-ODL.....	37
Tabelle 24:	Verbleibende Parameter für die weitere kartografische Bearbeitung	48
Tabelle 25:	Medianverschiebungswerte aus dem Hintergrundbereich vor der Interpolation	50
Tabelle 26:	Sanierungsmaßnahmen im Teilgebiet Aue	59
Tabelle 27:	Sanierungsmaßnahmen im Teilgebiet Johanngeorgenstadt.....	61
Tabelle 28:	Sanierungsmaßnahmen im Teilgebiet Zwickau	61
Tabelle 29:	Aue – Kennwerte der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten [Bq/kg].....	66
Tabelle 30:	Aue – Kennwerte der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten [Bq/kg].....	67
Tabelle 31:	Aue – Kennwerte der ODL-Messungen [nSv/h].....	67
Tabelle 32:	Johanngeorgenstadt – Kennwerte der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten [Bq/kg].....	70
Tabelle 33:	Johanngeorgenstadt – Kennwerte der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten [Bq/kg]	71
Tabelle 34:	Johanngeorgenstadt – Kennwerte der ODL-Messungen [nSv/h].....	71
Tabelle 35:	Zwickau – Kennwerte der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten [Bq/kg]	74
Tabelle 36:	Zwickau – Kennwerte der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten [Bq/kg].....	75
Tabelle 37:	Zwickau – Kennwerte der ODL-Messungen [nSv/h]	76

Anlagen (siehe **Anlagenband**)

1.1.1	Aue	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1982-88
1.1.2	Aue	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1999
1.1.3	Aue	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2010
1.2.1	Aue	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1982-88
1.2.2	Aue	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1999
1.2.3	Aue	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2010
1.3.1	Aue	ODL: Ortsdosisleistung der Gammastrahlung	2010
2.1.1	Johanngeorgenstadt	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1982-88
2.1.2	Johanngeorgenstadt	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2003
2.1.3	Johanngeorgenstadt	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2010
2.2.1	Johanngeorgenstadt	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1982-88
2.2.2	Johanngeorgenstadt	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2010
2.3.1	Johanngeorgenstadt	ODL: Ortsdosisleistung der Gammastrahlung	2003
2.3.2	Johanngeorgenstadt	ODL: Ortsdosisleistung der Gammastrahlung	2010
3.1.1	Zwickau	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1997
3.1.2	Zwickau	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1999
3.1.3	Zwickau	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2003
3.1.4	Zwickau	Uran: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2010
3.2.1	Zwickau	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1997
3.2.2	Zwickau	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	1999
3.2.3	Zwickau	Thorium: äquivalente Gehalte/äquivalente Aktivitäten	2010
3.3.1	Zwickau	ODL: Ortsdosisleistung der Gammastrahlung	1997
3.3.2	Zwickau	ODL: Ortsdosisleistung der Gammastrahlung	2003
3.3.3	Zwickau	ODL: Ortsdosisleistung der Gammastrahlung	2010

Abkürzungsverzeichnis

BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGS	Bundesgrenzschutz
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
ODL	Ortsdosisleistung der Gammastrahlung, in [nSv/h]
FinnGeoID	Finnischer Geologischer Dienst

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

Der im sächsisch-thüringischen Raum zwischen 1946 und 1990 umgegangene Uranerzbergbau hatte umweltrelevante Hinterlassenschaften zur Folge, die zu einem großen Teil in den vergangenen zweieinhalb Jahrzehnten mit sehr hohem Sanierungsaufwand beseitigt wurden. Die Sanierungsmaßnahmen betrafen die Umweltkompartimente Grund- und Oberflächenwasser, Boden und Luft.

Von der Wismut GmbH wurden dabei vielfältige und umfangreiche Sanierungsarbeiten u. a. an obertägigen Halden und Absetzanlagen bzw. Betriebsanlagen durchgeführt („Wismutobjekte“). Sie hatten das Ziel der Verminderung bzw. Verhinderung einer von diesen Anlagen ausgehenden Strahlungseinwirkung auf den Menschen und die Umwelt. Als Sanierungsmethoden kamen dabei u. a. Abbruch, Abriss, Materialumlagerung, Profilierung, Abdeckung/Abdichtung zur Anwendung.

Den Sanierungserfolg der durchgeführten Abdeck- und Abdichtungsarbeiten belegt die Wismut GmbH mit einer Vielzahl von genehmigungsrechtlich vorgegebenen Messkampagnen auf den Flächen der Objekte (Urzustand, Sanierungsphase[n], Abschluss der Sanierung) für unterschiedliche Parameter. Zum Beispiel werden für die Wismutobjekte die Werte der Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) an der Erdoberfläche in einem 5 × 5- (bzw. 10 × 10-)m-Raster gemessen und dokumentiert.

1.2 Ziel- und Aufgabenstellung

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hält Messsysteme für Hubschrauber vor, mit deren Hilfe (zum Beispiel nach einer störfallbedingten Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einer kerntechnischen Anlage) die schnelle und großräumige Bestimmung der Bodenkontamination und der Gamma-Ortsdosisleistung durchgeführt werden kann. Diese aerogammaspektrometrischen Messsysteme können zugleich auch für die Detektion der Umweltradioaktivität aus der Luft genutzt werden. Die Einsatzbereitschaft wird in jährlichen gemeinsamen Übungen mit der Fliegergruppe des Bundesgrenzschutzes (BGS) erprobt (LfULG 2014).

Aus den in Sachsen durchgeführten Befliegungen des BfS/BGS in den Jahren 1997, 1999, 2003 und 2010 liegen dem LfULG umfangreiche Daten zur radiologischen Belastung in den Gebieten mit Hinterlassenschaften des ehemaligen Uranbergbaus vor, aus denen die äquivalenten spezifischen Bodenaktivitäten für Uran-238 und Thorium-232 sowie der Gamma-Ortsdosisleistung berechnet wurden (LfULG 2014). Darüber hinaus verfügt das LfULG über Befliegungsdaten des geologischen Dienstes der DDR (GGD) in Leipzig, der die Gebiete des aktiven Uranbergbaus in den Jahren 1982–1988 befliegen hat.

Die Messungen erfolgten zu unterschiedlichen Zeitpunkten, bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen, mit unterschiedlichen Messsystemen und zum Teil mit unterschiedlichen Detektoren (RUHL & KARDEL 2006). Die Messflüge hatten einen Routenabstand zwischen 200 und 350 Metern und einen Messpunktabstand auf den Routen von 50 bis 70 Metern.

Das Ziel des Vorhabens ist es, soweit das methodisch möglich und sinnvoll ist, die Daten der einzelnen Befliegungskampagnen zusammenzuführen, um diese z. B. mit Blick auf die fortschreitenden Sanierungsmaß-

nahmen der Wismut-Hinterlassenschaften miteinander vergleichen zu können. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Sanierungsmaßnahmen grundsätzlich in einer Verringerung des Strahlungsniveaus an der Erdoberfläche widerspiegeln.

Dies soll anhand der vorliegenden Messdaten untersucht werden. Zur Auswertung gelangen die berechneten Daten der äquivalenten spezifischen Bodenaktivitäten von U-238 bzw. Th-232 sowie der Gamma-Ortsdosisleistung, die den wichtigsten Sanierungsmaßnahmen in den interessierenden Teilgebieten

- Aue,
- Johanngeorgenstadt und
- Zwickau

gegenüberzustellen sind.

Zur Lösung der Aufgabe stehen Daten folgender Befliegungen zur Verfügung:

- 1982/1988 Geologischer Dienst der DDR
- 1997 Bundesamt für Strahlenschutz/Bundesgrenzschutz
- 1999 Finnischer Geologischer Dienst
- 2003 Bundesamt für Strahlenschutz/Bundesgrenzschutz
- 2010 Bundesamt für Strahlenschutz/Bundesgrenzschutz

Die Auswertung der aerogammaspektrometrischen Befliegungen erfolgt in folgenden Schritten:

- Evaluierung der Primärdaten und Vorarbeiten zu den Berechnungen mit den Zielen
 - offensichtlich fehlerbehaftete Messreihen auszusondern und
 - eine angemessene Begrenzung der Darstellungsflächen zu erlangen.
- Die statistische Auswertung der Primärdaten hat das Ziel, grundlegende statistische Parameter der Befliegungsergebnisse zu dokumentieren, um aus den Verteilungsgesetzmäßigkeiten Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit bestimmter Berechnungs- und Interpolationsverfahren zu erhalten.
- Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur flächenhaften Darstellung der Messwerte inklusive Kartenerstellung: Test verschiedener Methoden und begründete Auswahl einer Vorzugsvariante.
- Räumlich-statistische Auswertungen der flächenhaften Darstellungen mit dem Ziel, die Verhältnisse innerhalb und außerhalb der Wismut-Objekte zu charakterisieren als Voraussetzung dafür, eine
- Parallelisierung der statistischen Ergebnisse der Befliegungen und der Wismut-Sanierungsmaßnahmen durchzuführen.

2 Daten der Befliegungskampagnen

Die nachfolgenden Ausführungen stammen überwiegend aus RUHL & KARDEL (2006) und BfS/BGS (2010). Die aerogammaspektrometrischen Messungen wurden mittels Hubschrauberbefliegungen durchgeführt. Die Flüge erfolgten in einem regelmäßigen Raster aus mehr oder weniger parallelen Messprofilen (Tabelle 1). Die Flughöhe lag bei 60-100 Metern (z. T. abweichende Höhen über Wohngebieten), die Fluggeschwindigkeit bei 100 km/h. Positionsbestimmungen (GPS-System der Hubschrauber) und Messungen der Flughöhe (Radarhöhenmesser) erfolgten kontinuierlich.

Tabelle 1: Daten zu den Befliegungskampagnen

Kampagne	Kenndaten						Parameter			Gebiete		
	Anzahl Datenpunkte	Fläche Befliegungsgebiet [km ²]	Flugrichtung[°]	Flughöhe [m]	Profilabstand [m]	Messpunktabstand [m]	Uran	Thorium	ODL	Aue/Schneeberg	Johanngeorgenstadt	Zwickau-Crossen
1982-1988 (GGD)	219.450	8.336	0/180	100	250	65-70	x	x		x	x	x
1997 (BfS/BGS)	20.981	265	60/240 150/330	100	300	30-100	x	x	x			x
1999 (FinnGeolD)	100.939	1.412	0/180	60 (180)	200	65-70	x	x		x		x
2003 (BfS/BGS)	26.305	482	0/180	100	250	30-100	x	x	x	x	x	x
2010 (BfS/BGS)	20.649	349	0/180	100	300	30-100	x	x	x	x	x	x

Die Messungen wurden mit Multikanalspektrometern durchgeführt. Dabei kam eine unterschiedliche Anzahl von NaI(Tl)-Einzeldetektoren mit einem aktiven Volumen von 4 Litern zum Einsatz (GGD: 8, FinnGeolD: 4, BfS/BGS: 3-4). Es wird ein komplexes Gammaspektrum in 256 Kanälen aufgezeichnet (0,3 bis 3,0 MeV). Die einzelnen Radionuklide werden an Hand ihrer charakteristischen Spektrallinien unterschieden. Bei der Erfassung der natürlichen Radioaktivität werden folgende Spektralbereiche verwendet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Daten zu den Messspektren

Fenster	Nuklid	Energie [keV]	Energieschwelle [keV]	
			untere	obere
Thorium	²⁰⁸ Tl (²³² Th)	2615	2415	2815
Uran	²¹⁴ Pb (²³⁸ U)	1765	1655	1885
Kalium	⁴⁰ K	1461	1360	1560

Aus den gemessenen Spektren lassen sich ebenfalls Werte der Ortsdosisleistung der Gammastrahlung (ODL) berechnen.

Die gemessenen komplexen Spektren bedurften einer umfangreichen Bearbeitung. Es wurden durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) bereits zuvor eine Reihe von Korrekturen durchgeführt:

- Berücksichtigung der Hintergrundstrahlung (kosmische Strahlung, Eigenstrahlung des Hubschraubers usw.),
- Entfernung von Streueffekten und Beiträgen anderer Nuklide („Stripping“-Faktoren),
- Höhenkorrektur (Absorption durch die Luftschicht wird berücksichtigt).

Bei der Umrechnung der gemessenen Impulsraten kamen Eichfaktoren zum Einsatz, die aus aerogamma-spektrometrischen Messungen über Eichflächen mit bekannten Uran-, Thorium- und Kaliumgehalten resultieren.

Die gemessenen Impulsraten [cps bzw. 1/s] von ^{214}Bi , ^{208}Tl und ^{40}K wurden in äquivalente Gehalte an U, Th [mg/kg] und K [%] umgerechnet. Daraus ließen sich aus den entsprechenden Nuklidanteilen im natürlichen Uran bzw. Thorium die spezifischen Aktivitäten [Bq/kg] wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} \text{U:} & \quad 1 \text{ mg/kg} = 12,349 \text{ Bq/kg } ^{238}\text{U} \\ \text{Th:} & \quad 1 \text{ mg/kg} = 4,072 \text{ Bq/kg } ^{232}\text{Th} \end{aligned}$$

Die Ermittlung der massebezogenen Aktivitäten aus aerogammaspektrometrischen Messungen basiert auf der Modellannahme, dass die Radionuklide im Boden(-profil) homogen verteilt sind. Es wird davon ausgegangen, dass bei diesen Messungen die radiologische Situation in den obersten 50 cm Boden/Substrat berücksichtigt wird. Weiterhin hängen die Aeromessergebnisse von den unterschiedlichen Bodendichten und Bodenfeuchtwerten in diesen obersten 50 cm ab. Aerogammaspektrometrisch ermittelte Messdaten beschreiben gemäß einer Stellungnahme des BfS (Anlage 24 in RUHL & KARDEL [2006]) eine Fläche, die rd. 2,5 E+5 m² groß ist (0,25 km² bzw. 25 ha, entspr. 500 x 500 m). In dieser Stellungnahme wird auf Grund von vergleichenden Bodenmessungen festgestellt, dass „... die Ergebnisse der Aerogammaspektrometrie in allen Fällen innerhalb des Schwankungsbereiches der Aktivitäten der verschiedenen Bodenschichten liegen ...“.

Die Messdaten wurden den Autoren bereits in der überarbeiteten und korrigierten Fassung übergeben.

3 Datenvorbereitung

3.1 Gelieferte Daten: Punkt- und Flächendaten

Für die Lösung der Aufgabenstellung standen folgende Daten zur Verfügung (Tabelle 3).

Tabelle 3: Übergebene Primärdaten

Name	Jahr	Anzahl	ODL_nSv_h	Th232_mgKg	U238_mgKg	U238_BqKg	Th232_BqKg	für
2_Erzgebirge	1982-1988	132051	--	Th	U	=U*12,349	=Th*4,072	A, J
28G1	1997	3575	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29A1	1997	2508	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29B1	1997	3607	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29C4	1997	2629	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29D1	1997	1071	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29E3	1997	2341	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29E4	1997	1015	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29F4	1997	1328	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
29G3	1997	2906	ODL_nSv_h	=Th_232_Bq/4,072	=Bi_214_2/12,349	Bi_214_2	Th_232_Bq	Z
aero_fin_shape	1999	100939	--	Th	U	=U*12,349	=Th*4,072	A, Z
Aerogamma_ 2003_Rohdaten	2003	26128	ODL_nSvh	=THORIUM_Bq/4,072	=URAN2_BqKg/12,349	URAN2_BqKg	THORIUM_Bq	A, J, Z
Aerogamma2010_ Johanngeorgenstadt	2010	3101	Gesamt_ODL	=Thorium_Bq/4,072	=Uran_2_Bq/12,349	Uran_2_Bq	Thorium_Bq	J
Aerogamma2010_ Schneeberg	2010	13332	Gesamt_ODL	=Thorium_Bq/4,072	=Uran_2_Bq/12,349	Uran_2_Bq	Thorium_Bq	A
Aerogamma2010_ Zwickau	2010	4216	Gesamt_ODL	=Thorium_Bq/4,072	=Uran_2_Bq/12,349	Uran_2_Bq	Thorium_Bq	Z
Objekte_Wismut _Aue_alt		58						A
Objekte_Wismut _Crossen		7						Z
Objekte_Wismut _Johanngeorgenstadt		94						J

Erläuterung zu Tabelle 3:

Die Primärdaten bestehen aus Punktdaten mit Messwerten (farbig hinterlegt) und Polygonshapes mit den Wismut-Objekten.

- Name: Dateiname
- Jahr: Messzeitpunkt
- Anzahl: Anzahl Messpunkte bzw. Flächenobjekte in der Datenquelle
- ODL_nSv_h: Feld in der Datenquelle mit den ODL-Daten in nSv/h
- Th232_mgKg: Feld in der Datenquelle mit den Thorium-Daten in mg/kg (blau)

- U238_mgKg: bzw. Rechenwert (rot)
 Feld in der Datenquelle mit den Uran-Daten in mg/kg (blau)
- U238_BqKg: bzw. Rechenwert (rot)
 Feld in der Datenquelle mit den Uran-Daten in Bq/kg (blau)
- Th232_BqKg: bzw. Rechenwert (rot)
 Feld in der Datenquelle mit den Thorium-Daten in Bq/kg (blau)
- für: bzw. Rechenwert (rot)
 berührtes Teilgebiet (A – Aue; Z – Zwickau; J – Johanngeorgenstadt)

3.2 Messzeitpunktbezogene Untersuchungsflächen

Die Grenzen der drei zu untersuchenden Teilgebiete wurden anhand der Verbreitung der Messpunkte im Jahr 2010 festgelegt. Die Messflächen der verwendeten Messwerte und Messpunkte zu den anderen Zeitpunkten decken sich nicht mit diesen Grenzen. Es wurde deshalb für jede dieser Messflächen eine Messpunktauswahl einschließlich einer Grenzfestlegung getroffen, die sich an den festgelegten Grenzen des Jahres 2010 orientieren.

Bei der Digitalisierung der Flächen wurde weiterhin darauf Wert gelegt, dass die umrissene Fläche möglichst viele Messpunkte enthält, dass aber andererseits keine großen messpunktfreien Gebiete in die Untersuchungsfläche einbezogen werden. Somit hat jede messzeitbezogene Untersuchungsfläche ihre individuelle Form, die von der Messpunktanordnung bestimmt wird. Im Extremfall wurden isolierte Randpunkte aus der Untersuchungsfläche ausgeschlossen, weil der Verdacht besteht, dass die Interpolation zu unplausiblen Ergebnissen führt (s. z. B. Abbildung 1).

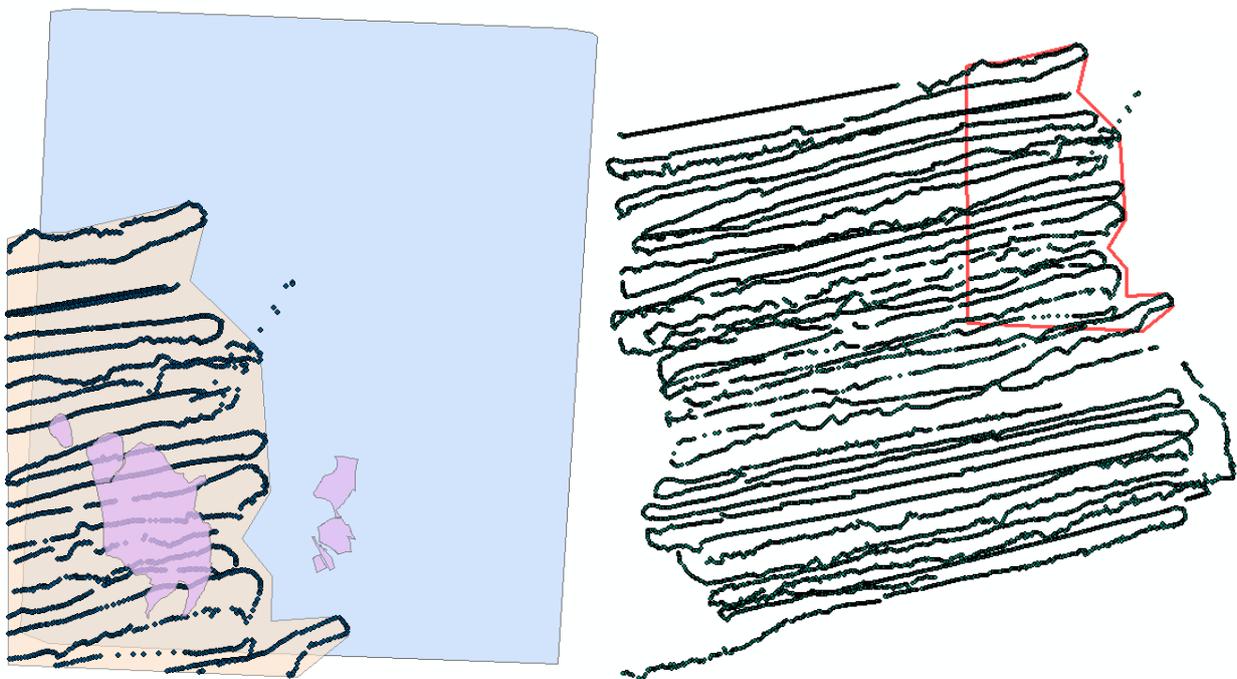


Abbildung 1: Beispiel der Untersuchungsfläche Zwickau 1997

Auf Abbildung 1 sind links ein Ausschnitt der Messpunkte 1997, die Wismut-Objekte (magenta) sowie die Untersuchungsfläche 2010 (blau) und die abgegrenzte Untersuchungsfläche 1997 (orange) für die weiteren Auswertungen dargestellt. Rechts sieht man die gesamte Messfläche 1997 einschließlich der in die weiteren Auswertungen eingegangenen Messpunkte (rot umrandet). Aus dieser Abbildung ist zu ersehen, dass die Untersuchungsfläche 1997 zum einen nur einen Teil der Wismut-Objekte bedeckt, dass sie aber andererseits weit über die Grenzen des Untersuchungsgebietes 2010 hinaus reicht.

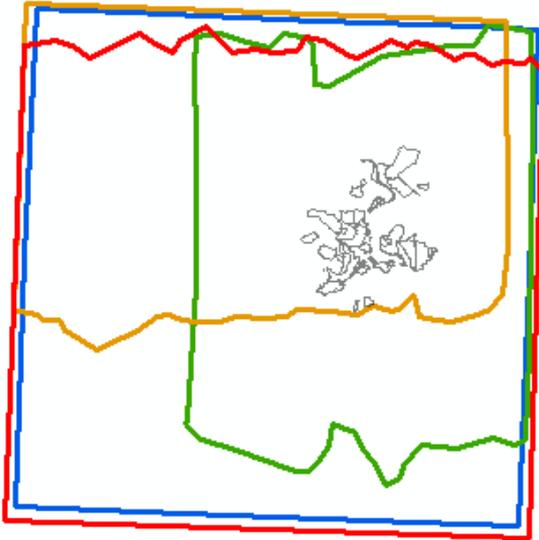


Abbildung 2: Untersuchungsflächen Aue – 1982 (rot); 1999 (orange); 2003 (grün); 2010 (blau)

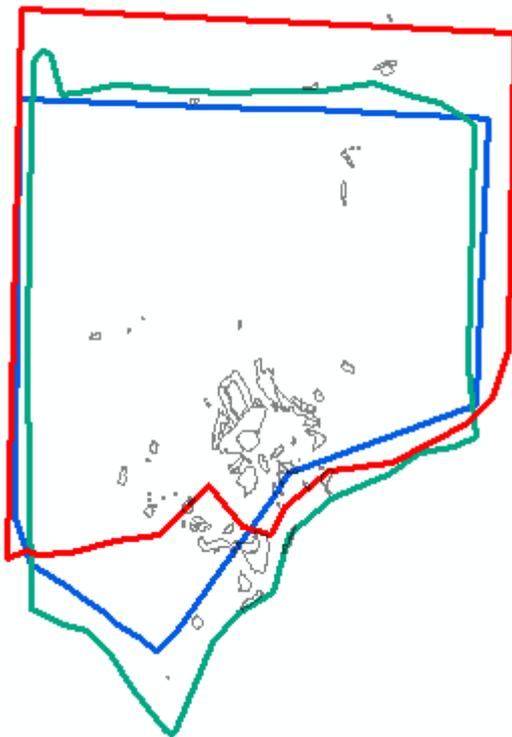


Abbildung 3: Untersuchungsflächen Johannegeorgenstadt – 1982 (rot); 2003 (grün); 2010 (blau)

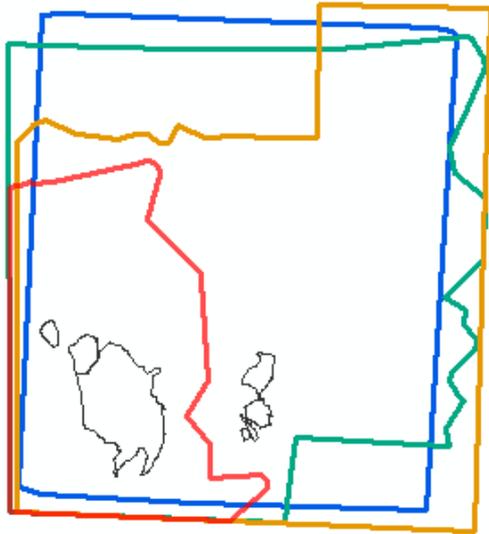


Abbildung 4: Untersuchungsflächen Zwickau – 1997 (rot); 1999 (orange); 2003 (grün); 2010 (blau)

Abbildung 2 bis Abbildung 4 zeigen, wie stark sich die Befliegungsflächen von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt in allen drei Teilgebieten unterschieden haben.

3.3 Punktdaten

Die soeben beschriebenen Untersuchungsflächen sind Grundlage für die Erstellung einer ArcGIS-Feature-Klasse mit Messpunkten für jedes zu untersuchende Teilgebiet. Es werden aus den Quelldaten alle Messpunkte zum zugehörigen Messzeitpunkt aufgenommen, die in die entsprechende Untersuchungsfläche fallen. Neben den Messwerten erhält jedes Feature im Feld ZEIT das Messjahr als Attributwert. Nicht jeder Messpunkt verfügt über alle Messwerte. Während nur wenige Messwerte für Uran und Thorium fehlen, weist ODL größere Lücken auf. Aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass für 1982 und 1999 gar keine ODL-Werte vorliegen.

3.4 Gruppierung und Buffering der Wismut-Objekte

Im Sinne der Aufgabenstellung kann man davon ausgehen, dass sich die wesentlichen Messwertveränderungen zeitbezogen im Bereich der Wismut-Objekte im Zusammenhang mit den durchgeführten Sanierungsmaßnahmen ereigneten. Diese sind deshalb getrennt von dem Umfeld gesondert zu untersuchen. Andererseits sind einige Objekte zu klein, als dass sie auf die Messmethode Fernerkundung einen deutlich messbaren Einfluss ausüben könnten. Es müssen deshalb Objekte zu größeren, möglichst zusammenhängenden Gebilden gruppiert werden. Diese Gruppen werden im Weiteren „Objektgruppen“ genannt. Die Gruppierung berücksichtigt sowohl die räumliche Anordnung der Wismut-Objekte als auch weitestgehend die Reihenfolge der Sanierungsarbeiten. Das Resultat der Gruppierung ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Objektgruppen der Wismut-Objekte

Teilgebiet	Lfd.Nr.	Bezeichnung
Aue	1	Halde 371 und Betriebsflächen
	2	Halden 366/186/383 und ehemalige Betriebsfläche 383
	3	Halde 66/207
	4	Halden 38/208/382/Borbachdamm, Betriebsfläche 382
	5	Hammerberghalde, ehemalige Betriebsflächen
	6	Halde 13b, andere Betriebsflächen
	7	ehemalige Betriebsflächen Z 50, Sch. 65
	8	Betriebfl. Halde Großsch. 1, Kernlager, Schacht 250
	9	Betriebfl. u. Halde 12/253/309 und 310
Johanngeorgenstadt	1	Absetzbecken, Halden, Erzfabrik, westlich
	2	Halden östlich
	3	Halden, Erzbunker südlich
	4	Halden, Verladestelle Breitenbrunn
	5	Halde Tiefschürfe 19 a und 21
Zwickau	1	Absetzanlagen Helmsdorf, Dänkritz I und Dänkritz II
	2	Bergehalde Crossen
	3	Betriebsfläche der ehemaligen Aufbereitungsfabrik Crossen
	4	links der Mulde liegende Betriebsflächen (DFA-Fläche, Erzlager „Sächsische Erze“)

Die genannte Gruppierung gestattet eine flächenhaft differenzierte Betrachtung der Widerspiegelung des Sanierungsgeschehens in den Aerogammadaten – nur durch eine Zusammenfassung von Einzelflächen in Gruppen wird eine genügend hohe Messpunktanzahl erfasst, die für eine statistische Auswertung der gemessenen Aktivitäten notwendig ist. Soll eine überschaubare Menge an Gruppen geschaffen werden, kann dabei der Fall auftreten, dass in eine Gruppe sowohl sanierte als auch nicht sanierte Einzelobjekte gelangen (Teilgebiet Aue). Im Teilgebiet Zwickau stimmt die Gruppierung inhaltlich überwiegend auch mit dem Sanierungsgeschehen überein. Im Teilgebiet Johanngeorgenstadt stellen die sanierten Objekte überwiegend nur sehr kleinflächige Bereiche dar, die räumlich weit auseinanderliegen und somit nicht in einzelne Gruppen eingeordnet werden können – hier ist die Gruppierung überwiegend räumlich begründet.

Darüber hinaus ist es charakteristisch für die gewählte Messmethode, dass potenzielle Strahlungsquellen nicht nur unmittelbar nach oben zum Empfänger strahlen, sondern auch seitlich. Aus der bereits erwähnten Stellungnahme des BfS (Anlage 24 in RUHL & KARDEL [2006]) geht ein Einwirkungsgebiet von ca. 500 m x 500 m auf dem Messwert im Messpunkt ein, das bedeutet ca. 250 m vom Messpunkt aus in jede Richtung. Dabei nimmt die Stärke des empfangenen Signals zum Rand des Einwirkungsgebietes ab. Durch empirische Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes hat sich ein Puffer von 150 m um die Wismut-Objekte als ausreichend erwiesen, um diesen Effekt der seitlichen Abstrahlung innerhalb des gepufferten Wismut-Gebiets aufzufangen.

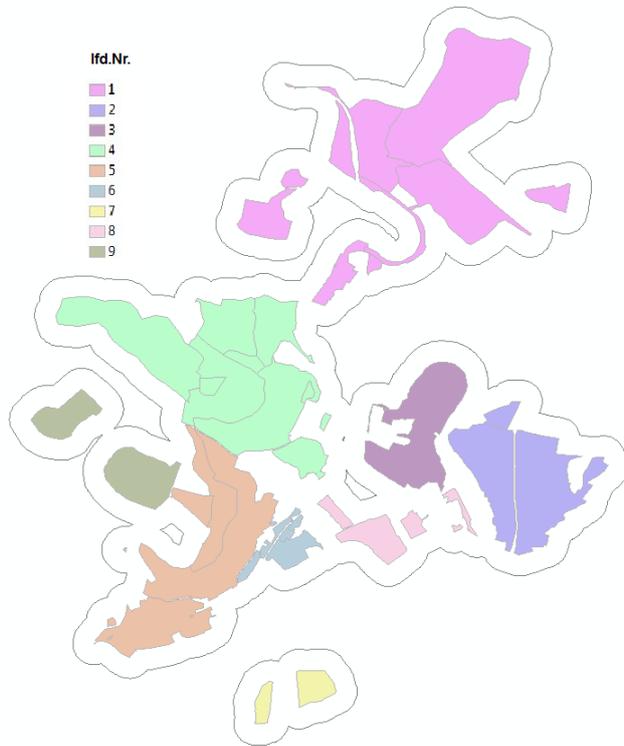


Abbildung 5: Teilgebiet Aue – Objektgruppen der Wismut-Objekte mit 150-m-Puffer

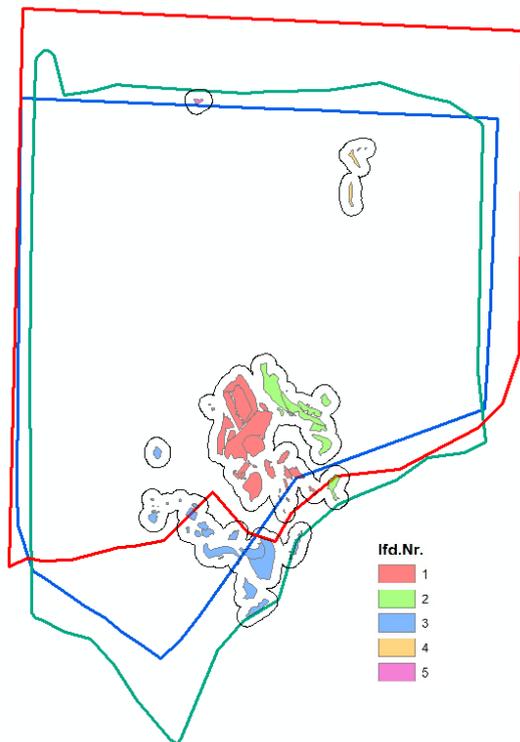


Abbildung 6: Teilgebiet Johanngeorgenstadt – Objektgruppen der Wismut-Objekte mit 150-m-Puffer

Bemerkung: Wegen der nicht immer vollständigen Überdeckung der Pufferflächen durch die Befliegungsflächen wurden für Johanngeorgenstadt die Umrisse aller drei Befliegungsflächen dargestellt: rot - 1982; grün – 2003; blau – 2010.

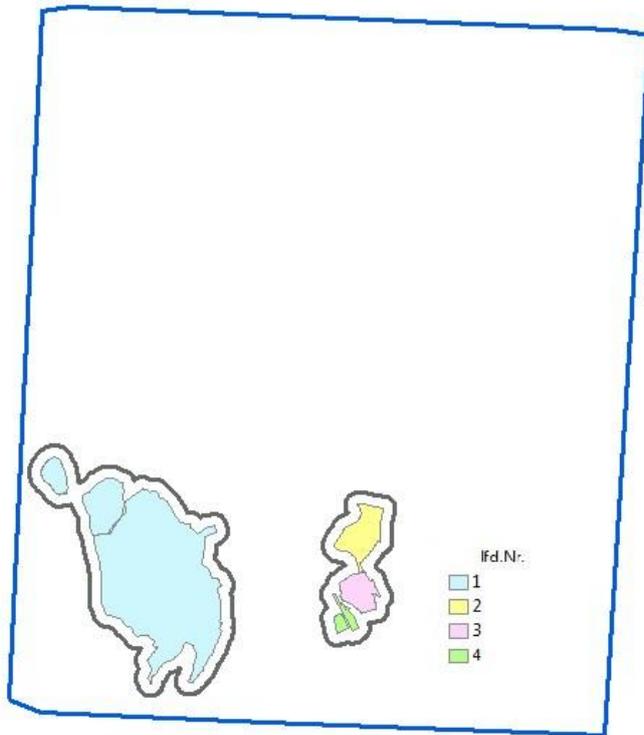


Abbildung 7: Teilgebiet Zwickau – Objektgruppen der Wismut-Objekte mit 150-m-Puffer

3.5 Berechnungsmasken

Aus der paarweisen Kombination der Befliegungsgrenzen (Abbildung 2 bis Abbildung 4) mit den gepufferten Wismut-Objektgruppen (Abbildung 5 bis Abbildung 7) wurden Berechnungsmasken für die nachfolgenden flächenhaften Auswertungen angelegt. Dabei wird der Pufferbereich von der jeweils nächstliegenden Gruppe ausgefüllt. Die Berechnungsmasken haben durchgehend eine Rasterauflösung von 50 m. In jedem Teilgebiet liegt die Mitte der Zellen immer genau übereinander.

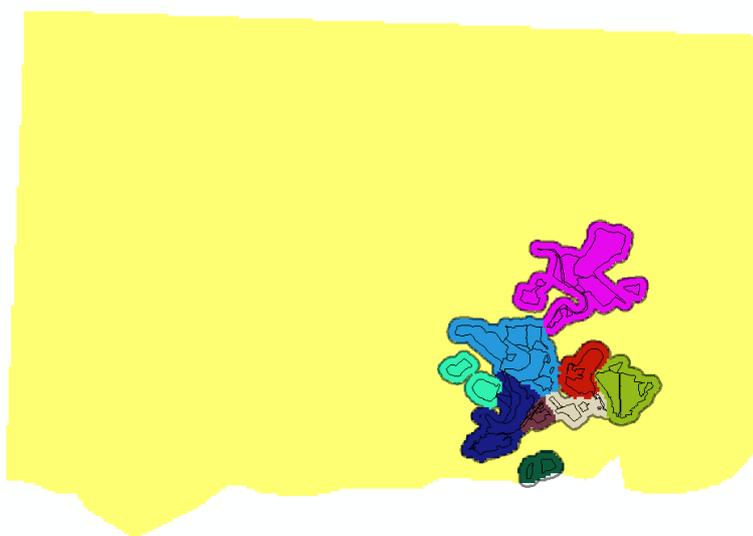


Abbildung 8: Berechnungsmaske Aue 1999 mit überlagerten Grenzen der Wismut-Objekte und ihres Puffers

Als Beispiel einer solchen Berechnungsmaske wurde in Abbildung 8 die für das Teilgebiet Aue, Messzeitpunkt 1999 dargestellt. Gelb ist der Bereich der Hintergrundwerte markiert. Die Pufferbereiche sind andersfarbig dargestellt. Die Ausgangsgeometrien sind in Abbildung 2 und Abbildung 5 zu sehen. Insgesamt entstanden 11 Berechnungsmasken (Aue: 1982, 1999, 2003, 2010; Johanngeorgenstadt: 1982, 2003, 2010; Zwickau: 1997, 1999, 2003, 2010).

3.6 Vergabe der Wismut-Objekt-Charakteristiken an die Messpunkte

Alle Messpunkte außerhalb des 150-m-Pufferbereichs erhalten im Feld HG den Wert 1, alle innerhalb den Wert 0. HG steht für „Hintergrund“. Für dieses Hintergrundgebiet gilt bei vorausgesetztem fehlerfreiem Messen:

- Es gibt keine bedeutenden, von anthropogenen Aktivitäten (z. B. Uranbergbau) hervorgerufenen, erhöhten Strahlungswerte.
- Die Messwerte ändern sich messzeitbezogen nicht wesentlich.

Dagegen ist folgendes Verhalten der Messwerte innerhalb des 150-m-Pufferbereiches zu erwarten:

- Die erhöhten, von den Wismut-Aktivitäten hervorgerufenen Strahlungswerte konzentrieren sich hier.
- Die Effekte der Sanierung (Abdeckung bzw. Umlagerung) können durch Vergleich der regionalisierten Messwerte zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten abgeleitet werden.

Zur Zuordnung der Messpunkte und Messwerte zu den ausgehaltenen Wismut-Objektgruppen enthält jede Punktfeatureklasse mehrere Felder mit Namen „W<ld.nr>“ (also W1, W2, W3 usw.). Sobald sich ein Messpunkt nicht weiter als 150 m von einem Wismut-Objekt der Gruppe i entfernt befindet, wird der Wert von W_i auf 1 gesetzt. Ansonsten beträgt er 0. Vermerkt sei, dass ein Messpunkt sich auf mehrere Objektgruppen beziehen kann, sobald er nicht mehr als 150 m von diesen Gruppen entfernt ist.

4 Statistische Auswertungen

4.1 Parameter und Messzeitpunkte

Entsprechend der Aufgabenstellung sind folgende Messparameter relevant:

- spezifische Aktivitäten Uran-238 in Bq/kg bzw. äquivalente Bodengehalte U_{nat} in mg/kg
- spezifische Aktivitäten Thorium-232 in Bq/kg bzw. äquivalente Bodengehalte Thorium in mg/kg
- ODL in nSv/h

Der Umrechnungsfaktor von mg/kg U_{nat} in Bq/kg U-238 beträgt 12,349. Der Umrechnungsfaktor von Thorium mg/kg in Bq/kg Thorium-232 beträgt 4,072. In Anbetracht der Konstanz der beiden Faktoren werden im Weiteren diese beiden Parameter nur als spezifische Aktivitätswerte in der Maßeinheit Bq/kg ausgewertet. Unter Verwendung der beiden Umrechnungsfaktoren kann man die zugehörigen äquivalenten Bodengehalte in mg/kg durch Division berechnen.

Die Zusammenstellung der Primärdaten entsprechend Kapitel 2 führte zu folgendem Datenbestand:

In Tabelle 5 sind unter den Messzeitpunkten die Feldnamen in den zugehörigen Feature-Klassen eingetragen. Diese Namen repräsentieren die zugehörigen Parameter gleichzeitig in den nachfolgenden Tabellen und Abbildungen. Die Erwägungen aus Kapitel 3.6 führten dazu, dass grundsätzlich für alle Teilgebiete und Parameter eine getrennte statistische Auswertung für die Hintergrunddaten (HG=1) und die gepufferten Wismut-Objektgebiete (HG=0) erfolgte.

Tabelle 5: Messzeitbezogener Primärdatenbestand für die statistischen Auswertungen

Teilgebiet	Parameter	1982-1988	1997	1999	2003	2010
Aue	Uran_238 in Bq/kg	U_1982		U_1999	U_2003	U_2010
	Thorium-232 in Bq/kg	Th_1982		Th_1999	Th_2003	Th_2010
	ODL in nSv/h				ODL_2003	ODL_2010
Johanngeorgenstadt	Uran_238 in Bq/kg	U_1982			U_2003	U_2010
	Thorium-232 in Bq/kg	Th_1982			Th_2003	Th_2010
	ODL in nSv/h				ODL_2003	ODL_2010
Zwickau	Uran_238 in Bq/kg		U_1997	U_1999	U_2003	U_2010
	Thorium-232 in Bq/kg		Th_1997	Th_1999	Th_2003	Th_2010
	ODL in nSv/h		ODL_1997		ODL_2003	ODL_2010

Die nachfolgenden Auswertungen erfolgen teilgebietsbezogen in der Reihenfolge:

- statistische Maßzahlen für Hintergrundwerte und gepufferte Wismut-Objekte
- Histogramme für Hintergrundwerte und gepufferte Wismut-Objekte
- vergleichende Betrachtungen zu den Einzelparametern
- paarweise Parameterdiagramme für Hintergrundwerte und gepufferte Wismut-Objekte
- Auswertungen der paarweisen Diagramme

4.2 Teilgebiet Aue

4.2.1 Statistische Maßzahlen

Tabelle 6: Statistische Maßzahlen (Hintergrundwerte)

Parameter	Anzahl	arithm. Mittel	Median	Standardabweichung	Min	Max
U_1982 [Bq/kg]	12.138	65,0	59,5	27,6	2,90	411,2
U_1999 [Bq/kg]	10.676	46,9	43,4	24,3	0,01	444,9
U_2003 [Bq/kg]	12.784	76,8	72,3	35,1	0,01	465,5
U_2010 [Bq/kg]	12.551	43,9	39,4	21,3	11,60	151,0
Th_1982 [Bq/kg]	12.138	47,8	48,3	12,7	5,00	128,6
Th_1999 [Bq/kg]	10.676	44,4	42,7	15,0	0,004	146,2
Th_2003 [Bq/kg]	12.784	43,5	43,0	13,8	0,57	97,7
Th_2010 [Bq/kg]	12.563	37,8	36,9	12,2	5,11	110,0
ODL_2003 [nSv/h]	12.784	120,5	119,4	25,8	22,4	355,8
ODL_2010 [nSv/h]	12.563	113,6	113,0	23,1	45,8	241,0

Tabelle 7: Statistische Maßzahlen (Pufferbereich der Wismut-Objekte)

Parameter	Anzahl	arithm. Mittel	Median	Standardabweichung	Min	Max
U_1982 [Bq/kg]	610	243,7	198,0	191,8	6,0	1284,1
U_1999 [Bq/kg]	756	135,7	97,6	115,5	1,2	781,6
U_2003 [Bq/kg]	1.027	142,4	113,6	92,0	18,3	660,0
U_2010 [Bq/kg]	645	74,8	57,5	66,8	13,4	503,0
Th_1982 [Bq/kg]	610	51,5	51,4	9,7	20,0	96,5
Th_1999 [Bq/kg]	756	39,8	39,5	10,3	10,6	78,6
Th_2003 [Bq/kg]	1.027	43,3	43,4	11,8	9,6	83,2
Th_2010 [Bq/kg]	645	37,2	37,0	7,2	13,5	57,7
ODL_2003 [nSv/h]	1.027	164,4	150,2	56,1	76,2	421,6
ODL_2010 [nSv/h]	645	136,0	127,0	44,7	77,4	358,0

4.2.2 Histogramme

Tabelle 8: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen U-238-Histogramme

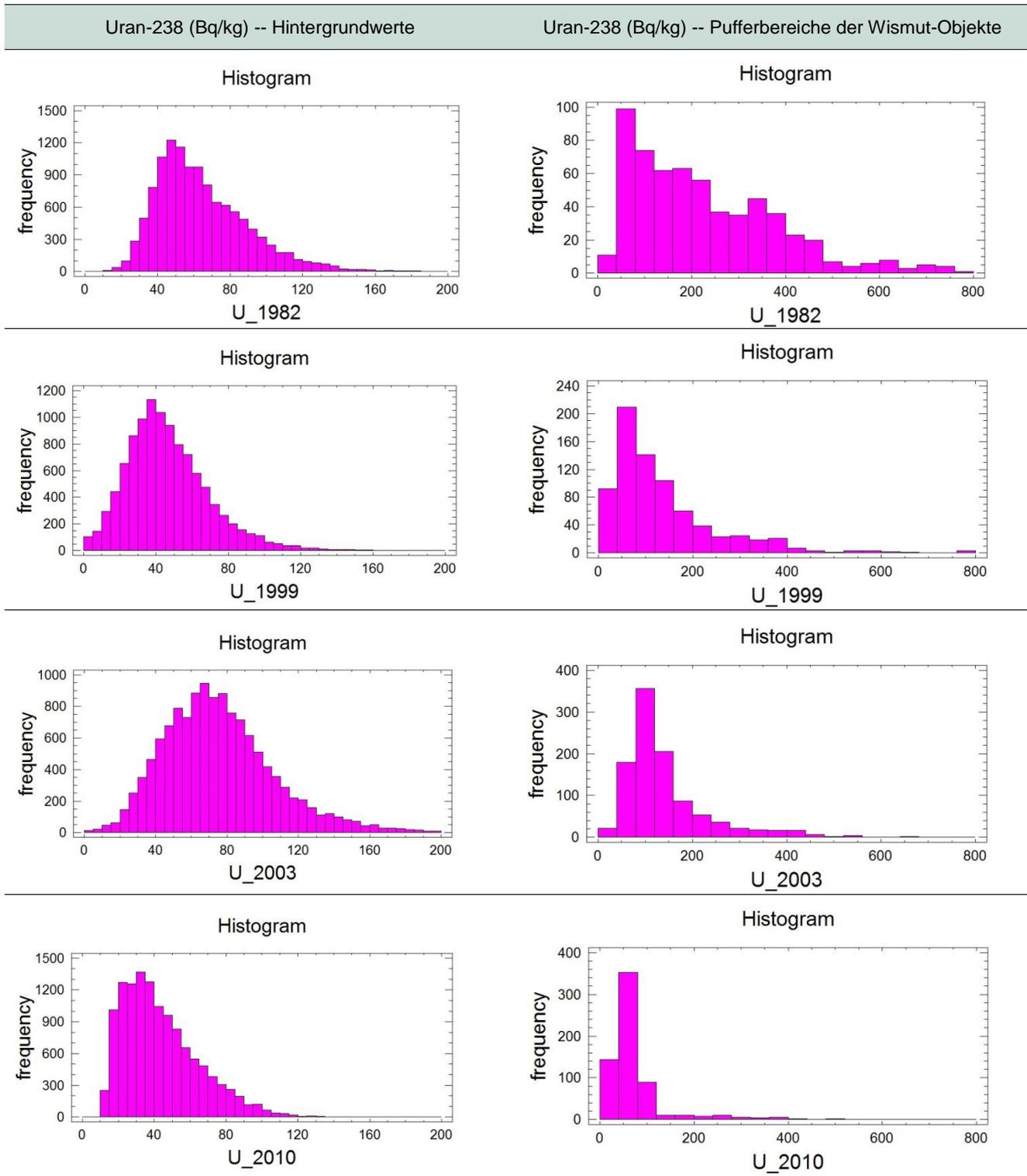


Tabelle 9: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen Th-232-Histogramme

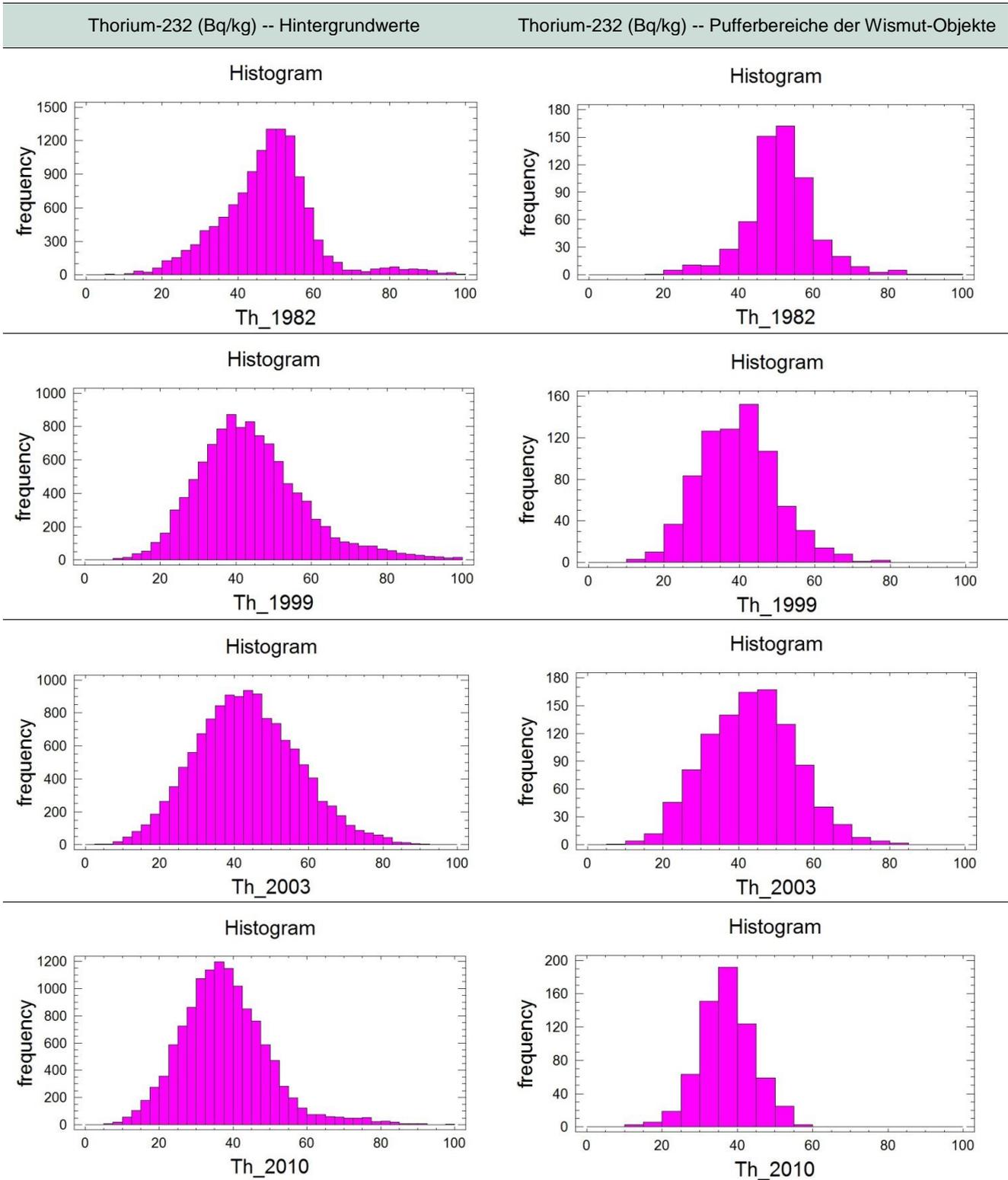
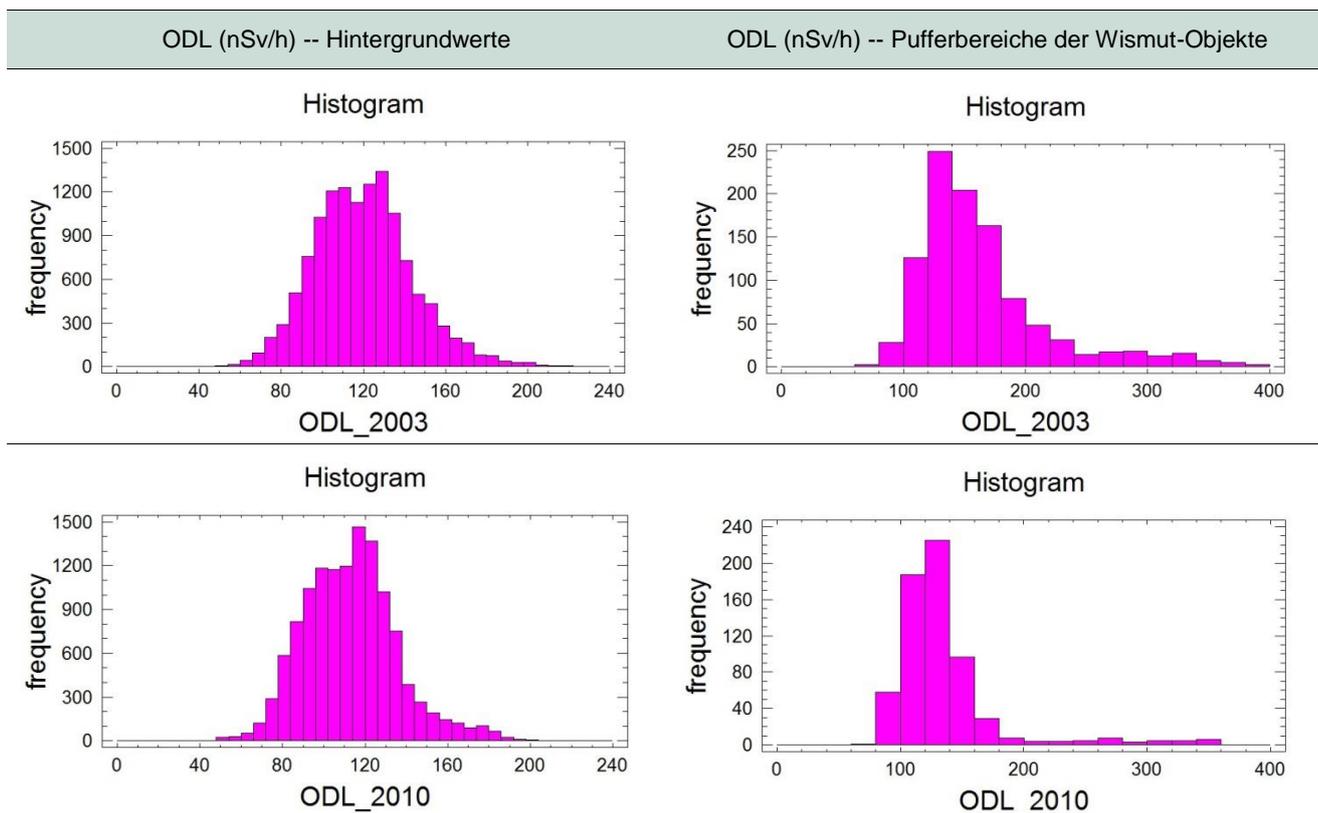


Tabelle 10: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen ODL-Histogramme



4.2.3 Vergleichende Betrachtungen der Einzelparameter

Spezifische Aktivitäten Uran-238

- Bei den statistischen Maßzahlen ist der arithmetische Mittelwert grundsätzlich größer als der Median. Das ist charakteristisch für eine rechtsschiefe Verteilung (logarithmische Normalverteilung), was auch durch die empirischen Histogramme unterstrichen wird.
- Sei a_M – arithmetischer Mittelwert und s - Standardabweichung. Dann befinden sich bei angenommener Normalverteilung im Intervall $(a_M - 2s, a_M + 2s)$ ca. 95 % aller Werte. Ist keine Normalverteilung anzunehmen, dann befinden sich in diesem $2s$ -Intervall als Abschätzung von unten nach der bekannten Tschetschewschen Ungleichung mindestens 75 % aller Werte unabhängig von der Verteilung.
- Die Uran-Werte verhalten sich im Wesentlichen so, wie in Kapitel 3.6 angenommen:
 - Die Werte im Bereich der gepufferten Wismut-Objekte sind höher als die Hintergrundwerte.
 - Die Hintergrundwerte ändern sich von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt nur unwesentlich. Eine Ausnahme machen die Messwerte 2003, worauf in Kapitel 5.2.3 noch Bezug genommen wird.
 - Die min- und max-Hintergrundwerte 2010 weichen von den anderen merklich ab. Das kann zum einen an den unterschiedlichen Messflächen und zum anderen an unterschiedlichen lokalen Messpunkteinzugsbereichen liegen.
 - Die Werte im Bereich der gepufferten Wismut-Objekte werden von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt deutlich kleiner. Auf die Ausnahme 2003 wird noch eingegangen. Die Anzahl der Punkte mit höheren spezifischen Aktivitäten > 200 Bq/kg nehmen mit der Zeit deutlich ab.

Spezifische Aktivitäten Thorium-232

- Die statistischen Maßzahlen der spezifischen Thoriumaktivitäten zeichnen sich dadurch aus, dass der arithmetische Mittelwert und der Median fast gleich sind, was auf eine mehr oder weniger symmetrische Verteilung schließen lässt.
- Bei den Thorium-Werten ist kein Unterschied zwischen den Hintergrunddaten und den Pufferdaten zu erkennen. Es ist jedoch eine geringe Abnahme der spezifischen Aktivitäten in der Zeit für beide Messpunktgruppen zu erkennen. Auf die Besonderheiten der Thorium-Werte im Teilgebiet Aue und dort speziell auf die Werte größer als 70 Bq/kg wird in Kapitel 5.2.2 näher eingegangen.

ODL

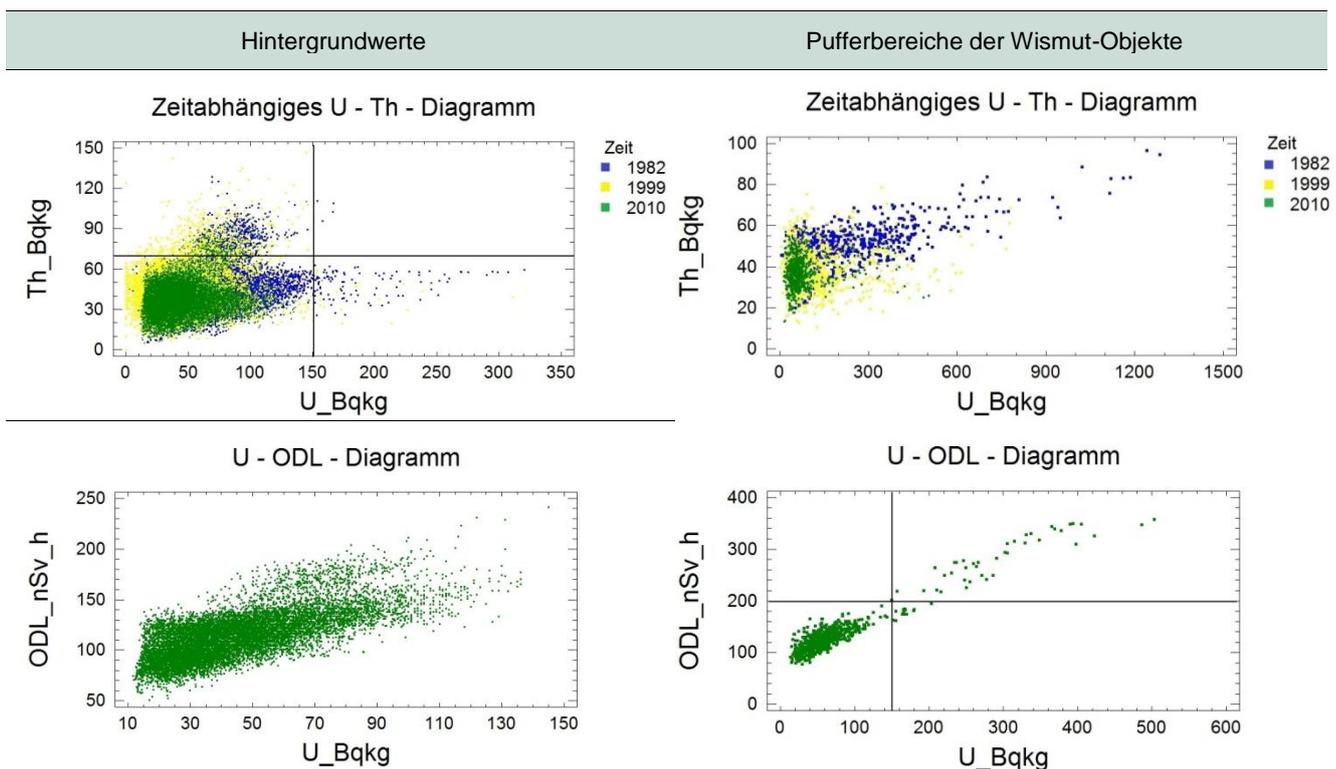
Bezüglich der zeitlichen Entwicklung der ODL-Werte können keine sicheren Aussagen getroffen werden, weil

- die Daten 2003 problembehaftet sind (siehe Kapitel 5.2.3),
- dadurch nur noch ein Zeitschnitt 2010 zur Verfügung steht.

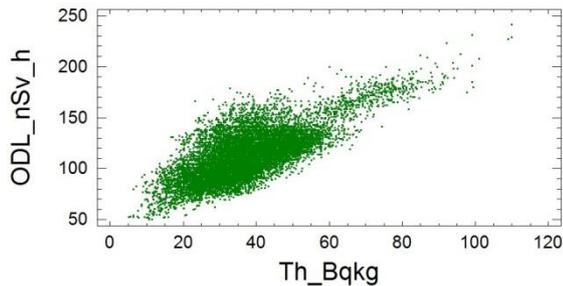
Bemerkenswert sind lediglich die Werte größer 200 nSv/h im Pufferbereich. Auf sie wird im Kapitel 4.2.4 näher eingegangen.

4.2.4 Paarweise Parameterbetrachtungen

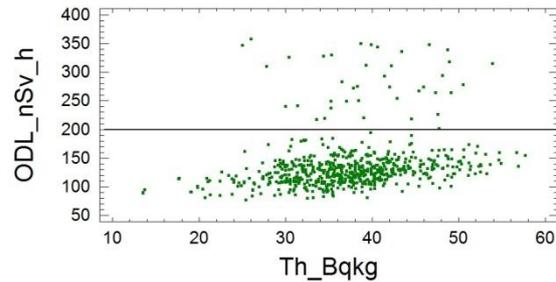
Tabelle 11: Grafische Übersicht der paarweisen Abhängigkeiten U-238 – Th-232 – ODL



Th - ODL - Diagramm



Th - ODL - Diagramm



Erläuterung: Die Daten des Jahres 2003 wurden ausgeschlossen (siehe Kapitel 5.2.3). Die oberste Tabellenzeile stellt die Messwertpaare (U-238 – Th-232) für die Messzeitpunkte 1982 (blau), 1999 (gelb) und 2010 (grün) dar. Links sind die Hintergrunddaten zu sehen, rechts die Daten der gepufferten Wismutbereiche. Die anderen Darstellungen zeigen nur noch Wertepaare aus 2010 (s. Tabelle 6 und Tabelle 7). In der mittleren Zeile sieht man U-238 – ODL und in der unteren Zeile Th-232 – ODL.

U-238 – Th-232

Das Diagramm mit den Hintergrunddaten zeigt ein zweigeteiltes Bild. Der Schnitt, der die zwei Teile trennt, kann etwa bei $A(\text{Th-232}) = 70 \text{ Bq/kg}$ angesetzt werden. Die Messwertpaare über dem Schnitt repräsentieren Punkte aus dem Eibenstocker Granit.

Die Messwertpaare unter dem Schnitt zeigen bis etwa 150 Bq/kg U-238 keinerlei Abhängigkeiten zwischen U-238 und Th-232. Für Werte darüber zeichnet sich eine schwache Abhängigkeit ab, insbesondere für die Wertepaare aus dem Pufferbereich. Dies gilt unabhängig vom jeweiligen Messzeitpunkt.

U-238 – ODL

Die soeben beschriebene Zweiteilung ist für die Hintergrunddaten ebenso in diesem Diagramm ersichtlich.

Für die Hintergrundflächen weisen Punkte mit ODL-Werten $> 150 \text{ nSv/h}$ überwiegend auf Flächen im Kirchberger Granit hin, aber auch auf Gebiete südlich und südwestlich der Wismutflächen. Innerhalb der gepufferten Wismutgebiete liegen die Punkte mit höheren ODL-Werten $> 200 \text{ nSv/h}$ und spezifischen Aktivitäten von U-238 von $> 150 \text{ Bq/kg}$ in den Betriebsflächen Schacht 371 sowie der Halde 371/1 und in Betriebsfläche und Halden Schacht 12/259/309. Die Messpunkte mit den jeweils geringeren Werten stammen aus der Halde 371/2 sowie aus Betriebsfläche und Halde Schacht 310, aus Teilen der Halden 366/1, 186 und 383 sowie aus Teilen der Halde 66/207.

Th-232 – ODL

Auch hier kann man die Zweiteilung für die Hintergrunddaten deutlich erkennen. Bemerkenswert ist die Abhängigkeit zwischen Th und ODL im Hintergrundbereich: spezifische Aktivitäten von Th-232 $> 60\text{-}70 \text{ Bq/kg}$ weisen auf eine Herkunft der Messpunkte fast ausschließlich aus dem Kirchberger Granit hin.

In den Wismutgebieten werden solche Th-232-Aktivitäten nicht erreicht. Hier gibt es für $\text{ODL} < 200 \text{ nSv/h}$ eine schwache Abhängigkeit zwischen ODL und Th-232. Zu den Messpunkten mit $\text{ODL} > 200 \text{ nSv/h}$ – siehe oben (U-238 – ODL).

4.3 Teilgebiet Johannegeorgenstadt

4.3.1 Statistische Maßzahlen

Tabelle 12: Statistische Maßzahlen (Hintergrundwerte)

Parameter	Anzahl	arithm. Mittel	Median	Standardabweichung	Min	Max
U_1982 [Bq/kg]	3.245	64,8	60,1	22,8	12,1	243,2
U_2003 [Bq/kg]	3.485	67,4	65,3	26,5	0,3	202,2
U_2010 [Bq/kg]	2.741	49,7	47,3	20,1	13,6	141,0
Th_1982 [Bq/kg]	3.245	31,8	33,0	10,9	4,1	57,9
Th_2003 [Bq/kg]	3.486	36,8	36,2	14,4	1,7	92,1
Th_2010 [Bq/kg]	2.741	24,4	24,6	9,3	5,0	55,5
ODL_2003 [nSv/h]	3.486	105,0	103,0	19,5	26,0	185,6
ODL_2010 [nSv/h]	2.741	100,3	97,0	18,9	49,7	177,0

Tabelle 13: Statistische Maßzahlen (Pufferbereich der Wismut-Objekte)

Parameter	Anzahl	arithm. Mittel	Median	Standardabweichung	Min	Max
U_1982 [Bq/kg]	266	177,5	162,6	101,7	47,4	497,8
U_2003 [Bq/kg]	489	138,1	124,1	66,5	25,1	409,0
U_2010 [Bq/kg]	326	112,9	99,5	55,4	18,1	283,0
Th_1982 [Bq/kg]	266	52,5	52,2	9,3	23,7	72,1
Th_2003 [Bq/kg]	489	53,0	53,4	12,9	19,7	90,1
Th_2010 [Bq/kg]	326	38,9	39,1	8,3	9,9	67,3
ODL_2003 [nSv/h]	489	167,7	158,1	44,2	86,8	305,6
ODL_2010 [nSv/h]	326	156,1	150,0	40,3	83,4	276,0

4.3.2 Histogramme

Tabelle 14: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen U-238-Histogramme

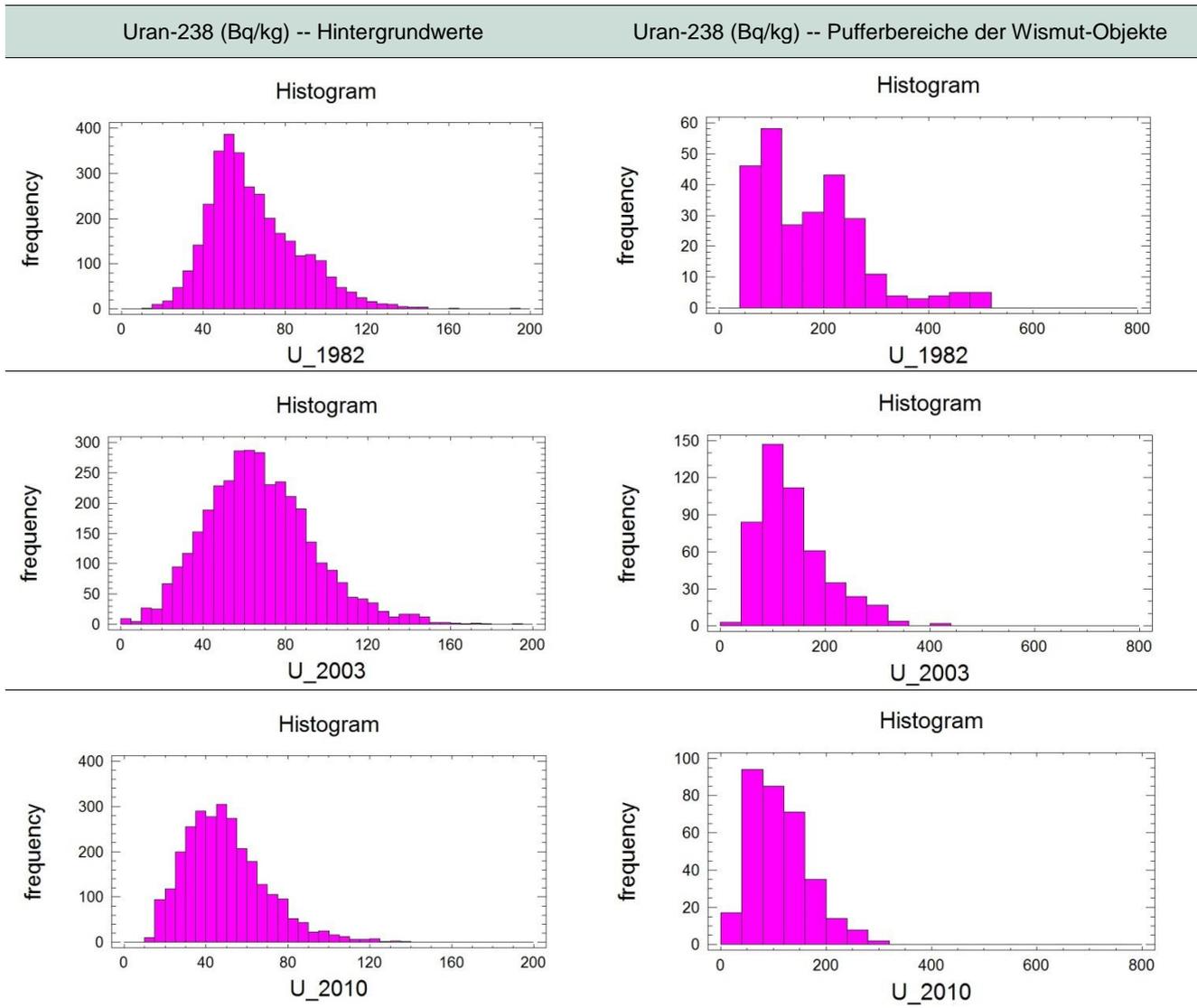


Tabelle 15: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen Th-232-Histogramme

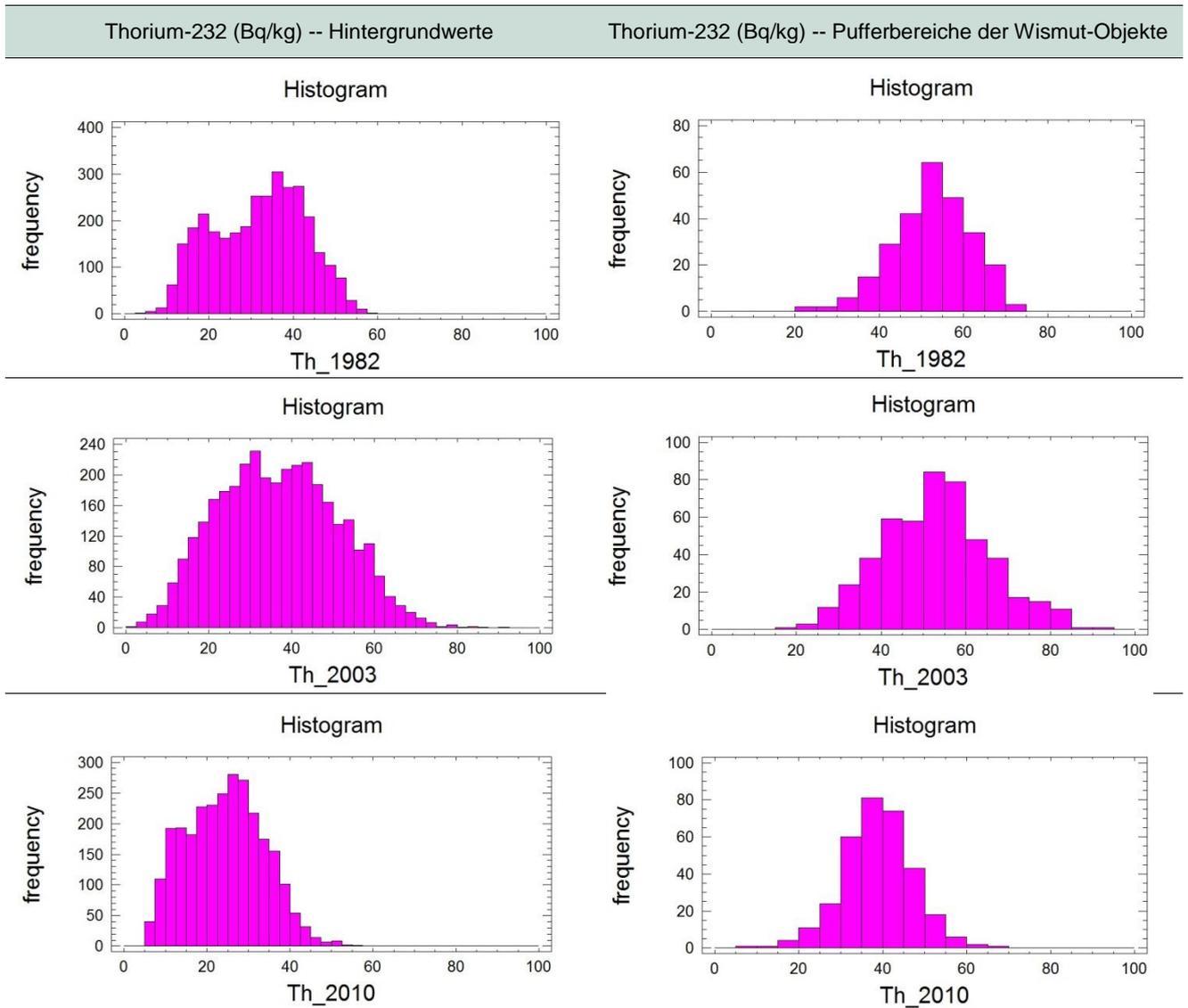
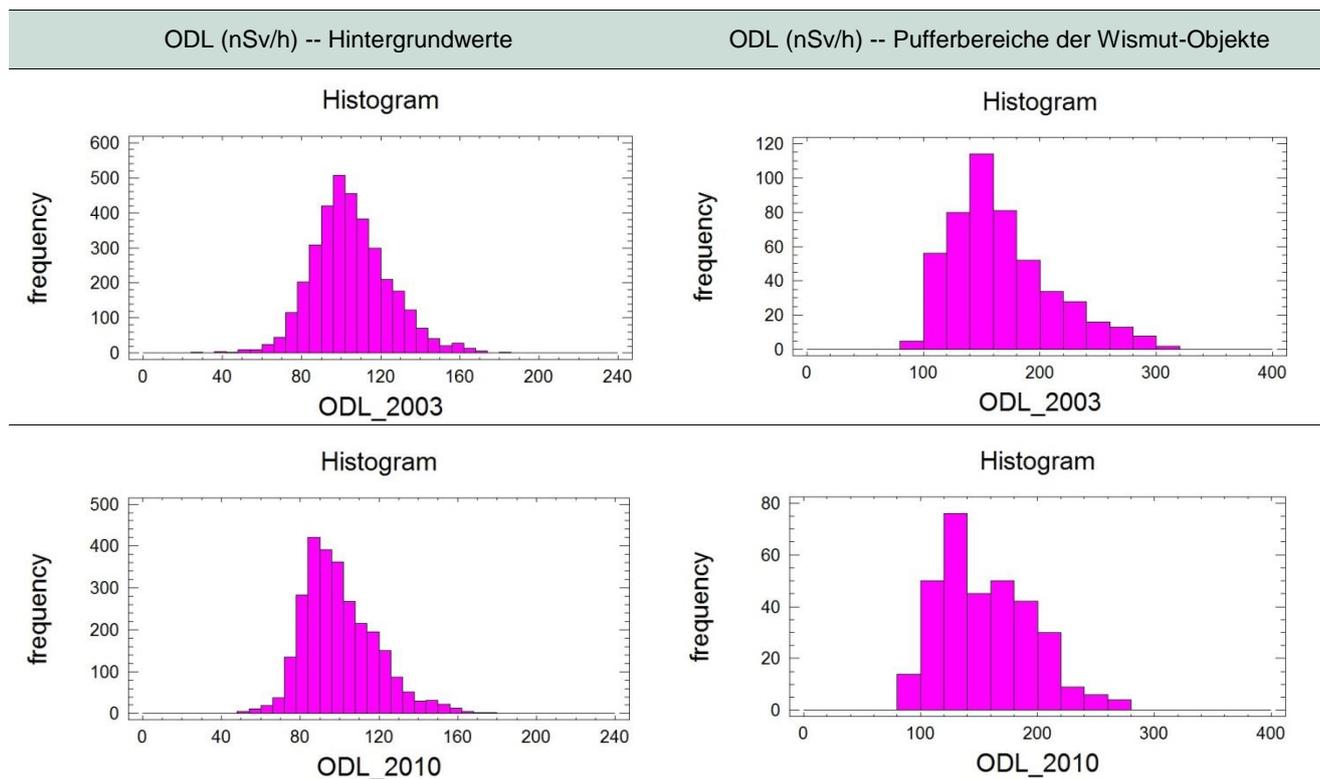


Tabelle 16: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen ODL-Histogramme



4.3.3 Vergleichende Betrachtungen der Einzelparameter

Spezifische Aktivitäten Uran-238

- Ähnlich wie für das Teilgebiet Aue ist bei den statistischen Maßzahlen der arithmetische Mittelwert grundsätzlich größer als der Median. Das ist charakteristisch für eine rechtsschiefe Verteilung, was auch durch die empirischen Histogramme unterstrichen wird.
- Die Uran-Werte verhalten sich im Wesentlichen so, wie in Kapitel 3.6 angenommen:
 - Die Werte im Pufferbereich der Wismut-Objekte sind höher als die in den Hintergrundbereichen.
 - Die Hintergrundwerte ändern sich von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt nur unwesentlich. Eine Ausnahme machen die Messwerte 2003, worauf in Kapitel 5.2.3 noch Bezug genommen wird.
 - Die Pufferwerte werden von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt deutlich kleiner. Auf die Ausnahme 2003 wird noch eingegangen. Die Anzahl der Punkte mit höheren spezifischen Aktivitäten > 200 Bq/kg nimmt mit der Zeit deutlich ab.

Spezifische Aktivitäten Thorium-232

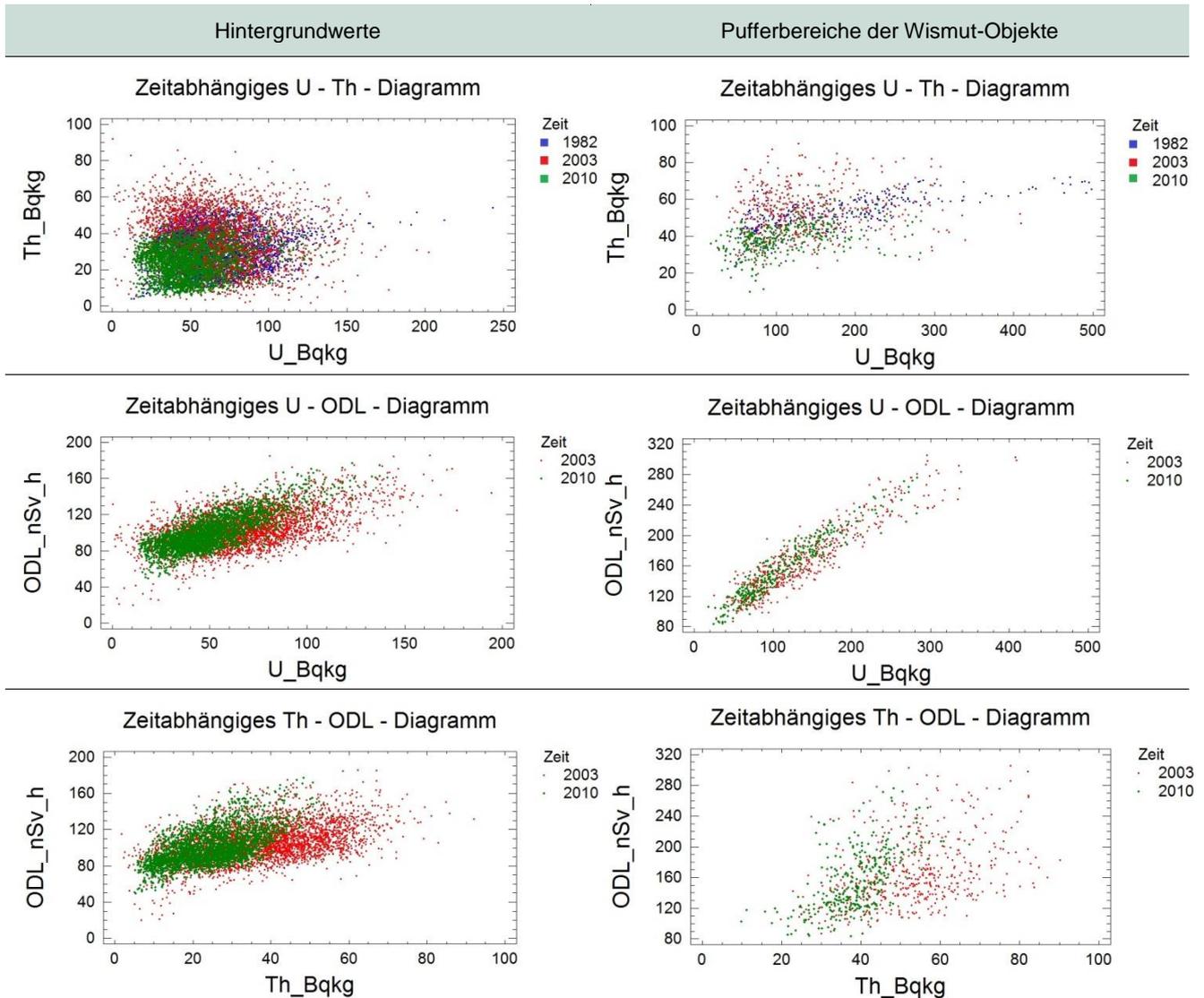
- Die Thorium-Werte verhalten sich etwas anders als die aus dem Teilgebiet Aue.
- Die Pufferbereiche weisen durchweg höhere Werte auf als die Hintergrundbereiche.
- Die Hintergrundwerte 1982 sind im Histogramm durch eine Zweigipfligkeit gekennzeichnet, auf die in Kapitel 5.2.2 noch näher eingegangen wird. Der Trennwert der beiden Gipfel liegt bei etwa 25 Bq/kg.

ODL

- Die Daten 2003 sind nicht problemfrei. (siehe Kapitel 5.2.3).
- Trotzdem kann festgestellt werden, dass die Pufferbereiche grundsätzlich höhere Messwerte aufweisen als die Hintergrundbereiche.
- Eine Aussage zur zeitlichen Entwicklung kann nicht abgeleitet werden.

4.3.4 Paarweise Parameterbetrachtungen

Tabelle 17: Grafische Übersicht der paarweisen Abhängigkeiten U-Th-ODL



Erläuterung: Die oberste Tabellenzeile stellt die Messwertpaare (U-238 – Th-232) für die Messzeitpunkte 1982 (blau), 2003 (rot) und 2010 (grün) dar. Links sind die Hintergrunddaten zu sehen, rechts die Pufferdaten. Die anderen Darstellungen zeigen nur noch Wertepaare aus 2003 und 2010. In der mittleren Zeile sieht man U-238 – ODL und in der unteren Zeile Th-232 – ODL.

U-238 – Th-232

Aus beiden Diagrammen ist keine deutliche Abhängigkeit zwischen den beiden Parametern zu erkennen. (Verteilung und Verbreitung der beiden Elemente unterliegen überwiegend unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten und haben überwiegend unterschiedliche, unabhängig voneinander begründete Herkunft.) Speziell kann man bei größeren Uran-Werten nicht automatisch auf höhere Thorium-Werte schließen.

Die Messpunkte mit spezifischen Aktivitäten von U-238 > 300 Bq/kg stammen im Jahr 1982 aus Teilen der Verladestelle Breitenbrunn, dem Absetzbecken J1, der Erzfabrik 98, der Halde nördlich Steigerstraße bzw. östlich Erzfabrik 98 und der Halde am Külliggut. 2010 werden dort keine spezifischen Aktivitäten von U-238 > 300 Bq/kg mehr gemessen.

U-238 – ODL

Uran und ODL zeigen naturgemäß eine sehr gute Abhängigkeit. Das Verhalten ist mit dem aus dem Teilgebiet Aue vergleichbar.

Spezifischen Aktivitäten von U-238 > 200 Bq/kg stammen immer aus den Wismutobjekten, die > 100 Bq/kg meist aus deren Pufferbereichen.

Th-232 – ODL

Das Th-232 – ODL-Diagramm im Hintergrundbereich zeigt eine ähnliche, rel. schwache Abhängigkeit der Parameter wie U-238 – ODL. In beiden Diagrammen ist die grüne Punktwolke (Daten aus dem Jahr 2010) bei deutlich geringeren Werten der spezifischen U-238- bzw. Th-232-Aktivitäten konzentriert, als die rote Punktwolke (Daten aus dem Jahr 2003). Im Bereich der Wismutobjekte sind nur sehr undeutliche gegenseitige Abhängigkeiten zu verzeichnen.

4.4 Teilgebiet Zwickau

4.4.1 Statistische Maßzahlen

Tabelle 18: Statistische Maßzahlen (Hintergrundwerte)

Parameter	Anzahl	arithm. Mittel	Median	Standardabweichung	Min	Max
U_1997 [Bq/kg]	1.800	79,5	63,6	67,6	0,2	775,5
U_1999 [Bq/kg]	7.563	49,0	43,6	32,5	0,01	1000,7
U_2003 [Bq/kg]	6.181	66,4	60,9	37,4	0,2	814,6
U_2010 [Bq/kg]	3.852	56,0	51,6	24,3	12,8	198,0
Th_1997 [Bq/kg]	1.804	37,6	35,8	16,6	0,3	215,6
Th_1999 [Bq/kg]	7.563	33,9	34,0	10,5	0,004	125,1
Th_2003 [Bq/kg]	6.191	34,7	33,2	13,6	0,6	109,1
Th_2010 [Bq/kg]	3.853	32,8	33,3	8,1	5,2	63,8
ODL_1997 [nSv/h]	1.804	144,1	120,8	86,2	65,1	965,0
ODL_2003 [nSv/h]	6.199	98,6	95,5	29,5	3,6	466,8
ODL_2010 [nSv/h]	3.853	112,6	113,0	20,9	36,0	210,0

Tabelle 19: Statistische Maßzahlen (Pufferbereich der Wismut-Objekte)

Parameter	Anzahl	arithm. Mittel	Median	Standardabweichung	Min	Max
U_1997 [Bq/kg]	446	863,9	376,9	1307,3	8,3	9432,3
U_1999 [Bq/kg]	762	400,4	313,3	394,9	0,01	1458,8
U_2003 [Bq/kg]	788	693,2	494,1	805,1	21,7	7604,1
U_2010 [Bq/kg]	339	314,7	125,0	446,0	36,3	2210,0
Th_1997 [Bq/kg]	446	58,4	37,1	75,0	0,1	677,1
Th_1999 [Bq/kg]	762	31,7	30,6	19,6	0,004	147,0
Th_2003 [Bq/kg]	788	33,3	32,4	14,9	0,3	92,9
Th_2010 [Bq/kg]	339	32,1	33,2	9,1	9,1	62,7
ODL_1997 [nSv/h]	446	553,1	273,7	739,0	35,2	5570,5
ODL_2003 [nSv/h]	788	475,5	361,0	464,9	61,2	4310,2
ODL_2010 [nSv/h]	339	279,5	172,0	252,8	80,8	1340,0

4.4.2 Histogramme

Tabelle 20: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen U-238-Histogramme

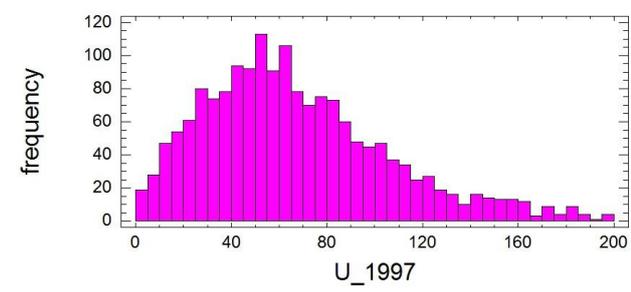
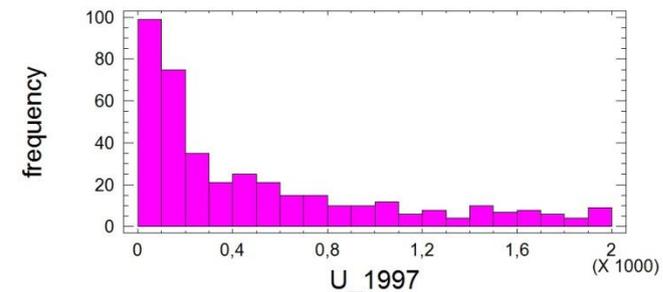
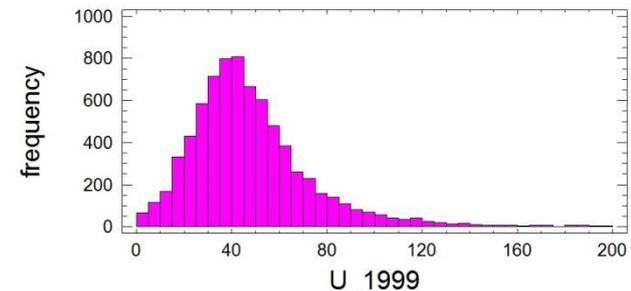
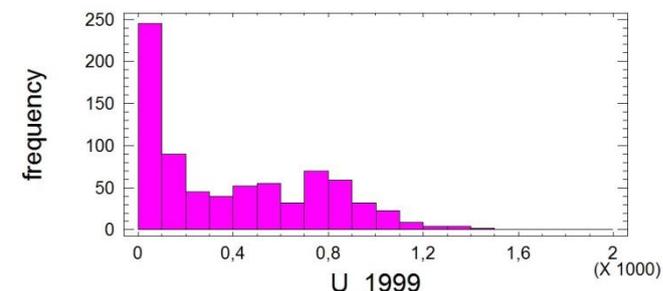
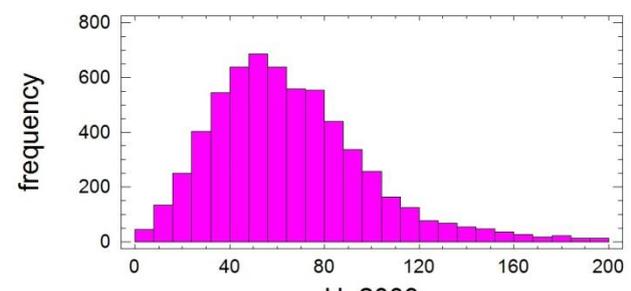
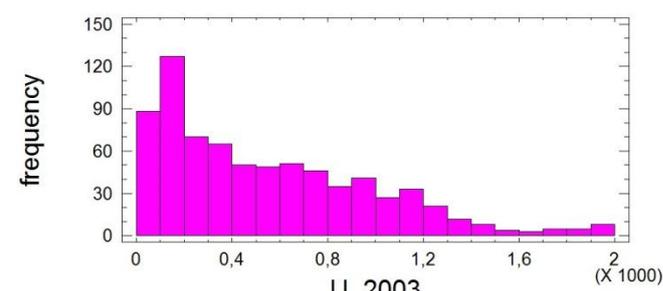
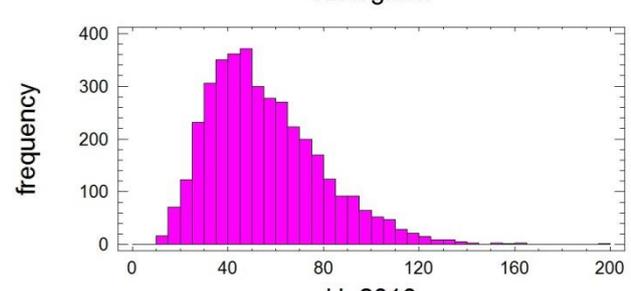
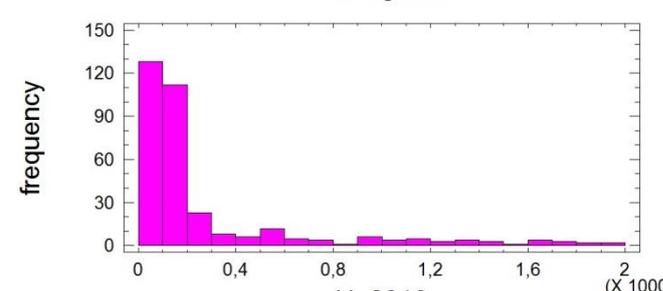
Uran-238 (Bq/kg) -- Hintergrundwerte	Uran-238 (Bq/kg) -- Pufferbereiche der Wismut-Objekte
<p style="text-align: center;">Histogram</p> 	<p style="text-align: center;">Histogram</p> 
<p style="text-align: center;">Histogram</p> 	<p style="text-align: center;">Histogram</p> 
<p style="text-align: center;">Histogram</p> 	<p style="text-align: center;">Histogram</p> 
<p style="text-align: center;">Histogram</p> 	<p style="text-align: center;">Histogram</p> 

Tabelle 21: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen Th-232-Histogramme

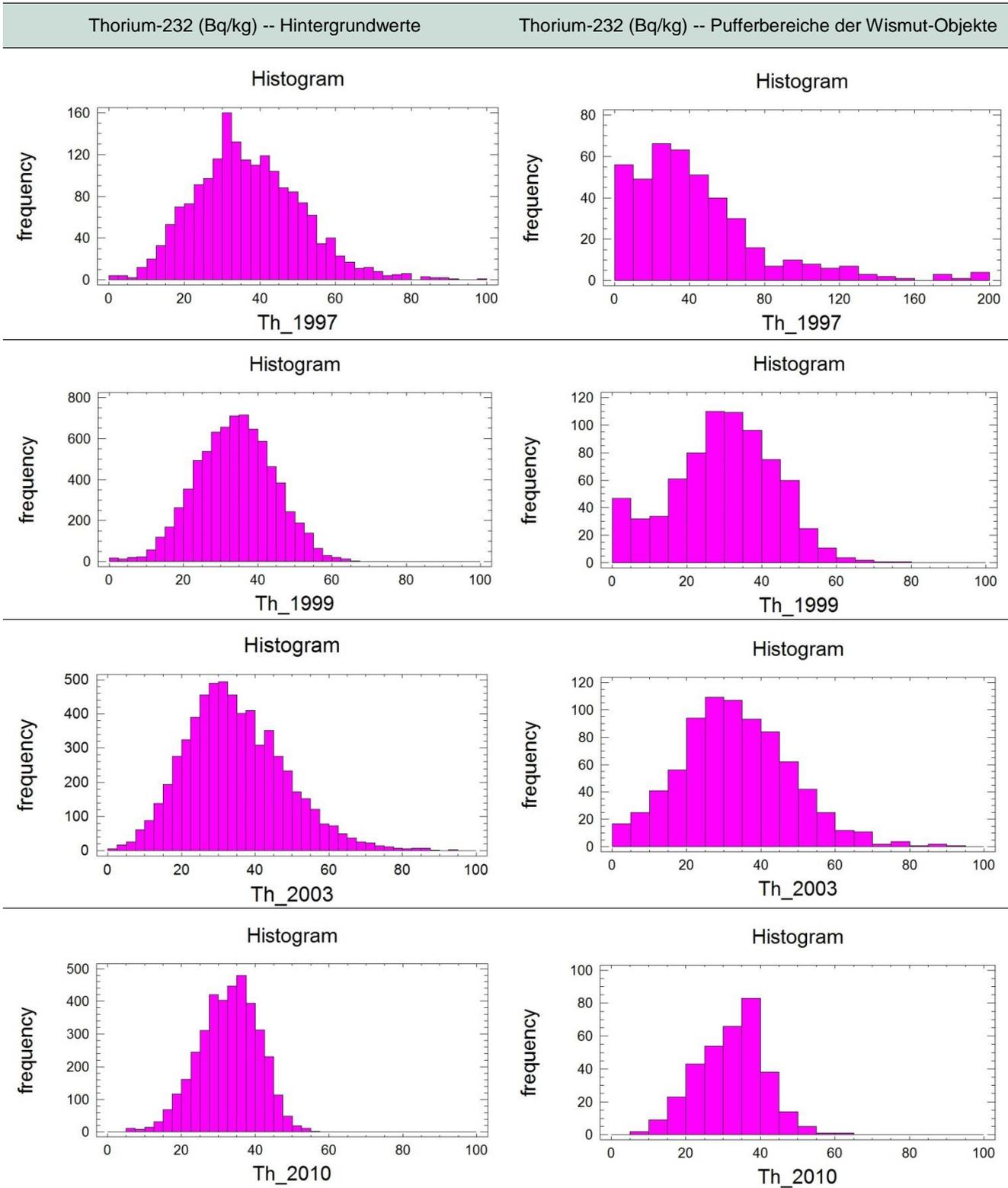
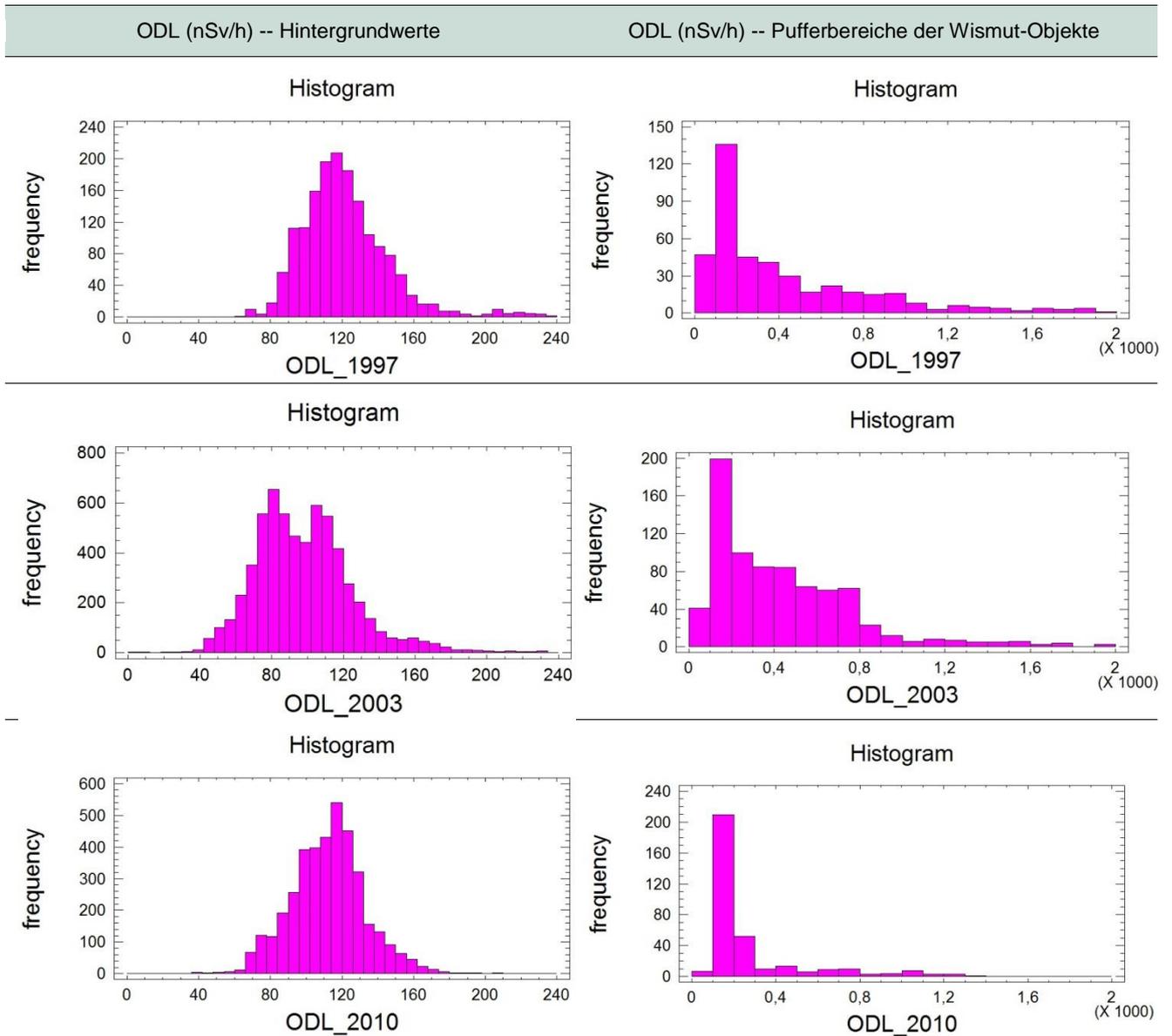


Tabelle 22: Gegenüberstellung der messzeitpunktbezogenen ODL-Histogramme



4.4.3 Vergleichende Betrachtungen der Einzelparameter

Spezifische Aktivitäten Uran-238

- Die statistischen Maßzahlen arithmetisches Mittel, Median und Maximum der Pufferwerte sind im Vergleich zu den Werten aus Aue und Johannegeorgenstadt um rund eine Zehnerpotenz größer. Für die Hintergrundbereiche ist ebenfalls eine Erhöhung zu konstatieren, aber um nicht mehr als das Doppelte. Dafür sind generell die Auenbereiche der Zwickauer Mulde nördlich von Crossen verantwortlich.
- Der rechtsschiefe Charakter der Verteilung der Hintergrundwerte ist auch in Zwickau zu registrieren. Im Gegensatz dazu kann über die statistische Verteilung der U-Werte im Puffergebiet keine solch eindeutige Aussage getroffen werden. Die Werte weisen eine sehr große Spanne auf. Teilweise ist eine Mehrgipfligkeit zu vermuten (siehe U_1999).
- Die Werte im Pufferbereich der Wismut-Objekte sind deutlich höher als die Hintergrundwerte. Die Hintergrundwerte ändern sich in der Zeit nur unwesentlich.

Die Entwicklung der Pufferwerte hin zu kleineren Werten ist erst 2010 zu konstatieren.

Spezifische Aktivitäten Thorium-232

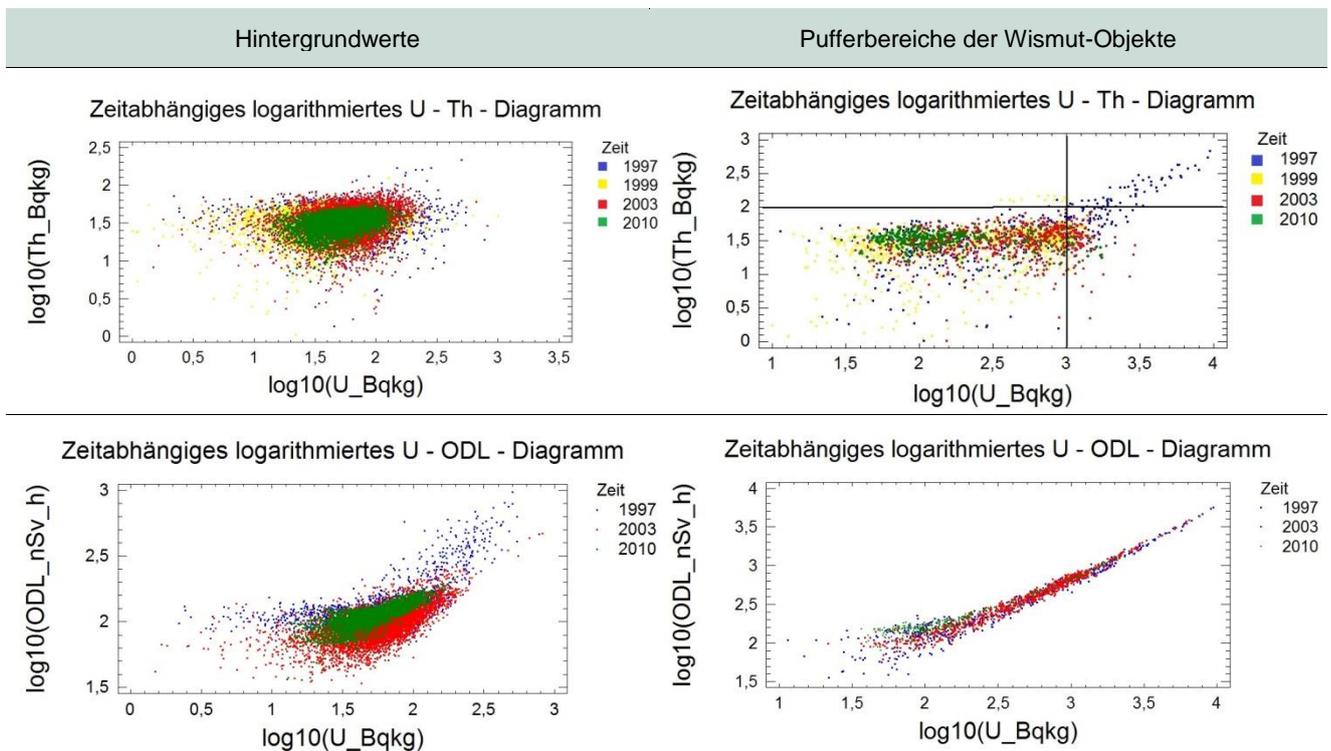
- Im Unterschied zu Uran liegen die statistischen Maßzahlen für Thorium im vergleichbaren Bereich wie für die Teilgebiete Aue und Johannegeorgenstadt.
- Mit Ausnahme der Pufferdaten 1997 zeichnen sich die statistischen Maßzahlen der Thoriumdaten dadurch aus, dass der arithmetische Mittelwert und der Median fast gleich sind, was auf eine mehr oder weniger symmetrische Verteilung schließen lässt.
- Bei fast allen Thorium-Werten ist kein Unterschied zwischen den Hintergrunddaten und den Pufferdaten zu erkennen. Es ist eine geringe Abnahme der höheren Messwerte in der Zeit für beide Messpunktgruppen zu erkennen.

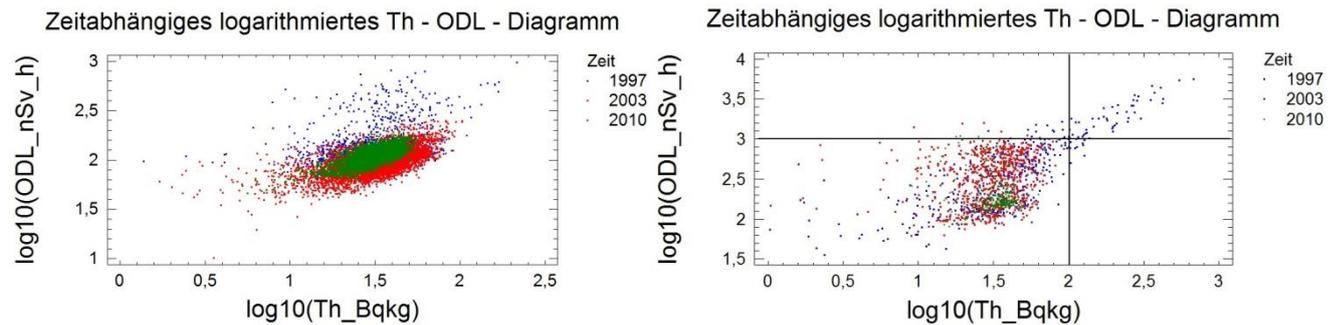
ODL

- Die ODL-Werte der Hintergrunddaten des Teilgebietes Zwickau liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie in Aue und Johannegeorgenstadt, bei den Pufferdaten ist für den Unterschied der Faktor 3 anzusetzen.
- Die Zweigipfligkeit der Hintergrunddaten 2003 ist wahrscheinlich einem Kalibrierungsfehler der Messapparatur eines Messteams zuzuschreiben. Der Kalibrierungsfehler hat auch Auswirkung auf die anderen Parameter, ist im Histogramm jedoch nur bei ODL zu sehen (siehe dazu auch Kapitel 5.2.3).

4.4.4 Paarweise Parameterbetrachtungen

Tabelle 23: Grafische Übersicht der paarweisen Abhängigkeiten U-Th-ODL





Erläuterung: Die oberste Tabellenzeile stellt die Messwertpaare (U-238 – Th-232) für die Messzeitpunkte 1997 (blau), 1999 (gelb), 2003 (rot) und 2010 (grün) dar. Links sind die Hintergrunddaten zu sehen, rechts die Pufferdaten. Die anderen Darstellungen haben keine Wertepaare aus 1999. In der mittleren Zeile sieht man

U-238 – ODL und in der unteren Zeile Th-232 – ODL. In Anbetracht der hohen U- und ODL-Messwerte im Vergleich zu den Daten aus Aue und Johanngeorgenstadt wurden alle Achsen logarithmisch dargestellt.

U-238 – Th-232

Das Diagramm mit den Hintergrunddaten deutet nicht auf Abhängigkeiten hin. Auch in den Pufferdaten sind Abhängigkeiten erst ab U-238 = 1000 Bq/kg und Th-232 = 100 Bq/kg zu erkennen. Am deutlichsten zeigen das die Daten aus 1997, die aber nur einen Teil der Wismut-Objekte überdecken, nämlich die Absetzbecken Dänkriz I und II und Helmsdorf.

Spezifische Aktivitäten U-238 > 1.000 Bq/kg werden in allen Messzeiträumen in den Wismutflächen immer auf den IAA Helmsdorf und Dänkriz (I und II) sowie auf der Bergehalde Crossen und untergeordnet der Aufbereitungsanlage Crossen (bei den beiden letzten Einheiten fehlt die Messung 1997) gemessen. Diese Flächeneinheiten sind großflächig. Solch hohe spezifische Aktivitäten U-238 sind im Teilgebiet Johanngeorgenstadt nicht und im Teilgebiet Aue nur im Messzeitraum 1982 vereinzelt anzutreffen (maximal 1.284 Bq/kg). Deshalb lassen sich in den entsprechenden oberen Zeilen der Tabelle 11 (Aue) und Tabelle 17 (Johanngeorgenstadt) auch nur geringe bzw. keine Abhängigkeiten zwischen den spezifischen Aktivitäten von U-238 und Th-232 ablesen.

Dass in Substraten mit spezifischen Aktivitäten von U-238 < 1.000 Bq/kg und Th-232 < 100 Bq/kg innerhalb der Wismutflächen auch zu Zeiten einer noch nicht bzw. gerade begonnenen Sanierung wenig bis keine Abhängigkeiten zwischen den beiden Parametern auftreten, wird mit der Verteilung der Thoriumführung in den Erzen zusammenhängen – offensichtlich sind die thoriumführenden Minerale (idiomorphe, grobkristalline Fazies von Uraninit bzw. Coffinit) im geringen Gehalts-/Aktivitätsbereich während des Aufbereitungsprozesses alle extrahiert worden und nicht mit in die Berge gegangen.

U-238 – ODL

Im Diagramm der Hintergrunddaten bilden die Datenpunkte der ODL-Werte aus den Jahren 1997 und 2003 deutlich getrennte Verbreitungsgebiete, wobei die Messwerte aus dem Jahr 1997 generell höher liegen als die aus dem Jahr 2003. Ursache dafür ist wahrscheinlich die verhältnismäßig geringe Überdeckung des gesamten Teilgebiets Zwickau durch die 1997er-Befliegung. Insgesamt sind Abhängigkeiten der ODL-Werte von den spezifischen Aktivitäten U-238 angedeutet bis gut ersichtlich. Ein äußerst enger Zusammenhang

zwischen den beiden Parametern ist für den gesamten Datenbestand des Pufferbereichs und für alle Messzeitpunkte zu verzeichnen.

Th-232 – ODL

Die Messpunkte außerhalb der Wismutflächen mit spezifischen Aktivitäten von Th-232 > 100 Bq/kg (alle aus dem Jahr 1997) liegen alle auf einem Ost-West-Flugprofil südlich der IAA Helmsdorf im Bereich Königswalde. Dort gibt es für diese spezifischen Aktivitäten keine geologischen Indikationen bzw. auf diesem Profil werden keine Wismutflächen gequert.

Innerhalb der Wismutflächen weisen die Parameterpaare nur für die 1997er-Daten und für Thorium-Werte über 100 Bq/kg und ODL-Werte über 1.000 nSv/h Abhängigkeiten zu den ODL-Werten auf.

5 Räumliche Auswertungen

5.1 Auswahl des geeigneten Auswerteverfahrens

Für die flächendeckende Darstellung von Messwerten aus Punktdaten stehen traditionell zwei unterschiedliche Gruppen von Interpolationsverfahren zur Verfügung:

■ Messpunkttreue Verfahren

- in jedem Messpunkt ist das Ergebnis der Interpolation der Messwert selbst
- bringen keine Aussage über die Genauigkeit der Interpolation zwischen den Messpunkten
- sind z. B.
 - das Voronoi-Mosaik oder Thiessen-Polygone
 - die Inverse Distance Weighting (IDW)

■ Geostatistische Verfahren

- Vorhersage in jedem Punkt besteht nicht nur aus einem Wert
 - Zumindest zwei Werte (Schätzwert und Schätzfehler)
 - Modernere Verfahren liefern eine vollständige Verteilungsdichte als Interpolationsergebnis; aus dieser Dichte kann man sich je nach Aufgabenstellung entsprechende Werte ableiten, so z. B. Perzentile wie den Median anstelle des Erwartungswerts, der üblicherweise als Schätzwert verwendet wird
- Der Schätzwert im Messpunkt muss dadurch nicht zwangsläufig mit dem Messwert übereinstimmen.
- Dafür erhält man eine Aussage über die Güte der Schätzung in jedem beliebigen Punkt.
- sind z.B.
 - Ordinary Kriging
 - Universal Kriging
 - Indikator Kriging

In HERTWIG & ZEIBLER (2012) wurden für die Auswertung von Bodenmessdaten methodische Untersuchungen unternommen, Punktdaten in die Fläche zu bringen. Dabei wurden alle aufgeführten Verfahren auf ihre Brauchbarkeit zur Lösung der Aufgabenstellung untersucht. Die vorliegende Aufgabenstellung ist mit der Auswertung der Bodenmessdaten durchaus vergleichbar. Selbst die unterschiedlichen Maßstäbe, in denen gearbeitet wird, stellen kein prinzipielles Hindernis dar (1: 10.000 für die Bodendaten gegen 1: 25.000 für die Aerogammamessdaten). Die dort vorgestellten methodischen Ergebnisse sollen als Grundlage für die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung dienen.

Der Grundgedanke besteht darin, dass nicht ein einziges digitales Verfahren die Aufgabe löst, sondern dass in mehreren Schritten gearbeitet wird:

- **Erstbewertung:** Hier hat sich die Verwendung des Voronoi-Mosaiks als ein sehr gutes Instrument herausgestellt. Wie man es verwendet, um grobe Datenfehler zu erkennen, wird im nachfolgenden Kapitel gezeigt.
- **HRE:** steht für „Homogene Raumeinheiten“. Das Untersuchungsgebiet wird in Teilgebiete untergliedert. Von jedem Teilgebiet wird angenommen, dass sich die Messwerte dort nicht sprunghaft ändern. Sprünge erfolgen an den Rändern der HRE. In der vorliegenden Aufgabenstellung dienen die gepufferten Wismutgebiete und die Hintergrundgebiete als HRE. Näheres siehe Kapitel 5.3.2
- **Interpolation je HRE:** Je HRE erfolgt die Interpolation unter Verwendung aller Messwerte innerhalb der HRE. Als Interpolationsverfahren wird dabei Universal Kriging verwendet. Es liefert zwar vergleichbare Schätzwerte wie Ordinary Kriging, kann aber im Allgemeinen die plausibleren Schätzfehler aufweisen und ist von seinem mathematischen Ansatz umfassender in seiner Funktionalität. Das Indikator Kriging fand in der vorliegenden Aufgabenstellung keine Anwendung.
- **Montage der Teilinterpolationen zu einem Gesamtergebnis:** Die Montage erfolgt wie auch die Berechnung der Voronoi-Mosaik und der Kriging-Ergebnisse mit Hilfe von ArcGIS 10.2 und der Programm-erweiterungen Geostatistical Analyst und Spatial Analyst.
- **Bewertung der Ergebnisse:** Das Spezifische der vorliegenden Aufgabenstellung besteht im Nachweis einer Entwicklung der Messwerte, die das räumliche und zeitliche Sanierungsgeschehen in den Wismutgebieten der drei Teilgebiete Aue, Johanngeorgenstadt und Zwickau widerspiegeln.

An einem konkreten Beispiel soll gezeigt werden, weshalb IDW nicht in die engere Auswahl als Interpolationsverfahren gelangte.

Voronoi-Mosaik

Interpolation mittels IDW

Universal Kriging

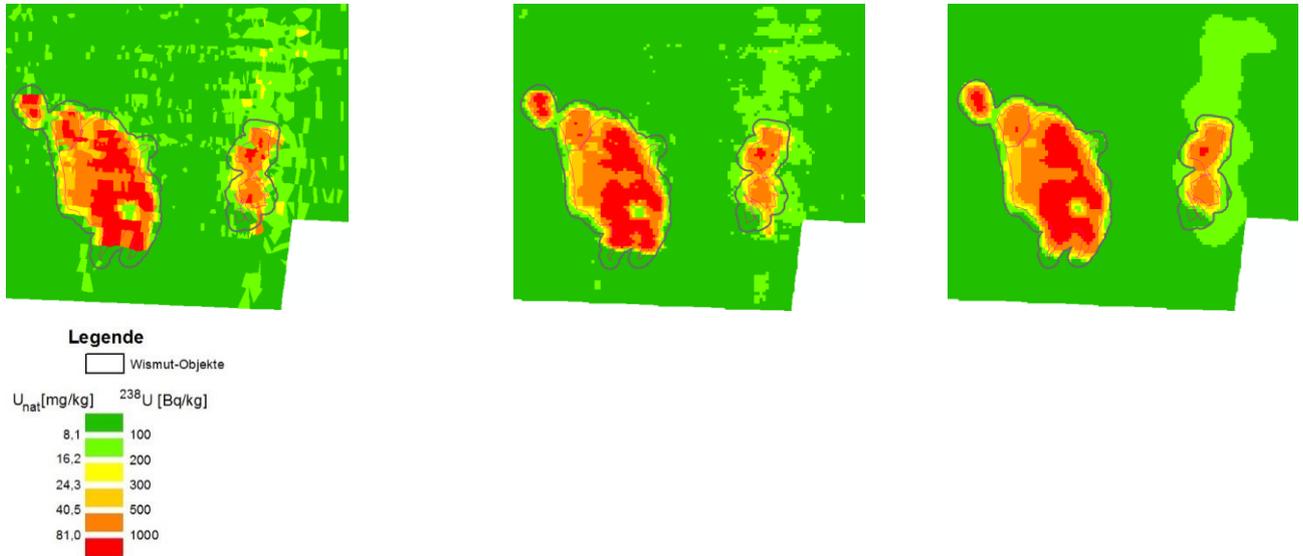


Abbildung 9: IDW im Vergleich mit Voronoi-Mosaik und Universal Kriging (Zwickau, U-238, 2003)

Die Uranmesswerte Zwickau 2003 sind problembehaftet (siehe Kapitel 5.2.3). IDW kann die lokalen Schwankungen wegen der Messpunkttreue nur bedingt glätten. Universal Kriging kann das deutlich besser.

5.2 Erstbewertung mittels Voronoi-Mosaik

5.2.1 Beispiel Uran-238 in Aue

Voronoi-Mosaik entstehen aus Messpunkten, die in der Ebene verteilt sind. Jedes Voronoi-Mosaik besteht aus konvexen Polygonen, die Zellen genannt werden. Innerhalb jeder Zelle liegt genau ein Messpunkt. Jede Zelle hat die Eigenschaft, dass für jeden gewöhnlichen Punkt der Zelle der zugehörige Messpunkt der nächstgelegene aus allen Messpunkten ist. Die Zellen bedecken lückenlos die Fläche. Andererseits überlappen sie sich nicht. Benachbarte Zellen werden durch Strecken begrenzt. Haben zwei Zellen eine gemeinsame Grenze, so gelten die zugehörigen Messpunkte als Delaunay-Nachbarn.

Wenn die Messpunkte jeweils einen Messwert haben, so kann man diesen Messwert der zugehörigen Zelle zuordnen und dadurch eine flächenfüllende Darstellung des Messwertfeldes erzielen. In HERTWIG & ZEISSLER (2012) wurde ausführlich auf die Methodik der Verwendung von Voronoi-Mosaiken für die Erstbewertung von numerischen räumlichen Daten eingegangen. Die wichtigsten Bewertungskriterien sind

- die Messwerte selbst,
- die arithmetischen Mittel aus den Delaunay-Nachbarn,
- die Standardabweichungen aus den Delaunay-Nachbarn.

Aus dem Gesamtumfang der bearbeiteten Daten in den drei Teilgebieten wurden einige wenige beispielhaft herausgegriffen. Das erste Beispiel betrifft die U-238-Daten aus Aue aus dem Messzeitraum 1982–1988. Es dient als positives Beispiel dafür, wie die Messwerte aussehen sollten, um sie als plausibel einzustufen. Als räumliche Orientierung dienen die Wismut-Objekte. Die späteren Darstellungen erhalten Koordinaten und einen topografischen Hintergrund. Die Legenden sind für jeden Parameter unabhängig vom Teilgebiet immer gleich. Für U und Th werden die Angaben in Bq/kg und mg/kg parallel dargestellt (Standardabweichungen nur in Bq/kg).

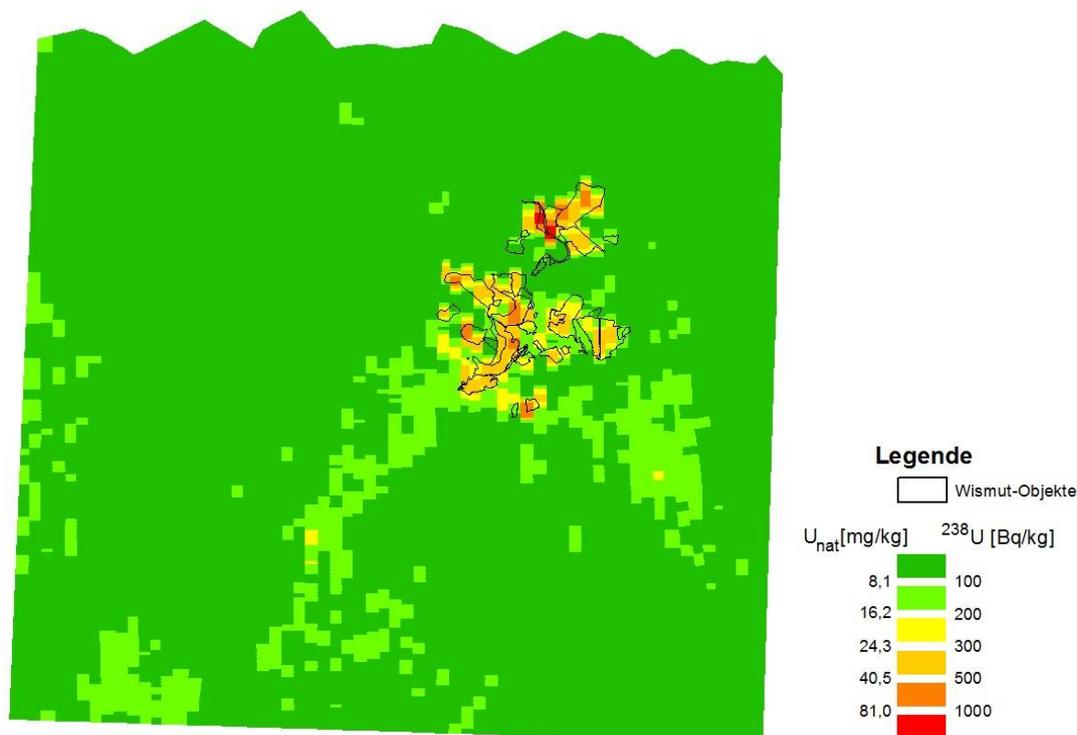


Abbildung 10: Aue – Voronoi-Mosaik mit den U-238-Messwerten von 1982–1988

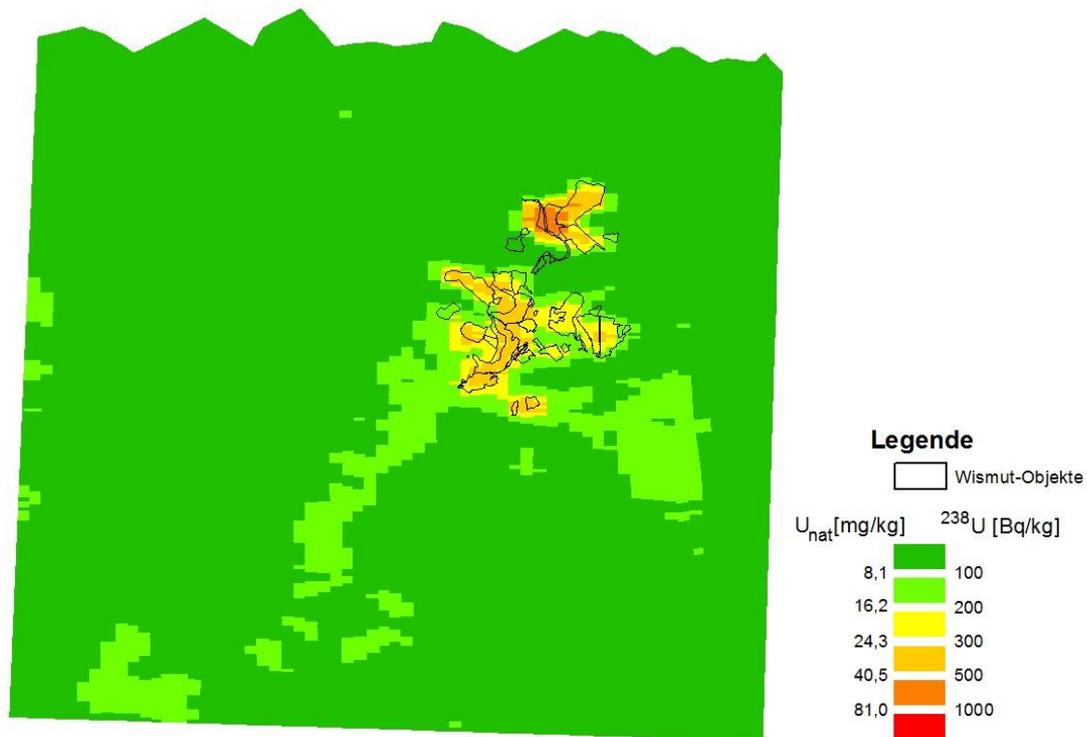


Abbildung 11: Aue – Voronoi-Mosaik mit den arithmetischen Mitteln aus den U-238-Messwerten von 1982–1988

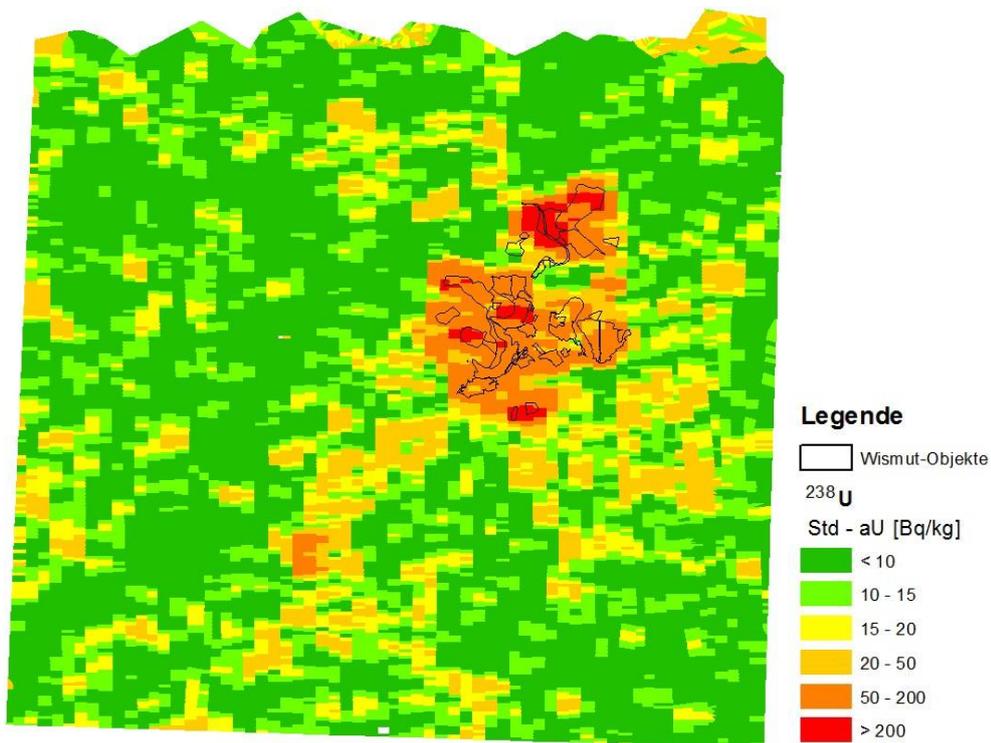


Abbildung 12: Aue – Voronoi-Mosaik mit den Standardabweichungen aus den U-238-Messwerten von 1982–1988

Aus den Abbildungen ist zu entnehmen:

- Die höchsten U-238-Werte sind genau im Bereich der Wismut-Objekte um Aue-Schlema-Schneeberg angesiedelt.

- Die arithmetischen Mittel unterstreichen diesen Fakt.
- Die Standardabweichungen weisen genau im Umfeld der Wismut-Objekte die höchsten Werte auf. Das ist für Daten dieser Art charakteristisch.

Die Interpolation mittels Kriging lässt vergleichbare Ergebnisse wie Abbildung 11 und Abbildung 12 erwarten. Wegen der guten Korrelation zwischen U-238 und ODL sind auch die Kartendarstellungen der ODL-Werte vergleichbar mit denen der U-238-Karten. Auf den Nachweis wird an dieser Stelle verzichtet, zumal für den Zeitraum 1982–1988 keine ODL-Messwerte für das Teilgebiet Aue vorliegen.

5.2.2 Thorium-232-Abhängigkeit vom geologischen Untergrund

Die Abhängigkeit der Th-Werte vom geologischen Untergrund wurde bereits in RUHL & KARDEL (2006) erwähnt und soll an zwei weiteren Beispielen aus den Teilgebieten Aue und Johanngeorgenstadt demonstriert werden.

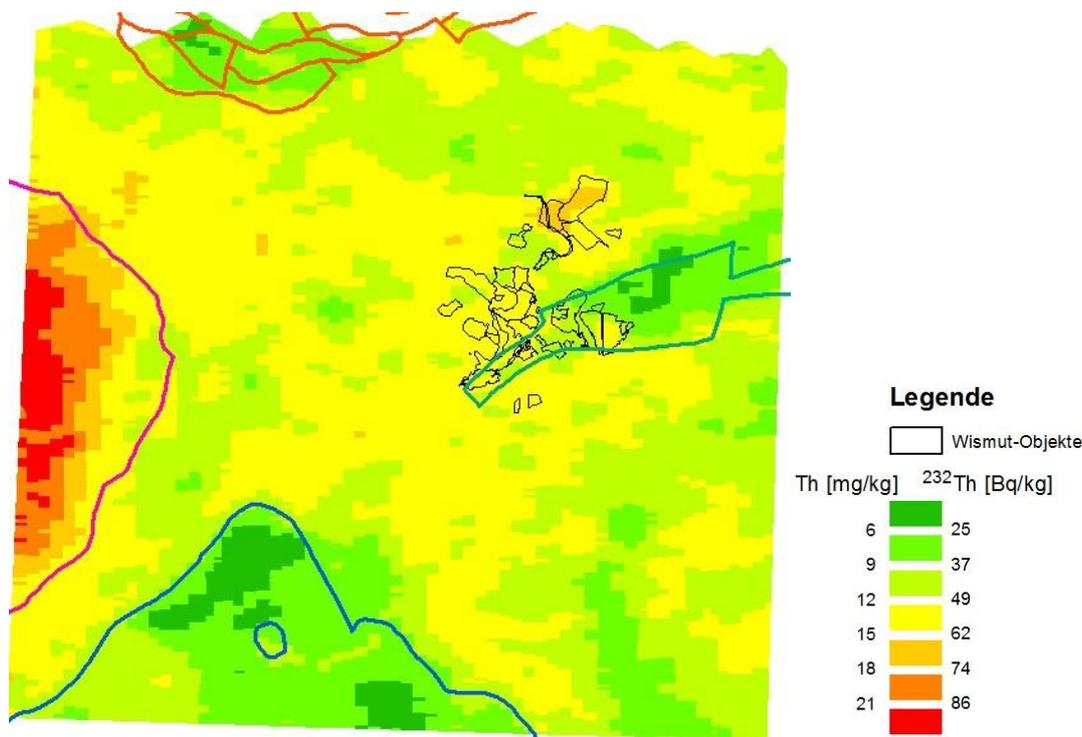


Abbildung 13: Aue – Voronoi-Mosaik mit den arithmetischen Mitteln aus den Th-232-Messwerten von 1982–1988 mit Grenzen ausgewählter geologischer Einheiten

In Abbildung 13 sind die Grenzen folgender geologischer Einheiten dargestellt:

- Kirchberger Granit (Westen – magenta)
- Eibenstocker Granit (Süden – blau)
- Lössnitz-Zwönitzer Mulde (Osten – grün)
- Erzgebirgsvorsenke (Norden – rot)

Während der Kirchberger Granit die höchsten Th-Werte überhaupt aufweist, zeichnen sich die anderen drei geologischen Einheiten durch deutlich geringere Werte im Verhältnis zum Umfeld aus. Einzig der Bereich der Wismut-Objekte der Lössnitz-Zwönitzer Synklinale ist durch den Bergbau überprägt. Das ist auf allen Thorium-Karten zu beobachten. Die Grenzen wurden der geologischen Karte 1 : 400.000 entnommen.

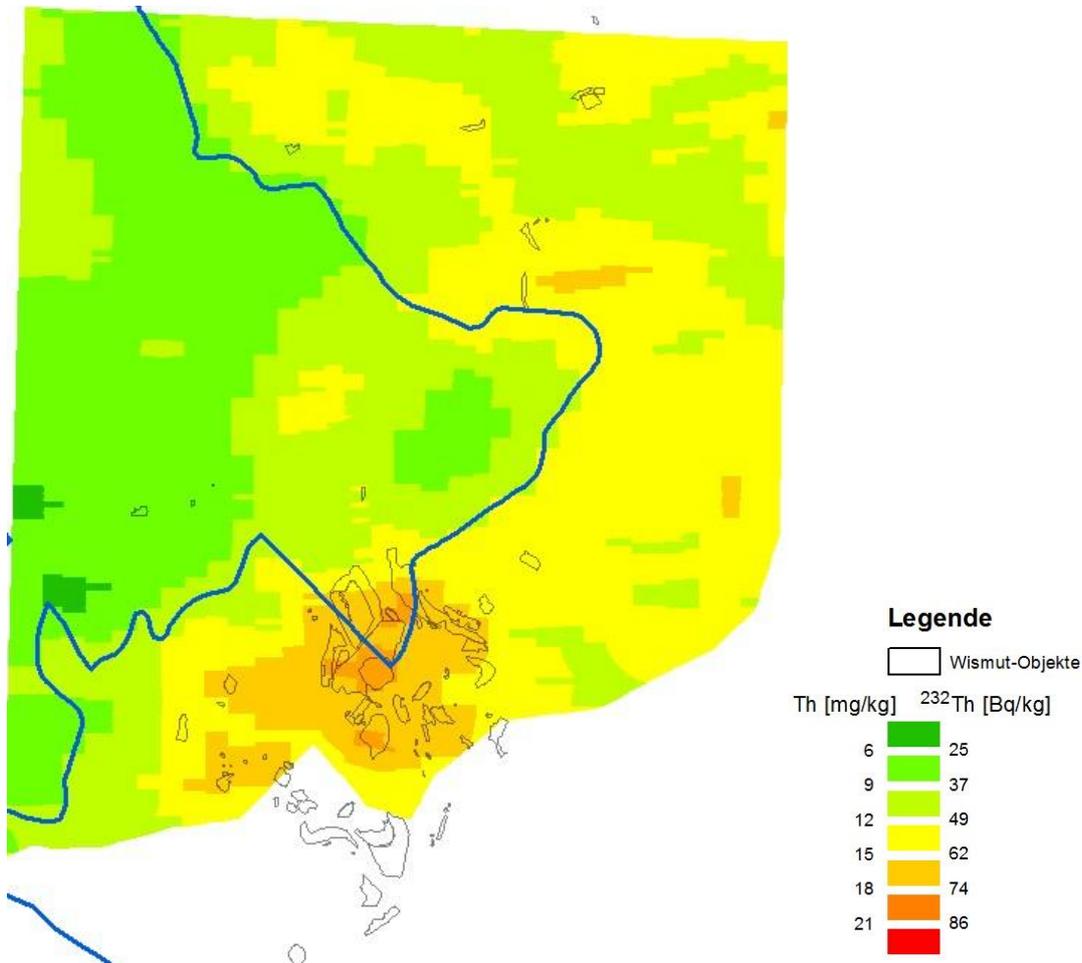


Abbildung 14: Johanngeorgenstadt – Voronoi-Mosaik mit den arithmetischen Mitteln aus den Th-232-Messwerten von 1982–1988 mit der Grenze des Eibenstocker Granits

Das zweite Beispiel betrifft das Teilgebiet Johanngeorgenstadt, das ebenso wie Aue vom Eibenstocker Granit berührt wird. Auch hier ist zu erkennen, dass der Granit deutlich geringere spezifische Aktivitäten von Th-232 aufweist als das Umfeld. Die Abweichung im Bereich der Wismut-Objekte ist der bergbaulichen Überprägung geschuldet.

Abschließend sei vermerkt, dass im Teilgebiet Zwickau eine solche Abhängigkeit nicht festgestellt werden konnte. Das war auch in Anbetracht dessen, dass dort weder der Eibenstocker, noch der Kirchberger Granit anzutreffen sind, nicht anders zu erwarten.

5.2.3 Systematische Messfehler der Befliegung 2003

Wie es bereits die statistischen Auswertungen vermuten ließen, sind die Messwerte 2003 mit nicht vernachlässigbaren Fehlern behaftet. Am deutlichsten wird das im Teilgebiet Aue, hier dargestellt an den Messwerten der (äquivalenten) spezifischen Aktivitäten von U-238 (Abbildung 15). Die charakteristische „Streifigkeit“ der Karte kommt durch eine Fehlzurordnung der Messwerte zu den Messpunkten zustande. Die Fluglinien verlaufen in Nord-Süd-Richtung. In Abbildung 16 ist mit dem Pfeil nach Nord angedeutet, dass eine Verschiebung der blau markierten Voronoi-Zellen in die neue Position sehr gut zur Lage der Wismut-Objekte passen würde. Es sind eine ganze Reihe solcher Fehlpositionierungen der Messwerte zu beobachten, deshalb die Streifigkeit. In Anbetracht dieser Zuordnungsfehler mussten folgende Themen aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen werden:

- Aue 2003: U-238, Th-232, ODL
- Johanngeorgenstadt 2003: Th-232
- Zwickau 2003: Th-232

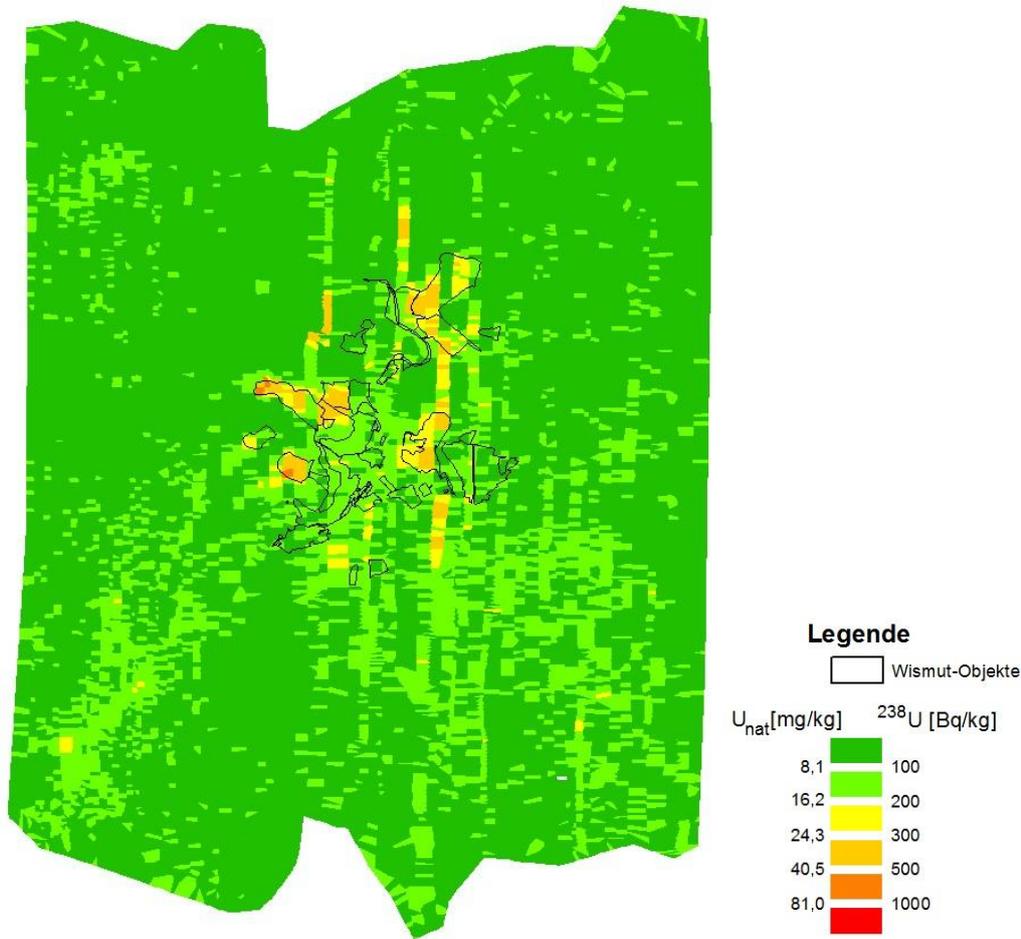


Abbildung 15: Aue – Voronoi-Mosaik mit den U-238-Messwerten von 2003

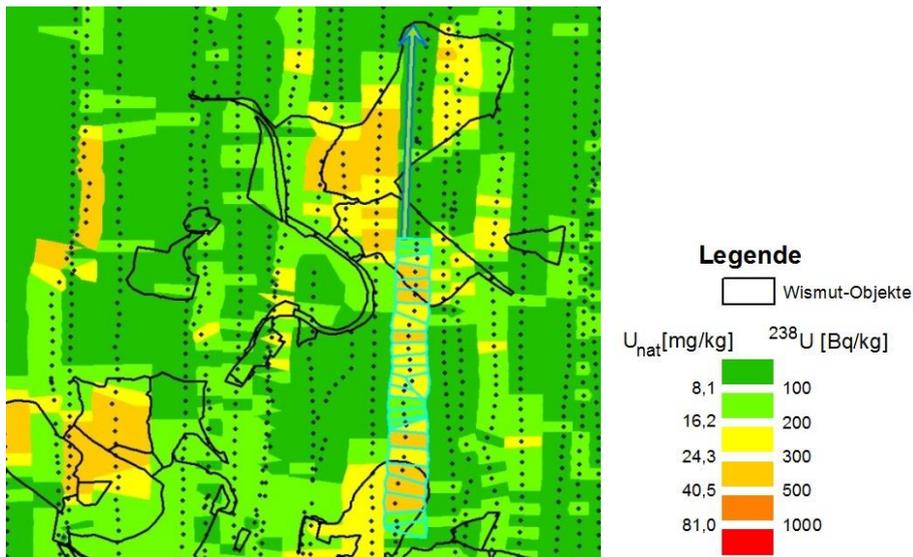


Abbildung 16: Aue – Voronoi-Mosaik mit den U-238-Messwerten von 2003 - Detailansicht

Dass auch die verbliebenen Messparameter aus 2003 nicht problemfrei sind, soll das folgende Beispiel aus dem Teilgebiet Zwickau zeigen (Abbildung 17). Hier verlaufen die Flugrouten in Ost-West-Richtung. RUHL & KARDEL (2006) wiesen darauf hin, dass bei einem teilnehmenden Messteam eine fehlerhafte Kalibrierung vorlag, wodurch dieses Team systematisch zu niedrige Werte gemessen hat. Das drückt sich in der markanten Streifigkeit der Karte aus. Trotzdem wurden diese Parameter mit in die weiteren Auswertungen einbezogen. Man darf jedoch die geringe Qualität der 2003er-Daten insgesamt bei der Beurteilung der Ergebnisse nicht aus dem Auge verlieren. Es ist zu vermuten, dass die Zweigipfligkeit des Histogramms in Tabelle 22 hiervon hervorgerufen wurde.

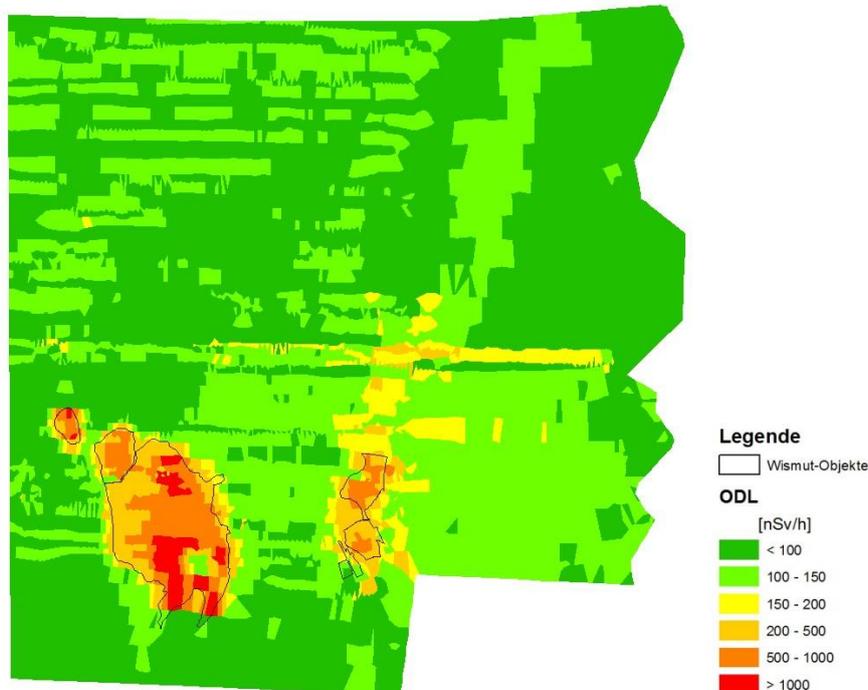


Abbildung 17: Zwickau – Voronoi-Mosaik mit den ODL-Messwerten von 2003

Ein weiterer Fehler in den Daten des Befliegungsgebietes Zwickau von 2003 besteht im Messpunkt mit den Koordinaten RW = 4.529.752; HW = 5.625.397. Dieser Messpunkt taucht nicht weniger als 258 Mal in den Primärdaten mit den unterschiedlichsten Messwerten auf. Alle Werte wurden aus der statistischen Bearbeitung ausgeschlossen, da sie insbesondere durch hohe U-Werte das Ergebnis übermäßig beeinflussten.

5.2.4 Lageverschiebung der Daten bei der Befliegung 1999

Die Befliegung 1999 durch den Finnischen geologischen Dienst weist eine geringe, aber bemerkbare Lageverschiebung auf, die deutlich an den Flächen mit erhöhten U-Messwerten in den Wismut-Objekten zu erkennen ist. Die Maxima sind ca. 200 m nach Südwesten verschoben. Trotz dieser Verschiebung gehen die Werte unverändert in die weiteren Berechnungen ein. Auch wenn dadurch einige Messpunkte aus dem Gebiet der Wismut-Objekte außerhalb dieser Objekte liegen, so fallen sie doch überwiegend in den angelegten 150-m-Pufferbereich und bleiben somit dem Gesamtgebiet der Wismut-Objekte erhalten.

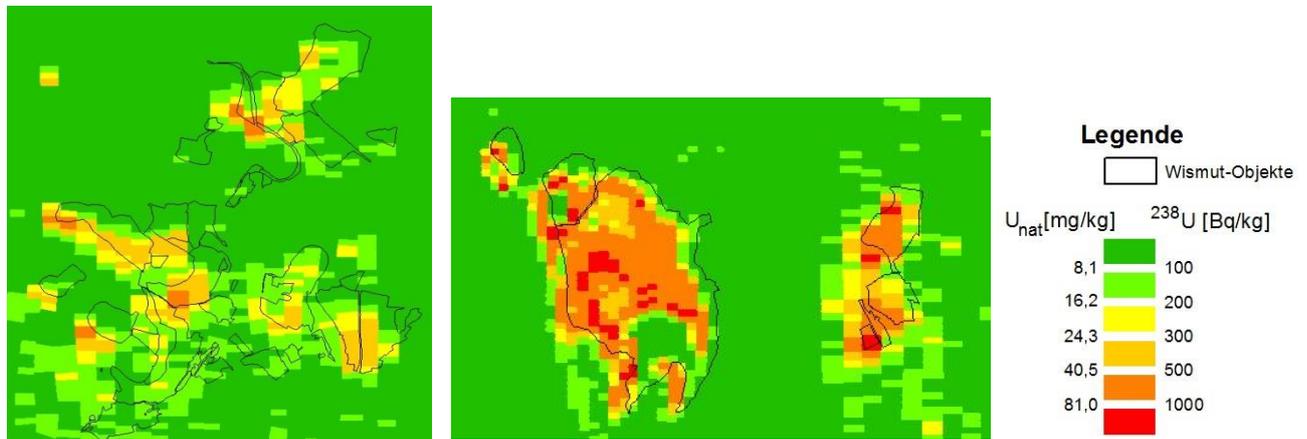


Abbildung 18: Aue (links); Zwickau (rechts) – Lageverschiebungen der U-238-Maxima zu den Wismut-Objekten

Zusammenfassend reduzieren sich die verfügbaren Daten aus Tabelle 5 auf die kartografisch weiter zu bearbeitenden Daten aus Tabelle 24.

Tabelle 24: Verbleibende Parameter für die weitere kartografische Bearbeitung

Teilgebiet	Parameter	1982-1988	1997	1999	2003	2010
Aue	Uran_238 in Bq/kg	U_1982		U_1999		U_2010
	Thorium-232 in Bq/kg	Th_1982		Th_1999		Th_2010
	ODL in nSv/h					ODL_2010
Johanngeorgenstadt	Uran_238 in Bq/kg	U_1982			U_2003	U_2010
	Thorium-232 in Bq/kg	Th_1982				Th_2010
	ODL in nSv/h				ODL_2003	ODL_2010
Zwickau	Uran_238 in Bq/kg		U_1997	U_1999	U_2003	U_2010
	Thorium-232 in Bq/kg		Th_1997	Th_1999		Th_2010
	ODL in nSv/h		ODL_1997		ODL_2003	ODL_2010

5.3 Interpolation mit Kriging

5.3.1 Verwendetes Verfahren und Software

Kriging ist ein heutzutage gebräuchliches geostatistisches Verfahren, um numerische Punktinformationen in die Fläche zu bringen. Zum theoretischen Hintergrund existiert eine umfangreiche Literatur. Die Auswertung von Bodenmessdaten mit diesem Verfahren haben die Autoren z. B. in HERTWIG & ZEISLER (2012) mehrfach praktisch angewendet.

Der Kernpunkt des Verfahrens spiegelt sich im mehrteiligen Ergebnis der Interpolation wider. Man erhält nicht nur eine Vorhersage des unbekanntes Messwerts in einem beliebigen Punkt des Untersuchungsgebietes, sondern auch eine Aussage über die Güte der Vorhersage. Als Vorhersagewert dient zumeist ein Rechenwert, der mit dem Erwartungswert einer gewöhnlichen Zufallsgröße verglichen werden kann. Die Güte wird im einfachsten Fall durch die Schätzvarianz beschrieben. Moderne Kriging-Verfahren ermitteln für jeden Punkt des Untersuchungsgebietes gleich eine vollständige Verteilungsdichte für die Vorhersage. Aus dieser

Dichte kann man dann die unterschiedlichsten Parameter ableiten. Das sind neben dem Erwartungswert und der Standardabweichung z. B. noch beliebige vorgebbare Quantile oder auch Wahrscheinlichkeiten, dass im Vorhersagepunkt der unbekannte Messwert einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet.

Im vorliegenden Projekt beschränken sich die Kriging-Ergebnisse auf die Ausgabe von Schätzwert und Schätzfehler. Die Berechnungen wurden mit der Software der amerikanischen Firma ESRI „Geostatistical Analyst“ von ArcGIS 10.1 durchgeführt. Aus der Liste der dort zur Verfügung stehenden Kriging-Verfahren wurde für alle Berechnungen Universal Kriging verwendet.

Die Interpolationsergebnisse sind detailliert für die drei Teilgebiete im Maßstab 1 : 25.000 in den Anlagen 1 bis 3 dargestellt.

5.3.2 Homogene Raumeinheiten

Homogene Raumeinheiten (HRE) zeichnen sich dadurch aus, dass Messwerte innerhalb einer HRE sich relativ gleichmäßig ändern. Sprunghafte Veränderungen der Messwerte legt man möglichst auf die Grenzen der HRE. Es ist für die vorliegende Aufgabenstellung naheliegend, zwei HRE je Teilgebiet auszuhalten:

- Wismut-Objekte und ihre Pufferung
- Hintergrundbereiche

Dafür gibt es zwei Gründe:

- Die drei betrachteten Parameter weisen die höchsten Messwerte im Pufferbereich auf (Thorium mit den bekannten Abstrichen).
- Infolge der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen ändern sich die Messwerte innerhalb der Pufferbereiche in der Zeit sehr stark. Im Hintergrundbereich sollten sie sich dagegen in der Zeit nur unwesentlich ändern.

Die Berechnung erfolgt für jedes Teilgebiet, jeden Zeitschnitt und jeden Parameter getrennt für Pufferbereich und Hintergrundbereich. Dabei werden die Messpunkte nach Feld HG ausgewählt (siehe Kap. 3.6). Im Anschluss werden die Teilergebnisse mit Hilfe der Berechnungsmasken (Kap. 3.5) zu einem einheitlichen Ergebnis montiert. Diese Berechnungen wurden für Schätzwert und Schätzfehler durchgeführt.

Zusammengefasst wurden aus 96 Teilergebnissen 48 thematische Karteninhalte montiert, die zu 24 Themen gehören (siehe Tabelle 24).

5.3.3 Medianverschiebung

Vor der eigentlichen Berechnung wurden die Messwerte jeweils um einen Medianverschiebungswert entsprechend Tabelle 25 korrigiert.

Die in das Kriging eingegangenen Messwerte MW_{Krig} (Hintergrundbereich und Pufferbereich) wurden wie folgt ermittelt:

$$MW_{Krig} = MW_{orig} - \text{Tabellenwert}_{\text{Tab.23}}$$

Tabelle 25: Medianverschiebungswerte aus dem Hintergrundbereich vor der Interpolation

Teilgebiet	Parameter	1982-1988	1997	1999	2003	2010
Aue	Uran_238 in Bq/kg	18,5		4,3		0
	Thorium-232 in Bq/kg	11,7		1,3		0
	ODL in nSv/h					0
Johanngeorgenstadt	Uran_238 in Bq/kg	15,5			18,6	0
	Thorium-232 in Bq/kg	8,5				0
	ODL in nSv/h				5,9	0
Zwickau	Uran_238 in Bq/kg		21,9	-8,4	14,1	0
	Thorium-232 in Bq/kg		7,7	3,0		0
	ODL in nSv/h		17,1		-13,0	0

Der Sinn dieser Korrektur ergibt sich aus der Annahme, dass die Messwerte im Hintergrundbereich für alle betrachteten Zeitschnitte weitgehend unverändert bleiben sollen. Als Bezugszeitpunkt wurde 2010 festgelegt. Es wurde in der Hintergrund-Überschneidungsfläche der Befliegungsfläche jedes anderen Zeitschnitts mit der Befliegungsfläche 2010 der Median der Messwerte innerhalb gebildet und die Differenz zum Median der innen liegenden Messwerte 2010. Diese Differenzen wurden in Tabelle 25 eingetragen. Eine Verringerung der Originalmesswerte um die eingetragene Differenz bringt diese im Hintergrundbereich statistisch auf ein vergleichbares Niveau wie 2010. Diese Operation erhöht die Glaubwürdigkeit bei der späteren Betrachtung der zeitlichen Messwertentwicklung im Pufferbereich. Die Notwendigkeit einer solchen Verschiebung zeigt andererseits, dass die allgemeinen Messwertniveaus von Messkampagne zu Messkampagne verschieden sind. Das erschwert den Vergleich der Messwerte zu den einzelnen Messzeiten auf derselben Fläche. Man kann jedoch zu jedem Messzeitpunkt die Messwerte innerhalb der Wismut-Objektgruppen mit denen im zugehörigen Hintergrundbereich vergleichen. Wie in Kapitel 6 zu sehen sein wird, kann sich das Messwertniveau der Wismut-Objektgruppen durch die erfolgten Sanierungsmaßnahmen bis auf das Niveau des Hintergrundbereichs absenken.

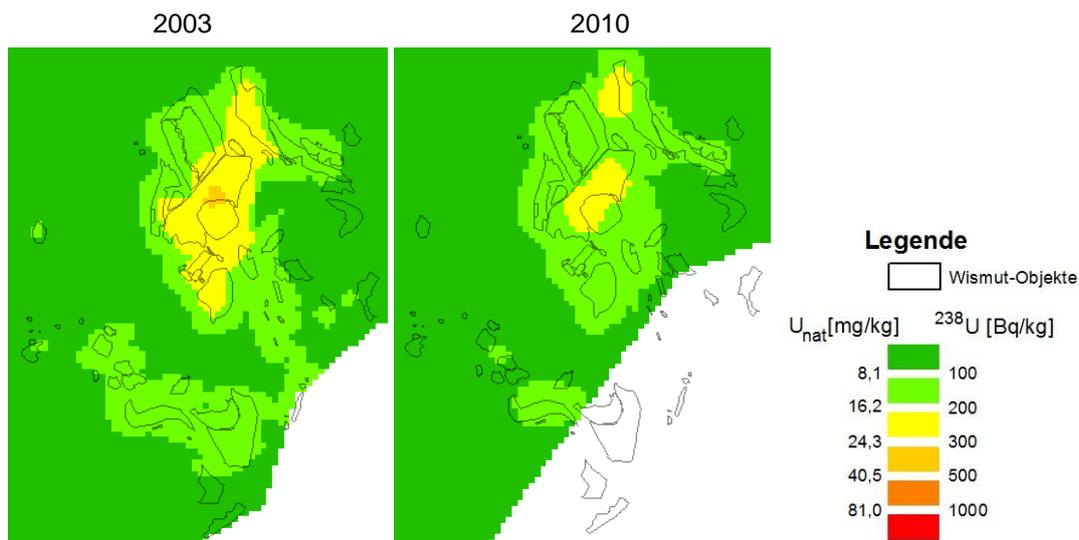


Abbildung 19: Johanngeorgenstadt, U-238, 2003 und 2010, Kriging-Ergebnisse ohne erweiterte Transformation

Für die Uran-Messdaten im Wismut-Gebiet in Johanngeorgenstadt 2003 führte die beschriebene Transformation zu einem Ergebnis, das sich wesentlich vom Kriging-Ergebnis 2010 unterschied (Abbildung 19). Nach den Sanierungsinformationen fanden jedoch zwischen 2003 und 2010 nur flächenmäßig unbedeutende Sanierungsmaßnahmen statt. Somit war ein solcher Unterschied nicht begründbar. Deshalb wurde für diese Daten eine erweiterte Transformation durchgeführt, bei der neben der Medianverschiebung noch eine lineare Stauchung der Daten 2003 mittels Quotienten zweier Standardabweichungen ausgeführt wurde.

$$U_{2003, t} = U_{\text{Median, 2003}} - \text{Mediantrans} + (U_{2003} - U_{\text{Median, 2003}}) \cdot \frac{S_{2010}}{S_{2003}}$$

$U_{2003, t}$	transformierter U-238-Wert der Befliegung 2003
$U_{\text{Median, 2003}}$	Median der U-238-Werte der Befliegung 2003 (124,1)
Mediantrans	Differenz der $U_{\text{Median, 2003}} - U_{\text{Median2010}}$ (24,6)
U_{2003}	Originalwerte 2003
S_{2003}	Standardabweichung 2003 (55,4)
S_{2010}	Standardabweichung 2010 (66,5)

Nach dieser erweiterten Transformation ergab sich folgendes Kriging-Ergebnis (Abbildung 20):

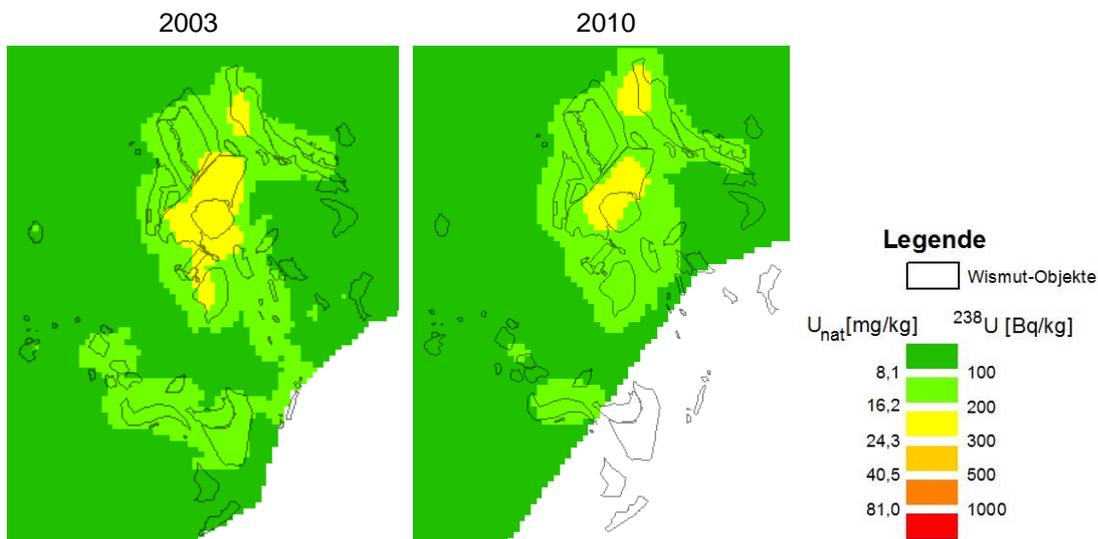


Abbildung 20: Johanngeorgenstadt – U-238, 2003 und 2010, Kriging-Ergebnisse mit erweiterter Transformation

Dieses letzte Ergebnis spiegelt den Zustand 2003 und 2010 ohne wesentliche Sanierungsaktivitäten in diesem Zeitraum viel besser als das vorhergehende Ergebnis aus Abbildung 19 wider. Hieraus ist zum einen zu erkennen, dass die Messungen zwar die radiologischen Emissionsstrukturen richtig widerspiegeln, dass dies jedoch auf unterschiedlichem Messwertniveau von Messzeitpunkt zu Messzeitpunkt geschieht. Eine vergleichbare erweiterte Transformation ist für die anderen Teilgebiete gerade wegen der dort stattgefundenen Sanierungsarbeiten nicht so leicht begründbar. Deshalb wurde auf sie verzichtet.

5.3.4 Modellparameter

Nach welchen Gesichtspunkten die Berechnungsparameter festgelegt wurden, soll am Beispiel der Hintergrundwerte von Uran 1982/1988 in Aue demonstriert werden. Nach der Auswahl der entsprechenden Messpunkte Aue – 1982/1988 – Hintergrund wählt man den zu bearbeitenden Parameter und das Verfahren „Kri-

ging“ aus. Danach erscheint der Dialog wie in Abbildung 21. Hier wird Universal Kriging ausgewählt. Die anderen Parameter bleiben unverändert.

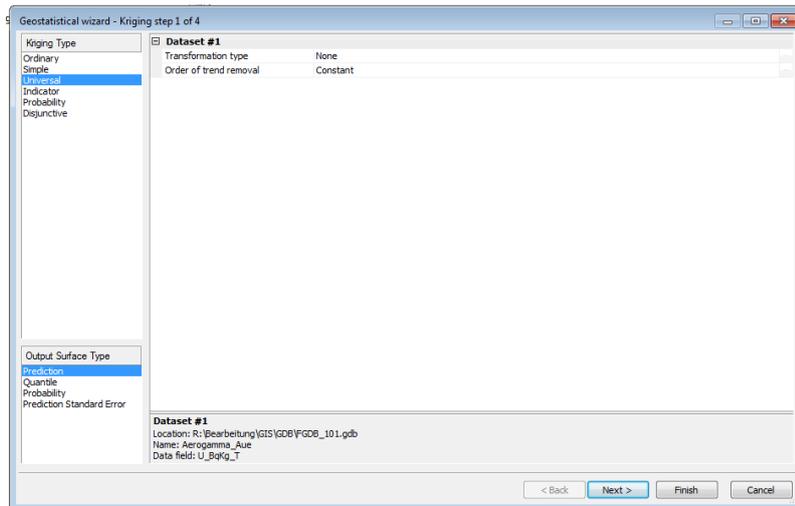


Abbildung 21: Geostatistical Analyst – Auswahl Universal Kriging

Im folgenden Dialog (Abbildung 22) bleiben alle voreingestellten Parameter unverändert.

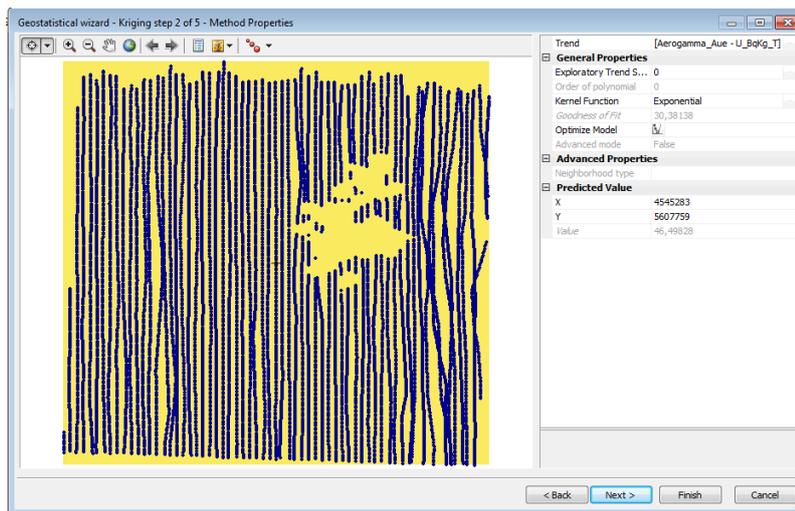


Abbildung 22: Geostatistical Analyst – Methodeigenschaften

Die wichtigsten Einstellungen sind für das Variogramm zu tätigen (Abbildung 23). Zuerst sind mit „Lag Size“ und „Number of Lags“ die roten Punkte und blauen Kreuze in eine Form zu bringen, die man verbal wie folgt beschreiben kann:

- nach links spitz zulaufend
- Kreuze nach rechts ansteigend, Anstieg langsam abnehmend bis nahezu parallel zur x-Achse
- gedachter Schnittpunkt mit der Y-Achse etwas über der Null

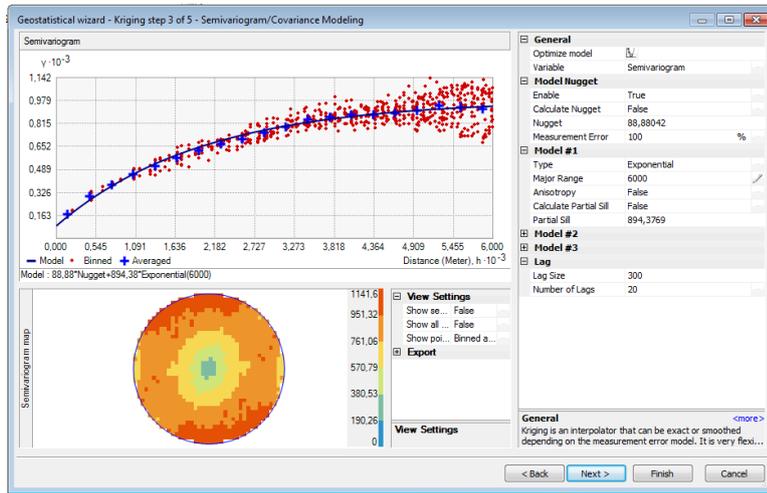


Abbildung 23: Geostatistical Analyst – Variogramm-Modellierung

Als nächstes wählt man unter Model Type ein passendes Modell aus. Als die am besten geeigneten für das Projekt haben sich die beiden Typen „Spherical“ und „Exponential“ herausgestellt. Zur Feinabstimmung kann man noch „Nugget“ und „Major Range“ manuell einstellen. Auf die Verstellung des Werts „Anisotropy“ wurde in Anbetracht der engen Anordnung der Messpunkte auf verhältnismäßig weit auseinander liegenden Flugrouten bewusst verzichtet.

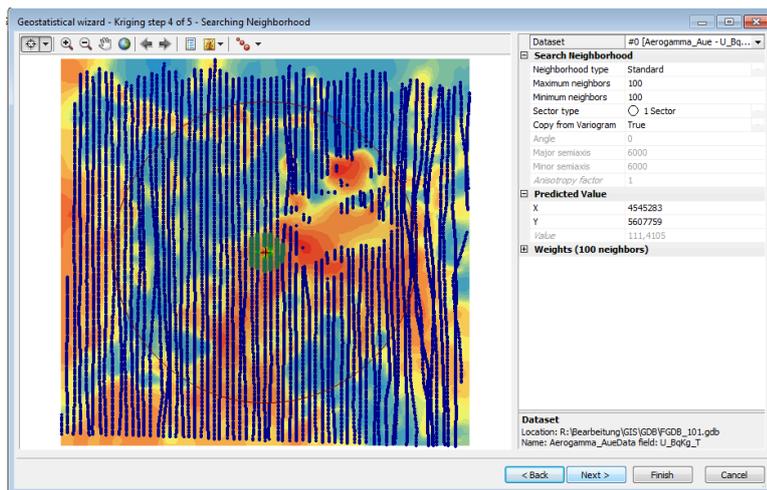


Abbildung 24: Geostatistical Analyst – in die Berechnung einbezogene Nachbarpunkte

Im folgenden Dialog (Abbildung 24) ist es essenziell, den Sector Type auf „1 Sector“ einzustellen. Zusätzlich wurden Maximum und Minimum Neighbors auf 100 gesetzt.

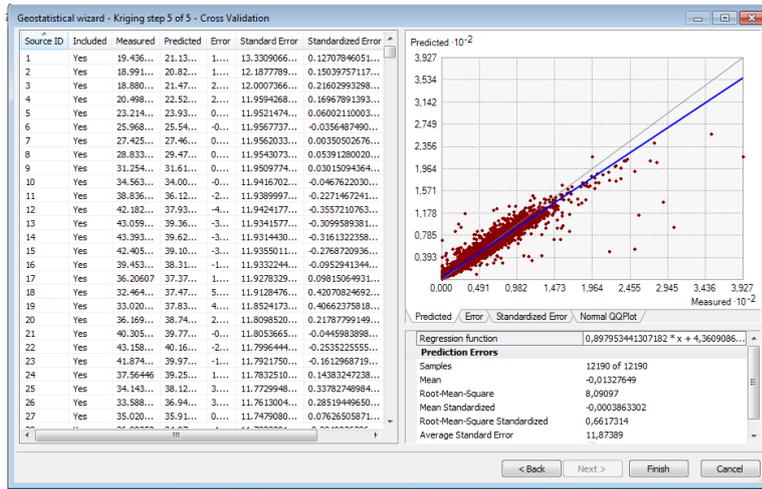


Abbildung 25: Geostatistical Analyst – Kreuzvalidierung

Der letzte Teildialog (Abbildung 25) zeigt an, welches Schätzergebnis an jedem Messpunkt erzielt werden würde, wenn es diesen Messwert dort nicht gäbe. Die Abbildung sollte nicht überschätzt werden. In der Vergangenheit haben die Autoren gute Kriging-Ergebnisse selbst dann erzielt, wenn die Punktwolke quasi parallel zur x-Achse verlief.

Eine vollständige Liste der in den Berechnungen verwandten Kriging-Parameter ist der Tabelle in Anlage 4 zu entnehmen.

5.3.5 Ausgewählte Kriging-Ergebnisse

Eine vollständige Darstellung aller Kriging-Schätzwerte im Maßstab 1 : 25.000 enthalten die Anlagen 1 bis 3. In diesem Kapitel werden nur einige wenige Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Kriging ist mathematisch gesehen ein Tiefpassfilter, d. h., dass kurzweilige Veränderungen aus dem Messwertbild herausfallen und langweilige Veränderungen dadurch mehr oder weniger geglättet hervorgehoben werden. Man sieht das am Beispiel der Uran-Schätzwerte in Aue 1982–1988 (Abbildung 26) im Vergleich mit dem Voronoi-Mosaik (Abbildung 10).

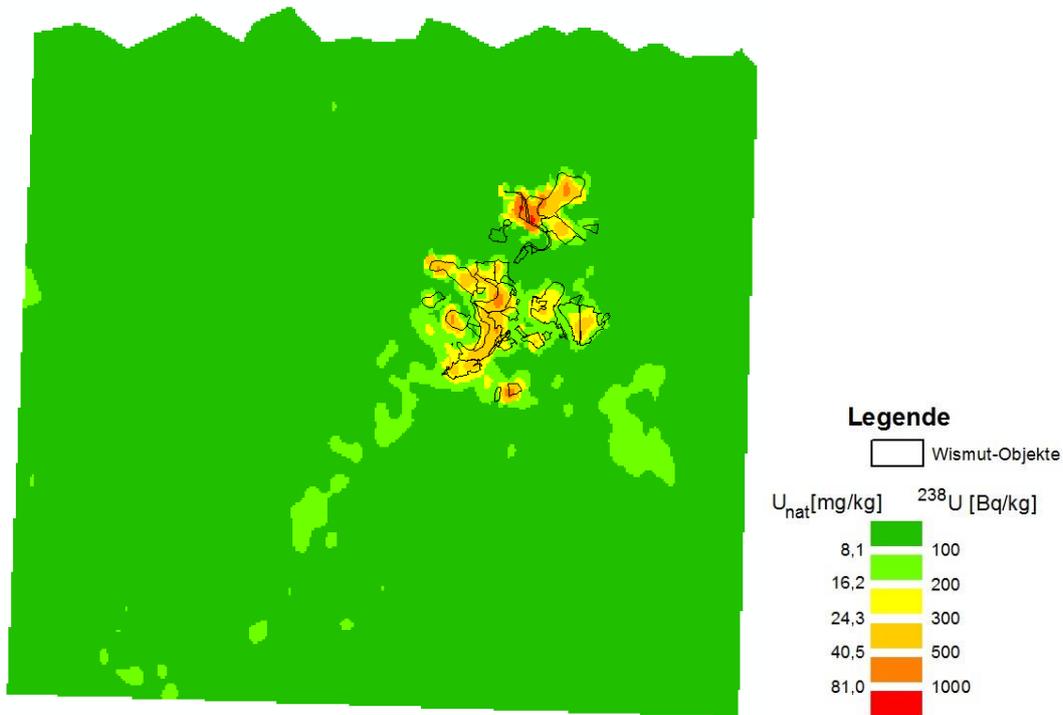


Abbildung 26: Aue – Kriging-Schätzwerte über die U-238-Messwerte von 1982–1988

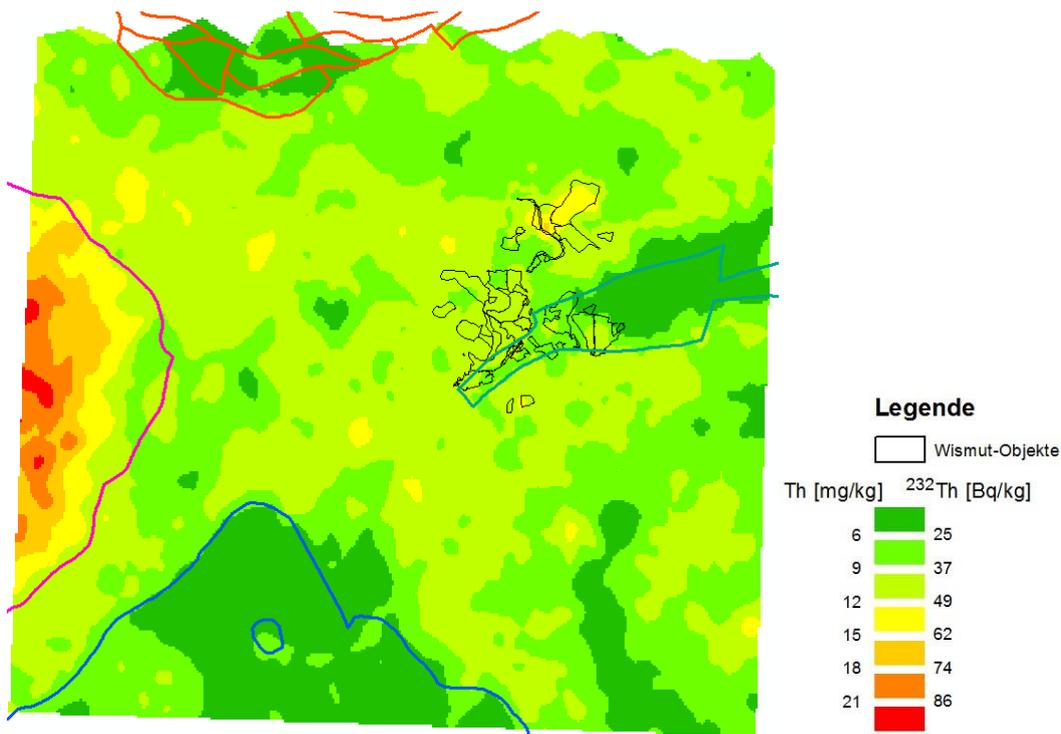


Abbildung 27: Aue – Kriging-Schätzwerte über die Th-232-Messwerte von 1982–1988

Beim Vergleich der Thorium-Karten in Abbildung 27 mit dem Voronoi-Mosaik in Abbildung 13 fällt auf, dass die Kriging-Ergebnisse deutlich niedriger sind als das Voronoi-Mosaik. Dies ist der Verringerung aller Messwerte um 11,7 Bq/kg vor dem Kriging geschuldet (s. Kap. 5.3.3).

Die **Kriging-Schätzfehler** sind alle vergleichbar mit dem Beispiel aus Abbildung 28. Es pausen sich die Flugrouten ganz stark durch. Charakteristisch sind die sprunghaft größeren Schätzfehler im Pufferbereich im

Vergleich zu denen im Hintergrundbereich. Auf eine weitere Darstellung dieser Schätzfehler wurde deshalb verzichtet.

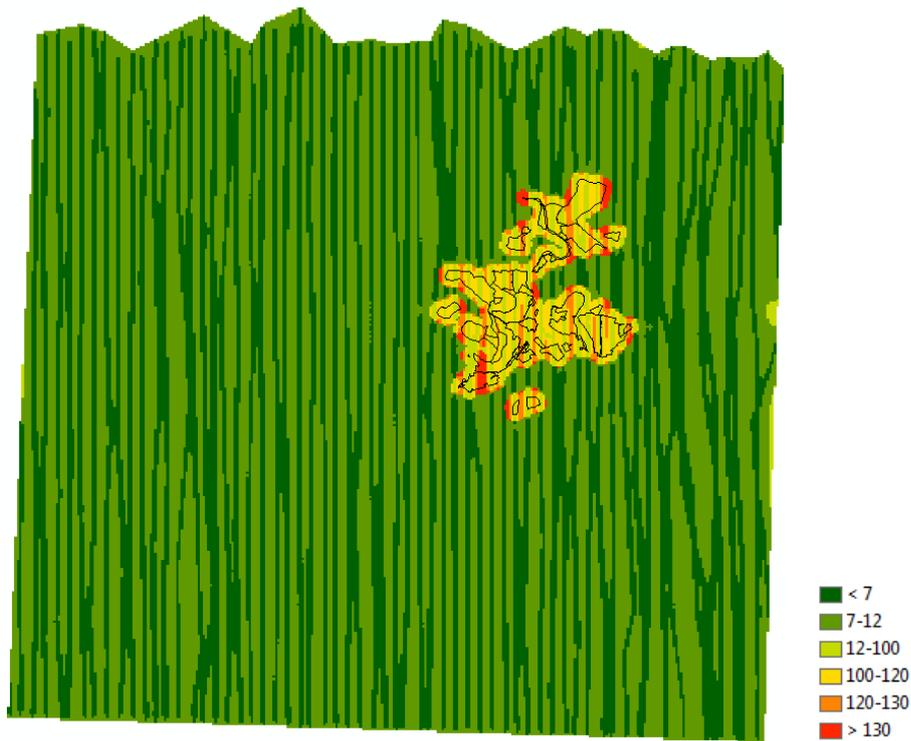


Abbildung 28: Aue – Kriging-Schätzfehler über die U-238-Messwerte von 1982-1988

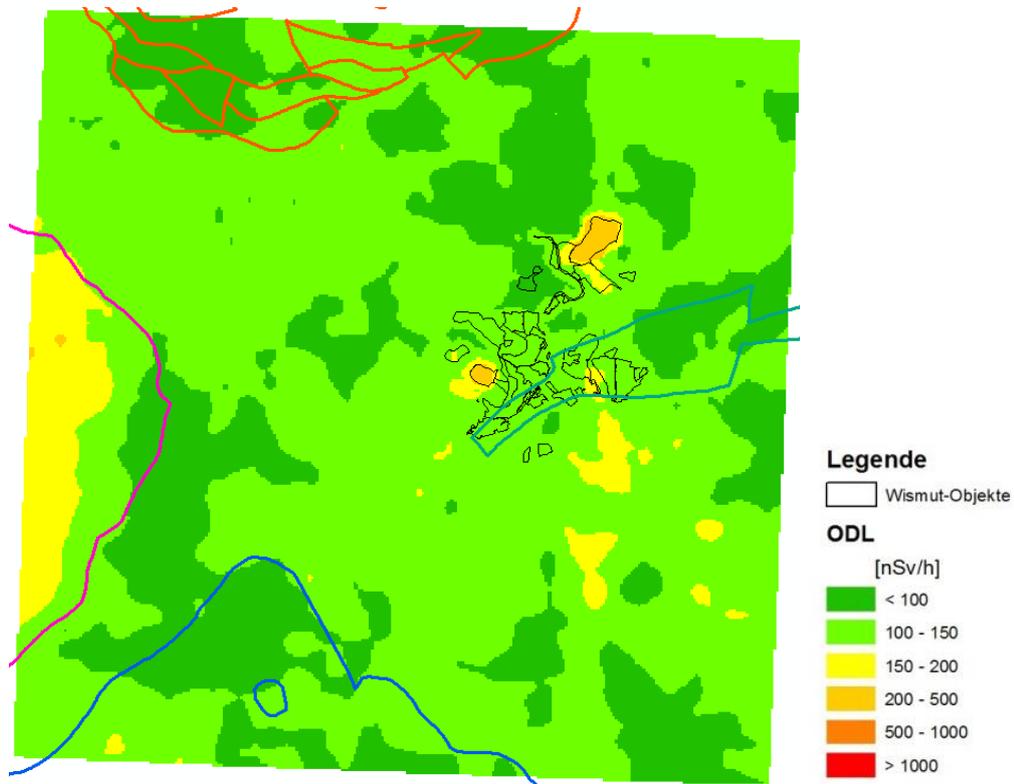


Abbildung 29: Aue – Kriging-Schätzwerte über die ODL-Messwerte von 2010

Vergleicht man die Ursachen erhöhter Messwerte der drei untersuchten Parameter an Hand der Interpolationsergebnisse, so kann man feststellen, dass

- Uran fast ausschließlich lagerstätten- und bergbaubestimmt ist,
- Thorium überwiegend gesteinsbestimmt ist,
- ODL sowohl lagerstätten- und bergbaubestimmt als auch gesteinsbestimmt sein kann.

Für Letzteres soll Abbildung 29 als Beispiel dienen. Es sind zum einen hohe ODL-Messwerte auf verschiedenen Wismut-Objekten zu beobachten. Zum anderen weist aber der Kirchberger Granit (magenta Umrisslinie) ebenfalls erhöhte ODL-Messwerte auf. Die anderen drei Gesteinseinheiten sind nicht ODL-auffällig.

5.3.6 Untersuchungen zu notwendigen Messwerttransformationen

Die Theorie besagt, dass eine Voraussetzung für die Anwendung von Kriging darin besteht, dass für die Messwerte Normalverteilung angenommen werden kann. Diese Voraussetzung ist im vorliegenden Fall insbesondere für die Uran-Messwerte in den Wismut-Gebieten nicht gegeben. Ein Ausweg besteht dann darin, die Ausgangsdaten vor den Berechnungen zu transformieren. Für die vorliegenden rechtsschiefen Daten kommt in erster Linie die Logarithmierung in Frage. Es wurden deshalb in den Teilgebieten Aue und Zwickau Untersuchungen mit allen Uran-Messdaten in den Wismut-Gebieten angestellt, inwieweit sich dadurch die Ergebnisse ändern, wenn die Messwerte vor dem Kriging logarithmiert werden. Der Geostatistical Analyst von

ArcGIS beinhaltet eine solche interne Transformation. Dabei erwies sich bei allen durchgeführten Berechnungen, dass es

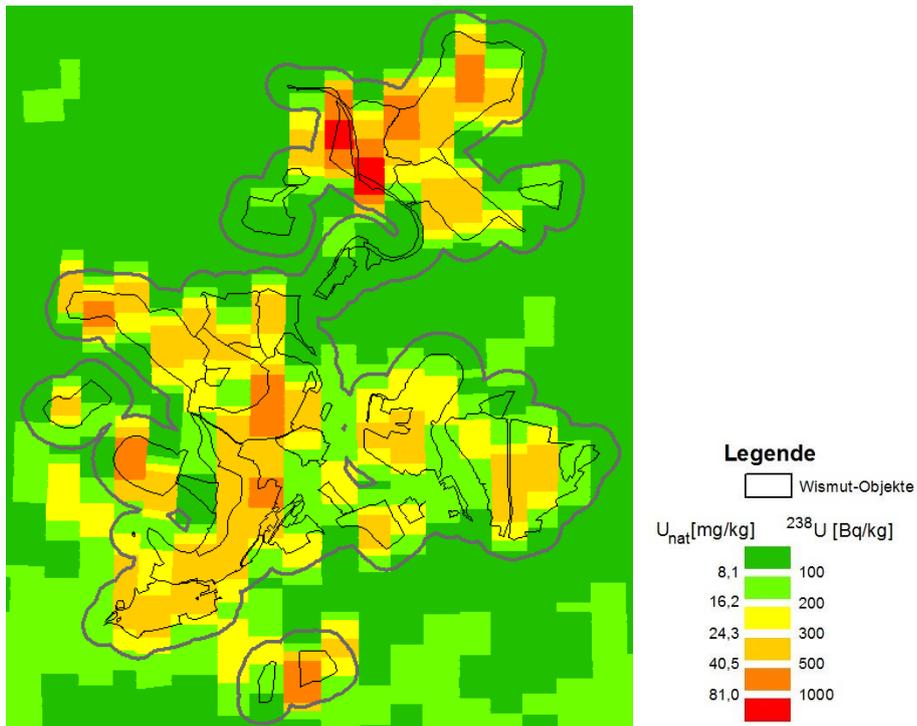
- bei der Verwendung des Geostatistical Analyst und Universal Kriging,
- bei der Bearbeitung der U-Messdaten in den Wismut-Gebieten

zu keinen signifikanten Veränderungen in den Kriging-Ergebnissen führt, die über die Messungenauigkeiten hinausgehen. Bei anderer Software und anderen Eingangsdaten kann diese Aussage gegenteilig ausfallen.

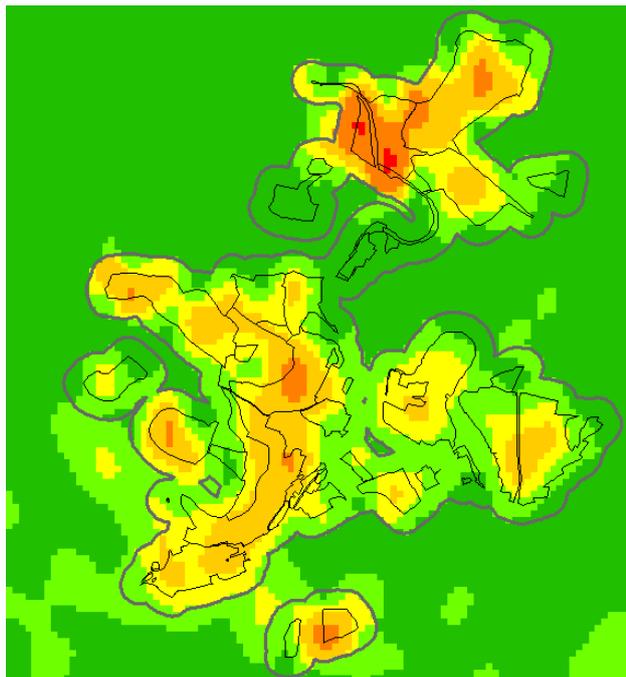
Es folgt in Abbildung 30 ein repräsentatives Beispiel mit den U-238-Messwerten aus Aue, 1982–1988. Die generelle Ähnlichkeit der beiden Kriging-Ergebnisse untereinander und ihre Ähnlichkeit zum Voronoi-Mosaik ist deutlich zu erkennen. Andererseits soll auf einige marginale lokale Unterschiede hingewiesen werden. Zum einen ist an der nördlichen Grenze der Halde 371 ganz im Norden der Karten zu erkennen, dass im logarithmierten UK die Begrenzung der Fläche mit höheren Messwerten gegen die Bereiche mit niedrigen Messwerten sehr scharf ist. Zum anderen ist die radiologische Belastung der am weitesten westlich gelegenen Wismut-Teilfläche vom unlogarithmierten UK gut eingefangen. So haben beide Varianten ihre Berechtigung. Die Unterschiede zwischen ihnen sind jedoch marginal. Insgesamt liefern beide ein praktisch gleichwertiges Ergebnis.

Es wurde entschieden, alle Ergebnisse ausschließlich aus den unlogarithmierten Messwerten zu verwenden.

Voronoi-Mosaik



UK, unlogarithmiert



UK, logarithmiert

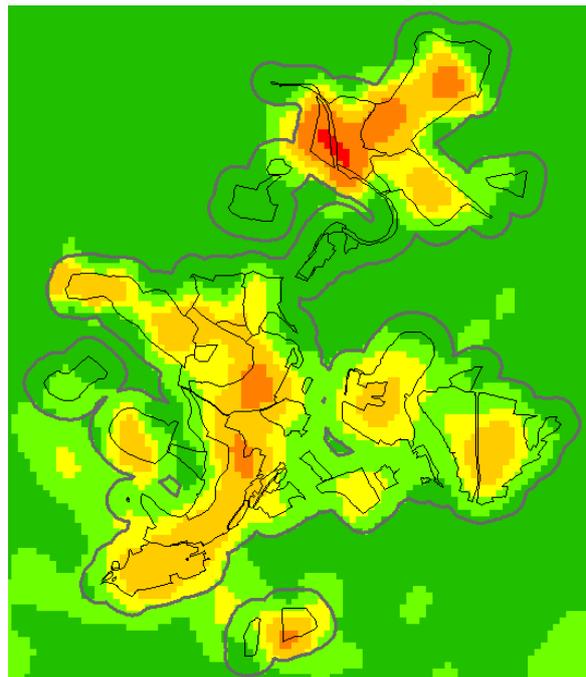


Abbildung 30: Aue, 1982–1988, U-238 – Vergleich Universal Kriging mit unlogarithmierten und logarithmierten Messwerten

6 Vergleich von Aerogammadaten und durchgeführten Sanierungsmaßnahmen

6.1 Zusammenstellung der Sanierungsmaßnahmen

Anhand der aerogammaspektrometrischen Messungen lässt sich in den Sanierungsgebieten ein schneller Überblick über die Wirksamkeit der durchgeführten Abdeckungsmaßnahmen hinsichtlich der Abschirmung von Gammastrahlung verschaffen. Die Spiegelung dieser Sanierungsmaßnahmen der Wismut GmbH (Tabelle 26 bis Tabelle 28, [Wismut GmbH 2015]) in den Messungen wird im Folgenden am Beispiel der drei Teilgebiete Aue, Zwickau und Johanngeorgenstadt diskutiert. Hierzu wurden die Messergebnisse der äquivalenten Bodenurangehalte bzw. spezifischen Aktivitäten aus den Jahren 1988, 1997, 1999, 2003 und 2010 im Maßstab 1 : 25.000 verglichen (Anlagen 1 bis 3).

Die zu einem willkürlich ausgewählten Stichtag ausgeführten Befliegungskampagnen zeigen eine Momentaufnahme eines meist langwierigen Sanierungsvorgangs (bei Halden und Absetzanalgen i. d. R. bestehend aus Profilierung Abdeckung, Wege- und Wasserbau und Begrünung), wobei oft auch diese Einzelphasen zeitlich parallel in unterschiedlichen räumlichen Abschnitten ablaufen. Die für die Abschirmung der Gammastrahlung maßgebliche Abdeckung kann in den unten aufgeführten Sanierungszeiträumen nicht genau zeitlich definiert werden.

Eine weitere Unschärfe bei der Widerspiegelung der Abdeckungsarbeiten durch die Darstellung der Gammastrahlung kann durch die zum konkreten Zeitpunkt der Befliegung vorherrschenden Bodeneigenschaften auftreten: zum Beispiel kann die Bodenfeuchte auf die Bodentiefe Einfluss nehmen, die zum Messwert beiträgt (an einer Stelle werden nur Werte gemessen, die die (geringmächtige) Abdeckung repräsentieren, an einer anderen Stelle auch die nicht sanierten Bereiche, die unterhalb der Abdeckung liegen).

Tabelle 26: Sanierungsmaßnahmen im Teilgebiet Aue

Objektname/Ort	Sanierung		Objektgruppe	Größe [ha]	Bemerkung
	Beginn	Ende			
TKZ 22	2001	2001	1	1,71	
ehem. BF Holzplatz Sägewerk Poppenwald	1996	2003	1	0,92	
BF und Halde Schacht 373	1998	2007	1	3,76	
BF und Halde Schacht 372	1997	2008	1	8,53	
Sanierung Westteil-RAB	2009	2009	1	5,14	
Halde 371/1 (Haldenkomplex 371)	1993	noch nicht abgeschlossen	1	49,35	
Halde 371/2 (Haldenkomplex 371)	1992	noch nicht abgeschlossen	1	23,65	
Betriebsfläche Schacht 371	1992	noch nicht abgeschlossen	1	16,59	
ehem. BF Schacht 383	1998	1999	2	2,81	
Halde 366/186/383	1997	2011	2	29,64	

Objektname/Ort	Sanierung		Objektgruppe	Größe [ha]	Bemerkung
	Beginn	Ende			
Halde 366/186/383	1997	2011	2	21,99	
BF Zufahrt und RWA Halde 66/207	1999	2013	3	0,25	
Halde 66/207	1999	2015	3	32,12	
Damm Absetzbecken Borbachtal	1996	2001	4	11,11	
Halde 382/Teilobjekt Anschüttung	1997	2004	4	13,40	
ehem. BF Plateaufläche Halde 38neu und Halde 382	2009	2009	4	20,09	
Halde 382 West	2003	2010	4	30,61	
Halde 38neu/208	1999	2010	4	25,28	
BF ehem. Grubenwehr	2000	2010	4	0,50	
BF Schacht 382	2004	2013	4	1,68	
Halde 382	1997	2015	4	2,12	
Halde 38alt und BF Lichtloch 9	1993	2017	4	6,64	
Betriebsfläche Schacht 208	2010	noch nicht abgeschlossen	4	0,73	
BF Lichtloch 14a	1993	2001	5	0,02	
ehem. BF Schacht 15b	2002	2002	5	0,26	
ehem. BF Schacht 15b	2002	2002	5	0,04	
BF Schacht 64	2003	2003	5	3,96	
BF Schacht 15IIb	2000	2009	5	19,53	
BF Schacht 15IIb	2000	2009	5	0,22	
Hammerberghalde	1992	2012	5	35,24	
ehem. BF Hammerberghalde, Halde 64 und Halde 312	1992	2012	5	12,28	
ehem. BF ZGB	1992	1992	6	1,58	
ehem. BF ZGB	1992	1992	6	0,66	
Halde 13b	1991	2001	6	5,26	
ehem. BF Halde Blaufarbenwerk/Schacht 13	2000	2008	6	1,19	
ehem. BF Zeche 50	1992	1992	7	5,27	
ehem. BF BS-Kommando/Schacht 65	1998	1998	7	2,64	
ehem. Halde und BF Schacht 250	1992	1996	8	8,35	
BF und Halde Großschurf 1	1997	1999	8	2,08	
BF ehem. Kernlager	1994	2001	8	1,93	
BF Betriebsschule Schlema	2000	2001	8	1,48	
BF und Halde Schacht 12/259/309	2009	noch nicht abgeschlossen	9	15,03	
BF und Halde Schacht 310	1993	noch nicht abgeschlossen	9	8,95	

Tabelle 27: Sanierungsmaßnahmen im Teilgebiet Johannegeorgenstadt

Objektname/Ort	Sanierung		Objektgruppe	Größe [ha]	Bemerkung
	Beginn	Ende			
TF4 der BF Zentralgarage Objekt 8	Apr 08	Jul 08	1	1,33	
Talstation Skilift Johannegeorgenstadt	Jul 10	Nov 10	1	0,35	
Zeche 51 (Trockenzeche 51)	Mai 02	Okt 02	1	0,62	P1
Erzverladebahnhof (Armerzverladebahnhof)	Mai 03	Jul 03	1	0,16	P2
Erzbunker am Eisenwerk	Sep 03	Jul 04	1	0,05	P3.2
Erzbunker am Wismut-Stolln 230	Sep 03	Jul 04	1	0,07	P3.1
HLD an der Haberlandmühle	Mrz 04	Mai 05	2	13,13	P7-Südteil ca. 1 ha
	Jun 09	Jul 11			Mittelteil ca. 3 ha
Caravanplatz Johannegeorgenstadt	Nov 04	Jun 05	3	1,93	
Betriebsflächen Schächte 52 und 227	Nov 06	Jul 07	3	5,92	
Halde Schacht 52 und 227 (Zentralschachthalde)	Okt 04	Nov 05	3	15,22	P5-Ostböschung ca. 2,5 ha
Halde Schacht 39	Nov 06	Aug 07	3	0,20	
Halde Schaarschacht (P4)	Aug 03	Jul 04	3	1,51	
Halde Schacht 120	Feb 09	Okt 09	3	0,35	
Erzbunker am Schaarschacht	Aug 03	Jul 04	3	0,03	gemeinsame Sanie- rung mit Schaar- schachthalde

Tabelle 28: Sanierungsmaßnahmen im Teilgebiet Zwickau

Objektname/Ort	Sanierung		Objekt- gruppe	Größe [ha]	Bemerkung
	Beginn	Ende			
IAA Dänkriz I	1999	2002	1	27,35	
IAA Helmsdorf	1990	noch nicht abgeschlossen	1	243,05	
Bergehalde Crossen	1990	noch nicht abgeschlossen	2	26,46	
BF Crossen	1991	noch nicht abgeschlossen	3	17,42	
BF Erzlager Sächsische Erze	2000	2001	4	3,73	
DFA Fläche Crossen	2000	2001	4	2,84	

Für die qualitativen und quantitativen Betrachtungen zum Sanierungsgeschehen werden teilgebietsbezogen die Phase des noch aktiven Uranerzbergbaus und unterschiedliche Zeitschnitte unterschieden, die aus den Befliegungszeiträumen resultieren. Als wichtigste Kenngröße bei der Beurteilung der Sanierungsvorhaben dient die Entwicklung der Uran-Aktivitäten.

6.2 Teilgebiet Aue

6.2.1 Sanierungsarbeiten

Der Fortschritt der Sanierungsarbeiten im Teilgebiet Aue wird sehr anschaulich mit den drei Bildern in Abbildung 31 ersichtlich. Die Befliegung 2003 ist für das Messgebiet wegen der bekannten schlechten Datenlage nicht mit berücksichtigt (Kapitel 5.2.3).

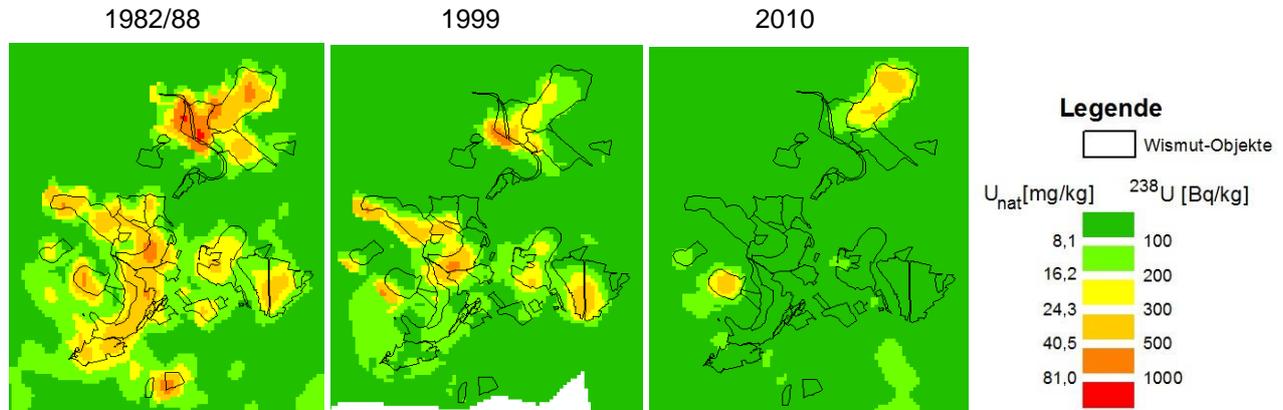


Abbildung 31: Aue (Ausschnitt) – äquivalente spezifische Aktivitäten Uran-238 von 1982/88, 1999, 2010

Phase des noch aktiven Uranerzbergbaus

Anhand der äquivalenten spezifischen Bodenaktivitäten für Uran-238 > 200 Bq/kg lassen sich sehr gut die un sanierten (unabgedeckten) Haldenkomplexe in der Region Schlema-Alberoda von dem geogenen Umfeld abgrenzen (siehe Abbildung 31, linkes Bild). Zu nennen sind hierbei insbesondere:

- Haldenkomplex 371/I und 371/II
- Halde 366
- Halde 66/207
- Halde 38neu/208,
- Halde 38alt
- Halde 382,
- Halde Borbachdamm (das Absetzbecken Borbachtal tritt auf Grund der Wasserüberdeckung als ODL-Anomalie nicht in Erscheinung)
- Hammerberghalde, Halde 64, Halde 312
- Halde 309
- Halde 310

Darüber hinaus sind aber auch die Standorte (Betriebsflächen) der Beprobungszeche 50 an der Auer Straße und das Erzlager mit der Radiometrischen Aufbereitungsfabrik (RAF) am Schacht 371 mit spezifischen Bodenaktivitäten für Uran-238 größer 200 Bq/kg von Interesse.

Ebenso heben sich das Deformgebiet und die noch nicht umgelagerte Halde 250 als gut erkennbare Anomalien von der Umgebung ab.

Dagegen lassen sich die kleineren Halden, wie z. B. die Halde 13b und die Halde Großschurf auf Grund ihrer geringen Erstreckung nicht erfassen. Der Bereich der IAA Oberschlema ist zu diesem Zeitpunkt bereits abgedeckt und somit nicht mehr als ODL-Anomalie lokalisierbar.

Sanierungen bis zur Befliegung 1999, Finnischer Geologischer Dienst

Es lassen sich bereits die ersten Erfolge der Umlagerungs- bzw. Abdeckungs- und Abdichtungsarbeiten in dieser Region nachweisen. Im Anomalienbild der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten (siehe Abbildung 31, mittleres Bild) treten folgende aufgrund aufgebraachter Abdeckungen aus unkontaminierten Erdstoffen nicht mehr in Erscheinung:

- Halde Borbachdamm
- Halde 38alt
- Hammerberghalde
- Deformgebiet
- Betriebsfläche Zeche 50
- Halde 250

Sanierungen bis zur Befliegung 2003, BfS/BGS-Übung

Entsprechend dem Sanierungsfortschritt und in Folge aufgebraachter Abdeckungen aus unkontaminierten Erdstoffen sind folgende im Vergleich zu 1999 weiteren Objekte im Anomalienbild der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten nicht mehr sichtbar (ohne Abbildung bzw. Anlage wegen unklarer Datenlage):

- Halde 366
- Halde 38neu/208
- Erzlager und RAF am Schacht 371

Auf Grund der Auffüllung der Beckenmulde des Absatzbeckens Borbachtal mit radioaktiv kontaminiertem Haldenmaterial (nach Freiwasserabsenkung und Zwischenabdeckung) ist in diesem Bereich eine Erhöhung der Gammastrahlung zu erkennen. Auch die zu diesem Zeitpunkt aktuellen Sanierungsbereiche auf der Halde 66/207, der Einlagerungsbereich auf der Halde 382 (Halde 382Anschüttung), die gerodete Halde 382West, der Einlagerungsbereich auf dem Plateau der Halde 371/I sowie die nach wie vor unsanierte Halde 309 werden noch eindeutig als Anomalien mit äquivalenten spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten größer 200 Bq/kg erfasst. Die zur Halde 309 benachbarte und ebenfalls nicht sanierte Halde 310 hebt sich vom Umfeld nicht so eindeutig ab. Das Haldeninventar und der visuelle Zustand sind allerdings ähnlich.

Sanierungen bis zur Befliegung 2010, BfS/BGS-Übung

Entsprechend des intensiven Sanierungsfortschrittes mit den aufgebraachten Abdeckungen aus unkontaminierten Erdstoffen sind folgende Objekte im Bild der äquivalenten Uragehalte als Anomalien nicht mehr sichtbar (siehe Abbildung 31, rechtes Bild):

- Halde 66/207
- Halde 382/Anschüttung
- Halde 382 West
- Halde Borbachdamm
- IAA Borbachtal

Die weiterhin aktiven Einlagerungsbereiche auf dem Plateau der Halde 371/I inklusive der Einlagerungsflächen für Immobilisate der Wasserbehandlung („Verwahrstandort“) im Westteil und der Einlagerungsbereiche von radioaktiven Materialien Dritter im Nordteil sind als Anomalien gut zu erkennen. Bei den radioaktiven Materialien Dritter handelt es sich bevorzugt um Haldenmaterialien aus der Sanierung von Altstandorten im Rahmen des vom Bund und vom Freistaat Sachsen vereinbarten Verwaltungsabkommens (2003–2012). In einigen Fällen wurden Haldenmaterialien mit höheren spezifischen Aktivitäten im Vergleich zum originären Haldenmaterial Schacht 371 eingelagert, was sich tendenziell in den unterschiedlich ausgeprägten Anomalien zwischen 2003 und 2010 auch abbildet.

Auch die Halde 309 (Halde Schacht 12/259/309) und die Halde 310 sind zu diesem Zeitpunkt weiterhin unsaniert; dabei ist die Halde 309 als Bereich mit äquivalenten spezifischen Bodenaktivitäten für Uran-238 von größer 300 Bq/kg deutlich erkennbar.

6.2.2 Zusammenfassende quantitative Darstellungen

Aus den Kriging-Schätzwert-Ergebnissen wurden mit Hilfe der Masken (Kapitel 3.5) je Objektgruppe plus Hintergrundgebiet folgende Kennwerte berechnet:

- Minimum
- Maximum
- Arithmetisches Mittel (MW)
- Standardabweichung

Aus diesen Angaben wurden je Messzeitpunkt und je Parameter Tabellen mit folgender Struktur aufgebaut und als dreidimensionales Säulendiagramm zur Darstellung gebracht:

- Gruppe - Objektgruppe
- MIN - Minimum
- UG - MW – Standardabweichung (aber nicht kleiner als MIN)
- MW - arithmetisches Mittel
- OG - MW + Standardabweichung (aber nicht größer als MAX)
- MAX - Maximum

Die Werte sind auf ganze Zahlen gerundet. Die aus diesen Tabellen erzeugten Säulen sind ähnlich einem „Box-and-Whisker-Plot“ zu lesen. Der Mittelwert ist als schwarze Linie gekennzeichnet. Sie wird umgeben von 2 Bereichen mit kräftigen Farben (von UG bis OG). Normalverteilung vorausgesetzt, sind zwischen UG und OG 2/3 aller Werte zu finden. Es schließen sich von UG bis MIN bzw. von OG bis MAX zwei matt eingefärbte Bereiche an. Speziell der Bereich von OG bis MAX ist wegen der vorkommenden wenigen hohen Werte von Interesse.

Die x-Achse wird von den Objektgruppen und dem Hintergrundbereich (HG) gebildet. Die Messzeitpunkte der Befliegungstermine markieren die y-Achse.

Spezifische Uran-238-Bodenaktivitäten

Tabelle 29: Aue – Kennwerte der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten [Bq/kg]

1982/88						1999						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	27	27	238	452	1104	1	0	6	110	214	664	1	11	11	93	178	395
2	60	88	171	253	403	2	21	37	138	239	380	2	27	41	55	69	94
3	49	126	193	259	337	3	22	84	151	218	310	3	19	48	66	85	108
4	35	123	243	362	670	4	12	42	169	296	579	4	17	34	50	66	93
5	73	177	271	365	514	5	39	72	136	200	444	5	13	46	66	86	121
6	96	142	196	250	350	6	62	79	105	130	165	6	52	63	72	82	86
7	77	120	260	400	656	7	59	70	83	96	126	7	32	40	57	74	107
8	70	108	163	219	319	8	49	68	96	125	185	8	43	51	65	80	105
9	24	75	191	308	532	9	6	18	127	237	522	9	21	44	140	236	466
HG	0	22	46	71	292	HG	18	27	41	56	158	HG	17	26	44	62	120

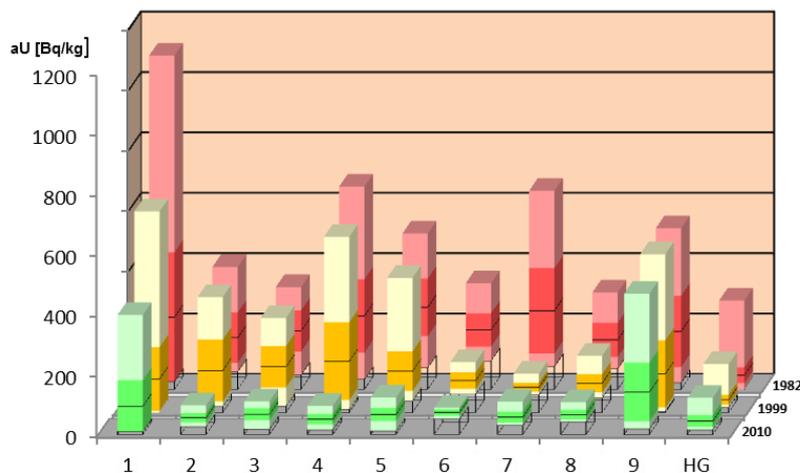


Abbildung 32: Aue – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten

Die zeitliche Entwicklung der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten zeigt am nachhaltigsten die Sanierungseffekte. Laut Kapitel 6.2.1 wurden in der Phase I bis 1999 Sanierungsarbeiten in den Objektgruppen 4 (Halde Borbachdamm, Halde 38alt), 5 (Hammerberghalde), 7 (BF Halde 50, Schacht 65) und 8 (Schacht 250) durchgeführt. Während die Erfolge in den Objektgruppen 7 und 8 in Abbildung 32 nachvollzogen werden können, sind die Erfolge in den Objektgruppen 4 und 5 zum Zeitpunkt 1999 nicht so offensichtlich. Ein wesentlicher Grund dafür sind wahrscheinlich die aufgeführten Messpunktverschiebungen (Kapitel 5.2.4). Diese bewirken, dass ein Teil der erfassten hohen Werte in den beiden Objektgruppen von zum Zeitpunkt 1999 noch nicht sanierten benachbarten Wismut-Objekten stammen.

Der Messzeitpunkt 2010 zeigt eindrucksvoll, dass zu diesem Zeitpunkt die Objektgruppen 2 bis 8 (Tabelle 4) bereits einen Sanierungsstand erreicht haben, bei dem sich die Uran-Aktivitäten auf dem Niveau des Hintergrunds eingepegelt haben. In den Objektgruppen 1 (Halde 371/2) und 9 (BF und Halde Schacht 12/259/309) besteht offensichtlich weiterer Sanierungsbedarf.

Der Hintergrundbereich ist von den Sanierungsmaßnahmen ausgeschlossen. Das drückt sich in den weitgehend ähnlichen Werten von UG, MW und OG über alle drei Messzeitpunkte aus. Lediglich die Maxima variieren, was auf ein Ausstrahlen einiger weniger hoher Werte in den Wismut-Objekten auf die nähere Umgebung schließen lässt.

Spezifische Thorium-232-Bodenaktivitäten

Tabelle 30: Aue – Kennwerte der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten [Bq/kg]

1982/88						1999						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	30	37	44	52	65	1	32	37	40	44	51	1	26	33	39	45	53
2	14	22	31	40	45	2	23	27	35	44	55	2	20	30	38	45	51
3	17	25	30	35	38	3	25	29	32	35	39	3	18	29	33	38	44
4	32	37	40	44	49	4	31	35	39	42	49	4	28	35	39	42	49
5	35	38	41	44	47	5	32	36	39	42	48	5	27	34	38	41	45
6	35	36	37	39	41	6	33	35	38	41	43	6	29	30	33	36	41
7	39	41	44	47	52	7	39	40	42	43	45	7	30	30	32	34	38
8	32	34	35	36	39	8	32	35	37	40	43	8	28	32	36	40	46
9	36	39	41	43	44	9	36	38	40	42	46	9	30	33	35	37	42
HG	1	24	36	48	100	HG	16	31	41	52	102	HG	9	27	38	49	99

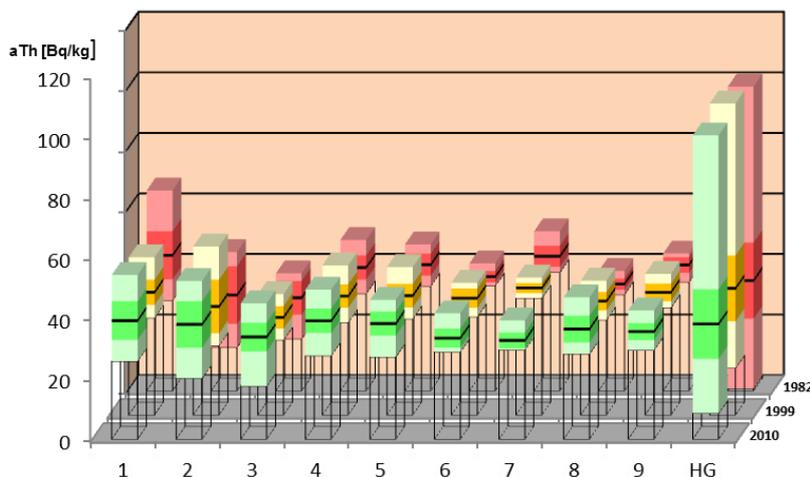


Abbildung 33: Aue – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten

Aus Abbildung 33 geht hervor, dass die Thorium-Werte relativ unbeeinflusst von den Sanierungsaktivitäten bleiben. Das war in Anbetracht der bereits festgestellten Gesteinsbestimmtheit der Thorium-Werte nicht anders zu erwarten. Die hohen Thorium-Werte im Kirchberger Granit (s. Abbildung 27) finden in den drei HG-Säulen ihren Ausdruck.

ODL-Werte

Tabelle 31: Aue – Kennwerte der ODL-Messungen [nSv/h]

2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	87	93	151	209	320
2	102	119	130	141	157
3	100	119	131	143	159
4	92	107	116	125	146
5	109	120	131	141	163
6	113	122	129	136	138
7	104	110	119	129	140
8	111	118	132	146	159
9	100	120	163	205	283
HG	51	92	113	135	214

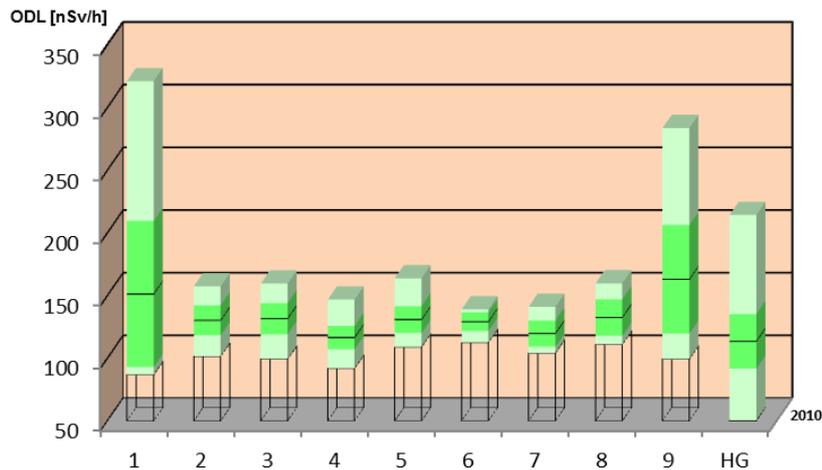


Abbildung 34: Aue – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der ODL-Werte

Über die zeitliche Entwicklung der ODL-Werte kann keine Aussage getroffen werden, weil mit 2010 nur ein Messzeitpunkt vorliegt. Hervorzuheben ist lediglich die optische Ähnlichkeit der Säulen mit denen aus 2010 in Abbildung 32. Das war in Anbetracht der statistischen Abhängigkeiten zwischen Uran und ODL zu erwarten (s. Tabelle 11).

6.3 Teilgebiet Johanngeorgenstadt

6.3.1 Sanierungsarbeiten

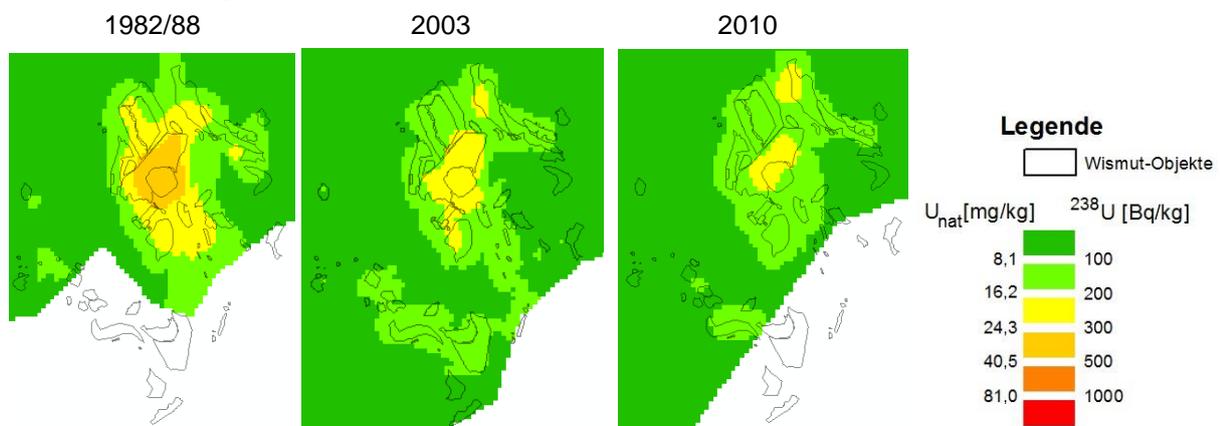


Abbildung 35: Johanngeorgenstadt (Ausschnitt) – äquivalente spezifische Aktivitäten Uran-238 von 1982/88, 2003, 2010

Zustand zur Vermessung 1982/1988 (kein aktiver Uranerzbergbau mehr)

Im Bereich Johanngeorgenstadt stellte die SAG/SDAG Wismut den Bergbau zwischen 1955 und 1958 ein. Die Halden- und Betriebsstandorte sind damals meist nur unzureichend gesichert, verwahrt bzw. saniert worden. Für die Halden betraf das oft nur eine Konturierung und Aufforstung (oft mit nur geringmächtigem Substratauftrag).

Eine Sanierung der so genannten Wismut-Altstandorte nach modernen Grundsätzen begann 2001 mit der Sanierungsvorbereitung für den Schwerpunktbereich Johanngeorgenstadt/Breitenbrunn.

Anhand der äquivalenten spezifischen Bodenaktivitäten für Uran-238 > 200 Bq/kg lassen sich sehr gut die unsanierten Haldenkomplexe in der Region Johannegeorgenstadt von dem geogenen Umfeld abgrenzen (siehe Abbildung 35, linkes Bild). Zu nennen sind hierbei insbesondere:

- Absetzbecken J1, Damthalde Trockenbecken (Uran-238 > 300 Bq/kg)
- Absetzbecken J2, Damthalde Steinsee, Halde am Külligut
- Halde Schacht 54

Sanierungen bis zur Vermessung 2003, BfS/BGS-Übung

Im mittleren Bild der Abbildung 35 ist erkennbar, dass die Verbreitungsflächen der Bodenaktivitäten für Uran-238 > 200 Bq/kg wesentlich kleiner sind als im Zeitraum 1982/1988:

- durch Sanierungsarbeiten in den Jahren 2002 und 2003 belegt sind dabei aber nur sehr kleinflächige Bereiche im Südosten:
 - Trockenzeche 51 und
 - Armerzverladebahnhof
- nicht durch Sanierungsarbeiten belegt ist der Rückgang der gemessenen Bodenaktivitäten für Uran-238 in den Bereichen:
 - Absetzbecken J1, Damthalde Trockenbecken (Uran-238 > 300 Bq/kg)
 - Absetzbecken J2 („Deponie Steinsee“), Damthalde Steinsee, Halde am Külligut

Geht man davon aus, dass die Unterlagen zu den Sanierungsvorgängen vollständig sind, so sind die Veränderungen in der Höhe der gemessenen Bodenaktivitäten für Uran-238 zwischen den Messungen 1982/1988 und 2003 auf den nicht sanierten Flächen hauptsächlich in Unterschieden der Messmethodiken zu vermuten.

Sanierungen bis zur Vermessung 2010, BfS/BGS-Übung

Im rechten Bild (Zeitschnitt 2010) der Abbildung 35 ist erkennbar, dass sich die Verbreitungsflächen der Bodenaktivitäten für Uran-238 > 200 Bq/kg etwas von denen im Zeitschnitt 2003 unterscheiden. Diese Unterschiede sind hauptsächlich durch die unterschiedlichen Messwertniveaus in den einzelnen Messkampagnen begründet. Unabhängig davon sind folgende kleinflächige Sanierungsarbeiten bekannt:

- Sanierungsarbeiten in den Jahren 2004/05 und ab 2009 im Nordosten:
 - Südteil und Mittelteil der Halde Haberlandmühle
 - Schüttkörper Westplateau Zentralschachthalde
 - Schaarschachthalde
 - Halde Schacht 120

6.3.2 Zusammenfassende quantitative Darstellungen

Spezifische Uran-238-Bodenaktivitäten

Tabelle 32: Johannegeorgenstadt – Kennwerte der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten [Bq/kg]

1982/88						2003						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	42	114	206	299	466	1	39	93	146	199	288	1	46	99	143	187	258
2	7	74	129	184	270	2	38	56	103	150	236	2	28	49	104	160	269
3	35	60	83	106	133	3	49	78	97	116	147	3	57	65	84	104	142
4	28	56	98	140	198	4	28	49	62	74	92	4	27	47	73	98	115
5	74	93	114	135	153	5	58	60	65	70	76	5	58	63	67	71	73
HG	10	30	49	68	154	HG	19	34	49	64	101	HG	20	33	50	66	119

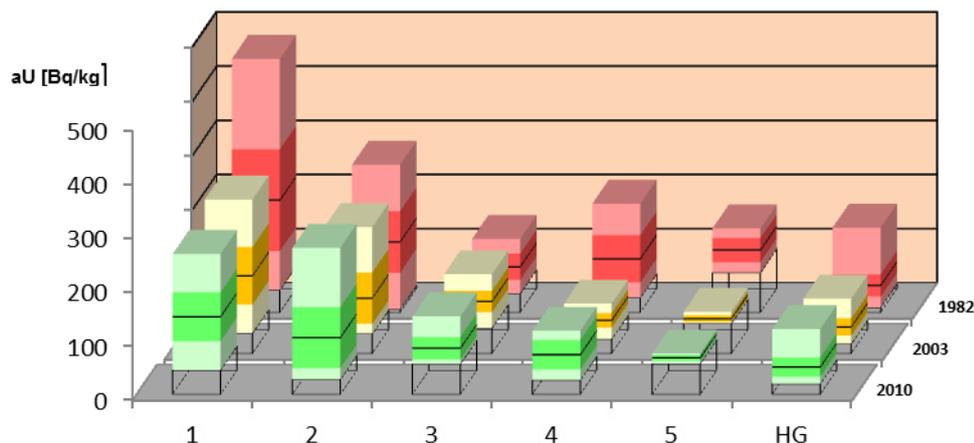


Abbildung 36: Johannegeorgenstadt – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten

Vor der Analyse der Diagramme von Johannegeorgenstadt muss man einen Blick auf die Überdeckung der Wismut-Objekte durch die Befliegungsflächen werfen. Aus Abbildung 6 geht hervor, dass

- Objektgruppe 3 nur von der Befliegung 2003 zufriedenstellend überdeckt wird,
- Objektgruppe 5 von der Befliegung 2010 unzureichend überdeckt wird. Zudem weist diese Objektgruppe eine sehr kleine Fläche auf.

Entsprechend sind die Werte aus diesen Befliegungen nicht repräsentativ für die gesamte Objektgruppe. Hinzu kommen die bekannten Qualitätsprobleme der Befliegung 2003. Im Übrigen kommen hier die 2003er-Messwerte mit erweiterter Transformation zum Einsatz (s. Kapitel 5.3.3).

Unter diesen Gesichtspunkten kann festgestellt werden:

- In Objektgruppe 1 haben sich die Messwerte von 1982 zu 2003 verringert, seitdem sind sie gleich geblieben. Sie liegen jedoch trotzdem höher als im Hintergrundbereich.
- Die Messwerte in Objektgruppe 2 sind weitestgehend unverändert geblieben. Die Werte liegen höher als im Hintergrundbereich.
- Die Messwerte in Objektgruppe 4 sind weitestgehend unverändert. Sie liegen unwesentlich höher als im Hintergrundbereich.

Die vorhandenen Messwerte der Objektgruppen 3 und 5 weisen auf keine gravierenden hohen Werte in Vergleich zu den Hintergrundwerten hin. Die Objektgruppe 3 ist nur 2003 ausreichend flächendeckend gemessen worden.

Spezifische Thorium-232-Bodenaktivitäten

Tabelle 33: Johannegeorgenstadt – Kennwerte der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten [Bq/kg]

1982/88						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	26	41	48	54	61	1	17	34	41	49	63
2	31	37	43	49	59	2	24	33	38	44	53
3	35	39	41	44	45	3	25	35	39	42	48
4	17	27	33	40	42	4	21	28	33	39	42
5	18	23	27	31	33	5	11	13	15	18	18
HG	1	13	23	34	47	HG	9	16	24	32	48

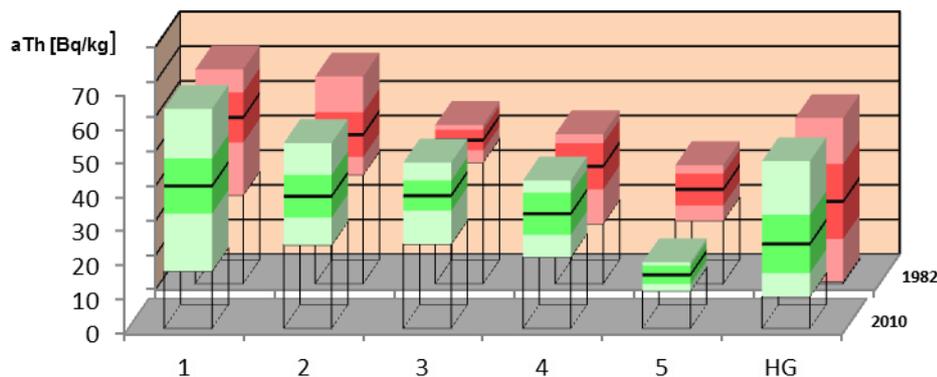


Abbildung 37: Johannegeorgenstadt – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten

Die Thorium-Aktivitäten unterliegen zwischen 1982/88 und 2010 keinen signifikanten Veränderungen. Objektgruppe 5 ist 2010 nur unzureichend abgedeckt. Daraus resultiert die Veränderung.

ODL-Werte

Tabelle 34: Johannegeorgenstadt – Kennwerte der ODL-Messungen [nSv/h]

2003						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	102	147	190	233	239	1	103	149	179	208	239
2	98	114	156	197	258	2	88	110	150	191	258
3	119	138	153	168	171	3	111	122	136	150	171
4	80	100	114	127	149	4	86	106	125	145	149
5	101	105	110	114	113	5	105	106	108	110	113
HG	32	83	99	116	168	HG	58	84	100	117	168

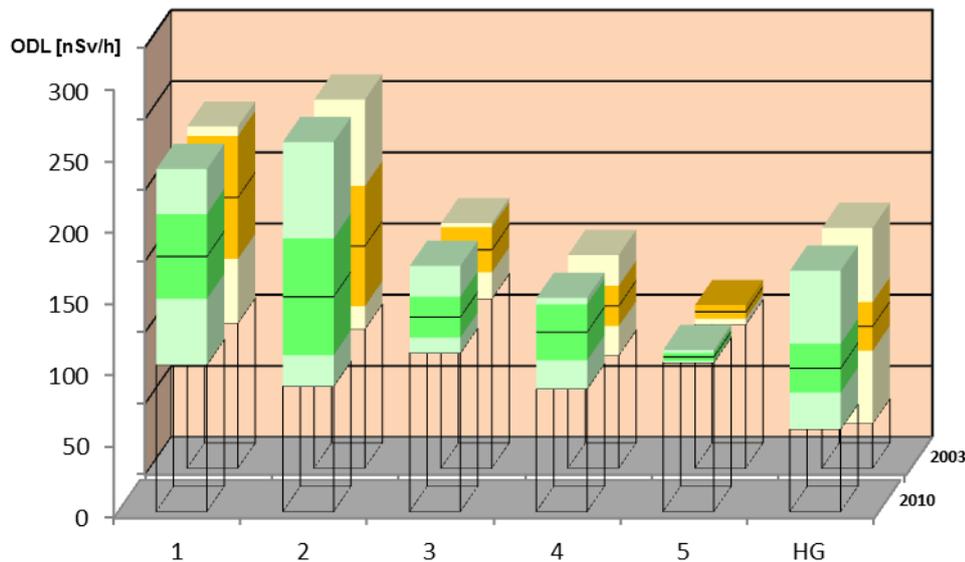


Abbildung 38: Johannegeorgenstadt – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der ODL-Werte

Die ODL-Werte unterliegen zwischen 2003 und 2010 keinen signifikanten Veränderungen. In den Objektgruppen 1, 2 und 3 übersteigen sie die Hintergrundwerte.

6.4 Teilgebiet Zwickau

6.4.1 Sanierungsarbeiten

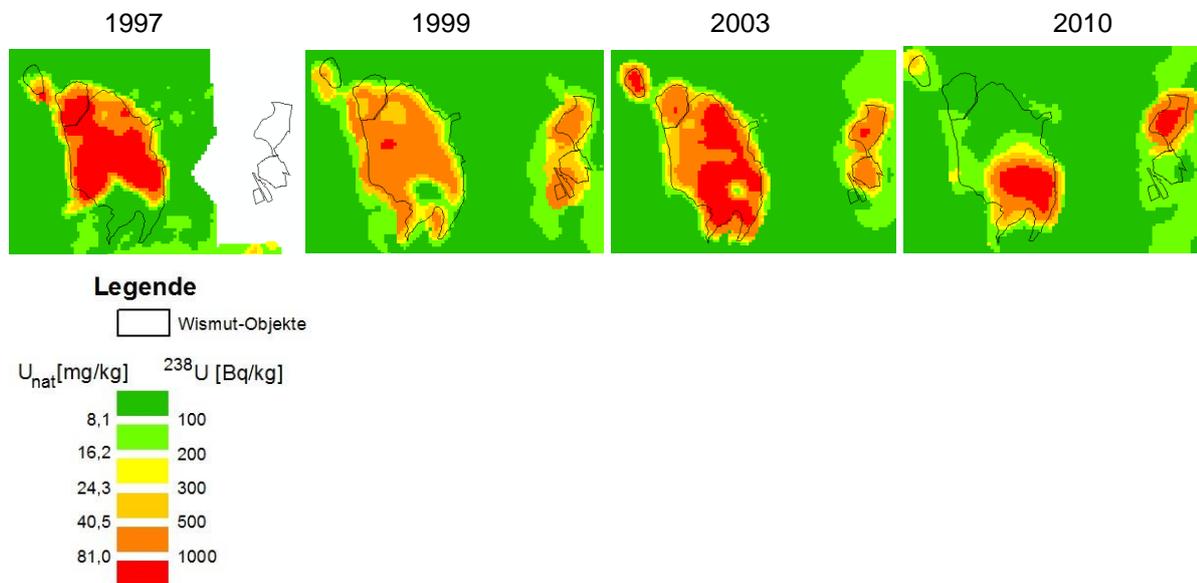


Abbildung 39: Zwickau (Ausschnitt) – äquivalente spezifische Aktivitäten Uran-238 von 1997, 1999, 2003, 2010

Phase des noch aktiven Uranerzbergbaus

Aus dieser Zeit fehlen benutzbare Aerogammadaten, weil diese wegen des Unfalls in Tschernobyl stark verfälscht sind.

Sanierungen bis zur Befliegung 1999, Finnischer Geologischer Dienst

Die industriellen Absetzanlagen Helmsdorf, Dänkritz I und Dänkritz II sowie die Bergehalde Crossen und die Betriebsfläche der ehemaligen Uranerzaufbereitungsfabrik sind in der Karte der äquivalenten Urangelte (Abbildung 39) unverändert als rotgefärbte Bereiche (spezifische Aktivität U-238 > 300 Bq/kg) zu erkennen. Weiterhin sind auch die bis dahin noch unsanierten Betriebsflächen (DFA-Fläche, Erzlager „Sächsische Erze“) am linken Ufer der Zwickauer Mulde als rotgefärbte Bereiche deutlich zu erkennen.

Im südlichen Teil der IAA Helmsdorf fällt ein Bereich mit scheinbar sehr viel niedrigeren Urangelten auf. Dieser Effekt wird durch die abschirmende Wirkung der zum damaligen Zeitpunkt noch vorhandenen Freiwasserlamelle über den Aufbereitungsrückständen in der Anlage verursacht.

Sanierungen bis zur Befliegung 2003, BfS/BGS-Übung

Während die industriellen Absetzanlagen Helmsdorf, Dänkritz I und Dänkritz II sowie die Bergehalde Crossen und die Betriebsfläche der ehemaligen Uranerzaufbereitungsanlage Crossen in der Karte der äquivalenten Urangelte (Abbildung 39) weiterhin unverändert als rotgefärbte Bereiche (spezifische Aktivität U-238 > 300 Bq/kg) zu erkennen sind, ist die zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossene Sanierung der Betriebsflächen auf dem linken Ufer der Zwickauer Mulde (DFA-Fläche, Erzlager „Sächsische Erze“) im Aerogrammabbild deutlich sichtbar. Die in der Abbildung markierten Flächen heben sich bereits zu diesem Zeitpunkt kaum mehr erkennbar vom geogenen Untergrund im angrenzenden Gebiet ab.

Der durch die abschirmende Wirkung der Freiwasserlamelle über den Aufbereitungsrückständen der IAA Helmsdorf verursachte Bereich mit niedrigeren Urangelten im südlichen Teil der Anlage ist im Vergleich zur Befliegung 1999 sehr viel kleiner geworden, was sehr gut mit der Reduzierung des Wasservolumens durch die installierte Wasserbehandlungsanlage korreliert.

Sanierungen bis zur Befliegung 2010, BfS/BGS-Übung

In der dritten Sanierungsphase sind am gesamten Standort Crossen deutliche Sanierungseffekte sichtbar. Im Bereich der IAA Dänkritz I und im Nordteil der IAA Helmsdorf liegen die äquivalenten Urangelte in Folge der aufgetragenen Endabdeckung bereits auf geogenem Niveau, während sich diese im südlichen Bereich der IAA Helmsdorf scheinbar sogar erhöht haben. Dieser Effekt wird, wie schon in den vorhergehenden Abschnitten diskutiert, durch die Verringerung des abschirmend wirkenden Freiwasserspiegels über den Aufbereitungsrückständen der Anlage verursacht. Die im Westteil der IAA Helmsdorf noch bestehenden Bereiche mit erhöhten Urangelten werden durch den zum Zeitpunkt der Befliegung noch freiliegenden Westdamm verursacht, welcher aus sandigen Aufbereitungsrückständen errichtet wurde.

Der nördlich der IAA Helmsdorf/Dänkritz I gelegene Altstandort IAA Dänkritz II wurde bis heute nicht saniert oder baulich gesichert. Die Veränderungen im Aerogrammabbild lassen dennoch eine Verringerung der äquivalenten Urangelte im Oberboden vermuten. Eine Erklärung dafür ist die abschirmende Wirkung des Freiwasserspiegels der Anlage, welcher in Folge natürlicher Prozesse in den letzten Jahren erheblich angestiegen ist.

Im Sanierungsgebiet der Bergehalde Crossen hat sich die Ausdehnung des „roten Bereiches“ mit spezifischen Aktivitäten für Uran-238 > 300 Bq/kg seit der Befliegung 2003 deutlich vergrößert. Ursache für diese Veränderungen ist der vollständige Abtrag der Halde, welcher zunächst einen Abtrag und damit ein Freilegen des Haldenkörpers und der Randdämme bis zur Aufstandsfläche erforderlich macht. In der untersten Abtragscheibe des Haldenkörpers befinden bzw. befanden sich zum Zeitpunkt der Befliegung zudem offen liegende Aufbereitungsrückstände aus der Frühphase der Uranerzaufbereitung, welche weitaus höhere spe-

zifische Aktivitäten als das Haldenmaterial aufweisen und mit dem fortschreitenden Abtrag freigelegt wurden (Abbildung 41, Objektgruppe 2).

Die Betriebsfläche der ehemaligen Uranerzaufbereitungsanlage Crossen wurde bis zum Jahr 2009 vollständig saniert und mit unkontaminierten Erdstoffen aufgefüllt, sodass sich dieses Gebiet im Aerogammabild heute nicht mehr vom geogenen Hintergrund der Umgebung unterscheidet. Auch der am Rande dieses Gebietes zur Zwickauer Mulde hin gelegene und aus Haldenmaterial errichtete Hochwasserschutzdamm ist im Aerogammabild unauffällig, weil bereits früher eine Abdeckung mit unbelasteten Erdstoffen erfolgte. Der Damm wird dennoch zu einem späteren Zeitpunkt, d. h. mit Abschluss der Sanierungsmaßnahmen am Standort Crossen, vollständig zurückgebaut werden.

6.4.2 Zusammenfassende quantitative Darstellungen

Spezifische Uran-238-Bodenaktivitäten

Tabelle 35: Zwickau – Kennwerte der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten [Bq/kg]

1997						1999						2003						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	1	1	953	2191	7923	1	1	135	414	694	1074	1	1	47	793	1539	5214	1	21	21	303	708	1946
2	0	0	0	0	0	2	65	157	376	595	772	2	89	207	463	719	1118	2	101	304	650	995	1509
3	0	0	0	0	0	3	67	169	321	473	658	3	60	189	401	612	840	3	1	58	135	212	439
4	0	0	0	0	0	4	238	405	557	709	821	4	1	14	111	208	481	4	100	111	126	140	170
HG	6	15	63	110	425	HG	9	36	59	82	356	HG	16	31	50	69	158	HG	23	35	56	77	151

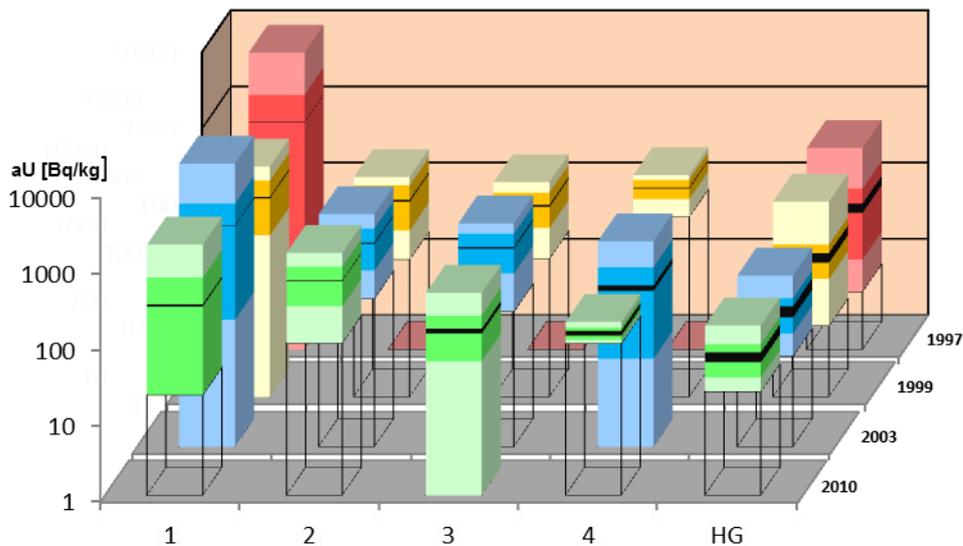


Abbildung 40: Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten (logarithmiert)

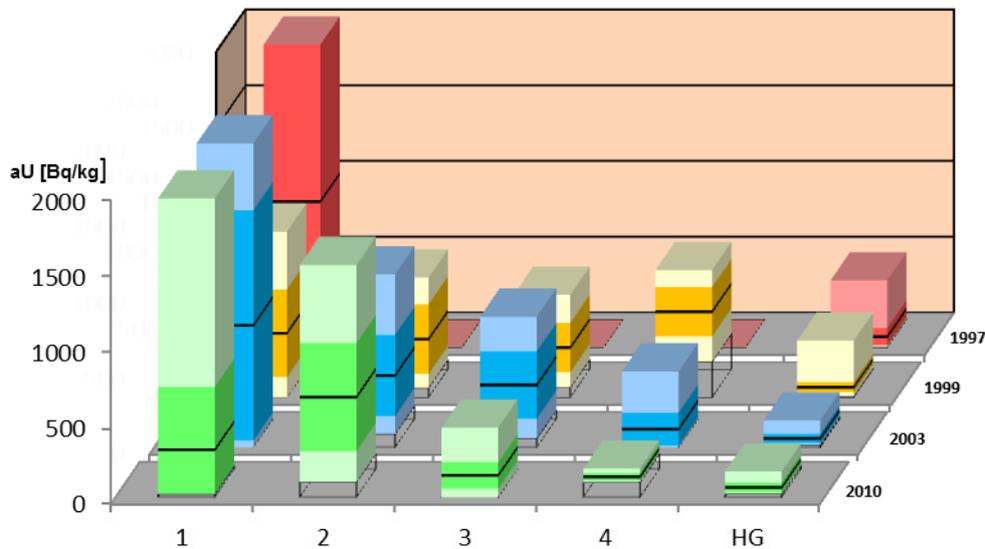


Abbildung 41: Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Uran-238-Bodenaktivitäten (Ausschnitt)

Die Uran-Aktivitäten im Teilgebiet Zwickau weisen als einzige vier verwertbare Messzeitpunkte auf, wobei der Messzeitpunkt 1997 nur die Objektgruppe 1 (Absetzanlagen) überdeckt. Weil die Messwerte deutlich höher sind als in den anderen Teilgebieten, wurden die Messwerte logarithmiert (vollständig, Abbildung 40) und linear (gekappt bei 2.000 Bq/kg, Abbildung 41) dargestellt. Von der Kappung sind die Säulen der Objektgruppe 1 für die Messzeitpunkte 1997 und 2003 betroffen.

Im Unterschied zu Aue und Johanngeorgenstadt ist bei den Messwerten aus Zwickau eine lebhaftere Veränderung in der Zeit zu erkennen. Das wird insbesondere auch aus Abbildung 39 und Abbildung 41 deutlich. Die Arbeiten auf den Absetzanlagen waren 2010 noch in vollem Gang (Objektgruppe 1). Die Werteschwankungen widerspiegeln hier trockengefallene Oberflächen, die teilweise mit kontaminiertem Material aufgefüllt wurden, das noch abgedeckt wird.

Die Gründe für den Anstieg der spezifischen U-238-Aktivitäten im Bereich der Bergehalde Crossen (Objektgruppe 2) sind im Kapitel 6.4.1, Befliegung 2010 beschrieben.

Die Bereiche Erzlager Sächsische Erze und DFA-Fläche (Objektgruppe 4) sind in der Befliegung 2003 schon im Bild der spezifischen U-238-Aktivitäten nicht mehr vom Hintergrund zu unterscheiden (Abbildung 39), was für die mittleren Werte auch das Diagramm in Abbildung 41 zeigt. Die ehemalige Aufbereitungsfabrik Crossen (Objektgruppe 3) war 2009 fertig saniert, was sich sowohl in den Kartendarstellungen als auch im Diagramm in Abbildung 41 widerspiegelt.

Spezifische Thorium-232-Bodenaktivitäten

Tabelle 36: Zwickau – Kennwerte der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten [Bq/kg]

1997						1999						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	0	0	60	123	434	1	0	16	27	39	67	1	11	23	30	37	46
2	0	0	0	0	0	2	29	36	41	46	59	2	23	30	38	45	58
3	0	0	0	0	0	3	27	29	32	36	43	3	32	38	40	42	46
4	0	0	0	0	0	4	30	31	38	44	57	4	29	31	37	42	50
HG	10	22	30	38	107	HG	0	24	31	38	51	HG	11	26	33	39	52

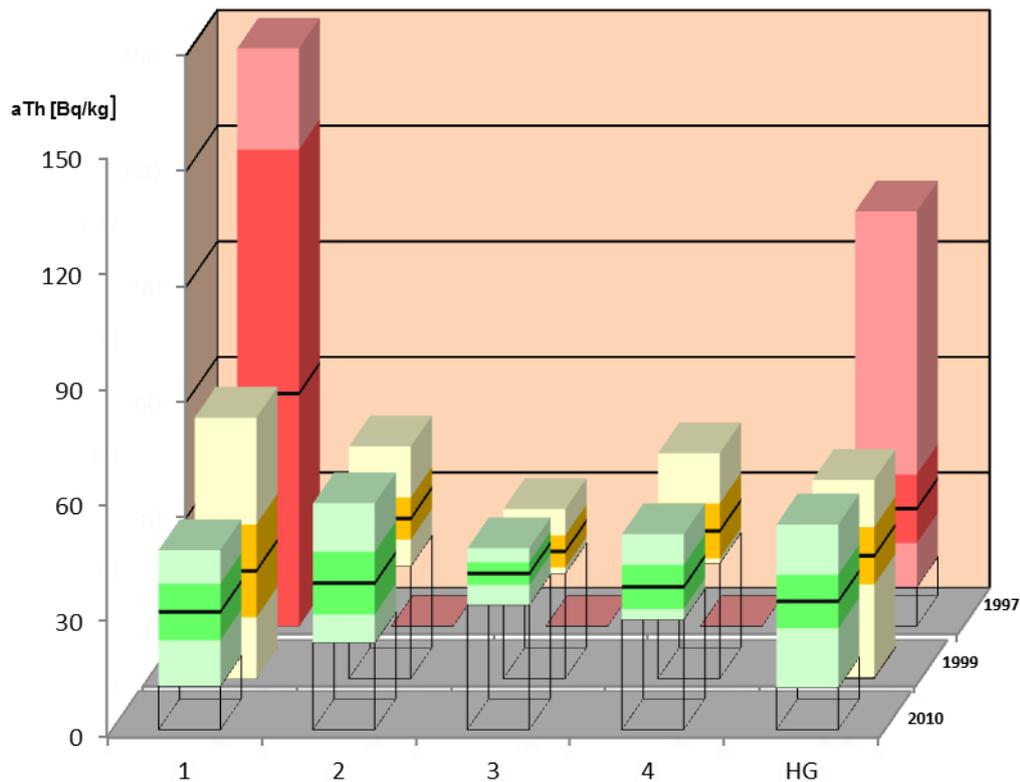


Abbildung 42: Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der spezifischen Thorium-232-Bodenaktivitäten

Das Teilgebiet Zwickau zeichnet sich als einziges dadurch aus, dass die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen zu einer signifikanten Verringerung der Thorium-Aktivitäten in der Objektgruppe 1 geführt haben (Absetzanlagen). Die Werte liegen 2010 auf dem Niveau des Hintergrunds. Die Ursachen wurden in Kapitel 6.4.1 beleuchtet.

ODL-Werte

Tabelle 37: Zwickau – Kennwerte der ODL-Messungen [nSv/h]

1997						2003						2010					
Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX	Gruppe	MIN	UG	MW	OG	MAX
1	0	0	600	1297	4642	1	24	106	558	1011	3354	1	82	82	275	509	1236
2	0	0	0	0	0	2	134	206	368	530	805	2	146	266	476	686	1015
3	0	0	0	0	0	3	119	189	326	463	642	3	74	121	165	208	341
4	0	0	0	0	0	4	88	93	153	213	386	4	124	139	149	159	175
HG	56	65	132	200	641	HG	52	90	110	129	206	HG	45	93	113	132	189

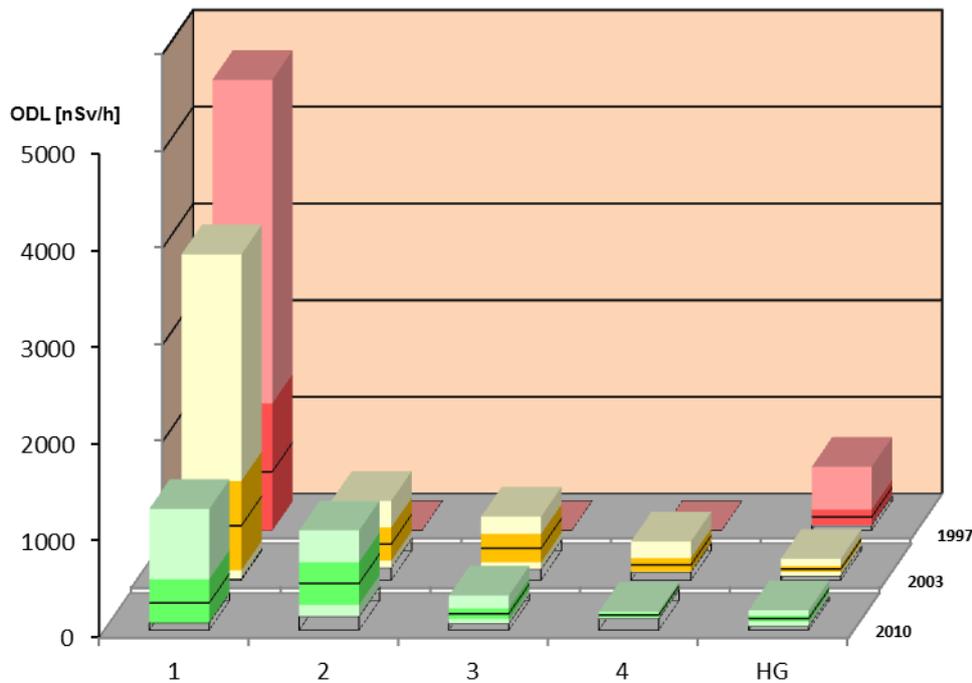


Abbildung 43: Zwickau – Objektgruppen-Zeit-Diagramm der ODL-Werte

Die ODL-Werte der Objektgruppe 1 (Absetzanlagen) gehen kontinuierlich zurück, verbleiben insgesamt jedoch noch auf einem Niveau, das weit über den Hintergrundwerten liegt. Das ist eine Folge der noch nicht abgeschlossenen Sanierungsarbeiten.

7 Zusammenfassung

Der Bericht beinhaltet die Auswertung von aerogammaspektrometrischen Befliegungen von Gebieten mit ehemaligem Uranerzbergbau aus den Jahren 1982-1988, 1997, 1999, 2003 und 2010. Zur Auswertung kamen die berechneten Daten der äquivalenten spezifischen Bodenaktivitäten von U-238 bzw. Th-232 sowie der Gamma-Ortsdosisleistung in den drei Teilgebieten Aue, Johanngeorgenstadt und Zwickau. Es sollte geprüft werden, inwieweit sich die auf den drei Teilgebieten ausgeführten Sanierungsarbeiten in den Messwerten widerspiegeln.

Ein Vergleich der Messwerte der Aerogammabefliegungen unterschiedlicher Kampagnen erscheint möglich, weil

- ab 1997 nach gleicher Methode mit gleichen Detektoren gemessen wurde,
- die Umrechnung der im Hubschrauber gemessenen Impulsraten auf die Gehalte im Boden durch Faktoren passiert, die über Flächen mit bekannten Radionuklidgehalten kalibriert wurden,
- über die als unverändert anzusehenden Hintergrundwerte Messwerttransformationen zur Angleichung der Hintergrundwertenniveaus ausführbar waren.

Die statistischen Auswertungen wie auch die Interpolationsberechnungen erfolgten getrennt für die gepufferten Bereiche der Wismut-Objekte und für den Hintergrundbereich. Die statistischen Auswertungen beinhalten

ten tabellarisch zusammengefasste statistische Maßzahlen, Histogramme und Diagramme zu paarweisen Abhängigkeiten, jeweils bezogen auf die einzelnen Messkampagnen. Die statistischen Ergebnisse wiesen eine Vergleichbarkeit der Messungen zu den verschiedenen Zeitpunkten nach einer einfachen Transformation auf der Grundlage der Medianangleichung in den Hintergrundbereichen nach. Anhand der Ergebnisse der statistischen Auswertungen erfolgte vor der Interpolation diese Transformation aller Werte auf das Niveau der Messungen aus 2010.

Die angewandte Methodik bei der räumlichen Analyse der Daten beinhaltete die Bearbeitungsschritte:

- **Erstbewertung:** Sie wurde hauptsächlich mit Hilfe des Voronoi-Mosaiks ausgeführt. Eine Reihe von Messdaten musste als unbrauchbar eingestuft werden (z. B. die Messdaten von 2003 im Teilgebiet Aue). Bei anderen Messdaten musste eine eingeschränkte Qualität festgestellt werden (z. B. die Messdaten von 1999).
- **HRE:** steht für „Homogene Raumeinheiten“. Das Untersuchungsgebiet wird in Teilgebiete untergliedert. Von jedem Teilgebiet wird angenommen, dass sich die Messwerte dort nicht sprunghaft ändern. Sprünge erfolgen an den Rändern der HRE. In der vorliegenden Aufgabenstellung dienen die gepufferten Wismut-Gebiete und die Hintergrundgebiete als HRE.
- **Interpolation je HRE:** Je HRE erfolgt die Interpolation unter Verwendung aller Messwerte innerhalb der HRE. Als Interpolationsverfahren wird Universal Kriging verwendet.
- **Montage der Teilinterpolationen zu einem Gesamtergebnis** mittels Spatial Analyst von ArcGIS 10.2.
- **Bewertung der Ergebnisse:** Schwerpunkt sind die räumliche und zeitliche Messwertentwicklung in den Wismut-Teilbereichen sowie ihr Abgleich mit dem erfolgten Sanierungsgeschehen.

Während die Karten Veränderungen hinsichtlich der externen Strahlung durch das Sanierungsgeschehen qualitativ sehr gut widerspiegeln, konnte anhand der Tabellen und Diagramme eine quantitative Bewertung vorgenommen werden.

Insgesamt zeigen die Karten den Sanierungsfortschritt sehr gut. Das ist in erster Linie an Hand der U-238-Karten und dort insbesondere in den Teilgebieten Aue und Zwickau nachzuvollziehen. Die quantitative Bewertung konnte die Erfolge der Abdeckungsarbeiten ebenfalls gut nachweisen. Zum Beispiel wird für das Teilgebiet Aue ersichtlich, dass für 7 von 9 Objektgruppen die U-238-Aktivitäten an der Erdoberfläche in den Bereich der Hintergrundwerte abgesenkt werden konnten.

Die Sanierung von kleinsten Flächen (meist kleiner ein bis zwei Hektar), wie sie häufig im Teilgebiet Johanngeorgenstadt stattfand, lässt sich weder in den statistischen Ergebnissen, noch in den interpolierten Kartendarstellungen durch Aerogammamessungen sicher belegen.

Ein Vergleich der drei analysierten Parameter (U-238, Th-232, ODL) mit den bergbaulichen und geologischen Gegebenheiten ließ folgende Schlussfolgerung zu:

- Uran ist fast ausschließlich lagerstätten- und bergbaubestimmt.
- Thorium ist überwiegend gesteinsbestimmt.
- ODL ist sowohl lagerstätten- und bergbaubestimmt, als auch gesteinsbestimmt.

Die Messwerte sind geeignet, großflächige Abdeckungsarbeiten im Rahmen der Sanierungsmaßnahmen widerzuspiegeln. Sie sind nicht geeignet nachzuweisen, dass innerhalb der Wismutobjekte zwischen zwei

Messzeitpunkten keine Sanierungen stattgefunden haben – dazu sind die Messwertniveaus von Messkampagne zu Messkampagne zu unterschiedlich. Für diesen Nachweis machten sich umfangreiche Transformationen der Eingangsdaten erforderlich.

Voraussetzungen für eine Verbesserung der quantitativen Aussagen sind:

- vollständige Überdeckung der Wismut-Objekte durch die Befliegungsflächen
- Erhöhung der Lagegenauigkeit der Messpunkte
- verbesserte Kalibrierung der Messgeräte als Voraussetzung der Vergleichbarkeit der Messergebnisse

Die angewandte Methodik ist geeignet für die Einbeziehung weiterer Befliegungszeitpunkte auf den drei Teilgebieten und auch für die Anwendung auf völlig neuen Teilgebieten.

8 Literaturverzeichnis

- BfS/BGS (2011): Nationale Übung Aero-Gammaspektrometrie 2010 – Messflüge in Sachsen (20.-23.09.2010). Interner Vortrag von Bundespolizei und Bundesamt für Strahlenschutz in Dresden vom 23.03.2011
- HERTWIG, TH. & ZEISSLER, K.-O. (2011): Schadstoffkarten für Siedlungsbereiche – Untersuchungen zur Verbesserung der Validität flächenhafter Aussagen. LfULG-Schriftenreihe, Heft 1/2012, 77 S.
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/12900>
- LfULG (2014): Leistungsbeschreibung „Auswertung von aerogammaspektrometrischen Befliegungen der Gebiete des ehemaligen Uranerzbergbaus im Freistaat Sachsen“. Dresden, 17.06.2014, 6 S.
- LfULG (2014): Werkvertrag zwischen dem LfULG, und der Beak Consultants GmbH, Freiberg. Dresden, 30.07.2014
- RUHL, A. & KARDEL, K. (2006): Aerogammaspektrometrische Messungen im Freistaat Sachsen. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Unveröff. Bericht - 17 S. und Anlagen
- WISMUT GmbH (2009): Ausgewählte Sanierungsobjekte im Bereich Johanngeorgenstadt/Breitenbrunn. Unveröff. Material/Exkursionsführer, Chemnitz
- WISMUT GmbH (2015): Tabellarische Aufstellungen der Sanierungen/Sanierungsvorhaben in den Bereichen Johanngeorgenstadt/Breitenbrunn, Zwickau und Aue/Schlema/Schwarzenberg. Unveröff. Material, Chemnitz

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Dr. Thomas Hertwig, Dr. Karl-Otto Zeißler
Beak Consultants GmbH
Am St. Niclas Schacht 13, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 781350
Telefax: +49 3731 781352
E-Mail: postmaster@beak.de

Redaktion:

Dr. Stefan Ritzel
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Strahlenschutz
Söbrigener Straße 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5310
Telefax: +49 351 2612-5399
E-Mail: stefan.ritzel@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

01.06.2015

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.