

# Umweltwandel im Erzgebirge

Eine vergleichende Analyse und Bewertung  
geökologischer Prozesse  
in bewaldeten Einzugsgebieten  
von Trinkwassertalsperren  
der oberen Berglagen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)  
der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften  
der Technischen Universität Dresden

vorgelegt von  
Dipl.-Geogr. Jörg Scheithauer

Dresden, März 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Geographischer Überblick</b>	<b>25</b>
2.1	Lagemerkmale	25
2.2	Naturräumliche Kennzeichnung	29
2.2.1	Geologie, Relief und Gewässernetz	29
2.2.2	Klima, Böden und Vegetation	31
2.2.3	Exkurs: Die Erzgebirgsmoore	33
2.3	Historische Landschaftsentwicklung	37
2.4	Sozioökonomischer Hintergrund	43
<b>3</b>	<b>Grundlagen und Methoden</b>	<b>49</b>
3.1	Vorüberlegungen	49
3.2	Indikatoren des Umweltwandels	52
3.2.1	Wärmehaushalt	52
3.2.2	Wasserhaushalt	53
3.2.3	Stoffhaushalt	54
3.2.4	Spezifische Indikatoren für Moor und Torf	56
3.2.5	Bioindikatoren	57
3.2.6	Synthese zu einem holistischen Indikatorenkonzept	57
3.3	Methodische Herangehensweise	59
3.3.1	Untersuchungsgebiete	59
3.3.2	Recherche vorhandener Datengrundlagen	64
3.3.3	Angewandte Feld- und Labormethoden	68
3.3.4	Statistik	73
<b>4</b>	<b>Analyse des Umweltwandels</b>	<b>75</b>
4.1	Klima und Witterung	75
4.1.1	Überregionaler Kontext	75
4.1.2	Langjährige Klimaentwicklung	76
4.1.3	Extremjahre und Extremereignisse	85

4.2	Stoffdeposition und Stoffeintrag . . . . .	88
4.2.1	Aspekte der Depositionsentwicklung . . . . .	88
4.2.2	Stoffeintrag über Freilandniederschlag und Kronen- traufe . . . . .	90
4.3	Waldzustand und Vegetation . . . . .	98
4.3.1	Das Phänomen „Waldsterben“ . . . . .	98
4.3.2	Waldsterben im Osterzgebirge . . . . .	101
4.3.3	Zusammensetzung der Bodenvegetation . . . . .	106
4.4	Böden und Bodeneigenschaften . . . . .	110
4.4.1	Gefahren für Wald- und Moorböden . . . . .	110
4.4.2	Verteilung und Charakterisierung der Waldböden . .	111
4.4.3	Veränderungen in terrestrischen Böden und Humus- auflagen . . . . .	124
4.4.4	Wandelprozesse in degradierten Gebirgsmooren . . .	135
4.4.5	Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen . . .	149
4.5	Stoffaustrag und Wasserqualität . . . . .	157
4.5.1	Hintergründe von Gewässerverschmutzung und -belastung . . . . .	157
4.5.2	Langjährige Messreihen ausgewählter Oberflächenge- wässer . . . . .	158
4.5.3	NOM und Huminstoffe in Oberflächengewässern . .	164
4.5.4	Stoffaustrag aus degradierten Gebirgsmooren . . .	170
4.5.5	Waldquellen . . . . .	182
4.5.6	Monitoring in Kleinsteinzugsgebieten - Beispiel „Salz- flüßchen“ . . . . .	185
4.5.7	Desorptionsverhalten von Streu . . . . .	190
4.5.8	Stoffliches Mobilisierungspotenzial aus unterschiedli- chen Bodentypen und -horizonten . . . . .	192
<b>5</b>	<b>Bewertung des Umweltwandels</b>	<b>201</b>
5.1	Driving Forces, Wald- und Moorökosysteme, Stoffausträge .	202
5.2	Konsequenzen aus sozioökonomischer Sicht . . . . .	218
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>223</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>227</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>233</b>
<b>9</b>	<b>Danksagung</b>	<b>239</b>

# Tabellenverzeichnis

4.1	Mediane von Klimaparametern der EG Rauschenbach - Flaje (RB-FL), Muldenberg (MB) und Carlsfeld (CF) für den Zeitraum 1971 - 2003 . . . . .	76
4.2	Mittlerer monatlicher und jährlicher Niederschlag ausgewählter Stationen im Westerzgebirge (1901 - 1950, repräsentativ für CF und MB, Quelle: FSK 1981) . . . . .	84
4.3	Mittlerer monatlicher und jährlicher Niederschlag ausgewählter Stationen im Osterzgebirge (1901 - 1950, repräsentativ für RB-FL, Quelle: FSK 1979) . . . . .	85
4.4	Niederschlagschemismus in Freiland (FN) und Kronentraufe (KT) an den DBF Klingenthal (1401) und Olbernhau (1402), Mediane in mg/L, Datenquelle: LFP . . . . .	91
4.5	Mittlere Stofffrachten in kg / ha von 1995 bis 2004 in Freilandniederschlag und Kronentraufe der DBF Klingenthal (1401) und Olbernhau (1402), Datenquelle: LFP . . . . .	94
4.6	Auswahl an Weiserarten der Standortgruppen in den oberen Lagen des Erzgebirges (Erläuterungen siehe Text, nach FSK 1979, 1981) . . . . .	107
4.7	Flächenanteile der Bodentypen in den EG Rauschenbach und Wernsbach . . . . .	116
4.8	Flächenanteile der Bodentypen in den wichtigsten Zulauf-EG der Talsperre Flaje . . . . .	117
4.9	Flächenanteile der Bodentypen in den EG Weiße und Rote Mulde . . . . .	120
4.10	Flächenanteile der Bodentypen im EG Carlsfeld . . . . .	123
4.11	Aktueller Bodenchemismus (Median, unteres und oberes Quartil, $C_{org}$ in %) in den EG des Osterzgebirges . . . . .	125
4.12	Vergleich der Tiefenprofile von drei Standorten im EG Muldenberg (BBn über Phyllit, BB-PP und PSd über Quarzit) . . . . .	127

4.13 Vergleich von zwei Staupodsolen im EG Carlsfeld mit unterschiedlich fortgeschrittener Vernässung und Humusanreicherung ( $C_{org}$ in %) . . . . .	128
4.14 Mittlerer Bodenwasserchemismus in 20, 60 und 100 cm Tiefe auf den DBF Klingenthal - 1401 und Olbernhau - 1402 (Mediane der Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Ionen in $\text{mg}/\text{L}$ , 1995 - 2004, Datenquelle: LFP) . . . . .	132
4.15 Signifikante Änderungstendenzen im Bodenwasserchemismus in 20, 60 und 100 cm Tiefe auf den DBF Klingenthal - 1401 und Olbernhau - 1402 (Rangkorrelation nach Spearman $r_R$ , 1995 - 2004) . . . . .	133
4.16 Rangkorrelation ( $r_R$ ) zwischen den Parametern der SF- und CF- Hochmoorstandorte (signifikant $p < 0,05$ ) . . . . .	143
4.17 Rangkorrelation ( $r_R$ ) zwischen Torfeigenschaften, Titriermittelverbrauch („deltaV“) und Bodenatmung (signifikant $p < 0,05$ ) . . . . .	145
4.18 Torfphysikalische Kenndaten der Standorte am Salzflüßchen (SF), in Carlsfeld (CF), an der Weißen Mulde (WM) und am Löffelsbach (LB) . . . . .	147
4.19 Mittlere wasserchemische Charakteristik (pH-Wert, Sulfat, Eisen, Mangan und Aluminium in $\text{mg}/\text{L}$ , Leitfähigkeit in $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) in den Zuläufen der vier Trinkwassertalsperren 2001 - 2004 (Datenquelle: LTV, Povodi Ohře) . . . . .	158
4.20 Mittlere wasserchemische Charakteristik (Calcium, Magnesium, Natrium, Chlorid, Nitrat, Orthophosphat und Ammonium in $\text{mg}/\text{L}$ ) in den Zuläufen der vier Trinkwassertalsperren 2001 - 2004 (Datenquelle: LTV und Povodi Ohře) . . . . .	159
4.21 Trends (Rangkorrelation $r_R$ ) wasserchemischer Parameter in den Zuläufen der vier Trinkwassertalsperren bis 1993 . . . . .	161
4.22 Trends (Rangkorrelation $r_R$ ) wasserchemischer Parameter in den Zuläufen der vier Trinkwassertalsperren nach 1993 . . . . .	162
4.23 Vergleich der Mediane (Med) und Streuung (QA) des $\text{SAK}_{254}$ in den Talsperrenzuläufen für die Zeiträume 1993 - 2000 und 2001 - 2004 (in $\text{E}/\text{m}$ ), Datenquelle: LTV, Povodi Ohře . . . . .	165
4.24 Vergleich der Mediane (Med) und Streuung (QA) des DOC in den Talsperrenzuläufen für die Zeiträume 1993 - 2000 und 2001 - 2004 (in $\text{mg}/\text{L}$ ), Datenquelle: LTV, Povodi Ohře . . . . .	166
4.25 Änderungstendenz ( $r_R$ ) der Parameter $\text{SAK}_{254}$ und DOC (*CSV) in den Talsperrenzuläufen (Zeitraum 1993-2004) . . . . .	167
4.26 Gegenüberstellung der NOM-Zusammensetzung (in %) ausgewählter Talsperrenzuläufe . . . . .	169

4.27	SAK <sub>254</sub> (in E/m) und DOC (in mg/L) in der Testfläche an der Weißen Mulde . . . . .	172
4.28	Huminstoffe (HS I und II in %) sowie Building Blocks (BB in %) in der Testfläche an der Weißen Mulde . . . . .	173
4.29	SAK <sub>254</sub> (in E/m) und DOC (in mg/L) in der Testfläche bei Carlsfeld . . . . .	175
4.30	Huminstoffe (HS I und II in %) sowie Building Blocks (BB in %) in der Testfläche bei Carlsfeld . . . . .	176
4.31	Anorganische Parameter in der Testfläche bei Carlsfeld (in mg/L) . . . . .	177
4.32	SAK <sub>254</sub> (in E/m) und DOC (in mg/L) in der Testfläche am Löffelsbach . . . . .	178
4.33	Huminstoffe (HS I und II in %) sowie Building Blocks (BB in %) in der Testfläche am Löffelsbach . . . . .	178
4.34	Anorganische Parameter in der Testfläche am Löffelsbach (Ionen in mg/L) . . . . .	179
4.35	Mediane ausgewählter wasserchemischer Parameter in Waldquellen bei Olbernhau (1402 Q1) und nahe Klingenthal (1401 Q1-3) für die Jahre 2001 bis 2004, Datenquelle: LFP Sachsen (Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Ionen in mg/L) . . . . .	183
4.36	Ausgewählte wasserchemische Parameter der TEG-Abflüsse Salzflüßchen und Weißer Fluß (Lf in $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Ionen in mg/L, SAK <sub>254</sub> in E/m, NOM-Fraktionen in %) . . . . .	185
4.37	Saisonale Beziehungen ( $r_R$ ) zwischen ausgewählten organischen Parametern und Witterungskennwerten (T: Tagesmitteltemperatur, N3: Niederschlagssumme der zurückliegenden 3 Tage) . . . . .	190
4.38	NOM-Kennzeichnung der Streu unterschiedlicher Baumarten (vgl. GRUNEWALD und SCHMIDT 2005) . . . . .	191
4.39	Ausgewählte Parameter der Extraktion mit destilliertem Wasser (2002) . . . . .	192
4.40	Vergleich von feldfrischen und luftgetrockneten Torfproben hinsichtlich ihrer NOM-Charakteristik im Extrakt (k.D. = keine Daten) . . . . .	197
4.41	Torfeigenschaften und Mikrobiologie eines SF-Standortes im Vergleich zum extrahierbaren SAK <sub>254</sub> . . . . .	199
5.1	Übersicht der „Driving Forces“ des Umweltwandels in West- und Osterzgebirge vor und nach der politischen Wende im Jahr 1989 (Erläuterungen auf der Folgeseite) . . . . .	202

---

5.2	Quantifizierungsansatz für den potenziell mobilisierbaren DOC (Experimente und LFP-Messungen) . . . . .	209
5.3	Korrelation („+“ entspricht einem signifikantem $r_R$ ) zwischen exogenen Faktoren und NOM-Transfer aggregiert nach Osterzgebirge (links) und Westerzgebirge (rechts) . . . . .	216

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Lage des Erzgebirges im ehemaligen „Schwarzen Dreieck“ (nach JAMS 1999, verändert) . . . . .	20
2.1	Topographische Übersichtskarte des oberen Osterzgebirges .	26
2.2	Topographische Übersichtskarte des oberen Westerzgebirges	28
2.3	Hochmoorentwicklung im Erzgebirge (nach SLOBODDA 1998, verändert) . . . . .	34
2.4	Historische Zeitmarken der Landschaftsentwicklung im oberen Erzgebirge (stark vereinfacht) . . . . .	38
2.5	Historisches Grabennetz im Fichtenforst östlich der Talsperre Carlsfeld . . . . .	42
2.6	Landnutzungsspektrum der oberen Berglagen: Primär- und Sekundärnutzer und wichtige Aktivitäten . . . . .	43
3.1	Stadien der Moorentwicklung unter Berücksichtigung von Eingriffen und Sukzession . . . . .	63
4.1	Box-Whisker-Plots der jährlichen Niederschlagssummen (in mm), Niederschlagstage (in d) und Niederschläge je Niederschlagstag (in mm/d) für 1971 - 2003 (von links nach rechts)	77
4.2	Abweichung des Jahresniederschlages vom Median 1971 - 2003 . . . . .	78
4.3	Box-Whisker-Plots der mittleren, maximalen und minimalen Tagestemperaturen (von links nach rechts, in °C) für 1971 - 2003 . . . . .	79
4.4	Abweichung der mittleren Tagestemperatur vom Median 1971 - 2003 . . . . .	80
4.5	Box-Whisker-Plots von Globalstrahlung (in J/cm <sup>2</sup> ), Relativer Luftfeuchte (in %) und Sonnenscheindauer (in Stunden) für 1971 bis 2003 (von links nach rechts) . . . . .	81
4.6	Monatliche Niederschlagssummen und Tagesmitteltemperaturen 1971 bis 2003 . . . . .	82
		11



4.7	Entwicklung der jährlichen Häufigkeit von Starkregenereignissen, Abweichung vom Median 1971 bis 2003 (über 20 mm Niederschlag bei über 0 °C Tagesmitteltemperatur) . . . . .	86
4.8	Entwicklung der Niederschläge in der ersten Vegetationsperiode April - Juni, Abweichung vom Median 1971 bis 2003 . . . . .	87
4.9	Schwefelemissionen in Deutschland 1987, 1990 und 1995 (die Farbskalierung von violett bis gelb entspricht einer Konzentration von > 175 bis < 50 µg Schwefel je m <sup>3</sup> ; Datenquelle: UMWELTBUNDESAMT 2004, verändert) . . . . .	89
4.10	pH-Wert-Entwicklung in Freilandniederschlag und Kronentraufe an der DBF Olbernhau (1995 - 2004), Datenquelle: LFP . . . . .	92
4.11	Vergleich der durchschnittlichen jährlichen Nitrat - Stickstoff - Konzentrationen auf den DBF Klingenthal (links) und Olbernhau (rechts) 1995 bis 2004, Datenquelle: LFP . . . . .	93
4.12	Vergleich der monatlichen Ammonium - Stickstoff - Konzentrationen 1996 und 2003 auf der DBF Olbernhau in Kronentraufe (links, Skalierung bis 9,0 in mg / L) und Freilandniederschlag (rechts, Skalierung bis 6,0 in mg / L), Datenquelle: LFP . . . . .	93
4.13	Entwicklung der monatlichen Sulfat - Schwefel - Frachten in Freilandniederschlag und Kronentraufe auf der DBF Olbernhau 1995 - 2004 (in kg / ha), Datenquelle: LFP . . . . .	95
4.14	Jahresfrachten von Gesamt-, Ammonium- und Nitrat - Stickstoff sowie Verlauf des N/S-Verhältnisses 1995 - 2004, Datenquelle: LFP . . . . .	96
4.15	Wahrnehmung des Waldsterbens in der Presse („Der Spiegel“ vom 8. Januar 1990, S. 31: „Waldsterben im Erzgebirge: Untersagt den Schornsteinen das Rauchen“) . . . . .	99
4.16	Landnutzung und Waldzusammensetzung in den EG Rauschenbach, Wernsbach und Flaje (nach GRUNEWALD und SCHMIDT 2005, verändert) . . . . .	100
4.17	Blick über das EG Flaje und die zu großen Teilen entwaldete Kammhochfläche (Foto: Scheithauer, Sommer 2001) . . . . .	101
4.18	Waldveränderungen im EG Radni Potok 1975 - 1998 (nach PETROSCHKA 2004, verändert) . . . . .	103
4.19	Änderungstendenzen im EG Radni Potok (aus PETROSCHKA 2004) . . . . .	104
4.20	Landnutzung und prozentuale Waldzusammensetzung (Nadelwald, Laubwald, Offenland) in den EG Flaje, Rauschenbach und Wernsbach . . . . .	105

4.21	Schematische Darstellung ausgewählter Umlagerungsserien (mit Bezeichnung der Umlagerungszonen nach FSK 1979 und der Bodenhorizonte nach AG BODEN 1996) . . . . .	112
4.22	Übersichtskarte der Bodentypen im Einzugsgebiet der Talsperren Rauschenbach und Flaje (Abkürzungen nach AG BODEN 1996, aus GRUNEWALD und SCHMIDT 2005, verändert) . . . . .	114
4.23	Übersichtskarte der Bodentypen im Einzugsgebiet der Talsperre Muldenberg (Abkürzungen nach AG BODEN 1996, aus GRUNEWALD und SCHMIDT 2005, verändert) . . . . .	118
4.24	Übersichtskarte der Bodentypen im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld (Abkürzungen nach AG BODEN 1996, aus GRUNEWALD und SCHMIDT 2005, verändert) . . . . .	122
4.25	Entwicklung ausgewählter Ionenkonzentrationen in den Tiefenstufen 20, 60 und 100 cm (oben: Sulfatschwefel DBF Olbernhau, unten: Aluminium DBF Klingenthal, 1995 - 2004, Datenquelle: LFP) . . . . .	134
4.26	Grabennetz und Torfmächtigkeit im Hochmoor am Salzflüßchen . . . . .	137
4.27	Mittlere Torftiefenprofile von pH-Wert und C/N-Verhältnis (Box-Whisker-Plots) in den Hochmooren am Salzflüßchen, an der Weißen Mulde und im Carlsfeldgebiet (von links nach rechts) . . . . .	139
4.28	Tiefenprofile ausgewählter Standorte in den Hochmooren am Salzflüßchen und im Carlsfeldgebiet . . . . .	141
4.29	Box-Whisker-Plots von Bodenatmung (mg CO <sub>2</sub> / g TS & 24h) und Trockensubstanz (0,01. %) nach Testgebieten (SF - Salzflüßchen, CF - Carlsfeld) und einzelnen Standorten . . .	144
4.30	pH- und Nitrat-Messreihen von Rauschenbach und Wilzsch 1970 - 2004 (Datenquelle: LTV) . . . . .	163
4.31	SAK <sub>254</sub> -Entwicklung (Ext/m) in Rauschenbach und Wilzsch 1993 - 2004 (Datenquelle: LTV) . . . . .	168
4.32	SAK <sub>254</sub> -Entwicklung (Ext/m) im Rohwasser der Talsperre Eibenstock 1993 - 2003 (Westerzgebirge), Datenquelle: LTV	169
4.33	Wassermessnetz in den Testflächen (graue Signatur) an der Weißen Mulde (W), in Carlsfeld (C) und am Löffelsbach (L)	171
4.34	Messreihen von pH-Wert und Sulfationenkonzentration der beiden DBF-Waldquellen 1401Q1 und 1402Q1 für die Jahre 1995 - 2004, Datenquelle: LFP Sachsen . . . . .	184
4.35	SAK <sub>254</sub> und Leitfähigkeit im Salzflüßchen für die Jahre 2002 bis 2004 . . . . .	187

4.36	Clusteranalyse zur Ermittlung der saisonalen Beziehungen zwischen den Stoffen im Salzflüßchen 2002 - 2004 (Ward-Methode, Eukl. Distanzen) . . . . .	188
4.37	Saisonales Verhalten ausgewählter Stoffe im Salzflüßchen 2002 - 2004 . . . . .	189
4.38	pH-Tiefenkurven in den MQ-, MQk- und MQs-Extrakten der Standorte SF1b und SF4a . . . . .	194
4.39	SAK <sub>254</sub> -Tiefenprofile (in Ext/m) der Standorte SF1b und SF4a je nach Lösungsmittel . . . . .	194
4.40	DOC-Tiefenprofile (in mg/L) der Standorte SF1b und SF4a je nach Lösungsmittel . . . . .	195
4.41	NOM-Charakterisierung (in % am TOC) der Standorte SF1b und SF4a: Huminstofffraktionen 1 & 2 (links oben), 1 (rechts oben) und 2 (links unten) sowie Vergleich der MQk-Huminstoff-Tiefengradienten (rechts unten) . . . . .	196
5.1	Vereinfachte Darstellung der Wechselbeziehungen zwischen exogenen Faktoren und ökosystemaren Veränderungen . . . . .	201
5.2	Zusammenhang zwischen atmosphärischem Säureeintrag, Baumschäden und Bodenveränderungen (Schema) . . . . .	203
5.3	Schematische Darstellung des Faktorenkomplexes von Deposition, Waldzustand und Bodenausprägung entlang eines Transektes durch das obere Osterzgebirge . . . . .	204
5.4	Clusteranalyse der wasserchemischen Befunde für die Jahre 2001 - 2004 (vgl. Abkürzungen siehe Kap. 4.5) . . . . .	205
5.5	Vergleich der Talsperrenzuläufe nach atmogenen (links) und geogenen (rechts) Parametern . . . . .	206
5.6	Vergleich der Talsperrenzuläufe nach NOM-Parametern . . . . .	207
5.7	Zusammenhang zwischen ausgewählten NOM-Parametern und dem EG-Anteil von degradierten Gebirgsmooren, Moor- und Anmoorstaugleyen (nach GRUNEWALD und SCHMIDT 2005) . . . . .	208
5.8	Vergleich des experimentell ermittelten, potenziell mobilisierbaren DOC (in mg/g Trockensubstanz) von Streu, Torf, Humusauflage und Mineralboden (nach GRUNEWALD und SCHMIDT 2005) . . . . .	209
5.9	Zusammenhang zwischen Zersetzungsgrad der Torfe (dg2-4 = schwach bis mäßig zersetzt; dg4-5 = stark zersetzt) und SAK <sub>254</sub> , DHM (gelöste Huminstoffe) und DOC (linke Box-Plots) sowie pH-abhängige Unterschiede (rechte Box-Plots); dargestellt sind die relativen Abweichungen vom Median . . . . .	211

5.10 Zusammenhang zwischen SAK <sub>254</sub> und Witterungsphasen (links: Rauschenbach) sowie pH-Wert und Temperatur (rechts: Rote Mulde) . . . . .	212
5.11 Jährliche Grabenpflege (in Metern) und DOC-Konzentration (in mg/L) im EG Rote Mulde 1995 bis 2001 . . . . .	214
5.12 Zusammenhang zwischen den SAK <sub>254</sub> - und DOC- Schwankungen sowie dem Anteil von Nasstandorten für EG mit „intaktem“ Wald (links) und der tatsächlichen Waldbedeckung im Osterzgebirge (rechts), vgl. GRUNEWALD und SCHMIDT 2005 . . . . .	214
5.13 Schematische Darstellung von Umweltschäden und Gegenmaßnahmen als Vernetzung zwischen dem oberen Osterzgebirge und den Vorländern . . . . .	218