

Carsten LORZ, Leipzig

Zur Regenerierung von versauerten Fließgewässern – Eine Fallstudie aus dem Oberen Westerzgebirge¹

Summary

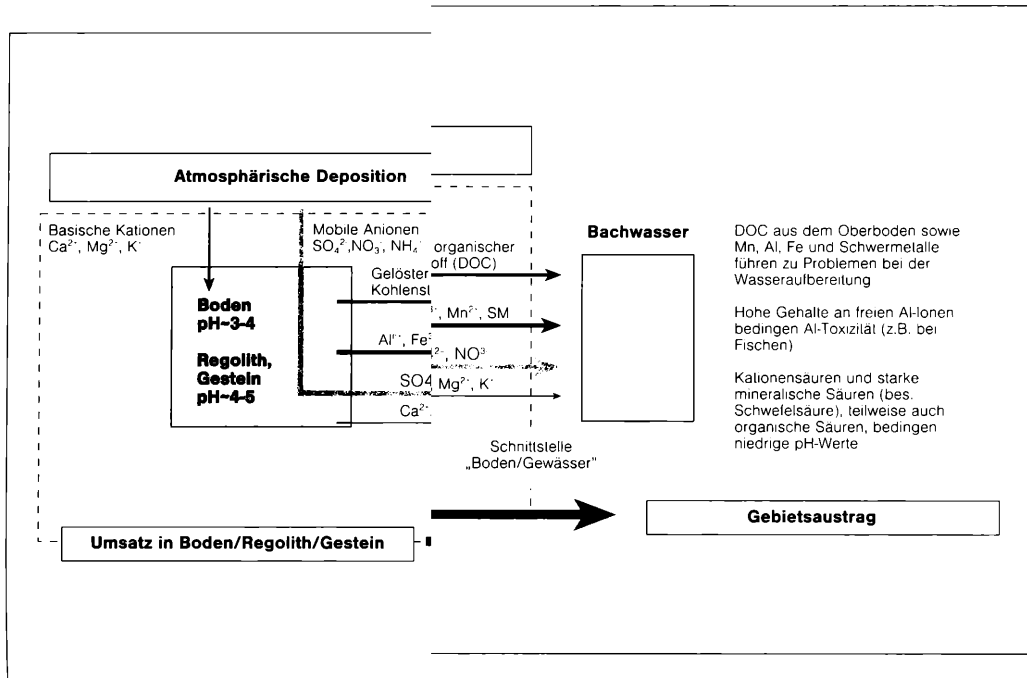
The acidification of stream water affects the water quality in smaller drinking water reservoirs of the upper western Ore Mountains since the 1960's considerably. In the last decade the reduction of emissions - e.g. in scope of the Gothenburg Protocol - and the effect of liming caused the recovery of these surface waters. The stream water chemistry with special regard to liming is the main interest of this study in a catchment in the upper Western Ore mountains.

Data from monitoring are analyzed to show the trends of acidification related compounds, as sulfate, nitrate, aluminum, dissolved organic carbon (DOC), and base cations. The interpretation of time series supports the idea of a low effect of liming carried out in the catchment.

Einleitung

Der Eintrag von versauerungswirksamen Stoffen in Verbindung mit basenarmen Böden und historischer (Über-)Nutzung führte in den Hochlagen des Erzgebirges zu einem Schadkomplex, der als „Neuartige Waldschäden“ bekannt wurde (SMUL 2001, 16ff.). Neben der erheblichen Schädigung der Vegetation wurde hierdurch auch die Qualität des Oberflächenwassers stark beeinträchtigt. Diese als Gewässerversauerung bezeichnete Erscheinung (Abb. 1) ist im Westerzgebirge von wasserwirtschaftlicher Bedeutung, da aufgrund des Grundwassermangels vorwiegend Oberflächenwasser zur Trinkwassergewinnung gesammelt wird. Von den im Freistaat Sachsen existierenden 25 Trinkwassertalsperren – die vorwiegend den Bedarf südsächsischer Städte decken – sind besonders die kleineren Reservoirs (z.B. TS Carlsfeld, TS Sosa; s. Abb. 2) mit ihren bewaldeten Einzugsgebieten von Versauerungserscheinungen betroffen.

¹ Diese Untersuchungen wären ohne die Bereitstellung der Gewässer- und Depositionsdaten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, das Staatliche Umweltfachamt Plauen, die Landestalsperrenverwaltung des Freistaats Sachsen und die Sächsische Landesanstalt für Forsten, Graupa nicht möglich gewesen. Zudem gilt mein Dank B. SCHNEIDER, Leipzig, für die konstruktive kritische Diskussion der Untersuchungsergebnisse und H. ZIEPP, Bochum, für konstruktive Kritik an einer früheren Version des Beitrages.



Arbeiten zur Gewässerversauerung im Westerzgebirge finden sich vermehrt in der jüngeren Vergangenheit (z.B. LORZ et al. 2003, LORZ 1999, STUFA 1996, KEITEL 1995, NEUMEISTER et al. 1995, STÖCKER 1992, STÖCKER 1991, DÄSSLER und RANFT 1989). NEUMEISTER et al. (1995) weisen auf den kontinuierlich sauren Charakter der Fließgewässer im Einzugsgebiet der Oberen Großen Pyra (zur Zwickauer Mulde) sowie in weiteren Einzugsgebieten im Westerzgebirge mit vorwiegender Waldnutzung und ohne Abwassereleitungen, wie Wilzsch (TS Carlsfeld) oder Kleine Bockau (TS Sosa), hin (s. Abb. 2). Der Vergleich von pH-Werten aus den 1950er und 1980er Jahren durch DÄSSLER und RANFT (1989) zeigt, dass in unbeeinflussten Waldbächen des Erzgebirges der pH-Wert in diesem Zeitraum sank.

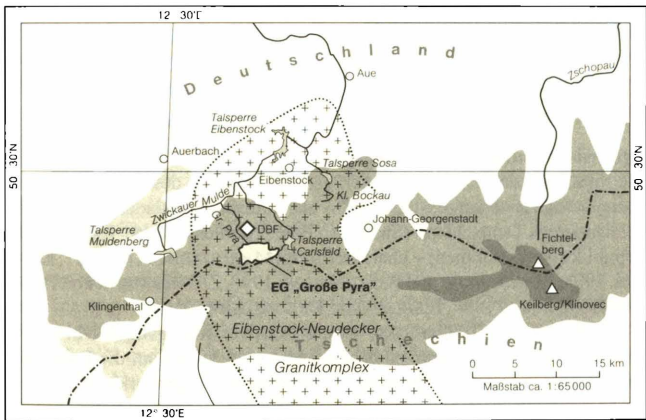


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes und Trinkwassertalsperren im westlichen Erzgebirge/Vogtland

Im Rahmen der Regelüberwachung der Landestalsperrenverwaltung des Freistaats Sachsen wurden für die Wässer der Talsperren Carlsfeld und Sosa in jüngerer Zeit niedrige pH-Werte sowie hohe Aluminium- und Mangan-Konzentrationen beobachtet (PÜTZ 1996, LTV 1991–1995). HEDLICH (1973) wies schon für die 1960er Jahre auf Grenzwertüberschreitungen in Talsperrenrohwassem im Westerzgebirge hin. So wurde für den Zeitraum 1961–1966 für die Talsperre Carlsfeld ein durchschnittlicher pH-Wert von 4,5 angegeben, der im oberen Bereich der heute beobachteten Werte liegt. Im gleichen Zeitraum wurden dort auch schon hohe Sulfatgehalte gefunden

($\varnothing = 35 \text{ mg l}^{-1}$; 1993: 21 mg l^{-1} ; 2002: 10 mg l^{-1} [LTV 2003]). KEITEL (1995) ermittelte für die Talsperre Carlsfeld zwischen 1960 und 1990 eine signifikante Abnahme der pH-Werte um 0,4–1,4 Einheiten. Im gleichen Zeitraum wurde ein Anstieg der Gehalte von NO_3^- (1 auf 5 mg l^{-1}), von SO_4^{2-} (18 auf 33 mg l^{-1}) sowie der Summe von Mg^{2+} und Ca^{2+} (6 auf 9 mg l^{-1}) für diesen Zeitraum nachgewiesen, während das Verhältnis dieser Ionen keinen Trend erkennen ließ.

Schon seit den 1970er Jahren war die Trinkwasserbereitstellung aufgrund der Qualitätsbeeinträchtigungen in einigen Talsperren des Westerzgebirges durch die Gewässerversauerung nur mit erhöhten Aufbereitungskosten möglich. So waren seit 1984 in der Talsperre Carlsfeld vermehrt Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen des Rohwassers durch versauerungsbedingtes Algenwachstum zu verzeichnen (KEITEL 1995). Die durch die Aufbereitung von sauren Rohwässern entstehenden Mehraufwendungen für die Wasserwirtschaft werden von EWERS (1986) auf 4 bis 8% der eigentlichen Aufbereitungskosten und von UDICH (2001) auf ca. $0,005 \text{ € pro m}^3$ geschätzt.

Immissionssituation im Westerzgebirge

Die Immissionssituation im Westerzgebirge ist durch dessen Lage im ehemaligen sog. „Schwarzen Dreieck“ – als stark industrialisierte Region im Dreiländereck Deutschland (Sachsen), Polen (Schlesien) und Tschechische Republik (Nord-Böhmen) – charakterisiert (MARQUARDT et al. 2001, KRAM et al. 1998, MARQUARDT und BRÜGGEMANN 1998, ZIMMERMANN und BOTHMER 1998, PACES 1994, LIEBOLD und DRECHSLER 1991).

Seit Anfang der 1990er Jahre ist ein massiver Rückgang der bis dahin hohen SO_2 -Luftbelastungen zu beobachten (Abb. 3), der auf die Rauchgasentschwefelung und Stilllegung verschiedener Kraftwerke sowohl in Deutschland als auch in der Tschechischen Republik und in Polen zurückzuführen ist (SMUL 1998; SLUG 1997, 6f.; vgl. FERRIER et al. 2001). Dadurch wird seit 1998 der UN-ECE *critical level* von $20 \mu\text{g m}^{-3}$ und der IW I (= Immissionswert I [Jahresmittelwert]) der TA Luft von $140 \mu\text{g m}^{-3}$ im Westerzgebirge nicht mehr überschritten (SMUL 2001, 11). Trotzdem lagen in der DBF (= Dauerbeobachtungsfläche) Klingenthal die S- und N-Deposition 1998/99 noch über dem *critical load* von ca. 0.6 bzw. 0.7 $\text{keq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei Depositionen von ca. 0.9 bzw. 1.6 $\text{keq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (SMUL 2001, 14). Auch wenn seit 1993 drastische Depositionsverminderungen zu beobachten sind, kommt es in Sachsen immer noch zur allgemeinen Überschreitung der kritischen Gesamtsäurebelastung. Diese Überschreitung betrug für 1999 durchschnittlich noch 1.7 keq ha^{-1} gegenüber 2,4 keq ha^{-1} für 1997 und 5,2 keq ha^{-1} für 1995 (SMUL 2002, 13f.).

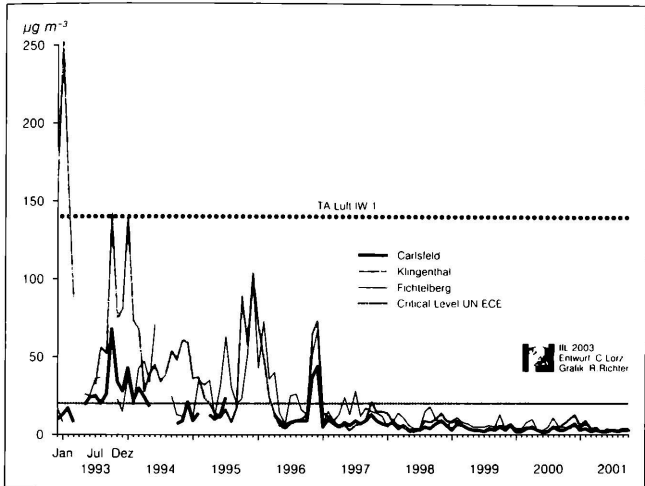


Abb. 3: Jahresgang des monatlichen Mittels für SO_2 -Luftkonzentrationen (aus Daten SLfUG 1994-2001)

Untersuchungsgebiet

Das Einzugsgebiet Obere Große Pyra ($12^\circ 34' \text{ E}$, $50^\circ 25' \text{ N}$) liegt im Oberen Westerzgebirge (Abb. 2). Es erstreckt sich über eine Höhe von 745 m bis 952 m ü. NN und eine Fläche von 5,24 km². Der geologische Untergrund (Eibenstock-Neudecker Granitkomplex) wie auch die Ausgangssubstrate der Bodenbildung (periglaziale Decken, Torfe) sind arm an basischen Kationen. Daraus resultieren Böden – vorwiegend Braunerde-Podsole und Moore – die sauer und oligotroph sind. Die Fichte (*Picea abies*) ist neben Ahorn (*Acer pseudo-platanus*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Tanne (*Abies alba*) mit jeweils sehr geringen Flächenanteilen (<1%) die dominierende Baumart. Der Hauptvorfluter des Einzugsgebietes ist die Große Pyra (Pegel Sachsengrund) mit einem kleineren Tributär (Kleine Pyra), der ein flaches minerogenes Hangmoor entwässert. Der atmosphärische Säureeintrag im Untersuchungsgebiet ist durch chronische und episodische Belastungen charakterisiert. Letztere können im Einzelereignis bis zu 15% der gesamten Protonen-
 10
 11
 12
 13
 14
 15
 16
 17
 18
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40
 41
 42
 43
 44
 45
 46
 47
 48
 49
 50
 51
 52
 53
 54
 55
 56
 57
 58
 59
 60
 61
 62
 63
 64
 65
 66
 67
 68
 69
 70
 71
 72
 73
 74
 75
 76
 77
 78
 79
 80
 81
 82
 83
 84
 85
 86
 87
 88
 89
 90
 91
 92
 93
 94
 95
 96
 97
 98
 99
 100
 101
 102
 103
 104
 105
 106
 107
 108
 109
 110
 111
 112
 113
 114
 115
 116
 117
 118
 119
 120
 121
 122
 123
 124
 125
 126
 127
 128
 129
 130
 131
 132
 133
 134
 135
 136
 137
 138
 139
 140
 141
 142
 143
 144
 145
 146
 147
 148
 149
 150
 151
 152
 153
 154
 155
 156
 157
 158
 159
 160
 161
 162
 163
 164
 165
 166
 167
 168
 169
 170
 171
 172
 173
 174
 175
 176
 177
 178
 179
 180
 181
 182
 183
 184
 185
 186
 187
 188
 189
 190
 191
 192
 193
 194
 195
 196
 197
 198
 199
 200
 201
 202
 203
 204
 205
 206
 207
 208
 209
 210
 211
 212
 213
 214
 215
 216
 217
 218
 219
 220
 221
 222
 223
 224
 225
 226
 227
 228
 229
 230
 231
 232
 233
 234
 235
 236
 237
 238
 239
 240
 241
 242
 243
 244
 245
 246
 247
 248
 249
 250
 251
 252
 253
 254
 255
 256
 257
 258
 259
 260
 261
 262
 263
 264
 265
 266
 267
 268
 269
 270
 271
 272
 273
 274
 275
 276
 277
 278
 279
 280
 281
 282
 283
 284
 285
 286
 287
 288
 289
 290
 291
 292
 293
 294
 295
 296
 297
 298
 299
 300
 301
 302
 303
 304
 305
 306
 307
 308
 309
 310
 311
 312
 313
 314
 315
 316
 317
 318
 319
 320
 321
 322
 323
 324
 325
 326
 327
 328
 329
 330
 331
 332
 333
 334
 335
 336
 337
 338
 339
 340
 341
 342
 343
 344
 345
 346
 347
 348
 349
 350
 351
 352
 353
 354
 355
 356
 357
 358
 359
 360
 361
 362
 363
 364
 365
 366
 367
 368
 369
 370
 371
 372
 373
 374
 375
 376
 377
 378
 379
 380
 381
 382
 383
 384
 385
 386
 387
 388
 389
 390
 391
 392
 393
 394
 395
 396
 397
 398
 399
 400
 401
 402
 403
 404
 405
 406
 407
 408
 409
 410
 411
 412
 413
 414
 415
 416
 417
 418
 419
 420
 421
 422
 423
 424
 425
 426
 427
 428
 429
 430
 431
 432
 433
 434
 435
 436
 437
 438
 439
 440
 441
 442
 443
 444
 445
 446
 447
 448
 449
 450
 451
 452
 453
 454
 455
 456
 457
 458
 459
 460
 461
 462
 463
 464
 465
 466
 467
 468
 469
 470
 471
 472
 473
 474
 475
 476
 477
 478
 479
 480
 481
 482
 483
 484
 485
 486
 487
 488
 489
 490
 491
 492
 493
 494
 495
 496
 497
 498
 499
 500
 501
 502
 503
 504
 505
 506
 507
 508
 509
 510
 511
 512
 513
 514
 515
 516
 517
 518
 519
 520
 521
 522
 523
 524
 525
 526
 527
 528
 529
 530
 531
 532
 533
 534
 535
 536
 537
 538
 539
 540
 541
 542
 543
 544
 545
 546
 547
 548
 549
 550
 551
 552
 553
 554
 555
 556
 557
 558
 559
 560
 561
 562
 563
 564
 565
 566
 567
 568
 569
 570
 571
 572
 573
 574
 575
 576
 577
 578
 579
 580
 581
 582
 583
 584
 585
 586
 587
 588
 589
 590
 591
 592
 593
 594
 595
 596
 597
 598
 599
 600
 601
 602
 603
 604
 605
 606
 607
 608
 609
 610
 611
 612
 613
 614
 615
 616
 617
 618
 619
 620
 621
 622
 623
 624
 625
 626
 627
 628
 629
 630
 631
 632
 633
 634
 635
 636
 637
 638
 639
 640
 641
 642
 643
 644
 645
 646
 647
 648
 649
 650
 651
 652
 653
 654
 655
 656
 657
 658
 659
 660
 661
 662
 663
 664
 665
 666
 667
 668
 669
 670
 671
 672
 673
 674
 675
 676
 677
 678
 679
 680
 681
 682
 683
 684
 685
 686
 687
 688
 689
 690
 691
 692
 693
 694
 695
 696
 697
 698
 699
 700
 701
 702
 703
 704
 705
 706
 707
 708
 709
 710
 711
 712
 713
 714
 715
 716
 717
 718
 719
 720
 721
 722
 723
 724
 725
 726
 727
 728
 729
 730
 731
 732
 733
 734
 735
 736
 737
 738
 739
 740
 741
 742
 743
 744
 745
 746
 747
 748
 749
 750
 751
 752
 753
 754
 755
 756
 757
 758
 759
 760
 761
 762
 763
 764
 765
 766
 767
 768
 769
 770
 771
 772
 773
 774
 775
 776
 777
 778
 779
 780
 781
 782
 783
 784
 785
 786
 787
 788
 789
 790
 791
 792
 793
 794
 795
 796
 797
 798
 799
 800
 801
 802
 803
 804
 805
 806
 807
 808
 809
 810
 811
 812
 813
 814
 815
 816
 817
 818
 819
 820
 821
 822
 823
 824
 825
 826
 827
 828
 829
 830
 831
 832
 833
 834
 835
 836
 837
 838
 839
 840
 841
 842
 843
 844
 845
 846
 847
 848
 849
 850
 851
 852
 853
 854
 855
 856
 857
 858
 859
 860
 861
 862
 863
 864
 865
 866
 867
 868
 869
 870
 871
 872
 873
 874
 875
 876
 877
 878
 879
 880
 881
 882
 883
 884
 885
 886
 887
 888
 889
 890
 891
 892
 893
 894
 895
 896
 897
 898
 899
 900
 901
 902
 903
 904
 905
 906
 907
 908
 909
 910
 911
 912
 913
 914
 915
 916
 917
 918
 919
 920
 921
 922
 923
 924
 925
 926
 927
 928
 929
 930
 931
 932
 933
 934
 935
 936
 937
 938
 939
 940
 941
 942
 943
 944
 945
 946
 947
 948
 949
 950
 951
 952
 953
 954
 955
 956
 957
 958
 959
 960
 961
 962
 963
 964
 965
 966
 967
 968
 969
 970
 971
 972
 973
 974
 975
 976
 977
 978
 979
 980
 981
 982
 983
 984
 985
 986
 987
 988
 989
 990
 991
 992
 993
 994
 995
 996
 997
 998
 999
 1000

Als kurz- bis mittelfristige Maßnahme gegen Bodenversauerung werden in Sachsen Bodenschutzkalkungen durchgeführt. So wurden im Einzugs-

gebiet der Großen Pyra seit 1987 $3,5 \text{ t ha}^{-1}$ dolomitische Lagerstättenkalke als Granulat viermal und ab 1994 $4,5 \text{ t ha}^{-1}$ über einen Zeitraum von sechs Jahren sukzessive (zweijährlich) per Hubschrauber aufgebracht (LAF 2000, 20f.). Langfristig strebt die Forstwirtschaft den Waldumbau von Fichtenreinbeständen in Mischbestände mit Rotbuche (*Fagus sylvatica*) in den Hochlagen des Westerzgebirges an (SMUL 2001, 27ff., LAF 1995). Konkrete wasserwirtschaftliche Sanierungsziele wurden für Einzugsgebiete mit Versauerungserscheinungen in Sachsen – so auch nicht für die Große Pyra – bisher nicht aufgestellt, auch wenn die EU-Wasserrahmenrichtlinie zukünftig integrierte Bewirtschaftungspläne für die Einzugsgebiete fordert (EU-WRRL 2000).

Fragestellung

Im Mittelpunkt der durchgeführten Untersuchungen im Einzugsgebiet Große Pyra steht die Frage nach der Wirkung von Depositionsverminderungen und Kalkungen auf die Gewässerchemie. Dazu werden Zeitreihen von Konzentrationen versauerungsrelevanter Stoffe interpretiert. Neben eigenen Ergebnissen (LORZ 1999, LORZ und SCHNEIDER 2002, LORZ et al. 2003) werden Daten des staatlichen Monitorings verwendet. Die Daten für die Große Pyra/Pegel Sachsengrund wurden im Messprogramm des Freistaates Sachsen innerhalb des UN-ECE Projekts „*Effects and control of long-range transboundary air pollution*“ durch das Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie sowie die hydrologischen Grunddaten durch das Staatliche Umweltfachamt Plauen erhoben. Die Depositionsdaten entstammen dem Level-II-Monitoring-Programm der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, Graupa auf der DBF Klingenthal².

Trends in der Gewässerversauerung

Die abnehmenden Sulfat-Konzentrationen (ca. $32 \mu\text{eq l}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Zeitraum 1994–2002³; Abb. 4) im Oberflächenwasser im Einzugsgebiet Große Pyra – wie auch für drei Waldquellen nahe der DBF Klingenthal (hier nicht dargestellt, SMUL 2001, 213) – spiegeln den starken Rückgang der Immissionen wider (Abb. 5), wie er in Europa generell zu beobachten ist (ALEWELL et al. 2000 und 2001, EVANS et al. 2001). Dabei ist die Abnahme dort am größten, wo die Belastungen am höchsten waren (PRECHTEL et al. 2001, 315). Andere Gründe für den Rückgang von Sulfatgehalten im Oberflächen-

² Die Daten wurde dankenswerterweise durch die genannten Institutionen zur Verfügung gestellt.

³ Einen vergleichbaren Wert ($28 \mu\text{eq l}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ermittelten KRÄM et al. (i. Dr.) für das Einzugsgebiet Lysina im Zeitraum 1989–2002.

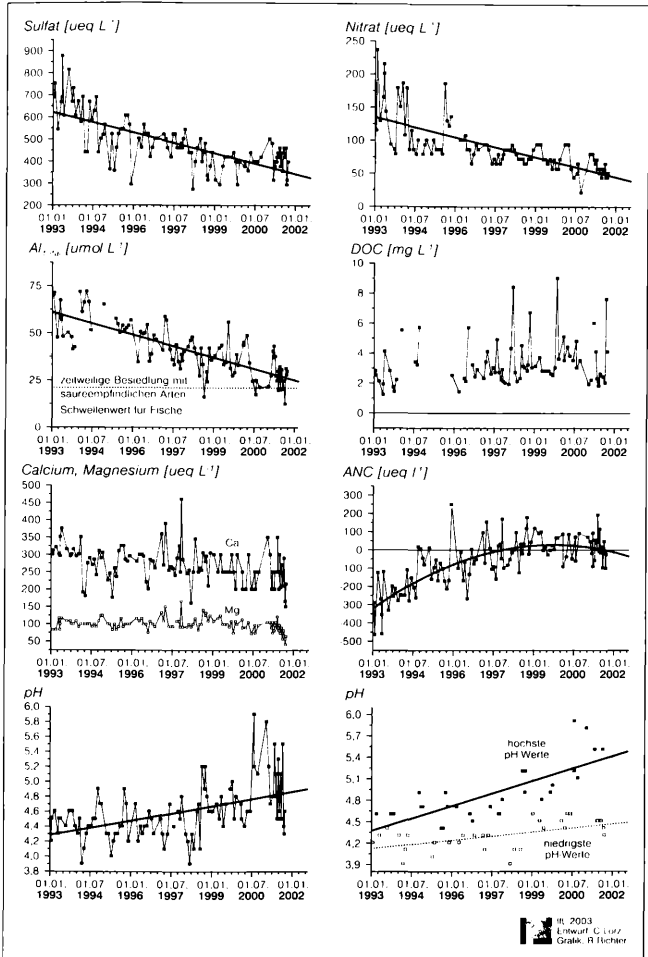


Abb. 4: Sulfat, Nitrat, Aluminium_{total}, DOC, Kalzium, Magnesium, ANC (= Säureneutralisationskapazität n. REUSS und JOHNSON 1986), pH und niedrigste/höchste pH-Werte im Oberflächenwasser Große Pyra, Pegel Sachsendgrund.

wasser, wie eine reduzierte S-Mineralisierung, eine verstärkte S-Aufnahme durch Pflanzen oder eine erhöhte Sulfatadsorption im Einzugsgebiet sind zwar nicht auszuschließen (VESELY et al. 2002), erscheinen jedoch aufgrund der Koinzidenz mit den enormen Depositionsverminderungen weniger bedeutsam.

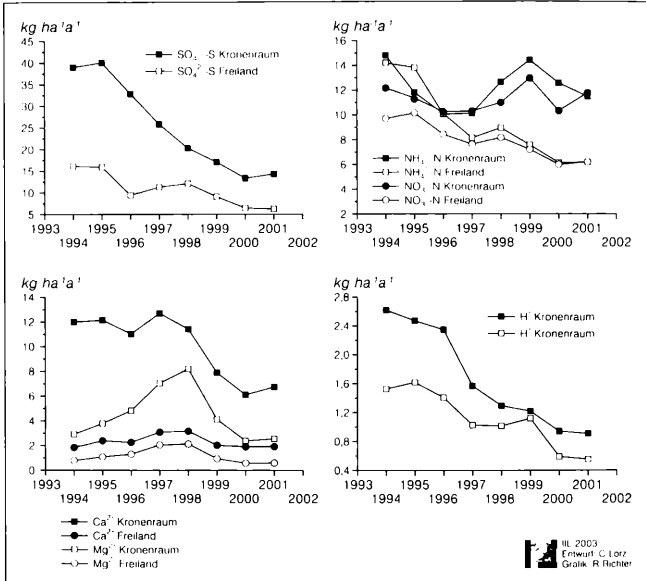


Abb. 5: Depositionsdaten (Jahresmittel) der DBF Klingenthal der LAF Graupa

Auch die Nitrat-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Großen Pyra zeigen einen deutlichen negativen Trend, obwohl die Stickstoff-Immissionen nur im Freilandniederschlag rückgängig sind (Abb. 4). Gründe für den Nitrat-Rückgang im Oberflächenwasser könnten der verstärkte Einbau in die Biomasse aufgrund höherer Vitalität der Bäume, sowie veränderte edaphische Bedingungen und eine höhere Aktivität der Mikroorganismen sein. Insgesamt ist für Stickstoff aufgrund seiner stärkeren Einbindung in biogeochemische Prozesse ein komplexer Zusammenhang zwischen Ein- und Austrag zu erwarten (VESELY et al. 2002). Die NO₃⁻-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Großen Pyra von ca. 55 µeq l⁻¹ für 2000 fügen sich

in das Bild mäßig bis stärker belasteter Gebiete Mitteleuropas ein (vgl. WRIGHT et al. 2001, 307). Die Ammonium-Konzentrationen im Einzugsgebiet Große Pyra liegen aufgrund der vorherrschenden Nitrifikation im Einzugsgebiet zumeist unterhalb der Nachweisgrenze (hier $0,05 \text{ mg l}^{-1}$; für ganz Europa vgl. WRIGHT et al. 2001, 302). In versauerten europäischen Fließgewässern finden sich generell weder für NO_3^- -N- noch NH_4^+ -N-Austräge Trends (ALEWELL et al. 2000 und 2001, EVANS et al. 2001, LFW 2000, 43ff.).

Die Abnahme der Aluminium-Werte in der Großen Pyra beruht vermutlich vorwiegend auf der geringeren Aluminium-Verfügbarkeit in der Bodenlösung aufgrund sinkender S-Depositionen. Jedoch liegen die Konzentrationen auch 2001 noch deutlich oberhalb des Schwellenwerts von $5,3 \mu\text{mol l}^{-1}$ ($\sim 143 \mu\text{g l}^{-1}$), an dem akut toxische Wirkungen auf säureempfindliche Arten der Gewässerfauna (z.B. Fische) zu erwarten sind. Seit 1999 werden in der Großen Pyra episodisch Konzentrationen $<21 \mu\text{mol l}^{-1}$ ($<567 \mu\text{g l}^{-1}$) erreicht, die eine zeitweilige Wiederbesiedlung mit säureempfindlichen Arten ermöglichen (LFW 2000; 36f.). Eine solche Wiederbesiedlung (Verschiebung von SKL [= Säureklasse] 4 nach SKL 3 n. BRAUKMANN 1999) wird von KEITEL (2001) seit diesem Zeitpunkt beobachtet. Eine Abnahme der Aluminium-Konzentrationen im Oberflächenwasser für den Zeitraum 1982–2000 ist auch in Rheinland-Pfalz zu verzeichnen (LFW 2000), während ALEWELL et al. (2001) in Deutschland keine allgemeine Tendenz erkennen konnten.

Die Kalzium- und Magnesium-Konzentrationen im Oberflächenwasser zeigen keinen generellen Trend, obwohl die Einträge seit 1998 deutlich gefallen sind (Abb. 6; vgl. EVANS et al. 2001). Erst 2001 ist für Kalzium und Magnesium ein Absinken der Konzentrationen zu beobachten. In der Massenbilanz von Kalzium und Magnesium ergibt sich ein deutliches Defizit (Abb. 7 <Tabelle>), wenn die Kalkungen nicht berücksichtigt werden. Für den Zeitraum 1994–2001 beträgt es $332,2 \text{ kg ha}^{-1}$ für Kalzium bzw. $73,9 \text{ kg}$

Ca^{2+} [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Totale Deposition	2,4	3,8	4,8	7,1	8,4	4,1	2,3	2,6
Austrag *	44,9	35,5	45,6	41,2	50,2	56,4	54,0	40,0
Δ Speicher	-42,5	-31,7	-40,8	-34,1	-41,8	-52,3	-51,7	-37,4
Mg^{2+} [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Totale Deposition	0,7	1,1	1,3	2,1	2,2	0,9	0,6	0,6
Austrag *	10,0	7,6	10,1	8,3	12,4	13,1	13,3	8,7
Δ Speicher	-9,3	-6,5	-8,8	-6,2	-10,2	-12,2	-12,7	-8,1

* Freiland Daten LAF Graupa, DBF Klingenthal, * berechnet aus Daten SLIUG, SIUFA Plauen

Abb. 7: Massen-Bilanz für Kalzium und Magnesium

ha⁻¹ für Magnesium. Durch Meliorationskalkungen wurden seit 1994 innerhalb von 6 Jahren 4,5 t ha⁻¹ dolomitische Lagerstättenkalke aufgebracht. Unter der Annahme eines CaCO₃-Gehalts von 80% und eines MgCO₃-Gehalts von 20% (LAF 2000, 18) ergibt dies für den Beobachtungszeitraum einen Eintrag von 1365,6 kg ha⁻¹ für Kalzium und 245,6 kg ha⁻¹ für Magnesium. Eine einfache Gegenrechnung der Speicheränderungen aus Tabelle 1 und der durch Kalkung eingebrachten basischen Kationen dürfte jedoch nicht sinnvoll sein, da (a) die Verteilung der aufgebrachten Kalke und damit die Herkunft der mit dem Durchfluss ausgetragenen basischen Kationen nicht klar ist und (b) Ernteentzug sowie Pflanzenaufnahme nicht berücksichtigt wurden. Besonders der Effekt einer zu erwartenden Anreicherung der eingebrachten basischen Kationen im Oberboden (SMUL 2002, 32) ist perspektivisch in Risikoanalysen zu untersuchen (vgl. LORZ und SCHNEIDER 2002).

Der in vielen Talsperrenwässern im Erzgebirge (SUDBRACK 2001) sowie in Fließgewässern Skandinaviens und Großbritanniens (EVANS und MONTEITH 2001) verzeichnete Anstieg der DOC-Gehalte (gelöster organischer Kohlenstoff) konnte in der Großen Pyra nicht beobachtet werden. Auch VESELÝ et al. (2002) fanden keinen generellen Anstieg der DOC-Gehalte in Bachwässern in Tschechien; nur bei Wässern mit höheren pH-Werten konnten sie eine Zunahme beobachten. Auch wenn über die Dynamik des DOC auf Einzugsgebietsebene bisher wenig bekannt ist, so dürften Aufbasung durch Kalkung und Veränderung der meteorologischen Bedingungen (Niederschlag, Temperatur) eine bedeutende Rolle spielen.

Die starke Abnahme der Sulfat- und Nitrat-Deposition sowie deren konsequenter Konzentrationsrückgang im Oberflächenwasser führt zu einem leichten Anstieg des pH-Werts und der ANC (=Säureneutralisationskapazität) bis 2000, um danach wieder leicht abzufallen. Die gesamte positive Tendenz des pH-Werts ist vorwiegend auf die höheren Werte 1998 bis 2000 zurückzuführen. Ein Zusammenhang mit den höheren Kalzium- und Magnesium-Einträgen 1997/98 erscheint unwahrscheinlich, weil deren Konzentrationen im Oberflächenwasser diese Einträge nicht widerspiegeln. In Deutschland und Europa werden generell zunehmende pH-Werte für saure Gewässer beobachtet (VESELÝ et al. 2002, ALEWELL et al. 2001, EVANS et al. 2001). Die jährlichen Höchstwerte im Einzugsgebiet Große Pyra (drei höchste Werte eines Jahres) zeigen ebenfalls ein deutliches Ansteigen der pH-Werte des Basisabfluss. Dagegen findet sich für die tiefsten Werte (drei niedrigste Werte eines Jahres) keine deutliche Zunahme. Die ökologisch bedeutsamen pH-Schocks (pH < 4,5) treten weiterhin auf (Abb. 4).

Schlußfolgerungen

Eine Wirkung von Bodenschutzkalkungen auf die Oberflächenwasserqualität im Einzugsgebiet Große Pyra lässt sich nicht eindeutig feststellen. Der schwache bis fehlende Trend der Kalzium- und Magnesium-Konzentrationen für den Zeitraum 1993–2000 kann sowohl als ausgleichender Effekt der Kalkung als auch als Beleg für eine weitere Basenauswaschung durch Versauerung im Einzugsgebiet gedeutet werden (vgl. LF_W 2000, 63ff.). Gestützt wird die erste Annahme durch die Beobachtung von abnehmenden Kalzium- und Magnesium-Konzentrationen im Bachwasser der Lysina in W-Böhmen (HRUŠKA et al. 2002), deren – mit der Großen Pyra vergleichbares – Einzugsgebiet nicht gekalkt wurde. Andererseits führen ALEWELL et al. (2000, 857) einen fehlenden Trend in nicht gekalkten Einzugsgebieten auf den kompensatorischen Effekt voranschreitender Versauerung zurück und deuten den Austrag an basischen Kationen ohne Trend *nicht* als Zeichen für eine Regenerierung, sondern als Pufferung weiterer Säureinträge (ALEWELL et al. 2000; 2001). Die Abnahme der Kalzium- und Magnesium-Konzentrationen für 2001 sprechen ebenfalls für einen geringen Einfluss der Kalkungen, die seit 1994 zweijährlich durchgeführt werden. Darüber hinaus weist der Vergleich der Sulfat/(Kalzium+Magnesium)-Verhältnisse von $\approx 3,4^4$ im Einzugsgebiet Große Pyra für die Periode 1993/2001 mit dem Einzugsgebiet Lysina für den Zeitraum 1989/2001 ($\approx 2,5^5$; KRÁM et al. 2002) auf eine untergeordnete Bedeutung der Kalkungsmaßnahmen hin. Die 1999 bis 2001 zu beobachtende leichte Zunahme der Sulfat-Konzentrationen und das etwas später einsetzende Absinken der Kalzium- und Magnesium-Konzentrationen (ab Sommer 2001) führten sogar zu einer Absenkung der ANC.

Es wird gefolgert, dass die aktuelle Entwicklung der Bachwasserqualität der Großen Pyra weniger durch Kalkung beeinflusst wird, als vielmehr auf Immissions-Reduktionen beruht. Auch wenn ein leichter Wiederanstieg der pH-Werte seit 1998 in der Großen Pyra beobachtet werden kann, so bleiben extreme Tiefwerte weiterhin der ökologisch begrenzende Faktor. Langfristige Effekte der Kalkungen auf die Oberflächenwasserqualität – insbesondere auch im Verhältnis zur S-Dynamik – sind bisher nicht ausreichend zu prognostizieren (LORZ et al. 2003, FEGER und LORZ 2001, MEESENBURG 2001). Insgesamt ist nicht mit einer kurz- bis mittelfristigen grundsätzlichen Regenerierung der Systeme zu rechnen (z.B. ALEWELL et al. 2001, HRUŠKA et al. 2002).

⁴ $32 \mu\text{eq l}^{-1} \text{a}^{-1} / 9,3 \mu\text{eq l}^{-1} \text{a}^{-1}$

⁵ $28 \mu\text{eq l}^{-1} \text{a}^{-1} / 11 \mu\text{eq l}^{-1} \text{a}^{-1}$

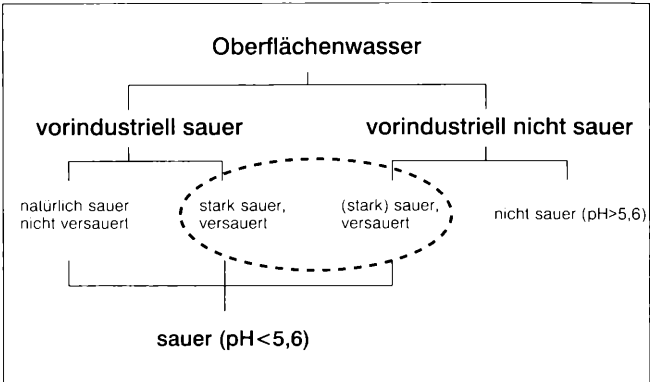


Abb. 6: Hierarchie der versauerten Gewässer (verändert nach HEMOND 1994)

Hinsichtlich der natürlichen Dynamik in „sauen“ Einzugsgebieten besteht ebenfalls erheblicher Forschungsbedarf (vgl. BISHOP et al. 2000). Eine Trennung von natürlich sauren Wässern und solchen, die anthropogen versauert sind bzw. eine hohe Prädisposition aufweisen, ist notwendig (Abb. 6). Ein begleitendes Monitoring- und Zielprogramm (BISHOP et al. 2000, LAF 2000, 11) sowie die Festlegung von Referenzzuständen im Sinne der EU-WRRL ist für Einzugsgebiete mit Bodenschutzkalkungen nachdrücklich zu fordern.

Weiterführende Untersuchungen im Einzugsgebiet der Großen Pyra werden folgende Punkte umfassen:

- a) Risikoabwägung von Bodenschutzkalkungen durch Abschätzung der Mobilisierungspotenziale von versauerungsrelevanten Stoffen (z.B. DOC, Aluminium; LORZ und SCHNEIDER 2002)
- b) Schwefelbilanzierung und Charakterisierung der Schwefelbindung (LORZ 1999, LORZ und SCHNEIDER in Vorbereitung)

Zudem muss berücksichtigt werden, dass eine Übertragung des Regenerieverhaltens einzelner versauerter Einzugsgebiete mit großen Unsicherheiten behaftet ist, da es sich bei Versauerung zwar um eine regionale Erscheinung handelt, die Regenerierung jedoch nur in einzelnen Kleineinzugsgebieten untersucht wurde (VESELÝ et al. 2002).

Grundsätzlich muss der gesamte geökosystemare Zusammenhang, der sich in der Problematik der Gewässerversauerung besonders deutlich zeigt, stärker in der Nutzung durch Forst- und Wasserwirtschaft berücksichtigt

werden. Die Bereitstellung von Oberflächenwasser aus forstwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten ist – auch unter Berücksichtigung der EU-WRRL (FEGER 2003) – stärker als Leistung und Verpflichtung der Forstwirtschaft zu sehen (FEGER und LORZ 2001).

Literatur

- ALEWELL, C., B. MANDERSCHIED, J. BITTERSÖHL und H. MEESENBERG 2000: Is acidification still an ecological threat? In: *Nature* 407, S. 856–857.
- ALEWELL, C., M. ARMBRUSTER und J. BITTERSÖHL und C.D. EVANS und H. MEESENBERG und K. MORITZ und A. PRECHTEL 2001: Are there signs of acidification reversal in freshwaters of the low mountain ranges in Germany? In: *Hydrology and Earth System Sciences*, H. 5 (3), S. 367–378.
- BISHOP, K., H. LAUDON, J. HRUŠKA, P. KRÁM, S. KÖHLER und S. LÖFGREN 2000: Does acidification policy follow research in northern Sweden? The case of natural acidity during the 1990's. In: *Water, Air, and Soil Pollution*, H. 130 (1–4), S. 1415–1420.
- BRAUKMANN, U. 1999: Säuregrad – Indikation mit Hilfe des Makrozoobenthos. In: FRIEDRICH, G. und W. V. TÖMPLING (Hrsg.): *Biologische Gewässeruntersuchung*, H. 2. Stuttgart, S. 286–298.
- DÄSSLER, H.-G. und H. RANFT 1989: Versauern unsere Waldböden? Ergebnisse eines über einen 30jährigen Zeitraum geführten pH-Wertvergleiches im Erzgebirge. In: *Sozialistische Forstw.* H. 39, S. 88–89.
- EU-WRRL 2000: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen im Bereich der Wasserpolitik, Abl. EG vom 22.12.2000, Nr. L 327/1, Brüssel.
- EVANS, C.D. und J.M. CULLEN und C. ALEWELL und J. KOPÁČEK und A. MARCHETTO und F. MOLDAŇ und A. PRECHTEL und M. ROĞORA und J. VESELY und R.F. WRIGHT 2001: Recovery from acidification in European surface waters. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, H. 5 (3), S. 283–298.
- EVANS, C.D. und D.T. MONTEITH 2001: Chemical trends at lakes and streams in the UK Acid Waters Monitoring Network, 1988–2000: Evidence for recent recovery at a national scale. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, H. 5 (3), S. 351–366.
- EWERS, H.J. 1986: Zur monetären Bewertung von Umweltschäden am Beispiel der Waldschäden. In: *UBA-Berichte*, H. 4, o. S.
- FEGER, K.H. 2003: Kleineinzugsgebiete im Mittelgebirge: Pedologische und geomorphologische Bedingungen und Prozessdynamik in Wassereinzugsgebieten: Bedeutung für den Gewässerschutz im Lichte der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In: *GÜG-Berichte*, H. 12, S. 3–6.
- FEGER, K.-H. und C. LORZ 2001: Saurer Boden – saures Wasser, aktuelle Trends und Prognosen der Gewässerversauerung. In: *KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, H. 48 (10), S. 1372–1373.
- FERRIER, R.C. und A. JENKINS und R.F. WRIGHT und W. SCHÖPP und H. BARTH 2001: Assessment of recovery of European surface waters from acidification 1970–2000: An introduction to the Special Issue. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, H. 5 (3), S. 274–282.
- HEDLICH, R. 1973: *Regionallimnologische Untersuchungen an sechs Trinkwassertalsperren des mittleren und westlichen Erzgebirges*, 120 S., Dissertation an der Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen an der TU Dresden. Dresden.

- HEMOND, H.F. 1994: Role of Organic Acids in Acidification of Fresh Waters. In: STEINBERG, C. und R.F. WRIGHT (Hrsg.): Acidification of Freshwater Ecosystems, Implications for the Future. London (Wiley), S. 103-115 (= Dahlem Workshop Reports, Environmental Sciences Research Report, H. 14).
- HRUŠKA, J., F. MOLDAN und P. KRÁM 2002: Recovery from acidification in central Europe – observed and predicted changes of soil and streamwater chemistry in the Lysina catchment, Czech Republic. In: Environmental Pollution, H. 120, S. 261-274.
- KEITEL, M. 1995: Langzeitbetrachtung der Gewässerversauerung – Fallstudie im Erzgebirge. In: Wasser und Boden, H. 10, S. 27-33.
- KEITEL, M. 2001: Beitrag innerhalb des Workshops Gewässerversauerung – quo vadis? Dresden vom 20. bis 22.5.2001.
- KRÁM, P., J. HRUŠKA und K. BISHOP (i. Dr.): Monitoring and modeling of long term changes in the stream water chemistry of two small catchments with contrasting vulnerability to acidification. In: Technical Documents in Hydrology.
- KRÁM, P., J. HRUŠKA und C.T. DRISCOLL 1998: Application of two biogeochemical models (PNET-BGC/CHESS and Magic) to the Lysina Catchment, Czech Republic. In: Poster Volume Head Water '98, Hydrology, Water Resources and Ecology of Mountain Areas, S. 175-178.
- LAF (= Sächsische Landesanstalt für Forsten) 1995: Abschlußbericht, Umbau von immmissionsgeschädigten Waldflächen der sächsischen Mittelgebirge zu naturnahen Bestockungen unter besonderer Berücksichtigung der Buche, Graupa, 167 S.
- LAF (= Sächsische Landesanstalt für Forsten) 2000: Leitfaden Forstliche Bodenschutzkalkulation in Sachsen. In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, H. 21, Graupa, S. 1-58.
- LEW (= LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, RHEINLAND-PFALZ) 2000: Versauerung von Fließgewässern in Rheinland-Pfalz. Mainz, S. 1-113.
- LIEBOLD, E. und M. DRECHSLER 1991: Schadenszustand und -entwicklung in den SO₂-geschädigten Fichtengebieten Sachsens. In: Allgemeine Forst-Zeitschrift, H. 10, S. 492-494.
- LINDEMANN, J. und S. PFEIFFER und R. HERRMANN 1995: Ökosysteminterne Neutralisierung atmosphärischer Säureeinträge durch redoxchemische Prozesse in Quellmooren (Frankenland, NO-Bayern). In: Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, H. 76, S. 349-352.
- LORZ, C. 1999: Bodenzustand und Gewässerversauerung im Westerzgebirge. In: UFZ-Berichte, H. 14, S. 1-154.
- LORZ, C., J. HRUŠKA und P. KRÁM 2003: Long-term modeling of acidification and recovery in an upland catchment of the Western Ore Mountains, SE-Germany. In: Journal of the Total Environment, H. 310, S. 153-161.
- LORZ, C. und B. SCHNEIDER 2002: Abschätzung des Mobilisierungspotentials von Sulfat und Metallen durch verschiedene Extraktionsmethoden in Böden eines sauren Einzugsgebiet im Westerzgebirge, SE-Deutschland. In: Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, H. 98, S. 51-52.
- LORZ, C. und B. SCHNEIDER (i. V.): Sulfatdynamik in einem versauerten Einzugsgebiet.
- LTV (=LANDESTALSPERRENVERWALTUNG SACHSEN) 1991-1995: Jahresberichte Eigenüberwachung der Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken und Speicher der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Pirna.
- LTV (=LANDESTALSPERRENVERWALTUNG SACHSEN) 2003: Freundliche mündliche Mitteilung vom 30.1.03.
- MARQUARDT, W. und E. BRÜGGEMANN 1998: Nationale und grenzüberschreitende Auswirkungen von Emissionen auf Regenwasserinhaltsstoffe in Sächsischen Großregionen. In: Sächsische Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): Workshop „Lufthygie-

- nische Situation und Waldzustand im Schwarzen Dreieck". Dresden, S. 43-52 (= Materialien zur Luftreinhaltung).
- MARQUARDT, W., E. BRÜGGE-MANN, R. AUER, H. HERRMANN und D. MÖLLER 2001: Trends of pollution in rain over East Germany caused by changing emissions. In: *Tellus*, H. 53B, S. 529-545.
- MEISENBERG, H., K.J. MEIWESE, M. WAGNER und J. PRENZEL 2001: Ecosystem effects after ameliorative liming of a catchment at the Harz mountains, Germany. In: HORST, W.J. (Hrsg.): *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*, S. 914-915.
- NEUMEISTER, H., A. KRÜGER, L. MEYER und R. REGBER 1995: Räumliche Differenzierung elementarer geoökologischer Eigenschaften im oberen Westerzgebirge/oberen Vogtland. In: *Geoprofil*, H. 5, S. 43-81.
- PACES, T. 1994: Acidic Emissions and Political Systems. In: STEINBERG, C. und R.F. WRIGHT (Hrsg.): *Acidification of Freshwater Ecosystems, Implications for the Future*. London (Wiley), S. 5-15 (= Dahlem Workshop Reports, Environmental Sciences Research Report, H. 14).
- PRECHTEL, A., C. ALEWELL, M. ARMBRUSTER, J. BITTERSOLH, J.M. CULLEN, C.D. EVANS, R.C. HELIWEIL, J. KOPÁČEK, A. MARCHETTO, E. MATZNER, H. MEISENBERG, F. MOLDAN, K. MORITZ, J. VESELY und R.F. WRIGHT 2001: Response of sulphur dynamics in European catchments to decreasing sulphate deposition. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, H. 5 (3), S. 311-326.
- PÜTZ, K. 1996: Wassergüteveränderungen in Talsperren und Möglichkeiten der Einflußnahme. In: Kolloquium, Trinkwasserversorgung aus Talsperren in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen. DVWK und DVGW, 30.4.96, S. 1-14, Meißen.
- REUSS J.O. und D.W. JOHNSON 1986: Acid deposition and the acidification of soil and water. In: BILLINGS, W.D., F. GOLLEY, O.L. LANGE, I.S. OLSON, H. REMMERT (Hrsg.): *Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters*. New York: Springer, S. 1-119 (= Ecological Studies, 59).
- SLFÜG (=SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT und GEOLOGIE) 1994-2001: Jahresberichte zur Immissionssituation. Materialien zur Luftreinhaltung, Radebeul.
- SMUL (=SÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT und LANDESPLANUNG) 1998: Umweltbericht o. S., Dresden.
- SMUL (=SÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT und LANDESPLANUNG) 2001: Waldzustandsbericht 2001, 36 S., Dresden.
- SMUL (=SÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT und LANDESPLANUNG) 2002: Waldzustandsbericht 2002, 42 S., Dresden.
- STÖCKER, G. 1991: Hydrochemische Kenngrößen kleinster Fließgewässer. In: *Archiv für Naturschutz und Landschaftspflege*, H. 31, 19-35.
- STÖCKER, G. 1992: Hydrochemische Kenngrößen kleinster Fließgewässer in Berg-Fichtenwäldern. In: *Archiv für Naturschutz und Landschaftspflege*, H. 32, S. 1-27.
- STUFA (=STAATLICHES UMWELTFACHAMT PLAUEN) 1996: Regionalbericht Staatliches Umweltfachamt Plauen, Beschaffenheitsentwicklung Fließgewässer. In: *Materialien zur Wasserwirtschaft*, H. 1, S. 1-30.
- SUDBRACK, R. 2001: Aktuelle Trends und Entwicklungen der Wasserbeschaffenheit in sächsischen Talsperren mit überwiegend forstwirtschaftlicher Nutzung im Einzugsgebiet. Vortrag Workshop Gewässerversauerung – quo vadis? Dresden vom 20. bis 22.5.2001.
- UDICH, H. 2001: Aufbereitung weicher saurer Talsperrenwässer. Vortrag Workshop Gewässerversauerung – quo vadis? Dresden vom 20. bis 22.5.2001.
- VESELY, J., V. MAJER und S. NORTON 2002: Heterogeneous response of Central European streams to decreased acidic atmospheric deposition. In: *Environmental Pollution*, H. 120 (2), S. 275-281.

- WRIGHT, R.F., C. ALWELL, J.M. CULLEN, C.D. EVANS, A. MARCHETTO, F. MOLDAN, A. PRECHTEL und M. ROGORA 2001: Trends in nitrogen deposition and leaching in acid-sensitive streams in Europe. In: Hydrology and Earth System Sciences, H. 5 (3), S. 299-310.
- ZIMMERMANN, F. und D. BÖHMER 1998: Analyse und Entwicklung der Emissionen im Schwarzen Dreieck. In: Sächsische Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Hrsg.): Workshop „Lufthygienische Situation und Waldzustand im Schwarzen Dreieck“. Dresden, S. 23-32. (= Materialien zur Luftreinhaltung).