

Carsten LORZ, Leipzig

## **Zur Regenerierung von versauerten Fließgewässern – Eine Fallstudie aus dem Oberen Westerzgebirge<sup>1</sup>**

### **Summary**

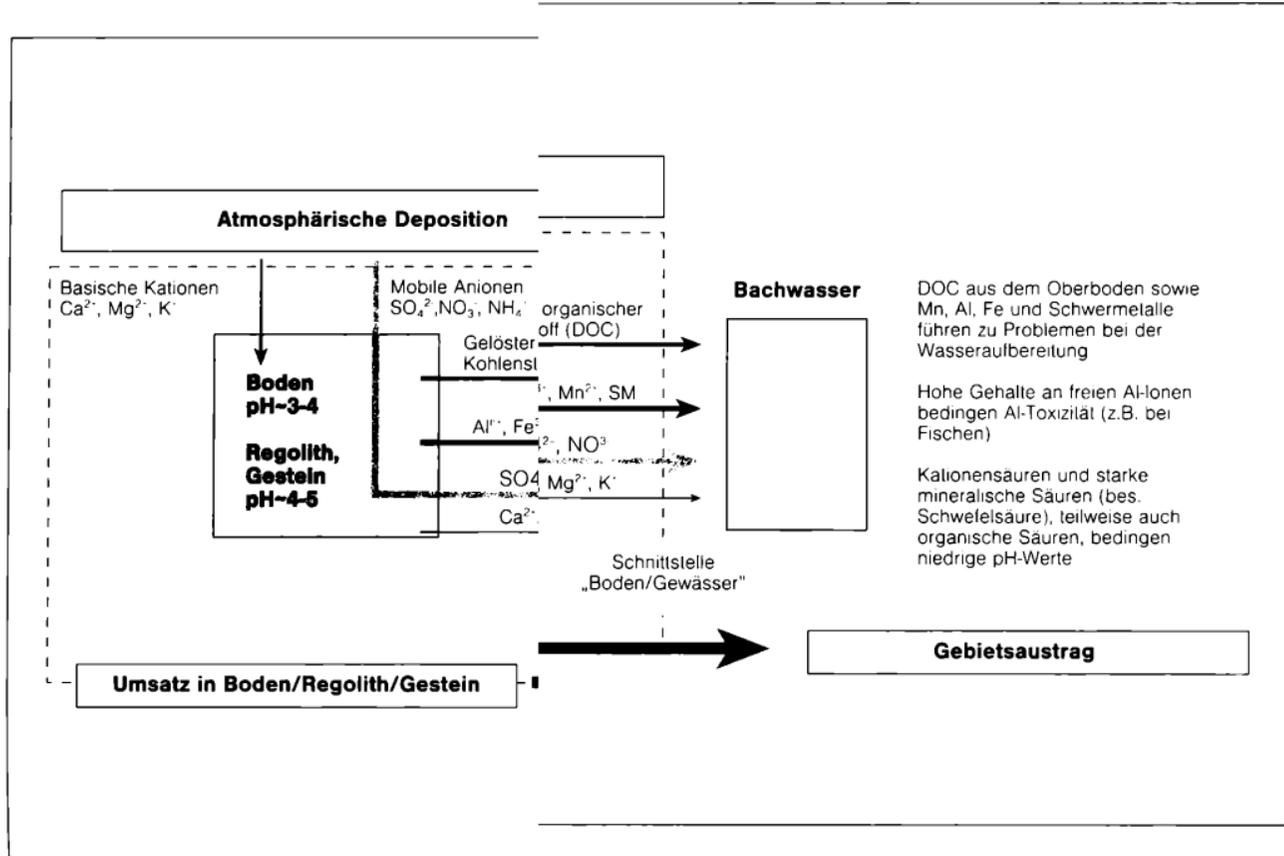
The acidification of stream water affects the water quality in smaller drinking water reservoirs of the upper western Ore Mountains since the 1960's considerably. In the last decade the reduction of emissions - e.g. in scope of the Gothenburg Protocol - and the effect of liming caused the recovery of 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.

<sup>1</sup> 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.

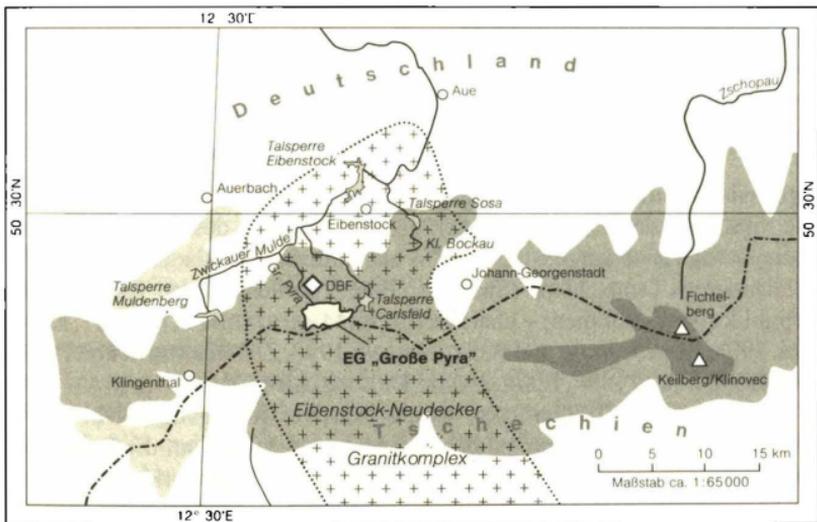


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebietes und Trinkwassertalsperren im westlichen Erzgebirge/Vogtland

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:  $21 \text{ mg l}^{-1}$ ; 2002:  $10 \text{ mg l}^{-1}$  [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  $\text{NO}_3^-$  (1 auf  $5 \text{ mg l}^{-1}$ ), von  $\text{SO}_4^{2-}$  (18 auf  $33 \text{ mg l}^{-1}$ ) sowie der Summe von  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  (6 auf  $9 \text{ mg l}^{-1}$ ) 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  $\text{SO}_2$ -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  $1.7 \text{ keq ha}^{-1}$  gegenüber  $2.4 \text{ keq ha}^{-1}$  für 1997 und  $5.2 \text{ keq ha}^{-1}$  für 1995 (SMUL 2002, 13f.).

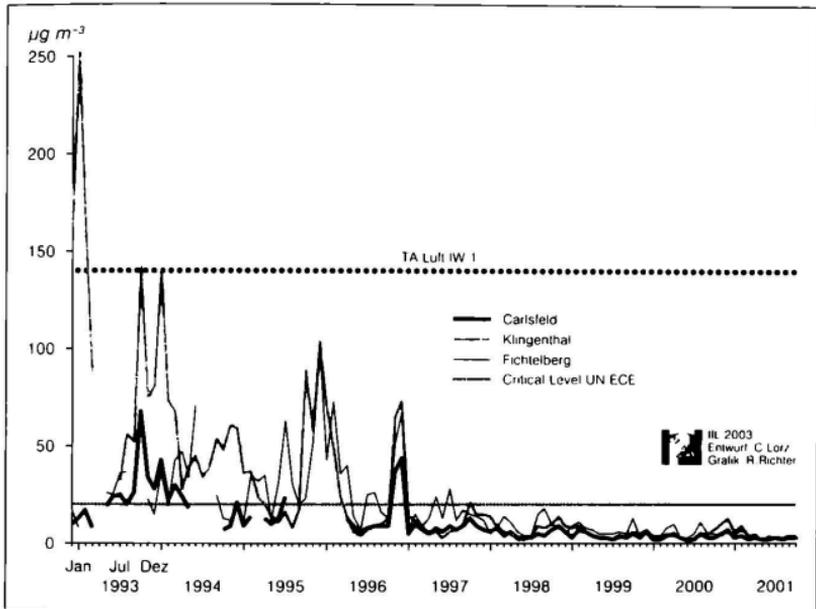


Abb. 3: Jahresgang des monatlichen Mittels für  $\text{SO}_2$ -Luftkonzentrationen (aus Daten SLfUG 1994-2001)

### 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 km<sup>2</sup>. 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 Sachsendgrund 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 Klingenthal<sup>2</sup>.

### Trends in der Gewässerversauerung

Die abnehmenden Sulfat-Konzentrationen (ca.  $32 \mu\text{eq l}^{-1} \text{ a}^{-1}$  im Zeitraum 1994–2002<sup>3</sup>; 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-

<sup>2</sup> Die Daten wurde dankenswerterweise durch die genannten Institutionen zur Verfügung gestellt.

<sup>3</sup> 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.

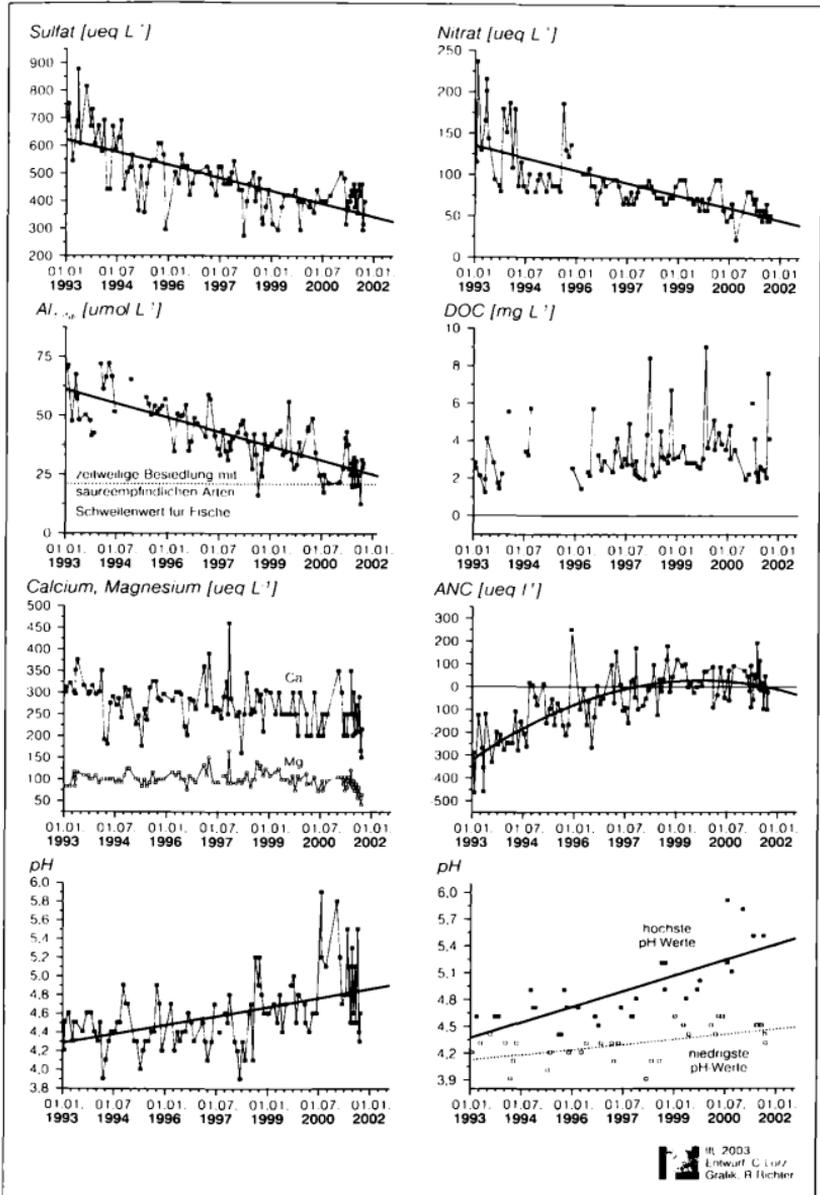


Abb. 4: Sulfat, Nitrat, Aluminium<sub>total</sub>, DOC, Kalzium, Magnesium, ANC (= Säureneutralisationskapazität n. REUSS und JOHNSON 1986), pH und niedrigste/höchste pH-Werte im Oberflächenwasser Große Pyra, Pegel Sachsendrund.

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.

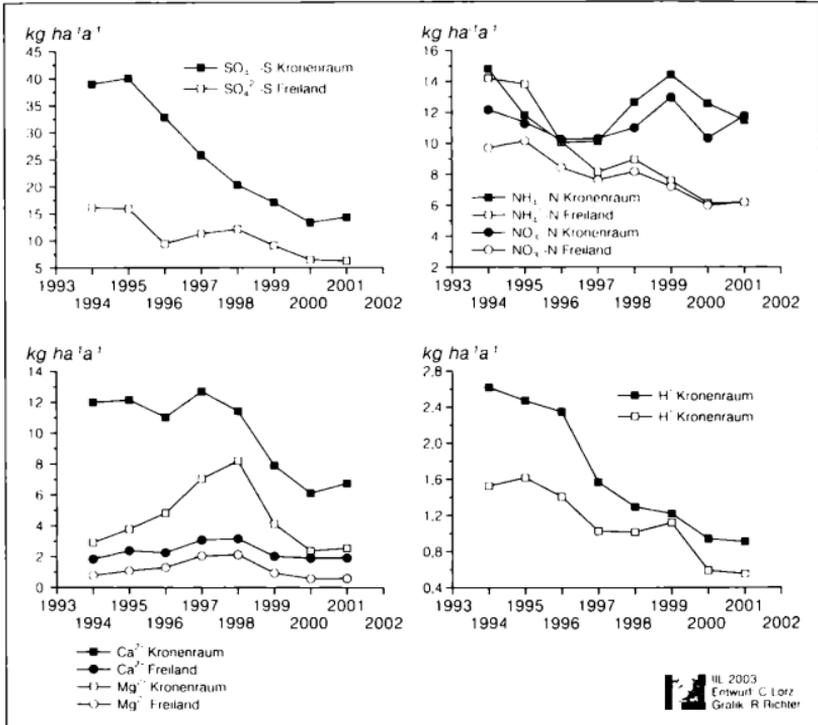


Abb. 5: Depositionsdaten (Jahresmittel) der DBF Klingenthal der LAF Graupa

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 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentrationen im Oberflächenwasser der Großen Pyra von ca. 55 µeq l<sup>-1</sup> 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  $\text{NO}_3^-$ -N- noch  $\text{NH}_4^+$ -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.  $73,9 \text{ kg}$

$\text{Ca}^{2+}$ [ $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ]	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
$\Delta$ Speicher	-42,5	-31,7	-40,8	-34,1	-41,8	-52,3	-51,7	-37,4
$\text{Mg}^{2+}$ [ $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ]	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
$\Delta$ 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<sup>-1</sup> für Magnesium. Durch Meliorationskalkungen wurden seit 1994 innerhalb von 6 Jahren 4,5 t ha<sup>-1</sup> dolomitische Lagerstättenkalke aufgebracht. Unter der Annahme eines CaCO<sub>3</sub>-Gehalts von 80% und eines MgCO<sub>3</sub>-Gehalts von 20% (LAF 2000, 18) ergibt dies für den Beobachtungszeitraum einen Eintrag von 1365,6 kg ha<sup>-1</sup> für Kalzium und 245,6 kg ha<sup>-1</sup> 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<sub>W</sub> 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).

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

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

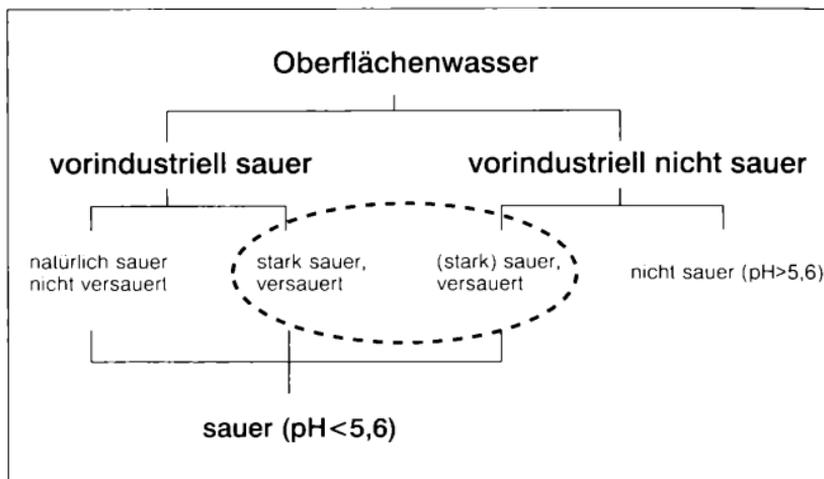


Abb. 6: Hierarchie der versauerten Gewässer (verändert nach HEMOND 1994)

Hinsichtlich der natürlichen Dynamik in „sauren“ 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. ROGORA 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 Bodenschutzkalung 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 SO<sub>2</sub>-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.
- MEISENBURG, 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. MEISENBURG, F. MOL-DAN, 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).