Entwicklung eines Land-Gewässer Bewirtschaftungskonzeptes

zur Senkung von Stoffverlusten an Gewässer

(Stör-Projekt I und II)

im Auftrag des Bundesministeriums
für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)
und des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein
Förderkennzeichen: 0339310A und 0339538

Endbericht

Berlin, im Februar 1996
(Redaktionelle Überarbeitung 2008)

Wissenschaftliche Leitung:
Prof. Dr. W. Ripl, TUB

in Zusammenarbeit mit:
Prof. F. Trillitzsch, TUB
Dr. R. Backhaus, DLR
Prof. Dr. H.-P. Blume, CAU
Prof. Dr. P. Widmoser, CAU

Bearbeitung des Abschlußberichts:
Dipl.Ing. Th. Janssen, TU Berlin
Dipl.Ing. Ch. Hildmann, TU Berlin
cand. Ing. I. Otto, TU Berlin

Technische Universität Berlin
Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt
Christian-Albrechts-Universität Kiel

<Aus Gründen des Copyright sind einige Graphiken in der vorliegenden pdf-Datei nicht enthalten.>

Vorwort

Das Forschungsprojekt "Entwicklung eines Land-Gewässer-Bewirtschaftungskonzepts zur Senkung von Stoffverlusten an Gewässer" war für unser Forschungsteam eine ganz besondere Herausforderung. Über die Energie als funktionale Basis des Wasserhaushalts und der Vegetation sollten deren strukturierende bzw. destrukturierende Wechselwirkungen mit der Landschaft prozeßhaft beschrieben werden.

Dieser Ansatz ermöglicht es, die Landschaftsprozesse in ihrer Vielfalt hierarchisch zu gliedern. Nichtlineare, raum-zeitliche Zusammenhänge zwischen dem Energieangebot, der ständigen Potentialverteilung durch das Medium Wasser und den damit gekoppelten Transportprozessen, die zyklischen Stoffflüsse in der Vegetation und die irreversiblen Stoffflüsse über das Bodenwasser und die Fließgewässer zum Meer können damit beobachtet und verstanden werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, vage Begriffe wie Nachhaltigkeit bzw. Alterung der Landschaft und Stabilität der Ökosysteme schärfer zu fassen. Diese Begriffe können in einen operationalisierbaren Zusammenhang gestellt und raum- bzw. zeitbezogene Bewirtschaftungsansätze zur Steigerung der Nachhaltigkeit abgeleitet werden.

Es zeigte sich im Laufe des Projekts, daß der Schlüssel für eine wirkungsvolle ökologische Sanierung der Landschaft mit ihren Gewässern nur in flächenbezogenen Maßnahmen der Einzugsgebiete liegen kann. Wasserwirtschaft und Landschaftsplanung müßten der raum- und zeitbezogenen Flächenbewirtschaftung nachgeordnet werden. Die Land- und Forstwirtschaft müßte von der Gesellschaft für die Funktionen der Natur, wie Wasserhaushalt und Klima, und für Ver- und Entsorgung der dichtbesiedelten Gebiete mit Wasser und Nahrungsmitteln leistungsbezogen bezahlt werden. Die Flächenbewirtschaftung müßte verteilungsbezogen, angepaßt und verlustminimierend erfolgen, wobei sich ein wesentlich höherer Anteil der Gesellschaft am Bewirtschaftungsprozeß beteiligt. Dies könnte unsere Landschaft wieder zum Grünen bringen, das Klima und den Wasserhaushalt in der Landschaft stabilisieren und damit die Landschaft als funktionale Basis des Menschen wieder zukunftsfähig machen.

Ich möchte mich an dieser Stelle für die Förderung, den Mut, die Risikobereitschaft und für das in unser relativ kleines Team gesetzte Vertrauen der Mittelgeber, des BMBF - vertreten durch Herrn Ministerialrat Schulz und der Ministerin für Natur, Umwelt und Landesentwicklung des Landes Schleswig Holstein - bedanken. Besonderer Dank gebührt auch dem Abteilungsleiter Gewässer Landesamt für Natur und Umwelt Herrn P. Petersen, Herrn Dipl. Ing. K. Voss sowie Frau Dr. C. Krambeck, die dieses Projekt stets wohlwollend vertreten und durch konstruktive Kritik gefördert haben.

Ein besonderes Dankeschön gilt dem Team im weiteren Sinne, meinem Kollegen Herrn Prof. Trillitzsch, der DLR in Köln-Porz, insbesondere Herrn Dr. Backhaus, der Christian Albrechts Universität in Kiel, den Kollegen Prof. Dr. Blume und Prof. Dr. Widmoser mit ihren Mitarbeitern.

Den Mitarbeitern des Fachgebiets Limnologie der TU Berlin und der Gesellschaft für Gewässerbewirtschaftung möchte ich für ihren bedingungslosen Einsatz im Feld, im Laboratorium, in ihrem Ringen um Verständnis fachübergreifender Schnittstellen, ihre Loyalität und ihren Mut, mit mir auch manchmal gegen den Strom zu schwimmen, ganz herzlich danken. Sie haben sich durch ihre verdienstvolle Arbeit im Störprojekt im besonderen Ausmaß qualifiziert und möchten auch weiter an der notwendigen strukturellen Umgestaltung der Landschaft in Richtung Nachhaltigkeit beitragen. Als wissenschaftlicher Leiter wünschte ich, daß wir mit unserer Arbeit die Gesellschaft

für die Probleme der Landschaft sensibilisieren und auf der Basis eines neuen Verständnisses der Zusammenhänge ein wenig von den notwendigen nächsten Schritten überzeugen könnten.

Berlin, im Februar 1996

Wilhelm Ripl

Inhaltsübersicht

	Inhaltsverzeichnis	6
	Kurzbeschreibung des Stör-Projektes (I und II)	11
A.	Einleitung	16
B.	Funktionales Leitbild	19
C.	Gebietsbeschreibung	64
D.	Methodik	73
E.	Untersuchungen zu Kennfeldern und Austragsmechanismen	96
F.	Ergebnisse der Gebietsanalyse	116
G.	Planung	167
H.	Umsetzung	185
I.	Zusammenfassende Projektbewertung	194
J.	Literatur	198
K.	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	200
	Anhang 1: Weitere Methoden	
	Anhang 2: Graphiken	

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung des Stör-Projektes (I und II)....11

A. Einleitung....16

B. Funktionales Leitbild....19
1. Energiedissipation als Grundlage funktionaler Ökosystemanalyse....20
1.1 Begriffsdefinitionen....20
1.2 Die Energiedissipation in der Natur....20
2. Organismengemeinschaften (Zönosenkernstrukturen) als energiedissipative Strukturen....22
2.1 Die Zönosenkernstruktur....22
2.2 Wirkungsgrad energiedissipativer Strukturen....27
2.3 Die Steigerung des Wirkungsgrades (Selbstoptimierung) als thermodynamische Notwendigkeit....27
3. Der Selbstoptimierungsprozeß als Entwicklung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Richtung erhöhter Nachhaltigkeit....30
3.1 Dynamik in Wasser- und Stoffhaushalt bei geringem Wirkungsgrad....30
3.2. Dynamik in Wasser- und Stoffhaushalt bei optimiertem Wirkungsgrad....34
4. Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässer - eine Entwicklung in Richtung maximaler Nachhaltigkeit....38
4.1. Die Morphologie....38
4.1.1 Die Morphologie als energiedissipative Struktur....39
4.1.2 Selbstoptimierungsprozeß bei geringem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen....41
4.1.3 Selbstoptimierungsprozeß bei optimalem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen....45
4.1.4 Grundlagen einer funktionalen Strukturanalyse....48
4.2 Die Fließgewässerzönosen....49
4.2.1 Die Fließgewässer-ZKS als energiedissipative Struktur....49
4.2.2 Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässer-ZKS bei geringem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen....51
4.2.3 Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässer-ZKS bei optimalem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen....55
4.2.4 Grundlagen einer funktionalen Strukturanalyse....57
5. Leitbildanforderungen für natürliche Systeme....58
5.1 Leitbildanforderungen zur Senkung der Stoffverluste in die Fließgewässer....58
5.2 Leitbildanforderungen zur Minimierung der Stoffverluste in Fließgewässern....60

C. Gebietsbeschreibung....64
1. Lage und naturräumliche Eigenschaften....64
1.1 Lage und Flächennutzung....64
1.2 Geologie und Böden....64
1.2.1 Böden der Jungmoränenausläufer....64
1.2.2 Böden der Niederen Geest....65
1.2.3 Böden der Hohen Geest....66
1.3 Vegetation....66
2. Historische Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes....67
2.1 Einleitung....67
2.2 Historische Entwicklung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet der Stör....67

D. Methodik....73
1. Heuristik und Mustererkennung....73
1.1 Heuristik....73
1.2 Muster 73
1.3 Heuristik zur Erfassung des Stoffaustragsprozesses....76
2. Analyse der Transportprozesse anhand der Gewässermorphologie....77

2.1 Indikatoreigenschaften der Fließgewässer....77
2.2 Die Indikatoreigenschaft der Morphologie für die Transportprozesse....79
2.2.1 Auswahl der morphologischen Parameter....79
2.2.2 Festlegung der Kartierquerschnitte....82
2.2.3 Festlegung des Kartierzeitraums....82
3. Meßkonzept....83
3.1 Abflußmessung....83
3.2 Konzentrationsmessungen....84
3.3 Einsatz der Leitfähigkeitsonden....84
3.4 Temperaturmessung....85
3.5 Bodenwasserpegel....87
3.6 Niederschlagsmessung....88
4. Fernerkundung....89
4.1 Flächennutzung....89
4.2 Oberflächentemperatur....89
5. Grundlagenkarten....90
5.1 Flächennutzung....90
5.2 Bodenkarte....90
5.3 Digitales Höhenmodell (DHM)....90
5.4 Karte der Teileinzugsgebiete....91
6. Abgeleitete Karten....91
6.1 Hangneigung....91
6.2 Ökotonenabstand....91
6.3 Wasserdurchfluß....92
6.4 Wirkungsgrad....93
6.5 Vorranggebiete....95

E. Untersuchungen zu Kennfeldern und Austragsmechanismen....96
1. Kennfelder zur Zönosenkernstruktur....96
1.1 Temperatursonden....99
1.2 Temperaturdaten vom Satelliten....101
2. Mechanismen der Stofffestlegung und des Stoffaustrags....103
2.1 Transport- und Reaktionsprozesse im Einzugsgebiet....104
2.1.1 Anorganische Lösungs-/Fällungsprozesse und biologische Prozesse....104
2.1.2 Bodenprozesse bei unterschiedlichem landschaftlichen Wirkungsgrad....106
2.1.3 Einfluß der Partikeloberfläche auf den Stoffaustausch zwischen Wasser und Substrat....107
2.1.4 Jahreszeitliche Differenzierung des Austragsprozesses....109
2.1.5 Bedeutung des Abflusses in seiner raum-zeitlichen Verteilung auf den Stoffaustrag....109
2.2 Stoffestlegung im Gewässer....110
3. Konzentrationsmuster....112

F. Ergebnisse der Gebietsanalyse....116
1. Beurteilung des Störgebietes....116
1.1 Stoffausträge und Stoffbilanzen....116
1.1.1 Eintrag über die Niederschläge....116
1.1.2 Abfluß als frachtbestimmende Größe....117
1.1.3 Leitfähigkeits-Abfluß-Beziehung....119
1.1.4 Basenvorräte der Oberböden....121
1.1.5 Stoffbilanz am Beispiel des Calciums....123
1.1.6 Anreicherung von Schwermetallen....125
1.2 Prozeßanalyse....127
1.2.1 Veränderung der Niederschlagsmuster....127
1.2.2 Muster des Bodenwasserspiegels....130
1.3. Fließgewässer als Indikatoren des Wasser- und Stoffhaushaltes des Einzugsgebietes....134

1.3.1 Die Gewässeranalyse am Beispiel von Himmelreichbach, Osterau und Dosenbek....134
1.3.1.1 Der Himmelreichbach....134
1.3.1.2 Die Osterau....136
1.3.1.3 Die Dosenbek....138
1.3.2 Ergebnis....140
2. Regionalstudie....145
2.1 Abfluß und Stoffverluste....145
2.1.1 Niederschlag....145
2.1.2 Abfluß 146
2.1.3 Konzentrationen....152
2.1.4 Stoffverluste....154
2.2 Strukturparameter zur Prozeßanalyse....157
2.2.1 Flächennutzung....157
2.2.2 Hangneigung....158
2.2.3 Ökotonenabstand....159
2.2.4 Wasserdurchfluß....160
2.3 Oberflächentemperatur....161
2.3.1 Temperaturverteilung der Berechnungsabschnitte und Einzugsgebiete....161
2.3.2 Oberflächentemperatur und Strukturparameter....162
2.3.3 Multitemporale Betrachtung....163
2.4 Bewertung der Landschaft anhand Wirkungsgrad und Phasenlage....163
2.4.1 Wirkungsgrad....163
2.4.2 Phasenlage der Einzugsgebiete....164
3. Zusammenfassung....165

G. Planung....167
1. Einleitung und Annahmen....167
2. Planungsgrundlagen....167
2.1 Geomorphologie als Grundlage....167
2.2 Bedeutung der Vegetation....170
3. Ausweisung der Vorranggebiete....171
4. Abgestufter Handlungsbedarf....171
5. Module zur Umsetzung....172
5.1 Kuppenlagen....172
5.2 Steilhänge....172
5.3 Fangsysteme entlang der Gewässer und Maßnahmen im Gewässer....173
5.3.1 Typ "Gewässerbegleitende Fangsysteme"....174
5.3.2 Typ "Temporäre Feuchtgebietskaskaden"....174
5.3.3 Typ "Feuchtgebiet mit Rieselstrecke"....177
5.4 Feuchtgebiete in Quellbereichen und an Gewässer-Zusammenflüssen....177
5.5 Polder zur Rückhaltung von Klarwasser....179
5.6 Bewirtschaftung auf den Flächen für die Land- und Forstwirtschaft....179
5.7 Siedlungsentwicklung....180
6. Zeitliche Komponente....182
6.1 Planung als zeitlicher Prozeß....182
6.2 Richtungssicherheit der Planung....182
6.2.1 Naturschutz....183
6.2.2 Hochwasserschutz....183
6.2.3 Klimaschutz....183

H. Umsetzung....185
1. Nachhaltigkeit heutiger Industriegesellschaften....185
2. Politische Rahmenbedingungen zur Selektion nachhaltigerer Bewirtschaftungsformen....188
2.1 Energiesteuer....189

2.2 Bodenwertsteuer und Bodenwertfreibetrag....189
2.3 Auswirkungen der Energie- und Bodensteuer auf die Wirtschaftsstruktur....190
3. Bewirtschafterebene....190
3.1 Der Wasserwirtschaft betreibende Landbewirtschafter....190
3.2 Ökologische und ökonomische Effekte der wasserhaushaltsbasierten Landbewirtschaftung....191
4. Technisch-administrative Ebene....192
5. Ausblick....192

I. Zusammenfassende Projektbewertung....194
1. Projektbewertung....194
2. Übertragbarkeit....195
3. Forschungs- und Handlungsbedarf....196

J. Literatur....198

K. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis....200
1. Abbildungsverzeichnis....200
2. Tabellenverzeichnis....202

Anhang 0: Die wichtigsten Karten
Karte 1: Berechnungsabschnitte....205
Karte 2: Hydrologisches Meßnetz....206
Karte 3: Hydrochemie-Meßnetz....207
Karte 4: Flächennutzung nach TK25....208
Karte 5: Flächennutzung: Klassifikation mit Landsat 5 TM....209
Karte 6: Bodentypenkarte in generalisierter Form....210
Karte 7: Höhenkarte 211
Karte 8: Hangneigung....212
Karte 9: Ökotonenabstand....213
Karte 10: Wasserdurchfluß....214
Karte 11: Wirkungsgrad: Abschätzung....215
Karte 12: Stoffverluste 216
Karte 13: Oberflächentemperatur 7. Juli 1987....217
Karte 14: Oberflächentemperatur 17. Mai 1992....218
Karte 15: Oberflächentemperatur 4. September 1991....219
Karte 16: Vorrangflächen zur Steigerung der Nachhaltigkeit....220

Anhang 1: Weitere Methoden <nicht enthalten>
1. Methodik der Gewässerkartierung
2. Liste der Probenahmestellen 1992-1994
3. Feldmethoden
4. Labormethoden
5. Zuordnung der Niederschlagsstationen zu den Pegeln
6. Heuristisches Abflußschätz-Verfahren
7. Beschreibung der im Projekt verwendeten Sonden
8. Erstellung der Bodenkarte

Anhang 2: Graphiken <nicht enthalten>

<Die Anhänge 1 und 2 befinden sich im Band 2 des Berichtes. Sie sind in der vorliegenden pdf-Datei nicht enthalten.>

Kurzbeschreibung des Stör-Projektes (I und II)

Problem

Aus den Einzugsgebieten der größeren deutschen Flüsse werden sehr große Mengen an gelösten mineralischen Salzen ausgetragen, z.B. 1,2 t/ha/a (ohne Natriumchlorid) für den Rhein. Das bearbeitete Einzugsgebiet der Stör weist einen Austrag von etwa einer Tonne pro Hektar und Jahr auf. Der Anteil der basischen Kationen (Calcium, Magnesium und Kalium) liegt bei knapp 30%. Die Werte der Austräge für die Nährstoffe Phosphor (Ges.P) und Stickstoff (Ges.N) betragen < 0,1% bzw. 1,5% der mineralischen Salzausträge. Die Austräge an mineralischen Salzen sind erheblich größer als die Einträge über Düngung und Niederschlag. Es ist zu erwarten, daß der Oberboden auf rasch zunehmender Fläche an Basen verarmt. Das Verhältnis im Oberboden zwischen Basen einerseits und nicht für die Vegetation nutzbaren Stoffen sowie Schadstoffen andererseits wird geringer. Hierdurch wird das gesamte Ökosystem nachhaltig geschädigt. Die Natur als Basis für den Menschen und die Gesellschaft ist damit ernsthaft in Frage gestellt.

Lage des Projektgebietes

Die Stör entspringt bei Willingrade südöstlich von Neumünster in Schleswig-Holstein. Sie durchfließt die hohe Geest im Gebiet um Neumünster und mündet unterhalb Hamburgs in das Elbeästuar. Untersucht wurde das nicht mehr von Tidewasser beeinflußte Einzugsgebiet (ca. 1150 km^2) bis Kellinghusen.

Forschungsansatz des Stör-Projektes

Der Forschungsansatz leitet sich aus dem Energie-Transport-Reaktionsmodell (ETR-Modell) ab. Dieses versucht, ökologische Systeme und damit die Landschaft funktional zu verstehen. Es ist ein auf den Wasserhaushalt und Energieumsatz reduziertes, konzeptionelles Denkmodell, das alle wesentlichen Prozesse in Raum und Zeit betrachtet und funktional verknüpft. Die Herangehensweise ist deduktiv und heuristisch.

Der tägliche Energiepuls der Sonne treibt alle Prozesse; das Medium Wasser verteilt die Potentiale, ist Transport- und Reaktionsmittel, wobei der Transport eine notwendige Voraussetzung für die Reaktion ist (deshalb ETR-Modell). Das Wasser reagiert in Organismen und in der Landschaft. Der Energiepuls wird vom Ökosystem bzw. der Vegetation auf eine mittlere Temperatur eingelenkt. Dies wird als Energiedissipation bzw. Absenkung der Energieflußdichte bezeichnet. Ökologische Strukturen sind dissipativ, indem sie Wasser transportieren, verdunsten und ihren Stoffwechsel betreiben. Vor allem durch Verdunstung und Taubildung werden die Temperaturunterschiede des Ökosystems räumlich und zeitlich geringer.

Bei der ungestörten Entwicklung eines Ökosystems werden die Wasser- und Stoffkreisläufe immer kurzgeschlossener. Der Wasserhaushalt wird durch den Aufbau wasserspeichernder Strukturen (z.B. Streuschicht oder Torf) ausgeglichener. Die Feuchtigkeit des Oberbodens steigt an, die vegetationsgesteuerte Prozeßrückkopplung nimmt zu. Die Nachhaltigkeit, gemessen am Wirkungsgrad als Verhältnis von Stoffumsatz zu Stoffverlust des Systems, wird im Laufe der Entwicklung immer weiter erhöht. Diese Entwicklung wird in nichtlinearer Weise durch die zur Neige gehenden Stoffvorräte begrenzt. Größere Störpulse (z.B. hohe anthropogen verursachte Energieflußdichten durch Entwässerung) werfen das System in einen früheren Zustand zurück. Von diesem beginnt die Optimierung der Nachhaltigkeit dann erneut, sofern die Störpulse in ihrer Fre-

quenz abnehmen. Die Nachhaltigkeit bzw. der Wirkungsgrad eines Ökosystems ist neben dem biologischen Stoffumsatz und den Verlusten auch über die Kühlfunktion der Landschaft ableitbar.

Das Projekt geht von folgender, aus dem ETR-Modell abgeleiteten, Hypothese für die hohen Stoffverluste aus:

Wird das Niederschlagswasser in der Landschaft nicht größtenteils über kurzgeschlossene Verdunstungs-Kondensationsprozesse oder oberflächennahen Abfluß transportiert, sondern versickert in den Boden, werden mineralisierte Stoffe gelöst. Es treten chemische Lösungs- und Fällungsreaktionen auf, die mit dem fließenden Wasser zu gerichteten Stofftransporten führen. Erreichen die Nährstoffe und Basen über die Fließgewässer das Meer, sind sie für die Landschaft und die Vegetation verloren (Verlustprozeß). Das Ausmaß des Mineralisationsprozesses im Boden hängt in starkem Maß von der räumlichen und zeitlichen Verteilung der wechselfeuchten Phasen (Schwanken des Bodenwasserspiegels) und der Bodentemperatur ab. Die Schwankungen des Bodenwasserspiegels und der Temperatur werden in einem entwickelten Ökosystem weitgehend von der Vegetation und der von ihr durchwurzelten Bodenschicht bestimmt. Die Kopplung zwischen Mineralisations- und Stoffaufnahmeprozeß durch die Vegetation als steuerndem "Prozessor" des Ökosystems ist heute stark herabgesetzt, bedingt durch die Veränderung des Wasserhaushaltes sowie der Nutzungsverteilung. Vor allem Eingriffe in die Vegetation und den Boden, wie z.B. Entwässerungen, führen zu einer nicht an die Vegetationsentwicklung rückgekoppelten, erhöhten Mineralisation von organischer Substanz. Es bilden sich starke Säuren, die durch die Basen gepuffert werden und so zu deren zunehmender Auswaschung aus dem durchwurzelbaren Oberboden in tiefere Schichten bzw. in die Gewässer führen. Ist der Standort bereits weitgehend an Basen verarmt, werden die Säuren aufgrund des gerichteten Wasserflusses an anderer, unterhalb liegender Stelle gepuffert und erhöhen dort die Basenverluste.

Durch diese Prozesse wird die Nachhaltigkeit der Landschaft bzw. deren Wirkungsgrad stark herabgesetzt.

Ziele des Forschungsprojektes

Die aus dem ETR-Modell abgeleiteten Arbeitshypothesen sollten überprüft und die bestimmenden Prozesse für den Stoffaustrag in ihrer regionalen Verteilung ermittelt werden. Daraus sollte ein Instrument entwickelt werden, das den raum-zeitlichen Handlungsbedarf aufzeigt, um ein richtungssicheres Handeln zur Steigerung der Nachhaltigkeit zu ermöglichen. Dazu notwendige Maßnahmen und gesellschaftliche Rahmenbedingungen sollten dargestellt werden.

Datenerfassung

Die wichtigsten erhobenen bzw. herangezogenen Daten sind:

- ► Abflüsse an 37 Meßpunkten (14 Landespegel, 23 projekteigene Sonden),
- ► monatliche Wasserprobennahmen zur chemischen Analyse der Wasserbeschaffenheit in den Gewässern an 128 Meßpunkten,
- ► kontinuierliche Leitfähigkeitsmessungen an 10 Meßpunkten (ab März 1994),
- ► Niederschlagsmengen an 14 Meßstationen des Deutschen Wetterdienstes,
- ► Erfassung der monatlichen Niederschläge und ihrer chemischen Beschaffenheit an einem vom Projekt betreuten Meßpunkt,
- ► Bodenwasserganglinien an 30 Meßpunkten (projekteigene Sonden),

- ► Verteilung der vom Satelliten gemessenen Oberflächentempertur zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten,
- ► Temperaturganglinien an 8 Meßpunkten (projekteigene Sonden) in 10 cm Bodentiefe, an der Bodenoberfläche, in 10 cm Höhe und in 2 m Höhe (ab Juni 1994),
- ► Flächennutzung (über TK 25 und Auswertung einer Satellitenszene),
- ► Lysimeterversuche im Labor und
- ► Makrophytenuntersuchungen in den Fließgewässern.

Zentrale Ergebnisse

Die Austräge an gelösten Salzen sind erheblich größer als die über Düngung und Niederschlag eingetragenen Mengen. Lysimeterversuche im Labor bestätigten den Einfluß der wechselfeuchten Phasen auf den Mineralisationsprozeß. Der Abfluß und nicht die Konzentration ist in der Regel die frachtbestimmende Größe. Die Morphologie der Gewässer und deren pflanzliche Ausstattung ist nicht in der Lage, die heutigen eingetragenen Stofffrachten zurückzuhalten bzw. umzusetzten. Die Stoffretention muß daher an Land erfolgen. Aus diesem Grund sind die sektoriellen Grenzen der Forschung und Bewirtschaftung durch neue Konzepte zu überwinden.

Neben der Notwendigkeit, die Landschaft insgesamt wieder mit mehr dauerhafter Biomasse auszustatten, wurden folgende allgemeine Bewirtschaftungsmaßnahmen abgeleitet:

1. Kuppenlagen - sie sind besonders von der Auswaschung betroffen - sollten nicht oder nur extensiv bewirtschaftet werden.

2. In Quellbereichen und an Zusammenflüssen von Gewässern sollten sich wieder die ursprünglich vorhandenen Feuchtgebiete entwickeln können. Das Wasser bleibt länger in der Landschaft, die wechselfeuchte Zone wird geringer. Der Wasserfluß ist gleichmäßiger. Der für die Ökologie entscheidende Basisabfluß in der Niedrigwasserperiode wird angehoben.

3. Große Feuchtgebiete (Röhrichte oder Feuchtwälder) sollten als bewirtschaftete Stoffrückhalteflächen eingerichtet werden, in denen das aus der Landschaft abfließende Oberflächen- und Schichtenwasser durch Verdunstung verlangsamt wird. Durch Rückführung der gewonnen Basen und Nährstoffe in die höher gelegenen Flächen schließt sich der Stoffkreislauf.

4. Organische Abfälle und Abwasser sind nach einer entsprechenden Aufbereitung in die Landschaft zurückzuführen, um den Stoffkreislauf kurzgeschlossen zu halten und die Verluste zu minimieren.

Durch solche, räumlich und zeitlich festzulegende Maßnahmen soll die Nachhaltigkeit der Landschaft erhöht werden: In einer Landschaft mit besserem Temperaturausgleich durch Verdunstung sinken die Stoffverluste, der Abfluß erfolgt gleichmäßiger und die Anzahl von Hochwasserereignissen verringert sich. Die Lebensgemeinschaften der Fließgewässer haben wieder die Möglichkeit, sich zu hochvergesellschafteten Strukturen zu optimieren, wodurch die Gewässer wieder ihren natürlichen Charakter zurück erhalten.

Über ein Geographisches Informationssystem (GIS) wurden Vorranggebiete ausgewiesen, die entweder sehr empfindlich auf den Auswaschungsprozeß reagieren oder deren Umgestaltung einen hohen Stoffrückhalt und damit eine hohe Maßnahmeneffizienz erwarten lassen. Um die beschriebenen Möglichkeiten zur Verringerung der Stoffverluste operabel zu machen, wurden Planungsmodule bzw. -vorschläge in allgemeiner Form beschrieben. Diese müssen der speziellen Situation in den jeweiligen Teilgebieten angepaßt werden.

Die Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen bietet neben der Erhöhung der Nachhaltigkeit eine gute Richtungssicherheit vieler bestehender Ziele im Natur-, Hochwasser- und Klimaschutz.

Gesellschaftliche Lösungsstrategie

Eine Gesellschaft kann nur dann dauerhaft bestehen, wenn sie die Landschaft als physische Basis durch eine nachhaltige Bewirtschaftung erhält. Eine Umorientierung in Richtung einer stoffverlustärmeren und daher dauerhafter funktionierenden Bewirtschaftung erfordert, daß das Nachhaltigkeitsprizip auf politischer Ebene oberste Priorität bekommt. Durch den Einsatz ökonomischer Steuerungsinstrumente müssen hier die erforderlichen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die in ihrem Zusammenwirken zur positiven Selektion nachhaltiger Wirtschaftsweisen führen. Analog zu ökosystemaren Regelungsmechanismen werden folgende ökonomischen Steuerungselemente vorgeschlagen:

1. Lineare Energiesteuer (entspricht dem zeitlich strukturierten und dadurch zeitlich limitierten Energieangebot in der Natur).

2. Progressive Bodenwertsteuer (entspricht der Limitierung des Raumes bzw. des Angebotes an Nährstoffen und Basen in der Natur) unter weitestgehender steuerlicher Entlastung der Dienstleistung.

3. Individueller Bodenwertfreibetrag als soziale Basis anstelle eines sozialen Netzes (entspricht der Grundausstattung eines Standortes an Nährstoffen und Basen in der Natur).

Der technisch-administrativen Ebene käme nach einer solchen Umgestaltung in erster Linie eine beratende Funktion zu, z.B. bei der Ausweisung von Vorranggebieten für die Wassergewinnung oder den Umsetzungsmaßnahmen der Abwasseraufbereitung.

Auf der Bewirtschafterebene ist den Landbewirtschaftern (Land- und Forstwirten) die Wasserwirtschaft zwingend zuzuordnen, da vielfach durch eine nicht sachgemäße Wasserwirtschaft die Stoffverluste maximiert wurden. Die Landbewirtschafter wären für die Bereitstellung des Lebensmittels Wasser in Form sauberen Oberflächenwassers mit einem über das Jahr vergleichmäßigtem Dargebot verantwortlich. Sie würden nach Menge und Güte des Wassers in den Flüssen marktgerecht bezahlt.

Nach einer Phase der (stoffverlustreichen) wirtschaftlichen Expansionsstrategie würde somit eine Umstrukturierung eingeleitet werden, bei der wirtschaftliches Wachstum an eine Wirkungsgradsteigerung (Absenken von Stoffverlusten) gebunden wäre. Dadurch könnte der heutigen Gesellschaft und nachfolgenden Generationen eine "lebenswerte Zukunft" gesichert werden, anstelle weiter auf Kosten der nächsten Generationen zu leben.

Auftraggeber

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein

Wissenschaftliche Projektleitung

Prof. Dr. W. Ripl, TU Berlin, Institut für Ökologie - Fachgebiet Limnologie

Beteiligte Institutionen

Technische Universität Berlin
Limnologie, Prof. Dr. W. Ripl
Landschaftsplanung, Prof. F. Trillitzsch

Christian-Albrecht-Universität Kiel
Wasserwirtschaft und Meliorationswesen, Prof. Dr. P. Widmoser
Bodenkunde, Prof. Dr. H.-P. Blume

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Hauptabteilung Systemanalyse Raumfahrt, Dr. R. Backhaus

Gesellschaft für Gewässerbewirtschaftung mbH (GfG) Berlin

Finanzvolumen: 3,8 Mio DM

Laufzeit: 01.11.90 - 31.03.95

A. Einleitung

Unsere heutige Kulturlandschaft weist in der Regel stark schwankende Abflüsse und daran gebunden hohe Einträge an festen und gelösten Stoffen in die Fließgewässer auf. Für das Untersuchungsgebiet der Stör beispielsweise wurden etwa 1.050 kg/ha/a an Salzausträgen gemessen (NaCl-korrigiert). Die gesteigerten Stoffausträge führen nicht nur zur morphologischen und zönotischen Destrukturierung der Fließgewässer, sondern vor allem zu einem beschleunigten Verlust der Bodenfruchtbarkeit des Einzugsgebietes. Eine Bewirtschaftung der Landschaft ist deshalb nicht nachhaltig, d.h. nicht dauerhaft, möglich.

In diesem Projekt wurden auf Grundlage einer funktionalen Systembetrachtung Anforderungen an eine raum- und zeitangepaßte Bewirtschaftung der Einzugsgebietsfläche zur Senkung der Stoffverluste an die Fließgewässer abgeleitet. Theoretische Grundlage bildete das Energie-Transport-Reaktions-Modell (Ripl 1991), das Ökosysteme als energiedisspative Strukturen beschreibt. In diesem Modell kommt dem Energieumsatz über das Wasser als Triebfeder landschaftlicher Stofftransporte zentrale Bedeutung zu. Die wesentlichen Prozesse werden dabei in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung dargestellt.

Ein wichtiger Aspekt in dieser funktionalen Betrachtung von Ökosystemen ist deren Selbstoptimierung. Die Eigendynamik der Natur führt bei einer ungestörten Entwicklung immer zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit der Landschaft: Der Wasserhaushalt wird durch den Aufbau wasserspeichernder Strukturen (z.B. Streuschicht, Torf) ausgeglichener. Das Feuchtigkeitsniveau steigt an, die vegetationsgesteuerte Prozeßrückkopplung (ortskonstante Produktion und Mineralisation) nimmt zu. Die Wasser- und Stoffkreisläufe werden in der Regel immer kurzgeschlossener, die irreversiblen Austräge in die Fließgewässer in der Folge immer geringer. Die Dauerhaftigkeit bzw. Stabilität der Strukturen sowohl zu Land als auch im Fließgewässer steigt an.

Die Nachhaltigkeit einer Landschaft kann als funktionales Leitbild verstanden werden, an dem Planung und Bewirtschaftung zu bewerten sind. Nachhaltig sind dabei nur solche Maßnahmen, die zu einem Anstieg der stofflichen Kreisprozesse gegenüber den irreversiblen Verlusten in die Fließgewässer führen. Voraussetzung für eine nachhaltige Landbewirtschaftung ist eine funktionale Orientierung an der Selbstoptimierungsstrategie der Natur.

Den Fließgewässern wurde innerhalb des Projektes eine Indikatorfunktion für die Nachhaltigkeit der sie umgebenden Landschaft zugeordnet. Durch den gerichteten Wasser- und daran gebundenen Stoffffluß in der Einzugsgebietsfläche sind sie dieser nachgeordnet. Über ihren Hydrographen (Abflußkurve) einerseits sowie die morphologische und zönotische Strukturierung andererseits spiegeln sie den Wasser- und Stoffhaushalt an Land deutlich wider. Im Rahmen des Projektes wurde ein Beobachtungsansatz entwickelt, die diese Rückkopplung mittels weniger, einfach zu erfassender morphologischer Parameter aufzeigt.

Ziel des Projektes war es, möglichst viel funktionales Systemverständnis über das Einzugsgebiet der Stör zu gewinnen. Es ist dadurch möglich, räumlich und zeitlich konkretisierte Planungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Landschaft einschließlich ihrer Fließgewässer abzuleiten. Aus diesem Grund wurde auch die deduktive Vorgehensweise der induktiven vorgezogen. Entsprechend beginnt der Projektbericht mit einem theoretischen Teil, der das Systemverständnis darlegt; darauf aufbauend schließen sich die Methodik sowie die Gebietsanalyse, -bewertung und -planung an.

Vorgeschichte des Forschungsvorhabens

Die Stoffrückhaltefähigkeit der Fließgewässer als Bewertungsgrundlage für die Ableitung von Konzepten zur Fließgewässersanierung bildete die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens. Sie führte im September 1988 in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein zur Formulierung des Projektantrages "Modellhafte Erarbeitung eines ökologisch begründeten Sanierungskonzeptes kleiner Fließgewässer". Das Bundesministerium für Forschung und Technologie empfahl im August 1989 seine Überarbeitung.

Die Überarbeitung des Antrags umfaßte neben der Methodik inhaltlich die Beurteilung der Stoffrückhaltefunktion der Landschaft sowie die daraus abzuleitenden Sanierungskonzepte. Dabei wurde in den Vordergrund gestellt, daß eine Sanierung der Fließgewässer vor allem über die Bewirtschaftung des Einzugsgebietes erfolgen muß. Beispielsweise zeigten erste Stickstoffbilanzen aus dem Projektgebiet auf, daß nicht mehr als 20-25% der Einträge in die Fließgewässer aus Punktquellen (Kläranlagen) stammen konnten. Einen größeren Anteil mußten demnach diffuse Quellen der Landbewirtschaftung ausmachen. Die hohen Einträge nicht nur an Hauptnährstoffen (Stickstoff, Phosphor) und Basen (z.B. Kalium, Natrium oder Magnesium), sondern auch an festem Material führen in den Fließgewässern zur Destrukturierung der Morphologie und der Zönosen. Unter dem Titel "Entwicklung eines Land-Gewässerbewirtschaftungskonzeptes zur Senkung von Stoffverlusten an Gewässer" wurde der Antrag erneut vorgelegt und im Oktober 1989 vom Bundesministerium für Forschung und Technologie positiv bewertet.

Nachdem auch die Auswahl der Modellgebiete, die auf Grundlage einer Einzugsgebietsanalyse der Stör durch das Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten erfolgte, näher erläutert und begründet worden war, konnte der Forschungsantrag am 20. Dezember 1989 in überarbeiteter und ergänzter Form erneut vorgelegt werden. Am 15. November 1990 wurde der Zuwendungsbescheid vom Bundesministerium für Forschung und Technologie erteilt.

Mit eingebunden in das Forschungsprojekt wurden im Bereich Hydrologie Herr Prof. P. Widmoser und im Bereich Bodenkunde Herr Prof. H.P. Blume von der Christian-Albrechts-Universität in Kiel. Außerdem wurden Kontakte zur Forschungsgruppe "Ökosystemforschung im Bereich der Bornhöveder Seenkette" (Kiel) hergestellt.

Ein Zusatzantrag "Messungen der energiedissipativen Funktion der Landschaft (Vegetation und Wasserhaushalt) in räumlicher und zeitlicher Verteilung im Einzugsgebiet der Stör" wurde im Juni 1993 gestellt und im November 1993 gebilligt (Stör II). Dieser hatte schwerpunktmäßig die Abschätzung des derzeitigen Stoffrückhaltevermögens der Landschaft zum Inhalt. Theoretischer Ansatz dabei bildete der Energieumsatz in der Landschaft über das Wasser. Die sich daraus ergebende Gebietsanalyse umfaßte Temperaturmessungen und deren Kopplung mit Fernerkundungsdaten. In diesem Rahmen wurde die Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR, Köln-Porz) mit in das Forschungsprojekt integriert.

Projektorganisation	Förderkennzeichen 03393 10A und 0339538 (Ergänzungsprojekt)
Förderung des Vorhabens	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)
Projektträger	Forschungszentrum Jülich GmbH
Durchführung des Vorhabens	
Auftragnehmer	Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein Projektleiter Klaus Voss
Wissenschaftliche Leitung	Technische Universität Berlin (TUB), Institut für Ökologie, Fachgebiet Limnologie, Prof. Dr. W. Ripl
in Zusammenarbeit mit	
	Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt (DLR) Dr. R. Backhaus
	Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU), Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung Prof. Dr. H.-P. Blume
	Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU) Institut für Wasserwirtschaft und Meliorationswesen Prof.Dr. P. Widmoser
	Gesellschaft für Gewässerbewirtschaftung Berlin (GfG mbH)
Wissenschaftliche Mitarbeiter	Arp, W., TU Berlin Bork, E., DLR Köln Bornhöft, D., CAU Kiel Braun, G., DLR Köln Finnern, J., CAU Kiel Gerlach, I., GfG Berlin Heller, S., GfG Berlin Hildmann, C., TU Berlin Janssen, T., TU Berlin Kleinfeld, F., CAU Kiel, GfG Berlin Krambeck, C., Kiel, Landesamt Markwitz, M., TU Berlin Michel, J., GfG Berlin Splies, A., TU Berlin Wang, Y., TU Berlin Wolter, K., Kiel, Landesamt Rapp, P., CAU Kiel Schmidt, U., DLR Köln

B. Funktionales Leitbild

Thesen:

1. Die Natur ist ein dissipatives System.

Die Natur ist ein energiedissipatives (energieflußdichtesenkendes) System. Wichtigstes energiedissipatives Element ist das Wasser, bedingt durch seine Eigenschaften von Verdunstung und Kondensation, Stofflösung und -fällung sowie Wasserspaltung und -synthese (Photosynthese/Respiration). Atmosphärische Prozesse, Bodenprozesse und biologische Prozesse werden durch die Dynamik dieses dissipativen Mediums bestimmt.

2. Die Natur ist selbstoptimierend.

Dissipative Systeme sind bei Raumlimitierung (räumlicher bzw. stofflicher Begrenzung/Geschlossenheit) und Zeitlimitierung (bei zeitlich strukturiertem und dadurch begrenztem Energieangebot) selbstoptimierend, sie streben nach höherer Dauerhaftigkeit (Stabilität). Diese Systementwicklung ist funktional als Entwicklung in Richtung maximaler Energieflußdichteabsenkung charakterisierbar.

3. Stoffverluste senken die Nachhaltigkeit natürlicher Systeme.

Je nach dem Ausmaß der örtlichen Energieflußdichteabsenkung auf den Mittelwert (potentialloser Zustand) ergeben sich unterschiedliche Anteile stofflicher Kreis- und Verlustprozesse. Die irreversiblen Stoffverluste in die Fließgewässer sind an die raum-zeitlichen Verteilung des Wassers und dessen Fließbewegung gekoppelt. Anhaltend hohe stoffliche Verluste bei abnehmenden Stoffvorräten führen zu einem weitgehenden Zusammenbruch der Vegetation, d.h. die Nachhaltigkeit der natürlichen Systeme wird abgesenkt.

4. Für die Landschaft kann ein Wirkungsgrad ermittelt werden.

Der landschaftliche Wirkungsgrad kann aus der Dynamik der Prozesse (wahrnehmbar z.B. als Temperatur- und Abflußschwankung) abgeleitet werden. Auch die Entwicklung dauerhafter und vielfältiger Strukturen steht in direktem Bezug zu ihm. Der Wirkungsgrad ist daher ein Maß für die Nachhaltigkeit einer Landschaft.

5. Fließgewässerprozesse sind denen der Landschaft nachgeordnet und ähnlich.

Die Prozesse im Fließgewässer sind denen der Landschaft nachgeordnet und ähnlich. Rückgekoppelt an die Selbstoptimierung der Landschaft entwickeln Fließgewässer Strukturen, die den Stoffffluß maximal gegenüber der Wasserbewegung verzögern. Dadurch tragen sie zur Verlustarmut des gesamten Einzugsgebietes bei (Selbstoptimierung des Fließgewässers).

6. Funktionale Leitbilder ermöglichen die Steigerung der Nachhaltigkeit.

Aus diesem prozeßhaften Naturverständnis heraus sind die Leitbilder für natürliche Systeme funktional zu definieren. In ihnen muß die Veränderung der räumlichen und zeitlichen Prozesse im Wasser- und Stoffhaushalt und damit die Veränderung des landschaftlichen Wirkungsgrades im Vordergrund stehen.

B.1. Energiedissipation als Grundlage funktionaler Ökosystemanalyse

B.1.1. Begriffsdefinitionen

Der Zusammenhang zwischen der Energiedissipation und den Stoffflüssen in der Landschaft bildet die Grundlage der nachfolgenden funktionalen Ökosystembetrachtung. Definiert ist dabei der Begriff der Energie sowie der Energiedissipation wie folgt (Ripl & Hildmann 1995, i.p.):

Energie ist als Wechselwirkung zwischen zwei oder mehreren Objekten zu betrachten (z.B. Moleküle, Sonne - Erde). Wahrnehmbar bzw. meßbar ist die Energie durch die räumliche und zeitliche Änderung der miteinander in Wechselwirkung stehenden Objekte (z.B. als chemische Reaktion, Temperaturänderung).

Unter der **Dissipation von Energie (Energieflußdichteabsenkung)** wird ein Prozeß verstanden, bei dem Energie während eines Pulses (Phase einer Wechselwirkung bzw. aus einem energetischen Potential) "aufgenommen" und zeitlich sowie räumlich phasenverschoben wieder "freigesetzt" wird. Dabei wird der Energiepuls in Richtung des Mittelwertes eingelenkt (gedämpft) und das Potential abgebaut. Stets erfolgt dieser Prozeß durch die räumliche und zeitliche Verlagerung von Materie. Beispielsweise wird durch die Energie aus der Wechselwirkung zwischen Sonne und Erde Luft erwärmt. Dadurch entstehen Druckunterschiede (energetisches Potential), die durch den Transport (Wind) abgebaut werden.

B.1.2. Die Energiedissipation in der Natur

Auch Ökosysteme sind aus funktionaler Sicht dissipativ: Die im Tag-Nacht-Rhythmus gepulste Energie aus der Wechselwirkung der Erde mit der Sonne[1] hält über das Wasser Prozeßabläufe in der Landschaft aufrecht, welche die Energie zeitlich (vom Tag in die Nacht) und räumlich (von wärmeren zu kühleren Bereichen) verschieben. Folge ist eine Dämpfung des täglich wirksamen Energiepulses, was auch als Energiedissipation bzw. Energieflußdichteabsenkung bezeichnet wird.

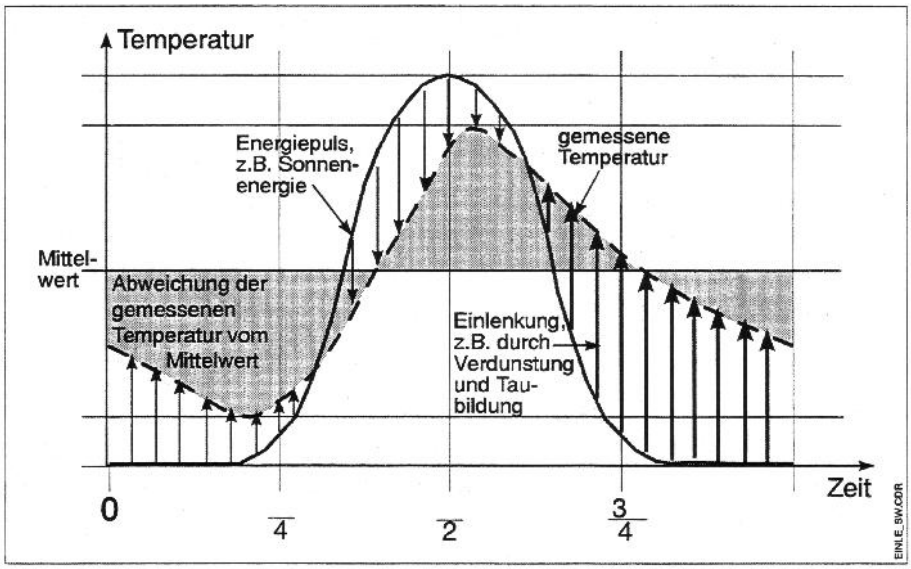


Abb. 1: Einlenkung des Energiepulses auf den Mittelwert (Energiedissipation).

1 Durch Rotation der Erde um die eigene Achse wird die Energie aus ihrer Wechselwirkung mit der Sonne als Energiepuls mit täglicher Frequenz wirksam. Der Puls erfährt durch die Drehung der Erde um die Sonne bei schräggestellter Erdachse zusätzlich eine jahreszeitliche Abwandlung. Wahrnehmbar wird die gepulste Energie als räumliche und zeitliche Temperaturschwankung.

Wahrnehmbar ist sie in der Verringerung der Tag-Nacht-Temperaturunterschiede, d.h. in der Temperatureinlenkung in Richtung des Mittelwertes eines Ortes (Abb. 1). Folgende Eigenschaften des Wassers sind im Prozeß der Energieflußdichtesenkung von entscheidender Bedeutung (dissipative Prozessoreigenschaften des Wassers, Abb. 2):

- Die *physikalische Prozessoreigenschaft* des Wassers besteht in seiner Fähigkeit zur Verdunstung und Kondensation. Über diese Prozesse wird Energie aus der Wechselwirkung zwischen Sonne und Erde gespeichert und raum- und zeitverschoben wieder freigesetzt. Die dissipativen Verdunstungs- und Kondensationszyklen besitzen in Verbindung mit der hohen Wärmekapazität[2] des Wassers die größte Bedeutung bei der Energieflußdichtesenkung.

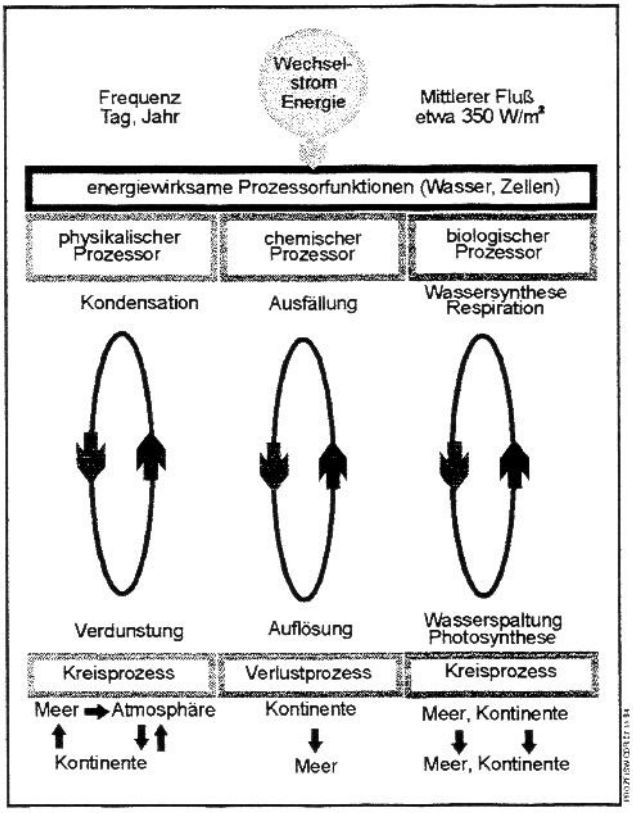


Abb. 2: Die Prozessoreigenschaften des Wassers.

- Die *chemische Prozessoreigenschaft* des Wassers beruht auf seiner Dipolstruktur. Der Wasserdipol kann Energie durch erhöhte Dissoziation in OH^-- und H^+-Ionen aufnehmen und bei der Wassersynthese wieder freisetzen. Ansteigende Temperaturen erhöhen die Dissoziation und damit auch die Reaktivität (Säurecharakter) des Wassers, ebenso wie die Beschleunigung bzw. Verzögerung der Wassermoleküle an den Phasengrenzflächen der Bodenpartikel. Über den Wasserdipol können so weitere dissipative Prozesse über Ladungs- bzw. Protonenflüsse ablaufen. Sie führen in der Landschaft auch zu irreversiblen Ladungsverlusten an das Meer, da die dort sedimentierenden Stoffe, wie z.B. Kalk, erst in geologischen Zeiträumen wieder zur Verfügung stehen.

- Die *biologische Prozessoreigenschaft* des Wassers ist durch seine Spaltung bei der Photosynthese sowie durch die Wasserbildung bei der Veratmung und Mineralisation gegeben: In Zeiten erhöhter Wechselwirkung zwischen Sonne und Erde wird bei der Photosynthese Wasserstoff gebildet. Dieser wird über die Reduktion des Kohlendioxids zum Aufbau energiereicher Substanz genutzt (Zucker, Zellulose). Die entgegengesetzte Reaktion ist die Respiration, bei der wieder Wasser entsteht und Energie für die Lebensprozesse der Organismen freigesetzt wird. Die mit der Sukzession zunehmende raum-zeitliche Organismenkopplung (Zönosenkernstruktur, Kap. 2.1) bewirkt, daß diese Prozesse räumlich begrenzt in immer stärkerem Maße als Kreislauf stattfinden. Die Zönosen wirken so den Stoffverlusten entgegen, die durch den Wasserkreislauf in Verbindung mit den Lösungsprozessen entstehen (Ripl & Hildmann 1995, i.p.).

Dissipative Verdunstungs- und Kondensationszyklen führen zum Wasserkreislauf auf der Erde. Durch ihn wird die Landschaft geformt und werden Stoffflüsse aufrechterhalten. Sie erfolgen mit

2 Die Wärmekapazität des Wassers beträgt 4,2 J/(cm^3*°C), die der Luft $1{,}3*10^{-3}$ J/(cm^3*°C) und die von Quarz 2,1 J/(cm^3*°C).

dem ober- und unterirdischen Abfluß gerichtet zu den Fließgewässern als den tiefsten Linien in der Landschaft und über diese zur globalen Senke Meer. Bezogen auf die im Oberboden begrenzt vorhandenen pflanzennotwendigen Basen handelt es sich hierbei um einen irreversiblen Verlustprozeß, der die Lebensdauer bzw. Stabilität ökologischer Strukturen begrenzt. Funktional betrachtet setzt das Wasser über Transporte gelöster sowie fester Stoffe einen Teil der täglich wirksamen Energie neben Verdunstung und Kondensation auch in Prozesse der räumlichen Strukturierung um (Stofflösung/-fällung, Erosion/Akkumulation). Die morphologische Dynamik sowohl zu Land als auch im Fließgewässer kann dabei als Abbild dieser Prozesse betrachtet werden.

Auch die Dynamik zönotischer Strukturen beruht auf dem Prinzip der Energiedissipation. Die Stoffflüsse dieser Strukturen werden vom täglich wirksamen Energiepuls aufrechterhalten, bei ungehinderter Entwicklung dabei zunehmend als Kreisprozeß betrieben: Unter der Begrenzung des verfügbaren Raumes bzw. seiner Ressourcen, wie z.B. Nährstoffe (Raumlimitierung) und der pulsstabilen Energetik tritt eine Selbstorganisation der Strukturen ein. Charakterisierbar ist diese Entwicklung funktional durch die Maximierung der Energieflußdichteabsenkung, einhergehend mit der Minimierung stofflicher Verluste. Geologische Stoffzyklen werden dadurch verlängert und damit auch die Zeitspanne einer möglichen Nutzung der Fläche durch den Menschen (nachhaltigkeitssteigernder Prozeß, Kap. 2, 3).

B.2. Organismengemeinschaften (Zönosenkernstrukturen) als energiedissipative Strukturen

B.2.1. Die Zönosenkernstruktur

Organismen bilden zusammen mit dem Wasser und ihrem Standort eine energiedissipative Funktionseinheit: Rückgekoppelt an die energetische Wechselwirkung zwischen Sonne und Erde wird nicht nur aktiv das zur Verfügung stehende Wasser verdunstet, sondern auch energiereiche Substanz aufgebaut und zeitlich phasenverschoben wieder veratmet bzw. mineralisiert. Die im Tag-Nacht-Rhythmus gepulste Energie hält somit Wechselwirkungen zwischen Organismen aufrecht, bestehend in einer Zirkulation von Stoffen unter deren permanenter Reduktion und Oxidation.

Eine stetige Energieflußdichteabsenkung über den biologischen Prozeß erfordert eine funktionale Kopplung der Organismen, welche die Stoffkreisläufe weitgehend schließt. Die **Zönosenkernstruktur** ist die kleinste Einheit, die durch das Zusammenwirken folgender Elemente diese Voraussetzung erfüllt (Abb.3):

- ► Die *Produzenten*, also die pflanzlichen Organismen, tragen den Prozeß der Energieflußdichteabsenkung (Transpiration, Biomasseaufbau). Sie steuern ihn auch in gewissen Grenzen, indem sie durch Streuakkumulation und Transpiration den Bodenwasserhaushalt regulieren und damit auch den Stoffabbau.
- ► Der *Detritus* ist Speicher für Nähr-, Mineralstoffe und Wasser.
- ► Die *Destruenten*, d.h. Pilze und Bakterien, schließen die Stoffkreisläufe durch den Abbau abgestorbener organischer Substanz. Über den Wassertransport werden Sauerstoff und Reaktanten zugeführt sowie Stoffwechselendprodukte abtransportiert. Die Produzenten steuern den Wasserfluß und damit die Aktivität der Destruenten (flußkontrollierte Prozeßträger).
- ► Das *Wasser* ist Transport- und Reaktionsmedium und dient als Kühlmittel. Beschleunigtes Wasser wirkt erosiv, stagnierendes Wasser konservierend.

► Die *Konsumenten* kontrollieren den Prozeß, indem sie die Produzenten bzw. die Konsumenten anderer trophischer Ebenen bewirtschaften. Durch die Bewirtschaftung werden ständige Zuwachsphasen aufrechterhalten und damit die Raumlimitierung aufgehoben.

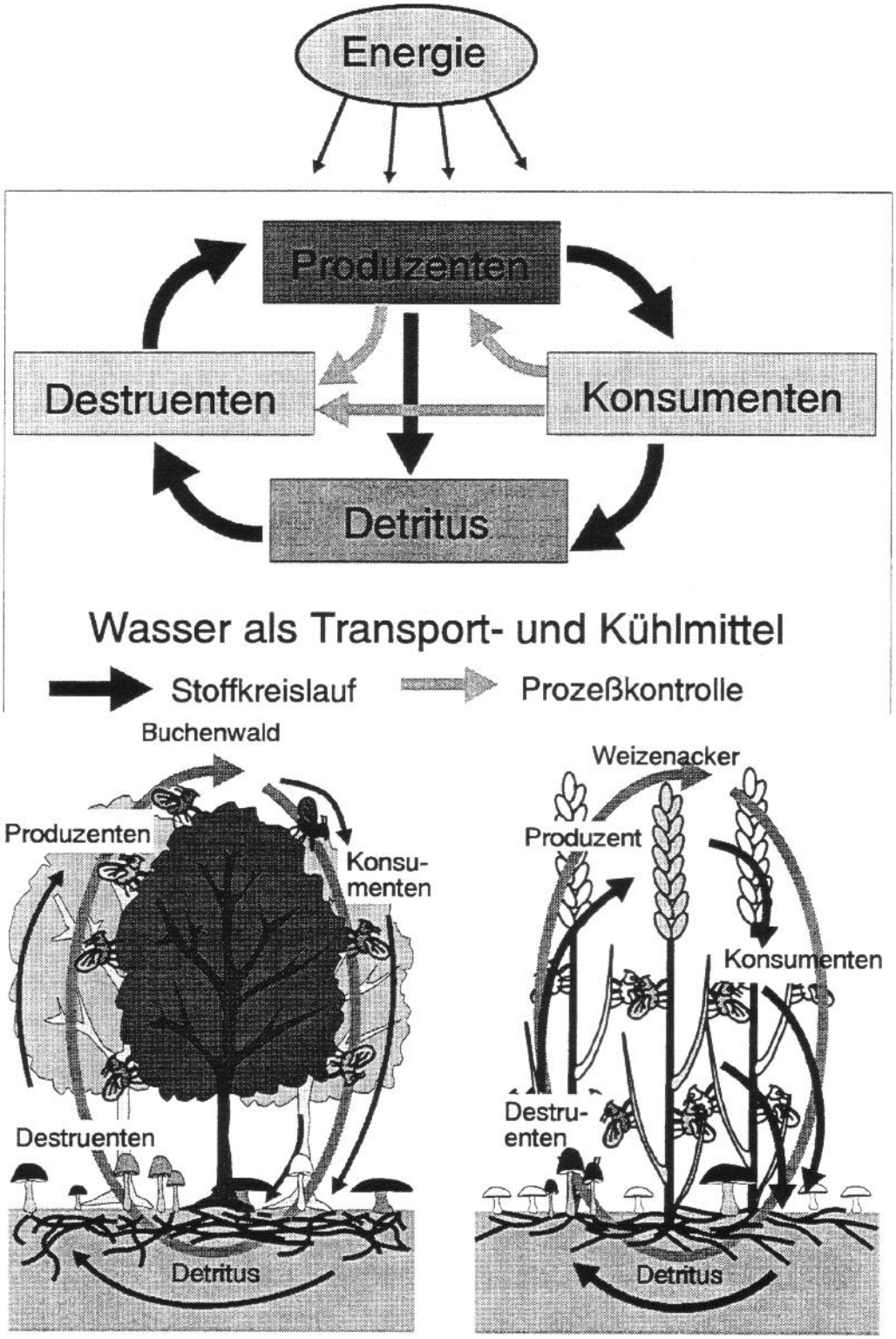


Abb. 3: Die Zönosenkernstruktur schematisch (oben) und an zwei Beispielen (unten).

Die Energieflußdichteabsenkung läuft in einer ZKS in Form folgender Prozesse ab (Abb. 4):

- Verdunstung[3] von Wasser:
  Über die Verdunstungsprozesse wird der größte Teil der Energie dissipiert. Beeinflußt werden sie durch die jeweilige Energieeinwirkung, das zur Verfügung stehende Wasser und durch Luftaustauschprozesse. Die Transpiration kann innerhalb gewisser Grenzen vom Produzenten aktiv gesteuert werden (Schließen der Spaltöffnungen bei extremen Temperaturanstieg). Die Interzeption nimmt mit zunehmender Oberfläche und deren Rauhigkeit zu, die Evaporation dagegen mit Weiterentwicklung der ZKS ab.

- Auf- und Abbau von Biomasse:
  Durch den Produktionsprozeß der autotrophen Organismen wird Energie in der Biomasse fixiert und größtenteils phasenverschoben durch Veratmung und Mineralisation wieder freigesetzt. Während bei den Produzenten tagsüber der Produktionsprozeß dominiert, läuft nachts nur noch der Respirationsprozeß ab.

- Kurzgeschlossene Verdunstung- und Kondensationszyklen:
  Kurze Verdunstungs- und Kondensationszyklen, wahrnehmbar als Taubildung, sind bei hoher Verdunstungskühle möglich. Beispielsweise kann im Baumkroneninneren transpiriertes Wasser an kühlerer Stelle rasch wieder kondensieren.

- Interne Kreisläufe:
  Hierzu zählen z.B. der auf- und absteigende Saftfluß sowie kurzgeschlossene Kreisprozesse wie Photosynthese und Photorespiration.

- Wärmestrom im Boden:
  Nicht von den Organismen dissipierte Energie wird teilweise als Bodenerwärmung und zeitverzögerte -abkühlung wirksam. Dabei findet ein Bodenwärmestrom statt, der tagsüber in die Tiefe und nachts zur Oberfläche hin gerichtet ist. Diese dissipativen Bodenprozesse verschieben die Energie zeitlich (vom Tag in die Nacht) und räumlich (von wärmeren zu kühleren Bodenbereichen) und lenken die Schwankung der Bodentemperatur auf ihren Mittelwert ein. Begünstigt werden dabei Prozesse der physikalischen Verwitterung, chemischen Lösung und Mineralisation; Stoffausträge werden vorbereitet. Die Extreme der Bodenerwärmung/-abkühlung werden mit zunehmender Weiterentwicklung der ZKS minimiert.

- Ausgleichende Warm- und Kaltluftströme der Luft (Abb. 5):
  Bei örtlich unvollständiger Energiedissipation erwärmt sich über dem Boden die angrenzende Luft und steigt auf. Sie führt in höheren Luftschichten zur Ausbildung eines kleinräumigen Hochdruckgebietes gegenüber den angrenzenden, besser gekühlten Gebieten. Der so entstandene Druckgradient gleicht sich aus, indem sich die aufsteigende Luft ausdehnt, ausbreitet und abkühlt. Da sie nur über den Kühlflächen unter fortwährender Abkühlung wieder absinken kann, entstehen dort bodennahe Druckgradienten zu den Wärmeinseln. Ihr Ausgleich erfolgt durch ein bodennahes Fließen von Kaltluftströmen von den Kühlflächen in Richtung der Wärmeinseln. - Im Bereich der Erwärmung ist durch den Aufstieg der warmen Luft bodennah ein Unterdruck im Verhältnis zu den umliegenden Flächen entstanden. Auch dieser wird durch das Zuströmen der Kaltluft ausgeglichen; der Kreislauf schließt sich.

3 Unter den Begriff der Verdunstung sind die Transpiration, die Interzeption (direkte Verdunstung von den Pflanzenoberflächen) und die Evaporation (Verdunstung aus dem Boden) zusammengefaßt.

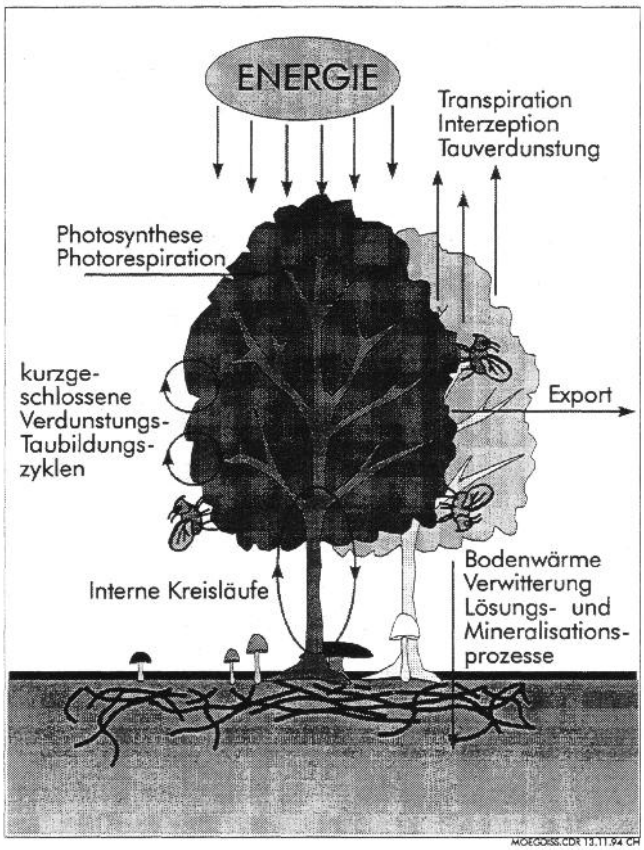


Abb. 4: Prozesse zur Absenkung der Energieflußdichte in einer ZKS.

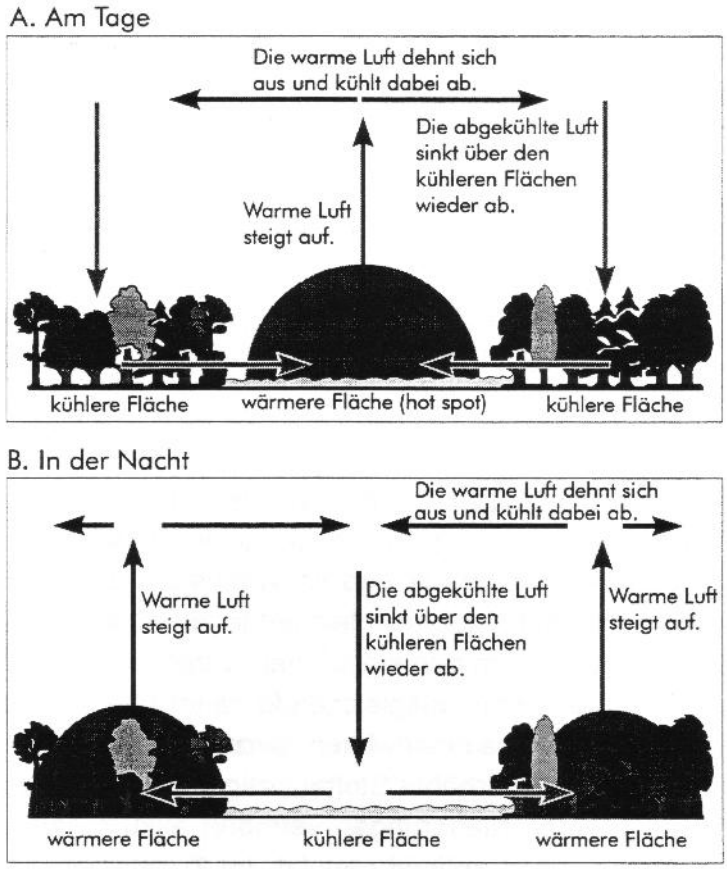


Abb. 5: Warm- und Kaltluftströme können energetische Potentiale in der Landschaft ausgleichen.

Importe (trockenerer) Warmluft und Exporte (feuchterer) Kaltluft als energiedissipative Prozesse am Tag führen in den Kühlflächen zu einer gesteigerten Transpiration. Die Bodenwechselfeuchte ist erhöht und damit auch die Mineralisation organischer Substanz; Stoffausträge werden vorbereitet. Die Luftdruckunterschiede werden mit zunehmender Weiterentwicklung einer ZKS weitgehendst minimiert.

► Erwärmung und Abkühlung des gespeicherten Wassers
Durch die hohe Wärmekapazität des in der lebenden und toten Biomasse gespeicherten Wassers wird ebenfalls Energie zeitlich verschoben und damit dissipiert. Ein feuchter Wald erwärmt sich wesentlich langsamer als ein Trockenrasen; dafür kühlt der Wald in der Nacht auch wesentlich langsamer aus.

Da die ZKS funktional verstanden wird, kann sie in verschiedener Form und Dimension realisiert sein (vgl. Abb. 6):

► Als Biofilm mit Algen (Produzenten), Rotatorien, Crustaceen (Konsumenten), Detritus, Bakterien (Destruenten) und Wasser, hier sogar als umgebendes Element.

► Als Aufwuchs auf einer Oberfläche mit Flechten und Moosen (Produzenten), Käfern und Spinnen (Konsumenten), abgestorbenen Pflanzenteilen (Detritus) und Bakterien/Pilzen (Destruenten) sowie mit dem Wasser.

► Als Hochmoor mit Sphagnen (Produzenten und Detritus), einigen Laufkäfern (Konsumenten), Bakterien (Destruenten) und Wasser.

► Als perenne Pflanze, wie die Buche (Produzent) mit Buchenspringrüssler (Konsument), Streu (Detritus), Destruenten und Wasser.

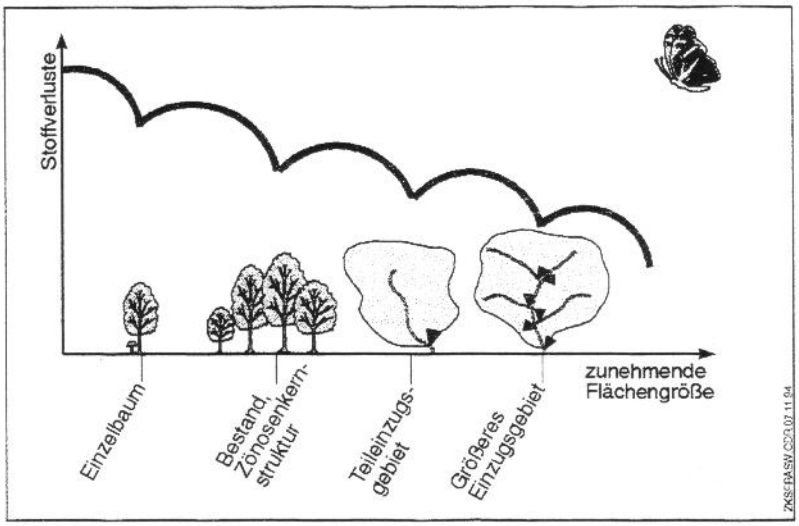


Abb. 6: Die ZKS als fraktale Struktur.

Die Stoffverlustarmut wächst mit zunehmend rückgekoppeltem Zusammenwirken sowohl der einzelnen Elemente einer ZKS als auch verschiedener ZKSen in größeren Einheiten. Beispielsweise werden in einem Wald durch das Nebeneinander absterbender und im Wachstum befindlicher Bäume die Verluste mit dem Wasserfluß gering gehalten (sich ausgleichende zeitliche Phasen). Ergänzend hierzu ist das Vorkommen unterschiedlicher, sich den kleinräumig variierenden Standortbedingungen anpassender Baumarten zu nennen (sich ausgleichende räumliche Phasen). Dieses phasenverschobene und daher verlustarme Zusammenwirken setzt sich auf übergeordneter Ebene zwischen den verschiedenen ZKSen fort. Erhöhte Stoffausträge mit dem Wasserfluß in Hanglagen werden z.B. in den nachgeordneten Niederungen vermehrt akkumuliert und durch die sich dort entwickelnde produktivere Vegetation optimal genutzt. Im Zusammenwirken immer größerer Einheiten (Einzelbaum, Wald, Einzugsgebiet etc.) werden dadurch irreversible

Flächenausträge in die Fließgewässer und von dort aus zur globalen Senke Meer minimiert (Abb. 6).

B.2.2. Wirkungsgrad energiedissipativer Strukturen

Den besten Wirkungsgrad hat die Struktur, die unter Erhalt ihrer stofflichen Voraussetzungen (begrenzt vorhandene Nährstoffe und Puffersubstanzen ihres Standortes) den Energiepuls am vollständigsten dämpft. Nur eine verlustarme Energieflußdichteabsenkung gewährleistet das dauerhafte Bestehen der Struktur. Eine Bestimmung des Wirkungsgrades setzt die Betrachtung eines sinnvoll abgegrenzten zeit-räumlichen Intervalls voraus (raum-zeitliche Systemabgrenzung).

Die Bestimmung des Anteils der Stoffverluste gegenüber den Kreisprozessen erfordert zum einem die Betrachtung weitgehend *geschlossener räumlicher Systeme*. Wassereinzugsgebiete besitzen über den gerichteten Wasser- und daran gebundenen Stofftransport, ausgehend von der Gebietskante hin zu den Fließgewässern als den tiefsten Punkten einer Landschaft, eine relative Abgeschlossenheit der Stoffflüsse zur Umgebung. Zwar findet auf dem Luftweg ein ständiger Stofftransport zu und aus der Fläche statt, doch ist er gegenüber den Transporten mit dem abfließenden Wasser vernachlässigbar gering. Wassereinzugsgebiete bilden daher eine sinnvoll räumlich abgrenzbare, dissipative Struktureinheit. Ihr Wirkungsgrad läßt sich über die Austräge gelösten Materials in die Fließgewässer bestimmen (Ripl & Hildmann 1995, i.p.).

Zur Wirkungsgradbestimmung energiedissipativer Strukturen sind zum anderen möglichst *geschlossene zeitliche Intervalle* zu betrachten. Sie richten sich nach den in der Natur vorgegebenen Frequenzen, innerhalb denen der Dissipationsprozeß betrieben wird (z.B. Tages-, Jahreszyklus).

Bemessen läßt sich der Wirkungsgrad neben der Schwankung der täglichen Temperaturamplitude auch über das Verhältnis der im Kreislauf geführten Stoffe gegenüber den Verlusten[4]. Rückschlüsse sind außerdem auf der Grundlage der Niederschlags- und Abflußvarianz möglich (Kap. B.3 und D.3.1).

B.2.3. Die Steigerung des Wirkungsgrades (Selbstoptimierung) als thermodynamische Notwendigkeit

Solange die Energie nicht vollständig an Ort und Stelle in Kreisprozessen dissipiert wird, bleibt ein Restpotential erhalten. Dessen Abbau in der Landschaft führt zu Stoffflüssen (Abb. 7). Die transportierten Stoffe, wie Nährstoffe und Basen, gehen dem System - bei Zugrundelegung der raum-zeitlich definierten Systemgrenzen (s.o.) - irreversibel verloren. Sie führen zur Systemdestabilisierung, da den Pflanzen die stoffliche Grundlage ihrer Existenz zunehmend entzogen wird. Die Basen (Ca, K, Mg etc.) sind als Puffersubstanz für Bodenprozesse (z.B. Neutralisierung von Respirationskohlensäure) und als Pflanzeninhaltsstoffe (vgl. Ebermayer 1876) stoffliche Voraussetzung für das Pflanzenwachstum.

Durch den Prozeß der Selbstorganisation (Selbststrukturierung) nähert sich das ungestörte System dem Zustand geringster Energieflußdichte. Dies geschieht, da dann die Energie nicht nur am

4 Stoffflüsse lassen sich in Protonen- bzw. Ladungsäquivalenten ausdrücken, worüber sich der Wirkungsgrad energiedissipativer Strukturen in folgender Formel beschreiben läßt (Ripl & Hildmann 1995, i.p.):
$W = (M_u - M_v)/M_u$
mit: W = Wirkungsgrad, M_u = Stoffumsatz insgesamt, M_v = Verluste.

weitestgehendsten in Kreisprozessen dissipiert wird, sondern auch die geringsten stofflichen Verluste auftreten. Das System funktioniert damit nachhaltiger und ist durch seine Langlebigkeit bei ausreichender Beobachtungsdauer wahrscheinlicher als ein verlustreicheres anzutreffen. Deshalb besitzt jedes energiedissipative System innerhalb seiner raum-zeitlichen Grenzen die systemimmanente Eigenschaft, nach Dauerhaftigkeit bzw. Langlebigkeit zu streben.

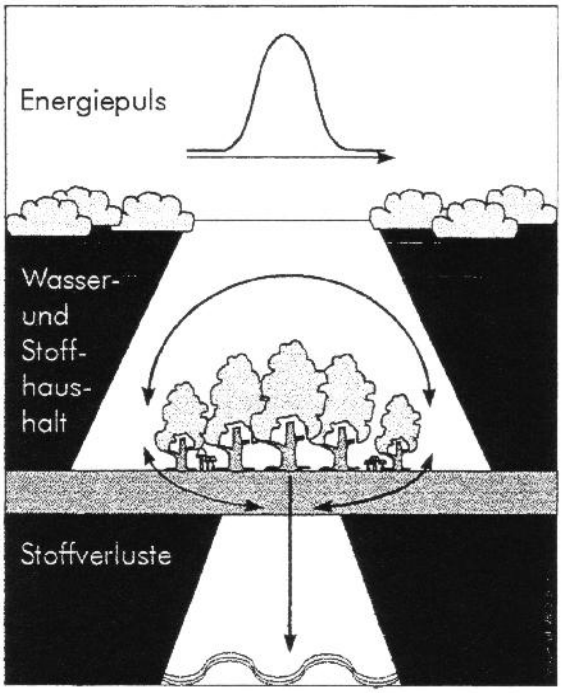


Abb. 7: Projektion des Energiepulses in die Landschaft.

Sukzession als thermodynamische Notwendigkeit

Aus dem Prinzip der Minimierung der Energieflußdichte ergibt sich auch die Sukzession als thermodynamische Notwendigkeit. Durch sie verbessert sich der Wirkungsgrad einzelner ZKSen, sichtbar z.B. in einem lichten Birkenwald, in dem einige Eichen zusätzlich aufwachsen. Das Strukturierungspotential und die Sukzessionsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Differenz zwischen maximal nutzbarem Energiepotential und aktueller Nutzung:

In einer Phase geringen Wirkungsgrades, d.h. zu Beginn der Sukzession, können sich die angesiedelten Pflanzen ungehindert ausbreiten. Es kommt noch zu keiner Interaktion zwischen ihnen (*Etablierungsphase*). Die Auswahl der sich ansiedelnden Pflanzenarten hängt von deren Verbreitungsmechanismen und dem Standort ab. Sie beinhaltet einen noch entsprechend großen Zufallsanteil; das Artenspektrum weist eine hohe Varianz auf (hohe Artenzahl). Die Stoffkreisläufe sind noch nicht geschlossen; längst nicht alle zur Verfügung stehende Energie wird an Ort und Stelle dissipiert.

Ist der Raum vollständig mit Vegetation besetzt (einsetzende "Raumlimitierung"), kann der Wirkungsgrad der Strukturen nur noch durch zunehmend phasengerechteres Zusammenwirken der Organismen unter weitgehendem Schließen der Stoffkreisläufe gesteigert werden (*Optimierungsphase*). Arten, die dazu beitragen, werden positiv selektiert, andere fallen aus. Mit zunehmend verlustarmer Energiedissipation innerhalb der ZKS steigt daher deren Struktur- und Prozeßstabilität, sichtbar in der gegenüber der Etablierungsphase geringeren Artenvarianz. Außerdem verändert sich mit Eintreten der Raumlimitierung das Artenspektrum von r-Strategen zur K-Strategie.

Der Grad der Selbstorganisation ist unter gegebenen und sich rückgekoppelt verändernden Bedingungen somit die treibende Kraft (Potential) für Sukzession und Evolution. Dabei setzen Sukzession und Evolution nicht an der einzelnen Art an (*survival of the fittest*), sondern an deren Vergesellschaftung in der ZKS. In diesem Selbststrukturierungsprozeß gehen erst bei zunehmender Raumlimitierung die Stoffverluste in der ZKS aufgrund der Notwendigkeit von enger geschlosseneren Stoffkreisläufen nennenswert zurück (Abb. 8).

Sukzessionspotential im Klimax (Evolution)

Ein optimiertes Ökosystem weist keine Nettoprimärproduktivität (NPP) mehr auf. Der Stoffhaushalt nettoproduktiver Systeme ist um den Betrag der Nettoproduktivität nicht in Kreisprozessen angeordnet: Um die für das Wachstum notwendigen Basen zu lösen, senkt die Vegetation den pH-Wert an der Wurzel entsprechend ab. Transportprozesse durch versickerndes Nieder-

schlagswasser führen dann zu Stoffverlusten. Die ZKS weist als sich selbst organisierende Struktur die Eigenschaft auf, diese Verluste zu minimieren. Grundlage dabei bildet eine zunehmend "phasengerechte" Steuerung der Abbauprozesse durch Einflußnahme auf die Wechselfeuchte im Detritus (Kap. B.3). Über längere Zeit nettoproduktiv sind nur solche Systeme, denen ständig Biomasse entzogen wird (z.B. ein Acker oder eine Weide).

Lebende Organismen weisen immer ein expansives Element auf (Reproduktion). Im Klimax (NPP -> 0) ist eine über die aufgebaute Biomasse hinausgehende Expansion nicht mehr möglich, so daß Wachstum nur über die Bruttoprimärproduktion (BPP) als Austausch einzelner Individuen möglich ist. Ein System, in dem die BPP -> 0 ist, ist tot. Als optimal muß daher ein Klimaxsystem gelten, das die Bedingungen "NPP -> 0 bei BPP -> max" erfüllt. Dies ist gleichbedeutend mit den Kriterien Stoffverlustfreiheit (Entropie -> 0) und maximalem Wirkungsgrad. Damit erklärt sich auch ein Sukzessionspotential in Klimaxgesellschaften, das letztlich zur Bildung neuer Arten führt (Evolution), da sich die Zönosen durchsetzen, die diese Bedingungen weitestgehend erfüllen.

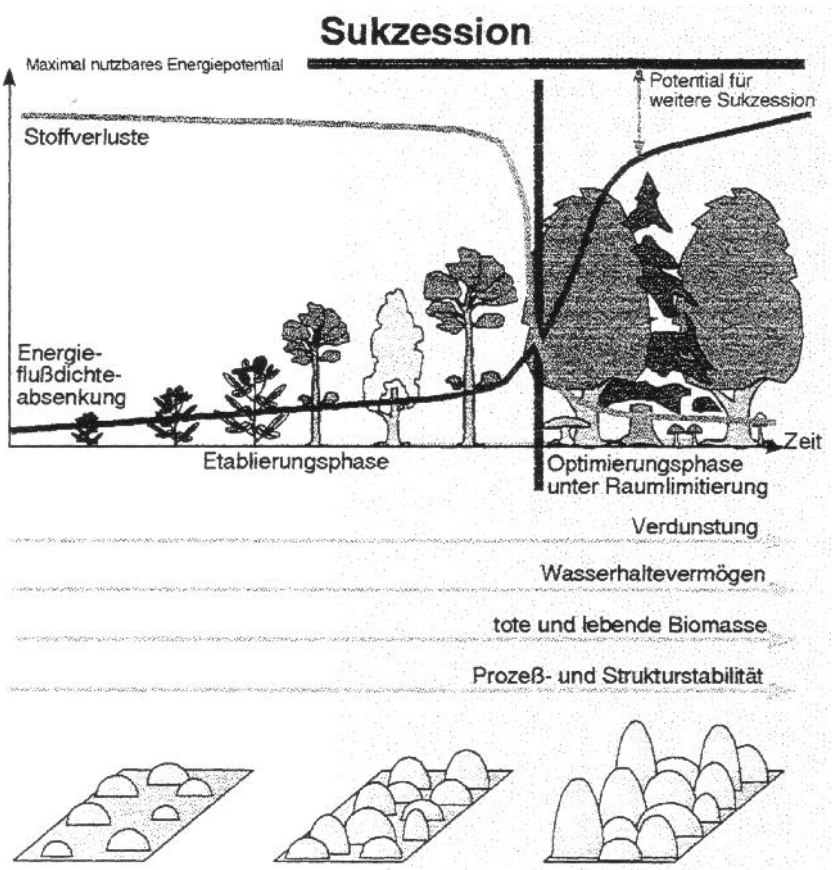


Abb. 8: Veränderung von Stoffverlusten während der Sukzession.

An dieser Stelle sei nochmals die besondere Rolle der Konsumenten bei Maximierung der BPP und damit des Wirkungsgrades einer ZKS im Klimax genannt (Kap. B.2.1). Durch Bewirtschaftung der übrigen Organismen halten sie beständige Zuwachsphasen aufrecht und heben dadurch die Raumlimitierung zeit-räumlich begrenzt auf.

Die Selbstorganisation natürlicher Systeme, sichtbar in den Prozessen von Sukzession und Evolution, funktioniert somit auf Grundlage eines gepulsten (strukturierten) Energieangebotes und vorhandener Raumlimitierung. Unter diesen Randbedingung werden diejenigen Elemente positiv selektiert, deren Zusammenwirken zu einem gleichmäßigeren Energiefluß bei zurückgehenden stofflichen Verlusten und damit zu größerer Stabilität des Systems führt.

B.3. Der Selbstoptimierungsprozeß als Entwicklung des Wasser- und Stoffhaushaltes in Richtung erhöhter Nachhaltigkeit

Die Wirkungsgraderhöhung einer ZKS erfolgt durch aktive Rückwirkung auf den Wasserhaushalt ihres Standortes (z.B. durch Akkumulation von Laubstreu oder Humus). Einzugsgebiete als dissipative Struktureinheit weisen daher im Rahmen des Selbstoptimierungsprozesses eine Änderung in ihrem Wasserhaushalt auf. Diese Änderung bezieht sich auf das Niederschlags- und Abflußverhalten sowie verbunden damit auch auf das Ausmaß wechselfeuchter Phasen im Boden. In engem Zusammenhang dazu stehen die Austräge gelöster Stoffe in Richtung der Fließgewässer. Die Änderung der Niederschlags- und Abflußvarianz sowie der daran gekoppelten Stoffverluste im Selbstoptimierungsprozeß auf Ebene des Einzugsgebietes werden im folgenden beschrieben.

B.3.1. Dynamik in Wasser- und Stoffhaushalt bei geringem Wirkungsgrad der Strukturen

Beispiel für eine Phase geringen Wirkungsgrades der Strukturen ist das spärliche Vegetationsvorkommen am Ende einer Eiszeit. Durch die unvollständige Dämpfung des Energiepulses in weiten Teilen der Fläche bestehen räumliche Temperaturgradienten zu besser gekühlten, entfernteren Bereichen. Ihr Ausgleich über eine entsprechend großräumige Zirkulation des Wassers und nachgeordnet der Atmosphäre geht mit einer hohen Dynamik im Wasser- und Stoffhaushalt der Landschaft einher.

Varianz der Niederschläge
Gegenüber Einzugsgebieten mit großflächigen, intakten Wald- und Feuchtgebieten sind Kondensationsprozesse zufälliger: Infolge der unzureichenden "Kühlung" des Großteils der Fläche treten Niederschläge unregelmäßiger und mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit als Starkregenereignisse auf. Sie besitzen somit eine erhöhte Varianz in ihrer zeit-räumlichen Verteilung und Intensität (vgl. Kap. F.1.2.1).

Gleichzeitig sind die Niederschläge durch das geringe Wasserspeicher- und -verdunstungsvermögen der ZKSen vermehrt abflußwirksam. Ober- und unterirdisch fließt das Regenwasser beschleunigt auf dem Weg des geringsten Widerstandes zu den Fließgewässern als den tiefsten Punkten einer Landschaft. Die hohe Abflußwirksamkeit der Niederschläge (meßbar als erhöhter Abflußbeiwert[5]) und ihre unregelmäßige Verteilung haben eine beschleunigte und häufigere Austrocknung der Fläche zwischen den Regenereignissen zur Folge. In Zeiträumen erhöhter Wechselwirkung zwischen Sonne und Erde steht daher nur unzureichend Wasser für dissipative Verdunstungs- und Kondensationszyklen zur Verfügung. Die unvollständige Umsetzung des Energiepulses hält hohe Wärmeströme sowohl im Boden als auch auf dem Luftweg aufrecht. Prozesse der Stofffreisetzung (physikalische, chemische und biochemische Verwitterung) sind dadurch begünstigt.

Räumliche Differenzen im Wasser- und Stoffhaushalt
Der Anstieg der Stofffreisetzung einerseits sowie erhöhte Abflußwirksamkeit der Niederschläge andererseits begünstigen Stoffverlagerungen mit dem Oberflächen- und dem Schichtenwasserabfluß. Rückgekoppelt an die Geomorphologie kommt es dadurch zur "hydromorphen Strukturierung" der Einzugsgebietsfläche. Sowohl in Abhängigkeit des Geländereliefs (Unterschiede im

5 Der Abflußbeiwert beschreibt den Abflußanteil des Gesamtniederschlages, bezogen auf einen Monats- oder Jahreszeitraum.

Gefälle) als auch der Bodenbeschaffenheit (Unterschiede in der Wasserdurchlässigkeit) unterliegt das abfließende Wasser Beschleunigungen und Verzögerungen. Sie bewirken in Fließrichtung die Sortierung fester und gelöster Stoffe, weshalb deren Normalverteilung in der Landschaft nicht anzutreffen ist:

- Das oberflächlich abfließende Wasser erodiert bei seiner Beschleunigung den Oberboden. Das Material wird entsprechend seiner Größe und Form bei Verzögerung des Wassers wieder abgelagert. Dieser Prozeß, der auch über das Sickerwasser mit feinpartikulärem Material stattfindet, führt in Fließrichtung zu einer Korngrößensortierung.

- Bei dem im Boden versickernden Wasser steigt mit seiner Verzögerung an den Partikeloberflächen die Beschleunigung seiner Moleküle. Dadurch erhöht sich der Säurecharakter des Wassers, d.h. seine Fähigkeit zur Stofflösung[6]. Mit der Verzögerung des Wassers in tieferen Bodenschichten werden die in Lösung befindlichen Stoffe vermehrt wieder ausgefällt. Stauschichten, wie z.B. Ortstein, sind sichtbares Ergebnis der hydromorphen Strukturierung über das Sickerwasser. Sie setzen die vertikale Wasserbewegung im Boden herab. Auf grundwasserfernen Standorten mit geringerer Hangneigung verbessern Stauschichten die Wasserversorgung des Oberbodens zwischen den Niederschlagsereignissen.

- Auch durch die in dieser Phase der Landschaftsentwicklung nettoproduktive Vegetation wird der Protonenumsatz im Boden erhöht, die Stofflösung und -verlagerung mit dem Sickerwasserabfluß somit begünstigt: Da ein nährstoffreicher Detritus noch fehlt, sind die Stoffkreisläufe weitgehend ungeschlossen. Zur Nährstoffgewinnung gibt die Vegetation H^+-Ionen aus der Wasserspaltung bei der Photosynthese ab. Ein weiterer Prozeß zur Nährstoffgewinnung stellt der Abbau von Wurzelmasse, d.h. energiereiche Substanz mit hohem Phosphor-, Stickstoff- und Schwefelgehalt dar. Die dabei entstehenden Starksäuren werden, solange der Boden noch puffernde Basen enthält, zu Bikarbonaten, Sulfaten und Nitraten umgebildet. Diese werden nach der nächsten Benetzungsphase räumlich verlagert. Aufgrund des geringen Anteils von verdunstendem zu versickerndem Niederschlagswasser wird auf diese Weise die irreversible Verlagerung des Großteils der freigesetzten Basen in tiefere Bodenschichten begünstigt.

Innerhalb dieses vom Wasserkreislauf in Wechselwirkung mit der Geomorphologie gesteuerten Strukturierungsprozesses kommt es zu einer zunehmenden Standortdifferenzierung bezüglich des Wasser- und Stoffhaushaltes (Abb. 9):

In den gefällereicheren Hanglagen dominieren aufgrund der beschleunigteren Wasserbewegung Austräge fester und gelöster Stoffe mit dem Oberflächen- und dem Bodenwasserabfluß (vergrößertes hydraulisches Potential).

Unter der rascheren ober- und unterirdischen Entwässerung der gefällereicheren Einzugsgebietslagen liegt dort eine vergrößerte Amplitude im Grund- und Schichtenwasserabfluß vor. Der Boden trocknet gegenüber den flacheren Lagen kurzfristiger nach Niederschlagsereignissen wieder aus. Intensivere Wechselfeuchte und Bodenerwärmung/-abkühlung begünstigen die biologisch stark beeinflußte Mineralisation und physikalische Verwitterung. Niederschlagsabhängig werden

6 Die Säureeigenschaft des Wassers beruht auf seinem Dissoziationsvermögen (Protonendichte von 10^{-7}mol/l/20°C). Die Dissoziation des Wassers steigt mit seiner Temperatur oder der Beschleunigung seiner Moleküle infolge von Abbremsung an festen Partikeloberflächen. Konstante Temperatur und Fließgeschwindigkeit minimieren die Reaktivität des Wassers; sie erhöht sich entsprechend mit zunehmender Schwankung in Temperatur- und Bodenwasserhaushalt (Ripl & Hildmann 1995, i.p.).

die freigesetzten Stoffe mobilisiert. Neben Verlagerungen feinpartikulären Materials (z.B. Tonminerale) finden vermehrt Auswaschungen gelöster Pflanzennährstoffe statt. Von besonderer Bedeutung sind dabei die pflanzennotwendigen Basen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium. Mit ihrem Transport in tiefere, undurchschaubare Bodenschichten bzw. Richtung Vorflut erfolgt eine permanente Reduzierung des pflanzenverfügbaren Vorrats. Aufgrund der irreversiblen Stoffverluste werden diese Teilbereiche eines Einzugsgebietes zunehmend nährstoffärmer. Sie werden aber auch trockener, da einerseits unter dem schwankenden Bodenwasserspiegel wasserspeichernde organische Substanz (z.B. abgestorbenes organisches Material, Humus) verstärkt mineralisiert wird, andererseits der Austrag feinpartikulären Materials das Wasserrückhaltevermögen des Bodens zusätzlich verringert.

In den gefälleärmeren Hanglagen und insbesondere den nachfolgenden Niederungen überwiegt aufgrund der verzögerten Wasserbewegung die Akkumulation des gelösten und feinpartikulären Transportmaterials (Ton, Schluff). Mit der dadurch zunehmend herabgesetzten Bewegung des Wassers im Boden erhöht sich dessen Rückhalt in diesen Flächen (Rückgang der Wasserleitfähigkeit). Sie werden daher gegenüber den oberen Einzugsgebietslagen nicht nur nährstoffreicher, sondern auch feuchter. Niederschläge können zu immer größeren Anteilen gespeichert werden und verlängern die Feuchtphasen des Bodens. Mit den gegenüber den höheren Standorten zurückgehenden Schwankungen im Bodenwasserhaushalt (verringerte Wechselfeuchte) liegt eine geringere Prozeßintensität in der Stofffreisetzung und -mobilisation vor.

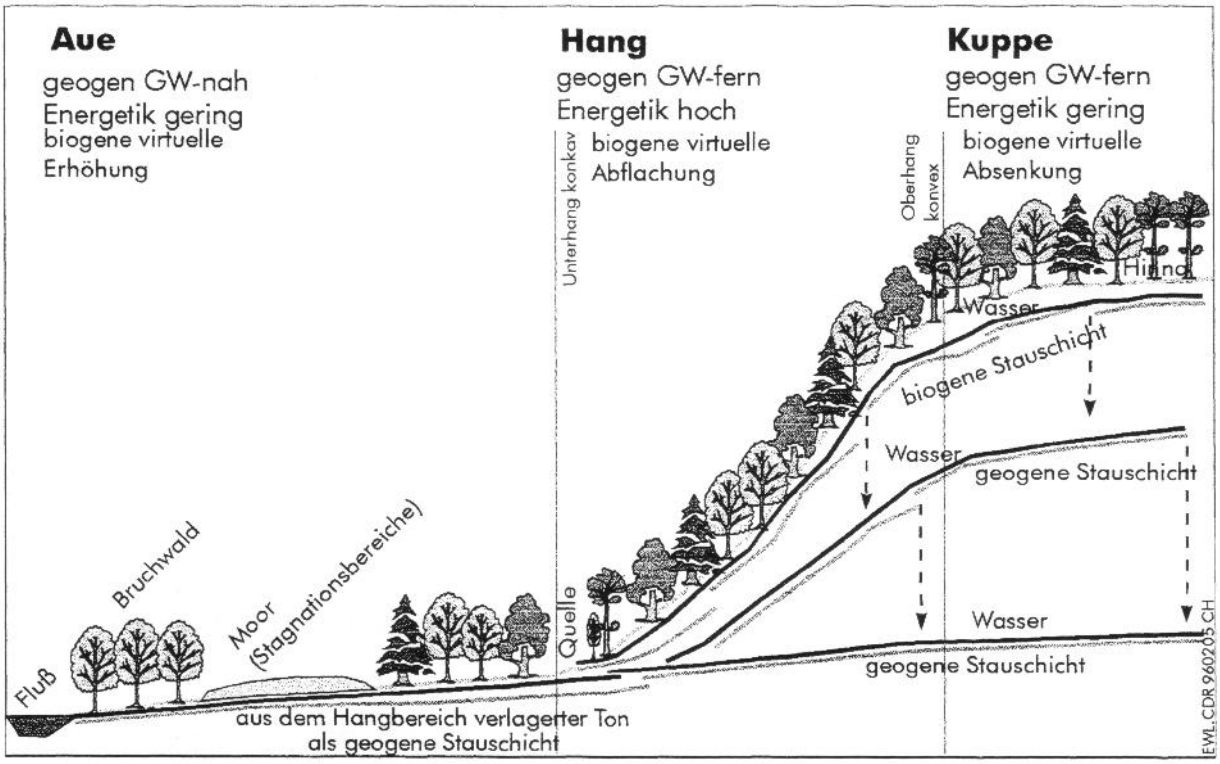


Abb. 9: Die Energetisch-Wasserhaushaltliche Logik der Landschaft (EWL).

Der dynamische Wasserhaushalt des Einzugsgebietes, charakterisiert durch eine hohe Niederschlags- und Abflußvarianz, geht somit mit einer hohen morphologischen Dynamik einher. Stets entwickeln sich dabei jedoch Strukturen, bei denen eine maximale Verlangsamung des Stofftransportes gegenüber der Wasserbewegung vorliegt (vgl. Stoffakkumulation in Niederungen, Senken). Der sich dadurch verbessernde Wasserrückhalt dieser Räume ermöglicht auch bei längeren Trockenperioden noch Verdunstungsprozesse. Als besser gekühlte Teilflächen im Einzugsgebiet steigt hier die Kondensationswahrscheinlichkeit. Die nur lokale Erhöhung des

Wasseranteils in kurzgeschlossenen Zyklen sowie der Wasserspeicherung im Boden besitzen jedoch noch kaum ausgleichende Wirkung auf das Abflußverhalten des Einzugsgebietes. Die erhöhte Temperaturschwankung aufgrund des geringen Wirkungsgrades der Strukturen in weiten Teilen der Fläche hält eine hohe Varianz im Niederschlagsverhalten aufrecht.

Varianz der Abflüsse

Gebunden an die Schwankungen der Niederschlagsverteilung liegt eine große Abflußvarianz vor. Sie spiegelt sich in charakteristischer Weise in den jährlichen Extremwerten und der Ganglinie der Fließgewässerabflüsse wider:

- Unter der Unregelmäßigkeit der Niederschläge und ihrer hohen Abflußwirksamkeit tritt insbesondere in den Sommermonaten eine verstärkte Austrocknung des Bodens auf. Die zurückgehende Wasserspende an die Fließgewässer (zurückgehender Basisabfluß) bewirkt ausgeprägte Extreme in Ausmaß und Dauer sommerlicher Niedrigwasserführung (geringer Trockenwetterabfluß). Diese sind in den hauptsächlich vom Schichtenwasserabfluß gespeisten Fließgewässern der höheren Einzugsgebietslagen größer als bei grundwasserbeeinflußten Fließgewässern der Niederungen.

- Gleichzeitig führen unregelmäßige Verteilung und hohe Extreme der Niederschläge zu ausgeprägten niederschlagsabhängigen Abflußspitzen in den Fließgewässern. Hochwasserspitzen einerseits sowie Extreme in der Niedrigwasserführung andererseits sind als starke Schwankungen des Hydrographen (Abflußkurve) wahrnehmbar.

Abweichungen in der Dynamik des Wasser- und daran gebunden auch des Stoffhaushaltes zwischen Einzugsgebieten vergleichbarer Größe treten durch deren Unterschiede bzgl. Form, Gefälle und Bodenart auf. Diese Eigenschaften des Einzugsgebietes beeinflussen die Beschleunigung bzw. Verzögerung des abfließenden Wassers und damit die Intensität seiner Wechselwirkung mit dem Bodensubstrat. Vermehrt wirksam werden diese Eigenschaften mit abnehmendem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen, da dann der Anteil des beschleunigt ober- und unterirdisch abfließenden Niederschlagswassers gegenüber dem gespeicherten und rasch wieder verdunstenden erhöht ist.

Zusammenfassung

Bei geringem Wirkungsgrad der ZKSen eines Einzugsgebietes bestehen noch stärkere räumliche Temperaturgradienten zu kühleren Bereichen in der Landschaft. Verdunstung und Kondensation verringern die Gradienten und erfolgen vermehrt räumlich und zeitlich voneinander getrennt. Einher geht die verlängerte Zykluszeit des Wassers mit einer hohen Niederschlagsvarianz im Einzugsgebiet. Sequentielle Prozesse von Stoffab- und -aufbau und damit intensive Transporte mit dem Abfluß sind begünstigt.

Je unvollständiger der Energiepuls durch Verdunstung und Kondensation an Ort und Stelle gedämpft wird, desto mehr wird er durch Prozesse der Stofflösung und -verlagerung über das dynamische Medium Wasser wirksam. Auf Einzugsgebietsebene führt dies zur Entwicklung räumlicher Varianzen hinsichtlich Wasser- und Nährstoffversorgung: Lagen beschleunigter Wasserbewegung werden nährstoffärmer und trockener zugunsten Lagen verzögerter Wasserbewegung, deren Wasser- und Nährstoffversorgung ansteigt. Nur in einer solchen Phase der Landschaftsentwicklung können sich daher fruchtbare Niederungen und Niedermoore bilden. Die Veränderungsdynamik morphologischer und auch zönotischer Strukturen ist unter den beschleunigten Stofftransporten hoch.

Die über den gerichteten Wasserfluß der Einzugsgebietsfläche nachgeordneten Fließgewässer weisen rückgekoppelt an das Niederschlagsverhalten hohe Abflußvarianzen auf (ausgeprägte Extreme in der Hoch- und Niedrigwasserführung), Einträge fester und gelöster Stoffe sind maximiert. Durch die intensive Stofffreisetzung im Einzugsgebiet ist der Nährstoffeintrag in die Fließgewässer direkt an die Höhe und zeitliche Verteilung des Sickerwasserabflusses rückgekoppelt. Damit kann es zum einem im Sommer bei starken Niederschlagsereignissen zu vermehrtem Stoffeintrag in die Gewässer kommen. Zum anderen werden vom Herbst bis Frühjahr, dem Zeitraum erhöhter Abflußwirksamkeit der Niederschläge, mineralisierte Stoffe zeitverzögert mobilisiert und irreversibel in die Vorflut ausgewaschen.

Deutlich wird, daß der noch sehr dynamische Wasser- und Stoffhaushalt in Wechselwirkung mit der Geomorphologie stets zur Entwicklung von Strukturen mit verbessertem Wirkungsgrad führt (Stoff- und Wasserrückhalt in Niederungen und Senken). In diesen Einzugsgebietsbereichen kann durch die sich selbstoptimierenden ZKSen der Energiepuls gegenüber der übrigen Fläche zunehmend verlustarm gedämpft werden (BPP -> max, NPP -> min, Kap. B.2.3), weshalb sie erste Senken für die pflanzennotwendigen Basenstoffe in der Einzugsgebietsfläche darstellen. Dieser auch als Selbstoptimierung charakterisierbare Selbststrukturierungsprozeß der Landschaft wird jedoch heute weitgehend unterbunden. Neben den höher gelegenen ärmeren Standorten werden insbesondere die fruchtbaren Niederungen für eine intensive Agrar- und Forstwirtschaft genutzt. Dadurch ist die Vegetation in weiten Teilen der Einzugsgebietsfläche nettoproduktiv. Da ein ausreichender Detritus mit Säurepuffern in dieser Phase hoher Nettoproduktivität fehlt, sind die Stoffkreisläufe weitgehend ungeschlossen. Hohe Nettoproduktivität bei unzureichender Ausstattung mit Basen führt zu verstärkter Protonenabgabe der verbleibenden Vegetation, was als zeitweise Versauerung des Standortes meßbar ist. Der verstärkte Abbau organischer Substanz, z.B. durch die Entwässerung der Landschaft, senkt ebenfalls den pH des Bodenwassers ab und begünstigt dadurch Nährstoffauswaschungen. Zusätzlich wird Oxidationsenergie im Boden durch bestimmte Düngemaßnahmen, z.B. durch Wirtschaftsdünger oder Gülle, als Säure wirksam. Hierbei entstehen auch Starksäuren (Salpetersäure, Schwefelsäure). Der Energieeintrag durch die Bodenbearbeitung (z.B. Pflügen) führt zu einer starken Vergrößerung der Partikeloberfläche im Boden (Oberflächenenergie) und damit ebenfalls zu einer erhöhten Lösungskinetik sowie der Auswaschung der darin enthaltenen Basen.

B.3.2. Dynamik in Wasser- und Stoffhaushalt bei optimiertem Wirkungsgrad der Strukturen

Steuerung des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes durch die ZKS

Ausgehend von den feuchten, nährstoffreichen Niederungen und Gewässerrändern besiedeln die Organismen nach und nach auch die übrige Einzugsgebietsfläche. Über ihre Lebensprozesse (Kap. B.2.1) optimieren sie an Ort und Stelle die Dissipation des täglich wirksamen Energiepulses. Innerhalb dieser Entwicklung kommt der Vegetation durch Ausbildung wasserspeichernder organischer Bodenauflagen (Streu, Humus) sowie durch Transpiration besondere Bedeutung zu:

- In den feuchten Niederungen erhöhen Transpiration und Interzeption (direkte Verdunstung des Regenwassers von der Pflanzenoberfläche) den Anteil des für die Energiedissipation genutzten Boden- und Niederschlagswassers.

- Mit zunehmender Ausbreitung der Organismen in die trockeneren, höher gelegeneren Standorte werden diese mit einer wasserspeichernden Auflage aus Streu und Humus (Detritus) überzogen. Sie wirkt zusammen mit den Pflanzenwurzeln verzögernd auf die Wasserbe-

wegung im Boden zurück. Mit der früheren Abbremsung versickernder Niederschläge werden die in ihnen gelösten Stoffe nach einer kürzeren Transportstrecke wieder genutzt bzw. ausgefällt. Folge ist die Ausbildung oberflächennaher "biogener Stauschichten". Sie setzen die vertikale Wasserbewegung herab. Ähnliche Wirkung entfaltet die Verdichtung sich akkumulierender Laubstreu. Das versickernde Niederschlagswasser fließt daher nicht nur verzögerter, sondern auch zu immer größeren Anteilen in der durchwurzelten, oberflächennahen Auflageschicht ab. Dadurch wird es zu größeren Anteilen für die Vegetation verfügbar. Diese kann so den Energiepuls immer vollständiger durch Transpiration, Wachstum und Reproduktion umsetzen.

Diese Entwicklung ist mit einer zunehmend aktiven Einflußnahme der ZKS auf den Stoffhaushalt ihres Standortes verbunden:

► Durch das Wasserspeichervermögen der organischen Bodenauflage (Detritus) werden die Feuchtphasen des Bodens und darüber die Wasserversorgung der Vegetation zwischen Niederschlagsereignissen verlängert. Die hohe Wärmekapazität des gespeicherten Wassers und die vollständigere Dissipation des Energiepulses über die Organismen führen zu einer verringerten Schwankung der Bodentemperatur im Tagesverlauf (Kap. E.1). Folge der geringeren Bodenerwärmung bzw. -abkühlung ist eine herabgesetzte physikalische Verwitterung. Von Bedeutung für die Stofffreisetzung ist jedoch hauptsächlich die minimierte Wechselfeuchte. Sie führt zu einer verringerten Sauerstoffversorgung und damit zu einer Einschränkung der Mineralisierung (Respiration organischer Substanz). Statt dessen wird die Mineralisation immer mehr über die Vegetation verlustarm gesteuert. Durch Transpiration hält sie im dauerfeuchten Milieu des Streu- und Humuskörpers hauptsächlich im unmittelbaren Wurzelbereich einen Wasserstrom und damit wechselfeuchte Bedingungen aufrecht. Die dort freigesetzten und mit dem Sickerwasser verlagerten Nährstoffe können zum Großteil von der Pflanze aufgenommen werden. Auf- und Abbau sind somit räumlich und zeitlich enger gekoppelt ("*Parallelisierung der Prozesse*"). Das begrenzte Nährstoffangebot wird dadurch weitgehend erhalten.

  In dem annähernd nicht mehr nettoproduktiven, reifen System findet über die im Regenwasser gelöste Kohlensäure (pH-Wert des Regens ca. 5,6) ein geringer, aber kontinuierlicher Säureeintrag statt. Dieser Eintrag ist jedoch so gering, daß lediglich eine Leitfähigkeit von ca. 10 - 120 µS/cm zu erwarten wäre. Da das Wasser nur zu einem kleinen Teil durch den Boden perkoliert (s.u.), wird diese Säure auch nur zu einem kleinen Anteil wirksam. Gelöstes Bikarbonat fällt größtenteils dort aus, wo der Wasserfluß abgebremst wird. Seekreide und Quelltuffe sind wahrnehmbare Ergebnisse derartiger Prozesse.

► Zusammen mit dieser verlustärmeren, orts- und zeitangepaßteren Stofffreisetzung kommt es außerdem zu einer maximalen Verzögerung des Stofftransportes gegenüber dem Wasserfluß:

  Durch den vermehrt oberflächennahen, d.h. in der durchwurzelbaren organischen Streuauflage erfolgenden Abfluß, unterliegt das Wasser einer häufigeren Verdunstung und Kondensation. Dies hat neben einer Verzögerung des Abflusses zur Folge, daß die im Wasser gelösten pflanzennotwendigen Stoffe nach kleinräumigerer Verlagerungsstrecke in der Biomasse fixiert und so vor weiterer Auswaschung geschützt werden (vgl. Abb. 10).

  Mit zunehmender Entwicklung zönotischer Strukturen erfolgt auch der Oberflächenabfluß vermehrt verlustarm und verzögert. Er dominiert bei Wassersättigung der organischen Bodenauflage während Niederschlagsereignissen. Verlagerungen gelöster Stoffe finden dabei

kaum statt. Da der Oberflächenabfluß durch die vergrößerte Oberfläche der Vegetation kleinräumigen Verzögerungen unterliegt, ist auch die über ihn erfolgende Sortierung grobpartikulären Materials mit verkürzten Verlagerungsstrecken verbunden.

Räumliche Differenzen in Wasser- und Stoffhaushalt

Durch die Entwicklung des Wasser- und Nährstoffspeichers erfolgt in der Einzugsgebietsfläche eine weitgehende Abkopplung der Stofflösungs- und Transportprozesse vom mineralischen Untergrund. Die Dynamik im Bodenwasserhaushalt wird immer mehr in die durchwurzelte oberflächennahe Detritusauflage verlagert und in dieser verlustarm über die Vegetation gesteuert. Mit Entwicklung dieses "oikos" (Haus im Sinne des von der Vegetation eigenständig geschaffenen, bewirtschafteten Raumes) gehen räumliche Standortunterschiede bezüglich Wasser- und Stoffhaushalt in der Einzugsgebietsfläche zurück: Trockene Standorte werden durch die Akkumulation organischen Materials feuchter, nasse Standorte durch Transpiration trockener. Auf den nährstoffreicheren Standorten verringert sich durch die wasserspeichernde organische Bodenauflage in Verbindung mit der Transpiration (Steuerung der Wechselfeuchte im Boden) die Menge der über das Wasser mobilisierten Nährstoffe. Dieser Form der "Oligotrophierung" steht auf ärmeren Standorten aufgrund der Ausbildung wasser- und nährstoffspeichernder organischer Bodenauflagen eine "Eutrophierung" gegenüber. Dort führt die Ausbildung der aktiv von der Vegetation bewirtschafteten organischen Bodenauflage zur Erhöhung nicht nur des Wasser-, sondern auch des Nährstoffangebotes sowie der zirkulierenden Nährstoffmenge.

Auch Einflüsse des Einzugsgebietes bezüglich Form und Gefälle auf die Abflußdynamik gehen zurück. Im Sommer wird durch die Speicherung des Wassers in der organischen Bodenauflage sowie durch seine häufigere und kleinräumigere Zirkulation der Abfluß maximal verzögert. Form- und Gefälleeigenschaften werden daher weniger wirksam. Dies gilt in ähnlicher Weise bei erhöhten Abflüssen in den kühleren Jahreszeiten. Zwar steigen dann die Abflüsse, doch erfolgen sie durch die erhöhte Wasserspeicherung in der organischen Bodenauflage bis zur Wassersättigung der oberflächennahen Schichten ebenfalls maximal verzögert.

Varianz in Niederschlag und Abfluß

Die verbesserte Kühlung des gesamten Einzugsgebietes (z.B. durch intakte Wälder, Feuchtgebiete) erhöht dort die Kondensationswahrscheinlichkeit. Niederschläge treten daher regelmäßiger auf und verringern Ausmaß und Dauer sommerlicher Niedrigwasserführung. Der Rückgang in der Varianz der Niederschläge setzt sich mit immer vollständigerer Dämpfung der täglichen Temperaturamplitude fort. Rückgekoppelt daran liegt eine zunehmend gleichmäßigere Wasserspende an die Fließgewässer vor. Dies spiegelt sich in einer Dämpfung des Hydrographen (Abflußganglinie) wider:

- Im Sommer, dem Zeitraum maximierter Verdunstung über die Vegetation, führt die häufigere und kleinräumigere Umsetzung des Wassers in der Einzugsgebietsfläche zu einer dauerhafteren Wasserspende an die Fließgewässer. Ausgeprägte sommerliche Niedrigwasserführungen werden weniger wahrscheinlich.

- Auch Extreme in der Hochwasserführung mit einsetzender Schneeschmelze im Frühjahr gehen zurück. Dies beruht zum einem auf dem erhöhten Speichervermögen der organischen Auflageschicht bis zu deren Wassersättigung für das Schmelzwasser, zum anderen auf der verbesserten Temperaturdämpfung: In der kühlen Jahreszeit begünstigt die vergrößerte Oberfläche vegetationsbedeckter Standorte Kondensationsprozesse (Erwärmung), wodurch das

Auftreten von Bodenfrost weniger wahrscheinlich wird. Gerade dieser bewirkt in Zeiträumen einsetzender Schneeschmelze, insbesondere bei zusätzlichem Niederschlag, temporäre Abflußspitzen. Daneben kommt es auf vegetationsbedeckten Standorten zur langsameren Erwärmung der Fläche und damit zu einer allmählicheren Schneeschmelze. Zurückzuführen ist dies auf die verbesserte Kühlung der Fläche infolge von Interzeption (direkte Verdunstung der als Schnee auf der Vegetationsoberfläche gespeicherten Niederschläge). Die allmählichere Schmelze führt zur Verringerung der Hochwasserspitzen unter Verlängerung der Hochwasserführung.

Unter der Vergleichmäßigung des Flächenabflusses einerseits und der verringerten Nährstoffmobilisation im Einzugsgebiet andererseits weisen die Fließgewässer deutlichere, jahreszeitlich geprägte Muster in den Stoffeinträgen auf: Stoffeintragsmuster

- Im Sommer führt die Maximierung dissipativer Verdunstungs- und Kondensationszyklen in der Einzugsgebietsfläche zur Minimierung der Nährstoffeinträge in die Fließgewässer.

- Die Nährstoffeinträge steigen dagegen im Herbst bis zum Frühjahr aufgrund der dann vergrößerten Abflüsse an. Die Eintragshöhe ist jedoch gering, da parallelisierte Auf- und Abbauprozesse im Sommer die Stoffverlagerungen mit dem ansteigenden Abfluß in der kühleren Jahreszeit minimieren. Hinzu kommt, daß nach Wassersättigung der oberflächennahen Detritusschicht der verlustarme Oberflächenabfluß im Verhältnis zur Versickerung überwiegt.

Zusammenfassung

Mit zunehmendem Wirkungsgrad der ZKSen eines Einzugsgebietes verringern sich die räumlichen Temperaturgradienten. Mit der verbesserten Kühlung der Fläche erhöht sich dort die Kondensationswahrscheinlichkeit, Niederschläge treten somit häufiger auf. Anstelle großräumiger Kreisprozesse unterliegt das Wasser rückgekoppelt an den im Tag-Nacht-Rhythmus wirksamen Sonnenenergiepuls immer ortskonstanteren, kurzgeschlosseneren Zyklen. Diese dämpfen den zeitlichen Temperaturgradienten (Tag-Nacht-Temperaturunterschiede). Unter der verkürzten Zykluszeit des Wassers sind in der Einzugsgebietsfläche "parallelisierte" Prozesse von Stoffab- und -aufbau begünstigt, irreversible Verlagerungsprozesse in die Fließgewässer somit minimiert (Abb. 10).

Standortunterschiede bezüglich Wasser- und Stoffhaushalt des Einzugsgebietes gleichen sich mit zunehmender Entwicklung der Vegetation und der mit ihr vergesellschafteten Organismen aus (Rückgang räumlicher Varianzen). Auch Gefälleunterschiede sind bei Rückgang des beschleunigten Abflusses durch die kleinräumige Verdunstungs- und Kondensationszyklen sowie die Entwicklung des organischen Bodenwasserspeichers (Detritus) weniger wirksam.

Bildlich gesehen ist bei optimierter Temperaturdämpfung das zeitliche Energiemuster (jahreszeitlich geprägter Energiepuls) nahezu vollständig in eine räumliche Strukturierung umgesetzt (dissipativ wirkende Vegetation und mit ihr vergesellschaftete Organismen). Die Dynamik dieser Strukturen - ein aktiv betriebener Wasser- und Stofftransport - spiegelt sich in einer Vergleichmäßigung des Hydrographen sowie der Stoffeinträge in die Fließgewässer wider.

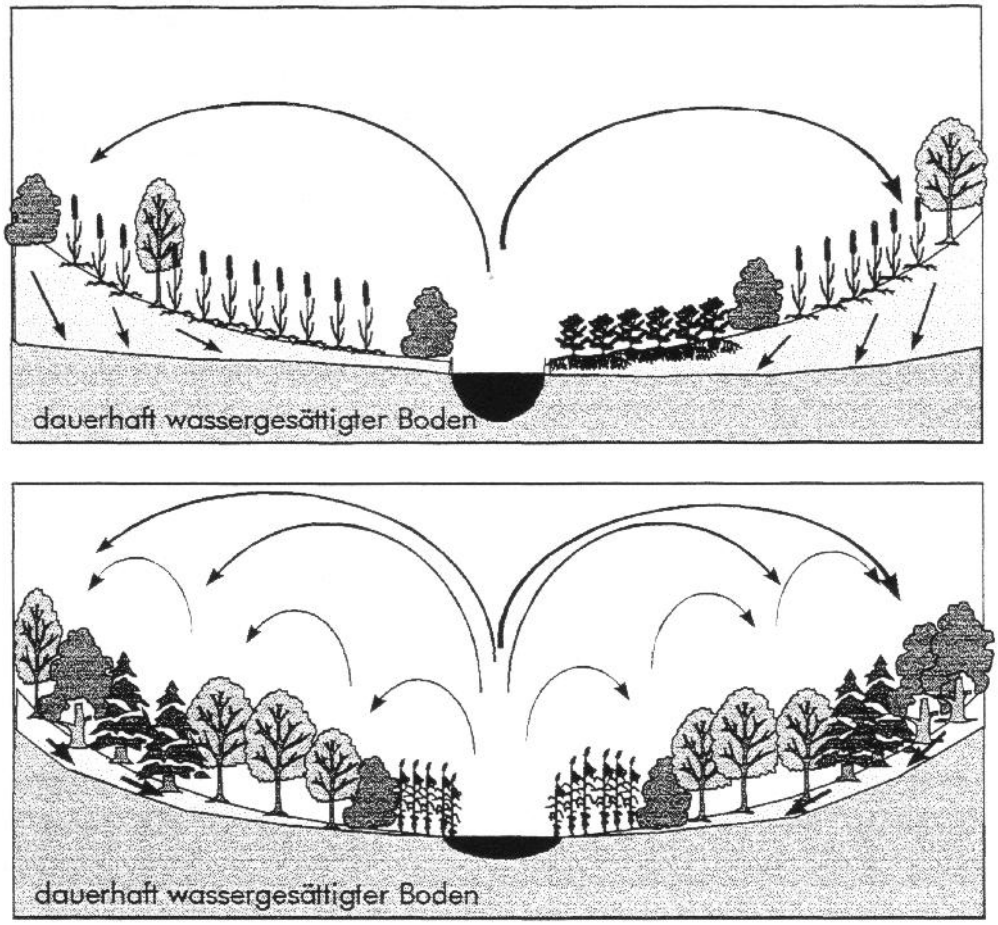


Abb. 10: Wasser- und Stoffkreislauf bei geringem und bei hohem Wirkungsgrad energiedissipativer Strukturen (oben bzw. unten).

B.4. Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässer - eine Entwicklung in Richtung maximaler Nachhaltigkeit

B.4.1. Die Morphologie

Fließgewässer bilden Sammelrinnen ober- und unterirdischer Abflüsse und der darüber transportierten Stoffe. Daher können sie nicht losgelöst vom Wasserhaushalt und den daran gebundenen Stoffhaushalt der sie umgebenden Einzugsgebietsfläche betrachtet werden. Sie spiegeln ihn vielmehr über ihre Abfluß- sowie die morphologische und biozönotische Strukturdynamik wider, stellen daher einen Indikator für den landschaftlichen Wirkungsgrad dar.

Im folgenden soll zunächst das Prinzip der Strukturbildung und -dynamik eines Fließgewässers beschrieben werden. Dabei wird verdeutlicht, daß die Wechselwirkung des Wassers mit der festen Materie (d.h. deren abflußabhängige Beschleunigung/Transport und Ablagerung bzw. Lösung, Transport und Ausfällung) stets morphologische Strukturen mit minimierter Dynamik zur Folge hat. Die Einnahme des stabilsten Zustandes unter der gegebenen Wasserbewegung ist Ergebnis energiedissipativer Prozesse zwischen Wasser und Substrat. Bei zurückgehenden Abflußschwankungen und Stoffeinträgen im raum-zeitlichen Strukturierungsprozeß des Einzugsgebietes durchlaufen daher auch die Fließgewässer eine gerichtete Entwicklung. Charakterisierbar ist diese durch eine zunehmende Verlangsamung des Materialtransports gegenüber der Wasserbewegung. Dadurch tragen Fließgewässer zur Verlustarmut der Landschaft bei.

B.4.1.1. Die Morphologie als energiedissipative Struktur

Triebfeder der morphologischen Dynamik nicht nur an Land, sondern auch im Fließgewässer bildet der im Tag-Nacht-Rhythmus wirksame Energiepuls. Er hält dissipative Verdunstungs- und Kondensationsprozesse und darüber einen ständigen Abfluß aufrecht. Durch die damit verbundenen Wechselwirkungen des Wassers mit der festen Materie setzt es die täglich wirksame Energie neben Verdunstung und Kondensation auch in Prozesse der räumlichen Strukturierung um. Wie im Einzugsgebiet[7] erfolgen diese auch im Fließgewässer räumlich und zeitlich nicht zufällig:

- An Orten und zu Zeiten beschleunigter Bewegung des Wassers führt seine Abbremsung an festen Grenzflächen zu einer geringfügigen Erhöhung seiner Temperatur, hauptsächlich aber zum Anstieg seiner Reaktivität (Dissoziationserhöhung/pH-Abfall). Verbunden damit steigt die Fähigkeit des Wassers zur Stofflösung[8]. Bei Verzögerung des Wassers, bedingt z.B. durch Aufweitung des Fließquerschnitts, sinkt seine Reaktivität. Eine vermehrte Ausfällung der in Lösung befindlichen Stoffe ist die Folge.

- Von entscheidenderer Bedeutung für die morphologische Strukturdynamik des Gerinnes jedoch ist der Transport von festen Stoffen. Mit der Abbremsung des Wassers an Festkörpern unterliegen diese in Abhängigkeit ihres Strömungswiderstandes einer Beschleunigung (Materialtransport, verbunden mit Materialabrieb bzw. Korrosion). Dort, wo das Wasser verzögert wird, lagert es die transportierten Stoffe nach Größe und Form sortiert wieder ab. Erosive und akkumulative Gewässerabschnitte sind das in der Struktur sichtbar werdende Ergebnis dieser Transporte.

Die Energie des fließenden Wassers beruht somit auf seiner Wechselwirkung mit der festen Materie (wechselseitige Beschleunigung/Verzögerung) und ist in der Dynamik morphologischer Strukturen wahrnehmbar: Bei Beschleunigung erodiert und löst das Wasser Stoffe, um sie bei Verzögerung wieder abzulagern bzw. auszufällen. Bildlich gesehen wird Energie aus einer Wechselwirkung über den Transport von Materie aufgenommen und räumlich sowie zeitlich phasenverschoben durch Ausfällung bzw. Akkumulation in eine räumliche Struktur umgesetzt (Energiedissipation bzw. Energieflußdichteabsenkung, vgl. Kap. B.1.1). Stets resultiert der energiedissipative Wechselwirkungsprozeß in der Einnahme des stabilsten Zustandes bzw. der stabilsten Lage der Materie bei gegebener Wasserbewegung. Eine maximale Verlangsamung des Stofftransportes gegenüber dem Wasserfluß ist die Folge.

Morphologische Vielfalt und Stabilität als sichtbares Ergebnis einer optimierten Energiedissipation

Bei nahezu unveränderter Abflußhöhe spiegelt sich der Prozeß der Energiedissipation in einer zunehmenden Vielfalt und Stabilität der Fließgewässermorphologie wider:

- Infolge der Materialsortierung entwickeln sich weitgehend stabile Widerstände im Gewässerbett. Bei deren Um- und Überströmen unterliegt das Wasser einer lokalen Beschleunigung und Verzögerung, wahrnehmbar als Erhöhung seiner Turbulenz. Verbunden damit kommt es im Gerinne zu einer häufigeren und kleinräumigeren Geschwindigkeitsänderung des Wassers (Abb. 11). Die engräumigeren Fließgeschwindigkeitsgradienten verkürzen die Verlagerungsstrecken im weiteren Sortierprozeß. Erkennbar werden sie neben einem dichteren Wechsel

7 Zum morphologischen Strukturierungsprozeß des Einzugsgebietes vgl. Kap. B.3.

8 Die Abbremsung des Wassers an der festen Grenzfläche führt zur Beschleunigung seiner Moleküle (meßbar als Temperatur-, hauptsächlich aber als Dissoziationsanstieg). Salzkristalle werden dadurch in einen beschleunigten Schwingungszustand versetzt, treten aus dem Gitterverband heraus und gehen in Lösung.

der Gewässertiefe und -breite auch in einer dichteren Abfolge unterschiedlicher Korngrößen im Partikelspektrum. Die Vielfalt morphologischer Strukturen steigt.

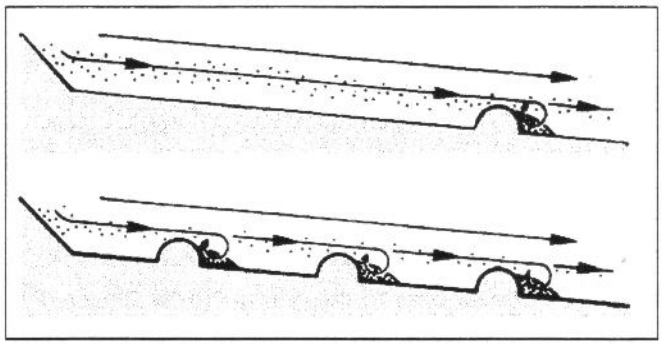


Abb. 11: Rückgang von Materialtransporten zugunsten der Turbulenz des Wassers bei der Selbststrukturierung des Gewässers.

► Bei unveränderter Abflußhöhe führt die fortschreitende Materialsortierung zur Maximierung weitgehend stabiler Strömungswiderstände. Großräumige Materialtransporte gehen somit immer mehr zugunsten kleinräumiger Wasserturbulenzen entlang der Oberflächen zurück. Einher geht die erhöhte Turbulenz des Wassers mit einem Anstieg seiner Temperatur und Dissoziation (Stofflösungsvermögen). Die über diese Entwicklung herabgesetzten Materialverlagerungen einerseits sowie die sich verkürzenden Verlagerungsstrecken andererseits verlangsamen zunehmend den Stofftransport gegenüber der Wasserbewegung. Sichtbares Ergebnis dieses energiedissipativen Strukturierungsprozesses ist daher neben einer hohen Vielfalt der Fließgewässermorphologie auch deren minimierte Dynamik.

Das Prinzip der Energiedissipation kann der Entwicklung sämtlicher Strukturen eines Fließgewässers zugrundegelegt werden. Dabei wiederholen sich die Strukturen in Abhängigkeit von Gefälle- und Substratverhältnissen sowie der Menge des abfließenden Wassers auf den verschiedensten räumlichen Ebenen in selbstähnlicher Form (fraktale Struktur):

Abb. 12: Fließgewässerstruktur und Energiedissipation. Angefangen von der Korngrößensortierung entlang eines Kiesels bis hin zur Insel- und Mäanderbildung beruhen sämtliche Fließgewässerstrukturen auf dem Prinzip der Energiedissipation: Abflußabhängige Beschleunigungen und Verzögerungen des Wassers stellen ein zeitliches Energiemuster dar. Dieses wird durch Materialtransporte in die weitgehend stabile räumliche Struktur des Gewässerbettes umgesetzt (Einnahme des stabilsten Zustandes der Materie bei gegebener Wasserbewegung). Immer kleinräumigere Beschleunigungen und Verzögerungen des Wassers entlang stabiler Oberflächen verlangsamen zunehmend den Stofftransport gegenüber der Wasserbewegung und optimieren den Wasserrückhalt im Gerinne.

Die Fließgewässerentwicklung in Richtung maximaler Strukturvielfalt und -stabilität kann auch als Prozeß der Selbstoptimierung bzw. Nachhaltigkeitssteigerung charakterisiert werden. Dieser ist jedoch nicht losgelöst von dem des zugehörigen Einzugsgebietes zu betrachten. Bei sich optimierendem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen (Kap. B.3) sinken Abflußschwankungen. Schwankungen im Abfluß werden als zeitliche Beschleunigung und Verzögerung des Wasserflusses wirksam und koppeln daher die Prozeßdynamik im Gerinne zurück: Hohe Abflußschwankungen gehen mit einer hohen morphologischen Strukturdynamik einher. Bei nur geringen Abflußschwankungen dagegen resultieren die Materialtransporte in einem zunehmend

hochstrukturierten Gewässer mit erhöhter morphologischer Stabilität. Hierauf soll im folgenden näher eingegangen werden.

B.4.1.2. Selbstoptimierungsprozeß bei geringem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen

Bei geringem Wirkungsgrad der ZKSen des Einzugsgebietes sind Stoffeinträge in die Fließgewässer sowie Schwankungen im Abfluß maximiert (hohe Abflußvarianz, Kap. B.3.1). Durch ausgeprägte Abflußspitzen bestehen in Abhängigkeit von Gefälle und Rauhigkeit des Sohlsubstrats große räumliche Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers. Durch die extremen Schwankungen im Abfluß sind außerdem ausgeprägte zeitliche Gradienten in der Fließgeschwindigkeit gegeben. Die unter diesen Randbedingungen stoffverlustreiche Energiedissipation im Fließgewässer spiegelt sich in charakteristischer Weise in den Gewässerbettstrukturen sowie deren Dynamik wider.

Stofftransporte bei der energiedissipativen Wechselwirkung zwischen Wasser und Substrat

In Zeiträumen mit extremen Abflußanstieg liegen rückgekoppelt an die Geomorphologie große räumliche Fließgeschwindigkeitsgradienten im Gerinne vor. Intensive und weiträumige Materialtransporte zur Verringerung der Gradienten sind begünstigt. Zeitgleich dominieren dadurch über weite Gewässerabschnitte hinweg Erosionsprozesse:

- In gefällereicheren Gewässerabschnitten dominiert bei einem Abflußanstieg die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit gegenüber der des benetzten Fließquerschnitts bzw. Wasserstandes. Mit der Beschleunigung des Wassers sinkt der Strömungswiderstand vorhandener Gewässerbettstrukturen. Ihre teilweise oder vollständige Erosion wird begünstigt.

- Weitgehend stabile Ablagerungen des im Gewässer erodierten und auch des eingeschwemmten Materials entwickeln sich hauptsächlich dort, wo bei einer Abflußerhöhung die Fließgeschwindigkeit zugunsten einer Vergrößerung des benetzten Fließquerschnitts zurückgeht. Beispiele solcher geomorphologisch beeinflußter Wasserverzögerung bilden nicht nur gefälleärmere Gewässerabschnitte, sondern auch Zusammenflüsse. In ihnen liegt ein im Verhältnis zu den einmündenden Einzelgerinnen verbreiterter Fließquerschnitt vor, was einer Gefälleminderung gleichkommt. Zusätzlich verzögert wird das Wasser durch seinen in diesen Abschnitten begünstigten Uferübertritt.

Abb. 13: Veränderungen des Rheinlaufs bei Karlsruhe bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts (aus: Endlich 1985).

Bei ausgeprägten Abflußspitzen unterliegt das Wasser somit einer großräumigen Beschleunigung und Verzögerung. Prozesse von Erosion und Akkumulation sind erhöht und erfolgen räumlich vermehrt voneinander getrennt (sequentiell). Der Stoffrückhalt im Fließgewässer ist minimiert.

Wahrnehmbar werden die temporär intensiven und weiträumigen Materialtransporte über die rasche morphologische Dynamik des Gerinnes:

- In den Bereichen beschleunigter Wasserbewegung spiegeln sich die Transporte je nach Ausmaß des Gefälles in einer vermehrten Tiefen- und Breitenerosion wider, einhergehend mit der Streckung oder auch Verlegung des Gewässerlaufs (Abb. 13).

- In den gefälleärmeren Bereichen mit Wasserverzögerung dominiert die Akkumulation des transportierten Materials, weshalb sie erste Stoffsenken im Fließgewässer darstellen. In der morphologischen Strukturdynamik sichtbar werden diese Prozesse durch Sohlaufhöhungen unter Verbreiterung des Fließquerschnitts, aber auch durch die Ausbildung natürlicher Uferdämme oder mächtiger Auelehmschichten in den Überflutungsbereichen (Abb. 14).

Funktional betrachtet resultieren die großräumigen Materialtransporte stets in Strukturen, bei denen der Stofftransport maximal gegenüber der Wasserbewegung verlangsamt ist (Prinzip der Dissipation, vgl. Kap. B.1.1). Erkennbar wird dies, wie vorausgehend beschrieben, durch die Entwicklung erster weitgehend stabiler Strukturen in den geomorphologisch beeinflußten Verzögerungsbereichen des Wassers. Gleichzeitig verringert die gefällemindernde Wirkung von Erosion und Akkumulation die räumlichen Fließgeschwindigkeitsgradienten und damit auch die Intensität der Materialtransporte in den Beschleunigungsbereichen.

Abb. 14: Natürliche Dämme und Flußaue in einer Tiefebene (aus: Endlich 1985).

<u>Der Wassertransport in Abhängigkeit der energiedissipativen Wechselwirkung zwischen Wasser und Substrat</u>

Großräumige Fließgeschwindigkeitsgradienten bei Abflußspitzen haben nicht nur einen geringeren Stoffrückhalt zur Folge. Vielmehr liegen in Zeiträumen mit großräumiger Beschleunigung des Wassers auch kurze Abflußzeiten zu den Hauptvorflutern der Niederungen vor. Der Wasserrückhalt im Gerinne ist minimiert. Rückgekoppelt an die hohe Abflußvarianz treten dadurch ausgeprägte Schwankungen des Wasserspiegels auf:

- In den gefällereicheren Lagen geht der beschleunigte Abfluß mit einem raschen und intensiven Wasserspiegelabfall zwischen Niederschlagsereignissen einher. Extrem geringe Wasserstände in der Mittel- und der Niedrigwasserführung sind dadurch wahrscheinlicher. Das Gewässer entfaltet dadurch eine entwässernde Wirkung auf seine Umgebung. Hohe Sickerwasserbewegungen lassen die angrenzende Landschaft kurzfristig nach Niederschlagsereignissen wieder austrocknen. Damit verbunden liegt eine hohe Wechselfeuchte des Bodens vor. Eine beschleunigte Nährstoffauswaschung und demzufolge rasche Nährstoffverarmung ist die Folge.

- Durch die Wasserbeschleunigung in den gefällereicheren Lagen werden in den flacheren Bereichen mit verzögerter Wasserbewegung schon bei geringem Abflußanstieg ausgeprägte Wasserstandserhöhungen begünstigt. Häufige Uferübertritte sind die Folge. Die Extreme in der Niedrigwasserführung sind jedoch gegenüber den gefällereicheren Lagen geringer, da es bei sinkendem Wasserspiegel zu einer Wasserspende aus den angrenzenden Überflutungsflächen kommt. In den entstehenden Flußauen dieser Lagen bilden sich durch den Feinsedimenteintrag über die Zeit hinweg mächtige Auelehmenschichten. Die feinkörnigen Hochwasserablagerungen aus Feinsand, Schluff und Ton setzen die Wasserleitfähigkeit des

Bodens herab und verlängern dadurch seine Feuchtphasen. Neben Feinsedimenten werden auch vermehrt Nährstoffe akkumuliert. Die Gewässerumgebung dieser Lagen wird somit nicht nur feuchter, sondern auch nährstoffreicher (vgl. Abb. 14).

Strukturstabilität und -vielfalt in Abhängigkeit der energiedissipativen Wechselwirkung

Infolge der hohen zeitlichen Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers unterliegen auch die Prozesse von Erosion und Akkumulation einer vermehrten zeitlichen Trennung. Dabei führt der häufige Wechsel zwischen Zeiträumen intensiver, weiträumiger Materialtransporte (Wasserbeschleunigung bei Abflußanstieg) mit solchen minimierter Materialtransporte (Wasserverzögerung bei Abflussrückgang) zu einer hohen morphologischen Dynamik im Gerinne. Sie spiegelt sich in dem geringen Strukturierungsgrad des Fließgewässers wider[9]:

Breiten-Tiefen-Varianz

Anhand des Wechsels der Gewässertiefe und -breite sind die Erosions- und Akkumulationszonen und darüber die Länge der Transportstrecken wahrnehmbar. Sie werden neben Untergrundbeschaffenheit, Gefälle und Größe des Gewässers entscheidend durch die Abflußschwankungen beeinflußt:

- Mit steigenden Extremen in den Abflußspitzen vergrößern sich die räumlichen Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers. Die Materialverlagerungsstrecken werden verlängert, d.h. Erosion und Akkumulation vermehrt räumlich voneinander getrennt. Verbunden damit ist ein Rückgang in der Breiten-Tiefen-Varianz sowohl im Längs- als auch im Querverlauf des Fließgewässers.

- Aufrechterhalten wird die geringe Breiten-Tiefen-Varianz durch die Extreme in der Niedrigwasserführung. Zugrunde liegt dem, daß mit Verzögerung des Wassers im gesamten Gerinnelängsverlauf auch seine Wechselwirkung mit den festen Oberflächen sinkt. Intensität und Verlagerungsstrecken im Materialtransport gehen zurück, der Strukturaufbau erfolgt entsprechend verlangsamt. Insbesondere in den gefälleärmeren Lagen, die gegenüber den steileren bei Abflußrückgang eine ausgeprägtere Fließgeschwindigkeitsverringerung aufweisen, umfaßt der minimierte Stofftransport hauptsächlich nur noch Feinmaterial. Die dabei entwickelten Strukturen stellen keine großen Strömungswiderstände dar und werden bei Abflußanstieg rasch wieder erodiert. Die Breiten-Tiefen-Varianz bleibt somit gering.

Partikelspektrum

Die Zusammensetzung des Partikelspektrums wird neben der Geomorphologie des Einzugsgebietes (Gefälle, Bodenart) ebenfalls entscheidend von der Abflußvarianz bestimmt. Hohe zeitliche und demzufolge auch räumliche Fließgeschwindigkeitsgradienten werden bei der Materialsortierung in der Homogenität des Partikelspektrums sichtbar:

- In Zeiträumen extremer Abflußspitzen bleibt in gefällereicheren Lagen durch die beschleunigte Wasserbewegung hauptsächlich gröberes Material zurück. Demgegenüber dominieren im Partikelspektrum der gefälleärmeren Gewässerabschnitte die feineren Stoffe. Mit ihrer vorwiegenden Sedimentation in diesen Wasserverzögerungsbereichen überdecken sie das dort vorhandene grobpartikulärere Material. Nur bei großräumigen Fließgeschwindigkeitsgradienten, einhergehend mit hohen (Fein-)Materialeinträgen aus der umgebenden Einzugsgebietsfläche, entstehen daher in diesen Gewässerabschnitten mächtige Lehm-

9 Eine entsprechende Strukturanalyse am Beispiel von drei Fließgewässern im Einzugsgebiet der Stör ist in Kap. D.2 beschrieben.

schichten in der Gewässersohle sowie in den Überflutungsräumen (Auelehm) oder herrschen organische Stoffe im Partikelspektrum vor.

► Aufrechterhalten wird die Homogenität des Partikelspektrums der gefälleärmeren Gewässerabschnitte durch ausgeprägte Niedrigwasserführungen. Die extreme Fließgeschwindigkeitsverringerung minimiert die Wechselwirkungen zwischen Wasser und Substrat. Zeitgleich findet dadurch weiträumig eine vermehrte Akkumulation des in der Transportphase befindlichen feineren Materials statt. Es überdeckt die bereits abgelagerten gröberen Partikel. Aufgrund fehlender kleinräumiger Fließgeschwindigkeitsgradienten im Gewässerbett (geringe Breiten-Tiefen-Varianz als Folge temporär großräumiger Wasserbeschleunigung und -verzögerung) bleibt es dominierend an der Oberfläche des Partikelspektrums. Ausgeprägte zeitliche Fließgeschwindigkeitsgradienten spiegeln sich somit weniger in einer horizontalen, als in einer vertikalen Korngrößensortierung wider. In den gefällereicheren Gewässerabschnitten allerdings geht die vertikale zugunsten der horizontalen Materialsortierung zurück. Aufgrund der dort beschleunigten Wasserbewegung liegen auch in Zeiträumen geringerer Abflußhöhe entlang stabilen Strömungswiderständen räumliche Gradienten in der Fließgeschwindigkeit vor. Eine fortschreitende Materialsortierung entlang dieser Gradienten ist die Folge (vgl. Abb. 15, 16).

Benetzter Fließquerschnitt (Strömungswiderstand) bei Hoch- und Niedrigwasser

Über den benetzten Umfang läßt sich der Strömungswiderstand[10] im Gewässerbett beschreiben. Seine Schwankung bei Hoch- und Niedrigwasser ermöglicht Rückschlüsse auf die Materialtransporte und darüber auf die räumlichen Fließgeschwindigkeitsgradienten im Gerinne:

► Hohe Schwankungen des Strömungswiderstandes zwischen Hoch- und Niedrigwasser liegen in Gewässern mit aufgeweiteten und abgeflachten Profilen vor. In ihnen wird schon bei geringem Abflußanstieg ein Uferübertritt begünstigt, der Strömungswiderstand durch die Gewässeraue dabei maximiert. Dadurch werden selbst in Zeiträumen mit maximaler Abflußhöhe geringe räumliche Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers aufrechterhalten.

► Eine nur geringe Schwankung des Strömungswiderstandes bei Hoch- und Niedrigwasser ist dagegen bei fehlendem Uferübertritt des Wassers gegeben. Seine unzureichende Verzögerung bei Abflußspitzen führt rückgekoppelt an die Gefälleverhältnisse zu großräumigen Fließgeschwindigkeitsgradienten und demzufolge intensiven Materialtransporten im Gerinne. Am geringsten ist dabei der Strömungswiderstand in den gefällereichen Abschnitten. Ausgeprägte Erosionsmerkmale, wie z.B. Sohleintiefung, sind das wahrnehmbare Ergebnis der dort erhöhten Transporte. Dauerhaft vergrößert ist der Strömungswiderstand erst in den gefälleärmeren Gewässerbereichen mit verzögerter Wasserbewegung, was in dem dort verbreiterten Fließquerschnitt sichtbar wird. Er ist jedoch auch in diesen Bereichen nicht optimal, bedingt durch die geringe Rauhigkeit des Sohlsubstrats (Akkumulation von Feinmaterial, s. Pkt. vorher). Bei ausgeprägter Abflußerhöhung ist daher auch dort eine fortschreitende Materialumlagerung in Richtung der Flußmündung wahrscheinlich.

Die bei hoher Abflußvarianz temporär großräumigen Fließgeschwindigkeitsgradienten prägen somit die Gerinnemorphologie: Sequentielle Prozesse von Erosion und Akkumulation sind begünstigt

10 Als Bezugsgröße zur Ermittlung des Strömungswiderstandes kann ein halbkreisförmiges Profil mit gleichem Querschnitt wie der des kartierten Fließgewässers verwendet werden. Ein halbkreisförmiges Profil besitzt den geringsten Umfang im Verhältnis zu seinem Querschnitt und setzt daher dem Wasser den geringsten Widerstand entgegen (vgl. Kap. D.2.2.2).

und werden über die Homogenität der Strukturen wahrnehmbar. Zwar steigt die Vielfalt zwischenzeitlich bei Abflußrückgang an, da dann kleinräumigere Fließgeschwindigkeitsgradienten entlang der Materialakkumulationen vorherrschen. Doch werden die dabei entwickelten Strukturen unter der großräumigeren Wasserbeschleunigung bei erneutem Abflußanstieg wieder vollständig oder teilweise erodiert. Eine hohe Dynamik unter weitgehendem Erhalt der Homogenität der Morphologie ist die Folge.

Die zeitlichen Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers können auch als zeitliches Energiemuster betrachtet werden, welches durch Prozesse von Erosion und Akkumulation in die räumliche Struktur des Gewässers umgesetzt wird (Energiedissipation, Kap. B.4.1). Bei hoher Schwankung dieses Energiemusters (meßbar als hohe Abflußvarianz) liegt eine hohe Prozeßdynamik im Gerinne vor. Sie spiegelt sich in einer geringen Vielfalt und hohen Dynamik der Strukturen wider.

B.4.1.3. Selbstoptimierungsprozeß bei optimalem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen

Mit zunehmendem Wirkungsgrad der ZKSen im Einzugsgebiet sinken Stoffeinträge in die Fließgewässer, Schwankungen im Abfluß werden minimiert. Ausgeprägte zeitliche Fließgeschwindigkeitsgradienten gehen (zusammen mit den räumlichen) zurück und können in dem sich strukturierendem Gerinne ohne weiträumige Materialtransporte weiter vergleichmäßigt werden. Die stoffverlustarme Energiedissipation ist in charakteristischer Weise in den Gewässerbettstrukturen und deren Dynamik erkennbar.

Stofftransporte bei der energiedissipativen Wechselwirkung zwischen Wasser und Substrat

Bei nur geringer Abflußschwankung maximiert sich durch fortschreitende Materialsortierung im gesamten Längsverlauf des Fließgewässers der Strömungswiderstand. Zusätzlich erhöht wird er durch die Akkumulation abgestorbenen Pflanzenmaterials (z.B. Totholz) sowie die Oberflächen wurzelnder Wasserpflanzen (Makrophyten). Einher geht die Maximierung des Strömungswiderstandes mit einer häufigeren und kleinräumigeren Geschwindigkeitsänderung des Wassers (Abb. 15, 16).

Verbunden mit der kleinräumigeren Geschwindigkeitsänderung des Wassers entlang stabiler Oberflächen ist ein Anstieg seiner Fähigkeit zur Stofflösung (meßbar als Dissoziationserhöhung an der festen Grenzfläche, Kap. B.4.1.1). Prozesse von Erosion und Akkumulation werden dagegen verringert und erfolgen entsprechend den kleinräumigeren Fließgeschwindigkeitsgradienten räumlich weniger voneinander getrennt ("parallelisiert"). Eine maximale Verlangsamung des Stoffflusses gegenüber der Wasserbewegung ist somit Folge des energiedissipativen Selbststrukturierungsprozesses im Gerinne.

Abb. 15: Strömungswiderstand durch Grobsubstrat (in Lagen erhöhten Gefälles): Durch die beschleunigte Wasserbewegung bleibt im Sortierprozeß gröberes Material zurück. Diese Strömungswiderstände führen zur Ausbildung hoher Fließgeschwindigkeitsgradienten auf engstem Raum: An den angeströmten Oberflächen verringert sich die Fließgeschwindigkeit in Richtung 0 (Prandtlsche Grenzschicht G), wogegen rückseitig der Hindernisse eine turbulent durchmische Totwasserzone (T) entsteht (nach Uhlmann 1975, verändert).

Abb. 16: Strömungswiderstand durch Wasservegetation und sortiertes Feinmaterial (in Lagen geringeren Gefälles): Durch Wasserverzögerung am Bestand sedimentiert Material in dessen Inneren und im Strömungsschatten. Während durch den Wasserstern (Callitriche) lockere organische Stoffe zurückgehalten werden, begünstigen Wasserhahnenfuß und Wasserpest (Elodea) auch Sandablagerungen. Mit dem Wachstum der Vegetation und der Sedimentschicht verkleinert sich die darüberliegende Freiwasserzone. Dort wird das Wasser beschleunigt, was seitlich und nach dem Hindernis die Wasserturbulenz erhöht. Sohlerosion (erkennbar an der Mulde) und Seitenerosion (erkennbar an der stets beobachtbaren "Inselbildung" der Vegetation) sind das in der Struktur sichtbar werdenden Ergebnis dieser kleinräumigen Fließgeschwindigkeitsgradienten (nach Uhlmann 1975, verändert).

Der Wassertransport in Abhängigkeit der energiedissipativen Wechselwirkung zwischen Wasser und Substrat

Der Rückgang großräumiger Beschleunigungen und Verzögerungen des Wassers zugunsten häufigerer und kleinräumigerer Geschwindigkeitsänderungen entlang stabiler Oberflächen verbessert auch den Wasserrückhalt im Gerinne (Verzögerung des Wasserflusses). Eine Dämpfung der zeitlichen Abflußschwankung und damit minimierte Wasserspiegelschwankungen im Jahresverlauf sind die Folge.

Strukturstabilität und -vielfalt in Abhängigkeit der energiedissipativen Wechselwirkung

Nur geringe Abflußschwankungen stellen ein zeitlich weitgehend stabiles Energiemuster dar. Dieses kann durch kleinräumige Materialtransporte in eine weitgehend stabile Struktur des Gewässerbettes umgewandelt werden. Die hohe Übereinstimmung zwischen zeitlichem Energiemuster und räumlichen Stoffmuster in Form der Gewässerbettstruktur ist neben einer minimierten morphologischen Veränderungsdynamik auch in einer hohen Vielfalt der Strukturen wahrnehmbar:

Breiten-Tiefen-Varianz

Entsprechend den kleinräumigeren Fließgeschwindigkeitsgradienten resultiert der Materialtransport in einem häufigeren Wechsel erosiver und akkumulativer Zonen im Längs- und auch im Querverlauf des Fließgerinnes. Erkennbar wird dies in einer dichteren Abfolge aufgeweiteter, flacher und verengter, tieferer Abschnitte. Die Breiten-Tiefen-Varianz ist maximiert.

Partikelspektrum

Die kleinräumigeren Fließgeschwindigkeitsgradienten führen im Sortierprozeß zu einer dichteren Abfolge unterschiedlicher Korngrößen im Partikelspektrum. Dies spiegelt sich auf den verschiedensten räumlichen Betrachtungsebenen wider. Beispielsweise sortiert sich im Strömungsschatten eines gröberen Partikels oder einer Wasserpflanze auch feineres Material. Ebenso entwickeln bei geringer Abflußschwankung die Mäander eine maximale Stabilität. Entsprechend der Wasserbeschleunigung und -verzögerung entlang dieser Struktur ist auch hier eine Sortierung des Materials nach Korngröße zu beobachten (Abb. 17):

Abb. 17: In einem Mäander vollzieht sich die Fließgeschwindigkeitsänderung in zwei Richtungen. Die eine erfolgt im seitlichen Ausschwingen des Wassers. Sie wird in den Kolken (Ergebnis einer Erosion durch Wasserbeschleunigung) sowie Furten (Ergebnis einer Akkumulation infolge von Wasserverzögerung) sichtbar. Eine weitere Geschwindigkeitsänderung erfolgt durch eine Querzirkulation am Prallhang (vgl. Schnitt A-A'). Dort taucht beschleunigtes Oberflächenwasser unter und gelangt unter Verzögerung seiner Bewegung am gegenüberliegendem Gleithang bzw. auch weiter flußabwärts wieder auf. Bei geringer Abflußschwankung sortiert sich das Material entlang dieser Fließgeschwindigkeitsgradienten (vgl. Schnitt A-A' am Beispiel eines Niederungsflusses) (nach Uhlmann 1975, Köhler 1985, verändert).

Aufrechterhalten wird die hohe Vielfalt im Partikelspektrum durch die nur geringe Abflußschwankung (geringer zeitlicher Fließgeschwindigkeitsgradient). Unter dieser Randbedingung besitzen die entwickelten Strömungswiderstände eine maximale Stabilität. Die Breiten-Tiefen-Varianz des Gewässers und damit auch die kleinräumigen Fließgeschwindigkeitsgradienten bleiben weitgehend erhalten. Ein hochstrukturiertes Gewässer mit einem optimal verlangsamten Stofftransport ist die Folge. Dies soll am Beispiel der morphologischen Dynamik eines mäandrierenden Gerinnes verdeutlicht werden:

► In Zeiträumen erhöhter Abflüsse verlaufen kleinräumige Fließgeschwindigkeitsgradienten von den Kolken (Wasserbeschleunigung) zu den Furten (Wasserverzögerung). Gleichzeitig wird

durch die Querzirkulation des Wassers in den Flußkrümmungen auch der Fließgeschwindigkeitsgradient vom Prallhang (Wasserbeschleunigung) zum Gleithang (Wasserverzögerung) vermehrt wirksam. Kolkeintiefung sowie Aufhöhung der Furten und Gleithänge sind wahrnehmbares Ergebnis der Materialtransporte zur Verringerung dieser Gradienten.

► Mit sinkendem Wasserspiegel kehrt sich der Fließgeschwindigkeitsgradient um. Er verläuft dann von den erhöhten Furten (Wasserbeschleunigung) in Richtung der tieferen Kolke (Wasserverzögerung), wo sich der Abfluß in Zeiträumen geringer Wasserführung konzentriert. Folge ist zum einen eine allmähliche Aufhöhung der Kolke bei gleichzeitiger Abflachung der Furten. Der so durch Materialtransporte verringerte Fließgeschwindigkeitsgradient geht mit einer fortschreitenden Korngrößensortierung einher. Wahrnehmbar ist sie in der zunehmenden Dominanz zurückbleibenden gröberen Substrats in den Furten gegenüber der Akkumulation feineren Substrats in den Kolken. Zum anderen kommt es mit der Umkehrung des Fließgeschwindigkeitsgradienten zu einer Umlagerung der Sandbänke an den Gleithängen der Flußkrümmungen. Geschiebeabtrag am Beginn einer Bank (nun im Bereich der Wasserbeschleunigung) und Ablagerung an ihrem Ende (Bereich der Wasserverzögerung), lassen die Bänke allmählich wandern.

Benetzter Fließquerschnitt (Strömungswiderstand) bei Hoch- und Niedrigwasser

Kleinräumige Fließgeschwindigkeitsgradienten sind Ergebnis einer fortgeschrittenen Materialsortierung und damit Zeichen eines maximierten Strömungswiderstandes im Gewässerbett (Prinzip der Dissipation, Kap. B.4.1.1). Deutlich sichtbar wird der maximierte Strömungswiderstand an der Vergrößerung des benetzten Fließquerschnitts.

Hervorzuheben ist dabei jedoch, daß der Strömungswiderstand und damit die "Dissipativität" (Verhältnis zwischen Materialtransport einerseits und kleinräumiger Beschleunigung und Verzögerung des Wassers entlang stabiler Oberflächen andererseits) natürlicherweise im Längsverlauf des Fließgewässers schwankt: Im gefällereichen Oberlauf ist zwar die abfließende Wassermenge geringer und die Rauhigkeit des Sohlsubstrats größer als im gefälleärmeren Mittellauf, doch liegt aufgrund der höheren Fließgeschwindigkeit ein beschleunigterer Materialtransport vor. Folglich steigt die Dissipativität vom Ober- zum Mittellauf hin an. Sie verringert sich dagegen wieder im Unterlauf des Fließgewässers. Hier verkleinert sich der Strömungswiderstand des Gewässerbettes aufgrund der größeren Wassertiefe und der geringeren Rauhigkeit des Sohlsubstrats (Dominanz von Feinsubstrat infolge des Materialabriebs und der geringen Fließgeschwindigkeit). Kleinräumige Fließgeschwindigkeitsgradienten entlang stabiler Oberflächen gehen gegenüber dem Mittellauf zurück, wodurch ein erhöhter Materialtransport mit der fließenden Welle begünstigt wird.

B.4.1.4. Grundlagen einer funktionalen Strukturanalyse

Funktional charakterisiert wurde die raum-zeitliche Selbststrukturierung der Gewässer als Entwicklung in Richtung maximaler Energieflußdichteabsenkung bzw. - durch die dabei minimierten Stoffverlagerungen - auch als nachhaltigkeitssteigernder Prozeß. Innerhalb dieses raum-zeitlichen Entwicklungsprozesses eines Fließgewässers spiegelt dessen Strukturierungsgrad die jeweilige Phasenlage, d.h. den Grad der Energieflußdichtesenkung wider:

► Intensive Materialtransporte bei der dissipativen Wechselwirkung zwischen Wasser und Substrat sind Zeichen einer hohen Energieflußdichte im Gewässer. Der Wirkungsgrad vorhandener Gewässerbettstrukturen, zu definieren über ihre Dauerhaftigkeit im Dissipationsprozeß (Erosionsbeständigkeit), ist nur gering. Wahrnehmbar ist er in der hohen morphologischen Dynamik sowie der geringen Vielfalt an Strukturen (Kap. B.4.1.1).

► Minimierte, kleinräumige Materialtransporte bei der dissipativen Wechselwirkung zwischen Wasser und Substrat sind Zeichen einer geringen Energieflußdichte im Gerinne. Der Wirkungsgrad vorhandener Gewässerbettstrukturen ist hoch, was sich in der geringen morphologischen Dynamik sowie im hohen Strukturierungsgrad des Fließgewässers widerspiegelt (Kap. B.4.1.1).

Eine solche funktionale, d.h. prozeßorientierte Strukturanalyse ermöglicht somit eine Abschätzung der Stofftransporte bei der Energiedissipation im Fließgewässer. Deutlich wird, daß eine stoffverlustarme Energiedissipation und eine dauerhaft hohe Vielfalt und Stabilität der Morphologie einander bedingen. Die stoffverlustarme Funktionsweise eines Gewässers und damit dessen Nachhaltigkeit muß daher oberste Priorität im Bewertungs- und auch im zugrundeliegenden Leitzielsystem zur Strukturgüteverbesserung besitzen (Kap. B.5).

B.4.2. Die Fließgewässerzönosen

Analog zu den Zönosen in der Einzugsgebietsfläche können die der Fließgewässer zusammen mit ihrem Standort als energiedissipative Funktionseinheit (ZKS) beschrieben werden. Über stoffliche Kreisprozesse (Produktion-Respiration) setzt sie den täglich wirksamen Energiepuls um, welcher im beschatteten Gewässer auch als Eintrag energiereicher Substanzen wirksam wird (z.B. NH_3, NH_4, abgestorbenes Laub). Auch im Fließgewässer durchlaufen die dissipativen Strukturen einen Selbstoptimierungsprozeß, der jedoch rückgekoppelt an den der ZKSen an Land erfolgt: Mit zurückgehenden Einträgen stofflicher Energieträger über den Abfluß aus dem Einzugsgebiet werden im Fließgewässer durch engräumigere, raschere Nahrungsbeziehungen die Stoffkreisläufe kurzgeschlossener. Der beschleunigte und kleinräumigere Stoffumsatz ermöglicht eine optimale Ausnutzung der in organischer Substanz gespeicherten Energie und bildet damit Grundlage einer maximalen Lebensdauer der Fließgewässer-ZKS im Jahresverlauf. Folge dieses Selbststrukturierungsprozesses ist eine zunehmende Trennung zwischen Nährstoff- und Wasserfluß. Auf diese Weise tragen auch die Zönosen der Fließgewässer zur Verlustarmut des gesamten Einzugsgebietes bei.

B.4.2.1. Die Fließgewässer-ZKS als energiedissipative Struktur

Im Fließgewässer wird die im Tag-Nacht-Rhythmus gepulste Energie - insbesondere bei hoher Beschattung - vermehrt als jahreszeitlich geprägter Eintrag energiereicher Stoffe wirksam. Zu diesen Stoffen gehören z.B. abgestorbenes Laub sowie die mit dem steigenden Flächenabfluß im Herbst und Frühjahr gelöst eingetragenen organischen (z.B. Glucose) und anorganischen (z.B. NH_4) reduzierten Substanzen. Unter der jahreszeitlich gepulsten Zufuhr an Energieträgern kann der Aufbau energiereicher Substanz (Produktion) dem Stoffabbau durch die heterotrophen Organismen (Respiration) zeitlich - und demnach auch räumlich - nachgeordnet werden. Das energiedissipative Wirkungsgefüges einer Fließgewässer-ZKS läßt sich daher in folgender Reihenfolge beschreiben (Abb. 18):

► Der *Detritus*, bestehend aus allochthonem (eingeschwemmten) und autochthonem (gewässereigenem) organischen Material, stellt im Fließgewässer den wesentlichen Energieträger dar.
► Die *Destruenten* (hauptsächlich Bakterien) zersetzen den Detritus und nutzen die darin gespeicherte Energie für ihre Lebensprozesse (Wachstum, Reproduktion). Bei dem hohen Transportvermögen des Wassers im Gerinne gewährleistet die kurze Umsatzzeit der Bakterien die ra-

sche Einschleusung der in organischer Substanz gespeicherten Nährstoffe in die Nahrungskette.

- Die *Produzenten* bauen als Autotrophe oder Chemoautotrophe[11] energiereiche organische Substanzen auf. Dabei werden im Wasser gelöste Nährstoffe durch Photosynthese der Autotrophen reduziert und in der Pflanzenbiomasse fixiert. Diatomeen beispielsweise dominieren als relativ temperaturunabhängige Schwachlichtalgen im Frühjahr, Grünalgen - vor allem Fadenalgen wie Cladophora - dagegen im Sommer. Zusätzliche Bedeutung besitzen die Produzenten in der räumlichen Strukturierung des Gerinnes: Insbesondere die höheren Wasserpflanzen (Makrophyten) stellen Strömungswiderstände dar, entlang denen das Wasser einer Geschwindigkeitsänderung unterliegt. Eine kleinräumige Materialsortierung entsprechend dem Fließgeschwindigkeitsgradienten ist die Folge.

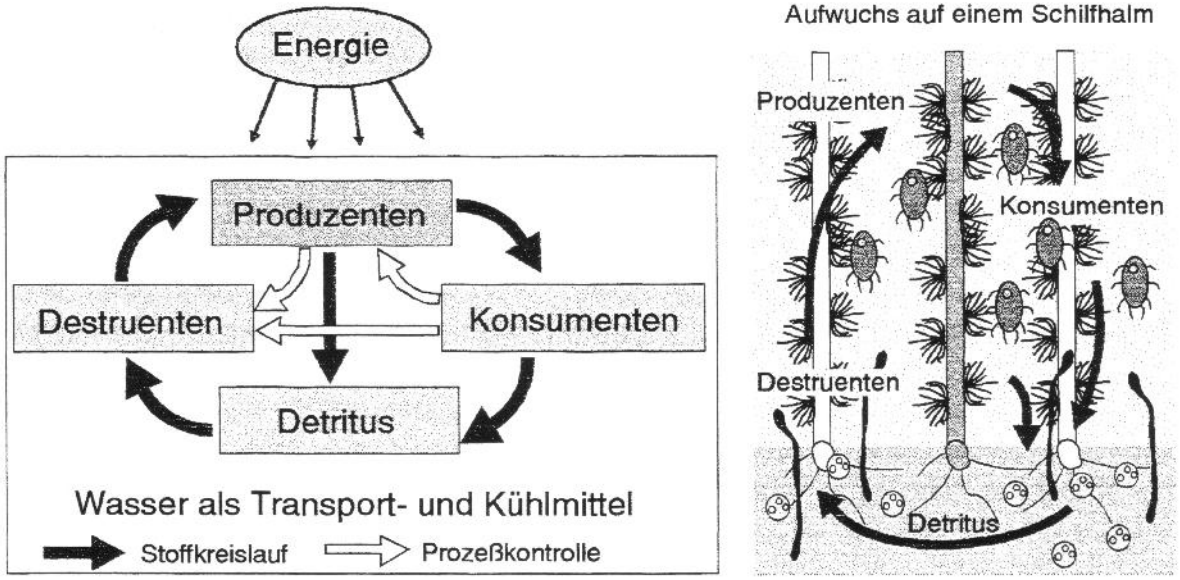


Abb. 18: Die Fließgewässer-ZKS schematisch (links) und am Beispiel einer Aufwuchs-Struktur (rechts).

- Die *Konsumenten* ermöglichen durch Bewirtschaftung (Fraß) der Organismen sämtlicher Trophiestufen einen dauerhaften Zuwachs im begrenzt besiedelbaren Raum des Fließgewässers. Auf diese Weise maximieren sie die energiedissipativen stofflichen Kreisprozesse von Produktion und Respiration innerhalb der ZKS (Maximierung der Gewässerproduktivität):

  Die Bewirtschaftung der Destruenten erfolgt durch bakterien- und detritusfressende Organismen des Gewässergrundes bzw. des Benthos (Detritivore). Von Bedeutung dabei sind Wasserinsektenlarven und Schnecken als bakterien- und detritusfressendes Makrozoobenthos sowie Ciliaten als bakterienfressendes Mikrozoobenthos.

  Höhere Konsumenten bewirtschaften die autotrophe und heterotrophe Ebene und zwar als Detritivore, Herbivore oder Carnivore, z.B. in Form detritus-, aufwuchs- oder organismenfressender Fische. Sie optimieren räumlich und auch zeitlich die Gewässerproduktivität durch ihren großen Aktionsradius einerseits sowie durch das Durchlaufen verschiedener Reifestadien unter Ausnutzung jahreszeitabhängiger Nahrungsquellen im Gewäs-

11 Die Chemoautotrophen nutzen reduzierte anorganische Verbindungen (z.B. H_2S, NH_3/NH_4) als Energiequelle zum Aufbau organischer Substanz. Sie stehen damit räumlich und zeitlich in enger Rückkopplung zu den anaeroben Bakterien (z.B. Denitrifikanten, Desulfurikanten), die über ihre Abbauprozesse diese reduzierten Verbindungen zur Verfügung stellen.

ser andererseits[12]. Gleichzeitig erfolgt durch höhere Konsumenten eine Einschleusung der Nährstoffe in langlebigere Zyklen.

- Das Wasser stellt verbindendes Transport- und Reaktionsmedium der einzelnen Ebenen im Wirkungsgefüge einer Fließgewässer-ZKS dar. Von Bedeutung ist außerdem sein ausgeprägter Fließgeschwindigkeitsgradient entlang den festen Oberflächen. Er erhöht die Sedimentationswahrscheinlichkeit organischer Substanz. Unterstützend hierauf wirkt auch die verstärkte Dissoziation des Wassers an der Phasengrenzfläche (meßbar als pH-Abfall). Sie begünstigt durch Ausflockung die Ablagerung organischer Substanz. Auf diese Weise sortiert das Wasser die Orte des Nahrungskettenaufbaus im Gewässer.

Bei dem hohen Transportvermögen des Wassers im Gerinne ist nur bei rascher, kleinräumiger Zirkulation der oxidierten bzw. reduzierten Stoffe eine verlustarme Energiedissipation innerhalb der ZKS gegeben. Von Bedeutung dafür ist das Vorhandensein von Aufwuchsstrukturen entlang stabiler Strömungswiderstände im Gewässerbett, hierbei sowohl auf Ebene der Produzenten ("biologischer Rasen") als auch der Destruenten (Aufwuchsbakterien). Durch ihre Standortfixierung einerseits sowie ihren hohen Zuwachs bei der Bewirtschaftung durch Konsumenten andererseits entsteht ein rascher Stoffumsatz auf engstem Raum (Parallelisierung von Stoffauf- und -abbau). Eine weitgehende Trennung zwischen Stoff- und Wasserfluß und damit eine verlustarme Energiedissipation im Fließgewässer ist gegeben (optimierte Energiedissipation). Bei begrenzten Stoffeinträgen in die Fließgewässer, Folge der Selbstoptimierung der ZKSen an Land, gehen minimierte Verluste mit einer hohen Ausnutzung der in organischer Substanz gespeicherten Energie einher. Die Lebensdauer einer Fließgewässer-ZKS im Jahresverlauf wird dadurch maximiert.

Die Entwicklung verlustarm funktionierender Fließgewässer-ZKSen steht in direktem Zusammenhang zur Selbstoptimierung in der zugehörigen Einzugsgebietsfläche. Nur bei hohem Wirkungsgrad der dortigen ZKSen sind Stoffeinträge in die Fließgewässer minimiert, gleichzeitig durch weitgehend stabile Oberflächen der Raum für pflanzlichen Aufwuchs sowie für Mikroorganismen maximiert. Unter diesen Randbedingungen entwickelt sich eine hoch strukturierte Zönose, die durch ihr rückgekoppeltes Zusammenwirken Stoffverluste mit dem Wasserfluß gering hält. Hierauf soll im folgenden näher eingegangen werden.

B.4.2.2. Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässer-ZKS bei geringem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen

In Zeiträumen extremer Abflußspitzen sind Stoffeinträge in die Fließgewässer maximiert, weitgehend stabile Oberflächen und damit Organismenhabitate dagegen kaum anzutreffen. Temporär dominiert über weite Strecken hinweg in der gesamten Freiwasserzone der Abbau energiereichen Materials. Raum- und zeitverschoben dazu ist bei Verzögerung des Wassers nicht nur eine vermehrte Akkumulation von unvollständig abgebauten Stoffen, sondern auch entsprechend der Belichtung eine intensive pflanzliche Produktion die Folge. Verbunden damit treten im Gerinne ausgeprägte Schwankungen des Sauerstoffgehaltes auf. Eine gering strukturierte Zönose mit hoher raum-zeitlicher Dynamik spiegelt die stoffverlustreiche Energiedissipation wider:

<u>Stofftransporte bei der Energiedissipation in der Fließgewässer-ZKS</u>

12 Die Larvenstadien der Fische finden sich meist im Frühjahr im Gewässer. In diesem Zeitraum liegen aufgrund der weitgehend fehlenden Belaubung günstige Belichtungsverhältnisse vor. Optimale Zuwachsphasen des Pflanzenaufwuchses, der Hauptnahrungsquelle der Larven, sind gegeben. In späteren Zeiträumen bewirtschaften die inzwischen ausgewachsenen Sekundärkonsumenten zusätzlich die heterotrophe Ebene.

Bei geringem Wirkungsgrad der ZKSen im Einzugsgebiet liegen rückgekoppelt an den Abflußanstieg hohe Einträge an Nährstoffen sowie an stofflichen Energieträgern in die Fließgewässer vor. Großräumige Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers begünstigen dabei den beschleunigten Transport des eingetragenen Materials (Kap. B.4.1.1). Dessen optimale Nutzung in der Fließgewässer-ZKS ist durch die rasche Organismenvermehrung gegeben. Produktion und Respiration nehmen zu, erfolgen aber vermehrt voneinander getrennt:

- An Orten und zu Zeiten verzögerter Wasserbewegung dominieren in der gesamten Freiwasserzone Respirationsprozesse des eingetragenen abbaufähigen Materials durch die Vermehrung planktischer, d.h. freischwebender Bakterien. Verbunden damit ist ein temporärer Abfall in dem Sauerstoffgehalt des Wassers. Das Vorkommen sauerstoffbedürftiger Konsumenten ist dadurch nur eingeschränkt möglich. Die Einschränkung lebensnotwendiger Standortvoraussetzungen kann auch als "Raumlimitierung" für die Organismen einer ZKS bezeichnet werden. Zwischen- und Endprodukte des Stoffabbaus sowie das Bakterioplankton unterliegen dadurch bei Abflußanstieg zum Großteil einer mehr oder weniger weiträumigen Verlagerung in Fließrichtung.
- Mit der Dominanz planktischer Abbauprozesse steigt insbesondere bei hohem Anteil leicht abbaubarer Substanzen die Fracht gelöster Nährstoffe. Sie begünstigt bei ausreichender Belichtung pflanzliche Produktionsprozesse. Sichtbar werden diese z.B. als Planktonblüte in strömungsärmeren Zonen, aber auch als intensiver Makrophytenzuwachs. Letzterer findet in größeren Gewässern hauptsächlich in dichten Röhrichtbeständen der Uferregionen, in kleineren Gerinnen dagegen in deren Verkrautung seinen Ausdruck. Bei steigender Selbstbeschattung kommt es jedoch zu einer zunehmenden Raumlimitierung für lichtbedürftige Produzenten[13].
- Zusammen mit der Produzentenvermehrung steigt in den betreffenden Gewässerabschnitten der Strömungswiderstand und damit auch die Sedimentation organischer Substanz. Deren Mineralisation begünstigt sowohl in Zeiträumen herabgesetzter Wasserführung als auch bei nächtlich fehlender Phototsyntheseaktivität der Unterwasservegetation einen Sauerstoffabfall. Dabei entsteht ein vertikaler Sauerstoffgradient, dessen Werte im Gewässersediment am niedrigsten sind und im darüberliegenden Makrophytenbestand je nach Fließgeschwindigkeit und Intensität der Abbauprozesse mehr oder weniger rasch ansteigen[14]. Dieser räumliche und zeitliche Sauerstoffgradient wirkt nicht nur raumlimitierend für die Konsumenten, sondern auch für sauerstoffbedürftige Destruenten. Er kann demzufolge zu anaeroben und damit unvollständigerem Stoffabbau führen, verbunden mit erhöhten Materialverlagerungen in Zeiträumen steigender Abflüsse. Eine Fortsetzung dieses Prozesses in Fließrichtung des Gerinnes ist die Folge.

Mit zunehmenden Einträgen energiereicher Stoffe steigt somit die Entkopplung der Produzenten-, Konsumenten- und der Destruentenaktivität der Fließgewässer-ZKSen. Prozesse von Produktion und Respiration sind räumlich und zeitlich vermehrt voneinander getrennt, wodurch der Nährstoffrückhalt im Gerinne minimiert ist. Wahrnehmbar ist die Trennung der Prozesse durch die Schwankungen im Sauerstoffgehalt des Fließgewässers. Aussagekräftig für die Prozeßdynamik

13 Zum Beispiel kam es in einem Wiesenbach (Barnbek) im Stör-Einzugsgebiet aufgrund hoher Lufttemperaturen, wenig Niederschlag und somit geringen Abflusses im Sommer 1992 zu einer üppigen Makrophytenentwicklung. Die mittlere Biomasse betrug 210 gTS/m² Bachbettfläche im Juni und ging aufgrund von Selbstbeschattung auf ca. 50 gTS/m² im Juli/August zurück. Analog zu dieser Entwicklung stieg die mittlere Biomasse der Aufwuchsalgen auf den Makrophyten von 1 gTS/m² Bachbettfläche im Juni auf ca. 100 gTS/m² im August an.

14 Anaerobe Verhältnisse auch innerhalb der Freiwasserzone wurden z.B. in einem Abschnitt der Alten Schwentine (bei Kiel) nachgewiesen. Zwischen den dort dominierenden *Elodea*-Beständen mit schlammig-sandigem und laubreichem Substrat kam es zur Faulgasentwicklung (Pöpperl 1991).

des Gerinnes ist dabei weniger die Betrachtung der Mittelwerte des Sauerstoffgehaltes als dessen Varianz[15].

Eine ähnliche Entwicklung läßt sich auf Grundlage hoher Einträge gelöster Pflanzennährstoffe beschreiben. Entsprechend den Strömungs- und Belichtungsverhältnissen gehen sie mit einer intensiven Produzentenvermehrung in den Fließgewässern einher. Steigende Abbauprozesse aus abgestorbener pflanzlicher Biomasse sowie des durch die Makrophyten aus der fließenden Welle "ausgesiebten" Materials lassen auch hierbei den stark schwankenden Sauerstoffgehalt zum raumlimitierenden Faktor für die Heterotrophen (Konsumenten, Destruenten) werden. Erhöhte Verlagerungen unvollständig abgebauter Stoffe und damit eine vermehrte raum-zeitliche Trennung von Produktion und Respiration sind die Folge.

Die temporär in großen Mengen aus dem Einzugsgebiet eingeschwemmten Stoffe können als ein stark schwankendes zeitliches Energiemuster betrachtet werden. Dieses wird im Fließgewässer mit der ZKS in eine dynamische räumliche Struktur umgesetzt. Die Dissipation unter diesem Energiemuster erfolgt durch sequentielle Prozesse von Respiration und Produktion. Einher geht dies mit hohen Schwankungen nicht nur in der Biochemie (Sauerstoffgehalt), sondern auch in der Morphologie (instabile Substratverhältnisse durch intensive Akkumulation und Erosion organischer Substanz). Eine gering strukturierte Zönose, charakterisiert durch eine hohe raum-zeitliche Prozeßtrennung innerhalb ihres Wirkungsgefüges, ist Abbild dieser verlustreichen Energiedissipation im Fließgewässer.

Raum-zeitliche Vernetzung der Fließgewässer-ZKS

Bei hohen Einträgen stofflicher Energieträger sowie an Nährstoffen in die Fließgewässer ist eine raum-zeitlich stark entkoppelte Fließgewässer-ZKS gegeben. Erkennbar wird dies in der geringen Vielfalt und Stabilität zönotischer Strukturen:

Die effizienteste Nutzung organischer Substanz innerhalb der Nahrungskette besteht, wie vorhergehend beschrieben, in der temporären Destruentenvermehrung mit raum-zeitlich verschobener Produzenten- und auch Konsumentenzunahme. Bei gelöst eingetragen Nährstoffen besteht sie in der Produzentenvermehrung mit raum-zeitlich verschobener Destruenten- und Konsumentenzunahme. Betrachtet man demzufolge in einem nährstoffreichen Fließgewässer an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt dessen Zönose, so ist zum einem ein hohes Biovolumen gegeben (Vermehrung einzelner Nahrungskettenglieder als energiedissipativer Prozeß, s.o.). Zum anderen liegt gleichzeitig eine geringe Artenvielfalt vor, bedingt durch die Aufhebung der Raumlimitierung (begrenztes Angebot an Nährstoffen oder stofflicher Energieträger) für einzelne Nahrungskettenglieder in den Fließgewässer-ZKSen. Dies äußert sich in der Dominanz nicht nur von einzelnen Trophieebenen, sondern auch von wenigen r-Strategen innerhalb derselben.

Hervorzuheben ist dabei, daß durch die hohe Trennung der Prozesse ein ständiger Wechsel in den Lebensraumbedingungen auftritt. Er beruht auf der Rückwirkung der dominierenden Nahrungskettenglieder auf die örtlichen Standortverhältnisse. Besonders deutlich wird das am Beispiel einer Pflanzenvermehrung als Folge hoher Nährstoffeinträge in die Fließgewässer: Mit Ausbreitung der Wasservegetation steigt der Strömungswiderstand und damit auch die Akkumulation organischer Substanz. Dadurch wirken die Pflanzen nicht nur zunehmend auf die Orte des Stof-

15 Zur Erfassung der Varianz dieses Parameters sind Meßintervalle erforderlich, welche die Geschwindigkeit der Prozeßabläufe im Tagesverlauf berücksichtigen. Einzelne Messungen mit Mittelwertsbildung auf Tages- und Monatsbasis besitzen einen hohen Zufallsanteil und sind somit in ihrer Aussagekraft stark eingeschränkt.

fabbaus - und demzufolge auch auf die Schwankungen im Sauerstoffgehalt des Wassers - zurück, sondern auch auf den zeitlichen Wechsel der lokalen Substratverhältnisse sowie der Gewässertiefe (Sohlaufhöhung). Auch die Belichtung sinkt mit zunehmender Ausbreitung der Pflanzen infolge Selbstbeschattung. Unter der bereits gegebenen hohen zeitlichen Schwankung in der Wasserführung kommt somit die der Biochemie (Sauerstoffhaushalt), Morphologie (Substratverhältnisse) und der Belichtung hinzu. Besonders ausgeprägt sind die Schwankungen der Standortverhältnisse in strömungsärmeren Gewässerabschnitten oder in kleineren Gerinnen mit stark herabgesetzter Fließgeschwindigkeit. Dort ist unter der hohen Standortvarianz die rasche Abfolge unterschiedlicher Arten begünstigt (Abb. 19). Stets setzt sich dabei die Art durch, die unter den gegebenen Licht-, Temperatur-, Abfluß- und Substratverhältnissen ihren Lebensprozeß (Wachstum, Reproduktion) am besten betreiben kann:

Abb. 19: Entwicklung der Wasservegetation in einem jährlich im Herbst entkrauteten Entwässerungsgraben (I) einer niederrheinischen Auenlandschaft: Im Frühjahr dominierten in dem nährstoffreichen und nahezu unbeschatteten Gerinne dichte Bestände an Schwimmblattgesellschaften (*Hottonia pallustris*, *Callitriche palustris* agg., *Ranunculus aquatilis*) gleichzeitig entwickelten sich *Hydrocharis morsus ranae* und *Lemna minor* auf der Wasseroberfläche (II). Ab Juli breiteten sich vom Ufer her *Phragmitetalia*-Arten aus, so daß im August kaum noch freie und unbeschattete Wasserfläche vorlag (III). Nach erfolgter Räumung der Gewässersohle im Herbst 1992 wurde im Untersuchungszeitraum zwischen Mai 1993 und Februar 1994 eine Tiefenspannweite von 48 - 104 cm gemessen (Diederich A., Neumann D., Borcherding J., 1995).

Bei geringer raum-zeitlicher Vernetzung der Organismen einer Fließgewässer-ZKS ergibt sich somit innerhalb des Jahresverlaufs ein hoher Durchsatz an vorwiegend kurzlebigen Arten. Er beruht auf der hohen zeitlichen Diversität der Wasserführung, Biochemie, Morphologie und Belichtung. Diese sequentielle Abfolge verschiedener Arten ist charakteristisch für die hohe raum-zeitliche Trennung von Produktion und Akkumulation im Gerinne und demzufolge auch für hohe (Nähr-) Stoffverluste mit dem Wasserfluß.

B.4.2.3. Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässer-ZKS bei optimalem Wirkungsgrad der Einzugsgebietsstrukturen

Mit sinkendem Stoffeintrag steigt die Rückkopplung innerhalb der Fließgewässer-ZKS: In dem zunehmend beschatteten Gerinne werden insbesondere auf Ebene der Heterotrophen Prozesse von Stoffab- und -aufbau durch raschere und kleinräumigere Nahrungszyklen parallelisiert. Ergebnis dieser Selbststrukturierung ist eine maximierte Gewässerproduktivität unter weitgehendem Nährstoffrückhalt im Gerinne. Auch minimierte Schwankungen im Sauerstoffgehalt des Wassers sind gegeben. Eine hoch strukturierte und in ihrer Zusammensetzung im Jahresverlauf stabilere Zönose spiegelt die verlustarme Energiedissipation im Fließgewässer wider.

Stofftransporte bei der Energiedissipation in der Fließgewässer-ZKS

Bei hohem Wirkungsgrad der ZKSen im Einzugsgebiet sind Stoffeinträge in die Fließgewässer minimiert, durch geringe Abflußschwankungen weitgehend stabile Oberflächen dagegen maximiert (Kap. B.4.1.3). Mit dem dadurch bedingten Anstieg kleinräumigerer Gradienten in der Fließgeschwindigkeit des Wassers kommt es zu einer Verlagerung der gelösten und feinpartikulären organischen Substanz aus der fließenden Welle an die festen Phasengrenzflächen. Auf diese Weise wirkt das Wasser räumlich strukturierend auf den Stoffabbau und damit auf den Nahrungskettenaufbau. Die Trennung zwischen Produktion und Respiration wird dabei herabgesetzt:

- Die ausgeprägte Änderung der Fließgeschwindigkeit entlang stabiler Oberflächen geht mit einem Dissoziationsgradienten in der Wassersäule einher. Meßbar ist er als pH-Abfall in Richtung der festen Grenzfläche. Die dort erhöhte Ladung begünstigt die Ausflockung[16] organischer Kolloide. Diese unterliegen infolge ihres dadurch erhöhten Gewichtes einer beschleunigten Ablagerung entlang dem Fließgeschwindigkeitsgradienten fester Oberflächen.

- Die an der festen Grenzfläche akkumulierte organische Substanz bildet eine adsorptive Schicht. Auf ihr werden entsprechend der vorhandenen Konzentration organischer Energieträger einerseits sowie den pH-Gradienten andererseits Aufwuchsbakterien selektiert. Deren Stoffwechselprodukte (meist in Form einer Polysaccharid-Matrix) besitzen ebenfalls eine adsorptive Wirkung. Dadurch werden nicht nur vermehrt weitere organische Stoffe gebunden, sondern auch Wasserpflanzensporen. Durch Selektion entsprechend den Strömungs-, Belichtungs- und Substratverhältnissen entwickeln sich auf den Oberflächen pflanzliche Aufwuchsorganismen in Form eines "biologischen Rasens". Dieser verringert den Dissoziationsgradienten des Wassers entlang der Grenzfläche.

16 Organische Kolloide besitzen elektrische Ladungen aufgrund von COOH-, NH_2-, NH-, N- und phenolischen OH-Gruppen. Mit der dadurch begünstigten Anlagerung der bipolaren Wassermoleküle entsteht eine Hydrathülle, die die Anziehungskräfte der Kolloide untereinander herabsetzt. Im Grenzbereich zu festen Oberflächen liegen durch die hohe Dissoziation des Wassers gegensätzliche Ladungsträger vor, welche die elektrische Ladung der organischen Kolloide bis hin zum Nullpunkt verringert (isoelektrischer Punkt). Das Hydradationsausmaß der Kolloide sinkt, ihre gegenseitige Anziehungskraft steigt. Die dadurch begünstigte Koagulation der Kolloide zu voluminöseren Partikeln geht mit deren "Niederschlag" einher.

In den belichteten Gewässerzonen erhöht der gegenüber Makrophyten größere Stoffumsatz des "biologischen Rasens" die Gewässerproduktivität. Dadurch steigt, zusammen mit der Fixierung der Produzenten an weitgehend stabilen Oberflächen, der Stoffrückhalt im Fließgewässer. Optimiert wird die Produktivität des Pflanzenaufwuchses durch die Aufrechterhaltung beständiger Zuwachsphasen (mechanischer Abrieb, Beweidung durch heterotrophe Organismen).

In beschatteten Gewässerabschnitten sind hohe Stoffumsätze nur auf Ebene der Heterotrophen möglich (hohe Sekundärproduktion). Dabei sind insbesondere die Destruenten von Bedeutung. Sie besitzen die kürzesten Generationszyklen unter den Heterotrophen und können daher das Angebot stofflicher Energieträger am effizientesten durch Wachstum und Vermehrung nutzen. Maximiert wird ihre Aktivität durch die Bewirtschaftung von bakterien- und detritusfressenden Organismen. Bei begrenztem Eintrag energiereicher Substanz in die Fließgewässer hält die kurzgeschlossene heterotrophe Nahrungskette zwischen Destruenten und bakterien- und detritusfressenden Konsumenten Respirationsverluste mit der fließenden Welle gering.

Der Rückgang planktischer, der Abdrift ausgesetzter Organismen zugunsten von Aufwuchsformen einerseits sowie die Zunahme kurzgeschlossener Stoffzyklen infolge einer steigenden Vergesellschaftung von Organismen andererseits gehen mit einer zunehmenden Parallelisierung von Stoffauf- und -abbau im Gerinne einher. Dadurch werden zum einem die gewässereigenen und aus dem Einzugsgebiet zugeführten Energieträger optimal an Ort und Stelle genutzt. Die so bewirkte weitgehende Trennung zwischen Stoff- und Wasserfluß ist zum einem als geringe Nährstoffkonzentration in der fließenden Welle meßbar. Zum anderen geht die Parallelisierung der Prozesse, welche zunehmend aus der fließenden Welle an den Grenzflächenbereich zwischen Wasser und Substrat verlagert werden, mit einer geringeren Schwankung im Sauerstoffgehalt einher.

Raum-zeitliche Vernetzung der Fließgewässer-ZKS

Geringere Schwankungen im Sauerstoffgehalt, bedingt durch eine Minimierung der (Respirations-) Verluste bzw. des unvollständigen Abbaus energiereicher Substanz, führen zu einer stabileren Zönose im Jahresverlauf.

Gleichzeitig begünstigen die kleinräumigeren Fließgeschwindigkeitsgradienten, welche mit einer dichteren Abfolge unterschiedlicher Substratzusammensetzungen und Gewässertiefen einhergehen, eine reicher strukturierte Zönose (Abb. 20).

Ihre hohe Strukturierung ergibt sich außerdem durch die ausgeprägte raum-zeitliche Organismenvergesellschaftung, sichtbar in der Ausbildung von Aufwuchsstrukturen (Kap. B.4.2.3). Der hohe Vergesellschaftungsgrad ist eine notwendige Voraussetzung für die maximale Lebensdauer einer Fließgewässer-ZKS bei jahreszeitlich stark strukturiertem (gepulstem) und dadurch limitiertem Angebot stofflicher Energieträger sowie Nährstoffen. Betrachtet man demnach in nährstoffarmen Gewässern an einem bestimmten Ort und zu einem bestimmten Zeitpunkt dessen Zönosen, so ist stets gegenüber denen eines nährstoffreichen Gerinnes eine erhöhte Artenvielfalt gegeben. Gleichzeitig ist aber auch durch den raschen Stoffumsatz innerhalb der Nahrungskette das zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelbare Biovolumen stets geringer als im nährstoffreichem Gewässer.

Abb. 20: Die Organismenvielfalt in Abhängigkeit kleinräumiger Gradienten in der Fließgeschwindigkeit und der Substratzusammensetzung.

Zusammenfassend betrachtet entwickeln sich somit rückgekoppelt an den Energiepuls aus der Wechselwirkung zwischen Sonne und Erde sowie an das daran gebundene jahreszeitliche Muster stofflicher Energieeinträge in die Fließgewässer dort "räumliche Strukturen" in Form der dissipativ wirkenden Fließgewässer-ZKS. Geht deren Dynamik mit nur geringen Veränderungen der Biochemie, den Substratverhältnissen und der Belichtung einher, ist eine verlustarme Energiedissipation gegeben. Im raum-zeitlichen Zusammenwirken der ZKSen im gesamten Fließgewässer sind dann irreversible Nährstoffverluste in Richtung der globalen Senke Meer minimiert, die Nachhaltigkeit (Dauerhaftigkeit) zönotischer Strukturen ist entsprechend maximiert.

B.4.2.4. Grundlagen einer funktionalen Strukturanalyse

Funktional charakterisiert wurde die raum-zeitliche Selbststrukturierung der Fließgewässer-ZKS als energieflußdichteabsenkender Prozeß bzw. - durch die dabei minimierten Verluste gelöster und feinpartikulärer organischer Stoffe - auch als Entwicklung in Richtung maximaler Nachhaltigkeit. Innerhalb dieser Selbststrukturierung spiegeln der Strukturierungsgrad der Fließgewässerzönosen sowie die Schwankung des Sauerstoffgehaltes die Phasenlage, d.h. den Grad der Energieflußdichteabsenkung deutlich wider:

- Hohe Schwankungen im Sauerstoffgehalt des Wassers sind Zeichen hoher Respirationsverluste, d.h. eines unvollständigen Umsatzes organischer Substanz. Die Energieflußdichteabsenkung und damit der Wirkungsgrad der Fließgewässer-ZKS ist nur gering. Sichtbar in deren Strukturierung wird dies durch die nur geringe Vielfalt (geringer raum-zeitlicher Vergesellschaftungsgrad der Organismen) sowie durch die hohe Strukturdynamik (hoher Artendurchsatz im Jahresverlauf).

- Geringe Schwankungen im Sauerstoffgehalt um einen hohen Mittelwert sind Zeichen eines nahezu vollständigen Stoffumsatzes. Bei dem hohen Transportvermögen des Wassers im Gerinne ist dies nur durch die rasche, kleinräumige Kreislaufführung der Stoffe an der Phasengrenzfläche Wasser-Substrat möglich und daher nur in einer Aufwuchs-ZKS gegeben. Respirationsverluste sind in dieser minimiert. Der hohe Wirkungsgrad der ZKS wird sowohl in der hohen Organismenvielfalt (hohe raum-zeitliche Organismenvergesellschaftung) als auch durch die hohe Stabilität in der Zusammensetzung wahrnehmbar.

Hervorzuheben ist der nur geringe Regelungsbereich der Fließgewässer-ZKS bei der Aufrechterhaltung eines verlustarmen Wirkungsgefüges. Zugrunde liegt dem nicht nur die begrenzt besiedelbare Oberfläche, sondern auch das hohe Transportvermögen des Wassers im Gerinne. Die dadurch gegebene relative Konzentrationserhöhung der im Wasser gelösten Stoffe kann schon bei einem geringen Eintragsanstieg zur Aufhebung der Raumlimitierung (Nährstofflimitierung) für die Produzenten führen. Auch Abflußspitzen, die in ihrer Frequenz die Selbstorganisation der Fließgewässer-ZKSen in Richtung einer verlustarmen Funktionsweise verhindern, tragen zur

Wirkungsgradabsenkung dieser Strukturen bei. Daß bei den heute hohen Einträgen an Hauptnähr- und Basenstoffen in die Fließgewässer die dortigen Zönosen eine nur untergeordnete Bedeutung für deren Rückhalt besitzen, zeigen Messungen an Makrophyten im Einzugsgebiet der Stör (Abb. 62, Kap. F.5.1). Eine größere Rolle bei der Stoffestlegung besitzen sie durch die biogene Kalkausfällung: Mit der Kohlendioxidaufnahme bei der Produktion senkt die Vegetation den Kohlendioxidpartialdruck des Wassers und beschleunigt dadurch die Ausfällung von Kalk sowie von anderen gelösten Stoffen (Kap. E.2).

B.5. Leitbildanforderungen für natürliche Systeme

B.5.1. Leitbildanforderungen zur Senkung der Stoffverluste in die Fließgewässer

Die irreversiblen Austräge pflanzennotwendiger Basen vom Land ins Meer gefährden die dauerhafte Nutzbarkeit der Landschaft durch den Menschen und dadurch die Stabilität der Gesellschaft. Oberstes Ziel bei der nachhaltigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen (§§1, 2 BNatSchG, §2 ROG) muß demnach sein, die irreversiblen Stoffausträge der Nutzung der Landschaft weitgehendst zu verringern. Eine Bewirtschaftung ist danach nur dann als nachhaltig zu bezeichnen, wenn die Stoffverluste minimiert sind.

Dieses Ziel kann als funktional definiertes Leitbild verstanden werden. Es erfordert eine Orientierung am natürlichen Selbstoptimierungsprozeß, d.h. ein Verständnis von der "funktionierenden Landschaft". Nur so kann bei der Flächenbewirtschaftung der irreversible Stoffaustrag minimiert und damit die Zeitspanne der Tragfähigkeit der Landschaft für die Gesellschaft maximiert werden.

Nachhaltigkeit als Leitbild erfordert, daß bei der Flächenbewirtschaftung die raum-zeitlichen Veränderungen im Wasser- und Stoffhaushalt und damit der landschaftliche Wirkungsgrad im Vordergrund stehen. Dies kann nur auf Grundlage einer raum-zeitlichen Planung erfolgen:

Sie muß zum einem die Veränderungen der Landschaft über die Zeit hinweg berücksichtigen. Die in der Landschaft anzutreffenden Zustände sind also als "Phasenlagen" in einen fortdauernden, vom Wasserhaushalt geprägten landschaftlichen Entwicklungsprozeß einzubinden. Die Planungen dürfen zum anderen nicht an administrativen Grenzen enden. Vielmehr sollten sie einzugsgebietsweise durchgeführt werden, da die Stofftransporte mit dem Wasserfluß (Schichten-, Oberflächenabfluß) gerichtet verlaufen.

Vordergründig zu beachten bei der Planung der Bewirtschaftung ist die unterschiedliche Langlebigkeit der Landschaftsbereiche, die bedingt ist durch die natürlicherweise gegebenen Unterschiede in der Schwankung des Bodenwasserhaushaltes. Beispielsweise verarmen die hochliegenden Einzugsgebietsflächen durch die erhöhte Dynamik im Bodenwasserhaushalt am ehesten an Nähr- und Basenstoffen. Auch müssen bei einer nachhaltigen Landbewirtschaftung die Prozesse so gekoppelt werden, daß die Produktions-Konsumptionsketten wieder geschlossen werden und dadurch die Stabilität der Landschaft steigt.

Diskutiert werden hierzu folgende Maßnahmen (Abb. 21):

- Kuppenlagen sind besonders von der Stoffauswaschung betroffen. Die Ausbildung vegetationsarmer, sich stark aufheizender "Schadstellen" in der Landschaft kann durch die Entwicklung eines extensiv oder nicht bewirtschafteten Waldes maximal verzögert werden.

- In den Quellbereichen und an den Zusammenflüssen von Gewässern sollten die ursprünglich vorhandenen und heute häufig drainierten Feuchtgebiete (z.B. Niedermoore) wieder vernäßt bzw. auf Grenzertragsböden neu eingerichtet werden. Das Wasser wird dadurch länger in der Landschaft gehalten. Folge sind verringerte Hochwasserereignisse. Gleichzeitig sinken durch die gleichmäßigere Wasserspende im Sommer die Extreme in der Niedrigwasserführung. Unter diesen Randbedingungen können sich in den Fließgewässern durch Selbstoptimierung verlustärmere morphologische und zönotische Strukturen entwickeln.

- Entlang der Gewässer könnten hinreichend große Feuchtgebiete (Röhrichtflächen oder Feuchtwälder) als bewirtschaftete Stoffrückhalteflächen eingerichtet werden. In ihnen wird das aus der Landschaft abfließende Oberflächen- und Schichtenwasser durch Verdunstung gebremst. Dabei wird ein Teil der gelösten Stoffe ausgefällt und von der Vegetation aufgenommen. Die geerntete Biomasse kann als Rohstoff (Silage, Vergärung, Baustoff u.a.) genutzt werden. Werden die darin enthaltenen Basen und Nährstoffe nach der Mineralisierung wieder auf die oberhalb liegenden Flächen zurückgebracht, könnten die Stoffkreisläufe wieder geschlossen werden.

- Nähr- und mineralstoffhaltige organische Abfälle, Klärschlämme und Abwässer sind wieder besser in die Stoffkreisläufe zu integrieren. Der Klärschlamm ländlicher Siedlungen enthält in der Regel kaum bedenkliche Inhaltsstoffe und sollte vermehrt wieder auf Flächen, die nicht zur unmittelbaren Nahrungsmittelproduktion dienen, aufgebracht werden. Biologisch geklärtes Abwasser ist eine nährstoffhaltige Ressource, mit der bewirtschaftete Schilfpolder extensiv beschickt oder in Teichen Futter für die Fischzucht produziert werden könnte.

- Die Giftwirkung, die von kontaminierten Standorten ausgeht, wird nicht anhand einer Betrachtung der Schadstoffe und ihrer Konzentration beurteilt. Vielmehr erfolgt eine Risikoeinschätzung bezüglich der Verlagerung der Schadstoffe sowie ihrer zeit-räumlichen Verteilung bei der Aufnahme in die Nahrungskette. Unter diesem Aspekt kann eine subhydrische Deponie, deren Schichtenwasser ein geringes Potential zur umgebenden Landschaft aufweist und demnach eine geologische Barriere ausbildet, als weitgehend unschädlich eingestuft werden. Durch Einbringen eines Förderbrunnens in den Deponiekörper kann das Stoffverlagerungspotential kontrolliert werden. Die mit dem Wasserfluß aus der Deponie geförderten Schadstoffe können jederzeit technisch oder biologisch aufgearbeitet werden.

Besitzt die über den landschaftlichen Wirkungsgrad definierte Nachhaltigkeit oberste Priorität jeglicher Planung, so ist auch gleichzeitig ein dauerhafter Klima-, Boden-, Wasser- sowie Artenschutz gewährleistet:

Nur in einer nachhaltig funktionierenden Landschaft mit maximierten kleinräumigen Wasserzyklen ist zum einem im Sommer eine ausreichende Wasserspende mit einer guten Qualität hinsichtlich der Gehalte an Nähr- und Mineralstoffen gegeben. Zum anderen sind insbesondere während der Vegetationsperiode Schwankungen der täglichen Temperaturamplitude, aber auch in der Niederschlagsverteilung minimiert. Das Klima ist somit stabilisiert (Kap. B.3).

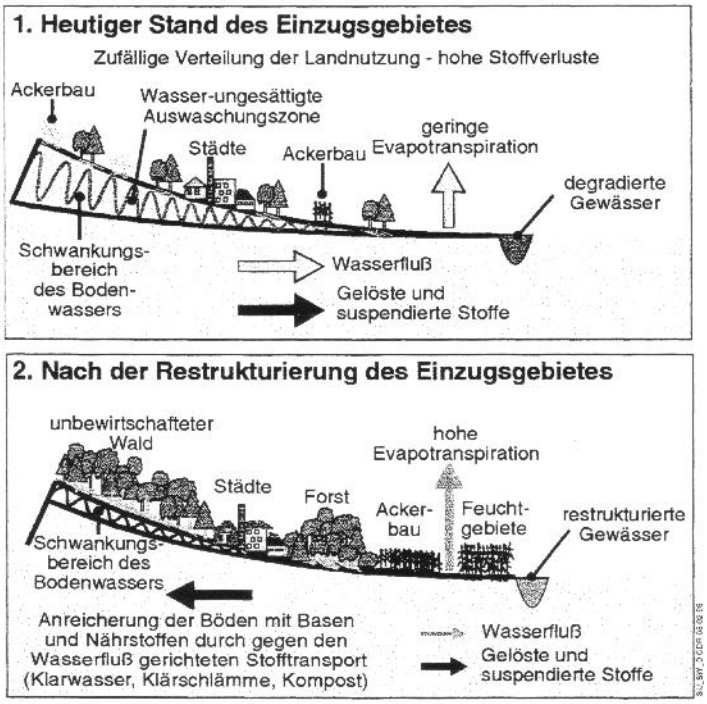


Abb. 21: Modell für die nachhaltige Restrukturierung des Einzugsgebietes.

Weiterhin wird auch nur in einer nachhaltig funktionierenden Landschaft die Tragfähigkeit des Bodens für die Gesellschaft langfristig erhalten: Maximierte Bruttoprimärproduktivität und minimierte Nettoproduktivität, betrachtet als Protonenumsatz (-flußdichte), verhindern weitgehend Prozesse der Basenauswaschung. Die unerwünschte Anreicherung des Oberbodens mit schwerer löslichen Schadstoffen (Kap. F.1.1.6) sowie Prozesse der Bodenversauerung werden dadurch vermieden, ebenso die Belastung der Fließgewässer durch hohe Stoffeinträge mit dem Flächenabfluß.

Auch den Ansprüchen des Naturschutzes kann erst eine nachhaltig funktionierende Landschaft gerecht werden. Denn nur unter der Randbedingung einer maximal gesenkten Energieflußdichte besitzen die vorzufindenden Organismenvergesellschaftungen auch eine hohe Stabilität (Kap. B.4.2.3). Ein aktiver Arten- und Biotopschutz, der außerdem bislang dem Artensterben kaum entgegenwirken konnte und deshalb von seinem Ansatz her in Frage zu stellen ist, ist dann nicht mehr erforderlich.

B.5.2. Leitbildanforderungen zur Minimierung der Stoffverluste in Fließgewässern

Fließgewässer tragen zur Nachhaltigkeitssteigerung des gesamten Einzugsgebietes bei, indem sie durch Selbststrukturierung den Stoffffluß maximal gegenüber der Wasserbewegung verlangsamen (Prozeß der Energieflußdichteabsenkung, Kap. B.4). Dabei ist nur in einem nachhaltig funktionierenden Gerinne auch eine hohe Strukturgüte im Sinne einer hohen morphologischen Vielfalt und Stabilität gegeben (Kap. B.4.1.4). Voraussetzung für die heute im Rahmen des Fließgewässerschutzes geforderte Steigerung der Strukturgüte bildet daher eine prozeßorientierte, d.h. funktionale Leitzielformulierung:

Oberstes Leitziel zur Steigerung der Strukturgüte eines Fließgewässers muß dessen nachhaltige Funktionsweise sein. Andere in der Literatur definierten Leitziele, wie z.B. "Naturnähe" durch hohe Strukturvielfalt und -stabilität oder "natürliche Landschaftsbereicherung" (Kern 1994, Lawa Rheinland-Pfalz 1994, unv.) sind die wahrnehmbaren Ergebnisse eines verlustarm funktionierenden Gerinnes und daher dem beschriebenen Oberziel nachzuordnen. Ebenso verhält es sich mit der Forderung nach dem "Hochwasserrückhaltevermögen" (LAWA Rheinland-Pfalz 1994, unv.): Bei einer nachhaltigen Funktionsweise liegt ein maximierter Strömungswiderstand im Fließgewässer vor (Kap. B.4.1). In dem dafür typischen breiten und flachen Profil wird schon bei geringem Abflußanstieg ein Uferübertritt des Wassers begünstigt, der Hochwasserrückhalt in der Gewässeraue somit optimiert.

Auf Grundlage dieses funktionalen Leitbildes lassen sich die Maßnahmen zur Verbesserung der Strukturgüte in eine sinnvolle Hierarchie bringen:

Oberste Priorität besitzt dabei die Senkung der Stoffeinträge und der Abflußschwankungen. Sie halten im Selbstoptimierungsprozeß des Fließgewässers temporär intensive Materialtransporte und damit eine geringe Strukturvielfalt und -stabilität aufrecht (Kap. B.4.1). Ein sinnvoller Gewässerschutz kann daher nur an Land beginnen, indem dort durch eine Stabilisierung des Wasserhaushaltes der Flächenabfluß in die Fließgewässer möglichst gleichmäßig erfolgt und mit minimierten Transporten fester und gelöster Stoffe einhergeht.

Eine weitere wichtige Voraussetzung zur Strukturverbesserung der Fließgewässer ist deren ungehinderte Dynamik. Jeder Eingriff durch Gewässerunterhaltung und -ausbau behindert den Selbststrukturierungsprozeß und hält dadurch hohe Transporte mit dem Wasserfluß aufrecht. Beispielsweise verhindert die Gewässerbewirtschaftung durch das Unterbinden von Ufererosion (Uferbefestigung, Abb. 22) und durch das permanente Entfernen sedimentierten Materials (Sohlräumung), daß die Gewässer eine der Abflußdynamik entsprechende dissipative Struktur entwickeln können. Vielmehr wird durch derartige Maßnahmen die Entwicklung von Stoffsenken in räumlich nachgeschaltete, mündungsnähere Bereiche verlagert.

Die derzeitige ökomorphologische Gewässerbewertung und -planung (z.B. LAWA Rheinland-Pfalz 1994, unv., Kern 1994) ist noch weit entfernt von einem funktionalen Betrachtungsansatz. Zwar strebt auch sie, aufbauend auf den Vorgaben von Werth (1987), den Zustand maximaler Stabilität und Selbstregulation der Fließgewässer an, der als hoher ökologischer Gehalt bezeichnet wird. Kennzeichnend für einen "hohen ökologischen Gehalt" der Fließgewässer sind eine "hohe Artenvielfalt bei ausgewogenen Mengenverhältnissen der Organismengruppen" (hohe Diversität), eine "hohe räumliche Heterogenität", ein "eher geschlossener Stoffkreislauf" sowie die "Elastizität gegenüber äußeren Einflüssen" (Werth 1987). Doch wird in diesem morphologischen Leitbild den Gewässerstrukturen vorrangige Bedeutung beigemessen und nicht dem raum-zeitlich zu betrachtenden landschaftlichen Selbstoptimierungsprozeß, aus dem sie hervorgehen. Statt dessen wird der Selbststrukturierungsprozeß des Gewässers isoliert betrachtet und als Entwicklung hin zu einem "dauerhaft dynamischen Gleichgewichtszustand" mit "einer bestimmten typischen Ausprägung des Gewässerbettsystems" beschrieben (LAWA Rheinland-Pfalz 1994:4, unv.). Daß die Eigendynamik der Gewässerstrukturen funktional in den landschaftlichen Entwicklungsprozeß einzuordnen ist, ihre äußere Erscheinung durch dessen Phasenlage geprägt ist, bleibt unberücksichtigt. Statt dessen wird der gewünschte Sollzustand des Gewässerbettsystems ausschließlich strukturell näher charakterisiert. Danach hat "aus morphologischer Sicht (...) das Idealgewässer in unseren Breiten den Charakter und die Strukturen eines Waldbaches, zumindest solange die Ufergehölze die Morphologie beeinflussen (...). Die Entwicklung dieser

naturraumspezifischen Waldbachmorphologie setzt folglich die Existenz eines mehrere Baumkronendurchmesser breiten Uferwaldes voraus." (Kern 1994:161).

Folge dieses strukturellen Ansatzes ist auf Umsetzungsebene der Fließgewässersanierung bis heute der vorrangige Schutz von Gewässerbettstrukturen oder von Organismen:

Abb. 22: Uferbestigung an der Osterau.

Bezogen auf den Schutz zönotischer Strukturen stellt der Erhalt bzw. die Wiedereinbürgerung von Fischen in die Fließgewässer den Inhalt zahlreicher gewässerökologischer Bemühungen dar. "Fischpsychologisches Wissen" und "technische Möglichkeiten zur Realisierung des Fischaufstiegs" dazu sind vorhanden und werden "in diversen, z.T. spektakulären Anlagen verwirklicht." (Bayer. Lawa 1994:107). Der Erfolg dieser strukturell orientierten Maßnahmen erscheint jedoch bei einer funktionalen Charakterisierung der Strukturen in einer dynamischen, sich selbst organisierenden Fließgewässerentwicklung äußert fragwürdig. In dieser Entwicklung ist eine dauerhaft hoch strukturierte Zönose das wahrnehmbare Ergebnis einer verlustarm funktionierenden Fließgewässer-ZKS und damit eines ungehinderten Selbstoptimierungsprozesses des Gerinnes (Kap. B.4.2). Notwendige Voraussetzung für die Selbstoptimierung der ZKS bildet die Eintragsminimierung abbaufähiger Substanz sowie von Nährstoffen. Weitere wichtige Voraussetzung ist das Vorhandensein kleinräumiger Strömungsgradienten im Gewässer (räumliche Heterogenität) sowie eine geringe Schwankung der chemischen Parameter, insbesondere dabei im Sauerstoffgehalt. Maßnahmen zur Vergleichmäßigung des Hydrographen bei gleichzeitiger Minimierung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer sind vor diesem Hintergrund die Voraussetzung für eine hohe Vielfalt und Dauerhaftigkeit der zönotischen Strukturen. Ein aktiver Artenschutz erübrigt sich dann.

Kritisch zu betrachten ist in diesem Zusammenhang auch die derzeit noch häufig praktizierte Fließgewässerrenaturierung. Eine hohe morphologische Vielfalt und Stabilität ist das sichtbare Ergebnis der ungehinderten (dissipativen) Selbststrukturierung des Gerinnes, dabei unter der Randbedingung nur geringer Abflußschwankungen und Stoffeinträge (Kap. B.4.1). Eine Renaturierung des Gewässers durch gewässerbauliche Maßnahmen kann nur punktuell, d.h. be-

zogen auf begrenzte Teilabschnitte, die morphologische Dynamik dämpfen. Sie besitzt daher bestenfalls einen "kosmetischen Charakter". Einen nennenswerten Beitrag zur dauerhaften Strukturaufwertung des gesamten Fließgerinnes liefert sie jedoch nicht.

Deutlich wird, daß ein sinnvoller Schutz von Fließgewässerstrukturen nur über die "Sanierung des Einzugsgebietes" erfolgen kann. Sein durch die derzeitige Bewirtschaftung destabilisierter Wasserhaushalt geht mit hohen Abflußschwankungen und Stoffeinträgen in die Fließgewässer einher. Dadurch wird im Selbstoptimierungsprozeß der Fließgewässerstrukturen sowohl bezogen auf die Morphologie als auch die Zönosen ein geringer Wirkungsgrad und damit ein Zustand geringer Vielfalt und Stabilität aufrechterhalten. Es ist daher eher die Funktionsfähigkeit der Natur, die geschützt und erhalten werden muß und nicht die als Schutzgüter ausgewiesenen Strukturen.

C. Gebietsbeschreibung

C.1. Lage und naturräumliche Eigenschaften

C.1.1. Lage und Flächennutzung

Die Stör entspringt bei Willingrade südöstlich von Neumünster in Schleswig-Holstein. Sie durchfließt die Hohe Geest im Gebiet Neumünster und mündet unterhalb von Hamburg in das Elbeästuar. Untersucht wurde das nicht mehr vom Tidewasser beeinflußte Einzugsgebiet bis Kellinghusen (ca. 1150 km^2). Das langjährige Niederschlagsmittel im Einzugsgebiet beträgt 750 - 800 mm im Jahr (Keller 1978), im Untersuchungszeitraum weichen die Niederschlagsmengen hiervon ab (Kap. F.2.1.1). Die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 8,3°C.

Die Flächennutzung im Gesamteinzugsgebiet (vgl. Karte Flächennutzung) verteilt sich folgendermaßen (Abb. 23):

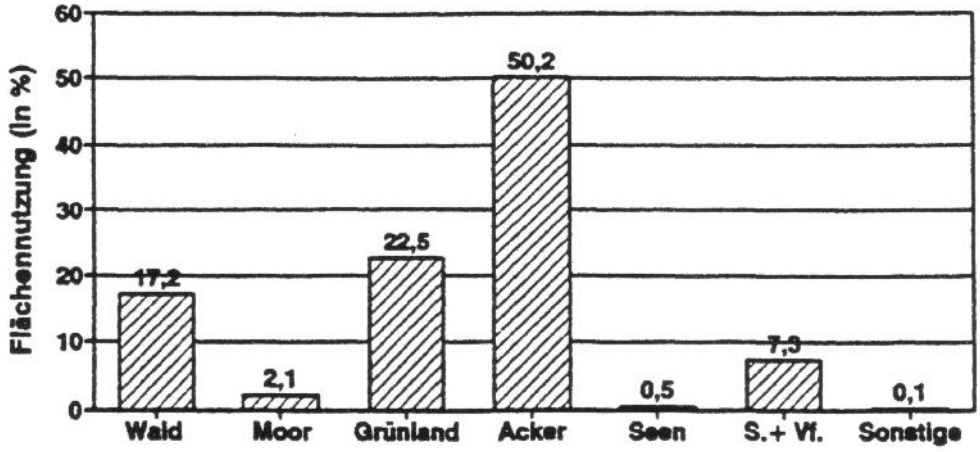


Abb. 23: Flächennutzung im Gesamteinzugsgebiet (in Prozent)

C.1.2. Geologie und Böden

Der untersuchte Bereich des Stör-Einzugsgebietes besteht geologisch überwiegend aus Schmelzwassersanden des Weichselglazials, die teilweise Sande des Saaleglazials überlagern. Sie nehmen weite Teile der Störniederung und ihrer Zuflüsse ein und bilden die Niedere Geest. Der Nordosten des Einzugsgebietes besteht aus mergeligen weichselzeitlichen Moränen, die naturräumlich zum Östlichen Hügelland gehören. Ansonsten werden die Niederungen von flachen, saalezeitlichen Moränenrücken durchragt, z.B. des Segeberger Forstes im Osten. Sie sind Teile der Hohen Geest.

Die Bodenformen des Gebietes der Stör wurden seitens J. Finnern, soweit keine Bodenkarten vorlagen, kartiert. Das Bodenmuster wurde als Bodenkarte im Maßstab von 1 : 100 000 dargestellt (Bodenkarte, Anhang 2). Es folgt eine kurze Beschreibung der vorherrschenden Böden.

C.1.2.1. Böden der Jungmoränenausläufer

Das Östliche Hügelland besteht vorrangig aus Sedimenten des Weichselglazials mit glazifluviatilen Ablagerungen, Beckenablagerungen und Geschiebemergel der Grundmoräne. Der unveränderte Geschiebemergel ist durch geringe Gehalte an Metallsulfiden schwarzgrau gefärbt. Sulfidoxidation

ließ ihn 3 bis 6 m tief verbraunen. Die Prozesse der Entkalkung, Verbraunung, Verlehmung und Tonverlagerung ließen aus dem Geschiebemergel der flachwelligen Grundmoräne allmählich Parabraunerden mit einer Entkalkungstiefe von 0.8 bis 2 m entstehen. Die sandiglehmigen Eluvialhorizonte sind 40-60 cm mächtig. Diese und die folgenden lehmigen Tonanreicherungshorizonte sind unter einer naturnahen Waldbestockung stark versauert (pH-Werte 3.5-4.5). Die Tiefenlagen der Entkalkung und Tonverlagerung nehmen von Westen nach Osten ab. Zugrunde liegt dem, daß die Moränen im Westen um 5000 bis 7000 Jahre älter sind und von vornherein sandiger und kalkärmer waren. Hinzu kommt eine Abnahme der Niederschläge und damit der Versickerungsraten von West nach Ost. Der infolge starken Eisdrucks dichte Geschiebemergel bewirkte ebenso wie die Tonanreicherung einen Wasserstau, so daß viele Parabraunerden in ebener bis flacher Muldenlage pseudovergleyt sind.

Kuppige Endmoränen sind sandiger und weisen tiefgründig entkalkte Braunerden auf, ebenso wie die sandigen Kameszüge. Manche sind podsoliert, besonders unter Fichtenforsten, manche besitzen im zweiten Meter dünne Tonbänder als Ergebnis einer Tonverlagerung.

Die meist sandigen Senken sind von Grundwasserböden beherrscht. Gleye, Anmoorgleye und Niedermoore sind vertreten. Teilweise sind sie mit Wiesenkalk angereichert.

Die Mehrzahl der ackerbaulich genutzten lehmigen Parabraunerden und sandigen Braunerden ist mehr oder weniger stark erodiert. Viele Unterhänge und Senken weisen daher Kolluvien auf. Kleine vermoorte Senken sind häufig erst durch ihre mehr oder weniger mächtige Bedeckung mit Kolluvien ackerfähig geworden. Die landwirtschaftlich genutzten Böden sind durch Erhaltungskalkung und Düngung mit Nährstoffen angereichert und weisen demzufolge noch pH-Werte zwischen 6 und 7 auf.

Mit der Verkoppelung der Ackerflächen im 18.Jh. wurden Wallhecken, sogenannte Knicks, angelegt. Die unter den oft tiefgründig humosen Wällen begrabenen Böden stellen wichtige Zeugen mittelalterlicher Ackernutzung dar.

C.1.2.2. Böden der Niederen Geest

Im Bereich der Niederen Geest dominieren nährstoffarme, sandige Böden mit hohen Grundwasserständen. Die vorherrschenden Sandersande des Weichselglazials sind extrem tonarm (< 2%), tiefgründig entkalkt und entbast. Entkalkung und Entbasung erfolgten oft bereits im Spätglazial, begünstigt durch ehemals tiefere Grundwasserstände. Mit dem Anstieg des Meeresspiegels im Holozän vernäßten die Niederungen und es entstanden extrem versauerte Gley-Podsole und Podsol-Gleye (pH-Werte zum Teil unter 3). Die mit Humus angereicherten und oft zu Ortstein verfestigten Unterböden der Gley-Podsole enthalten auch Eisenoxide, nicht hingegen die etwas tiefer gelegenen Podsol-Gleye. Deren ausgewaschenes Eisen und Mangan wurde teilweise in typischen Gleyen angereichert, und zwar vor allem parallel zu Bachläufen. Der Raseneisenstein dieser Gleye wurde bis in die 40er Jahre dieses Jahrhunderts verhüttet. In den 60er Jahren wurden die Reste des Raseneisensteins zusammen mit Ortsteinhorizonten der Gley-Podsole im Zuge der Flurbereinigung durch Tiefenumbruch gebrochen und damit zerstört. Weitere Senken der Niederen Geest sind vermoort, teils als Hoch- oder Niedermoore, stellenweise auch als Mudden. Dabei waren wurzelechte und auf Niedermoortorfen aufgewachsene Hochmoore stark vertreten. Seit dem letzten Jahrhundert wurden die Moore entwässert und kultiviert, so daß heute intakte Hochmoore praktisch nicht mehr existieren.

Im Ostteil der Niederen Geest wurden die Schmelzwassersande in geringer Mächtigkeit (0.5 bis 1 m) von Geschiebesand überdeckt. Auch hier haben sich Braunerde-Podsole bis Gley-Podsole entwickelt. Sanderlandschaften werden von einzelnen flachen saalezeitlichen Moränenrücken mit unterschiedlich stark podsolierten Braunerden und tiefgründig lessivierten Parabraunerden durchragt. Die hohen Grundwasserstände der Niederen Geest erschwerten die menschliche Besiedlung. Ortschaften entstanden daher vornehmlich auf den flachen Moränenrücken, den Holmen. Für sie sind z.T. graue, braune und graubraune Plaggenesche als Zeugnis starken menschlichen Einflusses charakteristisch. Heute sind nahezu alle Böden der Niederen Geest unter intensiver landwirtschaftlicher Nutzung: Die Moore und Podsol-Gleye unter Grünland, Braunerde-Podsol und Plaggenesche unter Ackerbau. Durch regelmäßige Kalkung und Düngung sind die Böden mit Nährstoffen angereichert und weisen pH-Werte zwischen 4 (Moore) bis 5.5 (Podsol-Braunerden) auf. Die sandigen Böden erfordern in trockenen Sommern eine Zusatzberegnung.

C.1.2.3. Böden der Hohen Geest

Auch auf den saalezeitlichen Moränen der Hohen Geest haben sich Parabraunerden entwickelt. Deren tonverarmte Oberböden sind mächtiger als im östlichen Hügelland, da sie zum Teil bereits im Eem-Interglazial lessivierten und im Weichselglazial durch Flugsandüberdeckung und Kryoturbation Geschiebedecksande entstanden. Aus den gleichen Gründen sind sie auch tiefgründiger entkalkt (oft mehrere Meter) und vielfach podsoliert. Sie sind mit Podsolen aus Flugsanddecken vergesellschaftet, während Täler mit hohen Grundwasserständen nährstoffarme Podsol-Gleye und Moore aufweisen.

C.1.3. Vegetation

Auf den nährstoffarmen und meist podsolierten Böden der Niederen und Hohen Geest hat der Buchen-Eichenwald den größten Anteil an den ursprünglichen Waldgesellschaften. Allerdings ist ein großer Anteil der möglichen Standorte in Nadelholzforste überführt oder wird landwirtschaftlich genutzt. Die Baumschicht setzt sich mit wechselnden Deckungsanteilen an *Fagus sylvatica*, *Quercus robur* und *Q. petraea* zusammen; nur in Einzelfällen erreicht auch *Sorbus aucuparia* die Baumschicht. Die Artenzusammensetzung der Strauchschicht bleibt bis auf die sich verjüngenden Baumarten auf *Sorbus aucuparia*, *Frangula alnus* und *Ilex aquifolium* beschränkt.

Im Verbreitungsgebiet des Birken-Eichenwaldes wird ein Großteil der möglichen und produktionsschwachen Standorte heute von Kiefernforsten eingenommen. Standorte des Birken-Eichenwaldes sind Dünen und Flugsanddecken mit Regosolen sowie Podsole mit mächtigen Orterde- oder Ortsteinhorizonten. Der Charakter dieser Wälder, die großflächig von der trockenen Variante des Buchen-Eichenwaldes durchsetzt sind, wird im wesentlichen von der in der Baumschicht vorherrschenden Stieleiche bestimmt, der einige Exemplare der Sandbirke beigemischt sein können. In Senken im Binnendünenbereich, auf abgetorften Hochmooren und Podsol-Gleyen ist der Pfeiffengras-Birken-Eichenwald verbreitet. In seiner Baumschicht tritt *Betula pubescens* als Feuchtezeiger auf. In der Krautschicht sind besonders die Horste von *Molinia caerulea* auffallend.

Lebende Hochmoore mit andauernder Torfbildung sind in Schleswig-Holstein nur noch in Resten vorhanden. Mit den bereits im vorletzten Jahrhundert begonnenen intensiven Entwässerungs- und Abtorfungsarbeiten haben diese ihren natürlichen Charakter eingebüßt und ihre standörtlichen Bedingungen wurden irreversibel verändert. In den wasserführenden - und daher als Wuchsort für die Moorbirke zu nassen - Torfstichen findet sich als aktuelle Vegetation eine Wollgras-Gesellschaft. Großflächig abgetorfte, stark entwässerte und gesackte Hochmoorkörper werden von

einem Birkenbruchwald eingenommen. Im Unterholz treten als stetige Sträucher *Sorbus aucuparia* und *Frangula alnus*, vereinzelt auch *Salix aurita* auf.

Auf grundwasserbeeinflußten Standorten können Gley-, Anmoorgley- und Niedermoorbereiche kleinflächig assoziiert sein. In Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt und Bodentyp sind daher *Alnus glutinosa*-Gesellschaften und Fraxino-Alneten mosaikartig verzahnt. Auf Mooren mit Höchstwasserstand im Flurniveau dominiert die Erle. Auf Gleystandorten mit etwas höherem Flurabstand des Grundwassers tritt die Esche stärker in Erscheinung und ein Erlen-Eschenwald kann sich entwickeln.

C.2. Historische Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes

C.2.1. Einleitung

Bei der ungestörten Entwicklung eines Ökosystems werden die Wasser- und Stoffkreisläufe immer kurzgeschlossener. Dabei nimmt seine Nachhaltigkeit, gemessen als Verhältnis von Stoffumsatz zu Stoffverlusten, immer mehr zu (Kap. B). Charakteristisch für diese Entwicklung ist eine Abnahme der Dynamik im Bodenwasserhaushalt: Bei immer rascherer und kleinräumigerer Wasserzirkulation werden wechselfeuchte Phasen des Bodens zugunsten dauerfeuchter Phasen seltener. Die Stofffreisetzung und -verlagerung mit dem Wasserfluß in tiefere Bodenschichten bzw. in die Fließgewässer wird verringert und statt dessen zunehmend als stoffverlustarmer Kreisprozeß über die Zönosen betrieben.

Anthrophogene Eingriffe in den Wasserhaushalt der Landschaft haben deren nachhaltige Funktionsweise immer mehr herabgesetzt. Die irreversiblen Verluste betragen für das Einzugsgebiet der Stör heute etwa 1t Salze/ha/a (das entspricht ca. 20 kmol Protonen/ha/a). Der Anteil basischer Kationen, wie z.B. Calcium, Magnesium oder Kalium, liegt bei knapp 30%. Die Austräge sind erheblich größer als die Einträge über Düngung und Niederschlag. Bei begrenztem Stoffvorrat im pflanzendurchwurzelbaren Oberboden sinkt dadurch die Nutzungszeitspanne der Landschaft durch den Menschen nichtlinear. Noch steht genügend bezahlbare Fremdenergie (z.B. fossile Energieträger) für die Düngung bzw. Pufferung der Böden zur Verfügung, so daß der Verlustprozeß derzeit nur an einzelnen Orten, z.B. als Waldsterben, sichtbar wird. Doch wird bei fortlaufenden Austägen der Anteil an Basen im pflanzendurchwurzelbaren Oberboden im Vergleich zu den schwerer löslichen, nicht pflanzennutzbaren, z.T. sogar giftigen Stoffen (z.B. Quarzsand, Schwermetalle) immer geringer (Kap. F.1.1.6), der finanzielle Aufwand zum Ausgleich der Stoffverluste immer höher.

Die zunehmende Öffnung der Stoffkreisläufe durch anthropogene Eingriffe in den Landschaftswasserhaushalt soll im folgenden für das Einzugsgebiet der Stör nachvollzogen werden.

C.2.2. Historische Entwicklung des Wasserhaushaltes im Einzugsgebiet der Stör

Ansatzpunkte über die historische Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes lassen sich dabei aus alten Karten (vgl. Abb. Anhang 2, C.2.2), Gebietsbeschreibungen, Flurnamen, Beschreibungen über die Entwicklung der Lebensumstände und Lebensweisen der Menschen sowie über die allgemeine Entwicklung der technischen Möglichkeiten ableiten. So zeigt z.B. ein Vergleich der "Topographisch Militärischen Charte des Herzogtums Holsteins" (1789-1796) mit der heutigen Nutzung deutlich, daß der Waldanteil zwar geringer und der Heideanteil höher, der Anteil von Retentionsstrukturen, wie z.B. Mooren, jedoch erheblich höher gewesen war. Die damals ausge-

prägtere Mäandrierung der Gewässer deutet außerdem auf eine gegenüber heute stärker herabgesetzte Abflußgeschwindigkeit hin.

Beschreibungen der Naturgeschichte Holsteins, wie sie Schröder & Biernatzki (1855) liefern, lassen auf einen wesentlich höheren Waldanteil im 13. und 14. Jh. rückschließen. Zum Zeitpunkt der Erstellung des Buches 1855 dagegen muß der Segeberger Staatsforst Heide gewesen sein. Auf einem Teil der "Segeberger Haide", zu dem der Segeberger Staatsforst gehört, befand sich noch im 14. Jahrhundert ein Wald, der Urwald genannt wurde. Anschaulich beschreiben dies Schröder & Biernatzki (1855:27) wie folgt:

"Außerdem wirkte bedeutend auf die Beschaffenheit, namentlich die Mitte des Landes, die übertrieben starke Entwaldung, welche die Zeit vorgeschrittener Culturentwicklung mit sich brachte. Es waren ehemals fast alle Haiden des Landes, alles hügelige Terrain der Westseite, selbst gegenwärtig mit Flugsand bedeckte Strecken so gut wie der Osten des Landes mit dichten Waldungen bedeckt. [...] Noch vor 200 Jahren waren nachweislich die jetzt fast mit Flugsand bedeckten Blankeneserberge mit dichten Waldungen bedeckt und das ganze Amt Reinbek durchzog noch im 13. Jahrhundert von einem Ende bis zum andern die große aus Eichen und Buchen bestehende Waldung Asbrok. Auf einem Theil der jetzigen Segeberger Haide stand noch im 14. Jahrhundert eine große Waldung, der Urwohld genannt, und von Lütjenburg bis Schleswig erstreckte sich einst die ungeheure Waldung Isarnho. Die zu rasche Zerstörung dieser Wäldermassen legte der Verheerung der Westwinde die Mitte des Landes schutzlos blos; die entwaldeten Strecken waren viel zu bedeutend, um damals alle angebaut zu werden und bedeckten sich rasch mit Haide und Flugsand; das Klima wurde rauher und die Physiognomie des Landes wurde ohne Zweifel unwirthlicher, wie sie es gewesen war."

Verschiedene Entwicklungen waren für die Entwaldung entscheidend. Ein erster Schub ist schon in der frühen Eisenzeit festzustellen, da für die Eisengewinnung aus Raseneisenerz ein großer Holzbedarf bestand. Wie Reimer (1978:19) in seinem Buch über die Geschichte des Aukrugs schreibt, befand sich in dem Gebiet zwischen Neumünster und Jevenstedt in der frühen Eisenzeit das Eisenhüttenzentrum Holsteins. Das Holz hierzu lieferte die Ilohheide, die "erst nach diesem Riesenverbrauch vollständig entwaldet und der Heide anheimgefallen ist". Stange (1971:248) schreibt zum Einfluß des Menschen in der vor- und frühgeschichtlichen Zeit:

"Wenn in der vor- und frühgeschichtlichen Zeit dem Menschen bereits größere waldvernichtende Wirkung zugeschrieben werden kann, so erstreckt sie sich hauptsächlich auf die beiden Geestzonen. Viehverbiß - vor allem in der Bronzezeit - und Eisenverhüttung der Eisenzeit haben auf dem Mittelrücken auch deshalb ein größeres Vordringen der im Unterholz bereits vorhandenen Heide erlaubt, da die zunehmende Degradierung der Geestböden eine schnelle Wiederbewaldung wie auf den kalkreichen Böden des Östlichen Hügellandes erschwerte."

Ab Mitte des 12.Jh.s nahmen die ansteigenden Lebensbedürfnisse und ein erhöhter Bedarf an landwirtschaftlicher Fläche zur Ernährung der Bevölkerung Einfluß auf die Entwaldung (Reimer 1978:22). Auch dürften der Schiffbau der Hanse und die vielen Kriege im 17.Jh. nicht unerheblich zur Entwaldung Schleswig-Holsteins beigetragen haben. Stange (1971:248-251) beschreibt zum Einfluß der Landwirtschaft und des Schiffbaus:

"Zweifellos hat die direkte Erweiterung der Ackerflächen durch Rodung den größten Anteil an der Waldvernichtung. [...] Während im Bereich der Güter die Wälder teilweise bewußt erhalten wurden [...], vernichteten die Bauern den Wald oft völlig (Probstei, Fehmarn). Waldweide und Schweinemast haben entsprechend ihrer großen Bedeutung in der damaligen Landwirtschaft

einen starken Anteil an der Degradierung der Wälder. [...] Der Bedarf des Bauernhofes an Holz für Brennholz, Bauholz und Zaunholz hat überall gleichbedeutende Mengen verschlungen. Als der schwindende Wald nicht mehr den Brennholzbedarf decken konnte, griff man auf die Torfmoore zurück [...].

Im Gegensatz zu einigen deutschen Mittelgebirgslandschaften [...], hatte die Raseneisenerzverhüttung nur in frühgeschichticher Zeit im Lande Schleswig-Holstein eine Rolle gespielt und zur Waldvernichtung beigetragen. Hingegen erreichte die Köhlerei im ganzen Land große Bedeutung besonders im Östlichen Hügelland, da sich die hier vorherrschende Buche gut zur Köhlerei eignete. Die im 16. und 17. Jh. aufkommende Glasindustrie war ebenfalls hauptsächlich auf das Östliche Hügelland beschränkt. Der Holzverbrauch war sehr groß, da einer der benötigten Rohstoffe, Pottasche, erst aus Buchenasche gewonnen werden mußte und die Brennöfen natürlich auch mit Holzkohle beschickt wurden. [...] Auf Grund der hohen Holzpreise und des Holzmangels gingen die meisten Glashütten schon im 18. Jahrhundert wieder ein. [...] Die reiche Ausstattung mit Häfen an West- und Ostküste und die von der Nordseeküste her das Land erschließenden Flüsse Eider, Stör, Wiedau u.a. förderten frühzeitig den Holzexport, so daß Schleswig-Holstein zum wichtigsten Lieferland für Schiffsholz (Eichen) nach Holland und England wurde. Das Fehlen einer geregelten Forstwirtschaft führte zum Holzraubbau, zur Waldverwüstung."

Einen weiteren Hinweis auf den früheren Zustand einzelner Feldmarken geben die Flurnamen. Die Flurnamen Neumünsters und seiner Umgebung sind z.B. von Prien (1929) in der Karte der Flurnamen von Neumünster und Umgebung festgehalten worden. Nach Reimer (1978:22) lassen sich die Flurnamen in vier Gruppen einteilen, "nämlich solche, die auf Wasser, Wald, Heide und altes Kulturland hindeuten. Auf Wasser deuten hin: Segn, Soll, Saal, Siek, Sichten, vi oder veh, Born, Furt, forth, Weddel, Hue, Pott, Diek, Rönne; auf altes Ackerland: Esch, Kamp, Rüm, Lann, Feld, Stücken, Spann, Koppel, auf Wiesen: Mede (mitbek, Meewisch). Für Heide kommt dies Wort und auch Viert in Betracht. Die größte Menge unserer Flurnamen weist auf Be- oder Entwaldung hin. [...] Auf Waldbestand deuten hin: Wohld, Hölln, Holln, Holt, Hagen, Loh, Horst, Hesel, Heise, Struck, Busch, Staf, Bast, Brok, Raa, Ratjen, Rehm, Stubben, Kölln, Kahln, Kohlstä, Ek, Bök, Barken, Eller, Weten, Wetjen, Dorn, Dör, Hassel u.a.".

Interessant ist der folgende Hinweis des Autors: "Eine Betrachtung der Flurnamen ergibt demnach, daß der Aukrug einst bedeutend mehr Wasser und Wald zeigte als heute. Urbares Land war nur in geringer Menge vorhanden" (Reimer 1978:22).

Der nicht wesentlich gestiegene Waldanteil (8,6%) wird von Stange (1971:247f) auf die Ungunst der natürlichen geographischen Faktoren (starke, häufige Westwinde; Niederschlagsminima in den Monaten April, Mai; Nachtfrostgefahr durch mangelnde Bodenwärme; Fehlen von Nadelbäumen aufgrund der milden Winter) zurückgeführt. Er räumt allerdings ein:

"Die ungünstigen Bedingungen reichen aber doch nicht aus, um die starke Entwaldung des Landes zu erklären. Wenn man heute stärkere Waldbildung zur Milderung der klimatischen und bodengeographischen Schäden anstrebt, dann muß aber auch der umgekehrte Schluß richtig sein: solange der Wald reichlich vorhanden war, konnte er sich auch in dem von ihm selbst geschaffenen Schutz, in seinem Kleinklima, natürlich regenerieren."

Die Aufhebung der Feldgemeinschaften, für die Schleswig und der königliche Teil von Holstein zwischen 1758 und 1771 feste Grundsätze und Regeln erhielten, führte ab 1724 zu einer starken Zunahme des Ackerlandes und der Koppeln, wobei die Koppeln aus Heide, Wald und Bruch ge-

wonnen wurden (Reimer 1978:108,109). Die ersten Bestrebungen, der Entwaldung und Verheidung entgegenzutreten, entstehen um 1870 und äußern sich z.B. in der Gründung des "Ersten schleswig-holsteinischen Waldverbandes" am 25.März 1875 (Reimer 1978:151). Das Statut galt für die Dörfer Homfeld, Innien, Bargfeld, Bünzen, Sarlhusen, Wiedenborstel, Meezen und Hennstedt.

Eine großräumige Entwässerung der Landschaft vor Mitte des 19.Jh. scheiterte u.a. an den enormen Kosten und den unzureichenden technischen Möglichkeiten. Reimer (1978:155,156) beschreibt den Ausbau der Bünzau: "Durch den Aukrug fließt die Bünzau. [...] Das Aubett ist nur schmal, und dabei flossen die Auen und Bäche in vielen Krümmungen dahin, wie das bei Auen mit geringem Gefälle immer der Fall war. Schon vor 1800 waren zwischen Böken und Bünzen Begradigungen vorgenommen worden, um schnelleren Wasserabfluß zu schaffen. Pastor Domeier in Nortorf berichtet in den Provinzial-Berichten 1790, daß die Bünzau sehr oft ihre Ufer übersteigt und das Wiesental in einen See verwandelte, [...]"

Am 27.1.1882 wurde dann die Bildung der "Bünzau-Entwässerungs-Genossenschaft" beschlossen, die den Lauf auf etwa 1/3 verkürzen sollte. Die Regulierung konnte in der Folgezeit die Überschwemmungen nicht ganz verhindern, da 1908 und 1920 die Buckener Au und die Fuhlenau reguliert wurden und das Wasser wieder schneller floß. 1933/34 wurde so durch den Arbeitsdienst die Bünzau auf 11m verbreitert, was immer noch keine völlige Abhilfe schaffte (Reimer 1978:156).

Die Möglichkeiten zur Drainage feuchter Senken wurde erst mit der Erfindung der Zylinderröhrenpresse durch den Engländer Whitehead 1845-48 geschaffen (Leister 1953:184,185). Die Kosten für die Verfahren, die vorher genutzt wurden, waren nach Leister so hoch, daß diese sich nur reiche Gutsbesitzer leisten konnten. "Erst durch die Röhrendrainage entstanden so jene sauberen, zusammenhängenden, flächigen Koppeln, die heute der Landschaft im Osten Schleswig-Holsteins ihr Gepräge geben" (Leister 1953:185). Diese Beschreibung ist bezüglich der Entwicklung des Drainageneinsatzes und der damit einhergehenden Nivellierung der Landschaft sicherlich auch auf das Störgebiet übertragbar. Die kleinräumige geomorphologische Ausformung der Landschaft mit Hügeln und feuchten Senken wurde an die großräumige Ausformung angepaßt. Damit wurden die kleinräumigen Retentionsbereiche zerstört. Der Prozeß der Auswaschung von Basen und Nährstoffen aus der Landschaft in die Fließgewässer wurde wesentlich beschleunigt.

Zusammenfassung

Die beschriebene Landschaftsgeschichte läßt den Schluß zu, daß das Gebiet der Stör zwar schon frühzeitig im 15./16.Jh. zu einem großen Teil entwaldet gewesen sein muß, die großflächigere Entwässerung aber erst zu Beginn des 18.Jhs., besonders mit der Aufhebung der Feldgemeinschaft, einsetzte. Die Überschwemmungen der Bünzau dieser Zeit hängen eng mit der Entwaldung zusammen. Wenn der Boden den "Bewirtschafter des Bodenwassers", den Wald, verliert, kommt es zu einem erhöhten bzw. schnelleren Abfluß der Niederschläge (meßbar als höherer Abflußbeiwert). Diese eher oberflächlichen bzw. oberflächennahen Abflüsse führten zwar in einigen Bereichen zur Erosion, das erodierte Material wurde aber weiter unterhalb abgelagert (Selbststrukturierungsprozeß der Landschaft, Kap. B.3). So kann dieser Prozeß in erster Linie als ein Verlagerungsprozeß in der Landschaft betrachtet werden. Erst durch die Entwässerung, die zu den hohen Austrägen gelöster Basenstoffe mit Schichtenwasserabfluß führte, wurde daraus ein irreversibler Verlustprozeß in Richtung der globalen Senke Meer. Die Entwässerung brachte es außerdem mit sich, daß die Landschaft geomorphologisch nivelliert wurde. Mit dem zunehmenden Wegfall der natürlichen Stoffsenken in den Niederungen wurden die Akkumulationszonen immer weiter in Richtung Gewässer verschoben. Mit der Absenkung des Bodenwasserspiegels wurde der Wasserhaushalt und damit auch der Stoffhaushalt des Bodens dynamischer. Die gesteigerten

Austräge unter der anthropogenen Bewirtschaftung haben die Nachhaltigkeit der Landschaft herabgesetzt und damit auch die Zeitspanne einer möglichen Nutzung durch die menschliche Gesellschaft.

Tab. 1: Auszüge aus der schleswig-holsteinischen Forstgeschichte in Zahlen (Quelle: Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei des Landes Schleswig-Holstein 1989: 61ff).

Um 11.000 v. Chr.	Endgültiger Rückzug der Eismassen der letzten Vereisung.
Um 11.000 bis	Wiederbewaldung (Birke, Aspe, Kiefer, Hasel, Erle, Eiche, Buche).
1070 n.Chr.	Domherr Adam von Bremen: "Die Cimbrische Halbinsel ist dicht bewaldet."
1220-1240	Sachsenspiegel und Jütisches Low verbieten Waldverwüstung.
13. Jahrhundert	Grenzwaldrodungen zwischen Eider und Schlei. Rodung großer Teile des Kropper Busches (1226-1236).
Um 1470	Beginn der Glasherstellung Glashütten wandern mit dem Wald. Niedergang dieses Gewerbes mit Ausgang des 17.Jhs. wegen Holzmangel.
1559	Erzwungene Niederlegung der Dithmarscher Bauernwaldungen an der Grenze zu Holstein.
1580	Erster Nadelholzanbau (Kiefer, Fichte, Eibe) durch Graf zu Rantzau auf Breitenburg.
Um 1590	Blüte der Waldweide und Schweinemast.
Um 1600	Nordfriesland und Schleswig'sche Geest bereits weitgehend entwaldet. Einfuhr von Bauholz nach Nordfriesland aus Norwegen.
1617	Erste Holzschulordnung in Dithmarschen fordert Erhaltung und Pflege des Waldes und Anlage von Pflanzgärten.
1618-1648	Der 30jährige Krieg dezimiert die Bevölkerung; der Wald erobert im landwirtschaftliche Flächen zurück, z.B. im Sachsenwald.
1623	Erste landesherrliche Forstordnung ("Stapelholmer Konstitution").
1671	Erste Königliche Holzordnung für die Herzogtümer Schleswig und Holstein.
1737	Königliche Holz- und Jagdverordnung fordert zur Linderung der Holznot, daß der Bräutigam auf der "Bräutigamskoppel" vor der Eheschließung 10 Eichen oder 15 Buchen pflanzen und ins dritte Blatt bringen soll und empfiehlt Nadelholzaufforstungen.
1777-1784	Bau des Eiderkanals. Großer Holzverbrauch für den Kanalbau und nachfolgend durch Holzexport. Das Gut Hanerau verliert durch den Kanalbau große Waldflächen.
Um 1780	Tiefster Stand der Bewaldung Schleswig-Holsteins; es gibt nur noch etwa 75.000 ha Wald. Ein Großteil des Landes (etwa 16%) ist Heidefläche. Beginn größerer Nadelholzaufforstungen.
1784	Allgemeine neue Forst- und Jagdverordnung: König Christian VII. regelt modern und umfassend Forstwirtschaft und Forstverwaltung, die Jagd und die Moorwirtschaft. Die forstaufsichtlichen Bestimmungen gelten bis 1950.
1792	Erste Vermessungen der im Zuge der Verkopplung mit Wall und Graben eingehegten Waldungen ("Gehege").
1837-1848	Erste Taxation der landesherrlichen Wälder in den Herzogtümern Schleswig und Holstein; im Herzogtum Lauenburg bereits 1815/16.
1866	Gründung der Dänischen Heidegesellschaft.
Um 1870	Gewinnung von Eichengerbrinde erlischt wegen ausländischer Konkurrenz und moderner Gerbverfahren.
1874	Gründung des "Ersten Schleswig-Holsteinischen Waldverbandes" - Vorläufer der Waldbauvereine - im Aukrug.
1875	Preußisches Gesetz betreffend Schutzwald und Bildung von Waldgenossenschaften.
1934	Reichsgesetz gegen Waldverwüstungen
1935	Wallheckenverordnung
1945-1947	14.000 ha von insgesamt 123.000 ha Wald für Brennholzgewinnung und Reparationen kahlgeschlagen.
1947	Letzte große Sandverwehungen in 50 Gemeinden Schleswig-Holsteins; Waldbildung und Windschutzanlagen vor allem im Gebiet des "Programm-Nord" beenden dieses Problem.
1950	Schleswig-Holsteinisches Walderhaltungsgesetz. Beginn der forstlichen Standortkartierung in den Landesforsten. Abschluß 1964.

D. Methodik

D.1. Heuristik und Mustererkennung

D.1.1. Heuristik

Bei der Wahl der Methodik steht zu Beginn die Frage nach der zweckmäßigsten Vorgehensweise: Wie kann der gesuchte Prozeß, wie können mögliche Veränderungen oder Zusammenhänge am schnellsten erkannt werden? Es gibt (mindestens) zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen:

- ► Der induktive Ansatz versucht, aus Einzelbeobachtungen auf allgemeine Zusammenhänge zu schließen (auch: bottom up, vom Speziellen zum Allgemeinen).
- ► Der deduktive Ansatz hingegen folgert aus einem allgemeineren Modellverständnis heraus, wie z.B. einer bekannten Verteilung, auf den Einzelfall (auch: top down, vom Allgemeinen zum Speziellen).

Für die Untersuchung des Stör-Einzugsgebietes wurde bewußt der deduktive Ansatz ausgewählt. Dieser erscheint für die Analyse natürlicher Systeme wesentlich besser geeignet. Die notwendigen Analysen und Einzelbeobachtungen können allmählich stark reduziert werden, da nicht alle möglichen auf das System einwirkenden Faktoren, sondern nur die als wesentlich erscheinenden zu untersuchen sind.

Die deduktive Methodik ermöglicht es, die Vorgehensweise an die gezielten Beobachtungen zurückzukoppeln. Die gewonnenen Erkenntnisse erweitern die bisherige Erfahrung und beeinflussen damit das weitere Vorgehen. Diese Vorgehensweise kann als heuristischer Erkenntnisprozeß bezeichnet werden. Bei der deduktiven, heuristischen Methodik wird, ausgehend von der vorhandenen Erfahrung, eine Erwartungshaltung generiert und durch die Beobachtung der Natur überprüft. Abweichungen deuten auf Prozesse oder Zusammenhänge hin, die bislang noch nicht berücksichtigt wurden. Diese können so erkannt werden und die Wissensbasis verbreitern, bis die Änderung der Erwartungshaltung nur noch marginal ist.

Auf der Grundlage der deduktiven Methodik können die beobachteten räumlichen und zeitlichen Ebenen auch in eine Hierarchie eingeordnet werden, z.B. in der Abfolge Gesamtgebiet - Teileinzugsgebiet - Teilfläche oder Jahr - Jahreszeit - Tag. Diese Hierarchie ermöglicht es, den Einfluß der festgestellten Prozesse abzugrenzen und einzuschätzen. Beispielsweise wird der Einfluß eines Prozesses auf Tagesbasis wenig Einfluß auf das Jahresmuster haben. Die in der Hierarchie weiter oben stehenden Ebenen können dazu dienen, Abweichungen untergeordneter Ebenen darzustellen: Räumlich können z.B. die Abweichungen der Teileinzugsgebiete vom Gesamtgebiet aufgezeigt werden, zeitlich z.B. die Differenzen zwischen dem Abfluß eines monatlichen Intervalles zum ganzen Jahr. Die übergeordnete Ebene dient als Referenzrahmen. Die Abweichungen (Residuen) von dieser lassen die Eigenheiten der Teilgebiete deutlicher hervortreten (Regionalanalyse, s.u.). Daraus kann auf die dafür verantwortlichen Prozesse geschlossen werden.

D.1.2. Muster

Prozesse, Strukturen und deren Verteilung sind in der Natur nicht zufällig. Deshalb reicht ein einzelner Mittelwert, der die zeitlichen und räumlichen Phasen der Prozesse nicht berücksichtigt, nicht für die Beschreibung der Natur aus. Ein wesentlicher Teil der Information besteht in der räumlichen

und zeitlichen Verteilung der Werte. Wird eine Beobachtung über eine gewisse Zeit oder einen bestimmten Raum hinweg fortgesetzt, lassen sich bei passender Wahl der Beobachtungsfrequenz Muster, d.h. kontinuierlich wiederkehrende Phasen, erkennen (Bsp.: Tagesgang der Temperatur, vgl. Anhang 2, E.1.1). Diese Muster sind das Ergebnis energiedissipativer Prozesse (s. unten).

Die Ergebnisse der Beobachtungen können für jeden Parameter oder Prozeß in einer Verteilung (Häufigkeitsverteilung oder Summenkurve) dargestellt werden. Zusammenfassend können aus den Einzelbeobachtungen Perzentilwerte, ein Mittelwert (z.B. als mittlere Prozeßintensität) und ein Streuungsmaß (z.B. die Varianz oder die Amplitude) berechnet werden.

Die Einzelbeobachtungen sind in der Regel nicht normalverteilt (größte Häufigkeit beim Mittelwert, Abweichungen vom Mittelwert nach oben und nach unten gleich häufig), sondern schief verteilt (Häufung bei geringeren oder höheren Werten). Zur Beschreibung und Einschätzung von Prozessen wird nicht nur der Mittelwert herangezogen, sondern auch die Varianz, da diese nicht als zufällig angesehen werden, sondern in einem dissipativen System Rückschlüsse auf die Prozeßkopplung und die Effizienz ermöglichen.

Wird die Beobachtung lange genug fortgesetzt, kann das Muster mehrmals aufeinander folgend erfaßt werden (z.B. mehrere Tagesgänge der Temperatur). Jeder Beobachtungszyklus (z.B. Tag) wird etwas vom vorherigen abweichen. Deshalb ist es sinnvoll, das mittlere Muster zu bilden. Dazu sind die Mittelwerte und die dazu gehörigen Varianzen für jeden sich wiederholenden Zeitpunkt über den ganzen Zyklus zu berechnen. Verändert sich das Muster mit zunehmender Beobachtungsdauer, weist dies auf einen anderen, übergeordneten Prozeß hin. So verändert der jahreszeitlich modulierte Energiepuls das tägliche Temperaturmuster (vgl. Kap. E.1.1). Aus dem Muster kann auch die erste Ableitung, die die Steigung der Kurve und damit den Grad der Veränderung des Parameters ausdrückt, gebildet werden. Dadurch sind die Phasen starker Veränderung, d.h. hoher Prozeßdynamik, deutlich zu erkennen (z.B. Erwärmung und Abkühlung).

Die Muster einzelner Teilgebiete bzw. Zeiträume können von dem Muster des Gesamtgebietes abweichen. Treten diese Varianzen in einem zeitlichen Muster auf, ist dies auf Unterschiede in der räumlichen Struktur zurückzuführen. Beispielsweise können Differenzen im Abfluß (zeitliches Muster) durch die unterschiedliche Landnutzung oder Hangneigung der Einzugsgebiete bedingt sein (räumliche Struktur). Die Varianz räumlicher Muster ist hingegen mit dem Energiemuster (zeitliche Komponente) zu erklären. So sind die Varianzen der Oberflächentemperatur im Satellitenbild (räumliches Muster) in jahreszeitlich unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten begründet.

Beispiele für räumliche Muster
- Verteilung der Oberflächentemperatur (Karte)
- Temperaturprofile (Kap. E.1.1)
- Wasserdurchfluß (Karte)
- Fließgewässer (Karte)

Beispiele für zeitliche Muster:
- Jahreszeiten
- Tag-Nacht-Wechsel (Kap. E.1.1)
- Hydrologisches Jahr (Kap. F.6.1)
- Niederschlagskurve (Kap. F.1)
- Grundwassergang (Kap. F.2)

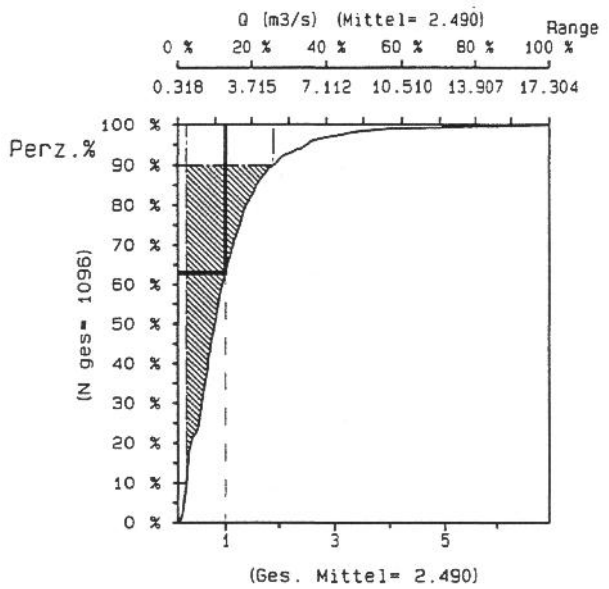


Abb. 24: Beispiel eines Verteilungsdiagramms. Auf der linken Achse sind die Perzentilwerte aufgetragen. Aus ihnen kann abgelesen werden, wieviel Prozent der Meßwerte (die nach der Größe sortiert sind) unter oder über einem bestimmten Meßwert liegen. Der Medianwert ist identisch mit der 50%-Perzentile. Auf der oberen Achse sind die Meßwerte prozentual aufgetragen (Minimum = 0%, Maximum = 100%) und als Absolutwerte (hier der Abfluß in m3/s). Die untere Achse zeigt die Meßwerte als Vielfache des Mittelwertes.

Die Verteilung kann neben der Abbildung der Muster auch in Form von Verteilungsdiagrammen (Summenkurven) dargestellt werden (vgl. Abb. 24). In diesen Diagrammen wird die Summenhäufigkeit eines Parameter (z.B. Abfluß in m^3/s) für die Gesamtheit aller Werte (0-100% Perzentile) oder eines Teiles (z.B. 5-95% Perzentile) angegeben. An der oberen x-Achse sind die Werte absolut und relativ aufgetragen, an der unteren x-Achse als Mittelwertsfaktor (d.h. die auf den Mittelwert normierte Schwankung). Die Anzahl der zugrunde gelegten Messungen ist an der y-Achse vermerkt (n ges). Die eingezeichneten dicken Linien kennzeichnen den Mittelwert des Datensatzes als Absolut- und Relativwert an der oberen x-Achse und als Perzentilwert an der y-Achse. Das Gesamtmittel des Datensatzes ist unter der Graphik angegeben. In der Beispielsgraphik ist der Bereich der 10-90% Perzentile durch Schraffur hervorgehoben. Dieser wird durch dünne, unterbrochene Linien begrenzt, die das Ablesen des jeweiligen Absolutwertes ermöglichen.

Anhand solcher Verteilungsdiagramme lassen sich Meßwerte als Perzentilwerte angeben, was eine Einschätzung bezüglich ihrer Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit ermöglicht.

Beobachtungsfrequenz

Damit über die Beobachtung Muster abgebildet werden, muß die Häufigkeit der Beobachtung bzw. die Größe des betrachteten Raumes auf den zu beobachtenden Prozeß abgestimmt sein. Bei einer zu geringen Beobachtungsfrequenz werden Prozesse mit höherer Frequenz nicht erkannt (z.B. Tagesschwankungen mit monatlichen Messungen). Wird keinerlei Muster festgestellt, so ist dies ein Hinweis auf eine zu geringe Meßfrequenz. Eine zu hohe Meßfrequenz bildet zwar den Prozeß ab, liefert aber auch redundante Daten (Daten ohne Informationsgehalt, unnötiger Meß- und Verarbeitungsaufwand).

Bedeutung von Mittelwert und Varianz

Wird ein Prozeß (z.B. der Abfluß) beobachtet, so gibt der Mittelwert die relative Prozeßintensität wieder. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Amplitude des Prozesses und kann so auch die Dämpfungseigenschaften des Systems ausdrücken. Über die Veränderung (1. Ableitung) der beiden Größen ist darüber hinaus eine Beurteilung möglich, wie spontan bzw. wie gedämpft der Prozeß verläuft. Mittelwert und Schwankungsmaß werden nicht als statistische Größen verwendet. Statt dessen dienen sie als Kennwerte der ermittelten Verteilungen und der darüber ausgedrückten Prozesse.

Das Muster energiedissipativer Prozesse

Die Energie aus der Wechselwirkung der Sonne mit der Erde weist eine tägliche Amplitude auf, die in unseren Breitengraden deutlich jahreszeitlich moduliert ist (zeitliches Energiemuster). Energie-

dissipative Systeme, wie die ZKSen, dissipieren den Energiepuls und lenken die resultierende Temperatur mehr oder weniger effektiv in Richtung des Mittelwertes ein (vgl. Kap. B.2). In Abhängigkeit von der Effizienz des Energieumsatzes eines Gebietes spiegeln sich die täglichen und jahreszeitlichen Muster des Energiepulses in den Temperaturen wider (vgl. Kap. E.1.1). Da die Energiedissipation zu großen Teilen durch die Verdunstung und Kondensation von Wasser erfolgt, weist auch der Abfluß ein jahreszeitliches Muster auf (vgl. Kap. F.2.1.2).

Jeder dissipative Prozeß besteht aus vier Phasen: In der Ausgangsphase (I) weisen die Werte nur geringe Schwankungen auf, wie z.B. die nächtliche Oberflächentemperatur einer Wiese. In der Anstiegsphase (II) ändern sich die Werte relativ schnell. Beispielsweise erwärmt sich im Laufe des Vormittags die Wiese an einem Sommertag sehr rasch. Während der Haltephase (oder Abflaufphase) (III) weisen die Werte nur noch geringe Schwankungen auf, so wie die Temperatur der Wiese in den frühen Nachmittagsstunden. In der Abstiegsphase (IV) kühlt die Wiese wieder aus, die Werte verändern sich wieder rascher. Diese Phasen finden sich in anderen Prozessen, wie z.B. dem Jahresverlauf des Abflusses, ebenso wieder.

D.1.3. Heuristik zur Erfassung des Stoffaustragsprozesses

Die Analyse des Stoffaustragsprozesses hat zum Ziel, durch ein verbessertes Systemverständnis, d.h. ein Verständnis der Prozesse in ihrer räumlichen und zeitlichen Kopplung, die andauernden Stoffverluste über eine veränderte Bewirtschaftung zu reduzieren (Steigerung der Nachhaltigkeit, vgl. Kap. B.5).

Ableitung der Meßfrequenz

Um den Stoffaustrag erfassen zu können, sind vor allem der Abfluß und die chemische Zusammensetzung des Wassers zu messen. Dazu ist eine zeitlich und räumlich angepaßte Meßfrequenz bei möglichst geringem Meßaufwand notwendig.

Die räumliche Abgrenzung wird durch den gerichteten Fluß des Wassers, dem Transport- und Reaktionsmedium, vorgegeben. Deshalb bieten sich Einzugs- bzw. Teileinzugsgebiete als räumliche Abgrenzungen an. Das Gebiet der Stör wurde, ausgehend von der zunächst vorgesehenen Simulation von Abflußdaten, in Berechnungsabschnitte unterteilt (vgl. Karte Berechnungsabschnitte, Kap. D.5.4).

Die zeitliche Abgrenzung leitet sich aus dem die Prozesse antreibenden Energiemuster mit täglicher Frequenz und jahreszeitlicher Modulation ab. Die Schwankungen des Abflusses sind stark von den Niederschlagsereignissen abhängig, die ihrerseits den energiedissipativen Verdunstungsprozeß der Vegetation bzw. der Meeresoberfläche widerspiegeln (vgl. Kap. B.3). Die Niederschlagsereignisse weisen in unseren Breitengraden kein Tagesmuster auf und dauern teilweise nur kurze Zeit an. Dies gilt auch für besonders abflußwirksame Starkregenereignisse. Deshalb wurde für die Abflußmessung eine hohe Meßfrequenz gewählt (Meßsonden mit 20minütiger Auflösung). - Die Stoffaustragsmuster als Resultat der täglichen Energiedissipation sind eher im Jahresmuster zu erkennen (Kap. F.2.1.3). Deshalb wurde die Probenahme auf einen monatlichen Rhythmus (zu Beginn: zweimonatlichen) beschränkt. Die Auswertung zeitlich hochauflösender Leitfähigkeitsmeßsonden rechtfertigt dieses Vorgehen, da der mögliche Fehler innerhalb tolerierbarer Grenzen liegt (vgl. Kap. F.1.1.3).

Hierarchische Vorgehensweise
Um die Bedeutung des Stoffverlustprozesses der einzelnen Teileinzugsgebiete für das Gesamtgebiet einschätzen zu können, werden die Muster des Gesamtgebietes als Referenzrahmen verwendet (Mittelwert und Standardabweichung, z.B. der Konzentration oder des spezifischen Abflusses). Dabei können folgende räumliche Ebenen unterschieden werden:

- ► Gesamtgebiet Stör
- ► Teileinzugsgebiete (Stör, Bramau, Osterau etc.)
- ► Berechnungsabschnitte (n=34) auf der Grundlage der Teileinzugsgebiete
- ► Einzelfläche (Pixel) im GIS.

Musteranalyse und Rückkopplung
Aus den Messungen können die Muster der Konzentrationen, der Abflüsse und der Frachten erstellt werden. Der Vergleich der Muster läßt eine Differenzierung der Gebiete, z.B. nach ihren Abflußcharakteristika, zu. Die Ergebnisse der Analyse sind unter Kap. F.2.1 dargestellt.

Durch die rückgekoppelte Vorgehensweise ist es möglich, die bisherige Erwartungshaltung aufgrund von Abweichungen zum beobachteten Muster zu modifizieren. Diese Abweichungen sind ebenfalls in Kap. F.2 dargestellt.

D.2. Analyse der Transportprozesse anhand der Gewässermorphologie

D.2.1. Indikatoreigenschaften der Fließgewässer

Im landschaftlichen Selbstoptimierungsprozeß sind die Fließgewässer über den gerichteten Wasser- und Stoffffluß der Einzugsgebietsfläche nachgeordnet. Morphologie und Zönosen eines Fließgewässers spiegeln dabei über ihre Strukturierung die Dynamik im Wasser- und Stoffhaushalt des Einzugsgebietes wider. Sie können daher als Indikatoren des landschaftlichen Wirkungsgrades betrachtet werden (Kap. B.4).

Der heute nur geringe landschaftliche Wirkungsgrad, der für das Einzugsgebiet der Stör aus der Entwicklung des Landschaftswasserhaushaltes sowie über die Gebietsanalyse (Kap. C.2) abgeleitet werden kann, geht in den Fließgewässern mit einer hohen Dynamik der Strukturen einher: Die hohen Stoffeinträge und Schwankungen des Hydrographen (Kap. F.1.3) führen temporär zur Dominanz weiträumiger Materialtransporte (verlustreiche Energiedissipation, Kap. B.4.1). Bei ungehinderter Entwicklung der Gewässer entstünden durch die Verlagerungsprozesse hauptsächlich in Mündungsbereichen oder Flußaufweitungen Auflandungs- und damit verbunden Überschwemmungszonen. Durch ihre gefällemindernde Wirkung wären diese Verlandungen Ausgangspunkte einer rückschreitenden Materialakkumulation unter Verbreiterung des Fließquerschnitts. Die so vergrößerte Phasengrenzfläche Wasser-Substrat erhöhte den Strömungswiderstand des Fließgewässerbettes allmählich. Folge dieser Fließgewässerentwicklung wäre eine nachhaltigere Funktionsweise, charakterisierbar als Rückgang großräumiger Materialtransporte zugunsten kleinräumigerer Beschleunigungen und Verzögerungen des Wassers entlang weitgehend stabiler Oberflächen (verlustarme Energiedissipation, Kap. B.4.1).

Wesentlich beschleunigt wird die Entwicklung der Fließgewässer in Richtung einer nachhaltigeren Funktionsweise durch den Eintrag von abgestorbenem Pflanzenmaterial (Laub, Totholz). Die daraus gebildeten Strömungshindernisse tragen im Gegensatz zur Wasservegetation auch außerhalb der Vegetationsperiode sowie in beschatteten Abschnitten zur Stoffretention im Fließgewässer bei.

Die heutige Gewässerbewirtschaftung verhindert neben der Verkleinerung bzw. Beseitigung der Gewässeraue auch durch das Unterbinden von Ufererosion (Uferbefestigung), Begradigung und durch das Entfernen sedimentierten Materials (Räumung von Gräben und Sandfängen), daß die Gewässer eine der Abflußdynamik entsprechende dissipative Struktur entwickeln können. Senken sowohl für die eingetragenen als auch für die im Gewässer erodierten Stoffe werden dadurch weiter in Richtung der globalen Senke Meer verlagert. Weiträumige Materialtransporte in den Fließgewässern werden so aufrechterhalten, weshalb die Nachhaltigkeit der gesamten Landschaft dauerhaft minimiert ist.

Eine entwickelte morphologische Gewässeranalyse soll eine Abschätzung über den Stoffrückhalt im Fließgewässer und damit über dessen Nachhaltigkeit in der Funktionsweise geben. Diese Strukturanalyse ist somit als eine Prozeßanalyse zu verstehen. Betrachtungsschwerpunkt bildete der Strukturierungsgrad des Fließgewässers in Abhängigkeit der dortigen Transportprozesse (stoffverlustreiche bzw. -arme Energiedissipation im Gerinne, Kap. B.4.1, D.2.1). Da die Dynamik der Transportprozesse wesentlich vom Abflußgang bestimmt ist, stellte die Abflußkurve zusammen mit gezielt ausgewählten morphologischen Kriterien die wesentlichen Untersuchungsparameter dar. Diese Prozeßanalyse wurde beispielhaft an drei Gewässern in Teileinzugsgebieten der Stör durchgeführt. Auf ihrer Grundlage konnte eine Aussage bezüglich der Nachhaltigkeit nicht nur des Fließgewässers, sondern auch des gesamten Einzugsgebietes getroffen werden.

Hervorzuheben ist, daß diese Methodik zur Abschätzung der verlustarmen Funktionsweise grundsätzlich auf jedes Fließgewässer angewendet werden kann, unabhängig von dessen Größe, Unterhaltung oder Untergrundbeschaffenheit. Diese Unterschiede führen lediglich zu Abweichungen in der Art des dominierenden Partikelspektrums sowie der Größe der Wasserbeschleunigungs- und -verzögerungszonen und der daran gebundenen Strukturverteilung. Abschätzungen der gewässerspezifischen Stoffrückhaltefähigkeit sind jedoch bei zusammenhänglicher Betrachtung sämtlicher Strukturparameter und bei Einbeziehung des Hydrographen dennoch möglich.

Herkömmliche Beschreibungen zur Funktionsweise von Fließgewässern unterscheiden sich von dem vorliegenden durch ihren vorwiegend strukturell geprägten Ansatz (z.B. Lawa Rheinland-Pfalz 1994). Dieser Ansatz greift auf das Idealbild eines naturnahen Gerinnes zurück. Auf Grundlage dieses Idealbildes werden den Verhältnissen beim Sohlsubstrat, dem Profil oder der Ufervegetation bestimmte Naturhaushaltsfunktionen zugeordnet, wie z.B. Hochwasserrückhaltevermögen oder Lebensraumbildung für Zönosen. Damit wird der Struktur vorrangige Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des Gewässers zugeordnet und nicht dem abflußabhängigen Selbststrukturierungsprozeß, der die Morphologie und Zönosen sowohl in der äußeren Ausbildung (Vielfalt) als auch in der Funktionsweise (z.B. Stabilität/Dauerhaftigkeit) prägt.

D.2.2. Die Indikatoreigenschaft der Morphologie für die Transportprozesse im Gewässer

D.2.2.1. Auswahl der morphologischen Parameter

Ziel der Analyse war die Beschreibung von Strukturmerkmalen, die auf eine stofftransportarme Dissipation im Fließgewässer rückschließen lassen. Dabei wurden folgende Parameter ausgewählt:

Der Formfaktor

Der Formfaktor beschreibt anhand des Gewässerquerschnittes die Strömungswiderstände im Gewässerbett und damit die Intensität der Materialtransporte bei der Energiedissipation. Mit dem Wasserspiegel schwankt auch der Formfaktor (Abb. 25): In einem verlustarm funktionierenden Gerinne ist der Strömungswiderstand durch die Aufweitung und Abflachung des Fließquerschnitts maximiert (Kap. B.4.1). Verbunden damit wird schon bei geringem Abflußanstieg ein Uferübertritt begünstigt. Der vergrößerte Gewässerquerschnitt und Strömungswiderstand in der Gewässeraue lassen den Formfaktor je nach Ausmaß der Abflußerhöhung erheblich ansteigen. Geringe Schwankungen des Formfaktors bei Hoch- und Niedrigwasser charakterisieren dagegen einen fehlenden Uferübertritt des Wassers. Seine unzureichende Verzögerung bei Abflußanstieg, Folge des minimierten Strömungswiderstandes durch den nur geringen benetzten Fließquerschnitt, begünstigt intensive Materialtransporte.

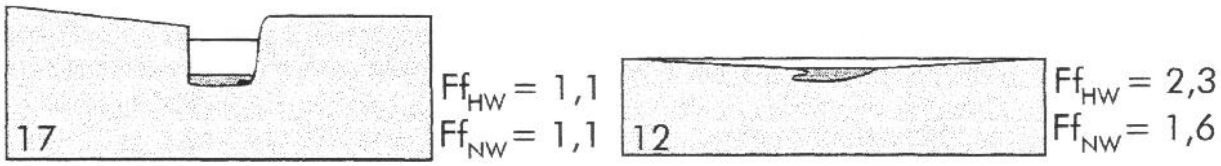


Abb. 25: Der Formfaktor verschiedener Querschnittsformen von Gewässerprofilen.
Li.: Himmelreichbach, Kartierquerschnitt 17. Re.: Himmelreichbach, Kartierquerschnitt 12. Maßstab 1:100. Durchgezogene Linie: Wasserstand am Tag der Kartierung. Gestrichelte Linie: Möglicher Hochwasserstand. Ff_{HW}: Formfaktor bei Hochwasser, Ff_{NW}: Formfaktor am Tag der Kartierung mit Niedrigwasserführung.

Einfluß auf die Wasserverzögerung im Gerinne nimmt das Verhältnis von benetztem Umfang zur Querschnittsfläche: Der Querschnitt eines halbkreisförmigen Profils besitzt den geringsten Umfang und setzt daher der Strömung den geringsten Widerstand entgegen. Je mehr das Gewässerprofil von dieser Form abweicht, desto stoffverlustärmer funktioniert das Fließgewässer.

Der Formfaktor (F_f) berechnet sich aus dem Verhältnis des Umfangs des benetzten Fließquerschnitts (U_G) zum Umfang eines Halbkreises (U_K) gleicher Querschnittsfläche (Berechnung vgl. Anhang 1):

$$F_f = U_G : U_K$$

Die Angaben des Formfaktors bei Hochwasser beruhen dabei auf geschätzten Wasserständen. Eigene Beobachtungen und die Befragung von Flächenanliegern bestätigen eine grobe Annäherung an reale Verhältnisse. Die angenommenen Wasserstände orientieren sich an der Differenz der an den Pegelmeßstellen ermittelten m.ü.NN am Tag der Kartierung und einem Hochwasserereignis. Der dort ermittelte Anstieg des Wasserstandes wurde prozentual auf die einzelnen Querschnitte im Gewässer übertragen (Methodik vgl. Anhang 1).

Der Pflanzenformfaktor

Während der Vegetationsperiode stellen die Oberflächen submerser Wasserpflanzen zusätzliche Strömungswiderstände dar. Sie wurden daher als Pflanzenformfaktor dem benetzten Umfang des Gewässerbettes zugeordnet. Besonders in kleineren Gerinnen können die Pflanzenoberflächen die Wasserbewegung stark verzögern. Im strömungsärmeren Inneren des Bestandes werden dadurch verstärkt Sedimente und organisches Material akkumuliert und sind Ausgangspunkte einer fortschreitenden Gerinnestrukturierung (Abb. 26).

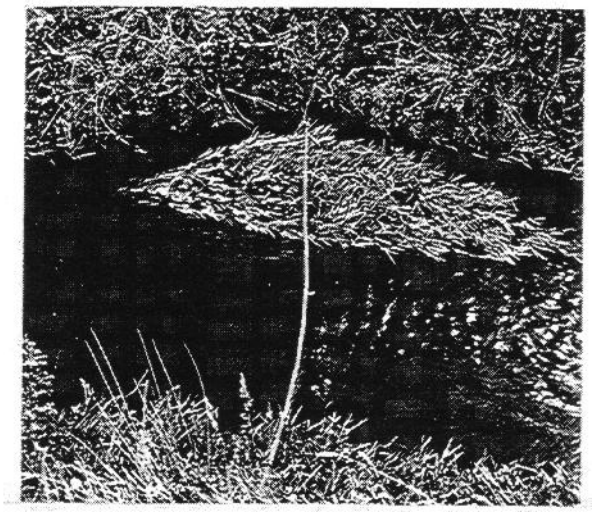


Abb. 26: Links: Einsetzende Strukturierung des Gewässerbettes durch Unterwasservegetation Oben: Ein Sproß findet im Gewässerbett Halt und vermehrt sich vegetativ. Mitte: Der entstehende Schwaden verzögert die Wasserbewegung und fördert die Sedimentbildung (punktiert dargestellt). Unten: Der an Höhe zugenommene Schwaden verengt den darüberliegenden Fließquerschnitt. Das dort beschleunigte Wasser bildet hinter dem Hindernis Wirbel. Folge ist eine Sohlerosion, die zur Unterspülung bis hin zur Loslösung des Schwadens führen kann. Deutlich sichtbar wird auch, daß das Wasser durch das Hindernis in vertikale Schwingungen versetzt wird, die in Fließrichtung zur Ausbildung von Erosionstälern und Sedimentbänken führen (nach Gessner 1955:290, verändert). Rechts: Das durch den Schwaden seitlich verdrängte Wasser hat das Ufer erodiert. Der Gesamtfließquerschnitt ist dadurch verbreitert worden (Photo der Schmalfelder Au).

Der Pflanzenformfaktor wurde wie folgt berechnet (vgl. Anhang 1):

- ► Die in den Gewässern vorgefundenen Pflanzen wurden entsprechend dem Faktor der durch sie bewirkten Oberflächenvergrößerung klassifiziert (Bestimmung von Oberflächenvergrößerungsfaktoren).

- ► Zur Ermittlung der Vergrößerung des Gesamtumfangs am Kartierquerschnitt wurde der von den Pflanzen besiedelte Umfang zunächst vom Gesamtumfang abgezogen, nach Berechnung seiner Vergrößerung (mittels Vergrößerungsfaktor bei jeweiligem Vegetationsdeckungsgrad) diesem wieder zuaddiert.

- ► Der vergrößerte Gesamtumfang wurde der Berechnung des Formfaktors zugrundegelegt und ergab den Pflanzenformfaktor.

Die Breiten-Tiefen-Varianz

Die Breiten-Tiefen-Varianz des Gewässerbettes zeigt die räumliche Abfolge von Fließstrecken beschleunigter und verzögerter Wasserbewegung und damit die Länge der Verlagerungsstrecken im Materialtransport an. Bei einer stoffverlustarmen Energiedissipation dominieren kleinräumige

Fließgeschwindigkeitsgradienten, die in der dichten Abfolge aufgeweiteter, flacher und verengter, tiefer Abschnitte sowohl im Längs- als auch im Querverlauf sichtbar werden.

Ermittelt wurde die Breiten-Tiefen-Varianz durch die Differenz zwischen der Gewässerbreite am Kartierquerschnitt (Breite Q) und der des darüberliegenden Abschnitts mit veränderter Breite/Tiefe (Breite AQ) sowie der des darunterliegenden Abschnitts mit veränderter Breite/Tiefe (Breite EQ) (Abb. 27):

Breitenvarianzzahl = (Q - AQ) * (Q - EQ)

Die errechneten Werte wurden gewässerspezifisch in vier Klassen unterteilt (vgl. Anhang 1, 1.4).

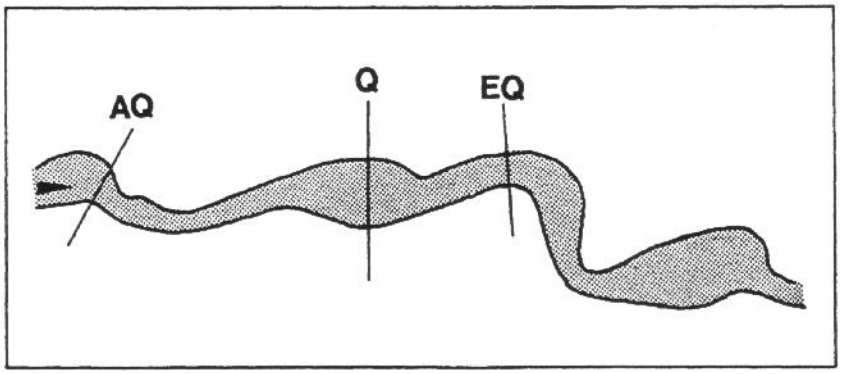


Abb. 27: Die Breitenvarianz am Beispiel des Himmelreichbachs (Kartierquerschnitt 3, Maßstab 1:200). Breite am Kartierquerschnitt (Q): 14 dm. Breite am darüberliegendem Anfangsquerschnitt (AQ): 8 dm. Breite am Endquerschnitt (EQ): 7 dm. Die Breitenvarianzzahl ergibt 42, was im Himmelreichbach einem hohen Wert entspricht (vgl. gewässerspezifische Klassifizierung der Breitenvarianz, Anhang 1).

Das Partikelspektrum

Das Partikelspektrum ermöglicht über das Ausmaß der Korngrößensortierung Rückschlüsse auf die Abflußschwankung und damit auf die Dynamik der Transportprozesse im Gerinne (Kap. B.4.1.1):

Große Abflußschwankungen gehen temporär mit großen räumlichen Fließgeschwindigkeitsgradienten einher und führen damit zu weiträumiger Substratsortierung nach Größe und Form. Die dadurch entstehende Homogenität des Partikelspektrums wird durch die gleichzeitig gegebenen Extreme in der Niedrigwasserführung weitgehend aufrechterhalten: Mit Ausnahme der gefällereicheren Lagen dominieren zeitgleich weiträumig Akkumulationsprozesse. Ein verlangsamter Sortierprozeß in den Zeiträumen zwischen den Abflußspitzen und damit eine geringe Vielfalt im Partikelspektrum ist die Folge.

Geringe Abflußschwankungen dagegen gehen mit einer fortschreitenden Materialsortierung einher. Entlang des so maximierten Strömungswiderstandes bilden sich zunehmend kleine Geschwindigkeitsgradienten. Es kommt zur Abfolge unterschiedlicher Korngrößen auf engstem Raum. Im Gerinne vorhandene Strömungswiderstände (z.B. Makrophyten, Totholz) beschleunigen den Sortierprozeß, minimierte Strömungswiderstände, z.B. als Folge der Gewässerunterhaltung, verlangsamen ihn (Abb. 28).

Das Partikelspektrum wurde als prozentualer Anteil einzelner Korngrößenfraktionen des Sohlsubstrats am Kartierquerschnitt geschätzt (vgl. Anhang 1).

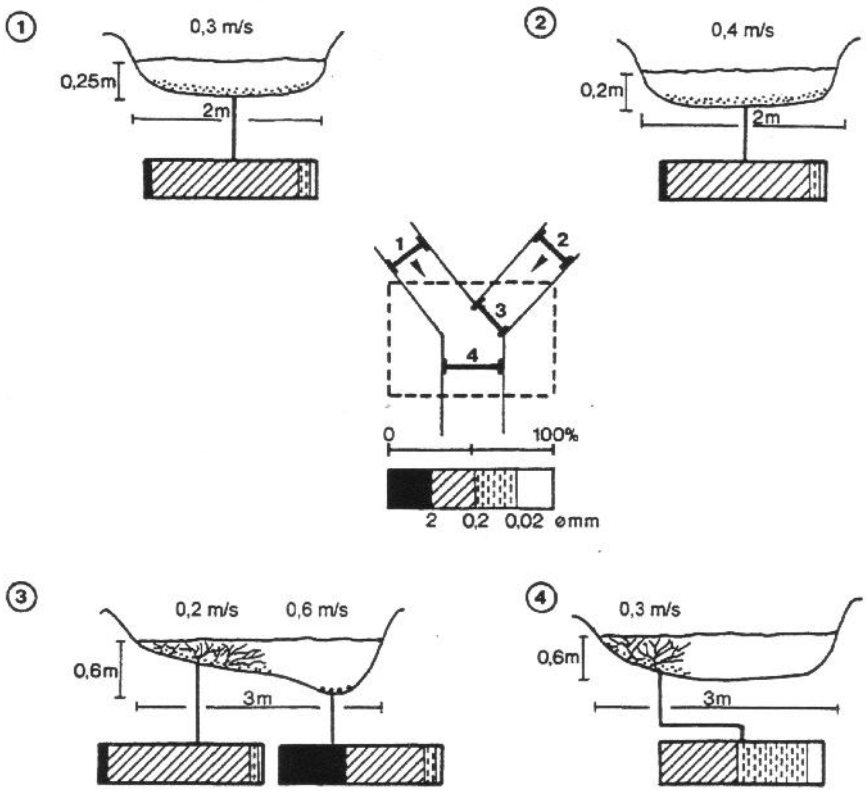


Abb. 28: Das Partikelspektrum am Zusammenfluß von Buerwischbek und Schmalfelder Au. Die homogene Korngrößenzusammensetzung an den Profilen 1 (Buerwischbek) und 2 (Schmalfelder Au) ist das Ergebnis stark gepulster Abflüsse und daran gebundener Materialeinträge aus dem Einzugsgebiet. Durch die minimalen Strömungswiderstände in den ausgebauten Gewässerläufen fehlen weitgehend kleinräumige Fließgeschwindigkeitsgradienten. Es findet kaum eine sichtbare Materialsortierung statt. Im Bereich des Zusammenflusses (Profil 3 und 4) kommt es aufgrund des vergrößerten Fließquerschnitts zu einer Wasserverzögerung und damit zu einer verstärkten Materialakkumualtion. Die dort einsetzende Strukturierung wird durch den zusätzlichen Strömungswiderstand siedelnder Pflanzen unterstützt. Innerhalb der Gewässerquerschnitte variiert der Strömungsgradient kleinräumiger, es kommt zu einer deutlich sichtbareren Materialsortierung.

D.2.2.2. Festlegung der Kartierquerschnitte

Zur Erfassung der morphologischen Strukturmerkmale wurde der Gewässerlauf in Kartierquerschnitte unterteilt. Die Untergliederung erfolgte entsprechend der vor Ort vorgefundenen Kleinräumigkeit der Gerinnestrukturierung. Änderungen in Breite und Tiefe des Bachbettes, wechselnde Sohlsubstrate oder das Auftreten von Wasserpflanzen in verschiedenen Dichten dienten zur Festlegung der Kartierquerschnitte. Die Angabe des Anfangs- und Endquerschnitts kennzeichnet dabei die Länge der Fließstrecke, deren Strukturierungsgrad als gleichbleibend erachtet wurde. Die kartierten Querschnitte können daher von Gewässer zu Gewässer je nach deren Größe und Geomorphologie (Gefälle, Untergrundbeschaffenheit) sowie dem Ausmaß ihrer Unterhaltung (Begradigung) sehr unterschiedliche Abstände aufweisen.

D.2.2.3. Festlegung des Kartierzeitraums

Der Zeitraum der Analyse lag in der Vegetationsperiode (August). Dadurch konnte zum einen die Entwicklung submerser Vegetation, einschließlich der Makrophyten, erfaßt werden. Daneben erleichterten die während der Sommermonate eher niedrigen Wasserstände die Erhebung der morphologischen Strukturmerkmale.

D.3. Meßkonzept

Im Unterschied zur Betrachtung technischer Prozesse ist die Betrachtung natürlicher Prozesse nur in ihrer räumlichen und zeitlichen Verknüpfung sinnvoll, da sie an das zeitliche und räumliche Energiemuster rückgekoppelt sind. Die Wahl des Raum- und Zeitfensters ist entscheidend für die Prozeßidentifikation und den Erkenntnisgewinn; es wirkt sich auch auf die Offenheit bzw. Geschlossenheit des betrachteten Systems aus. Die Naturbeobachtung kann somit vorrangig als Betrachtung von Verteilungen mit ihren Schwankungen und Mittelwerten aufgefaßt werden. Deshalb sollte zunächst eine Übersicht über den Prozeßverlauf an sehr vielen Meßpunkten gewonnen werden (z.B. zweimonatige Probenahme an über 200 Stellen, vgl. Kap. 3.2). Die Übersicht wurde dann durch eine Reduktion der Meßpunkte bei gleichzeitiger Erhöhung der Meßfrequenz vertieft (z.B. monatliche Probenahme an 128 Stellen, vgl. Kap. 3.2). Durch weitere Untersuchungen, z.B. die Messung der Leitfähigkeit mit zeitlich hochauflösenden Meßsonden, wurde sie in ihrer Beobachtungsschärfe gesteigert.

Einen wesentlichen Schwerpunkt bildete die Erhebung der Abflußdaten (Schreibpegel des Landesamtes bzw. Meßsonden mit 20minütiger Auflösung) mit einer parallelen monatlichen Wasserprobenahme. Über sie werden die Stoffverluste der Einzugsgebiete ermittelt (Stofffracht = Konzentration * Abfluß). Die Stoffverluste ermöglichen eine erste Beurteilung der Einzugsgebiete hinsichtlich ihres Wirkungsgrades bzw. ihrer nachhaltigen Nutzbarkeit. Zur Absicherung der Frachtberechnung wurden an einigen Abflußmeßstellen auch Leitfähigkeitsmeßsonden mit 20minütiger Meßfrequenz installiert.

Mit 4-Kanal-Temperatursonden sind die Temperatureigenschaften unterschiedlicher Standorte in einer Bodentiefe von 10 cm, an der Bodenoberfläche sowie in 10 cm und 200 cm Höhe über dem Boden registriert worden. Über die zeitlich hochauflösenden Temperaturdaten kann den Informationen aus der räumlichen Analyse der Flächennutzung und den Thermaldaten vom Satelliten ein Temperaturkennfeld zugeordnet werden.

Durch eine gekoppelte Betrachtung räumlich hochauflösender Daten (Fernerkundung, GIS) und zeitlich hochauflösender Daten (Messungen vor Ort) wird eine Überprüfung der Einzelergebnisse (z.B. der Karte des Wirkungsgrades der Landschaft oder der Verteilung der Oberflächentemperatur) ermöglicht. Die Repräsentativität der Fernerkundungsdaten bezüglich der Prozesse in der Landschaft kann über die Zeitreihen der Temperatur abgeschätzt werden. So trägt die zeitlich hochauflösende Erhebung der Temperaturdaten erheblich dazu bei, die jahreszeitlichen Veränderungen der Landschaft besser über Fernerkundungsdaten beurteilen zu können.

D.3.1. Abflußmessung

Für eine Beschreibung des stofflichen Verlustprozesses und dessen Änderung durch bestimmte Maßnahmen ist eine Erfassung des quantitiven Wasserhaushaltes unabdingbar.

Zur Bestimmung der Abflüsse als frachtbestimmender Größe wurden die Daten von 14 im Einzugsgebiet verteilten und vom Landesamt betriebenen Pegeln herangezogen. Zusätzlich waren zwischen Juni 1991 und März 1995 bis zu 24 Drucksonden zur Messung des Abflusses an weiteren Stellen eingesetzt. Die Installation der Pegel und die Erstellung der Pegelschlüsselkurven wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasserwirtschaft und Meliorationswesen der Christian-Albrecht-Universität Kiel durchgeführt. Die Erstellung der Pegelschlüsselkurven erfolgte nach dem Verfahren des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten.

Die Hälfte der Abflußsonden wurde Anfang 1993 für die Beobachtung der Bodenwasserganglinien an weiteren Orten eingesetzt, weshalb die Fehlzeiträume durch ein Verfahren zur Abschätzung der Abflüsse ergänzt werden mußten. Dieses Verfahren ist in Anhang 1 beschrieben.

D.3.2. Konzentrationsmessungen

Um einen Überblick über die Schwankungsbreite der Konzentrationen für einzelne Parameter (An- und Kationen, Alkalinität, Leitfähigkeit, Nährstoffe und Schwermetalle) und deren räumliche Verteilung zu bekommen, wurden 1991 an über 200 über das ganze Einzugsgebiet verteilten Probestellen in zweimonatlichem Abstand Wasserproben genommen. Diese wurden auf folgende Parameter hin analysiert:

Sonstige	Kationen	Metalle
pH	Calcium	Eisen
Leitfähigkeit	Magnesium	Mangan
Silikat	Natrium	Zink
	Kalium	Kupfer
Anionen	Ammonium	Cadmium
Alkalinität		Blei
Chlorid	Nährstoffe	Chrom
Sulfat	Gesamtphosphor	Nickel
	Gesamtstickstoff	Aluminium
	Nitrat	
	Nitrit	

1992 wurde zur Absicherung der Verteilungen auf monatliche Probenahme umgestellt und die Anzahl der Probestellen nach folgenden Kriterien auf 128 reduziert:

- ► Es sollte die Möglichkeit der Verknüpfung von Wasser- und Stoffffluß durch die eingerichteten Abflußmeßstellen in kleineren und größeren Teileinzugsgebieten gegeben sein, um darüber die Stoffverluste zu bilanzieren.
- ► Über alle Probestellen sollte insgesamt eine hohe Varianz der Meßwerte gegeben sein (Spektrum von niedrigen zu hohen Werten), um auf die vom Wasserfluß induzierten Prozesse Rückschlüsse ziehen zu können.

D.3.3. Einsatz der Leitfähigkeitsonden

Wichtigster Gesichtspunkt bei dem Einsatz der zeitlich hochauflösenden Leitfähigkeitssonden war die Überprüfung der auf monatlichen Probenahmen basierenden Frachtberechnung. Diese Überprüfung ist möglich, da die Leitfähigkeit ein Summenparameter für die Salzkonzentration ist (vgl. Kap. F.1.1.3). Als These wurde angenommen, daß ein starkes Absinken der Leitfähigkeit nur bei länger anhaltenden Regenereignissen im Jahresverlauf auftritt.

Zur Leitfähigkeitsmessung wurden 10 Leitfähigkeitssonden mit 20minütiger Auflösung in der Zeit zwischen März 1994 und März 1995 an 11 Standorten eingesetzt. Die Sonden wurden im März 1994 bei Hochwasser direkt im Gewässer installiert. Zwei Sonden (Standort 3 und 9) fielen bei fallendem Wasserstand im Frühjahr trocken. Diese wurden dann tiefergelegt. Für einen Teil des Sommers fiel die Meßsonde am Standort 7 aus. Der Standort 4 wurde Mitte Juli aufgegeben und der Standort 11 neu eingerichtet. Für die Standorte der Sonden in den einzelnen Gewässern sind

nachstehend der Gewässername, die Pegelbezeichnungen zur Abflußmessung und die nächstliegende Probenahmestelle für die monatliche Wasserproben aufgeführt.

Standort 1: Bach südlich von Heinkenborstel, Probestelle D-P3/170.
Standort 2: Osterau (P08/P11), nördlich vom Wildpark, Probestelle F-5/201x.
Standort 3: Stör bei Willenscharen (Landespegel 4135), Probestelle E-4/48.
Standort 4: Bach im Gehege Himmelreich (P01), Probestelle D-Q1-1/171a.
Standort 5: Himmelreichbach (P01), Probestelle D-Q6/171.
Standort 6: Wegebek (P17), Probestelle E-A3/257.
Standort 7: Prediger Au, Probestelle D-D3/111.
Standort 8: Schmalfelder Au (P26), Probestellen G-4/85 u. G-P1/86.
Standort 9: Dosenbek (P04), Probestelle B-F4/126.
Standort 10: Moorablauf Holmer Moor (P26), Probestelle G-7/221.
Standort 11: Stör bei Padenstedt (Landespegel 4200), Probestelle C-4/44.

Die Auswahl der Meßpunkte richtete sich nach folgenden Kriterien:
1. Absicherung der Bilanzierung der Stoffausträge durch Messung parallel zu einigen Abflußpegeln.
2. Unterschiede in der Flächennutzung sollten Hinweise auf deren Einfluß auf die Austräge geben. Meßpunkte in den oberen Einzugsgebieten, in denen einzelne Nutzungsarten dominieren, waren dafür am ehesten geeignet.

Die Leitfähigkeitssonden erfassen die unkorrigierte elektrische Leitfähigkeit und die Wassertemperatur über zwei Kanäle. Über die Formel

$LF_{kor} = LF_{unkor} + (LF_{unkor} * ß_{20}) * (T_R - T_{gem})$

$ß_{20} = [0.0228 + c*(T_{gem}-T_R)]/T_0$

LF_{kor} auf 20°C korrigierte Leitfähigkeit

LF_{unkor} unkorrigierte Leitfähigkeit

$ß_{20}$ Temperaturkoeffizient bei 20°C Referenztemperatur

c Veränderung von $ß_{20}$ pro °C = 0.0001

T_R Referenztemperatur

T_{gem} gemessene Wassertemperatur

T_0 1°C

werden die Werte auf eine Leitfähigkeit bei 20°C korrigiert.

D.3.4. Temperaturmessung

Die Dämpfung des Sonnenenergiepulses durch unterschiedliche nutzungsabhängige Vegetationstrukturen wurde durch die Messung ihres zeitlichen und räumlichen Temperaturverhaltens bestimmt.

Dafür wurden acht Vierkanal-Temperatursonden (Abb. 29) mit einer zeitlichen Auflösung von 20 Minuten an neun unterschiedlichen Standorten eingesetzt. Sie waren so installiert, daß die Temperatur 10 cm tief im Boden, an der Bodenoberfläche, 10 cm und 200 cm über dem Boden erfaßt wurde. Zeitlich wurde der Tages- bzw. Jahresgang erfaßt. Räumlich wurde an jedem Standort ein vertikales Temperaturprofil in 4 Höhen gemessen.

Abb. 29: Temperatursonden im Stör-Gebiet. Einige der Standorte im Störeinzugsgebiet: oben links der Ackerrandstandort nördlich des Geheges Himmelreich (Nr. 2), oben rechts der Standort im Dosenmoor (Nr. 6) und unten der Standort des lichten Erlen-Eschenwaldes im Gehege Himmelreich (Nr. 1) - links ein Überblick und rechts die Vergrößerung der Verhältnisse an der Bodenoberfläche.

Die Temperatursensoren waren nicht gegen die Sonneneinstrahlung abgeschirmt. Der Sensor an der Bodenoberfläche war leicht abgedeckt. An zwei Standorten (1 und 5) fielen die Sensoren im Boden ab Mitte September 1994 aus, da sehr wahrscheinlich Wasser eingedrungen war. Am Standort 3 sind im August 1994 durch ein Wildschwein die Sensoren im Boden und an der Bodenoberfläche freigelegt worden, so daß die Daten für den Zeitraum von Anfang bis Ende August nicht brauchbar waren.

Von dem ursprünglichen Plan, die Sonden im Sommer umzusetzten, wurde Abstand genommen. Dadurch sollte ausgeschlossen werden, daß die Meßreihen unvollständig und vielleicht wegen des Ab- und Wiederaufbaus nicht mehr vergleichbar sind. Es wurde lediglich Mitte September die Sonde vom Standort 4 an den Standort 9 verlegt.

An folgenden Standorten wurde gemessen:

Standort 1: Lichter Erlen-Eschenwald im Gehege Himmelreich.
Standort 2: Übergang Maisacker-Wiese nördlich vom Gehege Himmelreich.
Standort 3: Buchenwald im Gehege Himmelreich.
Standort 4: Dichter Fichtenwald im Segeberger Staatsforst.
Standort 5: Lichter Fichtenwald südlich des Segeberger Staatsforstes, nordöstlich von Hartenholm.
Standort 6: Pfeiffengraswiese im Dosenmoor.
Standort 7: Waldrand (Wald-Weide) östlich von Hartenholm.
Standort 8: Wiese südöstlich vom Gehege Himmelreich.
Standort 9: Feldrand, Übergang Wiese-Kartoffelacker in der Nähe von Standort 7.

Aus den Daten wurden der monatliche Tagesgang und die Standardabweichung für die Tageszeiten errechnet. Über die Produktbildung aus Tagesmittelwerten und der Standardabweichung für die einzelnen Kanäle und Standorte ist eine Klassifikation der Standorte untereinander bezüglich der Dämpfung des Sonnenenergiepulses möglich. Diese Klassifikation bildet ein charakteristisches Kennfeld, das den betrachteten Vegetationstypen bestimmte Dämpfungseigenschaften zuweist (Kap. E.1.1). Dieses Kennfeld, das nur ein erster Schritt bei der Beurteilung der Dämpfungseigenschaften sein kann, sollte durch eine fortgeführte Beobachtung (Heuristik) an den alten und an weiteren Meßstandorten verfeinert werden.

Die qualitativen Unterschiede werden bildhaft durch Differenzbildung der Werte des Einzelstandortes zu dem am besten gedämpften System (Buchenwald - Standort 3) für die monatlichen Tagesgänge und Standardabweichungen dargestellt (Kap. E.1.1).

D.3.5. Bodenwasserpegel

Die Schwankungen des Bodenwasserspiegels geben Aufschluß über die zeitliche Verteilung der wechselfeuchten Phasen im Oberboden. In diesen Phasen läuft die mikrobielle Mineralisationstätigkeit beschleunigt ab, wodurch Stoffverluste vorbereitet werden (Kap. F.2). Deshalb sollte für einige Standorte der Bodenwasserspiegel mit hoher zeitlicher Auflösung beispielhaft gemessen werden. Zum Einsatz kamen Drucksonden, die mit den bei der Abflußmessung eingesetzten Meßsonden identisch waren. Die Messung erfolgte in 20minütigen Abständen. Die Meßsonden waren in 2 m langen, geschlitzten Kunststoffrohren (Durchmesser ca. 6 cm) im Boden eingesetzt.

Insgesamt wurden die Meßsonden an 30 Stellen im Stör-Einzugsgebiet installiert (vgl. Karte Hydrologisches Meßnetz). Einige Meßsonden wurden zwischenzeitlich versetzt, um die Anzahl der

Meßpunkte zu erhöhen. Räumliche Schwerpunkte waren der Forst "Gehege Himmelreich" und die Schwale.

Tab. 2: Übersicht über die Bodenwasser-Meßsonden.

Nr.	Ort	Meßzeitr.	Ausfälle	Flächennutzung
1	Himmelreich	11.91-08.92		Laubwald
2	Himmelreich	06.91-03.95		Laubwald
3	Himmelreich	02.93-03.95	11.93-05.94	Mischwald
4	Himmelreich	06.91-03.95	06.92-06.93	Mischwald
5	Himmelreich	02.93-03.95		Laubwald
6	Fuhlenau	06.91-02.93		Grünland
7	Halloh	06.91-02.93		Heide, NSG
8	Lindeloh	12.91-03.95		Mischwald
9	Lindeloh	12.91-05.94		Nadelwald
10	Dosenmoor	12.91-03.95		Pfeiffengraswiese
11	Höllenau	06.91-06.93		Nadelwald
12	Höllenau	06.93-03.95		Nadelwald
13	Halloh	02.93-03.95		Nadelwald
14	Halloh	02.93-03.95		Nadelwald
15	Osterau	02.93-03.95		Nadelwald
16	Osterau	02.93-03.95		Mischwald
18	Halloh	02.93-11.93		Grünland
19	Halloh	02.93-03.95		Grünland
20	Schwale	02.93-06.94	06.93-10.93	Acker
21	Schwale	02.93-03.95		Grünland
22	Schwale	02.93-03.95		Laubwald
23	Schwale	02.93-11.93		Grünland
24	Schwale	02.93-03.95		Grünland
25	Schwale	02.93-03.95		Grünland
26	Fuhlenau	06.93-03.95		Acker /Knick
27	Himmelreich	02.93-03.95	6.93	Grünland /Mais
28	Himmelreich	02.93-03.95	6.93	Grünland
29	Fuhlenau	02.93-06.94	6.93-10.93	Knick /Acker
30	Fuhlenau	06.93-03.95		Grünland
31	Fuhlenau	02.93-03.95		Grünland

D.3.6. Niederschlagsmessung

Für die Erstellung einer Gebietswasserbilanz war es erforderlich den Gebietsniederschlag zu erfassen. Da es im Rahmen des Projektes nicht möglich war, umfangreiche eigene Niederschlagsmessungen durchzuführen, wurde auf Daten von 14 Stationen des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen, die das Wetteramt Schleswig zur Verfügung stellte. Die Stationsnummern und Ortsnamen können Tab. 3 entnommen werden (vgl. Karte "Hydrologisches Meßnetz").

Tab. 3: Verwendete Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes

Stationsnummer	Ortsname
27007	Brande-Hörnerkirchen
27008	Wahlstedt
27221	Bornhöved
30331	Bordesholm
30355	Hohenwestedt
48537	Henstedt-Ulzburg
48655	Neumünster
48657	Gnutz
48658	Brokstedt
48659	Kellinghusen
48660	Borstel
48663	Hartenholm
48665	Latendorf
48667	Bad Bramstedt

Um einen Anhaltspunkt über die Niederschlagszusammensetzung im Projektgebiet zu erhalten, wurde der Niederschlag an einer Meßstelle im Nordwesten des Einzugsgebietes (südöstlich von Hohenweststedt, unmittelbar neben der Wasserprobenentnahmestelle 18/D-6), mit drei nebeneinander installierten 2l fassenden Gefäßen aufgefangen. Diese wurden parallel zur monatlichen Wasserprobenahme ausgetauscht. Das Niederschlagswasser wurde wie die Wasserproben in Berlin bezüglich der Inhaltstoffe analysiert, so daß im Vergleich mit Literaturwerten ein relativ sicherer Wert für den Eintrag durch Luftdeposition ermittelt werden konnte (Kap. F.1.1.1).

D.4. Fernerkundung

D.4.1. Flächennutzung

Ausgehend von einer digitalen Landsat 5 TM-Szene vom 07.07.87 wurde für das Untersuchungsgebiet eine Landnutzungs- und Vegetationskartierung durchgeführt. Deren Ziel war die flächendeckende Ausweisung der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Wald- und Landnutzungstypen. Die räumliche Auflösung beträgt 30 * 30 m. Insgesamt konnten bei der von der DLR durchgeführten Klassifizierung 13 Landnutzungs- und Bodenbedeckungseinheiten ausgewiesen werden. Die Waldvegetation wurde in Laub-, Nadel- und Mischwald unterschieden. Bei der Ausweisung landwirtschaftlicher Flächen wurde zwischen Acker und Grünland unterschieden; bei den offenen Böden ist davon auszugehen, daß es sich um bereits abgeerntete, umgepflügte Flächen oder um Getreide im Stadium der Gelbreife handelt. Die ausgewiesenen Moorflächen wurden interaktiv durch einen ständigen Abgleich mit der topographischen Karte aufgenommen.

Um die Satellitenszene mit anderen Karten im Gauß-Krüger-System vergleichen zu können, mußte sie entsprechend geometrisch korrigiert werden.

D.4.2. Oberflächentemperatur

Der Kanal 6 des Landsat 5 TM kann nach vorhergehender Kalibrierung zur Kartierung der Schwarzkörpertemperaturen eingesetzt werden. Die räumliche Auflösung beträgt 120 * 120 m. Es ist zu beachten, daß ohne atmosphärische Korrektur die absoluten Oberflächentemperaturen Fehler bis zu 1 K aufweisen können.

Um mehrere Zeitpunkte miteinander vergleichen zu können, liegen insgesamt vier Satellitenszenen zu unterschiedlichen Jahreszeit vor:

07.07.1987
04.09.1991
26.01.1992
17.05.1992

Die Temperaturerfassung erfolgt im Landsat 5 TM durch vier parallel angeordnete Sensoren. Aufgrund der Alterung liefern diese Sensoren jedoch kein einheitliches Signal mehr, so daß im Bild deutliche Streifen zu erkennen sind. Über ein entsprechendes Filter-Programm wurde versucht, diesen Effekt auszugleichen. Bei der Januar-Szene ist dies aufgrund des nur sehr schwachen Signals (Temperaturspanne etwa 3 K) jedoch nur bedingt gelungen.

Die Berechnung der Schwarzkörpertemperaturen für die dargestellte September-Szene erfolgte nach Singh (1988). Der im südlichen Drittel der Stör sehr kühl erscheinende Talraum der Schmalfelder Au kann nicht mit dem Rest der Szene verglichen werden, da hier durch einen Nebelschleier die Landoberfläche durch den Thermalkanal nicht erfaßt wurde.

D.5. Grundlagenkarten

D.5.1. Flächennutzung

Die Flächennutzung des Stör-Einzugsgebietes wurde von der TK25 digitalisiert. Dabei wurde zwischen den Nutzungsarten Wald, Acker, Grünland, Moor, Wasserflächen, Siedlung, Kläranlagen und Sonstigen Nutzungen unterschieden. Unter die letzte Kategorie fielen z.B. Tongruben oder Friedhöfe. Neben den Nutzungsgrenzen wurde auch das Gewässer- und Straßennetz erfaßt.

Für die Digitalisierung dienten die vom Landesvermessungsamt Schleswig Holstein in Verbindung mit dem Amt für militärisches Geowesen herausgegebenen Blätter 1824, 1825, 1826, 1827, 1923, 1924, 1925, 1926, 1927, 2024, 2025, 2026, 2027, 2124, 2125, 2126 und 2127; die Karten weisen Berichtigungsstände zwischen 1986 und 1989 auf.

Zusätzlich wurden die Einzugsgebiete digitalisiert dafür wurden TK25-Blätter mit entsprechenden Eintragungen durch das Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten bereitgestellt.

D.5.2. Bodenkarte

Nur für einen Teil des Einzugsgebietes der Stör lagen Bodenkarten im Maßstab 1 : 25.000 vor (Kartenblätter 1824, 1924, 1925, 1926, 2024, 2025, 2026, 2125 des Geologischen Landesamtes Schleswig-Holstein). Im Rahmen des Projektes wurden deshalb die vorliegenden Daten durch Geländeerhebungen soweit ergänzt, daß eine Bodenkarte im Maßstab 1 : 100.000 mit Angaben zu Bodentyp und Bodenarten vorliegt (Bearbeitung: J. Finnern und J. Thiele, Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung der Christian-Albrecht-Universität Kiel, Prof. Blume). Die Karte liegt digital im Arc/Info-Format vor. Die genaue Methodik ist im Anhang 1, 8., ausführlich beschrieben.

D.5.3. Digitales Höhenmodell (DHM)

Um Informationen zum Abfluß des Wassers aus der Landschaft und zur Hangneigung zu bekommen, war ein digitales Höhenmodell (DHM) erforderlich.

Die Industrieanlagen-Beratungs-Gesellschaft (IABG) hat für das Militärgeographische Amt der Bundeswehr ein DHM mit einer räumlichen Auflösung von 25 m für die gesamte Bundesrepublik erstellt. Die Veräußerung von Teilen des DHM erfolgt nur nach Freigabe und Unbedenklichkeitserklärung durch die entsprechenden militärischen Stellen. Die Universität Kiel verfügt über einen Ausschnitt des DHM der IABG, der sich mit dem Untersuchungsgebiet deckt und freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde. Die Höhenauflösung beträgt einen Meter. Dieser Datensatz wies z.T. erhebliche Inkonsistenzen auf. Im Bereich eines Kartenblattes traten derartige Unstimmigkeiten auf, daß dieses auf der Grundlage der TK25 digitalisiert wurde.

Da die Höhenauflösung von einem Meter z.B. für die Ableitung der Hangneigung nicht ausreichend ist (es ergäbe sich eine sehr stufige Verteilung), wurden aus den Daten zunächst Höhenlinien extrahiert. Die dazwischen liegenden Werte wurden linear interpoliert. Dabei wurde jeweils die größte Höhendifferenz pro Strecke ausgewählt, da diese für die Prozesse des Wasserabflusses und des Stoffaustrages als die Wesentlichste angesehen wurde.

Die Karte wurde für die räumliche Auflösung von 20 * 20 m berechnet.

D.5.4. Karte der Teileinzugsgebiete

Die örtliche Zuordnung der Verluste erfordert eine Unterteilung des Gebietes in Teileinzugsgebiete (im Text z.T. auch als Berechnungsabschnitte bezeichnet). Abflüsse und Frachten können durch sie flächenspezifisch, d.h. bezogen auf einen Hektar des Einzugsgebietes, angegeben und darüber miteinander verglichen werden.

Die Basis der Karte bildeten die vom Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein verwendeten Einzugsgebietsgrenzen. Eine erste Korrektur erfolgte in den Bereichen, wo deutliche Abweichungen zum Fließgewässersystem und zu den Pegelmeßpunkten zu erkennen waren.

Eine zweite Korrektur war zum einen deswegen erforderlich, weil sich nach der Berechnung der spezifischen Abflüsse und Frachten in einigen Gebieten (z.B. Halloher Moor oder Himmelreich) sehr große (unwahrscheinliche) Abweichungen vom Mittel der übrigen Gebiete zeigten. Zum anderen wies die Wasserdurchflußkarte (Kap. 6.3) in einigen Bereichen Unstimmigkeiten mit den Einzugsgebietesgrenzen auf. Die Karte des Wasserdurchflusses war Grundlage für die Korrektur der Berechnungsabschnitte.

D.6. Abgeleitete Karten

D.6.1. Hangneigung

Die Karte der Hangneigung beruht auf dem bereits beschriebenen DHM (s. Kap. 5.3). Für jeden Punkt in der Karte wurde die erste Ableitung aus den acht benachbarten Pixeln gebildet.

D.6.2. Ökotonenabstand

In der intensiv bewirtschafteten Landschaft stoßen oft Flächen mit unterschiedlichem Wasserhaushalt zusammen, z.B. durch die verschieden hohe Fähigkeit zur Wasserspeicherung infolge eines verschieden hohen Anteils an Detritus (toter organischer Substanz). Dieses wasserhaushaltliche Potential gliche sich durch die Sukzession relativ rasch aus, wenn diese nicht durch die Bewirtschaftung unterbunden würde. Durch dieses künstlich aufrecht erhaltene Potential kommt es

gerade an diesen Ökotonen (Grenzlinien) zu Stoffverlagerungen und zu kleinklimatischen Abweichungen im Vergleich zu den umliegenden Flächen. So erwärmen sich z.B. die Bestandsränder eines Waldes im Tagesverlauf eher als die Bestandsmitte; der Ackerrand hingegen erwärmt sich langsamer als die Mitte des Ackers.

Diese Randeffekte soll die Karte der Ökotonenabstände (vgl. Karte) verdeutlichen. Zu ihrer Ermittlung wurde die Flächennutzung der topographischen Karte in vier Klassen zusammengefaßt unter der Annahme, daß sich die Flächennutzungen einer Klasse jeweils ähnlich bzgl. der Randeffekte verhalten:

Klasse 1: Wald, Wasser
Klasse 2: Grünland, Moor
Klasse 3: Acker, Sonstige Flächen
Klasse 4: Siedlung, Kläranlagen

Durch die vorliegenden Temperaturmessungen war bereits bekannt, wie stark sich die entwässerten Moorflächen erwärmen. Deshalb wurden diese zusammen mit dem Grünland in Klasse zwei statt in Klasse eins zusammengefaßt.

Für jeden Punkt (Pixel) der Karte wurde der minimale Abstand zur nächsten Ökotone bestimmt und in die Karte eingetragen. Bereiche mit großen Ökotonenabständen lassen die ungestörtere Ausbildung der jeweiligen Mikroklimate vermuten. Bei aneinandergrenzenden Klassen (z.B. zwischen Wald und Grünland, s.o.) wurden die sich jeweils direkt berührenden Pixel mit einem größeren Ökotonenabstand belegt, da hier von einem geringeren Randeffekt ausgegangen werden kann.

In der Darstellung der Karte wurden die Abstandswerte binärlogarithmisch in sieben Klassen unterteilt und durch zunehmende Farbintensiät dargestellt. Die Nutzungsklassen sind durch verschiedene Farbtöne ausgedrückt.

D.6.3. Wasserdurchfluß

Die Auswertung der Abflüsse und der wasserchemischen Daten in der Stör legt den Schluß nahe, daß ein großer Teil des Wassers oberflächlich bzw. oberflächennah abfließt (vgl. Kap. F.2.1.2; geringe Basisabflüsse von unter 30% des mittleren Abflusses). Es wurde versucht, den Wasserdurchfluß in der Fläche modellhaft aus dem digitalen Höhenmodell abzuleiten. Dabei wurde für jeden Punkt (Pixel) das theoretische oberirdische Einzugsgebiet ermittelt und in klassifizierter Form dargestellt. In diese Näherung gingen weder die Flächennutzung noch die Bodeneigenschaften ein.

Für die Ermittlung wurde zunächst die Exposition bestimmt, da diese unter den gegebenen Randbedingungen angibt, in welche Richtung das Wasser weitergegeben wird. Aufgrund der Unzulänglichkeiten des DHMs war eine Ableitung der Exposition lediglich aus den umgebenden Pixeln wenig erfolgreich. Statt dessen fand die Berechnung mit einem wachsenden Quadrat statt, wobei die Vektoren vom Zentrum zu den tiefer liegenden Pixeln des Quadrates zu einem Gesamtvektor addiert wurden und dadurch die wahrscheinlichste Fließrichtung für das zentrale Pixel ermittelt wurde. Die Größe des Quadrates war an die Veränderung der Winkelsumme rückgekoppelt.

Die Wasserdurchflußmenge konnte dann bestimmt werden, indem ein gedachter Niederschlag von einer Einheit Wasser gleichmäßig auf die Expositionskarte "geschüttet" wurde und dieses Wasser

entsprechend der Exposition abfloß. Diese Durchflußwerte wurden dann jeweils akkumuliert (vgl. Bauer *et al*. 1985). - Probleme traten noch mit der durchgängigen Berechnung des Wasserdurchflusses im Gewässer selbst auf. Da diese aber nur relativ geringe Flächenanteile an der Gesamtlandschaft darstellen, sind die Fehler für die hier vorgestellten Auswertungen nicht von Belang.

D.6.4. Wirkungsgrad

Für die Abschätzung des landschaftlichen Wirkungsgrades wurden im ersten Schritt die Flächennutzung, der Ökotonenabstand und der Wasserdurchfluß verknüpft. Dem lagen folgende Annahmen zugrunde:

Die Flächennutzung kann als grobe Schätzgröße für die Verdunstung des Wassers betrachtet werden. Durch eine hohe Verdunstung werden die Aufheizung des Standortes, die Perkolation des Wassers durch den Boden und damit die Stoffverluste verringert (vgl. Kap. B.). Dabei wird von folgender Reihung ausgegangen (von hohen zu niedrigen Verdunstungswerten):

(Wasser, Wald) > (Moor, Grünland) > (Acker, Sonstige) > (Siedlung, Kläranlagen)

Die Kläranlagen sind mit den Siedlungsflächen zusammengefaßt, da in deren Umgebung ein relativ hoher Anteil der Fläche versiegelt ist (Betriebsgebäude, Zufahrten).

Der Ökotonenabstand (vgl. Kap. 6.2) modifiziert diese Werte in folgender Form:

- ► Hohe Abstandswerte führen bei Wäldern zur Ausbildung eines besser ausgeglichenen Mikroklimas, damit zu geringeren Bodenwasserschwankungen und so zu geringeren Verlusten.
- ► Bei Äckern sind im Bereich hoher Abstandswerte durch eine höhere Temperaturamplitude Bodenwasserschwankungen und spontane Prozesse wahrscheinlicher und es können deshalb höhere Verluste angenommen werden.
- ► Bei Moor und Grünland wird mit hohen Abstandswerten ein ähnlicher, aber nicht so ausgeprägter Effekt wie bei den Äckern auftreten.
- ► Bei den Siedlungsflächen nimmt die Temperaturamplitude wie bei den Äckern mit wachsendem Ökotonenabstand zu.

Die Wasserdurchflußwerte führen zu einer weiteren Differenzierung in der Form, daß bei zunehmendem Wasserdurchfluß durch die bessere Wasserversorgung der Vegetation ein besserer Temperaturausgleich möglich ist und außerdem geringere Bodenwasserschwankungen wahrscheinlich sind. Im Siedlungsbereich wird davon ausgegangen, daß die Wasserdurchflußwerte durch den hohen Versiegelungsgrad kaum noch eine Bedeutung besitzen.

Der Wirkungsgrad wurde in fünf Klassen (1 = gering, 5 = hoch) unterteilt. In den folgenden Tabellen ist die Klassifikation dargestellt. Die Reihen beschreiben die Klassen der Ökotonendistanz (1..7), die Spalten die Klassen der Wasserdurchflußwerte (1..9).

Wasser, Wald

Ökotonendistanz (klassifiziert)	Klassifizierte Wasserdurchflußwerte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	2	3	3	3	3	4	4	4
2	2	2	3	3	3	3	4	4	4
3	2	2	3	3	3	4	4	4	4
4	3	3	4	4	4	4	4	5	5
5	3	3	4	4	4	4	5	5	5
6	3	3	4	4	4	4	5	5	5
7	3	3	4	4	4	4	5	5	5

Moor, Grünland

Ökotonendistanz (klassifiziert)	Klassifizierte Wasserdurchflußwerte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	2	2	2	3	3	3	4	4
2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
3	2	2	2	2	3	3	3	4	4
4	2	2	2	2	2	3	3	4	4
5	1	1	1	2	2	2	2	3	3
6	1	1	1	1	2	2	2	3	3
7	1	1	1	1	2	2	2	3	3

Acker, Sonstige

Ökotonendistanz (klassifiziert)	Klassifizierte Wasserdurchflußwerte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
3	2	2	2	2	2	2	2	3	3
4	1	1	1	1	1	1	2	2	2
5	1	1	1	1	1	1	2	2	2
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Siedlung, Kläranlagen

Ökotonendistanz (klassifiziert)	Klassifizierte Wasserdurchflußwerte 1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Die vergleichende Betrachtung der mit dem Satelliten aufgenommenen Oberflächentemperatur über mehrere Zeitpunkte zeigte, daß die Temperatur im Bereich der Schwale trotz der großen Ackerflächen untypisch kühl war. Dies trifft zumindest für die Zeitpunkte Juli 1987 und Mai 1992 zu, während im September 1991 die nicht bewaldeten Flächen vergleichbar der Gesamtfläche überwärmt waren. Dies deutet auf eine noch bessere Wasserspeicherkapazität des Bodens hin. Die Bodenkarte stellt in diesem Gebiet abweichend vom Gesamtgebiet überwiegend Pseudogleye und Parabraunerden dar. Diese Bereiche wurden deshalb in der Wirkungsgradkarte um eine Klasse angehoben.

D.6.5. Vorranggebiete

Zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Landschaft sollten funktional abgeleitete Vorranggebiete ausgewiesen werden (vgl. Kap. B.5):

- ► Feuchtgebiete entlang der Gewässer, die in ihrer bewirtschafteten Form dem Stoffrückhalt und der Stoffrückführung dienen;
- ► Quellgebiete und anquellige Bereiche zur Wasserspeicherung und zum Stoffrückhalt;
- ► Kuppenlagen, die besonders auswaschungsgefährdet sind und
- ► Bereiche hoher Hangneigung, die eine besonders hohe Prozeßdynamik aufweisen.

Die Feuchtgebiete entlang der Gewässer wurden ausgewiesen, indem alle Pixel mit einer maximalen Entfernung von 20 m vom Gewässer ausgewählt wurden. Zusätzliche Bedingung war ein maximaler Höhenunterschied von 0.5 m zwischen den Feuchtgebietspixeln und dem Gewässer. Insgesamt ergeben sich so gewässerbegleitende Feuchtgebiete von max. 60 m Breite (Gewässer plus jederseits 20 m Feuchtgebiet).

Die Ausweisung der Quellgebiete erfolgte über die berechneten Wasserdurchflußwerte (vgl. Kap. D.6.3). Dabei wurden die Bereiche selektiert, die einen Wert über 128 aufwiesen. Dies entspricht einem oberirdischen Einzugsgebiet von etwa 5 ha.

Die automatische Kartierung der Kuppenlagen erfolgte ebenfalls mit Hilfe des berechneten Wasserdurchflusses. Dabei wurden alle Werte <= 3 ausgewählt. Dies entspricht einem maximalen oberirdischen Einzugsgebiet von 0.12 ha.

Die Bereiche mit hohen Hangneigungen konnten direkt der Hangneigungskarte (vgl. Kap. B.6.1) entnommen werden. Dabei wurden lediglich Gebiete mit einer Hangneigung über 12.8% ausgewählt. Da das gesamte Gebiet der Stör relativ flach ist, sind dies unter 0.25% der Gesamtfläche.

Die so ermittelten Bereiche wurden entsprechend klassifiziert und in einer Karte zusammengeführt. Die Siedlungsflächen wurden von den Vorranggebieten ausgenommen.

Nicht ausgewiesen wurden Flächen in Siedlungsnähe, die der Rückführung von Klarwässern und den darin enthaltenen Basen und Nährstoffen in die Landschaft dienen.

E. Untersuchungen zu Kennfeldern und Austragsmechanismen

E.1. Kennfelder zur Zönosenkernstruktur

Mit Hilfe von Kennfeldern werden strukturelle und funktionale Eigenschaften (z.B. Organismen-Zusammensetzung oder Energieflußdichteabsenkung) der unterschiedlichen Zönosenkernstrukturen dargestellt. Dies erfolgt sowohl auf räumlicher als auch auf zeitlicher Basis. Für die zeitliche Betrachtung ist es notwendig, Kennfelder über den Tages- und Jahreszyklus zu beschreiben, da der Sonnenenergiepuls alle wesentlichen Prozesse in der Natur bestimmt.

Über einen bestimmten Zeitraum und/oder für eine bestimmte Größenordnung von ZKSen können mittlere Muster erstellt (z.B. der Tagesgang im Juli oder die Temperatur in Abhängigkeit des Ökotonenabstandes als Größenmaß der ZKSen) und die Abweichung einzelner ZKSen von diesem Gebietsmittel aufgezeigt werden. Neu hinzukommende Meßergebnisse können so schnell in einen größeren Zusammenhang eingeordnet und in ihrer Bedeutung für die Veränderung der mittleren Verteilung und der Schwankung eingeschätzt werden.

Die Beschreibung der funktionalen Eigenschaften über Kennfelder ermöglicht eine Abschätzung darüber, ob in dem betrachteten Raum stoffliche Kreis- oder Verlustprozesse vorherrschen (Wirkungsgrad der ZKSen, vgl. Kap. B.2.2):

- In einer Landschaft mit überwiegend hohem Wirkungsgrad der ZKSen kann der Energiepuls nahezu vollständig durch die ZKSen gedämpft werden. Wichtigster dissipativer Prozeß ist die Verdunstung. Durch die darüber verbesserte Kühlung der Fläche sind Kondensationsprozesse begünstigt. Rückgekoppelt daran treten längere Trockenphasen des Bodens seltener auf. Diese werden weitgehend durch die Transpiration der Vegetation bestimmt. Als steuernder Prozessor koppelt sie Mineralisation und Stoffaufnahme optimal aneinander. Das Stoffangebot des Standortes bleibt so weitgehendst erhalten. Der Wirkungsgrad wird durch die Produktivität der Organismen und die thermische Dämpfung abgebildet.

- Menschliche Eingriffe haben in die Kopplung der ZKSen eingegriffen, den verlustarmen, kurzgeschlossenen Wasserkreislauf geöffnet und dadurch den Wirkungsgrad der ZKSen gesenkt. Der Detritusspeicher der Wälder wurde u.a. durch Rodung und Streunutzung abgebaut, Feuchtgebiete drainiert. Verbunden damit haben sich die wechselfeuchten Phasen im Boden erhöht. Dies führt zu einer nicht an die pflanzliche Produktion rückgekoppelten Mineralisation. Durch die dabei entstehenden Starksäuren (z.B. HNO_3, H_2SO_4) gehen puffernde Basen am Standort oder an anderer Stelle in Lösung und werden mit dem abfließenden Wasser in Richtung der Fließgewässer verlagert.

Die Energieflußdichte wird im wesentlichen durch den Verdunstungsprozeß abgesenkt (Kap. B.2.1, Abb. 4). Die in der Literatur angegebenen Werte für die Verdunstung[17] (vgl. z.B. Kirchner 1986)

- weisen zumeist keine jahreszeitliche Differenzierung auf,

17 Kirchner (1986) grenzt die Variation der spezifischen Verdunstung (V) wie folgt ein (Vergleichswert Wiesen = 1.0):

Versiegelte Fläche	$0.40 \le V \le 0.50$
Acker	$0.50 \le V \le 1.10$
Wiese	$1.00 = V$
Wald	$1.00 \le V \le 1.50$
Wasserfläche	$1.20 \le V \le 1.40$

- ► berücksichtigen methodisch nicht die mögliche mehrfache Verdunstung des Wassers in kurzgeschlossenen Verdunstungs-Taubildungszyklen (nur längerfristige Bilanzierungen) und
- ► lassen die Rückkopplung zwischen dem Regionalklima und dem landschaftlichen Wirkungsgrad (Kap. B.3) außer Acht.

Die Temperaturdifferenzen unterschiedlicher Standorte lassen jedoch Rückschlüsse auf die Verdunstung zu: Eine geringere Temperatur ist im wesentlichen auf eine höhere Verdunstung zurückzuführen. So deutet die geringere Temperaturschwankung im Buchenbestand (Abb. 30) darauf hin, daß Buchen in den Sommermonaten Juni bis September eine höhere Verdunstung aufweisen als Fichten- oder Kiefernbestände.

Abb. 30: Die "Charakterkurven der Holzarten" von Müttrich (1890, zit. in Geiger 1961).

Ein Teil der nicht von der ZKS in Kreisprozessen umgesetzten Energie wird über die Bodenerwärmung und zeitverzögerte -abkühlung dissipiert (Bodenwärmestrom). Ein hoher Bodenwärmestrom, einhergehend mit einer großen wechselfeuchten Zone, führt bis in tiefere Bodenschichten zur Mineralisation[18] (Respiration organischer Substanz). Die löslichen Stoffe werden mit dem einsetzenden gerichteten Wasserfluß als Stoffverluste ausgetragen.

Die Stoffverluste sind nicht ausschließlich vom Wirkungsgrad einzelner ZKSen abhängig, sondern auch von der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen ZKSen und deren raum-zeitlicher Kopplung über den Wasserfluß. So kann das Basen transportierende Wasser beim Eintritt in Feuchtgebiete abgebremst und ein Teil der Fracht durch die Vegetation festgelegt werden. Dieser Effekt ist auch an Ökotonen (Grenzlinien) beim Wasserfluß in ZKSen mit höherem Wirkungsgrad, z.B. von einem Acker in einen Wald, zu erwarten. Hingegen können beim Abfluß in Richtung von Flächen mit geringerem Wirkungsgrad, z.B. von einem Wald auf einen Acker, diese Stofftransporte durch die dort erhöhten Temperatur- und Feuchtigkeitsgradienten beschleunigt sein.

18 Dieser Prozeß wird sehr anschaulich von Breuer (1994) für die Tundra als Folge einer stärkeren Erwärmung beschrieben: "Die längere Tauwetterperiode bringt eine stärkere Entwässerung der Böden, einen sinkenden Grundwasserspiegel und damit bessere Durchlüftung der Böden mit verstärkter Verwesung und Oxidation der im Boden gespeicherten Kohlenstoffverbindungen".

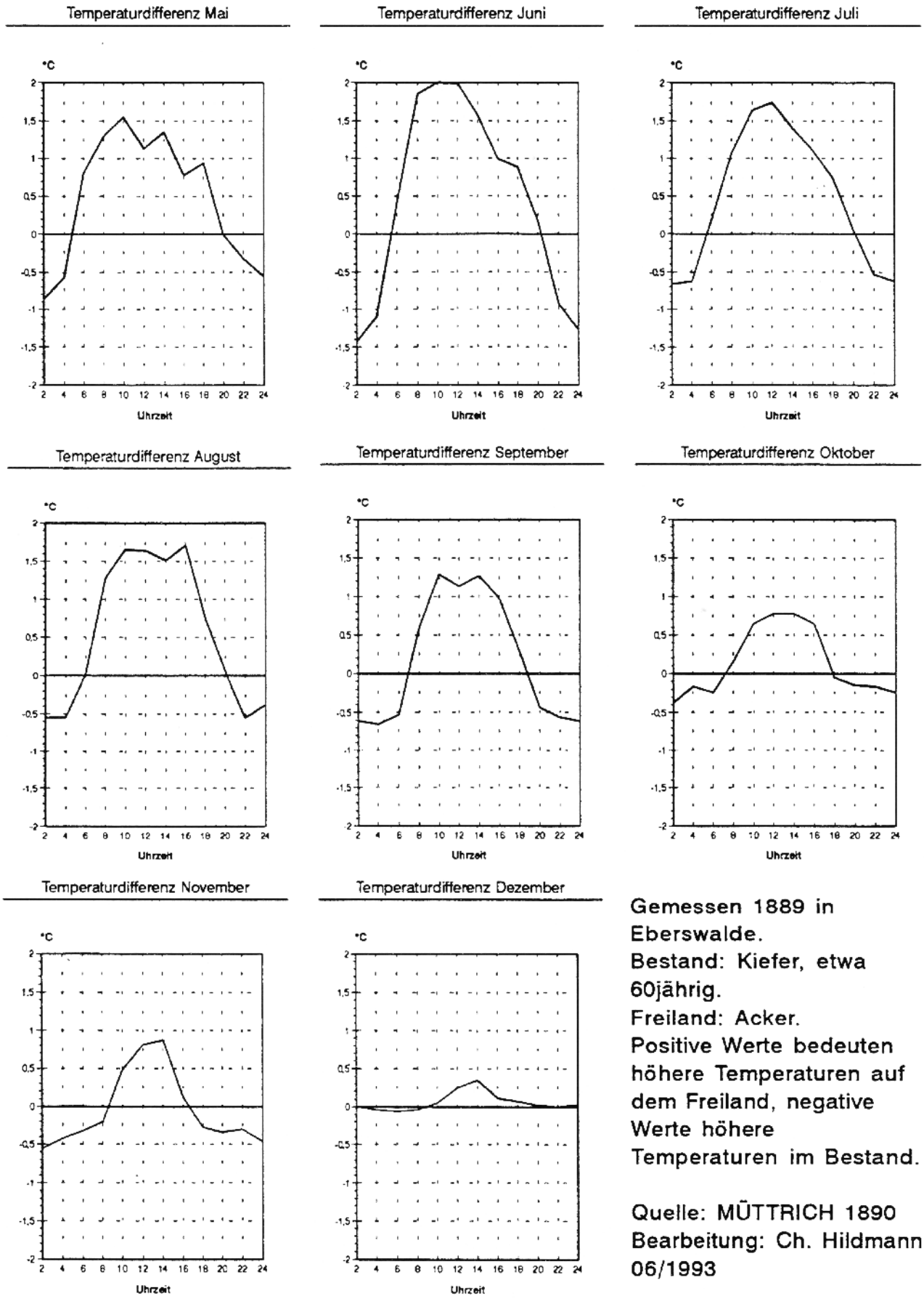


Abb. 31: Muster der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen einem Acker und einem Kiefernbestand in Eberswalde in 2 m Höhe (nach Daten in Müttrich 1890).

Anhand der Kennfelder können die im Gebiet vorgefundenen bzw. unterschiedenen ZKSen vergleichend dargestellt und beschrieben werden. Veränderungen der schon beobachteten ZKSen und noch nicht beschriebene ZKSen lassen sich anhand der Kennfelder rasch einordnen und bewerten. Ziel der Kennfelder ist eine Konkretisierung der Regionalstudie, da an die direkt gemessene Information (z.B. mit Hilfe eines Satellitenbildes) die Erkenntnisse der Kennfelder gekoppelt werden können.

E.1.1. Temperatursonden

Einen Hinweis auf den unterschiedlichen Wirkungsgrad verschiedener ZKSen geben kontinuierliche Temperaturmessungen. ZKSen mit geringem Wirkungsgrad weisen gegenüber solchen mit hohem Wirkungsgrad weite Temperaturamplituden (hohe Maxima, niedrige Minima) und hohe Standardabweichungen über die Tageswerte auf. Umfangreiche Temperaturmessungen, wie sie bereits Ende des letzten Jahrhunderts mit Hilfe forstlicher Doppelstationen durchgeführt wurden (z.B. Müttrich 1890, Lorenz 1878, Geiger 1961:383), zeigen bereits den oft geringeren Wirkungsgrad landwirtschaftlicher Flächen gegenüber Waldflächen sowie Differenzierungen zwischen Waldflächen mit verschiedenen Holzarten (vgl. Abb. 30).

Die zeitlich hochauflösenden Temperaturmessungen (20 Minuten-Intervalle) im Rahmen des Zusatzprojektes (Stör II) zeigen zum Teil große Unterschiede zwischen den verschiedenen ZKSen auf (vgl. Abb. 32 und Anhang 2, E.1.1). Die exemplarisch bereits Ende des 19. Jahrhunderts gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen Waldbestand und Freiland auf halbstündiger Basis (Müttrich 1890) (Abb. 31) werden durch die Ergebnisse der Sondenmessung (Abb. 32) bestätigt.

Deutlich wird, daß eine vernetzte, d.h. hoch vergesellschaftete ZKS (z.B. ein Wald), den Energiepuls über das ganze Jahr räumlich und zeitlich besser ausgleichen kann, als eine weniger gut vergesellschaftete (z.B. eine Wiese). Die Unterschiede sind im Winter erheblich geringer als im Sommer (vgl. Temperaturdifferenzen zwischen unterschiedlichen Vegetationstypen und einem Buchenwald, Anhang 2). Eine bessere Temperaturdämpfung verringert den Anteil stofflicher Verluste gegenüber den Kreisprozessen und bedingt damit eine höhere Stabilität des Standortes - die Nachhaltigkeit ist größer.

Das nachfolgende Temperatur-Kennfeld (Abb. 33, 34) für die untersuchten ZKSen gibt Aufschluß über die Dämpfungseigenschaften (Wirkungsgrad) der ZKS und über den Einfluß der umgebenden ZKSen.

Vergleich Wald-ZKSen mit anderen ZKSen:

- ► Die Unterschiede in 200 cm Höhe sind im Verhältnis zu denen im Boden und an der Bodenoberfläche sehr viel geringer, was auf den Einfluß der umgebenden ZKSen hindeutet.
- ► Das Produkt von Mittelwert und Standardabweichung ist hier in allen Höhen geringer.
- ► Die Energiemenge, die über den Bodenwärmestrom umgesetzt wird, ist in den Wäldern erheblich geringer.

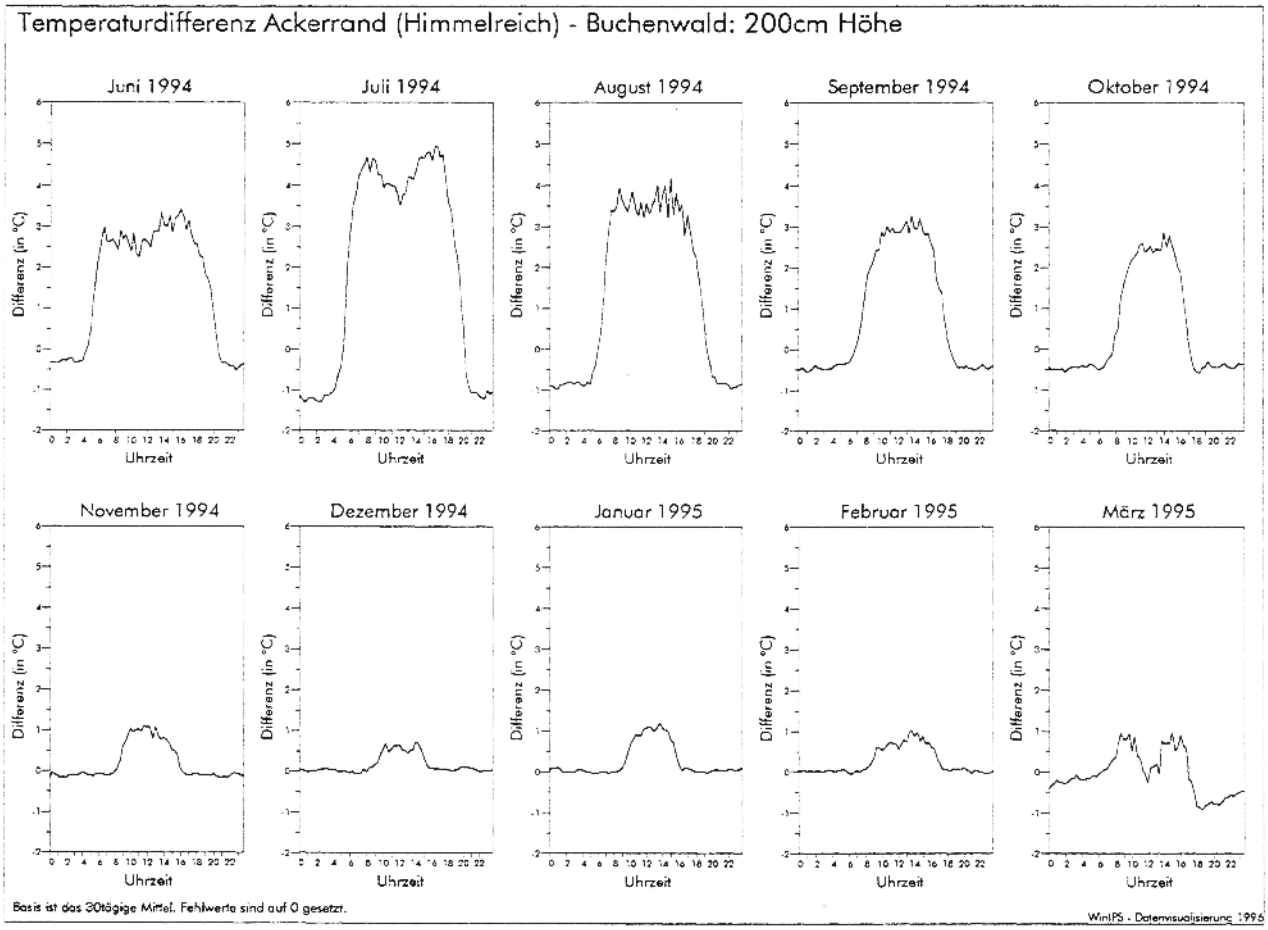


Abb. 32: Muster der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen einem Ackerrand- und einem Buchenwald-Standort im Stör-Einzugsgebiet in 2 m Höhe.

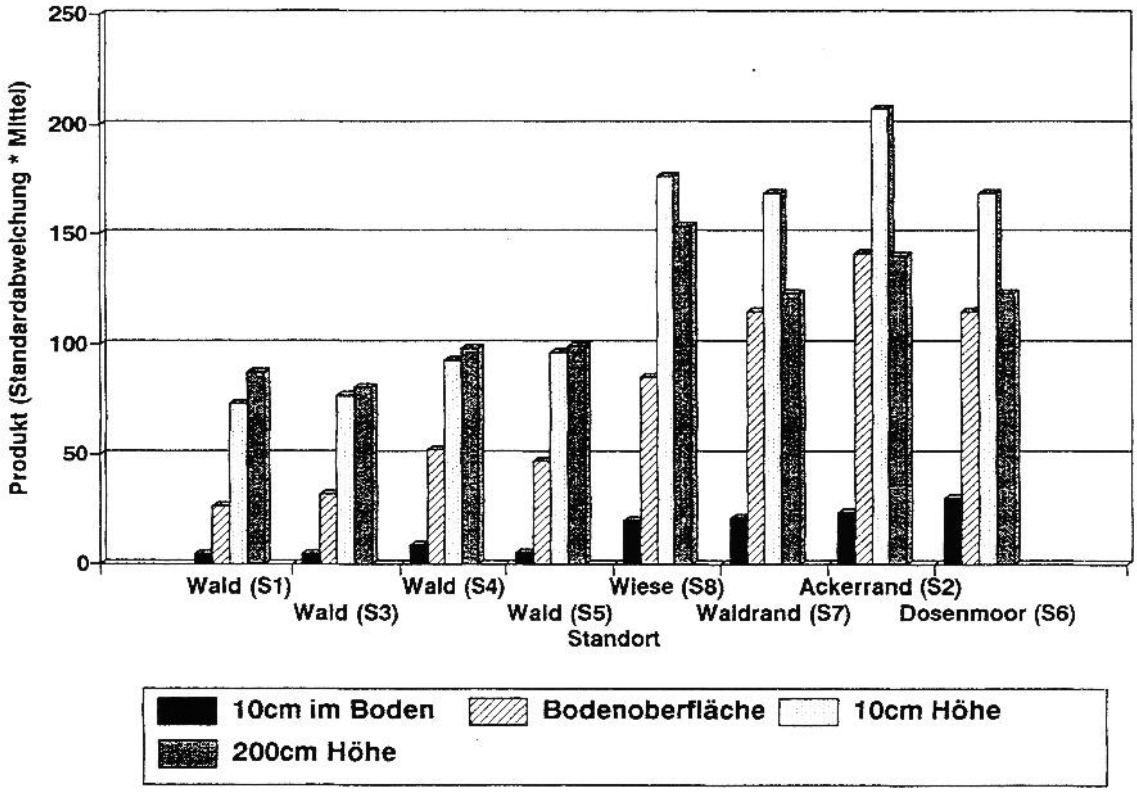


Abb. 33: Temperatur-Kennfeld für die untersuchten ZKSen. Das Kennfeld wurde aus dem Tagesgang der Temperatur im Juli 1995 berechnet.

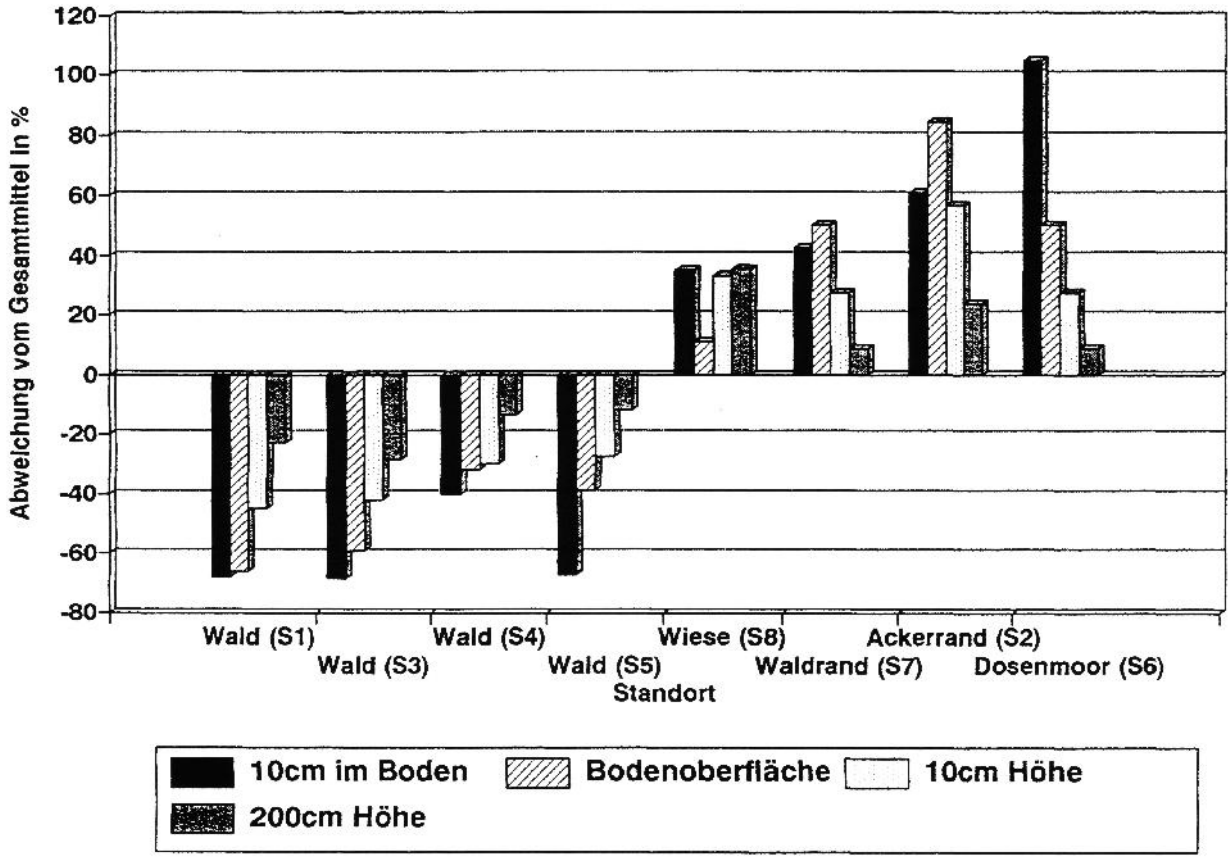


Abb. 34: Temperatur-Kennfeld: Abweichung vom Mittel der Meßhöhe in Prozent.

E.1.2. Temperaturdaten vom Satelliten

Verschiedene räumliche Betrachtungsebenen können über Kennfelder miteinander verglichen werden. So kann eine einzelne ZKS mit einer größeren Anzahl ähnlicher ZKSen hinsichtlich ihrer energiedissipativen Eigenschaften ebenso verglichen werden (z.B. Temperaturverteilung in Abhängigkeit des Ökotonenabstandes) wie verschiedene ZKSen untereinander (z.B. Buchenwald und Acker).

Die einzelnen Nutzungsklassen weisen in ihrer Verteilung teilweise deutliche Unterschiede auf (vgl. Abb. 35). Am stärksten überwärmt sind die Siedlungsbereiche, am kühlsten der Wald und die Wasserflächen. Grünland und Acker weisen ähnliche Mittelwerte auf der Variationskoeffizient des Ackers ist jedoch deutlich höher als der des Grünlandes. Dies deutet einerseits auf den Einfluß der Äcker mit besserem Wasserspeichervermögen in der Schwale und andererseits der offenen Böden hin. Die Moorflächen ähneln in Mittelwert und Verteilung dem Grünland. Ohnehin wird ein Teil der Moorflächen als Grünland genutzt.

Bemerkenswert ist die hohe durchschnittliche Temperatur einzelner Moorflächen wie dem Dosenmoor oder dem Großen Moor (s. Karte der Oberflächentemperatur), die noch über der mittleren Temperatur der Wiesen- und Ackerflächen liegt. Für Moore, bei denen die multitemporale Auswertung diese Aussage bestätigt, heißt dies, daß sie ihre dissipative Funktion verloren haben. Die oberflächennahe Austrocknung und damit der Mineralisationsprozeß müssen hier sehr hoch sein. Verschiedene Autoren (Succow 1986, Lütt 1992) weisen zwar darauf hin, daß zu bestimmten Zeitpunkten die Temperatur eines Moores höher ist als die anderer Flächen. Dies kann jedoch bei einem intakten Moor nicht die Regel sein, da es sich sonst aufgrund der Mineralisationsprozesse schon in der Abbauphase befände.

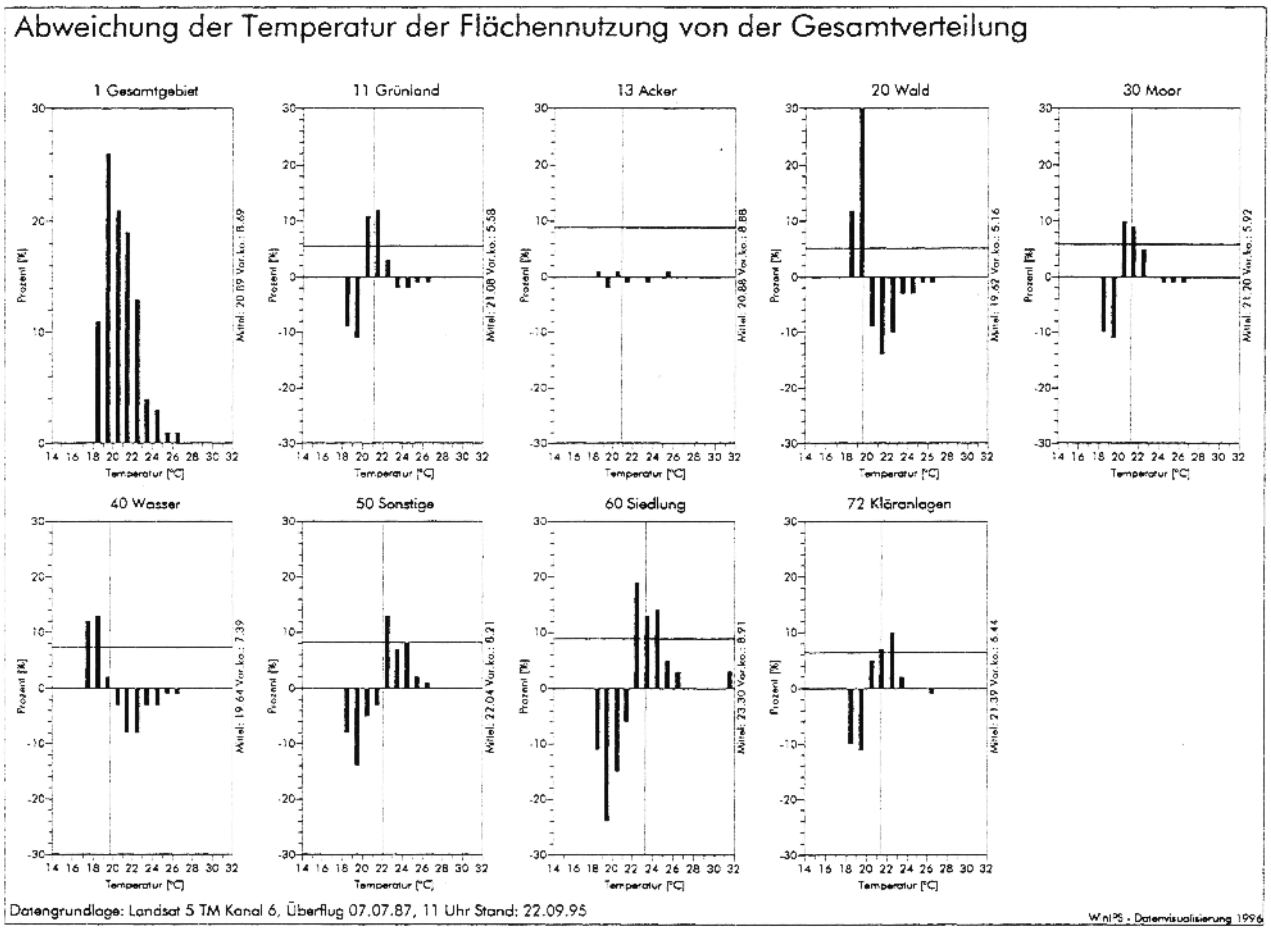


Abb. 35: Verteilung der Temperatur über die Flächennutzung im Einzugsgebiet der Stör. Datengrundlage: Temperaturkanal des Landsat 5 TM vom 07.07.1987, ca. 11 Uhr.

Der erwartete hohe Wert für Siedlungsflächen und Sonstige Flächen und damit deren Bedeutung als "hot-spots" (Heizflächen) der Landschaft wird bestätigt.

Durch die geringe räumliche Auflösung des Thermalkanals (120 m * 120 m) ist das empfangene Temperatursignal teilweise nicht das Signal nur einer Flächennutzung, sondern ein Mischsignal zweier oder mehrerer Nutzungsklassen. So entstehen in der Abbildung des Randbereiches zwischen Wald und Acker im Satellitenbild aus den Oberflächentemperaturen der angrenzenden Flächen gemittelte Zwischenwerte. Werden diese Randbereiche von der Auswertung ausgeschlossen, so wird die Differenzierung zwischen den Nutzungsklassen deutlicher.

Bei der Klassifizierung der Nutzungen mit Hilfe des Satellitenbildes wurden auch verschiedene Baumarten unterschieden (vgl. Kap. D.4.1). Darauf aufbauend wurden die Temperaturverteilungen für Laub-, Misch- und Nadelwald ermittelt. Die im Gebiet vorhandenen Laubwaldbestände sind jedoch nicht nur relativ kleinflächig, sondern zumeist auch isoliert in landwirtschaftlicher Fläche gelegen. Dies dürfte das wenig plausible und den Sondenmessungen widersprechende Ergebnis erklären, nachdem sowohl im Mai als auch im September der Nadelwald kühler als der Laubwald gewesen ist.

Die in der topographischen Karte als Acker ausgewiesenen Flächen sind bewirtschaftungsbedingt phasenweise als offener Boden anzusprechen. Über einen Schwellenwert zweier Kanäle (Rot und nahes Infrarot, "Normalized Vegetation Index", NDVI) konnte innerhalb der Nutzungsklassen Acker/Grünland jeweils der offene Boden kartiert und der Temperatur gegenübergestellt werden.

Danach ist der offene Boden erwartungsgemäß deutlich wärmer als der Acker (im Mai 1992 um 5.5°C, im Juli 1987 um 3.0°C, im September 1991 um 2.6°C).

E.2. Mechanismen der Stofffestlegung und des Stoffaustrags

Um den Stoffverlustprozeß als Grundlage für eine nachhaltige Bewirtschaftung besser zu verstehen, wurden die Stoffestlegungs- bzw. Stoffaustragsprozesse bezüglich ihrer Mechanismen, aber auch bezüglich ihrer räumlichen Verteilung untersucht. Dabei erfolgte sowohl eine Betrachtung der Transport- und Reaktionsprozesse im Einzugsgebiet als auch der Prozesse im Gewässer. Die räumlich und jahreszeitlich differenzierten Stoffausträge aus den einzelnen Teileinzugsgebieten (Berechnungsabschnitten) der Stör sind in Kap. F.7.2 dargestellt. Eine differenzierte Abfluß- und Stoffaustragsbetrachtung der einzelnen Orte eines Flußlaufs erfordert jedoch vorab eine weitgehende Kenntnis der dynamischen Prozesse im Einzugsgebiet. Sie ist daher meist erst nach längerer Beobachtung der Prozesse und nach Identifizierung der Quellen ihrer Varianz mit größerer Sicherheit möglich. Bei ungehinderter Entwicklung natürlicher Systeme werden die irreversiblen Stoffausträge minimiert, d.h. die Differenzen zwischen Abfluß und den Frachten einzelner Stoffe maximiert. Störeinflüsse (wie zum Beispiel eine nicht an die Landschaftsdynamik angepaßte Bewirtschaftung oder auch Katastrophen) setzen diesen Optimierungsprozeß teilweise zurück. Die dabei auftretenden irreversiblen stofflichen Verluste weisen räumliche und - bei hinreichender Beobachtungsfrequenz - zeitliche Muster auf. Die Muster ermöglichen Aussagen über Frequenz und Umfang (Amplitude) der Störeinflüsse.

Eine Verlangsamung des Stoffaustragsprozesses erfolgt durch den sich kürzer schließenden Wasserkreislauf in sich ungehindert entwickelnden Landschaften (Selbstoptimierungsprozeß, Kap. B).

Darüber hinaus bestimmen die Transporte aus den Böden der Einzugsgebiete die Frequenzen der stoffspezifischen Lösungs- und Festlegungszyklen. Diese Zyklen ergeben sich aus der Wechselwirkung zwischen Bodenwasser und fester Bodenmatrix. Rückgekoppelt ist diese Wechselwirkung an den Fluß des Wassers, seine Zusammensetzung sowie an die Größe des vom Wasser in einem bestimmten Zeitraum passierten Bodenprofils. Auch in den Gewässern erfolgen durch die Interaktion zwischen Wasser und den festen Strukturelementen (z.B. lebende und abgestorbene Pflanzen, Sand, Steine) Stofflösungs- und Festlegungsprozesse, über die es netto zu einer Frachtminimierung kommt. Die wahrnehmbaren Ergebnisse der Interaktion sind Aufwuchsbildung sowie Partikelwachstum im Seston oder in den Sedimenten (z.B. Kristallisation von Karbonaten oder Phosphaten an den Partikeloberflächen). Dabei sind anorganische Lösungs- und Fällungsprozesse sowie biologische Stoffrückhaltemechanismen in ihrer raum-zeitlichen Kopplung von größter Bedeutung. Diese Prozesse sind zwar in Laboratorien nachzuvollziehen, aber aufgrund ihrer unbekannten raum-zeitlich diskreten Verteilung und der vielfachen Rückkopplung kaum modellierbar, geschweige denn in die Natur übertragbar. Die wichtigsten chemischen Mechanismen stellen dabei die an biologische Produktions- und Respirationsprozesse gekoppelten Reaktionen des organischen Kohlenstoffs und der Kohlensäure dar. Diese Reaktionen sind ihrerseits im Wasser stark an die Transport- bzw. Verteilungsprozesse der chemischen Potentiale mit dem Wasserfluß rückgekoppelt.

E.2.1. Transport- und Reaktionsprozesse im Einzugsgebiet

E.2.1.1. Anorganische Lösungs-/Fällungsprozesse und biologische Prozesse

Die Triebfeder für die Lösungsprozesse ist die ständige Erneuerung von chemischen Potentialen. Sie erfolgt zum einem durch den Transport von Wasser, der an der Bodenoberfläche vorrangig Niederschlagswasser umfaßt. Über den Wassertransport werden Reaktanten (z.B. Elektronenaktzeptoren und/oder Protonen) zugeführt und Reaktionsprodukte (Ionenlösungen, CO_2 und andere Metabolite) abgeführt. Zum anderen werden die Potentiale durch die fortwährende Bereitstellung abbaufähigen organischen Materials als Kohlenstoffquelle in den Böden erneuert:

Versickernde Niederschläge, die beim Auftreffen auf die Bodenoberfläche noch sehr wenig gelöste Stoffe enthalten (vgl. Kap. F.1.1.1), werden bereits in den obersten Schichten der Böden durch Auflösung von Karbonaten, Sulfaten und Chloriden stark mit Ionen angereichert. Auch Silikate werden vielfach gelöst, doch legen sie sich durch Polymerisation relativ rasch an anderer Stelle wieder fest. Bereits in etwa 100 cm Tiefe sind durch Auflösung von leicht verwitterbarem oder bereits teilweise verwittertem Bodenmaterial die Lösungen des Bodenwassers meist von einer elektrischen Leitfähigkeit von < 5mS/m auf mehrere 10 mS/m angestiegen. Ihre chemische Zusammensetzung weist oft schon Eigenschaften von Bodenwasser bzw. - bei thermodynamischem Gleichgewicht - von Grundwasser auf.

Respiratorische Abbauprozesse durch Bakterien und Pilze, die in wechselfeuchten Bodenschichten im unmittelbaren Pflanzenwurzelbereich ausgeprägter als in feuchten Phasen sind, erhöhen den Partialdruck der Kohlensäure. Diese verschieben die Gleichgewichtsbedingungen für die Lösung von Basen (z.B. Karbonaten) stark in Richtung höherer Löslichkeit.

Auch durch respiratorische Abbauprozesse mit dem Luftsauerstoff, bei der organische Stickstoff- und Schwefelverbindungen zu Starksäuren (wie Salpetersäure oder Schwefelsäure) oxidieren, wird anorganisches Bodenmaterial zusätzlich verwittert bzw. werden Basen als Nitrate und Sulfate transportfähig gemacht. Als Beispiel sollen hier die Reaktionen im belüfteten Boden bei der Gülledüngung betrachtet werden:

Harnstoff wird durch hydrolytische Desaminierung mittels Ureaseenzym gespalten:

1) $NH_2\text{-}CO\text{-}NH_2 + H_2O \longrightarrow 2\ NH_3 + CO_2$

2) $NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4^+ + OH^-$

Unter Sauerstoffzutritt wird Ammonium zu Nitrit und Nitrat bakteriell nitrifiziert:

3) $NH_4^+ + 1{,}5\ O_2 \longrightarrow NO_2^- + 2\ H^+ + H_2O$ durch Nitrosomonas

4) $NO_2^- + 0{,}5\ O_2 \longrightarrow NO_3^-$ durch Nitrobacter

Die dabei gebildeten 2 Salpetersäuremoleküle lösen Kalk als Calciumnitrat auf:

5) $CaCO_3 + 2\ HNO_3 \longrightarrow Ca(NO_3)_2 + H_2O + CO_2$

Schwefelsäurebildung aus reduzierten Schwefelverbindungen geschieht analog und resultiert in einer erhöhten Basenauswaschung durch Bildung von relativ leichtlöslichem Gips.

Die Kopplung der Austragsmuster an die Trocken- und Naßphasen des Bodens wurde anhand von Auswaschungs-Versuchen (Leaching-Versuche) aufgezeigt. Dazu wurden zwei Standzylinder aus

Plexiglas mit einer an organischer Substanz reichen Sand-Gewässersedimentmischung gefüllt. Während der eine Zylinder kontinuierlich feucht gehalten wurde, unterlag der andere durch einen intermittierenden Wasserfluß ständig wechselfeuchten Phasen (Abb. 36). Die Menge des durch die beiden Versuchsanlagen geflossenen Wassers war etwa gleich.

Im Vergleich zum kontinuierlichen Wasserfluß wurden bei dem intermittierenden eine deutlich höhere Säurebildung und daran gekoppelt auch höhere Stoffausträge beobachtet (Abb. 37).

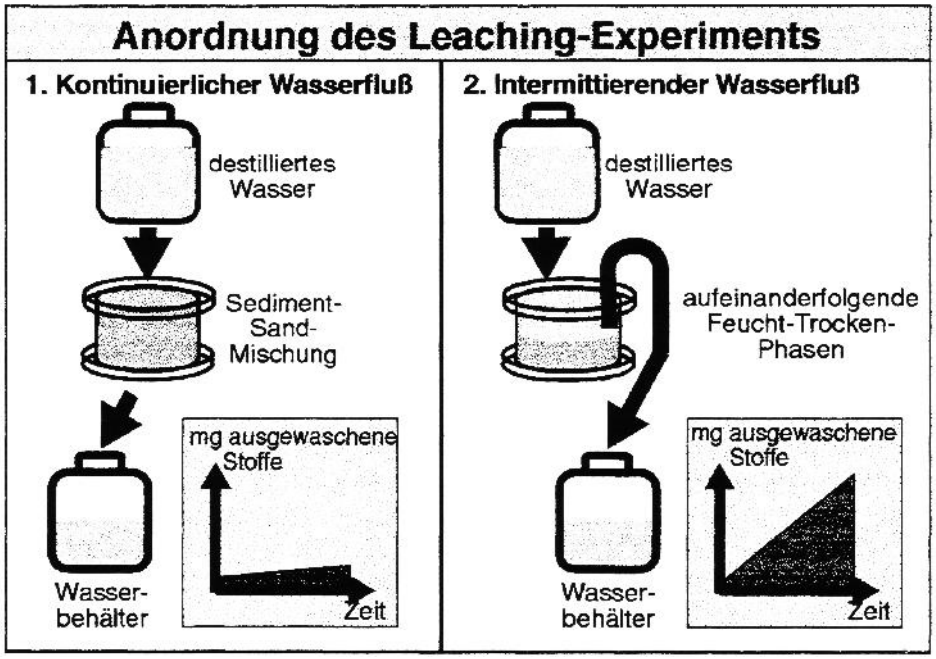


Abb. 36: Aufbau des Leaching-Versuches.

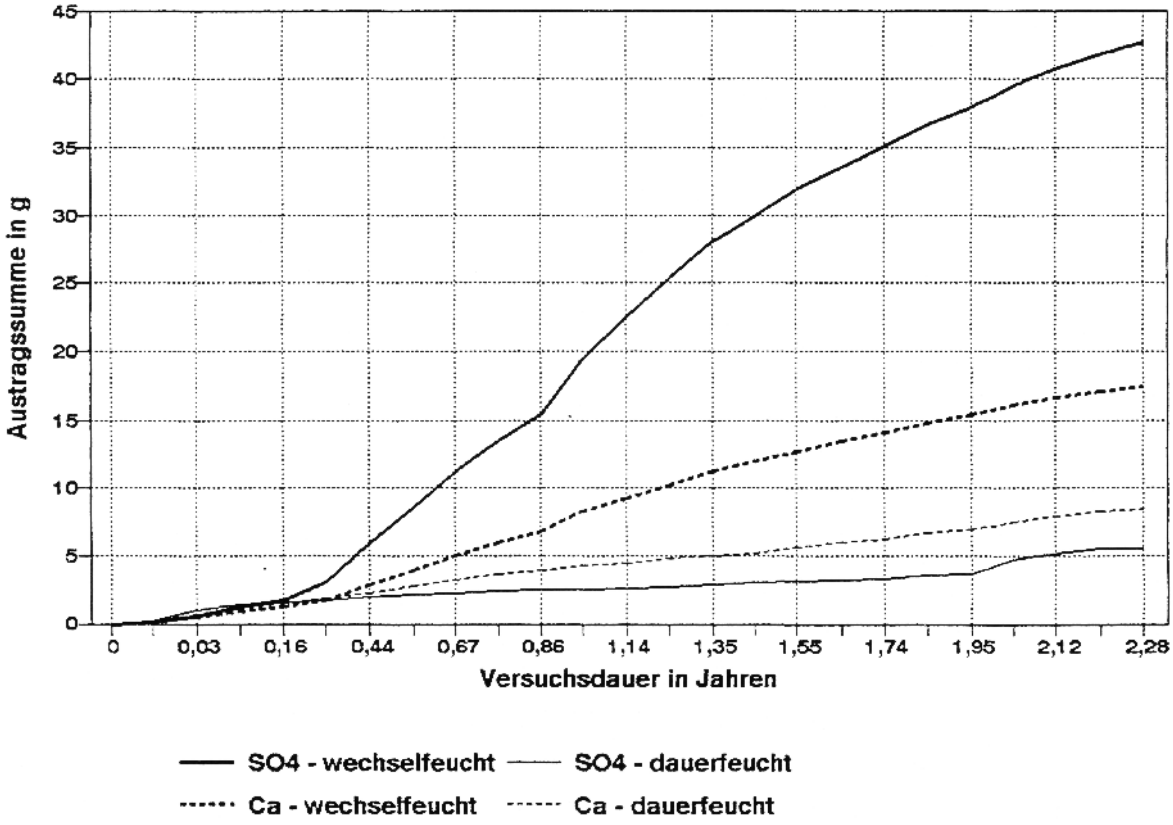


Abb. 37: Calcium und Sulfataustrag aus den Versuchszylindern.

Bei bereits sauren Bodenbedingungen (wie sie z.B. in Nadelwäldern meist auf Grenzertragsflächen vorkommen) werden auch die aufgrund ihrer geringeren Löslichkeit oberflächlich angereicherten Schwermetalle sowie Aluminium gelöst, transportiert und verlagert.

Die respiratorischen Abbauprozesse erfordern einen vertikalen Wassertransport, um die Reaktionspotentiale aufrechtzuerhalten. Wird dieser Wasserstrom über die Wurzeln von den Pflanzen und ihrer Transpiration gesteuert, erfolgt der Abbau durch diese kontrolliert. Es wird nur soviel organisches Material mineralisiert, wie von den Pflanzen zur Aufrechterhaltung ihrer Produktivität benötigt wird. Meliorative Eingriffe in den Bodenwasserhaushalt zur Steigerung der Nettoproduktivität haben jedoch auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen diesen Regelkreis erheblich gestört.

Die bessere Durchlüftung des Oberbodens durch die Absenkung des Bodenwasserspiegels sowie die Vergrößerung der reaktiven Partikeloberfläche durch Pflügen haben zum Anstieg der Mineralisierung organischer Substanz, der damit verbundenen Starksäurebildung und einer stark gesteigerten Verwitterung basenhaltiger Mineralstoffe geführt. Der Wasserfluß im Boden wurde dynamisiert und die Böden trockneten allmählich zunehmend aus. Von besonderer Bedeutung ist die dabei eingetretene Veränderung der Porenverteilung des Oberbodens in Richtung eines geringeren Anteils wasserhaltender Kapillarporen, da die kleineren Partikel zuerst ausgewaschen werden. Ursprünglich wurden mit der Entwicklung wasserhaltender Strukturen mit nur geringem Wasserdurchfluß die o.g. oxidierenden, versauernden und damit basenlösenden Prozesse durch reduzierende und neutralisierende Festlegungsprozesse (wie Denitrifikations-, und Desulfurikationsprozesse) abgelöst. Mit der Beschleunigung des Wassertransports nahm die organogene Prägung des Bodens ab. Dadurch wurden die Festlegungsprozesse verringert und der Stoffffluß im Boden beschleunigt.

E.2.1.2. Bodenprozesse bei unterschiedlichem landschaftlichen Wirkungsgrad

Über den Zusammenhang zwischen Bodenwasserhaushalt und dem stoffspezifischen Austrag (z.B. an Anionen) kann in vielen Fällen die Phasenlage der Landschaft in den Teileinzugsgebieten bestimmt werden (Kap. F.2.4.2). Die Fließgewässer in einer strukturoptimierten Landschaft weisen relativ gedämpfte Abflußamplituden auf. Die Abflüsse sind chemisch durch Calcium- bzw. Magnesiumbikarbonat geprägt und enthalten kaum Nitrate, Sulfate und Chloride. Letztere nehmen durch anthropogen bedingte Störeingriffe stark zu (s.u.). Durch sie werden die Respirationsprozesse im Boden gesteigert und damit auch die Konzentration der abfließenden Basenbikarbonatlösungen. Mit Zunahme der Respirationsprozesse erhöht sich der Kohlensäurepartialdruck im Boden gegenüber der Atmosphäre. Durch die höhere Kohlensäurekonzentration sinkt der pH-Wert und im sauren lösliche Stoffe werden verstärkt aufgelöst.

Bei hohem landschaftlichen Wirkungsgrad unterliegt das Wasser im Boden vorwiegend einem sehr langsamen vertikalen Transport. Anreicherungsschichten mit einem hohen Anteil an organischer Substanz begünstigen eine horizontale Ablenkung des Wasserflusses. Dabei wird der geringlösliche Sauerstoff rasch gezehrt. Die sauerstofftragenden Anionen werden mittels anaerober Atmung von spezialisierten Bakterien zur Endoxidierung von geeigneten Kohlenstoffquellen verwendet. Nitrat und Sulfat dienen unter den sauerstofffreien Bedingungen wassergesättigter organischer Böden als Elektronenakzeptoren: Nitrat wird unter Abgabe von molekularem Stickstoff denitrifiziert, Sulfat zu Schwefelwasserstoff reduziert und meist als Eisensulfid oder molekularer Schwefel festgelegt. In beiden Fällen entstehen Kohlendioxid aus der Oxidation von Kohlenstoff und Hydroxylionen aus der Reduktion von Anionen. Die Reduktion der Anionen fördert somit durch den damit verbundenen pH-Anstieg wieder eine Festlegung von zweiwertigen Basen, wie Calcium

und Magnesium, als Karbonate. Diese werden aus den transportierten Lösungen unter Protonen- bzw. Kohlensäureabgabe wieder ausgefällt[19]. Die gelöste Basenmenge wird über die aus den Reaktionen resultierenden pH-Werte und den aktuellen Kohlensäurepartialdruck bestimmt.

Die leichtlöslichen Chloride sind meist schon seit langer Zeit aus den Böden herausgelaugt und werden heute nur durch Immissionen von Salzstäuben aus dem Meer und durch anthropogene Emissionen in die Landschaft eingebracht. Ihr erhöhtes Auftreten ist daher meist auf einen unmittelbaren Einfluß des Menschen zurückzuführen.

Auf bereits veränderte Bodenprozesse deuten Sulfate und Nitrate hin. Das zunehmende Vorkommen dieser Anionen ist ursprünglich kaum auf Überdüngung zurückzuführen, sondern auf massive Eingriffe in den Wasserhaushalt der Böden. Beispiel dafür bildet die Absenkung des Bodenwasserspiegels. Die Eingriffe bewirkten eine "biochemische Erosion" ursprünglich akkumulativer, reduzierender Bodenstrukturen. Einher gingen sie zunächst mit Austrägen von Sulfaten. Später, als auch die denitrifizierenden Bodenhorizonte stark durchlässig für Wasser wurden, kamen die Nitrate hinzu. Dies hat zu einer zunehmenden Bodendegradierung und damit zur Notwendigkeit geführt, immer höhere Stickstoffmengen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit aufzubringen. Durch Düngung wurden auch die zunehmenden Verluste von Stickstoff durch das immer rascher abfließende Bodenwasser kompensiert. Ein zunehmender Basenaustrag war die Folge.

Zusammenfassend betrachtet ist das Nitratproblem der Böden und des Grundwassers wasserwirtschaftlich bedingt. Zugrundezulegen ist ihm der beschleunigte Wassertransport und die dadurch induzierte Bodenzerstörung durch erhöhte Mineralisierung. Ausgelöst wurde dieser Prozeß durch die Aufhebung der niedrigen Redoxverhältnisse, welche bei geringem Wasserfluß im Boden vorherrschen. Die sich daraus ergebenden negativen Rückkopplungen auf den Abbauprozeß müssen heute vielfach durch Anhebung der Düngegaben kompensiert werden. Erhöhte Sulfat- und Nitratkonzentrationen der Fließgewässer in Teileinzugsgebieten der Stör (vgl. Fließschemata in Kap. F.6.2) deuten auf nicht mehr funktionierende Denitrifikations- und Schwefelfestlegungsmechanismen (Desulfurikation) in den Böden bzw. einen sehr starken Oxidationsprozeß organischer Substanz hin.

E.2.1.3. Einfluß der Partikeloberfläche auf den Stoffaustausch zwischen Wasser und Substrat

Die größeren Oberflächen der feineren Fraktion der Bodenteilchen (Ton, Schluff) wirken bei der Stoffbindung selektiv auf die Stofflöslichkeit. Dies zeigen chemische Analysen zweier Größenfraktionen von Boden- und Sedimentproben aus dem Störgebiet.

Für die Untersuchung wurden in mehreren Fließgewässern der Stör (Himmelreichbach, Buerwischbek, Osterau, Höllenau und Schwale) (vgl. Anhang 1) insgesamt 17 Sedimentproben und an 28 Standorten der Bodenwasserpegel Mischproben des Bodens getrennt nach verschiedenen Tiefen (insgesamt 69 Proben) genommen. Die Proben wurden gesiebt und in zwei Fraktionen getrennt analysiert. Die feinere Fraktion umfaßte Korngrößen unter 0.02 mm, die gröbere die Korngrößen zwischen 0.02 mm und 0.071 mm.

In den Sedimenten ist das Verhältnis von Alkali- zu Erdalkalimetallen[20] in der feinsten Fraktion (<0.02 mm) am geringsten, in den Bodenprofilen dagegen in der gröberen Fraktion. Im Sediment herrschen wassergesättigte Bedingungen vor, so daß die leichter löslichen Salze schneller gelöst

19 Z.B. $Ca^{2+} + HCO_3^- \longrightarrow CaCO_3 + H^+$ oder $H^+ + HCO_3^- \longrightarrow CO_2 + H_2O$.

20 Alkali-Metalle: Natrium, Kalium, Lithium; Erdalkali-Metalle: Magnesium, Calcium.

und wegtransportiert werden. Im Boden dagegen erfolgt ein ständiger Wechsel feuchter und nasser Phasen. Dabei konzentrieren sich die leichter löslichen Salze in den Austrocknungsphasen an den feineren Partikeln, an denen das Wasser zuletzt verdunstet.

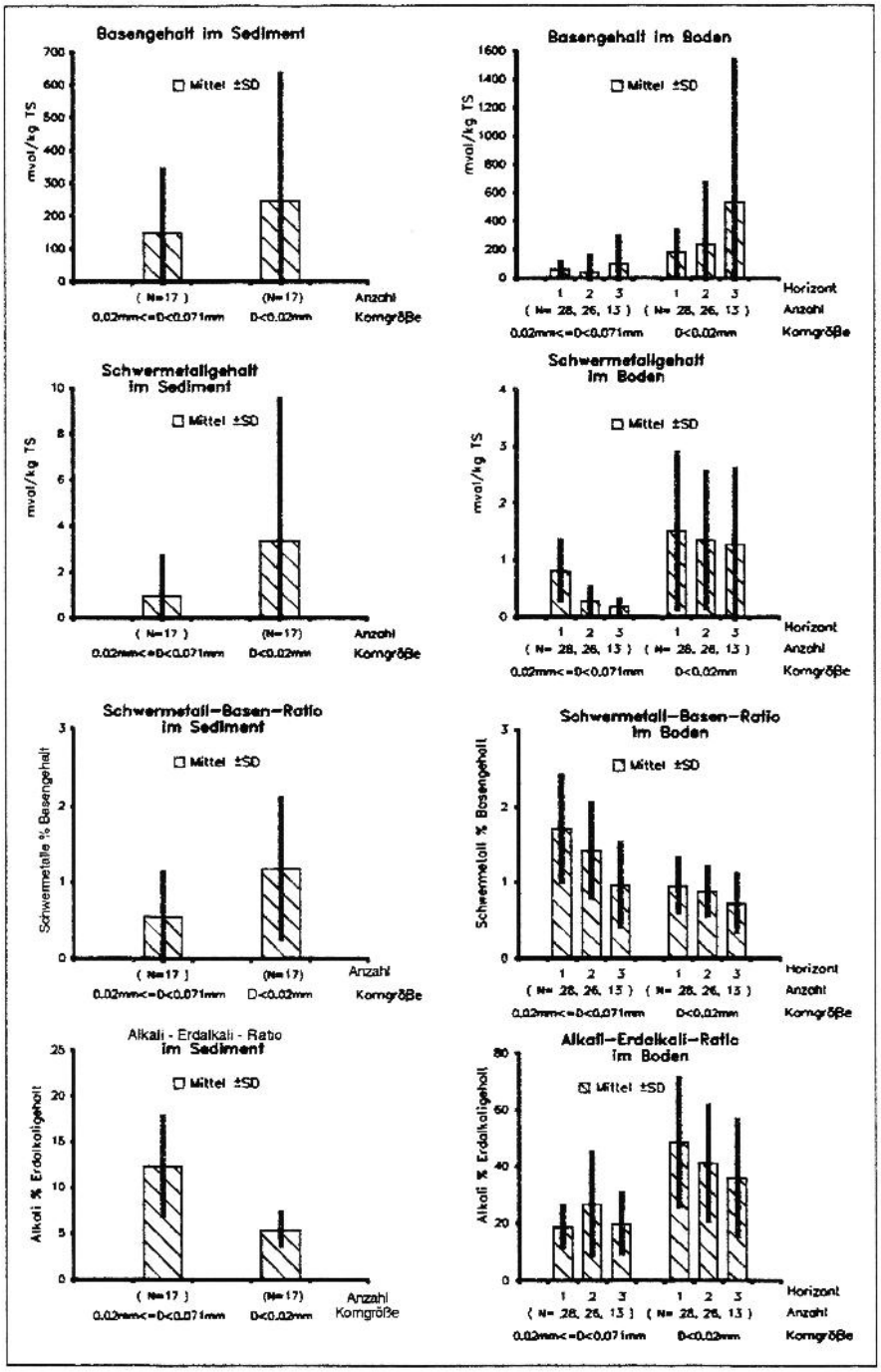


Abb. 38: Vergleich von Boden- und Sedimentproben aus dem Störgebiet anhand der Schwermetall-Basen- und Alkali-Erdalkali-Verhältnisse.

Ein analoges Erscheinungsbild zeigt das Verhältnis von Schwermetallen zu Basen. Im Boden ist dies in der feinen Fraktion geringer als in der göberen, in den Sedimenten ist es genau umgekehrt. Der Schwermetall- und Basengehalt dagegen ist fast an allen Stellen jeweils in der feinen Fraktion höher. Auch hier kann die größere Oberfläche der feineren Fraktion als Erklärung dienen. Die Basen und Schwermetalle werden in dieser Fraktion schwerer gelöst als in der gröberen. Da die Schwermetalle schwerer löslich sind als die Basen, erfolgt auch ihre Auswaschung aus dem Bo-

den vergleichsweise langsamer. Dieser Unterschied ist in der feinen Fraktion von geringerer Bedeutung als bei der gröberen, wo der Anteil an gebundenen Basen von vornherein niedriger ist.

Die Analysen zeigen außerdem, daß der Basengehalt der tieferen Bodenschichten höher als in den oberen Schichten ist. Durch den von der Oberfläche her wirkenden Auswaschungsprozeß ist das Verhältnis der Schwermetalle zu den Basen in den oberen Bodenschichten für die Vegetation ungünstiger als in den unteren.

E.2.1.4. Jahreszeitliche Differenzierung des Austragsprozesses

Die erhöhten Anionenkonzentrationen treten vorerst in jahreszeitlichen Mustern auf, welche durch den phasenverschobenen Reaktions- und Transportprozeß des Wassers geprägt sind: Bei absinkendem Bodenwasserspiegel von etwa April bis September wird bei jedem Regenereignis der Boden bei relativ hohen Temperaturen befeuchtet, wodurch beschleunigte Mineralisationsprozesse im wasserungesättigten Boden begünstigt sind. Zeitverschoben dazu werden bei ansteigendem Bodenwasserspiegel und zunehmendem Abfluß die Reaktionsprodukte in die Oberflächengewässer transportiert. Aus den sich daraus ergebenden Mustern des Nitrat- und Sulfataustrags lassen sich Rückschlüsse auf die zeitliche und räumliche Prozeßverteilung in den Teileinzugsgebieten ziehen. Die Konzentrationsmuster sind im Zusammenhang mit der Abflußdynamik zu betrachten. Mit ansteigendem Wasserfluß im Oktober - November gehen so Konzentrationsanstiege einher. Eine Verschiebung dieser Konzentrationsanstiege in den Sommer ist anzunehmen, aber aufgrund des zu kurzen Untersuchungszeitraumes nicht zu belegen. Zugrunde liegt dem die verringerte Verdunstung auf den versickerungsgeprägten Böden. Sie führt zu hohen Schwankungen der Bodentemperatur (vgl. Kap. E.1) und zu vermehrten wechselfeuchten Phasen. Der Abbauprozeß der organischen Substanz ist begünstigt. Niederschlagsabhängig werden somit durch den hohen Sickerwasseranteil große Mengen der freigesetzten Stoffe ausgewaschen.

Ein wassergesättigtes Bodensystem wiese dagegen nur an der Bodenoberfläche solche Reaktionen auf. Transporte träten nur in geringfügigem Ausmaß auf. Auch Produkthemmung und verringerter Transport von Elektronenaktzeptoren (negative Rückkopplung) minimierten die Bodenausträge. In ungestörten, natürlichen Böden sorgen schwellende, meist organische, Bodenkolloide für eine hohe Wasserhaltekapazität und demzufolge für eine geringe Versickerung. Ein in erster Linie über die Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln bewirkter Wassertransport könnte die Mineralisierung steuern.

Im Störgebiet weisen selbst viele der untersuchten Moore relativ hohe Konzentrationen an Basen im Abfluß auf. Dabei ist zu vermuten, daß die Frachten aus an Calcium reicher Mudde bzw. Sediment unter der Torfauflage stammen. Die hohen Konzentrationen im Sommer sind durch einen höheren Sickerwasseranteil zu erklären. Im Winter hingegen fließt das Niederschlagswasser bei Wassersättigung der oberen Schichten zu einem größeren Teil oberflächennah ab (geringere Perkolation). Dadurch wird das Wasser stärker verdünnt. Dies schlägt sich in geringeren Konzentrationen nieder. Dies konnte z.B. an den Meßstellen im Gebiet der oberen Dosenbek beobachtet werden (vgl. Anhang 2, F.2.1.3).

E.2.1.5. Bedeutung des Abflusses in seiner raum-zeitlichen Verteilung auf den Stoffaustrag

Im Abflußgeschehen ist das räumliche und zeitliche Verhalten der einzelnen Abflußkomponenten von Bedeutung. Gibt es sehr rasche, oberflächlich abfließende Anteile und geringe Schichten- oder

Grundwasserabflüsse, wird das abfließende Wasser eine höhere Varianz der Konzentrationen bei geringeren Mittelwerten aufweisen. Die relativ hohen Abflußwerte von ca. 20 m^3/ha/a und damit auch die sehr hohen Frachten des Himmelreichbaches sind vor allem auf ungewöhnlich hohe Abflußwerte im Jahr 1993 zurückzuführen, die von der Entwicklung in den anderen Einzugsgebieten im Zeitraum 1992-1994 abweichen. Aufgrund der geringen Größe des Einzugsgebietes von 0,92 km^2 müssen lokale Besonderheiten dafür verantwortlich sein. Die Fuhlenau weiter unterhalb weist im Mittel einen Abfluß von etwa 16 m^3/ha/d auf; die Entwicklung über die Jahre 1992-1994 entspricht aber der der anderen Einzugsgebiete.

In der Schwale dagegen beträgt der mittlere Abfluß nur etwa 7 m^3/ha/d und die mittleren Konzentrationen der Basen sind gegenüber dem Himmelreichbach stark erhöht (vgl. Anhang 2, F.2.1.3).

Für die Analyse der Nachhaltigkeit der Landschaft sind somit die lokalen Abflußbedingungen von höchster Bedeutung. Eine durch perenne Vegetation geprägte Fläche mit einem über das gesamte Jahr maximierten und weitgehendst vergleichmäßigten Verdunstungs-Kondensationsprozeß kann neben der Temperatur auch den Abfluß stark vergleichmäßigen. Gleichzeitig senkt die Vegetation mit der Entwicklung einer wasserhaltenden organischen Auflage die Prozeßdichte im Boden ab. Dies geht mit niedrigen Stoffkonzentrationen in den Gewässern einher, was am Gehege Himmelreich nachvollzogen werden kann. Ein geringer mittlerer Flurabstand mit geringer Varianz ist dafür eine notwendige Voraussetzung. Jedoch können trotz geringer Lösungs- und Respirationsprozesse durch vergleichsweise höhere Abflüsse größere Stofffrachten auftreten, als es der oberflächlich betrachtete Landschaftszustand vermuten läßt. Auch hierfür bildet das Gehege Himmelreich ein Beispiel.

Im gesamten Störeinzugsgebiet sind die aus der Landschaft in die Gewässer eingetragenen Lösungen stark durch die landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen und siedlungswasserwirtschaftlichen Aktivitäten geprägt (vgl. Kap. E.3). Die Rückhaltemechanismen der Landschaft für die verschiedenen Stoffe sind infolge des gesteigerten Wasserabflusses durch die Böden und der eingeschränkten Verdunstung stark gestört. Hohe Nitratflüsse bei geringen Bikarbonatgehalten, wie sie in der Dreckau festgestellt wurden, deuten auf eine weitgehende Basenerschöpfung hin (Abb. Anhang 2, F.2.1.3).

Auch in den Gewässern wird durch Ausbau und Unterhaltung der Selbststrukturierungsprozeß, z.B. durch die Unterhaltung von Sandfängen, verhindert und damit die Rückhaltefähigkeit für eingetragene Stoffe verringert.

E.2.2. Stoffestlegung im Gewässer

Mit dem vom Niederschlag abhängigen Wasserfluß im Boden findet ein Stofftransport in Richtung der Gewässer statt. Die Reaktionspotentiale für respiratorische Abbauprozesse werden erneuert (s.o.) sowie Stoffe in gelöster Form aus dem Oberboden den Gewässern zugeführt. Der Stoffeintrag in die Gewässer umfaßt vorrangig Bikarbonate, Sulfate, Nitrate sowie in gewissem Ausmaß auch Silikate der pflanzennotwendigen Basen. Aber auch Metalle, wie Eisen und in geringen Anteilen auch Mangan und Aluminium gehören dazu. Die gemessenen erhöhten Chloridkonzentrationen stammen überwiegend aus anthropogenen Quellen, wie z.B. punktuellen Abwassereinleitungen (erkennbar an dem ständigen Auftreten höherer Chloridkonzentrationen) oder Gülledüngung (erkennbar an dem kurzfristigen Auftreten von hohen Nitratkonzentrationen). Sie sind daher kaum aus Bodenprozessen abzuleiten.

Im Stofftransportprozeß der Gewässer spielen für die divalenten (zweiwertigen) Basen, wie z.B. Calcium oder Magnesium, die chemischen Gleichgewichtsreaktionen der Stoffübergangs-, Lösungs- und Fällungskinetik eine entscheidende Rolle. In den Gewässern erfolgt der Abbau einer Stoffübersättigung, z. B. mit Calcium, kurz nach dem Eintritt des Bodenwassers. Mit dem Ausgleich des Kohlensäurepartialdrucks zu dem der Atmosphäre kommt es zur Kalkausfällung, z.B. als Tuffe oder Seekreiden. Folglich kann eine permanente Calciumübersättigung in intakten Gewässern nur in Quellbereichen auftreten. Weiter abgesenkt wird die Calciumübersättigung, sobald sich eine Vegetation im Gewässer ausbildet. Durch die Produktionsprozesse wird dem Wasser zusätzlich Kohlensäure entzogen. Mit der dadurch bedingten pH-Erhöhung kommt es zur biogenen Kalkausfällung. Die Leitfähigkeit solcher Wässer weist etwa 6 - 10 mS/m auf. Dies bestätigen eigene Messungen an einem unbewirtschafteten Gleichgewichtssystem in den Kalkalpen.

Fließgewässer mit einem zu geringen Breiten-Tiefen-Verhältnis, einer unmittelbar am Ufer stark nettoproduktiven Vegetation oder mit einem durch Abwässer bedingten hohen Sauerstoffbedarf (BSB) sind durch die Dominanz von Abbauprozessen stark heterotroph geprägt. Stoffestlegungsprozesse sind in ihnen herabgesetzt: Die geringe Grenzschicht Wasser-Atmosphäre und die hohe Geschwindigkeit des Wasserflusses verhindern einen Ausgleich des Kohlensäurepartialdrucks im Wasser mit dem der Atmosphäre. Dieser Stoffübergang ist bezüglich seiner Kinetik wesentlich träger als der Sauerstoffübergang. Hinzu kommt der intensive Respirationsprozeß an den transportierten organischen Partikeln. Die Partikel tragen oberflächlich meist eine reichliche Bakterienflora. Deren Abbauprozesse begünstigen während des gesamten Jahres, insbesondere bezogen auf das Calcium, den Transport von wesentlich höheren Konzentrationen, als es dem bei chemischen Gleichgewichtsbedingungen entspräche. Ferner steigen die Transporte gelöster Stoffe mit der Verringerung der Breiten-Tiefen-Varianz des Fließgewässers. Aufgrund der dann verkleinerten festen Phasengrenzflächen sind die turbulenten Anteile des Wassers, an denen ein Kohlensäure-Ausgleich mit der Atmosphäre stattfinden könnte, herabgesetzt. Natürliche Gewässer weisen durch die hohen Ausfällungen von Kalk und Kieselsäure, aber auch von Eisenockern in Vergesellschaftung mit Phosphaten, meist eine hohe Dynamik an der Partikeloberfläche auf. Sie optimieren damit den Stoffrückhalt. Die Entstehung abdichtender Konglomerate bzw. Breccien im Umfeld der Gewässer sind die Folge.

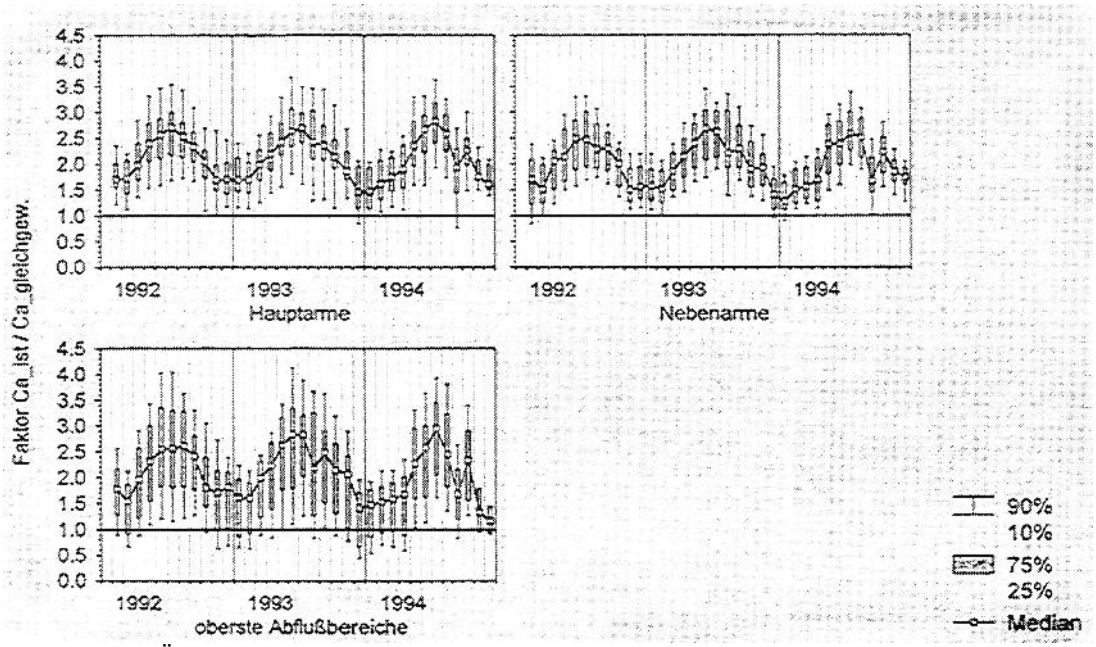


Abb. 39: Calcium-Übersättigung bezogen auf das Gleichgewicht mit dem CO_2 in der Atmosphäre.

In den betrachteten Fließgewässern in Teileinzugsgebieten der Stör lagen fast zu allen Zeitpunkten an fast allen Stellen die Calciumkonzentrationen über den chemischen Gleichgewichtsbedingungen (Abb. 39). Die Denitrifikation sowie die Desulfurikation, die besonders in Feuchtgebieten und Niedermoorstrukturen auftritt, war nur in äußerst bescheidenem Maß vorhanden. Die fehlende Möglichkeit der Gewässer, eine natürliche Dynamik in der Altarmbildung und Laufänderung auszubilden, ist aus diesen Gründen auch eine Ursache für die viel zu hohen irreversiblen Stoffverluste des gesamten Einzugsgebiets.

Wenn Flüsse zur Retention von Stoffen in der Landschaft signifikant beitragen sollen, müßten sie die ihnen eigene Abflußdynamik auf einer sehr viel größeren Fläche ausbilden können. Doch müßten diese Flächen zur Erfüllung dieser Funktion frei von jeglicher Nutzungskonkurrenz durch die herkömmliche Land-, Forst- und Wasserwirtschaft sein (vgl. Kap. G.). Ausgehen müßte der Prozeß der Wiederherstellung einer dynamischen Gewässerstruktur mit einer optimalen Stoffretention (Selbstreinigungsprozeß im weiteren Sinne) von den oberen Einzugsgebietslagen. Nur unter dieser Randbedingung können sich in den nachgeschalteten Gewässerabschnitten durch die Verringerung der Abflußschwankung und der Stoffzufuhr effiziente Rückhaltestrukturen ausbilden.

E.3. Konzentrationsmuster

Hinsichtlich ihres Jahresganges in der Konzentration können folgende drei Stoffklassen unterschieden werden:

1. Säurebildner wie Schwefel oder Stickstoff. Die Sulfat- oder Nitrat-Konzentration zeigt zeitlich verschoben die Abbauprozesse organischer Substanz an. Bei sinkendem Bodenwasserstand im Frühjahr/Sommer, d.h. einem abnehmenden Abfluß, dominiert der Stoffabbau in den oberen Bodenschichten gegenüber der Stofflösung und -verlagerung. Bei steigendem Wasserstand, d.h. bei zunehmenden Abfluß, erfolgt dagegen die vermehrte Lösung und die Auswaschung der freigesetzten Stoffe. Bei dem ersten stärkeren Anstieg des Abflusses am Jahresende nach einer längeren abflußarmen Zeit sind daher Konzentrations-Maxima im Gewässer zu beobachten (vgl. Abb. 39, 40; Anstieg im November 1992).

2. Durch die Löslichkeit bestimmte Stoffe, wie z.B. Calcium, Kalium oder Magnesium. Ihre Konzentration ist neben ihrer Löslichkeit zeitweise auch vom Wasserfluß abhängig. Ein "Einbrechen" der Werte ist nur bei sehr hohem Abfluß meßbar. Insgesamt ist die Schwankung (Standardabweichung) im Verhältnis zum Mittelwert daher sehr gering (Abb. 43 und Anhang 2, F.2.1.3).

3. Die überwiegend partikulär gebunden Stoffe, wie z.B. die Schwermetalle oder partikulärer Phosphor. Ihre Konzentration ist an den oberflächlichen Erosionsprozeß gekoppelt (Abb. 44). Der Quotient aus Mittelwert und Standardabweichung liegt bei diesen Stoffen nahe oder über eins (vgl. Fließschemata Schwermetalle oder Ges.-P). Dies zeigt an, daß ihr Austrag von kurzzeitigen Prozessen, wie z.B. Starkregenereignissen mit Oberflächenerosion, bestimmt wird.

Bei der Betrachtung der Konzentrationsmuster in den untersuchten Fließgewässern zeigt sich das für die 1. Stoffklasse beschriebene Phänomen des Konzentrationsmaximums bei dem ersten stärkeren Anstieg des Abflusses. Dies verdeutlichen die Abbildungen 41 und 43, die dies für drei

Variationsklassen[21] für Sulfat und Nitrat aufzeigen. Dort tritt der November 1993 mit einem deutlichen Anstieg der Konzentrationen gegenüber dem Ortsmittel hervor, was mit einem sehr starken Anstieg des Abflusses nach einer ausgeprägten Trockenphase zusammenfällt (vgl. Abb. 40).

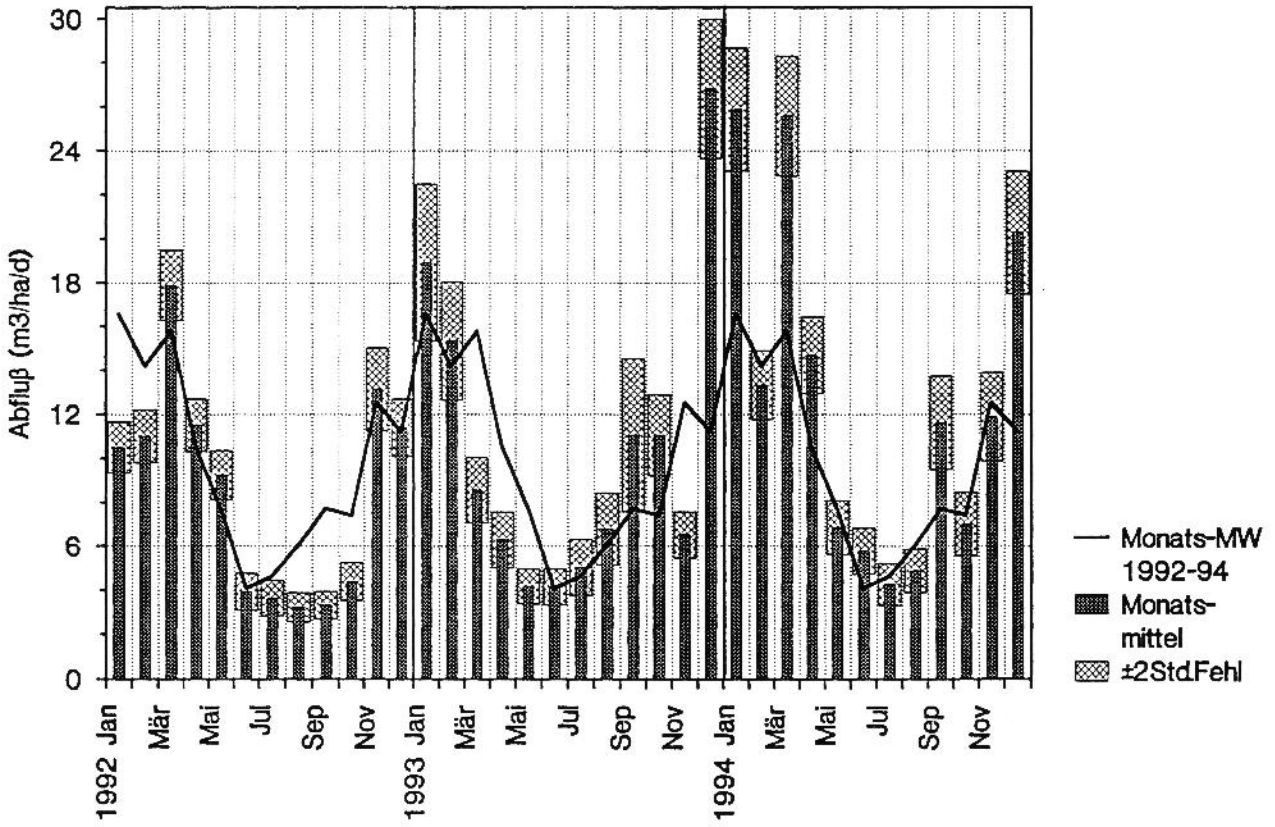


Abb. 40: Mittlerer flächenspezifischer Abfluß für 1992-1994 für 36 Meßpegel.

Für Calcium wird deutlich, daß die Schwankung in allen drei Variationsklassen sehr gering ist und sich die Werte nur in Monaten mit sehr hohen Abflüssen (März, November 1992, Januar, Februar, Dezember 1993) eine höhere Abweichung aufweisen (-30% in der dritten Variationsklasse im Dezember 1993). Ansonsten liegt sie zwischen -10% und +10% (Abb. 43).

Die Abhängigkeit des Gesamt-Phosphor-Gehaltes vom Abfluß zeigt sich vor allem in den Variationsklassen eins und zwei (Abb. 44). Mit den höheren Abflüssen im Herbst/Winter steigen auch die Konzentrationen an. In der dritten Klasse wird der Einfluß von Abwassereinleitungen deutlich, die das "normale" Muster (niedrige Werte im Frühjahr/Sommer, hohe Werte vor allem während des herbstlichen Anstieges) stören. Dies zeigen die durchgängig sehr hohen Standardabweichungen dieser Klasse in den Sommer- und Herbstmonaten.

21 Die Variationsklassen wurden folgendermaßen ermittelt: Für 12 chemische Parameter (Leitfähigkeit, Alkalinität, Chlorid, Sulfat, Ca, Mg, K, Ges.N, Ges.P, NO_3-N, Fe und Al) wurde die Schwankung an der jeweiligen Meßstelle nach der Formel $1+(SD_{Ort.1991-1994}/MW_{Ort.1991-1994})$ ermittelt (SD: Standardabweichung, MW: Mittelwert). Danach wurde den einzelnen Meßstellen das geometrische Mittel aus den 12 Werten zugeordnet und diese nach zunehmender Höhe des Wertes sortiert. Nach der Sortierung wurden drei gleichgroße Klassen gebildet. Die erste Klasse weist niedrige, die zweite Klasse mittlere und die dritte Klasse hohe Variationen auf.

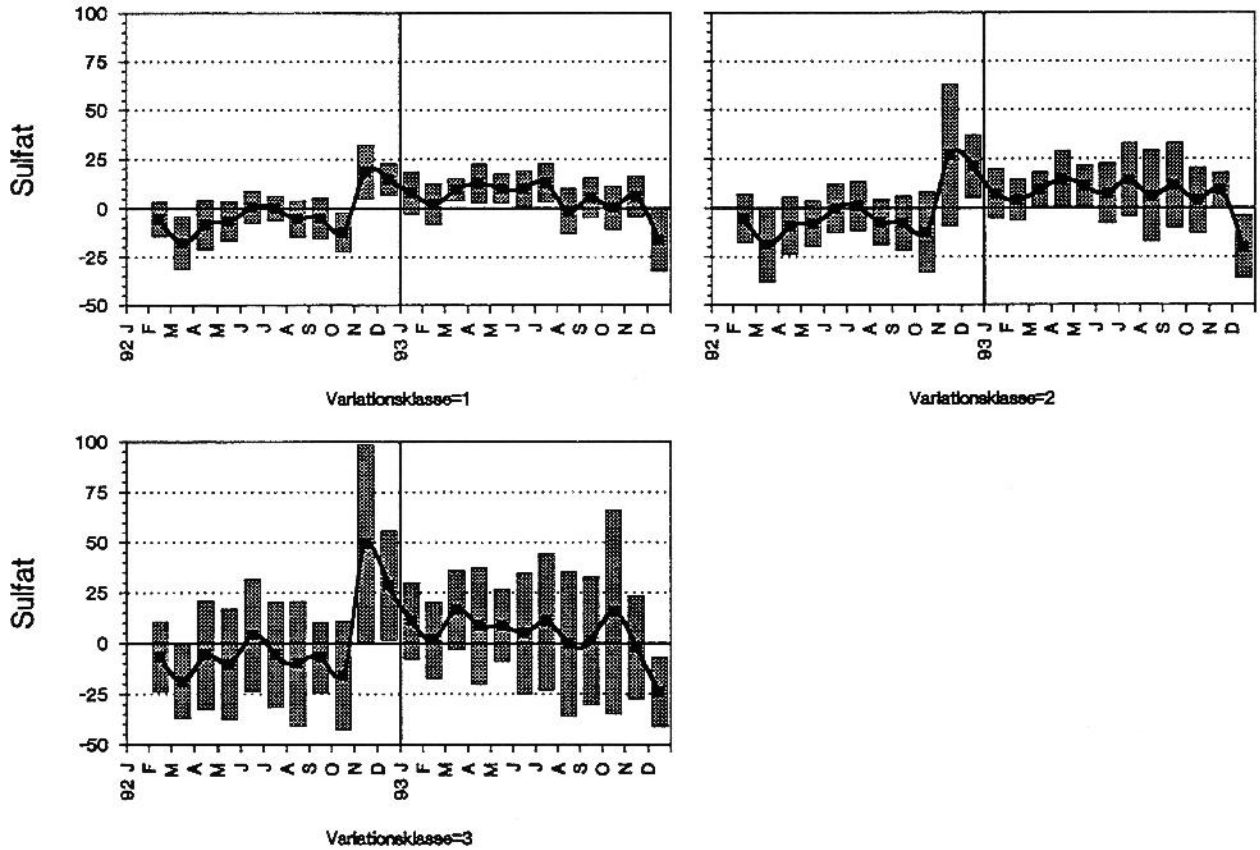


Abb. 41: Prozentuale Abweichung der Sulfatkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen (Zeitraum 1992-1993).

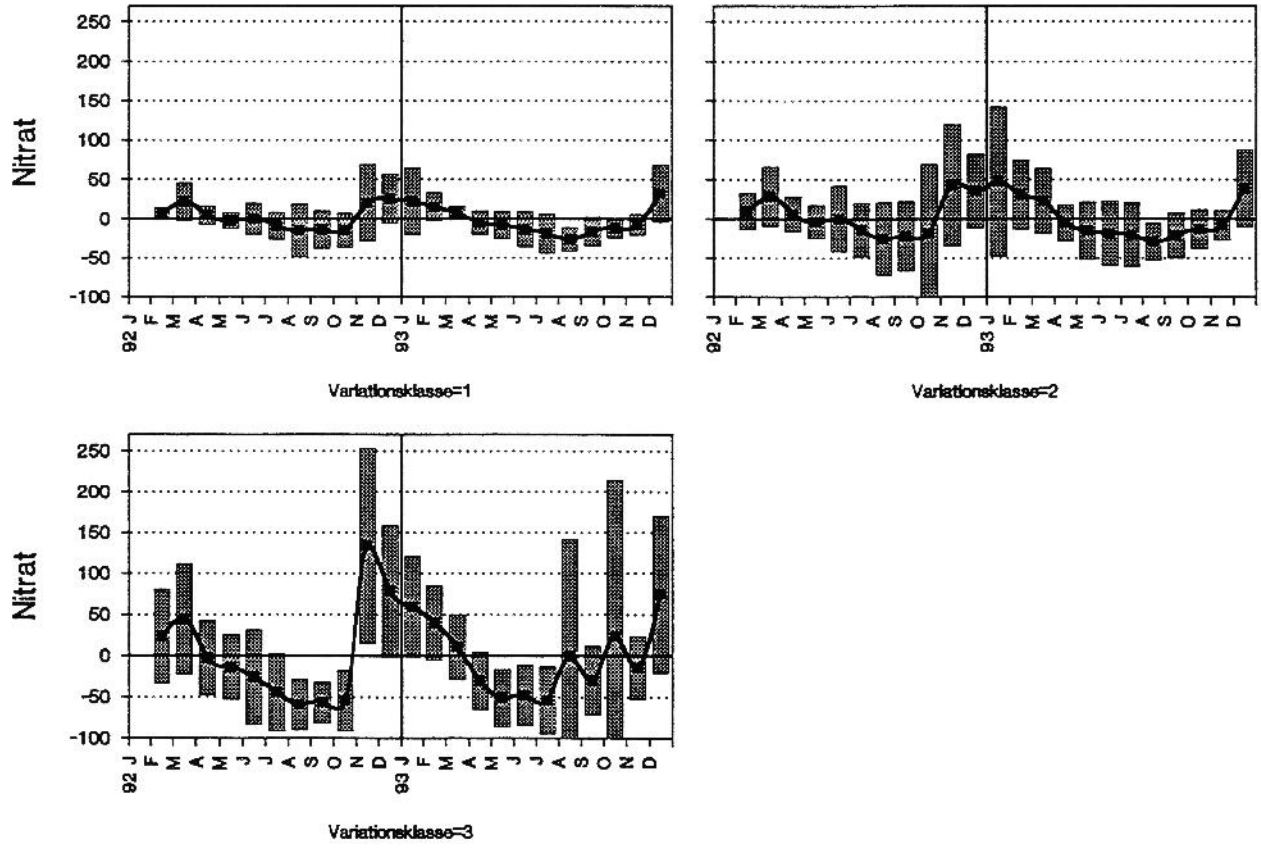


Abb. 42: Prozentuale Abweichung der Nitratkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen (Zeitraum 1992-1993).

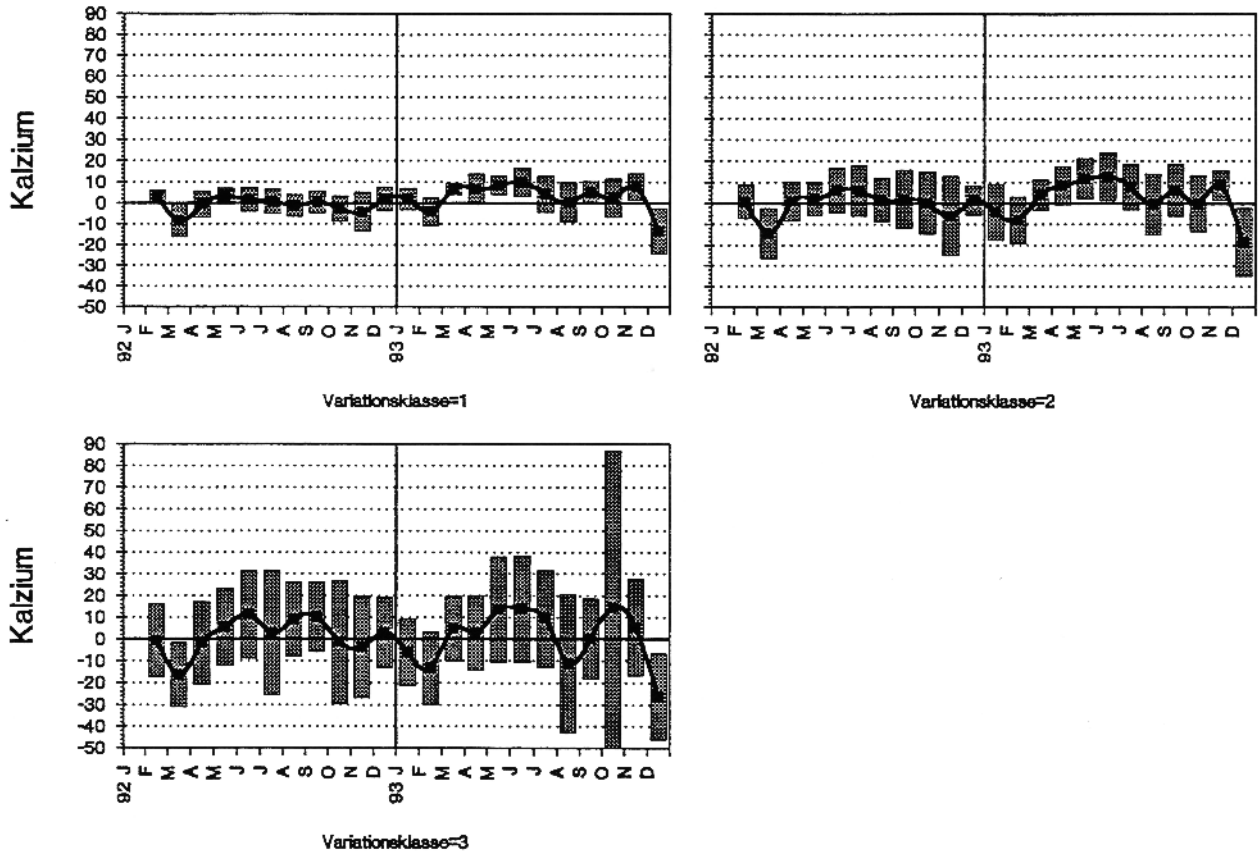


Abb. 43: Prozentuale Abweichung der Calciumkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen (Zeitraum 1992-1993).

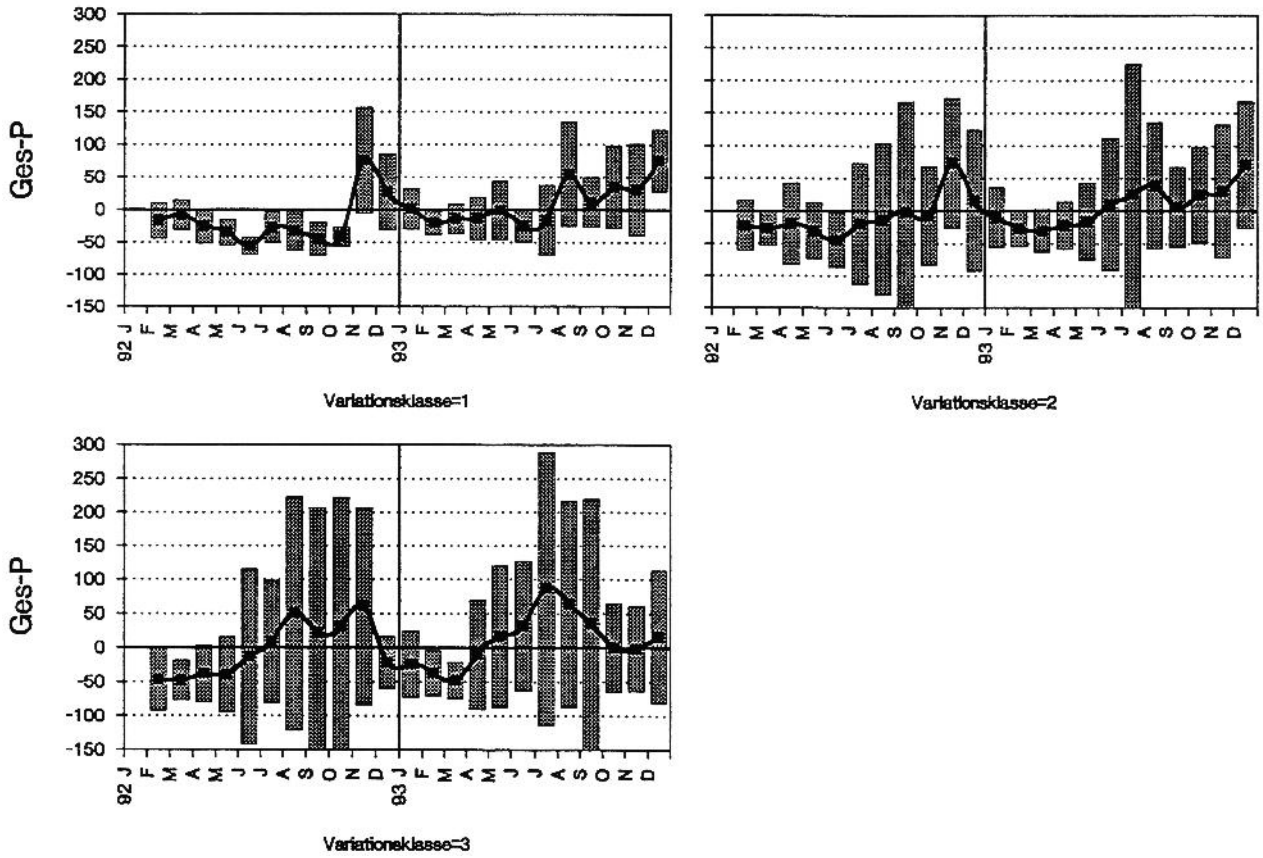


Abb. 44: Prozentuale Abweichung der Gesamt-Phosphorkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen (Zeitraum 1992-1993).

F. Ergebnisse der Gebietsanalyse

Die Gebietsanalyse hat zum Ziel, einerseits das Stör-Gebiet insgesamt einer ökologischen Wertung zu unterziehen und andererseits das Gebiet durch eine Regionalanalyse zu differenzieren. So wurde im ersten Teil eine Stoffbilanz erstellt und für den Stoffaustrag bedeutsame Prozesse analysiert. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Gewässeranalyse vorgestellt. In der Regionalstudie werden der Abfluß, die Stoffverluste und ausgewählte Strukturparameter für die einzelnen Teileinzugsgebiete bzw. Berechnungsabschnitte dargestellt und diskutiert. Der Auswertung der mit dem Satelliten erfaßten Oberflächentemperatur ist ein eigener Abschnitt gewidmet.

F.1. Beurteilung des Störgebietes

F.1.1. Stoffausträge und Stoffbilanzen

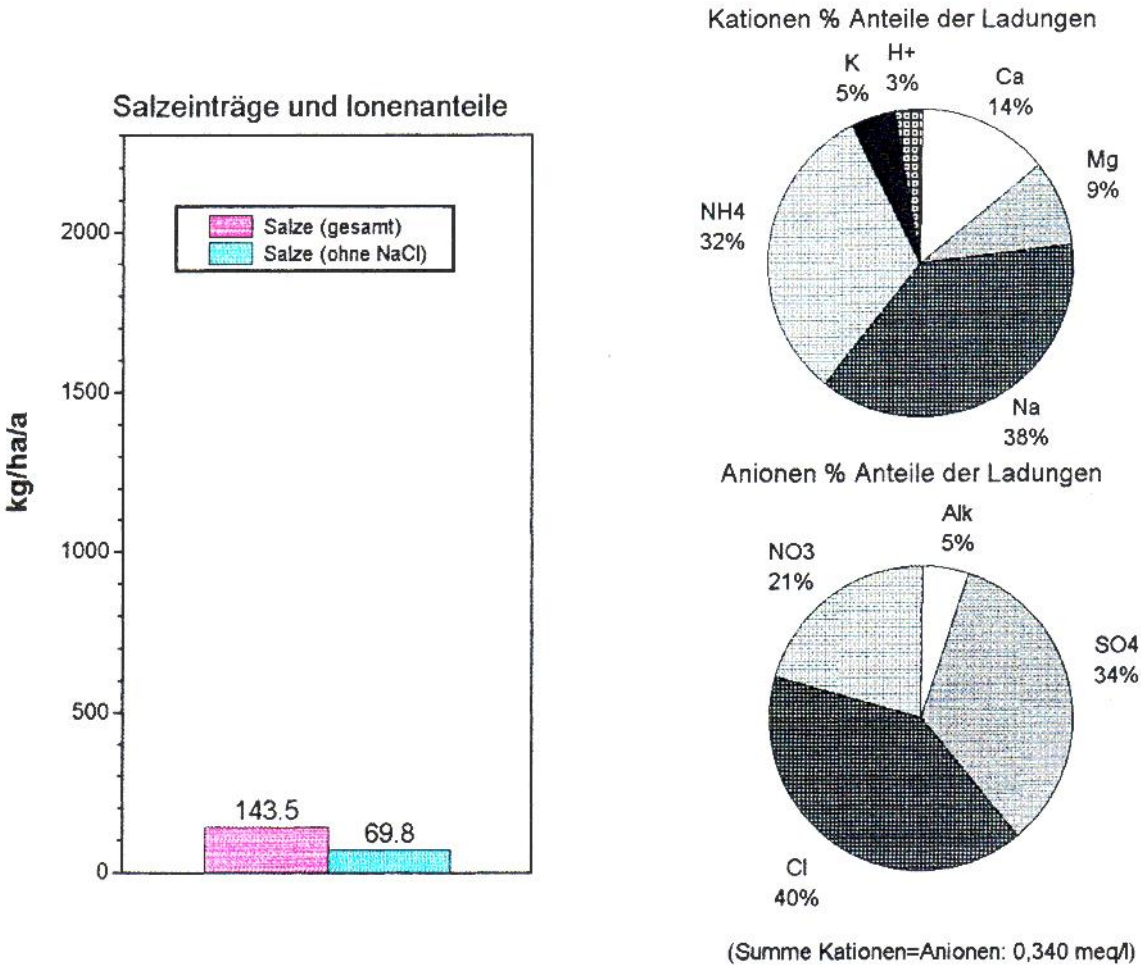
Durch die Untersuchungen in der Stör sollte die These, daß anhaltende Basenverluste zur Verarmung der Landschaft führen, überprüft werden. Zusätzlich zu den eigentlichen Messungen der Frachten in den Gewässern wurde deshalb auch eine Fehlerabschätzung anhand der zeitlich hoch auflösenden Leitfähigkeitsmeßsonden vorgenommen. Die Stoffeinträge mit den Niederschlägen und der Düngung können so in einer groben Bilanz den Verlusten gegenüber gestellt werden. Die stichprobenhafte Untersuchung der Basenvorräte sollte die Dringlichkeit von Maßnahmen hervorheben.

F.1.1.1. Eintrag über die Niederschläge

Die Einträge mit dem Niederschlagswasser an der projekteigenen Meßstation im Stör-Gebiet (Abb. 45, Tab. 1 im Anhang 2, F.1.1.1) weist eine weitgehende Übereinstimmung mit den Einträgen an den Niederschlagsstationen des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (1988, 1995; Tab. 2 im Anhang 2, F.1.1.1) und anderen Gebieten, z.B. dem Solling[22], auf. Die Gesamteinträge über den Niederschlag entsprechen bei den Nährstoffen (Ges.-P und Ges.-N) weitestgehend den Gesamtausträgen über die Gewässer, während die Einträge von Salzen mit dem Niederschlag gegenüber den Austrägen erheblich geringer sind (Kap. 2.1.4). Dies verdeutlicht, daß Phosphor und Stickstoff vor dem Hintergrund zusätzlicher Einträge über Düngung und Abwässer in hohem Maße festgelegt bzw. umgesetzt werden, während für die Salze ein eindeutiger Verlustprozeß festzustellen ist.

22 Jährliche Depositionsraten in den Freilandniederschlägen (N), in einem Buchenbestand (Nb1) und in einem Fichtenbestand (Nb2) [kg/ha] (nach Ulrich, Mayer & Matzner 1986):

	N	H	Ntot	NH_4-N	NO_3-N	Norg	P	S	Cl	Na	K	Mg	Ca	Al	Mn	Fe
N	1017	0,79	24,3	11,6	8,4	4,5	0,4	23,4	16,8	7,9	3,7	1,8	10,0	1,1	0,4	0,8
Nb1	864	1,34	32,4	12,2	10,7	10,8	0,5	50,3	32,7	14,2	28,0	4,0	24,1	1,6	3,9	1,2
Nb2	747	3,11	39,8	15,4	15,6	10,6	0,5	85,2	39,4	17,4	28,6	4,9	32,5	3,0	5,5	2,1



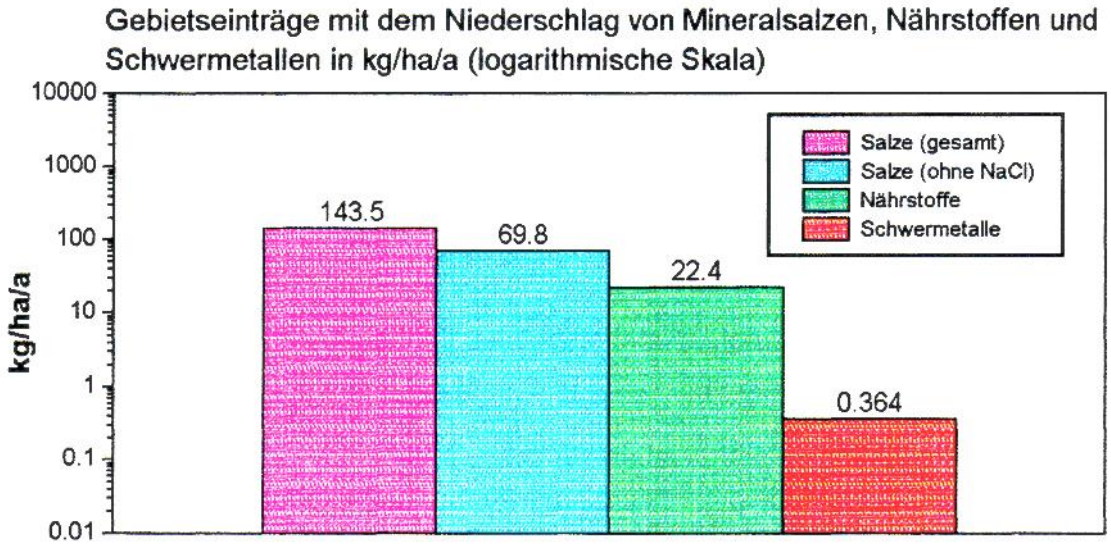


Abb. 45: Gebietseinträge mit dem Niederschlag.

F.1.1.2. Abfluß als frachtbestimmende Größe

Ein Vergleich der Fracht- und der Abflußmuster (Abb. 46; Anhang 2, F.2.1.4) zeigt, daß das Frachtmuster im Jahresgang wie das Abflußmuster verläuft. Der Abfluß ist daher die frachtbestimmende Größe. Dies ist durch die erheblich höhere Schwankung des Abflusses im Vergleich zur Konzentration bedingt.

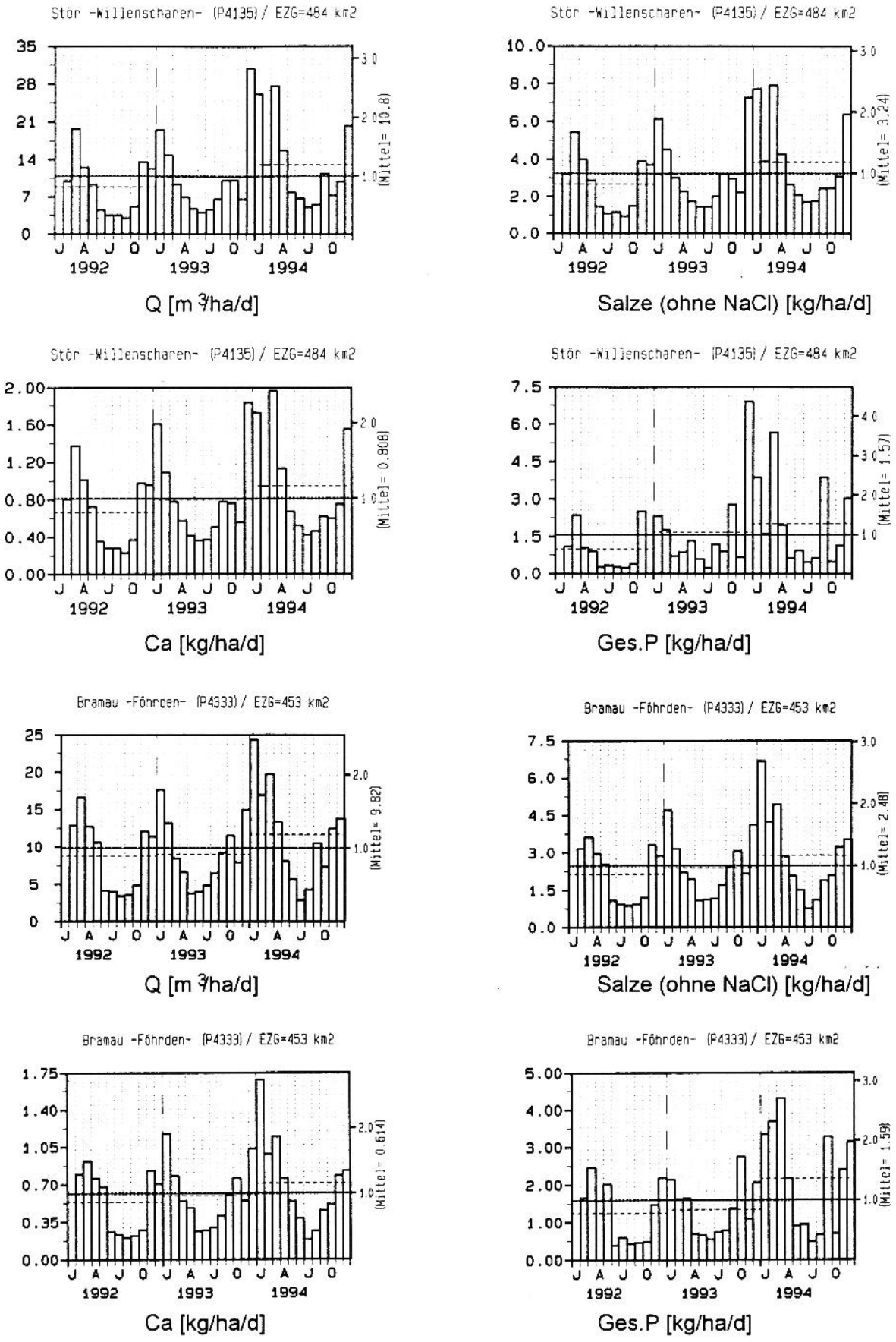


Abb. 46: Abfluß- und Frachtmuster (Salze, Sulfat und Calcium) für die Stör bei Willenscharen und die Bramau bei Föhrden.

Solange der Abfluß frachtbestimmend ist, stellt allein die Art und Weise des Wasserflusses in der Landschaft die Steuerungsgröße für den Stoffaustrag dar. Konzentrationen lassen sich nur rückgekoppelt an einen veränderten Wasserfluß in der Landschaft (eine Verringerung der wechselfeuchten Bereiche im Boden) verringern, es sei denn, sie sind durch Abwassereinleitungen beeinflußt.

F.1.1.3. Leitfähigkeits-Abfluß-Beziehung

Ein Vergleich der Abflußschwankungen mit den Schwankungen der Leitfähigkeit ergibt, daß der Abfluß auch erheblich stärker schwankt als die Leitfähigkeit (vgl. Abb. 47 und 48). Zum Beispiel schwankt der Abfluß in der Schmalfelder Au zwischen -100 und 400%, die Leitfähigkeit dagegen nur zwischen -50 und 20%. In der Wegebek schwankt die Leitfähigkeit bei einer etwas höheren Schwankung des Abflusses (-100 bis 600%) nur unbedeutend mehr (-50 bis 40%).

Die Leitfähigkeit kann als Summenparameter für die Salzkonzentration im Wasser dienen (vgl. Abb. 49). Dieser Zusammenhang ermöglicht eine Abschätzung der Stoffverluste über die gemessenen Abflüsse und Leitfähigkeiten. Die Stoffverluste sind dabei v.a. durch den Abfluß bestimmt, wie der Vergleich der Varianzen gezeigt hat.

Die Leitfähigkeits-Abfluß-Beziehung wurde auch genutzt, um eine Fehlerabschätzung der Frachtberechnung vorzunehmen. Während der Abfluß und die Leitfähigkeit beinahe kontinuierlich (20 min-Intervalle) erfaßt wurden und deren zeitliche Verteilung damit gut bekannt ist, stellen die monatlichen Probenahmen eher Stichproben dar. Die Fehlerabschätzung der Frachtberechnung erfolgte in mehreren Schritten:

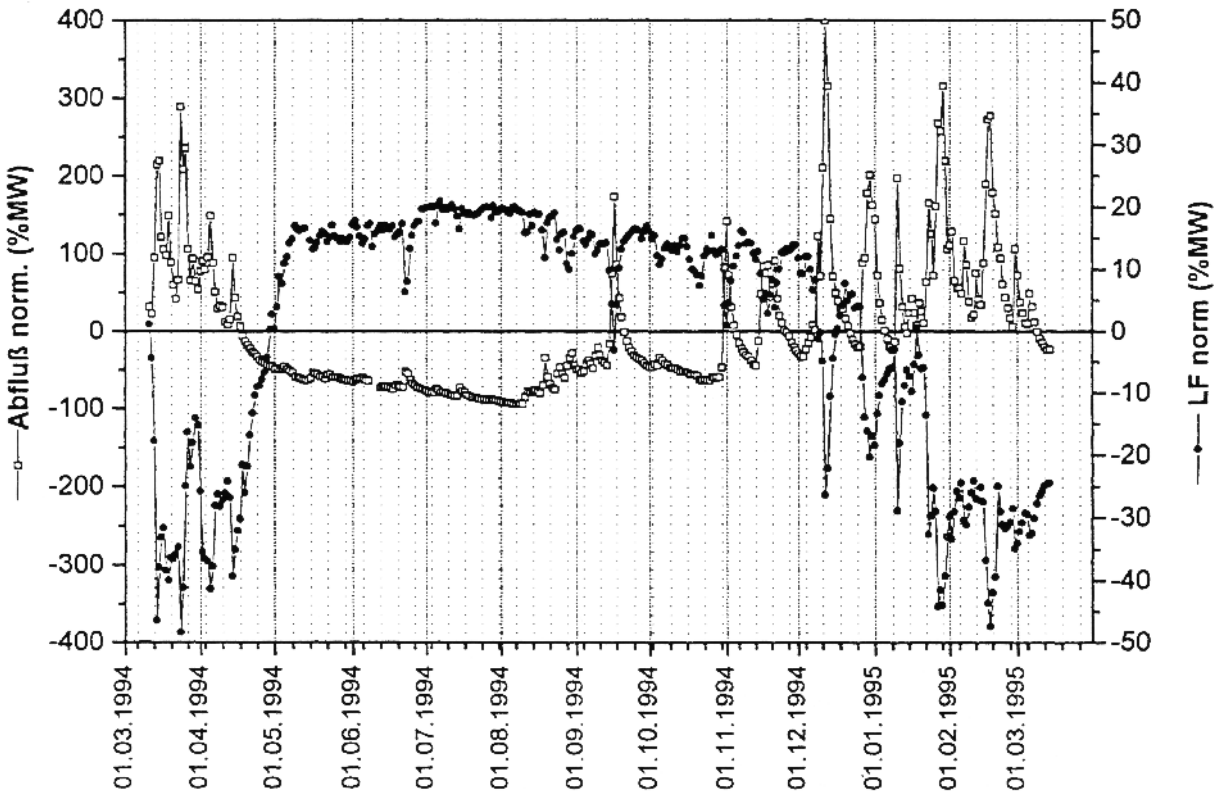


Abb. 47: Abweichung der Leitfähigkeit und des Abflusses 1994/95 in der Schmalfelder Au vom Mittelwert (in %).

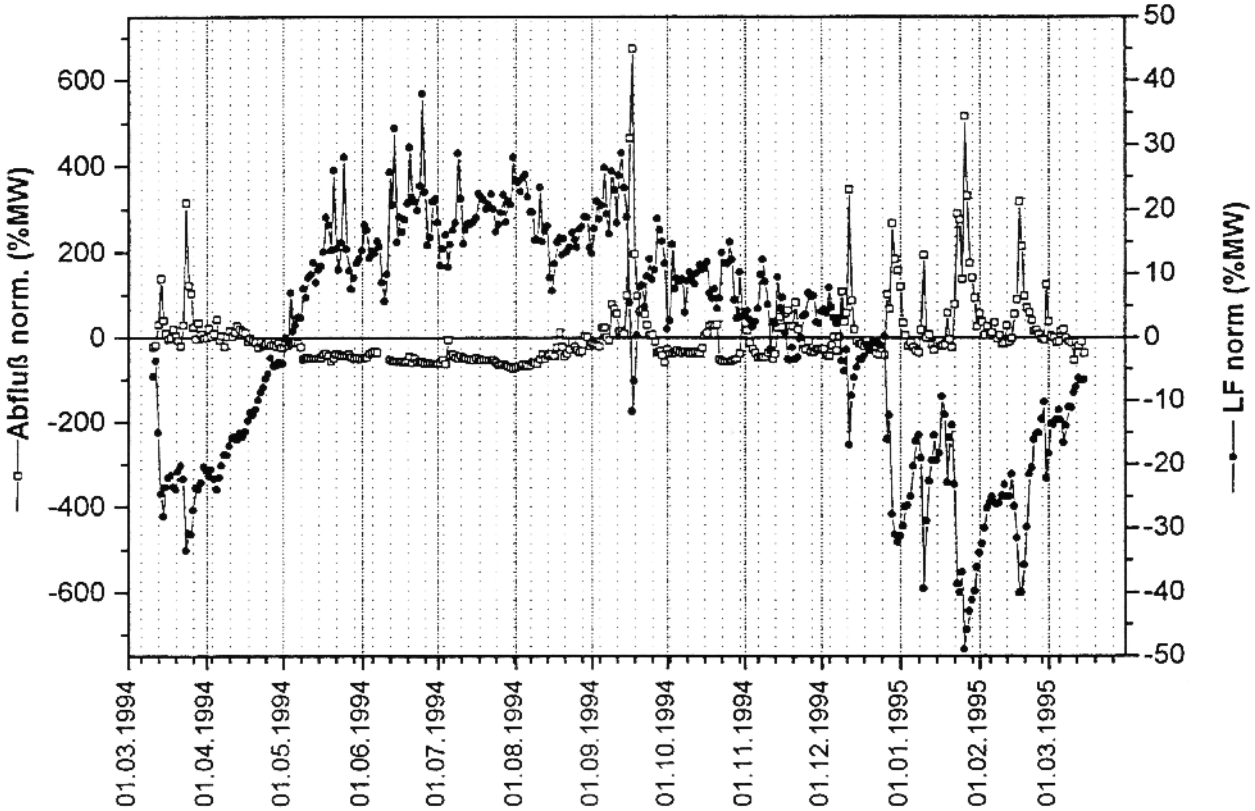


Abb. 48: Abweichung der Leitfähigkeit und des Abflusses 1994/95 in der Wegebek vom Mittelwert (in %).

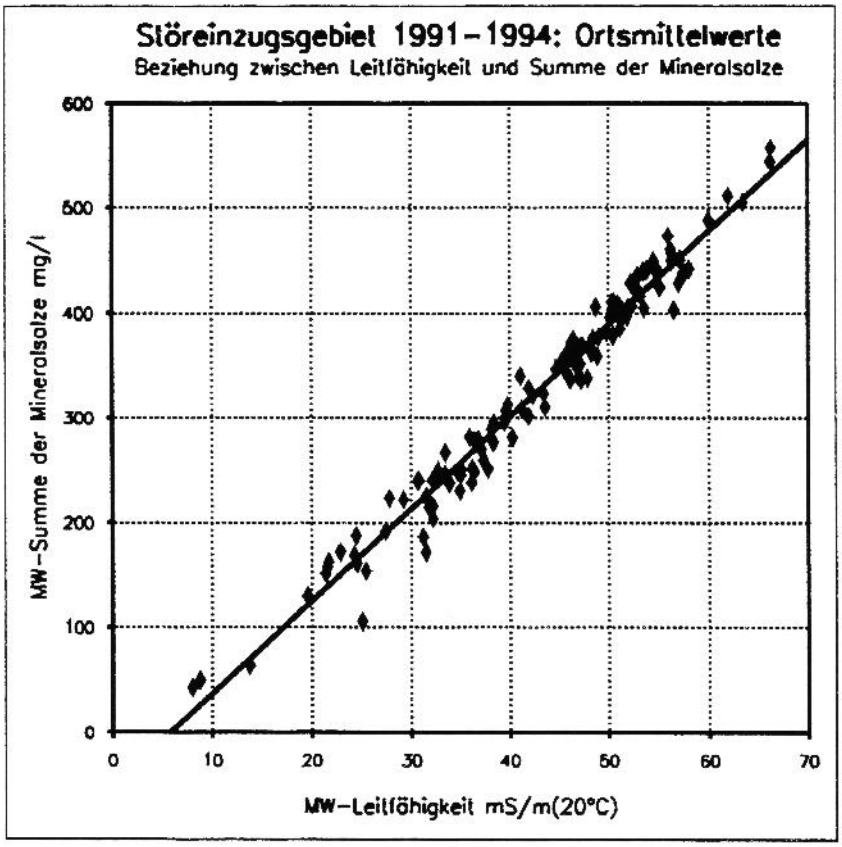


Abb. 49: Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Salzkonzentration.

A. Produktbildung aus Tagesabflüssen und monatlicher Probenahme
- Bildung des Tagesmittels der Leitfähigkeit aus den Daten mit 20 minütiger Auflösung.
- Berechnung des Produktes aus dem Monatsmittel des Abflusses und der im Gewässer gemessenen Leitfähigkeit am Tag der Probenahme.

B. Produktbildung aus Tagesabflüssen und Tagesmitteln der Leitfähigkeit.
C. Ermittlung der Abweichung der beiden Berechnungen.

Es ergibt sich für die sechs Leitfähigkeitsmeßstellen, an denen für mindestens 9 Monaten Abflußdaten auf Tagesbasis für Abfluß und Leitfähigkeit vorliegen[23], eine Frachtüberschätzung zwischen 5% und 10% bei monatlicher Probenahme gegenüber Tageswerten.

F.1.1.4. Basenvorräte der Oberböden

Für die Einschätzung der Dauerhaftigkeit der Landschaft und die Bewirtschaftung sind neben den Stoffverlusten die Vorräte des Oberbodens an Basen wichtig. Böden, die nur noch geringe Basenvorräte aufweisen, sind für eine beginnende Versteppung am anfälligsten. Gehen die Vorräte zur Neige, so kommt es vorübergehend durch die verstärkte und nicht mehr ausreichend gepufferte Protonenabgabe der Pflanzen zu einer Versauerung der Böden.

Die flächendeckende Untersuchung des Basenvorrates der Oberböden hätte aufgrund der kleinräumigen Inhomogenitäten und nicht ausreichend bekannten Verteilung des Bodens einen erheblichen Aufwand bedeutet. Aus der Bodenkarte (Kap. C.1.2) sind die Basenvorräte leider nicht ableitbar. Zum besseren Verständnis der Ganglinien der Bodenwassersonden (Kap. F.2) und zur Untersuchung der Austragsmechanismen (Kap. E.2.1) wurden an 29 Bodenwassermeßstellen Bodenuntersuchungen durchgeführt. Die Bodenproben wurden mit Hilfe eines Salpetersäure-Aufschlusses analysiert (vgl. Anhang 1, 4.2). Diese, sicherlich nicht repräsentative, Auswahl ermöglicht eine erste Schätzung der Vorräte.

Dazu wurden die Basengehalte (Ca, Mg, K, Na) flächenspezifisch für die obersten 10 dm berechnet. Damit ist der Hauptwurzelhorizont abgedeckt. Bei der Untersuchung wurden nur die feineren Fraktionen des Bodens (< 0.071 mm) auf ihre Basengehalte hin analysiert. Dabei wies die feinste Fraktion (< 0.02 mm) erwartungsgemäß deutlich höhere Basengehalte auf (vgl. auch Kap. E.2.1.3). Da die gröbere Fraktion (>= 0.071 mm) nicht analysiert wurde, wurden die Basengehalte für diese Fraktion auf zweierlei Art abgeschätzt:

- ► Die Annahme, daß in dieser Fraktion keinerlei Basen mehr vorhanden sind, führt zu einer Unterschätzung der Vorräte. Es ist jedoch davon auszugehen, daß in der gröberen Fraktion aufgrund der geringeren Oberfläche auch deutlich weniger Basen als in den feineren Fraktionen gebunden sind.
- ► Die Annahme, daß die Basengehalte der gröberen Fraktion denen der mittleren Fraktion entsprechen, führt zu einer deutlichen Überschätzung der Vorräte.

23 Für die Berechnung verwandte Leitfähigkeitsmeßstellen:

Sonde	Pegel	Gewässer
LF01	P4295	Bach südl. Heinkenborstel
LF02	P11	Osterau
LF03	P4135	Stör bei Willenscharen
LF06	P17	Wegebek
LF08	P26	Schmalfelder Au
LF09	P04	Dosenbek

Die Ergebnisse der Schätzung sind in Tab. 4 dargestellt. Sie weisen für die erste Annahme etwa 79 t Basen/ha auf, für die zweite Annahme etwa doppelt soviel. Die Basengehalte der Probenahmestellen zeigen ein differenziertes Bild. So beträgt der Vorrat vieler Böden unter der ersten Annahme weniger als 30 t Basen/ha. Diese Böden enthalten auch nur noch geringe Anteile der feineren Fraktionen, in der Regel deutlich unter 10 Gew.%. Die Auswaschung der Basen ist hier bereits weit vorangeschritten; feinere Partikel wurden verlagert bzw. aufgelöst. Diese Böden sind überwiegend Podsole (z.B. Probestelle G07, G09, G18). Die Auswertung der Bodenkarte (Tab. 5) zeigt, daß die Podsole mit 45% im Gebiet deutlich dominieren. Wir gehen davon aus, daß diese Podsole ähnlich verarmt und für die weitere Bewirtschaftung als kritisch zu betrachten sind.

Tab. 4: Berechnete Basenvorräte an den Bodenwasserpegeln

		Schätzung 1					Schätzung 2				
Probe-	Nutzung	Ca	Mg	K	Na	Basen	Ca	Mg	K	Na	Basen
stelle		[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]	[t/ha]
G01	Laubwald	70,00	42,68	28,70	9,31	150,69	128,60	78,22	53,97	13,75	274,54
G02	Laubwald	35,00	47,91	35,23	12,16	130,30	52,84	67,36	51,50	16,57	188,27
G03	Mischwald	51,64	31,01	23,07	8,60	114,33	96,31	45,67	34,47	14,45	190,90
G04	Mischwald	17,28	5,38	5,47	8,77	36,91	45,37	17,89	19,90	13,20	96,36
G05	Laubwald	12,59	1,81	2,67	6,92	23,99	34,92	7,03	11,99	13,18	67,12
G06	Grünland	87,08	8,86	9,13	18,53	123,61	249,34	23,39	20,23	23,24	316,20
G07	Heide	3,43	0,99	0,92	2,57	7,90	32,96	24,61	18,09	11,88	87,54
G08	Mischwald	9,24	0,94	1,30	4,57	16,05	73,67	6,52	8,37	17,09	105,65
G09	Nadelwald	5,22	0,88	0,83	3,80	10,74	33,31	7,83	7,99	12,03	61,17
G10	Molinia/Moor	92,55		4,28	35,49	132,31	263,11	15,71	5,45	42,10	326,36
G11	Nadelwald	8,42	1,69	1,76	4,05	15,93	55,64	10,56	10,94	11,60	88,74
G12	Nadelwald	5,65	2,45	1,58	4,24	13,92	34,69	18,29	14,58	12,91	80,47
G13	Nadelwald	24,04	3,04	4,42	21,24	52,74	77,90	11,77	12,93	31,62	134,23
G14	Nadelwald	6,93	1,39	1,17	4,87	14,36	54,88	20,91	18,89	14,01	108,69
G15	Nadelwald	12,93	1,69	1,37	4,48	20,47	58,21	9,30	9,13	11,19	87,83
G16	Mischwald	12,85	2,90	2,75	9,14	27,64	42,47	16,66	14,46	17,07	90,65
G17/18	Grünland	10,54	2,44	2,34	5,14	20,47	71,84	25,57	19,76	22,94	140,12
G19	Grünland	40,76	3,60	3,11	21,02	68,50	121,09	12,63	10,80	28,78	173,30
G20	Acker	48,82	33,74	26,29	12,57	121,42	65,79	47,19	37,73	15,50	166,21
G21	Grünland	59,89	50,80	36,42	15,26	162,36	73,12	65,77	48,08	17,71	204,68
G22	Laubwald	46,21	45,97	35,50	22,13	149,81	59,85	73,19	59,01	25,36	217,41
G23	Grünland	227,59	49,38	40,01	19,15	336,13	317,86	75,87	62,92	21,23	477,89
G24	Grünland	45,68	44,27	39,57	8,61	138,12	65,02	64,07	59,21	11,05	199,36
G25	Grünland	67,89	39,06	25,73	14,14	146,81	97,01	59,27	40,98	17,59	214,84
G26	Acker/Knick	13,58	2,98	5,58	5,50	27,64	46,42	38,86	26,37	10,16	121,82
G27	Grünland/Mais	13,28	5,94	7,77	5,29	32,28	30,54	18,61	25,80	8,07	83,01
G28	Grünland	51,40	31,03	24,90	8,88	116,22	84,30	54,02	44,08	11,80	194,20
G29	Knick/Acker	6,93	10,61	8,38	4,99	30,90	13,71	18,97	14,66	6,50	53,84
G31	Grünland	12,58	5,36	4,92	5,04	27,90	45,96	16,95	14,75	10,18	87,84
Mittel		37,93	17,10	13,28	10,57	78,29	83,68	32,85	26,79	16,65	159,97

Tab. 5: Flächenanteile der wichtigsten Bodentypen im Stör-Gebiet (in Prozent).

Braunerden	13,3
Parabraunerden	2,5
Podsole	45,3
Pseudogleye	8,2
Gleye	12,6
Moore	10,4
Versiegelte Flächen	7,0

In den anderen Böden sind die Basenvorräte zwar noch deutlich höher (bis über 300 t/ha bzw. 470 t/ha). Gerade die Gehalte an Calcium betragen aber auch hier zumeist deutlich unter 100 t/ha. Die Austräge an Ca übertreffen die der anderen Basen im Stör-Einzugsgebiet deutlich (Ca 263 kg/(ha*a), Mg 18,9 kg/(ha*a), K 26,5 kg/(ha*a)), so daß eine rasche Verarmung an Ca zu befürchten ist.

Zusammen mit den Auswaschungsraten (Ca: 263 kg/(ha*a), Mg: 18.9 kg/(ha*a), K: 26.5 kg/(ha*a)) begrenzen die Vorräte den gesellschaftlichen Handlungsspielraum. Es ist davon auszugehen, daß mit dem lokalen Ausfall der Vegetation der Verlustprozeß nichtlinear ansteigt, da durch die in verlustarmen Kreisprozessen erfolgende Energiedissipation nur noch auf einer stetig abnehmenden Fläche stattfinden kann (Kap. G.2.1). Eine einfache Extrapolation der Verluste gegenüber den Vorräten ist deshalb nicht sinnvoll.

F.1.1.5. Stoffbilanz am Beispiel des Calciums

Im folgenden soll versucht werden, die Ein- und Austräge des Calciums zu bilanzieren, da dieses den größten Teil der Basenverluste ausmacht und an den meisten Pufferreaktionen im Boden beteiligt ist. In einer solchen Bilanz könnten folgende Größen von Bedeutung sein:

Austräge:

- ► Frachten im Gewässer
- ► Ernteentzüge

Einträge:

- ► Niederschlag und trockene Deposition
- ► Düngung
- ► Auswaschungen aus tieferen Gesteinsschichten
- ► Einträge über importierte Nahrungsmittel

Frachten im Gewässer

Pro Jahr weist das Einzugsgebiet der Stör einen mittleren Calciumaustrag von etwa 263 kg/ha und einen um Natriumchlorid (NaCl) bereinigten mittleren Salzaustrag von etwa 1050 kg/ha auf. Dies ist erheblich mehr als in naturnahen Ökosystemen, in denen der Verlustprozeß durch die Sukzession minimiert wird (Kap. B.3.2, F.2.1.3)[24], [25].

Die Ergebnisse der Frachtberechnungen werden unter Kap. 2.1.4 dargestellt.

Ernteentzüge

Als weiterer "Austrag" kommen die Ernteentzüge hinzu, die anhand der Tabellen (im Anhang 2, F.1.1.5) abgeschätzt werden können. Im Vergleich zu den Auswaschungsverlusten sind diese jedoch eher gering . Sie reichen von 2 kg Ca/ha/a bei Mais (60 dt/ha Ertrag), über Kartoffeln 3 kg

24 Führer (1990: 193) ermittelte für vier Teileinzugsgebiete im Krofdorfer Buchenforst (Hessen) Calciumausträge zwischen 26,7 und 68,1 kg Ca/ha/a.

25 Wie Bartels (1989:35) für Quellbereiche aus der Region Burbach (Nordrhein-Westfalen) zeigt, liegt die Leitfähigkeit des Bachwassers in anthropogen weitgehend unbeeinflußten Einzugsgebieten nur geringfügig über der Leitfähigkeit des Niederschlages (50-60 µS/cm im Mittel 1987-1990 in Berlin, TU Berlin, FG Limnologie, unveröff.; Körner *et al*. 1986:198 gehen von 20-30 µS/cm aus). In diesen Quellbereichen liegen die Leitfähigkeiten zwischen 36 und 104 µS/cm. Sie sind größtenteils Feuchtbereiche (Erlenbruch, Quellmoor, -sumpf), wobei sich der geologische Untergrund durch karbonatfreie bis korbonathaltige bzw. alkali- und erdalkalireiche Verhältnisse auszeichnet.

Ca/ha/a (300 dt/ha Ertrag), Raps 13 kg Ca/ha/a (30 dt/ha Ertrag), Weizen mit Strohnutzung 19 kg Ca/ha/a (100 dt/ha Ertrag; 50 dt/ha Stroh + 50 dt/ha Weizen) bis zu 108 kg Ca/ha/a bei Zuckerrübenanbau mit Blattnutzung (900 dt/ha Ertrag; 500 dt/ha Rüben + 400 dt/ha Blätter) (Renger 1991). Zuckerrüben werden allerdings im Gebiet kaum angebaut. Im Stammholz von Buche oder Fichte (ohne Rinde und Äste) sind etwa 120-130 kg/ha Calcium gespeichert (Ellenberg *et al*. 1986).

Die Ernteentzüge stellen für die einzelnen Flächen Entzüge dar, die durch eine entsprechende Düngung ausgeglichen werden müssen. Für die Bilanzierung des Gesamtgebietes sind sie jedoch nur von untergeordneter Bedeutung, da der größte Teil der Ernte im Gebiet konsumiert wird. Wenn die Inhaltsstoffe später z.B. über den Klärschlamm wieder auf die Felder gebracht werden, dann wäre für das Gesamtgebiet kein Verlust entstanden. Gelangen die im Erntegut enthaltenen Basen jedoch in das Abwasser, so sind diese ohnehin durch die Meßstellen erfaßt worden.

Niederschlag und trockene Deposition

Die Einträge an Calcium sind gegenüber den Austrägen erheblich geringer. Über Luftdeposition (Niederschlag und Staub) werden etwa 10 kg Ca/ha/a eingetragen (vgl. Kap. F.1.1). In Wäldern treffen eher höhere Werte für den Eintrag zu, im Freiland liegt er meist unter 10 kg Ca/ha. Im Vergleich zu den Austrägen sind die Einträge sehr gering.

Die Quelle des Calciums sowie anderer Basen dürfte zu einem großen Teil jedoch die Landschaft selber sein, da z.B. größere Kalkstein verarbeitende Firmen fehlen. Auf den trockeneren Flächen wird calciumhaltiger Staub aufgewirbelt, der vom Niederschlag ausgewaschen wird oder als trockene Deposition in die Niederschlagsmesser gelangt. Anders als die "Staubfallen", wie Feuchtgebiete, feuchtere Wälder oder Niederschlagssammler, können diese Stäube auf den trockeneren landwirtschaftlichen Flächen mehrmals aufgewirbelt und verfrachtet werden. Die Einträge dürften demnach für landwirtschaftliche Flächen eher eine Überschätzung darstellen. Während für feuchtere Gebiete tatsächlich ein Ca-Eintrag vorliegen kann, kann dieser für das Gesamtgebiet vernachlässigt werden.

Düngung

Über die landwirtschaftliche Düngung gelangen im Durchschnitt 90 kg Ca/ha/a (Durchschnitt 1980-87) auf die genutzte Fläche, wobei auf Grünland eher unter 35 kg Ca/ha/a und auf Ackerstandorten etwa 145 kg Ca/ha/a ausgebracht werden (Statistisches Landesamt S-H. 1989a: 16). Den Austrägen stehen daher bei der heutigen Flächennutzung ca. 80,7 kg Ca/ha/a an Eintrag für das Gesamtgebiet gegenüber (50.2% Acker, 22.5% Grünland).

Großflächige Kalkungen finden in der Forstwirtschaft erst seit den achtziger Jahren statt. Zwischen 1984 und 1988 wurden in Schleswig-Holstein etwa 15.3 kg/ha/a Ca ausgebracht (Statistisches Landesamt S-H. 1989a). Umgerechnet auf die Gesamtfläche (17.2% sind Wald) macht dies nur 2.6 kg/ha/a aus. Es liegen uns jedoch keine Angaben darüber vor, wieweit und mit welcher Intensität diese Kalkungen auch in den letzten Jahren fortgeführt wurden.

Auswaschungen aus tieferen Gesteinsschichten

Auswaschungen aus tieferen, für die Vegetation unerreichbaren Gesteinsschichten stellen keinen eigentlichen "Eintrag" dar. Sie könnten jedoch hohe Verluste aus den für die Vegetation wesentlichen Oberböden vortäuschen.

Um den genauen Anteil des in tieferen Schichten gelösten Calciums an den Frachten zu bestimmen, wären zusätzliche Messungen erforderlich. Allerdings zeigen Überlegungen zum

Austragsprozeß, daß dieser Anteil nicht sehr groß sein kann: Nur etwa 30% des Abflusses in der Stör (Kap. 2.1.2) können als Basisabfluß bezeichnet werden und durchfließen damit tiefere Gesteinsschichten. Das Wasser perkoliert jedoch zunächst durch den Oberboden. Dabei wird es weitgehend im Oberboden gepuffert, da nur hier ausreichend organisches Material zur Mineralisation zur Verfügung steht und dabei Säuren freigesetzt werden. Darauf deuten auch die zunehmenden pH-Werte in Bodenprofilen hin. Auf diese Weise verbleibt lediglich ein geringes pH-Potential, das zur Lösung von Ca in tieferen Schichten führen kann.

Einträge über importierte Nahrungsmittel

Die Einträge über importierte Nahrungsmittel stellen eine vernachlässigbare Größe dar. Dies soll an einer Abschätzung für die Stadt Neumünster verdeutlicht werden: Die Verluste aus dem Berechnungsabschnitt, in dem Neumünster liegt (BAB 63), betragen 503.7 kg Ca/ha/a. Gegenüber den durchschnittlichen Calcium-Verlusten von 263 kg/ha/a werden hier also tatsächlich 240.7 kg/ha/a mehr Calcium ausgetragen. Umgerechnet auf die 80.000 Einwohner sind dies etwa 50 g Ca/EW/d. Im gesamten Störgebiet wohnen etwa 200.000 EW; dies entspräche einem Ca-Eintrag von 34.5 kg/ha/a.

Selbst dieser geringe Wert stellt noch eine maßlose Überschätzung dar. So stammt ein Teil des in das Wasser gelangten Calciums aus Nahrungsmitteln, die im Stör-Gebiet selbst produziert wurden[26]. Durch den Bedarf an Trink- und Brauchwasser ist der Abfluß aus dem Berechnungsabschnitt 63 etwa um den Faktor 1.5 gegenüber dem Abfluß am Pegel Willenscharen erhöht. Die Bereitstellung dieses, nicht aus Oberflächengewässern stammenden, Wassers trägt ebenfalls zu der zusätzlichen Ca-Aufstockung bei. Dazu kommen weitere Auswirkungen des Siedlungskörpers selbst, durch dessen starke Erwärmung die angrenzenden Flächen beeinflußt und damit Austräge begünstigt werden.

Angaben über Einträge mit Futtermitteln, wie z.B. Soja, lagen nicht vor. Wir gehen jedoch davon aus, daß auch diese keinen erheblichen Anteil in der Bilanz ausmachen.

Bilanzierung

Die Diskussion der möglichen Ein- und Austräge zeigt, daß den Verlusten von 263 kg Ca/ha/a im wesentlichen aus der Düngung stammende Einträge von etwa 80-90 kg Ca/ha/a gegenüber stehen. Die bisherige Düngung reicht also keineswegs aus, die Verluste zu kompensieren. Es verbleibt ein jährliches Defizit von etwa 175 kg Ca/ha/a.

Dies belegt, daß das Gesamtgebiet an seinen Reserven zehrt. Bei der heutigen Bewirtschaftung wird der noch vorhandene Vorrat durch die fehlende Orientierung an den natürlichen Stoffestlegungsmechanismen in der Landschaft beschleunigt abgebaut. Der energetische und damit der finanzielle Aufwand für den Erhalt fruchtbarer Böden wird immer größer.

F.1.1.6. Anreicherung von Schwermetallen

Mit dem fortgesetzten Basenaustrag werden die anderen Inhaltsstoffe des Bodens durch die unterschiedliche Löslichkeit nicht zu gleichen Teilen ausgetragen. Vielmehr werden die leichtlöslichen Basen, allen voran das Natrium und Kalium, zuerst ausgetragen. Als Hauptbestandteil des Bodens verbleibt vor allem Quarzsand, der kaum löslich und für die Pflanzen nicht verwertbar ist. Schwermetalle sind normalerweise wenig löslich und erst bei niedrigeren pH-Werten mobil. Sie reichern sich deshalb während des durch die nettoproduktive Bewirtschaftung der Flächen be-

26 Aus dem Stör-Gebiet werden natürlich auch land- und forstwirtschaftliche Produkte exportiert. Wenn dafür andere organische Produkte importiert werden, so gleicht dies die Exporte wieder aus.

schleunigten Auswaschungsprozesses an (Abb. 50). Eine Minimierung der Basenverluste ist deshalb auch notwendig, um diesen Anreicherungsprozeß zu unterbinden.

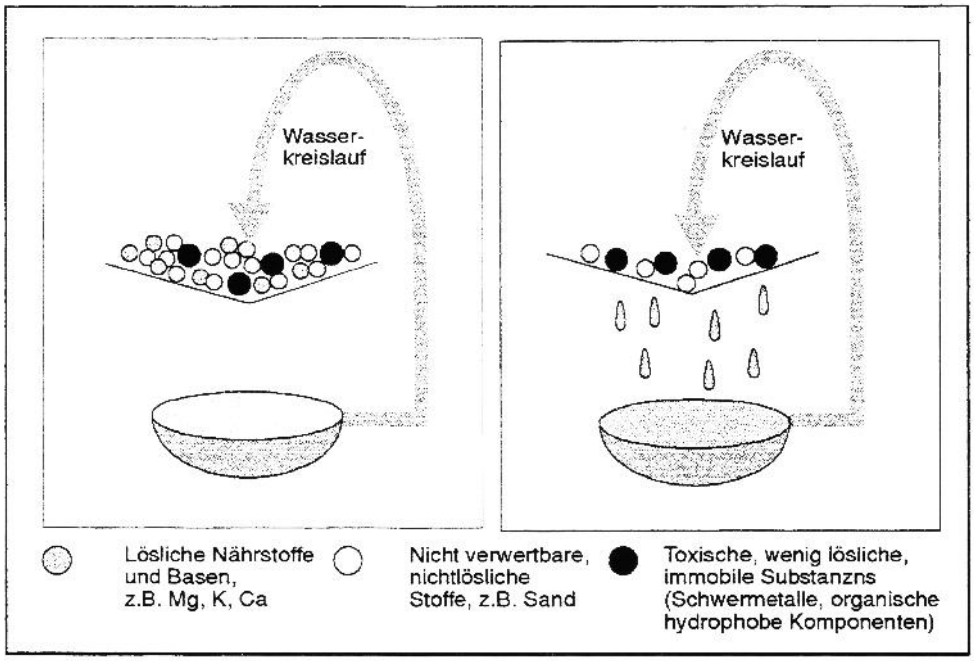


Abb. 50: Während des Auswaschungsprozesses gehen zuerst Basen und Nährstoffe verloren; es verbleiben für die Pflanzen nicht verwertbare oder sogar giftige Stoffe.

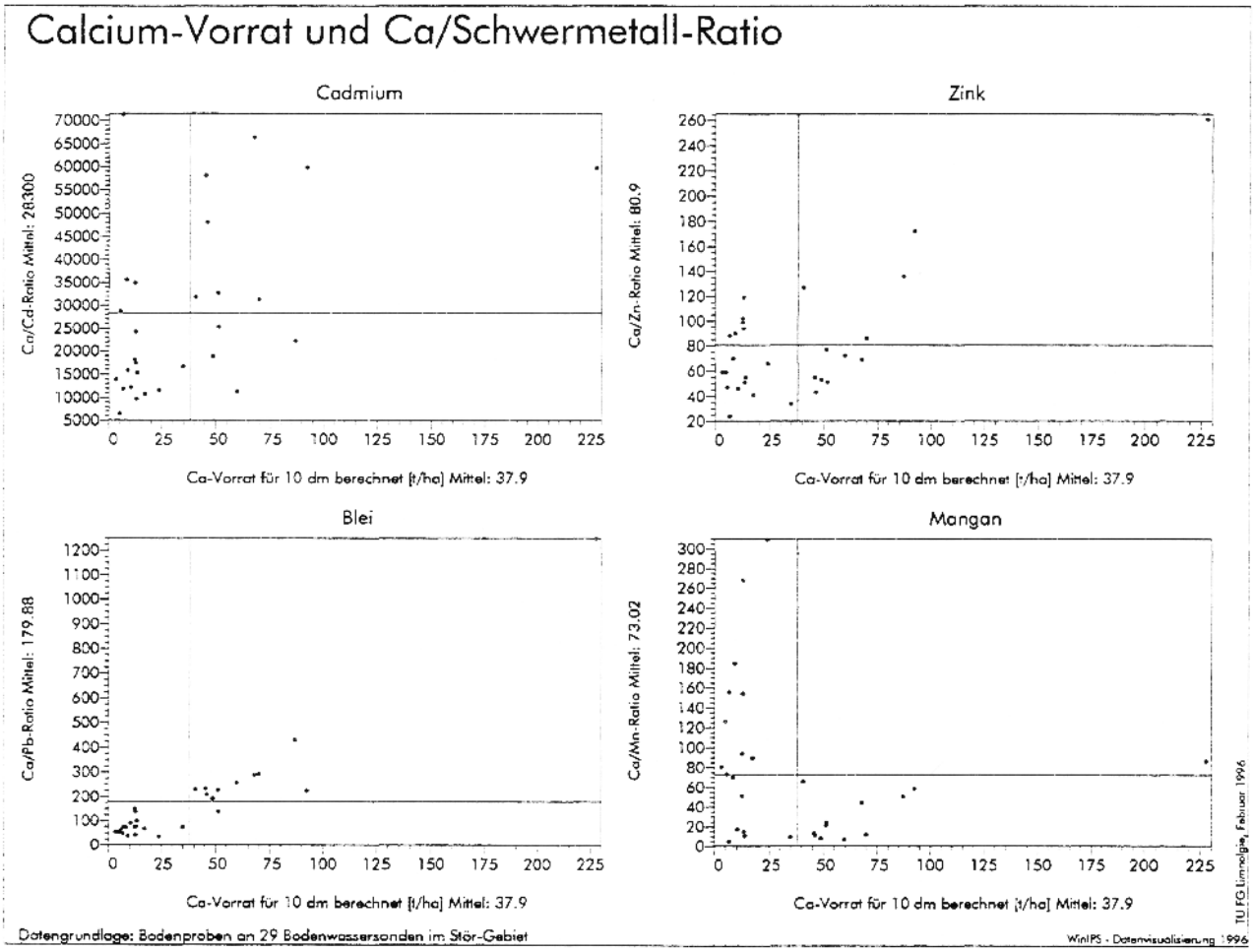


Abb. 51: Calcium-Vorrat und Calcium-Schwermetall-Verhältnisse.

Bei der Analyse der Bodenproben an den Bodenwasserpegeln (Kap. 1.1.4) wurden auch die Schwermetall-Gehalte untersucht. Die meisten Ergebnisse bestätigen, daß niedrige Ca/Schwermetall-Verhältnisse vermehrt bei geringen Ca-Vorräten auftreten und umgekehrt hohe Ca/Schwermetall-Verhältnisse bei hohen Ca-Vorräten (Abb. 51). Dies wird besonders deutlich bei Blei, ist aber auch bei Cadmium und Zink zu sehen. Das wesentlich leichter lösliche Mangan hingegen zeigt umgekehrte Verhältnisse; es wird zusammen mit dem Calcium ausgewaschen bzw. verlagert.

Die Schwermetalle sind teilweise bereits im Ausgangsgestein vorhanden gewesen, teilweise aber auch erst durch menschliche Aktivitäten eingetragen worden. Für das Blei wurden im Mittel etwa Werte von 100 µg/g TS festgestellt, während für den natürlichen Hintergrundwert nur etwa 20 µg/g TS anzunehmen sind (Laveskog *et al*. 1976).

F.1.2. Prozeßanalyse

Für den Austragsprozeß sind Einflüsse auf den Wasserhaushalt von besonderer Bedeutung. Im folgenden werden deshalb die Veränderungen der Niederschlagsmuster und die Auswertung der Bodenwasserpegel vorgestellt (Kap. 1.2.1, 1.2.2). Die Ergebnisse der Analyse der Fließgewässer für den Stoff- und Wasserhaushalt sind in Kap. 1.2.3 zusammengefaßt.

F.1.2.1. Veränderung der Niederschlagsmuster

Die zeitliche Analyse der Niederschlagsdaten von Neumünster und Berlin-Dahlem zeigt, daß die längerjährigen Monatsmittel des Niederschlages, wie es bei einer dynamischen Größe wie dem Niederschlag auch zu erwarten ist, Schwankungen unterworfen sind (vgl. Abb. 52 u. 53).

In den letzten Jahrzehnten konnte am Beispiel Berlins immer deutlicher eine Veränderung der Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf beobachtet werden, die - allerdings in geringerem Ausmaß - auch in Neumünster wiederzufinden ist. Abb. 52 und 53 zeigen, daß sich in Berlin die Niederschläge im Juli und Oktober von 1926 an fast kontinuierlich verringert haben, im Dezember dagegen erhöht. Demgegenüber treten in Neumünster die Veränderungen im März, August, November und Dezember am stärksten hervor. Die Niederschläge nehmen im Juli/August ab und in den Winter- und Frühjahrsmonaten zu. Diese Entwicklung wird durch die Standardabweichungen (Abb. 52, 53) als Abweichungen von den aufgetragenen Mitteln bestätigt: sie sind teilweise gleichgeblieben, meist aber zurückgegangen.

In Berlin erfolgt diese Veränderung der zeitlichen Verteilung der Niederschläge bei annähernd gleichbleibenden, über 10 Jahre gemittelten Jahresniederschlagssummen, während letztere in Neumünster stärker schwanken.

Aufschlußreich ist dabei auch die Veränderung des fortlaufenden und des zehnjährigen Mittels der Niederschlagssumme der Monate Juli bis September im Vergleich zu den Mitteln der Niederschlagssumme der Monate April bis Juni (Abb. 54 und 55). Das Mittel der Niederschlagsumme nimmt für den Zeitraum Juli bis September, von einer mehrjährigen Schwingung moduliert, ab, wobei sie im Zeitraum April bis Juni annähernd gleich bleibt. Der Unterschied zwischen den Mitteln der Niederschlagssummen nimmt fortwährend ab.

Durch diese Entwicklung im Landschaftswasserhaushalt steht der Vegetation in einem Zeitraum, in dem sie noch relativ viel Energie dissipieren muß (Juli bis September), immer weniger Wasser zur Verfügung. Der Energieanteil, der über kleinräumige und kurzgeschlossene Verdunstungsprozesse dissipiert wird, geht zugunsten des Anteils zurück, dessen Dissipation über den groß-

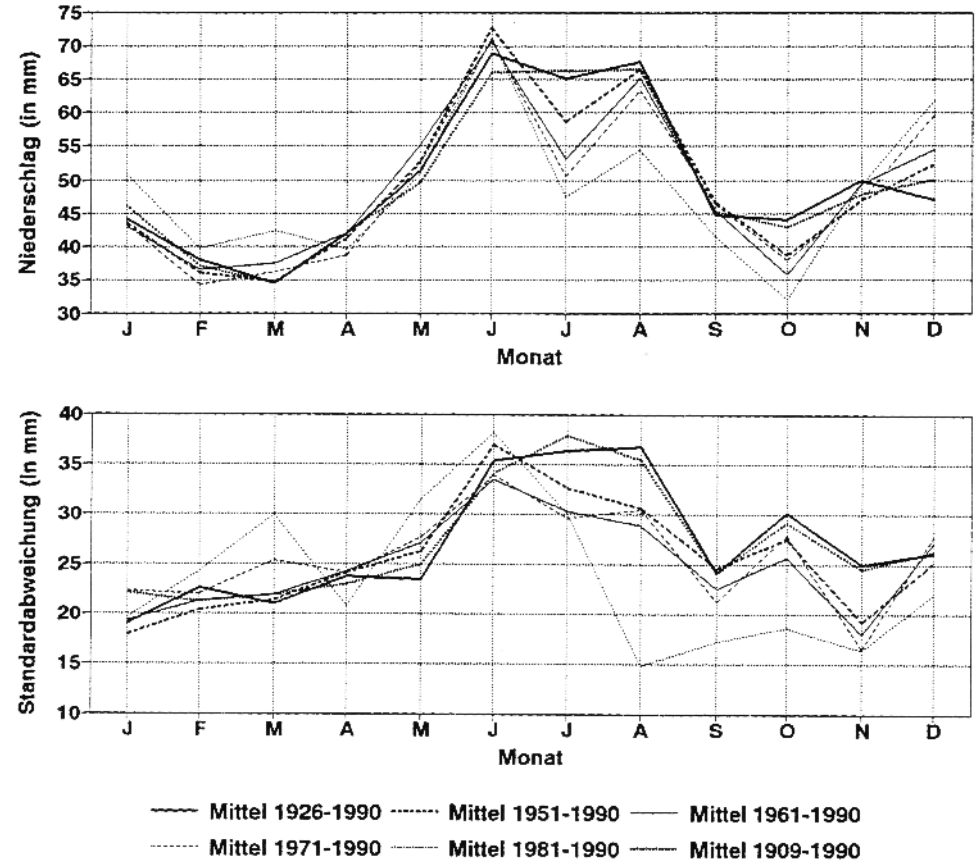


Abb. 52: Niederschlagsmittel in Berlin-Dahlem und Standardabweichung.

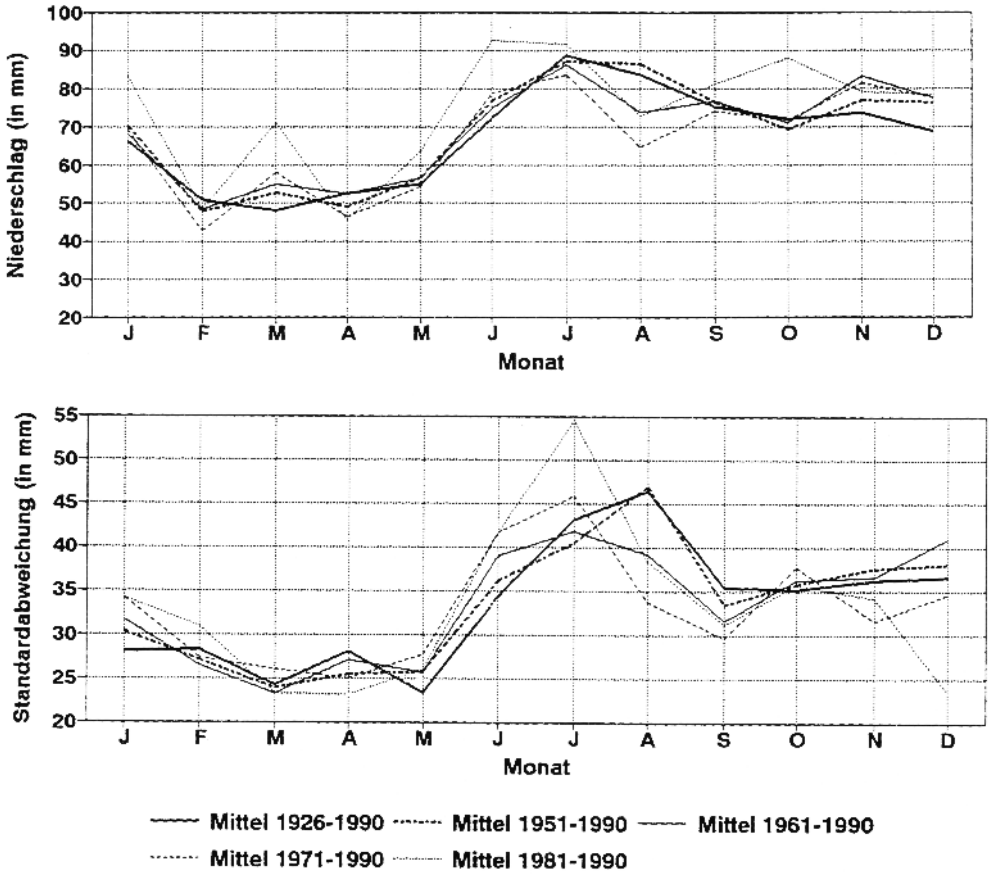


Abb. 53: Niederschlagsmittel in Neumünster und Standardabweichung.

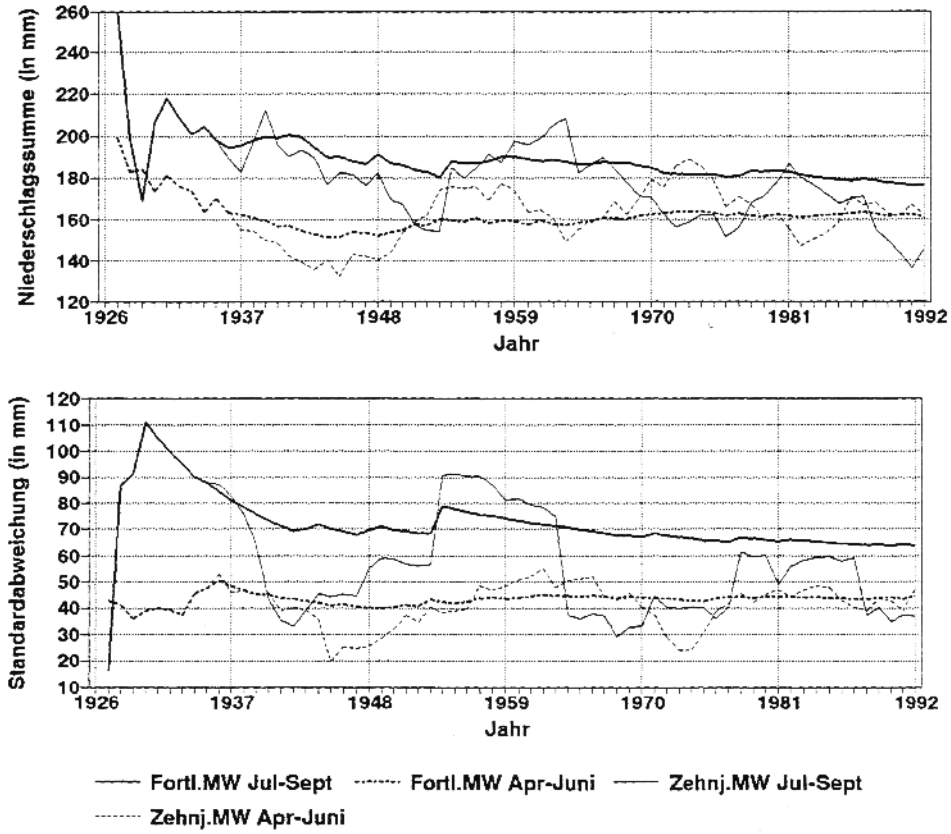


Abb. 54: Niederschlagssummen und Standardabweichung (April bis Juni und Juli bis September) für Berlin-Dahlem

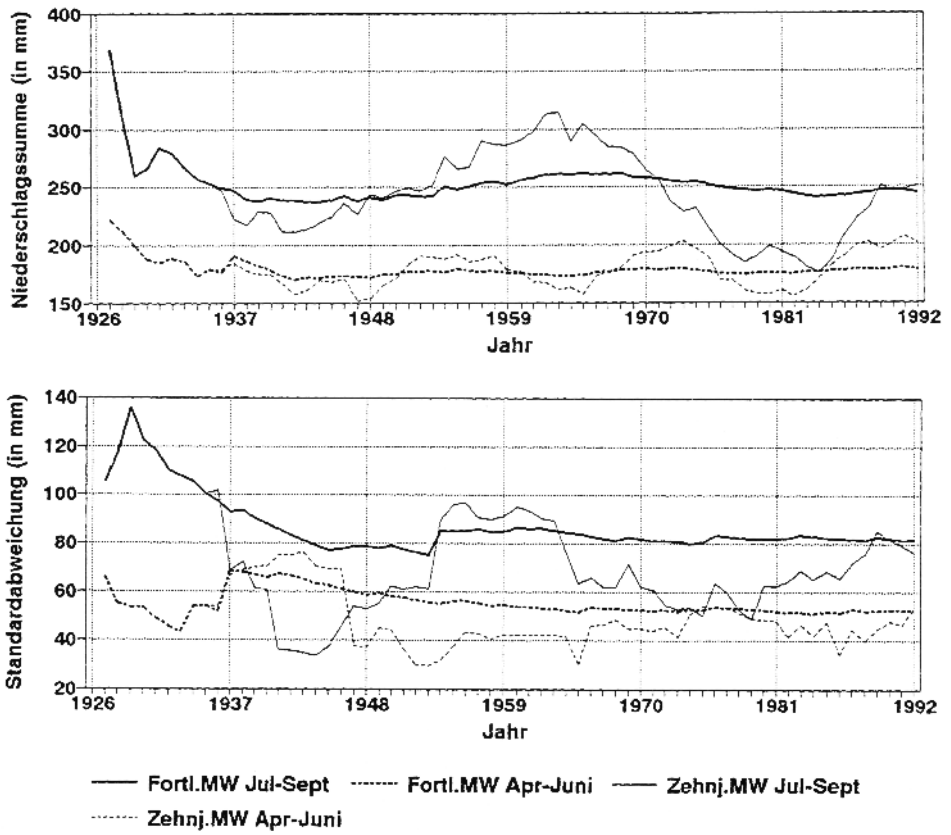


Abb. 55: Niederschlagssummen und Standardabweichung (April bis Juni und Juli bis September) für Neumünster

räumigen Wasserkreislauf und Mineralisationsprozesse erfolgt. Stoffverluste werden so in einem größeren Ausmaß vorbereitet. Die Entwicklung zeichnet sich in Berlin[27] deutlicher ab als in Neumünster.

Betrachtet man die großräumige Entwässerung der Landschaft in allen dichter besiedelten Gebieten, ist eine weitere Veränderung der Niederschlagsverteilung wahrscheinlich. Andere Wissenschaftler zeigen einen ähnlichen Trend auf[28], [29].

F.1.2.2. Muster des Bodenwasserspiegels

Der Bodenwasserspiegel wird von den ZKSen in Abhängigkeit von ihrem Wirkungsgrad (vgl. Kap. B.2.2, E.2.1) in unterschiedlichem Maße beeinflußt. In "reiferen" Ökosystemen erhöht die Akkumulation toter organischer Substanz (Humus, Streu oder Torf) die Wasserspeicherkapazität des Oberbodens. In ihnen kann die Energie weitgehend in kleinräumigen Kreisprozessen dissipiert werden. Gleichzeitig ist unter diesen Bedingungen die Verlagerung feinerer Bodenpartikel, die z.B. durch die Ausbildung undurchlässigerer Schichten zur Steigerung der Wasserspeicherkapazität beitragen, stark eingeschränkt. Durch die geringe räumliche und zeitliche Trennung von Verdunstung und Taubildung bzw. Niederschlag kann das Wasser im Idealfall ortsfest im Kreislauf geführt werden, anstatt mit dem Wind über große Entfernungen verfrachtet zu werden (Abb. 56).

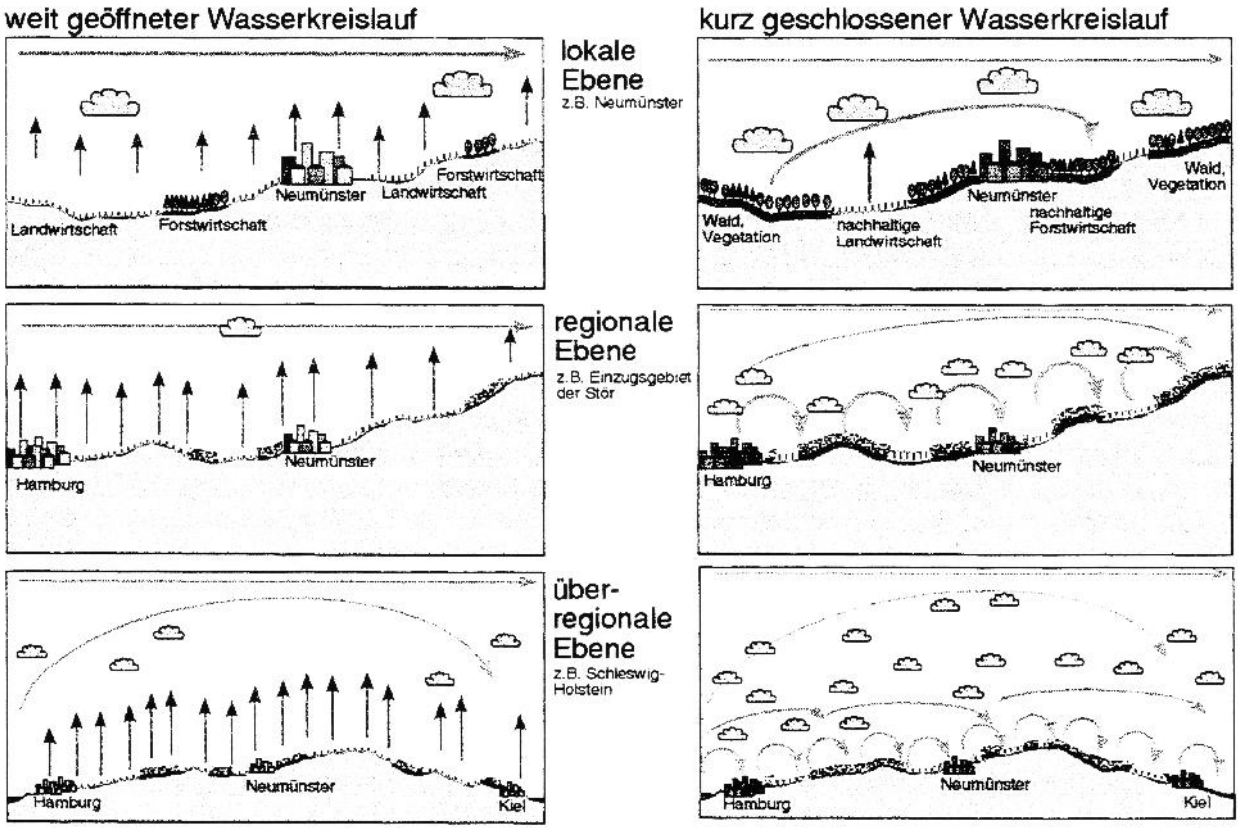


Abb. 56: Der Wasserkreislauf als fraktales Modell.

27 Hier ist die Entwicklung bei der Betrachtung der Zeitreihe von 1909 an noch deutlicher.

28 Kirchner (1986:103) faßt für sein Untersuchungsgebiet (die bayerischen Flußgebiete) zusammen, daß "markante Änderungen im Niederschlagsregime bei großflächigen Umgestaltungen in der Landnutzung, wenn überhaupt, nur in den Sommermonaten auftreten".

29 Schönwiese *et al*. (1993:22) zeigen, daß die sommerliche Abnahme des Niederschlags bereits größere Gebiete Europas betrifft. Für das Intervall 1891-1990 haben sie für den Monat August ein Abnahmegebiet ermittelt, das von den britischen Inseln bis zur Ostsee reicht. Im Intervall 1961-1990 hat sich dieser Trend erheblich verstärkt.

Die Wasserspeicherkapazität und damit der Bodenwasserspiegel eines Standortes wird bei abnehmendem Einfluß der Vegetation zunehmend auch von der Korngrößenverteilung und der Schichtung des Oberbodens bestimmt. Auch der Wasserzufluß aus hangaufwärts liegenden Flächen kann den Bodenwasserspiegel beeinflussen. Dies ist besonders in den Niederungen zu erwarten.

Der Verlauf der Ganglinien des Bodenwassers zeigt (vgl. Abb. 57, 58 und Anhang 2, F.2.1.2), daß der Bodenwasserspiegel an den untersuchten Standorten im Sommer, teilweise auch im Winter, von der Vegetation nicht mehr gesteuert wird. Die Standorte können nach den Ganglinien in

- ► Standorte mit dauerhaft hohen Flurabständen und
- ► Standorte mit sommerlich höheren und winterlich niedrigeren Flurabständen

differenziert werden.

Beispiele für Standorte mit dauerhaft hohen Flurabständen sind die Bodenwasserpegel 9, 11, 12, 13, 14 und 18 (vgl. Abb. 57 und Anhang 2, F.2.1.2). Die Bodenwasserganglinie zeigt zwar noch ein jahreszeitliches Muster, die Wasserstandserhöhung erreicht die oberen Dezimeter allerdings nicht mehr. Die Böden sind überwiegend grobkörnig (Mittelsand); ob Entwässerungsgräben vorhanden sind, ist nicht bekannt. Bei den genannten Pegeln handelt es sich überwiegend um Nadelwaldstandorte (vgl. Tab. 2, Kap. D.3.5). Durch den großen Flurabstand verursacht jeder Niederschlag wechselfeuchte Phasen im Oberboden, die zur verstärkten Mineralisation organischer Substanz beitragen (vgl. Kap. E.2.1). Während des Winters perkoliert das Niederschlagswasser durch das gesamte Bodenprofil. Dadurch kann es vermehrt Basen und Nährstoffe lösen und in Richtung der Oberflächengewässer transportieren.

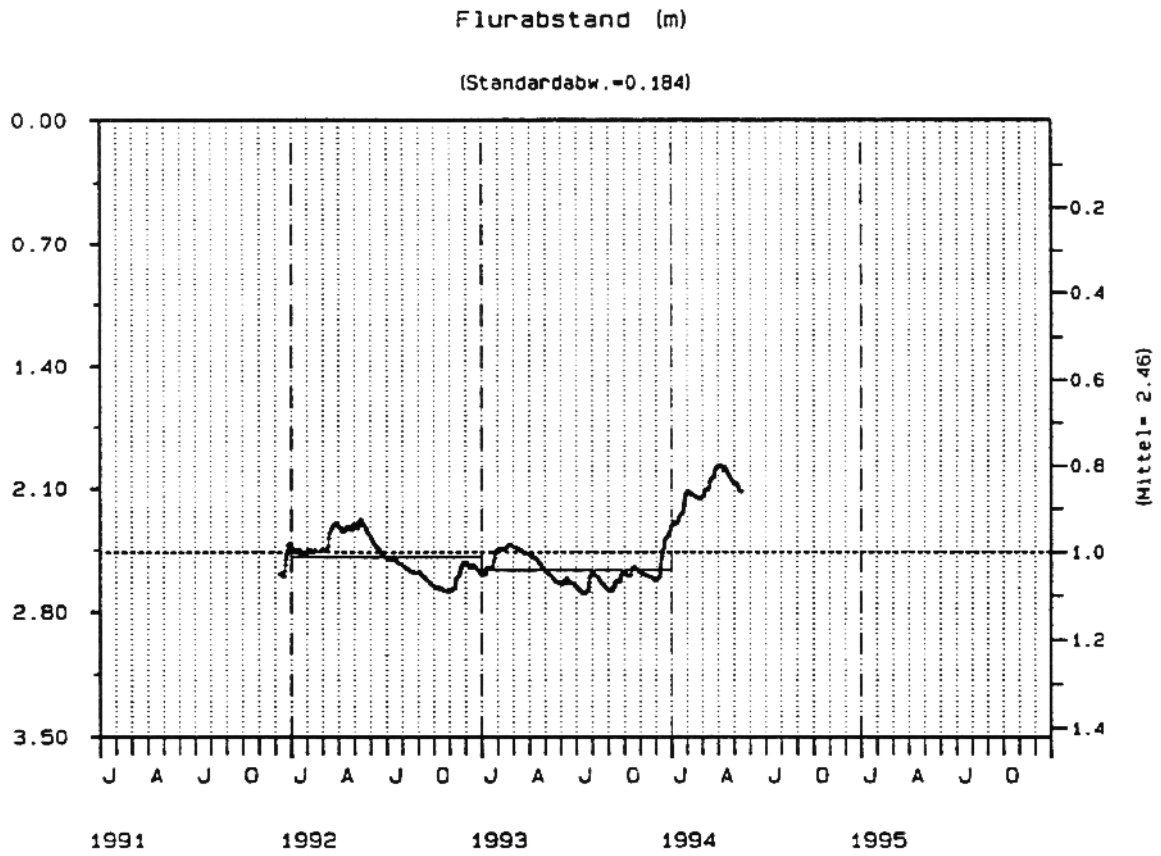


Abb. 57: Tägliches Mittel des Bodenwasserstandes am Meßpegel 9 (Nadelwald bei Lindeloh).

Ganglinien mit einem während des Winters geringen Flurabstand zeigen z.B. die Standorte 1, 2, 4, 15 und 16 (vgl. Abb. 58 und Anhang 2, F.2.1.2). Im Winter ist der Boden, rechnet man einen entsprechenden Kapillarsaum hinzu, fast vollständig wassergesättigt (Haltephase). Der Abfluß des Niederschlagswassers wird deshalb überwiegend oberflächlich bzw. oberflächennah auftreten. Der Transport von Basen und Nährstoffen ist dadurch begrenzt. Die gewählten Beispiele, bei denen es sich ausschließlich um Wälder handelt, können jedoch den hohen Wasserstand den Sommer über nicht halten. Verdunstung und möglicherweise Abfluß sind höher als Niederschläge und Taubildung, so daß der Bodenwasserspiegel bis auf unter 200 cm unter Flur absinken kann. Dabei sinkt die Ganglinie oft ohne größere Unterbrechung ab. In der je nach Standort etwas unterschiedlichen Auslaufphase (etwa Mai bis August) treten auch hier bei jedem Niederschlagsereignis wechselfeuchte Phasen im Oberboden auf. Der Wiederanstieg des Bodenwassers erfolgt zumeist etwas rascher als das Absinken.

Ähnliche Ganglinien finden sich auch unter Grünlandstandorten, z.B. den Standorten 19, 24, 25 und 28. Sie unterschieden sich von den Waldstandorten durch eine teilweise etwas höhere Dynamik der Ganglinie in der Haltephase. Auffällig ist, daß diese Grünlandstandorte überwiegend Böden mit feineren Korngrößen aufweisen (lehmige Sande). Dies belegt, daß die Waldstandorte mit gröberem Substrat durch die Vegetation bzgl. ihrer Wasserhaltekapazität verbessert wurden.

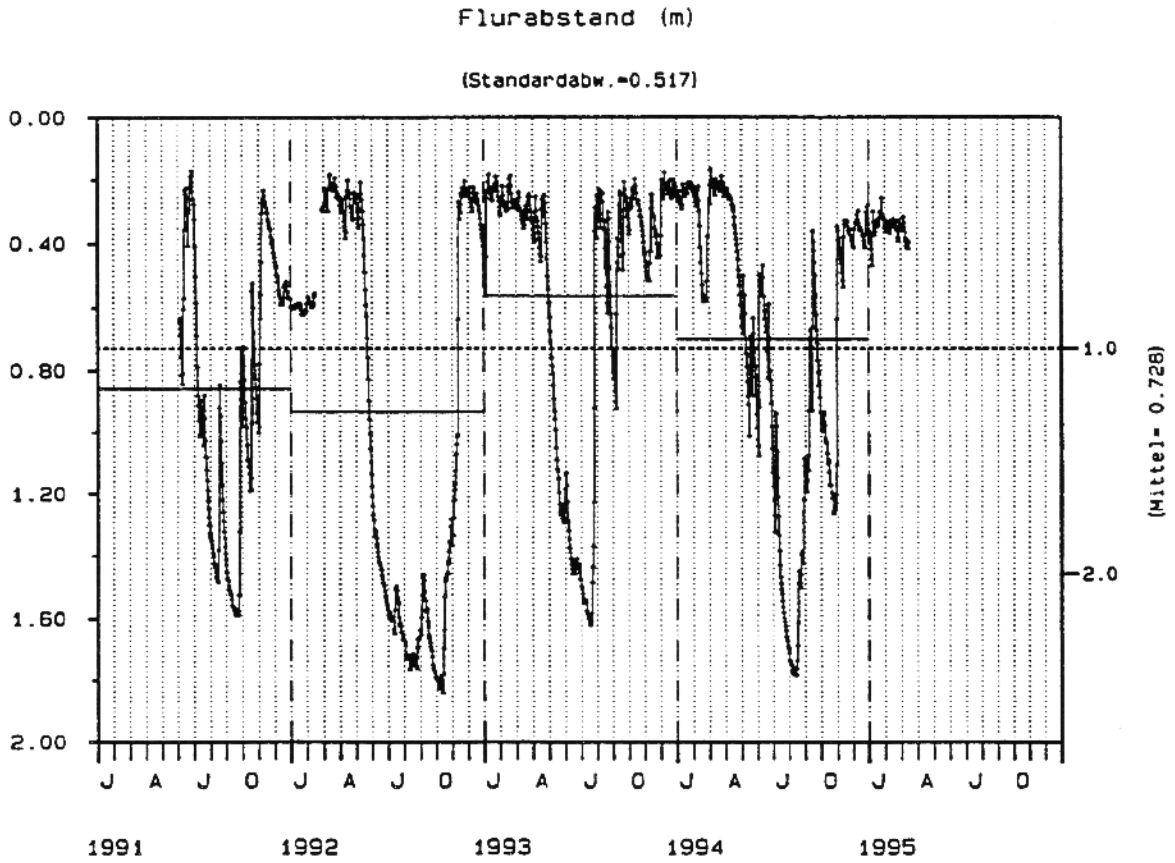


Abb. 58: Tägliches Mittel des Bodenwasserstandes am Meßpegel 2 (Laubwald im Gehege Himmelreich).

Der Grünlandstandort des Bodenwasserpegels 6 (Niedermoor) zeigt keine ausgeprägte Haltephase während der Wintermonate auf, aber während des gesamten Jahres relativ niedrige Flurabstände. Der Verlauf der Ganglinie könnte auf zufließendes Wasser hindeuten. - Die Lage des Pegels 22 unter Laubwald auf einem kleinen Hügel macht sich auch in der Ganglinie bemerkbar. Durch unzureichende Wasserspeicherung und fehlenden Zufluß sinkt hier der Bodenwasser-

spiegel von 50 cm bis auf 470 cm ab. - Der Bodenwasserpegel 7 auf einer Heidefläche im NSG Halloher Moor spiegelt die geringe Steuerung des Bodenwasserhaushaltes durch das frühe Sukzessionsstadium wider. Die Ganglinie weist auch während des Winters eine hohe Dynamik und teilweise große Flurabstände auf.

Der Einfluß der organischen Substanz als Auflage oder als Humus im A-Horizont läßt sich aus einer Gegenüberstellung von Standorten abschätzen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Höhe einer an organischer Substanz reicheren Schicht allein noch nicht deren Funktion der Wasserspeicherung bestimmt. Hier spielt sicherlich auch der Zustand des Humus und dessen Größenverteilung eine Rolle. Als Standorte mit einer größeren Humusauflage können gelten:

Nr	Nutzung	Ort	Oberboden [cm]
02	Laubwald	Gehege Himmelreich	O=11, Ah=21
04	Mischwald	Gehege Himmelreich	Ah=80
05	Laubwald	Gehege Himmelreich	Ah+Ae=50
06	Grünland	Fuhlenau	Hn=85
10	Pfeiffengras	Dosenmoor	Hn=100
16	Mischwald	westl. Latendorf	Ah+Hn=57

Während diese Standorte ausgeprägtere Haltephasen zumindest während des Winterhalbjahres aufweisen, zeichnet sich die zweite Gruppe durch tiefere, nicht mehr an die humosen Bodenschichten heranreichenden Ganglinien aus:

Nr	Nutzung	Ort	Oberboden [cm]
07	Heide	NSG Halloher Moor	Ae=13
09	Nadelwald	Hartenholm	Ahe=24
14	Nadelwald	nördl. Halloh	Ae=3
18	Grünland	westl. Halloh	Ap=29

Die Standorte 12 (Nadelwald, Höllenau) und 13 (Nadelwald, nördl. Halloh) weisen gestörte Profile auf, die auf eine vorangegangene "Melioration" hinweisen. Die Bodenwasserganglinien verlaufen hier 2 m unter Flur und spiegeln die Niederschlagsereignisse kaum mehr wider.

Durch den Einbau der geschlitzten Kunststoffrohre (D=6 cm, Kap. D.3.5) ist möglicherweise im obersten Auflagehorizont ein ungewollter Draineffekt aufgetreten. So weisen einige Pegel (z.B. Nr. 2, 5, 28) Ganglinien auf, die zwar bis an den oberen, humusreicheren Horizont heranreichen, aber nicht in diesen hinein. Diese Standorte sind deshalb vermutlich noch länger wassergesättigt, als dies die Ganglinien ausdrücken.

Die Ergebnisse der Meßsonden beschreiben zwar den Bodenwasserhaushalt in direkter Umgebung des Pegels, sind aber ohne weitergehende Heuristik nicht auf größere Flächen übertragbar. So besitzen z.B. die in enger Nachbarschaft liegenden Pegel 8 und 9 (bei Hartenholm) sich deutlich voneinander unterscheidende Ganglinien: Pegel 8 schwankt deutlich zwischen 60 cm und 140 m, während Pegel 9 nur geringe Schwankungen um 245 cm aufweist.

F.1.3. Fließgewässer als Indikatoren des Wasser- und Stoffhaushaltes des Einzugsgebietes

F.1.3.1. Die Gewässeranalyse am Beispiel von Himmelreichbach, Osterau und Dosenbek

Beispielhaft wurden für eine genauere Betrachtung drei Gewässer in Teileinzugsgebieten der Stör ausgewählt: Der Himmelreichbach, die Osterau und die Dosenbek (vgl. Karte 1). Sie weisen einen unterschiedlichen Grad der Gewässerbewirtschaftung auf. Das Spektrum reicht von einer noch relativ unbeeinflußten Gerinneentwicklung bis hin zur völligen Begradigung und Eintiefung des Laufes. Diese Auswahl versucht, verschiedene Varianten der Ausformung von Bach- bzw. Flußbetten zu erfassen, um sie bezüglich ihres Stoffrückhaltes im Gerinne, d.h. ihrer transportarmen Dissipation, vergleichend gegenüberzustellen. Ihre Einzugsgebiete zeigen dabei sowohl im Hinblick auf die Flächennutzung und somit die Vegetationsausstattung, als auch bezüglich ihrer Größe und Gefälleverhältnisse deutliche Abweichungen voneinander. Somit wurden unterschiedliche das Abflußverhalten beeinflussende Parameter erfaßt.

Abb. 59: Naturnaher Abschnitt des Himmelreichbachs.

F.1.3.1.1. Der Himmelreichbach

Der Himmelreichbach ist das kleinste der untersuchten Gewässer. Seine aus Schichtenwasser gespeisten Quellen liegen im Forst Gehege Himmelreich, südlich von Bramstedt. Der Forst bedeckt die sanft abfallende Hangkante der Hohen Geest zur Niederung der Fuhlenau. Der Himmelreichbach fließt ihr in südöstlicher Richtung zu und mündet in sie. Auf einer Fließstrecke von ca. 2 km wurden 26 Gewässerquerschnitte (Hi 1-26) kartiert (vgl. Karte 2). Dabei überwindet der Bach einen Höhenunterschied von ca. 15 m (Abschätzung nach TK 25). Die Abflußmessungen am Pegel 01 fanden im oberen Abschnitt des Baches zwischen Profil Hi 17 und 18 statt. Der im Wald liegende Gewässerabschnitt von Hi 1-20 erscheint kaum anthropogen beeinflußt (Abb.59). Entlang der weiteren Fließstrecke ist der Lauf zunehmend begradigt und das Gewässerbett ausgebaut und befestigt worden. Die Sohle ist bis zu 1,5 m eingetieft.

<u>Das Einzugsgebiet</u>

Das Einzugsgebiet des Himmelreichbaches bis zum Pegel 01 liegt auf dem Rücken einer Altmoräne (Hi 1-17). Seine Größe beträgt dort ca. 0,918 km². Es wird überwiegend forstwirtschaftlich genutzt (vgl. Karte Flächennutzung, Anhang 2). Das Gelände ist hügelig und zum Teil recht steil. Den Untergrund bildet Geschiebemergel, bestehend aus lehmigem Sand, durchmischt mit Kies

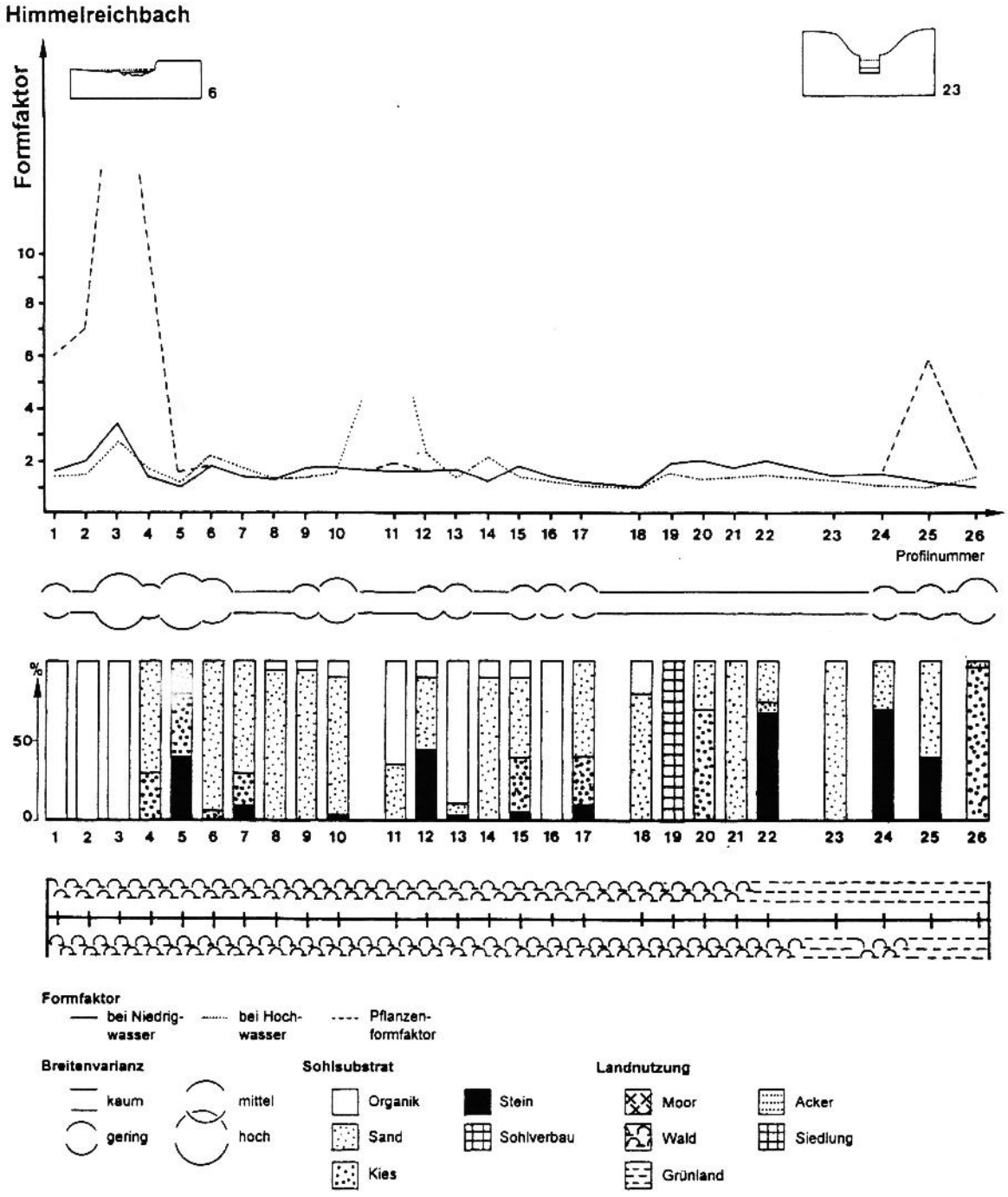


Abb. 60: Gewässerbettstrukturen des Himmelreichbaches.

und größeren Steinen. Die abwärts gerichtete Umlagerung feiner Partikel wie Ton und Schluff ließ wasserundurchlässigere Schichten entstehen. Die Bodenbildung ist entsprechend von Stauwasser beeinflußt. Es sind überwiegend Pseudogleye (vgl. Bodenkarte, Anhang 2). Im Vergleich zu den Einzugsgebieten von Osterau und Dosenbek weist der Forst Himmelreich das steilste Gefälle auf (vgl. Karte Hangneigung, Anhang 2). Die Geländeneigung des kleinen Einzugsgebietes und die Ausbildung von wasserstauenden Schichten begünstigen, daß Niederschlagswasser oberirdisch und im Boden lateral rasch dem Gewässer zufließt und zu kurzfristigen Abflußerhöhungen führt. Im Übergangsbereich zur Niederung haben sich in Folge des Grundwassereinflusses Anmoorgleye gebildet (Hi 18-24). Die Niederung der Fuhlenau selber (Hi 25-26) ist flach und weist keine ausgeprägten Gefälleänderungen auf. Als Relikt des dort ehemals hohen Wasserrückhaltes findet

sich Niedermoortorf. Die Niederung der Fuhlenau ist heute fast vollständig in Grünland umgewandelt und durch Grabensysteme drainiert.

Die Gewässerkartierung

Der Himmelreichbach weist besonders in seinen oberen, nicht bewirtschafteten Abschnitten (Hi 1-10) eine kleinräumige Strukturierung des Gewässerbettes auf. Das Gerinne besitzt über weite Strecken eine ausgeprägte Breiten- und Tiefenvarianz mit deutlicher Materialsortierung und zum Teil hohen Formfaktoren. Im mittleren Abschnitt (Hi 11-17) nimmt die Varianz in Breite und Tiefe des Gerinnes ab. An einigen Aufweitungen des Fließquerschnitts (Hi 13 und 16) wird aufgrund der dort herabgesetzten Wasserbewegung vermehrt organische Substanz akkumuliert. Im unteren, zunehmend begradigten und eingetieften Lauf (Hi 18-26) wird die Sohle häufiger aus freigespülten und abgelagerten gröberen Substraten gebildet. Zum Teil ist das Bachbett recht breit (Hi 19-22), so daß sich ein hoher Formfaktor ergibt. Hi 19 bezieht sich dabei auf einen naturnah gestalteten Ausbau des Bettes. Bei Hochwasser tritt der Bach an einigen im Wald gelegenen Abschnitten über die Ufer (Hi 4-7, 11 und 14). In der Niederung verhindert der eingetiefte Lauf, daß der Bach den Talraum überschwemmt.

Abb. 61: Die Osterau.

F.1.3.1.2. Die Osterau

Die Osterau ist das größte der untersuchten Fließgewässer. Sie entsteht aus der Rothenmühlenau und der Radesforder Au, die, aus östlicher Richtung kommend, vor Heidmühlen zusammenfließen. Von mehreren kleineren Zuflüssen gespeist fließt sie in süd-östlicher Richtung Bad Bramstedt zu. Dort mündet sie in die Bramau. Die Osterau wurde streckenweise in den 60er Jahren begradigt. Entlang der gesamten Fließstrecke wurden in zwei Abschnitten insgesamt 25 Querschnitte (OSA 1-25) kartiert (vgl. Karte 3a, 3b in Anhang 2). Bei einer Distanz von ca. 15 km überwindet die Osterau dabei einen Höhenunterschied von ca. 15 m (Abschätzung nach TK 25). Die Querschnitte OSA 1-12 beginnen kurz hinter Heidmühlen und ziehen sich fast bis an den Wildpark Eschholz heran. Die Osterau windet sich dort in Mäandern durch eine hauptsächlich als Weide- und Ackerland genutzte Niederung. OSA 13-25 wurden hinter dem Pegel P 11 in Bimöhlen aufgenommen und erstrecken sich über eine Länge von ca. 2,5 km. Der Flußlauf ist weit geschwun-

gen. Das überwiegend von Wald begrenzte Tal besitzt zum Teil steile Böschungen zum Ufer hin (Abb. 61).

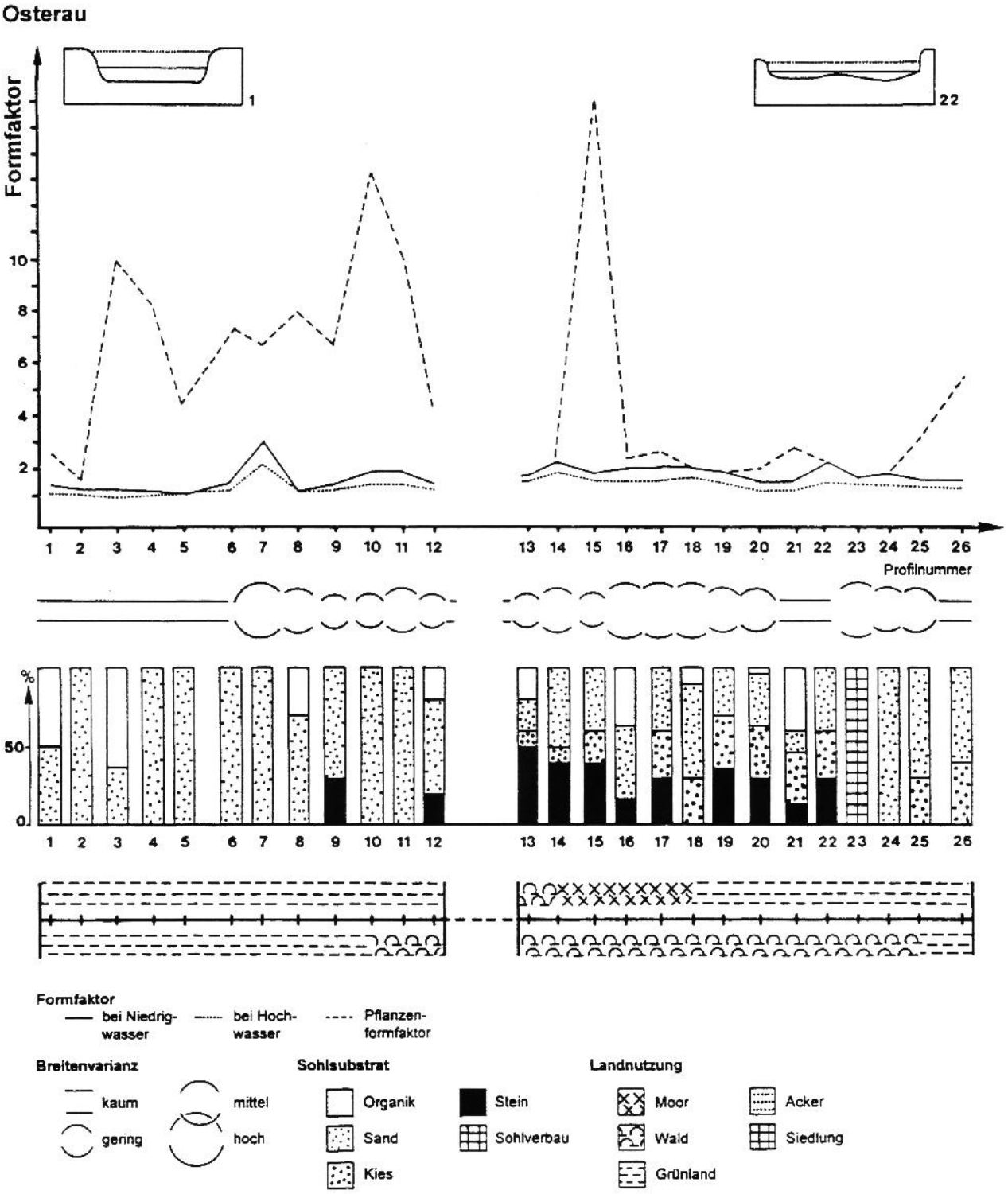


Abb. 62: Gewässerbettstrukturen der Osterau.

Das Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet der Osterau liegt im relativ flachen Bereich der niederen Geest. Am Pegel in Bimöhlen ist es ca. 140 km² groß. Der Untergrund besteht überwiegend aus Sandersanden und ist nährstoffarm. Vereinzelt begrenzen flache Moränenrücken das Einzugsgebiet im Norden und Süden (vgl. Karte Höhenschichten, Anhang 2). Die Bodenbildung in der Niederung ist

grundwasserbeeinflußt. Gley-Podsole und Podsol-Gleye bildeten wasserstauende Horizonte aus Eisenoxiden, Eisen und Mangan. In den Senken entwickelten sich weite Nieder- und Hochmoore (vgl. Bodenkarte, Anhang 2). Die Feuchtgebiete sowie die Geomorphologie begünstigen einen verzögerten Abfluß von Niederschlagswasser.

Durch die lange praktizierte Verhüttung des Rasensteins und einen in den 60er Jahren großflächig durchgeführten Tiefenumbruch des Bodens wurden die wasserstauenden Schichten weitgehend zerstört. Die Moore wurden seit dem letzten Jahrhundert entwässert und kultiviert. Heute ist die Niederung nahezu vollständig landwirtschaftlich als Grün- und Ackerland genutzt (vgl. Karte Flächennutzung, Anhang 2).

Die Gewässerkartierung

Im oberen, stärker mäandrierenden Abschnitt der Osterau (OSA 1-12) weist der Lauf zum Zeitpunkt der Kartierung kaum eine ausgeprägte Strukturbildung auf. Obwohl eine deutliche Breiten- und Tiefenvarianz nur selten ausgebildet ist, wurden gewässerspezifisch vier Variationsklassen unterschieden. Die Sohlsubstrate sind über weite Strecken homogen und weiträumig sortiert abgelagert. Es handelt sich fast ausschließlich um Sand und organisches Material. Im besonnten Lauf haben sich Wasserpflanzen angesiedelt (OSA 3). Im unterhalb gelegenen, stärker begradigten Flußlauf (OSA 13-26), findet sich gegenüber der mäandrierenden Fließstrecke eine deutlichere Gerinnestrukturierung. Infolge der dort selbst in Zeiträumen mit Niedrigwasser beschleunigten Verlagerung von Feinmaterial dominieren hier gröbere Substrate. Bei ansteigenden Abflüssen tritt die Osterau entlang der gesamten Fließstrecke nicht über die Ufer.

Abb. 63: Die Dosenbek.

F.1.3.1.3. Die Dosenbek

Die Quelle der Dosenbek liegt südlich von Negenharrie im Gehege Negenharrie des Staatsforstes Neumünster in Ausläufern des östlichen Hügellandes. Von dort fließt der Bach um das westlich gelegene Dosenmoor. Bei Blocksberg schwenkt er nach Süden um und mündet kurz vor Brachfeld in die Schwale. Die gesamte Fließstrecke ist stark begradigt (Abb. 63), der Lauf zum Teil befestigt und bis zu 1,5 m eingetieft (Karte in Anhang 2, F.1.3 und Abb. 63). Im Bereich des Dosenmoores

mündet eine Reihe von Stichgräben in die Dosenbek. Unterhalb von Tungendorf fließt ihr ein weiterer Wiesenbach zu. Entlang der gesamten Lauflänge wurden 21 Querschnitte (Do 1-21) kartiert (Karte in Anhang 2, F.1.3 und Abb. 63). Dabei überwindet der Bach auf einer Distanz von ca. 8 km einen Höhenunterschied von nicht ganz 10 m (Abschätzung nach TK 25). Die Abflußmessungen wurden bei Blocksberg, unterhalb des Dosenmoores, durchgeführt.

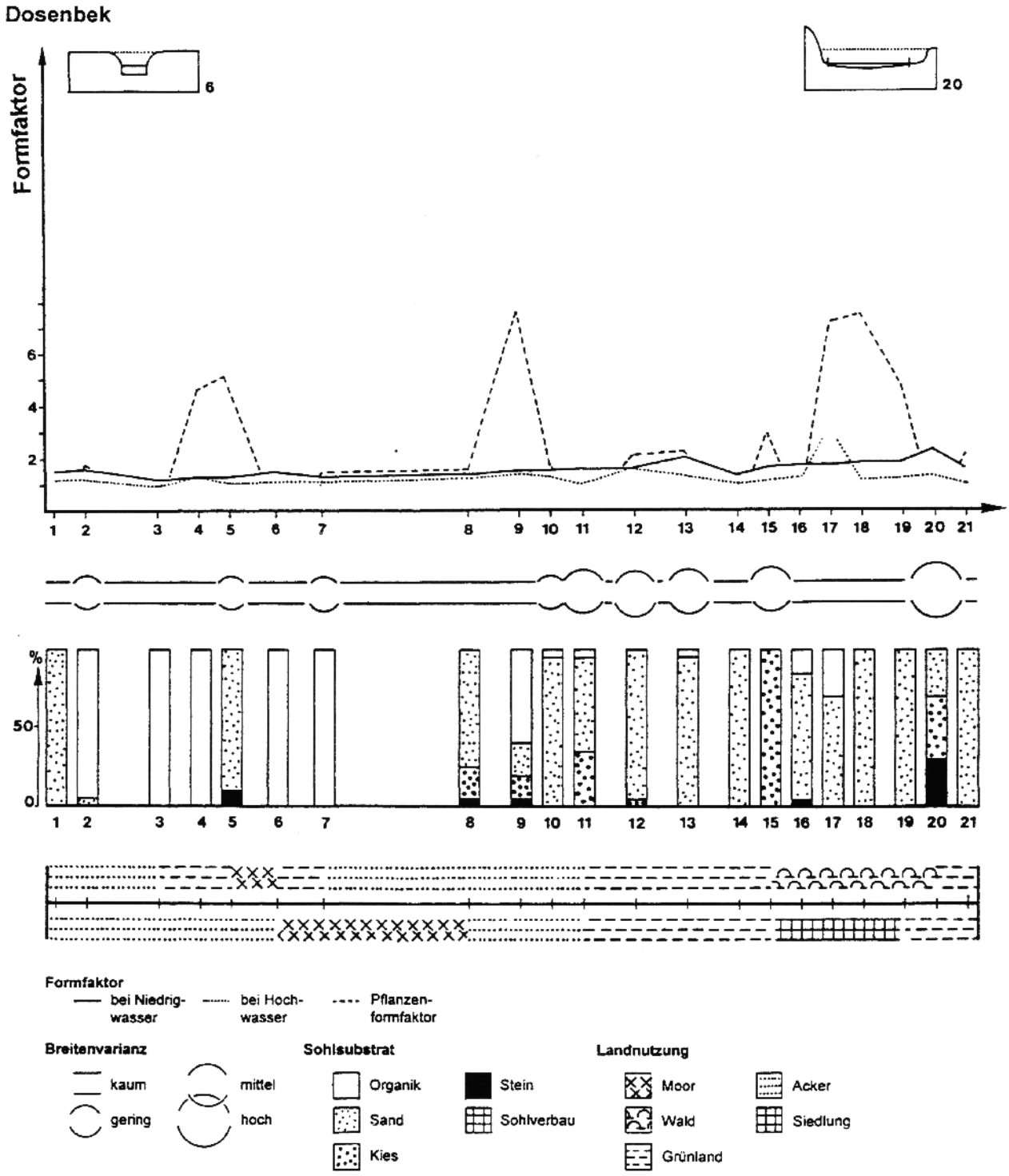


Abb. 64: Gewässerbettstrukturen der Dosenbek.

Das Einzugsgebiet

Im Nord-Osten wird das Einzugsgebietes der Dosenbek von den flachwelligen Ausläufern des östlichen Hügellandes begrenzt (vgl. Karte Höhenschichten, Anhang 2). Die Erhebungen werden

überwiegend aus eiszeitlichen Sedimenten und Geschiebemergel der Grundmoräne gebildet. Prozesse der Verlehmung und Tonverlagerung mit versickerndem Niederschlagswasser ließen wasserstauende Schichten im Boden entstehen. Als Böden stehen in weiten Teilen pseudovergleyte Parabraunerden an. In Mulden konnten sich Niedermoore bilden (vgl. Bodenkarte, Anhang 2). Das Gebiet ist heute überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Westlich des Hügellandes schließt sich im Übergang in die Niederung der Geest das Dosenmoor an. Es weist eine Reihe von Entwässerungsgräben auf. Die Größe des Einzugsgebietes am dort aufgestellten Pegel 04 beträgt ca. 16 km². Im sich südlich fortsetzenden Teil bis zur Mündung fließt die Dosenbek durch eine Niederung, deren ufernahe Auenbereiche ehemals vermoort waren. Heute sind sie ackerbaulich bzw. als Grünland genutzt (vgl. Karte Flächennutzung, Anhang 2).

Die Gewässerkartierung

Die Dosenbek weist entlang ihrer gesamten Lauflänge keine kleinräumige Strukturbildung auf. Eine Varianz in der Breite und Tiefe des zum Teil befestigten und durchgängig stark begradigten Bachbettes ist bis auf wenige Ausnahmen nicht vorhanden. Bei der zum Zeitpunkt der Kartierung niedrigen Wasserführung sind Sedimente über weite Strecken homogen abgelagert. Im Bereich des Moores herrscht organisches Material, im abwärtigen Bereich hauptsächlich Sand vor. Im Lauf finden sich nur einige wenige Aufweitungen, in denen eine Materialsortierung erkennbar ist (Do 11, 15, 21). Querschnitt Do 9 zeigt eine einsetzende Strukturbildung durch Wasserpflanzen. Bei Abflußerhöhungen tritt die Dosenbek in der Regel nicht über die Ufer. Nur extreme Hochwasserspitzen können im oberen Lauf und nahe der Mündung zu Überschwemmungen führen (z.B. Do 4 u. 17).

F.1.3.2. Ergebnis

Alle drei Gewässer weisen im Untersuchungszeitraum bei dem geringen landschaftlichen Wirkungsgrad einen stark schwankenden Hydrographen auf (Kap. F.2.1.2). Rückgekoppelt daran dominieren in Zeiträumen ansteigender Abflüsse intensive Materialtransporte im Dissipationsprozeß. Aufrechterhalten werden sie durch Maßnahmen der Gewässerunterhaltung, welche eine Selbststrukturierung der Gerinne in Richtung verlustärmerer Energiedissipation verhindern. Die fehlende Selbstoptimierung der Gewässer und ihre hohe morphologische Dynamik spiegeln sich deutlich in den kartierten morphologischen Parametern wider. Diese ermöglichen jedoch nur in ihrer Gesamtheit und in Verbindung mit dem Hydrographen Aussagen über die Transportprozesse.

Die Varianz des Formfaktors bei Hoch- und Niedrigwasser

Mit Ausnahme einiger Teilabschnitte des Himmelreichbachs (s.u.) weisen alle Gewässer eine kaum nennenswerte Verbesserung des Formfaktors und damit eine fehlende Ausuferung bei Hochwasser auf. Der so in Zeiträumen ansteigender Abflüsse minimierte Strömungswiderstand begünstigt intensive Materialtransporte. Stoffverluste mit der fließenden Welle sind maximiert.

Das Partikelspektrum

Die untersuchten Gewässer weisen größtenteils ein nur gering sortiertes Partikelspektrum auf. Hervorzuheben ist dabei, daß die jeweilige Untergrundbeschaffenheit zwar die dominierende Kornfraktion im Fließgewässer bestimmt, aber nicht ausschließlich für ein homogenes Partikelspektrum verantwortlich gemacht werden kann. So liegt z.B. in der Osterau als einem Sandergewässer zwar vorwiegend, aber nicht ausschließlich sandiges Material vor. Beispiel dafür bildet das Vorkommen gröberer Substratanteile der Profile 9 und 12, die nicht auf Steinschüttungen zurückgeführt werden können. Inwieweit sich diese - mengenmäßig je nach Untergrundbeschaffenheit natürlicherweise ungleich verteilten - Substrattypen sortieren, war Gegenstand der Betrachtung und ist wesentlich von der Abflußschwankung und den Materialeinträgen abhängig.

In den untersuchten Gewässern kann die weitgehend homogene Zusammensetzung des Partikelspektrums auf die temporäre Abflußbeschleunigung infolge extremer Abflußspitzen einerseits sowie die Unterhaltung der Gewässer andererseits zurückgeführt werden. Sie begünstigen eine sich selbst verstärkende Erosion. In den sich eintiefenden und z.T. verbreiternden Gerinnen steigt in Zeiträumen zurückgehender Abflußhöhe extrem der Strömungswiderstand. Temporär dominiert über weite Strecken die Akkumulation auch von feinerem Material. Eine verlangsamte Substratsortierung zwischen den Abflußspitzen und dadurch weitgehend homogene Zusammensetzung der Korngrößenfraktionen im Partikelspektrum der Gewässersohle ist die Folge. Das gering sortierte Partikelspektrum spiegelt somit die hohe Dynamik des Abflusses und rückgekoppelt daran auch der Transportprozesse der Gewässer wider (z.B. HI 18-26, OSA 1-11 und 23-26, DO 1-4, 6-10, 12-19 und 21).

Infolge der Gewässerunterhaltung werden auch in Abschnitten, wo natürlicherweise die Selbstoptimierung durch rückschreitende Auflandung einsetzen würde (Bereiche mit Fließquerschnittsvergrößerung, Kap. B.4.1.2), intensive Materialtransporte aufrechterhalten. Deutlich wird dies z.B. im unteren Lauf des Himmelreichbaches (HI 18-26). Dort tritt dieser in die Niederungen der Fuhlenau ein. Natürlicherweise würde hier durch die Verzögerung der Wasserbewegung eine Sedimentablagerung und Lauferhöhung eintreten. Durch Auflandung und Überschwemmung entständen somit erste Wasser- und Stoffretentionsräume im Gewässerlauf. Durch Begradigung erscheint jedoch die Wasserbewegung derart erhöht, daß auch bei einer mittleren Abflußmenge feinere Partikel kaum noch sedimentieren. Sichtbar im Sohlsubstrat wird dies durch das dort freigespülte bzw. abgelagerte gröbere Material.

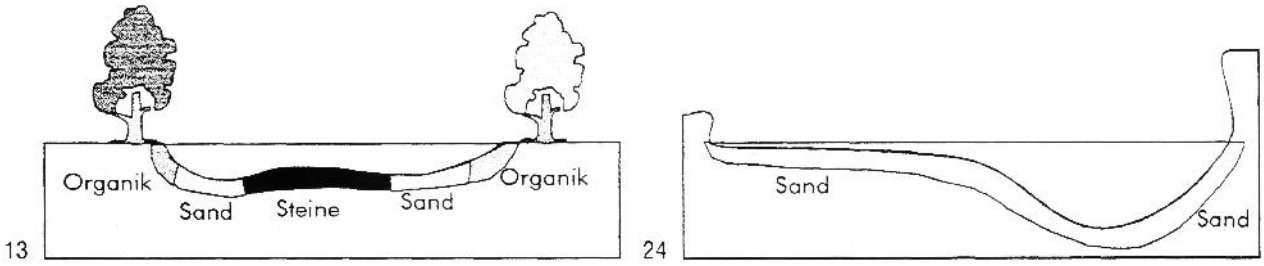


Abb. 65: Partikelspektrum der Osterau in einem Bereich stark herabgesetzter (rechts) und stark beschleunigter Fließgeschwindigkeit (links).

Ein weiteres Beispiel bildet der untere Lauf der ursprünglich stark mäandrierenden Osterau (OSA 13-22). Die ehemals gegenüber den oberen Abschnitten verzögerte Wasserbewegung ist, wie auch der Vergleich der Fließgeschwindigkeiten zeigt, durch Begradigung erhöht. Der dadurch selbst in Niedrigwasserzeiträumen gegenüber dem oberen Lauf erhöhte Feinmaterialtransport wird in einem höheren Anteil an freigespülten Grobsubstrat und dem veränderten Partikelspektrum sichtbar (Abb. 65).

In der Dosenbek sind aufgrund der durchgehenden Laufbegradigung bei gleichzeitig häufigen Extremen in den Abflußspitzen (Anhang 2, F.2.1.2) besonders intensive Materialtransporte zu erwarten. Das in großen Mengen eingetragene sandige und organische Material wird so über weite Distanzen flußabwärts verlagert. Nur an wenigen Stellen haben sich durch Selbststrukturierung kleinräumige Geschwindigkeitsgradienten entwickelt, die zu einer größeren Vielfalt der Korngrößen im Partikelspektrum führten (z.B. DO 5, 11, 20).

Die Breiten-Tiefen-Varianz

Eine auffällig hohe Breiten-Tiefen-Varianz, Zeichen einer weitgehend verlustarmen Energiedissipation im Fließgewässer, weist einzig der Himmelreichbach in seinem oberen und mittleren Lauf auf (HI 1-10 und 11-17). Aufgrund der kaum vorhandenen anthropogenen Beeinflussung des Gewässers können sich dort rückgekoppelt an die Schwankungen im Abfluß sowie die Unterschiede im Gefälle orts- und zeitangepaßt Strukturen entwickeln, die den Stofftransport maximal gegenüber der Wasserbewegung verzögern (Materialsortierung, Totholzstaue). Neben der hohen Varianz des Formfaktors und der hohen Vielfalt des Partikelspektrums wird dies insbesondere durch den häufigen und ausgeprägten Wechsel in der Gewässertiefe und -breite sichtbar:

► Nahe der Quelle (HI 1-3) ist der besonnte Lauf mit Moosen nahezu vollständig zugewachsen (Abb. 66). Durch die verzögernde Rückwirkung der Moose auf die Wasserbewegung wird die Akkumulation transportierten Feinmaterials erhöht; die Gewässertiefe und -breite variiert hier auf engstem Raum. Die sich hier im Gewässer entwickelnde Moosstruktur ist auch für die

Abb. 66: Moosstruktur im Oberlauf des Himmelreichbachs.

Selbstoptimierung der Gewässerumgebung von Bedeutung. Mit ihrer Ausbreitung in die angrenzende Fläche trägt sie dort zur Optimierung der Energiedissipation bei. Zusätzliche kleinräumige Verdunstungs- und Kondensationszyklen dämpfen die Temperaturamplitude unter Verlängerung der Feuchtphasen des Bodens. Die dortige Bodenauflage war z.B. auch im trockenen Hochsommer 1994 noch feucht. Ausgehend vom Gewässer entwickeln sich somit hier Strukturen, die den Wasser- und Stoffrückhalt in der Fläche und im Gerinne selbst steigern.

► Im Oberlauf (HI 1-10) ist das Bachgefälle gegenüber den restlichen Abschnitten am höchsten. Durch die hier vergrößerte Fließgeschwindigkeit des Wassers kommt es selbst in Zeiträumen stark herabgesetzter Abflußhöhe zu einer fortschreitenden Materialsortierung. Der ungehindert ablaufende Selbststrukturierungsprozeß wird in dem kleinräumigen Wechsel verengter und aufgeweiteter Abschnitte, einhergehend mit der hohen Vielfalt im Partikelspektrum, sichtbar.

Im Gewässer kann hier orts- und zeitangepaßt der Materialtransport maximal gegenüber der Wasserbewegung verlangsamt werden (Abb. 67).

Abb. 67: Zu Rippelmarken sortiertes Feinmaterial in einem strömungsarmen Abschnitt des Himmelreichbachs.

► Eine weitere markante Stelle in der Breiten-Tiefen-Varianz findet sich im Bereich der Kartierquerschnitte HI 4-7, 11, 14. Dort tritt der Bach bei Abflußanstieg rasch über die Ufer, da aufgrund des vergrößerten Fließquerschnitts infolge von Totholzstauen die Wasserbewegung verzögert wird. Ein Teil des eingetragenen und aus den höher gelegenen Abschnitten erodierten Materials wird in der Aue abgelagert. An dieser Fließstrecke maximalen Strömungswiderstandes dominiert somit selbst bei temporären Abflußspitzen die transportarme Energiedissipation.

Insgesamt läßt die ökomorphologische Betrachtung von Himmelreichbach, Osterau und Dosenbek auf eine derzeit hohe Strukturdynamik in allen drei Gewässern rückschließen. Dies kennzeichnet einen geringen Wirkungsgrad der Strukturen ihrer Einzugsgebiete. Die hohen Einträge feinpartikulären und gelösten Materials aus der Fläche in die Fließgewässer können dort insbesondere durch die Gewässerunterhaltung kaum zurückgehalten werden. Das derzeit geringe Stoffrückhaltevermögen der Osterau wird beispielsweise allein schon dadurch belegt, daß in einem Zeitraum von 10 Jahren nach mündlicher Auskunft des Wasserverbandes "Osterau" keinerlei Sohlreinigungen erforderlich waren, um Sandbänke, Sedimentationen und sonstige abflußhemmende Ursachen zu beseitigen. Intensive und weiträumige Materialtransporte in der Dosenbek belegen die mehr als 4000 m^3 umfassenden Schlammablagerungen[30]. Diese Ablagerungen stammen aus der Schwale, in die auch die Dosenbek mündet.

Von Bedeutung ist die hohe morphologische Dynamik im Gerinne auch für den Rückhalt der gelösten Basen. Die Gewässerzönosen finden in den bewirtschafteten Gewässerläufen kaum optimale Bedingungen für ihre Entwicklung. Kleinräumige Habitate fehlen ebenso wie die für Biofilm-

30 KN Holsteiner Zeitung vom 09. Februar 1988.

strukturen erforderlichen großen und stabilen Oberflächen des Gewässerbettes. Makrophyten, welche die besiedelbare Oberfläche vergrößern, werden durch Entkrautung und die extremen Hochwasserspitzen in ihrer Ausbreitung gehemmt. Zu betonen ist in diesem Zusammenhang, daß unter Berücksichtigung der hohen Eintragsmengen an gelösten Stoffen die Wasservegetation für deren Rückhalt durch Einbau in die Biomasse von nur untergeordneter Bedeutung ist (vgl. Abb. 68). Die vorrangige Bedeutung der Wasservegetation liegt vielmehr im Rückhalt partikulärer Stoffe durch Strukturierung des Gewässerbettes.

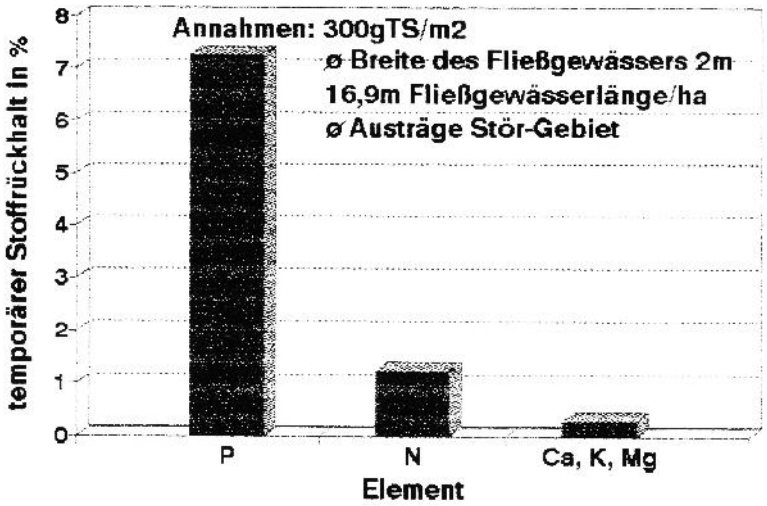


Abb. 68: Hochgerechneter temporärer Stoffrückhalt durch Makrophyten im Stör-Gebiet.

Zusammenfassend läßt somit die morphologische Kartierung auf einen äußert geringen Wasser- und Stoffrückhalt sowohl in der Einzugsgebietsfläche als auch in den ihr nachgeordneten Gewässern rückschließen. Der landschaftliche Wirkungsgrad ist nur gering.

F.2. Regionalstudie

Die Regionalstudie soll einen Vergleich der unterschiedlichen Einzugsgebiete und Berechnungsabschnitte bezüglich der untersuchten Parameter ermöglichen. Dabei werden zuerst die Abflüsse und Konzentrationen zur Ermittelung der Stoffverluste herangezogen (Kap. 2.1). Die Darstellung von Strukturparametern (Kap. 2.2) soll eine weitergehende Prozeßanalyse zulassen. Die Auswertung der Temperaturdaten liefert weitere Hinweise auf die Verteilung der dissipativen Prozesse (Kap. 2.3). Im Kap. 2.4 werden die Ergebnisse zum Wirkungsgrad und zur Phasenlage der Einzugsgebiete als Indikatoren für die Landschaft zusammengefaßt.

F.2.1. Abfluß und Stoffverluste

Zur Bestimmung der Stoffverluste der einzelnen Berechnungsabschnitte sind primär der Abfluß und die darin enthaltenen chemischen Konzentrationen erforderlich (Kap. 2.1.2, 2.1.3). Daraus lassen sich die Stofffrachten räumlich differenziert berechnen (Kap. 2.1.4). Für die Bestimmung des Abflußbeiwertes ist die Kenntnis der Niederschläge erforderlich (Kap. 2.1.1).

F.2.1.1. Niederschlag

Ein Vergleich zwischen den 14 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes zeigt (vgl. Abb. 69, 70), daß die Abweichungen der einzelnen Stationen vom Gesamtmittel aller Stationen relativ gering sind (-6% bis +5%). Diese Abweichung liegt im Rahmen der Meßfehler, die bei der Niederschlagsmessung auftreten können (Wohlrab *et al*. 1992: 46). Auch können z.B. die hohen Werte der Station Hohenwestedt - sie weist die höchsten Niederschläge für den Zeitraum 1992-1994 auf - anhand der Werte der nächstliegenden Station Gnutz - sie weist die niedrigsten auf - nicht nachvollzogen werden.

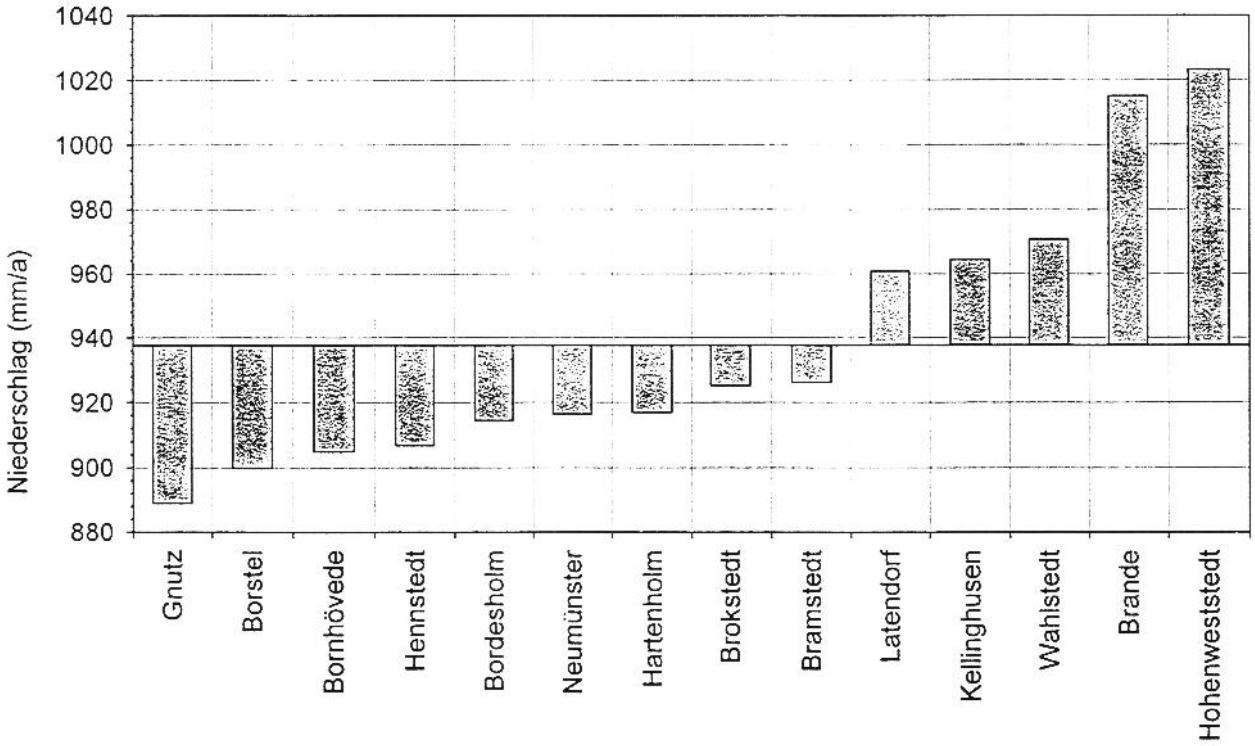


Abb. 69: Abweichung der einzelnen Niederschlagsmeßstellen vom Gesamtmittel (938 mm/a) im Störeinzugsgebiet 1992-1994.

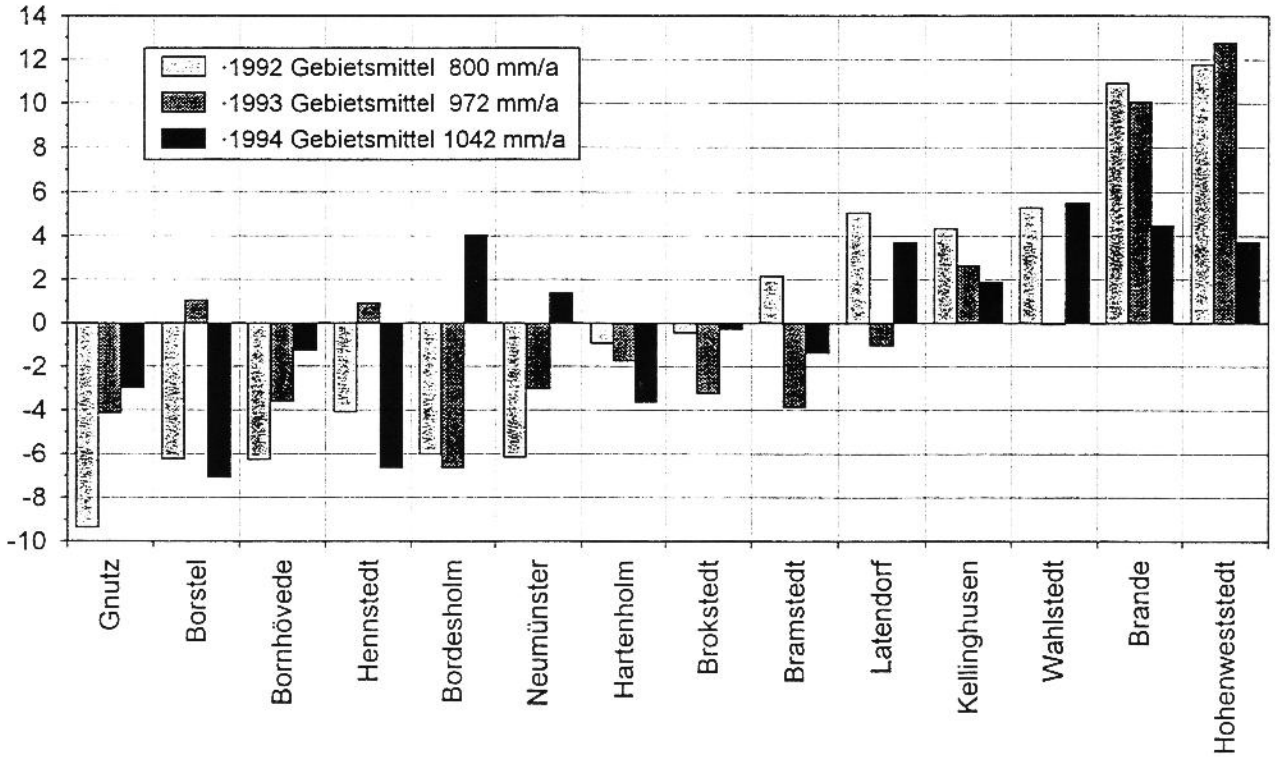


Abb. 70: Prozentuale Abweichung der einzelnen Meßstellen vom Jahresmittel aller 14 Stationen im Störeinzugsgebiet 1992-1994.

Das langjährige Mittel des Jahresniederschlages aus dem hydrologischen Atlas der Bundesrepublik Deutschland (Keller 1978) beträgt 750-800 mm. Während der Jahresniederschlag 1992 mit 800 mm diesem entsprach, wiesen die Untersuchungsjahre 1993 und 1994 einen um über 20% höheren Niederschlag auf (972 mm bzw. 1042 mm).

Die quantitative Niederschlagsanalyse ergibt:

- ► Niederschläge können auf kurze Entfernungen sehr unterschiedlich sein (z.B. Gnutz - Hohenwestedt im Nordwesten oder Wahlstedt - Bornhöved im Osten).

- ► Der allgemeine Trend "abnehmender Niederschlag von Westen nach Osten" sind nicht ohne weiteres auf das Untersuchungsgebiet übertragbar (z.B. Latendorf - Wahlstedt - Bornhöved - Borstel).

Für die Berechnung des mittleren Gebietsniederschlages der Teileinzugsgebiete wurden daher alle Stationen einbezogen, die im Teileinzugsgebiet bzw. in dessen näheren Umgebung liegen, mindestens jedoch zwei Stationen bei den kleineren Einzugsgebieten. Die genaue Zuordnung kann der Tab. im Anhang 1.5 entnommen werden.

F.2.1.2. Abfluß

Der durchschnittliche Jahresabfluß aller Pegel zwischen 1991 und 1994 beträgt 379 mm. Abb. 71 zeigt die absolute Abweichung der einzelnen Einzugsgebiete von diesem Wert.

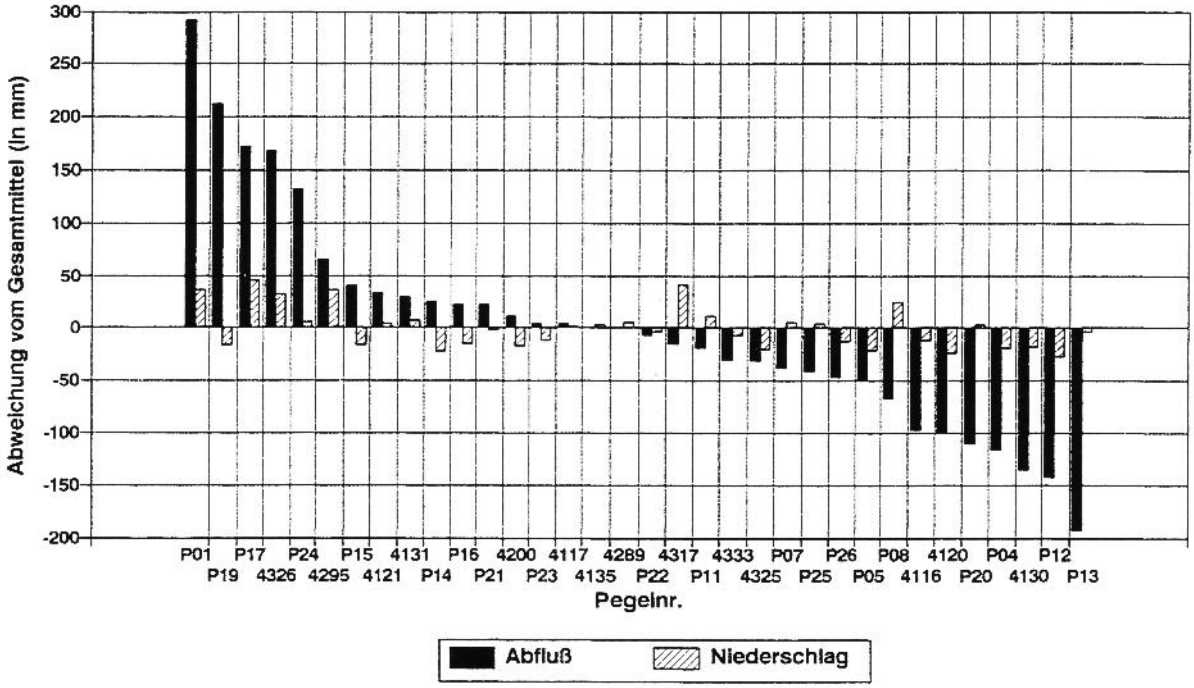


Abb. 71: Absolute Abweichung der Abflüsse und Niederschläge vom Gesamtmittel 1991-1994 (Abfluß 379 mm, Niederschlag 907 mm).

Die große Spannbreite der Abflüsse wird deutlich. Sie schwanken von etwa +275 mm bis -200 mm um das Gesamtmittel, wobei bei den Einzugsgebieten mit Extremwerten die räumliche Abgrenzung unsicher ist (z.B. P01, P19, P13). Die unterschiedlichen Gebietsniederschläge haben kaum einen Einfluß auf die Abflußunterschiede der Einzugsgebiete. So variiert der Niederschlag insgesamt nur sehr wenig, er macht nur einen geringen Anteil der Abflußabweichung aus und teilweise ist seine Abweichung sogar gegenläufig zu der des Abflusses. Daher verhalten sich die prozentualen Abweichungen von Abfluß und Abflußbeiwert sehr ähnlich (Abb. 72). Der jährliche Abflußbeiwert schwankt dabei zwischen 21 und 71.

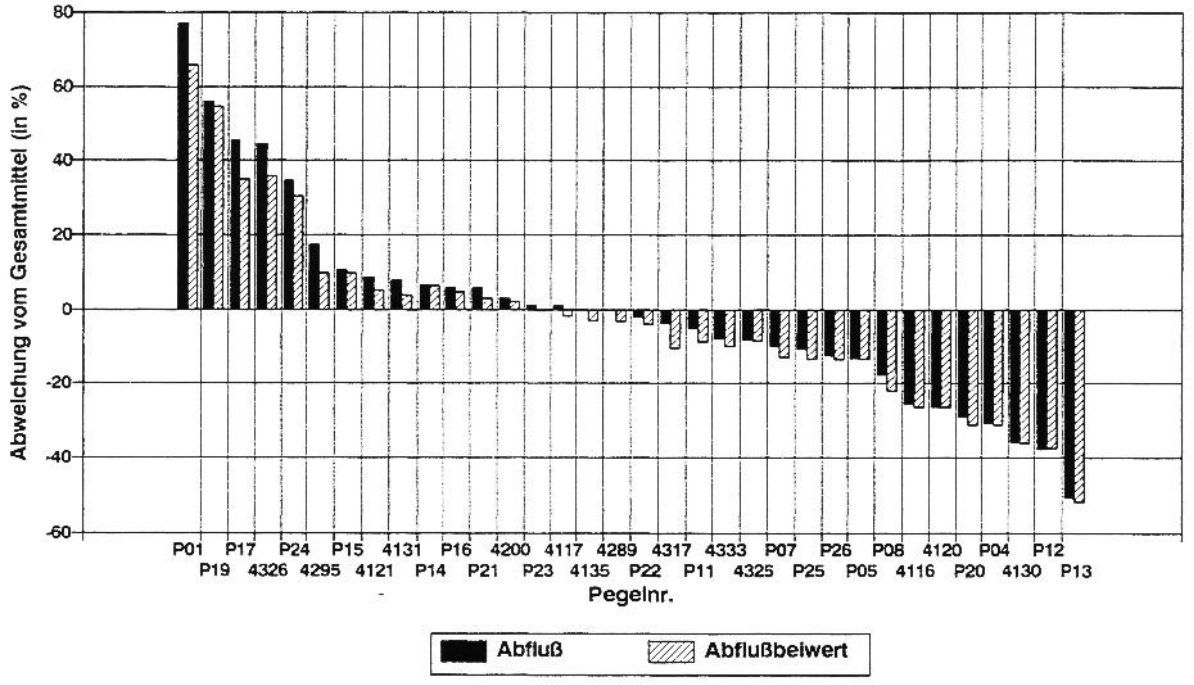


Abb. 72: Prozentuale Abweichung von Abfluß und Abflußbeiwert vom Gesamtmittel.

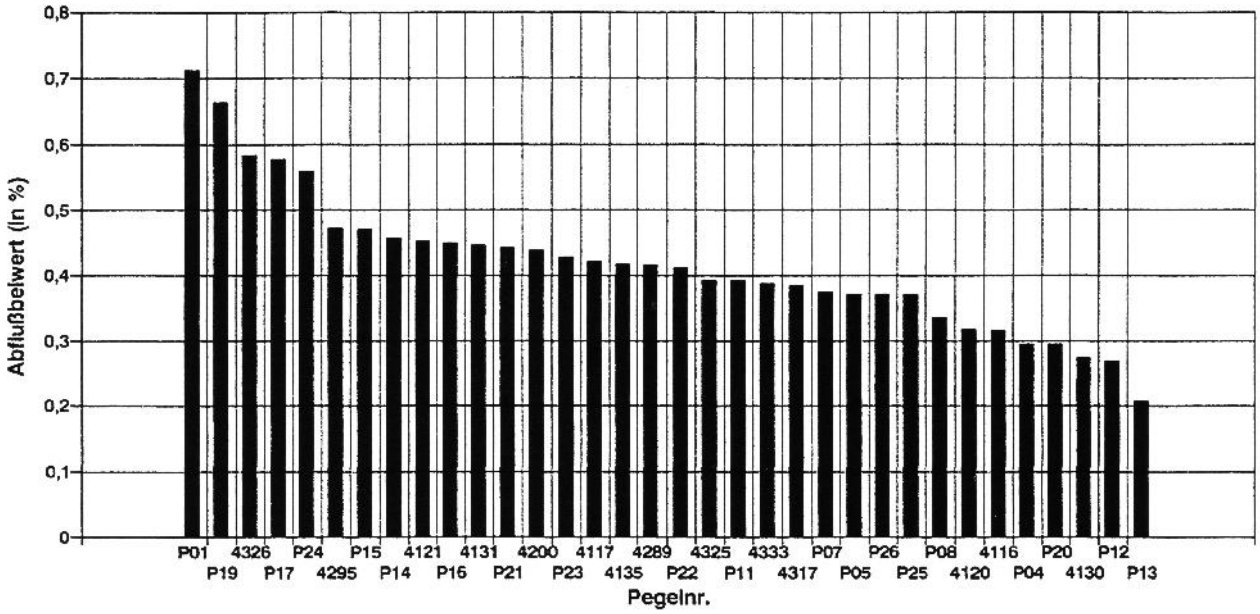


Abb. 73: Abflußbeiwerte für die Einzugsgebiete.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft für einen Teil der Pegel aus dem Einzugsgebiet der Stör unterhalb des Pegels Willenscharen die mittleren Monatsabflüsse, die monatlichen Minima und die monatliche Standardabweichung. Dabei werden die Werte der kleineren Teileinzugsgebiete in ihrer Relation zu den Gebietsabflüssen der beiden größten Teileinzugsgebiete Stör bis Willenscharen bzw. Bramau bis Föhrden dargestellt. Die übrigen Abbildungen sind in Anhang 2, F.2.1.2, enthalten.

Aus den Graphiken kann ersehen werden, wie die Abflußdynamik der Teileinzugebiete auf die Dynamik der großen Einzugsgebiete wirkt. Abweichungen nach unten (dünner Balken bis zum Wert des Vergleichspegels) signalisieren, daß das betrachtete Teileinzugsgebiet weniger zum Wert des Vergleichspegels beiträgt, Abweichungen nach oben (dicker Balken über den Wert des Vergleichspegels hinaus) zeigen einen höheren Beitrag an.

Unter dem Basisabfluß wird der Anteil am Abfluß verstanden, der als Grundwasserspende auch in niederschlagsarmen Perioden noch geliefert wird. Der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluß wurde als das Verhältnis zwischen dem minimalem Abfluß und dem mittleren Abfluß der Jahre von 1991 bis 1994 berechnet. Dabei ergeben sich leichte Unterschiede, je nach dem, ob die Minima anhand der niedrigsten Monatsabflüsse oder niedrigsten Tagesabflüsse ermittelt wurden.

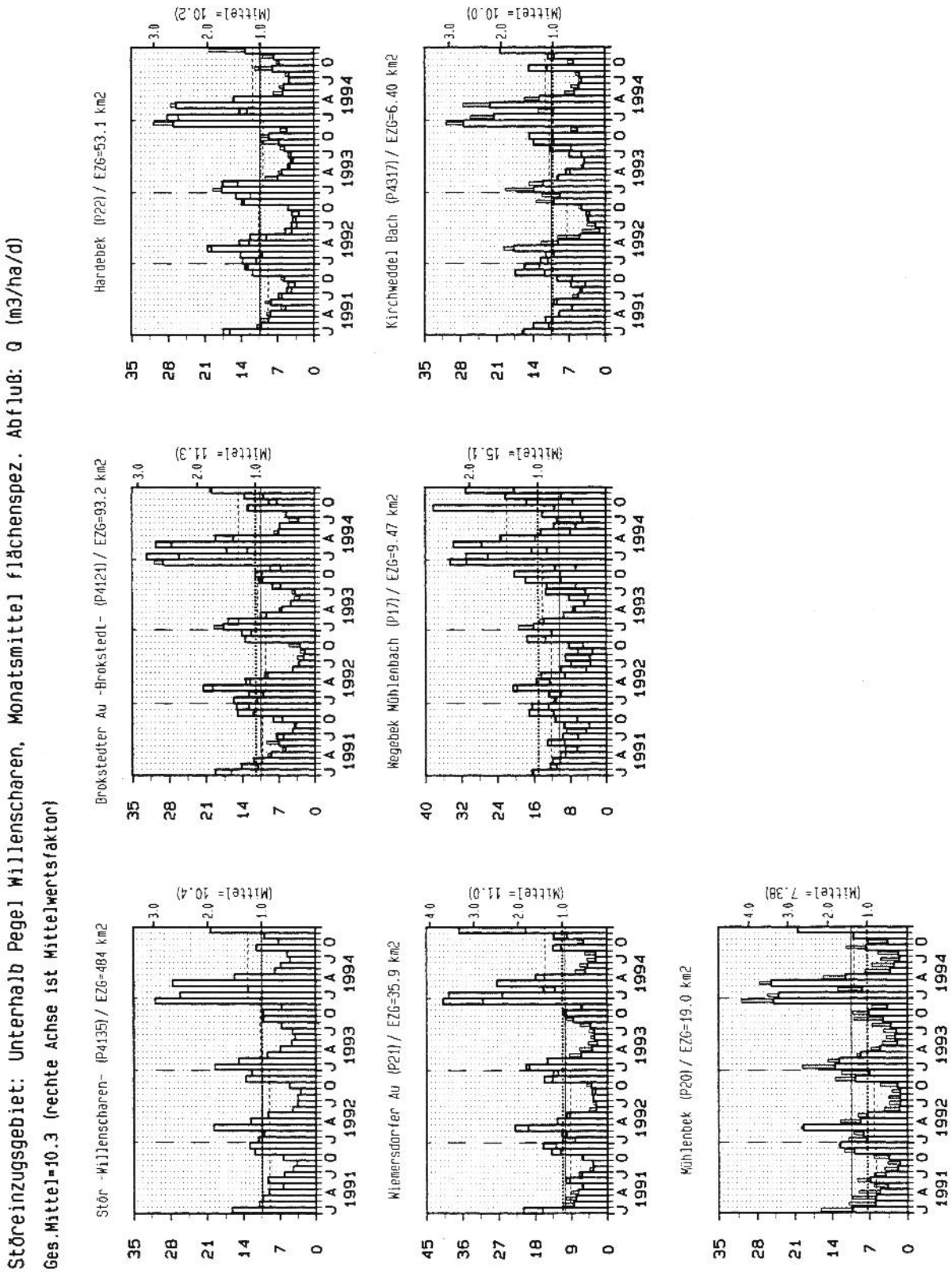


Abb. 74: Flächenspezifische Monatsabflüsse.

Auf der linken Achse ist der absolute spezifische Abfluß (in m^3/ha/d) aufgetragen, auf der rechten der Mittelwertsfaktor. Das Gesamtmittel 1991-1994 des Vergleichspegels ist durch eine durchgezogene Linie, das Gesamtmittel 1991-1994 des jeweiligen Pegels durch eine dicke gestrichelte Linie und sein Jahresmittel durch eine dünn gestichelte Linie gekennzeichnet. Abweichungen nach oben werden durch Schraffur und Fortführung des Balkens über den Wert des Vergleichspegels hinaus und Abweichungen nach unten durch einen dünneren Balken vom Wert des Verleichspegels aus nach unten verdeutlicht.

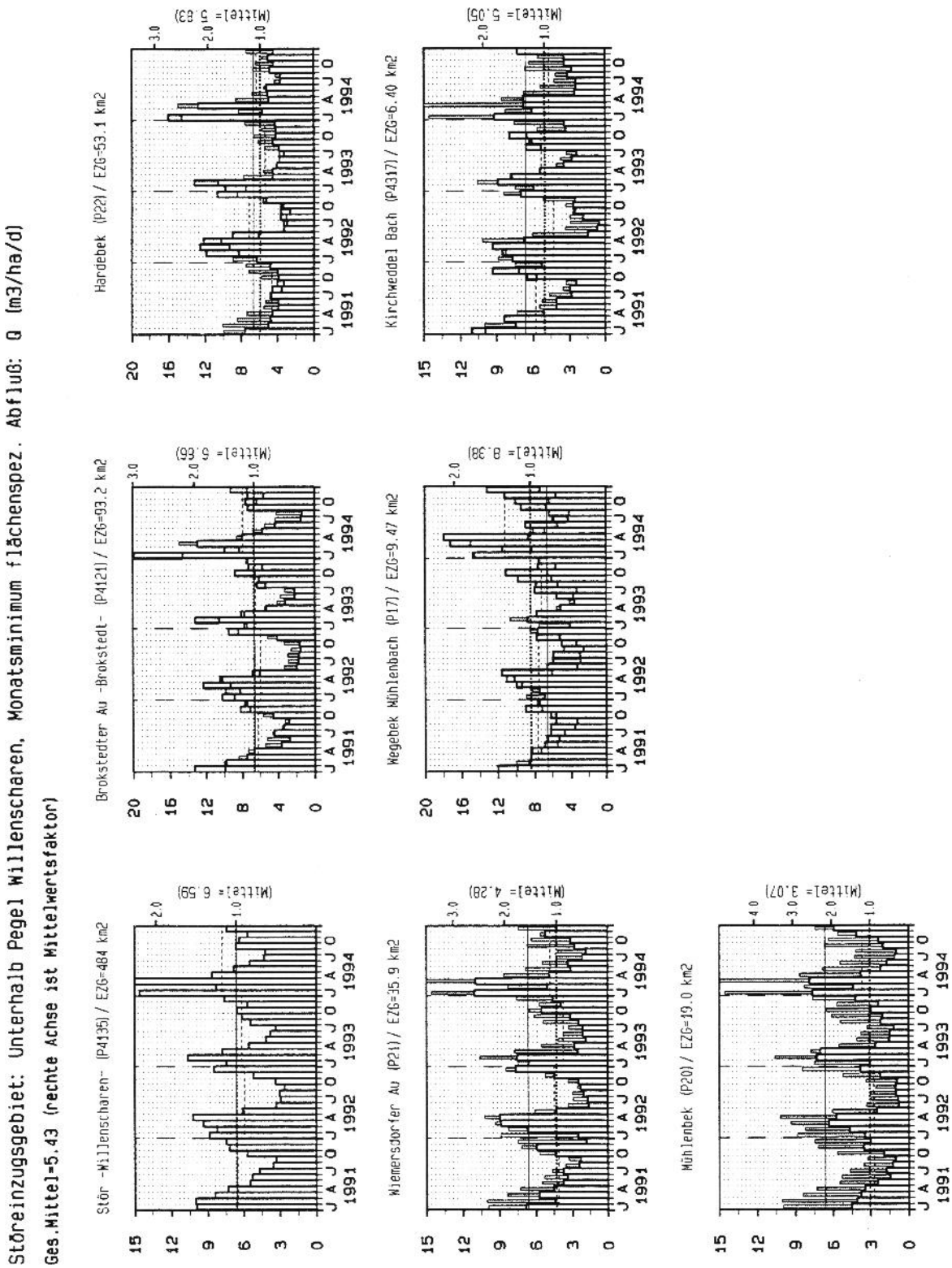


Abb. 75: Flächenspezifische monatliche Minima des Abflusses.

An der linken Achse kann das absolute spezifische Abflußminimum (in m^3/ha/d), an der rechten der Mittelwertsfaktor abgelesen werden. Das Gesamtmittel 1991-1994 des Vergleichspegels ist durch eine durchgezogene Linie, das Gesamtmittel 1991-1994 des jeweiligen Pegels durch eine dicke gestrichelte Linie und sein Jahresmittel durch eine dünn gestichelte Linie gekennzeichnet. Abweichungen nach oben werden durch Schraffur und Fortführung des Balkens über den Wert des Vergleichspegels hinaus und Abweichungen nach unten durch einen dünneren Balken vom Wert des Verleichspegels aus nach unten verdeutlicht.

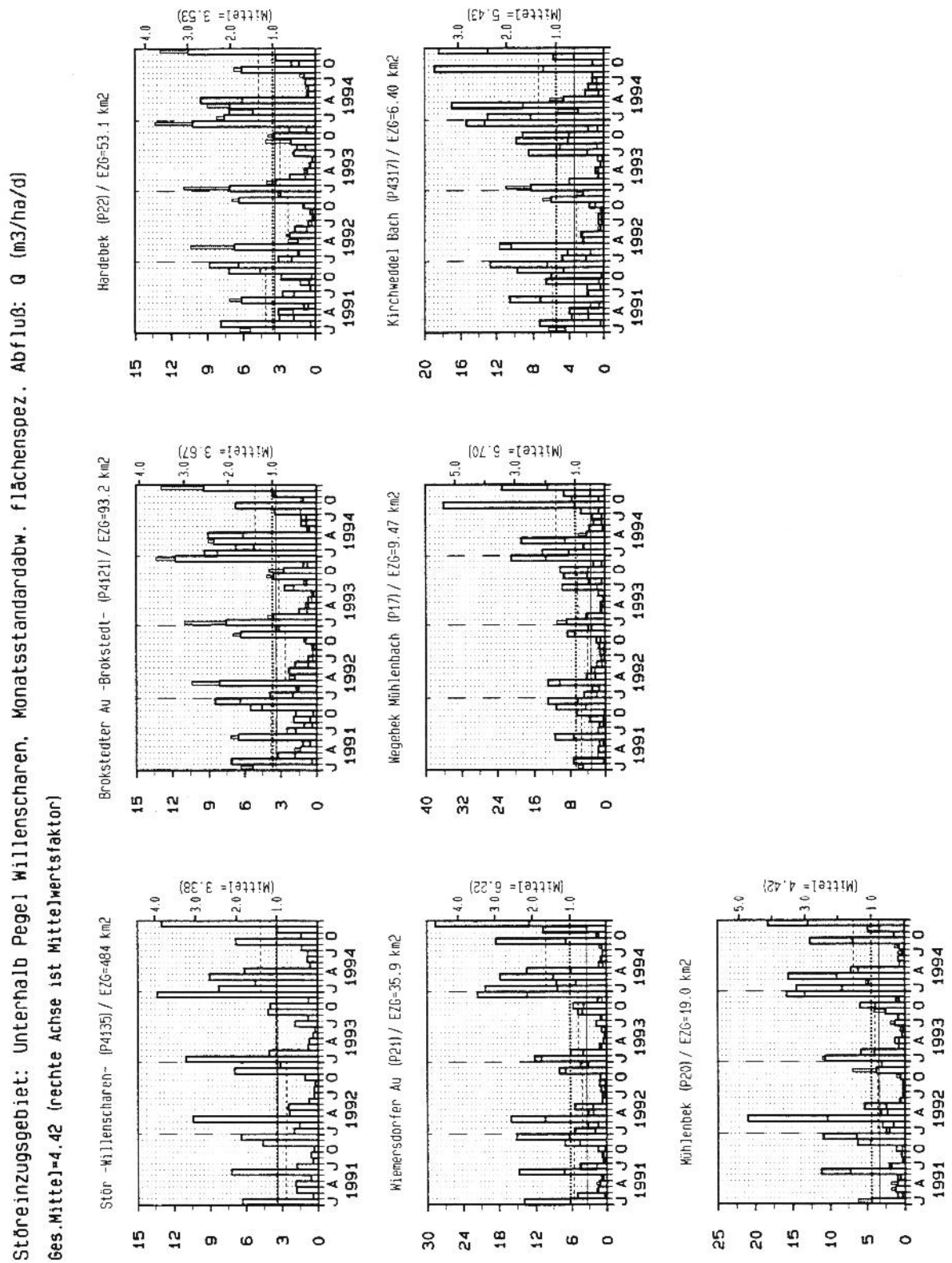


Abb. 76: Monatliche Standardabweichung des Abflusses.

An der linken Achse kann die absolute spezifische Standardabweichung des Abflusses (in m^3/ha/d) (auf Basis der Tagesabflüsse), an der rechten der Mittelwertsfaktor abgelesen werden. Das Gesamtmittel 1991-1994 des Vergleichspegels ist durch eine durchgezogene Linie, das Gesamtmittel 1991-1994 des jeweiligen Pegels durch eine dicke gestrichelte Linie und sein Jahresmittel durch eine dünn gestichelte Linie gekennzeichnet. Abweichungen nach oben werden durch Schraffur und Fortführung des Balkens über den Wert des Vergleichspegels hinaus und Abweichungen nach unten durch einen dünneren Balken vom Wert des Verleichspegels aus nach unten verdeutlicht.

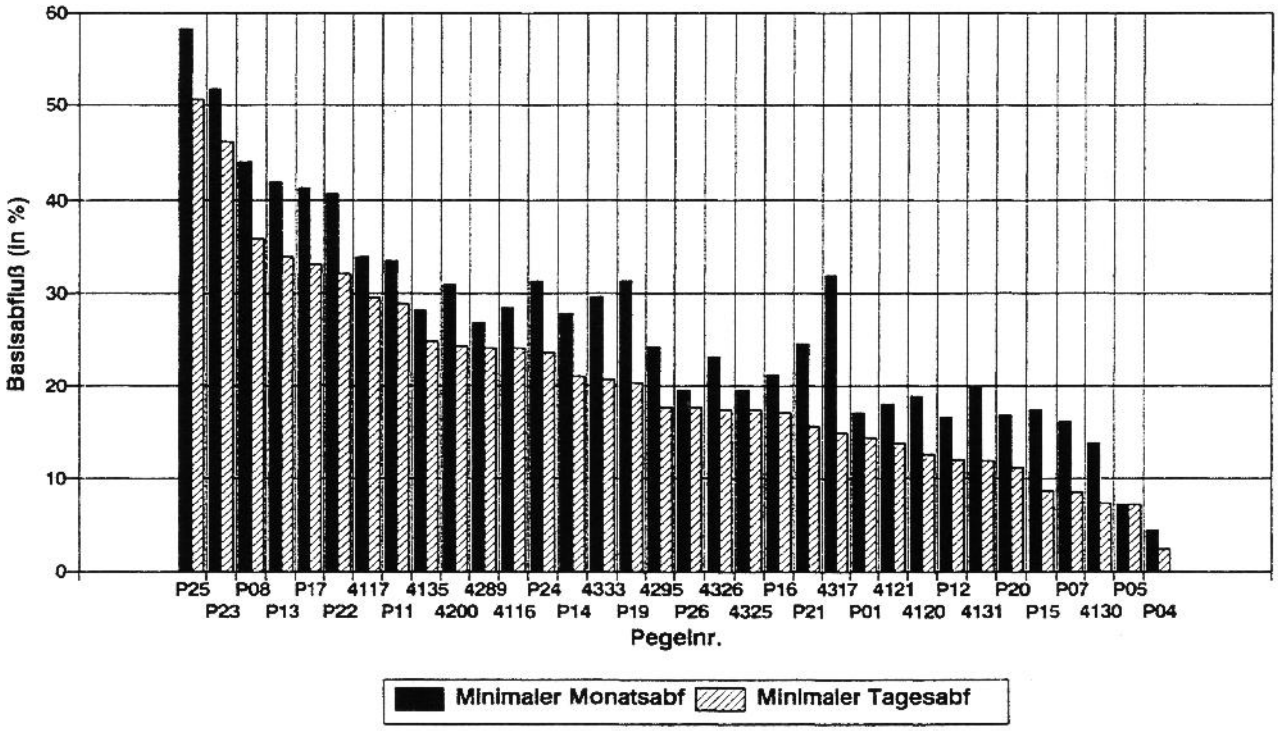


Abb. 77: Jährlicher Basisabfluß der Einzugsgebiete (in Prozent des mittleren Abflusses) auf Grundlage der Monatsminima.

Der durchschnittliche Basisabfluß auf der Grundlage des niedrigsten Monatsabflusses beträgt 26,7% und schwankt dabei zwischen 4,4% und 58,2%. Für die Berechnung anhand des niedrigsten Tagesabflusses ergeben sich 20,6% als Mittelwert und eine Schwankung zwischen 2,4% und 50,6%. Der Anteil des Basisabflusses ist also eher gering. Der sehr hohe Basisabfluß in der Dreckau (P25) und in der oberen Stör (P23) ist in Frage zu stellen, da er sich stark von der Gesamtverteilung abhebt.

Die niedrigen Werte für den Basisabfluß überraschen nicht. Im Sommer findet aufgrund der hohen Verdunstung kaum Versickerung statt. Im Winter hingegen wird die Versickerung begrenzt, sobald der Oberboden wassergesättigt ist. Deshalb stellt der Basisabfluß das am langsamsten fließende Wasser mit der längsten Aufenthaltszeit im Boden. In ihm gelöste Stoffe erreichen deshalb erst nach langer Zeit das Oberflächengewässer. Durch die lange Aufenthaltszeit sind die Frachten durch die Lösungsgleichgewichte bestimmt.

F.2.1.3. Konzentrationen

In den nachfolgenden Fließschemata sind für alle im Zeitraum 1992 bis 1994 beprobten Meßstellen die mittleren Konzentrationen und Standardabweichungen der untersuchten Parameter dargestellt. Aus der Farbgebung heraus ist eine Einordnung bezüglich des Gesamtmittelwertes und der Standardabweichung möglich.

Bei einem Vergleich der Meßorte fällt deren z.T. sehr unterschiedlicher Charakter auf. Zu erklären ist dies dadurch, daß die einzelnen Meßstellen unterschiedliche Gebietseigenschaften widerspiegeln, z.B. Einzugsgebietsgröße, Lage (Oberlauf, Unterlauf), und bei abnehmendem oder stagnierendem Abfluß im Sommer der Einfluß kurzzeitiger und/oder punktueller Prozesse (z.B. Abwasserzufluß) zunimmt. Über die Musteranalyse lassen sich die Meßpunkte unterschiedlichen Konzentrationsmustern zuordnen (vgl. Abb. 78 und Anhang 2, F.2.1.3):

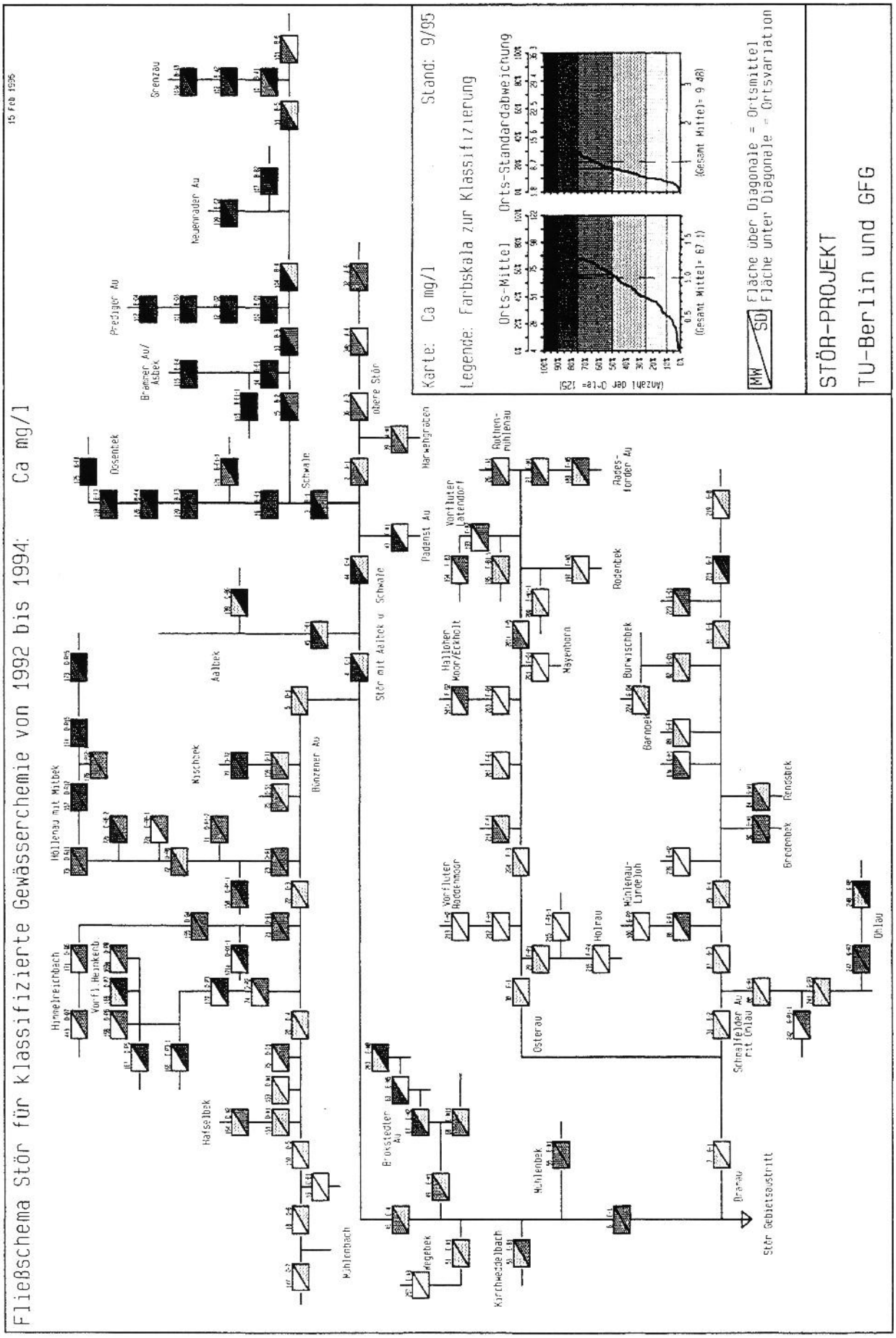


Abb. 78: Konzentrations-Fließschema für Calcium.

1. Die kaum durch saisonale oder einen Düngezyklus beeinflußten "natürlichen" Konzentrationsmuster. Sie spiegeln die Prozesse in der Landschaft am besten wider. Ihr Verlauf wird durch das jahreszeitliche Abflußmuster geprägt. Der Mittelwert und die Schwankung sind in Gebieten mit einem hohen Anteil von dissipativen Ausgleichsstrukturen (z.B. Wald) gering. Die Werte liegen, bedingt durch die bessere Rückkopplung zwischen Stoffauf- und -abbau, unter dem Mittel (hoher Anteil stofflicher Kreis- gegenüber Verlustprozessen, Kap. B.3).

2. Die durch Phasenmischung geglätteten Muster. Sie treten vor allem im Unterlauf auf. Durch das Zusammenfließen von Gewässern mit unterschiedlicher Konzentration (verschiedene Phasen) findet ein Konzentrationsausgleich statt.

3. Die durch einzelne hohe Konzentrationen gekennzeichneten Muster. Diese sind durch punktuelle, zeitlich begrenzte Stoffeinträge (Düngung, Einleitung von Abwässern) bedingt. Die gewählte Beobachtungsfrequenz (z.B. monatliche Probenahme) reicht nicht aus, diese zeitlich begrenzten Prozesse zu erfassen. Für eine Aussage über die stofflichen Umsetzungsprozesse in der Landschaft (stoffl. Kreis- oder Verlustprozesse) können die einzelnen Meßwerte mit hoher Konzentration vernachlässigt werden.

4. Die durch Abwassereinleitungen oder Sickerwasser aus Abwassergruben und undichten Leitungen geprägten, kaum an den hydrologischen Prozeß gekoppelten "Muster". Sie weisen betriebsabhängig eine relativ hohe Varianz über einen Großteil der Werte und einen hohen Mittelwert auf. Der Anteil des natürlichen Prozeßmusters ist sehr gering (z.B. Konzentrationsanstieg von P und N im Sommer bei geringem Abfluß und hoher Verdunstung).

Die einzelnen Meßpunkte können über die Fließschemata der Konzentrationsmuster den Musterarten 1, 2 und 4 zugeordnet werden.

Die Stellen, an denen sowohl ein hoher Mittelwert der Konzentration von Gesamt-P und Gesamt-N als auch eine sehr hohe Standardabweichung auftritt, sind entweder durch Abwässer (z.B. Vorfluter Heinkenborstel Stelle 169a/D-B8, Brokstedter Au Stelle 263/E-M8, einige Stellen im Einzugsgebiet der Schwale 111/B-D3 bzw. 107/B-B2) oder Moormineralisierung beeinflußt (vgl. Meßstellen im Dosenmoor oder dem Großen Moor). Der Klärwerkseinfluß zeigt sich ansonsten in sehr hohen Chlorid- und Natrium-Konzentrationen, wie z.B. an der Probestelle 44/C-4 in der Stör hinter Neumünster bei Padenstedt.

F.2.1.4. Stoffverluste

Die Stoffverluste wurden über die Multiplikation der Werte der monatlichen Probenahme mit dem mittleren Monatsabfluß ermittelt.

Abb. 79 zeigt das Frachtmuster für die Gesamtsalze. Die Frachtmuster der Parameter Ca, Mg, Ges.-P, Ges.-N, sind in Anhang 2, F.2.1.3, enthalten.

Diese Graphiken verdeutlichen, daß in allen Einzugsgebieten - bis auf das der Dreckau - die Frachten durch den Abfluß bestimmt werden (vgl. auch Abb. 81). Der Verlauf der Frachtmuster und der Abflußmuster ist nahezu identisch (Kap. 2.1.2).

Anhand der Abweichungen von dem Vergleichspegeln kann ermittelt werden, wann und in welchen kleineren Teileinzugsgebieten die Frachten geringer oder größer als im großen Teileinzugsgebiet sind.

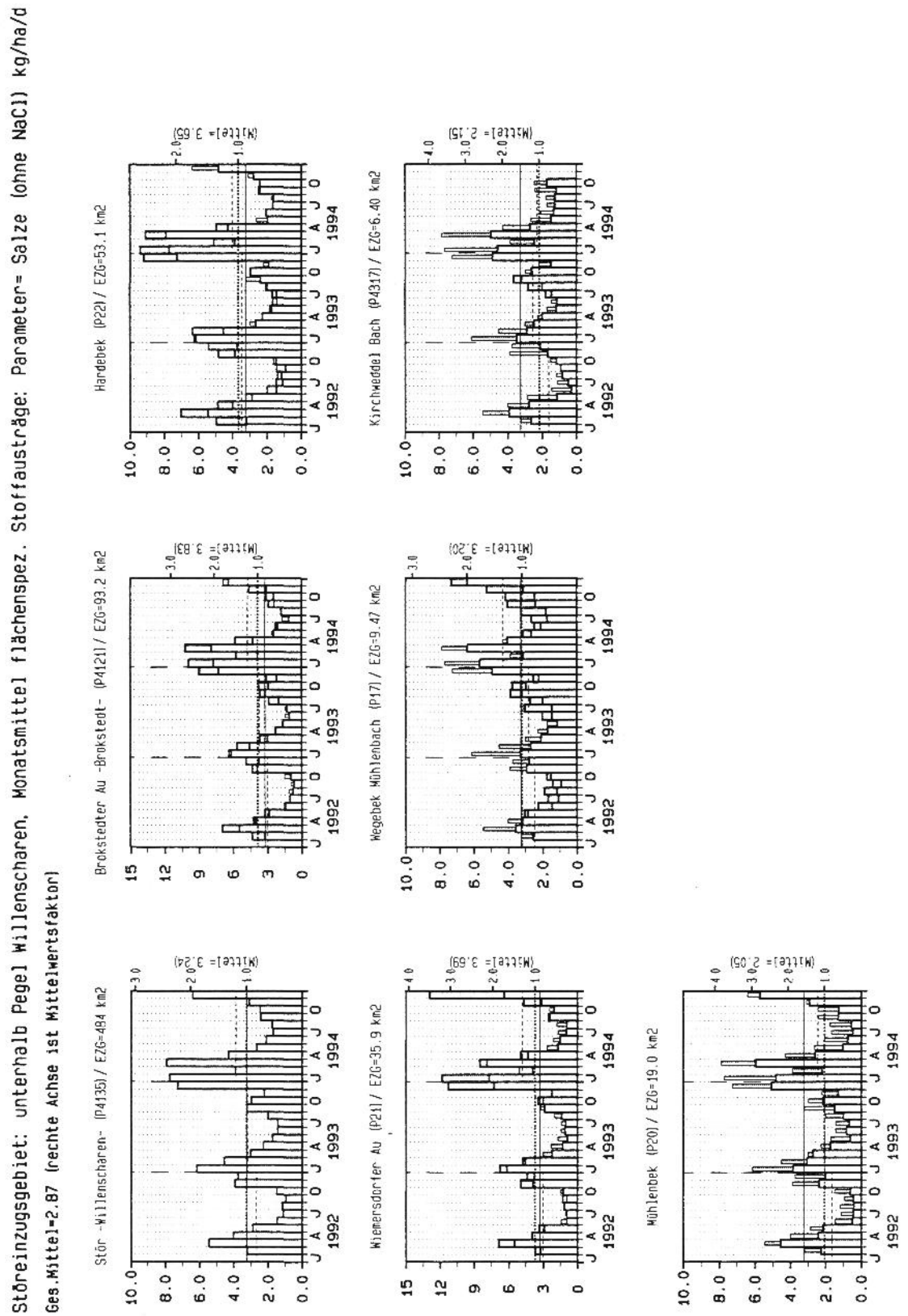


Abb. 79: Beispiel eines Frachtmusters (Gesamtsalze).

Auf der linken Achse ist die absolute spezifische Fracht (in kg/ha/d oder g/ha/d) aufgetragen, auf der rechten der Mittelwertsfaktor. Das Gesamtmittel 1991-1994 des Vergleichspegels ist durch eine durchgezogene Linie, das Gesamtmittel 1991-1994 des jeweiligen Pegels durch eine dicke gestrichelte Linie und sein Jahresmittel durch eine dünn gestichelte Linie gekennzeichnet. Abweichungen nach oben werden durch Schraffur und Fortführung des Balkens über den Wert des Vergleichspegels hinaus und Abweichungen nach unten durch einen dünneren Balken vom Wert des Verleichspegels aus nach unten verdeutlicht.

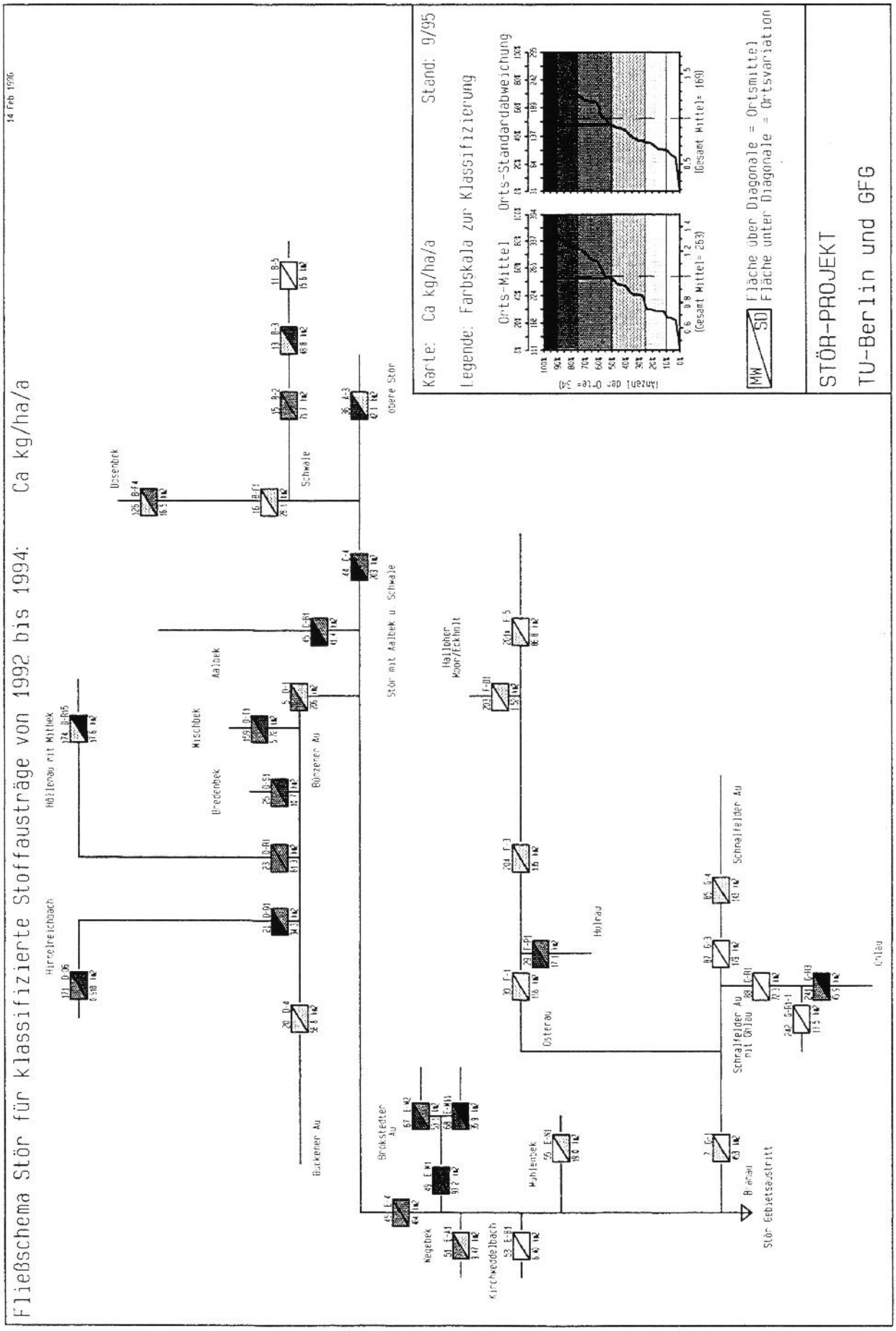


Abb. 80: Fracht-Fließschemata für Calcium.

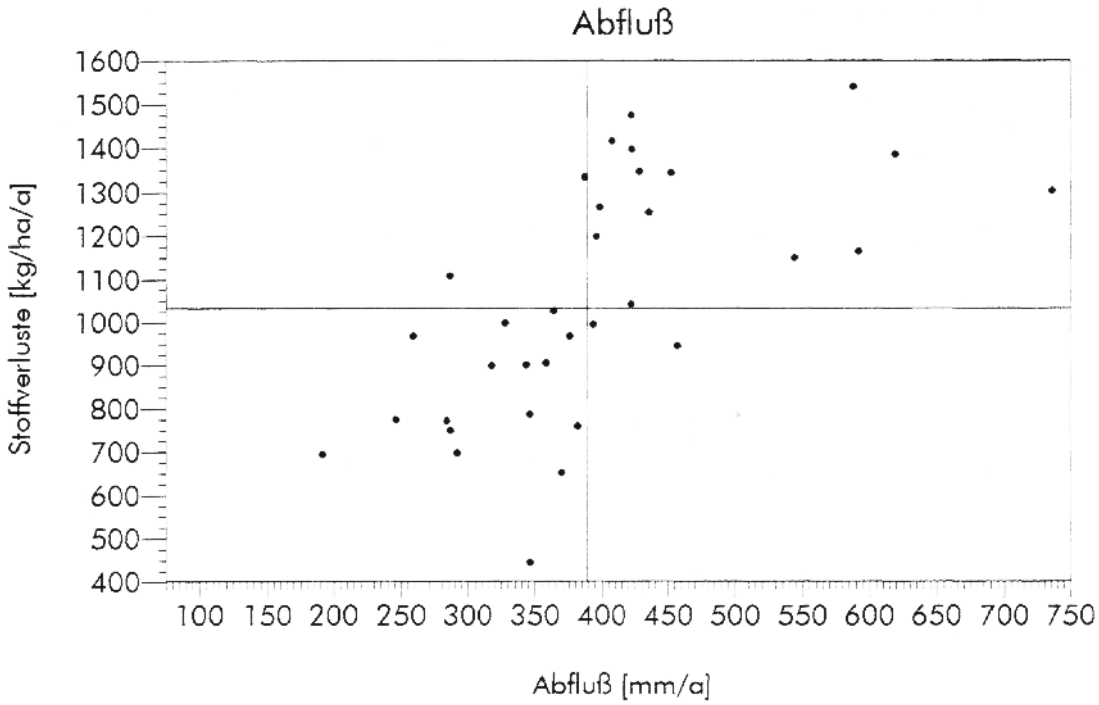


Abb. 81: Abfluß und Stoffverluste der Teileinzugsgebiete.

In den Fließschemata sind für die Einzugsgebiete die mittleren Austräge pro Hektar und Tag und deren Standardabweichung für den Zeitraum 1992 bis 1994 dargestellt. Über die Grautöne ist eine Einordnung bezüglich des Gesamtmittelwertes und der Standardabweichung möglich. Abb. 80 zeigt das Fließschema für Calcium die anderen Schemata sind in Anhang 2, F.2.1.4, wiedergegeben.

Die Verlustkarte zeigt die flächenspezifischen Verluste der einzelnen Einzugsgebiete der Stör. Als Einzugsgebiete mit den höchsten Verlusten treten die Fuhlenau, die Aalbek, die Stör bis Padenstedt und die Brokstedter Au hervor. Die Gebiete mit den geringsten Austrägen sind Mühlenbek, Schwale bis Wühren, das Halloher Moor, die Schmalfelder Au bis Bad Bramstedt und die Dreckau.

F.2.2. Strukturparameter zur Prozeßanalyse

Anhand der in diesem Abschnitt dargestellten Verteilungen lassen sich die Einzugsgebiete näher charakterisieren.

F.2.2.1. Flächennutzung

Die Flächennutzung auf der Grundlage der Topographischen Karte des Stör-Gebietes zeigt die Flächennutzungskarte. Die Verteilung der Flächennutzung für das Gesamtgebiet und die Abweichungen aller Berechnungsabschnitte von dieser Verteilung sind in Anhang 2, F.2.2.1, dargestellt.

Einige Gebiete zeigen dabei kaum eine Abweichung vom Gesamtmittel (z.B. Höllenau, Osterau bei Bad Bramstedt). Berechnungsabschnitte mit besonders hohem Waldanteil sind der Himmelreichbach und das Halloher Moor. Auffällig hoch ist der Ackeranteil in der Schwale und der Ohlau (Bad Bramstedt). Überdurchschnittliche Ackeranteile weisen auch die Fuhlenau (Böken) und die Dreckau (Lentföhrden) auf. Besonders viel Grünland findet sich im Einzugsgebiet der Ohlau und Holmau.

Auf den Ackerflächen wird der Energiepuls am schlechtesten dissipiert (Kap. Temperatursonden, Kap. Satellitendaten). Sie werden hoch nettoproduktiv bewirtschaftet und erhalten eine gewisse Kalkdüngung (Kap. 1.1.5). Deshalb ist zu erwarten, daß Berechnungsabschnitten mit einem hohen Anteil an Ackerflächen auch häufiger hohe Stoffverluste aufweisen. Diese Tendenz zeigt Abb. 81, in der überdurchschnittlich hohen Ackeranteilen auch überdurchschnittlich hohe Stoffverluste gegenüberstehen und umgekehrt. Abweichungen davon können in mehreren Ursachen begründet sein. So geht in den Ackeranteil selbst die relative Lage der Flächen zu den Gewässern ebenso wenig ein, wie die mögliche Begrenzung der Austräge durch den Transportprozeß (vgl. Kap. E.2.1). Darüber hinaus bestehen Unterschiede in den Flächen selbst, z.B. deren Vorrat, und in den nicht als Acker genutzten Flächen. Daß überdurchschnittlich hohe Waldanteile unterdurchschnittlich hohe Stoffverluste aufweisen, dürfte lediglich die Umkehrung des oben beschriebenen Sachverhaltes sein.

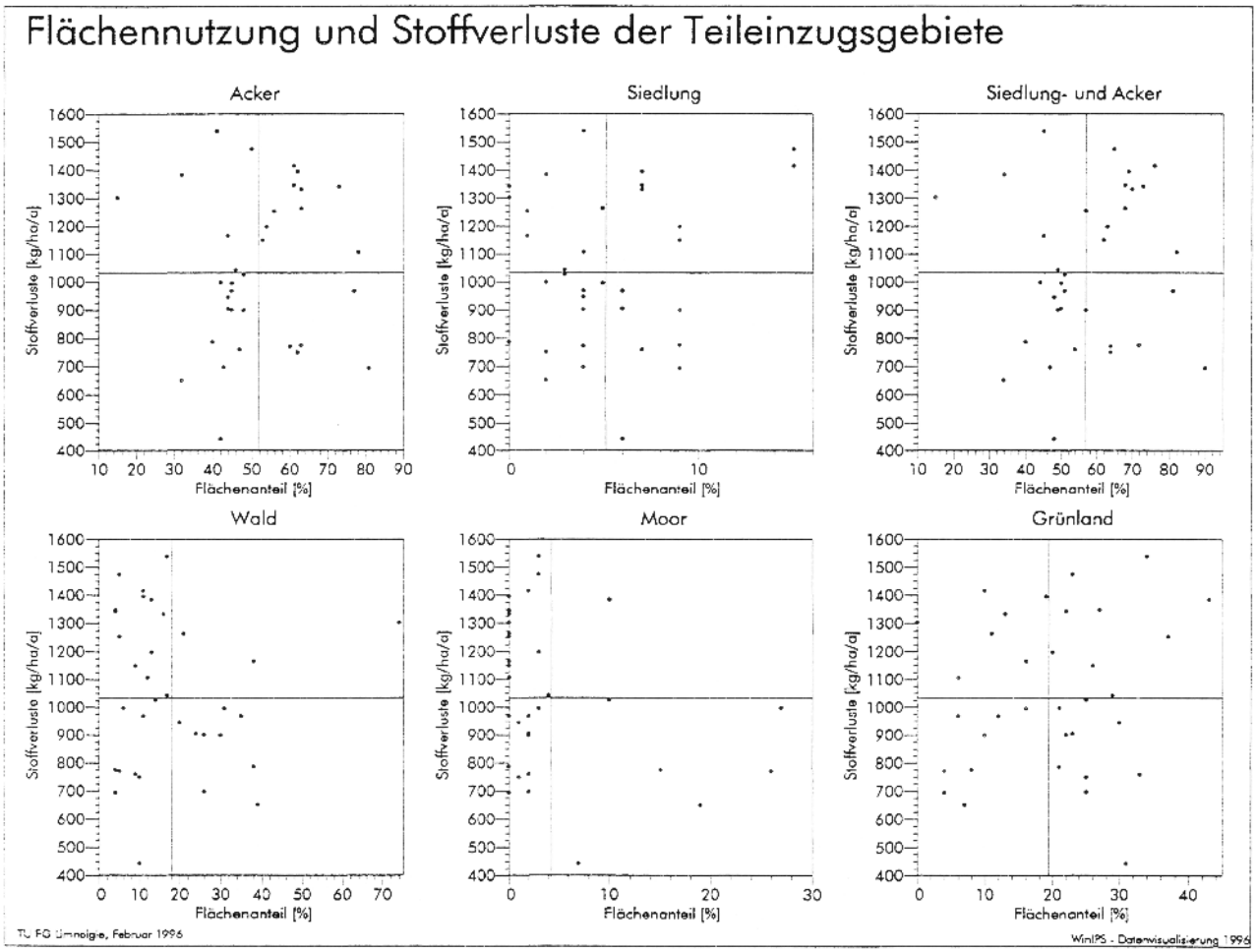


Abb. 82: Flächennutzung und Stoffverluste in den Berechnungsabschnitten. Die beiden Linien in den Diagrammen stellen jeweils die Mittelwerte dar.

F.2.2.2. Hangneigung

Die Hangneigung zeigt, wie zu erwarten, eine deutliche Häufung der geringer geneigten Flächen. Die Abb. im Anhang 2, F.2.2.2, zeigen die Abweichung der Hangneigung vom Gebietsmittel. Als Berechnungsabschnitte mit über dem Durchschnitt liegender Hangneigung fallen der Himmelreichbach, die Buckener Au (Innien), die Wegebek und die Fitzbek auf. Bereiche mit unterdurchschnittlicher Hangneigung sind z.B. die Aalbek (Ehndorf), die Wischbek und der Berechnungsabschnitt Stör bei Willenscharen.

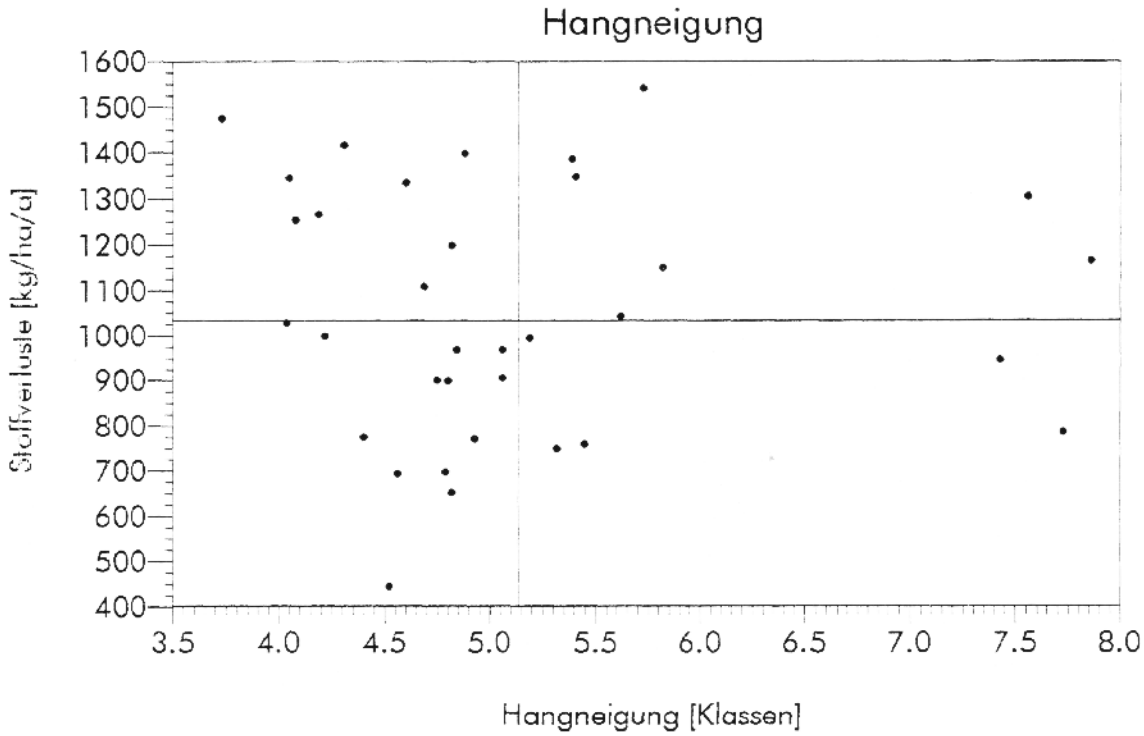


Abb. 83: Hangneigung und Stoffverluste der Berechnungsabschnitte.

Eine höhere Hangneigung führt zu einem beschleunigten Abfluß und damit möglicherweise zu einer schnelleren Verarmung des Oberbodens. Andererseits dürften die steileren Bereiche des Untersuchungsgebietes mehr bindiges Material und damit einen größeren Basenvorrat als die flacheren Bereiche enthalten. Da ohnehin die Unterschiede der Berechnungsabschnitte der Hangneigung eher gering sind, ist ein direkter Bezug zu den Stoffverlusten nicht zu erwarten (vgl. Abb. 83).

Allerdings ist festzuhalten, daß in kleineren Teileinzugsgebieten mit größerer Hangneigung wie z.B. Himmelreichbach, Buckener Au, Wegebek oder Fitzbek ein erhöhter Abfluß und damit auch ein höherer Stoffverlust als unter den gleichen Bedingungen in einem flacheren Relief zu erwarten ist.

F.2.2.3. Ökotonenabstand

In der Karte der Ökotonenabstände fallen vor allem der Segeberger Staatsforst und die Stadt Neumünster mit besonders hohen Werten auf. Die einzelnen Nutzungsklassen lassen sich anhand der Histogramme (vgl. Abb. 84) wie folgt charakterisieren:

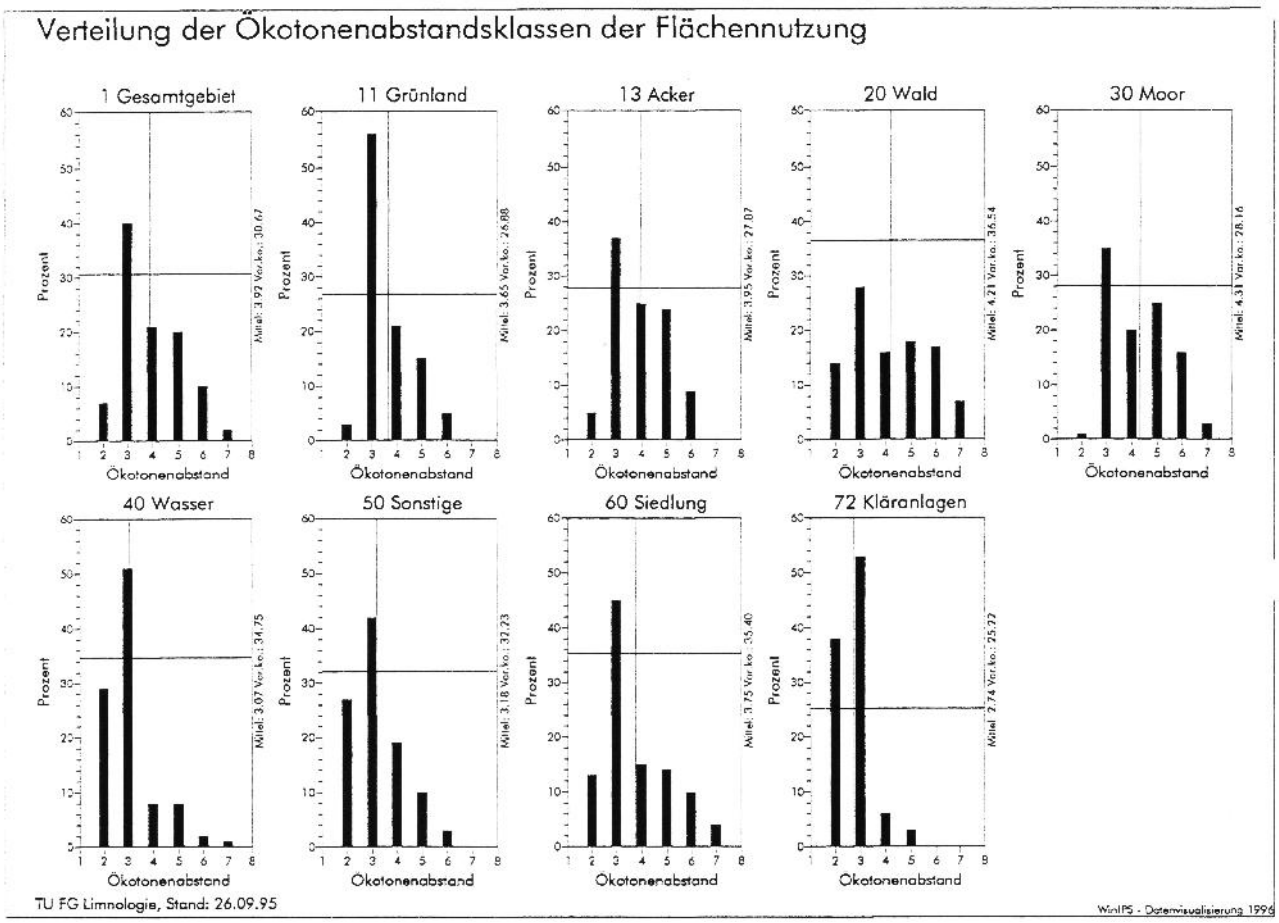


Abb. 84: Verteilung der Ökotonenabstände für mehrere Nutzungsklassen im Einzugsgebiet der Stör.

- ► Grünland weist in der Mehrzahl nur geringe Ökotonenabstände auf, aber kaum sehr kleine Flächen (unter 40 m Ökotonenabstand).
- ► Acker besitzt eine ausgeglichenere Verteilung, wenngleich auch hier die zweitniedrigste Klasse (40 - 60 m Ökotonenabstand) dominiert.
- ► Der Ökotonenabstand des Waldes ist relativ gleichmäßig verteilt. Auch die hohen Klassen (über 320 m Ökotonenabstand) sind hier belegt (Einfluß des Segeberger Staatsforstes). Gleichzeitig sind aber auch anteilig viele Bereiche mit niedrigem Ökotonenabstand vorhanden (unter 40 m).
- ► Die Verteilung der Wasserflächen spiegelt die überwiegend kleinflächigen Gewässer wider.
- ► Die Siedlungsflächen weisen Ökotonenabstände von hauptsächlich zwischen 40 und 80 m auf (etwa 45%). Auch hohe Werte (Stadtgebiet Neumünster) treten auf.

F.2.2.4. Wasserdurchfluß

Die Karte des Wasserdurchflusses zeigt eine deutliche Differenzierung in Kuppen-, Hang- und Tallagen innerhalb der Berechnungsabschnitte. Diese Strukturierung ist innerhalb des gesamten Störgebietes recht gleichmäßig verteilt. Dies zeigt auch die Gesamtverteilung der Wasserdurchflußklassen und die Abweichung der Berechnungsabschnitte davon (Abb. im Anhang 2, F.2.2.4).

Relativ niedrige Durchflußwerte weisen sehr kleine Gebiete, wie der Himmelreichbach, auf. Ebenfalls niedrige Werte sind auch in der Wegebek und im Halloher Moor anzutreffen. Im Bereich

der breiteren Flußtäler (Stör bei Padenstedt, Bramau bei Föhrden) sind hingegen leicht höhere Werte häufiger als im Gesamtgebiet.

Die Karte des Wasserdurchflusses veranschaulicht zudem Ungenauigkeiten, die bei der Ausweisung der Berechnungsabschnitte aufgetreten sind, wie das Beispiel des Halloher Moores zeigt. Die Karte wurde deshalb verwendet, um zu einer treffenderen Abgrenzung der oberirdischen Einzugsgebiete zu kommen (Kap. D.5.4).

F.2.3. Oberflächentemperatur

Anders als die abgeleiteten Parameter, wie z.B. Hangneigung und Ökotonenabstand, stellt die vom Satelliten erfaßte Oberflächentemperatur die direkte Messung einer zeitlich variableren Größe dar. Sie gibt einen Anhaltspunkt über die Art der Energiedissipation mit einer gewissen räumlichen Auflösung. - Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer Examensarbeit von Birgit Dybowski gewonnen.

Die Oberflächentemperatur der Aufnahmezeitpunkte vom Juli 1987, September 1991 und Mai 1992 sind als Karten dargestellt.

F.2.3.1. Temperaturverteilung der Berechnungsabschnitte und Einzugsgebiete

Die Temperaturverteilung des Gesamtgebietes und die Abweichungen der einzelnen Berechnungsabschnitte von dieser für die Juli-Szene zeigt die Abb. im Anhang 2, F.2.3.1. Beispiele für stark überwärmte Gebiete sind die Dosenbek (Tungendorf) und die Stör bei Padenstedt. Kühlere Bereiche hingegen sind die Schwale bei Kerkwischholz und der Himmelreichbach.

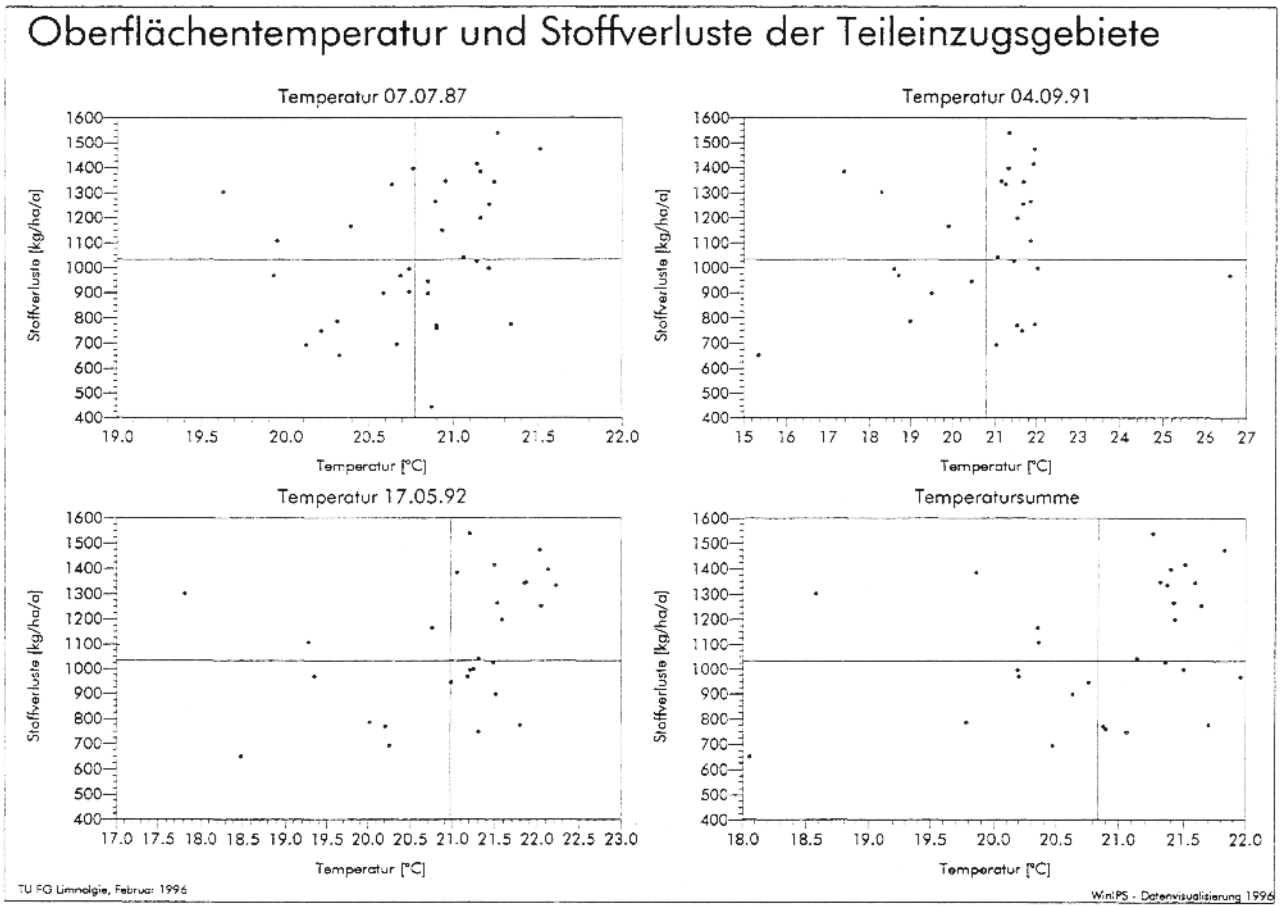


Abb. 85: Stoffverluste und mittlere Oberflächentemperatur der Teileinzugsgebiete. Da in der Septemberaufnahme Teile des Bildes durch Nebel nicht auswertbar waren, sind nicht alle Teileinzugsgebiete in die Auswertung eingeflossen.

Die mittlere Oberflächentemperatur der Teileinzugsgebiete zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. deren Summe ist in Abb. 85 den Stoffverlusten gegenüber gestellt. Berechnungsabschnitte mit unterdurchschnittlichen Temperaturen weisen überwiegend auch unterdurchschnittliche Stoffverluste auf. Abweichungen hiervon können in besonders hohen Abflüssen begründet sein, wie z.B. am Himmelreichbach. Berechnungsabschnitte mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen besitzen zumeist auch überdurchschnittlich hohe Stoffverluste auf. Dort, wo dies nicht der Fall ist, gehen möglicherweise bereits die Vorräte zur Neige, wie in der Dreckau (Kap. 2.4.2).

F.2.3.2. Oberflächentemperatur und Strukturparameter

Wasserdurchfluß

Der modellhaft ermittelte Wasserdurchfluß (Kap. D.6.3) macht sich in den Temperaturverteilungen nicht bemerkbar; allenfalls die Bereiche mit sehr hohem Durchfluß sind etwas besser gekühlt. Wider Erwarten sind auch die Kuppenlagen nicht durch eine höhere Temperatur kenntlich. Dies gilt auch, wenn nur eine Nutzungsklasse, etwa Acker oder Grünland, betrachtet wird. Gründe dafür dürften die ausreichenden Niederschläge (knapp 800 mm/a), deren zeitliche Verteilung und die durch die geringe Hangneigung langsame Abflußgeschwindigkeit sein. Würden weitere Temperaturbilder anderer Zeitpunkte analysiert, könnte auch eine andere Temperaturverteilung angetroffen werden.

Für die Ermittelung des Wirkungsgrades (Kap. D.6.4) wurde dieser Parameter aus diesen Gründen überschätzt. Von dem Wasserdurchfluß werden wertvolle Ergebnisse für die Abschätzung

landschaftlicher Prozesse wie Erwärmung und Stoffaustrag erwartet, wenn dieser mit der Vegetation und ggfs. der Hangneigung gekoppelt werden kann.

Ökotonenabstand
Die Ökotonendistanzen (Kap. D.6.2) sind bei der Betrachtung der Temperaturkarten kaum erkennbar. So sind z.B. zu den unterschiedlichen Zeitpunkten keine deutlichen Temperaturgradienten innerhalb des Segeberger Staatsforstes zu erkennen. Die Auswertung zeigt vor allem dann keine weitere Differenzierung mehr, wenn die möglichen Mischpixel entfernt werden. Lediglich das Stadtgebiet von Neumünster weist eine deutliche Differenzierung mit dem Ökotonenabstand auf. Werden die Temperaturkarten der verschiedenen Zeitpunkte addiert, so zeigt sich dieser Effekt noch deutlicher. Dies hängt möglicherweise mit der unterschiedlichen Bebauungsdichte und den zum Stadtrand hin zunehmenden Anteil an Gärten und Grünflächen zusammen.

Die gegenseitige Beeinflussung der Temperatur unterschiedlicher Flächen an ihren Rändern ist offensichtlich mit dem Landsat 5-Satelliten nicht mehr erfaßbar. Dies gilt nicht nur für die Wälder, sondern auch für die Ackerflächen. Der Einfluß des Ökotonenabstandes wurde bei der Abschätzung des Wirkungsgrades (Kap. D.6.4) nach den bislang vorliegenden Ergebnissen überschätzt.

Wirkungsgradklassen
Die Verteilung der vom Satelliten jeweils gegen 11.30 Uhr registrierten Temperatur über die Wirkungsgradklassen (Kap. D.6.4) zeigt die erwartete Differenzierung: Bei höherem Wirkungsgrad ist die Temperatur im Mittel niedriger als bei geringerem Wirkungsgrad. Dies wird in jeder der drei Szenen deutlich. Durch die in die Wirkungsgradabschätzung stark eingehende Flächennutzung gilt dies trotz der Überschätzung des Einflusses des Wasserdurchflusses und der Ökotonenabstände.

F.2.3.3. Multitemporale Betrachtung

Anders als zu den anderen Aufnahmezeitpunkten ist in der Januarszene keine deutliche Differenzierung zwischen den Nutzungsklassen mit Ausnahme großer Wasserflächen (Einfelder See) erkennbar. Dies kann mit dem im Januar nur sehr geringen Energiepuls begründet werden. So beträgt die Globalstrahlung im Januar nur 17.24 kWh/m² gegenüber 159.58 kWh/m² im Juni (langjährige Mittelwerte für Hamburg), so daß kaum thermische Potentiale aufgebaut werden können. Unter diesen Umständen treten die Störungen der Sensoren im Landsat deutlicher hervor, da der Signalabstand der Temperatur zum Rauschen gering ist. Auf dem Bild ist eine deutliche Streifung zu erkennen.

Die multitemporale Betrachtung der Satellitenbilder (vgl. Karten der Oberflächentemperatur) zeigt, daß sich die Flächennutzungen in ihrer Temperatur zu den Zeitpunkten Mai, Juli und September relativ zueinander ähnlich verhielten.

Das Gebiet der Schwale fällt trotz des hohen Anteils an Ackerflächen zu den Zeitpunkten Mai 92 und Juli 87 als relativ gut gekühlt auf. Dies kann mit einer höheren Wasserhaltekapazität und einem größeren Basenvorrat erklärt werden. So wird die Schwale zum Hügelland gerechnet, in dem die landwirtschaftlichen Erträge deutlich höher sind als in der angrenzenden Vorgeest (Statistisches Landesamt 1989b). Die Aufnahme vom September 91 zeigt aber, daß auch diese Flächen zu bestimmten Zeitpunkten austrocknen und die Ackerflächen dort dann ähnlich überwärmt sind wie im übrigen Teil des Stör-Gebietes.

Tab. 6: Anteile von Acker, offenem Boden und Grünland in Prozent des Gesamtgebietes.

Nutzung	Mai '92	Juli '87	September '91
Acker	43,1	48,8	36,8
Offener Boden	7,9	5,9	14,5
Grünland	21,8	16,5	21,5

Hohe Temperaturvarianzen des Ackers können durch die unterschiedlichen Anteile des offenen Bodens erklärt werden (Tab. 6).

F.2.4. Bewertung der Landschaft anhand Wirkungsgrad und Phasenlage

F.2.4.1. Wirkungsgrad

Im Anhang 2, F.2.4.1, ist die Verteilung der abgeschätzten Wirkungsgradklassen für das Gesamtgebiet, die Berechnungsabschnitte und die Einzugsgebiete dargestellt. Als Gebiet mit besonders hohem Wirkungsgrad fällt das Einzugsgebiet des Himmelreichbaches auf. Ebenfalls deutlich überdurchschnittliche Wirkungsgrade weisen die Schwale an den Pegeln Kerkwischholz und Bönebüttel, die Fitzbek und die Osterau bei Bimöhlen auf. Besonders unterdurchschnittliche Wirkungsgrade wurden für die Dosenbek bei Tungendorf, die Stör bei Padenstedt und die Schwale bei Brachenfeld ermittelt.

Wird der Wirkungsgrad den Stoffverlusten gegenüber gestellt (Abb. 86), so weisen in den meisten Fällen erwartungsgemäß überdurchschnittliche Wirkungsgrade unterdurchschnittliche Stoffverluste auf und umgekehrt. Abweichungen davon dürften mit der Transportlimitierung des Auswaschungsprozesses und einer nicht immer ganz zutreffenden Einschätzung des Wirkungsgrades zu erklären sein. Einige Gebiete weisen geringere Stoffverluste trotz eines schlechten Wirkungsgrades auf. Dies kann auf die Erschöpfung des Basenvorrates zurückzuführen sein (Kap. 2.4.2).

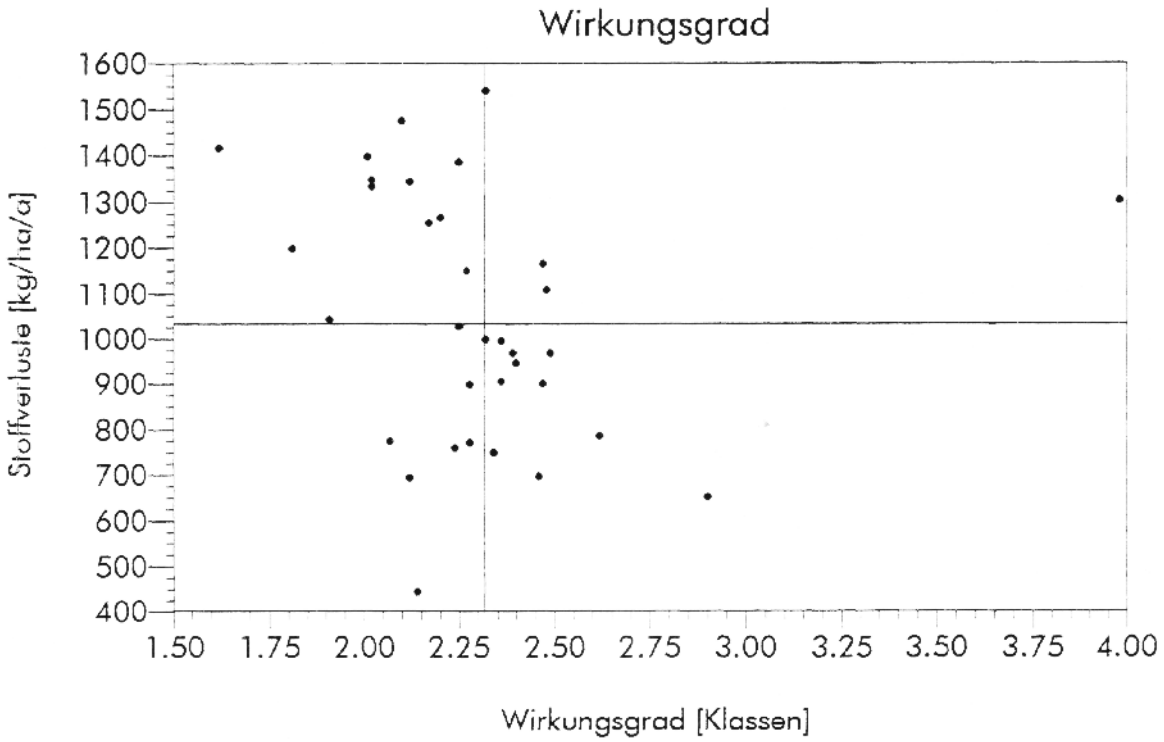


Abb. 86: Wirkungsgrad und Stoffverluste der Berechnungsabschnitte.

F.2.4.2. Phasenlage der Einzugsgebiete

Die Phasenlage eines Einzugsgebietes gibt dessen Stadium im Verlustprozeß wider: Steigen die Verluste noch an, haben sie ihr Maximum erreicht oder klingen sie gar schon aufgrund zur Neige gehender Vorräte ab. Über die Phasenlage müssen Stoffverluste und Wirkungsgrad relativiert werden, da ansonsten eine Fehleinschätzung erfolgt. So würde man vermuten, daß das Einzugsgebiet der Dreckau aufgrund des geringen Wirkungsgrades einen sehr hohen Verlust aufweist. Dies ist aber nicht richtig, wie die Frachtberechnungen zeigen (vgl. Verlustkarte). Der Vorrat in diesem Gebiet ist sehr wahrscheinlich schon weitgehend aufgebraucht (vgl. Kap. E.2.1.5).

Ein Vergleich der Stoffverluste mit dem Wirkungsgrad der Einzugsgebiete (vgl. Abb. 86) ergibt daher auch noch nicht die erwartete Übereinstimmung. Die Tendenz, daß mit abnehmendem Wirkungsgrad der Einzugsgebiete die Stoffverluste zur Zeit noch zunehmen, wird aber bestätigt. Die Abweichung einzelner Einzugsgebiete von der Tendenz wird z.T. auf folgende Zusammenhänge, die im Rahmen des Projektes nicht geklärt werden konnten, zurückgeführt:

- Im Einzugsgebiet der Dreckau (G-R1-1) dürften die Vorräte größtenteils schon aufgebraucht sein, so daß mit dem abfließenden Wasser keine großen Stoffverluste mehr verbunden sind.

- Für das Einzugsgebiet der Stör bis Padenstedt (C-4) wird der negative Einfluß der Stadt Neumünster bei der Ermittlung des Wirkungsgrades offensichtlich überschätzt. Möglicherweise wird ein Teil der entstandenen Wärme von den umliegenden Flächen durch Verdunstung dissipiert.

- Für das Einzugsgebiet des Himmelreichbaches (in der Graphik weggelassen) scheinen die Frachten sehr hoch. Sie könnten auf den stark erhöhten Abfluß im Jahr 1993 zurückgeführt werden. Auch konnte nicht geklärt werden, wie sehr die Vergrößerung der Mineralisationszone im Einzugsgebiet des Himmelreichbaches durch die stark erhitzte Umgebung die Stoffverluste erhöht.

- Für die Pegel in der Fuhlenau, Himmelreichbach, die Wegebek, die Ohlau und die Holmau ist die Ursache für die stark erhöhten Abflußwerte noch zu unklar. Diese können in falschen Einzugsgebietsgrenzen oder örtlichen Unterschieden im Niederschlag begründet sein.

F.3. Zusammenfassung

Die Projektergebnisse lassen sich zu einem dynamischen Bild der Landschaft verdichten. Danach ist die Landschaft keineswegs ein stabiles System, das allenfalls innerhalb geologischer Zeiträume einem Wandel unterworfen wäre. Vielmehr verändert sich der gesetzlich zum Schutzgut erhobene Naturhaushalt: Der Stoffhaushalt weist bzgl. der Basen ein erhebliches Defizit auf, der Wasserhaushalt ist großflächig beeinträchtigt. Die Landschaft verändert sich also nicht nur, sondern weist auch eine eindeutige Entwicklungsrichtung auf: die Landschaft droht, als Lebensraum für den Menschen immer weniger nutzbar zu werden.

Dies wird durch eine Reihe einzelner Prozesse bestätigt. Deren Analyse gibt zugleich aber auch Hinweise, welche Maßnahmen notwendig sind, um die Landschaft dauerhaft als Grundlage der Gesellschaft zu erhalten. Es konnte gezeigt werden, daß der Abfluß frachtbestimmend ist. Dies deutet auf Störungen im Wasserhaushalt hin: Die Vegetation ist nicht mehr in der Lage, den Transportprozeß durch einen höheren Anteil der Verdunstung und Kondensation zu beschränken.

Eine Anreicherung der Landschaft mit Vegetation verbesserte die Wasserqualität und vergleichmäßigte den Abfluß.

Die überschlägige Stoffbilanz und die Abschätzung der Basenvorräte hat deutlich gemacht, daß das Stör-Gebiet bereits stark an seinen Reserven zehrt. Dies trifft, wie die Regionalanalyse zeigt, für alle Teileinzugsgebiete zu. Im Falle der Dreckau ist zu befürchten, daß hier die Vorräte bereits zur Neige gehen (Kap. 2.4). Da ein Ausgleich der Verluste durch Düngung aufgrund des hohen Energie- und Kostenaufwandes bestenfalls kurzfristig erfolgen könnte, sind die Stoffkreisläufe durch eine veränderte Bewirtschaftung zu schließen (Kap. G). Die Höhe der Verluste unterstreicht, da keineswegs "nur" von einer linearen Fortsetzung des Austragsprozesses ausgegangen werden kann, daß die Minimierung der Verluste Priorität besitzen muß. Andernfalls droht die Versteppung und der Zusammenbruch der Vegetation auf größeren Flächen.

Bei der Bewirtschaftung ist darauf zu achten, daß die heute großen Bodenwasserschwankungen reduziert werden, da sie durch die erhöhte Mineralisationstätigkeit der Mikroorganismen dem Stoffaustrag Vorschub leisten (Kap. E.2.1.1). Die Entwässerung der Landschaft macht sich aber nicht nur in häufigeren wechselfeuchten Phasen des Oberbodens bemerkbar, sondern hat offensichtlich bereits zu einer Verschiebung der Niederschlagsverteilung geführt (Kap. F.1.2.1).

Die Analyse ausgewählter Fließgewässer hinsichtlich ihrer Morphologie hat deutlich gemacht, wie sehr die Gewässer Resultat ihres Einzugsgebietes sind. So weisen die untersuchten Fließgewässer durch ihre Struktur, ihr Breiten-Tiefen-Verhältnis oder ihr Partikelspektrum auf eine hohe Dynamik des Hydrographen hin. Diese Dynamik wird durch die Bewirtschaftung aufrechterhalten, so daß eine erneute Selbststrukturierung kaum zugelassen wird. Maßnahmen, die zur Verbesserung der Gewässer und damit auch zu deren Stoffrückhalt beitragen sollen, müssen demnach im Einzugsgebiet beginnen.

Die multitemporale Auswertung der Oberflächentemperatur (Kap. 2.3) und die Ergebnisse der Temperatursonden (Kap. E.1.1) unterstreichen noch einmal die Bedeutung der Vegetation für die Dämpfung des Energiepulses. Vegetationsarme Flächen erwärmen sich tagsüber wesentlich stärker als z.B. Wälder. Ein hoher Anteil dauerhafter Vegetation trägt daher entscheidend zum Ausgleich klimatischer Extreme bei.

Mit den vorgestellten Ergebnissen steht ein ausreichendes Systemwissen zur Verfügung, um eine Planung für das Gebiet auf eine solide Basis stellen zu können. Darüber hinaus wäre es durch eine eingeschränkte Fortführung der vorgestellten Untersuchungen möglich, die weitere Veränderung des Hydrographen, der Stoffverluste und der Oberflächentemperaturen als Indikatoren für die Nachhaltigkeit der Landschaft zu messen. Damit ließe sich auch der Erfolg der von den Verfassern für notwendig erachteten, veränderten Flächenbewirtschaftung feststellen: Eine Vergleichmäßigung des Abflußhydrographen über das Jahr (Anzeichen für einen veränderten Wasserfluß), eine Abnahme der Leitfähigkeit (Abnahme der Salzfracht) und eine Verringerung der Oberflächentemperatur (Verbesserung der Temperaturdämpfung) zeigten einen Erfolg an.

G. Planung

G.1. Einleitung und Annahmen

Ziel der Planung ist es, die Stoffverluste der Landschaft zu minimieren und damit deren Nachhaltigkeit zu steigern (vgl. Leitbild, Kap. B.5). Anders als bei herkömmlichen Planungen wird dabei von folgenden Annahmen ausgegangen:

- ► Die Abgrenzung des Planungsgebietes und eine evtl. kleinräumigere Differenzierung richtet sich nach den Wassereinzugsgebieten und nicht nach den politischen Grenzen.
- ► Die dargestellten Maßnahmen sind nicht als absolute Anweisungen im Sinne von Festsetzungen, sondern als Vorschläge anzusehen. Diese sollten von den Flächenbewirtschaftern (Land- und Forstwirten) nicht schematisch umgesetzt werden, sondern durch die lokalen Bedingungen modifiziert und an diese angepaßt werden.
- ► Der räumlichen Planung müssen zumindest grobe zeitliche Angaben zur Umsetzung und zur zeitlichen Veränderbarkeit zugeordnet werden. Die Fixierung statischer Strukturen in der Landschaft widerspräche der als dynamischen Prozeß verstandenen Natur.
- ► Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind in Teilen für die heutigen Flächenbewirtschafter nur dann tragbar, wenn sie diese entsprechend vergütet bekommen. Daher sollten die Land- und Forstwirte nicht länger die Rolle der Subventionsempfänger einnehmen, sondern für die Bereitstellung von sauberem Oberflächenwasser einschließlich der Erfüllung klimatischer Funktionen leistungsgerecht bezahlt werden. Die ökonomische Implementierung ist in Kap. H näher ausgeführt.
- ► Die Land- und Forstwirte übernähmen aber nicht nur die Versorgung der Orte mit Wasser und Lebensmitteln, sondern auch deren Entsorgung. Durch die Rückführung geeigneter Klarwässer, Klärschlämme und Komposte in die Landschaft würden die Kreisläufe weiter geschlossen. Die wasserwirtschaftlichen Maßnahmen wären unter diesen Randbedingungen der Flächenbewirtschaftung nachzuordnen.
- ► Statt einer absoluten Planung werden die Maßnahmen zu jeder Zeit und an jedem Ort durch deren Funktionalität (Senken der Stoffverluste, Schließen der Wasserkreisläufe, Verbesserung des Lokalklimas) relativiert. Deshalb sind alle Handlungen, sowohl deren räumliche (und zeitliche) Ausdehnung als auch die Vergütung der Bewirtschaftung, an den Erfolg der Maßnahmen rückzukoppeln und zu variieren. Meßbar - und damit überprüfbar - wird das Resultat der veränderten Bewirtschaftung, über die Veränderung der Stofffrachten (Kap. F.2.1.4) oder die Veränderung der Oberflächentemperatur. Für letzteres ist eine multitemporale Beobachtung über Satelliten notwendig.

G.2. Planungsgrundlagen

G.2.1. Geomorphologie als Grundlage

Die Bildung und Veränderung der Landschaft, z.B. deren Morphologie oder die Verteilung der Vegetation, beruht in erster Linie auf dem Wasser- und dem daran gekoppelten Stofftransport. Die räumliche Differenzierung dieser Prozesse ist primär durch die Geomorphologie vorgegeben. Sie wird sekundär durch die Vegetation einschließlich der Bewirtschaftung modifiziert bzw. überprägt. Da die Geomorphologie - im Gegensatz zur Bewirtschaftung und damit die Vegetation - durch

Planung kaum veränderbar ist, richtet sich die Auswahl der Vorranggebiete zunächst ausschließlich nach ihr.

Der Abfluß des Wassers differenziert die Landschaft durch den Transport gelöster und suspendierter Stoffe in drei Bereiche:

- Ausgehend von den Kuppenlagen werden Basen lediglich ausgewaschen, aber kaum mehr eingetragen. Die Einträge über die Luft machen im Mittel unter 10% der Verluste aus (Kap. F.1.1). Als Basenquelle verbleibt die Verwitterung des anstehenden Gesteins. Urgesteinsböden, wie z.B. Granit, verwittern langsam, so daß die Basennachlieferung zwar länger anhält, aber nur in geringen Mengen stattfindet. Aus Kalkgestein hingegen werden große Basenmengen relativ rasch freigesetzt. An der Oberfläche der sich daraus bildenden Böden verbleibt in beiden Fällen unfruchtbarer und gegenüber Witterung sehr widerstandsfähiger Quarzsand. In der Stör sind überwiegend Mischsubstrate, wie die eiszeitlichen Sande, Ausgangspunkt der Bodenbildung gewesen. Der Anteil verwitterbarer Mineralien ist dementsprechend nur noch gering. Die Kuppenlagen können deshalb auch als Auswaschungsbereiche bezeichnet werden.

- In kleineren Senken, in den Auen, an den Zusammenflüssen von Fließgewässern und in Feuchtgebieten einschließlich Kleingewässern und Seen wird der Wasserfluß abgebremst. Die Oberfläche des Wassers wird in ihnen vergrößert, zumal wenn sich die bespannten Wasserflächen rückgekoppelt an den Wasserfluß (z.B. bei Hochwasser) ausdehnen und ggfs. über die Ufer treten können. In diesen Bereichen wird die Verdunstung des Wassers physikalisch über die vergrößerte Wasseroberfläche und biologisch über die Vegetation gesteigert. Durch den so verzögerten Wasserfluß fallen Partikel und daran angelagerte Basen und Nährstoffe aus, z.B. sedimentieren phosphorhaltige Bodenteilchen. Der längere Aufenthalt des Wassers in der Fläche ermöglicht zusammen mit der vergrößerten Grenzschicht zwischen Wasser und Luft das Entweichen der übersättigten Kohlensäure (vgl. Kap. E.2.2). Dadurch werden Fällungsprozesse gelöster Stoffe, wie z.B. Calciumhydrogenkarbonat, begünstigt.

  In Quellgebieten, hier besonders in den Helokrenen (Sumpfquellen), ist es neben der verzögerten Wassergeschwindigkeit auch die Möglichkeit des Entweichens der Kohlensäure, die zur Kalkausfällung führt.

  Im Gegensatz zu den Kuppenlagen können diese Gebiete deshalb als Rückhaltebereiche bezeichnet werden. Hier können für längere Zeit mehr gelöste Stoffe festgelegt werden, als ausgewaschen werden. Die dafür notwendigen Voraussetzungen einer längeren Aufenthaltszeit des Wassers sowie einer ausgedehnten Wasser-Luft-Grenzschicht sind jedoch durch die beschleunigte Abführung des Wassers, wie sie z.B. durch Draingräben im Stör-Gebiet erfolgt, kaum mehr gegeben.

- Zwischen Auswaschungs- und Rückhaltebereichen können Gebiete liegen, in denen Stoffverluste und Stoffnachlieferung aus oberhalb liegenden Flächen annähernd ausgeglichen sind, wie z.B. die tiefer gelegenen Hangbereiche. Ihr Flächenanteil nimmt mit zunehmender Degradierung des Gebietes nichtlinear zugunsten der Auswaschungsbereiche ab. Die Geschwindigkeit des Abflusses und damit des Stofftransportes hängt hier neben der Vegetation auch von der Hangneigung ab. Steilere Hanglagen sind deshalb ähnlich den Kuppenlagen stärker von der Auswaschung betroffen.

Die Ursachen für die derzeit weiträumig maximierten Prozesse der Stofflösung und -verlagerung sind hauptsächlich in der Art und Weise der hoch nettoproduktiven Flächenbewirtschaftung und der ungenügenden Energieflußdichteabsenkung dieser Flächen zu sehen. Die gelösten und mit dem abfließenden Niederschlagswasser verlagerten Basen und Nährstoffe werden jedoch nur dann als irreversible Stoffverluste in die Fließgewässer wirksam, wenn sie nicht durch geeignete Rückhaltestrukturen aufgefangen werden. Beispielsweise sorgte die ausgedehntere Verbreitung der Feuchtgebiete noch vor 100 Jahren dafür, daß trotz einer bereits nettoproduktiven Wirtschaftsweise die Stoffverluste deutlich geringer als heute waren. Dies belegen die aus Seesedimenten abgeleiteten Ablagerungsraten (Digerfeldt 1972). Die Zerstörung der Feuchtgebiete im Zuge der landwirtschaftlichen "Melioration" und Flurbereinigung vernichtete damit eine für den Stoffrückhalt wesentliche, funktionale Komponente der Landschaft, obwohl die damit nur vordergründig und kurzzeitig "gewonnenen" Flächen nur einen kleinen Teil der Gesamtfläche ausmachten.

Dem hier vorgestellten Planungsansatz soll diese Nichtlinearität zwischen räumlicher Verteilung der Feuchtgebiete und deren Funktion für das Gesamtgebiet, wie z.B. der Stoffrückhalt, zugrunde gelegt werden. Auf diese Weise ist eine deutlich höhere Maßnahmeneffizienz zu erwarten als bei Maßnahmen, die entweder auf der ganzen Fläche zugleich ansetzen oder sich nur auf ausgewählte Naturschutzgebiete beschränken. Dazu sind die verloren gegangenen Feuchtgebiete gezielt wiederherzustellen bzw. in Teilen neu anzulegen.

Die Kuppenlagen erfahren als Auswaschungsbereiche in der Planung besondere Berücksichtigung, da hier die Vegetation zuerst beginnt, aus Basenmangel schütter zu werden und letztlich auszufallen. Selbst bei einem (unwahrscheinlichen) linearen Austrag nähme die betroffene Fläche durch ihre anwachsende Randlinie nichtlinear zu. Es ist also zu befürchten, daß dieser von den Auswaschungsbereichen ausgehende Devastierungsprozeß, einmal in Gang gekommen, nur noch sehr energie- und kostenaufwendig zu stoppen ist. Die hohen Stoffausträge aus der gesamten Bundesrepublik (vgl. Kap. H.1) deuten darauf hin, daß es sich hier nicht um einen lokal beschränkten Effekt handelt. Die zeitweilige Versauerung der Waldböden in eben solchen Kuppenlagen, wie z.B. im Harz oder Schwarzwald, sind bereits in diesen Zusammenhang zu sehen.

Die beschleunigte Degradation der Kuppenlagen führt zugleich zu einer Beeinträchtigung des Wirkungsgrades der angrenzenden Flächen: Die nicht in den devastierten Flächen umgesetzte Energie wird über einen beschleunigten Luftmassentransport zwischen ihnen und den benachbarten Flächen dissipiert. Dort kann es dadurch zu erhöhter Verdunstung kommen, solange ausreichend Wasser zur Verfügung steht (vgl. Kap. B.2.1). Mit dem beginnenden Rückgang der sommerlichen Niederschlagsmengen (vgl. Kap. F.1.2) wächst die Wahrscheinlichkeit für diese Flächen, auszutrocknen. In der Folge ist hier der Stoffverlustprozeß beschleunigt (positiv rückgekoppelt). Mit der räumlichen Ausdehnung der devastierten Kuppenlagen ist ein zunehmender Einfluß auf die Niederschläge bis hin zu einer deutlichen regionalen Klimaveränderung zu befürchten. Unter diesen Randbedingungen müßte die Land- und Forstwirtschaft in ihrer bisherigen Form eingestellt werden.

Für die Planung bedeutet dies, daß die Kuppenlagen, solange diese an Basen verarmten Flächen noch relativ gering sind, aus der Nutzung genommen werden sollten. Zumindest weitgehend unbewirtschaftete Wälder würden auf den Kuppenlagen energiedissipative Prozessoren erhalten; Schäden für die angrenzenden Flächen wären unwahrscheinlicher.

G.2.2. Bedeutung der Vegetation

Die Flächennutzung modifiziert die durch die Geomorphologie vorgegebenen Prozesse im Wasser- und Stoffhaushalt bzw. deren Geschwindigkeiten. So kann z.B. der Abfluß durch Waldflächen vergleichmäßigt werden. Die wichtigste Auswirkung der Vegetation ist eine Optimierung des landschaftlichen Wirkungsgrades. Sie nimmt dadurch in folgender Form Einfluß auf die Stofftransporte:

- Die Vegetation bestimmt den Energieumsatz auf der Fläche selbst. Anzustreben ist eine hohe Bruttoprimärproduktion bei möglichst geringer Nettoprimärproduktion. Stofflösung und -verlagerung sind unter diesen Bedingungen minimiert. Die Temperaturkurve verläuft ausgeglichener; der landschaftliche Wirkungsgrad ist hoch.

  Bei geringer Produktion oder lediglich hoher Nettoprimärproduktion ist mit höheren Stoffverlusten zu rechnen. Während die Temperatur bei hoher Nettoproduktion während der Wachstumsphasen ausgeglichener sein kann, steigen die Varianzen der Temperatur bei insgesamt geringer Produktion stark an. Der Wirkungsgrad ist gering.

- Ist die Energiedissipation auf der Fläche selbst weitgehend vollständig, so sind keine Potentiale mehr vorhanden, die zu einer Beeinträchtigung benachbarter Flächen führten. Bei geringem Wirkungsgrad dagegen sind erhöhte Potentiale für dissipative Luftmassentransporte vorhanden (Kap. B.2.1, Abb. 5). Solange den angrenzenden Flächen genügend Wasser zur Verdunstung zur Verfügung steht, ist in ihnen mit keinen Schäden zu rechnen. Tritt zeitweilig Wassermangel auf, so werden dort wechselfeuchte Phasen häufiger und Stoffverluste induziert. In der Planung ist anzustreben, solche Beeinflussungen durch die Steigerung des Wirkungsgrades zu verringern.

- Die durch die Geomorphologie vorgegebene Richtung des Wasser- und Stofftransportes verbindet unterschiedliche Vegetationsbestände. An den Schnittstellen zwischen den Vegetationsbeständen, den Ökotonen (vgl. Kap. D.6.2), können sich bei unterschiedlichem Wirkungsgrad Potentiale im Wasser- und Stoffhaushalt und in der Temperatur ausbilden, die mit einer erhöhten Prozeßdichte einhergehen. Diese Potentiale können sich für den Stofftransport sowohl bremsend als auch beschleunigend auswirken:

  Bremsend für den Stofftransport wirkt sich der Wasserfluß aus Flächen niedrigeren Wirkungsgrades in Flächen höheren Wirkungsgrades aus, z.B. von einer Wiese in einen Wald. Durch eine höhere Verdunstung können hier die im Wasser mitgeführten Stoffe vermehrt ausfallen. Bei hoher Produktivität der Vegetation werden die Stoffe aufgenommen und im biologischen Kreislauf festgelegt. Der Effekt ist vergleichbar dem einer Aue (s.o.), so daß bezogen auf die Dynamik im Bodenwasser- und Stoffhaushalt von einer "biogenen virtuellen Abflachung" gesprochen werden kann.

  Beschleunigend auf den Stofftransport wirkt sich der Fluß des Bodenwassers aus einer Fläche höheren Wirkungsgrades in eine Fläche geringeren Wirkungsgrades aus. Da das Potential durch die Bewirtschaftung ständig aufrecht erhalten wird, kann der Stofftransport fortgesetzt werden. Der Wasserfluß unterliegt, da er nicht mehr durch Verdunstung gebremst wird, einer Beschleunigung. Eine Stoffestlegung in den Flächen geringeren Wirkungsgrades erfolgt im günstigsten Falle temporär. Beispiele dafür sind Äcker, die während ihrer kurzen Phase hoher Nettoproduktivität Basen benötigen und viel Wasser verdunsten.

Unterbräche die Bewirtschaftung nicht die natürliche Sukzession immer wieder, so bildeten sich hier statt harter Übergänge (limes convergens) weichere aus (limes divergens). In ihnen würden die treibenden Potentiale zwischen den Flächen verringert. Die Bewirtschaftung sollte deshalb an diesen Ökotonen allmählichere Übergänge zulassen, z.B. Waldsäume mit Krautsaum.

In der Ermittlung des Wirkungsgrades (Kap. D.6.4) sind diese Überlegungen bereits weitgehend eingegangen. Bisher nicht berücksichtigt ist jedoch die Richtung der Ökotone (abbremsend oder beschleunigend).

G.3. Ausweisung der Vorranggebiete

In der Karte der Vorranggebiete sind die Flächen ausgewiesen, die entweder sehr empfindlich auf den Auswaschungsprozeß reagieren oder Flächen, deren Umgestaltung einen hohen Stoffrückhalt und damit eine hohe Maßnahmeneffizienz erwarten lassen.

Die Methodik zur Kartenerstellung wurde bereits in Kap. D.6.5 dargestellt. Die Bearbeitung der Karte erfolgte im Maßstab 1:100 000, wenngleich die Datengrundlagen in einem größeren Maßstab erfaßt wurden. Es wird jedoch darauf hingewiesen, daß eine direkte Übertragung der Karte in einen größeren Maßstab, etwa 1:25 000, nicht ohne weitere Bearbeitung sinnvoll ist, da dann z.B. Einzelhöfe fehlen oder Ungenauigkeiten durch das verwendete DHM auftreten.

Die Verteilung der Flächenanteile der Vorranggebiete für jeden Berechnungsabschnitt zeigt die Abb. in Anhang 2, G.3. Danach sind 23% der Fläche des gesamten Gebietes als Vorrangfläche zur Verbesserung des Wasserhaushaltes und zur Steigerung der Nachhaltigkeit ausgewiesen, 70% der Fläche für die Land- und Forstwirtschaft und 7% als Siedlung. Die 23% der Vorrangflächen zur Steigerung der Nachhaltigkeit teilen sich auf in 9% Kuppenlagen, 3% Quellbereiche und 11% gewässerbegleitende Feuchtgebiete (Fangsysteme). Der Anteil an steileren Hängen ist verschwindend gering.

In der vorliegenden Karte wurden die Vorranggebiete räumlich konkretisiert. Dabei ist zu beachten, daß durch Wahl der Klassifizierungsschritte (vgl. D.6.5) die flächige Ausdehnung veränderbar ist. Die für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Landschaft notwendige Gesamtfläche kann erst schrittweise durch eine verbesserte Heuristik (Kap. D.1.) genauer bestimmt werden. Insofern stellen die aus der Karte abgeleiteten Flächenanteile eine erste Abschätzung dar. Dies gilt auch für die Verhältnisse der unterschiedlichen Typen der Vorranggebiete.

G.4. Abgestufter Handlungsbedarf

Damit die Landschaft dauerhaft als Grundlage für die Gesellschaft bewirtschaftet werden kann, müssen die derzeitigen Stoffverluste (Kap. F.2.1.4) minimiert werden. Für die Differenzierung innerhalb der Teileinzugsgebiete ist die relative Lage der Flächen im Teileinzugsgebiet maßgebend. Die Maßnahmen sollten mit den weiter oberhalb liegenden Flächen beginnen und, dem Gewässer folgend, fortgeführt werden. So wirkt sich z.B. die Veränderung des Hydrographen durch vermehrte Feuchtflächen bereits entlastend im flußabwärts liegenden Bereich aus, während umgekehrt die Anstrengungen möglicherweise schon bald durch eine Flutwelle zunichte gemacht würden.

Die Dringlichkeit dieser Maßnahmen ist an der bisherigen Erfüllung der den Flächen zugedachten Funktionen festzumachen. Die gewässer- und quellbegleitenden Feuchtgebiete bestehen heute nur noch in Ausnahmefällen. Ihre Entwicklung ist deshalb vordringlich zumindest wieder zuzulassen (Kap. 5.3). Während unterstützende Maßnahmen auf bisherigen Acker- und Grünlandstandorten vordringlich sind, sind aktive Maßnahmen im Wald nur in Ausnahmefällen (z.B. bei extremer Drainage) erforderlich. Der Handlungsbedarf auf Kuppen und Steillagen kann anhand der Abschätzung des Wirkungsgrades bestimmt werden. Auf Flächen, die nur einen geringen Wirkungsgrad aufweisen, sind vordringlich Maßnahmen einzuleiten.

Die Abstufung des Handlungsbedarfs ermöglicht es, eine größermaßstäbliche Maßnahmenplanung abzuleiten. Dabei sind die lokalen Besonderheiten entsprechend zu berücksichtigen. Anhand der Prioritierung könnte nicht nur eine räumliche, sondern auch eine zeitliche Entwicklung dargestellt werden. Dies war im Rahmen des Projektes leider nicht möglich.

G.5. Module zur Umsetzung

Um die beschriebenen Möglichkeiten zur Verringerung der Stoffverluste operabel zu machen, sollen Planungsmodule bzw. -vorschläge zunächst in allgemeiner Form beschrieben werden. Diese sind dann für die spezielle Situation der Teilgebiete anzupassen.

G.5.1. Kuppenlagen

Kuppenlagen sollten eine dauerhafte Vegetation aufweisen, die in der Lage ist, ausreichend Niederschlagswasser zu speichern, um die Energiedissipation nahezu vollständig in physikalischen und biologischen Kreisprozessen zu ermöglichen. Dafür kommt in erster Linie ein weitgehend unbewirtschafteter Wald in Frage. Es wird vorgeschlagen, die Basenvorräte durch geeignete Aschen und Klärschlämme wieder zu ergänzen. Eine Bewirtschaftung als Plenterwald wäre möglich, wenn die Holzentnahme behutsam erfolgte und zum Ausgleich entsprechend Basen und Nährstoffe nachgedüngt würden. Dort, wo bereits Wälder auf den Kuppenlagen stocken, sollten diese natürlich erhalten bleiben und langsam in naturnahe Mischwälder mit dominierenden Laubhölzern überführt werden. Statt der heute im Gebiet vorhandenen Altersklassenwälder sollte auf eine entsprechende Altersmischung geachtet werden. Auf noch nicht bewaldeten Kuppenlagen könnten entsprechende Bestände unter starker Beteiligung der Buche (*Fagus sylvatica*) begründet werden. Die Ergebnisse der Temperaturmessung (Kap. E.1.1) zeigen, daß die Temperatur im Buchenbestand besonders ausgeglichen verläuft.

Diese Wälder könnten der Bevölkerung auch zur Erholung dienen. Der herkömmliche Naturschutz profitierte ebenfalls davon, da hier für die naturraumtypischen Arten des Waldes (z.B. Schwarzspecht) geeignete Flächen geschaffen würden.

G.5.2. Steilhänge

Steilhänge sind im Einzugsgebiet der Stör nur zu einem verschwindend geringen Anteil vorhanden. Trotzdem sollten diese wie die Kuppenlagen mit einem nicht oder nur extensiv bewirtschafteten Wald bestanden sein.

G.5.3. Fangsysteme entlang der Gewässer und Maßnahmen im Gewässer

Die Abbremsung des Wassers in der Aue ist heute durch die intensivierte Flächennutzung mit Draingräben kaum mehr gegeben. Die sich unter natürlichen Bedingungen in der Aue entwickelnden Feuchtgebiete, wie Niedermoore oder Erlenbruchwälder, fehlen weitgehend. Ihre Funktion für den Stoffrückhalt der Landschaft und die Verdunstung von Wasser soll durch die Wiederherstellung bzw. Neuanlage von Feuchtgebieten wieder aktiviert werden.

Bedingt durch den unter der heutigen Landbewirtschaftung aufgesteilten Hydrographen haben sich die Gewässer tief eingeschnitten, so daß die Abführung des Wassers beschleunigt erfolgt. Für die Planung retentiver Systeme ergeben sich hieraus zwei wesentliche Probleme:

- Die Anlage von Feuchtgebieten ist in der Aue kaum möglich, da ihnen auch in Gewässernähe durch die Dränwirkung der eingeschnittenen Fließgewässer häufig das Wasser fehlt.

- Die Verdunstung des Wassers in der Aue ist durch seinen beschleunigten Transportprozeß reduziert. Damit verliert die Aue ihre Bedeutung für den Wasser- und Stoffhaushalt des Einzugsgebietes. Außerdem kann die Kohlensäure trotz ihrer Übersättigung kaum entweichen und der damit verbundene Ausfällungsprozeß kaum stattfinden, da der Transportprozeß zu schnell und die Wasser-Luft-Grenzschicht zu gering ist (vgl. E.2.2).

Den eingezwängten Gewässern wäre wieder der Raum zu geben, über die Ufer zu treten und sich zu verbreitern. Bei den Entwässerungsgräben könnte eine teilweise Aufgabe der Grabenräumung bereits innerhalb weniger Jahre eine Verbesserung des Zustandes bewirken. Die ursprünglich natürlichen, später ausgebauten und/oder vertieften Gewässer hingegen würden durch die Abflußspitzen weiterhin ausgeräumt, solange der Hydrograph durch eine Änderung der Flächenbewirtschaftung nicht gedämpft ist. Da selbst im Falle einer raschen Umsetzung der Maßnahmen erst von einer langsamen Änderung des Hydrographen auszugehen ist (z.B. aufgrund des langsamen Gehölzwachstums), erscheinen lediglich punktuelle Eingriffe zur Beschleunigung der Aufweitung der Gewässer und der Steigerung der Breiten-Tiefen-Varianz sinnvoll. Einzelne Aufweitungen und Stauschwellen könnten bereits zu einer verstärkten Dynamisierung des bislang durch das vorgegebene Profil fixierten Gewässerlaufes und damit zu einer größeren Dissipativität des Gewässerbettes führen.

Aufgrund des zu Beginn der Maßnahmen noch nicht ausreichend gedämpften Hydrographen sollen die vorgeschlagenen Feuchtgebiete zunächst in und an den Oberläufen der Gewässer realisiert werden. Sie tragen dann dazu bei, den Hydrographen in weiter unterhalb gelegenen Flächen zu vergleichmäßigen und begünstigen so dort die schrittweise Anlage von Feuchtgebieten. Der besondere Wert der Feuchtpflanzen für den Stoffrückhalt ergibt sich aus folgenden Eigenschaften:

- Durch die hohe Verdunstung wird der Wasserfluß abgebremst; mitgeführte Stoffe können vermehrt ausfallen. Durch die Abbremsung und damit verbundene längere Aufenthaltszeit des Wassers können außerdem die über den Oberflächenabfluß eingeschwemmten Partikel sedimentieren.

- Aufgrund ihrer hohen Produktivität können die Pflanzen Basen und Nährstoffe aus dem Wasser entnehmen und im biologischen Kreislauf festlegen. Durch die Entnahme von Kohlensäure während der Produktionsphasen, z.B. über die Wurzeln oder durch Algenaufwuchs, wird die Retention über Fällungsprozesse verstärkt.

- ► Die Vergrößerung der Grenzfläche Wasser-Luft durch die flache Morphologie der Feuchtgebiete bzw. durch die hohe benetzte Pflanzenoberfläche erleichtert den Ausgleich der Kohlensäure-Übersättigung mit der Atmosphäre und damit die Kalkfällung.

- ► Anders als in anderen Landökosystemen sind Feuchtgebiete eher akkumulative Systeme, in denen mehr Biomasse aufgebaut als abgebaut wird. Dies liegt an der Dauerfeuchte, die die Zersetzung hemmt. Beispiele sind die Torfbildung aus Schilf, Seggen oder Torfmoos. Daher ist bei Feuchtgebieten die Möglichkeit einer qualitativ anderen, verlustfreien Bewirtschaftungsweise gegeben.

Auch Feuchtgebiete unterliegen einer natürlichen Sukzession. Die hohe Produktivität, die z.B. in Schilf- oder Rohrkolbenbeständen vorherrscht, ist z.B. in bestimmten Seggen- oder Torfmoosgesellschaften nicht mehr zu erwarten. Mit sinkender Produktivität wird aber auch die Aufgabe der neu angelegten Fangsysteme nur bedingt erfüllt. Neben der Festlegung muß dann die Rückführung der Basenstoffe in die Fläche erfolgen, um die geöffneten Kreisläufe in der Landschaft schließen zu können. Dazu ist eine angepaßte Bewirtschaftung der Feuchtgebiete notwendig. Es ist anzustreben, die geerntete Biomasse, bevor sie auf die höher gelegenen Teile des Einzugsgebietes zurückgebracht wird, zu nutzen. Dabei kommt z.B. die Nutzung als Kohlenstoffquelle zur Nahrungsmittelherstellung über Nahrungsketten, als Energieträger, die Herstellung von Industriealkohol oder von Baustoffen in Betracht.

Für die wieder zu errichtenden Feuchtgebiete sind grundsätzlich verschiedene Lösungen denkbar. Im folgenden sind einige beispielhaft dargestellt.

G.5.3.1. Typ "Gewässerbegleitende Fangsysteme"

Gewässerbegleitende Feuchtgebiete werden von dem aus der Landschaft abfließenden Wasser durchströmt, bevor es das Fließgewässer erreicht. In der sich an das Gewässer anschließenden Zone wird das Wasser aufgrund des hohen Grundwasserstandes relativ oberflächennah fließen, so daß es für die Vegetation erreichbar ist. Die Feuchtgebiete können sich ausbilden, sobald der Wasserhaushalt der Flächen den Lebensraumansprüchen der Feuchtpflanzen entspricht und andere Nutzungsformen, wie Mahd, aufgegeben werden. Die künstliche Ansiedlung (Anpflanzung, Ansaat, Halmstecklinge etc.) der Feuchtpflanzen anstelle der Sukzession wird nur in Ausnahmefällen und in Form von Initialpflanzungen erforderlich sein.

Von der Bewirtschaftung könnte ein direkt an das Gewässer angrenzender Streifen ausgenommen werden.

Gewässerbegleitende Fangsysteme sind prinzipiell an allen Oberflächengewässern, auch an größeren, denkbar.

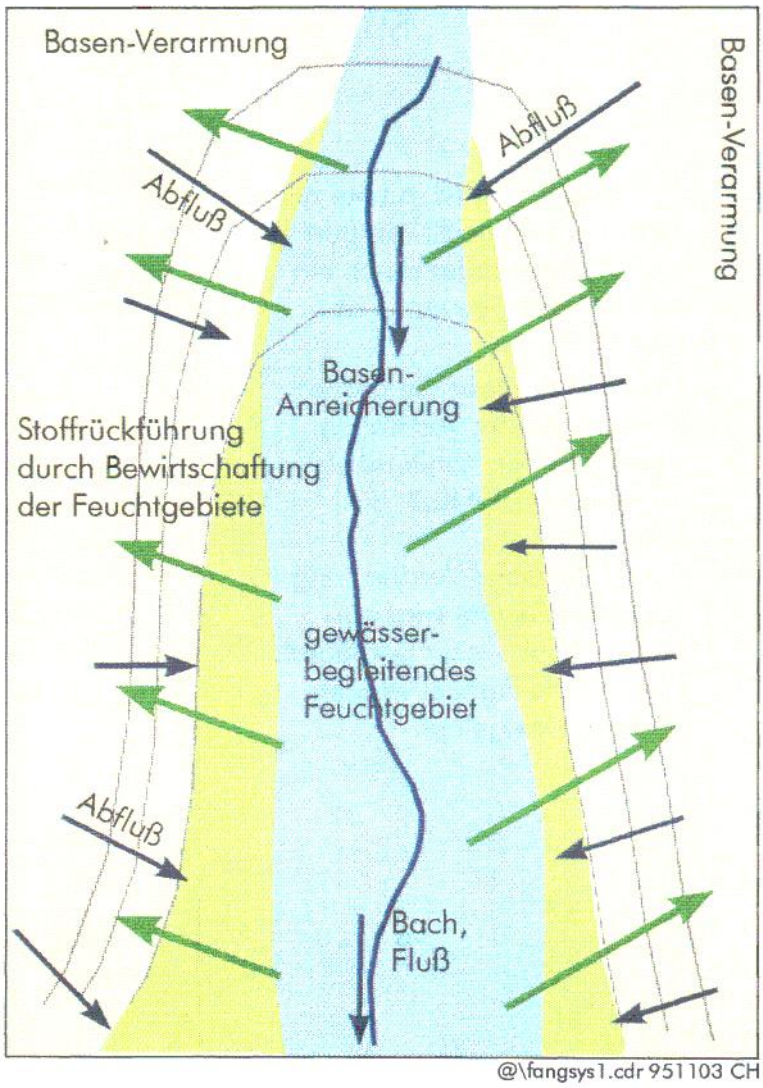
G.5.3.2. Typ "Temporäre Feuchtgebietskaskaden"

In der Aue befindet sich eine Reihe von Stauschwellen, die eine Kaskade von Poldern bilden, die je nach Bedarf aufgestaut oder abgelassen werden können. Während jeweils ein (oder mehrere) Polder bespannt sind, können die unbespannten z.B. als Grünland verwendet werden. Die Polder sollten nur sehr flach sein, z.B. etwa 20-30 cm tief, um eine relativ große Wasser-Luft-Grenzschicht zu schaffen. Dabei wird die Verdunstung maximiert. Mitgeführte Partikel sedimentieren aufgrund der längeren Aufenthaltszeit des Wassers. Die Kaskaden sind in zwei Varianten betreibbar:

Typ: Gewässerbegleitende Fangsysteme
(unmaßstäbliches Schema)

Gewässerbegleitende Feuchtgebiete werden von dem aus der Landschaft abfließenden Wasser durchströmt, bevor es das Fließgewässer erreicht.

Durch die hohe Verdunstung und Produktivität werden die transportierten Stoffe zurückgehalten. Mitgeführte Partikel werden ebenfalls festgelegt.



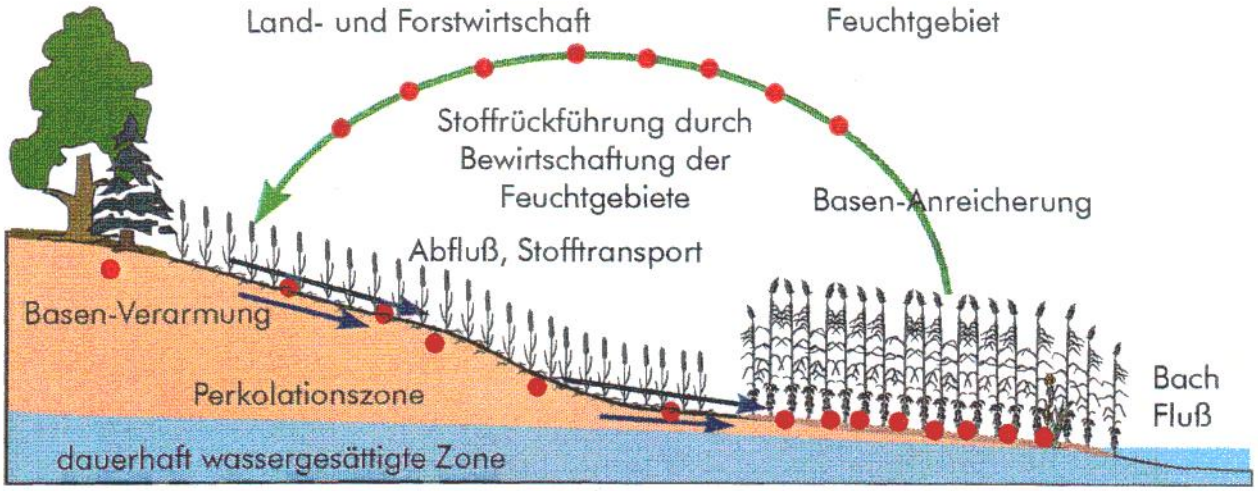
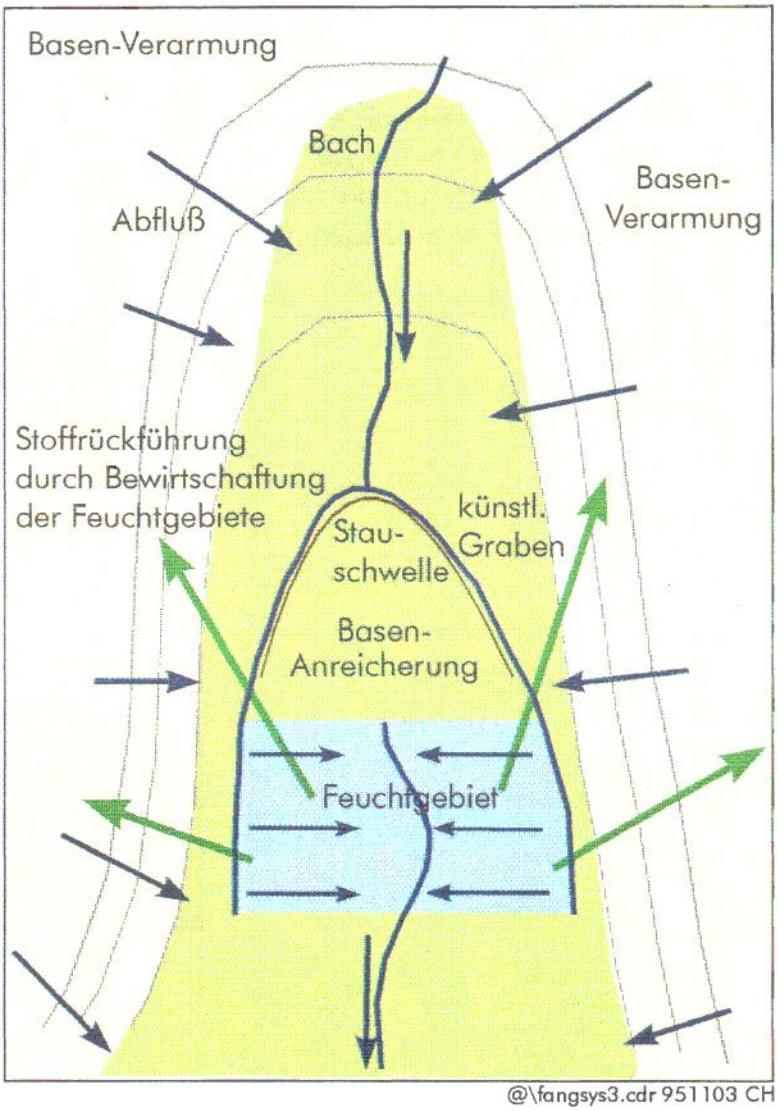


Abb. 87: Gewässerbegleitende Fangsysteme.

Stoffrückhalt durch Feuchtgebiete

Typ: Feuchtgebiet mit Rieselstrecke
(unmaßstäbliches Schema)

Der Bachlauf wird in zwei blinde Gräben aufgeteilt. Von dort sickert das Wasser durch ein Feuchtgebiet, bevor es abfließt.
Dabei kann über die große Oberfläche der Vegetation überschüssige Kohlensäure entweichen und Kalk ausfällen.
Durch die hohe Verdunstung und Produktivität wird der Stoffrückhalt weiter gesteigert.
Mitgeführte Partikel werden ebenfalls festgelegt.



Schnitt durch die Rieselstrecke

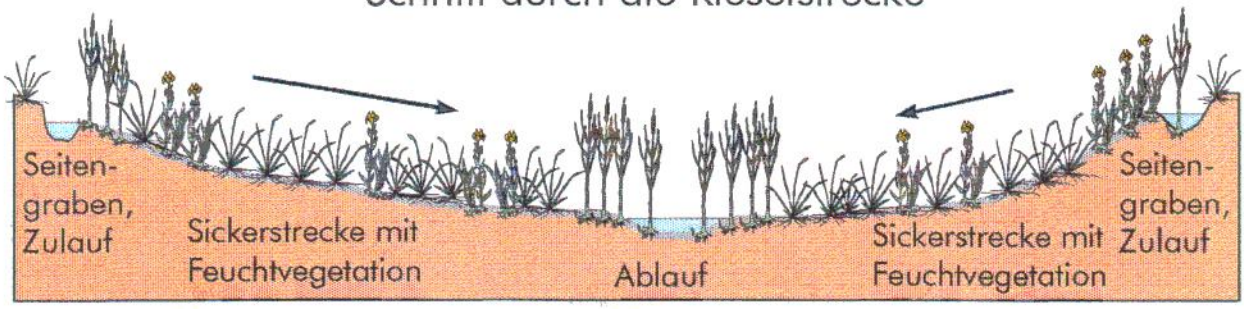


Abb. 88: Temporäre Feuchtgebietskaskaden.

- Die Polder werden nur für relativ kurze Zeit, z.B. 2 Jahre, bespannt. Durch die hohe Produktivität von Unterwasserpflanzen, wie z.B. *Elodea* oder *Callitriche*, kann es zur Ausfällung von Kalk kommen. Diese Pflanzen entnehmen die Kohlensäure zur Photosynthese direkt dem Wasser.

- Wenn die Polder jeweils für längere Zeit, z.B. mehrere Jahre, bespannt sind, kann sich ein hoch produktives Röhricht entwickeln. Mögliche Arten wären *Typha latifolia*, *Phalaris arundinacea* oder *Glyceria fluitans*.

Diese Art der Polderwirtschaft ist vor allem in der Aue der Oberläufe denkbar. Für die größeren Flüsse ist sie weniger geeignet.

G.5.3.3. Typ "Feuchtgebiet mit Rieselstrecke"

Die Grundidee dieses Feuchtgebietstypes ist es, eine möglichst große Wasser-Luft-Grenzschicht zu erzeugen, um so die Ausfällung von Stoffen zu ermöglichen. Natürliches Vorbild dafür sind Helokrene (Sickerquellen). Unter entsprechenden Bedingungen kann hier soviel Kalk ausfallen, daß Kalktuff aufgebaut wird. Dazu trägt die große Oberfläche und Verdunstung der Vegetation bei, die durch das Überrieseln immer wieder benetzt wird.

Realisiert werden könnte dies durch eine Stauschwelle, die das Gewässer mit dem natürlichen Gefälle in zwei künstliche, blinde Gräben leitet. Am Ende der beiden Gräben träte das Wasser flächig über die Grabenschulter und sickerte durch das Feuchtgebiet. Das Feuchtgebiet selbst wäre mit Pflanzen, wie z.B. *Glyceria fluitans*, *Iris pseudacorus* oder *Juncus*, bestanden. Das Wasser flösse dann wieder dem Bachlauf zu und über diesen ab. Bei hoher hydraulischer Belastung könnte die Stauschwelle an vorgesehener Stelle überströmt werden und dadurch eine Beschädigung der Anlage vermieden werden.

Dieser Feuchtgebietstyp bietet sich vor allem für kleine Bäche im Oberlauf an.

G.5.4. Feuchtgebiete in Quellbereichen und an Gewässer-Zusammenflüssen

Sowohl Quellgebiete als auch die Zusammenflüsse der Gewässer sind Bereiche, die ursprünglich als Feuchtgebiete besonders zur Dämpfung des Hydrographen beigetragen haben. In den Quellgebieten sammelte sich das aus der Landschaft stammende Wasser verstärkt an und konnte in den mit Feuchtvegetation ausgestatteten Quellsümpfen oder Quellmooren zumindest teilweise gespeichert und verdunstet werden. An den Zusammenflüssen der Gewässer wurden während der Hochwasserphasen durch den entstehenden Rückstau die angrenzenden Bereiche überflutet. Je nach der Häufigkeit und Dauer des Überstaues konnten sich hier Feuchtpflanzen, v.a. aber Gehölze wie Weiden und Erlen, ansiedeln. Sie profitierten von dem Rückhalt gelöster und partikulärer Basen und Nährstoffe und verbesserten diesen durch Verdunstung und die Wasserspeicherung des Detritus. Sowohl Quellgebiete als auch Überflutungsgebiete wurden drainiert und damit die Hochwässer für die Siedlungen bedrohlicher.

Die Entwicklung der Quellgebiete zu Feuchtgebieten sollte deshalb wieder ermöglicht werden. Vorhandene Drainagen und Gräben sollten geschlossen und andere Nutzungen aufgegeben werden. Größere Quellgebiete können möglicherweise ähnlich den Fangsystemen bewirtschaftet werden.

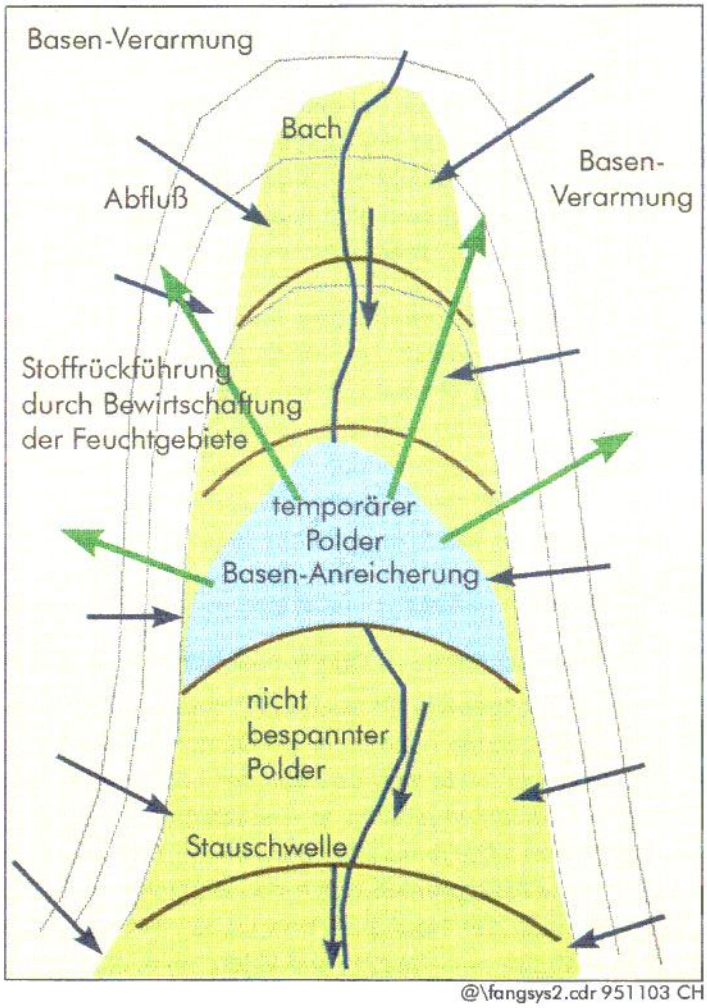
Stoffrückhalt durch Feuchtgebiete

Typ: Temporäre Feuchtgebietskaskaden
(unmaßstäbliches Schema)

In der Aue befindet sich eine Kaskade von Poldern, von denen jeweils nur wenige mit Wasser bespannt sind. Die unbespannten Polder können z.B. als Grünland genutzt werden.

Variante A:
Die Polder sind nur für kurze Zeit (z.B. 2 Jahre) bespannt. Durch die hohe Produktivität von Unterwasserpflanzen (z.B. Elodea oder Callitriche) kann Kalk augefällt werden.
Die Pflanzen entnehmen dem Wasser Kohlensäure für die Photosynthese. Außerdem sedimentieren mitgeführte Partikel.

Variante B:
Die Polder sind für längere Zeit (einige Jahre) bespannt. Es kann sich ein hoch produktives Röhricht (z.B. Typha, Phalaris, Glyceria) entwickeln.
Durch die hohe Verdunstung und den Biomassezuwachs werden Stoffe zurückgehalten. Mitgeführte Partikel sedimentieren.



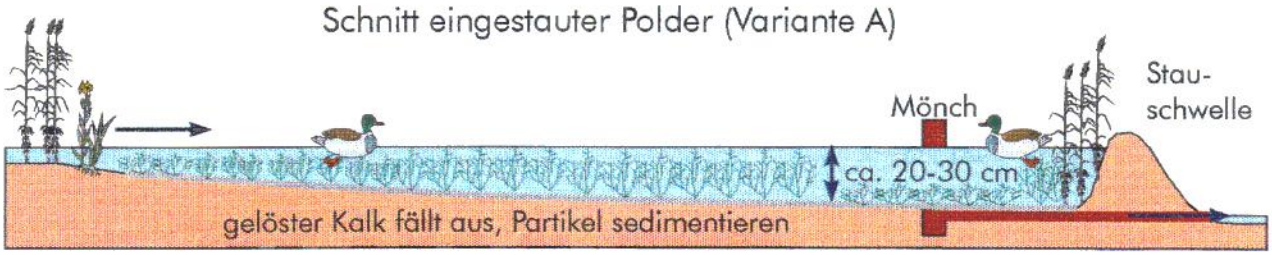


Abb. 89: Feuchtgebiet mit Rieselstrecke

Die Überflutung von Flächen an den Gewässerzusammenflüssen, deren Ausweisung im vorliegenden Bericht noch nicht erfolgte, muß wieder zugelassen werden. Die Eintiefung der Fließgewässer könnte hier durch punktuelle Maßnahmen, wie höhere Sohlschwellen, langsam wieder aufgehoben werden. Grundsätzlich sind unterschiedliche Möglichkeiten der Bewirtschaftung dieser Feuchtgebiete denkbar:

- ► Die häufiger überfluteten Bereiche können sich als Feuchtgebiete mit Schilf (*Phragmites communis*) entwickeln, die langsam in Feuchtwiesen übergehen.
- ► Statt dessen ist auch die Begründung eines Feuchtwaldes, etwa aus Erlen, möglich. Um die Retentions-Funktion aufrecht zu erhalten, ist ein gemischtaltriger Bestandsaufbau mit Plenterung zu bevorzugen.

G.5.5. Polder zur Rückhaltung von Klarwasser

Während die zuvor beschriebenen Vorranggebiete in ihrer räumlichen Lage direkt aus der Geomorphologie abgeleitet werden konnten, ist dies für die Polder zur Rückhaltung von Klarwässern nicht der Fall. Unter Klarwasser wird biologisch gereinigtes Abwasser verstanden, das trotz der physikalischen und biologischen Klärung noch einen erheblichen Anteil an pflanzenverwendbaren Basen und Nährstoffen enthält. Diese wertvollen Stoffe sollten nicht, wie bisher, über die Vorfluter irreversibel in das Meer abgeleitet werden, sondern in die biologischen Kreisläufe der Landschaft zurückgeführt werden. Dadurch wird auch die Qualität der Oberflächengewässer verbessert. - Von einer Verwendung in der Landschaft ausgeschlossen sind mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen belastete industrielle Abwässer.

Jeder Kläranlage im Störgebiet sollten deshalb Flächen zugeordnet werden, in die das Klarwasser in Form von Poldern eingeleitet werden kann. Für die Nutzung des Klarwassers bestehen mehrere Möglichkeiten:

- ► Die Polder werden mit Feuchtgebietspflanzen bepflanzt. Durch die kontinuierliche Nachlieferung der Nährstoffe kann hier Biomasse mit einer sehr hohen Produktivität produziert werden. Dafür kommt besonders Schilf (*Phragmites communis*) in Frage. Um die Produktivität und damit sowohl Verdunstung als auch Stofffestlegung dauerhaft hoch zu halten, ist eine entsprechende Bewirtschaftung erforderlich (vgl. Ripl, Hildmann & Janssen 1994).
  Diese Feuchtgebiete wären ausreichend zu dimensionieren. Im Idealfall träte während der Sommermonate kein Abfluß aus den Poldern auf. Größenordnungen von etwa 50 m^2/EWG wären zu diskutieren.
- ► Statt der Anlage von Schilfpoldern wäre auch eine Nutzung zur Fischzucht (z.B. Karpfen) denkbar, nachdem das Wasser einen kleineren Schilfpolder zur Nachklärung durchströmt hat.

Um die Stoffkreisläufe zu schließen, ist nicht nur eine Rückführung der Klarwässer, sondern verstärkt auch der Klärschlämme anzustreben. Klärschlämme aus häuslichen Abwässern enthalten in der Regel nur sehr geringe Mengen bedenklicher Inhaltsstoffe. Sie könnten sowohl in der Landwirtschaft als auch zum Aufbau bereits verarmter Böden, z.B. in den Kuppenlagen, dienen.

G.5.6. Bewirtschaftung auf den Flächen für die Land- und Forstwirtschaft

Die Bewirtschaftung außerhalb der Vorrangflächen zur Steigerung der Nachhaltigkeit wird in der vorliegenden Planung nicht weiter differenziert. Unter den angenommenen Randbedingungen (vgl.

Kap. G.1, H.2) wäre durch das vorhandene Eigeninteresse der Land- und Forstwirte an einer nachhaltigen Landschaftsnutzung eine weitergehende Ausweisung von Schutzgebieten nicht erforderlich. Bei einer Rückkopplung des Verdienstes der "Wasserwirte" an die Beschaffenheit der Oberflächengewässer könnte eine anhaltende, auf die Nachhaltigkeit bezogene, Optimierung der Bewirtschaftung einsetzen. Neben der Bewirtschaftung von Feuchtgebieten könnten sich Wirtschaftsweisen entwickeln, bei denen die Verluste durch die direkte Kopplung mit Fangsystemen weiter reduziert würden. Möglich wäre auch eine auf geringer Grundfläche sehr intensive Produktion von Nahrungsmitteln, wie sie z.B. in Gewächshochhäusern in der Nähe von Neumünster, denkbar ist.

Solange die Randbedingungen für eine nachhaltige Flächenbewirtschaftung nicht gesetzt sind (Kap. H), ist eine Veränderung der Wirtschaftsweise kaum zu steuern. Schon jetzt können jedoch Maßnahmen im Bereich der Vorranggebiete richtungssicher durchgeführt werden.

G.5.7. Siedlungsentwicklung

Die Entwicklung der Siedlungen, Städte und Dörfer ist ursprünglich das Ergebnis einer Steigerung des gesellschaftlichen Wirkungsgrades. Der Zusammenschluß von Menschen ermöglichte es, die Effizienz durch Arbeitsteilung und Spezialisierung zu steigern und stoffliche Verluste zu senken. Die entstehenden Städte bündelten die Arbeitsprozesse räumlich und zeitlich: Markt, Verwaltung, Schulen und kulturelles Zentrum (im Mittelalter auch Schutz) sind gesellschaftliche Funktionen, die außerhalb der Stadt nur eingeschränkt realisierbar waren. Der Wirkungsgrad der gesamten Gesellschaft konnte dadurch erhöht werden. Die Notwendigkeit der Ver- und Entsorgung (Trinkwasser - Abwasser, Lebensmittel - Abfälle) stellte eine enge Rückkopplung der Stadt an ihre physische Basis, ihr Umland her, die auch die Ausdehnung der Stadt begrenzte (Ripl & Hildmann 1995).

Durch den Einsatz von Fremdenergie (z.B. Kohle, Erdöl) und dem darauf basierenden Maschineneinsatz in der sich entwickelnden Industrie nahm allmählich die Notwendigkeit ab, die gesellschaftlichen Funktionen der Stadt an einem Ort zu konzentrieren. Die Stadt hob nicht mehr den Wirkungsgrad für die Gesellschaft an, sondern senkte ihn ab. Die Struktur der Stadt begann mit abnehmender gesellschaftlicher Funktionalität und verringerter Effizienz durch angewachsene zentrale Verwaltungen auszuufern und wächst unkontrolliert in die Landschaft hinein (Ripl & Hildmann 1995). Die Versorgung dieser Siedlungsstrukturen ist nur mit einem hohen Anteil an Fremdenergie möglich, der aber langfristig nicht gesichert erscheint (Kap. H.2.1).

Die Siedlungen sind von dem Ideal einer "reifen" ZKS noch weit entfernt:

- ► Die Siedlungen wirtschaften nicht nachhaltig, da sie gewaltige Stoffverluste verursachen. Unmittelbar entstehen noch immer große Abfallmengen, deren Recycling zwar technisch weitgehend möglich ist, aber aus Kostengründen nur zu einem Teil auch durchgeführt wird. Für die Landschaft von größerer Bedeutung sind die irreversiblen Verluste mit dem Wasser. So weist das Einzugsgebiet der Stadt Neumünster mit die höchsten Stoffverluste im Stör-Gebiet auf (Karte Stoffverluste). Für Berlin konnte gezeigt werden, daß die Stoffverluste nur zu einem geringen Anteil aus dem Abwasser (etwa 10%) stammen (Ripl & Koppelmeyer 1990).

- ► Die Siedlungen stellen besonders schlecht gekühlte Flächen (hot spots) dar, die im Satellitenbild deutlich erkennbar sind (Karte Oberflächentemperatur). Dieses überwärmte "Stadtklima" wirkt sich auch auf die Verteilung der Niederschläge aus. Durch den hohen Anteil versiegelter

und unbegrünter Flächen ist von einer vergleichsweise geringen Biomasseproduktion auszugehen, so daß der thermische Wirkungsgrad der Stadt als sehr gering einzustufen ist (vgl. Karte Wirkungsgrad).

Für die Planung bedeutet dies (vgl. Abb. 90), daß

- ► die Vernetzung der Stadt mit dem Umland zu intensivieren ist und
- ► die in der Stadt erheblich erhöhte Energieflußdichte, die z.B. in der Überwärmung fühlbar wird, abzusenken ist.

Abb. 90: Das Schließen der Stoffkreisläufe ist auch in Städten die Vorraussetzung für eine nachhaltige Siedlungsentwicklung (aus: Ripl & Hildmann 1995).

Die Vernetzung mit dem Umland der Siedlungen sollte durch die Land- und Forstwirte erfolgen (Kap. G.1, G.5.5, G.5.6). In der Folge der geänderten Randbedingungen (Energie- und Bodenwertsteuer, vgl. Kap. H.2) könnten verstärkt Arbeitsplätze in der Landschaft geschaffen werden. Die Menschen werden dort benötigt, um eine intelligente, d.h. phasenangepaßte und stoffverlustarme Bewirtschaftung auf der Fläche durchzuführen. Dazu gehört auch die Bewirtschaftung der Feuchtgebiete. Statt eines fortgesetzten Wachstums der Städte wie Neumünster wäre von einer "Rückbesiedlung" ländlicher Bereiche auszugehen. Dort sollte eine ebenfalls energieaufwendige Zersiedlung der Landschaft vermieden werden. Statt dessen könnten die vorhandenen Dörfer und Siedlungen arrondiert werden. Die Bedeutung und Ausdehnung der Städte ergäbe sich wieder aus deren Funktionen.

Die enorme Aufheizung der vorhandenen Städte (Karte Oberflächentemperatur) läßt sich über das "Prinzip der feuchten Oberflächen" dämpfen: Durch die ständige Verdunstungskühle heizen diese sich tagsüber kaum auf. Emissionen haben unter diesen Bedingungen nur eine geringe Reichweite. Solche feuchten Oberflächen können in der Stadt mit einer intensiven Begrünung installiert werden: Dach- und Fassadenbegrünungen, Baumpflanzungen, Verdunstung des an-

fallenden Niederschlagswassers statt Ableitung in die Vorfluter oder Versickerung. Durch die bei entsprechend großflächiger Realisierung zu erwartende Rückkoppelung wird der Wasserkreislauf zunehmend kleinräumiger geschlossen, so daß ein scheinbares Wasserdefizit durch Kondensationsprozesse (Tau, Regen) ausgeglichen wird. Die optimal gekühlte Stadt weist ein ausgeglicheneres Klima auf.

G.6. Zeitliche Komponente

G.6.1. Planung als zeitlicher Prozeß

In einem Planungsprozeß wird zumeist der aktuelle Bestand analysiert und daraus ein wünschenswerter Sollzustand abgleitet. Dies wird der Realität jedoch nicht gerecht, da die Dynamik der Landschaft nicht einen einzigen räumlich definierten Idealzustand zuläßt, sondern nach einer zeitlich und räumlich zu beschreibenden Entwicklung strebt. Dabei werden die Aussagen mit zunehmender zeitlicher Distanz unschärfer.

Planung beinhaltet bereits eine erste zeitliche Komponente durch die Reihenfolge der zur Umsetzung vorgeschlagenen Maßnahmen. Die Umsetzung ist erst dann möglich, wenn sie politisch gewollt und durchgesetzt wird. Der zeitliche Rahmen für diesen Realisierungsprozeß ist jedoch durch den anhaltenden, sich nichtlinear entwickelnden, Verlustprozeß eingeschränkt. Da mittelfristig von einem Ansteigen der Energiepreise aufgrund begrenzter Vorräte bei weltweit wachsender Nachfrage (Schwellenländer, Osteuropa) auszugehen ist, werden die Handlungsspielräume zusätzlich eingeengt (vgl. Kap. H).

Die Verteilung der vorgeschlagenen Flächennutzungen ist keineswegs als statisch zu betrachten. So können heute geschädigte Flächen, die durch eine Maßnahme verbessert worden sind, später wieder anders genutzt werden: Polder, in denen Klarwasser zur Schilf- oder Fischproduktion eingesetzt worden ist, können nach einigen Jahren verlegt und wieder landwirtschaftlich genutzt werden. Ähnliches ist bei Waldflächen, die zur Bodenverbesserung beigetragen haben, denkbar; sie können sich z.B. langsam "verschieben".

Weniger dynamisch sind jedoch die an der Geomorphologie festgemachten Gebiete, wie z.B. die Fangsysteme, die auf die Gewässernähe angewiesen sind. Jedoch gibt es auch in der Natur eine Dynamik der Feuchtgebiete: Es ist von einer Abnahme der gewässerbegleitenden Feuchtgebiete nach einer entsprechenden Zunahme der Waldflächen auszugehen, da dadurch der Hydrograph vergleichmäßigt wird und die Abflußdynamik der Gewässer sinkt. Ähnlich kann bei stoffverlustarmer Landbewirtschaftung die Ausdehnung der Feuchtgebiete wieder zurückgenommen werden. Dies ist immer funktional davon abhängig zu machen, wie weit die stoffliche Retentionsleistung der Landschaft bereits entwickelt werden konnte.

G.6.2. Richtungssicherheit der Planung

Eine Maßnahme ist dann richtungssicher, wenn sie den übergeordneten Zielen nicht widerspricht, sondern zu deren Verwirklichung beiträgt. Oberziel für die hier vorgestellte Planung ist die Senkung der Stoffverluste. Die Maßnahmen einer Planung lassen sich nach ihrer Wirkung in eine räumliche und zeitliche Hierarchie einordnen. So wirkt die Anpflanzung eines kleines Waldes vor allem lokal, während sich ein entsprechendes Feuchtgebiet für einen größeren Teil eines Einzugsgebietes positiv auswirken kann. Die Anlage eines nur temporär genutzten Polders zur Nutzung des Klarwassers ist zeitlich kurzfristiger als die eines Waldes einzuordnen.

Sektorielle Zielvorstellungen, wie sie heute in den Fachplanungen formuliert werden, sind keineswegs richtungssicher, da innerhalb der geforderten Teilziele keinerlei funktionale Hierarchie besteht. So können z.B. Ziele des Naturschutzes mit denen der Wasserwirtschaft kollidieren, wie z.B. bei unterschiedlichen Vorstellungen zur Stauhaltung des Wassers in der Landschaft.

In der hier vorgestellten Planung ist mit dem Oberziel der Stoffverlustminimierung eine Zielhierarchie gegeben. Trotzdem erfüllen die vorgeschlagenen Maßnahmen auch wesentliche Ziele anderer Planungen. Dies soll am Beispiel des Natur-, des Hochwasser- und Klimaschutzes gezeigt werden.

G.6.2.1. Naturschutz

Das Hauptziel des heutigen Naturschutzes ist der Arten- und Biotopschutz. Durch die vorgeschlagenen Maßnahmen bliebe die Landschaft dauerhaft für die Vegetation und Fauna besiedelbar. Dies ist auch die zwingende Voraussetzung für den langfristigen Erhalt einer größeren Zahl von Arten. Durch die zusätzliche Anlage von Feuchtgebieten und Wäldern werden zudem eine Reihe neuer Biotope geschaffen, die von entsprechend spezialisierten, heute teilweise seltenen, Arten besiedelt werden können. Es ist jedoch auch mit einer Verschiebung des Gesamtartenspektrums zu rechnen, da Biotope mit einem nur geringen Wirkungsgrad, wie z.B. Trockenrasen oder trockene Heideflächen, nicht erhalten werden sollen. Dies sind aber ohnehin keine stabilen Biotope. In ihnen wird die Sukzession ständig durch Eingriffe des Menschen zurückgeworfen.

G.6.2.2. Hochwasserschutz

Durch die Feuchtgebiete und die Wälder in den Kuppenlagen wird die Retention des Wassers in der Landschaft deutlich erhöht. Abflußspitzen können durch die Feuchtgebiete an den Zusammenflüssen der Gewässer und in den Quellgebieten gedämpft werden. Insgesamt werden Hochwasserereignisse damit unwahrscheinlicher, wenngleich eine Quantifizierung dieses Prozesses derzeit nicht möglich ist.

G.6.2.3. Klimaschutz

Durch die Anlage der Feuchtgebiete und der Wälder auf Kuppenstandorten wird die Wasserspeicherkapazität der Landschaft deutlich erhöht. Durch die Vegetation wird zugleich mehr Wasser als vorher verdunstet. Durch die dabei bewirkte Kühlung werden Kondensationsprozesse, wie Tau oder Regen, wahrscheinlicher. Damit wird der Wasserkreislauf vergleichmäßigt und der Landschaftswasserhaushalt stabilisiert. Diese lokalen Prozesse sind vor allem während austauscharmer Wetterlagen in den Sommermonaten von Bedeutung. Der Rückgang der Niederschläge in den Sommermonaten (Kap. F.1.2) deutet darauf hin, daß gerade dieser lokale Prozeß durch die Entwässerung der Landschaft an Bedeutung verloren hatte. Der damit verbundenen Aufheizung der Landschaft würde durch die Neuanlage von Feuchtgebieten entgegengewirkt, die zeitliche Verteilung der Niederschläge könnte sich wieder dem ursprünglichen Muster annähern. Die befürchteten Klimaänderungen scheinen nach dieser Analyse eher auf den Veränderungen der Landschaft zu beruhen. Ihnen könnte durch regionale Maßnahmen auf größerer Fläche entgegengewirkt werden.

Gleichzeitig würden die Emissionen, z.B. durch Industrie oder Verkehr, lokaler begrenzt wirksam. Durch die geringere Vertikalbewegung der Luft infolge einer verbesserten Energieflußdichteabsenkung würden die Emissionen, z.B. Methan oder NO_x, weniger hohe Luftschichten erreichen

und damit auch nicht so weit verteilt (vgl. Abb. 91). Über die vergrößerte feuchte Oberfläche des höheren Anteils an Feuchtgebieten und Wäldern könnten mehr Partikel und Stäube festgelegt werden. Dort lägen sie dann in einer geringeren Konzentration vor. Durch die verstärkte Ausstattung der Landschaft mit Vegetation käme es auch zu einer vermehrten Bindung des als problematisch angesehenen Kohlendioxids, wenngleich dessen Bedeutung als Ursache der Klimaänderungen anzuzweifeln ist.

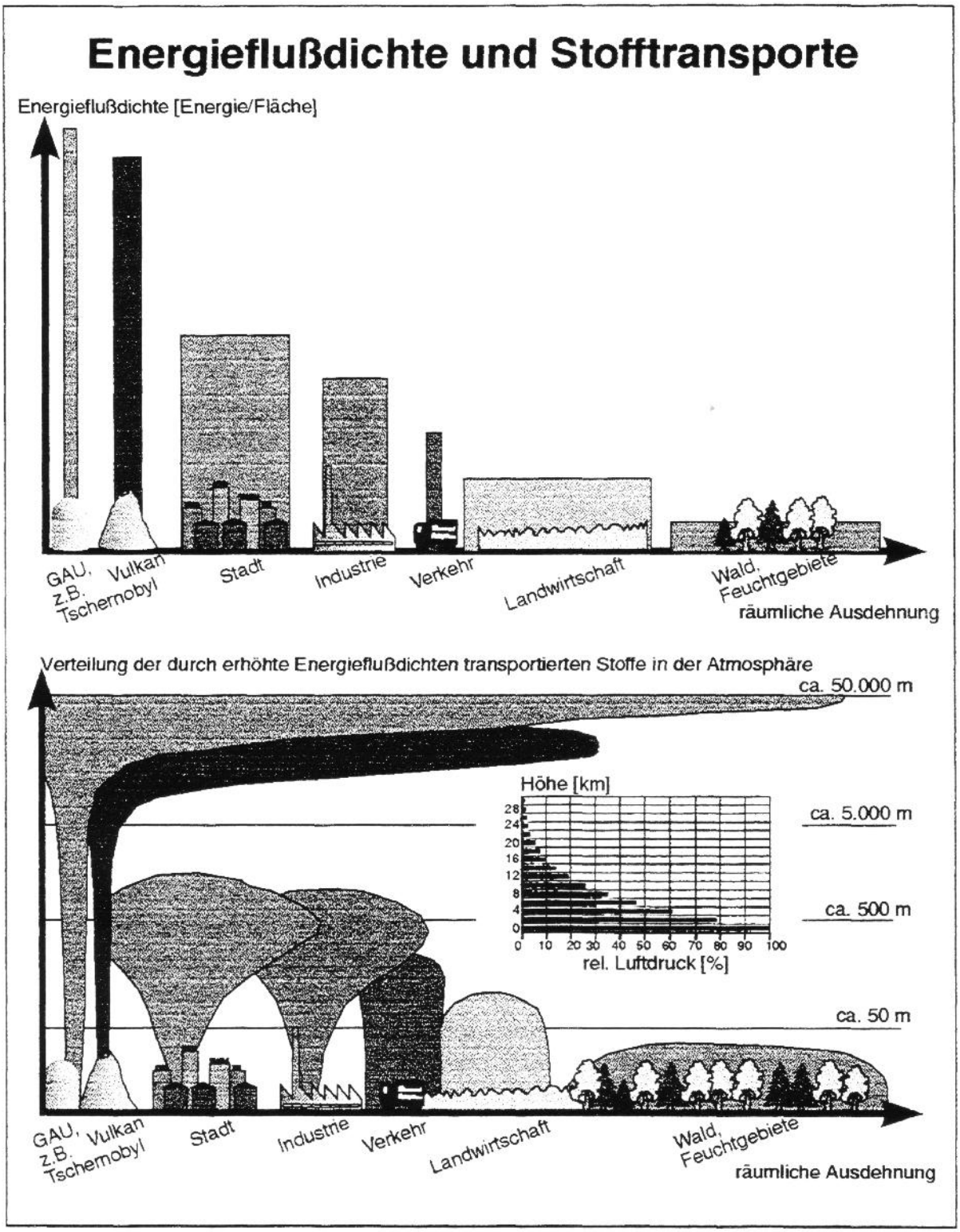


Abb. 91: Energieflußdichte und Emissionen.

H. Umsetzung

H.1. Nachhaltigkeit heutiger Industriegesellschaften

Eine Gesellschaft kann nur dann dauerhaft bestehen, wenn sie die Landschaft als physische Basis durch eine nachhaltige Bewirtschaftung erhält. Dazu müssen die Stoffkreisläufe über den Wasserkreislauf weitgehend ortskonstant aufrechterhalten und irreversible Stoffverluste aus der Landfläche in die Fließgewässer minimiert werden. Dieses auf dem Wasserhaushalt basierende Nachhaltigkeitsprinzip in der Bewirtschaftung ermöglicht nicht nur auf Dauer eine ausreichende Nahrungsmittelproduktion, sondern auch eine Wasserversorgung der Bevölkerung.

Derzeit liegen in der gesamten Bundesrepublik in den Einzugsgebieten der größeren Flüsse enorme Stoffverluste mit dem Wasserfluß vor (Tab. 7), was auf eine nicht nachhaltig funktionierende und damit langfristig instabile Gesellschaftsstruktur rückschließen läßt. Der Anstieg der Stoffausträge vom Land in die Gewässer in Zusammenhang mit der Intensivierung menschlicher Bewirtschaftung läßt sich anhand von Gewässersedimenten bis zur letzten Eiszeit zurückverfolgen (Abb. 92). Danach sind die Stoffausträge nach der Eiszeit zunächst mit der Entwicklung immer kurzgeschlossenerer Wasser- und Stoffkreisläufe auf ein Minimum zurückgegangen, mit zunehmender Besiedlung und Bewirtschaftungsintensität der Fläche jedoch wieder angestiegen. Enorme Schübe stellten dabei die großflächigen Waldrodungen sowie die Erfindung kostengünstiger Techniken zur Be- und Entwässerung dar (z.B. Pumpen, Drainage). Diese Maßnahmen erhöhten die Wechselfeuchte im Boden und damit die Stoffausträge mit dem Wasserfluß. Ihren Höhepunkt fanden die ansteigenden Stoffverluste mit der Erschließung fossiler und nuklearer Fremdenergie mit Beginn der Industrialisierung:

- Der Einsatz von Mineraldünger ermöglichte die teilweise Kompensation irreversibler Stoffverluste sowie die Bearbeitung basenarmer Flächen. Die Nutzungsverteilung, die zuvor neben den natürlichen Transportgegebenheiten auch von den natürlichen Standortvoraussetzungen abhing, konnte nun willkürlicher erfolgen. Dem natürlichen Ertragspotential eines Standortes sowie dem Erhalt der Bodenfruchtbarkeit durch Kreislaufwirtschaft wurde ein nur noch untergeordneter Stellenwert bei der Nahrungsmittelproduktion zugeordnet. Hervorzuheben ist jedoch, daß die Stoffverluste durch Düngung nicht vollständig ausgeglichen werden können und diese durch das fehlende Wasser- und Stoffrückhaltevermögen der Flächen zusammen mit der Düngung ansteigen.

- Die nun nahezu unbegrenzten Transportkapazitäten begünstigten zusammen mit der großflächigen Bewirtschaftungsintensivierung die Entwicklung von Nutzungsstrukturen, bei denen die Prozesse von Produktion, Konsumtion und Stoffabbau/-recycling räumlich und zeitlich vermehrt voneinander getrennt wurden. Beispiel dafür ist die Entwicklung von nahezu unbegrenzt wachsenden Verdichtungsräumen (Konsumtion) und deren über den Verkehr erfolgende Versorgung aus einem inzwischen weltweiten "Einzugsgebiet" (Produktion). Eine Stoffrückführung zu den Produktionsflächen findet bei den bis heute gängigen Entsorgungsstrategien (Mülldeponien, Abwasser) kaum statt. Infolge der so auf großer Fläche "parallelisierten Prozesse" wurden weiträumig die Stoffkreisläufe geöffnet. Demgegenüber erfolgten in vorindustriellen Gesellschaften - bedingt durch den nicht beliebigen Transport und Ersatz von Stoffverlusten unter dem limitierten (Sonnen)Energieangebot - Produktion, Konsumtion und Stoffabbau/-recycling noch vermehrt "sequentiell", d.h. unter Aufrechterhaltung eines größeren Anteils an lokalen Kreisprozessen.

Flußname Element	Einzugs- gebiet km^2	min. Verluste t/a	max. Verluste t/a	min. Verluste kg/ha/a	max. Verluste kg/ha/a
Elbe, Ca	96.080	1.220.369	1.394.656	127	145
Elbe, Mg	96.080	149.140	239.059	16	25
Elbe, K	96.080	73.425	217.637	8	23
Elbe gesamt	**96.080**	**1.442.934**	**1.851.352**	**150**	**193**
Rhein, Ca	105.389	1.734.728	3.802.148	165	361
Rhein, Mg	105.389	289.020	537.895	27	51
Rhein, K	105.389	134.530	267.751	13	25
Rhein gesamt	**105.389**	**2.158.278**	**4.607.794**	**205**	**437**
Weser, Ca	46.418	548.592	1.169.101	118	252
Weser, Mg	46.418	96.132	443.684	21	96
Weser, K	46.418	82.133	414.364	18	89
Weser gesamt	**46.418**	**726.857**	**2.027.149**	**157**	**437**
Donau, Ca	56.253	1.175.260	2.181.462	209	388
Donau, Mg	56.253	261.228	494.227	46	88
Donau, K*	-	-	-	-	-
Donau gesamt	**56.253**	**1.436.488**	**2.675.689**	**255**	**476**
Ems, Ca	12.672	104.353	354.044	82	279
Ems, Mg	12.672	10.435	39.243	8	31
Ems, K	12.672	12.609	39.670	10	31
Ems gesamt	**12.672**	**127.397**	**432.957**	**101**	**342**
Vechte, Ca	3.244	39.790	128.683	123	397
Vechte, Mg	3.244	2.015	10.606	6	33
Vechte, K	3.244	3.011	9.222	9	28
Vechte gesamt	**3.244**	**44.816**	**148.511**	**138**	**458**
Element	**Gesamt- fläche km^2**	**min. Verluste t/a**	**max. Verluste t/a**	**min. Verluste+ kg/ha/a**	**max. Verluste+ kg/ha/a**
Calcium	320.056	4.823.092	9.030.094	151	282
Magnesium	320.056	807.970	1.764.714	25	55
Kalium*	263.803	305.708	948.644	12	36
gesamt	**320.056**	**5.936.770**	**11.743.452**	**185**	**367**

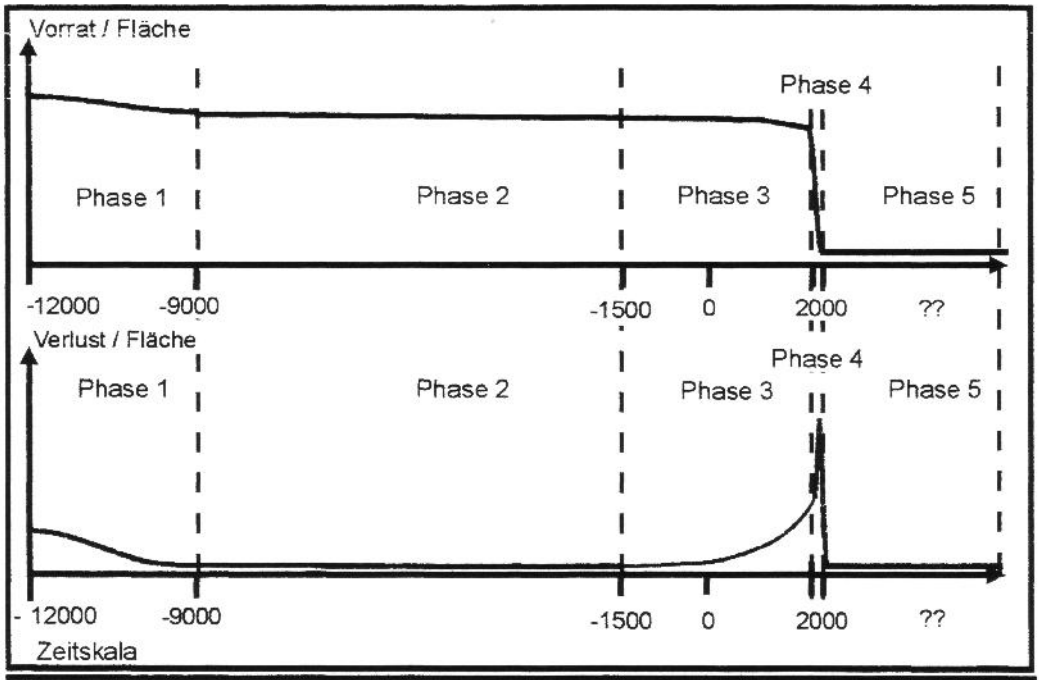
Tab. 7: Übersicht über die Jahresfrachten der Flußgebiete absolut und pro Hektar sowie die Gesamtverluste (Mittel 1991 bis 1993).

+ Durchschnittliche Werte.

* Die Kaliumkonzentration der Donau wird in Bayern nicht gemessen.

Gegenwärtige Verdichtungsräume besitzen nicht nur bezogen auf ihre Fläche maximale Stoffverluste mit dem abfließenden Wasser, sondern degradieren außerdem ihr versorgendes Umland. Neben der oben genannten fehlenden Stoffrückfuhr beruht dies insbesondere auf der weiträumig vergrößerten wechselfeuchten Bodenzone, Ergebnis der intensiven Land- und Forstwirtschaft sowie der zentralen Wasserversorgung über Grundwasser. Der dadurch herabgesetzte Wasser-

und Stoffrückhalt der Flächen hat irreversible Austräge mit dem Sickerwasser maximiert. Hervorzuheben ist dabei, daß bezogen auf die Gesamtmenge der ausgetragenen Stoffe der Anteil an Stickstoff und Phosphat, der über die Kläranlagen zum größten Teil zurückgehalten werden kann, äußert gering ist. Für das Einzugsgebiet der Stör (Schleswig-Holstein) beispielsweise liegt die Höhe der ausgetragenen Nährstoffe bei ca. 20 kg/ha/a Gesamtstickstoff und ca. 0,5 kg/ha/a Gesamtphosphor, die Gesamtmenge an ausgetragenen mineralischen Salzen aber bei ca. 1050 kg/ha/a (NaCl-bereinigt).



Phase Zeitraum	Verlustfaktor	pH	Leitfähigkeit µS/cm	Nährstoffe Faktor
Phase 1 (-12000-9000) Pioniervegetation	2 - 3	6,5 - 8	20 - 200	2 - 4
Phase 2 (-9000-(-1500)) Klimaxbedingungen	1	6,5 - 8	10 - 40	1
Phase 3 (-1500 +1850) Anthropogene Entwicklung	2 - 5	4 - 9	30 - 300	4 - 10
Phase 4 (1850-2000) Verwüstung	5 - 100	3 - 11	50 - 1000	10 - 100
Phase 5 (2000 - ???) Wiederherstellung ???	gering	4 - 10	absinkend	absinkend

EIGL05SW.CDR 07.11.04

Abb. 92: Entwicklung der Basenverluste der Landökosysteme seit der Eiszeit (abgeleitet und verändert nach Digerfeldt 1972).

Eine Umorientierung in Richtung einer stoffverlustärmer und daher dauerhafter funktionierenden Gesellschaftsstruktur erfordert die oberste Priorität des Nachhaltigkeitsprinzips auf politischer Ebene. Dort müssen die erforderlichen Rahmenbedingungen durch den Einsatz ökonomischer Steuerungsinstrumente erfolgen, die in ihrem Zusammenwirken zur positiven Selektion nachhaltigerer Wirtschaftsweisen führen. Nur dann besäße die Nachhaltigkeit in der Landnutzung auch

obersten Stellenwert bei der technisch-administrativen Ebene einerseits sowie der Land- und Forstwirtschaft auf Ebene der Flächenbewirtschafter andererseits. Eine am Wasserhaushalt orientierte, nachhaltige Landnutzung erfordert außerdem, daß den Flächenbewirtschaftern neben der Nahrungsmittel- und Rohstoffproduktion auch die Wasserwirtschaft und die Entsorgung von Haushaltsabfällen zugesprochen wird. Dabei sind Entwicklungsperspektiven zu eröffnen, die ein maximales Interesse an einer zunehmend nachhaltigen Bewirtschaftung der Landschaft zur Folge hätten.

H.2. Politische Rahmenbedingungen zur Selektion nachhaltigerer Bewirtschaftungsformen

In der Diskussion um den Einsatz marktwirtschaftlicher Instrumente in der Umweltpolitik standen bisher zwei Instrumententypen im Vordergrund. Bei diesen handelt es sich neben dem Konzept der Abgaben, welches aus finanzwissenschaftlicher Sicht übergeordnet für Ökosteuern, Umweltabgaben und Umweltsonderabgaben steht, auch um das der Umweltzertifikate. Bei der Zertifikatlösung definiert der Staat einen tolerierbaren Umfang an Umweltnutzung (z.B. Schadstoffemissionen) und gibt in diesem Umfang handelbare Umweltnutzungsrechte heraus (Rat v. Sachverständigen für Umweltfragen 1994). Über die Vermarktung an Nutzungsrechten soll gewährleistet werden, daß "Umweltnutzungen dort vorgenommen werden, wo die geäußerten Zahlungsbereitschaften die dringlichsten Verwendungen anzeigen." (Rat v. Sachverständigen für Umweltfragen 1994:150). Ziel ist, eine Übernutzung natürlicher Ressourcen aufgrund eines ungehinderten - weil kostenlosen - Zugriffs zu verhindern. Jedoch erfolgt weder über die Abgabenregelung noch über die Vermarktung von Nutzungsrechten eine Steuerung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der jeweiligen Umweltnutzer. Dadurch sind in der Umsetzung dieser Instrumente Lösungen denkbar, die die gewünschte Umweltqualitätsteigerung nicht zum Tragen kommen lassen. Dies wäre z.B. der Fall, wenn durch die Lokalisation von Betrieben Gewässerabschnitte mit Abfallstoffen belastet werden würde, die für die Trinkwassernutzung von Bedeutung sind. Ein weiteres Beispiel bildet die nicht landwirtschaftliche Nutzung von nachhaltig bewirtschaftbaren, ertragsreichen Lagen. Dadurch wird ein größerer Anteil stoffausträgsgefährdeter Standorte in die Nahrungsmittelproduktion einbezogen und somit auf größerer Fläche die Fruchtbarkeit des Bodens beschleunigt abnehmen. Nicht gegeben ist durch die beschriebenen Instrumente außerdem die Rückkopplung der Nutzungsrechte an die sich ändernden Randbedingungen in einer dynamischen Landschaft, d.h. an die zunehmende Verknappung der Ressourcen durch ihre fortwährende Nutzung an einer Stelle (z.B. Nährstoffverarmung des Bodens durch Landwirtschaft) und ihr verbessertes Angebot an anderer Stelle (z.B. Akkumulation ausgewaschener Nährstoffe in unbewirtschafteten Niederungsbereichen).

Die nachfolgend beschriebenen ökonomischen Instrumente unterscheiden sich von den vorhergehend genannten dadurch, daß sie zur dauerhaften Sicherung der lebensnotwendigen Ressourcen Boden, Wasser und Luft die raum-zeitliche Bewirtschaftung steuern. Dies erfolgt unter Orientierung an den natürlichen Regelmechanismen zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Landschaft.

Am Beispiel natürlicher Systeme wurde verdeutlicht, daß diese erst unter limitierten Randbedingungen (begrenztes Angebot an Energie sowie an Nährstoffen bzw. besiedelbarem Raum) funktionale Kopplungen entwickeln, die zu ihrer Wirkungsgradsteigerung im Sinne einer Nachhaltigkeitssteigerung führen (Kap. B.2.3). Auch im Markt könnten systemimmanente Limitierungen z.B. über das Preisgefüge geschaffen werden, um umweltangepaßtes, d.h. nachhaltiges Handeln zum Selektionskriterium werden zu lassen. Zur Selektion nachhaltigerer Wirtschaftsweisen werden

analog zu ökosystemaren Regelungsmechanismen folgende ökonomische Steuerungselemente vorgeschlagen (Ripl 1995):

- Lineare Energiesteuer (entspricht dem zeitlich strukturierten und dadurch zeitlich limitierten Energieangebot in der Natur).

- Progressive Bodenwertsteuer (entspricht der Limitierung des Raumes bzw. des Angebotes an Nährstoffen und Basen in der Natur) unter weitestgehender steuerlicher Entlastung der Dienstleistung.

- Individueller Bodenwertfreibetrag als soziale Basis anstelle eines sozialen Netzes (entspricht der Grundausstattung eines Standortes an Nährstoffen und Basen in der Natur).

H.2.1. Energiesteuer

Über die Energiesteuer würde der Verbrauch fossiler und nuklearer Energieträger linear besteuert. Die so künstlich limitierte Energie erforderte die Erschließung erneuerbarer Energiequellen und die Einsparung von Energie durch ihre verbesserte Ausnutzung. Einher ginge diese Energiesteuer mit einem Anstieg der Transportkosten und demzufolge mit einer Reduzierung der räumlichen Trennung von Produktion, Konsumtion und Stoffrecycling. Die energetisch bedingte Transportlimitierung führte somit zu einer allmählichen räumlichen Umverteilung der Nutzungsstrukturen mit kurzgeschlosseneren Stoffkreisläufen.

Durch die weltweit wachsende Nachfrage nach fossiler Energie (z.B. Schwellenländer, Osteuropa) und die abnehmenden Vorräte ist mittelfristig von einem erheblichen Anstieg der Energiepreise auszugehen. Die schon vorher einsetzende künstliche Verteuerung der Energie ermöglichte mit den so eingenommenen Steuermitteln die Förderung der Entwicklung und Umsetzung energiesparender Technologien. Dieser Prozeß wäre zum Zeitpunkt einer tatsächlichen Energieverteuerung kaum mehr zu bezahlen und bärge erhebliche Risiken für den Bestand der Gesellschaft.

H.2.2. Bodenwertsteuer und Bodenwertfreibetrag

Durch die Energiebesteuerung müßte bei gleichbleibenden Bedürfnissen die Nachfrage unter geringerem Transportaufwand befriedigt werden. Durch die so bewirkte Limitierung des zur Verfügung stehenden Bewirtschaftungsraumes stiegen die Anforderungen an dessen Produktivität. Dies machte die möglichst effiziente räumliche Anordnung (Allokation) der Nutzungsstrukturen erforderlich. Geeignetes Steuerungsinstrument dafür wäre eine Bodenwertsteuer in Verbindung mit einem individuellen Bodenwertfreibetrag. In dieser am Verkehrswert des Bodens ausgerichteten Steuer schlüge sich die Verminderung des Bodenwertes durch Basenverluste bei der Bewirtschaftung als finanzielle Belastung nieder. Eine Bodenbewirtschaftung mit minimierten Verlusten besäße entsprechende Wettbewerbsvorteile durch kostengünstigere, weil abgabenfreie Produktion. Mit der Bodenwertsteuer verteilte sich somit die Bewirtschaftung räumlich besser. Gleichzeitig hätte diese Abgabe zum anderen auch dadurch eine "raumlimitierende Wirkung", daß der räumlichen Expansion jedes Marktteilnehmers sowie der Bodenspekulation der progressive Bodenwertsteueranstieg entgegengewirkte.

Diese Steuer sollte beim Eintritt des Individuums in die aktive Gesellschaft mit einem Bodenwertfreibetrag gekoppelt werden. Der Freibetrag würde ebenso wie die Steuer in der Progressivität

demokratisch festgelegt werden und anstelle eines sozialen Netzes die Lebensgrundlage für jedes Gesellschaftsmitglied schaffen. Der Freibetrag legte den Wert eines Bodens fest, der steuerfrei bewirtschaftet werden könnte. Dieser Freibetrag könnte entweder durch den Aufkauf und die Bewirtschaftung von Land realisiert werden, er könnte aber auch verpachtet und so als Grundlage einer beispielsweise städtischen Existenz verwendet werden. Grundstücke könnten wegen ihrer Größe oder aufgrund hoher Nachfrage einen Wert besitzen, der steuerlich soweit belastet würde, daß er nicht mehr vollständig vom eingeräumten Freibetrag gedeckt werden könnte. Dieses Land könnte daher nur derjenige besitzen, der über die Bodenbewirtschaftung hinaus über Einnahmen zur Steuerdeckung verfügt (z.B. aus unbesteuerten Dienstleistungen). Aufgrund der Progressivität der Besteuerung sänke bei einem einzelnen Bewirtschafter der Grenznutzen mit der Größe und dem Wert des Grundstücks, weshalb eine gemeinschaftliche Bewirtschaftung durch mehrere Inhaber von Freibeträgen bzw. unter Pacht von Freibeträgen (v.a. von der Stadtbevölkerung) angestrebt würde.

H.2.3. Auswirkungen der Energie- und Bodensteuer auf die Wirtschaftsstruktur

Über die Energie- und Bodenwertsteuer in Verbindung mit dem Bodenwertfreibetrag würde eine Wirtschaftsstruktur geschaffen werden, in der jede ökonomische Aktivität, die über die Basisabsicherung hinausgeht, einem wirkungsgradabhängigen Selektionsdruck ausgesetzt wäre. Jede individuelle unternehmerische Aktivität müßte, um billig anbieten zu können, mindestens so effizient (verlustarm) wie die Konkurrenz wirtschaften. Die Marktwirtschaft würde so zu einem die Gesellschaft optimierenden Regelmechanismus. Dadurch käme es allmählich zur Selektion von einer Wirtschaftsstruktur, in der der Anteil der Kreislaufwirtschaft ansteigt. Verbunden mit einer zunehmend vollständigeren Kreislaufführung erhöhte sich die Stoffzyklusfrequenz (z.B. in der Nahrungsmittelproduktion). Dagegen verringerte sich die Produktzyklusfrequenz (z.B. bei Investitionsgütern), welche ein Maß für die Langlebigkeit von Produkten darstellt. Durch diese Art von Besteuerung hätte die Wirtschaft einen geringeren Nettostoffdurchsatz bei gleichmäßigerem ortsgerechten Energieeinsatz. Der Verzicht auf Besteuerung von Dienstleistungen unter den oben genannten Bedingungen verstärkte in einer "ökologisierten" Volkswirtschaft die bestehenden Tendenz zur Dienstleistungsökonomie (Ripl 1995), er wäre somit mit einem lokalen Beschäftigungsimpuls verbunden. In einer so umstrukturierten industrialisierten Gesellschaft läge das Wachstum ausschließlich im Wirkungsgrad, d.h. in der nachhaltigen Funktionsweise.

H.3. Bewirtschafterebene

H.3.1. Der Wasserwirtschaft betreibende Landbewirtschafter

Voraussetzung für den Rückhalt der im Oberboden nur begrenzt vorhandenen Basen- und Hauptnährstoffe sowie für eine ausreichende Ergiebigkeit und Trinkqualität des Wasserabflusses ist ein hoher landschaftlicher Wirkungsgrad. Bei einem hohen landschaftlichen Wirkungsgrad unterliegt das Wasser durch Speicherung über die organische Detritusauflage sowie über seine häufige, kleinräumige Zirkulation unter dem im Tag-Nacht-Rhythmus wirksamen Energiepuls einem optimalen Rückhalt in der Fläche. Im Sommer, dem Zeitraum der geringsten Wasserführung der Gewässer, ist dadurch eine gleichmäßige Wasserspende an die Fließgewässer gegeben. Einträge gelöster Stoffe sind durch deren Fixierung in der Biomasse und durch verringerte Freisetzungsprozesse im Boden (erhöhte Dauerfeuchte) minimiert.

Voraussetzung für die Entwicklung eines stabilen (und stoffverlustarmen) Landschaftswasserhaushaltes wäre somit die möglichst großflächige Wiederausstattung des Einzugsgebietes mit Vegetation, einhergehend mit der gezielten Anlage von Stoffretentionsstrukturen in Niederungen und Senken. Zur Wiederherstellung einer nachhaltig funktionierenden Landschaft ist daher die Wasserwirtschaft der Landbewirtschaftung (Forst-, Landwirtschaft) zwingend zuzuordnen. Diese wäre für die Bereitstellung des Lebensmittels Wasser in sauberen Oberflächenwasserströmen mit vergleichmäßigtem Dargebot verantwortlich und würde nach Menge und Güte des Wassers marktgerecht bezahlt werden. Dabei könnten sich die Bewirtschafter der Flächen zu "Wassergenossenschaften" zusammenschließen, welche den Markt (z.B. wassernutzende Industrie und Städte) beliefern. Das Trinkwasser müßte, um nicht durch die Dynamisierung des Bodenwasserhaushaltes die Stoffauswaschungen zu begünstigen, statt aus Grundwasser allmählich zu immer größeren Anteilen aus Oberflächenwasser (Flußwasser) gewonnen werden. Die höchsten Erträge würde eine Wassergenossenschaft zu Spitzenbedarfszeiten im Sommer erwirtschaften, wenn sie Trinkwasser in ausreichender Menge und hoher Qualität anbieten könnte. Qualitativ hochwertiges Wasser müßte sich durch geringste Stofffrachten, wozu auch Basenkationen zählen, auszeichnen.

In einem solchen Bewirtschaftungssystem könnte auch die Entsorgung "belasteter" Klarwässer zumindest zum Teil in bewirtschafteten, nettoproduktiven Vegetationsstrukturen übernommen werden:

- Vorgereinigtes, basen- und nährstoffhaltiges Abwasser aus der Stadt könnte über z.T. schiffbare Kanäle zu einem Produktionsgürtel in der Nähe der Städte und Gemeinden geleitet werden. In diesen Produktionsflächen könnten die pflanzenverwertbaren Stoffe durch Selektionsprozesse an der Wurzel aus dem Wasser zurückgewonnen werden, nichtlösliche und z.T. toxische Stoffe (z.B. Schwermetalle) würden verdünnt sowie in Sediment und Boden fixiert und damit unschädlich gemacht werden.

- Die natürlichen Flüsse wären dadurch weitgehend von Stofffrachten und Verkehr entlastet. Daher könnte über sie Trinkwasser mit ausreichender Qualität bereitgestellt werden. Diese Form der Trinkwassergewinnung hätte einen weniger dynamisierten Bodenwasserhaushalt und dadurch auf Dauer eine hohe Qualität des gewonnenen Wassers zur Folge.

H.3.2. Ökologische und ökonomische Effekte der wasserhaushaltsbasierten Landbewirtschaftung

Könnten auf großer Fläche Strukturen mit hohem Wirkungsgrad errichtet werden, wäre damit eine dauerhafte Sicherung der lebensnotwendigen Güter Boden, Wasser und Luft gegeben:

- Verlustminimierte Strukturen hätten eine Landbewirtschaftung zur Folge, bei der großflächig die Evapotranspiration maximiert ist. Klimawirksame Emissionen wären verringert, da sie in bodennahe, ortsgebundene Reaktionszyklen eingebunden wären (Bsp. Kohlendioxid). Außerdem würden sich Immissionen nicht nur in einzelnen, kleinen Kühlflächen, sondern über einen größeren Raum verteilen und damit in geringerer Konzentration niederschlagen.

- In einer nachhaltig funktionierenden Landschaft würde außerdem der stabilisierte Wasserhaushalt aufgrund geringerer Stoffausträge zu einer verbesserten Wasserqualität und zum langfristigeren Erhalt der Bodenfruchtbarkeit führen.

In bezug auf die wirtschaftliche Bedeutung einer wasserhaushaltsbasierten, nachhaltigen Landbewirtschaftung sind folgende Punkte zu nennen:

- ► Die Landwirtschaft könnte sich von einem fortwährenden Subventionsempfänger zu einer eigenständigen Versorgungswirtschaft emanzipieren.
- ► Die finanziellen und administrativen Maßnahmen zur Stützung der Land- und Forstwirtschaft könnten weitgehend abgebaut werden. Die Volkswirtschaft der Industrieländer bzw. der gesamte Weltmarkt würden weitgehend von unproduktiven Verwaltungen und Handelshemmnissen des Agrarsektors befreit.
- ► Die Kommunen könnten zunehmend von der Aufgabe entbunden werden, Wasserreinigung zu betreiben.

Über den Wasserhaushalt könnten somit - unter Einsatz neuer biotechnologischer Methoden und Produkte - Stoffflüsse zwischen den Orten des Konsums und der Produktion gelenkt und die Stoffkreisläufe zunehmend vollständig geschlossen werden. Die so gebildeten Nutzungsstrukturen würden eine nachhaltigere industrielle Entwicklung einleiten und durch die zuvor beschriebenen Instrumente der Besteuerung in Verbindung mit dem Bodenwertfreibetrag in ihrer Wirkung zunehmend optimiert werden.

H.4. Technisch-administrative Ebene

Derzeit erfolgen Maßnahmen zur Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen fast nur auf dem Gesetzes- und Verordnungsweg. Sektoral werden für die einzelnen Umweltgüter Boden, Wasser und Luft Grenzwerte für die erwünschte Qualität definiert und deren Einhaltung und auf dem Weg des technischen Umweltschutzes unter hohem Energie- und Ressourceneinsatz angestrebt. Bezogen auf den Sektor der Wasserversorgung läßt sich dabei der Trend einer sich immer mehr verselbständigenden Wasserwirtschaft feststellen, welche durch Eingriffe in den Wasserhaushalt der Landschaft deren nachhaltige Nutzung herabsetzt. Beispielsweise kommt bei der Trinkwasserversorgung der Förderung von Grundwasser nach wie vor elementare Bedeutung zu. Die flächig anwachsenden Trinkwassereinzugsgebiete stellen jedoch neben drainierten und intensiv bewirtschafteten Land- und Forstwirtschaftsflächen Bereiche mit einer dynamisierten Bodenwasserbewegung und damit einer erhöhten Bodenauslaugung dar. Mit der Auswaschung der löslichen Hauptnährstoffe und Basen steigt im Oberboden der Anteil schwerer löslicher, toxischer Stoffe (z.B. Schwermetalle) und auch die Wahrscheinlichkeit von deren Transport in Richtung des Grundwassers (Kap. B.). Eine Verlagerung der Wasserwirtschaft von der technisch-administrativen Ebene auf die der Flächenbewirtschaftung in der oben beschriebenen Form machte die öffentliche und der Nachhaltigkeit der Landschaft abträgliche Wasserwirtschaft überflüssig. Statt dessen käme der technisch-administrativen Ebene dieses Sektors hauptsächlich eine beratende Funktion zu, z.B. bei der Ausweisung von Vorranggebieten für den Wasserhaushalt (Kap. G.3) oder den Umsetzungsmaßnahmen der Abwasseraufbereitung. Damit entwickelte sie sich unter den marktwirtschaftlichen Selektionsmechanismen der Energie- und Bodenwertbesteuerung im wesentlichen zu einem Dienstleistungssektor, der zur Steigerung der Nachhaltigkeit der Landschaft beitrüge.

H.5. Ausblick

Die Schließung der Stoffkreisläufe besitzt in den heutigen Industrienationen weder in der Politik, noch nachgeordnet in der Planung und Flächenbewirtschaftung die erforderliche Priorität. Zu-

grunde liegt dem, daß die Verluste durch den Einsatz von Fremdenergie zur Zeit noch teilweise kompensiert werden können. Vor dem Hintergrund des weltweit begrenzten Vorkommens an Energieträgern stellt jedoch eine energie- und stoffverlustarme Kreislaufwirtschaft die einzige Möglichkeit dar, die natürlichen Lebensgrundlagen des Menschen dauerhaft zu sichern. Unter Orientierung an den Regelmechanismen natürlicher Systeme zur Nachhaltigkeitssteigerung sollen die beschriebenen Strategien auf politischer, technisch-administrativer und bewirtschaftender Ebene eine Möglichkeit darstellen, den Wirkungsgrad der Landschaft, die als gesellschaftliches Trägersystem betrachtet werden kann, zu steigern. Nach einer Phase der (stoffverlustreichen) wirtschaftlichen Expansionsstrategie würde somit eine Umstrukturierung eingeleitet werden, bei der wirtschaftliches Wachstum an eine Wirkungsgradsteigerung (Absenken von Stoffverlusten) gebunden wäre. Auf diese Weise entstünde analog und auf der Basis einer sich selbst optimierenden Natur ein nachhaltig funktionierendes Gesellschaftssystem.

I. Zusammenfassende Projektbewertung

I.1. Projektbewertung

Herangehensweise
Als besonders vorteilhaft hat sich die Verwendung des Top-Down-Ansatzes erwiesen. Auf seiner Grundlage konnten die während der Auswertung gestellten Hypothesen und aufgetretenen Fragen relativ schnell eingeordnet und geprüft werden (z.B. zur Schwermetall-Anreicherung, Kap. F.1.1.6).

Der Ansatz des ETR-Modells hat sich bei der Prozeßbetrachtung bewährt, da die allgemeine Prozeßbeschreibung als logische Abfolge von Energie als treibendem Potential, Transportphase und schließlich Reaktion zu einer klaren Strukturierung verhalf. Dies erleichterte z.B. die Analyse der Stoffaustragsprozesse. Die Modellvorstellung des energiedissipativen Prozesses konnte auf verschiedene Ebenen, z.B. der Zönosenkernstruktur, der Fließgewässer oder der Bodenchemie, übertragen werden.

Eingesetzte Methoden und Hilfsmittel
Bei der Datenanalyse war ein entscheidender Vorteil, daß durch die eigene Datenaufbereitung nicht nur Mittelwerte, sondern auch die zugehörigen Variationswerte und Verteilungen dargestellt werden konnten. Dadurch konnten Zusammenhänge eher erfaßt werden, die mit einem alleinigen Mittelwert oder Regressionskoeffizienten kaum aufgefallen wären.

Der Ansatz der Regionalanalyse, die Teilgebiete relativ zum Gesamtgebiet und relativ untereinander zu vergleichen, hat sich bewährt. Damit wurde z.B. auch die effiziente Klassifizierung der Konzentrationen und Frachten in den Fließschemata erst ermöglicht, indem die Klassifizierung auf der Gesamtverteilung basierte. Die Eigenheiten einzelner Teileinzugsgebiete, wie z.B. des Himmelreichbaches mit besonders hohen Abflüssen, wurden so rasch deutlich.

Die Kopplung zwischen thermischem und chemischem Wirkungsgrad ist bisher nur in Ansätzen vollzogen worden, da aufgrund der sehr kurzen Heuristik eine Einschätzung der Phasenlage in vielen Einzugsgebieten nicht möglich war. Es sollte deshalb angestrebt werden, ein in seinem Umfang reduziertes Monitoring weiter fortzuführen.

Die Sonden zur zeitlich hochauflösenden Messung der unterschiedlichen Parameter (Wasserstand im Gewässer, Bodenwasserstand, Leitfähigkeit, Temperatur) haben sich im Gelände bewährt. Durch die kompakte Bauform traten kaum Beschädigungen auf; die Datenakquisition war sehr zuverlässig.

Zur kleinräumigen Differenzierung sollten ursprünglich die Berechnungsabschnitte in kleinere Rechenabschnitte unterteilt werden. Die Abflußwerte sollten dann für diese mit dem Programm NASIM unter Einsatz der im Gelände erhobenen Daten simuliert und die fehlenden Pegeldaten an den Meßstellen ergänzt werden. Trotz eines hohen Zeitaufwandes für die Bearbeitung konnten, offensichtlich aufgrund von Programmängeln, keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden.

Der Einsatz der Fernerkundung zur Entwicklung eines Instrumentes für die Bestimmung des Handlungsbedarfes zeigt sich vielversprechend. Die angestrebte automatische Auswertung multitemporaler Satellitenbildszenen konnte nicht mehr erreicht werden. Erste Vergleiche und Aus-

sagen zur Temperaturverteilung (Thermalkanal des Landsat 5) unterschiedlicher Zeitpunkte waren dennoch möglich.

Vorschläge zur Umsetzung
Aus den Kenntnissen zum Stoffaustragsprozeß konnten schon recht früh allgemeine Aussagen zur Bewirtschaftung abgeleitet werden. Dazu war es notwendig und hilfreich, die Ziele hierarchisch zu betrachten und auf Plausibilität und Richtungssicherheit zu prüfen. Im weiteren Verlauf war es möglich, diese Ziele in Form einer Rahmenplanung zu konkretisieren. Die dabei ausgewiesenen Vorranggebiete sind zugleich Ansatzpunkt einer zeitlichen Prioritierung der vorgeschlagenen Maßnahmen.

Innerhalb des Projektes wurden nicht nur die hohen Stoffverluste festgestellt, sondern auch deren Bedeutung für die Gesellschaft dargestellt und eine Lösungsstrategie aufgezeigt.

Allgemeines
Für die Durchführung des Projektes und die Auswertung der Ergebnisse war ein ständiger Diskussionsprozeß notwendig. Dabei erwies es sich von Vorteil, daß die Bearbeitergruppe während des gesamten Projektverlaufes noch gut überschaubar blieb. Durch die räumliche Distanz zwischen den an diesem Projekt beteiligten Institutionen war die Kommunikation jedoch teilweise erschwert. Bei zukünftigen Projekten sollte dies behoben werden.

Die Diskussionen mit Vertretern der Landesbehörden waren sehr hilfreich. Gegenstand bildete dabei u.a. die als theoretisierend empfundene Sprache des Berichts. Hierzu ist hervorzuheben, daß die verwendete Modellvorstellung des energiedissipativen Prozesses mit eigenen Begriffen einhergeht. Diese wurden bei der Landschaftsanalyse, -bewertung und -planung beibehalten, um durch möglichst eindeutig und unmißverständlich definierte Begriffe das Verständnis zu erleichtern.

I.2. Übertragbarkeit

Das grundlegende Problem der Stoffverluste zeichnet sich für ganz Mitteleuropa ab. Dies zeigt der Vergleich aller deutschen Fließgewässersysteme (Kap. H.). Deshalb ist das Leitziel, die als Minimierung der Stoffverluste definierte Nachhaltigkeit zu steigern, auch in ganz Europa richtungssicher. Die ökonomischen Lösungsansätze des Wasserwirtes sowie der Besteuerung der Energie und des Bodenwertes anstelle der Dienstleistung sind innerhalb der Europäischen Union genauso diskussionswürdig wie im Untersuchungsgebiet.

Deutliche Unterschiede sind jedoch in der natürlichen Ausstattung der Einzugsgebiete zu erwarten. Hierzu zählen Basenvorräte und verwitterbares Material, Art und Menge der Vegetation, Geomorphologie und Niederschlagsverteilung. Daher sind zwar die Lösungsansätze, nicht aber die konkreten Lösungsvorschläge übertragbar. Vielmehr ist es erforderlich, für jedes Einzugsgebiet diese Planungen regional anzupassen.

Die Methodik und Herangehensweise des Projektes dürfte weitestgehend auch in anderen Wassereinzugsgebieten Mitteleuropas verwendbar sein. Die Messung der Basisgrößen, wie Abfluß, Niederschlag und Konzentrationen, sind ohnehin weit verbreitete Methoden. Hierbei ist in besonderem Maße auf die Konsistenz solcher Daten zu achten und diese anhand eigener Meßstellen zu überprüfen. Satellitendaten werden bereits weltweit eingesetzt; jedoch ist zu beachten, daß im stärker reliefierten Gelände durch Verschattungen die Interpretation erschwert ist.

I.3. Forschungs- und Handlungsbedarf

Handlungsbedarf

Die Dringlichkeit des Handlungsbedarfes ist durch die heute hohen Stoffverluste von über 1000 kg/ha/a im Störgebiet aufgezeigt worden. Ein Fortschreiten der Stoffverluste wird gravierende Änderungen im Wasserhaushalt der Landschaft, der Vegetationsdecke und dem Klima nach sich ziehen, die durch die zur Neige gehenden Vorräte noch beschleunigt werden. Wenn die Landschaft dauerhaft als Tragwerk der Gesellschaft erhalten bleiben soll, ist eine Änderung der derzeitigen, mit hohen Stoffverlusten behafteten Wirtschaftsweise in eine nachhaltige Bewirtschaftung unverzichtbar. Diese Umstellung muß so schnell wie möglich erfolgen. Der zu erwartende Anstieg der Energiepreise (Kap. H.) wird durch die Verteuerung der Transporte die Gesellschaft zur verstärkten Nutzung der ortsnahen Landschaftsteile zwingen. Noch könnte eine Vorwegnahme dieser Verteuerung durch eine veränderte Besteuerung (Kap. H.2) diese Umstellung finanzieren.

Um die dazu notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen, ist die Politik gefordert. Ihre Aufgabe ist es,

- durch die Änderung der derzeitigen Agrarsubventionspolitik den Land- und Forstwirten durch die marktmäßige Entlohnung des Oberflächenwassers zur Verwendung als Trinkwasser eine stabile und sich nicht jährlich ändernde ökonomische Grundlage zu bieten;

- durch die Besteuerung von Energie und Bodenwert Rahmenbedingungen zu schaffen, die eine ressourcenschonende, regionale Ökonomie ermöglicht und

- die rechtlichen Vorgaben an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Dabei sollte die Wasserwirtschaft der Land- und Forstwirtschaft zugeordnet werden.

Durch die so gesetzten Rahmenbedingungen könnte der Verwaltungsaufwand erheblich verringert werden.

Forschungsbedarf

Für die Umsetzung der im Bericht vorgestellten Planungsvorschläge ist in erster Linie eine politische Weichenstellung notwendig. Weitere Forschung kann dann dazu beitragen, durch die Fortsetzung der Heuristik die landschaftlichen Prozesse noch besser zu verstehen und das Systemverständnis zu erweitern. Damit wären genauere Aussagen zur Bewirtschaftung möglich. Gleichzeitig kann die Veränderung des Landschaftshaushaltes und damit auch der Erfolg einer veränderten Wirtschaftsweise erfaßt werden. Das wachsende Systemverständnis wiederum ermöglicht einen immer effizienteren Einsatz der begrenzten finanziellen Mittel zur Steigerung der Nachhaltigkeit.

Oft ermöglichen erst ausreichend lange Zeitreihen, die Aussagen auf eine solide Basis zu stellen und langfristige Prozesse zu identifizieren. Deshalb sollte in jedem Fall ein vereinfachtes Monitoring im Stör-Gebiet fortgesetzt werden.

Anzustreben ist auch eine weitere Konkretisierung der Planung, die möglichst großmaßstäblich, wie z.B. einzelne Teileinzugsgebiete, abdecken sollte. Vorraussetzung dafür ist jedoch der politische Wille zur Umsetzung der Ergebnisse und die ökonomische Sicherung der Landwirte. Die tatsächliche Realisierung einer nachhaltigen Bewirtschaftung wird in der Anfangsphase auch eine

Reihe von Versuchen nötig machen, z.B. zum effizienten Aufbau und zur Bewirtschaftung von Feuchtgebieten.

J. Literatur

Bartels, U. (1989): Untersuchung ausgewählter Quellbereiche im südlichen Siegerland - Landschaftsplan Burbach. In: Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung NRW (Hg.): LÖLF, Jahresbericht 1988. 34-37. - Recklinghausen

Bauer, J., Rohdenburg, H. & Bork, H.-R. (1985): Ein digitales Reliefmodell als Voraussetzung für ein deterministisches Modell der Wasser- und Stoff-Flüsse. In: Bork, H.-R. & Rhodenburg, H. (Hg.): Parameteraufbereitung für deterministische Gebiets-Wassermodelle: Grundlagenarbeiten zur Analyse von Agrar-Ökosystemen = Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, H. 10, 1-15

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1994): Jahresbericht 1994. - Mainz

Diederich, A. & Neumann, D. & Borcherding, J. (1995): Flora und Fauna in Gräben einer niederrheinischen Auenlandschaft. In: Natur und Landschaft, 70 (6), 263-268

Digerfeldt, G. (1972): The Post-Glacial Development of Lake Trummen: Regional vegetation history, water level changes and palaeolimnology = Folia Limnologica Scandinvia 16, Lund.

Ebermayer, E. (1873): Die physikalischen Einwirkungen des Waldes auf Luft und Boden und eine klimatologische und hygienische Bedeutung begründet durch die Beobachtungen der forstlich-meteorologischen Stationen im Königreich Bayern. (Abbildungsband). - Aschaffenburg

Ellenberg, H., Mayer, R. & Schauermann, J. (Hg.)(1986): Ökosystemforschung: Ergebnisse des Sollingprojektes 1966-1986. - Stuttgart

Endlich, B. (1985): Der Organismus der Erde. - Stuttgart

Führer, H.-W. (1990): Einflüsse des Waldes und waldbaulicher Maßnahmen auf Höhe, zeitliche Verteilung und Qualität des Abflusses aus kleinen Einzugsgebieten: Projektstudie im Krofdorfer Buchenforst. Schr.R. der Forstwiss. Fak. d. Univ. München und der bayer. forstl. Versuchs- u. Forschungsanstalt. - München

Geiger, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht: Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. 4. neubarb. u. erw. Aufl. = Die Wissenschaft, Bd. 78. - Braunschweig

Keller, R. (Hrsg.) (1978): Hydrologischer Atlas der Bundesrepublik Deutschland - Karten und Erläuterungen - im Auftrag der Dt. Forschungsgemeinschaft. - Boppard

Kern, K. (1994): Grundlagen naturnaher Gewässergestaltung. - Berlin/Heidelberg

Kirchner, M. (1986): Wirkungen unterschiedlicher Landnutzung auf den Wasserhaushalt bayerischer Flußgebiete. Münchener Universitätsschriften, Fakultät für Physik.

Köhler, R. (1985): Der Flußlauf - ein Organismus. In: Endlich, B: Der Organismus der Erde. - Stuttgart

Landesamt f. Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz (1994, unv.): Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahrensvorschlag für kleine und mittelgroße Fließgewässer in der freien Landschaft im Bereich der Mittelgebirge, des Hügellandes und des Flachlandes. Verfahrenserprobung 1995/95.- Mainz

Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (1988): Niederschlagsbeschaffenheit 1985-1987. - Kiel

Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein (1995): Ein Jahrzehnt Beobachtung der Niederschlagsbeschaffenheit in Schleswig-Holstein 1985-1994. - Kiel

Laveskog, A., Lindskog, A. & Stenberg, U. (1976): Om metaller: en litteratursammanställning. Hg. vom Statens Naturvardsverk. - Stockholm

Leister, I. (1953): Der Einfluß der Drainage auf das Landschaftsbild im Osten Schleswig-Holsteins. In: Schott, C. (Hg.): Beiträge zur Landeskunde von Schleswig-Holstein. Schriften des geogr. Inst. d. Univ. Kiel, 180-185. - Kiel

Lorenz, J.R., Ritter von Liburnau (1878): Wald, Klima und Wasser. - München

Lütt, S. (1992): Produktionsbiologische Untersuchungen zur Sukzession der Torfstichvegetation in Schleswig-Holstein. In: Mitteilungen d. Arbeitsgemeinschaft Geobotanik in Schleswig-Holstein und Hamburg, Hg. Dierßen, K., H.43. - Kiel

Minister für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei des Landes Schleswig-Holstein (1989): Wald und Forstwirtschaft für Schleswig-Holstein. - Kiel

Müttrich, A. (Hg.) (1890): Jahresbericht über die Beobachtungsergebnisse der im Königreich Preußen, des Königreichs Württemberg, des Herzogthum Braunschweig, der thüringischen Staaten, der Reichslande und dem Landes-

directorium der Provinz Hannover eingerichteten forstlich-meteorologischen Stationen. Fünfzehnter Jahrgang: Das Jahr 1889. - Berlin

Pöpperl, R. (1991): Die Biozönose eines durch Stauhaltung geregelten Seeabflusses - dargestellt am Beispiel der benthischen Makroinvertebraten in der Alten Schwentine zwischen Belauer und Stolper See (Schleswig-Holstein). Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. - Kiel

Prien, F. (1929): Karte der Flurnamen von Neumünster und Umgebung. - Kiel

Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1994): Umweltgutachten 1994. - Stuttgart 1994

Reimer, G. (1978): Die Geschichte des Aukrugs. 3. erw. Aufl.

Renger, M. & Wessolek, G. (1991): Vorlesungsskript für das Wahlpflichtfach Bodenökologie WS 1991/92. Institut für Ökologie, FG Bodenkunde, TU Berlin

Ripl, W. & Hildmann, C. (1996, i.p.): Ökosysteme als thermodynamische Notwendigkeit - Systemökologische Überlegungen. In: Handbuch zur Ökosystemforschung 1995.

Ripl, W. & Hildmann, Ch. (1995, i.p.): Die Stadt als energiedissipative Struktur - ein systemökologischer Ansatz. In: Schr.R. f. Vegetationskde. 27

Ripl, W. & Koppelmeyer, B. (1990): Stoffbilanzen für die Stadt Berlin. In: Nährstoffbelastung der Gewässer in Berlin und Umgebung: Bestandsaufnahme und Sanierungskonzepte. Sammelbd. d. Vorträge zum Kolloquium. - Berlin

Ripl, W. (1991): Das Energie-Transport-Reaktionsmodell (ETR-Modell) - ein prozessorales Wassermodell als Grundlage für eine reduzierte gesamtökologische Betrachtung. In: Dt. Ges. für Limnologie (DGL). Erw. Zus.fass. der Jahrestagung 1991, 531-535

Ripl, W. (1995): Nachhaltige Bewirtschaftung von Ökosystemen aus wasserwirtschaftlicher Sicht. In: Fritz, P., Haber, J., Levi, H.W.: Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive, 69-80. - Stuttgart

Ripl, W., Hildmann, Ch. & Janssen, Th. (1994): Das Röhricht: Ein integrativer System-Ansatz auf der Grundlage des ETR-Modells. In: Das Röhricht - modellhafte Vorstellungen und Beispiele aus Ungarn (Balaton, Velencei-See) und Deutschland (Berlin, Unterhavel). Im Auftr. SenStadtUm. - Berlin

Schönwiese, C.-H., Rapp, J., Fuchs, T. & Denhard, M. (1993): Klimatrend-Atlas Europa 1891-1990. In: Berichte des Zentrums für Umweltforschung, Nr.20. - Frankfurt

Schröder, J. & Biernatzki, H. (1855): Topographie der Herzogthümer Holstein und Lauenburg, des Fürstenthums Lübeck und des Gebiets der freien und Hanse-Städte Hamburg und Lübeck. 2. neubearb. Aufl., Band 1. - Oldenburg i.H.

Singh, S.M. (1988): Brightness Temperature Algorithms for Landsat Thematic Mapper Data. In: Remote Sensing of Environment 24, 509-512

Stange, R. (1971): Der Funktionswandel der Aufforstungen in Schleswig-Holstein. In: Stewig, R. (Hg.): Beiträge zur geogr. Landeskunde u. Regionalforschung in Schleswig-Holstein. Schriften des geogr. Inst. d. Univ. Kiel, Bd. 3, Schmieder, O., Klug, H., Pfaffen, K.-H. (Hg.), 247-266. - Kiel

Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein (1989a): Lieferungen von Düngekalk zum Verbrauch in der Land- und Forstwirtschaft. In: Statistische Monatshefte S-H. 1989 (1), 5-17. - Kiel

Statistisches Landesamt Schleswig-Holstein (1989b): Bodennutzung und Ernte in Schleswig-Holstein 1988. - Kiel

Succow, M. (1988): Landschaftsökologische Moorkunde. - Jena

Uhlmann, D. (1975): Hydrobiologie. - Stuttgart

Werth, W. (1987): Ökomorphologische Gewässerbewertungen in Oberösterreich (Gewässerzustandskartierungen). In: Österr. Wasserwirtschaft, 39 (5/6), 122-129

Wohlrab, B., Ernstberger, H., Meuser, A., Sokollek, V. (1992): Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik. - Hamburg, Berlin

K. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

K.1. Abbildungsverzeichnis

<Aus Gründen des Copyright sind einige Graphiken in der vorliegenden pdf-Datei nicht enthalten.>

Abb. 1: Einlenkung des Energiepulses auf den Mittelwert (Endergiedissipation).....20
Abb. 2: Die Prozessoreigenschaften des Wassers.....21
Abb. 3: Die Zönosenkernstruktur.....23
Abb. 4: Prozesse zur Absenkung der Energieflußdichte in einer ZKS.....25
Abb. 5: Warm- und Kaltluftströme.....25
Abb. 6: Die ZKS als fraktale Struktur.....26
Abb. 7: Projektion des Energiepulses in die Landschaft.....28
Abb. 8: Veränderung von Stoffverlusten während der Sukzession.....29
Abb. 9: Die Energetisch-Wasserhaushaltliche Logik der Landschaft (EWL).....32
Abb. 10: Wasser- und Stoffkreislauf bei geringem und bei hohem Wirkungsgrad energiedissipativer Strukturen.....38
Abb. 11: Rückgang von Materialtransporten zugunsten der Turbulenz des Wassers bei der Selbststrukturierung des Gewässers.....40
Abb. 12: Fließgewässerstruktur und Energiedissipation.....40
Abb. 13: Veränderungen des Rheinlaufs bei Karlsruhe bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts.....41
Abb. 14: Natürliche Dämme und Flußaue in einer Tiefebene.....42
Abb. 15: Strömungswiderstand durch Grobsubstrat.....46
Abb. 16: Strömungswiderstand durch Wasservegetation und sortiertes Feinmaterial.....46
Abb. 17: In einem Mäander vollzieht sich die Fließgeschwindigkeitsänderung.....47
Abb. 18: Die Fließgewässer-ZKS.....50
Abb. 19: Entwicklung der Wasservegetation.....54
Abb. 20: Die Organismenvielfalt in Abhängigkeit kleinräumiger Gradienten.....57
Abb. 21: Modell für die nachhaltige Restrukturierung des Einzugsgebietes.....60
Abb. 22: Uferbestigung an der Osterau.....62
Abb. 23: Flächennutzung im Gesamteinzugsgebiet (in Prozent).....64
Abb. 24: Beispiel eines Verteilungsdiagramms.....75
Abb. 25: Der Formfaktor verschiedener Querschnittsformen von Gewässerprofilen.....79
Abb. 26: Strukturierung des Gewässerbettes 80
Abb. 27: Die Breitenvarianz am Beispiel des Himmelreichbachs.....81
Abb. 28: Das Partikelspektrum am Zusammenfluß von Buerwischbek und Schmalfelder Au.....82
Abb. 29: Temperatursonden im Stör-Gebiet.....86
Abb. 30: Die "Charakterkurven der Holzarten".....97
Abb. 31: Muster der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen einem Acker und einem Kiefernbestand in Eberswalde in 2 m Höhe.....98
Abb. 32: Muster der täglichen Temperaturdifferenzen zwischen einem Ackerrand- und einem Buchenwald-Standort im Stör-Einzugsgebiet in 2 m Höhe.....100

Abb. 33: Temperatur-Kennfeld für die untersuchten ZKSen. Das Kennfeld wurde aus dem Tagesgang der Temperatur im Juli 1995 berechnet....100
Abb. 34: Temperatur-Kennfeld: Abweichung vom Mittel der Meßhöhe in Prozent....101
Abb. 35: Verteilung der Temperatur über die Flächennutzung....102
Abb. 36: Aufbau des Leaching-Versuches....105
Abb. 37: Calcium und Sulfataustrag aus den Versuchszylindern....105
Abb. 38: Vergleich von Boden- und Sedimentproben aus dem Störgebiet anhand:....der Schwermetall-Basen- und Alkali-Erdalkali-Verhältnisse....108
Abb. 39: Calcium-Übersättigung bezogen auf das Gleichgewicht mit dem CO_2 in der Atmosphäre....111
Abb. 40: Mittlerer flächenspezifischer Abfluß für 1992-1994 für 36 Meßpegel....113
Abb. 41: Prozentuale Abweichung der Sulfatkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen....114
Abb. 42: Prozentuale Abweichung der Nitratkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen....114
Abb. 43: Prozentuale Abweichung der Calciumkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen....115
Abb. 44: Prozentuale Abweichung der Gesamt-Phosphorkonzentration vom Ortsmittel für die drei Variationsklassen....115
Abb. 45: Gebietseinträge mit dem Niederschlag....117
Abb. 46: Abfluß- und Frachtmuster (Salze, Sulfat und Calcium) für die Stör bei Willenscharen und die Bramau bei Föhrden....118
Abb. 47: Abweichung der Leitfähigkeit und des Abflusses 1994/95 in der Schmalfelder Au vom Mittelwert (in %)....119
Abb. 48: Abweichung der Leitfähigkeit und des Abflusses 1994/95 in der Wegebek vom Mittelwert (in %)....120
Abb. 49: Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Salzkonzentration....120
Abb. 50: Während des Auswaschungsprozesses....126
Abb. 51: Calcium-Vorrat und Calcium-Schwermetall-Verhältnisse....126
Abb. 52: Niederschlagsmittel in Berlin-Dahlem und Standardabweichung....128
Abb. 53: Niederschlagsmittel in Neumünster und Standardabweichung....128
Abb. 54: Niederschlagssummen und Standardabweichung (April bis Juni und Juli bis September) für Berlin-Dahlem....129
Abb. 55: Niederschlagssummen und Standardabweichung (April bis Juni und Juli bis September) für Neumünster....129
Abb. 56: Der Wasserkreislauf als fraktales Modell....130
Abb. 57: Tägliches Mittel des Bodenwasserstandes am Meßpegel 9 (Nadelwald bei Lindeloh). 131
Abb. 58: Tägliches Mittel des Bodenwasserstandes am Meßpegel 2 (Laubwald im Gehege Himmelreich)....132
Abb. 59: Naturnaher Abschnitt des Himmelreichbachs....134
Abb. 60: Gewässerbettstrukturen des Himmelreichbaches....135
Abb. 61: Die Osterau....136
Abb. 62: Gewässerbettstrukturen der Osterau....137
Abb. 63: Die Dosenbek....138
Abb. 64: Gewässerbettstrukturen der Dosenbek....139

Abb. 65: Partikelspektrum der Osterau in einem Bereich stark herabgesetzter (rechts) und stark beschleunigter Fließgeschwindigkeit (links).....141
Abb. 66: Moosstruktur im Oberlauf des Himmelreichbachs.....142
Abb. 67: Zu Rippelmarken sortiertes Feinmaterial in einem strömungsarmen Abschnitt des Himmelreichbachs.....143
Abb. 68: Hochgerechneter temporärer Stoffrückhalt durch Makrophyten im Stör-Gebiet.....144
Abb. 69: Abweichung der einzelnen Niederschlagsmeßstellen vom Gesamtmittel.....145
Abb. 70: Prozentuale Abweichung der einzelnen Meßstellen vom Jahresmittel aller 14 Stationen 146
Abb. 71: Absolute Abweichung der Abflüsse und Niederschläge vom Gesamtmittel 1991-1994 147
Abb. 72: Prozentuale Abweichung von Abfluß und Abflußbeiwert vom Gesamtmittel.....147
Abb. 73: Abflußbeiwerte für die Einzugsgebiete.....148
Abb. 74: Flächenspezifische Monatsabflüsse.....149
Abb. 75: Flächenspezifische monatliche Minima des Abflusses.....150
Abb. 76: Monatliche Standardabweichung des Abflusses.....151
Abb. 77: Jährlicher Basisabfluß der Einzugsgebiete (in Prozent des mittleren Abflusses) auf Grundlage der Monatsminima.....152
Abb. 78: Konzentrations-Fließschema für Calcium.....153
Abb. 79: Beispiel eines Frachtmusters (Gesamtsalze).....155
Abb. 80: Fracht-Fließschemata für Calcium.....156
Abb. 81: Abfluß und Stoffverluste der Teileinzugsgebiete.....157
Abb. 82: Flächennutzung und Stoffverluste in den Berechnungsabschnitten.....158
Abb. 83: Hangneigung und Stoffverluste der Berechnungsabschnitte.....159
Abb. 84: Verteilung der Ökotonenabstände.....160
Abb. 85: Stoffverluste und mittlere Oberflächentemperatur der Teileinzugsgebiete.....161
Abb. 86: Wirkungsgrad und Stoffverluste der Berechnungsabschnitte.....164
Abb. 87: Gewässerbegleitende Fangsysteme.....175
Abb. 88: Temporäre Feuchtgebietskaskaden.....176
Abb. 89: Feuchtgebiet mit Rieselstrecke.....178
Abb. 90: Das Schließen der Stoffkreisläufe in Städten 181
Abb. 91: Energieflußdichte und Emissionen.....184
Abb. 92: Entwicklung der Basenverluste der Landökosysteme seit der Eiszeit.....187

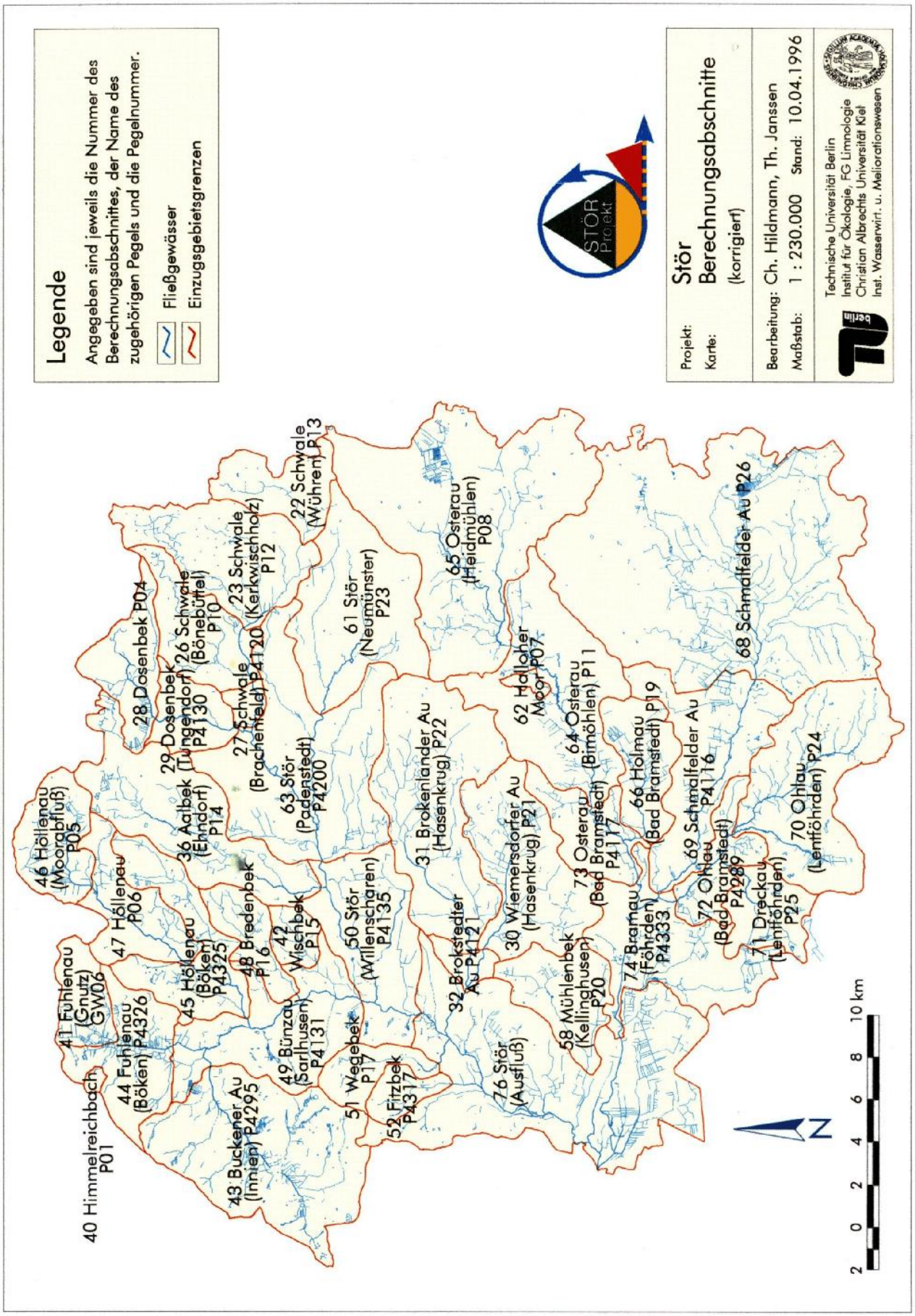
K.2. Tabellenverzeichnis

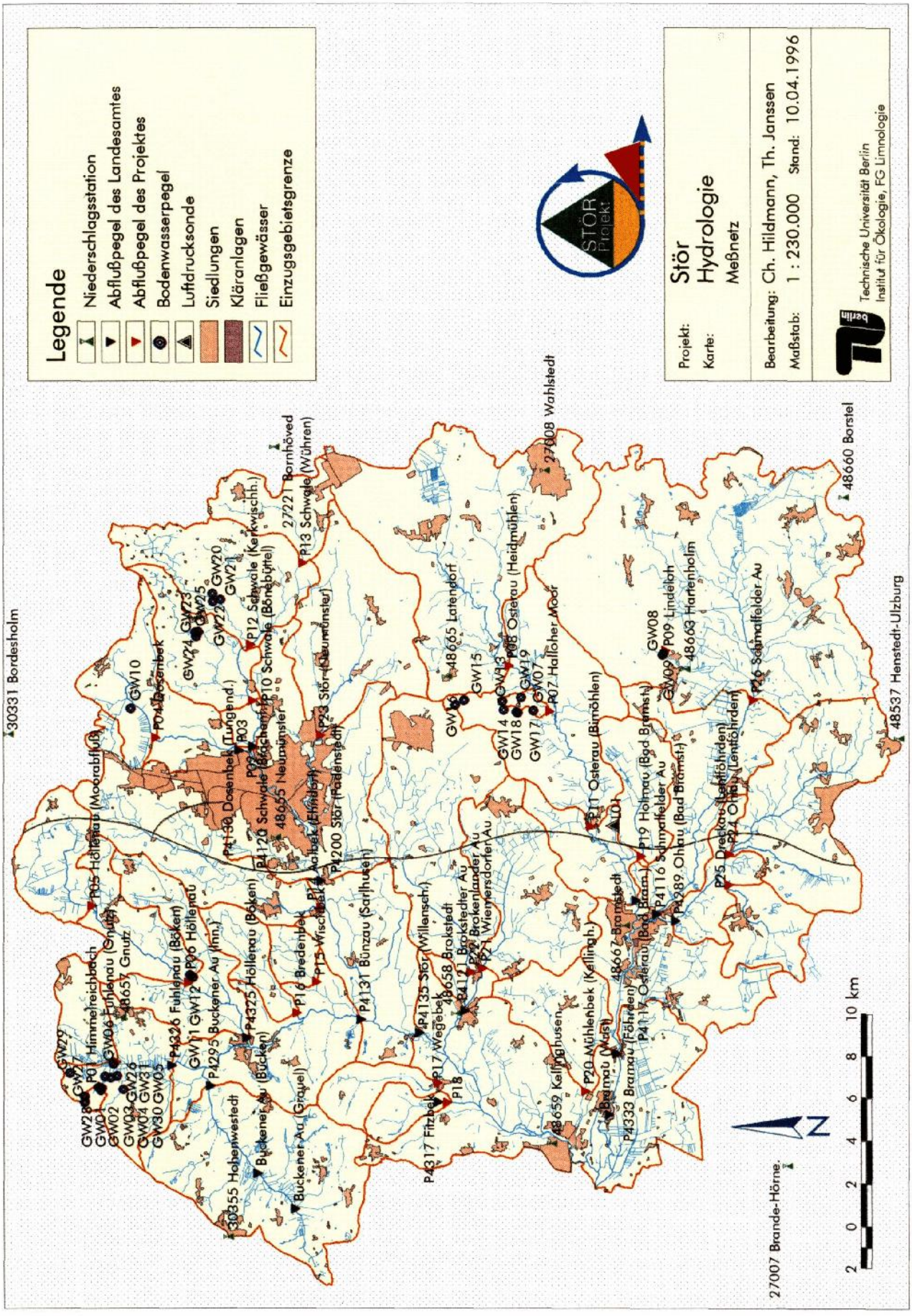
Tab. 1: Auszüge aus der schleswig-holsteinischen Forstgeschichte in Zahlen 71
Tab. 2: Übersicht über die Bodenwasser-Meßsonden.....87
Tab. 3: Verwendete Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes.....87
Tab. 4: Berechnete Basenvorräte an den Bodenwasserpegeln.....122
Tab. 5: Flächenanteile der wichtigsten Bodentypen.....122
Tab. 6: Anteile von Acker, offenem Boden und Grünland in Prozent des Gesamtgebietes..... 163
Tab. 7: Übersicht über die Jahresfrachten der Flußgebiete absolut und pro Hektar sowie die Gesamtverluste.....186

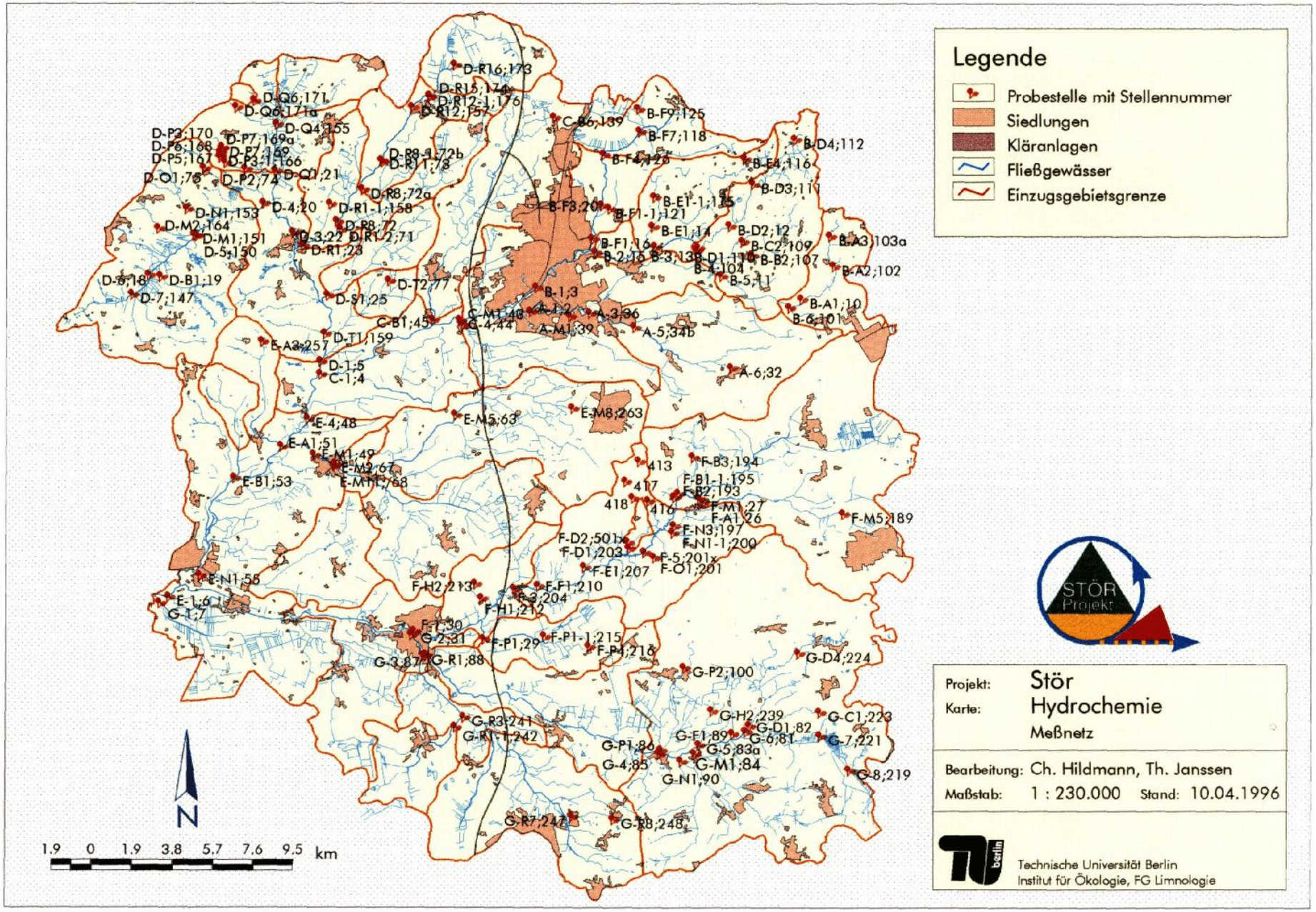
K.3. Kartenverzeichnis

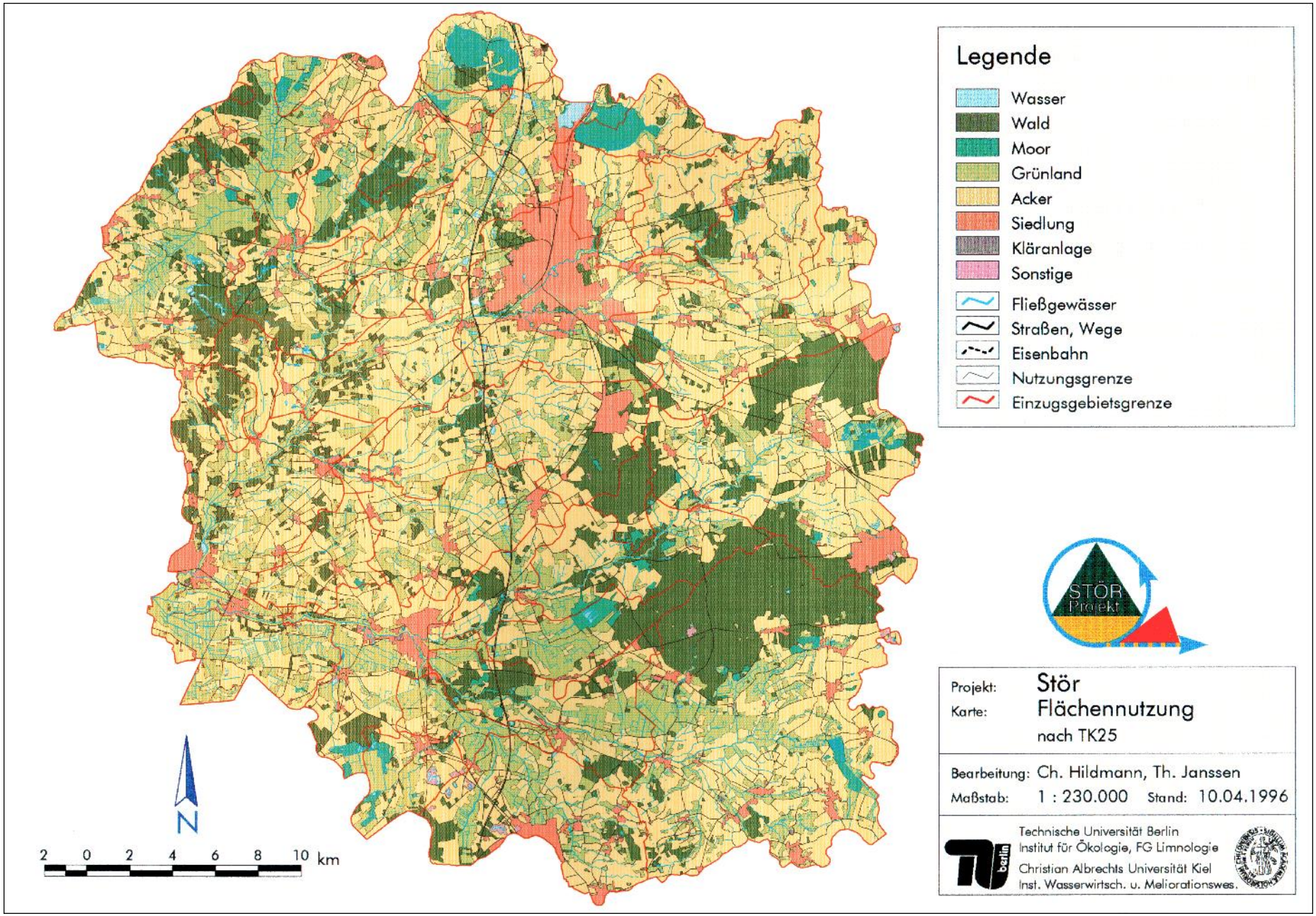
Karte 1: Berechnungsabschnitte.....205
Karte 2: Hydrologisches Meßnetz.....206
Karte 3: Hydrochemie-Meßnetz.....207
Karte 4: Flächennutzung nach TK25.....208
Karte 5: Flächennutzung: Klassifikation mit Landsat 5 TM.....209
Karte 6: Bodentypenkarte in generalisierter Form.....210
Karte 7: Höhenkarte.....211
Karte 8: Hangneigung.....212
Karte 9: Ökotonenabstand.....213
Karte 10: Wasserdurchfluß.....214
Karte 11: Wirkungsgrad: Abschätzung.....215
Karte 12: Stoffverluste.....216
Karte 13: Oberflächentemperatur 7. Juli 1987.....217
Karte 14: Oberflächentemperatur 17. Mai 1992.....218
Karte 15: Oberflächentemperatur 4. September 1991.....219
Karte 16: Vorrangflächen zur Steigerung der Nachhaltigkeit.....220

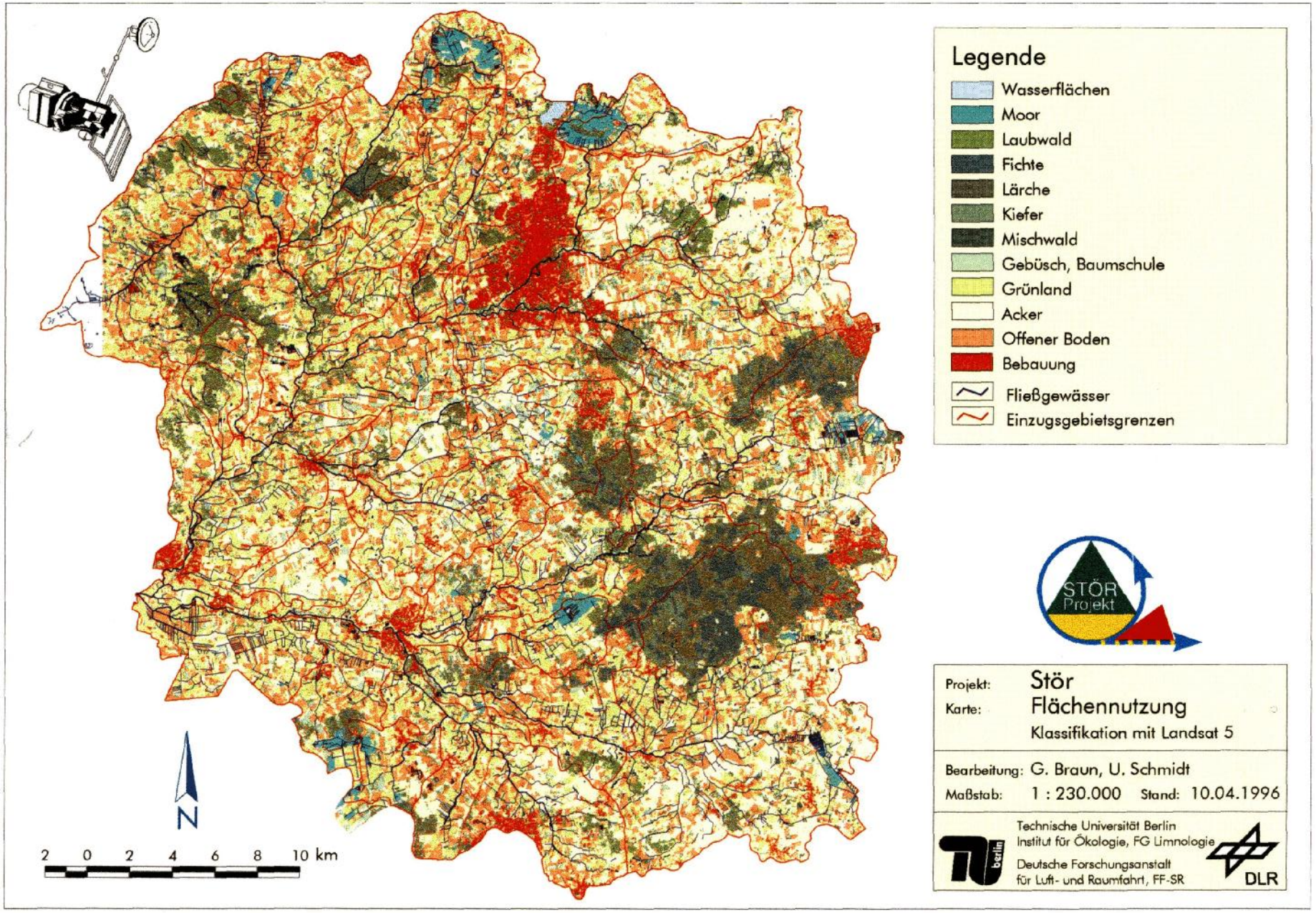
L. Anhang: Karten

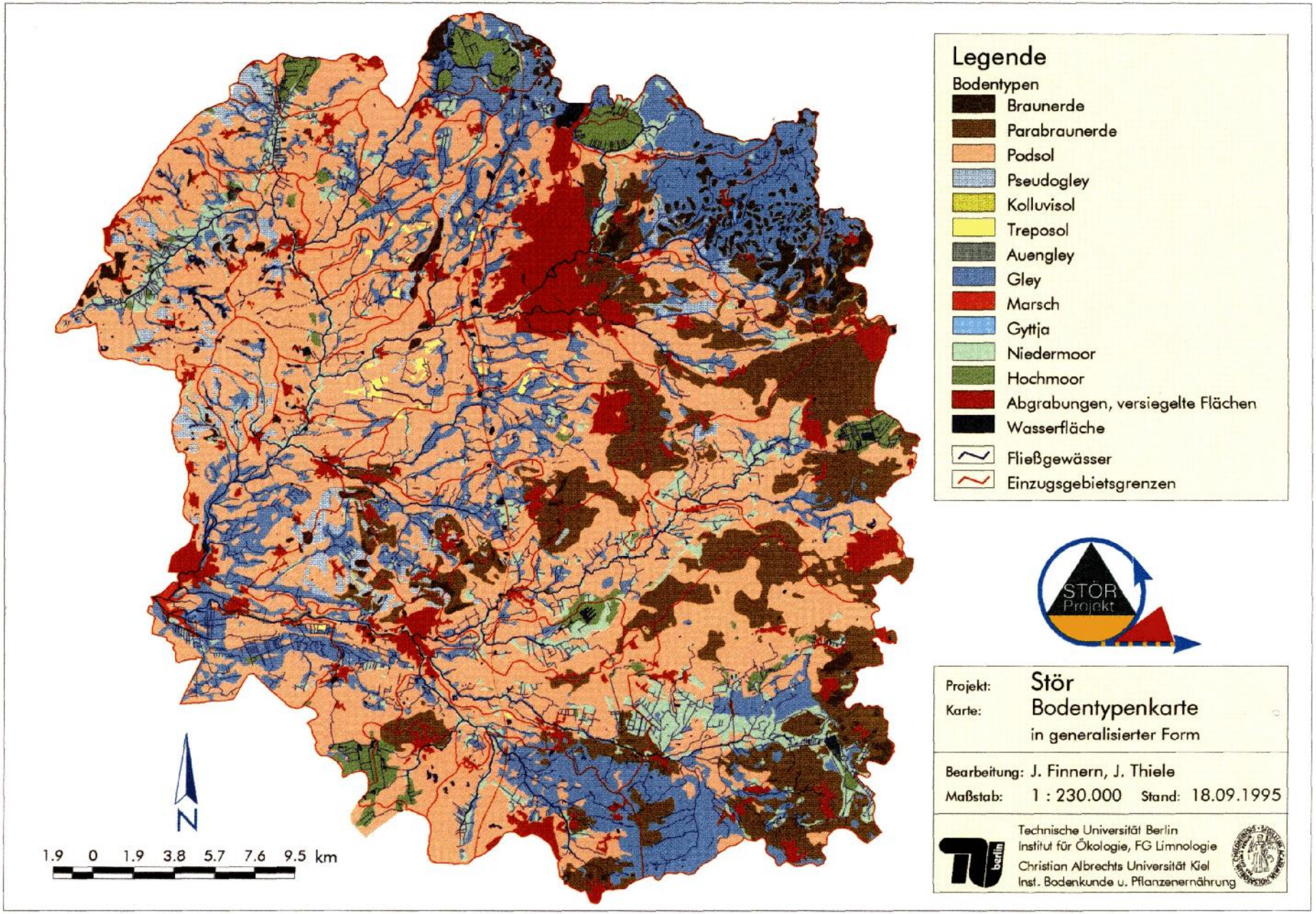

Legende
Angegeben sind jeweils die Nummer des Berechnungsabschnittes, der Name des zugehörigen Pegels und die Pegelnummer.
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Berechnungsabschnitte
(korrigiert)
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
Christian Albrechts Universität Kiel
Inst. Wasserwirt. u. Meliorationswesen
40 Himmelreichbach P01
41 Fuhlenau (Gnutz) GW06
44 Fuhlenau (Böken) P4326
43 Buckener Au (Innien) P4295
46 Höllenau (Moorabfluß) P05
47 Höllenau P06
45 Höllenau (Böken) P4325
36 Aalbek (Ehndorf) P14
48 Bredenbek P16
49 Bünzau (Sarlhusen) P4131
42 Wischbek P15
51 Wegebek P17
52 Fitzbek P4317
28 Dosenbek P04
29 Dosenbek (Tungendorf) P4130
26 Schwale (Bönebüttel) P10
27 Schwale (Brachenfeld) P4120
23 Schwale (Kerkwischholz) P12
22 Schwale (Wühren) P13
63 Stör (Padenstedt) P4200
50 Stör (Willenscharen) P4135
61 Stör (Neumünster) P23
31 Brokenlander Au (Hasenkrug) P22
32 Brokstedter Au P4121
30 Wiemersdorfer Au (Hasenkrug) P21
76 Stör (Ausfluß)
65 Osterau (Heidmühlen) P08
62 Halloher Moor P07
64 Osterau (Bimöhlen) P11
73 Osterau (Bad Bramstedt) P4117
58 Mühlenbek (Kellinghusen) P20
74 Bramau (Föhrden) P4333
66 Holmau (Bad Bramstedt) P19
69 Schmalfelder Au P4116
72 Ohlau (Bad Bramstedt) P4289
71 Dreckau (Lentföhrden) P25
70 Ohlau (Lentföhrden) P24
68 Schmalfelder Au P26
N
2 0 2 4 6 8 10 km

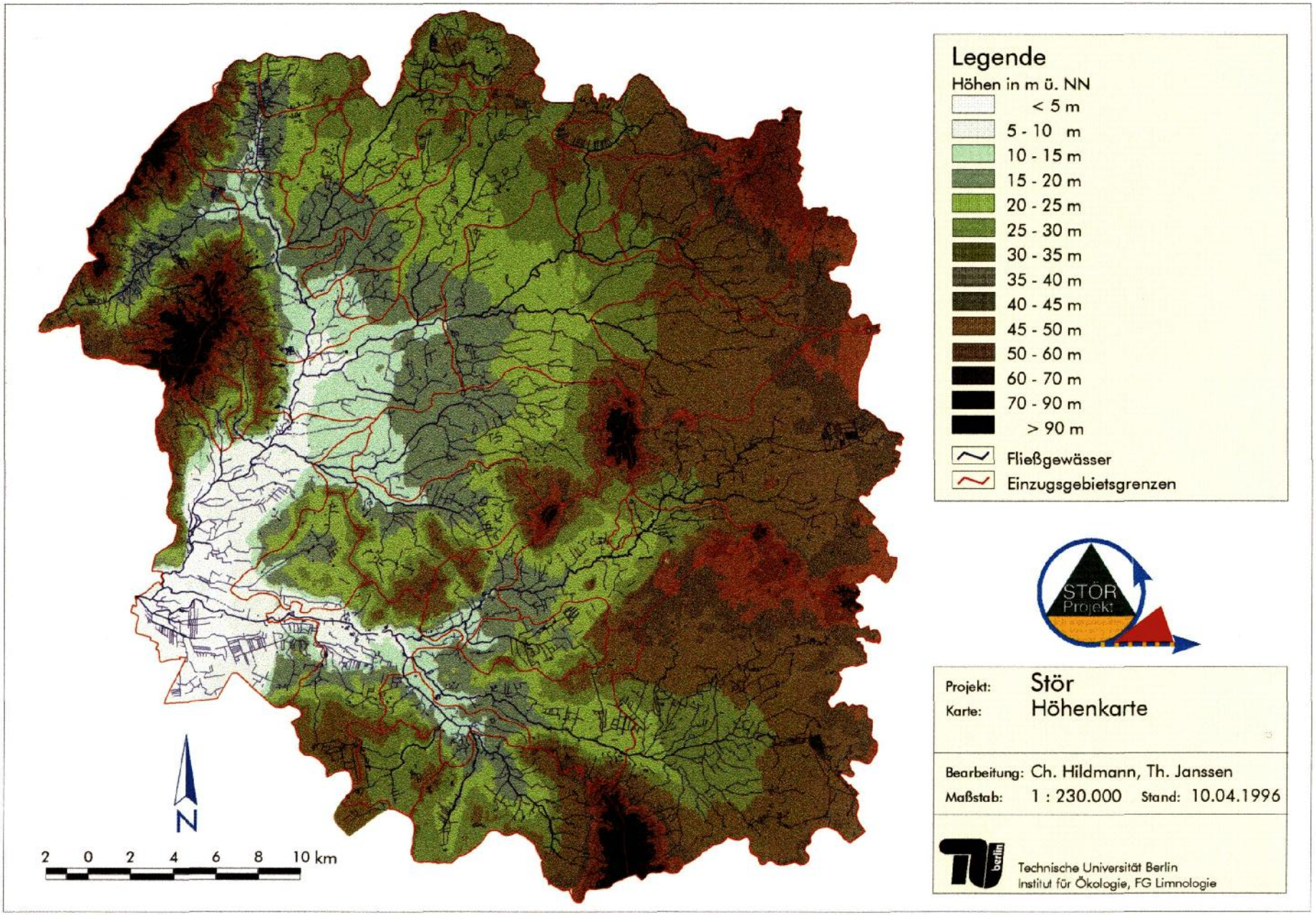

Legende
Niederschlagsstation
Abflußpegel des Landesamtes
Abflußpegel des Projektes
Bodenwasserpegel
Luftdrucksonde
Siedlungen
Kläranlagen
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenze
Projekt: Stör
Karte: Hydrologie
Meßnetz
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
STÖR Projekt
30331 Bordesholm
27221 Bornhöved
27008 Wahlstedt
48660 Borstel
48537 Henstedt-Ulzburg
27007 Brande-Hörne
N
2 0 2 4 6 8 10 km

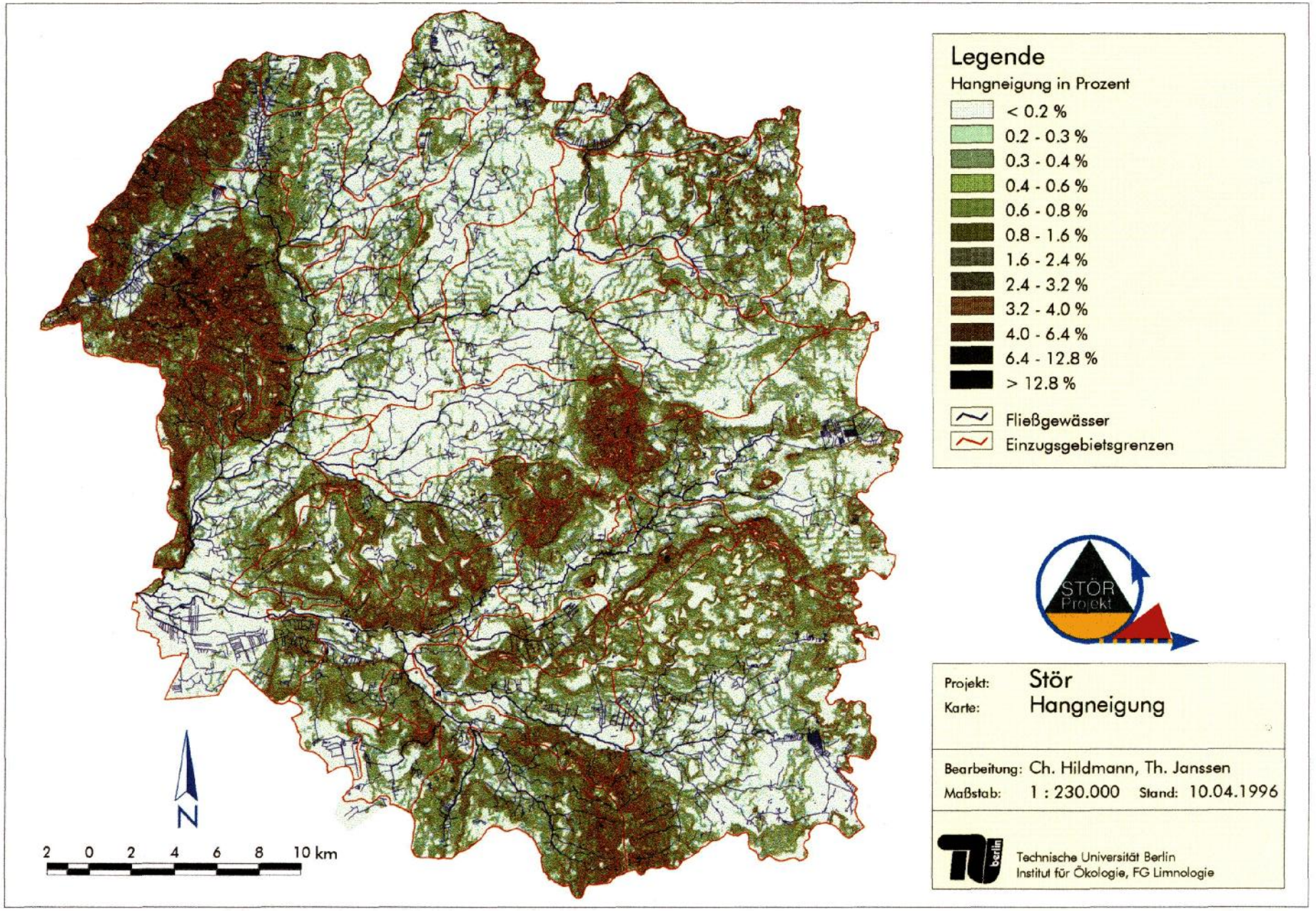

Legende
Probestelle mit Stellennummer
Siedlungen
Kläranlagen
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenze
D-R16;173
D-R15;174
D-R12-1;176
D-R12;157
D-Q6;171
D-Q6;171a
D-Q4;155
D-P3;170
D-P6;168
D-P5;167
D-P7;169a
D-P7;169
D-P3-1;166
D-Q1;76
D-P2;74
D-Q1;21
D-R8-1;72b
D-R11;78
D-R8;72a
D-N1;153
D-4;20
D-R1-1;158
D-M2;164
D-M1;151
D-5;150
D-3;22
D-R1-2;71
D-R1;23
D-R8;72
D-6;18
D-B1;19
D-7;147
D-T2;77
D-S1;25
C-B1;45
D-T1;159
E-A2;257
D-1;5
C-1;4
E-4;48
E-A1;51
E-M1;49
E-M2;67
E-M11;68
E-B1;53
E-N1;55
E-1;6
G-1;7
E-M5;63
E-M8;263
C-B6;139
B-F9;125
B-F7;118
B-F4;126
B-D4;112
B-E4;116
B-D3;111
B-F3;20
B-E1-1;115
B-F1-1;121
B-E1;14
B-D2;12
B-F1;16
B-2;15
B-3;13
B-D1-1;110
B-C2;109
B-A3;103a
B-B2;107
B-4;104
B-5;11
B-A2;102
B-1;3
A-1;2
A-3;96
C-M1;48
G-4;44
A-M1;39
A-5;34b
B-A1;10
B-6;101
A-6;32
413
F-B3;194
417
F-B1-1;195
F-B2;193
418
F-M1;27
416
F-A1;26
F-M5;189
F-N3;197
F-N1-1;200
F-D2;501
F-D1;203
F-5;201
F-O1;201
F-E1;207
F-H2;213
F-F1;210
F-3;204
F-H1;212
F-1;30
G-2;31
F-P1;29
F-P1-1;215
F-P4;216
G-3;87
G-R1;88
G-D4;224
G-P2;100
G-H2;239
G-C1;223
G-D1;82
G-R3;241
G-R1-1;242
G-F1;89
G-6;81
G-7;221
G-P1;86
G-5;83a
G-4;85
G-M1;84
G-N1;90
G-8;219
G-R7;247
G-28;248
N
1.9 0 1.9 3.8 5.7 7.6 9.5 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Hydrochemie
Meßnetz
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie

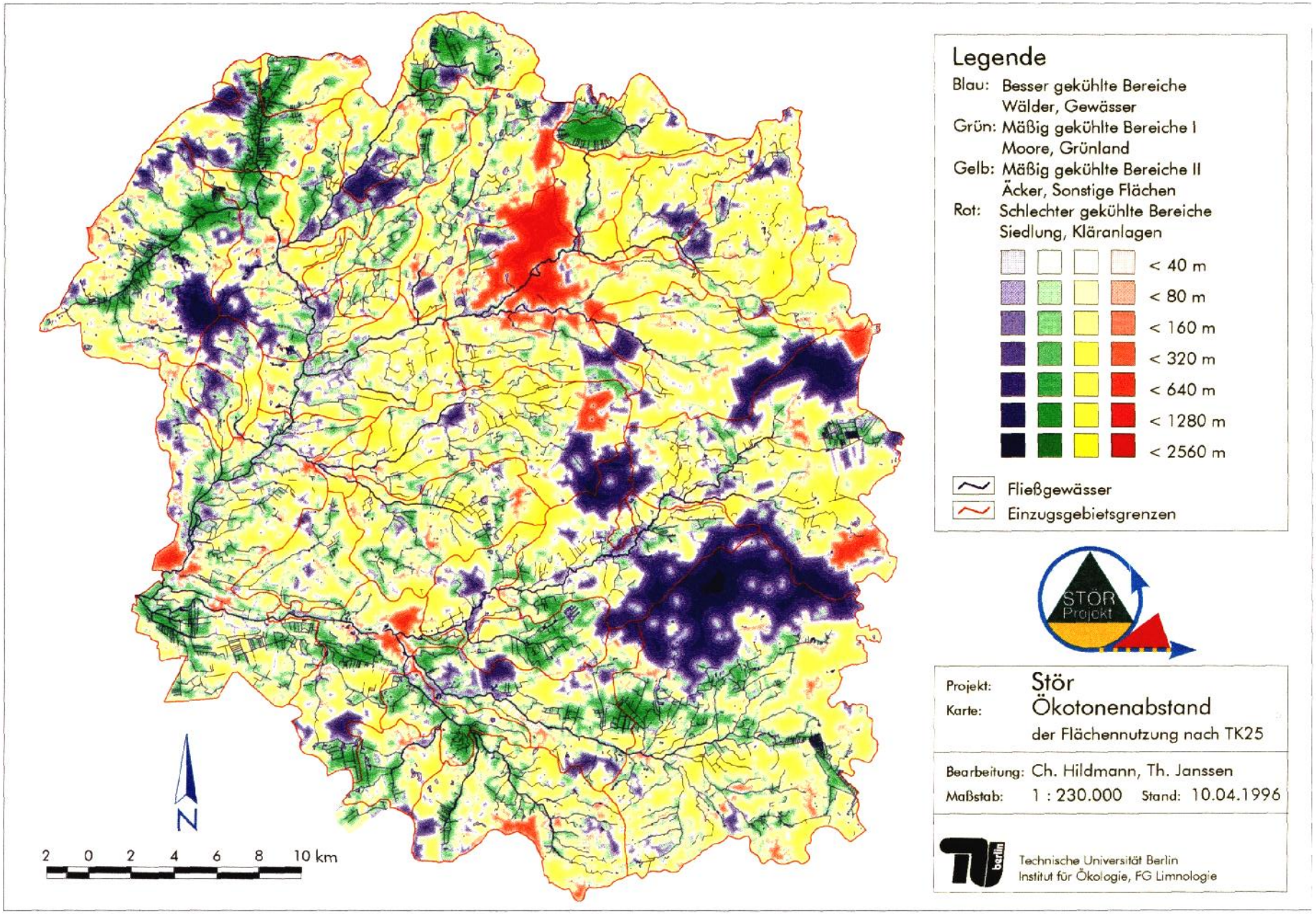

Legende
Wasser
Wald
Moor
Grünland
Acker
Siedlung
Kläranlage
Sonstige
Fließgewässer
Straßen, Wege
Eisenbahn
Nutzungsgrenze
Einzugsgebietsgrenze
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Flächennutzung
nach TK25
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
Christian Albrechts Universität Kiel
Inst. Wasserwirtsch. u. Meliorationswes.

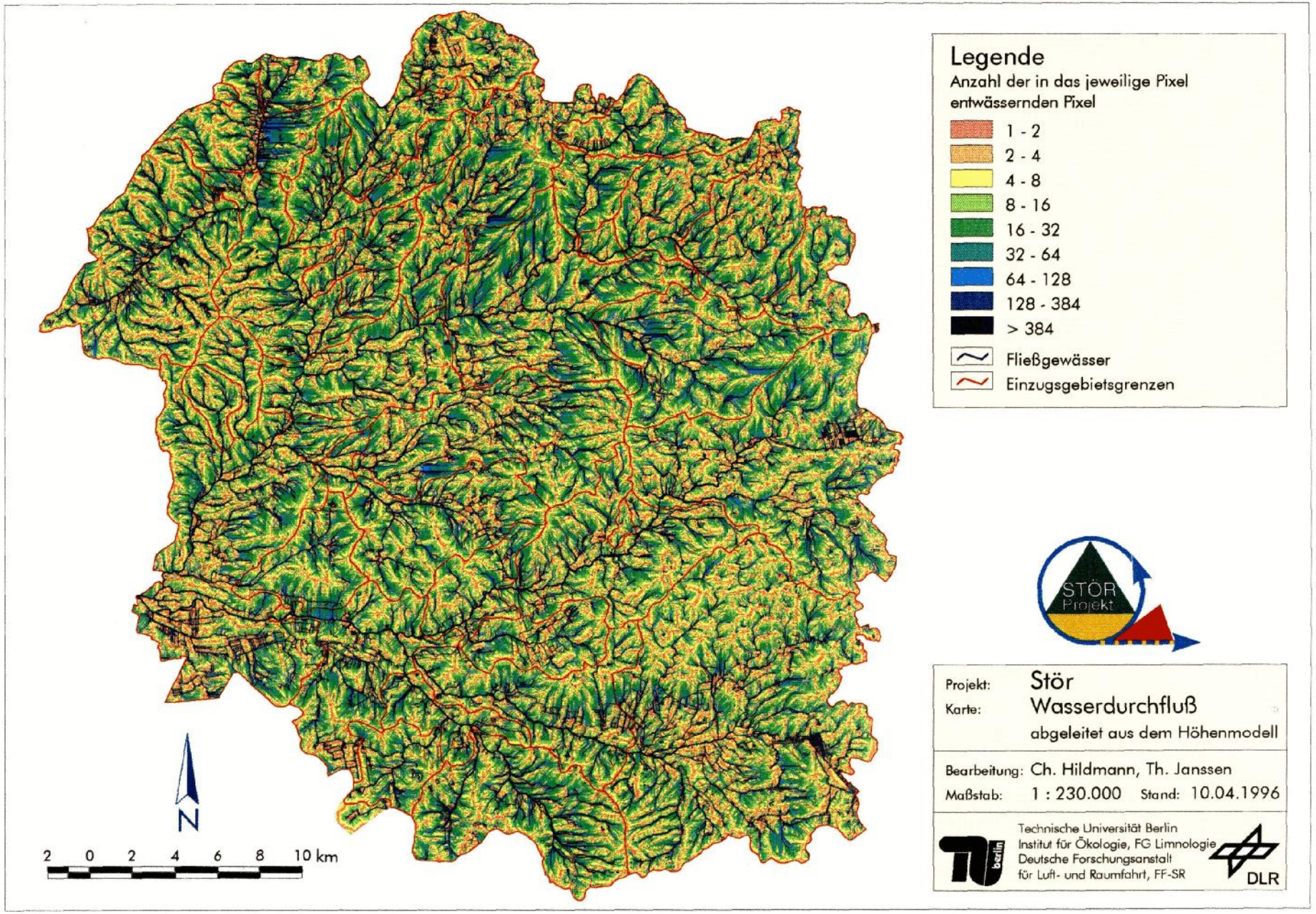

Legende
Wasserflächen
Moor
Laubwald
Fichte
Lärche
Kiefer
Mischwald
Gebüsch, Baumschule
Grünland
Acker
Offener Boden
Bebauung
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Flächennutzung
Klassifikation mit Landsat 5
Bearbeitung: G. Braun, U. Schmidt
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
Deutsche Forschungsanstalt
für Luft- und Raumfahrt, FF-SR
DLR

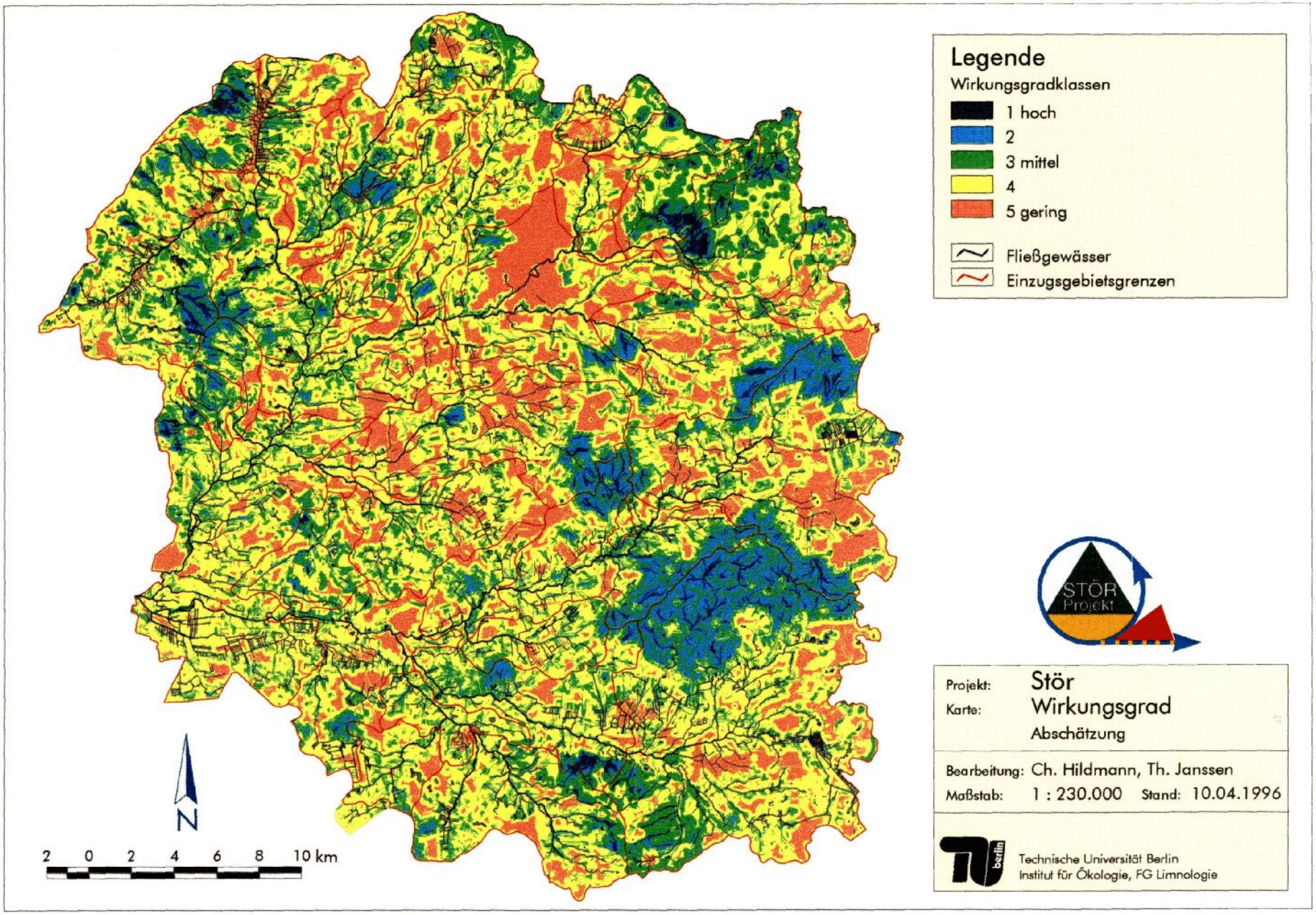

Legende
Bodentypen
Braunerde
Parabraunerde
Podsol
Pseudogley
Kolluvisol
Treposol
Auengley
Gley
Marsch
Gyttja
Niedermoor
Hochmoor
Abgrabungen, versiegelte Flächen
Wasserfläche
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
1.9 0 1.9 3.8 5.7 7.6 9.5 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Bodentypenkarte
in generalisierter Form
Bearbeitung: J. Finnern, J. Thiele
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 18.09.1995
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
Christian Albrechts Universität Kiel
Inst. Bodenkunde u. Pflanzenernährung

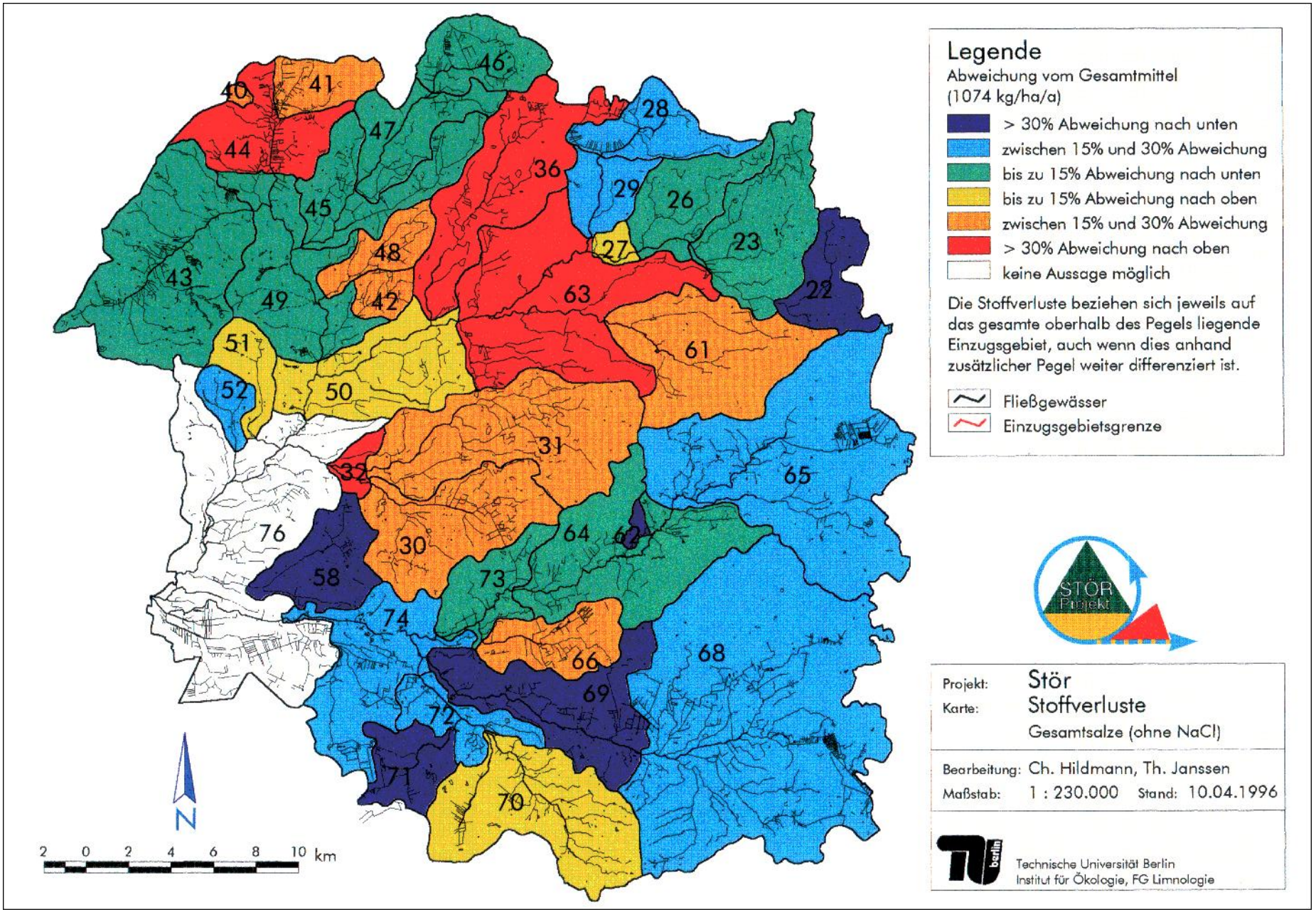

Legende
Höhen in m ü. NN
< 5 m
5 - 10 m
10 - 15 m
15 - 20 m
20 - 25 m
25 - 30 m
30 - 35 m
35 - 40 m
40 - 45 m
45 - 50 m
50 - 60 m
60 - 70 m
70 - 90 m
> 90 m
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Höhenkarte
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie

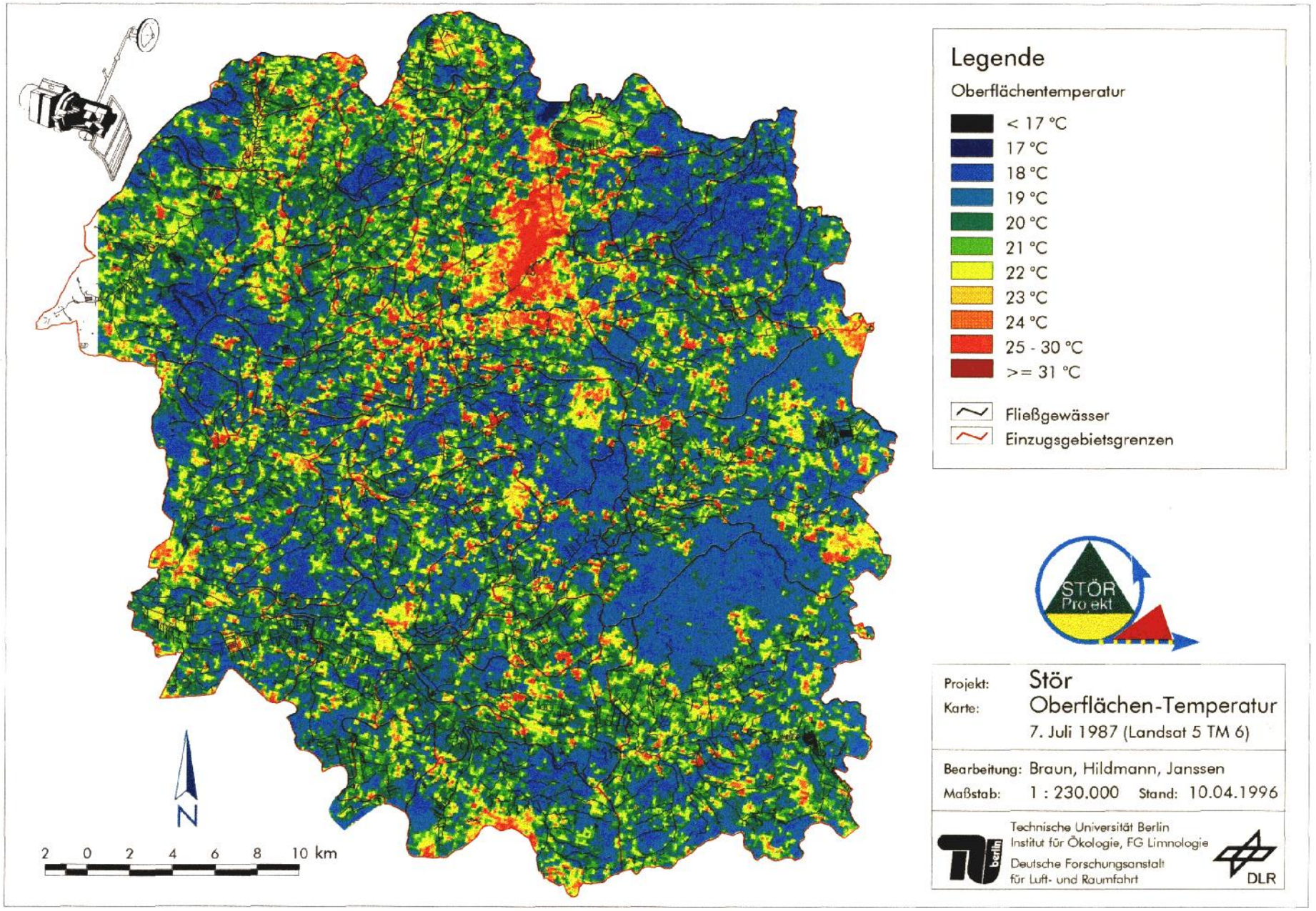

Legende
Hangneigung in Prozent
< 0.2 %
0.2 - 0.3 %
0.3 - 0.4 %
0.4 - 0.6 %
0.6 - 0.8 %
0.8 - 1.6 %
1.6 - 2.4 %
2.4 - 3.2 %
3.2 - 4.0 %
4.0 - 6.4 %
6.4 - 12.8 %
> 12.8 %
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Hangneigung
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie

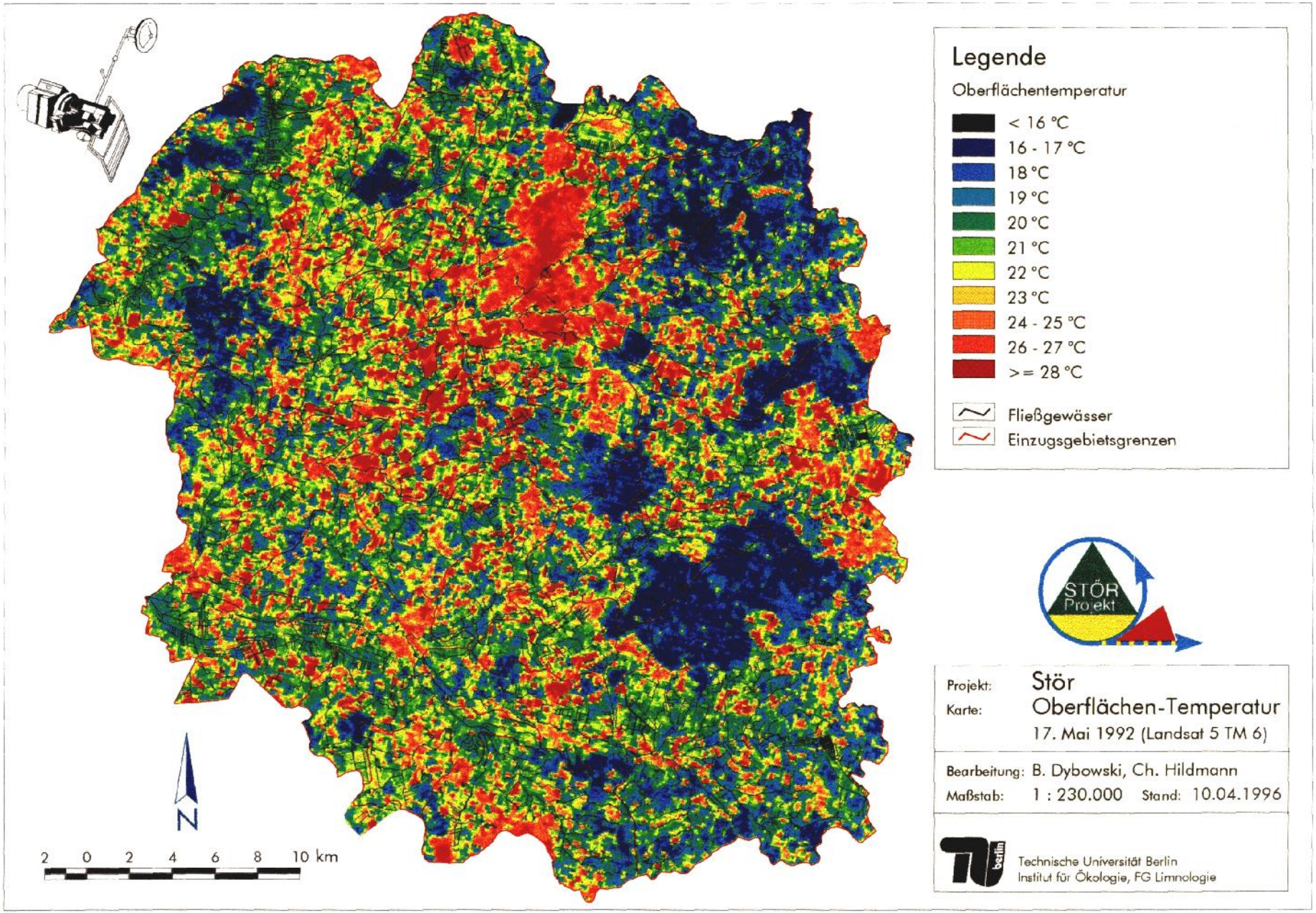

Legende
Blau: Besser gekühlte Bereiche
Wälder, Gewässer
Grün: Mäßig gekühlte Bereiche I
Moore, Grünland
Gelb: Mäßig gekühlte Bereiche II
Äcker, Sonstige Flächen
Rot: Schlechter gekühlte Bereiche
Siedlung, Kläranlagen
< 40 m
< 80 m
< 160 m
< 320 m
< 640 m
< 1280 m
< 2560 m
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Ökotonenabstand
der Flächennutzung nach TK25
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie

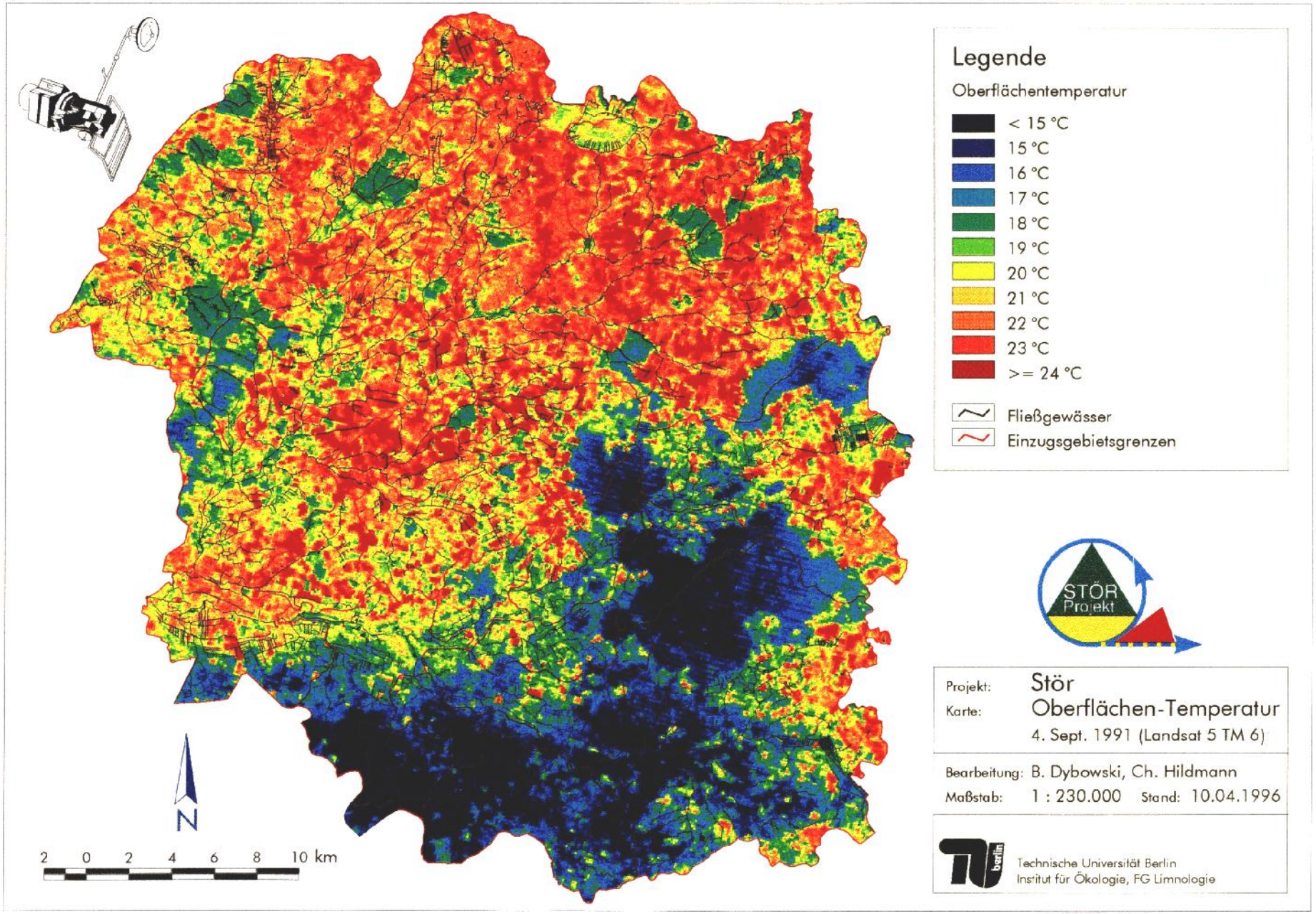

Legende
Anzahl der in das jeweilige Pixel entwässernden Pixel
1 - 2
2 - 4
4 - 8
8 - 16
16 - 32
32 - 64
64 - 128
128 - 384
> 384
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Wasserdurchfluß
abgeleitet aus dem Höhenmodell
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
Deutsche Forschungsanstalt
für Luft- und Raumfahrt, FF-SR
DLR

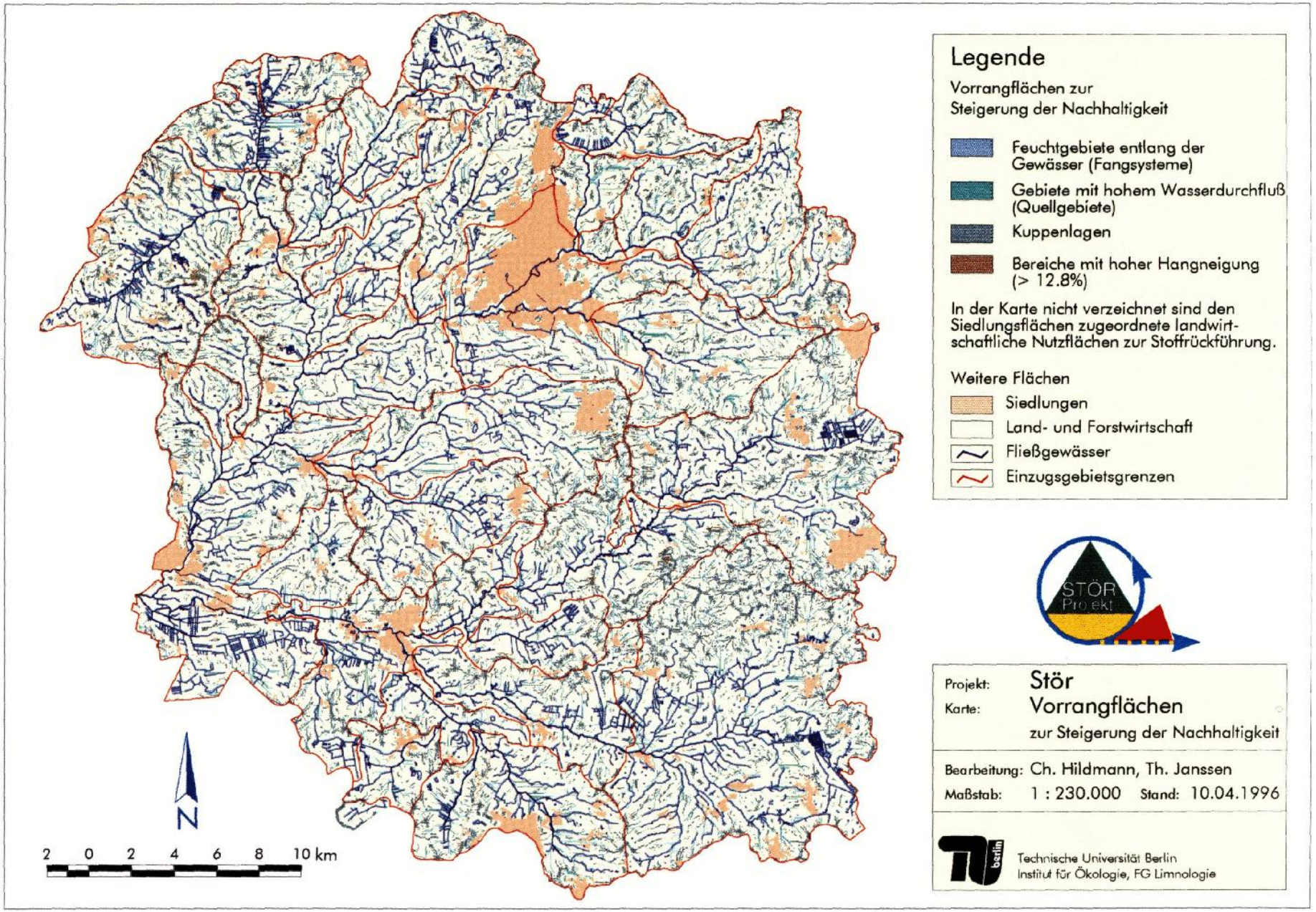

Legende
Wirkungsgradklassen
1 hoch
2
3 mittel
4
5 gering
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Wirkungsgrad
Abschätzung
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie


Legende
Abweichung vom Gesamtmittel
(1074 kg/ha/a)
> 30% Abweichung nach unten
zwischen 15% und 30% Abweichung
bis zu 15% Abweichung nach unten
bis zu 15% Abweichung nach oben
zwischen 15% und 30% Abweichung
> 30% Abweichung nach oben
keine Aussage möglich
Die Stoffverluste beziehen sich jeweils auf das gesamte oberhalb des Pegels liegende Einzugsgebiet, auch wenn dies anhand zusätzlicher Pegel weiter differenziert ist.
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenze
40 41 46 28 44 47 36 29 26 45 48 27 23 43 49 42 63 22 51 61 52 50 31 65 32 76 64 62 30 58 73 74 66 68 69 72 71 70
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Stoffverluste
Gesamtsalze (ohne NaCl)
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie


Legende
Oberflächentemperatur
< 17 °C
17 °C
18 °C
19 °C
20 °C
21 °C
22 °C
23 °C
24 °C
25 - 30 °C
>= 31 °C
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Oberflächen-Temperatur
7. Juli 1987 (Landsat 5 TM 6)
Bearbeitung: Braun, Hildmann, Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie
Deutsche Forschungsanstalt
für Luft- und Raumfahrt
DLR


Legende
Oberflächentemperatur
< 16 °C
16 - 17 °C
18 °C
19 °C
20 °C
21 °C
22 °C
23 °C
24 - 25 °C
26 - 27 °C
>= 28 °C
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Oberflächen-Temperatur
17. Mai 1992 (Landsat 5 TM 6)
Bearbeitung: B. Dybowski, Ch. Hildmann
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie


Legende
Oberflächentemperatur
< 15 °C
15 °C
16 °C
17 °C
18 °C
19 °C
20 °C
21 °C
22 °C
23 °C
>= 24 °C
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Projekt
Projekt: Stör
Karte: Oberflächen-Temperatur
4. Sept. 1991 (Landsat 5 TM 6)
Bearbeitung: B. Dybowski, Ch. Hildmann
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie


Legende
Vorrangflächen zur
Steigerung der Nachhaltigkeit
Feuchtgebiete entlang der Gewässer (Fangsysteme)
Gebiete mit hohem Wasserdurchfluß (Quellgebiete)
Kuppenlagen
Bereiche mit hoher Hangneigung (> 12.8%)
In der Karte nicht verzeichnet sind den Siedlungsflächen zugeordnete landwirtschaftliche Nutzflächen zur Stoffrückführung.
Weitere Flächen
Siedlungen
Land- und Forstwirtschaft
Fließgewässer
Einzugsgebietsgrenzen
N
2 0 2 4 6 8 10 km
STÖR Pro ekt
Projekt: Stör
Karte: Vorrangflächen
zur Steigerung der Nachhaltigkeit
Bearbeitung: Ch. Hildmann, Th. Janssen
Maßstab: 1 : 230.000 Stand: 10.04.1996
Technische Universität Berlin
Institut für Ökologie, FG Limnologie