

4. Critical Loads & Levels: naturwissenschaftliche Bestandteile eines Indikatorensystems für dauerhaft-umweltgerechte Entwicklungen

Dr. Hans-Dieter Nagel

1. Einleitung

Die Suche nach Kriterien für eine dauerhaft-umweltgerechte Menschheitsentwicklung begann für alle, die Ökonomie und Ökologie als Haushaltsführungen von Gesellschaft und Natur in ein und denselben Bezugsraum - die ganzheitliche Erde - stellen, vor etwa 25 Jahren. Als Startpunkt können die Arbeiten von FORRESTER (1968, 1972) und MEADOWS (1973) gelten, letzterer faßte zusammen: „Die Menschheit wird in absehbarer Zeit unausweichlich mit dem Übergang von weltweitem Wachstum zum globalen Gleichgewichtszustand konfrontiert. ... Es fragt sich, ob dieser künftige Zustand durch Nahrungsmittelknappheit, eine zerstörte Umwelt und erschöpfte Rohstoffvorräte gekennzeichnet sein wird. ...Möglich wäre aber auch, daß der Mensch die natürlich gesetzten materiellen Grenzen erkennt und bewußt einen Gleichgewichtszustand herstellt.“¹²

Gegenwärtig, insbesondere nach dem BRUNDTLAND-Bericht (WCED 1987), der Rio-Umweltkonferenz der Vereinten Nationen 1992 und dem Klimagipfel 1995 in Berlin, wird eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung als eine zentrale umweltpolitische Zielstellung ausgewiesen¹³. Begriffe wie „ökologisch-ökonomische Weltanschauung“ (COSTANZA 1992) oder die Forderung nach einer „ökologischen Wahrheit der Preise“ (v. WEIZSÄCKER 1989) bringen diese neue Sicht auf globale Entwicklungsprozesse zum Ausdruck. Nun werden Indikatoren gesucht, die die Nachhaltigkeit der Entwicklung bemessen können oder zur Steuerung einer „ökologischen Ökonomie“ (u.a. COSTANZA 1992, RENNINGS 1994) beitragen.

Von vielen Autoren¹⁴ wird dabei ein ökonomisches Verständnis von Nachhaltigkeit zugrundegelegt. Diese Herangehensweise wird prinzipiell auch seitens der Ökologie zu akzeptieren sein, da grundlegende Instrumentarien zur Wirtschafts- und Politikbeeinflussung aus der Ökonomie selbst erwachsen müssen.

¹² MEADOWS 1973, S.38f.

¹³ Das Umweltgutachten 1994 des Rats von Sachverständigen für Umweltfragen stand unter dem Leitthema „Für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung“ (SRU 1994).

¹⁴ Überblick in PFISTER u. RENN 1995

Eine Schwierigkeit besteht darin, die Meßgrößen für eine annähernd exakte Abbildung der Nachhaltigkeitssituation festzulegen und auf eine handhabbare Menge zu reduzieren (FISTER u. RENN 1995). Dieser notwendige Auswahl- und Abwägungsprozeß sollte jedoch nicht in einer ausschließlich monetären Bewertung münden. Solcherart „ökonomischen Fundamentalismus“ haben v. WEIZSÄCKER, A. B. und L. H. LOVINS (1995) im neuen Bericht an den CLUB OF ROME kritisiert und sich gegen die Verabsolutierung der ökonomischen Kreisläufe unter Ausblendung der Eingangsressourcen und der Reststoffe gewandt.

Naturwissenschaftlich ableitbare Meßgrößen über den Zustand bzw. die Belastung der Umweltgüter sind deshalb für die Bewertung der Nachhaltigkeit ebenfalls erforderlich und fest in den Indikatorenkomplex zu integrieren. Dabei sollte das Indikatorensystem für jeden Umweltbereich sowohl Belastungs-, als auch Zustandsgrößen erfassen, um einerseits den Verursacherbezug herstellen zu können (Umweltbelastung), und auf der anderen Seite auch Defizite bei der Nachhaltigkeit bzw. eine Annäherung oder Entfernung festzustellen (Umweltzustand) (FRANKE u. KOTTMANN 1995).

Bei PEARCE u. TURNER (1990)¹⁵ lautet eine der Managementregeln für die nachhaltige Entwicklung, daß Emissionen die natürliche Aufnahmekapazität der Ökosysteme nicht überschreiten dürfen. Solche ökosystemaren Aufnahmekapazitäten lassen sich aus Messungen und Wirkungsmodellen ableiten und stehen für ein Indikatorensystem zur Verfügung. Ein bereits praktizierter Ansatz zur Bestimmung von ökologischen Belastungsgrenzen sind die Critical Loads & Levels.

Das Critical Loads & Levels-Konzept hat durch seine Verwirklichung im Rahmen der europäischen Konvention über weitreichende, grenzüberschreitende Luftverschmutzung (CONVENTION ON LONG RANGE TRANSBOUNDARY AIR POLLUTION, UN ECE 1979) in der internationalen Umweltpolitik zunehmend an Bedeutung gewonnen. Mit diesem Ansatz werden von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN ECE) erstmals Umweltbelastungs- bzw. -qualitätskriterien für komplexe Ökosysteme als Zielgröße für die Emissionsreduzierung bei verschiedenen Luftschadstoffen verwendet. Auch im nationalen Maßstab sollen die sich aus diesem Konzept ergebenden Möglichkeiten einer auf ökosystemare Zusammenhänge orientierten Umweltpolitik stärker genutzt werden. Des öfteren wurde der Umweltpolitik in Deutschland "zum Vorwurf gemacht, daß sie zwar mit beachtlicher Energie und großer Regelungsbreite umweltbezogene Aktivitäten und Nutzungen beschränken und begrenzen wolle, aber nur selten bereit sei, langfristige Zielvorstellungen über Art und Ausmaß der angestrebten Umweltqualität zu entwickeln" (GREGOR 1993).

¹⁵ zitiert nach RENNINGS 1994, S.17

Deshalb galt der Entwicklung von Umweltindikatorensystemen auf nationaler Ebene auch die besondere Aufmerksamkeit des Sachverständigenrates für Umweltfragen in seinem Gutachten 1994, wo eine Systematik von Kriterien gefordert wird, aus der sich eine überschaubare Menge von Indikatoren auswählen läßt (SRU 1994, Tz.154). Umweltindikatoren im Sinne einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung sollen aufzeigen, durch welche Beeinträchtigungen die Gleichgewichte eines Ökosystemgefüges derart gestört werden, daß die nachhaltige Wirksamkeit der natürlichen Strukturen, Funktionen und Prozesse und damit die Kompensation anthropogener Störungen nicht mehr gewährleistet ist (SRU 1994, Tz.155). Dem entsprechen die Critical Loads und Levels. Sie ermöglichen, Umweltqualitätsziele zu entwickeln, die sich "an ökologisch und damit naturwissenschaftlich begründeten Grenzen für Stoffeinträge und strukturelle Änderungen orientieren. Hierzu sind Belastungsgrenzen für Ökosysteme und Teilökosysteme bezüglich verschiedener Nutzungen und Stoffeinträge zu ermitteln" (SRU 1994, Tz.182).

Umweltqualitätsziele sind allerdings politische Vorgaben, die sich auf das Erreichen oder Erhalten einer bestimmten Umweltqualität richten. Es ist daher möglich und zuweilen notwendig, Umweltqualitätsziele für verschiedene zeitliche Abschnitte zu definieren, die unterschiedlich hohe Schutzniveaus repräsentieren (Target Loads & Levels). Diese können dann innerhalb bestimmter Fristen verwirklicht werden. Letztendlich sollten als Qualitätskriterien für ein Schutzniveau, bei dem die Umwelt umfassend geschützt und das als langfristiges Ziel anzustreben ist, ausschließlich die Critical Loads & Levels zur Anwendung kommen. Für derart weitgehende, vom Vorsorgegedanken geprägte Qualitätskriterien ist allerdings in vielen Fällen nur langfristig die Umsetzung in verbindliche Standards zu erwarten.

In seinen Schlußfolgerungen empfiehlt in diesem Sinne der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen:

"Umweltindikatoren, die der Forderung nach dauerhaft-umweltgerechter Entwicklung entsprechen, müssen sich an der Leistungsfähigkeit von Ökosystemen orientieren; sie müssen den Grad der stofflichen und nicht-stofflichen Belastung beschreiben. Wegen der hohen Komplexität sollte bei der Bildung von Umweltindikatoren eine möglichst große Transparenz und Verständlichkeit angestrebt werden. Dies verbessert auch die notwendige Akzeptanz für die Datenerhebung und -bereitstellung. Das im Rahmen internationaler ökologischer Forschungsprojekte entwickelte Konzept der kritischen Konzentrationen (Critical Levels) und kritischen Eintragsraten (Critical Loads) bietet für Stoffe, die in Kreisläufen geführt werden, geeignete Indikatorengrößen und sollte auch für persistente, akkumulierende Stoffe sowie für strukturelle Veränderungen von Natur und Landschaft (kritische strukturelle Veränderungen / Critical Structural Changes) Anwendung finden" (SRU 1994, Tz.256/7).

"Von besonderer Bedeutung für den Bereich der Indikatoren ist die schnelle Weiterentwicklung und Ausfüllung des Konzepts der kritischen Konzentrationen, kritischen Eintragsraten und kritischen strukturellen Veränderungen. Hierfür meldet der Umweltrat unmittelbaren Forschungsbedarf an" (SRU 1994, Tz.256/13).

Critical Levels und Critical Loads - Ökologische Belastungsgrenzen

Unter Critical Levels/Loads sind naturwissenschaftlich begründete Belastungsgrenzen von Rezeptoren wie von Ökosystemen, Teilökosystemen und Organismen bis hin zu Materialien zu verstehen. Diese Belastungsgrenzen gelten unter festen Randbedingungen, wie Raum, Zeit und ökologisches System, die im einzelnen zu definieren und transparent zu machen sind. Ökologische Belastungsgrenzen sind vorrangig rezeptornah und wirkungsbezogen zu formulieren.

Im Rahmen der Aktivitäten der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN-ECE) ist das Critical Levels- und Critical Loads-Konzept für ökologische Belastungsgrenzen gegenüber verschiedenen Luftschadstoffen entwickelt worden. In diesem Zusammenhang werden unter Critical Levels Luftschadstoffkonzentrationen verstanden, bei deren Unterschreitung nach derzeitigem Wissen keine direkten Schäden an Rezeptoren zu erwarten sind. Es wird sowohl das kurzzeitige als auch das kontinuierliche Auftreten von Schadstoffen über längere Zeiträume berücksichtigt. Unter Critical Loads werden quantitative Abschätzungen von Luftschadstoffdepositionen verstanden, bei deren Unterschreitung nach derzeitigem Kenntnisstand signifikant schädliche Effekte an Ökosystemen und Teilen davon nicht zu erwarten sind.

Quelle: SRU 1994, Seite 103

Erforderlich ist eine Ausweitung des Konzeptes auf sämtliche Belastungspfade und -faktoren.

Der Umweltrat empfiehlt, die Begriffe „Critical Levels" mit „kritische Konzentrationen" und „Critical Loads" mit „kritische Eintragsraten" gleichzusetzen.

Darüber hinaus schlägt der Umweltrat vor, das Konzept der ökologischen Belastungsgrenzen auf strukturelle Eingriffe in Natur und Landschaft auszudehnen und

hierfür den Begriff der „kritischen strukturellen Veränderungen“ (Critical Structural Changes) zu verwenden.

2.0 Das europäische Critical Loads & Levels-Konzept

Die europäischen Umweltminister haben mit Unterzeichnung des zweiten Protokolls zur Minderung der atmosphärischen Schwefelbelastung 1994 in Oslo die Critical Loads als Belastbarkeitsindikatoren für ein Ökosystem bzw. einen definierten ökologischen Rezeptor und die Exceedance der Critical Loads als Maß für die Gefährdung durch anthropogene Stoffeinträge festgelegt.

Im Rahmen des Genfer Luftreinhalteübereinkommens waren zuvor bereits Maßnahmen zur Minderung der atmosphärischen Schadstoffbelastung durch Schwefeldioxyde (SO₂-Protokoll, Helsinki 1985) sowie durch Stickoxide (NO_x-Protokoll, Sofia 1988) beschlossen worden. Die in den Abkommen vereinbarten Strategien zur Begrenzung und Verminderung des Schadstoffausstoßes in die Atmosphäre haben unterschiedliche Ansatzpunkte, die den zum jeweiligen Zeitpunkt erreichten Stand des Wissens und die politische Übereinkommensfähigkeit der vertragschließenden Seiten widerspiegeln.

Mit fortschreitender europäischer Integration konnten auch anspruchsvollere Zielsetzungen für die Umweltpolitik festgeschrieben werden. Diese konzentrieren sich heute nicht mehr allein darauf, zulässige Höchstgrenzen von Schadstoffemissionen festzulegen, sondern versuchen mit einem ökosystemaren Ansatz, der die tatsächlichen Belastungsgrenzen unterschiedlicher Biotopie berücksichtigt, einen wirksameren Umweltschutz zu erreichen. Ein solcher ökosystemarer Ansatz ist die Bestimmung von ökologischen Belastungsgrenzen für wichtige natürliche Rezeptoren und definierte Schadstoffe (Critical Loads & Levels-Konzept).

Konzeptionell wurden bisher drei Strategien zur Senkung der atmosphärischen Schadstoffbelastung verfolgt:

- **Prozentansatz**

Die Emissionsmengen eines Luftschadstoffs werden von allen Ländern einheitlich um einen festgelegten Prozentsatz vermindert. Im Vergleich zum vereinbarten Bezugsjahr muß zum Zielzeitpunkt die Gesamtemission jedes Landes um diesen Prozentsatz reduziert sein. Beispiel: Im ersten SO₂-Protokoll verpflichteten sich alle Signatarstaaten gegenüber dem Bezugsjahr 1980 die SO₂-Freisetzung bis 1993 um mindestens 30 Prozent gesenkt

zu haben, wobei weder die Höhe der Emissionen im Bezugsjahr noch die tatsächliche ökologische Belastung berücksichtigt wurden.

- **BAT-Konzept**

Die mögliche Emissionsreduzierung wird für jeden Luftschadstoff vom gegenwärtigen Stand der Technik abhängig gemacht. Bezogen auf einen Schadstoff wird verhandelt und festgelegt, mit welchen in Europa verfügbaren Technologien der geringste Schadstoffausstoß zu erwarten ist. Dieser modernste Stand der Technik (Best Available Technology, BAT) zwingend für alle Industrieanlagen einer bestimmten Größenordnung vorgeschrieben, führt zur gewünschten Minderung der Schadstofffreisetzung. Eine selektive Berücksichtigung besonders gefährdeter ökologischer Rezeptoren ist allerdings nicht möglich.

Beispiel: In der ersten Phase des NO_x -Protokolls bis 1996 soll die Begrenzung der Schadstoffemissionen hauptsächlich durch die Anwendung des BAT-Konzeptes für bestimmte Industrieanlagen und in der Energiewirtschaft erreicht werden.

Protokoll

zu dem **Übereinkommen von 1979** über

weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung betreffend die weitere Verringerung von Schwefelemissionen

Die Vertragsparteien-

entschlossen, das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung durchzuführen,

besorgt darüber, daß Emissionen von Schwefel und anderen luftverunreinigenden Stoffen weiterhin über internationale Grenzen befördert werden und in exponierten Teilen Europas und Nordamerikas ausgedehnte Schäden an Naturschätzen von lebenswichtiger Bedeutung für Umwelt und Wirtschaft, z.B. Wäldern, Böden und Gewässern, sowie an Materialien, einschließlich historischer Denkmäler, verursachen und unter bestimmten Umständen schädliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben,

.....

in Bekräftigung der Notwendigkeit, eine umweltverträgliche und nachhaltige Entwicklung sicherzustellen,

in Anerkennung der Notwendigkeit, die wissenschaftliche und technische Zusammenarbeit fortzusetzen, um den auf kritischen Belastungen und kritischen Werten beruhenden Lösungsansatz weiter auszuarbeiten, einschließlich der Bemühungen zur Bewertung verschiedener luftverunreinigender Stoffe und unterschiedlicher Auswirkungen auf die Umwelt, auf Materialien und auf die menschliche Gesundheit,

.....

sind wie folgt übereingekommen:

.....

Artikel 2

Grundlegende Verpflichtungen

(1) Die Vertragsparteien begrenzen und verringern ihre Schwefelemissionen, um die Gesundheit des Menschen und die Umwelt vor nachteiligen Auswirkungen, insbesondere Auswirkungen durch Versauerung zu schützen und um sicherzustellen, soweit möglich ohne unverhältnismäßig hohe Kosten zu verursachen, daß Ablagerungen von oxidierten Schwefelverbindungen die nach dem heutigen wissenschaftlichen Kenntnisstand in Anhang I als kritische Schwefelablagerungen angegebenen kritischen Belastungen für Schwefel langfristig nicht überschreiten.

Artikel 6

Forschung, Entwicklung und Überwachung

Die Vertragsparteien fördern die Forschung, Entwicklung, Überwachung und Zusammenarbeit in bezug auf

a) die internationale Harmonisierung der Methoden zur Festlegung der kritischen Belastungen und der kritischen Werte....

c) Strategien zur weiteren Verringerung der Schwefelemissionen auf der Grundlage der kritischen Belastungen....

d) das Verständnis für die weitreichenden Auswirkungen von Schwefelemissionen....auf die Umwelt...

Artikel 7

Einhaltung des Protokolls

(1) Hiermit wird ein Durchführungsausschuß eingesetzt, der die Durchführung dieses Protokolls und die Einhaltung der....Verpflichtungen überprüft....

Oslo, 13.Juni 1994

- **Critical Loads & Levels-Konzept**

Die Belastbarkeit der Ökosysteme bestimmt die Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung. Abgeleitet vom wissenschaftlichen Erkenntnisstand werden für jeden Schadstoff und alle wichtigen ökologischen Rezeptoren spezifische Belastungsgrenzen (Critical Loads & Levels) bestimmt. Die Ausgangssituation in bezug auf die bisherige Belastung und die Sensitivität der Ökosysteme gehen in das Konzept ein.

Beispiel: Im zweiten SO₂-Protokoll und dem Nachfolgeprotokoll für NO_x werden die Maßnahmen zur Emissionsreduzierung von wissenschaftlich erarbeiteten und international bestätigten Critical Loads & Levels abgeleitet.

Erforderlich wurde ein neuer Strategieansatz, da bereits beim Inkrafttreten des SO₂-Protokolls dessen ökologische Inkonsequenz unbestritten war. Mit der Zielstellung, die Emissionen in allen Ländern bis 1993 um 30 Prozent zu vermindern, waren einerseits beachtliche wirtschaftliche Aufwendungen verbunden, denen andererseits aber keine sichtbaren ökologischen Effekte gegenüberstehen. So nimmt beispielsweise der Anteil des versauerten Waldbodens (unterhalb pH 4) auch bei voller Einhaltung dieses Protokolls ständig zu (Abb.1). Selbst die Verdopplung der Zielsetzung aus dem ersten SO₂-Protokoll, also eine 60 prozentige statt einer 30 prozentigen Minderung des SO₂-Ausstoßes, würde für Mitteleuropa die ökologische Belastung nicht grundlegend ändern. Wie eine IIASA-Studie ergab (AMANN, KLAASEN u. SCHÖPP 1991), liegen auch dann die sauren Depositionen in vielen Regionen noch weit über den ökologischen Belastungsgrenzen.

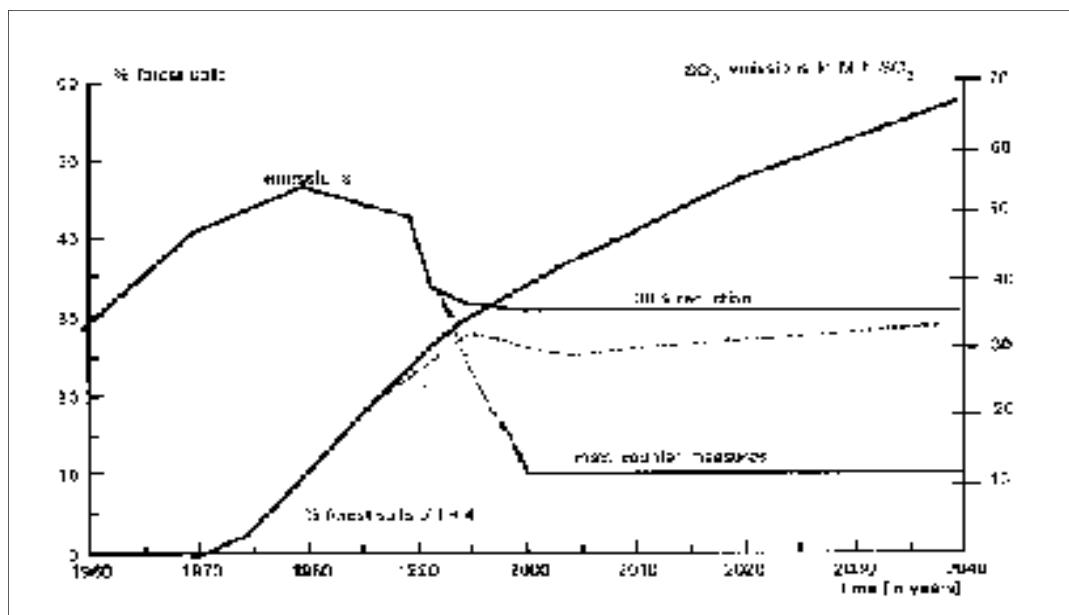


Abbildung 1: Entwicklung der SO₂-Emissionen in Europa und Anteil der Waldböden mit einem pH-Wert < 4 (RIVM 1989)

Deshalb wurde vereinbart:

Die Emissionssenkungen werden auf zu erarbeitende ökologische Belastungsgrenzen bezogen, deren Einhaltung unter den spezifischen Bedingungen der einzelnen Länder und Regionen Schäden in den Ökosystemen sowie an Bauwerken und Materialien ausschließen soll. Damit wird der Versuch unternommen, die Emissionsreduzierung eines Schadstoffes von vornherein ökologisch begründet vorzubereiten.

Erstmals verwandt wurde der Begriff "Ökologische Belastungsgrenzen" Ende der 70er Jahre zur Unterstützung umweltpolitischer Entscheidungen der Regierung Kanadas. Er fand daraufhin Eingang in die internationale Arbeit, insbesondere im Zusammenhang mit dem Übereinkommen über weitreichende, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen. Angeregt durch den Nordischen Ministerrat wurde ab 1986 versucht, das Konzept auf komplexe Ökosysteme anzuwenden und den Vorschlägen zur Senkung von Schadstoffbelastungen ökologische Belastungsgrenzen zugrunde zu legen (NILSSON 1986). Ein Anliegen bestand dabei darin, eine ökologische Alternative zum technisch orientierten BAT-Ansatz zu schaffen.

Abhängig vom Schadstoff und seiner Wirkung im Ökosystem werden ökologische Belastungsgrenzen allgemein wie folgt definiert (UN ECE 1993):

Critical Loads sind die quantitative Abschätzung der Schadstoffdeposition, bei der nach bisherigem Wissen keine nachweisbaren Veränderungen der Ökosysteme in Struktur und Funktion zu erwarten sind.

Critical Levels sind die quantitative Abschätzung der Schadstoffkonzentration (Immission), unterhalb der, nach derzeitigem Wissen, keine Schäden bei den ökologischen Rezeptoren zu erwarten sind.

Seitdem 1990 das methodische Handbuch zur Bestimmung der Critical Loads "Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and geographical areas where they are exceeded" (UN ECE 1993) als Ergebnis mehrerer internationaler Expertentreffen herausgegeben wurde, sind viele Fortschritte bei der grundlegenden Datenbasis und in der Zuverlässigkeit der Bestimmungsmethoden für die Critical Loads & Levels erreicht worden. In den UN ECE-Strukturen (Abb. 2) fließen aus unterschiedlicher Sicht Ergebnisse und Erfahrungen der Arbeitsgruppen, darunter der unter deutscher Leitung stehenden Task Force on Mapping, in die umweltpolitischen Zielstellungen ein.

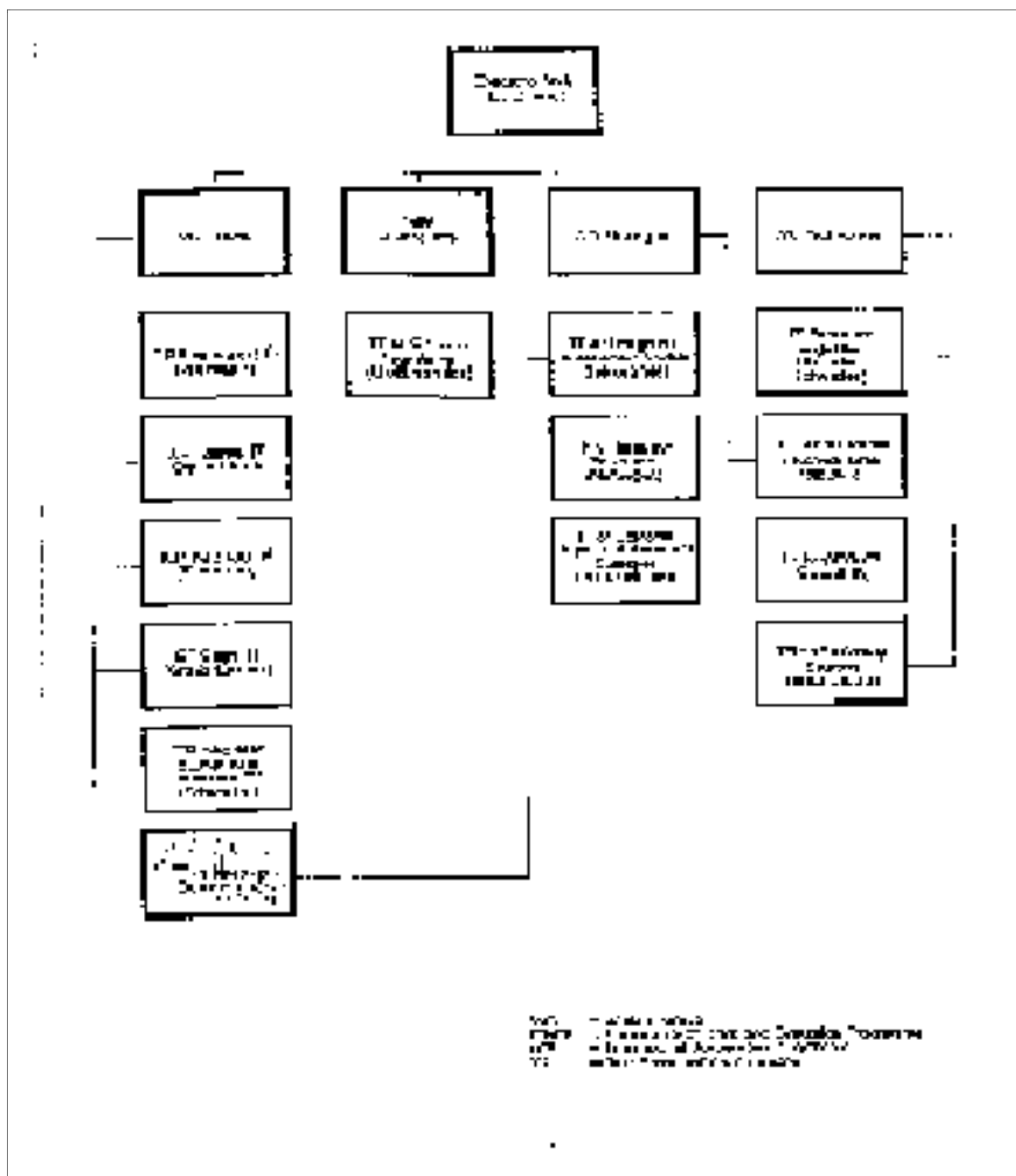


Abbildung 2: Einbindung des Critical Load-Konzepts in die UN ECE Strukturen
(UBA ICP 1995)

Zur Vorbereitung des zweiten Schwefelprotokolls wurden die maximal zulässigen Säureeinträge für empfindliche, gleichzeitig aber auch repräsentative Ökosysteme kartiert, so zum Beispiel die europäische 5-Perzentilkarte der Critical Loads für die saure Deposition durch den Eintrag von Schwefelverbindungen in Waldökosysteme. Damit wird einer Forderung

des Schwefelprotokolls gefolgt, die Critical Loads auch getrennt für den Schwefel- und den Stickstoffanteil bei den Luftschadstoffen zu berechnen. Für die Europakarte können aus dem Vergleich der Critical Loads mit der tatsächlichen Säurebelastung Aussagen über die Einhaltung oder Überschreitung der Critical Loads getroffen werden.

Infolge der regional unterschiedlichen Belastbarkeiten der Ökosysteme ergeben sich individuelle Festlegungen für die Obergrenzen der Schwefelemissionen für die einzelnen Vertragsstaaten bzw. für die Rasterzellen (etwa 150 km * 150 km) des europäischen Ausbreitungsmodells für Luftschadstoffe EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme, UN ECE/EMEP 1990).

Deutschland ist nach dem zweiten Schwefelprotokoll verpflichtet, seine SO₂-Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 1980 um 83 % bis zum Jahr 2000 und um 87 % bis zum Jahr 2005 zurückzuführen. Bereits nach dem ersten Schwefelprotokoll war europaweit eine Reduzierung der Emissionen größer 30 % zu verzeichnen, Deutschland erreichte bis 1992 eine Verminderung des SO₂-Ausstoßes um 53 %. Mit Deutschland vergleichbare Schwefelreduzierungsraten wurden im zweiten Protokoll auch für Österreich, Dänemark, Finnland, Schweden, Niederlande, Frankreich und Belgien festgelegt. Unter den Ländern des früheren Ostblocks will Polen seine Schwefeldioxidemissionen im gleichen Zeitraum um 47 %, die Tschechische Republik um 60 % und Bulgarien um 40 % mindern.

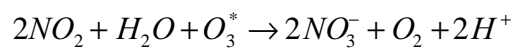
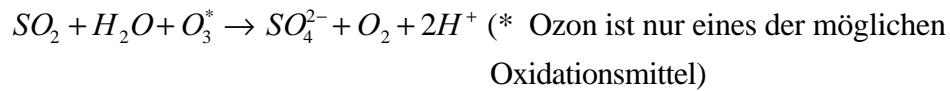
Die Critical Load-Berechnungen für Europa und die daraus abgeleiteten Karten zeigen, daß mit diesem ökosystemaren Ansatz eine Möglichkeit gefunden wurde, Schadstoffsenkungsstrategien differenziert auszuarbeiten und unter ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. In der europäischen Luftreinhaltepolitik sollen die Critical Loads bestimmen, in welchem Umfang weitere Maßnahmen zur Senkung der Schadstoffemission bzw. -deposition festgelegt werden müssen. Die Zielstellung dabei ist, über einen absehbaren Zeitraum die Schadstoffemissionen soweit zu senken, daß überall die ökologischen Belastungsgrenzen nicht mehr überschritten werden.

3.0 Erfassung von Critical Loads in Deutschland

3.1 Critical Loads für Säureinträge in Waldböden

Im Zusammenhang mit der Vorbereitung des zweiten Schwefelprotokolls für Europa, das erste ECE-Protokoll zur Minderung der Emissionen von Schwefeldioxid hatte eine Laufzeit von 1985 bis 1993, wurden auch in Deutschland zunächst Critical Loads für den Eintrag von Schwefelverbindungen bestimmt.

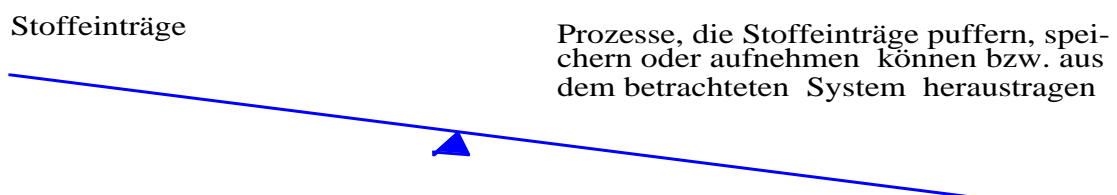
Aus wissenschaftlicher Sicht erfolgte darüber hinaus eine Erweiterung der Berechnungen auf die gesamte saure Deposition. So werden gegenwärtig die Schwefel- und Stickstoffverbindungen einzeln ebenso wie hinsichtlich des Gesamtsäureeintrags, als Protonenabgabe (H^+) betrachtet, in die Berechnungen einbezogen:



Von den durch Luftschadstoffe betroffenen Ökosystemen wurde allgemein für Europa der Wald bzw. der Waldboden als Rezeptor für die Bestimmung von Critical Loads für den Säureeintrag ausgewählt. Einige europäische Länder berechneten zusätzlich auch Critical Loads für die Versauerung von Seen.

Die zur Bestimmung der ökologischen Belastungsgrenzen verwendeten Methoden basieren auf einem einfachen Gleichgewichtsansatz für die Massenbilanzen. Wie auf einer Waage werden dabei die Quellen und Senken der betrachteten (Schad-) Stoffe gegeneinander aufgewogen.

Massenbilanzmethode



Mit Einstellung des Gleichgewichts wird die maximal zulässige (anthropogene) Deposition, der Critical Load-Wert, erreicht. Versauernd wirkende Stoffeinträge z.B. dürfen danach höchstens der gesamten Säureneutralisationskapazität des Systems entsprechen, die Nährstoffeinträge in Form von Stickstoff sollten nicht höher als die N-Festlegung sowie der Entzug mit Biomasse und Sickerwasser sein.

Beim Säureeintrag sind signifikante Schäden in einem Waldökosystem zu erwarten, wenn kritische chemische Werte in der Bodenlösung über- oder unterschritten werden, die zu einer Destabilisierung der Bodenprozesse oder zu Schäden an der Vegetation führen.

Als kritische chemische Werte (Tab.1) sind die Protonen- und Aluminiumkonzentration in der Bodenlösung sowie ein kritisches Ionenverhältnis der basischen Kationen (BC) Calcium (Ca^{2+}) und Magnesium (Mg^{2+}) zum Aluminium (Al^{3+}) anzusehen, letzteres wird als BC/Al- oder Ca+Mg/Al-Verhältnis bezeichnet (UN ECE 1993, HETTLINGH und DE VRIES 1992 ROST-SIEBERT 1985, HÜTTERMAN und ULRICH 1984).

Parameter	Einheit	Wert
Al	eq/m ³	0.2
BC / Al	eq/eq	1.0
pH	-	4.0
ANC	eq/m ³	-0,3

Tabelle 1: Kritische chemische Werte in der Bodenlösung unter Waldökosystemen

Critical Loads können somit auch als die maximale Deposition beschrieben werden, bei deren langfristigen Eintrag sich die Verhältnisse in der Bodenlösung nicht dahingehend ändern, daß einer dieser kritischen chemischen Werte den Toleranzbereich verläßt. Zum Beispiel sind als Folge einer Bodenversauerung die Auswaschung basischer Kationen und damit die Verschiebung des Ca+Mg/Al-Verhältnisses beobachtet worden, wobei ein Wert von 1 als eine kritische Größe anzusehen ist. Ein gesunder Boden zeichnet sich durch ein Ca+Mg/Al-Verhältnis zwischen 10 und 100 aus (ROST-SIEBERT 1985, SVERDRUP 1992).

Das für die Critical Load-Berechnungen verwendete einfache Massenbilanz-Modell setzt bei dieser Erkenntnis an und verwendet die Säureneutralisationskapazität (ANC, Tab. 1) in der Bodenlösung sowie das BC/Al-Verhältnis als einen zentralen Grenzwert für versauerungsgefährdete Forstböden. Zur Berechnung der maximalen Eintragswerte, die eine Einhaltung dieser Grenzwerte gewährleisten, hat man sich auf die Modellierung der maßgeblichen Schlüsselprozesse im System Waldboden konzentriert. Die Betrachtung eines langfristigen Gleichgewichtszustandes (steady state) ist dabei eine Grundannahme des Critical Load-Ansatz.

Auf der Waage werden also auf der einen Seite die Protoneneinträge, auf der anderen Seite die Nettosumme der Raten der Protonen konsumierenden und produzierenden Prozesse im System bilanziert, wobei der Critical Load-Wert dem Eintrag entspricht, der diese Waage ausgleicht.

Die diese einfache Massenbilanz abbildende Grundgleichung berücksichtigt vier Quellen oder Senken:

- die Freisetzung basischer Kationen (BC) durch die Mineralverwitterung (BC_w),
- die Aufnahme basischer Kationen durch die Vegetation (BC_u),
- die Aufnahme von Stickstoffverbindungen durch die Vegetation (N_v) sowie
- den Verlust an Säureneutralisierungskapazität (Acid Neutralizing Capacity, ANC) durch die Auswaschung in tiefere Bodenschichten (ANC_l).

Aus der Grundgleichung

$$CL_{AC} = BC_w - BC_u + N_v - ANC_l$$

wird die Berechnungsvorschrift entwickelt, die abgeleitete Gleichung zur Critical Loads-Bestimmung lautet:

$$CL_{AC} = BC_w + \left(\frac{0,8 * BC_w + BC_d - BC_u - PS * 0,015}{(BC / AL) * K_{gibb}} \right)^{1/3} * PS^{2/3} + (0,8 * BC_w + BC_d - BC_u - PS * 0,015)$$

CL_{AC} - Critical Load für den Säureeintrag [eq/ha yr]

BC_w - Verwitterungsrate [eq/ha yr]

BC_d - Deposition basischer Kationen [eq/ha yr]

BC_u - Aufnahme basischer Kationen durch die Vegetation [eq/ha yr]

PS - Sickerwasserrate (Precipitation surplus) [eq/ha yr]

Die gesamte Ableitung der Berechnungsvorschriften kann NAGEL, SMIA TEK und WERNER (1994) entnommen werden. Für die deutschen Waldgebiete sind seit 1991 Berechnungen und Kartierungen der Belastbarkeit mit Säureeinträgen erstellt und veröffentlicht worden. Ebenfalls liegen Karten der Überschreitung der Critical Loads vor (SRU 1994; NAGEL, SMIA TEK und WERNER 1994).

Tabelle 2 und Abbildung 3 zeigen die Belastbarkeitswerte in ihrer realen Flächenverteilung. Entsprechend der Waldverteilung ist in der Karte mit einer Auflösung von 1 km * 1 km der Critical Load-Wert für den dort hauptsächlich vorkommenden Waldtyp dargestellt.

Critical Loads [eq/ha yr]	Anteil der Waldfläche [%]
< 200	2,7
200 - 500	9,0
500 - 1000	33,0
1000 - 2000	37,9
> 2000	17,4

Tabelle 2: Critical Loads-Verteilung bezogen auf die Waldfläche

Aus der statistischen Verteilung der Critical Load-Werte ergibt sich, daß etwa 45 Prozent der deutschen Waldflächen sehr empfindlich gegenüber Säureeinträgen sind. Die Belastbarkeitswerte liegen unter 1000 eq/ha yr.

Abbildung 3: Critical Loads für den Säureeintrag in Waldböden

Bei weiteren 38 Prozent werden Depositionswerte von 1000 eq/ha yr bis 2000 eq/ha yr noch toleriert. Weniger als 20 Prozent des deutschen Waldes befinden sich auf gut gepufferten Standorten, sind gegenüber den sauren Einträgen demzufolge nicht so sensibel.

3.2 Critical Loads für eutrophierende Stickstoffeinträge in Waldökosysteme

Während die Emissionen von Schwefelverbindungen in den letzten beiden Jahrzehnten deutlich geringer wurden, haben sich die Emissionen von Stickstoffverbindungen in den meisten Ländern auf hohem Niveau gehalten, teilweise sogar erhöht. Wenn Anfang der 70er Jahre Stickstoffverbindungen bis auf wenige Ausnahmen höchstens mit einem Drittel an der sauren Deposition beteiligt waren, so hat sich diese Relation deutlich in Richtung eines höheren Stickstoffanteils verschoben. Auch in Deutschland läßt sich die Tendenz der Verschiebung des Schadstoffeintrages von Schwefel- zu Stickstoffverbindungen nachweisen, wie Untersuchungen an einem Standort im Solling exemplarisch zeigen (Abb. 4 nach ULRICH 1993 und BML 1994).

Aus ökologischer Sicht sind diese anthropogenen Stickstoffeinträge deshalb so gravierend, weil unter naturnahen Bedingungen Stickstoff in der Regel knapp ist. Ökosysteme haben sich in der Evolution zumeist auf Bedingungen eingestellt, bei denen nutzbarer Stickstoff zu den begrenzenden Faktoren im Stoffkreislauf gehört. Ihre besondere ökologische Wirkung erlangen Stickstoffverbindungen dadurch, daß sie in pflanzenverfügbarer Form einen zusätzlichen Nährstoffeintrag bedeuten und damit zur Eutrophierung der terrestrischen und aquatischen Ökosysteme beitragen.

Nach Abschluß des zweiten Schwefelprotokolls ist deshalb die Vorbereitung eines Nachfolgeprotokolls für Stickstoff von höchster Priorität in der europäischen Umweltpolitik. Wie beim Schwefelprotokoll sollen die Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff dabei die Grundlage bilden, um ökologisch wirksame Ziele für die Emissionsminderung in den einzelnen Ländern bzw. für den gesamteuropäischen Raum bestimmen zu können. Mit dem zweiten Protokoll für Stickstoffverbindungen kann in nächster Zeit gerechnet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Workshops zur Kartierung von Critical Loads für Stickstoff in Lökeberg, Schweden (März 1992) ist als methodischer Ansatz ebenso wie bei den

Säureinträgen eine Massenbilanz gewählt worden. Danach werden die anthropogenen Stickstoffdepositionen den stickstoffspeichernden bzw. stickstoffverbrauchenden Prozessen im Ökosystem gegenübergestellt. Zu diesen zählen die Nettofestlegung von Stickstoff in der Holzbiomasse, die Nettoimmobilisierung in der Humusschicht, die Denitrifikation und ein zu tolerierender bzw. unvermeidbarer Nitrat austrag mit dem Sickerwasser.

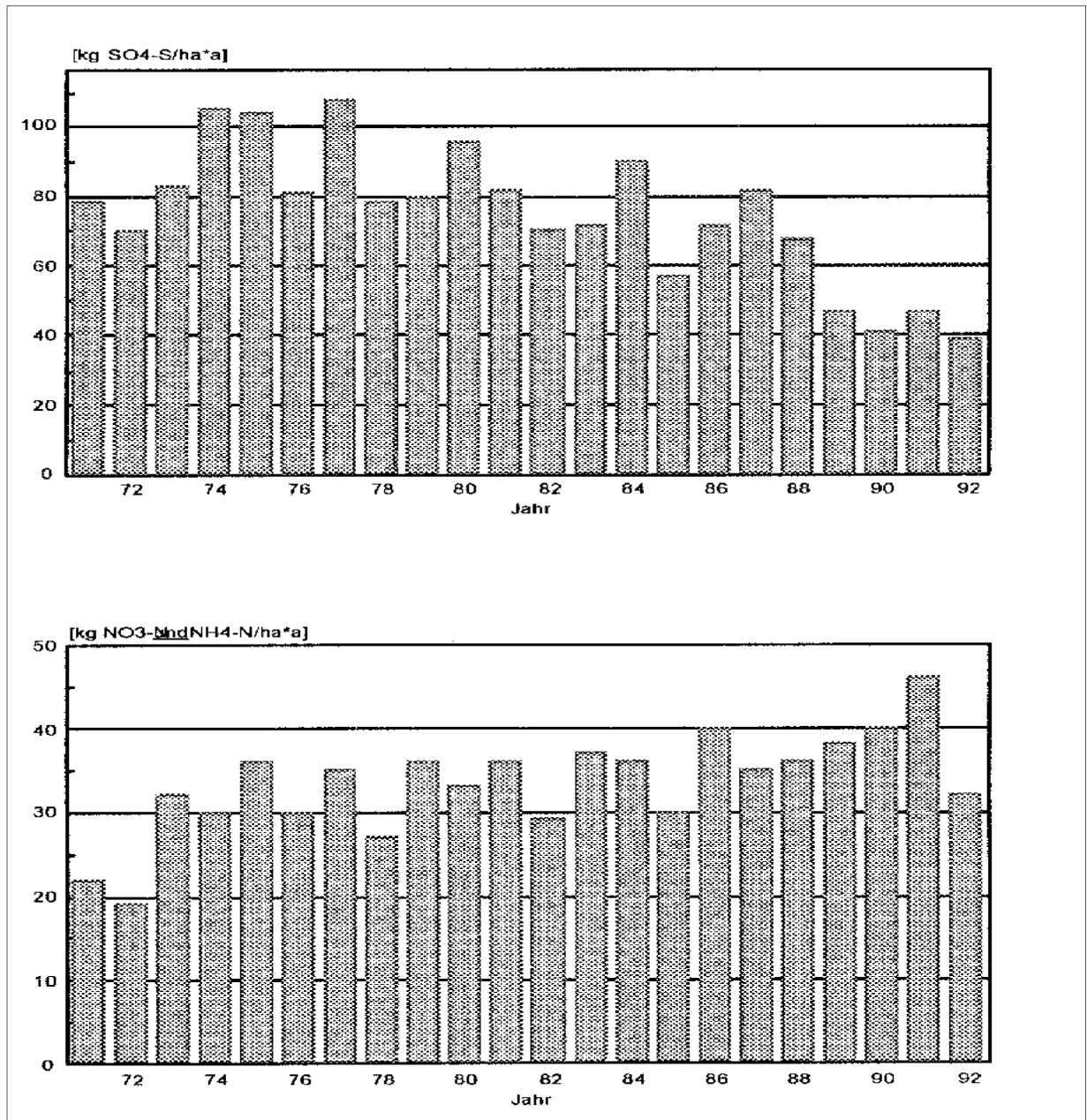


Abbildung 4: Jahresmittelwerte der Deposition (Kronentraufe) von Schwefel ($\text{SO}_4\text{-S}$) und Stickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$) in einem Fichtenbestand des Solling 1971-1992

Die Bestimmung der Belastungsgrenzen für Stickstoffverbindungen erfolgt damit nach der Gleichung:

$$CL_{nut}(N) = N_{u(crit)} + N_{i(crit)} + N_{l(crit)} + N_{de}$$

wobei:

$CL_{nut}(N)$ - Critical Load für den eutrophierenden Stickstoffeintrag in kg N/ha yr

$N_{u(crit)}$ - Grenzwert für die Stickstoffaufnahme durch die Vegetation in kg N/ha yr

$N_{i(crit)}$ - Grenzwert für die Stickstoffimmobilisierung im Humus in kg N/ha yr

$N_{l(crit)}$ - Grenzwert für den Stickstoffaustrag mit dem Sickerwasser in kg N/ha yr

N_{de} - Denitrifikationsrate in kg N/ha yr

Die Ergebnisse der Critical Loads- Berechnungen ergeben für die Waldflächen Deutschlands folgende Grenzwerte der Belastbarkeit mit Stickstoffeinträgen (Tab.3 und Abb.5):

Critical Load in kg N/ha yr	Waldfläche in %
0 - 5	0
5 - 10	52,1
10 - 15	36,4
15 - 20	11,2
20 - 30	0,3
> 30	0
Gesamtfläche	100,0

Tabelle 3: Critical Loads für Stickstoffeinträge in Waldökosysteme

Der flächenmäßig größte Anteil der Critical Loads liegt im Bereich zwischen 5 kg N/ha yr und 15 kg N/ha yr. Wie bisherige Erkenntnisse belegen, entsprechen die berechneten Werte etwa der Menge Stickstoff, die intakte Waldökosysteme durchschnittlich im jährlichen Derbholzzuwachs festlegen können. Für Kiefernforsten sind Critical Loads in diesen Größenordnungen wahrscheinlich noch etwas überhöht. Hochproduktive Waldstandorte hingegen sind über sehr begrenzte Zeiträume durchaus in der Lage, größere Mengen an Stickstoff (> 30 kg N/ha yr) umzusetzen (BOBBINK 1995).

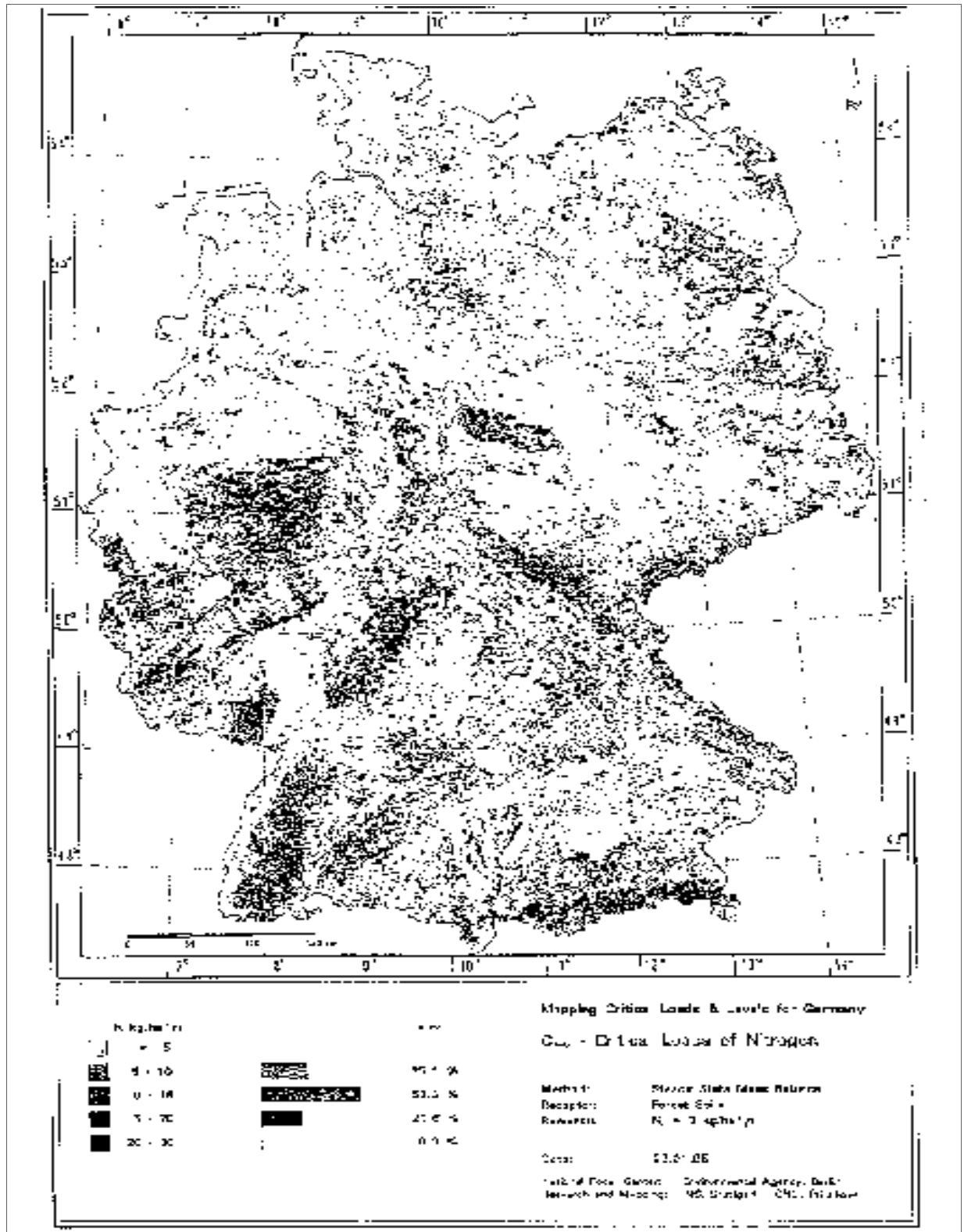


Abbildung 5: Critical Loads für den Stickstoffeintrag in Waldökosysteme

3.3 Critical Loads für aquatische Ökosysteme gegenüber Säurebildnern und eutrophierenden Stickstoffeinträgen

In Deutschland wurden bei der Bestimmung von ökologischen Belastungsgrenzen neben den Waldökosystemen auch aquatische Ökosysteme, vorrangig natürliche und künstliche Standgewässer, in die Untersuchungen einbezogen.

Der Eintrag atmosphärischer Schadstoffe initiiert im Gewässer

- Versauerungsvorgänge durch den Eintrag von SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ ,
- eine beschleunigte Eutrophierung infolge erhöhter Stickstoffeinträge (NO_3^- , NH_4^+).

Die Bestimmung der Critical Loads für aquatische Ökosysteme erfolgt vorrangig mit Gleichgewichtsmodellen, wie der First-Order Acidity Balance Method (FAB) und der Steady-State Water Chemistry Method (SSWC).

Gewässername	CL _{nut(N)} [eq/ha yr]	CL _{AC} [eq/ha yr]	Überschreitung CL _{AC} [eq/ha yr]
TS Muldenberg	640	800	5340
TS Cranzahl	740	1990	4080
TS Carlsfeld	600	560	5300
TS Falkenstein	920		
TS Stollberg	810		
TS Werda	720		
TS Lichtenberg	720		
TS Gottleuba	390		
TS Saidenbach	420		
TS Sosa	740	1730	4410
TS Neunzehnhain II	790	4250	2470
Rachelsee	750	300	2590
Pinnsee	640	510	720

Tabelle 4: Berechnung der Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff (CL_{nut(N)}) und Säureeinträge (CL_{AC}) nach der FAB-Methode für Talsperren (TS) und Seen

Ein Vergleich der für deutsche Seen ausgewiesenen Critical Loads mit denen anderer Länder zeigt, daß die Werte annähernd im gleichen Bereich liegen. Die nach der FAB-Methode für

die Talsperren Crazahl, Neunzehnhain II und Sosa ausgewiesenen CL-Werte liegen etwas höher als beispielsweise die für finnische Seen ermittelten Werte. Die CL-Werte der anderen Gewässer sind vergleichbar. In Norwegen und Polen erfolgte die Critical Loads Berechnung für Gewässer nach der SSWC-Methode. Die ermittelten Werte liegen auch hier in ähnlichen Größenordnungen.

Für die Bestimmung der Critical Loads für aquatische Ökosysteme sind nicht nur die Standgewässer, sondern auch die Fließgewässer interessant. Gerade die ökologisch wertvollen, unverschmutzten Gewässer oberläufe der kalkarmen Mittelgebirge sind gegenüber Versauerungen besonders empfindlich. Im Rahmen der ECE wurde ein internationales Überwachungsprogramm zur Feststellung und Beurteilung der Versauerung von oberirdischen Gewässern entwickelt, Untersuchungsgebiete dafür sind in Deutschland vor allem die Oberläufe von Fließgewässern in Bayern (SCHNELBÖGL, BURKL u. WIETING 1995).

3.4. Critical Loads für Schwermetalle und persistente organische Verbindungen

Die Anreicherung von Schwermetallen und persistenten organischen Verbindungen (POP) in den Umweltmedien und die von ihnen ausgehenden schädlichen Einwirkungen finden in Umweltforschung und Politik zunehmende Beachtung. Im Unterschied zu den meisten POP sind Schwermetalle Bestandteile von natürlichen Stoffkreisläufen. Diese werden aber heute stark von anthropogenen Einflüssen überlagert. Dagegen stammen viele POP ausschließlich aus Produktionsprozessen. Die Vielzahl der möglichen Verbindungen, Isomeren und Spaltprodukte, die trotz ähnlicher Strukturen oft völlig unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, macht eine Risikobewertung besonders kompliziert.

Die Gefahr, die von einer Anreicherung des Bodens mit persistenten Stoffen ausgeht, liegt hauptsächlich in der Kontamination von Nahrungsketten bis hin zum Menschen. Sowohl bei Schwermetallen als auch bei POP sind stoffabhängig toxische, mutagene und kanzerogene Wirkungen auf höherentwickelte Lebewesen bekannt. Weiterhin treten Minderungen der Besiedlungsdichte von Böden und Einschränkungen der mikrobiologischen Aktivität auf. Dagegen setzen toxische Wirkungen auf Pflanzen bzw. Ertragsdepressionen bei verschiedenen persistenten Schadstoffen erst bei sehr hohen Konzentrationen im Boden ein. Da Metalle und POP oft sehr geringe Partikelgrößen aufweisen bzw. in der Gasphase vorliegen, werden sie z. T. über sehr weite Strecken getragen und können auch Bestandteil grenzüberschreitender, luftgetragener Schadstofftransporte sein. So ist bekannt, daß die Konzen-

tration von Blei im Polarschnee heute um den Faktor 500 höher als sein ursprünglicher Gehalt ist (SCHEFFER u. SCHACHTSCHNABEL 1989).

Ausgehend von diesen Fakten ist eine Begrenzung des Eintrags persistenter Stoffe in die Umwelt dringend erforderlich. Als Beitrag dazu wurden, basierend auf dem Critical Loads & Levels Ansatz für Stickstoff und Säurebildner, erste Ansätze zu einer Ableitung von kritischen Eintragungswerten für Schwermetalle und POP entwickelt. Diese Ergebnisse sind im ESQUAD-Bericht (European Soil & Sea Quality due to Atmospheric Deposition) "The Impact of Atmospheric Deposition of Non-Acidifying Pollutants on the Quality of European Forest Soils and the North Sea", (van den HOUT 1994) beschrieben. In einem Entwurf des "Manual for calculating critical loads of heavy metals for soils and surface waters" (de VRIES u. BAKKER 1995) wurden die Arbeitsschritte zur Berechnung der Critical Loads für Schwermetalle beschrieben und zur Diskussion gestellt. Im April 1995 fand im Rahmen eines Workshops in Helsinki eine erste Diskussion über Möglichkeiten der Berechnung statt, wobei mehrere europäische Länder, darunter die BRD, ihre Ansätze vorstellten.

Weitere internationale und nationale Forschungsprogramme zum Depositionsverhalten, der räumlichen Verteilung von Schwermetallbelastungen und zu den Auswirkungen auf die Ökosysteme liefern wichtige Hintergrundinformationen. So wurden beispielsweise im Rahmen des EMEP-Projektes "Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe - estimations based on moss analysis" (RÜHLING 1994) alternativ zu bisherigen Depositionsmessungen die Schwermetallgehalte ektohydrer Moose im Großteil europäischer Länder gemessen. Die Ergebnisse ermöglichen qualitative und quantitative Aussagen zur räumlichen Verteilung von Schwermetalldepositionen und sollten zum Vergleich zu den Berechnungen von Critical Loads für Schwermetalle herangezogen werden.

Erste Ergebnisse zur Modellierung des Einflusses von nicht säurebildenden Luftschadstoffen auf die Qualität von Böden und des Meerwassers der Nordsee sind im Hauptbericht zum ESQUAD-Projekt enthalten. Die Berechnungen erfolgten für folgende Stoffe:

- Schwermetalle: Cadmium (Cd), Kupfer (Cu) und Blei (Pb)
- organische Schadstoffe: Lindan, Benzo(a)pyren (B(a)p)

Als Maßstab für die Feststellung von Veränderungen chemischer Bodeneigenschaften und Beeinträchtigungen von Ökosystemen wurden die folgenden Schwellenwerte herangezogen:

- **MPC** (Maximum Permissible Concentrations) basieren auf 0 - Effekt-Konzentrationen aus Messungen mit Boden- und Wasserorganismen unter Laborbedingungen.

- **NC** (Negligible Concentrations) entsprechen 1 % der MPC und sind damit ökologisch vernachlässigbare Konzentrationen.
- **DTV** (Dutch Target Values) basieren für Organika auf NC. Für Schwermetalle wurden sie aus Hintergrundwerten in Böden und Grundwasser unbelasteter Gebiete abgeleitet. Es sind Zielwerte, die auch von politischen Konventionen beeinflusst sind.
- **SMV** (Swedish Moor Values) wurden abgeleitet anhand toxischer Wirkungen auf mikrobiologische Prozesse in der organischen Auflage von Waldböden (0-Effekt-Konzentrationen), sind bisher jedoch ohne statistische Absicherung.

Unter Nutzung der mit dem Critical Loads-Konzept gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen über die Wirkung von Säure- und Stickstoffeinträgen wird in Deutschland zukünftig auch die Wirkung von Schwermetallen und ausgewählten persistenten Organika auf Böden unterschiedlicher Nutzung untersucht und eine Methode zur Festlegung von Belastungsgrenzen bzw. differenzierter maximaler Eintragungswerte entwickelt. Eine wichtige Grundlage dafür bildet die Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung von 1985 und der Entwurf zum Bodenschutzgesetz. In beiden wird ein Vorsorgeprinzip formuliert, das vom Grundsatz nur Stoffeinträge zuläßt, die maximal dem unbedenklichen Austrag entsprechen. Der Entwurf zum Bodenschutzgesetz legt eine allgemeine Vorsorgepflicht gegenüber Bodenverunreinigungen fest und fordert die Ableitung konkreter Vorsorgewerte in Rechtsverordnungen und Verwaltungsvorschriften.

Dazu ist es erforderlich, basierend auf naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, Kriterien zu formulieren, die die

- Unbedenklichkeit von Stoffeinträgen feststellen und/oder
- das Bestehen einer Besorgnis von schädlichen Bodenveränderungen signalisieren.

Bei bereits eingetretenen Veränderungen ist ab einer bestimmten Dimension der Handlungsbedarf geregelt. Die Bewertungsgrundlagen dafür sind in den einzelnen Bundesländern vorhanden. In Durchsetzung der Vorsorgepflicht muß der Handlungsbedarf jedoch bereits bei der Besorgnis einer Bodenveränderung einsetzen. Die dafür notwendig zu bestimmenden Besorgnisschwellen lassen sich durch einen Critical Load-Ansatz formulieren.

Literatur:

- AMANN, M., KLAASEN, G. u. SCHÖPP, W. (1991): UN ECE Workshop on exploring European Sulfur Abatement Strategies. IIASA, Laxenburg, Austria, S.32.
- BML (1994): Waldzustandsbericht der Bundesregierung 1994. Ergebnisse der Waldschadenserhebung. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
- BOBBINK, R. (1995): Empirical Nitrogen Critical Loads for Natural and Seminatural Ecosystems. Background paper UN-ECE Meeting, Dec.1995, Geneva
- COSTANZA, R. (1992): Ökologisch tragfähiges Wirtschaften: Investieren in natürliches Kapital. In: Goodland, R.; Daly, H.; Serafy, S.E. u. von Droste, B. (Hrsg.) (1992): Nach dem Brundtland-Bericht: Umweltverträgliche wirtschaftliche Entwicklung, Bonn 1992, S.85-93
- FORRESTER, J.W. (1968): Principles of Systems. Wright Allen Press. Inc., Cambridge, Mass.
- FORRESTER, J.W. (1972): Der teuflische Regelkreis. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- FRANKE, W. u. KOTTMANN, H. (1995): Korrespondenz zwischen den Meßgrößen der Umweltgüter und einer nachhaltigen Entwicklung. Endbericht zur Arbeitsgruppe 2 beim Workshop am 10./11. Juli 1995 „Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung“ an der Akademie für Technikfolgenabschätzung Stuttgart
- GREGOR, H.D. (1993): Umweltqualitätsziele, Umweltqualitätskriterien und -standards, Umweltbundesamt, Berlin
- HETTELINGH, J.-P. u. de VRIES, W. (1992): Mapping Vademecum. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven (The Netherlands)
- van den HOUT, K. D. (1994): The Impact of Atmospheric Deposition of Non-Acidifying Pollutants on the Quality of European Forest Soils and the North Sea, Main report of the ESQUAD project
- HÜTTERMANN, A. u. ULRICH, B., (1984): Solid phase - solution - root interactions in soils subjected to acid deposition. Phil. Trans. Soc. Lond. B 305, S. 353 - 368.
- MEADOWS, L. u. MEADOWS, D.H. (1973): Das globale Gleichgewicht. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- NAGEL, H.D., SMIA TEK, G. u. WERNER, B. (1994): Das Konzept der kritischen Eintragsraten als Möglichkeit zur Bestimmung von Umweltbelastungs- und -qualitätskriterien. Critical Loads & Critical Levels. Materialien zur Umweltforschung herausgegeben vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Metzler-Poeschel Stuttgart, Heft 20
- NILSSON, J. (1986): Critical Loads for Nitrogen and Sulphur. The Nordic Council of Ministers, Kopenhagen
- PEARCE, D.W. und TURNER, R.K., (1990): Economics of natural resources and the environment. In: Rennings, K., (1994)

- PFISTER, G. u. RENN, O. (1995): Ein Indikatorensystem zur Messung einer nachhaltigen Entwicklung in Baden-Württemberg. Publikation an der Akademie für Technikfolgenabschätzung Stuttgart
- RENNINGS, K. (Hrsg.) (1994): Indikatoren für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung. Materialien zur Umweltforschung herausgegeben vom Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Metzler-Poeschel Stuttgart, Heft 24
- RIVM (1989): Concern for tomorrow. A national Environmental Survey 1985 - 2010. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven (The Netherlands), 112 S.
- ROST-SIEBERT, K. (1985): Untersuchungen zur H⁺- und Al-Ionentoxizität an Keimpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Lösungskultur. Berichte des Forschungszentrum Waldökosysteme d. Univ. Göttingen, Bd.12.
- RÜHLING, A. (1994): Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe - estimations based on moss analysis". Nordic Council of Ministers, Nord 1994:9, Copenhagen
- SCHAEFFER F., SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart
- SCHNELBÖGL, G., BURKL, G. u. WIETING, J. (1995): Versauerung von oberirdischen Gewässern in der Bundesrepublik Deutschland. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft München
- SRU (1994): Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (Hrsg.): Umweltgutachten 1994. Für eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung. Verlag Metzler-Poeschel Stuttgart
- SVERDRUP, H. (1992): Calculating critical loads for high precipitation areas. "Workshop on Problems on Mapping Critical Loads and Levels in Sub-Alpine and Alpine Regions" 9.-10.03.1992, Wien
- ULRICH, B (1993): 25 Jahre Ökosystem- und Waldschadensforschung im Solling. Forstarchiv 64, S. 147-152
- UN ECE (1979): UN Convention on Long Range Transboundary Air Pollution. Genf
- UN ECE (1993): Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and geographical areas where they are exceeded. Umweltbundesamt Berlin, UBA-Texte 25/93
- UN ECE/CCE (1993): Calculation and Mapping of Critical Loads for Europe. Coordination center for Effects, Status Report 1993. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven (The Netherlands)
- UN ECE/EMEP (1990): Long Period Modelling of Photochemical Oxidants in Europe. EB.AIR/GE.1/R.51
- de VRIES, W. u. BAKKER, D.J. (1995): Manual for calculating critical loads of heavy metals for soils and surface waters, DLO Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC - DLO), Wageningen
- WCED (1987): Our Common Future (Der Brundtland-Bericht). Oxford, World Commission on Environment and Development/Oxford University Press. 393 S.
- von WEIZSÄCKER E.U. (1989): Erdpolitik - Ökologische Realpolitik an der Schwelle zum Jahrhundert der Umwelt. Darmstadt

von WEIZSÄCKER E.U., A.B. Lovins u. L.H. Lovins (1995): Faktor Vier. Doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome. Droemer Knauer München, 352 S.