

GÖTTINGER
BODENKUNDLICHE
BERICHTE

29

1973



Im Selbstverlag der Anstalten für
Bodenkunde der Universität Göttingen

Herausgeber: B. Meyer und B. Ulrich

Schriftleitung: P. Hugenroth

Bestellungen über:

Institut für Bodenkunde, Göttingen, von Siebold-Str. 4

Institut für Bodenkunde und Waldernährung
Göttingen, Büsgenweg 2

oder den Buchhandel (Gewährung von Wiederverkäufer-Rabatt)

Selbstkostenpreis

DM

GÖTTINGER
BODENKUNDLICHE
BERICHTE

29

1973



INHALT

B. ULRICH, R. MAYER, P.K. KHANNA und J. PRENZEL Modelling of Bioelement Cycling in a Beech Forest of Solling District	S. 1
D. de ANGELIS A General Code for Ecosystem Models	S. 55
U. STEINHARDT Input of Chemical Elements from the Atmosphere A Tabular Review	S. 93
B. ULRICH, U. STEINHARDT, A. MÜLLER-SUUR Untersuchungen über den Bioelementgehalt in der Kronentraufe	S. 133
M. PAVLOV Tabellen der Biomasse, der Energie- und der Bioelementgehalte der Buche in einem boden- sauren Buchenwald (Luzulo-Fagetum) des Solling	S. 193
P.K. KHANNA, B. ULRICH Ion Exchange Equilibria in an Acid Soil	S. 211

MODELLING OF BIOELEMENT CYCLING IN A BEECH FOREST OF SOLLING DISTRICT

by B. Ulrich, R. Mayer, P. K. Khanna and J. Prenzel

Institute of Soil Science

and Forest Nutrition of Goettingen University

Gonzalo De las Salas, F

Sponsored by the Deutsche Forschungsgemeinschaft

under contract No. UI 35/20

Contribution of the Solling project in IBP No 111

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 29, 1 – 54
(1973)**



Contents

1. Introduction
2. Research site
3. Methods
4. Basic compartment model
5. Data background of the model
6. Mathematical formulation of the model
7. Modelling of phosphate desorption/dissolution equilibria
8. Modelling of cation exchange equilibria
9. Simulation results: Seasonal variations
10. Simulation results: Fertilization

1. Introduction

The goal of mathematical modelling of bioelement cycling in forest stands is the development of tools (like mathematical models) for solving problems such as the exhaustion of soils by fast growing plantations, the nutritional and environmental effects of forest fertilization, the filtering effect of forests for gaseous, dissolved or solid air contaminants, etc.

In the Solling project as part of the German IBP projects the main purpose of investigations concerning bioelements has been the collection of data necessary for mathematical modelling. The modelling using systems analysis techniques was started in autumn 1972 after having obtained appropriate simulation programs. This report reflects the present state of our efforts which are far from reaching the goal.

2. Research Site (cf. ELLENBERG 1971)

The investigation site is located on a large plateau, consisting mainly of triassic sandstone (Buntsandstein); 500 m above sea level; annual rainfall about 1100 mm with rather uniform distribution, average yearly temperature 6.5°C.

The most important data on the beech (*Fagus silvatica*) stand for the beginning of the study (1969) are: age 120-125 years, 241 trees per ha, mean breast height diameter 39.0 cm, mean tree height 26.7 m. The only tree species is beech. There is almost no field layer. The site belongs to the Luzulo-Fagetum association.

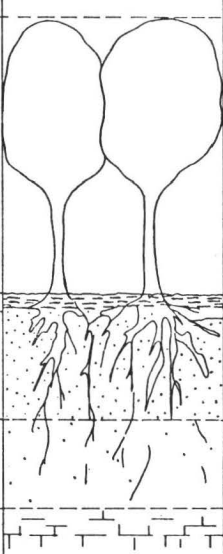
SYSTEM	SCHEMATIC CROSS SECTION	MEASURING LEVEL	BIOELEMENT FLUX	METHOD
Atmosphere ▽		Uppersurface of canopy (Measurement level transferred to adjacent open patch)	freeland precipitation	rain gauge
Above ground part of Beech stand			canopydrip stem flow	rain gauge collection of stem flow
Humuslayer		soil surface	litter	litter trap
Intensive root zone		surface of mineral soil	percolation water	funnel lysimeter
Mineral-soil		50 cm depth	percolation water	tension lysimeter
Extensive root zone		100 cm depth	percolation water	tension lysimeter
▽ to ground water				

Fig.1: Experimental design for measuring the bioelement fluxes

The soil, according to German nomenclature an acid "Braunerde" (7th Approximation: typic dystrochrept), has developed in a para-autochthonic loess layer of 40-50 cm thickness, with a low bulk density and a high permeability, overlying a loamy layer of a solifluction material with a high bulk density and low permeability. Main constituent of this deeper layer is weathered Buntsandstein material. The unweathered Buntsandstein begins at a depth of about 140 cm. The tree roots are almost completely limited to the loess layer, that is to the upper 50 cm of the soil profile.

3. Methods

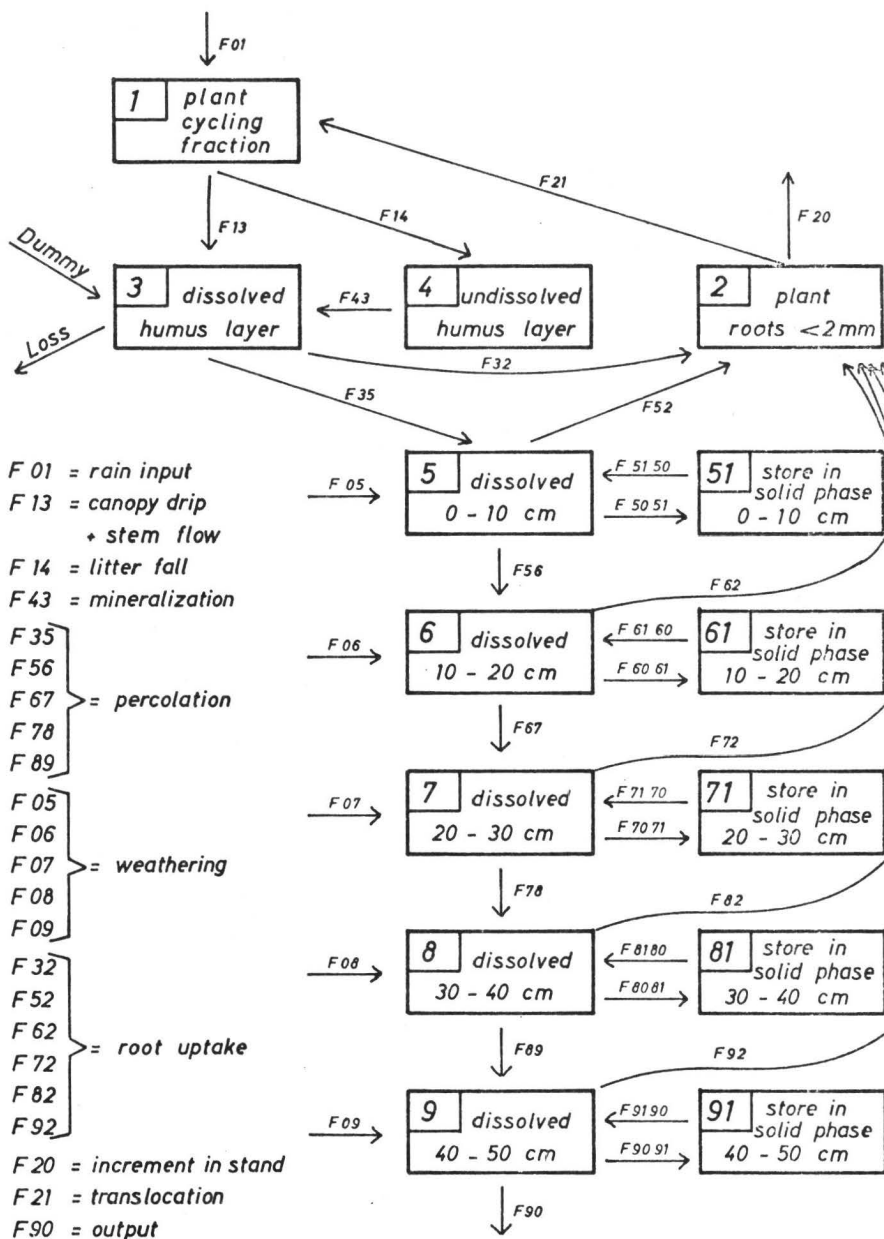
The bioelement stores of the stand have been calculated using biomass data from investigations on primary production (HELLER 1971 and unpublished, GOETTSCHE, 1972) and data on the bioelement content of the plant material (PAVLOV, 1972).

The technique of soil sampling and the methods used for soil analysis are described elsewhere (ULRICH et al., 1971a).

The experimental design for measuring the bioelement fluxes is demonstrated in fig. 1. The measuring levels lie on boundaries which separate either the ecosystem from its surrounding (measuring input from atmosphere and output from root zone to deeper soil layers) or the different compartments of the ecosystem from each other. Details of the methods may be found in ULRICH et al. (1971b) and MAYER (1971).

For the mathematical modelling the simulation language "Continuous System Modelling Program S/360 CSMP" has been used (IBM, 1971).

Fig. 2 Basic compartment model structure



4. Basic compartment model

The basic structure of the models is given in the form of a compartment model in fig. 2.

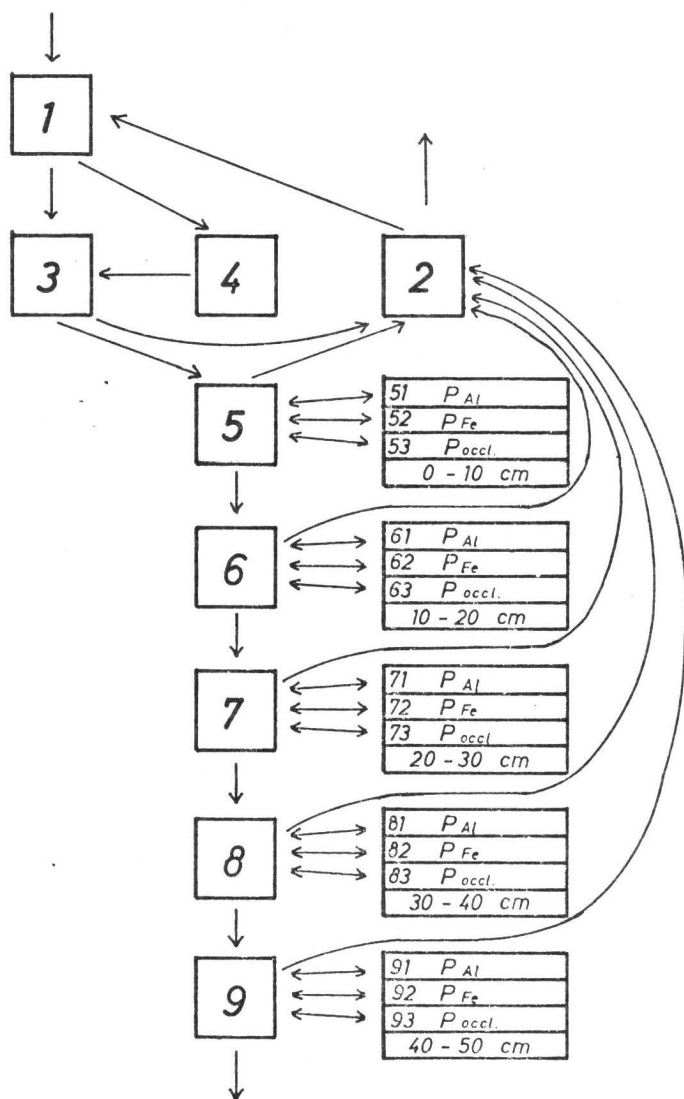
The stand is reduced to the following three compartments only:

- 1 the cycling fraction of the bioelement store of the stand. This fraction is located mainly in leaves and buds, but outside the vegetation period in other plant parts also, in which bioelements withdrawn from the leaves in autumn are stored.
- 2 fine roots (< 2 mm diameter; this is the root mass considered to be responsible for bioelement uptake.
- 3 the non-cycling fraction of the bioelement store of the stand, consisting of the wood and bark of trunks, branches and coarser roots. In an even aged stand this compartment has an annual increment and behaves in the time span between two thinnings as a sink for the bioelements transported into it. It can therefore be left beyond consideration.

The reduction of the forest ecosystem into a three compartment model implies that the model is capable of simulating only those events in which the number of trees as increment carriers is not changed. The model has no resolution in space.

Only the intensive root layer down to the 50 cm depth level of the soil is considered, since measurements with suction plate lysimeters have shown, that beyond this depth bioelement uptake by the stand is insignificant. All matter passing the 50 cm depth level is considered as output from the system.

Fig. 3 Structure of phosphate model



The soil is subdivided into 6 layers: the humus layer (top organic layer) and 5 intervals of 10 cm thickness in the mineral soil. The bioelement store of each layer is separated into a fraction within solution phase and one within solid phase. The bioelement stores in solid phase are further subdivided into fractions of different binding forms.

In the case of the cations Na, K, Ca, Mg and Al the exchangeable stores have so far only been taken into account. This implies that only those events can be simulated which do not change the pH of the soil compartments.

In the case of phosphorus (fig. 3) a subdivision of the solid soil phase is made into aluminium phosphates (P_{Al}), iron phosphates (P_{Fe}) and occluded phosphates (P_{occl}). The organically bound phosphorus in mineral soil is left out of consideration since the whole biological activity connected with litter decomposition occurs in the top organic layer. This fraction is, therefore, considered as an inert reserve which shows under the conditions prevailing no turnover with the P in soil solution.

If the same arguments are applied on nitrogen (fig. 4) then only the solution compartments are left in the mineral soil. This is in agreement with the findings of MAYER (1971), who found that the nitrogen reaching the ground with litter fall was mineralized solely in the humus layer within one year. RUNGE (1971) found only very small nitrogen mineralization in the A horizon of that site, which seems to be due to the decomposition of fine roots.

Fig.4 *Structure of nitrogen model*

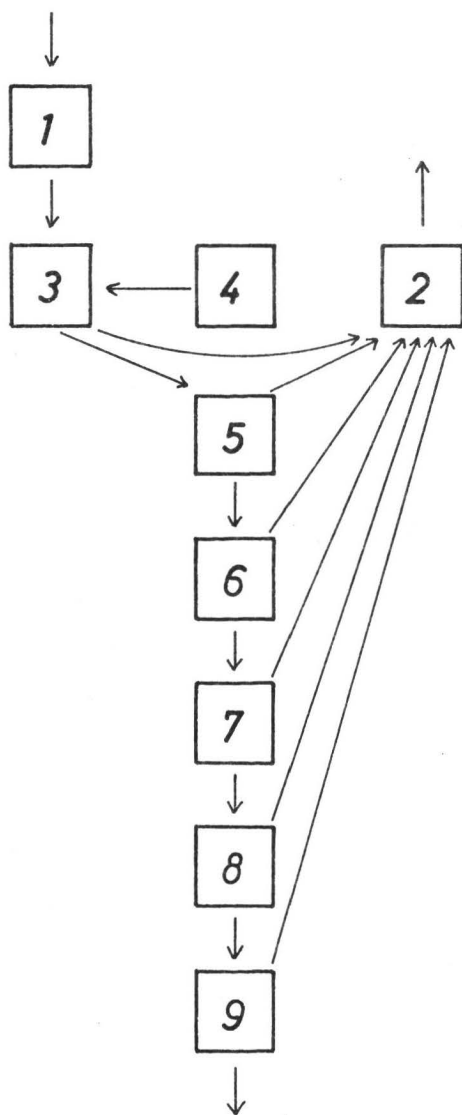


Table 1: Compartment contents (stores)

	Na	K	Ca	Mg kg/ha	Al	N	P
1	0.39	30.8	15.9	2.71	0.29	104.3	5.446
2	0.92	5.4	5.9	2.36	5.6	5.450	1.86
3	0.034	0.11	0.10	0.012	0.015	0.20	0.013
4	14.04	82.4	89.2	33.9	340	809	51.8
5	0.34	0.42	1.81	0.19	1.1	2.6	0.0029
6	0.42	0.32	1.45	0.20	0.97	1.51	0.0017
7	0.42	0.27	1.35	0.20	0.80	1.13	0.001
8	0.52	0.23	1.31	0.20	0.66	0.74	0.0008
9	0.52	0.18	1.11	0.16	0.60	0.45	0.0007
51	20	70	74	11	808		19
61	30	85	68	9.7	1005		8.7
71	33	76	47	7.4	815		11.3
81	32	73	39	5.3	743		19.1
91	38	83	40	6.3	840		17.3
52							82.2
62							74.7
72							79.3
82							81.1
92							54.8
53							206
63							212
73							233
83							270
93							277

5. Data background of the models

The data on the compartment contents, the stores, are compiled in table 1. The store in the solution compartment of the humus layer C3 has been calculated by the formula

$$(5.1) \quad C3 \text{ (kg/ha)} = \frac{a}{b} * \left(\frac{c}{d} * w \right)$$

where a = kg bioelement per ha and year measured in the percolation water of humus layer

b = amount of percolation water per year through humus layer in l/m^2 (= 816 l/m^2 for the present study)

a and b are taken from the measurements with funnel lysimeters (cf. fig. 1); the quotient $\frac{a}{b}$ gives an average concentration of the soil solution in the humus layer.

c = mass of humus layer in kg/m^2 (= 4.968)

d = bulk density of humus layer in kg/dm^3 (= 0.7)

w = mean annual water content of humus layer in l/dm^3 .

The term in brackets gives the mean amount of water present in the humus layer, in l/m^2 .

The stores in the solution compartments of the mineral soil are calculated as follows:

$$(5.2) \quad Cn \text{ (kg/ha)} = \frac{a}{b} * r * w * 100$$

where a and b have the same meaning as above but values are taken from the suction lysimeters in 50 cm depth.

r is a relative figure, expressing the ratio of bioelement concentration in the equilibrium soil solution in any depth interval to that in the depth interval of 40 to 50 cm.

r has been calculated from separate measurements of soil samples taken from different depth intervals several times

Table 2: Fluxes

	Na	K	Ca	Mg	Al	N	P
	kg * ha ⁻¹ * yr ⁻¹						
F01	7.3	2.0	12.4	1.79	3.05	23.92	0.481
F13	13.6	25.6	32.4	4.14	3.05	25.10	0.605
F14	0.9	17.3	22.7	1.66	0.78	54.67	4.855
F32	0.60	8.34	10.50	0.57	0.085	17.26	4.529
F52	1.10	11.84	10.26	1.06	0.202	20.41	1.314
F62	1.65	11.06	10.04	1.35	0.219	14.51	0.435
F72	1.60	8.75	8.95	1.25	0.175	10.47	0.430
F82	1.22	4.63	5.39	0.79	0.088	4.22	0.422
F92	1.22	3.68	4.56	0.64	0.080	2.57	0.421
F21	7.2	40.9	42.7	4.01	0.78	55.85	4.979
F20	0.19	7.4	7.0	1.65	0.069	13.59	2.572
F43	0.9	17.3	22.7	1.66	0.78	50.16	4.855
DUMMY	-	-	4.8	-	-	-	-
LOSS	-	-	4.8	-	-	-	-
F35	13.9	34.56	44.6	5.23	3.745	58.00	0.931
F05	-	1.54	0.82	0.38	0.931	-	0.420
F56	12.8	24.26	35.16	4.55	4.474	37.59	0.037
F06	-	1.54	0.82	0.38	0.932	-	0.420
F67	11.15	14.74	25.94	3.58	5.187	23.01	0.022
F07	-	1.54	0.82	0.38	0.932	-	0.420
F78	9.55	7.53	17.81	2.71	5.944	12.61	0.012
F08	-	1.54	0.82	0.38	0.932	-	0.420
F89	8.33	4.44	13.24	2.30	6.788	8.39	0.010
F09	-	1.54	0.82	0.37	0.932	-	0.420
F90	7.11	2.30	9.50	2.03	7.64	5.82	0.009

Table 3: Monthly values of rain input, litter fall, mineralization, canopy-drip, and output.
All values in kg . ha⁻¹.yr⁻¹

rain input	Na	.23	.96	.91	1.05	.42	.23	.22	.77	.23	.97	1.00	.31	7.30
	K	.1	.0	.0	.0	.20	.17	.13	.34	.28	.34	.34	.10	2.00
	Ca	.4	1.7	1.6	3.5	1.1	.7	.5	.9	.6	.50	.6	.3	12.40
	Mg	.09	.25	.19	.27	.15	.09	.07	.17	.09	.16	.18	.08	1.79
	Al	.21	.40	.49	.68	.08	.16	.11	.32	.22	.14	.15	.09	3.05
	P	.020	.015	.018	.049	0.058	.052	.041	.096	.064	.042	.019	.007	.481
	N	2.34	1.08	1.14	3.24	2.25	2.21	0.86	2.65	1.40	2.35	3.34	1.06	23.92
litter fall	Na	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.03	.04	.06	.75	.02	.0	.90
	K	.0	.0	.0	.0	.0	.2	.5	.7	1.2	14.3	.4	.0	17.30
	Ca	.0	.0	.0	.0	.0	.3	.6	1.1	1.5	18.8	.4	.0	22.70
	Mg	.0	.0	.0	.0	.0	.02	.04	.08	.11	1.38	.03	.0	1.66
	Al	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.02	.03	.06	.65	.02	.0	.78
	P	.0	.0	.0	.0	.0	.056	.140	.196	.337	4.014	.112	.0	4.855
	N	.0	.0	.0	.0	.0	.55	1.64	2.19	3.83	45.37	1.09	.0	64.67
mineralization	Na	.1	.1	.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.4	.2	.0	.90
	K	2.49	1.85	1.37	1.05	.72	.56	.48	.40	.32	.24	4.50	3.32	17.30
	Ca	2.16	2.01	1.95	1.91	1.80	1.68	1.62	1.51	1.41	1.39	2.94	2.32	22.70
	Mg	.15	.15	.14	.14	.13	.13	.12	.11	.11	.10	.21	.17	1.66
	Al	.08	.07	.07	.07	.06	.06	.06	.05	.05	.04	.09	.08	.78
	P	.573	.500	.451	.388	.330	.281	.262	.237	.208	.188	.767	.670	4.855
	N	6.49	5.94	5.44	4.94	4.49	4.14	3.79	3.48	3.21	2.96	2.74	2.54	50.16
Canopy-drip + stem flow	Na	.93	.63	2.20	1.93	.50	.81	1.94	1.66	1.58	.74	.40	.28	13.6
	K	1.6	.5	.6	1.3	2.3	2.5	1.6	4.9	3.2	4.9	1.5	.7	25.6
	Ca	3.1	3.0	3.2	5.6	1.8	2.0	1.8	4.3	3.0	2.9	1.3	.4	32.4
	Mg	.52	.49	.39	.39	.30	.29	.18	.36	.26	.46	.40	.10	4.14
	Al	.55	.33	.29	.44	.09	.12	.11	.33	.17	.25	.25	.12	3.05
	P	.031	.059	.043	.087	.045	.008	.033	.088	.077	.110	.013	.011	.605
	N	4.75	2.34	2.63	2.44	1.85	1.32	0.78	2.34	1.23	1.62	2.35	1.36	25.10
output	Na	.53	.26	.26	2.97	.70	.59	.33	.45	.04	.22	.40	.36	7.11
	K	.24	.05	.05	.48	.18	.27	.18	.27	.03	.17	.22	.16	2.30
	Ca	.80	.70	.70	3.05	1.18	.55	.40	.64	.05	.31	.58	.54	9.50
	Mg	.18	.07	.07	.86	.22	.14	.08	.10	.01	.06	.12	.12	2.03
	Al	.58	.16	.16	3.65	.85	.73	.31	.30	.02	.13	.37	.38	7.64
	P	.0003	.0003	.0003	.0019	.0003	.0006	.0016	.0031	-	.0003	.0003	-	.009
	N	.40	.14	.15	2.98	.82	.30	.16	.20	.02	.12	.25	.27	5.82

during a year. From these samples the equilibrium soil solution was obtained as a saturation extract according to ULRICH (1966) and analyzed.

Table 2 shows flux data. The input with rain (F01), the output with percolation water (F90), and the transport with canopy drip and stemflow (F13) as well as with the litter (F14) have been calculated from measurements of the flux of the transport medium (water, biomass) and its bioelement concentration. For all of these fluxes monthly values are available which are compiled in table 3.

The total bioelement uptake is given by the sum of the fluxes leaving the root compartment (F21 and F20). From these, F21 has been calculated by balancing compartment 1, and F20 from measured values of the increment of stem, branches and coarse roots, and the bioelement content of these plant parts. For the partition of total uptake into the different soil layers, that is for calculating the fluxes leading into compartment 2, the following consideration has been determining: The data on the root mass and on the bioelement concentration in the soil solution for the different intervals have been transformed into relative figures by using the same data for the soil interval from 40 to 50 cm as unit. Since an ion to be taken up by the root must impact on the root surface, therefore it was assumed that the product of the two relative figures for root mass and for bioelement concentration provides a relative measure for bioelement uptake. The figures used are shown in table 4.

The process of mineralization was investigated with the aid of funnel lysimeters installed in the humus layer. During installation of the lysimeters in the humus layer the roots were cut. Root uptake has thus been excluded. The bioelements liberated from organic matter by mineralization are carried downwards from the humus layer together with the percolation water and could thus be determined. The bioelement amounts found have been corrected for deviations in canopy drip and litter fall on the lysimeter surfaces to make the results comparable to the mean values characterizing the total site. The results showed that for most bioelements the mineralization is equal to the input into the humus layer by litter fall; in other words, the humus layer is in steady state. The mineralization F₄₃ has therefore been set equal to the litter fall F₁₄. The only exception is nitrogen, where F₄₃ has been made smaller than F₁₄. The reason for this is discussed in context of the calculation of weathering. Monthly values for mineralization are given in table 3. These values have been calculated by using following equation derived by MAYER (1972) from the funnel lysimeter data:

$$5.3 \quad J_{43} \text{ (kg/ha)} = N_0 \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_0} t} \right)$$

where N_0 = amount of bioelement in annual
litter fall in kg/ha
 t = months, $t = 1$ indicates November
 $t = 2$ indicates December
etc.

The half time values T_0 , these are the periods during which $N_0/2$ is mineralized, are as follows:

	Na	K	Ca	Mg	Al	N	P
T_0 (months)	2,28	2,28	8	8	10	6,37	4,42

If the ecosystem is in steady state and the fluxes correspond to the mean values characterizing the steady state, the following flux balance can be assumed:

$$(5.4) \quad \text{Input} + \text{Weathering} - \text{Increment} - \text{Output} = 0$$

From this flux balance of the ecosystem the weathering has been calculated. This caused no difficulty for Na (no weathering; the fluxes are balanced), K, Mg, Al and P. The total amount of weathering calculated for these elements was distributed equally to the mineral soil compartments, assuming that the decrease in root intensity and the increase in weatherable stores with increasing soil depth balance each other.

In the case of nitrogen this flux balance yielded a negative weathering, that is, a gain by the soil of 4.51 kg N/ha/yr. This amount was interpreted as being incorporated into the organic matter of the humus layer as a result of the high nitrogen input with rain (24 kg N/ha/yr.). This increase of nitrogen store in humus layer while the amount of organic matter of that layer remains constant, implies an improvement of the humus form and of the biological activity in the humus layer. A general trend of this kind has been more and more recognized during the last few years. The result of the flux balance is therefore quite in agreement with the actual development in beech forests on acid soils in Central Europe.

As may be seen from table 3, where the monthly values are listed, the percolation output shows a strong peak in April. This peak is due to saturated water flow through

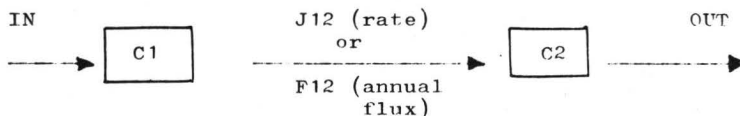
soil as a result of a sudden snow melt. Approximately one third of the total water percolated during the year 1969/70 occurred within this month. In the case of calcium we assumed that part of the output of this month (4.8 kg/ha) reflects a loss from the humus layer. It is proposed that with the high percolation rate occurring at snow melt under the special conditions of this year 4.8 kg Ca have been transported from the humus layer through the intensive root layer without coming into equilibrium with the exchangeable calcium in the mineral soil layers. This LOSS is considered as being the result of the special climatic conditions during the measuring period and is, therefore, balanced by a DUMMY. The reasons for this assumption as well as the methods to judge them are discussed later in connection with simulation results.

The percolation fluxes, F35, F56, F67, F78, F89, were finally calculated from the balance of the compartments 3, 5, 6, 7 and 8 respectively.

As may be seen from the discussion on LOSS and DUMMY in case of calcium, the measured fluxes F01, F13, F14, F20, F43 and F90 have been used without any greater adjustment or change which is not shown explicitly in the model. The philosophy is to avoid self-fraud, and to make the model transparent in respect of its data base.

6. Mathematical formulation of the model

The principles of mathematical modelling may be described using the following simple 2-compartment model:



C1 and C2 represent state variables (compartment contents) as listed in table 1,

(6.1) $F12 = \int_0^1 J12(t) dt$ is the annual flux as listed in table 2 and J12 is the flow rate from compartment 1 to compartment 2

J12 should be defined in form of an algebraic equation. According to the nature of the transport process this may be done in different ways.

The most common approach in applied systems analysis is to make J12 proportional to the contents in the donor compartment C1, which itself is a function of time t:

$$(6.2) \quad J12 = A12 * C1(t)$$

where the transfer coefficient A12 may be defined using the data available as

$$(6.3) \quad A12 = F12/C1(t) \text{ at } t = 0$$

This leads to a donor controlled, linear, constant coefficient model. The processes "percolation" and "translocation" are modelled this way.

In case of litter fall, canopy drip, mineralization and output the monthly flow rates FR as compiled in table 3 can be used to make the transfer coefficient A time dependent.

$$(6.4) \quad J_{12} = A_{12} (t) * C_1 (t)$$

$$(6.5) \quad A_{12} = FR (t) / C_1 (t)$$

The model is still donor controlled and linear, but the transfer coefficient is no longer constant. Weathering is described by an acceptor controlled input.

$$(6.6) \quad J_{12} = A_{12} / C_2 (t)$$

$$(6.7) \quad A_{12} = F_{12} * C_2 (t) \text{ at } t = 0$$

The weathering rate is made inversely proportional to the acceptor compartment. Simulating a fertilizer input the weathering will decrease but never become zero. In case of simulation of an export from the system the weathering will increase with the tendency to balance the export. For large exports this will give misleading simulation results; in such cases weathering should therefore be treated either as a constant input or made proportional to the size of the weatherable pool.

Root uptake also may be modelled in different ways according to the simulation purpose. In most cases it will be optimal to model root uptake like percolation and translocation as a donor controlled process. For the simulation of seasonal variation of root uptake as described in chapter 9 root uptake is modelled as being donor and acceptor compartment regulated:

$$(6.8) \quad J_{12} = A_{12} * C_1 (t) * C_2 (t)$$

$$(6.9) \quad A_{12} = F_{12} / (C_1 (t) * C_2 (t)) \text{ at } t = 0$$

This gives a nonlinear flow equation with constant coefficients. During simulation the size of the

acceptor compartment is forced corresponding to the seasonal variations in root mass as described by GOETTSCHE.

For the 2-compartment model shown above the differential equations describing the time behaviour of the systems can be written in the CSMP notation ($dc1/dt$ expressed as DC 1) as follows

$$(6.10) \quad DC1 = IN - J12$$

$$(6.11) \quad DC2 = J12 - OUT$$

If the rates (J) are calculated by using the actual values of the stores (C) it is necessary to keep track of the changes in C. In CSMP this is done by a built-in numerical integration procedure

$$(6.12) \quad Y = INTGRL(IC, X)$$

which stands for the following mathematical operation:

$$(6.13) \quad Y = \int_{t=0}^{t=\text{final}} x(t) dt + IC$$

where IC represents the initial condition (y at $t=0$).

In CSMP notation the program statements read as follows:

$$(6.14) \quad C1 = INTGRL(ST1, DC1)$$

$$(6.15) \quad C2 = INTGRL(ST2, DC2)$$

where ST is the variable name for the starting value of C at time $t = 0$.

Complete program examples written for CSMP are given later in the context of special simulation problems.

So far nothing has been said about the mathematical modelling of the physicochemical equilibria between liquid and solid soil phase (soil solution and mineral soil compartments). This will be done in the following chapters.

7. Modelling of phosphate desorption/dissolution equilibria

An appropriate approach for modelling the equilibria between P in solution and P bound in minerals or at mineral surfaces is the use of an adsorption isotherm. This approach has the disadvantage that an adsorption isotherm can be measured in the laboratory for total soil phosphorus only and not for the different phosphate forms existing in the soil.

Another approach may be developed using the concept of kinetics of dissolution processes. A dissolution process can be described by the following equation

$$(7.1) \quad DC5 = k * \sigma * (EQ5 - C5)$$

where DC5 denotes the concentration change in solution with time, k is a proportionality constant, σ the mineral surface, EQ5 the equilibrium concentration in solution and C5 the actual concentration at time t. For modelling, k and σ need to be deduced from measurable soil phosphate properties.

As a measure of the mineral surface σ the isotopically exchangeable phosphorus may be used. Its amount per gram of mineral may be directly converted into a surface area in m^2/g by the following equation (LOPEZ 1962)
(isotopically exchangeable P in mg/g) * 3.9 = surface area in m^2/g .

In this calculation it is assumed that the isotopically exchangeable phosphorus forms a monomolecular layer at the mineral surface with a netlike connexion of the single PO_4 -tetraeders. A PO_4 -tetraeder has a basal area of $20 \text{ \AA}^2$.

KHANNA et al. (1967) developed a method to determine the isotopically exchangeable phosphorus of the various phosphate forms in soils. For soils comparable to that used in this investigation they gave the following values for isotopically exchangeable P as percent of total P:

aluminium phosphates	5.25 %
iron phosphates	3. %
occluded phosphates	0.02 %

These values have been used in the present study.

In investigations on the kinetics of isotopic exchange of phosphates ULRICH et al. (1962) derived an exchange constant R_n^* with the dimension $1/t$ for different binding positions of PO_4 -tetraeders at the mineral surface. The values which have been found for different binding positions using various phosphates were in the following ranges:

localisation at mineral surface	Position no.	R_n^*	R_n^*
	n	min^{-1}	min^{-1}
diffusion layer	1	0.5-1.1	~ 1
different positions at crystal surface	2	0.04-0.09	~ 0.05
	3	0.006-0.01	
grain boundary diffusion or recrystallization	4	0.0009-0.001	~ 0.001

If the exchange constant R_n^* is multiplied with the amount of isotopically exchangeable P present in the same position the constant rate of turnover in equilibrium R_n is obtained. According to BENECKE (1959) the dissolution process of phosphates can be characterized by $(R_2 + R_3)/2$.

For modelling, R was calculated using the amounts of isotopically exchangeable P in the different phosphate forms (expressed in kg/ha) and $R^* = 0.05 \text{ min}^{-1} = 26280 \text{ yrs}^{-1}$

$$(7.2) \quad R \text{ (kg P/ha/yr)} = 0.1 * 26280 * a$$

where 0.1 is a reduction factor assuming that the phosphorus being transported through mineral soil with the percolation water has access only to 1/10 of the P stores present.

Equation (7.1) then reads like follows

$$(7.3) \quad J_{515} = R_{51} * (EQ5 - C5)$$

where J_{515} is the flux from compartment 51 (cf. fig. 3) to the solution compartment 5 and R_{51} is the constant rate of exchange in equilibrium for the compartment 51.

It is obvious that by introducing the reduction factor 0.1, the absolute size of R is defined only arbitrarily. This will influence simulation results only in cases of fast transport processes through mineral soil within short periods of time. For simulation periods of one year or more simulation results do not change with increasing R provided the ratio $R_{51}/R_{52}/R_{53}$ does not change. In practice this means that dilution of a soil with inert quartz sand will not change the phosphate equilibria between liquid and solid soil phase to any great degree. This is generally accepted, and the dilution of soil by sand is a common practice e.g. in pot experiments.

8. Modelling of cation exchange equilibria

There are several different equations describing the cation exchange equilibria in soils (cf. BOIT, 1967); all are of the same general form:

$$(8.1) \quad \left(\frac{A}{B}\right)_{\text{solution}} = f \left[(A, B)_{\text{adsorbed}} \right]$$

where A and B represent two different cations. On the left hand side of the equation, reduced activity ratios $AR_{A/B}$ are usually used which are defined as

$$(8.2) \quad AR_{A/B} = \frac{z_A \sqrt{a_A}}{z_B \sqrt{a_B}}$$

where a is the thermodynamic ion activity in gions/l, and z_A and z_B are the electrochemical valencies of the cations A and B, respectively. The way to describe the adsorbed (exchangeable) cations A and B differs widely according to different approaches. It has to be stated clearly that according to equation (8.1) the behaviour of a cation moving with the percolation water through soil cannot be described adequately without taking into consideration simultaneously other cations. This limits the use of exchange equations of usual type described in literature for modelling. A model describing the behaviour of a single cation can be used only for simulations where minor changes in the exchangeable cation stores occur.

In special laboratory experiments, which will be reported in detail by KHANNA et al. (1973), the proper way of defining equation (8.1) for strongly acid soils like the one under study was investigated. The following relationships have been adopted from this study to describe changes in exchangeable stores as a function of the concentration of the same cation in solution:

(8.3) general form of regression: $y = a + bx$

$$(8.4) \Delta \text{ Na } (\mu\text{eq/g soil}) = -0.372 + 0.00049 a_{\text{Na}}; r = 0.914$$

$$(8.5) \Delta \text{ K } (\mu\text{eq/g soil}) = -0.3912 + 0.005719 a_{\text{K}}; r = 0.982$$

$$(8.6) \Delta \text{ Ca } (\mu\text{eq/g soil}) = -0.3403 + 0.004573 a_{\text{Ca}}; r = 0.971$$

$$(8.7) \Delta \text{ Mg } (\mu\text{eq/g soil}) = -0.2151 + 0.003102 a_{\text{Mg}}; r = 0.979$$

$$(8.8) \Delta \text{ Al } (\mu\text{eq/g soil}) = -0.8388 + 0.007684 a_{\text{Al}}; r = 0.932$$

where Δ cation = change in exchangeable store in $\mu\text{eq/g soil}$,
 a_{cation} = ion activity in solution in g-ion/l.

For incorporating these equations into the models the equations have first been solved for Δ cation = 0, yielding the cation activity in the equilibrium soil solution of the original soil; $a_{\text{Na}}^{(\text{eq})}$. With this value and the start values ST of the solution compartments, that is the values given in table 1, b of the regression equation was recalculated (b^*). As an example compartment 5 of the potassium model may be considered:

$$(8.9) b^* = \frac{a_{\text{K}}^{(\text{eq})}}{\text{ST}_5} * b = \frac{68.4}{0.42} * 0.005719 = 0.9314$$

The flow rate of potassium from compartment 5 to compartment 51 is then formulated as

$$(8.10) J_{551} = (-.3912 + .9314 * C_{5K}) * 39.102 * 0.89$$

where C_{5K} is the contents in compartment 5 at time t , 39.102 is the atomic weight and 0.89 is the bulk density of the soil. The last two values are needed to transform $\mu\text{eq/g soil}$ into kg/ha .

To overcome the limitations inherited in single cation models a compound model for exchangeable cations was developed. In this model the cation exchange equilibria for Na, K, Ca, Mg and Al are treated simultaneously (tab.13).

The values for compartment contents and fluxes are the same as in the single cation models.

For describing multiple cation exchange equilibria an approach given by ULRICH (1969) for defining the solution composition of a cation exchange system has been used. The chemical potential μ_i^o of a cation i in the equilibrium solution may be defined as:

$$\mu_i^o = RT \ln \prod_i AR_{i/j}$$

when R is the gas constant, T the temperature in degrees Kelvin, j stands for other cations under consideration and AR has the same meaning as given in equation (7.2). By defining

$$(7.11) \quad pA = -\log_{10} a_A$$

μ_i^o may be calculated as

$$\mu_i^o \text{ (kcal/gion)} = -1,364 * n * \frac{1}{Z_i} P_i - \sum_{j=1}^n \frac{1}{Z_j} P_j$$

This way of calculation has been selected for programing since the time behaviour of ion activities in the solution phase as well as of the chemical potentials μ may be an interesting output from a simulation run.

From the experiments of KHANNA et al. (1973) cited above, the following regression equations, representing the exchange isotherms for simultaneous exchange of Na, K, Ca, Mg, and Al have been derived for a very similar soil:

$$(7.12) \Delta \text{Na } (\mu\text{eq/g soil}) = 0.1982 + 0.06476 \mu_{\text{Na}}^o; r = 0.878$$

$$(7.13) \Delta \text{K } (\mu\text{eq/g soil}) = 3.546 + 0.353 \mu_{\text{K}}^o; r = 0.985$$

$$(7.14) \Delta \text{Ca } (\mu\text{eq/g soil}) = -2.005 + 0.490 \mu_{\text{Ca}}^o; r = 0.949$$

$$(7.15) \Delta \text{Mg } (\mu\text{eq/g soil}) = -1.264 + 0.3217 \mu_{\text{Mg}}^o; r = 0.948$$

$$(7.16) \Delta \text{Al } (\mu\text{eq/g soil}) = -12.95 + 1.396 \mu_{\text{Al}}^o; r = 0.824$$

From these equations the μ_i^0 , characterizing the chemical equilibrium (net exchange equal to zero) in the soil used for deriving the exchange isotherms, can be easily calculated. To transfer these regression equations into the compound model first of all the μ_i^0 for the different soil layers have to be known. They have been derived using the data of the single cation models. As shown in table 5 the two soils differ partly remarkable in the values of μ_i^0 .

Table 5: Comparison of the μ_i^0 of the regression equation with the μ_i^0 derived from single cation models

	μ_i^0 kcal/gion	
	regression equation	single cation models
Na	- 3.06	- 9.94 to - 8.11
K	- 10.05	- 10.88 to -12.83
Ca	4.09	6.40 to 6.18
Mg	3.92	3.80 to 4.15
Al	9.28	10.62 to 10.45

The regression equations 7.12 to 7.16 may be represented by

$$y_i = a_i + b_i x_i$$

where y_i represents the change in amount of exchangeable cation, x_i the chemical potential, a and b are regression constants. The equations 7.12 to 7.16 have been used for the compound model after setting $a_i = -b_i c_i$, where c_i is the μ_i^0 derived from the data of the single cation models. By doing so the regression equations have been adjusted in respect to the equilibrium condition, whereas the slope, that is the amount of cation exchanged by changing μ_i , remains unchanged.

Well developed programs for the simulation of cation exchange and movement of ions in soils taking into consideration mass

flow, dispersion, and diffusion are available (REINIGER et al. 1972). These approaches consider only vertical salt transport through soil while neglecting the uptake. For using these more sophisticated approaches in ecosystem modelling, the seasonal variations of bioelement uptake from the different soil depths must be known. These data cannot be measured directly but can be obtained from ecosystem data like the ones collected in the IBP projects by simulation studies.

8. Simulation results: Seasonal variations

The flux governing the seasonal variation pattern of the compartments as well as of other fluxes is probably the ion uptake. As may be seen from the values listed in table 2, uptake is the largest flux of all.

In a previous paper (ULRICH et al., 1971b), ion uptake data were treated as being composed of a mass flow component, where the transpiration stream is the driving force, and a diffusion component, where gradients in concentration or chemical potentials are the driving force. It was calculated that the mass flow accounted for 60 % of total uptake of K, N and P; for 80 % of Ca and for 100 % of Na, Mg and Al. From this it follows that the simulation studies of seasonality of uptake are feasible by combining the bioelement model with a water model from which the transpiration rates are calculated. Since these data are not yet available for the research site, it was attempted to simulate bioelement uptake from the different soil layers using data on seasonality of other fluxes. This information is available for rain input, canopy drip, litter fall,

Fig. 5 Compartment model of the program
listed in table 6

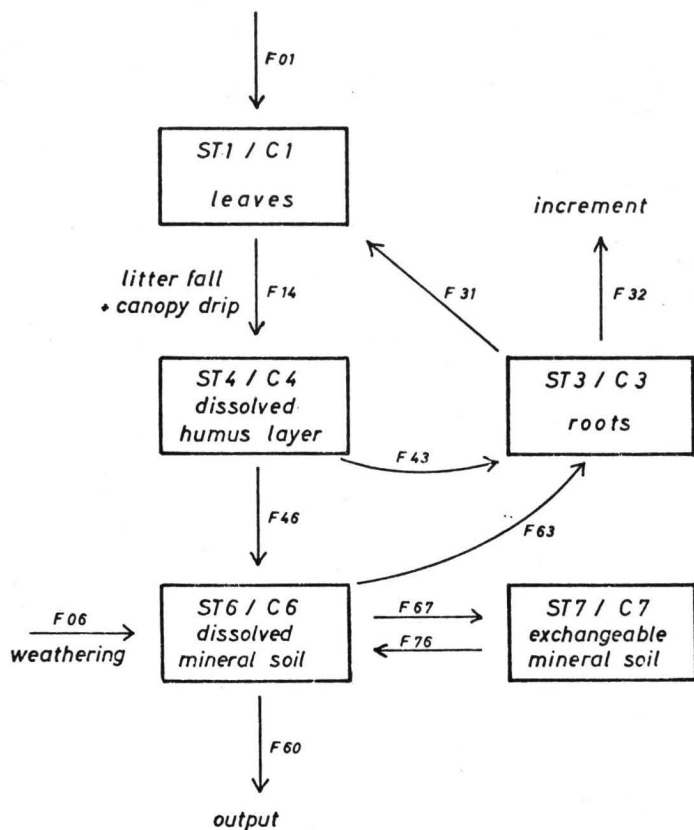


Table 6:

DEUTSCHE ZOOLOGISCHE VEREINIGUNG, Göttingen

- 32 -

TITLE POTASSIUM B1, SIMULATION OF SEASONAL UPTAKE PATTERN

FIXED N

/ NAMELIST /XFELD/XG1,X14,X43,X31,X32,X46,X63,X60,X06

*

*

INITIAL

*

FUNCTION ROOT=(0.,2.),(3.5,2.),(4.5,6.),(7.5,2.),(12.,2.)

PARAMETER N=1

PARAMETER X14=1.,X43=1.,X31=1.,X32=1.,X46=1.,X63=1.,X60=1.,X06=1.

PARAMETER XG1=1.

PARAMETER FC1=2.,F14=47.1,F46=38.1,F43=9.,F63=44.1,F32=8.,F31=45.1

PARAMETER F60=1.6,F06=7.6

PARAMETER ST1=31.,ST2=28.5,ST3=6.,ST4=0.1,ST6=0.46,ST7=70.

A31=F31/ST3

A32=F32/ST3

A46=F46/ST4

A43=F43/(ST4*ST3)

A63=F63/(ST6*ST3)

A60=F60/ST6

A06=F06*ST6

*

U6= 0.0151/1.0151

U7= 1./1.0151

*

FUNCTION INPUT=(0.,.1),(.5,.1),(1.5,.6),(3.5,.2),(4.5,.2),(5.5,.17),.00
(6.5,.13),(7.5,.34),(8.5,.28),(9.5,.34),(10.5,.34),(11.5,.1),(12.,.1)FUNCTION OUT=(0.,.15),(.5,.64),(1.5,.25),(2.5,.024),(3.5,.024),.00
(4.5,.227),(6.5,.129),(7.5,.148),(8.5,.148),(9.5,.117),.00
(10.5,.005),(11.5,.235),(12.,.15)FUNCTION CANOPY=(0.,.7),(.5,.6),(1.5,.5),(2.5,.6),(3.5,.3),.00
(4.5,.23),(5.5,.27),(6.5,.22),(7.5,.58),(8.5,.47),(9.5,.27),.00
(10.5,.52),(11.5,.7),(12.,.7)

*

*

DYNAMIC

*

A60=AFCN(OUT,JZ)*12.*ST6

ROOT IN=AFCN(ROOT,JZ)

*

TIME=TIME+0.5

JZ=(TIME-INT(TIME))*12.

*

J01=AFCN(INPUT,JZ)*12.*X01

J14=AFCN(CANOPY,JZ)*12.*X14

J43=A43*C4*ROOT IN *X43

J31=A31*C3*ROOT IN *X31

J32=A32*C3 *X32

J46=A46*C4 *X46

J63=A63*C6*ROOT IN *X63

J60=A60*C6 *X60

J06=A06/C6 *X06

*

DC1=J01+J31-J14

DC2=J32

DC3=J43+J63-J31-J32

DC4=J14-J43-J46

DC6=(J46+J06-J63-J60)*U6

DC7=(J46+J06-J63-J60)*U7

*

C1=INTGRL(ST1,DC1)

C2=INTGRL(ST2,DC2)

C3=INTGRL(ST3,DC3)

C4=INTGRL(ST4,DC4)

C6=INTGRL(ST6,DC6)

Table 6 (proceeded):

```

C7= INT GRL (ST7, DC7)
*
I01= INT GRL (0., J01)
I14= INT GRL (0., J14)
I43= INT GRL (0., J43)
I31= INT GRL (0., J31)
I32= INT GRL (0., J32)
I46= INT GRL (0., J46)
I63= INT GRL (0., J63)
I60= INT GRL (0., J60)
I06= INT GRL (0., J06)
*
RJNNR=N
PRINT I01, I14, I43, I31, I32, I46, I63, I60, I06, C1, C2, C3, C4, C6, C7, ...
      X14, X43, X31, X32, X46, X63, X60, X06, X01, RUNNR
TIMER FINTIM=10, CELT=0.003, PRDEL=10
*
*
TERMINAL
*
      IF(N0GE50) GO TO 33
X01=X01*(F01/I01)
      X14=X14*(F14/I14)
      X43=X43*(F43/I43)
      X31=X31*(F31/I31)
      X32=X32*(F32/I32)
      X46=X46*(F46/I46)
      X63=X63*(F63/I63)
      X60=X60*(F60/I60)
      X06=X06*(F06/I06)
      N=N+1
      CALL RFRUN
      GO TO 22
33  WRITE(2, XFELD)
22  CONTINUE
END
STOP
ENDJOB

```

Fig. 6 : Simulation of the seasonal pattern

fig. 6.1

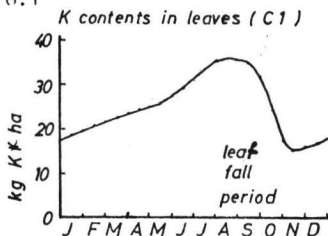


fig. 6.2

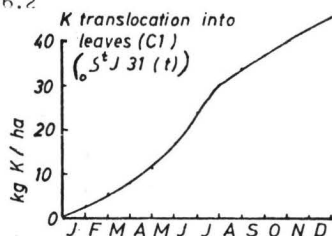


fig. 6.3

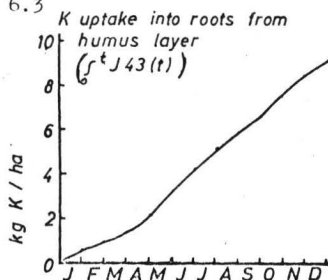


fig. 6.4

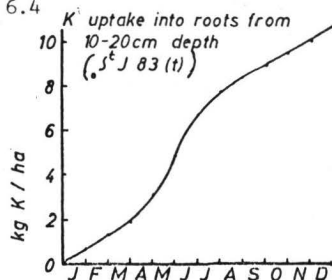


fig. 6.5

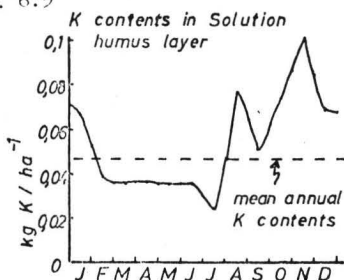


fig. 6.6

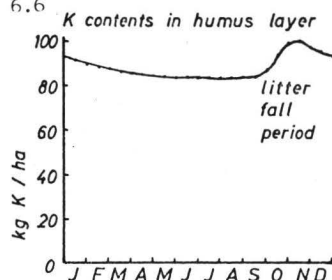


fig. 6.7 Exchangeable K in 0-10cm depth

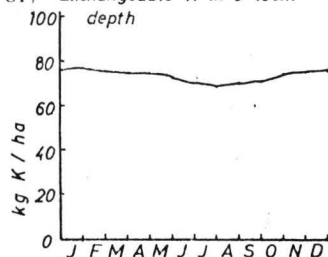
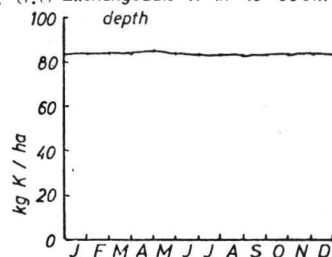


fig. 6.8 Exchangeable K in 40-50cm depth



mineralization and output (table 3). The changes in the size of the root compartment have also been measured (GÜTTSCHE). Since only minor changes in the exchangeable cation pools are to be expected the single cation models have been used for the simulation.

The mathematical modeling has been done by using a special feature of CSMP, the function generator: from a list of flux rates at different times (J_{ij}, t) the program interpolates values for any moment needed in the integration routine. For the fluxes mentioned above as well as for the size of the root compartment, monthly values have been inserted by using the linear function generator. These fluxes and the size of the root compartment are forced functions of time (made independent of changes in the system itself). An iteration procedure was included in the program to change the flux rates J_{ij} of the unforced fluxes in such a way that the integral of the flux rate is equal to F_{ij} . A program example of a simplified model as shown in fig. 5, is given in table 6. The values are taken from the potassium model. The results of the simulation of seasonal pattern of the complete potassium model is given in fig. 2. The leaves compartment 01 (6.1) reaches its lowest value at the end of the leaf fall period with 40 % of the maximum K storage in leaves occurring in August. This indicates an appreciable K storage in other parts of the tree, a fraction that is rapidly translocated into the growing leaves during spring. Translocation from roots into the leaves compartment (fig. 6.2) remains steady outside the vegetation period and more than doubles its rate during vegetation period. The same is true for the translocation rate from roots into wood and bark.

The seasonal pattern of K uptake by roots from humus layer and from 10-20 cm depth are shown in fig. 6.3 and 6.4 respectively. There is an increase during the vegetation period and a second increase due to leaching of K from freshly litter fall. In mineral soil the increase during the vegetation period is higher and the increase due to leave fall is delayed till December.

Fig. 6.5-6.8 show the seasonal variation in the K contents of some of the soil compartments. The only compartment showing appreciable variation is the solution compartment in humus layer. The potassium leaching from leaves in August and again during the leaf fall period is responsible for the two peaks. The K contents in humus layer increases with litter fall and then decreases exponentially. The exchangeable K in 0-10 cm depth shows only small variations; a decrease during the main uptake period followed by an increase due to litter mineralisation. In 40-50 cm depth the exchangeable K shows almost no variations. Because of the way of modelling (instantaneous exchange equilibria), the solution compartments show the same changes in percent as the exchangeable stores.

The results of simulations concerning the other bio-elements will be treated in a more comprehensive manner. For describing the seasonal variability in the soil solution and mineral soil compartments, the difference between minimum and maximum of the simulated values was expressed in percent of the maximum values. These values are given in table 7 (solution compartments) and table 8 (exchangeable cation stores).

Table 7: Seasonal variability of the solution compartments
in percent of maximum value (calculation see text)

Comp.	N	Na	K	Ca	Mg	Al
3	69	73	73	65	65	74
5	70	55	67	62	51	22
6	76	41	58	60	41	6
7	77	30	47	57	37	3
8	77	21	30	47	28	1
9	81	100	28	84	57	88

For the solution compartments one would expect that the seasonal variability in the concentration of the soil solution become smaller with increasing depth and the same should be true for the compartment contents. This has been found only for potassium and, to some extent, for nitrogen. The other cations show decreasing seasonal variability down to the fifth depth interval (compartment 8) and then a more or less sharp increase in the last depth interval. This increase may be due to the snow melt in April. As discussed already in chapter 5 the soil was water saturated at that time, so that the soil water passed rapidly through big pores without coming to equilibrium with the soil. It seems that only potassium, which is bound very strongly by the illite clay minerals, came to equilibrium with the exchangeable cation pool. For Ca a separate output from compartment 3 called LOSS was introduced to account for this phenomenon, but as may be seen from table 7, the partition of the total annual output into two components has not been successful. For further development of the models it is intended to simulate the output LOSS by an iteration procedure so as to make the seasonal variability of compartment 9 similar

to that of compartment 8. The output LOSS may also be due to a methodical error, because during the saturated waterflow in soil a very small suction head lying on the suction lysimeter plates in excess to the neighbouring soil will cause a funnel effect and thus force more water through the plate compared to the neighbouring soil. The behaviour of K and N shows, however, that this effect has probably not been the decisive one.

Table 8: Seasonal variability of the exchangeable cation stores in percent of maximum value

Comp.	Na	K	Ca	Mg	Al
51	2.7	2.9	1.4	1.8	0.03
61	1.2	1.9	1.7	1.9	0.01
71	0.9	2.2	2.3	2.5	0.002
81	0.8	1.4	2.2	2.7	0.001
91	5.3	1.1	4.8	8.9	0.27

In table 8 the seasonal variability of the exchangeable cation stores is shown. As already discussed for potassium the changes are quite small for all cations. If one remembers that the spatial inhomogeneity of soils often causes a variability coefficient of 50 percent it is obvious that there is little chance to follow bioelement uptake from soil by seasonal soil sampling.

Table 9: Bioelement uptake in the leafless period (Oct. 15 to April 15) in percent of total uptake

N	Na	K	Ca	Mg	Al
39	36	33	34	33	30

In table 9 bioelement uptake during the leafless period (October 15 to April 15) is expressed in percent of total annual uptake. Our simulation model shows that approximately one third of the total annual uptake occurs outside the vegetation period in a time span of half a year. There are only minor differences among the bioelements. Since transpiration in beech will be very low during this time, the simulated values appear very high. As stated in the beginning of this chapter, uptake may be the governing flux in mineral cycling which influences other fluxes to a great degree. In this case one would not expect that uptake can be simulated realistically by using the other fluxes as forcing functions. For further model development it is intended to simulate uptake using water flow (transpiration) as forcing flux.

Table 10: Cycling fraction in plant.

Maximum and minimum values in kg/ha.

	N	Na	K	Ca	Mg	Al
max.	113	.73	33.0	19.3	3.11	1.10
time of max.	Sep.15	Mar.1	Aug.7	Aug.13	Jul.7	Sep.18
min.	73.9	0	17.2	1.0	2.14	0.20
time of min.	Nov.15		Nov.10	Nov.10	Nov.7	Feb.7

In table 10 the simulated maximum and minimum values for the cycling fraction (leaves etc.) in plant are shown. The maximum values slightly exceed the values for the compartment contents of compartment 1 as shown in table 1 and with the exception of Na are reached more or less late in summer before leaf fall. The minimum values come close to the maximum for N, K, and Mg, but approach zero for Na, Ca, and Al. This simulation result seems reasonable.

10. Simulation results: Fertilization

The fertilizer input was modelled in different ways taking into account the solubility of the fertilizer. For simulating N fertilization a solitary input of 100 kg was given at time $t = 0$ into compartment 3 (humus layer, dissolved). For P the same input was given into compartment 4 (humus layer, undissolved). In case of K, Ca and Mg an input of 100, 100 and 10 kg, respectively, was given into compartment 3 over a time period of 6/10 of the first year. In case of Ca this input doesn't correspond directly to the fertilizer dose, but to that fraction of the lime fertilizer applied which has been neutralized according to the equation



As shown elsewhere (ULRICH, 1970a,b), a lime fertilizer applied on top of the humus layer of an acid forest soil causes almost no pH change in the mineral soil. Only this part of the action of a lime fertilizer can be simulated with the cation compound model in its present stage.

The results for P are compiled in table 11. 10 years after the fertilization 23 % of the fertilizer is still left undissolved in humus layer. 77 kg have been taken up during this time period, 32 kg thereof remaining in the stand, 41 kg being accumulated in the humus layer. Only 4 kg have been transported into mineral soil where they reduced weathering. There is no increase in percolation output. The results concerning distribution in soil compartments are in agreement with soil chemical investigations of forest fertilization plots (ULRICH, unpublished).

The cycling rate of nitrogen seems much higher, the increase in total uptake during 10 years after fertilization exceeds the fertilizer dose. This is mainly the result of giving the fertilizer nitrogen into a different compartment compared to phosphorus.

Table 11: Distribution of 100 kg fertilizer P or else N in the ecosystem 10 years after fertilization

	P kg/ha	N
(1) Increase in total uptake (F21 + F20)	73	165
(2) Increase in comp. 1 (leaves)	4	7
(3) Increase in comp. 2 (roots)	4	2
(4) Increase in increment	24	32
(5) Return to comp. 4 ($1 - (2 + 3 + 4)$)	41	124
(6) Reduction of weathering	4	-
(7) Increase in comp. 4 (undissolved humus)	64	44
(8) Fertilizer left in comp. 4 (7-5)	23	0
(9) Increase in output	0	14

In fig. 7 the cumulative uptake is plotted as a function of time after fertilization. It can be seen that already after 0.2 years the N-uptake is close to 100 kg. In the 10th year after fertilization the uptake rate of P is 80 % higher compared with unfertilized, whereas the uptake rate of N is only 10 % higher. This shows that the long term effect of fertilization on cycling is much higher for P than for N, which is in agreement with observations from fertilizer experiments (HAUSER et al., SEIBT et al.).

In spite of this general agreement the way of modelling fertilizer input seems not to be adequate. Probably the input should be given direct to compartment 3 as a series of solitary events. The time course should be

fixed according to experimental results of the dissolution of the fertilizer at the site. If the time behaviour within a year (e.g. the first or the second year after fertilization) is of interest a seasonal model has to be used.

For the cation compound model some of the simulation results are compiled in table 12. If one considers, for example, potassium, 61 % of the fertilizer dose appears 10 years after fertilization as part of the exchangeable stores, which increased by 16 %.

Table 12: Changes in cation stores and flows 10 years after fertilization of 100 kg K, 100 kg Ca and 10 kg Mg

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	sorbed		humus		out	weath.		increm.		leaves	
	kg	%	kg	%	kg	kg	%	kg	%	kg	%
Na	-6.3	4	+19	1	+5	-	-	+13	7	+0.03	.8
K	+61	16	+9.7	12	+2	-8	8	+18	24	+1.3	4
Ca	+31	12	+12	14	+22	-7	17	+26	37	+9	6
Mg	-3	8	+2	6	+4	-3	14	+4	26	+0.9	1
Al	-33	0.8			+23	-8	18	+14	20		

sorbed = change in exchangeable stores in 0-50 cm soil depth after 10 years in kg/ha and in % of initial value

humus = change in compartment 4 after 10 years in kg/ha and in % of initial value

out = change in output during 10 years in kg/ha

weath. = change in weathering during 10 years in kg/ha and in % of initial value

increm. = change in flux 20 (increment) during 10 years in kg/ha and in % of initial value

leaves = change in compartment 1 after 10 years in kg/ha and in % of initial value

In case of K and Ca the kg-values express also % of fertilizer dose, in case of Mg the same is true after multiplication with 10.

The increase of exchangeable K and Ca is balanced by decreases in exchangeable Na, Mg als Al. In spite of 10 kg Mg added as fertilizer the exchangeable Mg store decreased by 8 %. For all cations the output via percolation was increased, representing 2 %, 22 % and 40 % of the fertilizer dose for K, Ca and Mg, respectively. This shows that K and Ca fertilization has a strong effect on Mg, inducing Mg losses from the ecosystem. This result may be of importance for forest fertilization practices. For all cations, also the ones not added by fertilization, there is an appreciable decrease in weathering and increase in increment. The increase in increment seems to be too high, which is a question of modelling fertilizer input (see discussion above) on the one hand, but on the other a consequence of modelling increment simply as a sink for nutrients leaving the root compartment. In reality there are a lot of transport steps in between with feedbacks regulating growth and bioelement content in newly formed wood and bark. The models have to be improved in this respect, too, perhaps by introducing a time lag for flux F20.

In spite of the same fertilizer dose the distribution of K and Ca within the system is quite different. This is a consequence of the cation exchange equilibria, reflecting a high affinity of the cation exchangers in soil (mainly clay minerals of illitic type) for potassium. As may be seen from fig. 8 this results in a different distribution as a function of soil depth. K is mainly bound in the upper 20 cm of the mineral soil, its transport through soil being very slow. Ca moves rapidly through soil, is almost even distributed among the different depth intervalls and shows as a consequence an appreciable output.

By giving insight into the time dependent interrelationships between the different cations the cation compound model is able to provide a lot of information which seems to be realistic and useful. If for example only the Ca input is given, the system is more conservative in respect to Ca, making output loss smaller (12 kg only). Informations of this kind can easily be obtained by comparing the results of simulations with different nutrients fertilized or different ways of modelling fertilizer input. The effects of replication of fertilization after some years can also be simulated.

Not only fertilization, but other interferences with the ecosystem may also be simulated, such as export of humus layer as part of several silvicultural practices or a clear cutting.

Table 13:

****CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM****

*** VERSION 1.3 ***

TITLE COMPOUND MODEL FOR SODIUM,POTASSIUM,CALCIUM,MAGNESIUM,ALUMINIUM

*VERSION 1 FROM JULY 29,1973 - ULRICH = SOLLING 31

*

*C=CONTENTS IN COMPARTMENTS,F=FLUXES,J=RATES

*C=SINKS OR SOURCES OUTSIDE THE SYSTEM

*1=CYCLING FRACTION IN STAND

2 =FINE ROOTS

*3=DISSOLVED IN HUMUS LAYER

4 =BOUND IN HUMUS LAYER

*MINERAL SOIL 0-10 CM 5=DISSOLVED

51=EXCHANGEABLE

* 10-20 CM 6=DISSOLVED

61=EXCHANGEABLE

* 20-30 CM 7=DISSOLVED

71=EXCHANGEABLE

* 30-40 CM 8=DISSOLVED

81=EXCHANGEABLE

* 40-50 CM 9=DISSOLVED

91=EXCHANGEABLE

*

INITIAL

*

* DEFINITION OF RAIN INPUT

*

PARAMETER F01A=7.3,F01K=2.,F01CA=12.4,F01MG=1.79,F01AL=3.05

*

* INITIAL CONDITIONS OF COMPARTMENT CONTENTS

*

INCON IC1NA=.39,IC1K=.30,IC1CA=15.9,IC1MG=2.71,IC1AL=.29

INCON IC2NA=.92,IC2K=.54,IC2CA=5.9,IC2MG=2.36,IC2AL=5.6

INCON IC3NA=.034,IC3K=.011,IC3CA=.1,IC3MG=.012,IC3AL=.015

INCON IC4NA=14.4,IC4K=82.4,IC4CA=89.2,IC4MG=33.9,IC4AL=34.0

INCON IC5NA=.34,IC5K=.42,IC5CA=1.81,IC5MG=.19,IC5AL=1.13

INCON IC6NA=.42,IC6K=.32,IC6CA=1.45,IC6MG=.20,IC6AL=.97

INCON IC7NA=.42,IC7K=.27,IC7CA=1.35,IC7MG=.23,IC7AL=.83

INCON IC8NA=.52,IC8K=.23,IC8CA=1.31,IC8MG=.20,IC8AL=.66

INCON IC9NA=.52,IC9K=.18,IC9CA=1.11,IC9MG=.16,IC9AL=.61

INCON IC51NA=20.,IC51K=70.,IC51CA=74.,IC51MG=11.0,IC51AL=838.

INCON IC61NA=30.,IC61K=85.,IC61CA=68.,IC61MG=9.7,IC61AL=1005.

INCON IC71NA=30.,IC71K=76.,IC71CA=47.,IC71MG=7.4,IC71AL=815.

INCON IC81NA=32.,IC81K=73.,IC81CA=39.,IC81MG=5.3,IC81AL=743.

INCON IC91NA=38.,IC91K=83.,IC91CA=4.,IC91MG=6.3,IC91AL=843.

*

* ACTIVITY COEFFICIENTS

*

PARAMETER F1=.959,F2=.833,F3=.71

*

DYNAMIC

*

* CALCULATION OF ION ACTIVITIES IN SOLUTION, EXPRESSED AS NEGATIVE LOGS (P)

* P=0.4343*ALOG(1./((C*ACTIV.COEFF./ATOMIC WEIGHT)/AMOUNT OF WATER))

*

PNA5 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C5NA*F1/22.997)/33.0)))

PNA6 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C6NA*F1/22.997)/33.0)))

PNA7 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C7NA*F1/22.997)/33.0)))

PNA8 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C8NA*F1/22.997)/33.0)))

PNA9 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C9NA*F1/22.997)/33.0)))

PK5 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C5K*F1/39.061)/33.0)))

PK6 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C6K*F1/39.061)/33.0)))

PK7 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C7K*F1/39.061)/33.0)))

PK8 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C8K*F1/39.061)/33.0)))

PK9 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C9K*F1/39.061)/33.0)))

PCA5 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C5CA*F2/40.08)/33.0)))

PCA6 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C6CA*F2/40.08)/33.0)))

PCA7 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C7CA*F2/40.08)/33.0)))

PCA8 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C8CA*F2/40.08)/33.0)))

PCA9 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C9CA*F2/40.08)/33.0)))

PMC5 = 0.4343 * ALOG(ABS(1./((C5MG*F2/24.32)/33.0)))

Table 13 (proceeded):

```

PMG6 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C6MG*F2/24.32.0)/33.0)))
PMG7 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C7MG*F2/24.32.0)/33.0)))
PMG8 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C8MG*F2/24.32.0)/33.0)))
PMG9 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C9MG*F2/24.32.0)/33.0)))
PAL5 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C5AL*F3/26.97.0)/33.0)))
PAL6 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C6AL*F3/26.97.0)/33.0)))
PAL7 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C7AL*F3/26.97.0)/33.0)))
PAL8 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C8AL*F3/26.97.0)/33.0)))
PAL9 = 0.4243 * ALOG(ABS(1.0/((C9AL*F3/26.97.0)/33.0)))

```

```

* CALCULATION OF CHEMICAL POTENTIAL MY
* MY=R*T*LN(PRODUCT FOR ALL I VALLES OF ACTIVITY RATIOS I/J)

```

```

MYNA5 = -1.364*(4.0*PNA5-PK5 -5*PCA5-5*PMG5-3333*PAL5)
MYNA6 = -1.364*(4.0*PNA6-PK6 -5*PCA6-5*PMG6-3333*PAL6)
MYNA7 = -1.364*(4.0*PNA7-PK7 -5*PCA7-5*PMG7-3333*PAL7)
MYNA8 = -1.364*(4.0*PNA8-PK8 -5*PCA8-5*PMG8-3333*PAL8)
MYNA9 = -1.364*(4.0*PNA9-PK9 -5*PCA9-5*PMG9-3333*PAL9)
MYK5 = -1.364*(4.0*PK5 -PNA5-5*PCA5-5*PMG5-3333*PAL5)
MYK6 = -1.364*(4.0*PK6 -PNA6-5*PCA6-5*PMG6-3333*PAL6)
MYK7 = -1.364*(4.0*PK7 -PNA7-5*PCA7-5*PMG7-3333*PAL7)
MYK8 = -1.364*(4.0*PK8 -PNA8-5*PCA8-5*PMG8-3333*PAL8)
MYK9 = -1.364*(4.0*PK9 -PNA9-5*PCA9-5*PMG9-3333*PAL9)
MYCA5 = -1.364*(2.0*PCA5-PNA5-PK5 -5*PMG5-3333*PAL5)
MYCA6 = -1.364*(2.0*PCA6-PNA6-PK6 -5*PMG6-3333*PAL6)
MYCA7 = -1.364*(2.0*PCA7-PNA7-PK7 -5*PMG7-3333*PAL7)
MYCA8 = -1.364*(2.0*PCA8-PNA8-PK8 -5*PMG8-3333*PAL8)
MYCA9 = -1.364*(2.0*PCA9-PNA9-PK9 -5*PMG9-3333*PAL9)
MYMG5 = -1.364*(2.0*PMG5-PNA5-PK5 -5*PCA5-3333*PAL5)
MYMG6 = -1.364*(2.0*PMG6-PNA6-PK6 -5*PCA6-3333*PAL6)
MYMG7 = -1.364*(2.0*PMG7-PNA7-PK7 -5*PCA7-3333*PAL7)
MYMG8 = -1.364*(2.0*PMG8-PNA8-PK8 -5*PCA8-3333*PAL8)
MYMG9 = -1.364*(2.0*PMG9-PNA9-PK9 -5*PCA9-3333*PAL9)
MYAL5 = -1.364*(1.0*3333*PAL5-PK5 -5*PCA5-5*PMG5-PNA5)
MYAL6 = -1.364*(1.0*3333*PAL6-PK6 -5*PCA6-5*PMG6-PNA6)
MYAL7 = -1.364*(1.0*3333*PAL7-PK7 -5*PCA7-5*PMG7-PNA7)
MYAL8 = -1.364*(1.0*3333*PAL8-PK8 -5*PCA8-5*PMG8-PNA8)
MYAL9 = -1.364*(1.0*3333*PAL9-PK9 -5*PCA9-5*PMG9-PNA9)

```

```

J01NA=F01NA
J01K=F01K
J01CA=F01CA
J01MG=F01MG
J01AL=F01AL

```

```

* FLOW RATE = TRANSFER COEFFICIENT * COMPARTMENT CCNENT

```

```

J12NA=24.672*C1NA
J12K = 0.83117*C1K
J12CA= 2.0277*C1CA
J12MG=1.05277*C1MG
J12AL=1.0517*C1AL
J14NA=20.3777*C1NA
J14K = 0.66169*C1K
J14CA=1.04277*C1CA
J14MG=0.61255*C1MG
J14AL=2.06857*C1AL
J22NA=17.647 *C2NA
J22K = 75.818 *C2K
J22CA=11.504 *C2CA
J22MG=47.050 *C2MG
J22AL=5.0667 *C2AL
J52NA=3.0235 *C5NA
J52K = 20.193 *C5K
J52CA=5.0669 *C5CA

```

Table 13 (proceeded):

J 52M G= 5.579	*C 5MG
J 52AL= 5.1836	*C 5AL
J 62NA= 3.929	*C 6NA
J 62K = 3.0563	*C 6K
J 62CA= 6.924	*C 6CA
J 62M G= 6.750	*C 6MG
J 62AL= 6.2258	*C 6AL
J 72NA= 3.810	*C 7NA
J 72K = 3.0408	*C 7K
J 72CA= 6.630	*C 7CA
J 72M G= 6.25	*C 7MG
J 72AL= 6.2188	*C 7AL
J 82NA= 2.346	*C 8NA
J 82K= 2.013	*C 8K
J 82CA= 4.0115	*C 8CA
J 82M G= 3.955	*C 8MG
J 82AL= 3.1333	*C 8AL
J 92NA= 2.346	*C 9NA
J 92K= 2.0444	*C 9K
J 92CA= 4.0118	*C 9CA
J 92M G= 4.033	*C 9MG
J 92AL= 3.1333	*C 9AL
J 21NA= 7.8261	*C 2NA
J 21K = 7.5741	*C 2K
J 21CA= 7.2373	*C 2CA
J 21M G= 1.6992	*C 2MG
J 21AL= 1.1925	*C 2AL
J 21NA= 6.2065	*C 2NA
J 21K = 1.3774	*C 2K
J 21CA= 1.1846	*C 2CA
J 21M G= 1.6951	*C 2MG
J 21AL= 1.1232	*C 2AL
J 42NA= 6.6413	*C 4NA
J 42K = 6.2099	*C 4K
J 42CA= 6.2544	*C 4CA
J 42M G= 6.4868	*C 4MG
J 42AL= 6.2254	*C 4AL
J 35NA= 4.8082	*C 3NA
J 35K = 3.1461	*C 3K
J 35CA= 4.4604	*C 3CA
J 35M G= 4.2503	*C 3MG
J 35AL= 2.4967	*C 3AL
J 56NA= 3.7647	*C 5NA
J 56K = 3.762	*C 5K
J 56CA= 19.425	*C 5CA
J 56M G= 2.947	*C 5MG
J 56AL= 4.3673	*C 5AL
J 67NA= 2.6548	*C 6NA
J 67K = 4.6062	*C 6K
J 67CA= 17.897	*C 6CA
J 67M G= 17.967	*C 6MG
J 67AL= 5.3474	*C 6AL
J 78NA= 2.2737	*C 7NA
J 78K = 2.7085	*C 7K
J 78CA= 13.193	*C 7CA
J 78M G= 13.55	*C 7MG
J 78AL= 7.4269	*C 7AL
J 89NA= 1.6031	*C 8NA
J 89K = 1.9374	*C 8K
J 89CA= 1.117	*C 8CA
J 89M G= 11.507	*C 8MG
J 89AL= 1.1285	*C 8AL
J 90NA= 12.672	*C 9NA
J 90K = 12.778	*C 9K
J 90CA= 8.5586	*C 9CA

Table 13 (proceeded) :

J06MG=12.687/C 5MG
J90AL=12.733/C 9AL
J05K =.6468 /C 5K
J05CA=1.484/C 5CA
J05MG=.072 /C 5MG
J05AL=1.0241/C 5AL
J06K =.4928 /C 6K
J06CA=1.189/C 6CA
J06MG=.076 /C 6MG
J06AL=.90404/C 6AL
J07K =.4158 /C 7K
J07CA=1.107/C 7CA
J07MG=.076 /C 7MG
J07AL=.7456/C 7AL
J08K =.3542 /C 8K
J08CA=1.074/C 8CA
J08MG=.076 /C 8MG
J08AL=.6151/C 8AL
J09K =.2772 /C 9K
J09CA=.9102 /C 9CA
J09MG=.0592 /C 9MG
J09AL=.5592 /C 9AL

*

* FLOW RATES DEFINED BY EXCHANGE ISOTHERMS

*

J551NA=22.597*0.89*(.64358+.06476*MYNA5)
J661NA=22.597*1.19*(.59579+.06476*MYNA6)
J771NA=22.597*1.19*(.58549+.06476*MYNA7)
J881NA=22.597*1.19*(.54353+.06476*MYNA8)
J991NA=22.597*1.48*(.52545+.06476*MYNA9)
J551K =39.096*0.89*(.3.8421+.35300*MYK5)
J661K =39.096*1.19*(.4.0870+.35300*MYK6)
J771K =39.096*1.19*(.4.2081+.35300*MYK7)
J881K =39.096*1.19*(.4.3785+.35300*MYK8)
J991K =39.096*1.48*(.4.5283+.35300*MYK9)
J551CA=40.068*0.89*(-3.1352+.49*MYCA5)
J661CA=40.068*1.19*(-3.0288+.49*MYCA6)
J771CA=40.068*1.19*(-3.0553+.49*MYCA7)
J881CA=40.068*1.19*(-3.0410+.49*MYCA8)
J991CA=40.068*1.48*(-3.0575+.49*MYCA9)
J551MG=24.32*0.89*(-1.2225+.3217*MYMG5)
J661MG=24.32*1.19*(-1.2827+.3217*MYMG6)
J771MG=24.32*1.19*(-1.3342+.3217*MYMG7)
J881MG=24.32*1.19*(-1.3391+.3217*MYMG8)
J991MG=24.32*1.48*(-1.3226+.3217*MYMG9)
J551AL=26.57*0.89*(-14.830+1.396*MYAL5)
J661AL=26.57*1.19*(-14.812+1.396*MYAL6)
J771AL=26.57*1.19*(-14.768+1.396*MYAL7)
J881AL=26.57*1.19*(-14.525+1.396*MYAL8)
J991AL=26.57*1.48*(-14.784+1.396*MYAL9)

*

* DIFFERENTIAL EQUATIONS : CHANGE OF COMPARTMENT CONTENTS WITH TIME

*

CC1NA=J11NA+J21NA-J14NA-J13NA
CC2NA=J12NA+J52NA+J62NA+J72NA+J82NA+J92NA-J21NA-J20NA
CC3NA=J13NA+J43NA-J32NA-J35NA
CC4NA=J14NA-J43NA
CC5NA=J25NA-J52NA-J56NA-J551NA
CC6NA=J56NA-J62NA-J67NA-J661NA
CC7NA=J67NA-J72NA-J78NA-J771NA
CC8NA=J78NA-J82NA-J89NA-J881NA
CC9NA=J89NA-J92NA-J95NA-J991NA
CC51NA=J551NA
CC61NA=J661NA
CC71NA=J771NA

Table 13 (proceeded) :

```

DC81NA=J881NA
DC91NA=J991NA
DC1K=J81K+J21K-J14K-J13K
DC2K=J32K+J52K+J62K+J72K+J82K+J92K-J21K-J21K
DC3K=J13K+J43K-J32K-J35K
DC4K=J14K-J43K
DC5K=J35K-J52K-J56K+J65K-J551K
DC6K=J56K-J62K-J67K+J66K-J661K
DC7K=J67K-J72K-J78K+J77K-J771K
DC8K=J78K-J82K-J89K+J88K-J881K
DC9K=J89K-J92K-J97K+J96K-J991K
DC51K=J551K
DC61K=J661K
DC71K=J771K
DC81K=J881K
DC91K=J991K
DC1CA=J81CA+J21CA-J14CA-J13CA
DC2CA=J32CA+J52CA+J62CA+J72CA+J82CA+J92CA-J21CA-J21CA
DC3CA=J13CA+J43CA-J32CA-J35CA
DC4CA=J14CA-J43CA
DC5CA=J35CA-J52CA-J56CA+J65CA-J551CA
DC6CA=J56CA-J62CA-J67CA+J66CA-J661CA
DC7CA=J67CA-J72CA-J78CA+J77CA-J771CA
DC8CA=J78CA-J82CA-J89CA+J88CA-J881CA
DC9CA=J89CA-J92CA-J97CA+J96CA-J991CA
DC51CA=J551CA
DC61CA=J661CA
DC71CA=J771CA
DC81CA=J881CA
DC91CA=J991CA
DC1MG=J81MG+J21MG-J14MG-J13MG
DC2MG=J32MG+J52MG+J62MG+J72MG+J82MG+J92MG-J21MG-J21MG
DC3MG=J13MG+J43MG-J32MG-J35MG
DC4MG=J14MG-J43MG
DC5MG=J35MG-J52MG-J56MG+J65MG-J551MG
DC6MG=J56MG-J62MG-J67MG+J66MG-J661MG
DC7MG=J67MG-J72MG-J78MG+J77MG-J771MG
DC8MG=J78MG-J82MG-J89MG+J88MG-J881MG
DC9MG=J89MG-J92MG-J97MG+J96MG-J991MG
DC51MG=J551MG
DC61MG=J661MG
DC71MG=J771MG
DC81MG=J881MG
DC91MG=J991MG
DC1AL=J81AL+J21AL-J14AL-J13AL
DC2AL=J32AL+J52AL+J62AL+J72AL+J82AL+J92AL-J21AL-J21AL
DC3AL=J13AL+J43AL-J32AL-J35AL
DC4AL=J14AL-J43AL
DC5AL=J35AL-J52AL-J56AL+J65AL-J551AL
DC6AL=J56AL-J62AL-J67AL+J66AL-J661AL
DC7AL=J67AL-J72AL-J78AL+J77AL-J771AL
DC8AL=J78AL-J82AL-J89AL+J88AL-J881AL
DC9AL=J89AL-J92AL-J97AL+J96AL-J991AL
DC51AL=J551AL
DC61AL=J661AL
DC71AL=J771AL
DC81AL=J881AL
DC91AL=J991AL
*
* INTEGRAL EQUATIONS FOR COMPARTMENT CONTENTS
*
C1NA=INTGR( IC1NA,DC1NA)
C2NA=INTGR( IC2NA,DC2NA)
C3NA=INTGR( IC3NA,DC3NA)
C4NA=INTGR( IC4NA,DC4NA)

```

Table 13 (proceeded) :

C5NA= INTGRL (IC 5NA, DC 5NA)
 C6NA= INTGRL (IC 6NA, DC 6NA)
 C7NA= INTGRL (IC 7NA, DC 7NA)
 C8NA= INTGRL (IC 8NA, DC 8NA)
 C9NA= INTGRL (IC 9NA, DC 9NA)
 C51NA= INTGRL (IC 51NA, DC 51NA)
 C61NA= INTGRL (IC 61NA, DC 61NA)
 C71NA= INTGRL (IC 71NA, DC 71NA)
 C81NA= INTGRL (IC 81NA, DC 81NA)
 C91NA= INTGRL (IC 91NA, DC 91NA)
 C1K = INTGRL (IC 1K , DC 1K)
 C2K = INTGRL (IC 2K , DC 2K)
 C3K = INTGRL (IC 3K , DC 3K)
 C4K = INTGRL (IC 4K , DC 4K)
 C5K = INTGRL (IC 5K , DC 5K)
 C6K = INTGRL (IC 6K , DC 6K)
 C7K = INTGRL (IC 7K , DC 7K)
 C8K = INTGRL (IC 8K , DC 8K)
 C9K = INTGRL (IC 9K , DC 9K)
 C51K= INTGRL (IC 51K, DC 51K)
 C61K= INTGRL (IC 61K, DC 61K)
 C71K= INTGRL (IC 71K, DC 71K)
 C81K= INTGRL (IC 81K, DC 81K)
 C91K= INTGRL (IC 91K, DC 91K)
 C1CA= INTGRL (IC 1CA, DC 1CA)
 C2CA= INTGRL (IC 2CA, DC 2CA)
 C3CA= INTGRL (IC 3CA, DC 3CA)
 C4CA= INTGRL (IC 4CA, DC 4CA)
 C5CA= INTGRL (IC 5CA, DC 5CA)
 C6CA= INTGRL (IC 6CA, DC 6CA)
 C7CA= INTGRL (IC 7CA, DC 7CA)
 C8CA= INTGRL (IC 8CA, DC 8CA)
 C9CA= INTGRL (IC 9CA, DC 9CA)
 C51CA= INTGRL (IC 51CA, DC 51CA)
 C61CA= INTGRL (IC 61CA, DC 61CA)
 C71CA= INTGRL (IC 71CA, DC 71CA)
 C81CA= INTGRL (IC 81CA, DC 81CA)
 C91CA= INTGRL (IC 91CA, DC 91CA)
 C1MG= INTGRL (IC 1MG, DC 1MG)
 C2MG= INTGRL (IC 2MG, DC 2MG)
 C3MG= INTGRL (IC 3MG, DC 3MG)
 C4MG= INTGRL (IC 4MG, DC 4MG)
 C5MG= INTGRL (IC 5MG, DC 5MG)
 C6MG= INTGRL (IC 6MG, DC 6MG)
 C7MG= INTGRL (IC 7MG, DC 7MG)
 C8MG= INTGRL (IC 8MG, DC 8MG)
 C9MG= INTGRL (IC 9MG, DC 9MG)
 C51MG= INTGRL (IC 51MG, DC 51MG)
 C61MG= INTGRL (IC 61MG, DC 61MG)
 C71MG= INTGRL (IC 71MG, DC 71MG)
 C81MG= INTGRL (IC 81MG, DC 81MG)
 C91MG= INTGRL (IC 91MG, DC 91MG)
 C1AL= INTGRL (IC 1AL, DC 1AL)
 C2AL= INTGRL (IC 2AL, DC 2AL)
 C3AL= INTGRL (IC 3AL, DC 3AL)
 C4AL= INTGRL (IC 4AL, DC 4AL)
 C5AL= INTGRL (IC 5AL, DC 5AL)
 C6AL= INTGRL (IC 6AL, DC 6AL)
 C7AL= INTGRL (IC 7AL, DC 7AL)
 C8AL= INTGRL (IC 8AL, DC 8AL)
 C9AL= INTGRL (IC 9AL, DC 9AL)
 C51AL= INTGRL (IC 51AL, DC 51AL)
 C61AL= INTGRL (IC 61AL, DC 61AL)
 C71AL= INTGRL (IC 71AL, DC 71AL)
 C81AL= INTGRL (IC 81AL, DC 81AL)

Table 13 (proceeded) :

```

C91AL= INTGRL ( IC91AL,DC91AL )
*
* CALCULATION OF TOTAL UPTAKE
*
AUFNA=J 32NA+J 52NA+J 62NA+J 72NA+J 82NA+J 92NA
AUFK =J 32K +J 52K +J 62K +J 72K +J 82K +J 92K
AUFCA=J 32CA+J 52CA+J 62CA+J 72CA+J 82CA+J 92CA
AUFMG=J 32MG+J 52MG+J 62MG+J 72MG+J 82MG+J 92MG
AUFAL=J 32AL+J 52AL+J 62AL+J 72AL+J 82AL+J 92AL
IAUFNA= INTGRL ( 0.,AUFNA )
IAUFK = INTGRL ( 0.,AUFK )
IAUFCA= INTGRL ( 0.,AUFCA )
IAUFMG= INTGRL ( 0.,AUFMG )
IAUFAL= INTGRL ( 0.,AUFAL )
*
* CALCULATION OF TOTAL WEATHERING
*
WK =J 35K +J 56K +J 77K +J 88K +J 99K
WCA=J 35CA+J 56CA+J 77CA+J 88CA+J 99CA
WMC=J 35MG+J 56MG+J 77MG+J 88MG+J 99MG
WAL=J 35AL+J 56AL+J 77AL+J 88AL+J 99AL
IWK = INTGRL ( 0.,WK )
IWCA= INTGRL ( 0.,WCA )
IWMG= INTGRL ( 0.,WMC )
IWAL= INTGRL ( 0.,WAL )
*
* INTEGRATION OF OUTPUT
*
OUTNA= INTGRL ( 0.,J 96NA )
OUTK = INTGRL ( 0.,J 96K )
OUTCA= INTGRL ( 0.,J 96CA )
OUTMG= INTGRL ( 0.,J 96MG )
OUTAL= INTGRL ( 0.,J 96AL )
*
* CALCULATION OF AMOUNTS OF IONS EXCHANGED
*
EXNA=-J 551NA-J 661NA-J 771NA-J 881NA-J 991NA
EXK =-J 551K -J 661K -J 771K -J 881K -J 991K
EXCA=-J 551CA-J 661CA-J 771CA-J 881CA-J 991CA
EXMG=-J 551MG-J 661MG-J 771MG-J 881MG-J 991MG
EXAL=-J 551AL-J 661AL-J 771AL-J 881AL-J 991AL
IEXNA= INTGRL ( 0.,EXNA )
IEXK = INTGRL ( 0.,EXK )
IEXCA= INTGRL ( 0.,EXCA )
IEXMG= INTGRL ( 0.,EXMG )
IEXAL= INTGRL ( 0.,EXAL )
*
* PRINT AND PLOT STATEMENTS
*
PRTPLT C1NA,C2NA,C3NA,C4NA,C5NA,C6NA,C7NA,C8NA,C9NA,C51NA,C61NA,C71NA
PRTPLT C81NA,C91NA,C1K,C2K,C3K,C4K,C5K,C6K,C7K,C8K,C9K,C51K,C61K,C71K
PRTPLT C81K,C91K,C1CA,C2CA,C3CA,C4CA,C5CA,C6CA,C7CA,C8CA,C9CA,C51CA
PRTPLT C61CA,C71CA,C81CA,C91CA,C1MG,C2MG,C3MG,C4MG,C5MG,C6MG,C7MG
PRINT C8MG,C9MG,C51MG,C61MG,C71MG,C81MG,C91MG,0.00
      C5AL,C6AL,C7AL,C8AL,C9AL,0.00
      C51AL,C61AL,C71AL,C81AL,C91AL,IAUFNA,IAUFK,IAUFCA,IAUFMG,0.00
      IWK,IWCA,IWMG,IWAL,OUTNA,CUTK,CUTCA,OUTMG,CUTAL,IEXNA,IEXK,0.00
      IEXCA,IEXMG,IEXAL,IAUFAL,0.00
      MYNA5,MYNA6,MYNA7,MYNA8,MYNA9,MYK5,MYK6,0.00
      MYK7,MYK8,MYK9,MYCA5,MYCA6,MYCA7,MYCA8,MYCA9,MYMG5,MYMG6,MYMG7,0.00
METHOD MILNE
TIMER FINTIM=10., OUTDEL=0.2
END
STOP

```

- Benecke, P.: Kinetik des Isotopenaustausches bei Phosphaten. Diss. Landwirtsch.Fakultät Univ. Göttingen (1959)
- Benecke, P. and Mayer, R.: Aspects of soil water behaviour as related to beech and spruce stands - some results of the water balance investigations. Ecological studies (Springer) 2. 153-163(1971)
- Bolt, G.H.: Cation-Exchange equations used in soil science- A review. Neth.J.Agric.Sci.15,81-103(1967)
- Ellenberg, H.: Introductory survey in ecosystem research in the German Solling project. Ecological studies (Springer) 2, 1-15 (1971)
- Göttsche, D.: Verteilung von Feinwurzeln und Mykorrhizen im Bodenprofil eines Buchen- und Fichtenbestandes im Solling. Mitt.Bundesforschungsanst.f.Forst- u.Holzwirtsch., Nr.88 (1972)
- Hauser, K. und Wittich, W.: Ergebnisse eines Düngungs-Versuchs zu 66-jährigen Fichten auf einem typischen Standort des oberen Buntsandsteins im Württ. Schwarzwald. Allgem.Forst- u.Jagdztng. 140, 25-34, 49-62, 88-99 (1969)
- Heller, H.: Estimation of biomass of forests. Ecological Studies 2, 45-47 (1971a)
- International Business Machines Corporation (IBM): System/360 Continuous System Modeling Program User's Manual (1972)
- Khanna, P.K.: this volume (1973)
- Khanna, P.K. and Ulrich, B.: Phosphatfraktionierung im Boden und isotopisch austauschbares Phosphat verschiedener Phosphatfraktionen. Z.Pflanzenern.,Düngung,Bodenkde.117,53-63(1967)
- Lopez Martinze de Alva, L.: Zur Frage der Phosphatfestlegung im Boden. Diss. Univ. Göttingen (1962)
- Mayer, R.: Bioelement-Transport im Niederschlagswasser und in der Bodenlösung eines Wald-Ökosystems. Göttinger Bodenkd1.Ber.19, 1-119 (1971)

- Mayer, R.: Untersuchungen über die Freisetzung der Bioelemente aus der organischen Substanz der Humusaufgabe in einem Buchenbestand. Z.Pflanzenern.u.Bodenkunde 131, 261-273 (1972)
- Pavlov, M.: Bioelement-Inventur von Buchen- und Fichtenbeständen im Solling. Göttinger Bodenkundl. Ber.25, 1-174 (1972)
- Reiniger, P., Yaalon, D.H., and Frissel, M.J.: Simulation of cation exchange and movement in soils. In: Isotopes and Radiation in Soil Plant Relationships including Forestry, IAEA, Vienna, Proceedings Series (1972)
- Runge, M.: Investigations on the content and the production of mineral nitrogen in soils. Ecological Studies (Springer) 2, 191-202 (1971)
- Seibt, G., Knigge, W., Reemtsma, J.B. und Ulrich, B.: Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Düngungsmaßnahmen auf Ertragsleistung, Holzeigenschaften, nadelanalytische Merkmale und Bodenzustand des Fichtenbestandes im Düngungsversuch Oerrel-Lintzel. Allgem.Forst-u.Jagdztng.139, 25-37, 57-71 (1968)
- Ulrich, B.: Kationenaustausch-Gleichgewichte in Böden. Z.Pflanzenern., Düngung, Bodenkde. 113, 141-159 (1966)
- Ulrich, B.: Chemische Potentiale beim Transport von Bodenlösung durch das Solum. Z.Pflanzenern.u.Bodenkunde 123, 181-186 (1969)
- Ulrich, B.: Die Reaktionen von Calciumcarbonat bei der Einarbeitung von Kalkmergel in stark versauerte Waldböden mit Auflagehumus. Allgem.Forst-u.Jagdzeitung 141, 5-9 (1970a)
- Ulrich, B., E. Ahrens und Ulrich, M.: Soil chemical differences between beech and spruce sites - an example of the methods used. Ecological Studies (Springer) 2, 171-190 (1971a)

- Ulrich, B. und Keuffel, W.: Auswirkungen einer Bestandeskalkung zu Fichte auf den Nährstoffhaushalt des Bodens - Untersuchungen an Kalkungsversuchen im FA Escherode. Forstarchiv 41, 30-35 (1970b)
- Ulrich, B., Lin, H. and Karapurkar, H.: Kinetics of isotopic exchange between soil phosphates, soil solution and plant. In: Radioisotopes in Soil-Plant Nutrition Studies, pag. 59-74, Wien (1962)
- Ulrich, B., R. Mayer and M. Pavlov: Investigations on bioelement stores and bioelement cycling in beech and spruce stands including input-output analysis. Swedish Nat.Sci.Res.Council, Bull. Ecol.Res.Comm. 14, 87-113 (1971b)

A GENERAL CODE FOR ECOSYSTEM MODELS ¹

by D. L. De Angelis

¹ Sponsored by the Deutsche Forschungsgemeinschaft

under contract No. EI 1/37

Contribution of the Solling project in IBP No 112

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 29, 55 – 92
(1973)**

I. Introduction

The increasing use of mathematical simulation as a tool in the study of mass and energy flows in ecological systems has created the need for a general computer code which will allow ecologists to build simulation models with a minimum of effort. Mark Reeves, III (1972) has written a FORTRAN program for solving compartmental models which helps to fill this need. An advantage of Reeves' program is that all information specifying a particular system is put onto data cards. No internal manipulation of the program is necessary, so the modeller need not understand the program in detail but must only be able to properly format the data. Data sets for several simulation problems can be "stacked" and run in a single batch process, and the program can be used conveniently with data stored on file.

Modifications of the original program have now increased its flexibility in the modelling of ecosystems. This report provides the documentation for the modified program. In Section II the basic equations of compartmental models are discussed. In Sections III and IV the options provided by the present code are described. Section V is a description of the data card format and Section VI is an actual listing of the code.

II. Basic Equations

The flow of mass or energy through an ecosystem, divided into n distinct compartments, can be expressed by a series of equations of the form

$$\dot{q}_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} + f_i \quad (i = 1, n) \quad (1)$$

where

$\dot{q}_i$ = the time rate of change of matter or energy in the i^{th} compartment,

F_{ij} = the instantaneous flux passing from the donor compartment j to the receptor compartment i ,

f_i = external input acting on the i^{th} compartment.

The fluxes, F_{ij} , are, in general, functions of time and of the sizes of both the donor and receptor compartments. What form these functions take depends on the particular process involved. The external input, f_i , may, in general, be a function of time as well as of the size of the receptor compartment. Information specifying the form of these fluxes and external inputs, in addition to the initial compartment sizes, is given by the modeller. The computer program then calculates the changes in compartment sizes as a function of time over a specified time interval. A Runge-Kutta-Merson technique is used to perform the numerical integration.

III. Fluxes and External Inputs

To characterize the fluxes and external inputs, the user has at his disposal a wide variety of analytical functions, plus the capacity to use tabular data.

III. a. Fluxes

The flux from one compartment (j) to another (i) may be written as two factors, a factor $B(q_i, q_j)$ expressing the dependence on the size of the compartments, q_i and q_j , and a time-dependent modulation factor, $F(t)$. The total flux is

$$F_{ij} = F(t) \cdot B(q_i, q_j) \quad (2)$$

The flux, then, exhibits two types of time variation; a direct one, through the changes in $F(t)$, and an indirect one, through the implicit dependence of q_i and q_j on time. For example, the respiration of a particular organic component may depend on its mass, but may also be modulated in time because of changes in temperature, etc.

A particularly simple flux relationship is the case where $B(q_i, q_j) = q_j$. Then the flux,

$$F_{ij} = F(t) \cdot q_j \quad (3)$$

is linear with respect to q_j and has a time-modulated coefficient. The flux is also donor-dependent in this case since the flux depends

solely on the size of the donor compartment. If $F(t)$ is constant ($F(t) = a_{ij}$), there results

$$F_{ij} = a_{ij} \cdot x_j \quad (4)$$

a linear, donor-dependent, constant coefficient flux.

To deal with more complex fluxes, a variety of forms can be chosen for $B(q_i, q_j)$ and $F(t)$. The functions $B(q_i, q_j)$ available are listed in Section V.c. For example, FUNCTION B1 has the form

$$B1 = p_1 q_i + p_2 q_j + p_3 q_i q_j + p_4 q_i^2 + p_5 q_j^2 \quad (5)$$

where $p_1, \dots, p_5$ are parameters which the modeller is at liberty to choose by using the appropriate data cards. If the currently available functions are not adequate for the modeller, he can add or change functions by simple changes in the code itself (see FUNCTIONS B1 through B10, Section VI).

The analytical forms of the time-modulator, $F(t)$, available to the modeller include FUNCTIONS F1 through F10 and are pictured in Section V.d. Again, these forms are tailored to fit a particular problem by the appropriate choice of parameters $p_1, \dots, p_5$. Sometimes the time-modulation of a flux is known in the form of tabular data and is not easily representable as an analytic function. For example, the modeller may have data on litterfall at various times of the year. In cases of this sort, the modeller enters the tabular data into the pro-

gram and specifies FUNCTION 16. This function automatically interpolates between the tabular values to give the appropriate flux at any time during the year. FUNCTIONS 11 through 15 are described in Section IV.

III.b. External Inputs

When an external input does not depend on the size of the receptor compartment, it can be treated in a somewhat simpler way than the fluxes. In fact, the external input can be represented simply by the time-modulation factors (FUNCTION F1 - F10, F16) described above; that is

$$f_i = F(t) \quad (6)$$

If the external input does depend on the size of the receptor compartment, it must be treated in a manner similar to fluxes. The difference is that for external inputs there is no donor compartment, so a "dummy" donor compartment must be added to the system. This same added compartment can also act as a "dummy" receptor compartment for matter or energy outputted from the system.

IV. Special Functions: Dependence on Climatic Parameters

It is a major goal of ecological research to understand the dependence of nutrient fluxes on basic climatic parameters such as temperature and rainfall. It is important also to be able to incorporate these dependences in computer simulations. FUNCTIONS F11 through 15 have been reserved for this purpose.

At this time only one relationship between a climatic factor and a nutrient flux has been built into the computer code. This involves the dependence of canopy drip and stemflow on rainfall. Ulrich and Mayer (1973) have found that the nutrients carried in these fluxes depend not only on the amount of rainfall, but also on the distribution of rainfall intensities. A relation between the concentration (C) of nutrients found in canopy drip and stemflow and the rainfall intensity (N_i) is given as

$$\log C = a - b \cdot \log N_i \quad (7)$$

where a and b are constants. To simulate the effects of different intensities of rainfall on canopy drip, knowledge of the monthly rainfall intensity distribution is required. For example, the rainfall during a month can be broken into a number of intensities (e.g., 0 - .5 mm per hour, .5 - 1 mm per hour, etc.). The amounts of rainfall in each intensity interval in each month form the basic data units. FUNCTION 12 interpolates between the monthly data points to yield the rainfall intensity distribution $G(N_i)$ for any time. This quantity is then multiplied by the nutrient concentration as a function

of rainfall intensity $C(N_i)$ found from equation (7) and integration is performed over all intensities to yield the canopy drip and stem-flow

$$F_{ij} = \int dN_i \cdot G(N_i) \cdot C(N_i) \quad (8)$$

at any time interval during the year.

In the following section a description of the input data cards is presented. Comparison with the description of the original program by Mark Reeves (1972) indicates several new features now available. These include the capability the modeller has of inputting tabular data concerning fluxes and of simulating at least one of the fluxes as a function of climatic parameters. In addition the program automatically prints out all total fluxes occurring during the specified time period and allows the modeller to print out any of the instantaneous fluxes as a function of time.

V.a. Input Description

1. Title Card

2. List: NC,NA,NNF,NFF,NT,ITR

Format: 6I5

NC = n = number of compartments

NA = number of non-zero matrix elements a_{ij} for linear,
constant coefficient flows

NNF = number of fluxes which are non-linear or have time-
modulated coefficients plus the number of external
input functions which are dependent on the size of
the receptor compartment

NFF = number of compartments receiving external inputs
independent of compartment size

NT = number of times for which compartment sizes are to
be printed

ITR = maximum number of times the integration step may be
halved (ITR = 10 is typical)

3. List: DT,E

Format: 2E10.0

DT = t = time increment

E = preassigned accuracy which is used to adjust the step
size ($E = 10^{-6}$ is typical)

4. If $NA > 0$, the following card(s) is (are) necessary:

List : (I,J,A(I,J),K=1,NA)

Format: 4(2I5,E10.0)

$A(I,J) = a_{ij}$ = linear flow constant coefficient; only
off-diagonal coefficients ($i \neq j$) are
included.

5. If $NNF > 0$, the following card(s) is (are) necessary:

List: The following set of cards for each individual flux,

Card A: (I,J,INF(K),IFF(K),NTVF(K),(PNF(L,K),L=1,5))

Card B: (PFF(L,K),L=1,5)

Card(s) C: (T(K,L),L=1,NTVF(K))

Card(s) D: (DATA(K,L),L=1,NTVF(K))

Format: Card A: 5I4,5E10.0

Card B: 5E10.0

Card(s) C: 7E10.0

Card(s) D: 7E10.0

INF(K) = non-linear function identifier (FLAG) for flow
from compartment J to compartment I. Its value
determines which non-linear form (B1 through B10)
is used.*

IFF(K) = time-dependent modulator identifier. These are
the functions F1 through F16. If there is no
time-dependent modulation, then $IFF(K) = 0$.*

NTVF(K) = number of data points included in tabular flux
data. If there is no tabular data, $NTVF(K) = 0$.

PNF(L,K) = function parameters for non-linear flow.*

PFF(L,K) = function parameters for time-dependent modula-

tion. If $IFF(K) = 0$, this card is omitted. *

$T(K,L)$ = time points in tabular data. If $NTVF(K) = 0$,
this (these) card(s) is (are) omitted.

$DATA(K,L)$ = tabular flux values. If $NTVF(K) = 0$, this
(these) card(s) is (are) omitted.

(Note: If an external input dependent on receptor compartment size is being represented, then a "dummy" donor compartment must be used as J. For example, in a 14 compartment model an extra compartment, 15, is chosen to represent the source of such inputs. This same compartment can be used as a dummy receptor ("sink") for material leaving the system.)

6. If $NFF > 0$, the following card(s) is (are) necessary:

List: The following set of cards for each external input,

Card A: $(J, IFF(K), NTVF(K), (PFF(L,K), L=1,5))$

Card(s) B: $(T(K,L), L=1, NTVF(K))$

Card(s) C: $(DATA(K,L), L=1, NTVF(K))$

Format: Card A: 3I5,5x,5E10.0

Card(s) B: 7E10.0

Card(s) C: 7E10.0

$IFF(K)$ = time-dependent modulator identifier. These are
the functions F1 through F16. *

$NTVF(K)$ = number of data points included in tabular flux
data. If there is no tabular data, $NTVF(K)=0$.

$PFF(L,K)$ = function parameters for time-dependent mod-
ulation. *

* See description in parts c) and d) of this Section.

$T(K,L)$ = time points in tabular data. If $NTVF(K) = 0$,
this (these) card(s) is (are) omitted.

$DATA(K,L)$ = tabular flux values. If $NTVF(K) = 0$, this
(these) card(s) is (are) omitted.

7. List: $(QO(I), I=1, NC)$

Format: 7E10.0

$QO(I) = q_{oi}$ = initial size of compartment i .

8. List: NFLUX

Format: I5

NFLUX = number of fluxes to be printed as functions of
time.

9. If $NFLUX > 0$, the following card(s) is (are) necessary:

List: $(I(N), J(N), N=1, NFLUX)$

Format: 14I5

$I(N), J(N)$ = receptor-donor compartment pair for which
flux is printed out.

10. List: NRAIN, NINTS, NTPRA

Format: 3I5

NRAIN = total number of non-zero rainfall data units for
amount of rainfall in each intensity interval in
each month.

NINTS = number of intensity intervals.

NTPRA = number of months for which data is read in.

11. If $\text{NRAIN}, \text{NINTS}, \text{NTPRA} > 0$, the following card(s) is (are) necessary:

List: $(\text{RINTEN}(\text{I}), \text{I}=1, \text{NINTS})$

$\text{RINTEN}(\text{I})$ = average intensity in intensity interval i .

12. If $\text{NRAIN}, \text{NINTS}, \text{NTPRA} > 0$, the following card(s) is (are) necessary:

List: $((\text{RAINF}(\text{I}, \text{J}), \text{I}=1, \text{NTPRA}), \text{J}=1, \text{NINTS})$

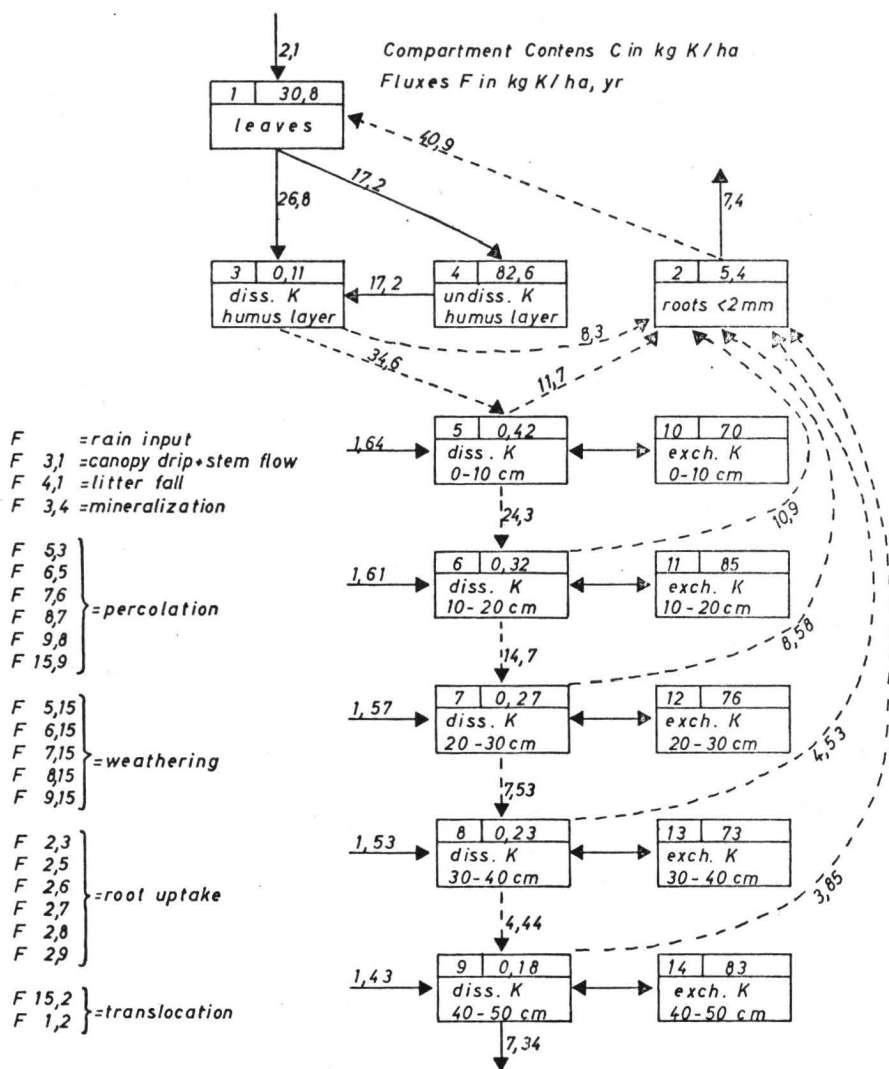
$\text{RAINF}(\text{I}, \text{J})$ = amount of rainfall in the intensity interval J during the month I .

V.b. Example

The use of this format can be somewhat clarified by reference to a particular example. The potassium model formulated by Ulrich, Mayer, Khanna and Prenzel (included in this volume) is well-suited to this purpose. This 14-compartment model is pictured in Figure 1. A fifteenth compartment is imagined present to serve as both a "dummy" donor compartment and a "dummy" receptor compartment.

A list of the appropriate data cards is exhibited below. The comment cards and the symbols on the data cards (e.g. A, B, D1, D2, NL11A) are present only to assist in the description.

fig.1 Solling B1 Beech Forest
Potassium Model



08/17-09:1n:06

C CARD A IS THE TITLE CARD

GENERAL ECOSYSTEM CODE - POTASSIUM MODEL EXAMPLE

C CARD B SPECIFIES THAT THE SYSTEM HAS 15 COMPARTMENTS, WITH 7 LINEAR,
C CONSTANT COEFFICIENT FLUXES AND 20 FLUXES WHICH ARE EITHER NON-
C LINEAR OR TIME-MODULATED, AND ONE EXTERNAL FORCING FUNCTION. IT ALSO
C SPECIFIES THAT THE COMPARTMENT SIZES WILL BE PRINTED OUT AT 25
C TIME INTERVALS. THE INTEGER ITR=15 WILL ALLOW THE ORIGINAL STEP-SIZE
C TO BE AUTOMATICALLY HALVED UP TO 15 TIMES IF NECESSARY TO OBTAIN
C ACCURATE INTEGRATION.

15 7 20 1 25 15

C CARD C SETS THE TIME INTERVAL AT .02 (OF A YEAR, FOR EXAMPLE, DEPEND-
C ON THE UNITS THE MODELLER IS WORKING IN).

.02 .00001

C CARDS D1 AND D2 SPECIFY THE LINEAR FLOW CONSTANT COEFFICIENTS. FOR
C EXAMPLE, THERE IS A LINEAR FLUX FROM COMPARTMENT 2 TO COMPARTMENT 1
C WHOSE ANNUAL RATE COEFFICIENT IS 10.35.

9	8	19.27	1	2	10.35	15	2	1.872	5	3	2.68	D1
6	5	56.37	7	6	45.49	8	7	27.65				D2

C CARDS NL1 THROUGH NL20F SPECIFY FLUXES WHICH ARE NON-LINEAR OR HAVE
C TIME-MODULATION FACTORS.

5	15	4	0	0	0.0	.6468	0.0	0.0	0.0	NL1
6	15	4	0	0	0.0	.4928	0.0	0.0	0.0	NL2
7	15	4	0	0	0.0	.4158	0.0	0.0	0.0	NL3
8	15	4	0	0	0.0	.3542	0.0	0.0	0.0	NL4
9	15	4	0	0	0.0	.2772	0.0	0.0	0.0	NL5

C FOR EXAMPLE, THE FLUX FROM COMPARTMENT 5 TO COMPARTMENT 10 (CARD NL6)
C SELECTS FUNCTION B3, SINCE ITS NON-LINEAR FLAG IS IFF(K)=3, AND
C ASSIGNS THE PARAMETER VALUES P1=-13.61, P2=32.41, P3=P4=P5=0, SINCE THE
C TIME-MODULATION FLAG IS IFF(K)=0, THERE IS NO TIME-MODULATION.

10	5	3	0	0	-13.61	32.41	0.0	0.0	0.0	NL6
11	6	3	0	0	-18.20	56.38	0.0	0.0	0.0	NL7
12	7	3	0	0	-18.20	67.42	0.0	0.0	0.0	NL8
13	8	3	0	0	-18.20	79.14	0.0	0.0	0.0	NL9
14	9	3	0	0	-22.64	115.6	0.0	0.0	0.0	NL10

C ON THE OTHER HAND, CARDS NL11A AND NL11B SPECIFY A TIME-MODULATED
C FLUX FROM COMPARTMENT 4 TO COMPARTMENT 3 WHICH HAS NO DEPENDENCE ON
C COMPARTMENT SIZE. THIS IS CLEAR BECAUSE THE NON-LINEAR FLAG IS
C IFF(K)=3, WHICH SELECTS FUNCTION B3, WHICH IS, FOR THE PARAMETER
C VALUES P1=1.0, P2=P3=P4=P5=0, SIMPLY A CONSTANT (1.0). THE TIME-MODU-
C LATION FLAG IS IFF(K)=4, WHICH IS A SHARP-RISE EXPONENTIAL FUNCTION.
C THE PARAMETERS WHICH APPROPRIATELY TAILOR THIS EXPONENTIAL FUNCTION
C ARE P1=50.16, P2=-.67, P3=4.0, P4=1.0, P5=0.0.

3	4	3	9	0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NL11A
50.16					4.0	1.0	0.0	0.0	0.0	NL11B
15	9	3	16	14	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NL12A

12.0	.5	0.0	0.0	0.0	0.0		NL12B
0.0	.0417	.125	.208	.29	.375	.458	NL12C
.541	.625	.708	.791	.875	.958	1.0	NL12D
.22	.09	.39	.03	.03	.33	.26	NL12E
.19	.21	.21	.17	.07	.34	.22	NL12F

C AS ANOTHER EXAMPLE, CARDS NL13A-NL13D SPECIFY A FLUX FROM COMPARTMENT
 C 7 TO COMPARTMENT 2 WHICH IS GIVEN BY TABULAR DATA. THE FINAL TWO
 C CARDS, NL13C AND NL13D, CONTAIN THE TIMES AT WHICH THE MEASUREMENTS
 C WERE TAKEN (IN FRACTIONS OF A YEAR) AND THE VALUES OF THE FLUX,
 C RESPECTIVELY. THE NON-LINEAR FLAG IS INF(K)=1 AND THE ASSOCIATED
 C PARAMETER VALUES ARE P1=0.0, P2=11.91, P3=P4=P5=0.0. THIS MEANS THAT
 C THE FLUX IS PROPORTIONAL TO 11.91*QJ. THE TIME-MODULATION FLAG IS
 C IFF(K)=16, WHICH IS NECESSARY WHEN TABULAR DATA IS USED. THE INTEGER
 C NTVF(K)=6 IN CARD NL13A MEANS THAT THERE ARE SIX DATA POINTS IN THE
 C TABULAR DATA. THE PARAMETER VALUES ASSOCIATED WITH THE TIME-MODULATOR
 C ARE P1=1.0, P2=.5, P3=P4=P5=0.0, WHICH MEANS THAT THE TABULAR FLUX
 C VALUES ARE MULTIPLIED BY UNITY AND THAT THE SIMULATION STARTS AT
 C .5 (YEARS) FOR EXAMPLE) AFTER THE FIRST MEASURED DATA POINT. THE TOTAL
 C FLUX IS $F2.7=11.91*QJ*F(T)$, WHERE $F(T)$ IS THE LINEAR INTERPOLATION
 C BETWEEN THE TABULAR FLUX VALUES.

2	7	1	16	6	0.0	11.91	0.0	0.0	0.0	NL13A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL13B
0.0		.29		.375	.547	.625	1.0			NL13C
2.0		2.1		6.0	6.1	2.1	2.0			NL13D
2	3	1	16	6	0.0	24.3	0.0	0.0	0.0	NL14A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL14B
0.0		.29		.375	.547	.625	1.0			NL14C
2.0		2.1		6.0	6.1	2.1	2.0			NL14D
2	9	1	16	6	0.0	7.163	0.0	0.0	0.0	NL15A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL15B
0.0		.29		.375	.547	.625	1.0			NL15C
2.0		2.1		6.0	6.1	2.1	2.0			NL15D
2	8	1	16	6	0.0	7.145	0.0	0.0	0.0	NL16A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL16B
0.0		.29		.375	.547	.625	1.0			NL16C
2.0		2.1		6.0	6.1	2.1	2.0			NL16D
2	5	1	16	6	0.0	10.46	0.0	0.0	0.0	NL17A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL17B
0.0		.29		.375	.547	.625	1.0			NL17C
2.0		2.1		6.0	6.1	2.1	2.0			NL17D
2	6	1	16	6	0.0	12.88	0.0	0.0	0.0	NL18A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL18B
0.0		.29		.375	.547	.625	1.0			NL18C
2.0		2.1		6.0	6.1	2.1	2.0			NL18D
4	1	4	16	14	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NL19A
1.0		.5		0.0	0.0	0.0	0.0			NL19B
0.0		.0417		.125	.208	.29	.375	.458		NL19C
.541		.625		.708	.791	.875	.958	1.0		NL19D
0.0		0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.2		NL19E
0.5		0.7		1.2	14.3	0.4	0.0	0.0		NL19F
3	1	4	12	14	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NL20A
.01		.5		2.5	1.5	.5				NL20B
0.0		.0417		.125	.208	.29	.375	.458		NL20C
.541		.625		.708	.791	.875	.958	1.0		NL20D
1.2		1.6		.5	.6	1.3	2.3	2.5		NL20E
1.6		4.9		3.2	4.9	1.5	0.7	1.2		NL20F

C CARDS FF1-FF5 SPECIFY AN EXTERNAL INPUT ACTING ON COMPARTMENT 1.
 C THE INPUT HAS THE FORM OF A TABLE OF DATA. THE TIMES AT WHICH THE
 C DATA MEASUREMENTS WERE TAKEN AND THE VALUES OF THOSE FLUX DATA ARE

C GIVEN IN CARDS FF2 AND FF3, RESPECTIVELY. THE TIME-MODULATION
C PARAMETERS ARE P1=12., P2=P3=P4=P5=0.0, WHICH MEANS THAT ALL TABULAR
C FLUX VALUES ARE MULTIPLIED BY 12.0.

1	16	13	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	FF1
0.0		.0417	.125	.29	.375	.458	.5	FF2
.625		.708	.791	.875	.985	1.0		FF3
.1		.1	0.0	0.0	.2	.17	.13	FF4
.34		.28	.34	.34	.1	.1		FF5

C CARDS Q1, Q2, AND Q3 SPECIFY THE INITIAL VALUES OF THE COMPARTMENT
C SIZES.

30.8	5.4	.11	82.4	.42	.32	.27	Q1
.23	.18	.70	.85.0	.76.0	.73.0	.83.0	Q2
100.							Q3

C CARD PF1 SPECIFIES THE NUMBER OF FLUXES TO BE PRINTED OUT AND PF2
C SPECIFIES WHICH FLUXES (I.E., FROM COMPARTMENT 9 TO COMPARTMENT 15,
C FROM COMPARTMENT 1 TO COMPARTMENT 4, ETC.)

4								PF1
15	9	4	1	3	4	3	1	PF2

C CARD NR SPECIFIES THAT 67 UNITS OF DATA CONCERNING AMOUNTS OF RAIN-
C FALL IN VARIOUS INTENSITY CLASSES AND MONTHS WILL BE READ IN AND THAT
C THE DATA IS BROKEN INTO 20 INTENSITY CLASSES FOR 13 MONTHS. IF NO
C RAINFALL DATA IS TO BE ENTERED THIS CARD CAN BE LEFT BLANK AND THE
C REMAINING CARDS OMITTED.

67	20	13						NR
----	----	----	--	--	--	--	--	----

C CARDS INT1-INT3 SPECIFY THE AVERAGE INTENSITIES WITHIN EACH OF THE
C INTENSITY INTERVALS (E.G., .25 MM/HOUR IS THE AVERAGE RAINFALL
C INTENSITY IN THE INTERVAL 0. - .50 MM/HOUR).

.25	.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	INT1
3.75	4.25	4.75	5.25	5.75	6.25	6.75	INT2
7.25	7.75	8.25	8.75	9.25	9.75		INT3

C CARDS RN1-RN17 SPECIFY THE NON-ZERO RAINFALL DATA UNITS. FOR
C EXAMPLE, IN THE 3RD MONTH 13.7 MILLIMETERS OF RAIN FELL IN THE
C INTENSITY CLASS 1 (INTERVAL 0. - .50 MM/HOUR).

3	1	13.7	3	2	29.6	3	3	17.1	3	4	11.2	RN1
3	8	8.0	3	9	10.7	3	14	6.7	4	1	27.4	RN2
4	2	59.2	4	3	34.2	4	4	22.2	4	8	16.0	RN3
4	9	21.4	4	14	13.4	5	1	13.7	5	2	29.6	RN4
5	3	17.1	5	4	11.4	5	8	8.0	5	9	10.7	RN5
5	14	6.7	6	1	14.2	6	2	10.4	6	3	5.7	RN6
6	4	5.3	6	5	21.4	6	6	4.3	6	9	4.3	RN7
6	10	12.1	6	11	16.0	6	12	2.8	7	1	8.8	RN8
7	2	31.3	7	3	52.2	7	4	2.6	7	5	33.7	RN9
7	6	4.0	7	7	1.6	7	8	12.3	7	12	11.5	RN10
8	1	5.6	8	2	47.2	8	3	0.6	8	4	15.0	RN11
8	13	7.5	9	1	11.7	9	2	27.8	9	3	47.5	RN12
9	4	11.7	9	6	3.3	9	7	3.9	10	1	26.1	RN13
10	2	19.1	10	3	27.5	10	4	7.8	10	5	1.5	RN14
10	12	2.9	11	1	24.7	11	2	18.3	11	3	42.7	RN15
11	4	33.9	11	5	3.4	11	6	1.5	11	12	2.9	RN16
12	1	11.6	12	2	31.3	12	3	6.5				RN17

V. c. Non-Linear Functions

$$1. \quad B1 = p_1 q_i + p_2 q_j + p_3 q_i q_j + p_4 q_i^2 + p_5 q_j^2 \quad (\text{INF}=1)$$

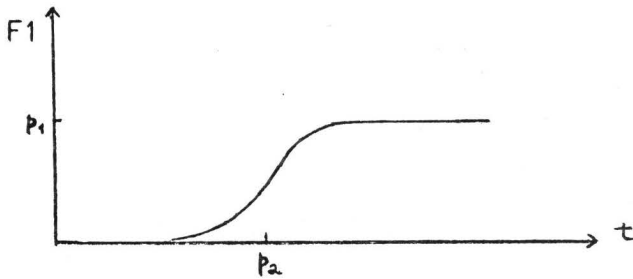
$$2. \quad B2 = p_1 q_i q_j / (p_2 + p_3 q_i + p_4 q_j) \quad (\text{INF}=2)$$

$$3. \quad B3 = p_1 + p_2 q_j + p_3 q_i + p_4 / q_j + p_5 / q_i \quad (\text{INF}=3)$$

$$4. \quad B4 = p_1 + p_2 / q_i + p_3 / q_j + p_4 / q_i^2 + p_5 / q_j^2 \quad (\text{INF}=4)$$

Currently no functional forms have been assigned to B5 through B10, which are instead set equal to zero. The modeller is free to construct his own functions if he so desires.

V. d. Time-Dependent Modulators



$$F1 = p_1 e^x / (1 + e^x), \quad x = (t - p_2) / p_3$$

Fig. 2. Sigmoid Growth Curve (IFF=1); the sharpness of the sigmoid curve increases as p_3 decreases.

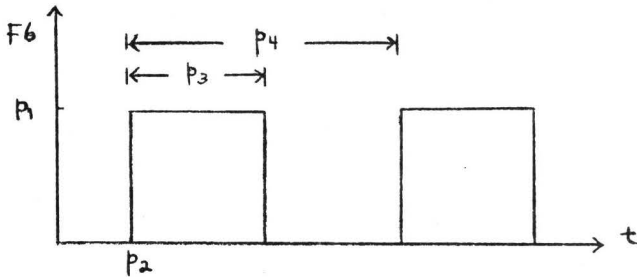


Fig. 3. Square Wave (IFF=6)

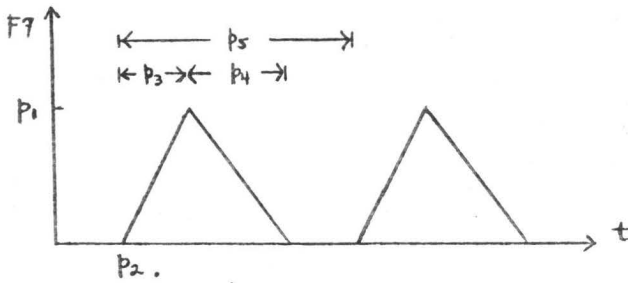


Fig. 4. Triangular Function (IFF=7)

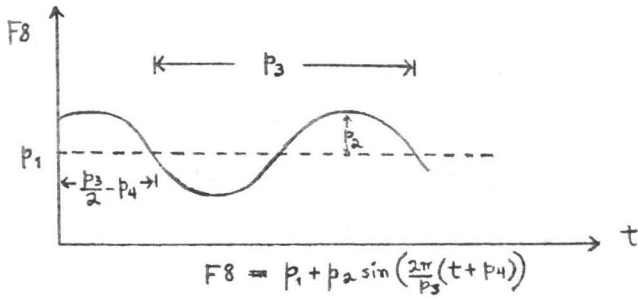


Fig. 5. Sinusoidal Curve (IFF=8)

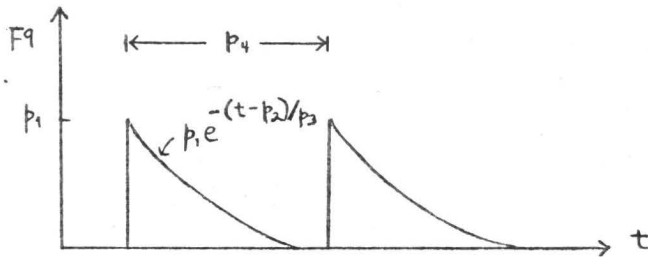


Fig. 6. Sharp-Rise Exponential Curve (IFF=9)

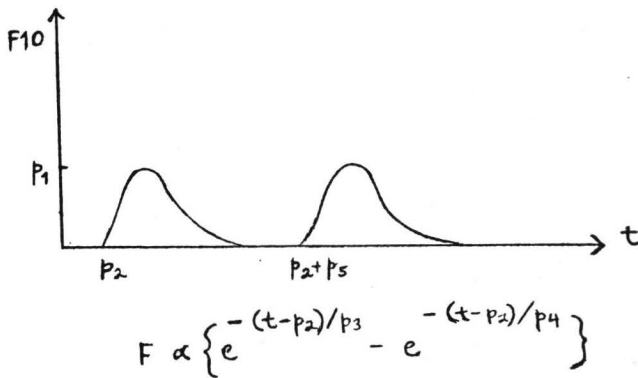


Fig. 7. Smooth-Rise Exponential Function (IFF=10); the parameter p_4 is roughly proportional to the width of the rising part of each curve and p_3 to the width of the falling part of each curve.

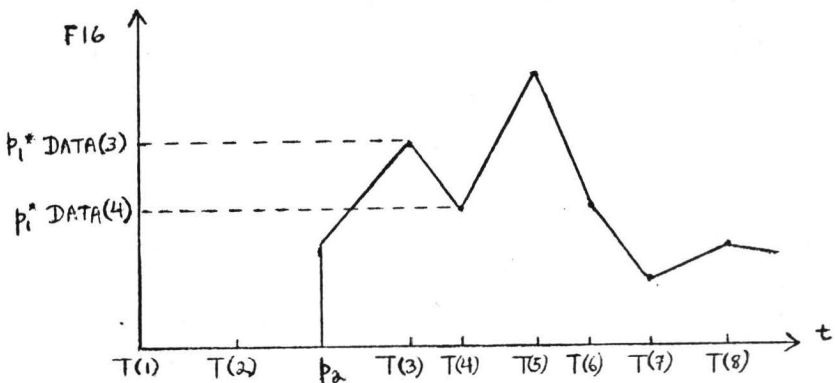


Fig. 8. Interpolation Function (IFF=16). The special function (F12, IFF=12), which computes canopy drip and stemflow as a function of rainfall is formatted in the same way as F16, except that the parameters, a and b of Equation (7) must also be assigned values. These are ($a=p_3$, $b=p_4$)

Currently no functional forms have been assigned to F2-F5, F11, F13-F15, which are instead set equal to zero. The modeller is free to construct his own functions if he so desires.

VI. LISTING OF CODE

```

C      NONLINEAR MODEL OF AN ECOSYSTEM.
C
C       $DQ/DT = AQ + B(Q,T) + F(Q,T)$ 
C
C      PROGRAM AUTHOR   MARK REEVES, III,
C      COMPUTING APPLICATIONS DEPARTMENT,
C      OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY,
C      UNION CARBIDE CORPORATION,
C      OAK RIDGE, TENNESSEE.
C
C      PROGRAM MODIFIED BY DONALD DE ANGELIS,
C      INSTITUT FUR BODENKUNDE UND WALDERNNAHRUNG,
C      UNIVERSITAT GOETTINGEN, 1973.
C
C      INTERNATIONAL BIOLOGICAL PROGRAM.
C
      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      COMMON/AMAIN/ T(100),Q(100,30),E,NT,NC, ITR,INCT
      COMMON /FLUXBK/ QFLUX(30,30)
      COMMON /AA/  A(30,30)
      COMMON /ADDBLK/ ADD(30,30)
      COMMON /FLUBK/  WFLU(100,10),IPFLUT(10),IPFLUF(10)
      COMMON/NPBLOK/ NPRFLX
      DIMENSION Y(80)
      EXTERNAL EQUA
      MXNT = 100
      INCT = 1
1    CALL IOD
      NC1=NC+1
      DO 2 I=1,NC
2    Y(I)=Q(I,1)
      QT=0.
      DO 10 J=1,NC
10   QT=QT+Y(J)
      Q(I,NC1)=QT
      DO 8 I=1,NC
      DO 8 J=1,NC
8    QFLUX(I,J) = 0.0
      DO 5 I=2,NT
      DT=T(I)-T(I-1)
      DTT = DT
      RT = T(I-1)
      CALL KUTTA(T(I-1),T(I),Y,NC,DT,E, ITR,EQUA)
      DO 3 J=1,NC
3    Q(I,J)=Y(J)
      CALL EQUAZ(RT,Y,ADD,NC,DTT)
      DO 7 I=1,NC
      DO 7 J=1,NC
7    WFLUX(II,J) = QFLUX(II,J) + DTT*ADD(II,J)
      DO 9 KK=1,NPRFLX
      NFLXTO = IPFLUT(KK)
      NFLXFR = IPFLUF(KK)
      WFLU(I,KK) = ADD(INFLAT0,NFLAFR)
9    CONTINUE

```

```

QT=0*
DO 4 J=1,NC
4 QT=QT+Y(J)
  W(I,NC1)=QT
5 CONTINUE
  CALL OUT(T,Q,NT,NC,MXNT,INCT)
  CALL OUT2(T,QFLU,NT,NPFLA,MANT,INCT,IPFLUT,IPFLUF)
  PRINT 2000
2000 FORMAT(///16X,'TOTAL ANNUAL FLUXES',///)
  DO 6 I=1,NC
  PRINT 2006,I
2006 FORMAT(10X,'ROW',I4)
  PRINT 2001, (QFLUX(I,J),J=1,NC)
2001 FORMAT(10X,8E12.4)
6 CONTINUE
GO TO 1
END

```

```

SUBROUTINE 100
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/AMAIN/ T(100),Q(100,30),E,NT,NC,ITR,INCT
COMMON /AA/ A(30,30)
COMMON /ANF/ PNF(20,30),INF(30),IPNF(30,30),INFF(30),NFF
COMMON /AFF/ PFF(20,30),IFF(80),NFF
COMMON/RAINBL/RAINFL(20,20)
COMMON /FLUBOK/ QFLU(100,10),IPFLUT(10),IPFLUF(10)
COMMON/NPBLOK/ NPFLX
COMMON/TIMBCK/TIMEF(22,22),FLUXQ(22,22),NTVF(22)
COMMON/TEMPBK/TEMPIM(50),TEMP(50)
COMMON/RAINBK/KANTIM(50),RAINMO(50)
COMMON/NINBLK/NINTS,RAININ(30)
COMMON/NTEBK/NTEMP,NMKAIN
DIMENSION SHEAD(20)
MXNT = 100
DO 1 J=1,30
  INF(J)=0
  IFF(J)=0
  DO 1 I=1,30
    A(I,J)=0.
1 IPNF(I,J)=0
  READ 1020,(SHEAD(I),I=1,16)
1020 FORMAT(16A4)
  PRINT 2000
2000 FORMAT(1,'4X','NONLINEAR MODEL OF AN ECOSYSTEM')
  PRINT 2020,(SHEAD(I),I=1,16)
2020 FORMAT(15A,16A4)
  READ 1000,NC,NA,NNF,NFF,NT,ITR
1000 FORMAT(14I5)
  PRINT 2001
2001 FORMAT(115X,NC,NA,NNF,NFF,NT,ITR)
  PRINT 2002,NC,NA,NNF,NFF,NT,ITR
2002 FORMAT(10A,6I12)
  READ 1001,DT,E
1001 FORMAT(7E10.0)
  PRINT 2003
2003 FORMAT(5X,DT,E)
  PRINT 2004,DT,E
2004 FORMAT(10A,8E12.4)
  IF(INA.EQ.0) GO TO 11
  READ 1002,(I,J,A(I,J),K=1,NA)

```

```

1002 FORMAT(4(2I5,E10.0))
      DO 15 I=1,NC
      DO 15 J=1,NC
      IF(I.EQ. J) GO TO 15
      A(I,I) = A(I,I) - A(J,I)
15  CONTINUE
      PRINT 2005
2005 FORMAT(///5X'LINEAR FLOW COEFFICIENTS')
      DO 10 I=1,NC
      PRINT 2006,I
2006 FORMAT(//10X'ROW',I4)
10  PRINT 2004,(A(I,J),J=1,NC)
11  IF(INNF.EQ.0) GO TO 3
      PRINT 2007
2007 FORMAT(///5X'NONLINEAR FLOW FLAGS AND PARAMETERS')
      DO 2 K=1,NNF
      READ 1003,I,J,INF(K),INFF(K),NTVF(K),(PNF(L,K),L=1,5)
1003 FORMAT(5I4,5E10.0)
      IF(INFF(K).GT.0) READ 1001,(PNF(L,K),L=6,11)
      IF(NTVF(K).EQ. 0) GO TO 12
      NTV = NTVF(K)
      READ 1001, (TIMEF(K, KK),KK=1,NTV)
      READ 1001, (FLUXQ(K, KK),KK=1,NTV)
12  CONTINUE
      IPNF(I,J)=K
      PRINT 2008, I,J,INF(K),INFF(K),NTVF(K),(PNF(L,K),L=1,5)
2008 FORMAT(1I4,5I9,5E12.4)
      IF(INFF(K).GT.0) PRINT 2030,(PNF(L,K),L=6,11)
2030 FORMAT(1I4,6E12.4)
      IF(NTVF(K).EQ. 0) GO TO 13
      PRINT 2023
2023 FORMAT(10A'FLUX VERSUS TIME',/,14X,'TIME',8X,'FLUX',8X,'TIME',8X,
2'FLUX',8X,'TIME',8X,'FLUX',8X,'TIME',8X,'FLUX')
      PRINT 2004, (TIMEF(K, KK),FLUXQ(K, KK),KK=1,NTV)
      PRINT 2025
2025 FORMAT(/)
13  CONTINUE
      KFIN = K
2  CONTINUE
3  IF(INFF.EQ.0) GO TO 5
      PRINT 2009
2009 FORMAT(///5X'FORCING-FUNCTION FLAGS AND PARAMETERS')
      DO 4 I=1,NNF
      K = KFIN + 1
      READ 1004, J,IFF(J),NTVF(K),(PFF(KK,J),KK=1,6)
1004 FORMAT(3I5,5X,6E10.0)
      IPNF(J,NC) = K
      PRINT 2029, J,IFF(J),NTVF(K),(PFF(KK,J),KK=1,6)
2029 FORMAT(1I4,3I8,6E12.4)
      NTV = NTVF(K)
      IF(NTV.EQ. 0) GO TO 21
      READ 1001, (TIMEF(K, KK),KK=1,NTV)
      READ 1001, (FLUXQ(K, KK),KK=1,NTV)
      PRINT 2031
2031 FORMAT(10A'INPUT VERSUS TIME',/,14X,'TIME',8X,'INPUT',7X,'TIME',
28X,'INPUT',7X,'TIME',8X,'INPUT',7X,'TIME',8X,'INPUT')
      PRINT 2004, (TIMEF(K, KK),FLUXQ(K, KK),KK=1,NTV)
21  CONTINUE
4  CONTINUE
5  READ 1001,(Q(I,I),I=1,NC)
      PRINT 2011
2011 FORMAT(///5X'QU')

```

```

      PRINT 2004, (Q(I,1), I=1, NC)
      QT=0.
      DO 6 I=1, NC
        QT=QT+Q(I,1)
      PRINT 2012
2012  FORMAT(///5X,'Q-TOTAL')
      PRINT 2004, QT
      T(1)=0.
      DO 7 I=2, NT
        T(I)=T(I-1)+DT
        READ 1000, NPRFLX
        READ 1000, (IPFLUT(I), IPFLUF(I), I=1, NPRFLX)
        PRINT 2017
2017  FORMAT(///5X,'FLUXES TO BE PRINTED')
      PRINT 2010, ((IPFLUT(I), IPFLUF(I)), I=1, NPRFLX)
2018  FORMAT(5X, 8(2I5, 3X))
      READ 1000, NRAIN, NINTS, NTPRA
      PRINT 2010
2018  FORMAT(///5X,'NRAIN,NINTS,NTPRA')
      PRINT 2002, NRAIN, NINTS, NTPRA
      READ 1001, (RAININ(I), I=1, NINTS)
      DO 2108 I=1, NTPRA
        DO 2108 J=1, NINTS
          RAINF(I,J) = 0.0
2108  CONTINUE
      READ 1002, (I,J, RAINF(I,J), K=1, NRAIN)
      PRINT 2014
2014  FORMAT(///5X,'RAINFALL DIVIDED INTO INTENSITY CLASSES')
      DO 20 I=1, NINTS
        PRINT 2015, I
2015  FORMAT(///10X,'INTENSITY', I4)
      DO 20 PRINT 2004, (RAINF(J,I), J=1, NTPRA)
      RETURN
      END

```

```

      SUBROUTINE OUT1(Q, NT, NC, IDT, INCT)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
      DIMENSION T(1), Q(IDT,1), KS(5)
      DATA KS/'T','Q'/
      NC1=NC+1
      DO 3 J=1, NC1
        QMN=1.010
        QMX=-QMN
        DO 1 I=1, NT
          QMN=OMIN1(QMN, Q(I,J))
          QMX=OMAX1(QMX, Q(I,J))
          IF(QMX.EQ.QMN) QMX=QMN+1.
          IF(J.NE.NC1) PRINT 2000, J
2000  FORMAT(///5X,'TIME-BEHAVIOR OF CONCENTRATION', I4)
          IF(J.EQ.NC1) PRINT 2001
2001  FORMAT(///5X,'TIME-BEHAVIOR OF THE TOTAL CONCENTRATION')
          CALL PRPLT(T, Q(I,J), NT, INCT, QMN, QMX, KS)
        3 CONTINUE
      RETURN
      END

```

```

      SUBROUTINE OUT2(T, Q, NT, NC, IDT, INCT, IPA, IPB)
      IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

```

```

COMMON /FLUBOK/ QFLU(100,10),IPFLUT(10),IPFLUF(10)
DIMENSION T(1),Q(10T,1),KS(5)
DIMENSION IPA(10),IPB(10)
DATA KS/'T','Q'/
NC1 = NC
DO 3 J=1,NC1
  QMN=1,D10
  QMX=-QMN
  DO 1 I=1,NT
    QMN=DMIN1(QMN,Q(1,J))
1  QMX=DHAX1(QMX,Q(1,J))
    IF(QMX.EQ.QMN) QMA=QMN+1.
    IPT = IPA(J)
    IPF = IPB(J)
    PRINT 2000, IPT,IPF
2000 FORMAT(///5X'TIME-BEHAVIOR OF FLUX',3X,14,1X,14)
    CALL PRPLTTT,Q(1,J),NT,INCT,QMN,QMX,KS)
3  CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE PRPLT(X,Y,IXU,INCX,YMIN,YMAX,KS)
C
C  PRPLT LISTS AND PLOTS Y AS A FUNCTION OF X.
C
  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
  DIMENSION Y(1),X(1),KS(1),KR(200)
  DATA KSR/'',//KGRD/'',//KBR/' '//
  KOL=KSR
  DO 1 I=1,51
1  KR(I)=KSR
  KBR=KSR
  PRINT 1000,(KS(I);I=1,2),KBL,(KR(I);I=1,51),KBR
1000 FORMAT(2(14X,A1),26X,53A1)
  DO 7 J=1,IXU,INCX
    DO 3 I=1,51
3  KR(I)=KBR
    DO 4 I=6,46,5
4  KR(I)=KGRD
    A1=50.*(Y(J)-YMIN)/(YMAX-YMIN)
    AIP=DFLOA1(IF1A1SNG1(A1))
    IF((A1-AIP).GE.+.5) A1=A1+1.
    I=A1+1.
    IF(I.LT.1.OR.I.GT.100) I=100
    KR(I)=KS(2)
    PRINT 1001,X(J),Y(J),KBL,(KR(K),K=1,51),KBR
1001 FORMAT(3X,2(3X,E13.7),23X,53A1)
7  CONTINUE
  DO 8 I=1,51
8  KR(I)=KSR
  PRINT 1002,KOL,(KR(I);I=1,51),KBR
1002 FORMAT(50X,53A1)
  RETURN
END

```

```

SUBROUTINE KUTTA(XL,XU,Y,NE,DEL,ACCURC,IMAX,EQUA)
C  PROGRAM AUTHOR  F. D. HAMMERLING,
C  COMPUTING TECHNOLOGY CENTER, UNION CARBIDE CORP., NUCLEAR DIV.

```

```

KUTTU001
KUTTU002
KUTTU003

```

C	OAK RIDGE, TENN.	KUTT0004
C		KUTT0005
C	CTC ORD PROGRAM NO. 9060	KUTT0006
	DIMENSION Y(1),Y1(20),YN(20),K1(20),K2(20),K3(20),	KUTT0007
1	K4(20),K5(20),F1(20),E(20),F1(20)	KUTT0008
	DOUBLE PRECISION Y,F,E,F1,XN,XL,DEL,XU,H,TEST,ACCURC,YN,Y1,K1,	KUTT0009
1	K2,K3,K4,K5	KUTT0010
	LOGICAL QUIT	KUTT0011
	LOGICAL FIRST	ADDITION
	ITTEM=0	KUTT0012
	N=NE	KUTT0013
	NFLTST = 0	
	XN=XL	KUTT0014
	H=DEL	KUTT0015
	FIRST=.TRUE.	ADDITION
	QUIT=.FALSE.	KUTT0016
	DO 1 I=1,N	KUTT0017
1	YN(1)=Y(1)	KUTT0018
2	IF(XN+H*LT.XU)GO TO 3	KUTT0019
	DEL=H	KUTT0020
	H=XU-XN	KUTT0021
	IF(FIRST) DEL=H	ADDITION
	QUIT=.TRUE.	KUTT0022
	HR = H	
3	CALL EQUA(XN,YN,F1,NE,HR)	
4	DO 5 I=1,N	KUTT0024
	K1(1)=H*F1(1)/3.	KUTT0025
5	Y1(1)=YN(1)+K1(1)	KUTT0026
	HR = 0.0	
	CALL EQUA(XN+H/3.,Y1,F,NE,HR)	
	DO 6 I=1,N	KUTT0028
	K2(1)=H*F1(1)/3.	
6	Y1(1)=YN(1)+K1(1)/2.+K2(1)/2.	KUTT0029
	HR = 0.0	KUTT0030
	CALL EQUA(XN+H/3.,Y1,F,NE,HR)	
	DO 7 I=1,N	KUTT0032
	K3(1)=H*F1(1)/3.	KUTT0033
7	Y1(1)=YN(1)+3.*K1(1)/8.+9.*K3(1)/8.	KUTT0034
	HR = 0.0	
	CALL EQUA(XN+H/2.,Y1,F,NE,HR)	
	DO 8 I=1,N	KUTT0036
	K4(1)=H*F1(1)/3.	KUTT0037
8	Y1(1)=YN(1)+3.*K1(1)/2.-9.*K3(1)/2.+6.*K4(1)	KUTT0038
	HR = 0.0	
	CALL EQUA(XN+H,Y1,F,NE,HR)	
	TEST=0.0	KUTT0040
	DO 9 I=1,N	KUTT0041
	K5(1)=H*F1(1)/3.	KUTT0042
	E(1)=(K1(1)-9.*K3(1)/2.+4.*K4(1)-K5(1)/2.)/5.	KUTT0043
	TEST=DMAX1(TEST,DABS(E(1)))	KUTT0044
		KUTT0045
9	CONTINUE	
	IF(TEST*.L1.ACCURC)GO TO 10	KUTT0046
	ITTEM=ITTEM+1	KUTT0047
	IF(ITTEM,GE,IMAX)GO TO 13	KUTT0048
	H=H/2.	KUTT0049
	QUIT=.FALSE.	KUTT0050
	FIRST=.FALSE.	ADDITION
	NFLTST = 1	
	GO TO 4	KUTT0051
10	DO 11 I=1,N	KUTT0052
11	YN(1)=YN(1)+(K1(1)+4.*K3(1)+K5(1))/2.	KUTT0053
	XN=XN+H	KUTT0054

	FIRST=.FALSE.	ADDITION
	IF(TEST.L1.ACCURC/32.)H=2.*H	KUTTU055
	IF(.NOT.QUIT)GO TO 2	KUTTU056
	DO 12 I=1,N	KUTTU057
12	Y(I)=Y(I)	KUTTU058
C	***** DECK MOD. TO REMOVE THIS CARD	KUTTU059
	GO TO 14	KUTTU060
13	DEL=H	KUTTU061
	PRINT 15	
15	FORMAT(1H1,'STEP SIZE HAS BEEN HALVED (MAX TIMES)')	ADDITION
	STOP 3111	ADDITION
14	RETURN	KUTTU062
	END	KUTTU063

```

SUBROUTINE EQUAT(T,Q,QP,NC,DT)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON /AA/ A(30,30)
COMMON /ANF/ PNF(20,30),INF(30),IPNF(30,30),INFF(30),NNF
COMMON /AFF/ PFF(20,30),IFF(80),NFF
COMMON/RAINBL/RAINP(20,20)
COMMON /FLUXBK/QFLUX(30,30)
DIMENSION Q(1),QP(1)
DO 1 I=1,NC
1 QP(I)=0.
DO 3 J=1,NC
DO 2 I=1,NC
QP(I)=QP(I)+A(I,J)*Q(J)
IF(NNF.EQ.0) GO TO 2
K=IPNF(I,J)
IF(INF(K).EQ.0) GO TO 2
CALL BGENB,T,Q(I),Q(J),INF(K),PNF(I,K),Q,INFF(K),K)
QP(I)=QP(I)+B
QP(J)=QP(J)-B
2 CONTINUE
IF(INF.EQ.0) GO TO 3
K = IPNF(J,NC)
IF(IFF(J).EQ.0) GO TO 3
CALL FGENF,T,Q(J),IFF(J),PFF(I,J),K)
QP(J)=QP(J)+F
3 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE EQUA2(T,Q,QPA,NC,DT)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON /AA/ A(30,30)
COMMON /ANF/ PNF(20,30),INF(30),IPNF(30,30),INFF(30),NNF
COMMON /AFF/ PFF(20,30),IFF(80),NFF
COMMON/RAINBL/RAINP(20,20)
COMMON /FLUXBK/QFLUX(30,30)
DIMENSION Q(1)
DIMENSION QPA(30,30)
DO 4 I=1,NC
DO 4 J=1,NC
4 QPA(I,J) = 0.0
DO 3 J=1,NC
DO 2 I=1,NC
QP(I,J) = A(I,J)*Q(J)
IF(NNF.EQ.0) GO TO 2
K=IPNF(I,J)
IF(INF(K).EQ.0) GO TO 2

```



```

CALL BGEN(B,T,Q(I),Q(J),INF(K),PNF(I,K),Q,INFF(K),K)
QPA(I,J) = B
2 CONTINUE
IF(INFF.EQ.0) GO TO 3
K = IPNF(J,NC)
IF(INFF(J).EQ.0) GO TO 3
CALL FGEN(F,T,Q(J),IFF(J),PFF(I,J),K)
3 CONTINUE
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE BGEN(B,T,QI,QJ,IF,P,Q,IFF,KM)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1),Q(1)
B=0.
GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10),IF
1 B = B1(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
2 B = B2(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
3 B = B3(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
4 B = B4(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
5 B = B5(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
6 B = B6(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
7 B = B7(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
8 B = B8(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
9 B = B9(T,QI,QJ,P)
GO TO 20
10 B = B10(T,QI,QJ,P)
20 IF(INFF.EQ.0) RETURN
CALL FGEN(F,T,QJ,IFF,P(16),KM)
B=B*F
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FGEN(F,T,Q,IF,P,KM)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
COMMON/RAINBL/RAINFL(20,20)
COMMON/TIMBCK/TIMEF(22,22),FLUXQ(42,22),NTVF(22)
COMMON/TEMPBK/TEMPIM(50),TEMP(50)
COMMON/RANMBK/RANTIM(50),RAINHU(50)
COMMON/NINBLK/NINTS,RAININ(30)
COMMON/NTMBK/NTMP,NMKAIN
DIMENSION P(1)
F=0.
GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16),IF
1 F=F1(T,Q,P)
RETURN
2 F=F2(T,Q,P)
RETURN
3 F=F3(T,Q,P)
RETURN

```

```

4 F=F4(T,Q,P)
  RETURN
5 F=F5(T,Q,P)
  RETURN
6 F=F6(T,Q,P)
  RETURN
7 F=F7(T,Q,P)
  RETURN
8 F=F8(T,Q,P)
  RETURN
9 F=F9(T,Q,P)
  RETURN
10 F=F10(T,Q,P)
  RETURN
11 F = F11(T,Q,P)
  RETURN
12 F = F12(T,Q,P,RAIN,F,TIMEF,FLUXQ,NTVF,RAININ,NINTS,KM)
  RETURN
13 F = F13(T,Q,P)
  RETURN
14 F = F14(T,Q,P)
  RETURN
15 F = F15(T,Q,P)
  RETURN
16 F = F16(T,Q,P,KM,TIMEF,FLUXQ,NTVF)
  RETURN
  END

```

```

FUNCTION B1(T,Q1,QJ,P)
  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
  DIMENSION P(1)
  B1=P(1)*Q1+P(2)*QJ+P(3)*Q1*QJ+P(4)*Q1**2+P(5)*QJ**2
  RETURN
END

```

```

FUNCTION B2(T,Q1P,QJ,P)
  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
  DIMENSION P(1)
  Q1=1-D-10
  IF(Q1P.NE.0.) Q1=Q1P
  B2=0
  D=P(2)+P(3)*Q1+P(4)*QJ
  IF(D.EQ.0.) RETURN
  IF(QJ.LE.0.) RETURN
  B2=P(1)*Q1*QJ/D
  RETURN
END

```

```

FUNCTION B3(T,Q1,QJ,P)
  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
  DIMENSION P(1)
  B3 = P(1) + P(2)*QJ + P(3)*Q1 + P(4)/QJ + P(5)/Q1
  RETURN
END

```

```

FUNCTION B4(T,Q1,QJ,P)
  IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
  DIMENSION P(1)
  B4 = P(1) + (P(2)/Q1) + (P(3)/QJ) + (P(4) /Q1**2) + (P(5)/QJ**2)
  RETURN

```

END

```

FUNCTION B5(T,Q1,QJ,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
B5 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION B6(T,Q1,QJ,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
B6 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION B7(T,Q1,QJ,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
B7 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION B8(T,Q1,QJ,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
B8 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION B9(T,Q1,QJ,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
B9 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION B10(T,Q1,QJ,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
B10 = 0.0
RETURN
END

```

FUNCTION F1(T,Q,P)

C
C
C

SIGMOID FORCING FUNCTION.

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
P1 = P(1)
P2 = P(2)
P3 = 1./P(3)
EX = P1*EXP((1-P2)*P3)
F1 = EX/(1. + (EX/P1))
RETURN
END

```

```

FUNCTION F2(T,Q,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

```

```
DIMENSION P(1)
F2=0*
RETURN
END
```

```
FUNCTION F3(T,Q,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
F3=0*
RETURN
END
```

```
FUNCTION F4(T,Q,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
F4=0*
RETURN
END
```

```
FUNCTION F5(T,Q,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
F5=0*
RETURN
END
```

```
FUNCTION F6(T,Q,P)
```

```
C
C SQUARE-WAVE FORCING FUNCTION.
C
```

```
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
1 P1=P(1)
P2=P(2)
P3=P(3)
P4=P(4)
P23=P2+P3
10 IF(T.LT.P2) GO TO 2
IF(T.LE.P23) GO TO 3
IF(T.GT.P23) GO TO 4
2 F6=0*
RETURN
3 F6=P1
RETURN
4 P2=P2+P4
P23=P23+P4
GO TO 10
END
```

```
FUNCTION F7(T,Q,P)
```

```
C
C TRIANGULAR FORCING FUNCTION.
C
```

```
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
1 P1=P(1)
P2=P(2)
P3=P(3)
P4=P(4)
P5=P(5)
P23=P2+P3
P234=P2+P3+P4
```

```

      IF(P3.GT.U.) S1=P1/P3
      IF(P4.GT.U.) S2=P1/P4
10  IF(T.LT.P2) GO TO 2
      IF(T.LT.P23) GO TO 3
      IF(T.LE.P234) GO TO 4
      IF(T.GT.P234) GO TO 5
      2 F7=U.
      RETURN
      3 F7=S1*(T-P2)
      RETURN
      4 F7=-S2*(T-P234)
      RETURN
      5 P2=P2+P5
      P23=P23+P5
      P234=P234+P5
      GO TO 10
      END

```

FUNCTION F8(T,W,P)

C
C SINUSOIDAL FORCING FUNCTION.
C

```

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION P(1)
      P1=P(1)
      P2=P(2)
      P3=P(3)
      W=2.*3.1415927/P3
      P4=W*P(4)
      P5=P(5)
      P6=P(6)
1  F8=P1+P2*USIN(W*T+P4)
      IF(F8.LT.P5) F8=P5
      IF(F8.GT.P6) F8=P6
      RETURN
      END

```

FUNCTION F9(T,W,P)

C
C SHARP-RISE EXPONENTIAL FORCING FUNCTION.
C

```

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      DIMENSION P(1)
1  P1=P(1)
      P2=P(2)
      P3=P(3)
      P4=P(4)
      P24=P2+P4
      A=1./P3
10 IF(T.LT.P2) GO TO 2
      IF(T.LT.P24) GO TO 3
      IF(T.GT.P24) GO TO 4
      2 F9=0.
      RETURN
      3 F9=P1*DEXP(-A*(T-P2))
      RETURN
      4 P2=P2+P4
      P24=P24+P4
      GO TO 3
      END

```

FUNCTION F10(T,W,P)

```
C
C   SMOOTH-RISE EXPONENTIAL FORCING FUNCTION.
C
```

```
    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
    DIMENSION P(1)
1   P1=P(1)
    P2=P(2)
    P3=P(3)
    P4=P(4)
    P5=P(5)
    P25=P2+P5
    A=1./P3
    B=1./P4
    T0=(DLOG(B)-DLOG(A))/(B-A)
    C=P1/(DEXP(-A*T0)-DEXP(-B*T0))
10  IF(T.LT.P2) GO TO 2
    IF(T.LT.P25) GO TO 3
    IF(T.GE.P25) GO TO 4
2   F1U=0.
    RETURN
3   TP=T-P2
    F1U=C*(DEXP(-A*TP)-DEXP(-B*TP))
    RETURN
4   P2=P2+P5
    P25=P25+P5
    GO TO 3
END
```

```
    FUNCTION F1I(T,Q,P)
    IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
    DIMENSION P(1)
    F1I = 0.0
    RETURN
END
```

```
    FUNCTION F1Z(T,Q,P,RAIN,F,TIMEF,FLUXQ,NTVF,RAININ,NINTS,KM)
C
C   CANOPY DRIP FORCING FUNCTION
C
```

```
    IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
    DIMENSION RAINF(20,20)
    DIMENSION TIMEF(22,22),FLUXQ(22,22),NTVF(22)
    DIMENSION AMNT(30)
    DIMENSION RAININ(30)
    DIMENSION P(1)
    AAA = P(3)
    BBB = P(4)
    DELINT = RAININ(2) - RAININ(1)
    START = P(2)
    NTPRA = NTVF(KM)
    X = T
    X = X + START
    DO 10 J=1,NTPRA
    IF(X.LT. TIMEF(KM,J)) GO TO 11
10  CONTINUE
11  CONTINUE
    JJ = J
    THRINT = 0.0
    DO 20 I=1,NINTS
    IF(I.EQ. 1 .OR. I.EQ. NINTS) GO TO 21
    DEL = DELINT
    GO TO 22
```

```

21 CONTINUE
DEL = .5*DELINT
22 CONTINUE
DEL = TIMEF(KM,JJ) - TIMEF(KM,JJ-1)
CONC = DEAP(AAA-BBB*DLUGID(RAININ(1)))
AMHT(1) = RAINF(JJ,1) - ((RAINF(JJ,1)-RAINF(JJ-1,1))*
2(TIMEF(KM,JJ)-X)/DEL)
THRINT = THRINT + DEL*AMHT(1)*CONC
20 CONTINUE
F12 = THRINT
F12 = P(1)*F12
RETURN
END

```

```

FUNCTION F13(T,Q,P)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION P(1)
F13 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION F14(T,Q,P)
DIMENSION P(1)
F14 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION F15(T,Q,P)
DIMENSION P(1)
F15 = 0.0
RETURN
END

```

```

FUNCTION F16(T,Q,P,KM,TIMEF,FLUXQ,NTVF)

```

```

C
C   TABULAR DATA FORCING FUNCTION
C
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
DIMENSION TIMEF(22,22),FLUXQ(22,22),NTVF(22)
DIMENSION P(1)
START = P(2)
NTPKF = NTVF(KM)
X=1
X = X + START
DO 10 I=1,NTPKF
IF(X.LT. TIMEF(KM,I)) GO TO 11
10 CONTINUE
11 CONTINUE
DEL = TIMEF(KM,I) - TIMEF(KM,I-1)
F16 = FLUXQ(KM,I) - ((FLUXQ(KM,I) - FLUXQ(KM,I-1))
2*(TIMEF(KM,I)-X)/DEL)
F16 = P(1)*F16
RETURN
END

```

REFERENCES

1. Reeves, Mark (1972) - A Code for Nonlinear Modeling of an Ecosystem. Contract No. 7405-eng-26, Mathematics Division, Oak Ridge National Laboratory.
2. Ulrich, B. and R. Mayer (1973) - "Systemanalyse des Bioelement-Haushalts von Wald-Ökosystem", in Ökosystemforschung (ed. Ellenberg, H.). Springer-Verlag.

Input of chemical elements from the atmosphere
A tabular review of literature

by U. Steinhardt

Göttinger Bodenkundliche Berichte 29, 93 – 132
(1973)

In studies of mineral cycling in ecosystems the input from the atmosphere plays an important role. In the following tables data from literature are represented dealing with

1. Input with precipitation (tab. 1 - 4)
2. Input to soil with throughfall (tab. 5 - 6)
3. Concentrations of gases in air (tab. 7)
4. Aerosol concentrations in air (tab. 9)
5. Chemical composition of aerosols (tab. 8)
6. Input with dust fallout (tab. 10)

No attempt was made to cover the relevant literature completely.

Tabelle 1:

Bioelementzufuhr mit dem Niederschlag in Deutschland

Autor	Legende des Messpunktes	Messzeitraum	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Ges.-N	Cl	S	P	Si
kg/ha/Jahr																	
MAYER (1971)	Solling	1969/70	0,83	7,30	2,00	12,40	1,79	1,17	3,05	0,22			23,92	17,80	24,80	0,48	
GRUNERT (1964)	Eberswalde				4	15	3	1	1				15			0,5	1
SCHROEDER (1873)	Tharand (Raucheinfluss)	1870/71	3,68	2,98	2,90	0,83	8,32							2,78	4,90	0,66	
	Grillenbourg (kaum Einfl.)		4,22	2,91	3,67	0,70	1,75							1,12	2,30	0,28	
NEUWIRH (1957)	Günterstal		3,46	1,85	7,87	1,24									9,14		
	Feldberg i. Schwabw.		3,59	1,52	8,10	1,18									12,41		
	Augustenberg		4,04	2,10	15,00	2,91									14,50		
RIEM (1961) und (1964) und	Westerland	1958/59	154,88	7,74	13,38	12,67					2,62	2,82		344,96	23,94		
RIEM/QUELLMÄLZ (1959)	Schleswig	1957/59	17,55	2,11	9,83	2,81					4,91	2,81		33,70	16,15		
	Braunsch.-Völkenrode		4,26	2,13	17,06	3,20					3,73	2,67		11,73	11,73		
	Bonn		4,17	2,38	39,87	4,17					2,98	3,57		13,69	10,71		
	Königsstuhl (Heidelb.)	1959	1,20	3,20	13,60	1,20					1,60	2,00		9,60	5,20		
	Leimen (Heidelberg)		4,55	6,83	42,25	3,58					0,65	4,88		13,33	4,55		
	Augustenberg	1956/59	2,73	2,05	12,98	2,73					4,10	2,73		6,15	12,29		
	Ettenheim	1958/59	1,97	2,62	12,45	1,31					3,28	2,62		8,52	9,83		
	Rirgshelm		3,89	3,25	36,99	1,30					1,30	4,54		8,44	9,09		
	Balderwegerhof	1956/59	2,95	1,97	6,88	0,98					2,95	2,95		4,92	9,83		
	Feldberg		3,24	1,62	6,48	1,62					3,24	2,43		4,86	8,91		
	Hohenpeissenberg	1957/59	1,72	6,88	14,62	2,58					2,58	1,72		5,16	12,90		
SCHARRER/FAST (1954)	Giessen	1948/49			9,60	159,1							28,20	9,86	114,09	0,48	
KREYSCH (1958)	Berlin-Dohlem	1954/57			1,70						5,74	4,10	9,84			0,13	
SCHARRER/SCHROPP (1938)		1928/36												14,80			
WEISSFLOG zit. in PFAFF (1937) und BUCHNER (1958)	Limburgerhof												6,00	1,00	43,00		
	Griechheim														30-60		
	Garthe, Westf.														59		
	Dürkheim-Weinberg														50-80		
	Ludwigshafen-Opau														100-300		
GERICK & KURTES (1957)	Hannum	1955/56													79,70		
	Elwechterdamm														37,65		
	Kleve-Kellen														66,48		
	Künster														90,11		
	Bückeburg														129,36		
	Hilders, Rhön														67,28		
	Freystadt, Ostpf.														82,10		
	Puch b. München														93,32		
	Feld, Kr. Wangen														75,30		

Tabelle 2:

Bleielementzufuhr mit dem Niederschlag in den Tropen

Autor	Land / Lage des Meßpunktes	Mess- zeitraum	Na	K	Ca	Mg	NH ₄ -N g	NO ₃ -N g	Org.-N kg/ha/Jahr	Ges.-N	Cl	S	P
HESSE (1957)	Kiyuku (1. Regen nach Trockenzeit) (Nach 3 Tagen heftigen Regens)	Nov. 1955*										1,54	
		Mai 1956*										1,00	
JONES (1960)	Nigeria/ Samaru	1959	61,06	37,24	1,02	2,95	54,03**	1,36	2,27	57,56**			
JONES/BROGFELD (1970)	Nigeria/ Katsina	1969					2,51						
	Kano						2,48						
	Kontagora						3,46						
	Chafe						3,48						
	Minna						2,87						
	Samaru I						2,54						
	Samaru II						3,15						
THORNTON (1965)	Gambia/ Yundum	1963	9,52	5,94	4,37					47,04			0,31
	Jenoi		8,85	4,26	2,69					44,91			0,16
	Yoroberi Kunda		5,82	2,80	1,68					14,22			0,27
MEYER/PAUMPTER (1959)	Zaire/ Yangambi						3,17	2,30					
ERTKESON (1966)	Zaire/ Yangambi	1958	2,10	2,10	3,70	1,20	1,50	4,60			4,00		7,00
	Kulunga		2,60	2,60	3,40	1,10	5,30	4,20			4,00		4,50
	Binza		1,40	1,40	4,60	0,90	0,70	2,90			2,20		2,80
NYE (1964)	Ghane/ Kade	1959		17,47	12,66	11,31	11,54	2,46					0,41
VISSER (1964)	Uganda/ Kampala	1958/59	21,70	21,60			6,60	4,90		19,10	11,4		7,60
MUNIZ/MARCANO (1989)		1883/85								5,78			
AUFFRAY (1909)	Vietnam/ Saigon	1902/08					10,60	10,98					
RICHARD/VILARD-GOUDOU (1953)	Vietnam/ Saigon	1932								10,35			

**) Werte falsch; siehe JONES/BROGFELD (1970)

*) Berechnet nach den aktuellen Konzentrationen und der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge

Tabelle 3:

Bioelementzufuhr mit dem Niederschlag in Europa

Autor	Land / Lage des Meßpunktes	Mess- zeitraum	Na	K	Ca	Mg	NH ₃ -N		NO ₃ -N	Ges.N	Cl	S	P	pH-Wert	
			kg/ha/Jahr												
JOHANSSON (1962)	Schweden/Durchschn. aus 35 Stationen	1958										4,5			
	Norwegen/ " " 12 "											4,7			
	Finnland/ " " 6 "											3,3			
	Dänemark/ " " 13 "											12,2			
	Island/ 1 Meßstation											3,5			
	England /Durchschn. aus 16 Stationen											15,8			
JOHANSSON (1959)	Zentraleuropa/ " " 29 "											12,0			
	Schweden/Region Götaland											6,8			
	" " Svealand											5,0			
	" " Norrland											3,0			
LIG (1963) und (1968)	Norwegen/ Ås	1955/62	4,88	1,37	5,36	0,94	1,56	1,46						5,3	
	Väggås		1,34	1,08	4,06	0,50	0,46	0,30						6,2	
	Lista (Küstenlage)		148,31	8,39	12,81	17,34	2,76	3,45						4,9	
	Ytterøy		18,20	2,83	5,61	2,73	0,75	0,57						5,9	
	Tena	1958/62	9,66	1,38	4,13	1,32	0,69	0,31						6,0	
	Gjerumndnes	1957/62	27,85	1,85	5,84	3,64	1,06	0,53						5,9	
	Stend		24,91	2,45	6,43	3,36	2,09	1,48						5,4	
	Fortun		2,53	1,23	5,28	0,60	0,98	0,51						6,0	
	Fensråken		3,63	1,20	2,64	0,53	0,86	0,55						5,8	
	Trysil		1,26	0,81	3,94	0,42	1,07	0,88						5,7	
	Kise		1,04	0,75	4,91	0,45	1,26	0,92						5,7	
	Dalen, Telemark		2,40	1,65	7,59	0,66	0,90	1,12						5,9	
	Finnland		1,83	2,45	1,99	1,31	1,36 (Si)			5,87	5,76	1,39	0,09		
	Finnland/ Sodankylä	1957/58	0,99	0,72	2,52	0,20	0,43	0,35				2,24	2,42		
	Kauhava	1955/58	1,19	1,40	4,47	0,56	0,57	0,51				2,51	3,75		
	Kuopio		1,05	0,84	2,95	0,38	0,63	0,48				1,60	3,30		
	Jyväskylä		1,41	0,96	4,41	0,41	0,65	0,78				3,17	3,23		
	Punkarju	1957/58	1,17	0,58	3,89	0,34	0,56	0,67				1,87	3,50		
	Tvärminne	1955/58	3,60	1,35	3,53	0,64	0,67	0,74				5,50	3,76		
VIRO (1955)	Schweden/ Riksgränsen	1955/58	4,78	0,70	3,00	0,84	0,44	0,26				8,74	2,24		
	Öjebyn		1,63	1,02	2,60	0,53	0,81	0,57				3,16	3,38		
	Öffer		3,18	2,42	3,19	0,67	0,81	0,45				4,16	3,66		
	Åscl		1,83	0,84	3,17	0,66	0,77	0,65				1,91	3,78		
	Erken		2,25	1,60	3,25	0,77	0,89	0,60				3,04	4,56		
	Lanna		4,26	2,02	4,58	0,92	1,74	0,98				7,88	5,01		
	Flehuht		3,92	1,59	3,53	0,99	1,72	1,11				6,51	5,39		
	Alnarp		7,56	1,50	8,27	1,96	2,90	1,85				12,71	8,59		
	Ödum		11,43	1,82	5,22	1,81	3,28	1,62				19,48	8,21		

Tabelle 3 (Fortsetzung) :

Autor	Land/Lage d. Meßpunktes	Mess- zeitraum	Na	K	Ca	Mg	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Ges.-N	Cl	S	P	pH-Wert
ERIKSSON et al. (1954)	Schweden		4-38	1-4	6-19				0,8-4,9				
ANGSTRÖM/HÖGBERG (1952)	Schweden/ Upsala	1947/50					1,90	0,91					
NIHLGÅRD (1970)	Schweden/ Kongälsund	1957/68	5,60	1,90	3,50	0,91	0,10 (kn)		8,20	11,10	7,90	0,07	5,2
JENSEN (1962) und (1963)	Dänemark/ Durchschn. aus 10 Stationen	1957/61	16,10	3,10	6,50	3,00	4,60	2,30	26,00	12,90			5,0
GORHAM (1957)	Irland/ Roscoshill	1955	4,06	0,64	2,16	0,64		0,64	5,72	3,68			5,2
MILLER (1905)	England/ Rothamsted	1888/1901					2,71	1,00	14,87	6,97			
RUSSEL/RICHARDS (1919)	Rothamsted	1889/1916					2,96	1,49	17,92				
GORE (1968)	England/ Moor House	1964/66	32,14	2,27	9,35	4,48			1,27 (Org-N)	8,16		0,27	
GORHAM (1958)	England/ Hawkhead Moore	1955/56						2,00		92,00	24,00		
ALLEN et al. (1968)	England/ Abbot's Moss (Cheshire)	1965/66	14,00	5,40	14,00	2,90			19,00			0,80	
	Grizedale Forest (South Lake D.)	1962/65	44,00	9,40	6,60	5,40			9,10			0,30	
	Kerloch (Kineardineshire)	1965/66	28,00	3,90	6,70	3,60			8,90			0,20	
	Kerlewood (North Lancashire)		22,00	3,70	12,00	3,60			15,00			1,00	
	Silpho Moor (North Yorkshire)		36,00	4,80	9,80	4,50			13,00			0,80	
CARLISLE et al. (1966)	England/ Grizedale Forest	1963/64	35,34	2,96	7,30	4,63			9,54			0,43	
CARLISLE et al. (1967)	Grizedale Forest		50,76	2,84	6,72	6,10			8,71			0,28	
HADGICK/OWINGTON (1959)	England/ Bedgebury (27 km v.d. Südküste)	1955/57	19,30	2,80	10,70	4,20			2,07 (Org-N)			0,40	
MINISTÈRE DE LA SANITÉ PUBLIQUE zitiert in:	Belgien/ Bruges	1961	21,05	4,19	10,88	3,67	2,22	4,10		24,80	16,43		
DUVIGNEAUD/	Uccle		11,20	2,61	11,59	2,49	1,42	3,59		9,31	19,51		
DEWAEYER-DE SMET (1964)	Dourbes		7,46	1,74	6,76	1,63	1,69	4,07		6,97	10,37		
	Botrange		10,80	3,22	7,20	1,41	2,02	5,03		7,81	17,74		
DEWAEYER-DE SMET (1962)	Belgien/ Lembeek-lez-Hal	1961		11,50	50,00								
DEWAEYER-DE SMET (1969)	Belgien/ Virelles-Blaimont	1965/67	24,80	5,27	17,70			2,37					
BERTRAND (1935)	Frankreich/ Paris	1934/32									24,06		
	Grignon (Reinluft)	1934/35									15,10		
TAMÉS et al. (1952)	Spanien/ semiaride Zone subhumide Zone	1950/52							11,52 15,74				
REHM (1961) und (1964)	Italien/ Sauze de Oulx (Westalpen) Vesima (Genua)	1959	2,17 205,92	1,45 15,44	7,23 78,51	0,72 23,17	1,45 0,00	0,72 1,29		5,78 398,97	2,17 33,46		
	Österreich/ Linz	1958/59	2,69	2,69	15,23	2,69	1,79	2,69		4,48	13,44		
	Retz		1,82	0,91	8,19	0,91	1,37	1,37		2,27	6,37		
	Wien		1,37	4,10	16,39	2,73	1,27	1,37		3,41	11,61		
	Klagenfurt		0,93	1,85	11,12	2,78	1,85	0,93		1,85	11,12		
ZUBER (1962)	Schweiz/ Liebefeld	1957/61	2,00	1,30	12,00	1,60	6,00	0,81		10,90	14,36		
KACKŮ et al. (1959)	CSSR/ Durchschnitt aus 21 Stationen	1957/58			12,89	3,30	6,19	0,44	0,03 (NO ₂ -N)	19,21			
PINCUS/RÖLLIG (1967)	Preussen/ Insterburg	1864/65					4,05	2,10	6,15				
CHODJACKI/KAC-KACAS (1963)	Polen/ Pulawy-Gebiet	1961/62		2,36	11,05		6,10	3,69				0,08	
MINA (1965)	UdSSR/	1960		5,10	6,60	1,60	1,00						
BOBRITSKAJA (1962)	UdSSR/ Stende	1959					2,34	0,51	0,10	2,95			
	Syktyvkar	1959/61					2,88	0,54	0,12	3,54			
	Moskau, Snegivi	1958/61					2,66	1,21	0,06	3,93			
POKOLAREVA (1963) nach	UdSSR/ Leningrad			5,00	32,40	3,30			0,10 (NO ₂ -N)	2,80	1,10		

Tabelle 4:

Bioelementzufuhr mit dem Niederschlag in Nordamerika und den gemäßigten Breiten

Autor	Land / Lage des Meßpunktes	Mess- zeitraum	kg/ha/Jahr						Ges-N	Cl	S	P
			Na	K	Ca	Mg	NH ₃ -N	NO ₃ -N				
HERMAN/CORHAM (1957)	Kanada/ Kentville (Agrargebiet)	1952/54					2,76	1,08			9,12	
DALBRO (1955)	USA/	1954	9,50	1,70	3,80							
BORMANN/LIKENS (1967) und LIKENS et al. (1967)	USA/ Hubbard Brook Exp. Forest (New Hampshire)	1963/64	1,00 1,52	2,13	3,00 2,95	0,70 0,92						
LIPLIN/CONYBEARE (1936)	USA	1930		8,17	32,60	11,66						
WETZELAAR/HUTTON (1963)	Australien/ Katherine, North Terr.	1958/60	1,10	0,60		0,20	0,70	0,65			1,70	
ATTIWIILL (1966)	Australien/ Disappointment State Forest	1960/62	16,81	2,01	2,74	5,36						
HUTTON (1968) und HUTTON/LESLIE (1958)	Australien/ Cape Bridgewater Coleraine Parwan Horsham Seymour Walpeup Merbein	1955/56	107,26 19,86 9,65 6,81 5,68 5,11 5,11	4,82 1,42 0,85 1,14 0,85 0,57 0,85	12,49 3,41 2,27 2,84 1,14 4,54 10,78	11,92 2,84 1,70 1,70 1,14 1,14				183,87 32,92 13,62 9,08 6,81 5,68 6,81		
DROVER/BARRETT-LENNARD (1956)	Australien/ Nedlands	1952/55					1,20	1,02	0,43	2,65		
	Avondale						1,20	0,65	0,12	1,97		
	Chapman						2,00	0,62	0,33	2,95		
	Merredin						0,95	0,34	0,31	1,60		
	Muresk						0,90	0,60	0,21	1,71		
	Wongan Hills						0,70	0,47	0,11	1,28		
									(NO ₂ -N)		3,50 4,16	
DROVER (1960)	Australien/ Nedlands Perth	1957/59										
ERIKSSON (1966)	Südafrika/ Pretoria	1958	2,70	1,80	14,40	3,90	0,80	1,50		3,90	10,00	
INGHAM (1950a) und (1950b)	Südafrika/ Natal			40,42	77,63		10,74	1,25		184,78		1,85
WILL (1955)	Neuseeland	1954/55	10,76	1,72	2,08	1,36						
WILL (1959)	Neuseeland/ Whakarewarewa Forest Kaingora Forest	1954/55 1955/57	34,62 26,83 36,96	5,04 3,53 8,62	3,02 2,91 3,75						0,25 0,25 0,44	
MILLER (1963)	Neuseeland/ Taika	1956/58	59,00	6,60	7,20	11,20	0,53	0,91	1,36	2,80	116,00	8,40
MILLER (1964)	Taika		63,00	7,00	7,00	11,00			(Org-N)	2,80		0,20
MILLER (1968)	Taika		54,00	5,00	7,00	10,00				4,00	107,00	8,00
EDUNJOBI (1974)	Neuseeland	1966/67	60,00	10,00	10,70	5,30				7,40	100,00	0,22

Tabell. 4 (Fortsetzung) :

Cl in kg/ha/Jahr

BLAKEMORE (1953)	Neuseeland/ Rongotai	0,4 km	1947/48	238,35
	Baring Head		1947/48	169,12
	Kelburn	zunehmende	1947/50	113,50
	Pirinoa		1949/50	127,12
	Levin	Entfernung	1949/50	54,48
	Palmerston North		1950	53,35
	Te Awa	vom	1949/50	37,46
	Waingawa	61 km Meer	1949/50	40,86
DANIEL et al.(1939)	USA/ Guthrie, Oklahoma		1934/37	1,11

		Mess- zeitraum	Fe	Al	Mn	Ti	Cr	Cu	Mo	Ni	Sr	Co	Zn	Ba	
			g/ha/Jahr												kg/ha/Jahr
Mac INTIRE et al.(1952)	USA/ Tennessee(ländl. Lagen)	1948/50													1,60
BEAR (1954)	USA/ New Brunswick,N.Y.	1949/50						3710,0				3,7			(F)
		1950/51			520,0			240,0	70,0				1440,0		
		1951/52			770,0				260,0				1110,0		
MILLER (1968)	Neuseeland/ Taika		400,0	800,0	30,0	10,0	3,0	130,0	1,0	7,0	60,0		40,0	2,00	(Si)

		S kg/ha/Jahr	Autor	Land/ Lage des Meßpunktes	Mess- zeitraum	S kg/ha/Jahr
JORDAN et al.(1959)	USA/ Alabama (Mittel v. 5 Stat.)	1952/55	ALWAY et al.(1936)	USA/ Minnesota, Bemidji	1936	3,55
	Arkansas "	2 "		Page		6,25
	Florida "	7 "		University Farm		29,46
	Georgia "	5 "	LUTZ (1957)	USA/ Virginia, Ashland	1953/56	19,75
	Kentucky "	5 "		Blacksburg		23,34
	Louisiana "	3 "		Buckingham Courthouse		16,00
	Mississippi "	7 "		Chantilly		29,06
	North Carolina "	16 "		Chatham		15,50
	South Carolina "	4 "		Charlotte Courthouse		14,82
	Tennessee "	7 "		Fredericksburg		25,42
	Texas "	5 "		Halifax		14,11
	Virginia "	14 "		Hillsville		17,37
	Durchschn. Kent.,Tenn.,Virg.			Kentbridge		19,36
	Durchschn. andere 9 Staaten			Middleburg		24,57
				Norfolk		38,68
JORDAN/REISENAUER (1957)	USA/ Tennessee			Orange		22,47
	Nebraska			Salem		23,61
	Washington			Staunton		20,43
SEAY (1957)	USA/ Kentucky	1953/56		Warsaw		20,88
BERTRANDSON et al.(1950)	USA/ Indiana	1946/47				

Tabelle 5:

Bioelementzufuhr mit der Kronentraufe

Autor	Bestand	Land / Lage des Meßpunktes	Mess- zeitraum	Na	K	Ca	Mg	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Org-N	Ges-N	Cl	S	P
										kg/ha/Jahr				
MAYER (1971)	Fagus silvatica, 125j.	Bundesrepublik/ Solling	1969/70	11,30	18,10	26,60	3,45				22,47	38,00	40,80	0,58
GRUNERT (1964)	Kiefern-Bu-Mischwald	DDR/ Eberswalde												
	Lehnstandort				28,00	40,00	15,00				15,00			1,00
	mittl.Sandstandort				24,00	36,00	12,00				15,00			1,00
	Kiefernbestand mittl.Sandstandort				12,00	30,00	10,00				12,00			1,00
AUSSENAC et al.(1972)	Picea abies	Frankreich/ Amance (Nancy)			21,37	12,25	3,04	7,27			25,75			0,25
DENAEYER-DE SNET (1962)	Quercus petraea	Belgien/ Lembeq-Les-Hal	1961		60,00	110,00								
DENAEYER-DE SNET (1969)	Eichenmischwald	Belgien/ Virelles-Blaimont	1965/67	21,20	23,40	27,00			2,37					
HADGWICK/OVINGTON(1959)	Laubholz-Gestrüpp	England/ Bedgebury	1955/57	54,30	58,40	46,60	20,90							
	Nothofagus obliqua			30,20	18,10	23,30	9,20							
	Quercus petraea			19,90	22,20	14,60	7,70							
	Quercus rubra			21,00	12,30	13,60	6,10							
	Laubholz-Durchschnitt			31,10	27,80	24,50	11,00							
	Picea omorika			41,00	39,00	31,60	13,30							
	Larix eurolepis			39,50	27,70	32,10	12,20							
	Abies grandis			44,60	18,50	31,10	9,50							
	Tsuga heterophylla			46,00	16,50	29,30	9,30							
	Pseudotsuga taxifolia			31,10	27,50	21,80	8,30							
	Picea abies			27,70	27,80	16,30	7,30							
	Pinus nigra			24,20	18,70	18,50	6,60							
	Chamaecyparis lawsoniana			25,90	13,90	17,20	5,80							
	Thuja plicata			24,70	13,60	19,20	5,30							
	Nadelholz-Durchschnitt			33,80	22,60	24,10	8,80							
	Gesamt-Durchschnitt			33,00	24,20	24,20	9,50							
CARLISLE et al.(1966)	Quercus petraea	England/ Grizedale Forest	1963/64	55,55	28,14	17,18	9,36				8,82			1,31
CARLISLE et al.(1967)	Quercus petraea	England/ Grizedale Forest	1964/65	82,78	18,86	19,01	11,70			5,49	9,60			0,83
NIHLGÅRD (1970)	Fagus silvatica	Schweden/ Kongalund	1967/68	13,70	9,90	9,00	3,00				8,50	31,20	14,90	0,11
	Picea abies			22,60	22,60	14,70	5,25				21,50	46,30	42,00	0,43
MINA (1965)	Oxalis-Farn-Pi-Wald	UdSSR/ Yaroslavl' Oblast (Taiga)			13,40	9,60	2,70	2,20						
	Beerkrut-Fichten-Wald				14,60	13,10	4,00	1,90						
	Gras-Birken-Wald				6,40	9,70	2,10	2,00						
	Beerkrut-Birken-Wald				7,40	13,00	2,60	2,40						
	Beerkrut-Kiefern-Wald				12,10	15,00	3,20	4,30						
	Bergeschen-Hasel-Wald	Moskva Oblast (Nadelw.gürtel)			8,20	12,00	3,10	2,90						

Tabelle 5 (Fortsetzung):

Autor	Bestand	Land/Lage d. Meßpunktes	Meß- zeitraum	kg/ha/Jahr										S	P
				Na	K	Ca	Mg	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Ges. N	Cl				
SVETIDOVA (1960)	Quercus	WASSER/ Voronež Naturschutzgebiet	1959		3,30	6,00	1,20			6,70				0,10	0,30
	Populus tremula				2,00	5,10	0,30			7,60				0,10	0,20
	Pinus				1,00	6,00	0,90			8,10				0,20	-
DALERO (1955)	Malus Bramley Seedling	USA	1954	9,00	30,00	10,30									
	Cox's Orange			9,00	25,00										
ATTIWI (1966)	Eucalyptus obliqua	Australien/ Disappointment St. For.	1960/62	25,43	13,37	8,01	7,29								
INGHAM (1950b)		Südafrika			324,41	274,18		32,46	1,25		467,94			10,97	
NYE (1961)	Tropischer Regenwald	Ghana/ Kade	1959		279,52	29,12	17,92	14,78	11,65					3,70	
HEESE (1957)	Acacia	Kikuyu (1. Regen nach Trockenzeit) Nov. 1955												4,29	
		(nach 3 Tagen heftigen Reg.) Mai 1956												1,08	
	Eucalyptus	(1. Regen nach Trockenzeit) Nov. 1955												2,92	
		(nach 3 Tagen heftigen Reg.) Mai 1956												1,00	
EGUNJOBI (1971)	Ulex europaeus	Neuseeland	1966/67	70,00	56,00	14,00	13,00			8,00	145,00			0,34	
WILL (1955)	Pinus radiata	Neuseeland	1954/55	37,43	18,81	7,53	12,25							3,03	
WILL (1959)	Pinus radiata	Neuseeland/ Whakarewarewa Forest	1954/55	81,48	25,76	4,82								0,65	
		Kaingora Forest	1955/57	28,84	19,63	3,16								1,21	
	Pseudotsuga taxifolia	Kaingora Forest		35,14	27,10	5,68								4,57	
MILLER (1963)	Nothofagus truncata	Neuseeland/ Wellington		73,92	31,02	13,44	13,44				160,16	10,42		0,56	
MILLER (1968)		Neuseeland/ Wellington		68,00	27,00	13,00	12,00			7,00	134,00	11,00		0,60	
				Fe	Al	Mn	Ba	Ti	Cr	Cu	Ko	Ni	Sr	Si	
				g/ha/Jahr											
MILLER (1968)		Neuseeland/ Wellington		700,0	1700,0	650,0	80,0	20,0	10,0	280,0	2,0	9,0	200,0	7000,0	
NIMLÖF (1970)	Fagus silvatica	Schweden/ Kongalund	1967/68			1930,0									
	Picea abies					4030,0									
GRUNERT (1964)	Kiefern-Bu-Mischwald	DDR/ Eberswalde													
	Lehmstandort			2000,0	3000,0									2000,0	
	Mittl. Sandstandort			2000,0	3000,0									2000,0	
	Kiefernstandort			2000,0	2000,0									2000,0	
MAYER (1971)	Fagus silvatica, 125j.	Bundesrepublik/ Solling	1969/70	1505,0	1510,0	2810,0									

*) Berechnet nach den aktuellen Konzentrationen und der mittleren jährlichen Niederschlagsmenge

Tabelle 6:

Differenz zwischen der Bioelementzufuhr in Niederschlag und in Kronentraufe

Oberer Wert = Differenz in kg/ha/Jahr

Unterer Wert = Differenz in % der Werte für Freilandniederschlag

Autor	Bestand	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Ln	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Org-N	Ges-N	Cl	S	P	Si
MAYER (1971)	Fagus silvatica, 125j.	4,00 55	16,10 805	14,20 115	1,66 93	0,34 29	-1,54 -50	2,59 1177				-1,45 -6	20,20 113	16,00 65	0,10 21	
GRUNERT (1964)	Kiefern-Bu-Mischwald (Lehm)		24,00 600	25,00 167	12,00 400	1,00 100	2,00 200					0,60 0			0,50 100	1,00 100
	(Sand)		20,00 500	21,00 140	9,00 300	1,00 100	2,00 200					0,00 0			0,50 100	1,00 100
	Kiefernbestand (Sand)		8,00 200	15,00 100	7,00 333	1,00 100	1,00 100					-3,00 -20			0,50 100	1,00 100
	DENAIEYER-DE SLEET (1962) Quercus petraea		48,50 422	60,00 120												
DENAIEYER-DE SLEET (1969) Eichenmischwald		-3,60 -15	18,13 344	9,30 53												
MADGWICK/OWINGTON (1959) Laubholz-Durchschnitt		9,90 47	25,00 893	13,80 129	6,80 162											
	Nadelholz-Durchschnitt	14,50 75	19,80 707	13,40 125	4,60 110											
CARLISLE et al. (1966) Quercus petraea		20,21 57	25,18 851	9,88 135	4,73 102							-0,72 -8			0,88 205	
CARLISLE et al. (1967) Quercus petraea		32,02 63	16,02 564	12,29 183	5,60 92						3,42 165	0,89 10			0,55 196	
NIHLGÅRD (1970)	Fagus silvatica	8,10 145	8,00 421	5,50 157	2,09 230			1,63 1830				0,30 4	20,10 181	7,00 89	0,04 57	
	Picea abies	17,00 304	20,70 1089	11,30 320	4,34 477			3,93 3930				13,30 162	35,20 317	34,10 432	0,36 514	
MIHA (1965)	Oxalis-Farn-Fichten-Wald		8,30 163	3,00 45	1,10 69				1,20 120							
	Beerkraut-Fichten-Wald		9,50 186	6,50 98	2,40 150				0,50 50							
	Gras-Birken-Wald		1,30 25	3,10 47	0,50 31				1,00 100							

Tabelle 6 (Fortsetzung) :

Differenzen in kg/ha/Jahr bzw. in % Freilandniederschlag

Autor	Bestand	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Ges. N	Cl	S	P
	Beerkraut-Birken-Wald	2,76 45	6,40 37	6,40 37	1,00 63				1,40 140					
	Beerkraut-Kiefer-Wald	7,00 127	-5,40 -77	1,60 100					3,30 330					
	Bergeschen-Eiche-Wald	5,20 63	5,40 82	1,50 94					1,90 190					
DALRO (1955)	Malus Branley Seedling	-0,50 -5	28,30 1655	6,70 175										
	Cox's Orange	-0,50 -5	23,30 1371											
ATTWELL (1966)	Eucalyptus obliqua	8,62 51	11,36 565	5,27 192	1,35 36									
INGHAM (1960b)		283,09 703	196,55 253						21,72 202	0,00 0		283,16 153		9,12 493
KYE (1964)	Tropischer Regenwald	202,05 1157	16,46 130	6,61 58					3,24 28	9,19 37%				3,29 802
HEESE (1957)	Acacia (nach Trockenzeit)												2,75 179	
	(nach heftigen Regen)												0,08 8	
	Eucalyptus (nach Trockenzeit)												1,38 90	
	(nach heftigen Regen)												0,00 0	
ESUMOTO (1971)	Ulex europaeus	10,00 17	46,00 460	3,30 31	7,70 145						0,60 8	45,00 45		0,12 55
WILL (1955)	Pinus radiata	26,57 248	17,09 234	5,45 262	10,89 801									
WILL (1959)	Pinus radiata (Winkl.For.)	46,76 135	20,72 411	1,00 60										0,39 150
	(Kainig.For.)	1,96 7	16,10 455	0,25 9										0,96 364
	Pseudotsuga taxifolia	-1,82 -5	19,48 214	1,93 51										4,13 939
MILLER (1963)	Nothofagus truncata	10,32 17	24,02 343	6,44 92	2,44 22						44,16 38	2,02 24		0,36 180
MILLER (1968)		14,60 26	22,00 440	6,00 85	2,00 20	0,30 75	0,90 113	0,62 1157			3,00 75	27,00 25	3,00 37	0,30 100
		Ba	Ti	Cr	Cu	Mo	Ni	Sr						
MILLER (1968)		0,040 100	0,010 100	0,007 233	0,150 115	0,001 100	0,002 29	0,140 233						

Tabelle 7:

Konzentrationen von Gasen in der Luft

Autor	Meßgebiet	Meß- zeitraum	NH ₃	NO ₂	H ₂ O	Cl	F	Schwefel	
								H ₂ S	SO ₂
					µg/m ³	Luft			
KÖHLER/FLECK (1969)	BRD/Westerland	1967		3,60					7,0
und RÖNIGKE (1965)	Clausthal-Zellerfeld			13,60					
und FUCHS (1970)	Gelsenkirchen			59,80					86,4
und DFG (1968)	Deuselbech			8,80					4,8
	Mannheim			31,20					100,0
	Brotjackelriegel			2,60					6,2
	Schwaibinsland			3,10					6,8
	Mittel aller Stationen			17,50					35,2
	Mittel d.Reinluftstationen			6,30					6,2
	Mittel d.belast.Stationen			45,50					93,0
OELSCHLÄGER (1965)	BRD/Stuttgart-Hohenheim						0,3-0,4		
van HAUT/ STRATMANN (1967)	BRD/ländliche Gebiete			10-80					
	Großstädte			20-120					
HARTKAMP/ STRATMANN (1969)	BRD/Nordrhein-Westfalen	1965/66							
	Mittel aus 15 Meßgebieten			46,10					
DOMÉS (1966)	BRD/Nördliches Ruhrgebiet								236,1
LAHMANN et al.(1967)	Raum Mannheim-Ludwigshfn.	1965							120,0
LAIPADIS (1968)	DDR/ 8 km v. Großkraftwerk								
	Feld, Vegetationszeit								280,0
	Vegetat.ruhe								200,0
	Ei-Bestand, belaubt								250,0
	unbelaubt								200,0
	ringsum Rauchquellen(2-5 km)								
	Feld, Vegetationszeit								180,0
	Vegetat.ruhe								110,0
	Laubwald, belaubt								210,0
	unbelaubt								480,0
WISLICEUS (1966)	Thorandter Wald, 8-10 km von der Halsbrücker Esse								
	Abb. 33a, Westrand								88,0**
	31, Westrand								95,0**
	27a, Westrand								90,0**
	28, im Altbestand 1)								79,0**
	2)								85,5**
	33a, tief i.d. Dichtung								62,0**
	27c, tief i.d. Dichtung								70,0**
CST (1960)	Süntelgebirge	1889							
	Fi-Altholz, Kammlage								72 ***
	lichter Bu-Wald								74-57***
	Fi-Dickung								31 ***
	Fi-Dickung, Kammlage								22 ***
	Waldrand am Hangfuß								50 ***
	Lüneburger Heide								
	Ki-Bestandesrand 1)								53 ***
	2)								52 ***
	im Betand								51 ***
	sehr lichter Ki-Bestand 1)								58 ***
	2)								74 ***
	3)								68 ***
	8 km von Celle, Wiese 1)								127 ***
	2)								136 ***
	Hannover, stadtnah								312 ***
	Eilenriede								263 ***
WIELER (1905)	Stolberg	1903							
	Kl.Probstey, 1,2km v.d.Rauchqu.								302,9
	Gr.Probstey, 2,3-2,4km v.d.Rauchqu.								441,8
	Stadtwald, 10,25km v.d.Rauchquelle								50,6

Tabelle 7 (Fortsetzung) :

Autor	Meßgebiet	Meß- zeitraum	HI ₂	NO ₂	N ₂ O	Cl	F	H ₂ S	SO ₂
REBER (1963)	Alpen/ Zugspitze St.Moritz-Rod Corviglia		6,90 4,90	3,10 7,70 4,40					4,7 1,8 0,7
STEFAN/ POLLAKSCHÜTZ (1967)	Österreich/ Hochfilzen i.d.Nähe v.Hagnsitwerk	1961 1962 1963 1964							0,56**** 0,55**** 1,15**** 0,66****
KELLER (1958)	Schweiz/ Marienstein Zement- und Kalkwerk 1,4km entf. hinter Wald 1,4km entf.v.d.Waldrand (dazwisch.breiter Waldstr.) Kafestelle 3, am Werk	1955 1955 1954							100,0 100,0 400,0
JOHANSSON (1962)	Schweden/Mittel v.28 Stat.) Norwegen/ " 4 " Finnland/ " 6 " Dänemark/ " 3 " Island/ " 1 " England/ " 7 " Zentraleuropa 29 "	1958							5,3 4,4 3,1 8,6 3,3 14,0 17,5
JOHANSSON (1969)	Schweden/ Region Götaland S Svealand Norland N	1954/57							5,1 4,7 3,0
MEEHAN (1950)	England (ohne Werte aus Städten)								37,0
JUNGE (1955) u. (1957) USA/	Homestead, Florida Bilo, Miami Ipswich, Kans.(ländl.)	1954	4,77 2,31 4,67	2,00 2,89 2,99		1,57 1,92 4,40			
JUNGE (1954)	USA/ Round Hill, Pass.							8,9	
JUNGE (1953)	USA/ Bedford, Mass.								23,5
CIZLAK (1950)	USA/ Cincinnati Cincinnati, ländl.Gebiete Wohngebiete Industriegebiet	1947/51	17,47	471,50		106,26 83,72 96,60	3,934 5,086 4,298		108,4 128,9 187,5
LANGE et al. (1970)	Panama/ Albrook Atlantische Seite Portados	1968			0,361 0,475 0,522				

*) Gesamtschmelz (in Gasen und Aerosolen) in $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ Luft

**) Abtätigungsgrad der Partikelpollen mit SO_2 in % verbrauchtes BaSO_3 (verglichen als BaSO_4)

***) $\mu\text{g SO}_2$ / 10 g Partikelpollen/ halbes Jahr

****) Partikelpollen: $\mu\text{g H}_2\text{SO}_4$ / Tag

Tabelle 8 :

Chemische Zusammensetzung der Aerosole

Autor	Land / Lage des Messpunktes	Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	NH ₃ -N	NO ₃ -N	Cl	S	F	Si
		$\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ Luft}$												
HETICHE (1964)	BRD/ Hamburg, Stadtgebiet							0,188						
WEBER (1963)	Alpen/ Zugspitze St.Moritz-Bad Corviglia								0,08	0,14		0,57		
		0,05							0,41	0,29	0,15	0,67		
		0,05		0,04					0,05	0,07	0,15	0,77		
RIEM (1964) und RIEM et al.(1965)	BRD/ Mittel aus 12 Stationen	4,91	1,69	3,44	1,79				5,77		13,38	19,91		
	Österreich/ Mittel aus 4 Stationen	2,65	1,30	2,20	0,85				5,30		6,32	15,13		
	Italien/ Sauze de Oulx	2,00	1,20	2,50	0,40				2,80		6,20	5,80		
	Vesima	53,00	4,40	4,50	0,68				4,20		103,80	19,10		
PEŠEK (1968)	CSSR/ Prag, Stadtregion	10,00	10,00		10,00	31,00	32,00							28,00
STEVENS (1968)	England/ Mittel aus 9 Stationen	2,87	1,22	1,38	0,52				2,73		5,41			
EGOROV et al.(1970)	UdSSR/ Mittel aus 12 Stationen					0,17	0,05	0,138						
KATZ (1952)	Kanada/ Gebiet um Windsor			3,26	0,81	2,49	2,75	0,281						6,21
CHAMBERS et al.(1955)	USA/ Nichturbane Lagen (Mittel aus 5 Orten) Städte über 2 Mill. Einw.(5 Orte)					3,30				0,02		0,21	0,13	
						6,52		0,322		0,30		4,12	0,18	
U.S. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE zit. in Staub (1959) **	USA/ Stadtlagen Stadttrand Ländliche Lagen	2,00	1,80		1,80	2,60		0,110		21,00	8,00	139,00	54,00	
										19,00	2,00	59,00	27,00	
										1,00			44,00	
COEN (1968)	USA/ Messungen d. U.S.Dept.HEW 1957-64					1,99		0,064		0,38		3,12		
McMULLEN et al.(1970)	USA/ Ländl.Stat., Reingluft (10 Stationen) Mittl.Entf.(15 Stationen) Stadtnen (5 Stationen) Stadtlagen (217 Stationen)					0,15		0,005	0,12	0,10		0,64		
						0,27		0,212	0,22	0,19		1,77		
						0,56		0,026	0,95	0,32		3,34		
						1,43		0,073	0,70	0,54		3,37		
JUNGE (1956) und (1957)	USA/ Florida, Homestead (Küstennah) Hawaii, Hilo (Küstennah) Mass., West Newton (landwirtsch. Gebiet) Mass., Boston	0,91							0,09	0,08	1,54	0,21		
									0,04	0,02	5,05	0,37		
									0,67	0,09				
									1,97	0,10				
JUNGS (1954)	USA/ Mass., Round Hill								0,62	0,18		1,37		
JACOBS (1937)	USA/ Californien, La Jolla (Küstennah)										220,00			
CHOLAK (1952)	USA/ Cincinnati (Gesamtgebiet) (Ländliche Gebiete)	28,00	48,00	16,00	<7,00	12,50	4,40	0,300			1,90	0,90	0,93	
		<20,00	20,00	9,00	<10,00	5,70	1,90	0,200					0,67	
BRAR et al.(1970)	USA/ Chicago (Mittel aus 22 Stationen)	0,31				2,43	1,43	0,433			2,12			

Tabelle 8 (Fortsetzung) :

	Zn	Ti	Pb	Cu	Ag	As	Be	Co ₂ n g/m ³ Luft	Mo	Sn	V	Ni	Cr	Ba	Cd	Sr	Hg	Sb	Br
HEITCHE (1964)	915	459	1944	849			00,5	11	.6		76	54	37					26	
PESEK (1968)	500	500	500	500	500	50	50,0	50	50	50	50								
BOGOROV et al. (1970)			147	529						30		61	58		103				
KATZ (1952)	197	67	614	247			6,0		34	46	17	26	11	27	8				
CHAMBERG et al. (1955)		80	360	98		20	0,1			10	2								
		264	4640	490		62	0,3			70	105								
U.S. DEPT. HEW (Stadtlagen)	1890	80	1400	310						7	31	21	7	25	5	80			
COEN (1958)	90	42	540	63						24		28	20						
McMILLIN et al. (1970)			22	60								2							
			96	78								4							
			210	160								8							
			1110	160								17							
CHOLAK (1952)	2000	<1000	2700	860		60	9,5			<200	<200				220		100	<200	
	1600	<1000	1200	800			3,0			<200	<200								
SEAR et al. (1970)	585				4			3			21		17				10	13	123

*) Ohne Los Angeles (in Los Angeles 14,4 µg NO₂/m³)

**) S-, N-, F- und Cl-Konzentrationen in Salzmenigen ausgedrückt

Tabelle 9:

Aerosolkonzentrationen in der Luft

Autor	Meßstelle	Staubzahlen N/l Luft	Kernzahlen N/cm ³	Autor	Meßstelle	Aerosolgehalte µg/m ³ Luft
NEUKIRCH (1965)	Gaswerk, N-Seite d. Mooswald bei Freiburg i.Br.		43 000	DFG (1968) und FUCHS (1970)	BRD, Westerland	79
	Ostrand des Waldes		17 000		Gelsenkirchen	300
	Lichtung im Wald (straßenkreuzung)		33 400		Deuselbach	56
	Westrand des Waldes		12 000		Mannheim	212
	Waldinneres		4 400		Mittel aller Stationen	162
NEUKIRCH (1968)	Uhlberg, Douglasie, stark durchforstet	1 000	1 500	LABORATOIRE D'HYGIENE DE LA VILLE DE PARIS (1965)	Mittel der Reinluftstationen	68
	Freifläche	1 000	2 000		Mittel der belasteten Stationen	256
	Kiefern-, Buchen-, Eichenbestand	1 000	2 000		Frankreich, Paris, alle 39 Meßstellen	116
	Douglasie, schwach durchforstet	1 000	1 500		Boulogne-Bilancourt	102
	Herdern, Waldrand	2 000	9 500		England, Ländliche Gegend (3 Meßstellen)	81
	Herdern	2 000	11 500		Offenes Land, nicht völlig frei von Verunreinigungen (10 Meßstellen)	71
					Völlig offenes Land (1 Meßstelle)	10
ZENKER (1954)	Usedom, belaubter Hochwald, 50m vor dem Wald		6 000	WARREN SPRING LABORATORY (1962) zitiert in: LÖBNER (1965)	England, Ländliche Gegend (3 Meßstellen)	81
	Waldrand		3 300		Offenes Land, nicht völlig frei von Verunreinigungen (10 Meßstellen)	71
	50m im Wald		2 000		Völlig offenes Land (1 Meßstelle)	10
	Dichter Nadelwald, 50m vor dem Wald		4 900		England (ohne Werte aus Städten)	52
	Waldrand		3 200		England, Landesdurchschnitt 1944/54	254
	50m im Wald		2 500		USA, Cincinnati, Gesamtgebiet	370
	wenig belaubter Hochwald, 50m vor dem Wald		5 300		Ländliche Gebiete	180
GINER/HESS (1937)	Waldrand		3 900	CHOLAK (1952)	Wohngebiete	280
	50m im Wald		3 100		Industriegebiete	420
	Inntal Ostl. von Innsbruck, Thaur	24 200	14 200	CHAMBERS et al. (1955)	USA, Städte über 2 Mill. Einw., Mittel aus 5 Orten	264
	Freiland bei Thaur	12 800	9 100		Ländliche Gebiete, Mittel aus 5 Orten	65
	im Wald	5 400	5 800		USA, Ländliche Gebiete, Mittel aus 32 Stationen	30
					USA, ländl. Geb., Reinluft (10 Stationen)	21
					Mittl. Entfernung (15 Stationen)	40
					Stadt nahe Lagen (5 Stationen)	45
					Städte (247 Stationen)	102
FALKE (1949)	Braunschweig, Grünanlagen/Parks	4 300		McCORMACK (1968)	USA, Städte über 2 Mill. Einw., Mittel aus 5 Orten	264
	Äußere Wohnbezirke	10 900			Ländliche Gebiete, Mittel aus 5 Orten	65
	Wohnbezirk, von Industrie durchsetzt	16 800			USA, Ländliche Gebiete, Mittel aus 32 Stationen	30
	Stadtzentrum	26 200			USA, ländl. Geb., Reinluft (10 Stationen)	21
	Hannover, Nienburgerstraße	47 500			Mittl. Entfernung (15 Stationen)	40
	10m im Park senkrecht zur Straße	35 600			Stadt nahe Lagen (5 Stationen)	45
	30m im Park	19 900			Städte (247 Stationen)	102
	Georgstr.	33 800				
	Rasenfäche gegenüber	18 600				
	Hohenzollernstr.	42 400				
SELEZNEVA (1966)	Eilenriede	29 600		Voejkov, USSR		

Tabelle 10:

Elementzufuhr mit dem Staubbiederschlag

Autor	Meßgebiet	Meß- zeitraum	K	Ca	NH ₃ -N	kg/ha/Jahr			Gesamtmenge
						Cl	S	F	
LÖBNER (1949)	Müncheberg (Mark) (Reinluft)	1935/44			1,28*	18,00*	22,10*		370
	Bin.-Dahlen (Villenvorort)	1935/45			2,76	28,80	38,92		571
	Bin.-Mitte (Großstadt)	1935/45			2,57	30,60	50,94		1162
	Dortmund (Industriestadt)	1935/39			4,44	50,40	83,61		1637
	Hürth/Köln (Kraftwerksnähe)	1935/40			0,69	67,20	361,85		1700
	Essen (Industriestadt)	1935/44			6,91	72,00	82,17		2166
LIESEGANG (1951)	Müncheberg	1933/40					19,70		309
	Bin.-Dahlen						33,64		453
	Bin.-Mitte						48,05		649
	Dortmund						78,33		1118
	Essen						79,77		1167
LÖBNER (1951)	Müncheberg	1940/44					22,75		351
	Bin.-Dahlen	1940/51					34,63		547
	Bin.-Charlottenburg	1945/51					47,97		1132
	Bin.-Mitte	1940/45					51,51		1588
	Essen	1940/44					80,41		2345
LÖBNER (1960)	Ruhrgebiet	1953/59					96-144		2508-4116
	Raum Mannheim-Ludwigshafen						48-76		1317-2119
	Berlin						< 48		1213-1258
DOMRÖS (1966)	Ruhrgebiet	1956/63							2149
BOHKE (1963)	Wald im Bereich e.Zementw.	1958/59	36,36**	1096**		428,49**	4,38**	250,29**	4230
NEUWIRTH (1965)	Triberg (Schwarzw.) Ortsmitte	1960/64							724
	Wald bei Triberg								50
NEUWIRTH (1968)	Freiburg i.Br., Stadtgarten	1967							179
	Uhlberg, Freifläche im Wald								71
NEUWIRTH (1963)	Mittel aus 21 Orten in Erho- lungsgeb. in SW-Deutschland	1959/62							64
	beste Meßstellen								351
	schlechteste Meßstellen								351
DFG (1968) und RÜCKE (1969) und FUCHS (1970)	Westerland	1967			3,68		27,01		1765
	Clausthal-Zellerfeld				5,95	13,98	37,23		354
	Gelsenkirchen				16,44	55,48	43,44		1978
	Deuselbach				5,67	43,07	4,75		247
	Mannheim				68,59	86,51	58,40		1347
	Brotjacklriegel				11,90	6,57	23,73		212
	Schauinsland				5,67	25,55	15,33		234
	Mittel aller Stationen				17,06	40,51	28,84**		564*
	Mittel der Reimluftstationen				6,52	23,73	17,59**		285*
	Mittel d. belast. Stationen				42,80	71,18	51,10		1913
MEETHAM (1950)	England, ohne Industriegebiete					43,20	19,80		
MEETHAM (1952)	England, ländliche Gebiete		14			40,00	24,03		380

*) Nur löslicher Anteil

**) Werte umgerechnet, da Angaben wahrscheinlich in Oxid-Werten

*) Ohne Westerland

**) Ohne Clausthal

LITERATUR

ALIEN, S.E., CARLISLE, A., WHITE, E.J. und EVANS, C.C.: The plant nutrient content of rain water. *Journal of Ecology* 56, 497-504 (1968)

ANGSTRÖM, A. und HÖGBERG, L.: On the content of nitrogen in atmospheric precipitation. *Tellus* 4, 31-42, 271-279 (1952)

ATTIWILL, P.M.: The chemical composition of rain-water in relation to cycling nutrients in mature eucalyptus forest. *Plant and Soil* 24, 390-406 (1966)

UFFRAY, M.: Richesse des eaux de pluie en acide azotique et en ammoniacque au Tonkin. *Bulletin de l'économie d'Indochine* 12(51), 595-616 (1909)

AUSSEMAC, G., BONNEAU, M. und Le TACON, F.: Restitution des éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière et des précipitations dans quatre peuplements forestiers de l'est de la France. *Oecologia Plantarum* 7, 1-21 (1972)

BEAR, F.E.: Trace elements. Progress report on research with particular references to New Jersey soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 2, 244-251 (1954)

BERTRAMSON, B.R., FRIED, M. und TISDALE, S.L.: Sulfur studies of Indiana soils and crops. *Soil Science* 70, 27-41 (1950)

BERTRAND, G.: Observations à propos des apports atmosphériques de soufre aux terres arables. Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie de Sciences 201, 309-312 (1935)

BLAKEMORE, L.C.: The chloride content of rainwater collected in the Wellington Province. New Zealand Journal of Science and Technology, Section B, 35, 193-197 (1953)

BOBRITZKAYA, M.A.: Nitrogen intake in soil from atmospheric precipitation in various zones of European USSR. Soviet Soil Science 12, 1363-1368 (1962)

BOHNE, H.: Schädlichkeit von Staub aus Zementwerken für Waldbestände. Allgemeine Forstzeitschrift 18, 109-111 (1963)

BORMANN, F.H. und LIKENS, G.E.: Nutrient cycling. Science 155, 424-429 (1967)

BRAR, S.S. et al.: Instrumental analysis for trace elements present in Chicago area surface air. Journal of Geophysical Research 75, 2939-2949 (1970)

BUCH, K.: Zusammensetzung des atmosphärischen Niederschlages in Finnland. Soc. Scient.Fenn., Commentationes Physico-Mathematicae 24(10), 1-26 (1960)

BUCHNER, A.: Die Schwefelversorgung der westdeutschen Landwirtschaft. Landwirtschaftliche Forschung 11, 79-92 (1958)

CARLISLE, A.: Carbohydrates in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea* (Mattushka) Liebl.) canopy. *Plant and Soil* 22, 399-400 (1965)

CARLISLE, A., BROWN, A.H.F. und WHITE, E.J.: Litter fall, leaf production and the effects of defoliation by *Tortrix viridana* in a sessile oak (*Quercus petraea*) woodland. *Journal of Ecology* 54, 65-85 (1966)

CARLISLE, A., BROWN, A.H.F. und WHITE, E.J.: The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea*) canopy. *Journal of Ecology* 54, 87-98 (1966)

CARLISLE, A., BROWN, A.H.F. und WHITE, E.J.: The nutrient content of the tree stem flow and ground flora litter and leachates in a sessile oak (*Quercus petraea*) woodland. *Journal of Ecology* 55, 615-627 (1967)

CHAMBERS, L.A., FOTER, M.J. und CHOLAK, J.: A comparison of particulate loadings in the atmosphere of certain American cities. *Proceedings of the Third National Air Pollution Symposium*, 24-32 (1955)

CHOJNACKI, A. und KAC-KACAS, M.: Content of some nutrition components in precipitation in Poland in the Pulawy region. *Tellus* 15, 202-203 (1963)

CHOLAK, J.: The nature of atmospheric pollution in a number of industrial communities. *Proceedings of the Second National Air Pollution Symposium*, 6-15 (1952)

CORN, M.: Nonviable particles in the air. S. 47-94
in: STERN, A.C. (Hrsg.): Air Pollution (2nd Edition),
Vol. I, New York (1968)

DALBRO, S.: Leaching of apple foliage by rain. Pro-
ceedings of the fourteenth International Horticultural
Congress 1, 770-778 (1955)

DANIEL, H.A., ELWELL, H.M. und HARPER, H.J.: Nitrate
nitrogen content of rain and run-off water from plots
under different cropping systems on soil classified
as Vernon fine sandy loam. Soil Science Society of
America, Proceedings 3, 230-233 (1939)

DENAEYER-DE SMET, S.: Contribution à l'étude du
pluviolessivage du couvert forestier. Bulletin de la
Société Royale Botanique de Belge 94, 285-308 (1962)

DENAEYER-DE SMET, S.: Bilan annuel des apports
d'éléments minéraux par les eaux de précipitation sous
couvert forestier dans la forêt mélangée caducifoliée
de Blaimont. Bulletin de la Société Royale Botanique
de Belge 99, 345-375 (1966)

DENAEYER-DE SMET, S.: Recherches sur l'écosystème
forêt. Série B: La Chênai mélangée calcicole de
Virelles-Blaimont. Contribution no 29. Apports d'élé-
ments minéraux par les eaux de précipitation, d'égoutte-
ment sous couvert forestier et d'écoulement le long des
troncs (1965, 1966, 1967). Bulletin de la Société
Royale Botanique de Belge 102, 355-372 (1969)

DFG (Deutsche Forschungs-Gemeinschaft): Kommission zur
Erforschung der Wirkungen luftverunreinigender Stoffe,
Mitteilung III vom 1. September 1968. Bad Godesberg (1968)

DOMRÖS, H.: Luftverunreinigung und Stadtklima im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet und ihre Auswirkung auf den Flechtenbewuchs der Bäume. Arbeiten zur Rheinischen Landeskunde 23 (1966)

DROVER, D.P.: Accession of sulphur in the rainwater at Perth and Nedlands, Western Australia. Journal of the Royal Society of Western Australia 43, 81-82 (1960)

DROVER, D.P. und BARRETT-LENNARD, I.I.: Accession of nitrogen (ammonia, nitrate and nitrite) in Western Australian wheat belt rains. Journal of the Australian Institute of Agricultural Science 22, 193-197 (1956)

DROZDOVA, V.N. und MAKHON'KO, E.P.: Content of trace elements in precipitation. Journal of Geophysical Research 75, 3610-3612 (1970)

DSIR (Department of Scientific and Industrial Research): The investigation of atmospheric pollution; a report on observations in the 10 years ending at 31st March, 1954, 27th report. London (1955)

DUVIGNEAUD, J. und DENAEYER-DE SMET, S.: Le cycle des éléments biogènes dans l'écosystème forêt (forêts tempérées caducifoliées). Travaux du Laboratoire de Botanique Systematique et de Phytogéographie de l'Université Libre de Bruxelles, No 58 (1964)

EGNER, H. und ERIKSSON, E.: Current data on the chemical composition of air and precipitation. Tellus 7 (1955) ab S. 134 und folgende Nummern

EGOROV, V.V., ZHIGALOVSEAYA, T.N. und MALAFHOV, S.G.:

Microelement content of surface air above the continent and the ocean. Journal of Geophysical Research 75, 3650-3656 (1970)

EGUNJOBI, J.I.: Ecosystem processes in a stand of *Ulex europaeus* L. I. Dry matter production, litterfall and efficiency of solar energy utilization. Journal of Ecology 59, 31-38 (1971)

EMANUELSSON, A., ERIKSSON, E. und EGNER, H.: Composition of atmospheric precipitation in Sweden. Tellus 6, 261-267 (1954)

ERIKSSON, E.: Composition of atmospheric precipitation. I. Nitrogen compounds. II. Sulfur, chloride, iodine compounds. Tellus 4, 215-232, 280-303 (1952)

ERIKSSON, E.: Air and precipitation as sources of nutrients. S. 774-792 in: Handbuch der Pflanzenernährung und Düngung, Band II/1 Wien (1966)

FALKE, H.: Probleme, Meßtechnik, Meßmethodik und Ergebnisse der Bestimmung des Staub- und Bakteriengehaltes der Luft in Anwendung auf Messungen in Braunschweig und Hannover. Dissertation, Braunschweig (1949)

FUCHS, B.: Pegelüberwachung des Verschmutzungsgrades der "Reinluft" durch die DFG. Umschau in Wissenschaft und Technik 70(5), 147-148 (1970)

GAMBEIL, A.W. und FISHER, D.W.: Occurrence of sulphate and nitrate in rainfall. Journal of Geophysical Research 69, 4203-4210 (1964)

GEORGII, H.W.: Untersuchungen über das Auswaschen atmosphärischer Spurenstoffe durch den Niederschlag. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 91, 107-111 (1963)

GEORGII, H.W. und BEILKE, S.: Atmospheric aerosol- and trace-gas washout. Final Scientific Report, Contract AF 61(052)-815. Frankfurt a.M. (1966)

GEORGII, H.W. und JOST, D.: Untersuchungen über die Verteilung von Spurengasen in der freien Atmosphäre. Pure and Applied Geophysics 59, 217-224 (1964)

GEORGII, H.W. und WEBER, G.: The chemical composition of individual rainfalls. Technical Note, Contract AF 61 (052)-249, Frankfurt a.M. (1960)

GERICKE, S. und KUMTES, B.: Pflanzennährstoffe in den atmosphärischen Niederschlägen. Die Phosphorsäure 17, 279-300 (1957)

GERSPER, P.L. und HOLOWAYCHUK, N.: Effect of stemflow water on a Miami soil under a beech tree. I. Morphological and physical properties. II. Chemical properties. Soil Science Society of America, Proceedings 34, 779-794 (1970)

GERSPER, P.L. und HOLOWAYCHUK, N.: Some effects of stemflow from forest canopy trees on chemical properties of soils. Ecology 52, 691-702 (1971)

GINER, R. und HESS, V.F.: Studie über die Verteilung der Aerosole in der Luft von Innsbruck und Umgebung. Gerlands Beiträge zur Geophysik 50, 22-43 (1937)

GORHAM, E.: Chemical composition of rain from Rosscahill in County Galway. Irish Naturalist's Journal 12, 122-126 (1957)

GORHAM, E.: The influence and importance of daily weather conditions in the supply of chloride, sulphate and other ions to fresh waters from atmospheric precipitation. Philosophical Transactions of the Royal Society, Ser. B, 241, 147-178 (1958)

GRUNERT, F.: Der biologische Stoffkreislauf in Kiefern-Buchen-Mischbeständen und in Kiefernbeständen. Albrecht-Thaer-Archiv 8, 435-452 (1964)

van HAUT, H. und STRATMANN, H.: Experimentelle Untersuchungen über die Wirkung von Stickstoffdioxid auf Pflanzen. Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissions- und Bodennutzungsschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 7, 50-70 (1967)

HERMAN, F.A. und GORHAM, E.: Total mineral material, acidity, sulphur, and nitrogen in rain at Kentville, Nova Scotia. Tellus 2, 180-183 (1957)

HESSE, P.R.: Sulphur and nitrogen changes in forest soils of East Africa. Plant and Soil 2, 86-96 (1957)

HETTICHE, H.O.: Benzpyrene und Spurenelemente in Großstadtluft. International Journal of Air and Water Pollution 8, 185-191 (1964)

HUTTON, J.T.: The redistribution of the more soluble chemical elements associated with soils as indicated by analysis of rain-water, soils and plants. 9th International Congress of Soil Science, Adelaide, Transactions 4, 313-322 (1968)

HUTTON, J.T. und LESLIE, T.I.: Accession of non-nitrogenous ions dissolved in rainwater to soils in Victoria. Australian Journal of Agricultural Research 9, 492-507 (1958)

INGHAM, G. (1950a): The mineral content of air and rain and its importance to agriculture. Journal of Agricultural Science 40, 55-61 (1950)

INGHAM, G. (1950b): Effect of materials absorbed from the atmosphere in maintaining soil fertility. Soil Science 70, 205-212 (1950)

JACOBS, W.C.: Preliminary report on a study of atmospheric chlorides. Monthly Water Review 65, 147-151 (1937)

JENSEN, J.: Undersøgelser over nedbørens indhold af plantenaerstoffer. Tidsskrift for Planteavl 65, 894-906 (1962)

JENSEN, J.: Some investigations on plant uptake of sulfur. Soil Science 95, 63-68 (1963)

JOHANSSON, C.: On sulfur problems in Swedish agriculture. Kungl. Lantbrukshögskolans Annaler 25, 57-169 (1959)

JOHANSSON, O.: Über die Schwefelversorgung der landwirtschaftlichen Kulturen in Schweden. Landwirtschaftliche Forschung 15, 1-6 (1962)

JONES, E.: Contribution of rainwater to the nutrient economy of soil in Northern Nigeria. Nature 168, 432 (1960)

JONES, E. und BRONFIELD, A.R.: Nitrogen in rainfall at Samura, Nigeria. Nature 227, 86 (1970)

JORDAN, H.V., BARDSLEY, C.E., ENSMINGER, L.E. und LUTZ, J.A.: Sulphur content of rainwater and atmosphere in southern states as related to crop needs. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 1196 (1959)

JORDAN, H.V. und REISENAUER, L.M.: Sulphur and soil fertility. U.S. Department of Agriculture, Yearbook of Agriculture 1957, 107-111 (1957)

JUNGE, C.E.: The chemical composition of atmospheric aerosols. I. Measurements at Round Hill field station, June-July 1953. Journal of Meteorology 11, 323-333 (1954)

JUNGE, C.E.: Recent investigations in air chemistry. Tellus 8, 127-139 (1956)

JUNGE, C.E.: Chemical analysis of aerosol particles and gas traces on the island of Hawaii. Tellus 9, 528-537 (1957)

JUNGE, C.E. (1958a): The distribution of ammonia and nitrate in rainwater over the United States. Transactions of the American Geophysical Union 39, 241-248 (1958)

JUNGE, C.E.: Sulphur in the atmosphere. Journal of Geophysical Research 65, 227-237 (1960)

JUNGE, C.E. und GUSTAFSON, P.E.: On the distribution of sea salt over the United States and its removal by precipitation. Tellus 9, 164-173 (1957)

JUNGE, C.E. und WERBY, R.T.: The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulphate in rain water over the United States. Journal of Meteorology 15, 417-425 (1958)

KATZ, M.: Sources of pollution. Proceedings of the Second National Air Pollution Symposium, 95-102 (1952)

KAUL, O.N. und BILLINGS, W.D.: Cation content of stem flow in some forest trees in North Carolina. Indian Forester 91, 367-370 (1965)

KELLER, H.: Beiträge zur Erfassung der durch schwefelige Säure hervorgerufenen Rauchschäden an Nadelhölzern. Forstwissenschaftliche Forschung 10 (1958)

KÖHLER, A. UND FLECK, W.: Konzentration gasförmiger Luftverunreinigungen in belasteten und "reinen" Gebieten. Staub 29, 499-503 (1969)

KRZYSCH, G.: Der N-, P- und K-Gehalt der Niederschläge in Dahlem. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung 82, 138-143 (1958)

KÜPPERS, E.: Über den Schwefelsäuregehalt von Schnee und Regenwasser. Zeitschrift für Angewandte Chemie 31 I, 74-76 (1918)

LABORATOIRE D'HYGIÈNE DE LA VILLE DE PARIS: Surveillance de la pollution atmosphérique dans le département de la Seine pendant l'année 1961. Paris (1963)

LÅG, J.: Relationship between the chemical composition of the precipitation and the contents of exchangeable ions in the humus layer of natural soils. Acta Agriculturae Scandinavica 18:3, 148-152 (1968)

LÅG, J.: Tilføring av plantenaeringstoffer med nedbøren i Norge. Forskning og Forsøk i Landbruket 14, 553-563 (1963)

LAHMANN, E., MORGENSTERN, W. und GRUPINSKI, I.: Schwefeldioxid-Immissionen im Raum Mannheim/Ludwigshafen. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 25 (1967)

LAHUE, M.D., PATE, J.B. und LODGE, Jr., J.P.: Atmospheric nitrous oxide concentrations in the humid tropics. Journal of Geophysical Research 75, 2922-2926 (1970)

LAMFADIUS, F.: Die Bedeutung der SO₂-Filterung des Waldes im Blickfeld der forstlichen Rauchschadens-therapie. Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17, 503-511 (1968)

LIESEGGANG, W.: Die Betriebsüblichkeit der Staubemissionen und die Ortsüblichkeit des Staubbiederschlages. Staub Nr. 24, 4-10 (1951)

LIESEGGANG, W. und NEILS, H.: Untersuchungen über die Mengen der in Niederschlagswässern enthaltenen Verunreinigungen. Kleine Mitteilungen des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 2, 306-312 (1933), 10, 350-355 (1934), 11, 248-251 (1935), 12, 314-318 (1936), 13, 347-351 (1937), 14, 112-117 (1938), 15, 204-208 (1939), 16, 222-225 (1940)

LIPMAN, J.G. und CONYBEARE, A.B.: Preliminary note on the inventory and balance sheet of plant nutrients in the United States. New Jersey Agric. Exper. Station, Bulletin 607 (1936)

LÖBNER, A.: Vergleichende Untersuchungen über den Staub-Gehalt der Großstadtluft im Winter und im Sommer. Kleine Mitteilungen des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 13, 181-200 (1937)

LÖBNER, A.: 10 Jahre Regenwasseranalyse - Ein Beitrag zur Ortsüblichkeit von Staubbiederschlägen. Der Gesundheitsingenieur 70, 196-200 (1940)

LÖBNER, A.: Ergebnisse von Regenwasseruntersuchungen in den Jahren 1940-1951. Staub Nr. 27, 443-448 (1951)

LÖBNER, A.: Ergebnisse von Staubbiederschlagsmessungen an verschiedenen Orten Deutschlands in den Jahren 1953 bis 1959. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 15 (1960)

LÖBNER, A.: Schwebstoffkonzentrationen in der atmosphärischen Luft verschiedener Länder. Staub Nr. 25, 221-225 (1965)

LODGE, Jr., J.P. und FATE, J.B.: Atmospheric gases and particulates in Panama. Science 153, 408-410 (1966)

Mac INTIRE, W.E., HARDIN, I.J. und HESTER, W.: Measurement of atmospheric fluorine. Industrial and Engineering Chemistry, Industrial Edition 44, 1365-1370 (1952)

MACKU, M., PODZINEK, J. und SRAHEK, L.: Results of chemical analysis of precipitation collected on territory of Czechoslovak Republic in 1959. Geofysikalni Sbornik No 124 (1959)

MADGWICK, H.A.I. und OVINGTON, J.D.: The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plots. Forestry 32, 1-22 (1959)

MAYER, R.: Bioelement-Transport im Niederschlagswasser und in der Bodenlösung eines Wald-Ökosystems. Göttinger Bodenkundliche Berichte 19, 1-119 (1971)

McCOLL, J.G.: Properties of some natural waters in a tropical wet forest of Costa Rica. Bio-Science 20, 1096-1100 (1970)

McMULLEN, T.B., FAORO, R.B. und MORGAN, G.B.: Profile of pollutant fractions in non urban suspended particulate matter. Journal of the Air Pollution Control Association 20, 369-372 (1970)

MEETHAM, A.R.: Natural removal of pollution from the atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 76, 359-371 (1950)

MEETHAM, A.R.: Atmospheric pollution. London (1952)

MEYER, J. und PAMPTER, E.: Nitrogen content of rainwater collected in the humid Central Congo basin. Nature 184, 717-718 (1959)

MILLER, N.H.J.: The amounts of nitrogen as ammonia and as nitric acid, and of chlorine in the rainwater collected at Rothamsted. Journal of Agricultural Science 1, 280-303 (1905)

MILLER, R.B.: The chemical composition of rainwater at Taita, New Zealand, 1956-1958. New Zealand Journal of Science 4, 844-853 (1961)

MILLER, R.B.: Plant nutrients in hard beech. III. The cycle of nutrients. New Zealand Journal of Science 6, 388-413 (1963)

MILLER, R.B.: Flows and cycles of macro- and micro-elements in a forest soil and its environment. 9th International Congress of Soil Science, Adelaide, Transactions 4, 323-331 (1968)

MINA, V.N.: Leaching of certain substances by precipitation from woody plants and its importance in the biological cycle. Soviet Soil Science 6, 600-617 (1965)

MUNTZ, A. und MARCANO, V.: Sur la proportion de nitrates contenus dans les pluies des régions tropicales. Comptes rendus hebdomadaires des Séances de l'Academy de Sciences 105, 1062-1064 (1889)

NEUWIRTH, R.: Ergebnisse neuerer luft- und niederschlagschemischer Untersuchungen und ihre Bedeutung für die Forstwirtschaft. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 128, 147-150 (1957)

NEUWIRTH, R.: Aerosoluntersuchungen in Erndlungsgebieten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 91, 113-116 (1963)

NEUWIRTH, R.: Der Wald als Aerosolfilter. Der Forst- und Holzwirt 20, 220-223 (1965)

NEUWIRTH, R.: Vorläufiger Bericht über Messungen der Luftreinheit im Waldlabor am Uhlberg bei der Zähringer Burg. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 139, 37-39 (1968)

NJHLGARD, B.: Precipitation, its chemical composition and effect on soil water in a beech and spruce forest in South Sweden. Oikos 21, 208-217 (1970)

NYE, P.H.: Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. Plant and Soil 13, 333-346 (1961)

OELSCHLÄGER, W.: Die Verunreinigung der Atmosphäre durch Fluor. Staub 25, 528-532 (1965)

OST, H.: Die Verbreitung der Schwefelsäure in der Atmosphäre. Chemische Industrie 23, 292-296 (1900)

PESPE, F.: Biochemische Phänomene im Boden Exhalationsgebiete. S. 33-39 in Air Pollution. Wageningen (1968)

PETRENCHUK, O.P. und SEMEZNEVA, E.S.: Chemical composition of precipitation in regions of the Soviet Union. Journal of Geophysical Research 75, 3629-3634 (1970)

REAFF, C.: Über Lysimeterversuche. Der Forschungsdienst, Sonderheft 6, 102-114 (1937)

PINCUS und RÖHLIG, J.: Untersuchungen über den Stickstoff- resp. Ammoniak- und Salpetersäuregehalt der atmosphärischen Niederschläge. Die Landwirtschaftlichen Versuchsstationen 9, 465-476 (1867)

PONOMAREVA, V.V., ROZHNOVA, T.A. und SOTNIKOVA, N.S.:
Lysimetric observations on the leaching of elements
in podzolic soils. 9th International Congress of
Soil Science, Adelaide, Transactions 1, 155-164 (1968)

RICHARD, C. und VIALARD-GOUDOU, A.: Composition
chimique de l'eau de pluie à Saigon. Comptes rendus
hebdomadaires des Séances de l'Academy de Sciences
237, 1548-1550 (1953)

RIEHM, H.: Die Bestimmung der Pflanzennährstoffe im
Regenwasser und in der Luft unter besonderer Bertick-
sichtigung der Stickstoffverbindungen. Agrochimica 5,
174-188 (1961)

RIEHM, H.: Pflanzennährstoffe in den atmosphärischen
Niederschlägen unter besonderer Berücksichtigung des
Schwefels. 5. Sympos. Internazion., Agrochimica su
"Lo zolfo in agricoltura", 453-472 (1964)

RIEHM, H. und QUELLMALZ, E.: Die Bestimmung der
Pflanzennährstoffe im Regenwasser und in der Luft
und ihre Bedeutung für die Landwirtschaft. S. 171-183
in: RIEHM, H. (Hrsg.): Hundert Jahre Staatliche Land-
wirtschaftliche Versuchs- und Forschungsanstalt Augusten-
berg. Karlsruhe (1959)

RIEHM, H., QUELLMALZ, E. und KRAUS, M.: Ergebnisse
atmosphärisch-chemischer Untersuchungen in Mittel-
europa. Zentralblatt für Biologische Aerosol-Forschung
12, 434-454 (1965)

RÖNICKE, G.: Langzeitwirkungen von Luftverunreinigungen.
Natur und Landschaft 44, 202-204 (1969)

RUSSEL, F.U. und RICHARDS, F.H.: The amounts and composition of rain and snow falling at Rothamstad. Journal of Agricultural Science 2, 309-337 (1919)

SCHARRER, K. und FAST, H.: Untersuchungen über die dem Boden durch die Niederschläge zugeführten Pflanzennährstoffe. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde 55, 97-106 (1951)

SCHARRER, K. und SCHROPI, W.: Über den Stickstoffgehalt der Niederschläge. Der Forschungsdienst 5, 469-472 (1938)

von SCHROEDER, J.: Untersuchung über die Mineralbestandteile des Regenwassers. Tharandter Forstliches Jahrbuch 23, 68-87 (1873)

SEAY, W.A.: Sulfur contained in precipitation in Kentucky. Agronomy Journal 49, 453-454 (1957)

STEFAN, K. und POLLANSCHÜTZ, J.: Entstehung und Entwicklung eines Rauchschaengebietes in der Umgebung eines Magnesitwerkes. Allgemeine Forstzeitung 78, 51-54 (1967)

STEVENSON, C.M.: An analysis of the chemical composition of rainwater and air over the British Isles for the years 1959-64. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 94, 56-70 (1968)

SVIRIDOVA, I.K.: Resultaty izucenija vymyvanija azota i zol'nyh elementov dozdevymi osadkami iz kron drevosnyh porod. Doklady Akad. Nauk SSSR 133, 706-708 (1960)

TAMES, C., AGUIRRE, J. und PERAL, M.T.: Importancia de los compuestos nitrogenados aportados por las precipitaciones atmosféricas. Boletín, Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas 12(26), 195-231 (1952)

TARRANT, R.F. et al.: Nitrogen content of precipitation in a coastal Oregon forest opening. Tellus 20, 554-556 (1968)

THORNTON, I.: Nutrient content of rain water in the Gambia. Nature 205, 1025 (1965)

TSYGANENKO, P.P.: (Role of the aeolian factor in the salt balance of arid lands). Vestnik Leningradskogo Universiteta (1956). zitiert in: PONOMAREVA, V.V. et al. (1968)

U.S. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE, PUBLIC HEALTH SERVICE: Air pollution measurements of the national air sampling network. Analyses of suspended particulate samples collected 1953-1957. besprochen in: Staub 19, 339 (1959)

VIRO, P.J.: Loss of nutrients and the natural nutrient balance of the soil in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 42 (1), 1-51 (1955)

VISSER, S.: Chemical composition of rain water in Kampala, Uganda, and its relation to meteorological and topographical conditions. Journal of Geophysical Research 66, 3759-3765 (1961)

WEBER, E.: Untersuchungen atmosphärischer Spurenstoffe in den Alpen. *Geofisica e Meteorologia* 11, 203 ff (1963)

WEINMANN, H.: The nitrogen content of rainwater in Southern Rhodesia. *South African Journal of Science* 52, 82-84 (1955)

WETSELAAR, R. und HUTTON, J.T.: The ionic composition of rain water at Katherine, N.T., and its part in the cycling of plant nutrients. *Australian Journal of Agricultural Research* 14, 319-329 (1963)

WHITE, E.J. und TURNER, F.: A method of estimating income of nutrients in a catch of airborne particles by a woodland canopy. *Journal of Applied Ecology* 7, 441-461 (1970)

WHITEHEAD, H.C. und FETH, J.H.: Chemical composition of rain, dry fallout, bulk precipitation at Menlo Park, California, 1957-1959. *Journal of Geophysical Research* 69, 3319-3333 (1964)

WIEIER, A.: Untersuchungen über die Einwirkung schwefliger Säure auf die Pflanzen. Berlin (1905)

WIESNER, G.H.: Nitrogen and chlorine in rain and snow. *Chemical News* 109, 85-87 (1914)

WILL, G.M.: Removal of mineral nutrients from tree crowns by rain. *Nature* 176, 1180 (1955)

WILL, G.M.: Nutrient return in litter and rainfall under some exotic conifer stands in New Zealand. New Zealand Journal of Agricultural Research 2, 719-734 (1959)

WISLICENUS, H.: Nachweis der schwefligen Säure in der Waldluft des Tharandter Waldes. Tharandter Forstliches Jahrbuch 48, 173-184 (1898)

ZENKER, H.: Waldeinfluß auf Kondensationskerne und Lufthygiene. Zeitschrift für Meteorologie 8, 150-159 (1954)

ZUBER, R.: Pflanzennährstoffe aus der Atmosphäre. Mitteilungen auf dem Gebiet der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene 53, 499-507 (1962)

Untersuchungen über den Bioelementgehalt in der Kronentraufe

von B. Ulrich, U. Steinhardt und A. Müller-Suur

gefördert mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Az. UI 35/17)

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 29, 133 – 192
(1973)**

Inhalt

1. Einführung
 2. Regenwasseruntersuchungen Witzenhausen
 3. Ableitung von Annahmen über die SO_2 -Ausfilterung
 4. Regenwasseruntersuchungen unter Fichte und Buche auf verschiedenen Standorten
 5. Regenwasseruntersuchungen unter Fichte und Buche im Solling
 6. Regenwasseruntersuchungen unter isolierten Fichten im Solling
 7. Niederschlagsuntersuchungen im Raum östlich Kassel
 8. Staubuntersuchungen
 9. Diskussion
- Zusammenfassung
Literatur

1. Einführung

Zur Erfassung des Bioelementhaushaltes eines Standortes ist es notwendig, den Standort und die auf ihm stockende Vegetation zusammen als Ökosystem zu betrachten und in diesem System Bioelementvorräte und Bioelementflüsse zu untersuchen.

Die Flüsse lassen sich in

I N P U T (Einführen in das System hinein),

O U T P U T (Ausführen aus dem System heraus) und

T U R N - O V E R (Flüsse zwischen den Kompartimenten - den Teilsystemen - des Ökosystems) gliedern.

Input aus der Atmosphäre erfolgt in Form von in Niederschlag transportierten Bioelementen, sedimentiertem Staub, ausgefilterten Aerosolen und absorbierten Gasen. Da zum einen Niederschlagsproben leicht zu gewinnen sind und zum anderen die Elementkonzentrationen in Niederschlagswasser (Regen, aufgetauter Schnee, abgetauter Rahreif usw.) nicht nur für die Waldernährung, sondern auch für die Lufthygiene von Bedeutung sind, liegen in der Literatur große Mengen von Daten über Bioelementgehalte in den Niederschlägen vor. Niederschlagsproben, die unter dem Kronendach von Waldbeständen (Kronentraufe, Canopy drip, Leachates) oder von dem an den Stämmen des Bestandes herablaufenden Regenwasser (Stammablauf, Stemflow) gewonnen werden, kennzeichnen jedoch nicht mehr den Input, der mit dem Niederschlag erfolgt, sondern sind bei der Passage durch das Kronendach in ihrem Elementgehalt verändert worden. Alle Untersuchungen ergaben eine - je nach Bioelement unterschiedliche - Erhöhung der Konzentration, die bei Phosphor und Stickstoff am geringsten (praktisch nicht signifikant) und bei Kalium und Mangan i.a. am stärksten ist. Diese Konzentrationserhöhung kann bedingt sein durch ausgefilterte Aerosole, ausgelöste Gase und Ausscheidungen sowie Auswaschungen aus Blättern und Rinde. Ganz oder zum Teil auf die

Filterwirkung, die der Wald auf Aerosole ausübt, sind diese Anreicherungen nach OVERTON (1962), ERIKSSON (1955), CARLISLE et al. (1966), GRUNERT (1964), MADGWICK und OVERTON (1959), MILLER (1963) und TAMM (1953) zurückzuführen. STENLID (1958), MINA (1965), NIHLGARD (1970), SOERIANEGARA (1970), THOMAS et al. (1967), VOIGT (1960) und ATTIWILL (1966) messen der Filterwirkung nur geringe Bedeutung zu und führen die Anreicherungen auf Auswaschungen aus den Blättern zurück. So führt zum Beispiel NIHLGARD die höheren Konzentrationen in der Kronentraufe der Nadelhölzer nicht auf höhere Filterwirkung der Nadeln zurück, sondern darauf, daß sich stets absterbende und tote Nadeln in der Krone befinden.

Anreicherungen von Ammoniak führt INGHAM (1950) auf die Absorption von feuchten Blättern zurück.

Aus den widersprüchlichen Deutungen zeichnet sich insgesamt in der Literatur bisher folgendes Bild ab.

Für die mobileren l-wertigen Elemente Na und K wird im allgemeinen Auswaschung als Ursache angenommen, wobei K von allen Elementen am leichtesten ausgewaschen wird (STENLID, 1958; CARLISLE et al., 1966; ATTIWILL, 1966; MCCOLL, 1971; NYE, 1961; DENAEYER DE SMET, 1962). Mit destilliertem Wasser abgewaschene Blätter ergaben keine wesentlich anderen Gehalte an K in der Blattanalyse als ungereinigte. Die K-Gehalte in den analysierten Verunreinigungen machten, bezogen auf die Gehalte in den Blättern, nur wenige ppm aus (DENAEYER DE SMET, 1962). Besonders hohe Werte traten im Herbst, trotz hoher Regenwassermengen, mit dem Absterben der Blätter auf (DENAEYER DE SMET, 1962; MILLER, 1963).

Die Anreicherung des Na ist sehr unterschiedlich.

Beim Kalzium scheint der Anteil der Plattverunreinigungen weitaus größer, da der Gehalt nach langen Trockenperioden sowohl im Freiland-Niederschlag als auch im Kronentraufwasser ansteigt (DENAEYER DE SMET, 1962).

Auch war der Anteil des Ca in den abgewaschenen Blattverunreinigungen weitaus größer. Auswaschung scheint nur beim Absterben der Blätter im Herbst eine Rolle zu spielen. Nach GRUNERT, (1964) der gegen Verstaubung durch Plastikfolie isolierte und ungeschützte Zweige analysierte, machte der Staubeinfluß sich neben geringen Erhöhungen des Al- und Si-Gehaltes vor allem im Ca-Gehalt bemerkbar. Der Phosphorgehalt war stets sehr niedrig; stärkere Anreicherungen ergaben sich nur zur Zeit des Absterbens des Blätter (MILLER, 1963). Von den übrigen Anionen erfährt vor allem das Bikarbonation eine starke Anreicherung (NYE, 1961).

Neben den aufgeführten Bioelementen enthält das Kronentraufenwasser auch noch erhebliche Mengen organischer löslicher Substanzen (BRUCKERT et al., 1971). Sie können nach CARLISLE (1965) bis zu 86 kg/ha und Monat ausmachen und haben nur einen geringen N-Gehalt aber hohe Kohlehydratgehalte. Trotz ihres geringen N-Gehaltes ist der Anteil des organischen Stickstoffs am Gesamt-Stickstoff erheblich (TARRANT et al., 1958; WILSON, 1959). Auf die Bedeutung der organischen Substanzen weist auch die Liste der "leached metabolites" von TUKEY und MORGAN (1962) hin. Sie können neben dem Bikarbonation in vielen Fällen die Unterschiede zwischen der Gesamtmenge an Kationen und an Anionen erklären, insbesondere bei den sauren Niederschlägen, wo das Carbonat keine Rolle mehr spielt.

Unter Leaching verstanden MANN und WALLACE (1925), die den Begriff zuerst einführten (siehe auch WALLACE, 1930), die Extraktion von Elementen aus gewässerten Blättern oder aus beregneten absterbenden Blättern. Später erweiterte sich der Begriff, und man versteht heute unter Leaching den Transport von Substanzen von Pflanzen durch

wässrige Lösungen (Regen, Tau usw.), wobei das Phänomen als solches benannt wird und die Frage nach der Herkunft der "leached substances" vernachlässigt wird (TUKEY jr., 1970). Leaching stellt also grundsätzlich nur erst einmal eine Beschreibung, keine Erklärung des Phänomens der Erhöhung der Bioelementkonzentrationen bei der Passage durch das Kronendach dar, wobei in den Untersuchungen jedoch immer die Verlagerung von Substanzen aus den Blättern im Vordergrund stand. TUKEY und MORGAN (1962) stellten die beeinflussenden Faktoren tabellarisch zusammen.

Faktoren, die die Auswaschbarkeit von
Metaboliten beeinflussen

Innere	Äußere
Art und Eigenschaften der Pflanze	Auswaschungslösung
Ausgewaschene Metabolite	Licht - Dunkelheit
Blatt-Characteristika	Temperatur
a) Benetzbarkeit	
b) Wachsschichten	Dauer der Auswaschung
c) Kutikula	
d) Behaarung	Intensität und Menge des Regens
e) Hydäthoden	
Physiologisches Alter der Blätter	Blattbeschädigungen
Ernährungszustand der Pflanze	Tau
Physiologische Störungen	Nährstoffsituation im Durchwurzelungs- medium

Zum Mechanismus des Leaching brachte ARENS (1934) einen Beitrag. Er faßte diesen Prozeß als aktiven Ausscheidungs-
vorgang der Pflanzen auf und nannte ihn kutikuläre Ex-
kretion. Der aktive Ausscheidungsprozeß wurde angenom-
men, weil die in seinen Versuchen ausgeschiedenen Stoffe

im Gegensatz zum sauren Zellsaft alkalisch waren.

LAUSBERG (1935) unterstützte mit ihren Untersuchungen diese Hypothese und bestätigte die Exkretion auch in ihrer Höhe. Die Zahlenwerte der Ausscheidungen, die ARENS und LAUSBERG nannten, waren jedoch sehr hoch. Sie würden bedeuten, daß der gesamte Bioelementgehalt der Pflanze am Standort mehrmals umgesetzt würde (s. Tabelle 1).

Dies wurde von ENGEL (1939), der als erster Kontrolluntersuchungen anstellte und dabei weder entsprechend hohe Konzentrationen noch pH-Werte im alkalischen Bereich feststellen konnte, aufgrund seiner Ergebnisse angezweifelt. Er wies auf die Möglichkeit der Beteiligung von Staub als Blattverunreinigung an den hohen Werten hin. THORNE (1954) konnte keine Verringerung der Bioelementgehalte in Blättern feststellen, wenn die Blätter vorher gewaschen worden waren. Auch LUNDEGARDH (1954) maß der Salzausscheidung nur untergeordnete Bedeutung bei. ENGEL ging jedoch keineswegs so weit, die "kutikuläre Exkretion" ganz zu verneinen. Er ging nur von geringeren Werten aus und bezweifelte, daß eine aktive Ausscheidung stattfinden würde; er sah die Ursache in passiver Auswaschung. Ebenfalls passive Auswaschung nahm SCHOCH (1955) als Ursache an. Sie bestätigte in ihren Ergebnissen die Größenordnungen von ENGEL, die erheblich unter denen von ARENS lagen (siehe Tabelle 1), wobei zwar der Vergleich unterschiedlicher Pflanzengattungen fragwürdig bleibt. Sie sprach entsprechend nicht mehr von Exkretion sondern von "Kutikulärer Rekretion", da es sich nicht mehr um pflanzliche Metabolite handelte (FREY-WYSSLING, 1935).

Der Mechanismus der Rekretion war damit aber noch nicht geklärt. "Exosmose" (LEPESCHKIN, 1948) konnte als Erklärung nicht in Frage kommen, da die Geschwindigkeiten osmotischer Vorgänge zum Transport so großer Mengen

Tabelle 1:

Rekretmengen pro ha und Jahr für K und Ca von verschiedenen Autoren

Jährlich ausgeschiedene Rekrete bei *Fagus silvatica* nach ARENS (1934)Jährliche Bioelementzufuhr mit der Kronentraufe
unter *Fagus silvatica* in Solling nach MAYER (1971)

	Gehalt in Blättern kg/ha	Oxidwerte kg/ha/Jahr	Rekretmenge	Elementwerte kg/ha/Jahr	kg/ha/Jahr	
Asche	109,5	260	= 2,4 x Gehalt			
K ₂ O	16,2	135	= 8,3 x Gehalt	112,07	18,1	K
CaO	38,9	62	= 1,6 x Gehalt	44,31	26,6	Ca

Jährlich ausgeschiedene Rekrete bei Tabak nach SCHOCH (1955)

Asche	250					
K ₂ O	92	62	= 0,7 x Gehalt	52		
CaO	70	7,3	= 0,1 x Gehalt	5,2		

nicht ausreichten.

ROUSCHIAL undSTRUGGER (1940) wiesen darauf hin, daß nach ihren Forschungen mit Kaliumrhodanit jede Parenchymzelle von einem Nährsalzstrom (Transpirationsstrom) umgeben ist, der die Salzmengen enthält, die vom Zellplasma nicht aufgenommen werden können und der als Quelle der kutikulären Rekretion dienen kann, so daß, - unabhängig von der Permeabilität der Protoplasten -, ein relativ schneller Salztransport durch das Parenchymgewebe erfolgen kann. Damit war auch gleichzeitig gezeigt, daß keine aktive Exkretion, wie sie ARENS annahm, erfolgte, sondern eine passive Auswaschung.

Neuere Untersuchungen (MECKLENBURG et al., 1966) bestätigen, daß tatsächlich im Überschuß aufgenommene Kationen, die austauschbare Kationen-Pools an Zellwänden und der Kutikula bilden, bei der Auswaschung vorherrschen. Es werden fast keine Kationen aus dem Zellinnern ausgewaschen. Durch Austauschreaktionen mit der Auswaschungslösung (z.B. Niederschlag) werden die Kationen in der Kutikula durch Wasserstoff-Ionen ersetzt oder bzw. und es findet auch ein direkter Austausch über den Translokationsstrom im Blatt mit der Auswaschungslösung durch Massenfluß über Kutikulafreie Blattstellen statt. Von YAMADA et al. (1966) wurden für verschiedene Ionen solche Positionen für die Bindung austauschbarer Ionen lokalisiert. Die ausgewaschenen Kationen gehen Verbindungen mit gelöstem CO_2 ein und bilden alkalische Karbonate, die sich praktisch unbegrenzt ansammeln können, selbst bis zur Krustenbildung. Dies erklärt die hohe Konzentration von Bikarbonationen und auch den Überfluß von Kationen in der Lösung. Ebenso läßt sich somit die Unabhängigkeit der Auswaschung von der Menge der Auswaschungslösung erklären, da nur die Oberfläche befeuchtet werden muß. Ein Ansteigen der Lösungsmenge bringt also keine Intensivierung des Auswaschungsvorganges mit

sich, womit sich auch die höhere Effektivität feinen Nieselregens gegenüber kurzen, heftigen Schauern erklärt (TUKEY jr., 1970; WITTWER und TEUBNER, 1959). Damit in Übereinstimmung steht auch, daß die höchsten Nährstoffverluste durch Leaching in den ersten Stunden auftreten (STENLID, 1958). Durch diesen Austausch über "exchangeable cation pools" wird klar, daß die stomatische Transpiration nicht der primäre Transportweg für die Nährstoffabgabe der Blätter sein muß, da außerdem auch Leaching an Blättern ohne Stomata auftrat (TUKEY jr., 1970).

Im folgenden Bericht werden im Wesentlichen die Ergebnisse von Regenwasser-Untersuchungen diskutiert, die im Lauf der letzten Jahre durchgeführt wurden. Z.T. handelte es sich hierbei um Testversuche, mit denen methodische Ansätze getestet werden sollten zur Abklärung der Frage, inwieweit der Bioelementgehalt in der Kronentraufe auf atmosphärischem Input oder internem Umsatz beruht. Die Versuchsanlagen entsprachen daher nicht durchweg den Anforderungen, die für eine kritische Auswertung gestellt werden müssen.

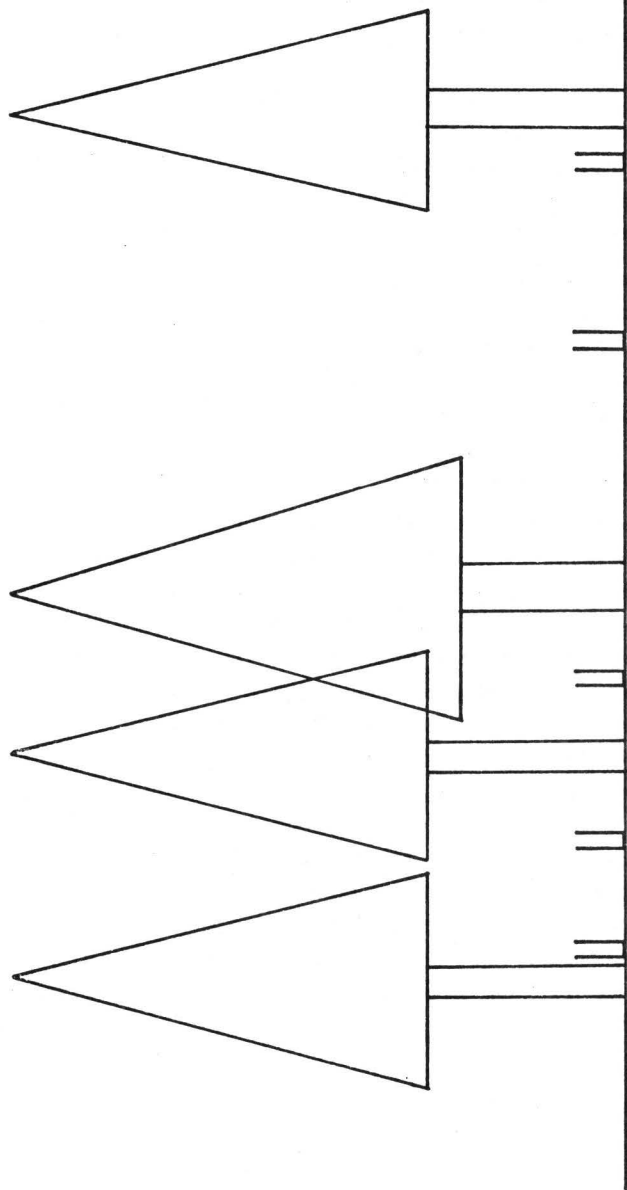
2. Regenwasseruntersuchungen Witzenhausen

In den Regenwasseruntersuchungen im Forstamt Witzenhausen in der Zeit vom 1.9.1965 bis zum 30.6.1966 sollte der Einfluß der Meßposition im Bestand auf den Bioelementgehalt der Niederschläge untersucht werden. Die verschiedenen Meßpositionen werden in der Abbildung 1 dargestellt. Als Auffanggeräte dienten 111 Kunststoffeimer mit einer Auffangfläche von $360,27 \text{ cm}^2$. Die Entleerung erfolgte in 1-monatigem Abstand; die Verdunstung wurde durch Paraffinölzugabe herabgesetzt.

Die Analysenwerte und ihre chemischen Kennzahlen, - wobei Proben, deren stark überhöhte P-Werte auf Verun-

ABB. 1

MESSPOSITIONEN IM BESTAND



MITTL. TRAUFBEREICH

NICHT BESCHIRMT

DOPPELTRAUFE

EINFACHTRAUFE

STAMM

reinigung schließen ließen, ausgeschieden wurden -, wurden in einem paarweisen Mittelwertvergleich (GEBHARDT) statistisch untersucht. Die gewonnenen statistischen Aussagen sind jedoch kritisch zu betrachten, da der BARTLETT-Test in den meisten Fällen keine gleichen Varianzen ergab.

Die Elementzufuhr pro ha und Jahr ist in Tabelle 2 in Absolut- und Relativwerten mit ihrer Streuung in % des Mittels dargestellt. Tabelle 2 zeigt die Signifikanzmatrix für die Unterschiede zwischen den verschiedenen Positionen.

Diese Tabellen enthalten außerdem die Niederschlagsmengen.

Die Elementkonzentrationen enthält die Tabelle 3 a und eine entsprechende Signifikanzmatrix ist in Tabelle 3 b gegeben.

Die Äquivalentbrüche und deren Signifikanz zeigen die Tabellen 4 a und 4 b.

Es zeigt sich, daß allen Meßpositionen im Bestand deutlich höhere Elementmengen zugeführt wurden als der Freifläche (siehe Abbildung 2). Diese Unterschiede sind, - abgesehen vom Phosphor, bei dem in diesem Versuch nirgends signifikante Unterschiede festgestellt werden konnten -, hochsignifikant. Da auf der Freifläche jedoch, - ebenfalls überall hochsignifikant -, mehr Niederschlag als im Bestand fiel, müssen diese Unterschiede durch Erhöhung der Elementkonzentrationen bedingt sein, die auch überall - mit Ausnahme des Phosphors - hochsignifikant vorliegt. Der Phosphor zeigt zwar auch eine leichte Erhöhung der Konzentrationen, die jedoch nur für die nicht beschirmte Fläche und die Einfachtraufe signifikant ist. Da die Niederschlagshöhe in diesen beiden Positionen aber am geringsten ist, wirkt sich die

signifikante Konzentrationserhöhung in der Gesamtzufuhr
nicht mehr signifikant aus.

Tabelle 2a: Gesamtschleimstoffaufnahme durch Niederschlag in Witzenhausen pro ha und Jahr

(Oberer Wert = Menge in val pro ha und Jahr; unterer Wert = Standardabweichung in Prozent vom Gesamtmittel) (Stickstoff in g-atom pro ha und Jahr)

	mm Niederschlag	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Σc^+	Cl	P	S	Σc^-	N
Freifläche	866	863	124	110	452	32,8	27,7	27,5	477	1796	119	2,05	1104	1226	426
	1,5	5,0	13,0	11,0	3,2	32,0	9,3	14,0	3,6	2,6	14,0	7,3	3,1	3,0	25,0
Nicht beschirmt	674	1493	341	390	1204	326	60,0	116	895	4229	500	2,19	3380	3883	718
	1,0	8,4	9,7	8,3	7,4	7,7	9,0	6,0	7,7	7,8	9,1	10,0	8,4	8,2	9,5
Einfachtraufe	700	2138	400	517	1624	412	85,6	140	1267	5739	584	2,27	4724	5310	865
	1,6	8,9	5,7	6,7	6,3	5,0	6,8	6,2	6,6	5,9	6,6	10,0	6,6	6,5	5,6
Doppeltraufe	717	2291	439	565	1738	472	87,6	143	1323	6176	678	2,13	5220	5900	1032
	2,1	6,8	7,3	8,0	7,0	8,1	8,3	8,9	7,8	6,8	10,0	26,0	7,5	7,8	9,0
Mittlerer Kronenbereich	726	2752	486	630	2056	508	108	157	1662	7252	758	2,11	6224	7003	1178
	1,5	6,5	5,7	6,5	6,4	5,9	7,0	5,5	6,2	5,9	6,1	15,0	6,4	6,3	8,5
Stammnähe	751	3424	530	670	2258	564	120	187	1828	8363	793	2,18	7838	8634	1276
	7,2	10,2	8,2	7,4	9,3	10,0	12,0	9,2	8,5	8,3	7,0	22,0	9,6	9,2	12,0
Relativwerte															
Freifläche	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Nicht beschirmt	77	173	275	354	266	993	216	421	187	235	420	106	306	316	168
Einfachtraufe	80	247	322	470	359	1256	309	509	265	329	490	110	427	433	203
Doppeltraufe	82	265	354	513	384	1439	316	520	277	343	569	103	472	481	242
Mittlerer Kronenbereich	83	318	391	572	454	1548	389	570	348	403	636	102	563	571	276
Stammnähe	86	396	427	609	499	1719	433	680	383	465	666	106	709	704	299

Tabelle 3a:

Bioelementkonzentrationen im Regenwasser in Wittenhausen

	pH	Na	K	Ca	Mg	Al	Fe	Mn	P	S	Cl	N	Σc^+	Σc^-
		$\mu\text{-g-ion/l}$										$\mu\text{-g-atom/l}$	$\mu\text{-val/l}$	$\mu\text{-val/l}$
Freifläche	4,01	14,22	12,67	26,11	1,89	6,33	1,61	1,58	0,242	63,8	13,7	48,1	208	142
Nicht beschirmt	3,72	50,69	58,50	89,81	24,42	15,06	4,47	8,62	0,338	252,0	74,5	106,8	630	579
Einfachtraufe	3,55	56,91	74,13	115,70	29,39	20,31	6,11	9,97	0,337	336,7	83,3	123,4	818	757
Doppeltraufe	3,53	61,27	79,00	121,40	33,18	20,78	6,12	9,95	0,306	363,9	94,1	143,3	863	822
Mittlerer Kronenbereich	3,46	67,12	86,96	141,70	35,15	25,69	7,46	12,31	0,302	430,2	104,3	163,2	958	965
Stammhöhe	3,38	71,30	89,70	150,00	38,20	27,50	8,13	12,55	0,316	527,8	106,8	170,1	1125	1163

150

Tabelle 3b:

Signifikanzmatrix der Bioelementkonzentrationen im Regenwasser in Witzhausen

	Freifläche				Nicht beschirmt				Einfachtraufe				Doppeltraufe				Mittlerer Kronenbereich			
Nicht beschirmt	xxx	xxx	xxx	xxx																
	xxx	xxx	xxx	xxx																
	xx	x	xxx	xxx																
	xxx	xxx																		
Einfachtraufe	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	-	x	xx												
	xxx	xxx	xxx	xxx	x	xx	xx	-												
	xxx	-	xxx	xxx	-	-	xx	-												
	xxx	xxx			xx	x														
Doppeltraufe	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	x	xx	-	-	-	-								
	xxx	xxx	xxx	xxx	x	xx	x	-	-	-	-	-								
	xxx	-	xxx	xxx	x	-	xx	-	-	-	-	-								
	xxx	xxx			xx	xx			-	-										
Mittlerer Kronenbereich	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x	xxx	xxx	x	x	-	x	-	-	-	-				
	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	x	x	x	-	-	-	-	-				
	xxx	-	xxx	xxx	xx	-	xxx	xx	x	-	x	x	-	-	-	-				
	xxx	xxx			xxx	xxx			x	x			-	-						
Stammnähe	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x	xxx	xxx	xxx	x	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-
	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	xxx	xx	xx	-	x	x	x	-	x	-	-	-	-	-	-
	xxx	-	xxx	xxx	xx	-	xxx	x	-	-	xx	x	-	-	x	-	-	-	-	-
	xxx	xxx			xxx	xxx			xx	xxx			x	x			-	-		

Positionen im Signifikanzfeld

pH	Na	K	Ca
Mg	Al	Fe	Mn
N	P	S	Cl
c ⁺	c ⁻		

Signifikant bei 0,1%, 1% und 5% Überschreitungswahrscheinlichkeit = xxx, xx und x

Nicht signifikant = -

Tabelle 4a:

Äquivalentbrüche der Konzentrationen im Regenwasser in Witzenhausen

(Oberer Wert = Äquivalentbruch; unterer Wert = Standardabweichung in Prozent vom Gesamtmittel)

	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Cl	S
Freifläche	0,4805	0,0691	0,0615	0,2519	0,0177	0,0153	0,0150	0,0890	0,0967	0,9015
	4,7	13,6	11,3	2,3	29,5	8,4	13,3	4,1	12,6	1,3
Nicht beschirmt	0,3432	0,0824	0,0930	0,2884	0,0785	0,0141	0,0285	0,0719	0,1280	0,8714
	4,3	6,6	4,5	1,9	4,6	3,2	4,1	3,5	5,5	0,8
Einfachtraufe	0,3701	0,0706	0,0900	0,2823	0,0733	0,0149	0,0246	0,0741	0,1110	0,8885
	2,1	3,3	3,2	1,7	3,0	4,1	3,5	4,9	3,6	0,5
Doppeltraufe	0,3698	0,0713	0,0917	0,2815	0,0773	0,0141	0,0228	0,0716	0,1126	0,8871
	4,7	4,1	4,6	2,1	7,0	4,0	4,5	4,3	4,5	0,6
Mittlerer Kronenbereich	0,3792	0,0678	0,0868	0,2821	0,0709	0,0148	0,0223	0,0762	0,1098	0,8899
	2,5	2,5	3,1	1,5	2,8	2,4	4,3	2,0	2,9	0,4
Stammnähe	0,4097	0,0637	0,0813	0,2688	0,0667	0,0141	0,0225	0,0732	0,0945	0,9053
	2,5	2,6	3,9	2,2	5,5	4,3	6,2	3,4	5,6	0,6

Tabelle 4 b:

Signifikanzmatrix der Äquivalentbrüche der Konzentrationen im Regenwasser in Witzenhausen

	Freifläche				Nicht beschirmt				Einfachtraufe				Doppeltraufe				Mittlerer Kronenbereich			
Nicht beschirmt	xxx	-	xxx	xxx																
	xxx	-	xxx	xxx																
	x	x	xxx	xxx																
Einfachtraufe	xxx	-	xxx	xxx	-	-	-	-												
	xxx	-	xxx	x	-	-	xx	-												
	-	-	xxx	xxx	x	x	xx	x												
Doppeltraufe	xxx	-	xxx	xx	-	-	-	-	-	-	-	-								
	xxx	-	xx	xx	-	-	xx	-	-	-	-	-								
	-	-	xxx	xxx	-	-	xx	xx	-	-	-	-								
Mittlerer Kronenbereich	xxx	-	xxx	xxx	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	xxx	-	xxx	xxx	-	-	xxx	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	-	-	xxx	xxx	x	-	xxx	xxx	-	-	x	x	-	-	-	-				
Stammhöhe	x	-	x	-	xxx	xx	x	x	xx	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
	xxx	-	xx	xx	-	-	xx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	x	x	xx	xxx	x	x	x	x	x	x	-	-

Positionen im Signifikanzfeld

H	Na	K	Ca
Mg	Fe	Mn	Al
Cl	S	$\sum c^+$	$\sum c^-$

Signifikant bei 0,1%, 1% und 5% Überschreitungswahrscheinlichkeit = xxx, xx und x

Nicht signifikant = -

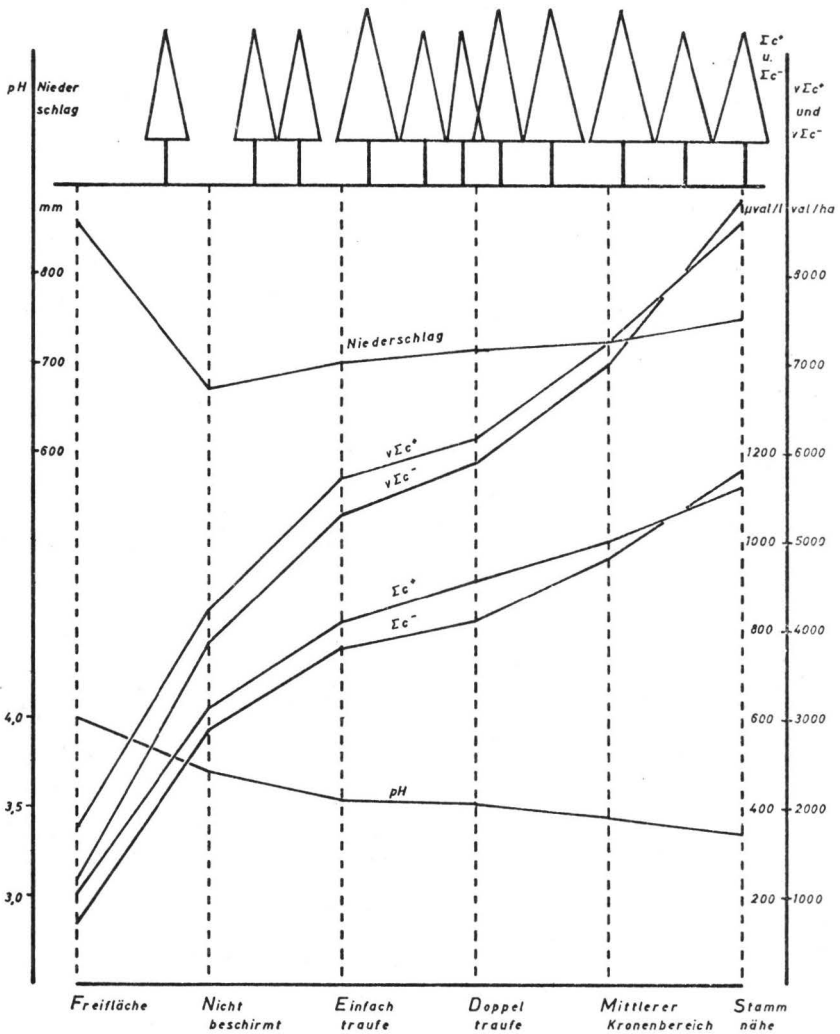


ABB. 2

Ionenkonzentration und -gesamtzufuhr
in Abhängigkeit von der Kronenposition

Grundsätzlich muß in jeder Lösung die Äquivalentsumme der Kationen ($\sum c^+$) gleich der der Anionen ($\sum c^-$) sein. Dies ist entsprechend Tab. 1 a nicht der Fall. Abweichungen können sich aus Analysenfehlern und aus der Nicht-Erfassung einzelner Ionen ergeben. Bicarbonationen können aufgrund der niedrigen pH-Werte nicht vorhanden sein, so daß als nicht erfaßte Ionen besonders die N-Formen NH_4^+ und NO_3^- sowie organische Anionen zu erwarten sind.

Die Meßpositionen unter den Kronen erhielten in folgender Reihe ansteigende Elementzufuhren:

Einfachtraufe, Doppeltraufe, mittlerer Kronenbereich, Stammnähe (siehe Abb. 2). Dabei sind die Unterschiede der in dieser Reihenfolge benachbarten Positionen nicht signifikant. In Bezug auf die zugeführten Bioelementmengen können die Einfachtraufe mit der Doppeltraufe und der mittlere Kronenbereich mit dem stammnahen zu jeweils einem Bereich Kronenrand und innere Krone zusammengefaßt werden, denn die Unterschiede zur nicht beschirmten Fläche sind beim inneren Kronenbereich - abgesehen von P - alle noch hochsignifikant, während für den äußeren Kronenbereich die Signifikanz abnimmt. Auch die Unterschiede von Einfach- und Doppeltraufe zum mittleren und stammnahen Kronenbereich weisen in etwa gleiche Signifikanz auf. Die Unterschiede zwischen den Kronenpositionen sind zum Teil durch zum Stamm hin ansteigende Konzentrationen bedingt, obwohl auch die aufgefangene Niederschlagsmenge zum Stamm hin ansteigt, wobei jedoch nur die Differenz zwischen Einfachtraufe und Stammnähe signifikant ist. Die Konzentrationswerte zeigen aber, wenn auch mit schwacher Signifikanz, in etwa die Tendenz wie die Gesamtzufuhren pro Monat, nämlich einen Unterschied zwischen Kronenrand und Kroneninnerem und unterschiedliche Abweichungen von der nicht beschirmten Fläche.

Ein signifikanter Unterschied in der Zusammensetzung der Kationen und der Anionen besteht für die verschiedenen Positionen in der Krone nicht. Am geringsten sind die Unterschiede zwischen Einfach- und Doppeltraufe (siehe Abbildung 3).

Der Niederschlag in den nicht beschirmten Teilen des Bestandes nimmt eine gewisse Sonderstellung ein. Die zwar auch hochsignifikanten Unterschiede zum Freiland in der Gesamtzufuhr und in den Konzentrationen sind geringer als die der Kronenpositionswerte zum Freiland.

Die Unterschiede zu den Positionen unter der Krone sind größtenteils noch signifikant (bis auf Na, Mn, P, Cl und N im äußeren Kronenbereich) bis hochsignifikant für die Positionen im inneren Kronenraum, und zwar sowohl für die Gesamtzufuhren, als auch für die Konzentrationen; ebenso der Anstieg der Niederschlagsmenge. Sie sind ebenfalls geringer als die der Kronenpositionen zum Freiland. Bezüglich Konzentrations- und Gesamtzufuhr-Werten nehmen die nicht beschirmten Stellen also eine Stellung zwischen Freiland und kronenüberschirmter Fläche ein.

Dies ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn man die Äquivalentbrüche betrachtet. Der H-Anteil liegt, teilweise signifikant bis hochsignifikant, unter den Werten der Freifläche als auch der Positionen unter der Krone. Die anderen Anteile liegen mit Ausnahme des Fe und des Al über den Werten der beiden anderen Cruppen, der Mn-Anteil sogar signifikant bis hochsignifikant. Bei den Anionen liegen die Äquivalentbrüche für S unter denen aller anderer Positionen, die für Cl über denen aller anderen Positionen. Bezüglich der Zusammensetzung des Regenwassers stellen also die nicht beschirmten Bestandteile keine Übergangsform zwischen der Freifläche und der von den Kronen überschirmten Fläche dar, sondern müssen besonderen Einflüssen unterworfen sein.

	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al
Freifläche	H	Na	K	Ca				Al
Nicht beschirmt	H	Na	K	Ca	Mg		Mn	Al
Einfachtraufe	H	Na	K	Ca	Mg		Mn	Al
Doppeltraufe	H	Na	K	Ca	Mg		Mn	Al
Mittl. Kronenbereich	H	Na	K	Ca	Mg		Mn	Al
Stammnähe	H	Na	K	Ca	Mg		Mn	Al

ABB. 3

Äquivalentbrüche der Kationen in Regenwasser in Witzenhausen

Nach NEUWIRTH (1965) wirken Lücken im Bestand durch Turbulenzbildung als Staubfallen. Die Untersuchungsergebnisse würden mit einem vergleichsweise höheren Anteil an Aerosolen im Niederschlagswasser der nicht beschirmten Flächenanteile in Einklang stehen, doch kann der Effekt nicht groß sein.

Daß auch durch den Bestand nicht nur allgemein die Konzentrationen erhöht werden, zeigen die Unterschiede in deren Äquivalentbrüchen, die, mit Ausnahme von Na, Fe, Cl und S, signifikant, zum größten Teil sogar hochsignifikant sind. Es wird durch den Bestand also auch die Zusammensetzung des Regenwassers verändert. Der Anteil der Wasserstoffionen wird erheblich, der der Al-Ionen im geringeren Maße reduziert. Dem steht ein stark erhöhter Anteil des Mg und relativ auch des Mn und ein in geringerem Maße erhöhter Anteil des K und Ca gegenüber. Der Na- und Fe-Anteil bleibt etwa gleich. Die Anionenäquivalente für S sind im Bestand etwas niedriger und für Cl etwas höher. Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant, so daß man von keinem Unterschied zwischen Freifläche und Bestand in der relativen Zusammensetzung der Anionen sprechen kann.

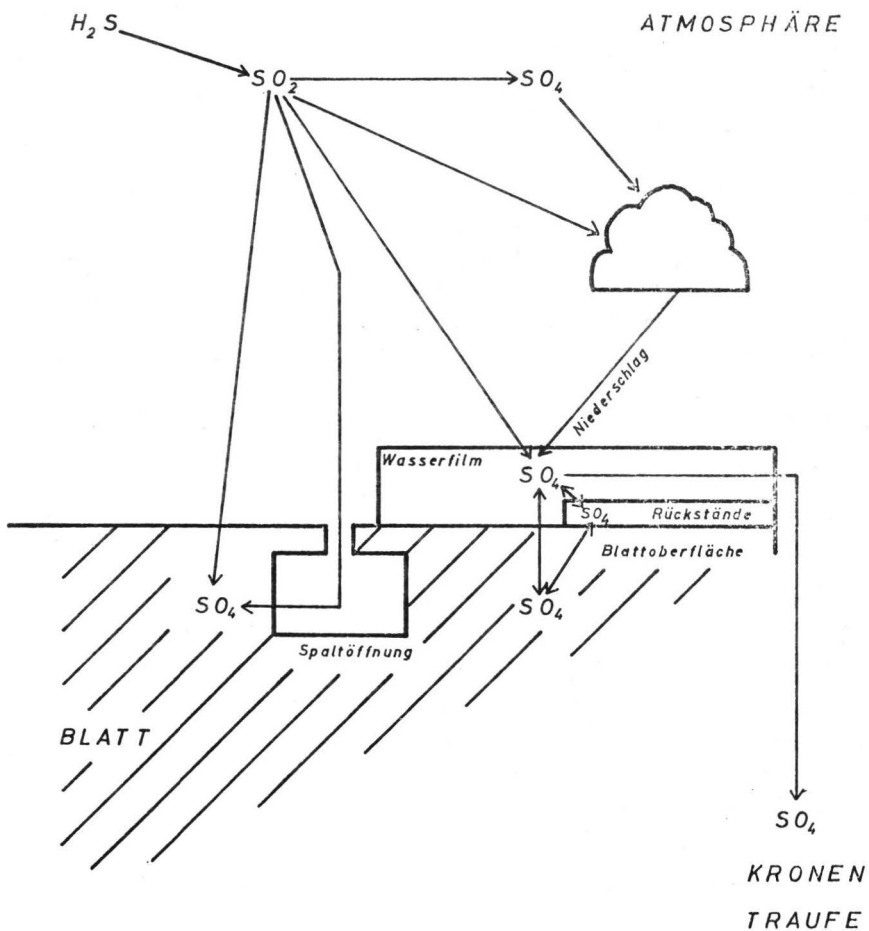
3. Ableitung von Annahmen über die SO_2 -Ausfilterung

Eine aktive Ausfilterung von SO_2 durch Waldbestände ist denkbar 1. durch SO_2 -Assimilation und 2. durch SO_2 -Absorption in den Wasserfilmen, die sich bei Niederschlägen, Nebel oder Tau an den Oberflächen der Krone ausbilden (SO_2 -Auslösung) (vgl. Abb. 4).

Die Frage der SO_2 -Assimilation wurde von MATERNA und KOHOUT (1963) untersucht. In Experimenten mit markiertem SO_2 wurde bei einer Anfangskonzentration von 8 - 10 mg SO_2/m^3 Luft nach 50 Minuten Einwirkungszeit in abge-

ABB. 4

Austauschvorgänge
an der Blattoberfläche



geschlossenen Polyäthylenhüllen fast die gesamte SO_2 -Menge von Fichtennadeln absorbiert (assimiliert), wobei die Absorption auch nachts erfolgte. KATZ (1949) fand bei Douglassic nachts keine Absorption. Nach MATERNA (1963) hat ein Fichtenbestand an einem Standort mit maximal 1 - 2 mg SO_2/m^3 Luft in den Nadeln 14 kg S pro ha aus dem SO_2 der Luft gebunden.

Luftanalytische Untersuchungen im Gelände haben in der Regel keine Hinweise für eine aktive Filterwirkung von Wäldern ergeben. Bereits WISLICENUS (1898) fand, daß " SO_2 in das Innerste der dichtesten Bestände vordringt" und konnte keine wesentlichen Konzentrationsunterschiede zum Freiland feststellen. OST (1900) fand allerdings in dichten Fichtenbeständen deutlich geringere Werte als bei seinen sonstigen Messungen in ländlichen Gebieten. LAMPADIUS (1968) stellte in Kiefernwäldern eine leichte Konzentrationserhöhung gegenüber Meßpunkten vor dem Wald fest und konnte an Meßprofilen im Gelände keinen signifikanten Einfluß von Waldgebieten auf die Konzentration an Meßpunkten hinter unterschiedlich ausgedehnten Waldflächen finden.

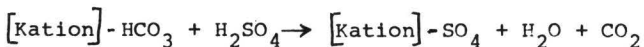
Am Beispiel des Versuchs Witzenhausen seien die Überlegungen dargestellt, um aus der chemischen Zusammensetzung von Freiland-Niederschlag und Kronentraufe auf Umfang der SO_2 -Auslösung zu schließen. Betrachtet werden zunächst die stamennahe Position und der Freiland-Niederschlag:

Die pH-Werte erniedrigen sich von 4,01 (Freifläche) auf 3,38.

Die Ausgeglichenheit der Kationen- und Anionenäquivalentsummen in Stammnähe ($\Sigma \text{c}^+ = 8363$, $\Sigma \text{c}^- = 8634$ val/ha) schließt einen größeren Anteil organischer Anionen aus. Damit wird aber auch ausgeschlossen, daß die Steigerung im Wasserstoffionen-Input gegenüber der Freifläche (um 2560 val/ha) durch die Abgabe organischer Säuren aus dem Kronenraum gespeist wird. Dies ist schon deshalb unwahrscheinlich, weil in dem Ionengemisch der Kronentraufe eine

pH-Absenkung von 4 auf 3 die Zufügung starker organischer Säuren erfordern würde. Vielmehr läßt der hohe S-Anteil an der Anionenäquivalentsumme von 91 % die Vermutung zu, daß die Steigerung im Wasserstoffionen-Input in Form von Schwefelsäure (nach Oxidation von schwefliger Säure) erfolgt und damit die (minimale) Filterwirkung gegenüber SO_2 angibt.

Dieser Wert ist jedoch als ein Mindestbetrag anzusehen. Es ist anzunehmen, daß als Folge eines pH-Gradienten zwischen Wasserfilm an der Nadeloberfläche und Nadelgewebe eine Diffusion von Bicarbonaten aus der Nadel in den Wasserfilm erfolgt, wo folgender Reaktionsmechanismus abläuft:



Auf diesem Wege könnte ein Teil der durch SO_2 -Absorption in den Wasserfilmen gebildeten Schwefelsäure neutralisiert werden. Die aus der pH-Differenz berechnete Filterwirkung wäre dann unterschätzt.

Man kann diese Überlegungen noch weiter führen. Aufgrund der nachgewiesenen SO_2 -Assimilation in den Nadeln läßt sich vermuten, daß das Sulfat nicht aus den Wurzeln in die Nadeln transportiert wird, sondern umgekehrt ein Transport von Sulfat aus den Nadeln in andere Gewebe erfolgt. Würde diese Annahme zutreffen, so wäre eine Kronenauswaschung von Sulfat völlig auszuschließen, und die gesamte Steigerung des S-Inputs wäre der SO_2 -Auslösung zuzuschreiben. Für den Bestand in Witzenhausen ergibt diese Maximalschätzung im Mittel aller Positionen eine SO_2 -Ausfilterung von 69 kg S/ha. Der wahre Wert dürfte irgendwo zwischen dem Mindestwert und der Maximalschätzung liegen.

Es sei noch erwähnt, daß Mindestwert und Maximalschätzung für die gesamte Fläche mit einer Abweichung von weniger als 5 % der Position Einfachtraufe entsprechen. Daraus ergibt sich ein methodischer Hinweis für die Verteilung von Regennessern im Bestand.

ergibt sich ein methodischer Hinweis für die Verteilung
von Regenmessern im Bestand.

4. Regenwasseruntersuchungen unter Fichte und Buche auf verschiedenen Standorten

In dieser Meß-Serie wurden Buche und Fichte auf gleichem Standort (Pseudogley im FA Gahrenberg) sowie Buche auf Pseudogley und Buche auf Kalk miteinander verglichen. Der Bestandesniederschlag wurde aufgefangen mit 3 Regenmessern in einem Buchenaltholz auf Pseudogley, mit 2 Regenmessern in einem Fichtenhorst am Rande dieses Buchenbestandes, und mit 4 Regenmessern unter Buche in einem im unteren Muschelkalk steil eingeschnittenen Trockental auf Rendzina bei Nedermünden.

Die Ergebnisse sind in Tab. 5 als Gesamtzufuhr in kg/ha, Jahr dargestellt. Mit Hilfe des in der Tabelle ebenfalls aufgeführten Jahresniederschlags kann die mittlere Konzentration in der Kronentraufe berechnet werden.

Bei der Buche auf Kalk liegt der pH-Wert höher als im Freilandniederschlag; bei der Kronenpassage werden also Wasserstoffionen abgepuffert. Die Wasserstoffionenzufuhr zum Boden ist damit geringer, die an K, Ca, Mg und P dagegen höher als auf der Freifläche. Bei den anderen Elementen bestehen keine nennenswerten Unterschiede, auch nicht bei S. Die Anreicherung der Kronentraufe an K, Ca, Mg und P muß ausschließlich auf Kronenauswaschung zurückgeführt werden.

Die Buche auf Pseudogley zeigt eine erhöhte Gesamtzufuhr von K, Ca, Mg, Fe, Mn, Al und S. Gegenüber der Buche auf Kalk ist die K-Auswaschung aus der Krone erhöht, neu hinzugekommen ist die Kronenauswaschung von Fe, Mn und Al. P wird nicht mehr ausgewaschen, sondern aus dem Niederschlag durch die Blätter aufgenommen: in den Meßdaten spiegeln sich also die Ernährungsverhältnisse am Standort durchaus wider. Insgesamt ist die Kronenauswaschung erhöht.

Der Fichtenhorst am Rande des Buchenbestandes hat diesen

Tabelle 5

Regenwasseruntersuchungen unter Fichte und Buche auf verschiedenen Standorten

		Nieder- schlag	pH	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	P	S	N	Σc^+
		mm/ Jahr	kg / ha , Jahr												val/ha, Jahr
1	Freifläche	905	4,39	0,602	5,2	5,3	7,8	1,8	0,86	0,29	3,4	0,88	49,2	15,7	1919
2	Buche auf Kalk	684	4,82	0,363	3,8	28,3	27,0	3,6	0,76	0,30	4,9	3,47	44,0	11,5	3477
3	Buche Pseudogley	655	4,30	0,584	4,8	40,9	31,3	4,2	1,22	4,07	14,7	0,46	70,8	12,5	5577
4	Fichte Pseudogley	722	3,31	3,82	9,4	44,3	53,6	7,6	4,92	5,31	27,5	0,54	193,6	17,9	12080
5	Zunahme Fi gegen Bu auf Pseudogley (4-3)		3,236	4,6	3,4	22,3	3,4	3,7	1,24	12,8		122,8			6503
6	Zunahme in val/ha		3236	200	87	1113	280	133	45	1423		7660			6517
7	Äquivalentanteile in Staub (s.Tab. 13)			0,46	0,03	0,12	0,03	0,06	0,003	0,29		0,53			
8	berechnete Zufuhr mit Staub (Aerosolen) val/ha			200	13	52	13	26	1,3	126		230			
9	Zeile 8 in % von Zeile 6			100	15	4,7	4,6	20	2,9	8,9		3,0			

höhenmäßig überragt und damit als Nebelfalle gewirkt: der Bestandesniederschlag unter dem Fichtenhorst ist höher als im Buchenbestand. Insgesamt ist unter dem Fichtenhorst die Kationenzufuhr mehr als doppelt so hoch wie im Buchenbestand. Erhöht ist insbesondere die Zufuhr von H, Na, Ca, Mg, Fe, Al und S. Die Erhöhung von Na läßt vermuten, daß ein Teil dieser Zufuhr von Aerosolen stammt, die der Fichtenhorst mit dem Nebel ausgefiltert hat. Da aus Staubuntersuchungen (s. später) die Äquivalentanteile der Kationen im Staub bekannt sind, wurde in der unteren Hälfte der Tab. 6 (Zeile 5 - 9) mit Hilfe der Äquivalentanteile die Kationenmenge berechnet, die als Staub bzw. Aerosol maximal zugeführt sein kann. Die Berechnung ergibt Prozentsätze zwischen 100 (bei Na) und 3 (bei Mn und S). Diese Berechnung weist darauf hin, daß die Aerosol-Ausfilterung nur eine untergeordnete Rolle spielt, der Hauptanteil der Erhöhung gegenüber dem Buchenbestand auf gleichem Standort stammt demnach bei den Kationen aus der Kronenauswaschung.

Die nach Abschnitt 3. berechnete SO_2 -Ausfilterung ist in Tab. 6 zusammengestellt.

Tabelle 6
 SO_2 -Ausfilterung

	Minimal- Wert	Maximal- Wert
	kg S/ha, Jahr	
Buche auf Kalk	0	0
Buche Pseudogley	0	22
Fichte Pseudogley	52	144

Das Fehlen einer SO_2 -Ausfilterung beim Buchenbestand auf Kalk könnte mit der standörtlichen Lage dieses Bestandes (Muldenlage) zusammenhängen. Die Buche auf Pseudogley zeigt keine oder nur eine geringe SO_2 -Ausfilterung. Die Werte für den Fichtenbestand liegen dagegen beim Doppelten (Minimalwert) bis Vierfachen (Maximalwert) der S-Immission mit dem Niederschlag.

5. Regenwasseruntersuchungen unter Fichte und Buche im Solling

Bei den Untersuchungen im Solling im Rahmen des IBP werden die Nährstoffgehalte in der Kronentraufe unter Buche und Fichte sowie in Freilandniederschlägen erfaßt. Die Niederschläge werden in Plastikmeßgläsern (3 Reihen zu je 5 Meßgefäße) aufgefangen, die in etwa 30 cm Höhe über dem Boden aufgestellt sind und nach jedem Niederschlag entleert werden. Die Einzelniederschläge werden monatsweise zu Mischproben zusammengefaßt und als solche analysiert. Der Standort entspricht einer stark podsoligen Braunerde aus Löss über Buntsandstein - Fließerde.

Die bis September 1970 gewonnenen Werte wurden von MAYER (1971) ausgewertet. Seitdem liegen neuere Daten bis Juli 1972 vor, bei denen, im Gegensatz zu den älteren Daten, der Stickstoff getrennt nach Ammoniak-, Nitrat- und Gesamt-Stickstoff erfaßt wurde.

Diese Daten wurden ebenfalls in einer Varianzanalyse nach dem Modell

$$Y_{ijr} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijr}$$

verrechnet, wobei Effekt A (Holzart) mit 3 Stufen (Freifläche, Buche und Fichte) und Effekt B (Termine) mit 21 Stufen (Monatswerte) als fix betrachtet wurden.

Die marginalen Mittel (über alle Termine gemittelt) der

Tabelle 7
Bioelementkonzentrationen und Bioelementzufuhr im Solling

Konzentrationen	pH	cNa	cK	cNH ₃ -N	cCa	cMg	cFe	cMn	cAl	cNO ₃ -N	cCl	cS	cP	cGes-NO ₃ -N	Σ ⁺	Σ ⁻
		mg/l													μ-val/l	
Freifläche (W1)	4,12	0,89	0,68	1,40	2,17	0,44	0,09	0,01	0,15	0,94	1,83	3,12	0,080	1,85	415	316
Buche (B1)	3,86	1,87	2,68	1,85	4,92	0,70	0,20	0,39	0,28	1,57	4,34	6,61	0,082	2,68	794	649
Fichte (F1)	3,34	3,06	4,87	2,28	7,43	1,05	1,93	0,78	0,46	2,10	6,71	13,65	0,127	3,63	1553	1195
A Bestockung	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx
B Termine	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
C Interaktion AxB	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xx	xxx	xxx	xxx

Gesamtzufuhr	vH	vNa	vK	vNH ₃ -N	vCa	vMg	vFe	vMn	vAl	vNO ₃ -N	vCl	vS	vP	vGes-N	vΣ ⁺	vΣ ⁻	Nieder- schlag
		kg/ha/Jahr													val/ha/Jahr		mm/Jahr
Freifläche (W1)	0,6	5,9	4,1	8,4	11,5	2,5	0,5	0,7	2,5	5,3	12	17,6	0,4	16,3	2436	1824	910
Buche (B1)	0,96	10,4	14	9,7	25,6	3,5	1,1	1,9	4,1	8,8	25	35	0,4	24	4248	3504	576
Fichte (F1)	2,52	16,2	23,6	11,5	37,6	5,5	12,4	3,8	7,3	10,0	33	68	0,7	27	7836	5928	566
A Bestockung	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx
B Termine	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
C Interaktion AxB	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xxx	xxx

Signifikant bei 0,1 % [†] und 5 % Überschreitungswahrscheinlichkeit = xxx, xx und x Nicht signifikant = -

Gesamtzufuhren (dargestellt als Jahreswert) und Konzentrationen mit den entsprechenden Signifikanzen der beiden Faktoren und der Interaktion Holzart x Termin sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Die Eisen- und Phosphorwerte weisen keine Signifikanz auf. Ansonsten ist der Einfluß der Termine und der Interaktion jedoch fast überall hochsignifikant.

Der Einfluß der Bestockung ist fast bei allen Werten, abgesehen von Fe, P und X_{Cl}^I , hochsignifikant.

Die Gesamtzufuhr ist in allen Fällen bei Fichte am höchsten und liegt für Buche -, trotz gleicher Interceptionsraten von Buche und Fichte -, zwischen den Werten von Fichte und den Freilandwerten.

Bei den Konzentrationen gilt grundsätzlich das gleiche, jedoch sind die Unterschiede zum Freilandniederschlag größer.

Die stärksten Erhöhungen erfahren K, Mn und S, am wenigsten reichern sich die Stickstoffionen an.

Dies spiegelt sich auch in den Äquivalentbrüchen wider (siehe Abbildung 5). Dort verringert sich der Anteil des Ammoniak-N und des Nitrat-N sogar erheblich. Außerdem nimmt auch der Anteil des Mg deutlich ab. Diese Abnahme erfolgt im Buchenbestand bei den Kationen vor allem zu Gunsten des Ca, aber auch der Anteil des K, Mn und Na vergrößern sich. Bei den Anionen steht dieser Abnahme eine gleich starke Zunahme von Cl und S gegenüber.

Bei der Fichte wird diese Abnahme bei den Kationen vom Anstieg des H-Anteils ausgeglichen. Der Anstieg des K-Anteils entspricht in etwa der Abnahme des Na, der des Mn-Anteils etwa der Abnahme des Mg-Anteils. Bei den Anionen geht die Abnahme des N-Anteils allein auf das Konto des S-Anteils.

Bei den Stickstoffkonzentrationen sinkt das Ammoniak-N:

	H	Na	K	NH ₃ -N	Ca	Fe	Mn	Mg	Al
Freiland (W1)	H	Na	K	NH ₃ -N	Ca			Mg	Al
Buche (B1)	H	Na	K	NH ₃ -N	Ca			Mg	Al
Fichte (F1)	H	Na	K	NH ₃ -N	Ca	Fe		Mg	Al

	NO ₃ -N	Cl	S
W1	NO ₃ -N	Cl	S
B1	NO ₃ -N	Cl	S
F1	NO ₃ -N	Cl	S

ABB. 5.1

Äquivalentbrüche der Kationen und Anionen
in Niederschlag im Solling

Nitrat-N-Verhältnis von 1,5 : 1 auf der Freifläche, - was den allgemein berichteten Werten für Europa entspricht -, über 1,2 : 1 bei der Buche auf 1,1 : 1 bei der Fichte ab. Die Gesamtstickstoffzufuhr teilt sich in folgenden Verhältnissen auf die einzelnen Komponenten auf

	NH ₃ -N	:	NO ₃ -N	:	Org.-N
Freiland	1,6	:	1	:	0,5
Buche	1,1	:	1	:	0,6
Fichte	1,2	:	1	:	0,6

Die SO₂-Ausfilterung zeigt für die Buche vergleichbare Werte

Tabelle 8

SO₂-Ausfilterung im Solling

	Minimal- Wert	Maximal- Wert
	kg S/ha, Jahr	
Buche	6	17
Fichte	31	50

mit den Untersuchungen im Gahrenberg, für die Fichte wesentlich niedrigere Werte, die jedoch denen von Witzenhausen (Maximalwert 69 kg S/ha) entsprechen.

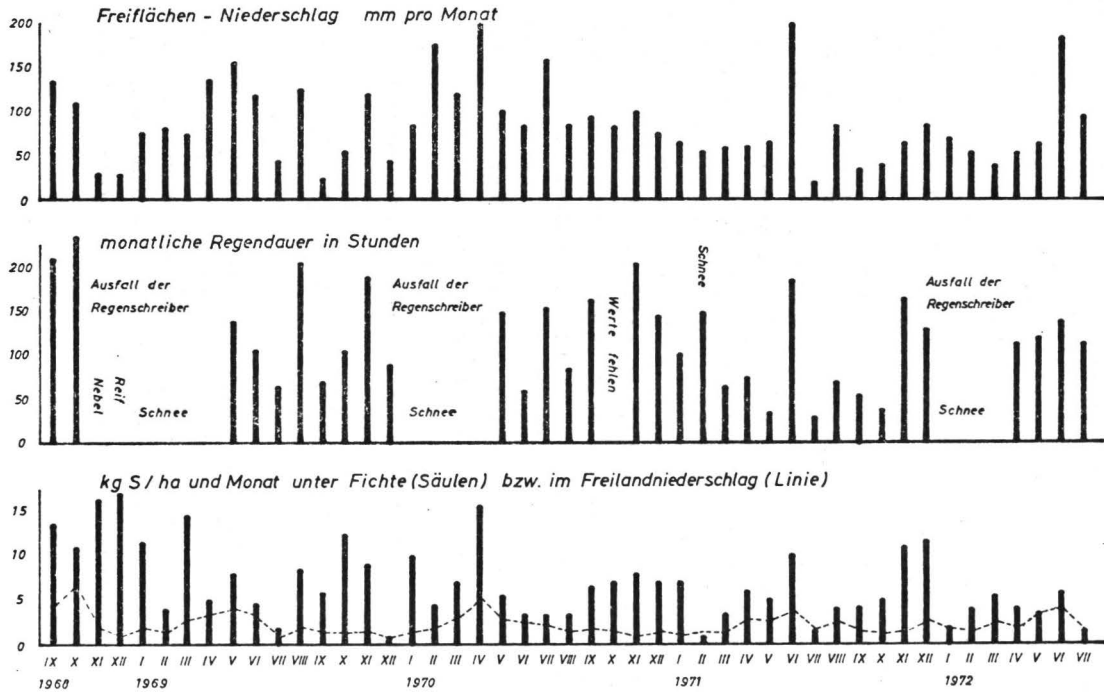
In Abb. 5.2 sind die monatlichen Werte für den Freiland-Niederschlag, die Regendauer und die S-Zufuhr durch die Kronentraufe der Fichte (Säulendarstellung) sowie den Freilandniederschlag (Liniendarstellung) zusammengestellt. Als Regendauer wird der vom Regenschreiber festgehaltene Niederschlagszeitraum bezeichnet, wobei die Daten vom Freilandniederschlag und der Kronentraufe zusammengefaßt wurden (Daten von BENECKE, unveröffentlicht). Die Regendauer wurde als Maß für die Zeitdauer, während der die Fichtenkrone benetzt war und damit SO_2 auslösen konnte, herangezogen. Regendauer und Niederschlagsmenge sind natürlich miteinander korreliert, wenn sich auch während der für die SO_2 -Auslösung entscheidenden Herbst- und Frühwintermonate als Folge von Nebel- nässe erhebliche Unterschiede ergeben können.

Aus der untersten Darstellung ersieht man aus dem Vergleich von S-Zufuhr im Freilandniederschlag und in der Kronentraufe, daß der zusätzliche S-Input in der Kronentraufe im Wesentlichen von September bis April, also während der Vegetationsruhe bzw. der Heizperiode, erfolgt. Alle physiologischen Kenntnisse sprechen dagegen, daß der Bestand während dieses Zeitraumes die S-Aufnahme so steigert, daß die Zunahme der S-Menge in der Kronentraufe gegenüber dem Freilandniederschlag aus dem internen Umsatz des Ökosystems stammen könnte. Die Koinzidenz zwischen Heizperiode bzw. der durch Verbrennung erhöhten SO_2 -Emission und der S-Zufuhr in der Kronentraufe kann daher als kausaler Zusammenhang gedeutet werden. Dieser Schluß wird noch erhärtet durch die Korrelation zwischen S-Input mit der Kronentraufe (y) und Regendauer (x):

$$y \text{ (kg S/ha, Monat)} = 1,099 + 0,045x \text{ (Std./Monat)}; \\ r = 0,682$$

In dieser Korrelation ist allerdings nur ein wesentlicher Parameter der Filterfunktion der Fichte erfaßt. Andere wesentliche Parameter sind der SO_2 -Gehalt der Luft sowie die Form des Niederschlags (trockener Schneeniederschlag hat nach eigenen Untersuchungen extrem niedrige S-Gehalte).

Abb. 5.2 Monatliche Werte für Niederschlag, Regendauer und S-Zufuhr mit Kronentraufe unter Fichte im Solling



Beim Vergleich von Tab. 4 und Tab. 6 ergibt sich ferner, daß auf den sauren Braunerden im Solling der Na-Umsatz höher, der K-, Mn- und Al-Umsatz jedoch niedriger ist als auf dem Pseudogley. Bei der Fichte im Solling ist der Fe-Umsatz extrem hoch. Diese Unterschiede könnten durch die Unterschiede in der Wurzelverteilung und im Wasserhaushalt beider Standorte bedingt sein: nur flache Durchwurzelung vorwiegend im Auflagehumus und A_h bei der Fichte auf Pseudogley, tiefere Durchwurzelung bis in den B_v auf der Braunerde. Wegen der gehemmten Tiefensickerung ist die Bodenlösung auf Pseudogleyen salzreicher als in durchlässigen Böden, was zu einer erhöhten Bioelementaufnahme und damit erhöhtem Umsatz führt. Bei gehemmter Tiefensickerung erfolgt ferner eine relative Anreicherung von Mn und Al in der Bodenlösung, da in stark sauren Böden diese beiden Elemente im Austausch mit Wasserstoffionen in Lösung gehen; dies erklärt den auch relativ höheren Mn- und Al-Umsatz auf dem Pseudogley. Andererseits enthält die Bodenlösung im Auflagehumus relativ viel K und wenig Na, während im Mineralboden diese Relationen umgekehrt sind. Dies könnte im Zusammenhang mit der Wurzelverteilung erklären, daß auf dem Pseudogley der K-Umsatz, auf der Braunerde der Na-Umsatz relativ stärker ist. Zwar sind diese Parallelisierungen nicht mehr als Hinweise, aber sie lassen es lohnend erscheinen, den Zusammenhängen nachzugehen.

6. Regenwasseruntersuchungen unter isolierten Fichten im Solling

Bei dem Versuch an einer Fichten-Dickung in Abteilung 52a des Forstamts Neuhaus im Solling in der Zeit vom 23.10. 1970 bis zum 30.6.1971 sollte die Frage nach den Ursachen der Konzentrationserhöhungen durch Vergleich einer natürlichen Fichten-Dickung mit einem Bestand aus abgeschlagenen, vom Boden durch Plastiksäcke isolierten Stämmen, - bei

denen somit die Wassernachlieferung ausgeschaltet war -, untersucht werden. Die Filterkapazität gegen Aerosole war bei beiden Flächen, da es sich um Stämme aus der gleichen Dichtung in natürlicher Anordnung handelte, als gleich anzusehen. Auftretende Unterschiede mußten demnach auf die Isolierung zurückzuführen sein.

Die Versuchsanlage ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die Niederschläge wurden in drei Wiederholungsgruppen von Niederschlagsmessern auf jeder Fläche aufgefangen. Nach jedem Niederschlag wurden die Gefäße entleert. Es wurden die Einzelniederschläge analysiert und Monatswerte der Konzentrationen durch entsprechende Summierung und Durchschnittsbildung berechnet.

Konzentrationen und Äquivalentbrüche aus beiden Flächen sind in Tabelle 9 aufgeführt. Einen Vergleich der Äquivalentbrüche zeigt Abbildung 7. Der zeitliche Verlauf der Konzentrationsänderungen ist in Abb. 8 dargestellt.

Die Ergebnisse lassen sich am besten anhand eines Vergleichs der zeitlichen Änderung der Gesamtzufuhren im Verhältnis beider Flächen diskutieren. Zu diesem Zweck sind in Tab. 10 die Relativwerte für die Fläche 2 mit den isolierten Fichten als Vielfaches der Zufuhren auf der unbehandelten Fläche 1 zusammengestellt.

Tabelle 10

Gesamtzufuhren auf Fläche 2 (isoliert), dargestellt als Vielfaches der Werte von Fläche 1 (unbehandelt)

Termin	H	Na	K	NH ₃	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	NO ₃	Cl	S	P
1	1,2	1,1	1,4	1,8	1,5	1,3	1,0	1,8	0,9	1,4	1,3	1,4	0,9
2	1,5	1,2	1,0	2,0	1,3	1,2	0,9	1,7	1,4	2,1	1,4	1,6	1,0
3	1,6	1,4	1,5	1,7	1,5	1,5	1,4	1,6	1,3	1,6	1,7	1,1	1,6
4	2,0	1,0	0,5	5,9	1,2	0,9	1,3	0,6	1,3	3,1	0,8	1,3	0,9
5	7,1	1,1	0,4	4,2	1,8	1,0	1,8	0,6	2,3	8,1	0,6	1,1	0,1

Die fast durchweg etwas höheren Gesamtzufuhren unter den isolierten Fichten sollen nicht näher interpretiert werden, da dies bereits eine Folge einer geringen Erhöhung in der Stammzahl pro Fläche bzw. einer gleichmäßigen Flächendeckung bei den isolierten Fichten sein kann, vgl. hierzu Abb. 5. Läßt man diese Erscheinung außer Betracht, so zeigt sich bei Na, Ca, Mg, Fe, Al und S kein bemerkenswerter Unterschied zwischen beiden Flächen. Dies könnte einmal darauf beruhen, daß während der Laufzeit des Versuchs (außerhalb der Vegetationsperiode) auch im intakten Bestand kein nennenswerter Transport von Bioelementen (mit dem Transpirationsstrom) zu den Nadeln erfolgte, bei beiden Flächen also die Kronenauswaschung aus dem Abbau vorhandener Bioelementvorräte in den Nadeln gespeist wurde. Zum anderen könnte dies auch auf einen Filtereffekt hinweisen, da die Filterwirkung der isolierten Fichten durch den Eingriff nicht verändert wurde. Der Versuch läßt also bei diesen Elementen keine Entscheidung zu. Bei K, Mn, Cl und besonders stark bei P sinkt gegen Ende der Meßperiode bei den isolierten Fichten die Bioelementmenge im Kronentraufwasser erheblich ab. Dies könnte bei fehlendem Vorrat (z.B. Cl) oder gehemmtem Vorratsabbau (z.B. P) durch den Ausschluß der Aufnahme verursacht sein; die Auswaschung dieser Elemente scheint sehr direkt mit der Aufnahme gekoppelt zu sein.

Wieder anders verhalten sich H, $\text{NH}_3\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$, wo bei den isolierten Fichten die Ausschüttung mit zunehmender Beobachtungsdauer relativ ansteigt. Bei den N-Formen zeigt dies den mit der Austrocknung der Nadeln fortschreitenden Eiweißabbau an. Beim H kann dies sowohl eine Folge der Abgabe organischer Säuren (die pH-Werte liegen bei Termin 5 bei der unbehandelten Fläche bei 4,5, bei der behandelten bei 3,7) wie auch einer Verringerung der in Abschnitt 3 angesprochenen Pufferwirkung bei SO_2 -Ausfilterung sein.

Insgesamt gesehen liefert die Versuchsanlage bei den meisten Bioelementen keine eindeutigen Ergebnisse, die

Tabelle 9:

Bioelementkonzentrationen in der Fichten-Dickung im Solling

Konzentrationen	pH		cNa		cK		cNH ₃ -N		mg/l		cCa		cMg		cFe		cMn	
	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2
23.10.-20.11.70	3,70	3,59	2,46	3,09	3,14	4,83	0,30	0,61	2,05	3,31	0,49	0,73	4,52	5,24	0,40	0,78		
21.11.-31.12.70	3,73	3,20	2,27	2,67	3,37	3,88	0,80	1,61	3,57	4,69	0,24	0,28	9,08	13,61	0,17	0,28		
26.3.-26.4.1971	3,30	3,08	2,45	3,53	3,56	5,67	4,44	7,77	8,02	12,43	0,89	1,38	19,61	30,10	0,41	0,72		
27.4.-28.5.1971	3,95	3,56	1,12	1,40	11,50	7,71	0,46	3,19	8,58	12,31	1,18	1,34	10,53	16,38	0,78	0,54		
29.5.-30.6.1971	4,55	3,68	0,60	0,69	14,73	6,60	0,05	0,25	2,23	4,27	0,51	0,55	3,67	6,79	0,51	0,31		
Äquivalentbrüche	X_H^L		X_{Na}^L		X_K^L		X_N^L		X_{Ca}^L		X_{Mg}^L		X_{Fe}^L		X_{Mn}^L			
	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2		
23.10.-20.11.70	.1143	.1294	.0584	.0635	.0445	.0578	.0118	.0201	.0561	.0757	.0222	.0280	.0891	.0874	.0083	.0128		
21.11.-31.12.70	.1526	.1633	.0324	.0265	.0327	.0237	.0191	.0264	.0584	.0553	.0065	.0053	.1099	.1142	.0020	.0024		
26.3.-26.4.1971	.0791	.0918	.0154	.0146	.0129	.0139	.0454	.0549	.0563	.0597	.0103	.0110	.0994	.1039	.0021	.0025		
27.4.-28.5.1971	.0348	.0567	.0135	.0117	.0818	.0368	.0090	.0417	.1187	.1136	.0270	.0204	.1044	.1079	.0079	.0036		
29.5.-30.6.1971	.0177	.0774	.0152	.0102	.2192	.0579	.0022	.0059	.0654	.0708	.0244	.0150	.0777	.0829	.0107	.0038		
Gesamtzufuhr	vH		vNa		vK		vNH ₃ -N		vCa		vMg		vFe		vMn			
	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2		
23.10.-20.11.70	1,83	2,20	21,49	24,53	27,25	38,47	2,60	4,76	17,87	25,90	4,25	5,76	39,30	41,68	3,38	6,07		
21.11.-31.12.70	1,58	2,41	7,87	9,28	13,34	13,89	2,77	5,65	12,34	16,25	0,83	0,98	31,49	47,46	0,58	1,00		
26.3.-26.4.1971	1,24	2,00	5,31	7,38	7,85	11,89	9,74	16,69	17,77	26,04	1,96	2,89	43,54	63,34	0,90	1,48		
27.4.-28.5.1971	0,36	0,72	3,21	3,26	33,10	18,03	1,29	7,66	24,59	26,80	3,39	3,11	30,08	38,49	2,23	1,26		
29.5.-30.6.1971	0,16	1,14	3,15	3,55	77,31	33,61	0,30	1,25	11,69	21,60	2,67	2,77	19,27	34,63	2,66	1,59		

Fläche 1 (Fl.1) = ungestört

Fläche 2 (Fl.2) = isoliert

Tabelle 9 (Fortsetzung):

Konzentrationen	cNO ₃ -N		cCl		cS		cP		cOrg-N		cGes-N		$\sum c^+$		$\sum c^-$	
	$\mu\text{g/l}$												$\mu\text{-val/l}$			
	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2
23.10.-20.11.70	4,34	6,38	5,39	8,43	11,26	10,42	6,93	6,77	1,27	1,50	2,09	2,90	1685	2179	869	1110
21.11.-31.12.70	4,63	6,61	10,79	17,39	10,72	10,28	7,45	7,41	1,30	2,12	2,73	5,04	2997	4293	1214	1721
26.3.-26.4.1971	5,11	9,04	20,36	24,18	23,15	25,89	22,77	38,78	0,17	0,64	6,63	11,85	7055	10324	2349	2918
27.4.-28.5.1971	4,49	4,31	12,16	20,39	17,33	18,94	11,29	13,06	1,58	3,33	2,79	9,34	3604	5397	1506	2227
29.5.-30.6.1971	4,12	2,66	6,90	8,16	17,94	2,07	12,04	1,53	0,63	0,93	0,72	1,46	1719	2898	1132	673
Äquivalentbrüche	X_N^L		X_{Cl}^L		X_S^L											
	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2										
23.10.-20.11.70	.0444	.0553	.1473	.1731	.3922	.4813										
21.11.-31.12.70	.0370	.0543	.1088	.1085	.5561	.6304										
26.3.-26.4.1971	.0621	.0839	.0417	.0872	.5441	.5153										
27.4.-28.5.1971	.0359	.0944	.0839	.0558	.5044	.5636										
29.5.-30.6.1971	.0021	.0290	.1026	.1132	.3803	.7586										
Gesamtzufuhr	vNO ₃ -N		vCl		vS		vP		vOrg-N		vGes-N		$\sum c^+$		$\sum c^-$	
	val/ha/"Monat"															
	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2	Fl.1	Fl.2
23.10.-20.11.70	4,58	6,30	37,97	50,88	46,71	66,20	60,51	53,91	11,06	11,94	18,22	22,88	16603	17001	7503	8684
21.11.-31.12.70	2,20	4,60	16,25	23,08	37,37	60,43	25,79	25,78	4,50	7,38	9,47	17,60	10398	15012	4210	5986
26.3.-26.4.1971	4,47	7,34	11,29	19,08	45,04	51,31	50,29	82,58	0,38	1,37	14,70	25,39	15634	21770	5177	6209
27.4.-28.5.1971	2,16	6,67	12,88	10,04	34,98	46,31	32,52	30,61	4,56	7,81	8,01	22,15	10352	12600	4322	5142
29.5.-30.6.1971	0,18	1,46	21,66	13,59	36,31	41,71	63,37	7,82	3,33	4,74	3,79	7,47	9040	14762	5956	3436
															Niederschlag	
															1/"Monat"	
															Fl.1	Fl.2
23.10.-20.11.70															4,32	3,93
21.11.-31.12.70															1,71	1,72
26.3.-26.4.1971															1,09	1,05
27.4.-28.5.1971															1,42	1,16
29.5.-30.6.1971															2,60	2,52

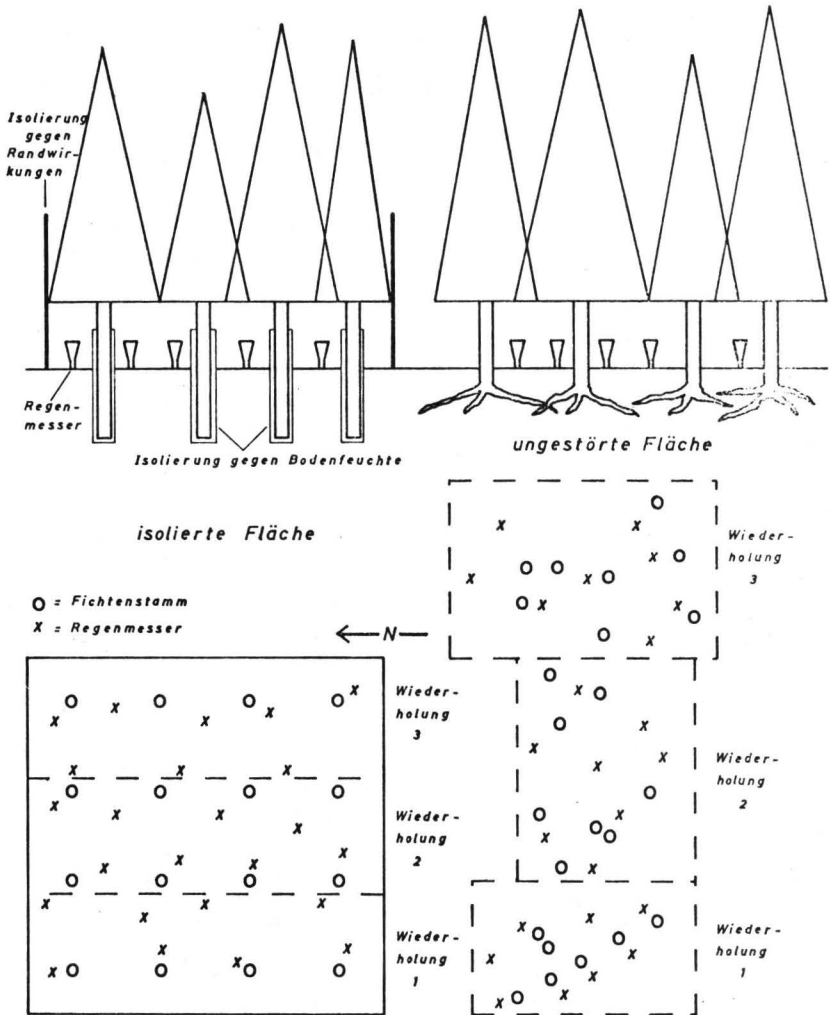


ABB. 6

Versuchsanlage in der Fichten-Dickung
in der Abt. 52a im Solling

Fläche I: ungestört

H Na K $\text{NH}_3\text{-N}$ Ca Mg Fe Mn Al^{3+} AlOH

23.10.-20.11.1970

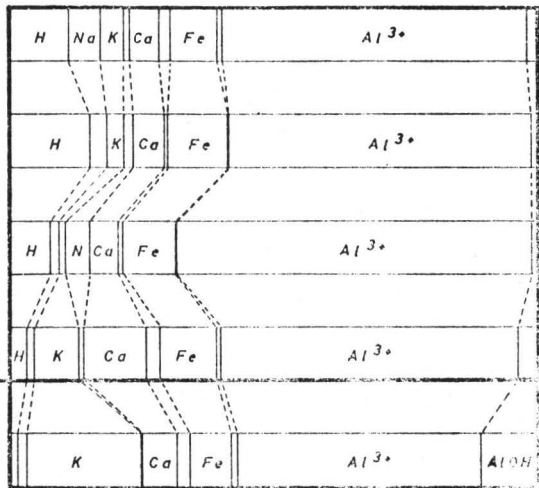
21.11.-31.12.1970

26.3.-26.4.1971

27.4.-28.5.1971

Abfallen der Nadeln
auf Fläche II

29.5.-30.6.1971



Fläche II: isoliert

H Na K $\text{NH}_3\text{-N}$ Ca Mg Fe Mn Al^{3+} AlOH

23.10.-20.11.1970

21.11.-31.12.1970

26.3.-26.4.1971

27.4.-28.5.1971

Abfallen der Nadeln

29.5.-30.6.1971

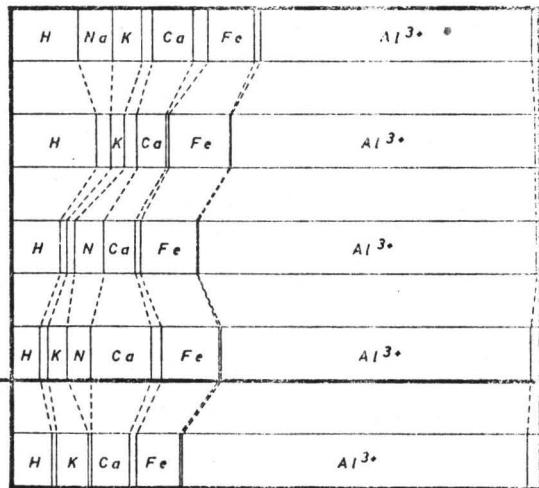


ABB. 7

Vergleich der Äquivalentbrüche

der Kationen im Kronentraufenwasser

zwischen der isolierten und der natürlichen Fläche

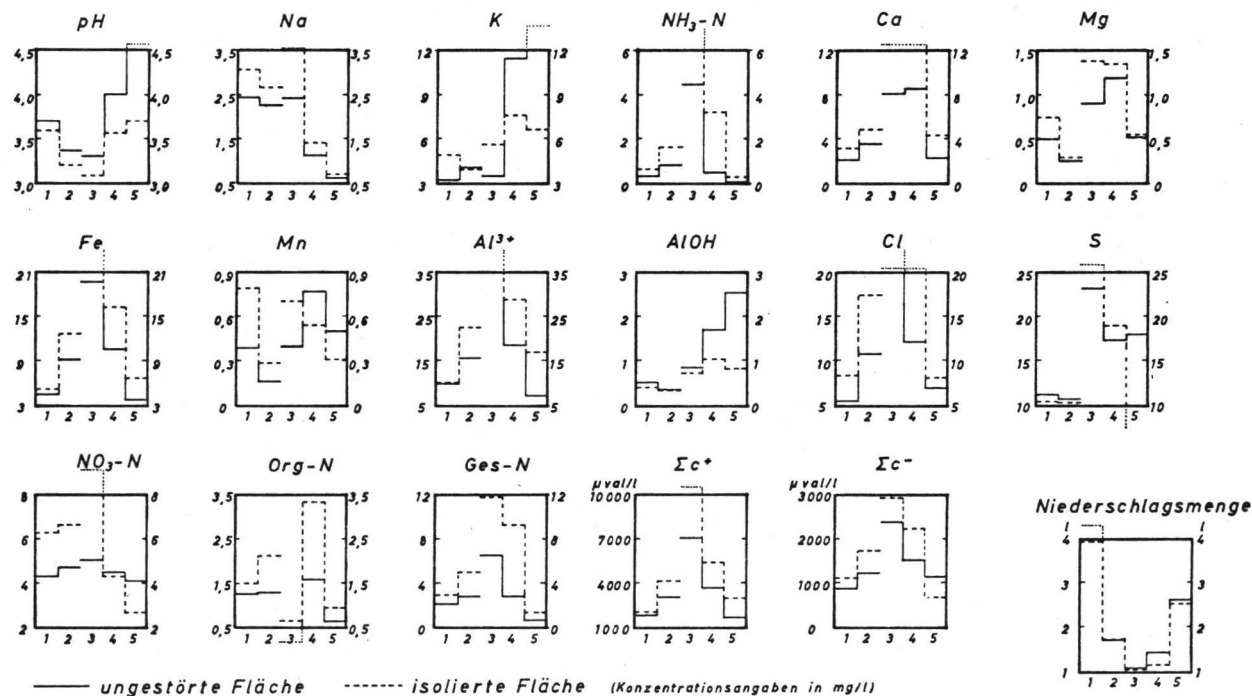


ABB. 8

Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Konzentrationen in der Kronentraufe in der Fichten-Dickung im Solling

eine Entscheidung zwischen Input und Turnover und damit über die Filterwirkung zulassen.

7. Niederschlagsuntersuchungen im Raum östlich Kassel

Östlich von Kassel erstreckt sich im Kaufunger Wald ein ausgedehntes, nicht durch Siedlungen unterbrochenes geschlossenes Waldgebiet bis zu den Ortschaften Trudelshausen / Hundelshausen im Gelstertal. In diesem Gebiet wurden an 2 Terminen im Januar und März 1972 in einer von Oberkaufungen bis zum Langenberg westöstlich sich erstreckenden Linie in insgesamt 35 Fichtenbeständen und zugehörigen Freiflächen die Niederschläge etwa je einer Woche aufgefangen. Die Ergebnisse sind in Tab. 11 und Abb. 9 dargestellt. Unter "Waldrand" wird im Folgenden nicht der Rand eines einzelnen Bestandes, sondern des Kaufunger Waldes verstanden.

Tab. 11

S-Konzentration und pH im Bestands- und Freilandniederschlag als Funktion der Entfernung vom Waldrand

	Ober- Kaufungen	Zoll- stock	Biel- stein	Langen- berg
Entfernung vom Waldrand bei Kassel in km	1,5	4	10	12,5
Entfernung vom Waldrand Gelsterbachtal in km	13	10,5	4,5	2
Anzahl Bestände	2	10	20	3
Bestandesniederschlag mg-ion S/l	16,5	12,2	9,7	11,6
Anzahl Freiflächen	3	4	4	4
Freiflächenniederschlag mg-ion S/l	1,23	0,73	0,82	0,77
pH	5,50	4,56	4,32	4,47

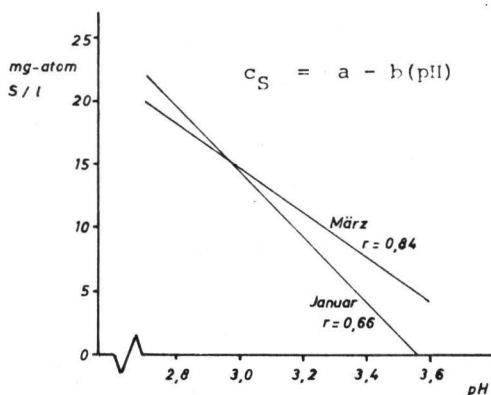
Die S-Konzentrationen im Freiland- und Bestandes-Niederschlag liegen bei dieser Untersuchung während der Heizperiode beim 5- bis 20-fachen der in den anderen Versuchsserien gemessenen jahresdurchschnittlichen Konzentration. Als Funktion der Entfernung vom Waldrand sinkt die S-Konzentration sowohl im Bestands- wie im Freilandniederschlag deutlich ab, wobei sowohl von der Siedlungsgröße wie von der Windrichtung hauptsächlich der Raum Kassel als SO_2 -Emittent zu betrachten ist. Aus der Abnahme der S-Konzentration von der Kassel am nächsten liegenden Meßstation Oberkaufungen zu den östlich davon liegenden Stationen um rund $1/3$ läßt sich ein Ausfilterungseffekt von etwa derselben Größenordnung vermuten. Die pH-Werte im Freilächenniederschlag erreichen ein Minimum beim Bielstein. Die in Waldrandnähe höheren pH-Werte weisen auf die Existenz basischer staubförmiger Luftverunreinigungen (z.B. aus Flugasche) hin, die als Kondensationskerne dienen und dabei aufgelöst werden.

Für den Bestandesniederschlag ergeben sich dagegen nach Abb. 9 hochsignifikante Korrelationen zwischen pH und S-Konzentration: mit steigender S-Konzentration sinkt der pH-Wert auf Werte von 2,5, mit Maximalwerten von 3,4 bei der Januar-Probenahme und 3,7 bei der März-Probenahme. Der Verlauf der Regressionslinien läßt erkennen, daß die Beziehung messzeit-spezifisch ist (der maximale pH-Wert liegt jeweils nahe dem O-Punkt der Ordinate, d.h. nahe bei einer minimalen S-Konzentration). Auch dies weist darauf hin, daß S-Konzentration und pH-Wert im Bestandesniederschlag nicht vom Bestand, sondern von der Umwelt (SO_2 -Konzentration in der Luft) geregelt werden.

Die gesamten Daten wurden schließlich noch varianzanalytisch verrechnet, wobei die Bestände nicht nach der Entfernung vom Waldrand, sondern nach dem Bestandesalter gruppiert wurden. Die Ergebnisse sind in Tab. 12 zusammengefaßt.

Abb. 9

Beziehungen zwischen pH und S-Konzentration im Niederschlag



Tab. 12

Ergebnisse der varianzanalytischen Verrechnung

Modell: $y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_{ij} + \gamma_{ijk} + \xi_{ijkl}$

Effekt	Altersklasse	Jahre	15-45	50-70	70-100	F-Test
A	S mg-ion/l		11,1	13,6	12,2	n.s.
	pH		3,17	3,01	3,14	n.s.
B(A)	Termine		Januar	März		
	S mg-ion/l		14,9	11,3		n.s.
	pH		2,98	3,19		xxx
C(AB)	Bestände: S-Konzentration und pH:					xxx
E	Wiederholungen: Standardabweichung s von S =					
	3,48 mg-ion/l					
	von pH= 0,13					

Im Wesentlichen zeigt das Ergebnis dieser Verrechnung, daß gemäß Tab. 11 die Lage oder aber Schluß und Astigkeit der Bestände (Signifikanz von Effekt C) S-Konzentration und pH vorrangig bestimmen.

8. Staubuntersuchungen

Ziel der vorwiegend im Solling in der Nähe der Wiesenfläche W1 des Sollingprojektes durchgeführten Staubuntersuchungen war, ausreichende Staubmengen für chemische Analysen zu gewinnen, um über einen Vergleich der chemischen Zusammensetzung von Staub, Niederschlagswasser und Kronentraufe zu Schlüssen über den Anteil von Staub an der Kronentraufe zu kommen. Es wurde daher mit dem Staubsammelgerät GRAVICON der Fa. Sartorius, Göttingen, gearbeitet, und zwar im Solling während der Monate Mai bis Juli 1972 auf Freiflächen. Erste Untersuchungen zeigten, daß in diesem Reinluftgebiet mehrere 1000 m³ Luft durchgesaugt werden mußten, damit die im gesammelten Staub enthaltenen Elementmengen ein Vielfaches der Blindwerte der verwendeten Glasfaserfilter SM 13400 betragen. Es konnte ferner nur mit Elektroanschluß gearbeitet werden, da das Stromaggregat zu viel Aerosole (Ruß) erzeugte.

Die Messungen ergaben die in Tab. 13 zusammengestellten Gehalte in der Luft.

Tab. 13

Chemische Zusammensetzung von Staubproben aus dem Solling											
Staub	Asche	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Pb	S	ΣOxide
					μg/m ³						
52	29	3,8	0,39	0,84	0,12	0,55	0,03	0,93	0,14	3,0	27
Äquivalentsumme					μval/m ³	0,353				0,187	
Äquivalentanteile Staub											
		0,46	0,03	0,12	0,03	0,06	0,003	0,29	0,004		
"	Niederschlag	0,20	0,08	0,45	0,16	0,02	0,002	0,08	-		
"	Kronentraufe	0,18	0,15	0,45	0,11	0,01	0,03	0,06	-		

Die Tabelle zeigt, daß 1. alle quantitativ wesentlichen Kationen erfaßt wurden, da die berechnete Summe der Oxide ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dem Aschegewicht ($29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entspricht, 2. Sulfat nicht als einziges Anion auftritt, der Rest dürfte Chlorid sein, 3. die Zusammensetzung von der der Kronentraufe völlig abweicht. Der hohe Na-Anteil läßt vermuten, daß die aufgefangenen Aerosole Überwiegend aus dem Meerwasser stammen und sekundär SO_2 aufgenommen haben. Als eine ins Gewicht fallende Input-Quelle kommen sie aufgrund ihrer Menge wie auch ihrer Zusammensetzung nicht in Betracht (s. auch Abschnitt 4).

9. Diskussion

So schnell und nachdrücklich niederschlagschemische Untersuchungen auch die Aufmerksamkeit auf die Frage der hohen Zufuhr von Sulfatschwefel gelenkt haben, so erwies es sich andererseits doch recht schwierig, allein mit niederschlagschemischen Untersuchungen den Nachweis für die Herkunft dieses Schwefels zu führen. Grundsätzlich stehen als Alternativen interner Umsatz im Ökosystem (Turnover, S-Anreicherung in der Kronentraufe durch Kronenauswaschung) oder Input aus der Luft (durch Auslösen und/oder Assimilation) zur Diskussion. Die meisten Untersuchungsergebnisse sind zwar mit der Erklärung als Input verträglich, lassen jedoch keinen Ausschluß der Erklärung als internen Umsatz zu. Allein die mehrjährigen Beobachtungen, daß der erhöhte S-Input mit der Kronentraufe der Fichte im Wesentlichen während des Winterhalbjahrs erfolgt, schließen internen Umsatz als Ursache aus und beweisen damit indirekt die Filterwirkung von Waldbeständen, besonders der Fichte, gegenüber SO_2 . Weitere niederschlagschemische Untersuchungen zu dieser Frage sollten daher folgernde Parameter berücksichtigen:

1. Interception als Maß für die zur Auslösung zur Ver-

fügung stehende Wassermenge im Kronenraum (für den Vergleich verschiedener Bestände)

2. Regendauer als Maß für die Zeitdauer, die zur Auslösung zur Verfügung steht
3. Angaben über Niederschlagsform
4. S- und H-Input mit Freilandniederschlag und Bestandesniederschlag
5. SO_2 -Gehalt in der Luft zur Zeit des Auslösungsvorganges

Mit Hilfe dieser Parameter sollte es möglich sein, aus entsprechenden Untersuchungsergebnissen eine empirische mathematische Bezeichnung abzuleiten, mit der die Filterwirkung von Waldbeständen für bestimmte Umweltsituationen abgeschätzt werden kann.

Ökologisch wirkt sich die Ausfilterung von SO_2 durch pH-Absenkung im Oberboden nachteilig aus. Hierauf soll an anderer Stelle eingegangen werden.

Zusammenfassung

Es werden eine Reihe niederschlagschemischer Ansätze zur Erfassung der Filterwirkung von Waldbeständen für SO_2 der Luft diskutiert. Aus Messungen von pH-Wert und SO_4 -S-Konzentration im Freiland- und Bestandesniederschlag kann eine minimale und eine maximale Filterwirkung berechnet werden, wobei die tatsächliche Filterwirkung aufgrund physiologischer Überlegungen näher bei dem maximalen wie bei dem minimalen Wert liegen dürfte. Die Filterung erfolgt durch Auslösen vor allem während der Herbst- und Wintermonate, weshalb Laubbölzer wie die Buche eine wesentlich geringere bis fehlende Filterwirkung besitzen. In emissionsferner Lage filtern Fichtenbestände ca 50 kg S/ha und Jahr (zwischen 30 und 70 kg S) aus der Luft aus. Dies ist der 2- bis 5-fache Betrag des Ausregnehmens von SO_2 .

Der mit der S-Immission verbundene Wasserstoffionen-Input spielt eine erhebliche Rolle bei der weitverbreiteten ökologisch bedenklichen Oberbodenversauerung vieler Wälder, besonders von Fichtenbeständen.

L i t e r a t u r

- ARENS, K.: Die kutikuläre Exkretion des Laubblattes. Jahrbücher für Wissenschaftliche Botanik 80, 248-300 (1934)
- ATTIWILI, P.M.: The chemical composition of rainwater in relation to cycling nutrients in mature eucalyptus forest. Plant and Soil 24, 390-406 (1966)
- BRUCKERT, S. et al.: Influence des pluviollessivats de hête et de pin sylvestre sur les processus d'humification. Oecologia Plantarum 6, 329-339 (1971)
- CARLISLE, A.: Carbohydrates in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea* (Mattushka) Liebl.) canopy. Plant and Soil 22, 399-400 (1965)
- CARLISLE, A., BROWN, A.H.F. und WHITE, E.J.: The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea*) canopy. Journal of Ecology 54, 87-98 (1966)
- DENAEYER DE SMET, S.: Contribution à l'étude du pluviollessivage du couvert forestier. Bulletin de la Société Royale Botanique de Belge 94, 285-308 (1962)
- ENGEL, H.: Das Verhalten der Blätter bei Benetzen mit Wasser. Jahrbücher für Wissenschaftliche Botanik 88, 816-861 (1939)
- ERIKSSON, E.: Air borne salts and the chemical composition of river waters. Tellus 7, 243-250 (1955)
- FREY-WYSSLING, A.: Die Stoffausscheidung der höheren Pflanzen. Berlin (1935)
- GRUNERT, F.: Der biologische Stoffkreislauf in Kiefern-Buchen-Mischbeständen und in Kiefernbeständen. Albrecht-Thaer-Archiv 8, 435-452 (1964)
- INGHAM, G. (1950 a): The mineral content of air and rain and its importance to agriculture. Journal of Agricultural Science 40, 55-61 (1950)
- KATZ, M.: Sulfur dioxide in the atmosphere and its relations to plant life. Industrial and Engineering Chemistry 41, 2450-2465 (1949)

LAMPADIUS, F.: Die Bedeutung der SO_2 -Filterung des Waldes im Blickfeld der forstlichen Rauchscha-denstherapie.

Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden 17, 503-511 (1968)

LAUSBERG, T.: Quantitative Untersuchungen über die cuticuläre Exkretion des Laubblattes. Jahrbücher für Wissenschaftliche Botanik 81, 769-806 (1935)

LEPESCHKIN, W.W.: Influence of temperature and light upon the exosmosis and accumulation of salts in leaves. American Journal of Botany 35, 254-259 (1948)

LUNDEGARDH, H.: Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben (4. Auflage). Jena (1954)

MADGWICK, H.A.I. und OVINGTON, J.D.: The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plots. Forestry 32, 1-22 (1959)

MANN, C.E.T. und WALLACE, T.: The effect of leaching with cold water on the foliage of the apple. Journal of Pomological and Horticultural Sciences 4, 146-161 (1925)

MATERNA, J.: Nekteré výsledky výzkumu v krusnohorské kourové oblasti. III. celostátní bioklimatologická konference v Praze 1961, Sbornik Dokumentu, 156-170 (1963)

MATERNA, J. und KOHOUT, R.: Die Absorption des Schwefeldioxi-ds durch die Fichte. Naturwissenschaften 50, 407 (1963)

MAYER, R.: Bioelement-Transport im Niederschlagswasser und in der Bodenlösung eines Wald-Ökosystems. Göttinger Bodenkundliche Berichte 19, 1-119 (1971)

MCCOLL, J.G.: Properties of some natural waters in a tropical wet forest of Costa Rica. Bio-Science 20, 1096-1100 (1970)

MECKLENBURG, R.A., TUKEY jr., H.B. und MORGAN, J.V.: A mechanism for the leaching of Calcium from foliage. Plant Physiology 41, 610-613 (1966)

MILLER, R.B.: Plant nutrients in hard beech. III. The cycle of nutrients. New Zealand Journal of Science 6, 388-413 (1963)

MINA, V.N.: Leaching of certain substances by precipitation

- from woody plants and its importance in the biological cycle. Soviet Soil Science 6, 609-617 (1965)
- NEUWIRTH, R.: Vorläufiger Bericht über Messungen der Luftreinheit im Waldlabor am Uhlberg bei der Zähringer Burg. Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung 139, 37-39 (1962)
- NIHLGARD, B.: Precipitation, its chemical composition and effect on soil water in a beech and spruce forest in South Sweden. Oikos 21, 208-217 (1970)
- NYE, P.H.: Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest. Plant and Soil 13, 333-346 (1961)
- OELSCHLÄGER, W.: Die Verunreinigung der Atmosphäre durch Fluor. Staub 25, 528-532 (1965)
- OST, H.: Die Verbreitung der Schwefelsäure in der Atmosphäre. Chemische Industrie 23, 292-296 (1900)
- OVINGTON, J.D.: Quantitative ecology and woodland ecosystem concept. Advances in Ecological Research 1, 103-192 (1962)
- ROUSCHAL, E. und STRUGGER, S.: Der floureszenzoptisch-histochemische Nachweis der kutikulären Rekretion und des Salzweges im Mesophyll. Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft 58, 50-69 (1940)
- SCHOCH, K.: Quantitative Erfassung der kutikulären Rekretion von K und Ca. Berichte der Schweizer Botanischen Gesellschaft 65, 205-250 (1955)
- SOLRIANEGARA, I.: Peranan hudjan pada peredaran hara mineral dalam ecosystem daratan. Rimba Indonesia 15, 36-41 (1970)
- Stenlid, G.: Salt losses and restitution of salts in higher plants. S. 615-637 in: Handbuch der Pflanzenphysiologie, Band IV (1958)
- TAMM, C.O.: Removal of plant nutrients from tree crowns by rain. Physiologia Plantarum 4, 184-188 (1951)
- TAMM, C.O.: Growth, yield and nutrition in carpets of a forest moss (Hylocomium splendens). Meddelanden fran Statens Skogsforskning Inst. 43, 1-140 (1953)
- TARRANT, R.F. et al.: Nitrogen content of precipitation in a coastal Oregon forest opening. Tellus 20, 554-556 (1968)
- THOMAS, W.A., AUERBACH, S.I. und OLSON, J.S.: Accumulation and cycling of calcium by flowering dogwood trees. ORNL-TM-

- 1919, Oak Ridge Nat. Lab. (1967)
- THORNE, G.N.: Absorption of nitrogen, phosphorus and potassium from nutrient sprays by leaves. *Journal of Experimental Botany* 5, 37-48 (1954)
- TUKEY, H.B. und MORGAN, J.V.: The occurrence of leaching from aboveground plant parts and the nature of the material leached. *Proceedings of the 16th International Horticultural Congress, Brussels* 4, 153-160 (1962)
- TUKEY jr., H.B.: Leaching of metabolites from foliage and its implication in the tropical rain forest canopy. S. H.155 - H.160 in: ODUM, H.T. (Hrsg.): *A Tropical Rain Forest*. Washington (1970)
- TUKEY jr., H.B.: The leaching of substances from plants. *Annual Review of Plant Physiology* 21, 305-324 (1970)
- VOIGT, G.K.: Alteration of the composition of rainwater by trees. *American Midland Naturalist* 63, 321-326 (1960)
- WALLACE, T.: Experiments on the effect of leaching with cold water on the foliage of fruit trees. *Journal of Pomological and Horticultural Science* 9, 44-60 (1930)
- WILSON, A.T. (1959 a): Organic nitrogen in New Zealand snows. *Nature* 183, 318-319 (1959)
- WILSON, A.T. (1959 b): Surface of the ocean as a source of airborne nitrogenous material and other plant nutrients *Nature* 184, 99-101 (1959)
- WISLICENUS, H.: Nachweis der schwefeligen Säure in der Waldluft des Tharandter Waldes. *Tharandter Forstliches Jahrbuch* 48, 173-184 (1898)
- WITTWER, S.H. und TEUBNER, F.G.: Foliar absorption of mineral nutrients. *Annual Review of Plant Physiology* 10, 13-27 (1959)
- YAMADA, Y., RASMUSSEN, H.P., BUKOVAC, M.J. und WITTWER, S.H.: Binding sites for inorganic ions and urea on isolated cuticular membrane surfaces. *American Journal of Botany* 53, 170-172 (1966)

**Tabellen der Biomasse, der Energie- und Bioelementgehalte
der Buche in einem bodensauren Buchenwald
(Luzulo-Fagetum) des Solling**

M. B. Pavlov *)

*) Anschrift. Institut für Forsthydrologie
D - 3510 Hann. Münden, Gartenstraße 1

Ergebnisse des Sollingprojekts der DFG (IBP), Mitt. Nr. 113

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 29, 193 – 210
(1973)**

Einführung

Ein wichtiges Ziel bei der Untersuchung von Wald-Ökosystemen ist die Erfassung der Biomasse sowie des Energie- und Bioelementgehaltes der organischen Substanz.

In Tabelle 1 werden die mittleren Aschen- und Bioelementgehalte der Blätter sowie der Rinde und des Holzes von Ästen, Stamm und Wurzeln der Buche in mmol/kg Trockenmasse gegeben. Zusammen mit den Mittelwerten sind die jeweiligen Streuungen der Mittelwerte, ausgedrückt in Prozent, angegeben ($\pm$ S%). Die Werte für die oberirdischen Baumteile entsprechen dabei den in PAVLOV, 1972, Tab. 9 a gegebenen Werten. In dieser Arbeit befinden sich auch sämtliche Angaben über Probenahmeschema, Untersuchungs- und Analysenmethoden.

Die Bioelementgehalte in Tabelle 1 bilden zusammen mit der abschnittsweisen Bestimmung der Biomasse von Einzelbäumen (HELLER, 1971 und unveröffentlicht) sowie der Energiegehalte der organischen Substanz (RUNGE, 1973 a,b) die Grundlage für die Tabellen 2 a - n: Dort werden die Biomasse sowie die Energie und Bioelementgehalte pro Baum für verschiedene Durchmesserklassen (gemessen in 1,3 m Stammhöhe) angegeben. Rechnerisch lassen sich aus diesen Werten weitere Massen- und Gehaltswerte wie z.B. die Bioelementmengen im Derbholz (Spalte 2 minus Spalte 4), in der Derbholz-Rinde (2-4-3), in der Wurzelrinde (5-6) usw. bestimmen. Die Fein- und Feinstwurzeln (≤ 5 mm) sind in den Tabellen 2 a - n nicht berücksichtigt.

Für die Unterstützung der Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr. B. Ulrich und Herrn Prof. Dr. H. Hatterer.

Tab. 1: Mittelwerte der Bioelementgehalte in Buchen
Mean values of the bioelement concentration in beech

Pflanzenmaterial plant part		Asche %		Bioelement-Vorräte in mmol/kg Trockenmasse Bioelement stores in mmoles/kg dry matter											
		Ash	Si	Na	K	Ca	Mg	Mn	Al	P	Fe	Zn	N		
Blätter leaves	$\bar{y}$	3.60	93	4.7	219	110	31	30	3.0	55	4.3	0.7	2068		
	$\pm S$	4.4	9.6	38.3	3.7	30.1	4.8	25.0	3.7	5.5	36.2	34.3	9.3		
Astholz Branches, wood	$\bar{y}$	0.55	5.4	1.3	29	29	7.9	7.8	0.4	15	1.4	0.2	169		
	$\pm S$	12.7	100	46.2	27.9	50.0	19.0	21.8	75.0	157	64.3	10.0	22.5		
Astholzzrinde Branches, bark	$\bar{y}$	3.53	181	3.4	37	211	15	30	4.4	19	8.0	1.0	567		
	$\pm S$	11.3	21.2	100	20.8	17.4	15.3	27.7	31.8	23.2	35.0	30.0	8.6		
Stammholz Bole wood	$\bar{y}$	0.48	8.1	0.9	22	19	8.6	7.1	0.3	5.5	1.3	0.13	81.9		
	$\pm S$	14.6	45.7	267	60.4	191	53.5	11.3	30.8	131	69.2	33.3	3.3		
Stammholzzrinde Bole, bark	$\bar{y}$	3.41	113	2.2	61	199	17	33	2.0	24	5.9	0.5	597		
	$\pm S$	70.4	27.7	214	106	31.0	34.7	189	85.0	97.1	151	50.0	42.7		
Wurzelholz Roots, wood	$\bar{y}$	1.09	26.0	49	37.0	29.0	11.0	4.0	6.0	16	2.0	0.60	186		
	$\pm S$	27.5	45.4	81.6	88.1	20.0	15.5	10.0	36.7	25.0	35.0	83.3	46.2		
Wurzelrinde Roots, bark	$\bar{y}$	5.54	499	61	79	125	29	8.7	83	24.0	19.0	3.2	596		
	$\pm S$	5.4	7.3	59.0	15.6	12.4	13.5	87.4	12.4	26.7	10.5	15.6	8.9		
Feinwurzeln 5mm Fine roots	$\bar{y}$	4.65	518	16	55	59	39	5.6	83	24	52	1.9	489		
	$\pm S$	38.9	58.5	190	34.6	60.5	178	76.8	83.0	57.6	248	42.1	108		

Tabelle 2a: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Biomasse in kg						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			Summe pro Baum/ Total per tree
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm m. Rinde/ with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm o. Rinde/ without bark	Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
1	2	3	4	5	6	7	8
7	8.7	8.2	7.2				
8	12.2	11.6	8.2				
9	17.6	16.8	9.5				
10	24.9	23.7	10.8				
11	34.2	32.4	12.2				
12	45.3	42.9	13.8				
13	58.4	55.1	15.5	9.5	8.4	7.7	67.9
14	73.4	69.2	17.3	11.7	10.4	9.8	85.1
15	90.3	85.0	19.2	14.1	12.5	12.0	104.1
16	109.1	102.5	21.3	16.2	14.8	14.4	125.3
17	129.8	121.9	23.5	19.5	17.3	16.9	149.3
18	152.4	143.0	25.7	22.4	19.9	19.6	174.3
19	176.9	165.9	28.2	25.5	22.6	22.5	202.4
20	203.3	190.6	30.7	28.7	25.5	25.5	232.0
21	231.7	217.0	33.3	32.1	28.5	28.6	263.8
22	261.9	245.3	36.1	35.7	31.7	31.9	297.6
23	294.1	275.3	39.0	39.5	35.0	35.4	333.6
24	328.2	307.0	42.0	43.4	38.5	39.0	371.6
25	364.2	340.6	45.1	47.4	42.1	42.8	411.6
26	402.1	375.9	48.4	51.7	45.9	46.7	453.8
27	441.9	413.0	51.8	56.1	49.8	50.8	498.0
28	483.6	451.8	55.2	60.7	53.9	55.0	544.3
29	527.2	492.5	58.9	65.4	58.1	59.4	592.6
30	572.7	534.9	62.6	70.4	62.5	64.0	643.1
31	620.2	579.1	66.4	75.4	67.0	68.7	695.6
32	669.6	625.0	70.4	80.7	71.7	73.5	750.3
33	720.8	672.8	74.5	86.1	76.5	78.5	806.9
34	774.0	722.3	78.7				
35	829.1	763.7	83.0				
36	886.1	816.7	87.5				
37	945.0	871.5	91.9				
38	1005.8	938.1	96.7				
39	1068.5	996.4	101.6				
40	1133.1	1056.6	106.5				

Tabelle 2b: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Kcal: * 10 ³						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			Summe pro Baum/ Total per tree
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	41.1	39.5	23.4				
8	54.7	54.7	25.3	3.4			
9	83.3	78.2	27.3				
10	117.9	110.0	29.3	17.8	15.8	11.4	
11	161.5	150.2	31.8				
12	214.2	198.6	34.2				
13	275.8	255.4	36.8	45.4	40.3	37.0	321.2
14	346.4	320.5	39.5	46.2	49.9	47.0	402.6
15	426.0	394.0	42.3	67.8	60.2	57.8	493.8
16	514.6	475.7	45.3	80.2	71.2	69.3	594.8
17	612.2	565.8	48.4	93.4	82.9	81.5	705.6
18	769.7	664.2	51.6	107.4	95.4	94.5	877.1
19	834.4	770.9	54.9	122.2	108.5	108.3	956.6
20	959.0	885.9	58.4	137.8	122.3	122.7	1096.8
21	1092.6	1009.3	62.1	154.2	136.9	137.9	1246.8
22	1235.3	1188.1	65.8	171.4	152.2	153.9	1406.7
23	1386.9	1280.9	69.7	189.4	168.1	170.6	1576.3
24	1547.5	1429.2	73.7	208.2	184.8	188.0	1755.7
25	1717.1	1585.9	77.9	227.8	202.2	206.2	1944.9
26	1895.7	1750.8	82.2	248.2	220.3	225.1	2143.9
27	2083.3	1924.1	86.6	269.4	239.1	244.8	2352.7
28	2279.9	2105.7	91.2	291.4	258.7	265.2	2571.3
29	2485.5	2295.6	95.9	314.2	278.9	286.3	2799.7
30	2700.1	2446.6	100.7	337.8	299.8	308.2	3037.9
31	2923.7	2700.4	105.6	362.2	321.5	330.9	3185.9
32	3156.4	2915.2	110.7	387.4	343.9	354.2	3543.8
33	3398.0	3138.4	116.0	413.4	366.9	378.3	3811.4
34	3648.6	3369.9	121.3				
35	3908.2	3609.8	126.8				
36	4176.8	3857.9	132.4				
37	4505.3	4114.4	138.2				
38	4741.0	4379.2	144.1				
39	5036.6	4652.3	150.1				
40	5341.2	4933.7	156.3				

Tabelle 2c: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Stickstoff (N) in g						Summe pro Baum/ Total per tree
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	7.2						
8	10.0						
9	16.6						
10	27.0	25.2					
11	41.2	36.2					
12	59.1	49.9	46.6				
13	80.8	66.4	53.9	26.7	16.5	21.1	107.5
14	106.4	85.8	61.7	32.9	20.4	26.8	139.3
15	135.6	107.9	70.0	39.6	24.5	32.9	175.2
16	168.7	132.9	78.8	46.7	28.9	39.4	215.4
17	205.6	160.6	88.2	54.3	33.6	46.3	259.9
18	246.2	191.1	98.1	62.3	38.5	53.6	308.5
19	290.6	224.5	108.4	70.8	43.8	61.4	361.4
20	338.8	260.6	119.4	79.8	49.3	69.6	418.6
21	390.8	299.6	130.8	89.2	55.2	78.2	480.0
22	446.5	341.3	142.7	99.1	61.3	87.2	545.6
23	506.0	385.8	155.2	109.5	67.7	96.7	615.5
24	569.4	433.2	160.2	120.3	74.3	106.6	689.7
25	636.4	483.3	181.7	131.6	81.3	116.9	768.0
26	707.3	536.3	195.7	143.3	88.5	127.6	850.6
27	782.0	592.0	210.3	155.6	96.1	138.9	937.6
28	860.4	650.5	225.4	168.1	103.9	150.2	1028.5
29	942.6	711.9	240.9	181.2	112.0	162.2	1123.8
30	1029	776.0	257.2	195.0	120.3	174.6	1224.0
31	1118	843.0	273.7	209.0	129.0	187.4	1327.0
32	1212	912.7	290.8	223.0	137.9	200.6	1435.0
33	1309	985.2	308.5	238.0	147.2	214.3	1547.0
34	1410	1061	326.7				
35	1515	1139	345				
36	1624	1220	358				
37	1736	1303	384				
38	1853	1390	405				
39	1973	1479	425				
40	2096	1571	447				

Tabelle 2d: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Phosphor (P) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts		Summe pro Baum/ Total per tree	
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumbolz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm			
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
						Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
1	2	3	4	5	6	7	8
7	0.4						
8	0.5	0.5					
9	1.3	1.1					
10	2.7	2.2					
11	4.7	3.7					
12	7.3	5.8					
13	10.4	8.4	9.1	3.4	2.6	2.3	13.8
14	14.2	11.4	10.4	4.9	3.8	3.6	19.1
15	18.6	15.0	11.8	6.4	5.0	5.0	25.0
16	23.6	19.0	13.2	7.8	6.2	6.3	31.4
17	29.2	23.6	14.7	9.3	7.4	7.7	38.5
18	35.3	28.6	16.2	10.8	8.6	9.0	46.1
19	42.1	34.2	17.8	12.3	9.8	10.4	54.4
20	49.5	40.2	19.5	13.8	11.0	11.7	63.3
21	57.5	46.7	21.2	15.3	12.2	13.1	72.8
22	66.1	53.8	23.0	16.8	13.4	14.4	82.9
23	75.2	61.3	24.9	18.2	14.6	15.8	93.4
24	85.0	69.3	26.8	19.7	15.8	17.1	104.7
25	95.4	77.8	28.8	21.2	17.0	18.5	116.6
26	106.4	86.9	30.8	22.7	18.2	19.8	129.1
27	118.0	96.3	32.9	24.2	19.4	21.2	142.2
28	130.1	106.3	35.0	25.7	20.6	22.5	155.8
29	142.9	116.8	37.2	27.1	21.8	23.9	169.0
30	156.0	127.8	39.5	29.0	23.0	25.2	185.0
31	170.0	139.3	41.8	30.0	24.2	26.6	200.0
32	185.0	151.3	44.2	32.9	25.4	27.9	217.0
33	200.0	163.7	46.7	33.0	26.6	29.3	233.0
34	216.0	176.7	49.2				
35	232.0	190.2	51.8				
36	249.0	204.1	54.4				
37	267.0	218.6	57.1				
38	285.0	233.6	59.8				
39	304.0	249.0	62.6				
40	323.0	265.0	65.5				

Tabelle 2e: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Kalium (K) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			Summe pro Baum/ Total per tree
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumbolz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm	Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.		
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	4.6	4.2					
8	6.8	6.2					
9	11.1	10.0					
10	17.5	15.6					
11	26.1	23.1	21.2				
12	36.8	32.4	24.2				
13	49.7	31.7	27.4	14.4	13.3	13.1	64.1
14	64.7	56.5	30.9	18.3	16.5	16.8	83.0
15	81.8	71.3	34.6	22.5	19.9	20.7	104.3
16	101.1	88.0	38.5	27.1	23.5	24.9	128.2
17	122.5	106.5	42.6	31.9	27.3	29.4	154.4
18	146.1	126.9	46.9	37.0	31.4	34.2	183.1
19	171.8	149.1	51.5	42.4	35.8	39.2	214.2
20	199.6	173.1	56.3	48.1	40.3	44.5	247.7
21	229.6	199.0	61.3	54.1	45.1	50.1	283.7
22	261.7	226.7	66.5	60.3	50.2	55.9	322.0
23	296.0	256.2	71.9	66.9	55.4	62.1	362.9
24	332.4	287.6	77.6	73.8	60.9	68.5	406.2
25	370.9	320.8	83.5	80.9	66.7	75.1	451.8
26	411.6	355.9	90.0	88.4	72.6	82.1	500.0
27	554.4	392.8	95.8	96.1	78.8	89.3	550.5
28	499.4	431.4	102.4	104.1	85.3	96.7	603.5
29	546.5	472.2	109.2	112.5	91.6	104.5	659.0
30	595.7	514.6	116.2	121.1	98.8	112.5	716.8
31	647	558.9	123.4	130.0	106.0	120.8	777
32	701	605.0	130.8	139	113	129	830
33	576	652.9	138.4	149	121	130	905
34	814	702.7	146.3				
35	874	754.3	154.4				
36	936	807.8	162.7				
37	1000	863.1	171.2				
38	1067	920.3	179.9				
39	1135	979.3	188.9				
40	1206	1040.1	198.1				

Tabelle 2f : Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Calcium (Ca) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			Summe pro Baum/ Total per tree
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	42.2	31.3	14.8				
8	56.4	42.3	15.7				
9	71.2	53.5	16.9				
10	86.5	64.6	18.3				
11	102.3	75.9	19.9				
12	118.7	87.1	21.8				
13	135.6	98.5	23.9	15.9	7.5	11.2	151.5
14	153.0	109.8	26.3	18.7	9.2	13.8	171.7
15	171.0	118.8	28.9	21.7	11.1	16.6	192.7
16	189.6	132.7	31.8	25.0	13.1	19.5	215.7
17	208.6	144.3	34.9	28.4	15.3	22.7	237.0
18	228.2	155.8	38.2	32.0	17.6	26.1	260.2
19	248.4	167.5	41.8	35.9	20.0	29.6	284.3
20	269.1	179.1	45.6	39.9	22.5	33.4	309.0
21	290.3	190.9	49.6	44.2	25.2	37.3	334.5
22	312.1	202.6	53.9	48.7	28.0	41.4	360.8
23	334.4	214.5	58.4	53.4	30.9	45.7	387.8
24	357.2	226.3	63.2	58.3	33.9	50.3	415.5
25	380.6	238.3	68.2	63.3	37.1	55.0	443.9
26	404.6	250.2	73.5	68.7	40.4	59.9	473.3
27	429.0	262.3	79.0	74.2	43.9	64.9	503.2
28	454.0	274.3	84.7	79.9	47.5	70.2	533.9
29	479.6	286.5	90.7	85.8	51.2	75.7	565.4
30	506	298.7	96.9	92.0	55.0	81.4	598.0
31	532	310.9	103.3	98.0	59.0	87.2	620.0
32	560	323.1	110.0	105.0	63.1	93.3	665.0
33	587	335.5	116.9	112.0	67.3	99.5	699.0
34	615	347.8	124.1				
35	644	360.3	131.5				
36	674	372.7	139.2				
37	703	385.3	147.1				
38	734	397.8	155.2				
39	765	410.5	163.6				
40	796	423.1	172.2				

Tabelle 2g: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Magnesium (Mg) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts		Summe pro Baum/ Total per tree	
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumbolz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 cm/ Roots > 5 mm	Wurzeln > 10 cm/ Roots > 10 mm with b.		
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	0.5						
8	0.8	0.76					
9	1.5	1.43					
10	2.7	2.5	2.3				
11	4.3	4.1	2.7				
12	6.5	6.1	3.0				
13	9.1	8.5	3.4	2.7	1.8	2.0	11.8
14	12.2	11.4	3.8	3.3	2.3	2.5	15.5
15	15.8	14.7	4.2	3.9	2.6	3.1	19.7
16	19.9	18.4	4.7	4.6	3.3	3.7	24.5
17	24.4	19.6	5.1	5.3	3.8	4.4	29.7
18	29.5	27.3	5.6	6.1	4.4	5.1	35.1
19	35.0	32.3	6.2	6.9	5.1	5.8	41.9
20	41.0	37.8	6.7	7.7	5.7	6.6	48.7
21	47.5	43.8	7.3	8.6	6.4	7.4	56.1
22	54.4	50.2	7.9	9.6	7.2	8.3	64.0
23	61.8	57.0	8.6	10.6	7.9	9.2	72.4
24	69.7	64.3	9.2	11.6	8.7	10.1	81.3
25	78.1	72.0	9.9	12.7	9.6	11.1	90.7
26	87.0	80.1	10.6	13.8	10.4	12.1	100.8
27	96.3	88.7	11.4	15.0	11.3	13.2	111.3
28	106.2	97.8	12.1	16.2	12.3	14.3	122.4
29	116.5	107.2	12.9	17.4	13.2	15.4	133.9
30	127.3	117.1	13.7	18.7	14.2	16.6	146.0
31	139.0	127.5	14.5	20.1	15.3	17.8	159.1
32	150.0	138.3	15.4	21.5	16.3	19.1	171.5
33	163.0	150.0	16.3	22.9	17.4	20.4	185.9
34	175.0	161.2	17.3				
35	188.0	173.3	18.2				
36	202.0	185.8	19.2				
37	216.0	198.8	20.2				
38	231.0	212.3	21.2				
39	246.0	226.1	22.3				
40	262.0	240.4	23.3				

Tabelle 2h: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Natrium (Na) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			Sucrose pro Baum/ Total per tree
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	0.9	0.8	0.3				
8	1.3	1.1	0.3				
9	1.5	0.9	0.3				
10	1.7	1.6	0.4				
11	2.0	1.8	0.4				
12	2.3	2.1	0.4				
13	2.7	2.4	0.5	16.7	13.7	8.5	19.4
14	3.0	2.7	0.5	17.5	14.3	9.3	20.5
15	3.4	3.0	0.6	18.4	14.9	10.1	21.8
16	3.7	3.3	0.6	19.2	15.5	10.9	22.9
17	4.1	3.6	0.7	20.1	16.1	11.7	24.2
18	4.5	3.9	0.8	20.9	16.7	12.4	25.4
19	4.9	4.3	0.8	21.8	17.2	13.2	26.7
20	5.3	4.6	0.9	22.6	17.8	14.0	27.9
21	5.8	5.0	1.0	23.5	18.4	14.8	29.4
22	6.2	5.4	1.1	24.3	19.0	15.6	30.5
23	6.7	5.7	1.2	25.2	19.6	16.3	31.9
24	7.2	6.1	1.3	26.0	20.2	17.1	33.2
25	7.7	6.5	1.4	26.9	20.8	17.9	34.6
26	8.2	7.0	1.5	27.7	21.4	18.7	35.9
27	8.7	7.4	1.7	28.6	22.0	19.5	37.3
28	9.2	7.8	1.8	29.4	22.6	20.3	38.6
29	9.8	8.3	1.9	30.3	23.1	21.0	40.1
30	10.3	8.7	2.1	31.1	23.7	21.8	41.4
31	10.9	9.2	2.2	32.0	24.3	22.6	42.9
32	11.5	9.7	2.4	32.8	24.9	23.4	44.3
33	12.1	10.1	2.5	33.7	25.5	24.2	45.8
34	12.7	10.6	2.7				
35	13.4	11.2	2.9				
36	14.0	11.7	3.0				
37	14.7	12.2	3.2				
38	15.3	12.7	3.4				
39	16.0	13.3	3.6				
40	16.7	13.9	3.8				

Tabelle 21: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Eisen (Fe) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts		Summe pro Baum/ Total per tree	
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm			Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	4.0	3.5	1.2				
8	5.3	4.8	1.4				
9	6.6	6.0	1.6				
10	7.9	7.2	1.9				
11	9.1	8.3	2.1				
12	10.4	9.4	2.4				
13	11.6	10.4	2.6	0.2			11.8
14	12.8	11.4	2.9	0.7		0.1	13.5
15	14.0	12.3	3.1	1.4	0.04	0.7	15.4
16	15.2	13.2	3.4	2.0	0.5	1.3	17.2
17	16.4	14.0	3.8	2.7	0.9	1.9	19.1
18	17.5	14.8	4.0	3.5	1.4	2.6	21.0
19	18.7	15.5	4.3	4.3	1.9	3.3	23.0
20	19.8	16.2	4.6	5.1	2.5	4.0	24.9
21	20.9	16.8	4.9	6.0	3.1	4.8	26.9
22	21.9	17.4	5.2	6.9	3.7	5.6	28.8
23	23.0	17.9	5.5	7.9	4.3	6.5	30.9
24	24.0	18.4	5.8	8.9	5.0	7.3	32.9
25	25.1	18.8	6.1	9.9	5.6	8.3	35.0
26	26.1	19.2	6.5	11.0	6.4	9.2	37.1
27	27.1	19.5	6.8	12.1	7.1	10.3	39.2
28	28.0	19.8	7.2	13.3	7.9	11.3	41.3
29	29.0	20.0	7.5	14.5	8.7	12.4	43.5
30	29.9	20.2	7.9	15.8	9.5	13.5	45.7
31	30.8	20.2	8.2	17.1	10.3	14.7	47.9
32	31.7	20.3	8.6	18.5	11.2	15.9	50.2
33	32.6	20.4	9.0	19.9	12.1	17.1	52.5
34	33.5	20.4	9.4				
35	34.3	20.3	9.7				
36	35.2	20.2	10.1				
37	36.0	20.0	10.5				
38	36.8	19.8	10.9				
39	37.6	19.5	11.4				
40	38.3	19.2	11.8				

Tabelle 2k : Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Mangan (Mn) in g						Summe pro Baum/ Total per tree
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7							
8							
9							
10							
11	1.2	0.8					
12	5.5	4.0					
13	11.1	8.3	8.7	1.8	0.5	1.3	12.9
14	18.1	13.6	9.8	2.3	1.0	1.8	20.4
15	26.4	19.9	11.1	2.9	1.5	2.4	29.3
16	36.1	27.3	12.4	3.5	2.0	3.0	39.6
17	47.2	35.8	13.8	4.2	2.6	3.6	51.4
18	59.6	45.4	15.2	4.9	3.2	4.3	64.5
19	73.4	56.0	17.2	5.7	3.8	5.0	79.1
20	88.5	67.6	18.5	6.5	4.5	5.7	95.0
21	105.0	80.3	20.2	7.3	5.2	6.5	112.3
22	122.9	94.1	22.1	8.2	5.9	7.3	131.1
23	142.1	109.0	24.0	9.1	6.7	8.2	151.2
24	162.7	124.9	26.0	10.1	7.5	9.1	172.8
25	184.6	141.8	28.1	11.1	8.3	10.0	195.7
26	207.9	159.8	30.3	12.1	9.2	11.0	220.0
27	232.6	178.9	32.6	13.2	10.1	12.0	245.8
28	258.6	199.1	34.9	14.3	11.0	13.0	272.9
29	286.0	220.3	37.4	15.5	12.0	14.1	301.5
30	314.6	242.5	39.9	16.7	13.0	15.2	331.3
31	344.8	265.8	42.5	17.9	14.0	16.4	362.7
32	376.3	290.2	45.3	19.2	15.1	17.6	395.5
33	409.1	315.7	48.1	20.5	16.2	18.8	429.6
34	443.3	342.2	51.0				
35	478.8	369.7	53.9				
36	515.7	398.3	57.0				
37	554.0	428.0	60.2				
38	593.6	458.8	63.4				
39	634.6	490.6	66.7				
40	676.9	523.4	70.2				

Tabelle 21 : Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Silicium (Si) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts		Summe pro Baum/ Total per tree	
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o.Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm			
				m.Rinde/ with bark	o.Rinde/ without bark		
7							
8							
9							
10	0.2						
11	2.3						
12	5.6						
13	10.2		6.6	4.3			14.5
14	16.0	0.2	7.6	10.0		5.2	26.0
15	23.0	3.6	8.7	16.1		10.9	39.1
16	31.2	7.8	10.1	22.7	0.1	17.0	53.9
17	40.6	12.7	11.6	29.6	3.9	23.5	70.2
18	51.3	18.5	13.4	37.0	7.9	30.4	88.3
19	63.2	24.9	15.3	44.8	12.1	37.7	107.0
20	76.3	32.2	17.3	53.0	16.6	45.4	129.3
21	90.6	40.1	19.6	61.7	21.3	53.4	152.3
22	106.1	48.9	22.0	70.8	26.3	61.9	176.9
23	122.9	58.4	24.7	80.3	31.5	70.8	203.2
24	140.9	68.7	27.5	90.2	35.8	80.0	231.1
25	160.1	79.7	30.4	100.5	42.5	89.7	260.6
26	180.5	91.5	33.6	111.3	48.4	99.7	291.8
27	202.1	104.0	36.9	122.5	54.5	110.2	324.6
28	225.0	117.4	40.5	134.1	60.8	121.0	359.1
29	249.1	131.4	44.2	146.1	67.3	132.2	395.2
30	274.4	146.3	48.0	158.5	74.1	143.9	432.9
31	300.9	161.8	52.1	171.4	81.1	155.9	472.3
32	328.6	178.2	56.3	184.7	88.4	168.3	513.3
33	357.6	195.3	60.8	198.4	95.9	181.1	556.0
34	387.8	213.2	65.4				
35	419.2	231.8	70.1				
36	451.8	251.2	75.1				
37	485.6	271.3	80.2				
38	520.7	292.3	85.6				
39	557.0	313.9	91.1				
40	594.5	336.4	96.7				

Tabelle 2m: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Aluminium (Al) in g						Summe pro Baum/ Total per tree
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Role wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				m. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	0.5	0.3	0.2				
8	0.6	0.4	0.2				
9	0.8	0.5	0.2				
10	0.9	0.6	0.2				
11	1.1	0.7	0.2				
12	1.2	0.7	0.3				
13	1.3	0.8	0.3	1.3			
14	1.4	0.9	0.3	2.0		0.6	
15	1.6	0.9	0.3	2.9	0.3	1.3	2.6
16	1.7	1.0	0.4	3.7	0.8	2.0	3.4
17	1.8	1.1	0.4	4.7	1.3	2.8	4.5
18	1.9	1.1	0.5	5.7	1.8	3.6	5.4
19	2.0	1.1	0.5	6.7	2.3	4.5	6.5
20	2.1	1.2	0.6	7.8	2.9	5.4	7.4
21	2.2	1.2	0.6	9.0	3.5	6.4	8.7
22	2.3	1.3	0.7	10.2	4.2	7.4	9.9
23	2.4	1.3	0.8	11.5	4.9	8.5	11.2
24	2.5	1.3	0.8	12.9	5.6	9.6	12.5
25	2.6	1.3	0.9	14.3	6.3	10.8	13.9
26	2.6	1.3	1.0	15.7	7.1	12.0	15.4
27	2.7	1.3	1.1	17.2	7.9	13.3	16.9
28	2.8	1.3	1.2	18.9	8.7	14.6	18.3
29	2.9	1.3	1.3	20.4	9.5	16.0	19.9
30	2.9	1.3	1.4	22.1	10.4	17.4	21.7
31	3.0	1.3	1.4	23.8	11.3	18.9	23.3
32	3.0	1.2	1.6	25.6	12.3	20.4	25.0
33	3.1	1.2	1.7	27.5	13.3	22.0	26.8
34	3.1	1.2	1.8			23.6	28.6
35	3.2	1.1	1.9				30.6
36	3.2	1.1	2.0				
37	3.2	1.1	2.1				
38	3.3	1.0	2.3				
39	3.3	1.0	2.4				
40	3.3	0.9	2.5				

Tabelle 2n: Biomasse und Bioelement-Vorräte im Einzelbaum
der Buche
Biomass and Bioelement Stores in Single Trees
of Beech

Durch- messer Dia- meter in 1.3 m	Zink (Zn) in g						
	Oberirdische Teile/ Aboveground Parts			Unterirdische Teile/ Belowground Parts			Summe pro Baum/ Total per tree
	Gesamt- Baum/ Total tree	Baumholz o. Rinde/ Bole wood without bark	Äste mit Rinde/ Branches with bark	Wurzeln > 5 mm/ Roots > 5 mm		Wurzeln > 10 mm/ Roots > 10 mm with b.	
				o. Rinde/ with bark	o. Rinde/ without bark		
1	2	3	4	5	6	7	8
7	0.4	0.3	0.2				
8	0.5	0.4	0.2				
9	0.6	0.5	0.2				
10	0.7	0.6	0.2				
11	0.8	0.7	0.3				
12	0.9	0.8	0.3				
13	1.1	0.9	0.3	0.1	0.1		1.2
14	1.2	1.1	0.4	0.2	0.2		1.4
15	1.4	1.2	0.4	0.4	0.3	0.1	1.8
16	1.5	1.3	0.4	0.5	0.3	0.2	2.0
17	1.7	1.4	0.5	0.6	0.4	0.4	2.3
18	1.9	1.6	0.5	0.8	0.4	0.5	2.7
19	2.1	1.7	0.5	0.9	0.5	0.6	2.9
20	2.3	1.9	0.6	1.1	0.5	0.8	3.4
21	2.5	2.0	0.6	1.3	0.6	1.0	3.8
22	2.7	2.2	0.6	1.4	0.7	1.1	4.1
23	2.9	2.3	0.7	1.6	0.7	1.3	4.5
24	3.1	2.5	0.7	1.8	0.8	1.5	4.9
25	3.4	2.6	0.7	2.0	0.9	1.7	5.4
26	3.6	2.8	0.8	2.3	0.9	1.9	5.9
27	3.9	3.0	0.8	2.5	1.0	2.1	6.4
28	4.1	3.1	0.9	2.7	1.1	2.3	6.8
29	4.4	3.3	0.9	2.9	1.2	2.6	7.3
30	4.7	3.5	1.0	3.2	1.2	2.8	7.9
31	5.0	3.7	1.0	3.5	1.3	3.0	8.5
32	5.3	3.8	1.1	3.7	1.4	3.3	9.0
33	5.6	4.0	1.1	4.0	1.5	3.6	9.6
34	5.9	4.2	1.2				
35	6.2	4.4	1.2				
36	6.5	4.6	1.3				
37	6.8	4.8	1.3				
38	7.2	5.0	1.3				
39	7.5	5.2	1.4				
40	7.9	5.4	1.5				

Literatur

- HELLER, H. (1971) : Estimation of Biomass of Forests.
In "Ecological Studies" 2, 45-47, (Editor: H.
ELLENBERG).
- PAVLOV, B.M (1972) : Bioelement-Inventur von Buchen- und
Fichtenbeständen im Solling.
Diss. Fakultät Univ. Göttingen
- PRODAN, M. (1965) : Holzmesslehre
Sauerländ. Verl. Frankfurt / M.
- RUNGE, M. (1973 a) : Scripta geobotanica, Bd. IV.
Göttingen
- RUNGE, M. (1973 b) : in "Ökosystemforschung" (Editor: H.
ELLENBERG), Springer Verlag Berlin.

Ion Exchange Equilibria in an acid soil*)

P. K. Khanna & B. Ulrich

Sponsored by the Deutsche Forschungsgemeinschaft
under project No. UI 35/15

**Göttinger Bodenkundliche Berichte 29, 211 – 230
(1973)**



Introduction:

The compartments representing soil solution in a model describing nutrient cycling, contain relatively very little quantities, but the fluxes arriving and leaving these compartments are so great that the compartments regulating them gain much significance. The most important of these are the mineral soil compartments, which are so intricately attached to soil solution compartments over adsorption or desorptions processes that under normal conditions an equilibrium among them can be assumed. Any change in the contents of soil solutions compartments bring about a change in the system and a steady state is reached again. The present studies give an account how the equilibrium between soil solution compartments and the mineral soil compartments of an acid soil can be described.

Theoretical treatment of ion exchange equilibria in an acid soil

Schofield's idea (1955) of describing nutrient status of soils by using nutrient potentials (intensity parameters) and their capacities has been used extensively in recent years. The type of intensity as well as the capacity parameters used by various authors have been quite different; a few selected ones have been given in a summarised form in Table 1.

Ion	Parameters Solution Phase (Intensity)	Exchangeable Phase (Capacity)	Type of the soil used	Basic Principles involved	Reference No.
Na	$\frac{C_{Na}}{\sqrt{C_{Ca} + C_{Mg}}}$	$\frac{Na_s}{C E C_e}$	Saline, Sodic	Modified Gapon's equation	4,18
	$\frac{a_{Na}}{\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}}$	ΔNa_s	Normal	Ratio Law	6,14
	$\frac{a_{Na}}{a_K + \sqrt{a_{Ca}} + \sqrt{a_{Mg}}}$	$\frac{Na_s}{\alpha K_s + \beta \sqrt{Ca_s} + \gamma \sqrt{Mg_s}}$	Saline, Sodic	arbitrary	12
K	$\frac{a_K}{\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}}$	Δh_s	Normal	Ratio Law	2,7
	RT ln a_K	-	Normal	Chemical Potential	19
	$\frac{a_K}{\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}} + \sqrt{a_{Al}}}$	ΔK_s	Acid soils	arbitrary	13
	$\frac{a_K}{\sqrt[3]{a_{Al}}}$	$\Delta K_s, KSP$	acid soils	Ratio law	11
	$\frac{a_K}{\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}}$	$\frac{K_s}{Ca_s}$	Normal	Gapon's equation	10,15,5

The electro-chemical potential (μ) of a single ion (i) present in the soil solution system can be described by the following equation

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i + \text{electrical potential} \quad (1)$$

where μ_i^0 is the electrochemical potential of the ion (i) in the standard state. The standard state does not form any actual physical state of solution. It is rather the hypothetical state where the solute has its mole fraction equal to unity and its environment is so very dilute that each solute molecule is free from any interaction with neighbouring solute molecules. a_i is the chemical activity of ion i and R and T the universal gas constant and absolute temperature. In the soil solution system at equilibrium, the chemical activity of a single ion is not a constant entity but differs due to its position in or near the double layer of the exchangeable phase causing a difference in the electrical potential. Moreover, the measured value of a_i will fluctuate with any changes in the amount of electrolyte etc.

To overcome these difficulties, the use of a relative chemical potential has been suggested (Woodruff, 1955) which for the ion i relative to the ion j can be derived as:

$$\mu_{i/j} = \left(\frac{1}{z_i} \mu_i^0 - \frac{1}{z_j} \mu_j^0 \right) + RT \ln \frac{a_i^{1/z_i}}{a_j^{1/z_j}} \quad (2)$$

where z refers to the valency of the ion. Under equilibrium conditions the relative chemical potential $\mu_{i/j}$ for a given soil solution system is constant for all

parts of the system. Since $\frac{1}{z_i} \mu_i^0 - \frac{1}{z_j} \mu_j^0 = \mu_{i/j}^0$ can be considered to be a constant term, the value

$$RT \ln \frac{a_i^{1/z_i}}{a_j^{1/z_j}} \quad (3)$$

is constant for the given conditions.

$\frac{a_i^{1/z_i}}{a_j^{1/z_j}}$ is also called reduced activity ratio or AR

which by taking $-\log_{10}$ can be expressed as Schofield's potential (SP)

$$SP_{i/j} = -\log_{10} AR = \frac{1}{z_i} p_i - \frac{1}{z_j} p_j \quad (4)$$

At constant temperature 25°C, the value (in kcal/gion) for the term (3) can then be obtained as

$$- 1.364 SP_{i/j} = \mu_{i/j}^0 - \mu_{i/j}^0 \quad (5)$$

The relative chemical potential of j (relative to i, $\mu_{j/i}$) can be similarly derived and will have the same value as of $\mu_{i/j}$ but with an opposite sign.

It is difficult to operate with the above value till certain assumptions are made about the relationship of AR in solution to that in the exchangeable phase. These assumptions have been described in the "Ratio law" postulated by Schofield (1947). Under the conditions of equilibrium given in "Ratio law", the relative chemical potential of an ion in the exchangeable phase equals that in the solution phase. It is because the constant terms on the right hand side of equation (5) remain insignificant and the electrical potential terms are ignored normally.

This law holds good for all such cases where the relative chemical potential of any ion is measured with respect to that ion which remains more or less unchanged in its chemical potential during the ion uptake or leaching processes. Moreover, the chemical potential for the relative ion should be uniform through all parts of the system. These conditions are valid when calcium is taken as a relative ion in calcareous soils. As shown in Table 1 the use of Ca ion as the reference ion has been quite extensively used and has shown convincing results.

In those soils where calcium cannot be used as a reference ion, because the changes in ions other than calcium, e.g. K, are not completely reflected by those of calcium and a third ion is involved, the above given concept has to be treated further to involve all the different ions involved in the exchange phenomenon. Such soils are the acid soils and the selection of one single reference ion for describing the chemical potential of, say, Na is not possible. It is, therefore, suggested to follow

$$\sum_j^n \mu_{i/j} - \sum_j^n \mu_{i/j}^0 = RT \ln \frac{a_{Na}^4}{a_K \cdot \sqrt{a_{Ca}} \cdot \sqrt{a_{Mg}} \cdot \sqrt[3]{a_{Al}}} \quad (6)$$

$$\mu_{Na}^- = - 1.364 \text{ SP}_{Na/K} - 1.364 \text{ SP}_{Na/Ca} - 1.364 \text{ SP}_{Na/Mg} - 1.364 \text{ SP}_{Na/Al} \quad (7)$$

where μ_{Na}^- is the sum of all the relative chemical potentials involved in the exchange equilibria with Na and has the dimensions Kcal/gion.

Equation 6 is derived by extending Schofield's Ratio Law from a single ion pair to a series of ion pairs existing in the solution. Under equilibrium conditions the sum of the chemical potentials of all the cations involved in the exchange equilibria is equal to zero.

$$\sum_i^n u_i^- = 0.$$

Although there is at present no theoretical treatment available to relate μ_i^- to the exchangeable ions, yet it will be of interest to find out the effects of changing the fraction of exchangeable ion i (x_i^s) on its μ_i^- .

Experimental Details

The soil sample used for these studies was collected from IBP - Beach area in the Solling District. Details of the soil characteristics can be obtained from Ulrich et al. (1971).

The field wet soil sample (24.8% moisture content) was stored cool for more than 8 months before the exchange isotherms were obtained. 5 g of moist soil was shaken with 25 ml of the solution for 18 hours under constant temperature conditions ($20.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$). The concentration of the solution was the same as of the equilibrium soil solution (determined separately prior to this experiment) except for the ion whose exchange isotherm was to be determined. Table 2 gives the composition of the solutions used along with the reduced activity ratios obtained after the equilibration was attained.

Table 2

Composition of added solution ($\mu\text{ g ion/l}$) and the range of $AR_{A/B}$ values (in brackets, dimensions are $\frac{(g_{ion/l})^{1/z_A}}{(g_{ion/l})^{1/z_B}}$)

Ion A	Na	K	Ca	Mg	Al
Na-Series	0.4-1005 (-)	38 (.84-15.0)	46 (.006-.137)	40 (.008-.142)	91 (.0012-.021)
K -Series	214 (.12-1.42)	0.6-610 (-)	46 (.006-.048)	40 (.006-.05)	91 (.001-.007)
Ca-Series	214 (22.9-78.5)	38 (100.-317.)	0-600 (-)	40 (.85-2.63)	91 (.123-.384)
Mg-Series	214 (20.5-79.4)	38 (81.-360.)	46 (.69-2.63)	2-536 (-)	91 (.116-.376)
Al-series	214 (131.-246.)	38 (594.-918.)	46 (4.8-7.2)	40 (5.0-8.1)	0-448 (-)

The equilibrium soil solution was obtained after filtering the suspended material, by centrifugation at 10000 rpm. There was one replication. pH, Na, K, Ca, Mg and Al concentrations were determined by usual methods. From the difference between the initial added concentration and the final equilibrium concentration of the soil solution, the Δ cation values were obtained.

Results and Discussion :

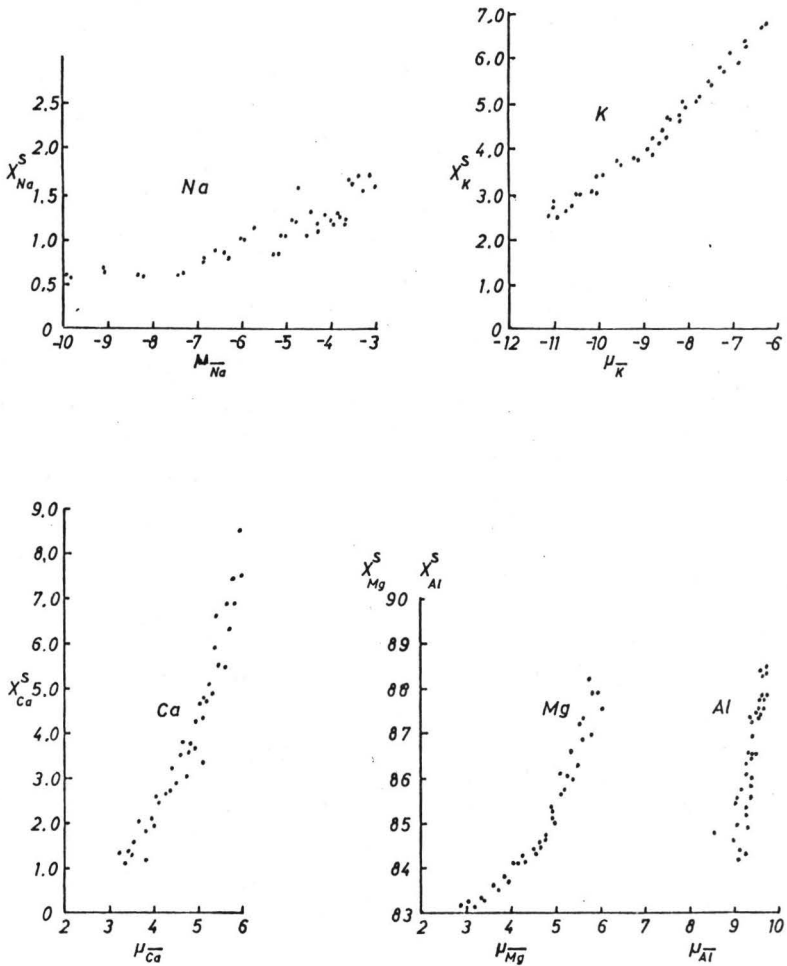
The μ_i^- values were calculated from the activities of Na, K, Ca, Mg and Al ions in the equilibrium soil solution. The activities of H, Fe and Mn ions were left out for the calculations of μ_i^- values because of the uncertainties in obtaining the amount and type of ion involved in the exchange phenomenon. Their values as exchangeable ions were, however, used for the calculation of x_i^s fractions. Fig. 1 shows the relationship between μ_i^- values and x_i^s values for various ions. The following observations can be made from Fig. 1.

Sodium : The potential values for Na increase sharply after exchangeable Na fraction decreases below 0.007, which in other words, would mean that after the exchangeable sodium is reduced to about 7 sites out of the 1000 available ones, the potential or the energy attached to each ion becomes great enough to check the further removal of exchangeable Na. It is not possible to characterize the slope of the line by a single value.

Potassium : The relationship between μ_{Ca}^- and exchangeable potassium is curvilinear, although the curvature is not steep. This indicates the presence of exchangeable ions on sites with continuous increasing tenacity (as is well known for potassium) and that each withdrawal of potassium makes the next more difficult. Similar results for K by using $\mu_{K/Ca}$ were obtained by Barrow et al. (1965). The slope of the the line can be characterised (for the part of the curve studied) by using a quadratic equation of the form :

Fig.1

Relationships among equivation fractions of ions (x_i^s in %) and the relative chemical potential (μ_i^- in kcal/g ion)



$$x_K^S = .1798 + .0224 \mu_K^- + .00078 \mu_K^{-2} \quad (8)$$

The quadratic term takes into account the excess of potential involved in each further withdrawal of exchangeable potassium.

Calcium and Magnesium:

The curvilinear nature of relationship for calcium and magnesium between μ_{Ca}^- and x_{Ca}^S and μ_{Mg}^- and x_{Mg}^S are of the similar type and can be treated combined. For the range of x_i^S studied for these ions, a unit withdrawal of calcium and magnesium requires less energy than the unit withdrawal of potassium. Nevertheless the potential required to decrease a unit of x_i^S values at lower exchange saturation conditions is higher than at higher exchange saturation conditions; out of calcium and magnesium, calcium requires higher potential. The quadratic equations to describe the relationship are

$$x_{Ca}^S = .0732 - .0416 \mu_{Ca}^- + .00708 \mu_{Ca}^{-2} \quad (9)$$

$$x_{Mg}^S = .0414 - .0278 \mu_{Mg}^- + .00489 \mu_{Mg}^{-2} \quad (10)$$

Aluminium:

Aluminium potential shows a straight line relationship with changes in x_{Al}^S values $x_{Al}^S = .434 + .046 \mu_{Al}^-$. A change of about 5 % in x_{Al}^S (from 84 to 89 %) requires 0.5 kcal/gion. It shows that Al is not bound specific in this range.

General discussion:

A general type of potential curve is S-formed. The curves shown in Fig. 1 had also been of S type, if the whole range of x^S would have been studied. The

curvatures observed in Fig. 1 can be approximately fitted as regions on a typical S curve shown below in Fig. (2), although the potential curve for each

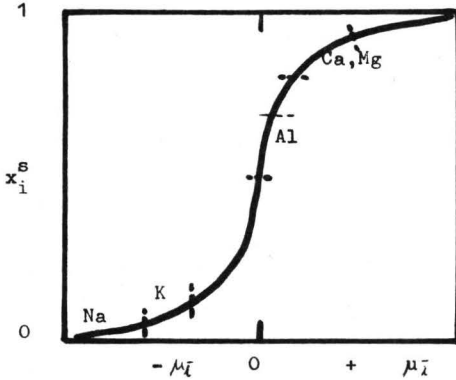


Fig. 2

ion would look different. Depending upon the position of the soil on this potential curve one can postulate the behaviour of an ion towards processes like leaching, uptake or fertilization. As shown in Fig. 2, the acid soil from Solling (IBP) lies on the curvature part of the curve indicating that leaching losses of Na, K, Ca & Mg cannot be extensive.

Ion Exchange Isotherms

The simplest form of an adsorption isotherm describes the relationship between the amount of an ion adsorbed on the exchange complex as a function of its concentration (activity) in the equilibrium soil solution under constant temperature conditions (also described as C/I relationship).

Ion adsorption isotherms for various ions for the soil sample from Solling are shown in Fig. 3. Depending upon the nature of ions with respect to their energies of adsorption and the type of the adsorbing surfaces such as of clay minerals the different forms of the adsorption isotherms are obtained.

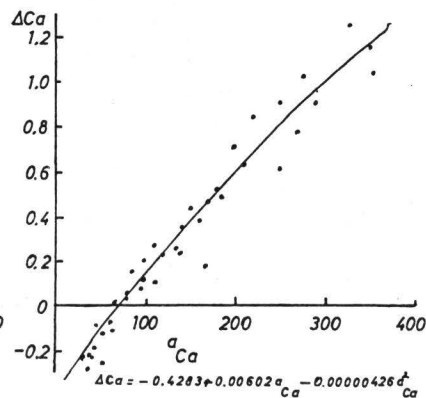
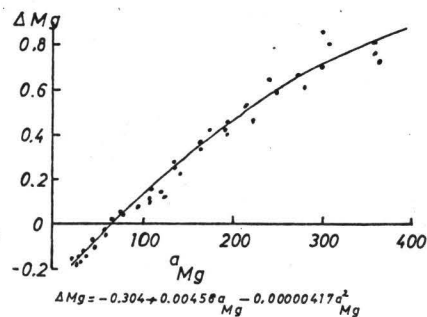
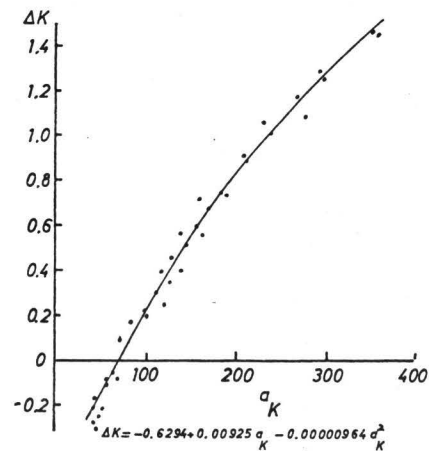
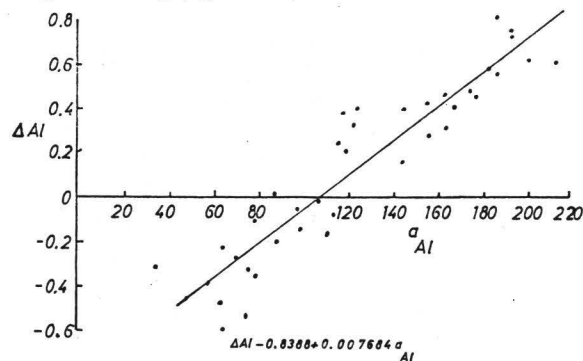
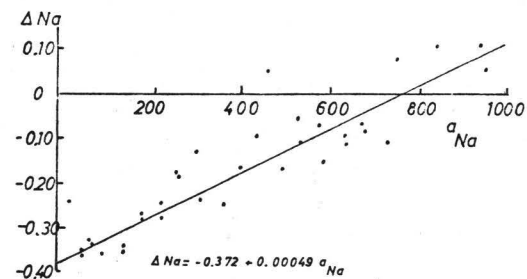
The adsorption isotherm for K (the soil contains open illites as the dominant clay fraction) shows at least two main regions on the curve.

- (a) The upper linear part over which the quantity (Q) of adsorbed ions is directly proportional to the activity of potassium (I) and thus, indicates the absence of specific ion adsorption sites in this region.
- (b) The lower curved part of the isotherm over which the quantity of the adsorbed ions is not directly proportional to the activity of potassium (I). This part of the curve indicates the adsorption of potassium on the specific ion adsorption sites.

The results obtained on splitting the curve will be presented separately.

As discussed previously, it is advantageous to use AR instead of a_1 as the intensity parameter to build such isotherms. Calcium (+ Magnesium - because of experimental easiness) has been used as the reference ion in most of

Fig.3

Q/I relationships between $\Delta\text{cation}(\mu\text{g ion/g})$ and $a_i(\mu\text{g ion/l})$ 

the earlier studies, which were mainly confined to soils rich in calcium. For an acid soil, Tinker (1964) used AR defined as:

$$\frac{a_K}{\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg} + \alpha \sqrt[3]{a_{Al}}}}$$

where a constant value α was introduced to bring the $\sqrt[3]{a_{Al}}$ to the same dimensions as $\sqrt{a_{Ca} + a_{Mg}}$ so that these terms could be added up. The addition of terms a_{Ca} , a_{Mg} and a_{Al} and then using them as reference ions inherited the postulation that these ions possess the same adsorption sites and these adsorption sites are of additive nature. This assumption may not be valid for each soil. Moreover, the above function is of arbitrary nature. The function (6) suggested by us includes every ions involved in the exchange process and has been used as the intensity parameter for Q/I isotherms shown in Fig. 4. The decrease in the concentration of an ion in soil solution after equilibrium was attained, had been calculated on unit soil basis and described as $+\Delta$ cation and the increase as $-\Delta$ cation.

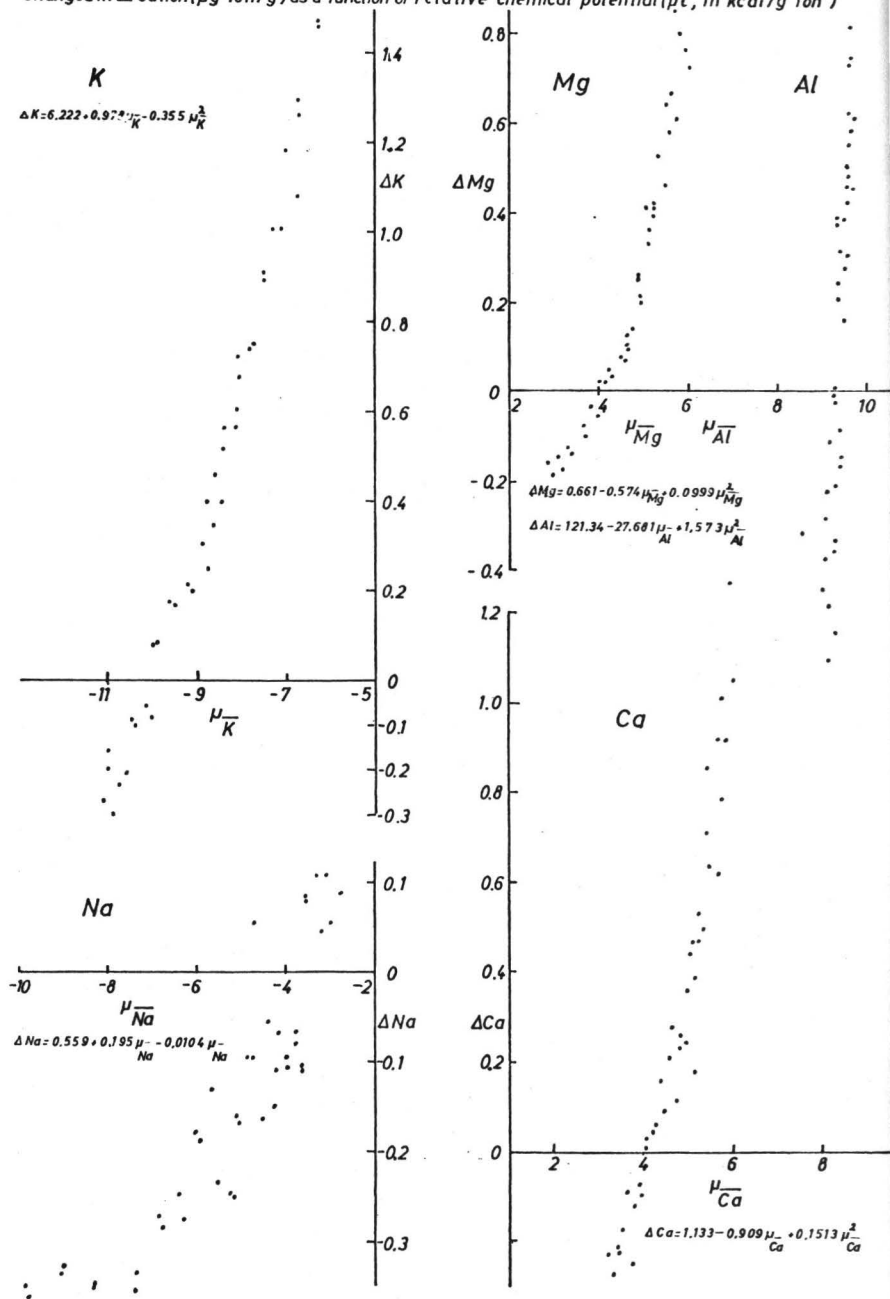
These exchange isotherms can be well described by the following quadratic equations:

$$\begin{aligned}\Delta Na &= 0.559 + 0.194 \mu_{Na}^- + 0.0104 \mu_{Na}^{2-} \\ \Delta K &= 6.222 + 0.978 \mu_K^- + 0.0355 \mu_K^{2-} \\ \Delta Ca &= 1.133 - 0.909 \mu_{Ca}^- + 0.1513 \mu_{Ca}^{2-} \\ \Delta Mg &= 0.661 - 0.574 \mu_{Mg}^- + 0.0999 \mu_{Mg}^{2-} \\ \Delta Al &= 121.34 - 27.681 \mu_{Al}^- + 1.573 \mu_{Al}^{2-}\end{aligned}$$

The μ_i^- values at equilibrium (Δ cation = 0) are -3.78, -10.08, 4.01, 4.05 and 9.25 for Na, K, Ca, Mg and Al respectively. All the exchange isotherms show

Fig. 4

Changes in Δ cation ($\mu\text{g ion/g}$) as a function of relative chemical potential ($\mu_{\text{r}}^{\pm}$, in kcal/g ion)



typical curvilinear form and consist of two regions as discussed earlier. A unit change over lower part of the curve requires higher potential than that over upper part of the curve. Quadratic term accounts for this difference of the potential.

Equivalent fractions for the exchange isotherms:

Diagrams using equivalent fractions (x^s/x^L) give the Q/I relationships in a simple form where the equivalent fraction of an ion on the exchangeable phase (x^s) is the quantity parameter and the equivalent fraction of the same ion in the solution (x^L) at equilibrium with exchangeable phase is the intensity parameter (Ulrich, 1966).

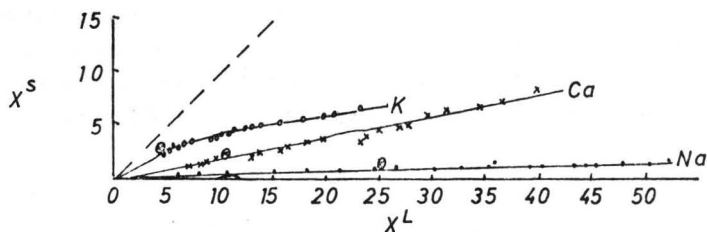
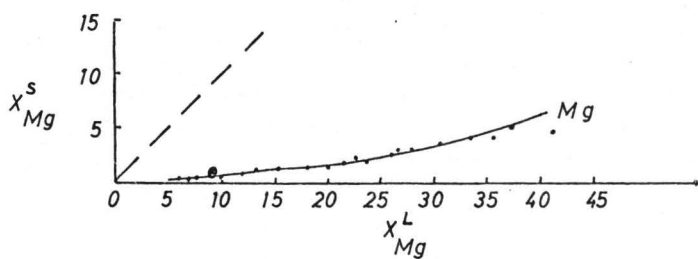
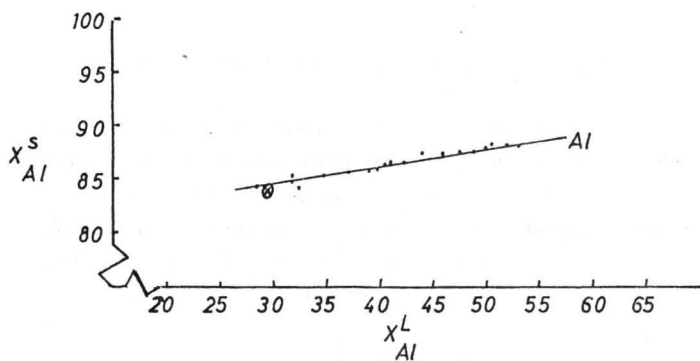
$$x_A^s = \frac{A_s}{A_s + B_s + C_s + \dots} \quad (C \in C_e)$$

$$x_A^L = \frac{z_A a_A}{z_A a_A + z_B a_B + z_C a_C + \dots}$$

Where A_s , B_s & C_s are the amount of adsorbed ions expressed as equivalents/unit of soil; suffix z gives the valency and a is the activity of ion expressed as moles/l. x_A^s and x_A^L do not have any dimensions.

$$\begin{aligned} x_A^s / x_A^L &= 1 \text{ (nonpreferential adsorption)} \\ &= < 1 \text{ (selective discrimination)} \\ &= > 1 \text{ (selective adsorption)} \end{aligned}$$

(No attempt has yet been made to deduce this relationship by using principles involved in the adsorption chemistry. Because there are more than one ion pair involved such deductions become quite complex). Jensen (1972) showed

Fig. 5 x^S/x^L relationship x^L, x^S in % ; $\theta \hat{=}$ Initial state

the effects of ionic strength of equilibrium solution on adsorption isotherms for an hexavalent ionic pair.

x^s/x^L diagrams are given in Fig. 5. These show that Al is selectively adsorbed by this soil, whereas the other ions are selectively discriminated from the exchange complex. For a long range of x^s around the initial state of the soil, the value of x^L shows a straight line relationship (K is an exception) as also observed by Ulrich & Khanna (1970).

Summary:

An energy function μ_i which involves the relative chemical potential of all the ions present in an equilibrium soil solution of an acid soil has been derived. This relationship between the relative chemical potential and percent exchangeable ion saturation shows different regions of a typical potential curve. The use of various parameters as an intensity measure to construct Q/I isotherms for an acid soil has been discussed and the use of μ_i and of x_i^L (equivalent fraction of i in soil solution) has been suggested.

References :

1. Barrow, N.J., Ozanne, P.G. and Shaw, T.C. (1965) Aust. J. Agric. Res. 16, 61-76
2. Beckett, P.H.T. (1964) J. Soil Sci. 15, 1-23
3. Beckett, P.H.T. (1965) Soil Sci. 97, 376
4. Bolt, G.H. (1965) Soil Sci. 79, 267-276
5. Ehlers, W., Meyer, B., and Ulrich, B. (1967) Potash
6. Nafady, M.H. and Lamm, C.G. (1972) Soil Sci. Review
7. Le Roux, J. and Sumner, M.E. (1966) Soil Sci. 106, 35-41
8. Schofield, R.K. (1947) Proc. 11th Intern. Congr. Pure Appl. Chem. (London), 3, 257-51

9. Schofield, R.K. (1955) Soils & Fert. 18, 373-75
10. Schowenburg, J.Ch.van and Schuffelen, A.C. (1963)
Neth. J. Agric. Sci. 11,13-22
11. Singh, M.M. and Talibudeen, O. (1971) Proc. int.
Sym. Soil Fert. Evaluation, New Delhi 1,85-97
12. Singh, S.S. and Ramamoorthy, B. (1965) Annals Agr. Coll.
Sweden 31,93-101
13. Tinker, P.B. (1964) J. Soil Sci. 15,24-34
14. Tinker, P.B. (1966) Trans. Comm. II and IV int. Soc.
Soil Sci. 223-31
15. Ulrich, B. (1966) Z. Pflanzenern., Dung.,Bodenkunde 113,
141-159
16. Ulrich, B. and Khanna, P.K. (1971) Gottinger
Bodenkundliche Berichte 19, 121
17. Ulrich, B., Ahrens, E. and Ulrich, M. (1971)
In H. Ellenberg ed. Ecological Studies 2,171-190
18. U.S. Salinity Laboratory (1954) Diagnosis and
Improvement of Saline and Alkali Soils. U.S. Dept.
Agr. Handbook 60.
19. Woodruff, C.M. (1955) Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 19,36-40

