

Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees – a comment

Walter Flückiger and Sabine Braun

Institute for Applied Plant Biology, 4124 Schönenbuch, Switzerland

Many approaches have been made to get a better understanding of adequate ranges for nutrient concentrations and ratios of woody plants in respect of growth, cold hardiness and drought resistance as well as susceptibility of plants to parasite attacks. To define critical nutrient limits, nutrient ratios are more useful than nutrient concentrations. The ratios not only reflect nutrient balance but are also less affected by growth dilution, concentrations of nonstructural carbohydrates and aging processes than nutrient concentrations. They are often derived from adequate concentration ranges by dividing the lower end of one nutrient by the higher end of the other nutrient and vice versa. This procedure is, however, unsuitable if the concentration ranges are already very large as it has been the case in a recent evaluation by ICP Forests (UNECE 2000). A starting point is certainly the mean of the concentration range, but the ends of the range have to be adjusted according to physiological criteria. The N/Mg ratio recommended by ICP Forest e.g. extends to values associated with symptoms of Mg deficiency as shown by Rodenkirchen (1998).

A large number of references on nutrient concentrations and ratios has been compiled by Van den Burg (1985) and Van den Burg (1990). A list of publications giving numbers on ratios is compiled in table 1. Summarising these publications on ratios and deriving ratios from the publications on concentration ranges, averages for the lower and upper end of normal/adequate ranges were calculated. They result in the recommended ranges given in table 2 (Altherr & Evers 1974; Altherr *et al.* 1974; Blok *et al.* 1972; Bonneau 1973; Bonneau 1986; Bonneau 1988; CERAFER 1971; Etter 1969; Fiedler & Höhne 1984; Foerst *et al.* 1987; Gussone 1964; Gussone 1978; Gussone *et al.* 1985; Höhne 1978; Hunger & Marschner 1987; Hüttl 1987; Hüttl 1988; Hüttl 1991; Ingestad 1979; Járó 1967; Landmann *et al.* 1987; Le Tacon & Millier 1970; Le Tacon & Toutain 1973; Linder 1990; Lyr *et al.* 1967; Kaupenjohann *et al.* 1987; Krauss *et al.* 1986; Materna 1965; Nihlgård 1986; Ovington 1956; Rehfuess 1983; Rodin & Bazilevich 1967; Silfverberg 1980; Silva Ferraz 1985; Stefan 1983; Stefan 1989; Strebel 1959; Strebel 1960; Summerer 1987; Tamm 1953; Van den Burg 1988; van den Driessche 1991; Wehrmann 1963; Weissen *et al.* 1988; Wenninger 1986; Wittich 1958; Zech *et al.* 1983; Zöttl 1964; Zöttl & Hüttl 1985; Zöttl & Hüttl 1986).

Tab. 1: Compilation of literature data for optimum/adequate nutrient ratios

Reference	tree species	N/P	N/K	N/Mg
Binns <i>et al.</i> 1983	broadleaved trees	10-20	2-4	
Bonneau 1988	various trees	10-15		<17.5
Strebel 1960	<i>Picea abies</i> (adult stands)	5.6-12.0		
Fiedler <i>et al.</i> 1973		8.0-8.3		7.2-8.6
Aldinger 1987		6.2-10		
Fiedler & Höhne 1987		7.1-7.7	1.7-1.9	
Hüttl 1991		6-12	1-3	8-30
Ingestad 1979	<i>Picea abies</i> (seedlings)	6.25	2	20

Tab. 2: Recommended adequate/normal nutrient ratios for Norway spruce and beech

		Recommended range (median values from lower and upper end)	Number of publications
Picea abies	N/P	7.0-12.0	37
	N/K	1.9-3.6	34
	N/Mg	10.3-20.0	31
Fagus sylvatica	N/P	10.0-17.1	14
	N/K	2.1-3.8	14
	N/Mg	10.4-21.5	9

Comparing the above recommended adequate nutrient ratios from literature and the nutrient ratios given by Stefan *et al.* (1997) and ICP Forests (UNECE 2000) as listed in table 3, respectively, there are remarkable differences. Using the first or the latter has severe consequences for the interpretation of the nutrient status of the European permanent observation plots. The evaluation on the basis of the nutrient ratios proposed by ICP Forests results in only 13 of 102 European permanent observation plots with nutrient imbalances (de Vries, pers. comm.). With the use of compiled and recommended literature data, there are 57 plots with nutrient imbalances (de Vries *et al.* 2003). It is unlikely that after 40 years of increased N deposition (Goulding & Blake 1993; Braun *et al.* 1996) only a few forest sites with nutrient imbalances can be found even in the highly polluted regions of Central Europe. Nutrient status and ratios changed drastically in Central Europe during the past decades (table 4).

Tab. 3: Nutrient ratios for Norway spruce and beech after ICP Forests (UNECE 2000)

		ICP Forests
Picea abies	N/P	6-17
	N/K	1.3-4.9
	N/Mg	8.0-28.3
Fagus sylvatica	N/P	10.6-25
	N/K	1.8-5.0
	N/Mg	12.0-25.0

Tab. 4: Comparison of historical with recent nutrient ratios

Species	Reference	region	number of plots		First evaluation		second evaluation	
					year	ratio	year	ratio
Fagus sylvatica	Duquesnay <i>et al.</i> 2000	Northeastern France	188	N/P	1969-71	16.2	1996-97	23.5
				N/K	1969-71	2.33	1996-97	2.80
				N/Mg	1969-71	14.03	1996-97	25.33
	Flückiger & Braun 1998	Switzerland	45	N/P	1984/85	18.1	1999	25.4
				N/K	1984/85	2.58	1999	3.66
				N/Mg	1984	16.3	1999	18.3
Picea abies	Hüttl 1990	Germany, Black Forest		N/K	1961	1.2-2.5	1983	2.0-6.8
				N/Mg	1975	8-13	1983	9-56
	Flückiger & Braun 1998	Switzerland	18	N/P	1984/85	13.5	1999	16.5
				N/K	1984/85	3.43	1999	3.71
				N/Mg	1984/85	17.1	1999	15.5

There is a number of studies showing that woody plants are significantly more susceptible to parasite attacks when nutrient ratios are not balanced:

- Pine (*Pinus sylvestris*) with N/K ratios >3.5 (ICP Forests adequate ratio for pine 1.2-4.9) showed distinct increased infestation by the fungal pathogen *Lophodermium pinastri* (Brüning 1964)
- Oak leaves with N/K 3.96 showed increased infestation by 17% with scales (*Eulecanium carni* und *E. rufulum*) compared to leaves with N/K 2.65 (Brüning & Uebel 1968). (ICP Forests adequate ratio for oak 1.5-5.0)
- Apple trees with N/K >2.5 showed significantly increased infestation by scarf (*Venturia inaequalis*) (Chaboussou 1972)
- Beech (adult stands) in permanent observation plots with N/K >3.7 showed significantly more dead branches caused by the pathogenic fungus *Nectria ditissima* (Flückiger *et al.* 1986)
- Beech saplings in a N fertilization experiment (pots) with N/P ≥17 showed significantly increased infestation by the leaf aphid *Phyllaphis fagi* (Flückiger & Braun 1994)
- Beech in a N fertilization experiment (afforestation) with N/K ≥4 showed increased shoot dieback caused by the pathogenic fungus *Apiognomonia errabunda* (Flückiger & Braun 1999)
- Norway spruce in a N fertilization experiment (afforestation) with N/K ≥4 showed increased infestation by the pathogenic fungi *Botrytis cinerea* and *Sclerophoma pithyophila* (Flückiger & Braun 1999).
- Beech in a N fertilization afforestation with N/P >15 showed lower concentrations of fungistatic phenolic compounds in leaves such as coumaric acid and hydroxyacetophenone (Tomova *et al.* 2002)

Maybe one of the most accurate method to determine nutrient imbalances is the DRIS system (Diagnosis and Recommendation Integrated System) that includes physiological, soil and envi-

ronmental parameters (Beaufils 1971; Beaufils 1973; Sumner 1977a; Sumner 1977b; Sumner 1978; Timmer & Armstrong 1988).

In the context of setting empirical critical loads for N on the basis of limits for nutrient concentrations and ratios and the observed detrimental effects by parasites on woody plants with wide N/P, N/K and N/Mg ratios it is recommended to use adequate ranges of nutrient ratios which minimize secondary risks.

References

- Aldinger, E. (1987) Elementgehalte im Boden und in Nadeln stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände auf Praxiskalkungsflächen im Buntstandstein-Schwarzwald. Dissertation Albert-Ludwig-Universität, Freiburg im Breisgau.
- Altherr, E & Evers, F H (1974) Unerwarteter Düngungserfolg bei Magnesiummangel in einem jungen Buchenbestand auf Mittlerem Buntsandstein des Odenwaldes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **145**, 121-125.
- Altherr, E, Evers, F H & Linnert, H (1974) Erste Ergebnisse von Fichten-Düngungsversuchen auf Feiertsteinlehmstandorten des Wuchsbezirkes "Nördliches Härtdtsfeld" (Ostalb). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **145**, 101-111.
- Beaufils, E R (1971) Physiological diagnosis - a guide for improving maize production based on principles developed for rubber trees. *Fert.Soc.South Africa J.*, **1**, 30.
- Beaufils, E R (1973) Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Soil Sci.Bull.Univ.of Natal, Pietermaritzburg, South Africa*, **1**.
- Binns, W.U., Insley, H. & Gardiner, J.B.H. (1983) Nutrition of broadleaved amenity trees. I. Foliar sampling and analysis for determining nutrient status. *Arboricultural Research Note 50-83-SSJ*. . DOE Arboricultural Advisory and Information Service Forestry Commission, Research Station, Alice Holt Lodge, Farnham Surrey.
- Blok, H, Van den Burg, J, van Goor, C P & Oldenkamp, L (1972) Minerale voeding van fijnspar (Een samenvatting van proefveldresultaten). *Intern Rapport Bosbouwproefstation "De Dorschkamp"*, Wageningen, **30**.
- Bonneau, M. (1973) The state of research on forest nutrition. *FAO-IUFRO International symposium on forest fertilization, Paris 3-7 December 1973 pp. 1-21*. Ministère de l'Agriculture.
- Bonneau, M (1986) Fertilisation à la plantation. *Revue Forestière Française*, **38**, 293-300.
- Bonneau, M (1988) Le diagnostique foliaire. *Revue Forestière Française*, **40**, 19-28.
- Braun, S., Flückiger, W. & Leonardi, S. (1996) Belastungen des Gebirgswaldes. Ansätze einer Risikobeurteilung. [59], 1-237. . *BUWAL Umweltmaterialien*.
- Brüning, D (1964) Einfluss der mineralischen Düngung auf einen mit "Dickungsschütte" befallenen Kiefernbestand. *Allgemeine Forstzeitschrift*, **28**, 1.
- Brüning, D & Uebel, E (1968) Einfluss der Düngung auf den Schädlingsbefall bei Roteichen und Robinien am Beispiel der Populationsdichte von Napfschildläusen. *Kali-Briefe*, **6**, 1-10.

- CERAFER (1971) Reboisement - Fertilisation. Centre Technique Forestier, Ministère de l'Agriculture, République Française.
- Chaboussou, F (1972) Die Rolle des Kaliums und des Kationengleichgewichtes für die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen gegen Krankheiten. Intern.Kali-Briefe Fachg.23, **39**.
- de Vries,W., Reinds,G.J., van der Salm,C., van Dobben,H., Erisman,J.W., de Zwart,D., Bleeker,A., Draaijers,G.-P.J., Gundersen,P., Vel,E.M. & Haussmann,T. (2003) Results on nitrogen impacts in the EC and UNECE ICP Forests programme. Critical Loads of Nitrogen. Report on a Workshop held in Berne, Switzerland, Nov. 11-13 2002 BUWAL, Berne.
- Duquesnay, A, Dupouey, J L, Clement, A, Ulrich, E & Le Tacon, F (2000) Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in Beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. *Tree Physiology*, **20**, 13-22.
- Etter, H M (1969) Growth, metabolic components and drought survival of lodgepole pine seedlings at three nitrate levels. *Can.J.Plant Sci.*, **49**, 393.
- Fiedler, H J & Höhne, H (1984) Das NPK-Verhältnis in Kiefernadeln als arteigene Erscheinung und Mittel zur Ernährungsdiagnose. *Beiträge für die Forstwirtschaft*, **18**, 128-132.
- Fiedler, H J & Höhne, H (1987) Relationen der Kernnährstoffe in Fichtennadeln und ihre Abhängigkeit von biologischen Faktoren. *Beiträge für die Forstwirtschaft*, **21**, 17-21.
- Fiedler,H.J., Nebe,W. & Hoffmann,F. (1973) Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Fischer, Stuttgart.
- Flückiger, W. & Braun, S. (1994) Waldschaden-Bericht. Untersuchungen in Buchenbeobachtungsflächen 1984-1993. 1-54. . Schönenbuch, Institut für angewandte Pflanzenbiologie.
- Flückiger, W & Braun, S (1998) Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification. *Environmental Pollution*, **102**, 69-76.
- Flückiger, W & Braun, S (1999) Nitrogen and its effects on growth, nutrient status and parasite attacks in beech and Norway Spruce. *Water, Air and Soil Pollution*, **116**, 99-110.
- Flückiger, W, Braun, S, Flückiger-Keller, H, Leonardi, S, Asche, N, Bühler, U & Lier, M (1986) Untersuchungen über Waldschäden in festen Buchenbeobachtungsflächen der Kantone Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Aargau, Solothurn, Bern, Zürich und Zug. *Schweiz.Zeitschrift für Forstwesen*, **137**, 917-1010.
- Foerst, K., Sauter, U. & Neuerburg, W. (1987) Bericht zur Ernährungssituation der Wälder in Bayern und über die Anlage von Walddüngungsversuchen. [79], -90. . Forstliche Forschungsberichte, Schriftenreihe der Forstwissenschaftl. Fakultät der Univ. München und der Bayer. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt München.
- Goulding, K.W.T. & Blake, L. (1993) Testing the PROFILE model on long-term data. Critical Loads: Concepts and Applications. Proceedings of a Conference 12.-14. Feb. 1992, Grange over Sands (eds M.Hornung & R.A.Skeffington). [28], 68-73. . London: HMSO. ITE symposium. Institute of Terrestrial Ecology.
- Gussone,H.A. (1964) Faustzahlen für Düngung im Walde. BLV, München.
- Gussone,H.A. (1978) Erfahrungen über die Düngung von Eichen und Buchen in der Bundesrepublik Deutschland. Proceedings of the Symposium on establishment and treatment of high-quality hardwood

- forests in the temperate climate region, Nancy-Champenoux 11-15 Spetember 1978; IUFRO Division 1, Section S1.05.00 pp. 116-125. INRA, Centre National de Recherches Forestières. Station de Sylviculture et de Production, Champenoux.
- Gussone, H.A., Evers, F.H. & Hüser, R. (1985) Forstliche Düngung, Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. (AID) e.v., Bonn.
- Höhne, H (1978) Untersuchungen über Mineralstoff- und Stickstoffgehalt der Flora in einem Waldbestand auf Serpentin im sächsischen Granulitgebirge. *Flora*, **167**, 177-196.
- Hunger, W & Marschner, W (1987) Zum Ernährungszustand der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) auf Nassstandorten im Lausitzer Tiefland. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, **27**, 195-204.
- Hüttl, R F (1987) Neuartige Waldschäden, Ernährungsstörungen und Düngung. *Allgemeine Forstzeitschrift*, **42**, 289-299.
- Hüttl, R.F. (1988) Forest decline and nutritional disturbances. Forest site evaluation and long-term productivity (eds D.W.Cole & S.B.Gessel), pp. 180-186.
- Hüttl, R F (1990) Nutrient supply and fertilizer experiments in view of N saturation. *Plant and Soil*, **128**, 45-58.
- Hüttl, R F (1991) Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*, **28**, 1-440.
- Ingestad, T (1979) Mineral nutrient requirments of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seedlings. *Physiologia Plantarum*, **45**, 373.
- Járó, Z (1967) (Die Bedeutung der Nadel- und Laubanalyse bei der Feststellung von Mangel oder Unzulänglichkeit an Nährstoffen) (Hungarian with English summary). *Erdészeti Kutatások*, **63**, 119-127.
- Kaupenjohann, M, Zech, W, Hentschel, R & Horn, R (1987) Ergebnisse von Düngungsversuchen mit Magnesium an vermutlich immissionsgeschädigten Fichten (*Picea abies* [L.] Karst) im Fichtelgebirge. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, **106**, 78-84.
- Krauss, H H, Heinsdorf, D, Hippeli, P & Tölle, H (1986) Untersuchungen zur Ernährung und Wachstum wirtschaftlich wichtiger Nadelbaumarten im Tiefland der DDR. *Beiträge für die Forstwirtschaft*, **20**, 156-164.
- Landmann, G, Bonneau, M & Adrin, M (1987) Le dépérissement du sapin pectiné et de l'épicéa commun dans le Massif Vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements? *Revue Forestière Française*, **39**, 5-11.
- Le Tacon, F & Millier, C (1970) Influence des conditions de nutrition minérale sur la croissance de l'épicéa commun sur les plateaux calcaires de l'est de la France. *Annales des Sciences forestières*, **27**, 335-355.
- Le Tacon, F & Toutain, F (1973) Variations saisonnières et stationnelles de la teneur en éléments minéraux des feuilles de hêtre (*Fagus sylvatica*) dans l'Est de la France. *Annales des Sciences forestières*, **30**, 1-29.
- Linder, S. (1990) The relationships between nutrition and biomass production in Swedish coniferous stands. *Proc. 5th workshop of ecology of subalpine zone, IUFRO 1990*.
- Lyr, H., Polster, H. & Fiedler, H.J. (1967) *Gehölzphysiologie*. Fischer, Jena.

- Materna, J. (1965) Ernährungsprobleme in Kiefernbeständen. *Aktuelle Probleme der Kiefernwirtschaft. Internationales Symposium des Instituts für Forstwissenschaften Eberswalde der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin, vom 28. September bis 3. Oktober 1964 in Eberswalde* pp. 633-638.
- Nihlgård, B. (1986) The seasonal variation of nutrients in needles of three different exposed spruce stands. *Direct effects of dry and wet deposition on forest ecosystems - in particular canopy interactions. Proceedings of a workshop organized by CEC* pp. 60-70. Swedish Univ. of Agricultural Science and the Institute of Environmental Research.
- Ovington, J D (1956) The composition of tree leaves. *Forestry*, **29**, 22-28.
- Rehfuess, K E (1983) Ernährungsstörungen als Ursache der Walderkrankungen? *Kali-Briefe*, **16**, 549-563.
- Rodenkirchen, H (1998) Ernährungszustand verschiedener Baumarten auf forstlichen Standortseinheiten der submontanen Höhenstufe im Schwarzwaldvorgebirge. *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung*, **39**, 91-101.
- Rodin, L.E. & Bazilevich, N.I. (1967) *Production and mineral cycling in terrestrial vegetation (translated by Scripta Technica Ltd.)*. Oliver and Boyd, Edinburgh and London.
- Silfverberg, K (1980) Micronutritional growth disorder in Norway spruce. *Folia Forestalia*, **432**, 13p.
- Silva Ferraz, J B (1985) Standortbedingungen, Bioelementversorgung und Wuchsleistung von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) des Südschwarzwaldes. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*, **14**, 224.
- Stefan, K (1983) Nadelanalysen, eine wesentliche Voraussetzung bei der Planung und Kontrolle des Grossdüngungsversuches Pinkafeld. *Der Forst- und Holzwirt*, **38**, 234-237.
- Stefan, K. (1989) Schwefel- und Nährstoffgehalte in Pflanzenproben des österreichischen Bioindikatornetzes. *Air Pollution and Forest Decline. Proc. 14th Intern. Meeting for Specialists in Air Pollution Effects on Forest Ecosystem, IUFRO Interlaken Switzerland 2-8 Oct. 1988* (eds J.B.Bucher & I.Bucher-Wallin), pp. 99-104. EAFV Birmensdorf.
- Stefan, K., Fürst, A., Hacker, R. & Bartels, U. (1997) *Forest foliar condition in Europe. Results of large-scale foliar chemistry surveys*. European Commission - United Nations/Economic Commission for Europe, Brussels, Geneva, Vienna.
- Stebel, O (1959) Nadelanalytische Untersuchungen über die Mineralstoffernährung von Fichtenbeständen in Bayern. *Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayern*, **31**, 242-251.
- Stebel, O (1960) Mineralstoffernährung und Wuchsleistung von Fichtenbeständen (*Picea abies*) in Bayern. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, **79**, 17-41.
- Summerer, H. (1987) Untersuchungen zur Symptomentwicklung und zum Krankheitsverlauf der Buchen-Kronendürre (unpublished data). *Ernährungszustand, Standortansprache und Wuchsleistung der Esche (Fraxinus excelsior L.) in Bayern* (ed A.Knorr). [82], 1-240. . Forstliche Forschungsberichte, Schriftenreihe der Forstwissenschaftl. Fakultät der Univ. München und der Bayer. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt München.
- Sumner, M E (1977a) Application of Beaufil's diagnostic indices to maize data published in the literature irrespective of age and conditions. *Plant and Soil*, **46**, 359-369.
- Sumner, M E (1977b) Preliminary N, P and K foliar diagnostic norms for soybeans. *Agron.J.*, **69**, 226-230.

- Sumner, M E (1978) Interpretation of nutrient ratios in plant tissue. *Commun.Soil Sci.Plant Anal.*, **9**, 335-345.
- Tamm, C O (1953) Mera om granens gulspettssjuka. *Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift*, **4**, 1-7.
- Timmer, V R & Armstrong, G (1988) Seedling nutrient status assessment by DRIS and vector diagnosis. *Agron.Abstr.*, **268**.
- Tomova, L, Braun, S & Flückiger, W (2002) The effect of nitrogen fertilization on fungistatic phenolic compounds in roots of beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* L. [Karst]). *New Phytologist*, **submitted for publication**.
- UNECE (2000) *Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe. Technical Report 2000*. EC-UNECE, Brussels, Geneva.
- Van den Burg, J. (1985a) Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data. 414. . Wageningen, Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp".
- Van den Burg, J. (1988) Voorlopige criteria voor de beoordeling van de minerale - voedingstoestand van naaldeboomsoorten op basis van de naaldsamenstelling in het najaar. [522], 1-20. . Wageningen, Rijksinstituut voor onerzoez in de bos - en landschapsbouw "de Dorschkamp". Rapport 522.
- Van den Burg,J. (1990b) *Foliar analysis for determination of tree nutrient status - a compilation of literature data*. Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp", Wageningen.
- van den Driessche,R. (1991) *Mineral Nutrition of Conifer Seedlings*. CRC Press Boca Raton.
- Wehrmann, J (1963) Möglichkeiten und Grenzen der Blattanalyse in der Forstwirtschaft. *Landwirtschaftliche Forschung*, **16**, 130-145.
- Weissen,F., van Praag,H.J., Hambuckers,A. & Remacle,J. (1988) A decennial control of N cycle in the Belgian Ardenne forest ecosystems. *FERN Conference "Changes in nitrogen status in European forest ecosystems"*, Aberdeen, U.K. 21-23. Sept. 1988.
- Wenninger,F. (1986) *Untersuchung der Nähr- und Schadelemente in Buchenblättern aus verschiedenen Kronenpositionen*. Forstwirtschaftliche Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Wittich, W (1958) Auswertung eines forstlichen Düngungsversuches auf einem Standort mit für weite Gebiete Deutschlands typischen Nährstoffhaushalt. *Ruhr-Stickstoff AG, Bochum*, 1-48.
- Zech, W, Suttner, T & Kotschenreuther, R (1983) Mineralstoffversorgung vermutlich immissionsgeschädigter Bäume in NO Bayern. *Kalibriefe (Büntehof)*, **16**, 565-571.
- Zöttl, H W (1964) Stoffumsätze in Ökosystemen des Schwarzwaldes. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, **106**, 105-114.
- Zöttl, H W & Hüttl, R F (1985) Schadsymptome und Ernährungszustand von Fichtenbeständen im südwestdeutschen Alpenvorland. *Allgemeine Forstzeitschrift*, **40**, 197-199.
- Zöttl, H W & Hüttl, R F (1986) Nutrient supply and forest decline in Southwest-Germany. *Water Air and Soil Pollution*, **31**, 449-462.