

Simone Klatt

Der Beitrag heimischer Leguminosen
zur Stickstoffversorgung artenreicher
Wiesen im westlichen Hunsrück
(Rheinland-Pfalz)



Cuvillier Verlag Göttingen

Simone Klatt

**Der Beitrag heimischer Leguminosen zur
Stickstoffversorgung artenreicher Wiesen
im westlichen Hunsrück (Rheinland-Pfalz)**

Vom Fachbereich VI
Geographie / Geowissenschaften
der Universität Trier
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation

Betreuende: Univ.-Prof. Dr. Barbara Ruthsatz

Berichterstattende: Apl. Prof. Dr. Mechthild Neitzke

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 21.05.2007

Erscheinungsort und –jahr: Göttingen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008

Zugl.: Trier, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-564-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-564-4

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde in der Abteilung Geobotanik im Fachbereich VI Geographie / Geowissenschaften der Universität Trier angefertigt.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Menschen beigetragen, denen ich an dieser Stelle ganz herzlich danken möchte. Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Barbara Ruthsatz, die mir die Gelegenheit zur Bearbeitung dieses Themas gegeben hat. Ich danke ihr für die Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Untersuchungsflächen, für die Betreuung und Begutachtung der Arbeit sowie für zahlreiche fachliche Diskussionen. Frau apl. Prof. Dr. Mechthild Neitzke danke ich für wertvolle Ratschläge und für die Begutachtung der Arbeit.

Bei Frau Dorothee Krieger und Herrn Bernhard Backes möchte ich mich ganz herzlich für die vielfältige Unterstützung bei der Pflanzenernte, der Bearbeitung der Proben und der Analyse im Labor bedanken. Den studentischen Hilfskräften Katharina Hammermann und Dorothe Schurr danke ich für ihren tatkräftigen Einsatz bei der Geländearbeit und der Probenaufbereitung. Herrn Dipl. Geogr. Thomas Frankenberg danke ich für die wertvolle Unterstützung bei der Einarbeitung in die Wiesenvegetation und für die kritischen Anmerkungen zur pflanzensoziologischen Auswertung. Für die Erstellung des Kartenausschnitts im GIS sowie das Korrekturlesen der gesamten Arbeit möchte ich mich herzlich bei Frau Dipl. Umweltwiss. Simone Schneider bedanken. Herrn Dr. Patrick Büker sei vielmals für die kritische Durchsicht der Summary gedankt. Bei allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Geobotanik möchte ich mich ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit und die stete Hilfsbereitschaft bedanken. Besonders danke ich Herrn Dr. Andreas Golisch für seine fortwährende Unterstützung und für viele wertvolle Fachgespräche.

Herr Reinhard Langel (Kompetenzzentrum Stabile Isotope, Göttingen) hat die zahlreichen Isotopenmessungen durchgeführt und mir hilfreiche Informationen zur Isotopentechnik gegeben. Dafür danke ich ihm ganz herzlich. Herrn Prof. Dr. Knut Schmidtke (Hochschule für Technik u. Wirtschaft, Dresden) sei an dieser Stelle für anregende Gespräche und nützliche Hinweise zur Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode gedankt.

Informationen über das FUL-Programm sowie die Untersuchungsflächen habe ich dankenswerter Weise von den FUL-Beratern der Landkreises Trier-Saarburg sowie den Mitarbeitern der Kreisverwaltung Trier-Saarburg erhalten. Allen Landwirten danke ich für ihre Auskünfte und die Möglichkeit, die Untersuchungen auf ihren Flächen durchführen zu können.

Die Nikolaus Koch Stiftung Trier und der Forschungsfonds der Universität Trier haben diese Arbeit finanziell unterstützt. Die Firma Jost GmbH (Iserlohn) hat mir kostenlos Rhizobien-Proben zur Verfügung gestellt. Dafür möchte ich ihnen allen danken.

Mein großer Dank gilt Herrn Dr. Rüdiger Jung für seine Freundschaft und für die beständige fachliche und persönliche Unterstützung während der gesamten Arbeit. Ganz besonders danke ich auch meiner Familie sowie allen Freundinnen und Freunden für ihr fortwährendes Interesse am Vorankommen der Arbeit und für die moralische Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Die Entwicklung der artenreichen Wiesen im Hunsrück	3
2.2	Die Funktion der Leguminosen im Grünland	5
2.3	Höhe der N ₂ -Fixierungsleistung von Grünland-Leguminosen	6
2.4	Methoden zur Bestimmung der symbiotischen N ₂ -Fixierung.....	8
2.4.1	¹⁵ N-Techniken.....	9
2.4.1.1	δ ¹⁵ N-Methode, ¹⁵ N natürliche Abundanz-Methode, (¹⁵ N natural abundance method).....	9
2.4.1.2	¹⁵ N-Anreicherungsverfahren (enriched ¹⁵ N isotope dilution method).....	10
2.4.1.3	Grundlage beider ¹⁵ N-Methoden	11
2.4.1.4	Vor- und Nachteile der Methoden.....	11
2.4.1.5	¹⁵ N ₂ -Reduktionsmethode (¹⁵ N ₂ reduction method)	12
2.5	Abiotische und biotische Einflüsse auf die Leguminosenverbreitung im Grünland und auf die Höhe der symbiotischen N ₂ -Fixierung.....	13
3	Untersuchungsgebiet und Untersuchungsflächen.....	18
3.1	Naturräumliche Lage.....	18
3.2	Geologie und Böden.....	18
3.3	Klima.....	18
3.4	Auswahl und Lage der Untersuchungsflächen.....	19
3.5	Pflanzensoziologisch - ökologische Betrachtung der Wiesen	21
4	Material und Methoden	23
4.1	Pflanzenprobenahme	23
4.1.1	Flächenbezogene quantitative Ernte	23
4.1.2	Untersuchung ausgewählter Arten.....	24
4.2	Bestimmung der Pflanzenerträge	24
4.2.1	Ermittlung der Trockenmassen	24
4.2.2	Schätzung des Massenanteils der Leguminosen	25
4.3	Stickstoffanalysen des Pflanzenmaterials	25

4.3.1	Gesamtstickstoff	25
4.3.2	Stabile Stickstoffisotope	26
4.4	Phosphor-, Kalium-, Magnesium-, Calcium-, Mangan- und Eisengehalte in der Sprossmasse	26
4.5	Kulturversuch zur Ermittlung der N-Isotopenfraktionierung bei der N ₂ -Fixierung	26
4.6	Schätzung der N ₂ -Fixierungsleistung der Leguminosen.....	27
4.6.1	Berechnung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge	27
4.7	Vegetationsaufnahmen.....	29
4.8	Test auf VA-Mykorrhiza in Wurzeln ausgewählter Wiesenpflanzen.....	29
4.9	Bodenuntersuchungen.....	30
4.9.1	Termine	30
4.9.2	pH-Werte.....	30
4.9.3	Gesamtstickstoff- und Gesamtkohlenstoffgehalte	30
4.9.4	Austauschbare Phosphor- und Kaliumgehalte	30
4.9.5	Austauschbare Kationen	30
4.9.6	Nitrat- und Ammoniumgehalte (N _{min})	31
4.9.7	Bodentypen und Gründigkeit.....	31
4.10	Statistische Auswertung	31
5	Ergebnisse	32
5.1	Gesamterträge der Wiesen	32
5.1.1	Hauptuntersuchungsflächen.....	32
5.1.2	Nebenuntersuchungsflächen	33
5.2	Massenanteile der funktionellen Gruppen	34
5.2.1	Hauptuntersuchungsflächen.....	34
5.2.2	Nebenuntersuchungsflächen	37
5.3	Stickstoffmengen im Wiesenschnitt.....	39
5.3.1	Gesamte N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse.....	39
5.3.1.1	Hauptuntersuchungsflächen	39
5.3.1.2	Nebenuntersuchungsflächen.....	41
5.3.2	N-Anteile der funktionellen Gruppen an der gesamten N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse	42
5.3.2.1	Hauptuntersuchungsflächen	42

5.3.2.2	Nebenuntersuchungsflächen.....	43
5.3.3	Beziehung zwischen der Leguminosenmasse und der N-Menge im Aufwuchs.....	43
5.4	Stickstoff-Isotopensignaturen und Stickstoff-Gehalte in Leguminosen und Nicht-Leguminosen.....	44
5.4.1	N-Isotopensignaturen in Leguminosen und Nicht-Leguminosen im Freiland	44
5.4.2	Zeitliche und innerpflanzliche Variabilität der N-Isotopensignatur	47
5.4.3	N-Isotopensignaturen verschiedener funktioneller Gruppen	49
5.4.4	N-Isotopensignaturen und N-Gehalte in Leguminosenarten bei N ₂ -Ernährung im Kulturversuch.....	53
5.4.4.1	Vergleich der N-Gehalte der Leguminosen im Kulturversuch mit den N-Gehalten der Leguminosen auf den Versuchsflächen	56
5.4.5	Berechnung der Korrekturgröße für die N-Isotopenfraktionierung bei der N ₂ -Fixierung (B-Wert).....	57
5.4.6	Prozentualer N-Gehalt und Beziehung zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert.....	58
5.4.6.1	Freilandpflanzen (Leguminosenarten und Nicht-Fixierer).....	58
5.4.6.2	Funktionelle Gruppen (Leguminosen, Kräuter, Gräser).....	59
5.4.6.3	Kulturversuchspflanzen (Leguminosenarten).....	60
5.5	Symbiotisch fixierte Stickstoffmengen in den Wiesen	61
5.5.1	Quantifizierung und Berechnungsvarianten.....	61
5.5.2	Hauptuntersuchungsflächen	62
5.5.2.1	Fixierte N-Anteile (Ndfa) in der Leguminosenmasse	62
5.5.2.2	Fixierte N-Anteile (Ndfa) in der gesamten Erntemasse	63
5.5.2.3	Fixierte N-Mengen (Nfix) in der Gesamtschnittmasse.....	64
5.5.3	Nebenuntersuchungsflächen	65
5.5.4	Einfluss der Referenzpflanze auf das Ergebnis der symbiotischen N ₂ -Fixierung	67
5.5.5	Einfluss der symbiotisch fixierten N-Menge (Nfix) auf die N-Mengen in der oberirdischen Biomasse	68
5.5.6	Einfluss des Leguminosenanteils an der oberirdischen Biomasse auf die symbiotisch fixierte N-Menge (Nfix) in der oberirdischen Pflanzenmasse.....	69
5.5.7	Ableitungsmöglichkeiten der fixierten N-Menge aus dem Gesamtertrag und dem Leguminosenanteil	70
5.5.8	Artspezifische symbiotische N ₂ -Fixierung der Leguminosen	73

5.6	Einfluss der Höhenlage der Flächen auf die Pflanzenerträge und die Stickstoffmengen in der oberirdischen Pflanzenmasse.....	76
5.6.1	Beziehung zwischen Höhenlage und Gesamtertrag sowie Massenanteilen der funktionellen Gruppen	76
5.6.2	Beziehung zwischen Höhenlage und N-Menge sowie fixiertem N-Anteil.....	77
5.7	Nicht-destruktive Ermittlung des Gesamtertrages und der Massenanteile der funktionellen Gruppen	78
5.7.1	Schätzung des Trockenmassenertrages über die Messung der Bestandeshöhe	78
5.7.2	Schätzung der Massenanteile der funktionellen Gruppen – Vergleich mit den TM-Anteilen.....	79
5.8	Böden der Untersuchungsflächen	82
5.8.1	pH-Werte.....	82
5.8.2	Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalte	83
5.8.3	Phosphorgehalte	84
5.8.4	Kaliumgehalte	85
5.8.5	Magnesiumgehalte	86
5.8.6	Calciumgehalte.....	86
5.8.7	Aluminiumgehalte.....	87
5.8.8	Eisen- und Mangangehalte.....	88
5.8.9	Basensättigung und effektive Kationenaustauschkapazität der Böden.....	88
5.8.10	Mineralstickstoffgehalte ($N_{\min}$).....	89
5.8.11	Beziehungen zwischen der Bodenreaktion, wichtigen Pflanzennährstoffen (P, K, Mg) sowie dem Ca/Al-Verhältnis und der symbiotischen N_2 -Fixierung.....	90
5.8.12	Beziehung zwischen den aktuellen $N_{\min}$ -Gehalten der Böden und der symbiotischen N_2 -Fixierung	92
5.9	Mineralstoffgehalte im Sprossmaterial der Leguminosen und Nicht-Leguminosen	93
5.10	VA-Mykorrhiza in Leguminosen und Nicht-Leguminosen.....	97
6	Diskussion	99
6.1	Standortbedingungen und symbiotische N_2 -Fixierung	99
6.1.1	Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von den N-Gehalten des Bodens	99
6.1.2	Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von der N-Deposition	100
6.1.3	Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von den P-Gehalten des Bodens.....	101

6.1.4	Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von den Kalium und Magnesium-Gehalten des Bodens.....	102
6.1.5	Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von der Bodenreaktion, den Calcium- und den Aluminium-Gehalten des Bodens	102
6.2	Isotopensignaturen und symbiotische N ₂ -Fixierung.....	104
6.2.1	Negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im oberirdischen Pflanzenmaterial der halbextensiv genutzten Wiesen	104
6.2.2	Einfluss diverser N-Quellen auf die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in den Referenzpflanzen	105
6.2.3	Fixierte N-Anteile (Ndfa) in den Leguminosen.....	109
6.2.4	Bedeutung der fixierten N-Mengen für die Magerwiesen	111
6.3	Methodendiskussion.....	114
6.3.1	Vertrauenswürdigkeit des im Kulturversuch ermittelten B-Wertes.....	114
6.3.2	Einflüsse auf die Berechnung der fixierten N-Menge durch die B-Werte und durch geringe $\delta^{15}\text{N}$ -Differenzen.....	116
6.3.3	Nutzung geeigneter B-Werte zur Quantifizierung der N ₂ -Fixierung.....	122
6.3.4	Eignung der ausgewählten Nicht-Fixierer als Referenzpflanzen und Einfluss der Referenzpflanze auf die Schätzung der fixierten N-Menge.....	124
6.3.5	Transfer-Stickstoff	125
6.3.6	Beurteilung der Eignung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode für Untersuchungen in artenreichen Wiesen.....	126
6.3.7	Ausblick	127
7	Zusammenfassung.....	129
8	Summary	133
9	Literatur.....	136
	Anhang.....	148

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Untersuchungsgebiet im südwestlichen Hunsrück in Rheinland-Pfalz mit der Lage der Untersuchungsflächen.	20
Abb. 2: Relative Anteile der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) an der Gesamtbiomasse (oberirdisch) der sechs Hauptuntersuchungsflächen.	35
Abb. 3: Relativer Anteil der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) an der oberirdischen Gesamtbiomasse. Zehn Nebenuntersuchungsflächen im Jahr 2002, fünf Nebenuntersuchungsflächen im Jahr 2003.	38
Abb. 4: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross von Leguminosen (■) und Nicht-Leguminosen (□) für die Termine Juni 2001 und Juni 2002, Mittelwerte mit Standardabweichung aus Mischproben.	45
Abb. 5: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross von Leguminosen und Nichtleguminosen an drei Terminen (23.4., 7.5. und 28.5.2003).	47
Abb. 6: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in der Sprossmasse der Leguminosen und gemittelter $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Nicht-Fixierer ($\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwert Kräuter und Gräser) für jede Ernteparzelle.	52
Abb. 7: Stickstoffgehalte (in %) und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial von Leguminosen und Nicht-Fixierern im Juni 2001 sowie im Juni 2002.	58
Abb. 8: Stickstoffgehalte (%) und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross- und Wurzelmaterial von Leguminosenarten und nicht-fixierenden Kräuterarten (sieben Wiesen, 2003).	59
Abb. 9: Stickstoffgehalte (%) und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in der oberirdischen Biomasse der Ernteparzellen.	60
Abb. 10: Beziehung zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert (‰) und dem prozentualen N-Gehalt A) in der Sprossmasse und B) in der Wurzelmasse der auf N-freiem Substrat kultivierten Leguminosenarten.	61
Abb. 11: Vergleich der aus der Berechnung mit den beiden Referenzvarianten <i>Plantago lanceolata</i> und Kräuter- plus Gräserfraktion erzielten Ergebnisse über die Höhe der aus symbiotischer N_2 -Fixierung stammenden N-Anteile in der Leguminosen-Sprossmasse (% Ndfa).	67
Abb. 12: Beziehung zwischen der N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Menge.	68
Abb. 13: Regression des Leguminosenanteils an der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Menge (Nfix).	69

Abb. 14: Fixierte N-Mengen (kg) je dt Leguminosen-Sprossmasse.	70
Abb. 15: Regression der Höhenlage der Wiesen und des Gesamtertrags (oberirdische TM) im Juni 2002.	76
Abb. 16: Regressionen der Höhenlage der Wiesen mit den Massenanteilen der funktionellen Gruppen Gräser, Kräuter und Leguminosen im Juni 2002.	77
Abb. 17: Regression der Höhenlage der Untersuchungsflächen und der N-Menge im Wiesenschnitt im Juni 2002.	77
Abb. 18: Regression des durch Leguminosen fixierten Stickstoffs (Ndfa) im Juni 2002 und der Höhenlage der Wiesen.	78
Abb. 19: Beziehung zwischen der Bestandeshöhe und dem Trockenmasse-Ertrag, in 267 Ernteparzellen im Juni 2003.	79
Abb. 20 a und b: Vergleich der Ergebnisse der Leguminosen-Anteilsschätzung im Juni 2002 und im Juni 2003 mit der Anteilsermittlung über die Trockenmassenbestimmung.	81
Abb. 21: Nitrat-N- und Ammonium-N-Gehalte im Oberboden (0–10 cm Tiefe) der sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni und im September des Jahres 2001.	90
Abb. 22: Zusammenhang des mineralischen Bodenstickstoffs ($N_{\min}$) und der symbiotisch fixierte N-Menge.	92
Abb. 23 a und b: Nach dem Modell der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode postulierte Lage der verschiedenen pflanzlichen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte. a) Boden-N sei ^{15}N abgereichert gegenüber Luft-N b) Boden-N sei ^{15}N -angereichert gegenüber Luft-N.	117
Abb. 24: Berechnungsbeispiel 1: Ndfa > 100 %.	118
Abb. 25: Berechnungsbeispiel 2: Ndfa < 0 %.	118
Abb. 26: Höhe der symbiotisch fixierten N-Anteile (Ndfa) bei einem gegebenen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminose von -0,5 ‰, einem gegebenem B-Wert von -1,6 ‰ bzw. 0 ‰ und hypothetischen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Referenzpflanze von -20 bis +20 ‰.	119

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Lage der 16 Untersuchungsflächen mit Flächenbezeichnungen.	19
Tab. 2: Erntetermine, Größe und Zahl der Ernteparzellen auf den Untersuchungsflächen.....	23
Tab. 3: Erträge (oberirdische Trockenmassen) der sechs Hauptuntersuchungsflächen in drei Untersuchungsjahren (jeweils Juni-Schnitt).....	33
Tab. 4: Erträge (Trockenmassen) im Juni 2002 und im Juni 2003 auf 10 Nebenuntersuchungsflächen.	34
Tab. 5: Unterschiede in den Ertragsanteilen der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) zwischen den drei Versuchsjahren auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen.	35
Tab. 6: Statistischer Vergleich der Leguminosen-, Kräuter- und Gräseranteile zwischen den sechs Hauptuntersuchungsflächen innerhalb eines Untersuchungsjahres (Juni-Ernte).	37
Tab. 7: Unterschiede in den Ertragsanteilen der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) zwischen den zwei Versuchsjahren 2002 und 2003 auf den Nebenuntersuchungsflächen.	38
Tab. 8: Statistischer Vergleich der Nebenuntersuchungsflächen hinsichtlich der Leguminosen-, Kräuter- und Gräseranteile für die Versuchsjahre 2002 und 2003.....	39
Tab. 9: Stickstoffmengen im Aufwuchs der sechs Hauptuntersuchungsflächen (Juni-Ernten in den Jahren 2001 bis 2003).	40
Tab. 10: Stickstoffmengen im Aufwuchs der Nebenuntersuchungsflächen (Juni-Ernten in den Jahren 2002 und 2003).	41
Tab. 11: Anteile der funktionellen Gruppen an der gesamten N-Menge der oberirdischen Biomasse in den drei Untersuchungsjahren (Juni-Ernten, Hauptuntersuchungsflächen).	42
Tab. 12: Anteile der funktionellen Gruppen an der gesamten N-Menge der oberirdischen Biomasse auf den Nebenuntersuchungsflächen.	43
Tab. 13: Beziehung (Regression) zwischen Leguminosen-TM (dt ha^{-1}) und N-Menge (kg ha^{-1}) der Gesamtbiomasse.	44
Tab. 14: Mittlerer Differenzbetrag (‰) der einzelnen Leguminosenarten zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Spross von <i>Plantago lanceolata</i> auf jeder Fläche für die Termine Juni 2001, Juni 2002 und Mai 2003.	46

Tab. 15: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross und in der Wurzel von Leguminosen und Nicht-leguminosen am 28.5.2003, Mittelwerte mit Standardabweichung.	49
Tab. 16: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen für die Juni-Ernten der Jahre 2001 und 2002.	51
Tab. 17: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte und N-Gehalte in Spross und Wurzel der Versuchspflanzen bei Kulturende. Versuchsvarianten: Radicin [®] - und Bodenextrakt-Animpfung.	54
Tab. 18: Aus den Kulturversuchsdaten ($\delta^{15}\text{N}$) ermittelte Korrekturgrößen (B-Werte) für die Berechnung der Stickstoff-Fixierungsleistung der Leguminosen.	57
Tab. 19: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N_2 -Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im Sprossmaterial der Leguminosen, sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni 2001 und im Juni 2002.....	62
Tab. 20: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N_2 -Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im gesamten Wiesenschnitt, sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni 2001 und im Juni 2002.	63
Tab. 21: Die durch Leguminosen fixierte N-Menge (Nfix) im Wiesenschnitt, sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni 2001 und im Juni 2002.....	64
Tab. 22: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N_2 -Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im Sprossmaterial der Leguminosen, Nebenuntersuchungsflächen im Juni 2002.	65
Tab. 23: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N_2 -Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im gesamten Wiesenschnitt, Nebenuntersuchungsflächen im Juni 2002.....	66
Tab. 24: Die durch Leguminosen fixierte N-Menge (Nfix), Nebenuntersuchungsflächen im Juni 2002.	66
Tab. 25: Statistischer Vergleich (lineare Regression) der Ergebnisse aus den beiden Referenzvarianten Berechnung ohne B-Wert).	68
Tab. 26 A–C: Ableitungsmöglichkeit der fixierten N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiese über die ermittelten Größen „Gesamtertrag“ und „prozentualer Leguminosenanteil“.....	71
Tab. 27: Kalkulation der symbiotisch fixierten N-Menge für die August-Ernte des Jahres 2001.....	72
Tab. 28: Kalkulation der symbiotisch fixierten N-Menge für die Juni-Ernte des Jahres 2003.	73

Tab. 29: Anteile symbiotisch fixierten Stickstoffs (% Ndfa) an der N-Menge im Sprossmaterial von sieben Leguminosenarten, Berechnung mit B-Wert = 0 ‰ und verschiedenen Referenzarten (<i>Plantago lanceolata</i> , <i>Sanguisorba minor</i> , <i>Leucanthemum vulgare</i> , <i>Holcus lanatus</i>).....	74
Tab. 30: Abweichung der Schätzung der Massenanteile der funktionellen Gruppen gegenüber der Trockenmassen-Ermittlung auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen für die Juni-Ernten der Jahre 2001 bis 2003.....	80
Tab. 31: pH-Werte der Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.....	83
Tab. 32: Stickstoff- und Kohlenstoff-Gesamtgehalte und das C _t /N _t -Verhältnis in den Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.	84
Tab. 33: Gehalte an austauschbarem Phosphor, Kalium (Ammoniumlactat-Austausch) und Magnesium (Ammoniumchlorid-Austausch) in den Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.	85
Tab. 34: Gehalte an austauschbarem Calcium, Mangan und Aluminium (Ammoniumchlorid-Austausch) in den Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.	87
Tab. 35: Basensättigung und effektive Kationenaustauschkapazität der Wiesenböden.....	89
Tab. 36: Zusammenhang zwischen pH-Wert, Ca/Al-Verhältnis und P-Gehalt der Böden und der N ₂ -Fixierungsleistung.....	91
Tab. 37: Mineralstoffgehalte (P, K, Mg, Ca, Mn, Fe) im Sprossmaterial von Leguminosen und Nichtleguminosen (Juni und August 2001, Juni 2002, Mittelwerte ± Standardabweichung.....	94
Tab. 38: Strukturen von Mykorrhiza-Pilzen (VAM) im Wurzelgewebe der untersuchten Leguminosen und zweier Nicht-Leguminosen.....	98

Verzeichnis der Abkürzungen

δ	Delta
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
μmol	Mikromol
‰	Promill
%	Prozent
a	Jahr
Abb.	Abbildung
B-Wert	Korrekturwert für die Isotopenfraktionierung bei der symbiotischen N_2 -Fixierung
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
cm	Centimeter
dt	Dezitonne
Fe	Eisen
g	Gramm
ges	gesamt
h	Stunde
ha	Hektar
K	Kalium
KAK_{eff}	Effektive Kationenaustauschkapazität
kg	Kilogramm
l	Liter
m^2	Quadratmeter
mg	Milligramm
Mg	Magnesium
mm	Millimeter
Mn	Mangan
n	Stichprobenumfang
N	Stickstoff
N_2	Distickstoff
Ndfa	Nitrogen derived from the atmosphere (Anteil Stickstoff aus der Luft)
Nfix	Menge aus symbiotischer N_2 -Fixierung stammenden Stickstoffs
NH_4^+	Ammonium
N_{min}	mineralischer Stickstoff
NN	Normal Null
NO_3^-	Nitrat
Nt	Gesamtstickstoff
P	Phosphor
P	Irrtumswahrscheinlichkeit
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
r	Korrelationskoeffizient
R^2	Bestimmtheitsmaß (Regressionsanalyse)
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
Var.B	Variante Animpfung mit Bodenextrakt
Var.R	Variante Animpfung mit Radizin-Produkten

Funktionelle Pflanzengruppen:

G	Gräser
L	Leguminosen
K	sonstige Kräuter (ohne Leguminosen)

1 Einleitung

Die Intensivierung der Landwirtschaft in Deutschland hatte im 20. Jahrhundert einen starken Wandel in der Ausprägung des Kulturgraslands zur Folge. Durch hohe Mineraldünger-Gaben, eine hohe Schnittfrequenz, einen frühen ersten Schnitt auf Wiesen und Mähweiden sowie durch einen dichten Viehbesatz entwickelte sich kräuterreiches Grünland zu landwirtschaftlichen Produktionsflächen, die vielen Tier- und Pflanzenarten kaum noch Lebensraum bieten. Besonders kleinwüchsige Pflanzen mit geringeren Nährstoffansprüchen, die in ein- bis zweischürigen Wiesen ihren Verbreitungsschwerpunkt haben, zählen in der heutigen Zeit zu den im Rückgang begriffenen oder mittlerweile bereits gefährdeten Arten (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002, BRIEMLE 2003).

Der Trend zur Intensivierung oder Aufgabe relativ unproduktiver Grünlandflächen ist auch im Hunsrück (Rheinland-Pfalz) zu erkennen (RUTHSATZ et al. 2004). Die hier anzutreffenden artenreichen Wiesen kalkarmer Standorte sind im Gegensatz zu den Lebensgemeinschaften der Kalkmagerrasen nicht grundsätzlich geschützt. Der Erhalt dieses Magergrünlands sollte jedoch von allgemeinem Interesse sein, da ihm nicht nur ein landwirtschaftlicher Nutzwert zukommt. Magerwiesen tragen in hohem Maße zur Biodiversität bei. Darüber hinaus steigern kräuterreiche Wiesen durch ihre Blütenvielfalt den Erholungswert einer Kulturlandschaft für den Menschen (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002).

Eine Vielzahl von Leguminosen (Familie der Schmetterlingsblütengewächse, *Fabaceae*) sind in extensiv genutztem Grünland heimisch. Diese Pflanzen haben die Fähigkeit atmosphärischen Stickstoff (N_2) biologisch zu fixieren, indem sie Symbiosen mit stickstoffsammelnden Bodenbakterien der Gattungen *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* u. a. eingehen (WERNER 1992). Bei einer reduzierten Stickstoff-Düngung kann die biologische N-Bindung der Leguminosen einen Teil des zum Wachstum des Pflanzenbestandes notwendigen Stickstoffs ersetzen (RIEDER 1983).

Der Anteil der Leguminosen in den Wiesen und die Höhe der N_2 -Fixierung ist von vielen biotischen und abiotischen Faktoren abhängig, wobei der allgemeinen Nährstoffversorgung eine große Bedeutung zukommt (MARTIN 1990, HARTWIG 1998, CREWS 1999, SPRENT 1999, SCHUBERT et al. 2003, SADOWSKY 2005). Während für die meisten intensiv genutzten landwirtschaftlichen Anbausysteme (Feldfutterbau, Intensivweiden) bereits umfangreiche Untersuchungen hinsichtlich der symbiotischen N-Bindung von Leguminosen vorliegen, fehlen diese für extensiv genutzte Grünlandflächen weitgehend. Insbesondere fehlt eine Übersicht über den Beitrag der krautigen Leguminosen zum Stickstoffhaushalt artenreicher Wiesen kalkarmer Böden der Mittelgebirgslagen.

Die Kenntnis über die Höhe der symbiotischen Stickstoff-Bindung der Leguminosen ist in der landwirtschaftlichen Praxis von großer Bedeutung, um eine möglichst exakte N-Bilanz für die jeweiligen Flächen erstellen zu können. Dies dient nicht nur der Kosteneinsparung (weniger Düngemittel), sondern liefert auch einen Beitrag zum Grundwasserschutz sowie zum Landschafts- und Biotopschutz.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sollen zu einem besseren Verständnis der Bedeutung der Leguminosen für den Stickstoff-Haushalt von Magerwiesen beitragen.

Im Wesentlichen wurde folgenden Fragen nachgegangen:

- Wie hoch ist der symbiotisch gebundene N-Anteil an der N-Menge im Sprossmaterial der Grünland-Leguminosen?
- Welche N-Mengen werden über symbiotische N-Bindung in die Magerwiesen eingebracht?
- Wie hoch ist der Leguminosenanteil an der Biomasse der ungedüngten oder sporadisch gedüngten Magerwiesen typischerweise?
- Ist die N-Bindungseffizienz der Leguminosen in Magerwiesen ähnlich hoch wie im Feldfutterbau und in der Weidewirtschaft?
- Eignet sich die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (^{15}N natürliche Abundanz-Methode) für Untersuchungen in artenreichem Dauergrünland?

2 Literaturübersicht

2.1 Die Entwicklung der artenreichen Wiesen im Hunsrück

Artenreiche Wiesen dienen nicht nur der Nahrungsproduktion (Tierfutter bzw. tierische Erzeugnisse), sondern sind auch Indikatoren für die ökologischen Leistungen der Landwirtschaft (nachhaltige Nutzung). Gleichzeitig bieten sie durch ihre Ästhetik dem Menschen einen wertvollen Erholungsraum (Naherholung, Tourismus). Mit ihrer Vielfalt an Tier- und Pflanzenarten gehören Magerwiesen zu den artenreichsten Ökosystemen Mitteleuropas (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002, BRIEMLE 2003).

Durch den Strukturwandel in der Landwirtschaft und die Intensivierung der Nutzung ist der mengenmäßige Anteil artenreichen Grünlands extensiver bis halbextensiver Nutzung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts stark zurückgegangen. Zu den im Rückgang begriffenen Dauergrünlandtypen zählen auch die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Glatthaferwiesen magerer Ausprägung sowie die in höheren Lagen des Hunsrücks vorkommenden Bärwurz-Goldhaferwiesen. Nach DIERSCHKE & BRIEMLE (2002) ist der flächenmäßige Anteil der Glatthafer-Talwiesen (*Arrhenatherion elatioris*) am gesamten Grasland Deutschlands seit 1950 von 35 % auf 5 % gesunken. In der gleichen Zeit nahm auch der Anteil der Goldhafer-Bergwiesen (*Polygono-Trisetion*) von 10 auf 5 % ab. Entsprechend wurde eine Zunahme der artenarmen Vielschnittwiesen, Mähweiden und Intensivweiden registriert. Grünlandtypen extensiver Nutzungsform gehören zu den am stärksten gefährdeten Vegetationsformen in Deutschland. Annähernd 500 der 870 gefährdeten Pflanzenarten sind in extensivem Grünland zu finden (BRIEMLE 2003).

In den klimatisch ungünstigeren Lagen der Mittelgebirge ist im Vergleich zu anderen Regionen Deutschlands relativ viel Magergrünland erhalten. So zeigt auch das Hunsrück-Gebirge eine eher traditionelle Kulturlandschaft mit einer Durchmischung von Ackerflächen und futterbaulich genutztem Grasland. Doch auch im Hunsrück hat die Intensivierung der Landwirtschaft seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts stetig zugenommen, so dass hier ebenfalls ein Rückgang der durch vielfältige Funktionen für den Naturhaushalt wertvollen, mageren Grünlandflächen zu verzeichnen ist (HASEMANN 1986, SMOLLIICH & BERNERT 1986, MANZ 1989, RUTHSATZ et al. 2004). Im Kreis Trier-Saarburg, in dem die Untersuchungsflächen liegen, hatte das Dauergrünland¹ im Jahr 2003 mit ca. 14.500 ha einen Anteil von etwa 43 % an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ 2005). Mäßig bis sehr intensiv

¹ Dauergrünland im Sinne der Landwirtschaft ist definiert als Grünland, welches ohne Unterbrechung durch andere Kulturen zur Futtergewinnung durch Abmähen oder Abweiden genutzt wird (STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ 2005). Der Grasanbau auf dem Ackerland (Feldfutterbau) zählt nicht hierzu, wohl aber ein- und nachgesäte Grünlandflächen.

genutztes Grünland (inklusive Ansaaten und Nachsaaten) überwiegt flächenmäßig gegenüber extensiv bis mäßig extensiv genutztem (FRANKENBERG & RUTHSATZ 2001). Zwar gibt es in der Hunsrück-Region immer noch traditionell, d. h. extensiv wirtschaftende Landwirte, doch die Gefahr der Hof-Aufgabe mit Abgabe der Flächen an intensiv wirtschaftende Vollerwerbsbetriebe ist hoch. Diese Tendenz war in den letzten Jahrzehnten bereits zu beobachten (RUTHSATZ 2001). Bei einer Nutzungsintensivierung werden aus den artenreichen Blumenwiesen relativ schnell kräuterarme, grasreiche Fettwiesen. Ein weiteres Problem stellen aus naturschutzfachlicher Sicht der Umbruch von Grünland sowie Neuansaaten und Nachsaaten mit artenarmen Saadmischungen (insbesondere mit produktiven Gräser-Sorten) dar.

Aufgrund der kurzlebigen Samen vieler Wiesenpflanzen (5 bis 10 Jahre) ist eine Rückführung einer langjährig intensiv genutzten, artenarmen Wiese in eine artenreiche Wiese fast unmöglich (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002, BRIEMLE 2003). Dies gilt insbesondere, wenn in der Umgebung ausschließlich Intensivlandwirtschaft betrieben und ein Einwandern selten gewordener Arten somit zusätzlich erschwert wird. Umso wichtiger ist der Schutz des verbliebenen extensiv genutzten Graslands. Die Erhaltung oder Wiederherstellung regionaltypischen artenreichen Grünlands wird von den deutschen Bundesländern mit verschiedenen Agrar-Umweltprogrammen unterstützt. Beispiele dafür sind die Kulturlandschaftsprogramme (KULAP) in Bayern, Thüringen und weiteren Bundesländern, das Programm Marktentlastung und Kulturlandschaftsausgleich (MEKA bzw. MEKA II) in Baden-Württemberg oder das Förderprogramm Umweltschonende Landbewirtschaftung (FUL mit dem Grünlandextensivierungsprogramm FUL 2) in Rheinland-Pfalz². Für die vertragliche Einhaltung bestimmter Auflagen, die den Artenreichtum auf den Vertragsflächen fördern, erhalten die Landwirte eine Aufwands- bzw. bei verminderten Ernten eine Ertragsentschädigung. Statt einer rein maßnahmenorientierten Förderung wird derzeit eine ergebnisorientierte Förderung mit einer Erfolgskontrolle anhand floristischer Kartierungen angestrebt (OPPERMANN 2003, BERTKE et al. 2003a und b).

Eine Nutzungsintensivierung auf von Natur aus ungünstigen Standorten - wie beispielweise auf den flachgründigen Schieferböden im Hunsrück - ist auf lange Sicht ohnehin unrentabel (RUTHSATZ et al. 2004). Durch eine Nutzungseinschränkung - mit Beibehaltung der Mahd - wäre dagegen vielerorts eine Erhaltung oder Wiederherstellung artenreicher Wiesen realisierbar. Einige der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wiesen wurden im Grünlandextensivierungsprogramm FUL 2 gefördert. Optimal wäre es, wenn viele Landwirte Extensivwiesen in ihren Betrieb integrieren würden, so dass in der Fläche eine breit gestreute Verteilung dieses Biotoptyps entstehen kann.

² Das Förderprogramm umweltschonende Landbewirtschaftung (FUL) wird im Jahr 2007 durch das Programm-Agrar-Umwelt-Landschaft (PAULa) abgelöst (Kreisverwaltung Mayen-Koblenz, http://www.kvmyk.de/-r_presse/presse2006/oktober2006/presse_330.htm, 10.11.2006).

Die Maßnahmen tragen neben der Erhaltung der Artenvielfalt und des Biototyps der mageren Glatthafer- bzw. Goldhaferwiesen auch zum Erhalt einer vielfältigen und strukturierten Kulturlandschaft bei. Die Verringerung der Düngung schützt zudem Boden und Grundwasser vor zu hohen Stoffeinträgen wie insbesondere Nitrat (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002).

2.2 Die Funktion der Leguminosen im Grünland

In den artenreichen Wiesen mittlerer Standorte finden sich zahlreiche krautige Leguminosen (Familie *Fabaceae* LINDL. = *Papilionaceae* GISEKE, Schmetterlingsblütengewächse in der Ordnung *Fabales* = *Leguminosae*, Hülsenfrüchtler). Neben den auch in intensiver genutztem Grünland verbreiteten Klee-Arten *Trifolium repens* (Weiß-Klee) und *Trifolium pratense* (Rot-Klee) kommen auf den halbextensiv genutzten Wiesen des Hunsrücks weitere Kleinklee-Arten wie *Trifolium dubium* (Kleiner Klee) und *T. campestre* (Feld-Klee) sowie Hornklee-Arten, Wundklee, Wicken, Platterbsen und Ginster-Arten vor.

Leguminosen bilden aufgrund ihrer Fähigkeit zur symbiotischen N₂-Fixierung eine eigene funktionelle Gruppe in der Grünlandvegetation. Sie sind für den N-Kreislauf ihres Ökosystems von Bedeutung. Ein Biodiversitätsverlust trifft einen Bestand stärker, wenn Arten mit wichtiger Funktion wie z. B. Leguminosen verloren gehen. SPEHN et al. (2002) stellten in experimentellem Grünland (BIODEPTH-Projekt, Deutschland) einen großen Einfluss der Leguminosen auf die Biomasseproduktion und die N-Akkumulation in der Biomasse fest. Dieser wurde mit der symbiotischen N₂-Fixierung der Leguminosen begründet. Auch PALMBORG et al. (2005) bestätigten in ihrem Biodiversitäts-Experiment den positiven Effekt der Leguminosen (*Trifolium*-Arten und *Lotus corniculatus*) auf die Höhe der Biomasseproduktion in artenreichen Grünlandbeständen. Die Autoren vermuten, dass Gräser und nicht-fixierende Kräuter von einer verbesserten N-Verfügbarkeit profitierten, da die Menge des anorganischen Stickstoffs im Boden durch das Vorkommen von N₂-fixierenden Leguminosen erhöht wurde. Einen engen Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil der Leguminosen und dem N-Gehalt sowie dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im oberirdischen Pflanzenmaterial eines experimentellen Grünlands stellten MULDER et al. (2002) fest. Auch hier erhöhte der durch symbiotische N₂-Fixierung gewonnene Stickstoff die N-Verfügbarkeit für die nicht-fixierenden Pflanzen und führte so zu einer Steigerung der oberirdischen Biomasse.

Die Nutzung von Leguminosen im Grünland und Feldfutterbau hat positive Effekte in Bezug auf die Tierernährung. OPITZ VON BOBERFELD & LASER (1999) betonen die Möglichkeit der Verbesserung des Futterwertes protein- und energiearmer Aufwüchse extensiv bewirtschafteter Flächen durch Leguminosen wie *Trifolium repens*. Leguminosen besitzen einen hohen Rohproteingehalt, der sich bei der physiologischen Alterung der Pflanzen weniger verringert als es bei Gräsern zu beobachten ist. Das gilt jedoch z. B. für *Lotus corniculatus* nur eingeschränkt, da die Art durch hohe Ligninkonzentrationen und einen niedrigen P/E-Quotienten (Protein/Umsetzbare Energie-Quotient) andere Eigenschaften als z. B. *Trifolium repens* aufweist. Jedoch wurden auf Extensivweiden auch durch *Lotus*

corniculatus die Nährelementgehalte (Ca, P, Mg) in Gräsern wie *Festuca rubra* und *Agrostis capillaris* gesteigert (OPITZ VON BOBERFELD & LASER 1999). *Trifolium pratense* kann neben einer Steigerung des Rohproteingehalts auch den Mineralstoffgehalt (P, K, Mg, Ca) eines Graspartners im Bestand verbessern (LEHMANN & MEISTER 1982). Verschiedene Futterwert-Parameter von in naturnahem Grünland vorkommenden Leguminosen sind einer Übersicht von SCHUBERT et al. (2003) zu entnehmen.

Nicht zuletzt bringen Leguminosen dem landwirtschaftlichen Betrieb einen ökonomischen Vorteil, da die symbiotische N-Bindung den Boden bzw. den gesamten Pflanzenbestand mit Stickstoff anreichert und so die mineralische N-Düngung deutlich reduziert werden kann (ROCHON et al. 2004).

2.3 Höhe der N₂-Fixierungsleistung von Grünland-Leguminosen

Im Stoffhaushalt der Pflanzen steht der Stickstoff an erster Stelle, da er entscheidenden Einfluss auf das Wachstum und auf die Artenkombination von Pflanzenbeständen ausübt (DIERSCHKE & BRIEMLE 2002). Spätestens seit der Entdeckung durch Hermann Hellriegel und Hermann Wilfahrt im Jahr 1886 ist bekannt, dass Leguminosen mit Hilfe von Knöllchenbakterien elementaren Luftstickstoff für ihr Wachstum nutzen können (BURRIS 1974, BÖHM 1986).

Daten zur symbiotischen N₂-Fixierungsleistung von Leguminosen sind nicht leicht zu ermitteln, da eine direkte Meßmethode für die Anwendung im Freiland fehlt. Bisher angewandte in-situ-Methoden (siehe Kap. 2.4) beruhen auf indirekten Ableitungen und werden daher als Schätzmethoden bezeichnet. Beim Vergleich von Literaturdaten stellen sich daher mehrere Probleme: Zum einen muss die verwendete Schätzmethode berücksichtigt werden, zum anderen beziehen sich die angegebenen Werte auf unterschiedliche Pflanzenorgane (Spross, Wurzel oder Gesamtpflanze). Darüber hinaus spielen die Wachstumsbedingungen eine Rolle. Die vorhandenen Daten zu den heimischen *Trifolium*-Arten und *Lotus corniculatus* stammen überwiegend aus pflanzenbaulichen Versuchen zur Futterherstellung. Die dort gefundenen Unterschiede sind durch unterschiedliche Standortbedingungen sowie durch die Bewirtschaftung geprägt.

Für Fixierungsleistungen des Weißklee in Dauergrünland bei Mahdnutzung sei auf eine Übersicht bei LEDGARD (2001) verwiesen. Die Spanne der beobachteten N₂-Fixierung wurde dort mit 45 bis 315 kg gebundenem N je Hektar und Jahr angegeben (Bestimmung durch ¹⁵N-Anreicherungsverfahren). Eine weitere Zusammenstellung von Literaturdaten für die N-Bindung bei Weiß- und Rotklee findet sich bei CARLSSON & HUSS-DANEL (2003). In dieser Arbeit werden Fixierungsleistungen von 1 bis 283 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für Weißklee und von 8 bis 373 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für Rotklee genannt (bei max. 20 kg N-Dünger ha⁻¹ a⁻¹, Bestimmung durch ¹⁵N-Anreicherungsverfahren).

Zur symbiotischen N-Bindung bei *Lotus corniculatus* gibt SCHNOTZ (1995) eine Übersicht. Es werden fixierte N-Mengen von 16 bis 232 kg N ha⁻¹ a⁻¹ aufgeführt. Eine Spanne von 49 bis

109 kg N ha⁻¹ a⁻¹ wird von PEOPLES et al. (1995) genannt. OPITZ VON BOBERFELD & LASER (1999) geben für *Lotus corniculatus* in Reinsaat eine symbiotische N-Bindung in Höhe von maximal 260 kg N ha⁻¹ a⁻¹ an. Von SEGUIN et al. (2000) wurde für Hornklee eine durchschnittliche Fixierung von 145 kg N ha⁻¹ a⁻¹ nachgewiesen.

Zu den in dieser Arbeit untersuchten *Vicia*-Arten, zu *Lathyrus linifolius* sowie zu *Trifolium dubium* waren keine Angaben hinsichtlich der symbiotischen N-Bindung zu finden.

Zu bedenken ist, dass es sich bei den Angaben überwiegend um frisch angesäte Klee-Gras-Bestände mit hohen Anteilen der jeweiligen Leguminose oder um Reinbestände im Feldfutterbau handelt. Die niedrigsten in den genannten Arbeiten zitierten symbiotisch gebundenen N-Mengen für *Trifolium pratense* (8 kg N ha⁻¹), für *T. repens* (1 kg N ha⁻¹) und *Lotus corniculatus* (16 kg N ha⁻¹) entstammen einer Untersuchung von HEICHEL & HENJUM (1991). Diese vergleichsweise geringen N-Mengen wurden auf geringe Massenanteile dieser Arten im Bestand bzw. eine geringe Fixierungsleistung im ersten Untersuchungsjahr nach der Ansaat zurückgeführt. Auch werden häufig Jahresgesamtmengen aus Summen mehrerer Ernten angegeben. SERESINHE et al. (1994) stellten beispielsweise bei mehrfacher Schnittnutzung von Weißklee (im Bestand mit *Lolium perenne*) eine N-Bindung in Höhe von ca. 100 bis 140 kg ha⁻¹ für die gesamte Vegetationsperiode fest. Davon entfielen ca. 20 bis 25 kg N ha⁻¹ auf den ersten Schnitt Ende Mai.

Die hohen fixierten N-Mengen in den oberen Bereichen der angegebenen Spannen sind sicherlich nicht mit den artenreichen Magerwiesen zu vergleichen, da hier die Ertragsanteile der Leguminosen wesentlich geringer waren als in den meisten (intensiven) Anbausystemen zur Futtererzeugung. Lediglich die Werte im unteren Bereich der angegebenen Spannen können einen Hinweis auf eine Fixierungsleistung bei geringem Anteil der entsprechenden Art in einem Grünlandbestand geben. Beispielsweise berichten RIFFKIN et al. (1999b) von relativ geringen fixierten N-Mengen von lediglich 11 bis 18 kg ha⁻¹ a⁻¹ ($\delta^{15}\text{N}$ -Methode) in Weiden mit Weißkleeanteilen von durchschnittlich 8 %. Dieser Leguminosenanteil entspricht dem mittleren Anteil der Leguminosen in den untersuchten Hunsrück-Wiesen. Experimente auf Weiden sind wegen der heterogenen Nährstoffzufuhr durch die Weidetiere jedoch nur bedingt mit den hier untersuchten Mähwiesen zu vergleichen.

CLEVELAND et al. (1999) bewerten den Beitrag der biologischen Stickstoff-Fixierung durch Leguminosen in natürlichem Grasland unter globalem Gesichtspunkt als gering, da in diesen Ökosystemen der Anteil dieser Artengruppe an der Nettoprimärproduktion häufig niedrig ist (1–5 %). Die Angaben über die fixierten N-Mengen von 0,1 bis 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ beziehen sich jedoch überwiegend auf Untersuchungen einer Gräser-dominierten Steppen- und Präievegetation.

Da Untersuchungen zur symbiotischen N₂-Fixierung in alten Dauergrünlandbeständen mittlerer Standorte in Deutschland bisher fehlen, werden im Folgenden Arbeiten aus N-limitierten Graslandökosystemen aufgeführt, die mit den eigenen Arbeiten am ehesten vergleichbar sind. BOWMAN et al. (1996) untersuchten die Stickstoffbindung dreier

Trifolium-Arten in alpiner Tundra anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode. Sie fanden eine symbiotisch fixierte N-Menge von durchschnittlich $5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem Anteil fixierten Stickstoffs am Gesamt-N der Leguminosenmasse von 70 bis maximal 100 %. TSIALTAS et al. (2004) wendeten zur Bestimmung der symbiotisch fixierten N-Menge in mediterranem Grasland die ^{15}N -Verdünnungsmethode an. Sie berechneten bei einem 3 %igen Anteil von *Trifolium repens* eine symbiotisch fixierte N-Menge in Höhe von $3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Mit der gleichen Methode bestimmten JACOT et al. (2000b) den Beitrag der symbiotischen N_2 -Fixierung in alpinem Grasland. Sie wiesen fixierte N-Mengen von circa einem bis zu $26 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nach. Die fixierte N-Menge war dabei stark von dem Mengenanteil der Leguminosen im Bestand abhängig. In einer kürzlich von WATZKA et al. (2006) veröffentlichten Studie wurde für ungedüngtes Dauergrünland (altes experimentelles Grünland) in der submontanen Stufe der österreichischen Alpen eine symbiotisch fixierte N-Mengen in Höhe von durchschnittlich $15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ angegeben. Die fixierten N-Mengen wurden anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode geschätzt. Der Leguminosenanteil - bis zu 30 % am Erntegut der untersuchten Wiesen - wurde überwiegend durch Rot- und Weißklee gebildet.

2.4 Methoden zur Bestimmung der symbiotischen N_2 -Fixierung

Prinzipiell sind zwei Gruppen von Methoden zu unterscheiden: Einerseits Verfahren, die auf der Analyse der stabilen N-Isotope (^{14}N und ^{15}N) beruhen und andererseits Verfahren, die andere Parameter als die Isotopensignaturen zur Schätzung der N-Fixierung heranziehen. Letztere Gruppe umfasst einige im Hinblick auf den Analysenaufwand relativ einfache und kostengünstige Methoden, wie z. B. die Ertragsmethode. Bei dieser wird die N-Bindung über den Ertrag mit Hilfe von Faustzahlen (RIEDER 1983, ZEHR & KLÖBLE 2005) abgeleitet. Ferner sind zu nennen: Die Differenzmethode, der Acetylen-Reduktionstest und die Xylem-Saft-Methode.

Seit den frühen 1980er Jahren haben sich jedoch für die exakte Schätzung der symbiotischen Stickstoff-Fixierung in den meisten Forschungsfeldern die Isotopenmethoden durchgesetzt. Obwohl der Analysenaufwand teilweise recht hoch ist, bieten diese Verfahren doch eine Reihe von Vorteilen hinsichtlich der Messgenauigkeit. Beschreibungen der bisher in der Forschung verwendeten Methoden zur Bestimmung der symbiotischen N_2 -Fixierung – oft auch biologische N_2 -Fixierung (BNF) genannt - finden sich beispielsweise bei LEDGARD & PEOPLES (1988), SHEARER & KOHL (1989), MARRIOTT & HAYSTEAD (1993), SCHNOTZ (1995), IAEA (2001) sowie PEOPLES et al. (2002).

Insbesondere auch für Grünland-Studien werden immer häufiger die ^{15}N -Techniken für die Schätzung der N_2 -Fixierungsleistung bevorzugt (LEDGARD & STEELE 1992, HØGH-JENSEN & SCHJOERRING 1994). Ihre Grundlagen sowie ihre Vor- und Nachteile in der Anwendung werden im Folgenden erläutert.

2.4.1 ¹⁵N-Techniken

Atmosphärischer Stickstoff besteht zu 99,6337 % aus ¹⁴N und zu 0,3663 % aus ¹⁵N. Dieses Verhältnis ist global konstant und wird daher als Standard genutzt (MARIOTTI 1983). Das Isotopenverhältnis der im Boden vorhandenen N-Fractionen unterscheidet sich durch höhere oder niedrigere ¹⁵N-Gehalte von dem der Luft. Bei den verschiedenen ¹⁵N-Techniken wird der natürliche Unterschied („natural abundance“) dieser N-Quellen genutzt oder das N-Isotopenverhältnis im Boden bzw. in der Atmosphäre wird künstlich mit ¹⁵N angereichert (WAREMBOURG 1993).

2.4.1.1 $\delta^{15}\text{N}$ -Methode, ¹⁵N natürliche Abundanz-Methode, (¹⁵N natural abundance method)

Bei der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode wird das natürliche Vorkommen der stabilen Stickstoffisotope ¹⁵N und ¹⁴N genutzt, um die Herkunft des Stickstoffs in der Pflanze zu ermitteln (AMARGER et al. 1979, KOHL et al. 1980, MARIOTTI 1983). Das Verhältnis der Isotope ¹⁵N und ¹⁴N ist in den meisten landwirtschaftlich genutzten Böden abweichend vom konstanten N-Isotopenverhältnis der Luft (mit 0,3663 atom % ¹⁵N, MARIOTTI 1983). Diese Differenz wird ausgedrückt als $\delta^{15}\text{N}$ -Wert mit der Einheit Promill (‰).

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{Probe}} (\text{‰}) = \frac{(R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}})}{R_{\text{Standard}}} * 1000 \quad (1)$$

$R = ^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ -Verhältnis (HANDLEY & RAVEN 1992),
Standard = Luft-N₂

Die natürlichen Unterschiede zwischen dem N-Isotopenverhältnis der Luft und dem N-Isotopenverhältnis des Bodens kommen durch Isotopenfraktionierungen (Diskriminierung des schwereren ¹⁵N-Isotops) in den zahlreichen Reaktionsprozessen des Stickstoffkreislaufs zustande. Atmosphärischer Stickstoff hat per Definition einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von 0 ‰. Durch die Aufnahme von Luft-N₂ bei der symbiotischen Stickstoff-Fixierung wird der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert in der Leguminosen-Biomasse in Richtung des Wertes des atmosphärischen N bewegt (gegen 0 ‰). Durch die Methode kann die Herkunft des Stickstoffs aus unterschiedlichen N-Quellen (Luft-N₂ bzw. Boden-N) im Sprossmaterial der Leguminosen bestimmt werden (REDECKER et al. 1997). Negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte bedeuten eine Abreicherung, positive Werte eine Anreicherung von ¹⁵N gegenüber dem Luftstickstoff.

Für die Berechnung des aus der symbiotischen N₂-Fixierung stammenden N-Anteils (Ndfa = Nitrogen derived from the atmosphere) werden zusätzlich $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von Referenzpflanzen genutzt. Als Referenzpflanzen eignen sich Arten, die nicht zur symbiotischen N₂-Fixierung befähigt sind und eine ähnliche Wuchsform wie die untersuchten Leguminosen aufweisen. Ihr $\delta^{15}\text{N}$ -Wert spiegelt ein über die Zeit integriertes N-Isotopenverhältnis des von der Pflanze aufgenommenen bodenbürtigen Stickstoffs wider (BODDEY et al. 2000). Eine im Prozess der

N₂-Fixierung potenziell auftretende Isotopenfraktionierung durch die Diskriminierung des schwereren ¹⁵N Isotops wird durch den sogenannten „B-Wert“ berücksichtigt (vgl. Kap. 4.5).

$$\text{Ndfa (\%)} = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{\text{Referenzpflanze}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Leguminose}})}{(\delta^{15}\text{N}_{\text{Referenzpflanze}} - \text{B})} * 100 \quad (2)$$

B = ¹⁵N-Wert im Sprossmaterial von Leguminosen,
die auf N-freiem Medium gewachsen sind und
Luft-N₂ symbiotisch fixiert haben

Die Auswertung beruht auf der Annahme, dass die Nicht-Fixierer größere Mengen Boden-N aufnehmen und dadurch höhere ¹⁵N-Gehalte in ihren Geweben aufweisen als Leguminosen, die sich zusätzlich von Luftstickstoff (mit geringerem ¹⁵N-Gehalt) ernährt haben. Das Ausmaß der „Verdünnung“ des ¹⁵N-angereicherten Pflanzenmaterials durch atmosphärischen Stickstoff in den Leguminosen soll eine Einschätzung der Höhe der symbiotischen N₂-Fixierung ermöglichen. Diese Methode wird daher auch als natürliche ¹⁵N-Verdünnungsmethode bezeichnet (HØGH-JENSEN & SCHJOERRING 1994). Ausführlichere Beschreibungen der Methode mit weiteren Berechnungsformeln finden sich bei SHEARER & KOHL (1986, 1989, 1991 und 1993) sowie SPRENT & SPRENT (1990).

2.4.1.2 ¹⁵N-Anreicherungsverfahren (enriched ¹⁵N isotope dilution method)

Das Prinzip dieser Methode beruht ebenfalls auf einer Verdünnung („dilution“) des ¹⁵N-Gehaltes im Pflanzenmaterial der Leguminosen durch symbiotische N₂-Fixierung. Jedoch wird vor Versuchsbeginn eine künstliche Anreicherung des Bodens mit dem ¹⁵N-Isotop durch die Gabe von ¹⁵N-angereichertem Dünger vorgenommen (SPRENT & SPRENT 1990, WAREMBOURG 1993). Auch die Anwendung von ¹⁵N-abgereichertem Dünger ist möglich (LEGDARD & STEELE 1992). In beiden Fällen soll die Differenz zwischen dem ¹⁵N-Gehalt des atmosphärischen N₂ und dem ¹⁵N-Gehalt der N-Quellen des Bodens erhöht werden, um eine ¹⁵N-Verdünnung durch die symbiotische N₂-Fixierung beobachten zu können. Aus der N-Isotopenzusammensetzung im Pflanzenmaterial der Leguminose und der Referenzpflanze wird der Anteil fixierten Stickstoffs (Ndfa) berechnet.

$$\text{Ndfa (\%)} = \left[1 - \frac{\text{atom \% } ^{15}\text{N excess}_{\text{Leguminose}}}{\text{atom \% } ^{15}\text{N excess}_{\text{Referenzpflanze}}} \right] * 100 \quad (3)$$

$$\text{atom \% } ^{15}\text{N excess} = \text{atom \% } ^{15}\text{N}_{\text{Probe}} - \text{atom \% } ^{15}\text{N}_{\text{Standard}}$$

(LEGDARD & PEOPLES 1988)

2.4.1.3 Grundlage beider ^{15}N -Methoden

Eine Grundlage beider Methoden ist die Annahme, dass Fixierer und Nicht-Fixierer ihren Stickstoff aus denselben N-Pools im Boden mit gleichen ^{15}N -Gehalten aufnehmen (HØGH-JENSEN & SCHJOERRING 1994). Um diese Voraussetzung zu erreichen, sollten als Referenzpflanzen Arten verwendet werden, deren Wurzelsystem und zeitliches N-Aufnahmemuster mit dem der zu untersuchenden Leguminose vergleichbar ist. Die absolute Höhe der N-Aufnahme aus den Boden-N-Quellen bzw. Dünger-N ist nicht ausschlaggebend (MARRIOTT & HAYSTEAD 1993). Die zweite Annahme ist das Fehlen des Transfers fixierten Stickstoffs von der Leguminose zur Referenzpflanze während des Untersuchungszeitraumes (MARRIOTT & HAYSTEAD 1993). Besonders diese zweite Voraussetzung ist in mit Leguminosen durchmischten Beständen wie in den untersuchten Wiesen vermutlich nicht gegeben. Die Höhe des N-Transfers kann nur durch in unmittelbarer Nähe zu den Untersuchungsplots gelegene Leguminosen-freie Kontrollplots ermittelt werden. Hier wird allerdings vorausgesetzt, dass die Bodenbedingungen identisch sind. Die Menge an Transferstickstoff in den Referenzpflanzen kann stark variieren und je nach Bestandespartnern zwischen Null und 80 % des Gesamtstickstoffs der Referenzpflanze betragen (MARRIOTT & HAYSTEAD 1993). FARNHAM & GEORGE (1993) fanden z. B. einen Anteil (ursprünglich vom Kleepartner) fixierten Stickstoffs von 44 bis 71 % der N-Menge des Grasparkers (Rotklee-Knaulgras-Bestand mit einem Klee-Massenanteil über 70 %). Zu den möglichen Auswirkungen des N-Transfers auf die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte nicht-fixierender Kräuter und Gräser siehe Kapitel 6.3.5.

Die Verwendung von Referenzpflanzen hat Vorteile gegenüber der Messung von Boden- $\delta^{15}\text{N}$ -Werten, da der ^{15}N -Gehalt des pflanzlichen Stickstoffs ein räumlich und zeitlich integriertes Mittel des aufgenommenen Stickstoffs nach möglicherweise erfolgter Isotopendiskriminierung angibt (SHEARER & KOHL 1993). Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Gesamt-N im Boden ist zwar messbar, er entspricht jedoch nicht zwangsläufig dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des pflanzenverfügbaren Stickstoffs. Die verschiedenen N-Pools des Bodens können unterschiedliche ^{15}N -Gehalte aufweisen, die zudem zeitlich variieren. Durch diese Dynamik in der Umsetzung von N im Boden wird eine Aussage über die natürlichen ^{15}N -Gehalte in den verschiedenen N-Quellen im Boden erschwert (HÖGBERG 1997).

2.4.1.4 Vor- und Nachteile der Methoden

Übersichten über Vorteile und Grenzen der Anwendung der ^{15}N -Techniken bzw. weiterer Methoden zu Bestimmung der symbiotischen N_2 -Fixierung der Leguminosen finden sich beispielsweise bei LEDGARD & PEOPLES (1988), PEOPLES et al. (2002) sowie BEDARD-HAUGHN et al. (2003).

Nachteile der ^{15}N -Anreicherungs-methode sind die hohen Kosten der angereicherten Düngemittel (HØGH-JENSEN & SCHJOERRING 1994, BEDARD-HAUGHN et al. 2003) und eine relative Unsicherheit über die Änderung der ^{15}N -Verteilung mit zunehmender Bodentiefe (MARRIOTT & HAYSTEAD 1993). Die größte Schwierigkeit bei Verwendung

der ^{15}N -Anreicherungs-methode in natürlichen Ökosystemen besteht laut SHEARER & KOHL (1989) in der Beurteilung der Eignung der Referenzpflanzen. Zudem würden sich Probleme bei einer ^{15}N -Applikation auf etablierten Beständen mit mehrjährigen Pflanzen ergeben, wenn die ^{15}N -Zugabe den ^{15}N -Gehalt des Pflanzenmaterials bei Versuchsbeginn ungleichmäßig verändern würde. Dagegen verändert sich der ^{15}N -Gehalt im Pflanzenmaterial bei Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode bei Versuchsbeginn nicht (SHEARER & KOHL 1989) und der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des pflanzenverfügbaren Bodenstickstoffs bleibt während der Versuchsdauer relativ konstant (LEDGARD & PEOPLES 1988). Der entscheidende Vorteil der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode besteht also darin, dass eine Störung der natürlichen Abläufe des Ökosystems vermieden wird (HÖGBERG 1997). Die ^{15}N -Anreicherungs-methode lässt sich dagegen gut in pflanzenbaulichen Systemen anwenden, bei denen die ^{15}N -Applikation der Aussaat der Leguminose und der Referenzpflanze vorausgeht.

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode liefert exaktere Ergebnisse, je größer die Differenz zwischen den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten des fixierten Stickstoffs (B-Wert) und des verfügbaren Bodenstickstoffs ist. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass eine geringe Differenz zu größeren Fehlern bei der Berechnung des fixierten N-Anteils führt (LEDGARD & PEOPLES 1988, HÖGBERG, 1997). Zur Bestimmung des B-Wertes (Wert für die Isotopenfraktionierung im Prozess der N_2 -Fixierung) und der Problematik der Berechnung bei geringen Differenzen siehe die Kapitel 5.4.4, 5.4.5 und 6.3.

Kritik an der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode wird in SHEARER & KOHL (1993) diskutiert. Die Autoren halten die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode für geeignet, um die N_2 -Fixierung zu quantifizieren und betonen, dass die konventionellen Methoden (z. B. Differenzmethode, ^{15}N -Anreicherungs-methode) keine präziseren Resultate liefern. Ein Vergleich von Ergebnissen beider ^{15}N -Methoden zeigte in vielen Fällen eine gute Übereinstimmung (LEDGARD & STEELE 1992). HØGH-JENSEN & SCHJOERRING (1994) bewerten beide ^{15}N -Methoden als geeignet für die Schätzung der symbiotischen N_2 -Fixierung in Grasland-Systemen. BEDARD-HAUGHN et al. (2003) favorisieren die ^{15}N -Anreicherungs-methode für quantitative Untersuchungen, die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode für semi-quantitative Studien zum Beispiel zur Aufdeckung von $\delta^{15}\text{N}$ -Mustern.

2.4.1.5 $^{15}\text{N}_2$ -Reduktionsmethode ($^{15}\text{N}_2$ reduction method)

Während die oben beschriebenen Methoden indirekte Methoden zur Bestimmung der Fixierungsleistung darstellen, ist die $^{15}\text{N}_2$ -Reduktionsmethode die einzige bisher bekannte direkte Methode zur Messung der N_2 -Fixierungsleistung. Sie ist jedoch aufgrund des apparativen Aufwandes (geschlossene Systeme mit gasdichten Vorrichtungen) auf Gefäßversuche beschränkt und eignet sich nicht für umfangreiche Untersuchungen im Freiland (SCHNOTZ 1995, MARRIOTT & HAYSTEAD 1993). Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode findet sich bei WAREMBOURG (1993).

2.5 Abiotische und biotische Einflüsse auf die Leguminosenverbreitung im Grünland und auf die Höhe der symbiotischen N₂-Fixierung

Für die Ausbreitung der Leguminosen spielen ökologische Hemmnisse wie Boden-Azidität und Aridität, geringe Verfügbarkeit von P und Mo sowie fehlende geeignete Bakterienstämme eine wichtige Rolle (CREWS 1999). HARTWIG (1998) präsentiert eine Hypothese, nach der die Höhe des Leguminosenanteils an der Biomasse eines Pflanzenbestandes entscheidend durch die Höhe des verfügbaren mineralischen N im Boden beeinflusst wird. Nach diesem Modell würden die Leguminosen durch einen hohen N-Input aus symbiotischer N₂-Fixierung den Boden mit mineralischem N anreichern und somit den Nicht-Fixierern günstigere Wachstumsbedingungen beschern. In der Folge werden die Nicht-Fixierer konkurrenzkräftiger und der Anteil der Leguminosen im Bestand nimmt ab, bis der Vorrat an mineralischem N soweit abgesunken ist, dass ein großer Bedarf an symbiotischer N₂-Fixierung für das gesamte Ökosystem besteht. Schließlich nimmt der Leguminosenanteil erneut zu. Die N-Mengen im Boden, das Vorkommen und die Produktivität der Leguminosen sowie die Konkurrenz durch benachbarte Gräser nennen auch LEDGARD & STEELE (1992) als primäre Einflussfaktoren auf die N₂-Fixierung der Leguminosen. Diese primären Faktoren werden ihrerseits durch die Bodenbedingungen, Umwelt- und biotische Faktoren beeinflusst.

Einen Literaturüberblick zu den indirekten Wirkungen (über das Wachstum der Wirtspflanze) und den direkten Einflüssen auf das N₂-fixierende System gibt HARTWIG (1998). Dort werden folgende abiotische und biotische Faktoren genannt: extreme Temperaturen, Wassergehalt des Bodens, Salinität, Azidität, Alkalinität, Sauerstoffmangel im Boden, Verfügbarkeit von Kalium, Phosphor und mineralischem Stickstoff für die Pflanzen, Entlaubung der Pflanzen und erhöhter CO₂-Partialdruck der Luft. Auch die Verfügbarkeit der Nährstoffe Eisen und Molybdän beeinflusst die Leguminosen-Rhizobien-Symbiose (VITOUSEK et al. 2002). Ungünstige Umweltbedingungen und ein Mangel an Nährstoffen können das Pflanzenwachstum limitieren und gleichzeitig den Bedarf an symbiotisch fixiertem Stickstoff mindern (HARTWIG 1998).

Abgesehen von den klimatischen und edaphischen Bedingungen spielen auch genetische Voraussetzungen eine Rolle. So wurde mehrfach von einer art- und sortenspezifischen Fixierungsleistung der Leguminosen berichtet (z. B. LOGES 1998). Auch das Pflanzenalter kann eine Rolle spielen. Bei einer Etablierung von Leguminosen muss zudem der passende Bakterienstamm im Boden vorhanden sein, damit eine N₂-fixierende Symbiose ausgebildet werden kann (SPRENT & SPRENT 1990). Da Rhizobien unter bestimmten Bedingungen auch eine Zeit lang ohne ihren Wirt als frei lebende Bakterien im Boden existieren können, ist eine Infektion bei Wiederansiedlung von Leguminosen meist kein Problem. Wird im landwirtschaftlichen Anbau allerdings erstmals eine Kultur mit Leguminosen (bzw. eine neue Leguminosen-Art) auf einem Boden angesät, müssen die entsprechenden Rhizobienstämme ebenfalls ausgebracht werden. Das ist durch direkte Inokulation des Saatgutes wie auch durch Begießen des Ackers mit Bakteriensuspension möglich. Dies ist ebenfalls bei einer

Neueinsaat von Grünland bzw. Klee-Gras-Beständen zu bedenken, wenn auf der Fläche seit vielen Jahren keine Leguminosen vorhanden waren.

Geringe pH-Werte der Bodenlösung hemmen die Bildung von Wurzelknöllchen (SPRENT & SPRENT 1990). Nach SPRENT (1999) sind die meisten der bisher untersuchten Leguminosen zwar säuretolerant, sie können jedoch in ihrer Jugendentwicklung durch hohe Protonenkonzentrationen gestört werden. Grundsätzlich kann in sauren Böden die Verfügbarkeit von P, Ca, Mg und Mo herabgesetzt sein, während z. B. Aluminium oder Mangan in toxischen Konzentrationen auftreten können (SPRENT & SPRENT 1990, HARTWIG 1998, SPRENT 1999). Wie unterschiedliche Leguminosenarten mit toxischen Al-Konzentrationen im Boden umgehen, ist noch wenig untersucht. Beispielsweise kann Aluminium aber in Blättern in unschädlicher Form verwahrt werden (SPRENT 1999).

Mikronährstoffe wie Fe, Mo und Ni sind Bestandteile wichtiger Enzyme (Nitrogenase, Urease, Hydrogenase) des N₂-fixierenden Systems der *Rhizobium* und *Bradyrhizobium*-Arten. Fe wird zudem für die Bildung von Leghämoglobin benötigt (SPRENT & SPRENT 1990). In sauren Böden kann Molybdän-Mangel auftreten. Ob Leguminosen sich an Mo-Mangelbedingungen angepasst haben oder Strategien entwickelt haben, um Mo aufzunehmen (möglicherweise auch über arbuskuläre Mykorrhiza), ist nicht bekannt (SPRENT 1999).

Eine ausreichende Verfügbarkeit von Makronährstoffen wie P, K, Ca, S und Mg ist überwiegend für eine hohe Photosyntheseleistung und ein optimales Wachstum der Wirtspflanze notwendig (MARSCHNER 1995, RÖMER & LEHNE 2004). Dies stellt eine grundlegende Voraussetzung für eine funktionierende N₂-fixierende Symbiose dar (MARTIN 1990). Phosphor und Calcium wirken zudem direkt auf die Knöllchenentwicklung und ein höherer Kaliumgehalt kann die Knöllchenaktivität stimulieren (SPRENT & SPRENT 1990, LEIDI & RODRIGUEZ-NAVARRO 2000).

Die Bodentemperatur wirkt direkt auf die Nodulation und die Aktivität der Wurzelknöllchen (SPRENT & SPRENT 1990). Ein Wachstum der Knöllchenbakterien wurde bereits ab etwa 5°C beobachtet, wobei das Optimum für die *Trifolium/Rhizobium*-Symbiose bei etwa 30°C angegeben wird (SADOWSKY 2005).

Ein geringer Wassergehalt im Boden kann sowohl durch eine Störung des Pflanzenwachstums als auch direkt durch Verminderung der Knöllchenaktivität die Fixierungsrate herabsetzen (SPRENT & SPRENT 1990). Bodenvernässung kann jedoch durch nachfolgenden Sauerstoffmangel ebenfalls ein Problem sein (SPRENT 1999, HARTWIG 1998). Allerdings haben einige Arten spezifische Anpassungen an das Leben auf nassen Böden entwickelt. So bildet *Lotus uliginosus*, der in nassen Wiesen anzutreffen ist, Knöllchen mit ausgeprägtem Aerenchym (SPRENT 1999). Zudem kann die Infektion durch Knöllchenbakterien bei fehlender Wurzelhaarbildung unter Staunässebedingungen auch an geschwollenen epidermalen Zellen stattfinden (JAMES & SPRENT 1999).

Die Hinweise über die Wirkung einer arbuskulären Mykorrhiza (AM) auf die N₂-Fixierung der Leguminosen sind widersprüchlich. Schon ASAI (1944) stellte fest, dass beide Symbiosen – arbuskuläre Mykorrhiza und Rhizobien-Symbiose – für die Leguminosen wichtig sind. Nach WERNER (1992) wird durch AM nicht nur die P-Versorgung der Pflanze verbessert, sondern auch weitere Nährstoffe wie Kupfer und Zink und auch Stickstoffverbindungen können zur Pflanze transportiert werden. In Untersuchungen von TRANNIN et al. (2000) wurde die N₂-Fixierung nicht durch fehlende AM behindert. Bei IBIJBIJEN et al. (1996) haben Leguminosen mit AM-Symbiose dagegen signifikant mehr N₂ fixiert als Leguminosen ohne AM-Symbiose. Auch BAREA et al. (1989) haben im Kulturversuch eine Verbesserung der Nodulation an Wurzeln und eine Steigerung des aus der N₂-Fixierung stammenden N-Anteils in Sprossen von Luzerne-Pflanzen (*Medicago sativa*) durch die AM-Symbiose festgestellt. Weitere synergetische und antagonistische Wirkungen der arbuskulären Mykorrhiza mit stickstofffixierenden Bakterien stellt FINLAY (2005) dar. Bei niedriger P-Verfügbarkeit im Boden kann AM die P-Versorgung verbessern (REDECKER et al. 1997, FINLAY 2005) und damit den hohen P-Bedarf der N₂-Fixierung decken (MORTON & YARGER 1990). Dadurch wird indirekt die N-Aufnahme (N₂-Fixierung) gefördert. Leguminosen sind wegen ihres hohen P-Bedarfs meist stark mykorrhiziert (REINHARD 1995). Auch ein indirekter Effekt auf die Leguminosen ist denkbar, da durch AM der N-Bedarf steigt und daraufhin mehr N₂ fixiert werden muss, besonders wenn Konkurrenz durch nichtfixierende Pflanzen besteht (TRANNIN et al. 2000). BOROWICZ & FITTER (1990) betonen, dass eine arbuskuläre Mykorrhiza auch schädigende Wirkung auf ihre Wirtspflanze haben kann, wenn diese zum Beispiel durch Herbivorie (z. B. Beweidung) geschädigt wurden und den heterotrophen Pilzpartner nicht mehr mit genügend organischen Kohlenstoffverbindungen versorgen können bzw. die AM zu viele C-Verbindungen verbraucht und die Pflanze zusätzlich in ihrem Wachstum gestört wird. Diese Ergebnisse wurden an der Art *Lotus corniculatus* im Kulturversuch erzielt. Ob die N₂-Fixierung in diesem Fall gestört wurde, haben die Autoren nicht erörtert.

Neben den Boden- und Klimaverhältnissen übt im Grünland die Art und Intensität der Bewirtschaftung eines Bestandes den stärksten Effekt auf die symbiotische N-Bindung aus (LOGES 1998). Besonders ist hier die N-Düngung zu nennen, die in höheren Mengen die Artenzusammensetzung einer Wiese zu Ungunsten der vorkommenden Leguminosen verändert und auf die symbiotische N₂-Fixierung einwirkt. Alle Prozesse, die die Verfügbarkeit von mineralischem N im Boden senken, stimulieren die symbiotische N₂-Fixierung. Dies schließt Denitrifikation, Auswaschung, gasförmige N-Verluste und N-Immobilisierung durch Nicht-Leguminosen und Boden-Mikroorganismen ein (HARTWIG 1998). Auch die Konkurrenz um den Bodenstickstoff in einer Wiese durch einen großen Anteil an Nicht-Fixierern kann die Fixierungsleistung der Leguminosen erhöhen (LOGES 1998). Die Höhe der symbiotischen N₂-Fixierung verringert sich dagegen, wenn den Pflanzen ausreichend mineralischer N zur Verfügung steht (SPRENT 2005). Der N-Vorrat des Bodens wird auf Grünlandflächen zur Ertragssteigerung häufig durch mineralische N-Düngemittel oder organische N-Dünger (z. B. Gülle) erhöht. Die Effekte einer Aufnahme von organischen

N-Verbindungen wie Aminosäuren auf die N_2 -Fixierung und die N-Isotopensignaturen der Leguminosen sind bisher noch weitgehend unbekannt (SPRENT 1999, GEHRING 2003). Hier herrscht noch Forschungsbedarf.

Stickstoffverbindungen werden auch über trockene und nasse Deposition aus der Atmosphäre in Ökosysteme eingetragen. Als trockene Deposition wird der Eintrag von luftgetragenen Stoffen als Gas oder als Aerosol bezeichnet. Als wichtigste N-Verbindungen sind hier NO_2 und NH_3 zu nennen. Unter nasser Deposition wird der Eintrag über Niederschläge wie Regen, Nebel und Schnee verstanden. Hieran haben die N-Verbindungen NO_3^- und NH_4^+ den größten Anteil. Die vornehmliche Wirkung der N-Deposition besteht in einer Eutrophierung der Ökosysteme (VAN DER EERDEN et al. 2001). Zusätzlich findet auch eine Versauerung statt. Folgende Zitate von VAN DER EERDEN et al. (2001) unterstreichen die Bedeutung der anthropogen verursachten N-Einträge: „Gegenwärtig sind die Ökosysteme Westeuropas hohen Einträgen an Stickstoff ausgesetzt.“ und „Die Biodiversität in Wäldern, Heiden und artenreichen Grasgesellschaften ist bereits jetzt durch Stickstoffeinträge deutlich beeinträchtigt worden.“

Die atmosphärische N-Depositionsrate in Mitteleuropa beträgt laut THOMPSON & MASKELL (2005) durchschnittlich $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Es treten jedoch regionale Unterschiede auf, die durch starke N-Emissionen z. B. aus der Intensivtierhaltung oder von Industrie und Verkehr verursacht werden. Nach VAN DER EERDEN et al. (2001) beträgt die Summe der trockenen und nassen Deposition von Stickstoffverbindungen auf niedrigwüchsige oligotrophe Systeme in der Bundesrepublik Deutschland zwischen 10 und $25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. In Wäldern wurden höhere Summen gemessen als im Freiland. Im Hunsrück werden N-Depositionsmessungen seit vielen Jahren von der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz durchgeführt. Die Messungen in den Jahren 2000 bis 2003 im Hunsrück (Morbach) ergaben im Freiland relativ geringe Depositionsmengen von weniger als $5 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und weniger als $5 \text{ kg NH}_4\text{-N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALDÖKOLOGIE UND FORSTWIRTSCHAFT RHEINLAND-PFALZ 2005). QUIRIN (2004) stellte in der landwirtschaftlich mäßig intensiv genutzten Region des westlichen Hunsrück eine nasse N-Deposition in Höhe von $10,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (im Jahr 2001) bzw. von $7,5 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (im Jahr 2002) fest. Die Depositionsmenge setzte sich zu gleichen Teilen aus Ammonium-N und Nitrat-N zusammen. Ähnlich hohe N-Mengen aus trockener Deposition sind möglich. Eine N-Gesamtdeposition im Hunsrück in einer Größenordnung zwischen 10 und $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ist wahrscheinlich.

In ungedüngten oder wenig gedüngten Grünlandsystemen fördert eine hohe N-Deposition vor allem das Wachstum und die Ausbreitung der hochwüchsigen Gräser und die Bestände werden artenärmer. Als „critical load“ wird für neutral-saure artenreiche Rasen eine Depositionsrate von jährlich $20\text{--}30 \text{ kg N ha}^{-1}$ angegeben (VAN DER EERDEN et al. 2001). SPRENT (2005) hält einen direkten Effekt einer Depositionsrate von 15 kg N ha^{-1} auf die symbiotische N_2 -Fixierung der Leguminosen im Grünland für unwahrscheinlich. Jedoch kann ein indirekter Effekt über eine Veränderung der Artenkombination eines Bestandes entstehen

und höhere Depositionsraten könnten auch einen direkten Effekt auf die Nodulation und die N₂-Fixierung ausüben (SPRENT 2005).

Neben den in Symbiosen lebenden Knöllchenbakterien sind verschiedene frei lebende Bakterien (hauptsächlich *Azotobacter* spp.) zur Bindung elementaren Luftstickstoffs befähigt. Auch sie können zur N-Anreicherung eines Bodens beitragen. Besonders bei hohen Anteilen organischen Materials im Boden z. B. durch Ernterückstände kann die Population freilebender N₂-fixierender Bakterien wachsen und zu einer N-Anreicherung im Boden führen (SPRENT & SPRENT 1990). Jedoch ist die Höhe dieser Form von biologischer N-Bindung im Verhältnis zur symbiotischen N-Fixierung meist vernachlässigbar gering (SCHNOTZ 1995). CLEVELAND et al. (1999) beziffern die Höhe der nicht-symbiotischen N-Bindung in natürlichem Grasland weltweit mit durchschnittlich 2,2 kg N ha⁻¹ a⁻¹.

Im Hinblick auf den Klimawandel wurde im vergangenen Jahrzehnt der Einfluss erhöhter CO₂-Gehalte der Atmosphäre auf Ökosysteme untersucht. Unter anderem wurden Experimente zur Auswirkung CO₂-angereicherter Luft auf Leguminosen bzw. auf deren N₂-fixierendes System durchgeführt. VAN GROENINGEN et al. (2003, FACE Experiment ETH Zürich) stellten im Pflanzenmaterial von Weißklee, der unter erhöhten CO₂-Konzentrationen der Luft gewachsen war, höhere fixierte N-Mengen fest als in *Trifolium repens* unter normalen CO₂-Bedingungen. Untersuchungen von WINKLER & HERBST (2004) in einer N-armen Grünlandgesellschaft (Fröttmaninger Heide) zeigten größere Wachstumsraten bei Leguminosen im Gegensatz zu Nicht-Fixierern bei erhöhten CO₂-Konzentrationen der Luft, was letztendlich in höheren TM-Anteilen der Leguminosen und größeren symbiotisch gebundenen N-Mengen resultierte. Jedoch sind die bisherigen Ergebnisse zum Einfluss einer erhöhten CO₂-Versorgung inkonsistent. In Untersuchungen von WEST et al. (2005) wurden je nach N-Ernährungszustand und Leguminosenart positive wie negative Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die N₂-Fixierung beobachtet. WEST et al. (2005) zitieren sowohl Autoren, die von einer Stimulation des Leguminosenwachstums unter erhöhten CO₂-Konzentrationen bzw. von einer Stimulation der symbiotischen N₂-Fixierung berichten, als auch Arbeitsgruppen, die keine CO₂-induzierte Steigerung der Fixierungsrate der Leguminosen fanden. Bei EDWARDS et al. (2006) wirkte sich eine erhöhte CO₂-Konzentration lediglich bei gleichzeitig hohen Boden-P-Vorräten (134 kg P ha⁻¹) positiv auf die N₂-Fixierungsleistung von *Trifolium repens* aus.

Die genannten Faktoren, besonders die edaphischen Größen, beeinflussen sich vielfach gegenseitig, so dass ein multikausaler Einfluss auf die N₂-Fixierung der Leguminosen besteht.

3 Untersuchungsgebiet und Untersuchungsflächen

3.1 Naturräumliche Lage

Das Untersuchungsgebiet umfasst südwestliche Teile des Hunsrücks in Rheinland-Pfalz, Bundesrepublik Deutschland. Der Hunsrück ist Teil des Rheinischen Schiefergebirges. Den südwestlichen Außensaum des Gebirges bildet der Saar-Ruwer-Hunsrück. Er erstreckt sich zwischen dem Trierer Moseltal und dem unteren Saartal bis zum Osburger Hochwald und dem südwestlichen Ende des Schwarzwälder Hochwaldes. In östlicher Richtung schließen sich die Hunsrück-Hochfläche und der Hoch- und Idarwald (mit den Bergrücken des Osburger Hochwaldes, des Schwarzwälder Hochwaldes und des Idarwaldes) an. Das Landschaftsbild wird durch eine landwirtschaftlich genutzte Hochfläche (400 bis 500 m ü. NN) mit Äckern und Grünland sowie durch geschlossene Waldgebiete auf den Bergrücken (maximale Erhebung Erbeskopf 818 m ü. NN) geprägt. Zum Mosel- und Saartal fällt das Gebirge in Terrassenstufen ab. Flächenstufen beginnend bei 300 m ü. NN werden dem Gebirge zugerechnet (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1962).

3.2 Geologie und Böden

Die Gesteine des Hunsrückgebirges bestehen überwiegend aus unterdevonischen harten Quarziten und weichen Tonschiefern. Seltener kommen Grauwacken und Sandsteine vor. An den unteren Hängen der Quarzitrücken findet sich mit größeren Blöcken durchsetzter, sandig-lehmiger Verwitterungsschutt. Der Schiefer bildet auf den Hochflächen weiche Geländeformen und ist mit einer lehmigen, Quarzbruchstücke enthaltenden Verwitterungsdecke überzogen. In den oberen Lehmschichten der Verwitterungsdecke ist Schiefergrus eingemischt (MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1962).

Auf den Quarziten und Grauwacken der Höhenrücken haben sich flachgründige, nährstoffarme Böden gebildet (Ranker und Braunerden, unter Nadelbaumkulturen auch Podsole). Über Schiefer sind Ranker und saure Braunerden entstanden. Der hohe Skelettanteil und die Flachgründigkeit dieser Böden bedingen eine mäßige Wasserkapazität. An Mittel- und Unterhängen sowie in Mulden konnten sich auf Hangschutt tiefgründigere Ranker und Braunerden entwickeln. In den Hochmulden des Hunsrücks (Keller-, Hermeskeiler-Mulde) sind als Relikt Graulehmböden (Grau-Plastosol) erhalten. Es sind schluffig-lehmige bis schluffig-tonige, dichte und undurchlässige Böden mit geringer Austauschkapazität. Sie reagieren sauer und sind nährstoffarm (SCHRÖDER 1983).

3.3 Klima

Mit dem Höhenanstieg vom Moseltal über die Terrassenstufen des Ruwer-Hunsrück bis zum Hoch- und Idarwald geht ein klimatischer Gradient einher. Die mittlere Jahrestemperatur (langjähriges Mittel) ist im Moseltal mit 8,5 bis 9 °C gegenüber dem Hochwald (6 bis 7 °C)

erhöht. Die Jahresniederschläge steigen mit der Meereshöhe von 650–700 mm (Trierer Talweitung) auf 900–1000 mm auf den Hochflächen und bis zu 1100 mm an den Bergrücken des Hoch- und Idarwaldes (DEUTSCHER WETTERDIENST 1957, MEYNEN & SCHMITHÜSEN 1962).

3.4 Auswahl und Lage der Untersuchungsflächen

Als Untersuchungsobjekte wurden artenreiche Dauergrünlandflächen frischer Standorte im beschriebenen Gebiet ausgewählt. Bei den 16 untersuchten Flächen (Tab. 1, Abb. 1) handelt es sich um Mähwiesen in Höhenlagen zwischen 350 bis 625 m ü. NN. Bei der Auswahl der Flächen wurde auf eine hohe Artenzahl und – im Hinblick auf die Untersuchung ihrer Rolle im Stickstoffhaushalt der Wiesen – auf das Vorkommen mehrerer Leguminosenarten je Fläche geachtet. Außerdem sollten die Flächen gut erreichbar sein und nicht in einem Naturschutzgebiet liegen. Es wurden ausschließlich Wiesen untersucht, die mindestens einmal und maximal zweimal im Jahr gemäht wurden. Die Flächen wurden nicht oder nur sporadisch gedüngt.

Tab. 1: Lage der 16 Untersuchungsflächen mit Flächenbezeichnungen.

Fläche	Kürzel	Gauß-Krüger Koordinaten (m)		Meereshöhe (m ü. NN)	Naturräumliche Lage
		Rechtswert	Hochwert		
Hockweiler	HOCK	2549869	5508598	350	Trierer Talweitung
Gutweiler	GUTW	2552208	5509199	350	Saar-Ruwer-Hunsrück
Gusterath 1	GUS1	2550959	5508303	370	
Gusterath 2	GUS2	2550817	5508089		
Gusterath 3	GUS3	2550822	5508066		
Pellingen 1	PEL1	2548670	5502992	450	
Pellingen 2	PEL2	2548762	5503114		
Pellingen 3	PEL3	2548100	5503447	410	
Pellingen 4	PEL4	2548734	5503184	450	
Pellingen 5	PEL5	2549082	5503213	420	
Oberemmel Berg	OBER	2547883	5501449	505	
Waldweiler	WALD	2558531	5497462	510	Keller Mulde
Züsch 1	ZÜS1	2572986	5502539	560	Schwarzwälder Hochwald
Züsch 2	ZÜS2	2573074	5502459		
Muhl 1	MUH1	2575361	5504670	625	
Muhl 2	MUH2	2575374	5504670		

Die Flächen Gutweiler, Gusterath 1 bis 3, Pellingen 1 bis 5 und Oberemmel Berg liegen im Saar-Ruwer-Hunsrück. Die Fläche Hockweiler liegt aus naturräumlicher Sicht in der Trierer Talweitung am Rand des mittleren Moseltals in unmittelbarer Nähe zu dem Naturraum Ruwer-Hunsrück. Das Ausgangsgestein ist auch hier der Hunsrück-Schiefer. Die Standortbedingungen unterscheiden sich daher nicht wesentlich von denen der nahegelegenen Flächen

Gusterath 1 bis 3. Die Fläche Waldweiler liegt zwischen dem Osburger Hochwald und Schwarzwälder Hochwald in der Keller Mulde, einem Teil der Hunsrück-Hochfläche. Die Flächen Züsch 1 und 2 sowie Muhl 1 und 2 liegen an der südöstlichen Flanke des Schwarzwälder Hochwaldes.

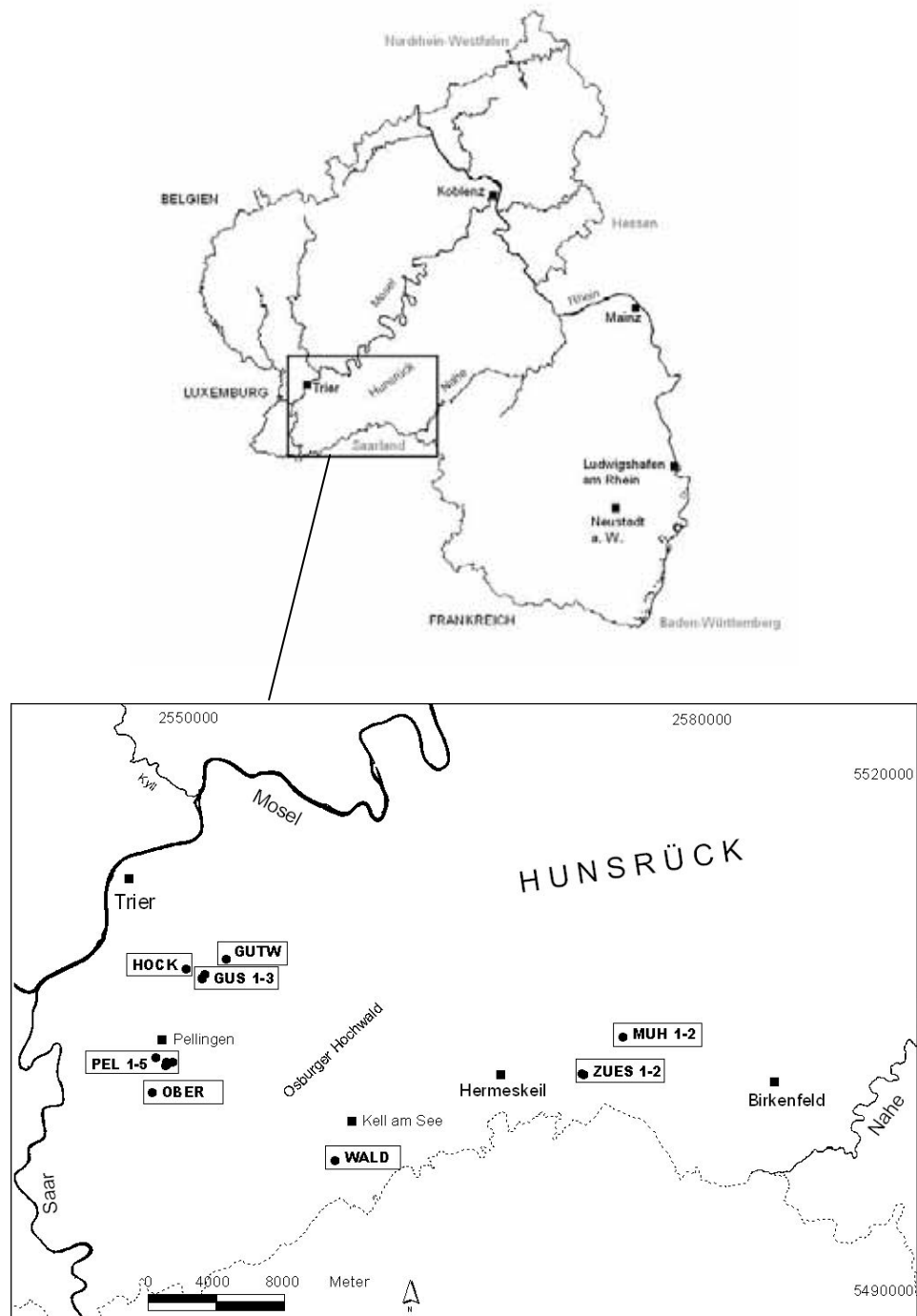


Abb. 1: Untersuchungsgebiet im südwestlichen Hunsrück in Rheinland-Pfalz mit der Lage der Untersuchungsflächen (durch Punkte und Rahmen gekennzeichnet, Erläuterung der Abkürzungen in Tab. 1). Digitale Kartengrundlage: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (LUWG), Oppenheim.

3.5 Pflanzensoziologisch - ökologische Betrachtung der Wiesen

Die pflanzensoziologische Einordnung der Wiesen folgt der Klassifizierung nach ELLENBERG (1996). Die ökologische Beurteilung wurde anhand der Zeigerwerte von ELLENBERG et al. (1992) vorgenommen. Eine Vegetationstabelle mit den Ergebnissen der Vegetationsaufnahmen der 16 Untersuchungsflächen findet sich im Anhang.

Aufgrund der Artenzusammensetzung lassen sich die untersuchten Wiesen in die pflanzensoziologische Klasse der *Molinio-Arrhenatheretea* (Mähwiesen- und Weidegesellschaften) einordnen. Typische Arten dieser Klasse wie *Trifolium pratense*, *Rumex acetosa*, *Vicia cracca*, *Holcus lanatus* und *Plantago lanceolata* treten mit hoher Stetigkeit auf. Als Charakterarten des Verbandes *Arrhenatherion elatioris* (Tieflagenfrischwiesen, Glatthaferwiesen) kommen *Arrhenatherum elatius* (auf allen Untersuchungsflächen) und *Trifolium dubium* (auf sechs Flächen) vor. Des Weiteren treten *Leucanthemum vulgare*, *Avenochloa pubescens* und *Lotus corniculatus* in der Mehrzahl der Aufnahmen auf. Diese Arten besitzen innerhalb des Grünlandes Zeigercharakter hinsichtlich einer weniger intensiven Nutzung und geringeren Nährstoffversorgung der Wiesen (RUTHSATZ et al. 2004). Weitere Arten mit einem Zeigercharakter für die magere Ausprägung der Glatthaferwiesen kommen hinzu. *Sanguisorba minor* und *Leontodon hispidus* kommen teilweise mit hoher Artmächtigkeit vor. *Pimpinella saxifraga*, *Saxifraga granulata*, *Hypochoeris radicata* und *Hieracium pilosella* treten mit geringerer Deckung in einigen Wiesen auf. Besonders auf der Fläche Gusterath 2 ist eine große Zahl an Magerkeitszeigern vorhanden. Auf den Flächen Gusterath 3 und Oberemmeler Berg wächst zusätzlich zu den häufigeren Magerkeitszeigern noch die Art *Briza media*. Darüber hinaus finden sich *Koeleria macrantha* und *Campanula glomerata*, die auch als Schwachbasenzeiger gelten.

Auf den Flächen Züsch 2, Muhl 1 und Waldweiler kommen mit *Nardus stricta*, *Potentilla erecta* und *Galium harycinum* Arten der Klasse *Nardo-Callunetea* und weitere Säurezeiger wie *Veronica officinalis* und *Avenella flexuosa* vor. Zudem fehlen hier einige *Arrhenatherion*-Arten wie *Knautia arvensis*, *Lotus corniculatus* und *Trifolium dubium*. Die Wiesen lassen somit einen Übergang zu den Borstgrasrasen erkennen. Die mittlere ungewichtete Reaktionszahl dieser drei Flächen ($R = 4,1$ bis $4,5$) fiel aufgrund dieser Säurezeiger niedriger aus als bei den übrigen Flächen ($R = 4,9$ bis $6,1$).

Für die Aufnahmen wurden die ungewichteten mittleren Stickstoff-, Feuchte- und Reaktionszahlen berechnet. Die mittlere Stickstoffzahl ist mit $N = 3,5$ auf der Flächen Züsch 2 am geringsten und auf der Fläche Muhl 2 mit $N = 5,0$ am höchsten. Die aus der Vegetation abgeleitete N-Zahl weist damit auf stickstoffarme bis mäßig stickstoffreiche Standorte hin. Als echte Stickstoffzeiger ($N = 8$) sind lediglich die Arten *Heracleum sphondylium* und *Taraxacum officinale* in wenigen Aufnahmen und mit geringer Deckung vertreten. Dagegen weisen die Aufnahmen eine Reihe von Magerkeitszeigern ($N = 2$ bis 3) auf (s. o.). Die mittleren Feuchtezahlen liegen zwischen $F = 4,1$ (Fläche Gusterath 2) und $F = 5,4$ (Flächen Waldweiler und Muhl 2) und deuten somit auf mehr oder weniger frische Standorte hin. Die trockeneren Wiesen enthalten einige Arten mit niedrigen Feuchtezahlen

zwischen 3 und 4 wie *Euphorbia cyparissias*, *Koeleria macrantha*, *Campanula rapunculus* oder *Thymus pulegioides*. Die Wiesen mit einer höheren mittleren Feuchtezahl enthalten dagegen eher Mäßigfeuchte- und Feuchtezeiger mit Feuchtezahlen zwischen 6 und 7 wie *Lotus uliginosus*, *Ranunculus repens*, *Ajuga reptans*, *Succisa pratensis* oder *Poa trivialis*. Zu erwähnen sei, dass auf einigen Flächen kleinräumig nasse Mulden vorkommen, die jedoch bei der Beprobung ausgespart blieben und bei der pflanzensoziologischen Beurteilung der Wiesen außer Acht gelassen wurden. Die Spanne der mittleren Reaktionszahlen reicht von $R = 4,1$ für die Fläche Muhl 1 bis zu $R = 6,1$ auf der Fläche Gusterath 2. Mit *Nardus stricta*, *Avenella flexuosa*, *Hieracium laevigatum* und *Veronica officinalis* enthält die Vegetation der Fläche Muhl 1 Säurezeiger, die der Wiese Gusterath 2 gänzlich fehlen.

Da ein Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Leguminosenarten lag, soll im Folgenden kurz die Zuordnung der Leguminosen zu den pflanzensoziologischen Einheiten zusammengefasst werden. Die Arten *Vicia cracca*, *Trifolium pratense*, *T. repens*, *T. dubium* und *Lotus uliginosus* sind typischerweise in Gesellschaften der Klasse *Molinio-Arrhenatheretea* zu finden. Die Art *Trifolium campestre*, die in dieser Untersuchung nur in der Aufnahme der Fläche Gusterath 2 zu finden war, gilt als Kennart der Klasse *Sedo-Scleranthetea* (Lockere Sand- und Felsrasen). *Lotus corniculatus* ist in mehreren Gesellschaften der anthropo-zoogenen Heiden und Rasen verbreitet. DIERSCHKE & BRIEMLE (2002) nennen *Lathyrus linifolius* als häufige Art in Gebirgs-Frischwiesen (*Polygono-Trisetion*) und als Trennart für die bodensauren Berg-Magerwiesen in Abgrenzung zu Berg-Magerwiesen basenreicherer Böden. Das soziologische Verhalten der Art *Vicia sepium* wird von ELLENBERG et al. (1992) als indifferent bezeichnet, da die Art sowohl in Waldgesellschaften als auch im Grünland zu finden ist. DIERSCHKE & BRIEMLE (2002) erwähnen die Zugehörigkeit der Art *Vicia sepium* zu den *Arrhenatheretalia*-Gesellschaften, wo sie aufgrund ihrer Trittempfindlichkeit eher in Wiesengesellschaften - weniger auf Weiden - vorkommt.

4 Material und Methoden

4.1 Pflanzenprobenahme

In den Versuchsjahren 2001 bis 2003 wurde auf den Wiesen oberirdisches Pflanzenmaterial gesammelt. Die Trennung der Wurzeln unterschiedlicher Arten erwies sich aufgrund der starken Verfilzung der Wurzeln als äußerst schwierig und zeitaufwendig. Eine Wurzelprobenahme wurde daher nicht in größerem Maßstab durchgeführt. Lediglich im Jahr 2003 wurden von ausgewählten Arten auf sieben Flächen Wurzelproben genommen.

4.1.1 Flächenbezogene quantitative Ernte

Um die Gesamterträge der Wiesen sowie die Stickstoffmengen in der oberirdischen Biomasse bestimmen zu können, wurde in Parzellen definierter Fläche der Aufwuchs geschnitten (Schnitthöhe ca. 5 cm). Im Jahr 2001 wurden je Wiese acht bis neun Parzellen mit 0,25 m² Fläche beerntet. In den Versuchsjahren 2002 und 2003 wurde die Parzellengröße auf 0,065 m² verringert und dafür die Zahl der Ernteparzellen erhöht. Die Erhöhung der Anzahl der Schnittparzellen sollte der inhomogenen Verteilung der Leguminosen auf vielen Flächen besser gerecht werden. Je nach Größe der Wiesen wurden 20 bis 45 Parzellen beerntet (Tab. 2).

Tab. 2: Erntetermine, Größe und Zahl der Ernteparzellen auf den Untersuchungsflächen

Erntetermin	2001		2002	2003
	Juni	August	Juni	Juni
	n ¹⁾	n ¹⁾	n ²⁾	n ²⁾
Hauptuntersuchungsflächen				
Gutweiler	8	8	40	23
Hockweiler	8	8	25	25
Oberemmeler Berg	9	8	30	25
Pellingen 1	8	8	25	25
Pellingen 2	8	8	45	25
Waldweiler	8	8	40	25
Nebenuntersuchungsflächen				
Gusterath 1	k.P.	k.P.	25	25
Gusterath 2	k.P.	k.P.	23	23
Gusterath 3	k.P.	k.P.	30	25
Muhl 1	k.P.	k.P.	25	k.P.
Muhl 2	k.P.	k.P.	25	k.P.
Pellingen 3	k.P.	k.P.	30	k.P.
Pellingen 4	k.P.	k.P.	20	k.P.
Pellingen 5	k.P.	k.P.	21	21
Züsch 1	k.P.	k.P.	20	k.P.
Züsch 2	k.P.	k.P.	25	25

n: Zahl der Ernteparzellen

k.P.: keine Probenahme

¹⁾ Schnittfläche 0,25 m²

²⁾ Schnittfläche 0,0625 m²

Die Anordnung der Parzellen entsprach einem lückigen Flächentransekt (TREMP 2005) mit einem Abstand von 2 m zwischen den Schnittflächen. Die Schnitttermine lagen zeitlich nah an den von den Landnutzern durchgeführten Heuernten. Im Jahr 2001 wurde eine zweite Probenahme im August durchgeführt.

4.1.2 Untersuchung ausgewählter Arten

Die Leguminosen *Trifolium pratense* L. (Rot-Klee), *T. repens* L. (Weiß-Klee), *T. dubium* SIBTH. (Kleiner Klee), *Lotus corniculatus* L. (Gemeiner Hornklee), *Lathyrus linifolius* (REICHARD) BÄSSLER (Berg-Platterbse), *Vicia cracca* L. (Vogel-Wicke) und *V. sepium* L. (Zaun-Wicke) wurden untersucht. Für die Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (Kap. 4.6) wurden außerdem Arten ohne Befähigung zur symbiotischen N_2 -Fixierung (Referenzarten) beprobt: namentlich die Kräuter *Plantago lanceolata* L. (Spitz-Wegerich), *Sanguisorba minor* SCOP. (Kleiner Wiesenknopf), *Leucanthemum vulgare* LAMK. (Wiesen-Margerite), *Galium mollugo* L. (Wiesen-Labkraut) sowie das mit hoher Stetigkeit vorkommende Süßgras *Holcus lanatus* L. (Wolliges Honiggras) (Nomenklatur der Arten nach ROTHMALER 1994). Es wurde Sprossmaterial von je 15-20 Pflanzen gesammelt und zu einer Mischprobe je Art vermengt.

Im Juni 2001 und im August 2001 wurde Sprossmaterial der ausgewählten Arten auf sechs Wiesen geerntet. Im Juni 2002 wurde auf zehn Wiesen gesammelt. Im Jahr 2003 wurden an drei Terminen (23. April, 7. Mai, 28. Mai) Sprossproben genommen. Am letzten Termin Ende Mai wurden darüber hinaus Pflanzen mit Wurzeln ausgegraben. Die Wurzelproben wurden gründlich mit Wasser ausgewaschen und wie die Sprossproben bei 60°C mindestens 48 h getrocknet. Der N-Gesamtgehalt sowie die N-Isotopenzusammensetzung wurden gemessen. Ferner wurden die Mineralstoffgehalte der Elemente Phosphor, Kalium, Magnesium, Calcium, Mangan und Eisen in den Spross- und Wurzelproben bestimmt. Neben den oben genannten Arten wurden im Jahr 2002 weitere Pflanzen auf einigen Flächen untersucht (siehe Anhang, Tab. A10 und Tab. A14).

4.2 Bestimmung der Pflanzenerträge

4.2.1 Ermittlung der Trockenmassen

Der in den Ernteparzellen geschnittene Aufwuchs wurde in die funktionellen Gruppen - Leguminosen, sonstige Kräuter (in der Arbeit auch als „Kräuter“ bezeichnet) und Gräser - getrennt. Die Proben wurden in Kühltaschen ins Labor transportiert und im Kühlschrank aufbewahrt. Die Sortierung der Proben wurde bis spätestens 48 Stunden nach der Ernte abgeschlossen. Die Proben wurden bei 60°C im Trockenschrank für mindestens 48 h getrocknet und anschließend gewogen. Es wurden die Gesamterträge der Wiesen (als Trockenmassen) und die Anteile der funktionellen Gruppen am Ertrag berechnet.

4.2.2 Schätzung des Massenanteils der Leguminosen

Das Sortieren der Ernteproben war zeitaufwendig. Die Pflanzenproben mussten zudem in frischem Zustand sortiert werden, was bei begrenzten personellen Ressourcen nur die Bearbeitung weniger Wiesen in dem engen Zeitfenster von dem gewünschten maximalen Ertrag (Blühbeginn der meisten Gräser) bis zur Mahd durch die Nutzer ermöglichte. Um eine Beschleunigung bei der Ermittlung der Massenanteile der funktionellen Gruppen zu erreichen, können diese Anteile geschätzt werden (Ertragsanteilschätzung nach KLAPP/STÄHLIN zit. in KLAPP 1965, VOIGTLÄNDER & VOSS 1979).

Direkt vor dem Schnitt wurde pro Parzelle der Anteil der Leguminosen an der Erntemenge abgeschätzt. Die in der Schnittparzelle vorkommenden Leguminosenarten wurden außerdem notiert. Abweichend von der Methode von KLAPP/STÄHLIN wurden keine Massenanteile für einzelne Arten geschätzt. Bei der Juni- und der August-Ernte des Jahres 2001 wurde der Anteil der Leguminosen anhand ihrer Deckung auf der Ernteparzelle geschätzt. Die Deckungswerte der Leguminosen-, Gräser- und sonstigen Kräuter ergaben summiert eine Gesamtdeckung von über 100 % (durch Überlagerungen der Blätter im Bestand). Im Juni 2002 wurde eine Schätzung der tatsächlichen Masse angestrebt, wobei die Deckung eine Orientierung bot, jedoch die Anteile der funktionellen Gruppen für jede Parzelle zusammen 100 % ergaben. Durch die unterschiedliche Wuchshöhe ist eine Abschätzung der Massenanteile der Kraut- und der Grasschicht schwierig. Im Juni 2003 wurde daher neben der Massenschätzung der funktionellen Gruppen deren Wuchshöhe gemessen. Die geschätzten Anteile wurden schließlich mit der gewogenen Trockenmasse verglichen. Die Deckungswerte aus dem Versuchsjahr 2001 wurden für den Vergleich mit den Jahren 2002 und 2003 in Massenprozent umgerechnet. Hierzu wurde die Gesamtdeckung aller Fraktionen gleich 100 % Masse gesetzt und die Deckungswerte jeder Fraktion in Prozent Massenanteile umgerechnet.

4.3 Stickstoffanalysen des Pflanzenmaterials

4.3.1 Gesamtstickstoff

In den funktionellen Gruppen wurde der Gesamtstickstoffgehalt mittels Elementaranalyse (vario EL CHNOS Elementaranalysator, elementar Analysensysteme GmbH) bestimmt. Die sortierten Proben der Ernteparzellen wurden hierzu staubfein gemahlen (Scheibenschwingmühle, Fa. Fritsch) und in Zinnschiffchen eingewogen. Die Anzahl der untersuchten Proben richtete sich nach der Zahl der beernteten Parzellen. Von den Parzellen des Jahres 2001 wurde jede Probe gemessen, von den Parzellen der Jahre 2002 und 2003 wurde nur etwa jede zweite zur Stickstoffanalyse herangezogen, um die Probenzahl gering zu halten. Die Stickstoffmenge in der gesamten oberirdischen Biomasse sowie die Stickstoffmengen der funktionellen Gruppen wurden berechnet. In gleicher Weise wurden die N-Gehalte im Spross- und Wurzelmaterial der gesammelten Pflanzenarten (Leguminosen und Nicht-Leguminosen) ermittelt.

4.3.2 Stabile Stickstoffisotope

Für die beabsichtigte Schätzung der N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen wurde die Zusammensetzung der stabilen Isotope ¹⁵N und ¹⁴N im pflanzlichen Stickstoff ermittelt. Hierzu wurden 3–5 mg der gemahlenen Pflanzenproben in Zinnkapseln eingewogen. Die Messung der Proben wurde mittels Isotopenverhältnismassenspektrometer (IRMS, FINNIGAN MAT 251, Finnigan MAT GmbH, Bremen) und gekoppeltem Elementaranalysator (NA 1500, Carlo Erba Instruments, Milano) im Kompetenzzentrum Stabile Isotope (KOSI) an der Universität Göttingen vorgenommen.

4.4 Phosphor-, Kalium-, Magnesium-, Calcium-, Mangan- und Eisen-gehalte in der Sprossmasse

Die Höhe der Nährstoffgehalte im Sprossmaterial ausgewählter Pflanzenarten wurde ergänzend zu den Bodennährstoffgehalten bestimmt, um die Ernährungssituation der Pflanzen insbesondere der Leguminosen auf den Magerwiesen besser einschätzen zu können.

Das Sprossmaterial der im Juni und August des Jahres 2001 auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen und im Juni des Jahres 2002 auf insgesamt zehn Wiesen gesammelten Leguminosen und Nicht-Leguminosen (Arten siehe Anhang, Tab. A14) wurde im Säure-Mikrowellen-Verfahren aufgeschlossen. Der P-Gehalt wurde kolorimetrisch als Molybdat-Phosphatkomplex unter partieller Mo-Reduktion mit Ascorbinsäure bestimmt (Phosphor-Blau-Methode, Messung bei 880 nm, Spektralphotometer UV-160A, Fa. Shimadzu). Die Gehalte der Elemente K, Mg, Ca, Mn und Fe wurden durch Atomabsorptionsspektrometrie (AAS, Spektr. AA30 bzw. AA300, Fa. Varian) ermittelt.

4.5 Kulturversuch zur Ermittlung der N-Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung

Zur Ermittlung der Korrekturgröße (B-Wert, UNKOVICH & PATE 2001, JACOT et al. 2000a) für die im Verlauf der N₂-Fixierung auftretende Isotopenfraktionierung (durch Diskriminierung des schwereren ¹⁵N-Isotops) wurde ein Kulturversuch mit den in den Wiesen häufig vorkommenden Leguminosenarten durchgeführt. Die Isotopenfraktionierung wurde an Pflanzen bestimmt, die auf N-freiem Substrat gewachsen waren und ausschließlich Luftstickstoff als N-Quelle zur Verfügung hatten.

Die Samen bzw. vorgekeimten Pflanzen wurden in Töpfen mit Vermiculite (1–2 mm Körnung, Fa. Deutsche Vermiculite Dämmstoff GmbH, Sprockhövel) ausgelegt. Ein Teil des Versuches wurde mit handelsüblichen Rhizobien-Präparaten beimpft (Firma Jost GmbH, Iserlohn, Produktinformationen siehe Anhang, Tab. A1), ein anderer Teil mit einem wässrigen Bodenextrakt von einem der Untersuchungsstandorte. Schließlich wurde über mehrere Wochen mit stickstofffreier Nährlösung gegossen (Zusammensetzung siehe Anhang, Tab. A2). Die Temperatur wurde auf 19°C/15°C (Tag/Nacht) eingestellt und die Pflanzen

wurden anfangs mit ca. 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}^2$ beleuchtet. Die Pflanzen wurden spätestens bei Blühbeginn geerntet, auf Wurzelknöllchen überprüft und nach Sprossen (ohne Blüten) und Wurzeln getrennt bei 60°C 48 h getrocknet und schließlich gewogen. Die Proben wurden anschließend in einer Scheibenschwingmühle im Achateinsatz gemahlen und wie in Kap. 4.3 beschrieben für die Stickstoffisotopenanalyse vorbereitet. Zur Isotopenanalyse wurden nur die Pflanzen mit Wurzelknöllchen herangezogen, d. h. die Pflanzen, die höchstwahrscheinlich symbiotische N_2 -Fixierung betrieben haben. Aus den gemessenen $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ -Verhältnissen wurden $\delta^{15}\text{N}$ -Werte für jede Art erhalten und der „B-Wert“ berechnet.

Eine detailliertere Beschreibung der beiden Versuchsvarianten (Animpfung mit Radicin[®]-Lösung bzw. mit Bodenextrakt) findet sich im Anhang.

4.6 Schätzung der N_2 -Fixierungsleistung der Leguminosen

Der Beitrag der Leguminosen zur Stickstoffversorgung der Wiesen wurde untersucht. Die Höhe der N_2 -Fixierungsleistung wurde mit der semiquantitativen $\delta^{15}\text{N}$ -Methode („ ^{15}N natural abundance method“, SHEARER & KOHL 1986) geschätzt. Die Grundlagen der Methode wurden bereits in Kap. 2.4.1 erläutert. Dort sind auch die Berechnungsformeln für den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert und den aus der symbiotischen N_2 -Fixierung stammenden N-Anteil (Ndfa) aufgeführt.

4.6.1 Berechnung der symbiotisch fixierten Stickstoffmenge

Für die Versuchsjahre 2001 und 2002 wurde der N-Anteil aus symbiotischer N_2 -Fixierung in den Leguminosen, der fixierte N-Anteil (Ndfa in %) in der gesamten oberirdischen Biomasse und die fixierte N-Menge (Nfix in kg ha^{-1}) für jede Fläche berechnet. Der fixierte N-Anteil in den Leguminosen wurde bestimmt, um die Plausibilität der gesamten Berechnung zu überprüfen. Fixierte N-Anteile zwischen 0 % und 100 % an der N-Menge der Leguminosen wurden als gültige Werte betrachtet.

Die Berechnung wurde mit B-Wert (siehe Kap. 5.4.5 und Kap. 5.5) und ohne B-Wert (d. h. B-Wert = 0 %) durchgeführt. Es wurden ferner Berechnungsvarianten von zwei unterschiedlichen Referenzpflanzen einander gegenübergestellt. In der ersten Variante wurde der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Sprossmaterials von *Plantago lanceolata* der entsprechenden Wiese verwendet (zur Auswahl dieser Art als Referenzpflanze siehe Kap. 5.4.1). In der zweiten Variante wurden Mittelwerte aus den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Kräuter- plus der Gräser sprossmassen als Referenz genutzt (siehe Kap. 5.4.3). In diesem Fall wurden alle Nicht-Leguminosen gemeinsam als Referenz betrachtet. Für die Flächen Gusterath 3, Pellingen 4, Pellingen 5, Züsch 2 und Muhl 2 lagen keine $\delta^{15}\text{N}$ -Werte für *Plantago lanceolata* vor, so dass hier nur die zweite Referenzvariante berechnet wurde.

Folgende Daten stellen die Grundlage für die Berechnung der symbiotisch fixierten N-Mengen dar:

- Die Erntemengen der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) und der Gesamtertrag als TM (dt ha⁻¹) (Kap. 5.1 und 5.2)
- Die N-Gehalte (%) der funktionellen Gruppen und die N-Mengen (kg ha⁻¹) im Pflanzenmaterial (Kap. 5.3)
- Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert (‰) der Leguminosen (Kap. 5.4)
- Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert (‰) einer Referenzpflanze (*Plantago lanceolata*), die zur gleichen Zeit auf derselben Fläche geerntet wurde bzw. der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der sonstigen Kräuter (ohne Leguminosen) und der Gräser (Kap. 5.4)
- Der B-Wert als Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung im Prozess der N₂-Fixierung (Kap. 5.4.5)

Die N-Menge in der Sprossmasse der Leguminosen wurde durch Multiplikation des N-Gehaltes in der Leguminosen-Sprossmasse mit der Leguminosen-TM ermittelt:

$$\text{N-Menge in der Leguminosen-Sprossmasse (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{N-Gehalt der Legum. (\%)} * \text{Legum.-TM (dt ha}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

Die prozentuale Menge fixierten Stickstoffs (Nd_{fa}) in der Leguminosen-Sprossmasse wurde anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Referenzpflanze (hier *Plantago lanceolata*), der Freiland-Leguminosen und des B-Wertes berechnet:

$$\text{Nd}_{fa} (\%) \text{ in der Leguminosen-Sprossmasse} = \frac{(\delta^{15}\text{N}_{\text{Plantago}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Leguminosen}})}{(\delta^{15}\text{N}_{\text{Plantago}} - B)} * 100 \quad (5)$$

Die Multiplikation des fixierten N-Anteils mit der N-Menge in der Leguminosenfraktion ergab die fixierte N-Menge (N_{fix}) in der Leguminosen-Sprossmasse:

$$\text{N}_{\text{fix}} (\text{kg ha}^{-1}) \text{ in der Legum.-Sprossmasse} = \frac{\text{Nd}_{fa} (\%) * \text{N-Menge (kg ha}^{-1}\text{) in der Legum.-Sprossmasse}}{100} \quad (6)$$

Die symbiotisch fixierte N-Menge in der Leguminosen-Sprossmasse entspricht der symbiotisch fixierten N-Menge in der oberirdischen Biomasse (vgl. RIFFKIN et al. 1999a, TSIALTAS et al. 2004):

$$\text{N}_{\text{fix}} (\text{kg ha}^{-1}) \text{ in der oberirdischen Biomasse} = \text{N}_{\text{fix}} (\text{kg ha}^{-1}) \text{ in der Leguminosen-Sprossmasse} \quad (7)$$

Zur Bewertung der Rolle der Leguminosen im Stickstoffhaushalt der Wiesen wurde der Anteil symbiotisch fixierten Stickstoffs an der Stickstoffmenge der gesamten oberirdischen Biomasse berechnet:

$$\text{Ndfa (\% in der oberirdischen Biomasse)} = \frac{N_{\text{fix}} (\text{kg ha}^{-1}) \text{ in der Leguminosen-Sprossmasse}}{N\text{-Menge (kg ha}^{-1}) \text{ in der oberirdischen Biomasse}} * 100 \quad (8)$$

4.7 Vegetationsaufnahmen

Eine Einordnung der Wiesen in die Grünlandgesellschaften erfolgte durch die Auswertung von Vegetationsaufnahmen. Auf allen Wiesen wurden in unmittelbarer Nähe zu den Ernteparzellen auf 16 m² Teilflächen die Pflanzenarten und ihre Deckung nach Braun-Blanquet mit einer nach WILMANN (1998) veränderten Schätzskala aufgenommen.

Schätzung der Artmächtigkeit (Menge):

r:	1 Individuum in der Aufnahme­fläche	
+:	2-5 Individuen	Deckung < 1 %
1:	6-50 Individuen	Deckung < 5 %
2m:	> 50 Individuen	Deckung < 5 %
2a:	Individuenzahl beliebig	Deckung 5-15 %, 16-25 %
2b:	Individuenzahl beliebig	Deckung 16-25 %, 26-50 %
3:	Individuenzahl beliebig	Deckung 26-50 %, 51-75 %
4:	Individuenzahl beliebig	Deckung 51-75 %, 76-100 %
5:	Individuenzahl beliebig	Deckung 76-100 %

4.8 Test auf VA-Mykorrhiza in Wurzeln ausgewählter Wiesenpflanzen

Die Aufnahme von Stickstoffverbindungen aus dem Boden kann durch eine Symbiose mit Mykorrhiza-Pilzen beeinflusst sein. Für die Wiesenpflanzen wurde das Vorhandensein der vesikulär-arbuskulären Mykorrhiza vermutet. Um zu klären, ob der beobachtete Unterschied in der Isotopensignatur der untersuchten Leguminosen und Referenzpflanzen möglicherweise auf das Vorhandensein bzw. Fehlen von VA-Mykorrhiza zurückzuführen sein könnte, wurden im Oktober 2002 auf drei Untersuchungsflächen mehrere Leguminosenarten und zwei Nichtleguminosenarten mit Wurzeln entnommen. Die Wurzeln wurden gründlich gewaschen, um den Mineralboden und anhaftende Wurzeln anderer Arten zu entfernen. Als Anfärbetechnik wurde die von VIERHEILIG et al. (1998) beschriebene Methode mit Tinten-Essiglösung (Tinte der Fa. Pelikan, schwarz) verwendet. Die so behandelten Feinwurzeln wurden als Quetschpräparat unter dem Lichtmikroskop betrachtet und Bereiche mit Strukturen von Mykorrhiza-Pilzen photographisch festgehalten.

4.9 Bodenuntersuchungen

4.9.1 Termine

Die Bodenproben für die Bestimmung der pH-Werte, der Gesamtstickstoff- und Kohlenstoffgehalte, der austauschbaren Phosphor- und Kaliumgehalte sowie für die Ermittlung der austauschbaren Kationen wurden jeweils am Ende der Vegetationsperiode im September des Jahres 2001 (Flächen Gutweiler, Oberemmeler Berg, Pellingen 1 und 2, Hockweiler und Waldweiler) und im Oktober 2002 (Flächen Gusterath 1–3, Pellingen 3–5, Züschen 1 und 2 sowie Muhl 1 und 2) genommen.

4.9.2 pH-Werte

Auf den Untersuchungsflächen wurden an 15–20 Stellen in einer Tiefe von 0–10 cm (das entspricht dem am stärksten durchwurzelten Bereich) mit einem Bohrstock Bodenproben entnommen und in zwei Tiefen (0–5 cm und 5–10 cm) getrennt zu Mischproben vereinigt. Die Proben wurden gesiebt (2 mm Maschenweite) und luftgetrocknet. Jeweils 10 g TB wurden mit 25 ml H₂O_{dest} oder KCl versetzt und 2 h geschüttelt. Die pH-Werte wurden mittels pH-Elektrode gemessen.

4.9.3 Gesamtstickstoff- und Gesamtkohlenstoffgehalte

Die gesiebten Bodenproben wurden zur besseren Homogenisierung in einer Scheibenschwingmühle gemahlen (Metalleinsatz) und jeweils etwa 30 mg in Zinnschiffchen eingewogen. Mittels Elementaranalyse (vario EL CHNOS Elementaranalysator, elementar Analysensysteme GmbH) wurden der Gesamtstickstoff- und der Gesamtkohlenstoffgehalt bestimmt.

4.9.4 Austauschbare Phosphor- und Kaliumgehalte

An den gesiebten Bodenproben wurde der austauschbare Phosphor- und Kaliumgehalt bestimmt. Genau 5 g gesiebter TB wurden unter Zugabe von 100 ml Ammoniumlactat-essigsäure 4 h geschüttelt und über Faltenfilter abfiltriert (Gleichgewichtsverfahren nach EGNER-RIEHM in SCHLICHTING et al. 1995). Die P-Bestimmung erfolgte kolorimetrisch als Molybdat-Phosphatkomplex unter partieller Mo-Reduktion mit Ascorbinsäure. Der Kaliumgehalt wurde am Atomabsorptionsspektrometer (AAS, Spektr. AA30 bzw. AA300, Fa. Varian) gemessen.

4.9.5 Austauschbare Kationen

Die austauschbaren Kationen Ca, Mg, Al, Fe und Mn wurden durch Extraktion mit 1M NH₄Cl-Lösung bestimmt (nach MEIWES in SCHLICHTING et al. 1995 bzw. LÜER & BÖHMER 2000, verändert). Genau 5 g gesiebter TB wurde mit 50 ml 1M NH₄Cl-Lösung versetzt, 2 h geschüttelt und durch Blaubandfilter abfiltriert. Die Gehalte der Elemente im Filtrat wurden an einem AAS gemessen.

4.9.6 Nitrat- und Ammoniumgehalte ($N_{\min}$)

Im Untersuchungsjahr 2001 wurde kurz nach den Ernten in den Schnittparzellen mit hoher bzw. geringer Leguminosendeckung Boden in einer Tiefe bis - 10 cm entnommen, um die aktuellen Gehalte an Nitrat und Ammonium zu bestimmen. Die Proben wurden gekühlt ins Labor transportiert, gesiebt (2 mm Maschenweite) und der Frischboden mit $KAl(SO_4)_2$ -Lösung extrahiert (nach BREMNER 1965 zit. in GERLACH 1973). Nitratgehalte wurden bichromatisch bei zwei Wellenlängen bestimmt (ESSER & HANS 1990). Ammonium wurde nach Anfärbung mit Salicylat-Citrat photometrisch bestimmt (nach SCHLICHTING et al. 1995, verändert). Zur Umrechnung der Gehalte auf Trockenboden wurden die Wassergehalte der Bodenproben bestimmt (Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz). Die $N_{\min}$ -Gehalte ($mg\ kg\ TB^{-1}$) wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit Literaturdaten in Nährstoffmengen ($kg\ ha^{-1}$) umgerechnet. Als Wert für die Lagerungsdichte der Böden wurde einheitlich ein mittlerer Wert von $1,4\ kg\ l^{-1}$ Boden angenommen (VDLUFA 1991).

4.9.7 Bodentypen und Gründigkeit

Auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen wurden der Bodentyp und die Bodenart kartiert (AG BODEN 1996, 2005). Um einen Eindruck von der durchwurzelbaren Tiefe zu bekommen, wurde die Gründigkeit der Böden mit Hilfe eines skalierten Metallstabs erfasst. Hierzu wurden pro Fläche 20 Einstiche gemacht und die Spanne der Gründigkeit notiert.

4.10 Statistische Auswertung

Für die statistische Datenanalyse wurden die SPSS Versionen 12.0 und 13.0 für Windows verwendet. Die Daten wurden mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung getestet. Mittels Levene-Test wurde die Homogenität der Varianzen überprüft. Die Mittelwerte aus normalverteilten Daten mit homogenen Varianzen (Kulturversuch) wurden mit ANOVA und Tukey-Test bzw. t-Test verglichen. Die $\delta^{15}N$ -Werte der Nicht-Leguminosen der Untersuchungsjahre 2001 und 2002 (Einzelarten) wurden gegen die $\delta^{15}N$ -Werte der Leguminosen mittels eines Allgemeinen linearen Modells (ALM) und anschließend Mehrfachvergleich T2 nach TAMHANE (für nicht homogene Varianzen) getestet. In Tabellen und Abbildungen wurde vorwiegend der arithmetische Mittelwert mit Standardabweichung dargestellt, da die überwiegende Zahl der Datensätze zumindest annähernd Normalverteilung zeigte (vgl. SACHS 1988). Da jedoch eine Normalverteilung nicht für alle Stichprobenwerte gegeben war und es keine eindeutigen Kriterien dafür gibt, ab wann die Anwendungsvoraussetzungen für einen Test nicht mehr gegeben sind, der eine Normalverteilung voraussetzt (JANSSEN & LAATZ 2003), wurden die Trockenmassenerträge und N-Mengen im Pflanzenmaterial mittels Kruskal-Wallis-Test (H-Test) bzw. paarweise mit Hilfe des Mann-Whitney U-Tests auf signifikante Unterschiede geprüft. Die angegebenen Signifikanzniveaus gelten daher nur für den jeweiligen Paarvergleich. Die Anwendung des Rangtests nach Nemenyi war aufgrund ungleicher Gruppenumfänge nicht möglich (KÖHLER et al. 2002). Für die Beschreibung von Zusammenhängen zwischen zwei Merkmalen wurden Korrelationen bzw. Regressionsanalysen durchgeführt.

5 Ergebnisse

5.1 Gesamterträge der Wiesen

5.1.1 Hauptuntersuchungsflächen

Insgesamt sechs Wiesen (Gutweiler, Hockweiler, Pellingen 1, Pellingen 2, Oberemmeler Berg, Waldweiler) wurden in allen drei Jahren (2001, 2002 und 2003) untersucht. Deren Erträge (Juni-Schnitt) sind in Tabelle 3 als Trockenmasseertrag (dt ha⁻¹) dargestellt. Der im Vergleich der Jahre und Flächen insgesamt höchste Ertrag konnte im Juni 2001 auf der Fläche Gutweiler mit 53,7 dt ha⁻¹ nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu fand sich der insgesamt geringste Ertrag mit 18,2 dt ha⁻¹ im Juni 2003 auf der Fläche Oberemmeler Berg. Im Jahr 2001 bewegten sich die Juni-Erträge der Flächen zwischen 27,4 und 53,7 dt ha⁻¹. Die ertragreichste Fläche Gutweiler war damit etwa doppelt so produktiv wie die ertragärmste Fläche Pellingen 2. Der Ertrag der Fläche Gutweiler unterschied sich in 2001 signifikant von den Erträgen der übrigen Flächen. Die Fläche Hockweiler zeigte mit 38,2 dt ha⁻¹ ein mittleres Ertragsniveau und unterschied sich damit ebenfalls signifikant von den übrigen, ertragsärmeren Flächen Pellingen 1 und 2, Waldweiler und Oberemmeler Berg. Im Juni 2002 wurde auf der Fläche Hockweiler mit 46,8 dt ha⁻¹ ein signifikant höherer Ertrag als auf den übrigen Flächen ermittelt. Im Gegensatz dazu erbrachte die Fläche Waldweiler im gleichen Zeitraum mit 19,5 dt ha⁻¹ den insgesamt geringsten Ertrag. Die Flächen Pellingen 1 und 2 sowie Oberemmeler Berg zeigten im Juni 2002 mit Erträgen zwischen 24,2 und 28,1 dt ha⁻¹ ein ähnliches Ertragsniveau wie im Juni 2001. Ihre TM-Erträge waren signifikant höher als der TM-Ertrag der Fläche Waldweiler, jedoch signifikant niedriger als die TM-Erträge der Flächen Hockweiler und Gutweiler. Im Juni 2003 war die Fläche Hockweiler mit 45,0 dt ha⁻¹ erneut die produktivste Fläche. Die Erträge der übrigen Flächen bewegten sich zwischen 18,2 und 27,3 dt ha⁻¹ und waren damit signifikant geringer als der TM-Ertrag der Fläche Hockweiler. Der TM-Ertrag der Fläche Gutweiler war im Juni 2003 mit 27,3 dt ha⁻¹ ebenfalls signifikant höher als der TM-Ertrag der Flächen Pellingen 1 und 2, Waldweiler und Oberemmeler Berg (18,2 bis 22,0 dt ha⁻¹).

Die Fläche Gutweiler wurde ab dem Jahr 2001 extensiviert. Die ausbleibende Düngung erklärt die signifikant geringeren Erträge in den Jahren 2002 und 2003. Die geerntete Biomasse hat sich im Vergleich zwischen den Jahren 2001 und 2003 von 53,7 auf 27,3 dt ha⁻¹ halbiert. Auf den Flächen Pellingen 1 und 2, Waldweiler sowie Oberemmeler Berg waren die Erträge im Jahr 2003 ebenfalls signifikant geringer als im Juni 2001. Die Fläche Hockweiler ist vor dem Bewirtschaftungsjahr 2002 nach Wechsel des Bewirtschafters (Übernahme durch einen Rinder haltenden Betrieb) stark mit organischem Material (Gülle) gedüngt worden. Der Ertrag wurde dadurch tendenziell von 38,2 auf 46,8 dt ha⁻¹ gesteigert. Diese Steigerung ließ sich jedoch nicht statistisch absichern.

Tab. 3: Erträge (oberirdische Trockenmassen) der sechs Hauptuntersuchungsflächen in drei Untersuchungsjahren (jeweils Juni-Schnitt).

	2001			2002			2003		
Fläche	TM (dt ha ⁻¹)			TM (dt ha ⁻¹)			TM (dt ha ⁻¹)		
Pellingen 2	26,8	A	a	27,2	A	a	22,0	A	b
Waldweiler	27,4	A	a	19,5	B	b	20,7	AB	b
Pellingen 1	29,4	A	a	24,2	A	ab	21,4	AB	b
Oberemmeler Berg	30,6	A	a	28,1	A	a	18,2	B	b
Hockweiler	38,2	B	a	46,8	C	a	45,0	C	a
Gutweiler	53,7	C	a	35,5	D	b	27,3	D	c

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Großbuchstaben für Unterschiede zwischen den Flächen eines Jahres, Kleinbuchstaben für Unterschiede zwischen den Jahren)

Im Jahr 2001 wurde im August ein zweiter Schnitt durchgeführt, um den Zuwachs nach der Ernte im Juni und die Jahressumme zweier Schnitte zu ermitteln (Anhang, Tab. A3). Die TM-Erträge im August waren mit Werten zwischen 8,3 dt ha⁻¹ (Oberemmeler Berg) und 13,1 dt ha⁻¹ (Hockweiler) deutlich niedriger als im Juni 2001. In der Jahressumme 2001 (Addition der Ergebnisse aus den Monaten Juni und August) wurden auf den sechs Flächen Gesamt-TM-Erträge von 35,7 dt ha⁻¹ (Pellingen 2) bis 64,6 dt ha⁻¹ (Gutweiler) nachgewiesen.

5.1.2 Nebenuntersuchungsflächen

In den Jahren 2002 und 2003 wurden zusätzlich zehn (2002) bzw. fünf (2003) Flächen untersucht. Die Ernteerträge der jeweiligen Juni-Schnitte sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die TM-Erträge dieser Flächen lagen im Juni 2002 zwischen 24,2 dt ha⁻¹ (Pellingen 5) und 35,8 dt ha⁻¹ (Pellingen 3). Diese Ergebnisse bewegen sich im Bereich der Erträge der Hauptuntersuchungsflächen. Der Ertrag der Fläche Pellingen 3 war signifikant höher als der Ertrag der fünf Flächen Gusterath 1, 2 und 3, Züsch 2 und Pellingen 5. Der Ertrag auf der Fläche Pellingen 5 war signifikant niedriger als auf den sieben Flächen Züsch 1 und 2, Gusterath 3, Muhl 1 und 2 und Pellingen 3 und 4.

Fünf der im Jahr 2002 beprobten Flächen wurden im Juni 2003 erneut untersucht. Die Flächen Pellingen 5 und Züsch 2 wiesen mit 24,6 bzw. 22,3 dt ha⁻¹ signifikant höhere TM-Erträge als die Flächen Gusterath 2 und 3 (17,6 bzw. 18,0 dt ha⁻¹) auf. Die Fläche Gusterath 1 unterschied sich in ihrem TM-Ertrag (19,8 dt ha⁻¹) nur von der produktivsten Fläche Pellingen 5 signifikant. Auf vier Flächen (Gusterath 1, 2 und 3 sowie Züsch 2) war vom Jahr 2002 zum Jahr 2003 eine signifikante Abnahme des Ertrages zu verzeichnen. Das entspricht der Entwicklung der Ertragsrückgänge auf fünf der sechs Hauptuntersuchungsflächen (mit Ausnahme der Fläche Hockweiler).

Tab. 4: Erträge (Trockenmassen) im Juni 2002 und im Juni 2003 auf 10 Nebenuntersuchungsflächen.

	2002			2003		
Fläche	TM (dt ha ⁻¹)			TM (dt ha ⁻¹)		
Pellingen 5	24,2	A	a	24,6	A	a
Gusterath 1	26,1	A	a	19,8	BC	b
Gusterath 2	28,1	AB	a	17,6	B	b
Züsch 2	30,9	BC	a	22,3	AC	b
Gusterath 3	31,5	C	a	18,0	B	b
Muhl 1	32,0	CD		k.P.		
Pellingen 4	32,3	CD		k.P.		
Züsch 1	33,0	CD		k.P.		
Muhl 2	34,1	CD		k.P.		
Pellingen 3	35,8	D		k.P.		

k.P.: keine Probenahme

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test mit $P < 0,05$ (Großbuchstaben für Unterschiede zwischen den Flächen eines Jahres), Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Kleinbuchstaben für Unterschiede zwischen den Jahren)

5.2 Massenanteile der funktionellen Gruppen

5.2.1 Hauptuntersuchungsflächen

Die prozentualen Anteile der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) an der geernteten Biomasse (bezogen auf die Trockenmassen der Juni-Ernte) in den Jahren 2001 bis 2003 sind für die sechs Hauptuntersuchungsflächen in Abbildung 2 dargestellt. In allen Fällen bildeten die Gräser den relativ größten Teil des Trockenmasseertrages. Der Anteil der Gräser am TM-Gesamtertrag bewegte sich zwischen 47,9 % (Fläche Oberremmeler Berg im Jahr 2003) und 96,2 % (Fläche Hockweiler im Jahr 2003). Die Leguminosen zeigten Ertragsanteile von 0,2 % (Fläche Hockweiler im Jahr 2003) bis zu 17,6 % (Fläche Waldweiler im Jahr 2001). Der Anteil der Kräuter bewegte sich zwischen 3,6 % in Hockweiler im Jahr 2003 und 45,4 % (Fläche Pellingen 1 im Jahr 2003). Die dieser und der folgenden Abbildung 3 zu Grunde liegenden Mittelwerte der Trockenmassen sind im Anhang (Tab. A4) aufgeführt.

Für die sechs Flächen war keine gemeinsame Entwicklung bezüglich einer Zunahme oder Abnahme der Anteile der funktionellen Gruppen über die drei Untersuchungsjahre zu verzeichnen. Der Leguminosenanteil ist vom Jahr 2001 bis zum Jahr 2003 auf den Flächen Gutweiler (von 3,3 auf 14,5 %), Oberremmeler Berg (von 5,2 auf 7,1 %) und Pellingen 2 (von 5,2 auf 7,8 %) gestiegen. Diese Steigerungen ließen sich jedoch statistisch nicht absichern ($P > 0,05$; Tab. 5). Auf den Flächen Waldweiler und Pellingen 1 wurde ein tendenzieller Rückgang der Leguminosenanteile vom Jahr 2001 zum Jahr 2003 festgestellt. Doch auch in diesen Fällen war der Rückgang von 6,6 auf 4,7 % (Pellingen 1) und 17,6 auf 10,3 % (Waldweiler) statistisch nicht absicherbar ($P > 0,1$). Auf der Fläche Waldweiler war allerdings der Leguminosenanteil im Jahr 2002 mit 8,5 % signifikant geringer als im Jahr

2001 (17,6 %). Auf der Flächen Hockweiler wurde ein hoch signifikanter Rückgang des Leguminosenanteils von 9,4 % im Jahr 2001 auf 0,2 % im Jahr 2003 beobachtet ($P < 0,001$).

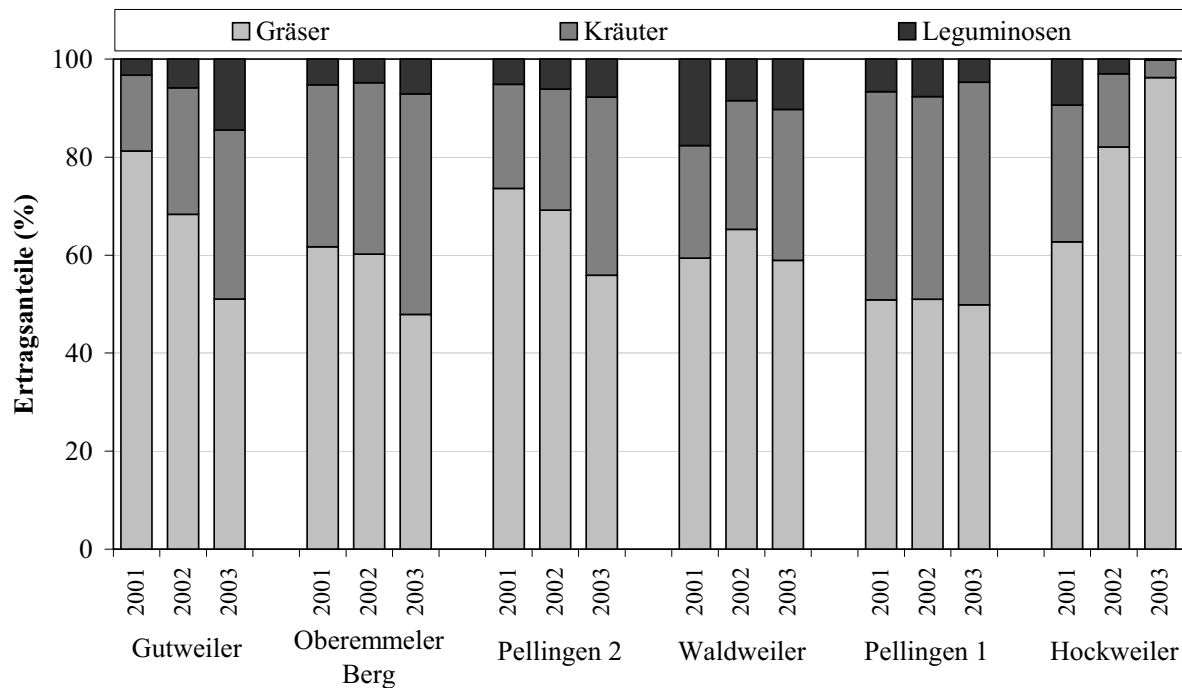


Abb. 2: Relative Anteile der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) an der Gesamtbiomasse (oberirdisch) der sechs Hauptuntersuchungsflächen.

Tab. 5: Unterschiede in den Ertragsanteilen der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) zwischen den drei Versuchsjahren auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen.

	Gutweiler			Oberemmeler Berg			Pellingen 2			Waldweiler			Pellingen 1			Hockweiler		
→	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003
Leguminosen	a	a	a	ab	a	b	a	a	a	a	b	ab	a	a	a	a	b	c
Kräuter	a	a	b	a	a	b	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	b	c
Gräser	a	b	c	a	a	b	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a	b	c

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung durch Pfeil gekennzeichnet)

Die Kräuteranteile sind auf drei der sechs Hauptuntersuchungsflächen vom Jahr 2001 zum Jahr 2003 signifikant gestiegen. Auf der Fläche Gutweiler stieg der Kräuteranteil von 15,5 auf 34,5 % ($P = 0,001$), auf der Fläche Oberemmeler Berg von 33,1 auf 45,0 % ($P = 0,012$) und auf der Fläche Pellingen 2 von 21,2 auf 36,3 % ($P = 0,017$). Die Anstiege des Kräuteranteils auf den Flächen Waldweiler (von 23,0 auf 30,8 %) und Pellingen 1 (von 42,5 auf 45,4 %) ließen sich nicht statistisch absichern ($P > 0,05$). Lediglich auf der Fläche Hockweiler ist der Anteil der Kräuter am Gesamtertrag signifikant zurückgegangen ($P < 0,001$). Er lag im Juni 2001 bei 27,9 % und im Juni 2003 bei 3,6 % der gesamten Trockenmasse.

Die Gräseranteile an der gesamten Trockenmasse zeigten sich auf den Flächen Gutweiler, Oberemmeler Berg und Pellingen 2 im Jahr 2003 signifikant niedriger als im Jahr 2001. Ein

besonders starker Rückgang des Gräseranteils von 81,2 auf 51,0 % wurde auf der Fläche Gutweiler festgestellt ($P < 0,001$). Auf der Fläche Oberemmeler Berg sank der Gräseranteil von 61,7 auf 47,9 %, auf der Fläche Pellingen 2 von 73,6 auf 55,9 % und war damit in beiden Fällen im Juni 2003 signifikant geringer als im Juni 2001 ($P < 0,01$). Auf den Flächen Waldweiler und Pellingen 1 haben sich die Gräseranteile während der drei Untersuchungsjahre nur wenig verändert. Der Gräseranteil auf der Fläche Waldweiler lag zwischen 58,9 % im Jahr 2003 und 65,3 % im Jahr 2002. Für die Fläche Pellingen 1 wurden Gräseranteile zwischen 49,9 % im Jahr 2003 und 51,0 % im Jahr 2002 festgestellt. Unter den sechs Hauptuntersuchungsflächen zeigte lediglich die Fläche Hockweiler einen hoch signifikanten Anstieg des Gräseranteils von 62,7 % im Jahr 2001 bis auf 96,2 % im Jahr 2003 ($P < 0,001$).

Im Jahr 2001 wurden die Flächen im August erneut einer Probenahme unterzogen und die Ertragsanteile der funktionellen Gruppen bestimmt (Anhang, Abb. A1). Im zweiten Aufwuchs wurden im Vergleich zum ersten Aufwuchs höhere Anteile bei den funktionellen Gruppen der Leguminosen (11,5 bis 34,2 % Ertragsanteil im August, 3,3 bis 17,6 % im Juni 2001) und der restlichen Kräuter (27,5 bis 66,7 % im August, 15,5 bis 42,5 % im Juni) beobachtet. Die Werte des August-Schnittes 2001 bestätigten den optischen Eindruck der Kräuter dominierten Wiesen im Spätsommer. Der Gräseranteil betrug im August 21,1 bis 50,5 % (im Juni 50,9 bis 81,2 %).

Da der Leguminosenanteil an der Gesamtbiomasse bezüglich der zu berechnenden Menge an symbiotisch gebundenem Stickstoff interessierte, werden im Folgenden die sechs Hauptuntersuchungsflächen besonders hinsichtlich des TM-Anteils der Leguminosen an der gesamten oberirdischen Biomasse verglichen. In Tabelle 6 kennzeichnen verschiedene Buchstaben statistisch abgesicherte Unterschiede (Signifikanzniveau: 5 %). Im Juni 2001 unterschieden sich die Leguminosenanteile auf den Flächen Gutweiler, Oberemmeler Berg, Pellingen 1 und 2 nicht signifikant voneinander. Diese vier Flächen unterschieden sich jedoch im Leguminosenanteil signifikant von der Fläche Waldweiler. Die Fläche Hockweiler unterschied sich im Leguminosenanteil signifikant von der Fläche Gutweiler. Im Juni 2002 unterschied sich lediglich die Fläche Hockweiler von allen anderen Flächen durch einen signifikant geringeren Leguminosenanteil. Die übrigen fünf Hauptuntersuchungsflächen unterschieden sich nicht signifikant in ihren Leguminosenanteilen. Im Jahr 2003 zeigte die Fläche Hockweiler den geringsten Leguminosenanteil und unterschied sich damit erneut signifikant von den übrigen Flächen. Darüber hinaus zeigte die Fläche Oberemmeler Berg im Jahr 2003 einen signifikant höheren Leguminosenanteil als die Fläche Pellingen 1. Die Kräuteranteile der Flächen Gutweiler, Pellingen 2 und Waldweiler unterschieden sich in allen drei Versuchsjahren nicht voneinander. Die Fläche Oberemmeler Berg zeigte im Juni 2001 mit den Flächen Waldweiler und Hockweiler, in den Jahren 2002 und 2003 dagegen mit der Fläche Pellingen 1 vergleichbare Kräuteranteile. Der Gräseranteil auf der Fläche Pellingen 1 war in allen drei Versuchsjahren geringer als auf den Flächen Waldweiler und Hockweiler.

Tab. 6: Statistischer Vergleich der Leguminosen-, Kräuter- und Gräseranteile zwischen den sechs Hauptuntersuchungsflächen innerhalb eines Untersuchungsjahres (Juni-Ernte).

→	Gutweiler			Oberemmeler Berg			Pellingen 2			Waldweiler			Pellingen 1			Hockweiler		
	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003
Leguminosen	A	A	AB	AB	A	A	AB	A	AB	C	A	AB	AB	A	B	BC	B	C
Kräuter	A	A	A	B	B	B	AC	AC	A	AB	A	A	D	B	B	BC	C	C
Gräser	A	A	AB	B	BC	B	C	A	AC	ABC	AB	A	D	C	BC	BC	D	D

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung durch Pfeil gekennzeichnet)

5.2.2 Nebenuntersuchungsflächen

In den Jahren 2002 und 2003 wurden zusätzliche Wiesen untersucht, wobei die Flächen Gusterath 1 bis 3, Züsch 1 und Pellingen 5 in beiden Jahren, fünf weitere Flächen nur im Jahr 2002 geprüft wurden (Abb. 3, TM im Anhang, Tab. A4).

Bei allen in den Jahren 2002 und 2003 untersuchten Nebenflächen war ein leichter Rückgang der Gräseranteile zum Jahr 2003 zu beobachten, der aber nur für die Flächen Gusterath 2 und 3 signifikant war ($P = 0,006$ bzw. $0,018$; Tab. 7). Auf der Fläche Gusterath 2 sank der Gräseranteil von 27,2 % auf 15,6 % und auf der Fläche Gusterath 3 von 44,2 % auf 36,9 %. Gleichzeitig mit einer Verringerung des Gräseranteils stiegen der Leguminosenanteil sowie der Kräuteranteil, jedoch mit unterschiedlicher Intensität auf den einzelnen Flächen. Der Kräuteranteil der Fläche Gusterath 2 ($P < 0,05$) sowie der Leguminosenanteil der Fläche Pellingen 5 ($P < 0,001$) waren im Jahr 2003 signifikant höher als im Jahr 2002.

Die Anteile der Leguminosen an der Gesamt-Trockenmasse bewegten sich bei den im Juni des Jahres 2002 untersuchten Flächen zwischen 4,2 % (Züsch 1) und 15,1 % (Gusterath 2 sowie Gusterath 1) (Abb. 3). Die mittleren Leguminosenanteile der Flächen Pellingen 5 (6,5 %), Pellingen 4 (6,1 %), Züsch 2 (5,4 %), Gusterath 3 (4,8 %) und Züsch 2 (4,2 %) waren signifikant niedriger als die Leguminosenanteile der Flächen Gusterath 1 und 2 (jeweils 15,1 %) sowie Muhl 1 und 2 (11,5 und 14,8 %). Die Kräuteranteile zeigten sich im Juni 2002 auf den Flächen Gusterath 2 (57,7 %) und Gusterath 3 (51,0 %) signifikant höher als die Kräuteranteile der übrigen Flächen (10,3 bis 32,4 %). Den niedrigsten Kräuteranteil (10,3 %) wies die Fläche Züsch 1 auf. Die Gräseranteile bewegten sich auf den Nebenuntersuchungsflächen im Jahr 2002 zwischen 27,2 % (Gusterath 2) und 85,5 % (Züsch 1). Die Gräseranteile der Flächen Gusterath 2 (27,2 %), Gusterath 3 (44,2 %) und Gusterath 1 (52,5 %) waren signifikant geringer als die Gräseranteile der übrigen Flächen.

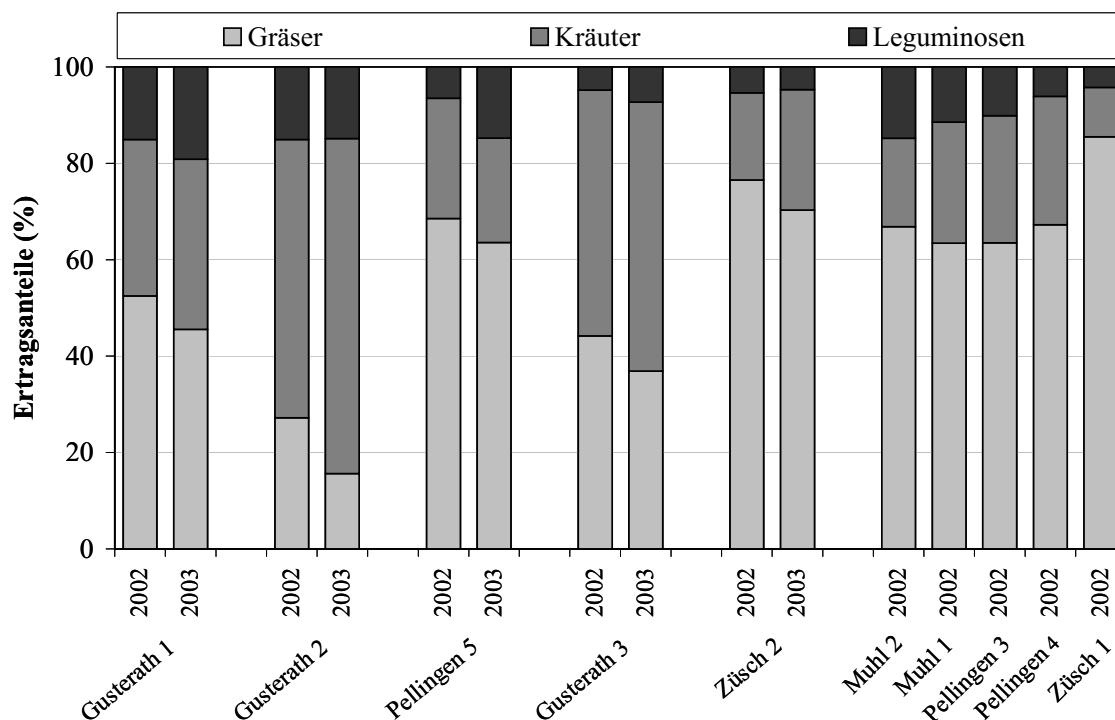


Abb. 3: Relativer Anteil der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) an der oberirdischen Gesamtbiomasse. Zehn Nebenuntersuchungsflächen im Jahr 2002, fünf Nebenuntersuchungsflächen im Jahr 2003.

Tab. 7: Unterschiede in den Ertragsanteilen der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser) zwischen den zwei Versuchsjahren 2002 und 2003 auf den Nebenuntersuchungsflächen.

	Gusterath 1		Gusterath 2		Pellingen 5		Gusterath 3		Züsch 2	
→	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Leguminosen	a	a	a	a	a	b	a	a	a	a
Kräuter	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a
Gräser	a	a	a	b	a	a	a	b	a	a

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung durch Pfeil gekennzeichnet)

Im Jahr 2003 waren die Leguminosenanteile der Flächen Gusterath 1 (19,1 %) und Gusterath 2 (14,8 %) sowie Pellingen 5 (14,8 %) signifikant höher als die Leguminosenanteile der Flächen Gusterath 3 (7,3 %) und Züsch 2 (4,7 %). Die höchsten Kräuteranteile wurden im Jahr 2003 auf den Flächen Gusterath 2 (69,5 %) und Gusterath 3 (55,8 %) nachgewiesen. Einen mittleren Kräuteranteil zeigte die Fläche Gusterath 1 mit 35,3 %. Damit waren die Kräuteranteile dieser drei Wiesen signifikant höher als die Kräuteranteile der Flächen Züsch 2 (25,0 %) und Pellingen 5 (21,6 %). Die hohen Kräuteranteile der Flächen Gusterath 2 und Gusterath 3 überstiegen die auf den Hauptuntersuchungsflächen bei den Juni-Ernten nachgewiesenen Anteile von maximal 45,4 % (Fläche Pellingen 1 im Juni 2003, Abb. 2). Gegenläufig zu den Kräuteranteilen zeigten die Flächen Züsch 2 mit 70,3 % und Pellingen 5

mit 63,6 % signifikant höhere Gräseranteile als die Flächen Gusterath 1 (45,6 %), Gusterath 3 (36,9 %) und Gusterath 2 (15,6 %). Einzelheiten zum statistischen Vergleich sind in Tab. 8 zu finden.

Tab. 8: Statistischer Vergleich der Nebenuntersuchungsflächen hinsichtlich der Leguminosen-, Kräuter- und Gräseranteile für die Versuchsjahre 2002 und 2003.

	2002 (Juni)										2003 (Juni)				
→	Gusterath 2	Gusterath 1	Muhl 2	Muhl 1	Pellingen 3	Pellingen 5	Pellingen 4	Züsch 2	Gusterath 3	Züsch 1	Gusterath 1	Gusterath 2	Pellingen 5	Gusterath 3	Züsch 2
Leguminosen	A	AB	AB	B	ABCF	CE	CD	CD	DE	DF	A	A	A	B	B
Kräuter	A	B	CE	CDF	D	DE	BD	FE	A	G	A	B	C	D	C
Gräser	A	B	C	C	C	CD	C	D	B	E	A	B	C	D	C

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung durch Pfeil gekennzeichnet)

5.3 Stickstoffmengen im Wiesenschnitt

5.3.1 Gesamte N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse

5.3.1.1 Hauptuntersuchungsflächen

In Tabelle 9 sind die aus der oberirdischen Biomasse der Juni-Ernten stammenden N-Mengen (in kg ha^{-1}) für die Versuchsjahre 2001 bis 2003 dargestellt. Die N-Mengen wurden durch Multiplikation der prozentualen N-Gehalte (Anhang, Tab. A5 und Tab. A15) mit den TM-Erträgen ermittelt. Im Juni des Jahres 2001 wurde die höchste N-Menge im Schnittgut auf der Fläche Gutweiler mit $69,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ nachgewiesen. Die Fläche Pellingen 2 zeigte mit $42,0 \text{ kg N ha}^{-1}$ eine signifikant geringere N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse als die Flächen Pellingen 1 ($52,4 \text{ kg N ha}^{-1}$), Oberemmeler Berg ($54,1 \text{ kg N ha}^{-1}$) und Hockweiler ($55,5 \text{ kg N ha}^{-1}$). Die Fläche Waldweiler wies im Schnittgut eine N-Menge in Höhe von $57,0 \text{ kg N ha}^{-1}$ auf.

Im Juni 2002 wurde die höchste Schnittgut-N-Menge mit $99,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ auf der Fläche Hockweiler festgestellt. Alle übrigen Flächen zeigten signifikant geringere N-Mengen in der oberirdischen Pflanzenmasse. Die Flächen Gutweiler ($53,7 \text{ kg N ha}^{-1}$), Pellingen 2 ($48,1 \text{ kg N ha}^{-1}$) und Waldweiler ($46,3 \text{ kg N ha}^{-1}$) wiesen hinsichtlich dieses Parameters keine signifikanten Unterschiede auf. Die geringste N-Menge wurde in 2002 auf der Fläche Pellingen 1 mit $37,9 \text{ kg N ha}^{-1}$ nachgewiesen. Diese N-Menge unterschied sich jedoch nicht signifikant von den N-Mengen der Flächen Oberemmeler Berg ($45,2 \text{ kg N ha}^{-1}$) und Waldweiler ($46,3 \text{ kg N ha}^{-1}$).

Im Juni 2003 wies die Fläche Hockweiler mit $81,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ wiederum die höchste N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse auf. Die übrigen Flächen wiesen signifikant geringere

N-Mengen im Erntegut auf. Die Flächen Waldweiler ($47,4 \text{ kg ha}^{-1}$) und Gutweiler ($45,5 \text{ kg ha}^{-1}$) zeigten keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Parameters Schnittgut-N-Menge. Die geringste N-Menge wurde wie im Vorjahr auf der Fläche Pellingen 1 mit $33,0 \text{ kg ha}^{-1}$ beobachtet. Ein signifikanter Unterschied zu den Flächen Oberemmeler Berg ($34,6 \text{ kg ha}^{-1}$) und Pellingen 2 ($37,8 \text{ kg ha}^{-1}$) lag jedoch nicht vor.

Abgesehen von der Fläche Hockweiler ist die N-Menge im Schnittgut bei allen Flächen innerhalb der drei Untersuchungsjahre tendenziell gesunken. Für die Fläche Gutweiler war eine signifikante Abnahme der N-Menge im Aufwuchs über die drei Jahre von $69,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (Juni 2001) auf $45,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Juni 2003) zu verzeichnen. Die Flächen Oberemmeler Berg und Pellingen 1 wiesen einen signifikanten Rückgang von etwa 20 kg ha^{-1} auf. Bei der Fläche Waldweiler war die Abnahme der Schnittgut-N-Menge um etwa 10 kg ha^{-1} nicht signifikant. Die Fläche Pellingen 2 zeichnete sich im Juni 2002 durch eine signifikante Zunahme der N-Menge um $6,1 \text{ kg ha}^{-1}$ gegenüber dem Juni des Jahres 2001 aus. Im Juni 2003 war die N-Menge in der Erntemasse jedoch wieder um $10,3 \text{ kg ha}^{-1}$ gesunken. Die Fläche Hockweiler ist nachweislich am Ende des Versuchsjahres 2001 nach einem Nutzerwechsel mit Wirtschaftsdünger (Gülle) gedüngt worden, was sich im Folgejahr signifikant auf die N-Menge im Schnittgut (wie auch auf die Erntemasse) auswirkte. Die N-Menge im Aufwuchs verdoppelte sich nahezu von $55,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (Juni 2001) auf $99,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (Juni 2002). Gegenüber Juni 2002 war im Juni des Jahres 2003 jedoch wieder eine leichte Abnahme der N-Menge auf $81,2 \text{ kg ha}^{-1}$ zu verzeichnen.

Tab. 9: Stickstoffmengen im Aufwuchs der sechs Hauptuntersuchungsflächen (Juni-Ernten in den Jahren 2001 bis 2003).

	2001			2002			2003		
Fläche	N-Menge (kg ha^{-1})			N-Menge (kg ha^{-1})			N-Menge (kg ha^{-1})		
Pellingen 2	42,0	A	a	48,1	AC	b	37,8	A	a
Pellingen 1	52,4	B	a	37,9	B	b	33,0	A	b
Oberemmeler Berg	54,1	B	a	45,2	AB	b	34,6	A	c
Hockweiler	55,5	B	a	99,9	D	b	81,2	C	ab
Waldweiler	57,0	ABC	a	46,3	BC	a	47,4	B	a
Gutweiler	69,9	C	a	53,7	C	b	45,5	AB	c

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Großbuchstaben für Unterschiede zwischen den Flächen eines Jahres, Kleinbuchstaben für Unterschiede zwischen den Jahren)

Für das Jahr 2001 wurden die N-Mengen im zweiten Aufwuchs ermittelt (Anhang, Tab. A6). Die N-Mengen des August-Schnittes lagen zwischen $18,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Fläche Oberemmeler Berg) und $31,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (Fläche Hockweiler) und betrugen damit etwa die Hälfte der N-Mengen aus der Juni-Ernte dieses Jahres. Die Jahressumme der N-Mengen aus beiden Ernten des Jahres 2001 war für Fläche Gutweiler mit $100,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ am größten, für Fläche Pellingen 2 mit $63,5 \text{ kg ha}^{-1}$ am geringsten.

5.3.1.2 Nebenuntersuchungsflächen

Die Stickstoffmengen im Aufwuchs der zehn im Juni 2002 zusätzlich untersuchten Flächen sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die geringste N-Menge wurde mit 37,1 kg N ha⁻¹ für die Fläche Pellingen 5 ermittelt. Die Fläche Gusterath 1 zeigte mit 45,0 kg N ha⁻¹ eine signifikant höhere N-Menge als die Fläche Pellingen 5. Die Flächen Züsch 2, Gusterath 2 und 3 und Pellingen 3 wiesen im Erntegut N-Mengen zwischen 50 und 60 kg ha⁻¹ auf. Die Flächen Pellingen 4, Züsch 1 und Muhl 1 zeigten im Schnittgut N-Mengen zwischen 60 und 70 kg ha⁻¹. Die höchste N-Menge wurde im Pflanzenaufwuchs der Fläche Muhl 2 mit 76,2 kg ha⁻¹ nachgewiesen.

Im Jahr 2003 wurden fünf der Flächen erneut untersucht. Die N-Mengen im Erntegut der Wiesen unterschieden sich in diesem Jahr nicht signifikant voneinander und lagen im Bereich von 34,3 kg ha⁻¹ (Fläche Gusterath 3) bis 40,2 kg N ha⁻¹ (Fläche Züsch 2). Die N-Mengen im Aufwuchs der Flächen Pellingen 5 und Gusterath 1 haben sich zwischen Juni 2002 und Juni 2003 nicht signifikant verändert. Auf den Flächen Züsch 2 sowie Gusterath 2 und 3 war eine signifikante Abnahme der N-Menge im Juni 2003 gegenüber Juni 2002 zu verzeichnen. Die N-Mengen im Schnittgut sanken um 11,1 kg ha⁻¹ (Fläche Züsch 2), 16,6 kg ha⁻¹ (Fläche Gusterath 2) und 18,0 kg ha⁻¹ (Fläche Gusterath 3).

Tab. 10: Stickstoffmengen im Aufwuchs der Nebenuntersuchungsflächen (Juni-Ernten in den Jahren 2002 und 2003).

	2002			2003		
Fläche	N-Menge (kg ha ⁻¹)			N-Menge (kg ha ⁻¹)		
Pellingen 5	37,1	A	a	39,1	A	a
Gusterath 1	45,0	B	a	37,3	A	a
Züsch 2	51,3	BC	a	40,2	A	b
Gusterath 3	52,3	C	a	34,3	A	b
Gusterath 2	52,9	BC	a	36,3	A	b
Pellingen 3	57,3	CD		k.P.		
Pellingen 4	65,8	DE		k.P.		
Züsch 1	67,0	DE		k.P.		
Muhl 1	69,1	EF		k.P.		
Muhl 2	76,2	F		k.P.		

k.P.: keine Probenahme

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test mit $P < 0,05$ (Großbuchstaben für Unterschiede zwischen den Flächen eines Jahres), Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Kleinbuchstaben für Unterschiede zwischen den Jahren)

5.3.2 N-Anteile der funktionellen Gruppen an der gesamten N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse

5.3.2.1 Hauptuntersuchungsflächen

Tabelle 11 gibt die prozentualen Anteile der funktionellen Gruppen an der Gesamtstickstoffmenge in der oberirdischen Biomasse wieder. Die Leguminosen enthielten im Juni 2001 zwischen 8,2 und 29,0 % der N-Menge des gesamten Schnittguts. Die Kräuter zeigten Anteile zwischen 18,9 und 45,4 % und die Gräser Anteile zwischen 42,9 und 72,9 % an der gesamten N-Menge im Aufwuchs. Im Juni 2002 lag der N-Anteil der Leguminosen an der oberirdischen N-Menge bei 3,9 bis 16,6 %, der N-Anteil der Kräuter bei 20,7 bis 43,4 % und der N-Anteil der Gräser bei 44,7 bis 75,3 %. Für die Juni-Ernte des Jahres 2003 wurde ein N-Anteil der Leguminosen in Höhe von 1,0 bis 30,7 %, ein N-Anteil der Kräuter in Höhe von 8,7 bis 46,5 % und ein N-Anteil der Gräser in Höhe von 38,7 bis 90,2 % an der gesamten N-Menge der oberirdischen Pflanzenmasse ermittelt.

Tab. 11: Anteile der funktionellen Gruppen an der gesamten N-Menge der oberirdischen Biomasse in den drei Untersuchungsjahren (Juni-Ernten, Hauptuntersuchungsflächen).

Fläche	2001			2002			2003		
	N-Anteil (%)			N-Anteil (%)			N-Anteil (%)		
	Legu- minosen	Kräuter	Gräser	Legu- minosen	Kräuter	Gräser	Legu- minosen	Kräuter	Gräser
Waldweiler	29,0	23,7	47,3	16,6	26,0	57,4	19,7	21,6	58,7
Hockweiler	17,5	31,7	50,8	3,9	20,7	75,3	1,0	8,7	90,2
Pellingen 1	11,7	45,4	42,9	11,9	43,4	44,7	10,5	40,5	49,0
Oberemmeler Berg	10,9	35,4	53,7	10,3	33,6	56,1	12,8	46,5	40,7
Pellingen 2	9,6	23,9	66,5	10,9	35,1	54,0	15,2	36,7	48,1
Gutweiler	8,2	18,9	72,9	11,5	30,7	57,8	30,7	30,6	38,7

Für die Fläche Hockweiler war ein signifikanter Rückgang ($P \leq 0,001$) des N-Anteils der Leguminosen am gesamten Schnittgut-N von 17,5 % im Juni 2001 auf 3,9 % im Jahr 2002 bzw. 1,0 % im Jahr 2003 zu verzeichnen (Statistik im Anhang, Tab. A7). Ein Anstieg des N-Anteils der Leguminosen an der N-Menge in der gesamten oberirdischen Pflanzenmasse von 8,2 auf 30,7 % wurde auf der Fläche Gutweiler beobachtet. Das Ergebnis war jedoch nicht signifikant, da der sehr hohe N-Anteil im Jahr 2003 durch einen Extremwert beim Ertragsanteil der Leguminosen (85 %) in einer Ernteparzelle mit verursacht wurde. Wird diese Ernteparzelle nicht berücksichtigt, liegt der mittlere N-Anteil der Leguminosen an der N-Menge des Ernteguts im Jahr 2003 bei 12,7 %. Die übrigen Flächen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsjahren ($P > 0,05$).

Im August-Schnitt des Jahres 2001 lag der N-Anteil der Leguminosen an der gesamten N-Menge im Aufwuchs der Wiesen mit 16,8 bis 43,0 % (Anhang, Tab. A8) deutlich über dem N-Anteil der Leguminosen an der N-Menge im Schnittgut der Juni-Ernte 2001 (8,2 bis 29,0 % N-Anteil). Der N-Anteil der Kräuter an der gesamten oberirdischen N-Menge war im August mit 23,5 bis 62,9 % ebenfalls höher als im Juni (18,9 bis 45,4 %). Der N-Anteil der Gräser an

der gesamten N-Menge fiel dementsprechend im August mit 20,3 bis 45,7 % geringer aus als im Juni (42,9 bis 72,9 %).

5.3.2.2 Nebenuntersuchungsflächen

Auf den Nebenuntersuchungsflächen (Tab. 12) wurde im Juni 2002 ein N-Anteil der Leguminosen an der gesamten N-Menge im Aufwuchs zwischen 7,0 und 25,5 % ermittelt. Die Kräuter wiesen einen N-Anteil von 7,7 bis 53,5 % und die Gräser einen Anteil von 21,0 bis 85,3 % an der gesamten N-Menge im Erntegut auf.

Tab. 12: Anteile der funktionellen Gruppen an der gesamten N-Menge der oberirdischen Biomasse auf den Nebenuntersuchungsflächen.

Fläche	2002			2003		
	N-Anteil (%)			N-Anteil (%)		
	Leguminosen	Kräuter	Gräser	Leguminosen	Kräuter	Gräser
Gusterath 2	25,5	53,5	21,0	21,0	65,4	13,7
Gusterath 1	25,3	30,8	43,9	32,5	29,2	38,3
Muhl 1	20,1	26,7	53,1	k.P.	k.P.	k.P.
Muhl 2	19,7	19,7	60,6	k.P.	k.P.	k.P.
Pellingen 3	17,5	29,5	53,0	k.P.	k.P.	k.P.
Pellingen 5	15,1	24,2	60,7	33,9	17,5	48,6
Gusterath 3	10,8	47,7	41,5	12,2	54,9	32,9
Züsch 2	9,4	18,4	72,2	7,8	25,2	67,0
Pellingen 4	9,2	26,5	64,3	k.P.	k.P.	k.P.
Züsch 1	7,0	7,7	85,3	k.P.	k.P.	k.P.

k.P.: keine Probenahme

Im Juni 2003 wurde für die fünf beprobten Flächen ein N-Anteil der Leguminosen an der gesamten N-Menge der oberirdischen Pflanzenmasse von 7,8 bis 33,9 % nachgewiesen. Die Kräuter zeigten einen N-Anteil in Höhe von 17,5 bis 65,4 % und die Gräser hatten einen N-Anteil von 13,7 bis 67,0 % an der Schnittgut-N-Menge. Für die funktionelle Gruppe der Leguminosen war vom Jahr 2002 zum Jahr 2003 für die Fläche Pellingen 5 ein signifikanter Anstieg des N-Anteils von 15,1 auf 33,9 % an der gesamten N-Menge des Ernteguts zu verzeichnen (Statistik im Anhang, Tab. A9).

5.3.3 Beziehung zwischen der Leguminosenmasse und der N-Menge im Aufwuchs

Es sollte geprüft werden, inwieweit die Höhe der Leguminosenmasse (mit hohen pflanzlichen N-Gehalten) einen Einfluss auf die Höhe der N-Menge des gesamten Aufwuchses hatte. In Tabelle 13 sind Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Ernten der Jahre 2001 bis 2003 dargestellt. Die durch das Bestimmtheitsmaß angegebene Beziehung zwischen den Variablen „Leguminosen-Trockenmasse“ und „N-Menge im Aufwuchs der Wiese“ war bei den Juni-Ernten sehr schwach ($R^2 = 0,03$ im Juni 2001 und 2002) bis schwach ($R^2 = 0,12$ in 2003). Die Leguminosenmasse übte demnach keinen Einfluss auf die N-Menge im Aufwuchs aus.

In den Jahren 2002 und 2003 stellten die hohen N-Mengen der Fläche Hockweiler (Gülle-düngung im Herbst 2001) Extremwerte dar. Die Regressionsanalyse wurde zusätzlich ohne

diese Extremwerte durchgeführt. Die Beziehungen wurden hierdurch enger ($R^2 = 0,24$ im Juni 2002 und $R^2 = 0,19$ im Juni 2003), jedoch wurde kein signifikanter Einfluss ($P > 0,05$) der Leguminosenmasse auf die N-Menge im Aufwuchs beobachtet.

Für die August-Ernte im Jahr 2001 zeigte die Regressionsanalyse einen signifikant positiven Einfluss der Leguminosenmasse auf die Stickstoffgesamtmenge ($R^2 = 0,69$; $P = 0,04$) im Aufwuchs der Wiesen.

Tab. 13: Beziehung (Regression) zwischen Leguminosen-TM (dt ha^{-1}) und N-Menge (kg ha^{-1}) der Gesamtbiomasse.

	2001						2002			2003		
	Juni			August			Juni			Juni		
	R^2	P	n	R^2	P	n	R^2	P	n	R^2	P	n
alle Flächen	0,03	0,740	6	0,69	0,040	6	0,03	0,527	16	0,12	0,289	11
ohne Extremwert ¹⁾							0,24	0,066	15	0,19	0,204	10

¹⁾ Fläche Hockweiler nach Gülldüngung

5.4 Stickstoff-Isotopensignaturen und Stickstoff-Gehalte in Leguminosen und Nicht-Leguminosen

Das Verhältnis von ^{15}N zu ^{14}N im pflanzlichen Stickstoff wurde für ausgewählte Arten (Kap. 5.4.1 und 5.4.2) und für die Pflanzengruppen Leguminosen, sonstige Kräuter und Gräser (Kap. 5.4.3) bestimmt.

5.4.1 N-Isotopensignaturen in Leguminosen und Nicht-Leguminosen im Freiland

Ziel der Untersuchung war das Auffinden einer geeigneten Nicht-Leguminose als Referenzpflanze für die Schätzung der N_2 -Fixierungsleistung der Leguminosen. Als geeignet für die Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode nach SHEARER & KOHL (1986) gilt eine Pflanzenart (ohne Befähigung zur N_2 -Fixierung) mit einer Differenz von mindestens 2 ‰ zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des fixierten Stickstoffs ($\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminose aus N_0 -Anzucht, B-Wert, siehe Kap. 6.3.2).

In den ersten beiden Versuchsjahren wurde auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen (und vier weiteren Flächen im Jahr 2002) Sprossmaterial der häufig vorkommenden Leguminosenarten und mehrerer häufiger Nicht-Leguminosen gesammelt. Pro Fläche wurde für jede Art eine Mischprobe aus Material von 15 bis 20 Pflanzen hergestellt, um die Kosten der Isotopenanalysen gering zu halten. Eine Aussage über die Variabilität einer Art auf den einzelnen Versuchsflächen kann daher nicht gemacht werden. Es wurde jedoch ermittelt, welche der untersuchten Nicht-Leguminosen in ihrem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert die größte Differenz zu den Leguminosen aufwies.

Abbildung 4 zeigt die N-Isotopensignaturen der Sprossmasse als $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (Mittelwerte von $n = 3$ bis 10 Flächen). Einzelwerte für jede Untersuchungsfläche finden sich in Tab. A10 (Anhang). Die untersuchten Leguminosenarten wiesen mit einer Ausnahme (*Lotus*

corniculatus, abgekürzt Lo co) höhere ^{15}N -Gehalte als die Nicht-Leguminosen auf. Die *Trifolium*-Arten (*Trifolium repens* Tr re, *Trifolium dubium* Tr du, *Trifolium pratense* Tr pr), die *Vicia*-Arten (*Vicia cracca* Vi cr, *Vicia sepium* Vi se) sowie *Lathyrus linifolius* (La li) zeigten $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwerte im Bereich zwischen -0,30 ‰ (*Vicia sepium* im Juni 2001) und -1,42 ‰ (*Trifolium repens* im Juni 2002). Bei den Spannweiten der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf den unterschiedlichen Versuchsflächen gab es geringere Unterschiede bei den Leguminosen als bei den Nicht-Leguminosen. Aus der Gruppe der Nicht-Leguminosen hat sich *Plantago lanceolata* (Pl la) mit Werten von -4,14 ‰ im Juni 2001 und -3,59 ‰ im Juni 2002 als die Art mit dem niedrigsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Spross und der größten $\delta^{15}\text{N}$ -Differenz zu den Leguminosen herausgestellt.

Sanguisorba minor (Sa mi) zeigte $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwerte von -2,68 ‰ im Jahr 2001 und -3,01 ‰ im Jahr 2002. Für *Leucanthemum vulgare* (Le vu) wurde ein $\delta^{15}\text{N}$ -Wert in Höhe von -2,99 ‰ (Jahr 2002) festgestellt. *Galium mollugo* (Ga mo) wies im Jahr 2001 einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -2,18 ‰ und im Jahr 2002 einen Wert von -1,77 ‰ auf. Als einzige Gräserart wurde *Holcus lanatus* (Ho la) untersucht. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwert dieser Art lag im Jahr 2001 mit -1,04 ‰ zwischen dem der Kräuter und der Leguminosen (Ausnahme *Lotus corniculatus*). Wegen der zu geringen Differenz zu den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Leguminosen wurde diese Art im folgenden Versuchsjahr nicht mehr berücksichtigt.

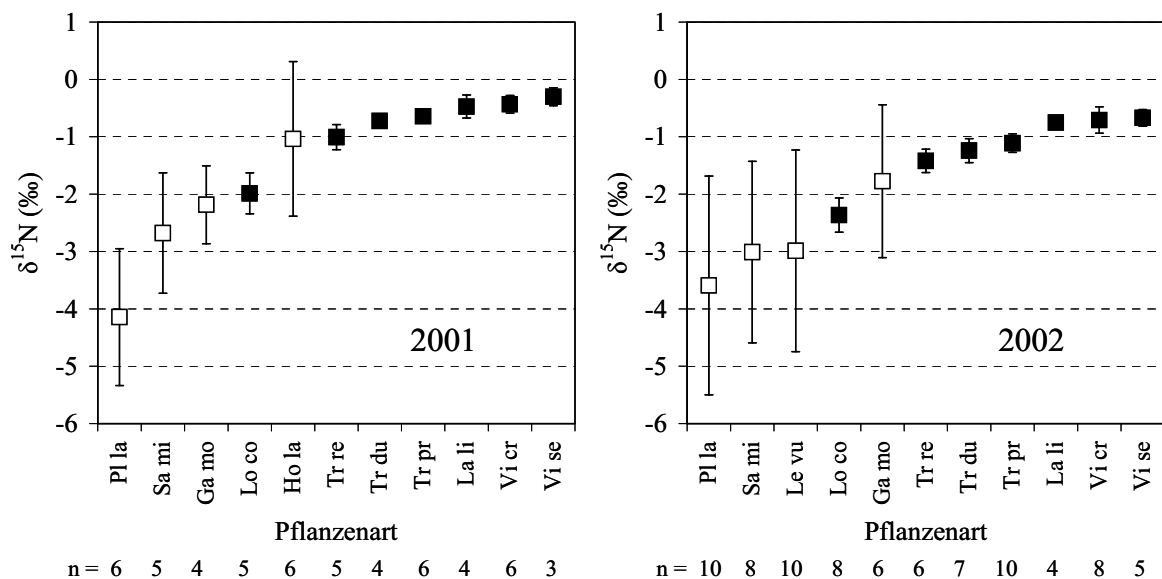


Abb. 4: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross von Leguminosen (■) und Nicht-Leguminosen (□) für die Termine Juni 2001 und Juni 2002, Mittelwerte mit Standardabweichung aus Mischproben (mindestens 15 Pflanzen pro Art) von n = 3 bis 10 Flächen.

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Leguminosen der Untersuchungsjahre 2001 und 2002 wurden gegen die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen mittels eines Allgemeinen linearen Modells (ALM) getestet. Das Untersuchungsjahr wurde als Zufallsvariable in das Modell einbezogen. Es wurde kein signifikanter Einfluss des Untersuchungsjahres auf die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte festgestellt. Die Werte beider Jahre wurden daher in der weiteren statistischen Auswertung (Post-Hoc-

Test T2 nach Tamhane) zusammengefasst. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert in der Sprossmasse von *Plantago lanceolata* war signifikant niedriger ($P < 0,001$) als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen mit Ausnahme von *Lotus corniculatus*. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Art *Sanguisorba minor* zeigte sich signifikant niedriger als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen *Trifolium pratense* und *T. dubium* ($P < 0,05$) sowie *Vicia cracca*, *V. sepium* und *Lathyrus linifolius* (jeweils $P < 0,01$), wies jedoch keinen signifikanten Unterschied zu *Trifolium repens* auf. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Nicht-Leguminose *Leucanthemum vulgare* war aufgrund der großen Streuung der Einzelwerte nicht signifikant niedriger als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von *Holcus lanatus* und *Galium mollugo* unterschieden sich ebenfalls nicht signifikant von den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Leguminosenarten. Innerhalb der Leguminosengruppe wies *Lotus corniculatus* einen signifikant niedrigeren $\delta^{15}\text{N}$ -Wert als die übrigen Leguminosen auf ($P < 0,001$).

Im Jahr 2002 wurden weitere Nicht-Leguminosen untersucht, die jedoch nicht in die statistische Auswertung einbezogen wurden. Die Asteraceenart *Leontodon hispidus* zeigte im Mittel mit -3,85 ‰ (Anhang, Tab. A10) noch niedrigere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als *Plantago lanceolata*, kam jedoch nur auf vier der Hauptuntersuchungsflächen und zwei weiteren Flächen vor. Eine *Centaurea*-Art konnte auf acht der zehn Flächen beprobt werden und wies im Mittel einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -3,01 ‰ auf, ähnlich den Arten *Sanguisorba minor* und *Leucanthemum vulgare* im gleichen Jahr.

Im Mittel wurde eine $\delta^{15}\text{N}$ -Differenz im Spross der Leguminosen zu *Plantago lanceolata* von 3,35 ‰ (2001), 2,41 ‰ (2002) und 2,74 ‰ (2003, 3. Termin) berechnet (Tab. 14). Die größte Differenz zeigte *Plantago lanceolata* im Jahr 2001 und 2002 zu der Art *Vicia sepium* (3,84 ‰ resp. 2,92 ‰). Ende Mai 2003 war die Differenz zwischen dem mittleren $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von *Plantago lanceolata* zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von *Lathyrus linifolius* mit 3,43 ‰ am größten. Die geringste Differenz bestand in allen drei Jahren zu *Lotus corniculatus* (1,23 bis 2,16 ‰).

Tab. 14: Mittlerer Differenzbetrag (‰) der einzelnen Leguminosenarten zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Spross von *Plantago lanceolata* auf jeder Fläche für die Termine Juni 2001, Juni 2002 und Mai 2003.

	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) Differenzbetrag zu <i>Plantago lanceolata</i> (Spross)		
	Juni 2001	Juni 2002	Ende Mai 2003
<i>Lotus corniculatus</i>	2,16	1,23	1,40
<i>Trifolium repens</i>	3,14	2,17	2,37
<i>Trifolium dubium</i>	3,42	2,35	k.P.
<i>Trifolium pratense</i>	3,50	2,48	2,81
<i>Lathyrus linifolius</i>	3,67	2,84	3,43
<i>Vicia cracca</i>	3,71	2,88	3,07
<i>Vicia sepium</i>	3,84	2,92	3,33
mittlere Differenz	3,35	2,41	2,74

k.P.: keine Probenahme

Die Berechnung der N_2 -Fixierungsleistung der Leguminosen (Kap. 5.5) wurde getrennt für jede Fläche mit *Plantago lanceolata* als Referenzpflanze durchgeführt. Eine Differenz von 5 ‰ konnte nur auf den Flächen Pellingen 1 und Pellingen 2 durch die sehr negativen $\delta^{15}\text{N}$ -

Werte dieser Art auf den beiden Flächen (-5,96 ‰ auf der Fläche Pellingen 1 im Jahr 2001 und -6,10 ‰ auf der Fläche Pellingen 2 im Jahr 2002, Anhang, Tab. A10) erreicht werden.

5.4.2 Zeitliche und innerpflanzliche Variabilität der N-Isotopensignatur

Im Versuchsjahr 2003 wurde an drei Terminen vor dem Juni-Schnitt (23. April, 7. und 28. Mai) Sprossmaterial und an einem Termin (28. Mai) zusätzlich Wurzelmaterial gesammelt, um Informationen über eine mögliche zeitliche oder innerpflanzliche Variabilität der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zu bekommen. Die Abbildung 5 gibt die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Sprossproben als Mittelwerte von zwei bis sieben Flächen für die drei Termine wieder. Im Vergleich der Termine konnten innerhalb einer Art keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden ($P > 0,05$; Kruskal-Wallis-Test).

Die Nicht-Leguminosen *Plantago lanceolata* und *Leucanthemum vulgare* wiesen Ende Mai im Spross geringere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf als Ende April. Bei *Plantago lanceolata* sank der Wert von -2,83 ‰ auf -3,56 ‰. Im Sprossmaterial von *Leucanthemum vulgare* wurde Ende April ein $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -2,16 ‰ und Ende Mai von -2,93 ‰ festgestellt. Die Art *Sanguisorba minor* zeigte einen leichten Anstieg des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes von -2,90 auf -2,82 ‰.

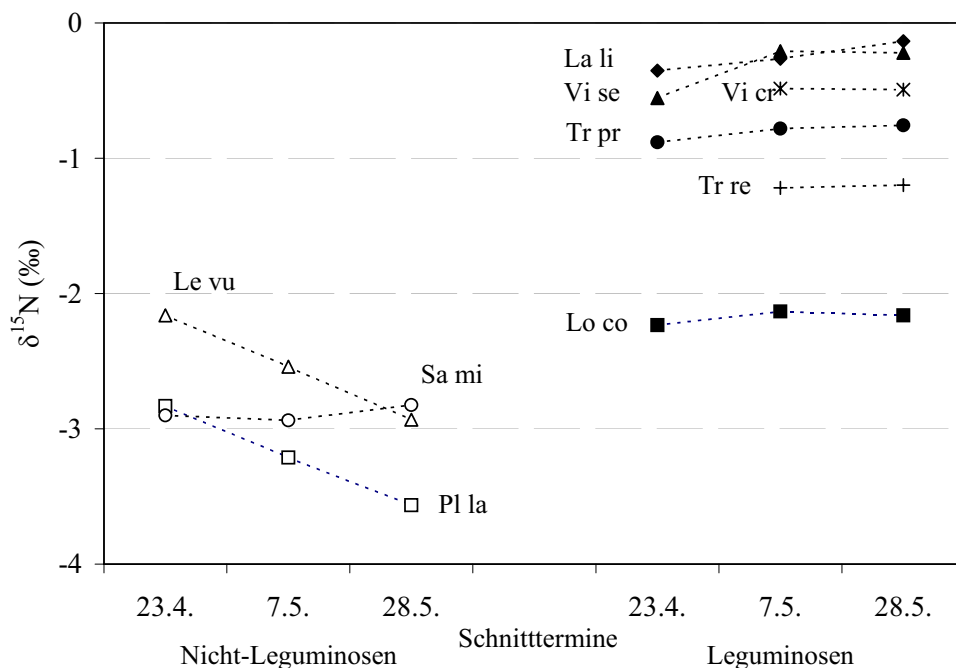


Abb. 5: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross von Leguminosen und Nichtleguminosen an drei Terminen (23.4., 7.5. und 28.5.2003), Mittelwerte aus Mischproben (mindestens 15 Pflanzen pro Art) von $n = 2$ bis 7 Flächen.

Bei den Leguminosen traten im Mai tendenziell höhere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf als Ende April. Im Sprossmaterial der Art *Vicia sepium* bewegte sich der Wert von -0,56 auf -0,23 ‰. *Lathyrus linifolius* zeigte einen Anstieg des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes von -0,35 auf -0,13 ‰. Bei *Trifolium pratense* stieg der Wert von -0,88 auf -0,76 ‰. Auch im Sprossmaterial von *Lotus corniculatus* wurde

ein leichter Anstieg des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes von -2,23 auf -2,16 ‰ registriert. Von den Arten *Vicia cracca* und *Trifolium repens* konnte beim ersten Termin Ende April noch kein Material gesammelt werden. An beiden Mai-Terminen wies *Vicia cracca* einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -0,49 ‰ auf. Der Wert im Spross von *Trifolium repens* war mit -1,22 ‰ Anfang Mai und -1,20 ‰ Ende Mai ebenfalls kaum verändert.

In Tabelle 15 sind die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross und in der Wurzel zum letzten Erntetermin Ende Mai 2003 dargestellt (Mittelwerte von Pflanzenmaterial mehrerer Flächen). Einzelwerte für jede Untersuchungsfläche sind in Tab. A10 (Anhang) aufgeführt. Beim Vergleich der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial der Arten ergibt sich ein ähnliches Muster wie für die Ergebnisse der Jahre 2001 und 2002. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen sind weniger negativ - und liegen somit näher am $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Standards Luft-Stickstoff (0 ‰) - als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Leguminosen. *Plantago lanceolata* zeigte mit -3,56 ‰ den niedrigsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Sprossmaterial. Die beiden Nicht-Leguminosen *Leucanthemum vulgare* (-2,93 ‰) und *Sanguisorba minor* (-2,82 ‰) wiesen im Spross ebenfalls niedrigere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf als die Leguminosen. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial der Leguminosen stiegen in der Reihenfolge *Lotus corniculatus* (-2,16 ‰), *Trifolium repens* (-1,20 ‰), *Trifolium pratense* (-0,76 ‰), *Vicia cracca* (-0,49 ‰), *Vicia sepium* (-0,23 ‰) und *Lathyrus linifolius* (-0,13 ‰) an.

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Wurzeln lagen mit Ausnahme der Art *Trifolium repens* im negativen Bereich (^{15}N -Abreicherung). Das Wurzelmaterial der Nicht-Leguminosen zeigte geringere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als die Wurzeln der Leguminosen. Im Einzelnen wurden Werte von -2,67 ‰ bei *Plantago lanceolata*, -2,66 ‰ bei *Leucanthemum vulgare* und -2,24 ‰ bei *Sanguisorba minor* ermittelt. Innerhalb der Gruppe der Leguminosen wies *Lotus corniculatus* mit -2,03 ‰ den niedrigsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Wurzelmaterial auf. *Lathyrus linifolius* zeigte einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -1,13 ‰ in der Wurzel. Die beiden *Vicia*-Arten wiesen mit -0,65 ‰ (*V. cracca*) und -0,74 ‰ (*V. sepium*) im Wurzelmaterial untereinander ähnliche $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf. Die insgesamt höchsten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte wurden im Wurzelmaterial der beiden *Trifolium*-Arten mit -0,37 ‰ (*T. pratense*) und +0,87 ‰ (*T. repens*) festgestellt. Der positive Mittelwert bei *Trifolium repens* setzt sich aus vier Einzelwerten in Höhe von +0,24 bis +2,26 ‰ zusammen.

Signifikant höhere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Wurzeln im Vergleich zum Spross zeigten die Arten *Trifolium pratense* und *Trifolium repens*. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Leguminosen und der Art *Lotus corniculatus* waren in der Wurzel tendenziell höher als im Spross. Dieser Unterschied war jedoch nicht statistisch absicherbar ($P > 0,05$). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der *Vicia*-Arten sowie der Art *Lathyrus linifolius* waren in der Wurzel tendenziell niedriger als im Spross.

Tab. 15: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross und in der Wurzel von Leguminosen und Nichtleguminosen am 28.5.2003, Mittelwerte mit Standardabweichung aus Mischproben (mindestens 15 Pflanzen pro Art) von $n = 3$ bis 7 Flächen.

28.05.03	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	n	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	n	Unterschied Spross / Wurzel
	im Spross		in der Wurzel		
<i>Plantago lanceolata</i>	-3,56 $\pm$ 1,99	7	-2,67 $\pm$ 1,52	7	n.s.
<i>Leucanthemum vulgare</i>	-2,93 $\pm$ 2,03	6	-2,66 $\pm$ 1,37	7	n.s.
<i>Sanguisorba minor</i>	-2,82 $\pm$ 0,94	7	-2,24 $\pm$ 1,06	6	n.s.
<i>Lotus corniculatus</i>	-2,16 $\pm$ 0,20	5	-2,03 $\pm$ 0,19	5	n.s.
<i>Trifolium repens</i>	-1,20 $\pm$ 0,32	4	+0,87 $\pm$ 0,94	4	*
<i>Trifolium pratense</i>	-0,76 $\pm$ 0,15	7	-0,37 $\pm$ 0,26	7	**
<i>Vicia cracca</i>	-0,49 $\pm$ 0,26	7	-0,65 $\pm$ 0,23	5	n.s.
<i>Vicia sepium</i>	-0,23 $\pm$ 0,07	4	-0,74 $\pm$ 0,08	3	n.s.
<i>Lathyrus linifolius</i>	-0,13 $\pm$ 0,09	3	-1,13 $\pm$ 0,05	3	n.s.

Signifikante Unterschiede zwischen Spross und Wurzel sind gekennzeichnet durch ** ($P < 0,01$); * ($P < 0,05$); n.s. nicht signifikant, Mann-Whitney U-Test

5.4.3 N-Isotopensignaturen verschiedener funktioneller Gruppen

Neben der Analyse der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte einzelner Arten wurden die Proben aus den Schnittparzellen der Juni-Ernten der Jahre 2001 und 2002 getrennt nach funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter und Gräser) auf ihre N-Isotopenzusammensetzung untersucht. Im folgenden Abschnitt werden die Spannen der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen und die $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwerte für jede Gruppe genannt, die anhand der Ernteparzellen aller Untersuchungsflächen bestimmt wurden. Die Einzelwerte sind Tabelle A13 (Anhang) zu entnehmen.

Das Leguminosen-Schnittgut wies überwiegend negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (< 0 ‰) auf (Tab. A13, Anhang). Die Leguminosen-Sprossmasse enthielt demzufolge weniger ^{15}N als der Standard Luft- N_2 . Im Juni 2001 wurden im Sprossmaterial der Leguminosen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen -2,02 ‰ und -0,13 ‰ ermittelt. Im Juni 2002 bewegten sich die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial der Leguminosen zwischen -2,58 ‰ und +0,24 ‰. Die Spanne der $\delta^{15}\text{N}$ -Einzelwerte (Parzellen) war bei den Kräutern mit -5,90 ‰ bis +0,53 ‰ im Juni 2001 und -7,23 ‰ bis +3,51 ‰ im Juni 2002 weiter als bei den Gräsern mit -5,34 ‰ bis -0,69 ‰ (Juni 2001) und -5,20 ‰ bis +3,08 ‰ (Juni 2002). Insgesamt wurden nur in wenigen Ernteproben bzw. auf wenigen Untersuchungsflächen positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte festgestellt. Auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen wurde im Juni 2001 lediglich in einer Kräuter-Probe ein positiver $\delta^{15}\text{N}$ -Wert bestimmt. Im Juni 2002 wiesen die Nicht-Fixierer der Fläche Hockweiler in der Sprossmasse fast ausschließlich positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf, wobei die Gräser-Sprossmasse noch höhere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zeigte als die Kräuter-Sprossmasse. Die Änderung der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte vom negativen zum positiven $\delta^{15}\text{N}$ -Bereich in den funktionellen Gruppen Kräuter und Gräser auf der Fläche Hockweiler ist höchstwahrscheinlich auf eine Gülledüngung der Wiese in der Zeit zwischen den beiden Probenahmen zurückzuführen. Die Düngung hat anscheinend die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Fixierer stärker beeinflusst als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen. Auf der

Fläche Muhl 2 wurden bei ca. 50 % der Ernteparzellen negative (bis $-2,04\text{‰}$) und zur anderen Hälfte positive (bis $+2,68\text{‰}$) $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in der Kräuter- und der Gräserprossmasse festgestellt. Nach Angaben des Nutzers wird diese Wiese gelegentlich mit Festmist gedüngt. Dies kann die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Pflanzen auf der Wiese kleinräumig beeinflusst haben. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwert für die Leguminosen aller Ernteparzellen lag im Juni 2001 für sechs Wiesen bei $-0,82\text{‰}$ und im Juni 2002 für 15 Wiesen bei $-0,79\text{‰}$. Die sonstigen Kräuter zeigten im Juni 2001 für die Ernteparzellen der sechs Wiesen einen $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwert in Höhe von $-2,92\text{‰}$ und im Juni 2002 für 15 Wiesen in Höhe von $-2,55\text{‰}$. Für die funktionelle Gruppe der Gräser wurde im Juni 2001 (sechs Wiesen) ein $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwert von $-2,61\text{‰}$ und im Juni 2002 (15 Wiesen) ein Mittelwert von $-1,77\text{‰}$ ermittelt.

In Tabelle 16 sind die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der drei funktionellen Gruppen (Mittelwerte der Ernteparzellen) je Untersuchungsfläche für die Versuchsjahre 2001 und 2002 vergleichend dargestellt. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwerte lagen bis auf wenige Ausnahmen (Kräuter- und Gräserfraktionen der Flächen Hockweiler und Muhl 2 im Jahr 2002) im negativen Wertebereich ($< 0\text{‰}$). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen bewegten sich im Jahr 2001 zwischen $-0,48\text{‰}$ (Fläche Waldweiler) und $-1,06\text{‰}$ (Fläche Hockweiler). In der funktionellen Gruppe Kräuter wiesen die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte eine Spanne von $-1,14\text{‰}$ (Fläche Waldweiler) bis $-4,35\text{‰}$ (Fläche Pellingen 2) auf. In der funktionellen Gruppe Gräser variierten die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Jahr 2001 zwischen $-1,38\text{‰}$ (Fläche Waldweiler) und $-3,91\text{‰}$ (Fläche Pellingen 1).

Im Jahr 2002 wurden für die funktionelle Gruppe Leguminosen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen $-0,28\text{‰}$ (Fläche Züschen 2) und $-2,04\text{‰}$ (Fläche Gusterath 2) nachgewiesen. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Kräuter variierten zwischen $+1,19\text{‰}$ (Fläche Hockweiler) und $-5,13\text{‰}$ (Fläche Pellingen 1). Die Gräser zeigten im Jahr 2002 $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen $+2,17\text{‰}$ (Fläche Hockweiler) und $-3,53\text{‰}$ (Fläche Gusterath 2).

Für die Berechnung der fixierten N-Menge sind insbesondere die Unterschiede zwischen den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der funktionellen Gruppen von Interesse, da größere Differenzen zwischen den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Leguminosen und Referenzpflanzen zu verlässlicheren Ergebnissen hinsichtlich der fixierten N-Anteile in der Leguminosen-Sprossmasse führen (siehe Kap. 6.3). Im Jahr 2001 zeigten die Leguminosen signifikant höhere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als die funktionellen Gruppen Kräuter und Gräser. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Kräuter waren auf fünf der sechs Flächen niedriger als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Gräser. Der Unterschied war jedoch nur für die Fläche Pellingen 2 signifikant. Auf der Fläche Waldweiler lag der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Kräuter mit $-1,14\text{‰}$ geringfügig aber nicht signifikant über dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Gräser ($-1,38\text{‰}$).

Tab. 16: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen für die Juni-Ernten der Jahre 2001 und 2002, Mittelwerte aus $n = 4$ bis 20 Schnittparzellen (nach $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Kräuter sortiert).

$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross der funktionellen Gruppen								
2001 (Juni)								
Fläche	Leguminosen			n	sonst. Kräuter			n
Waldweiler	-0,48 ± 0,24	a		8	-1,14 ± 0,77	b		8
Hockweiler	-1,06 ± 0,43	a		8	-2,25 ± 0,91	b		8
Gutweiler	-0,81 ± 0,68	a		7	-2,32 ± 0,74	b		8
Oberemmeler Berg	-0,93 ± 0,45	a		9	-3,27 ± 1,13	b		9
Pellingen 1	-0,80 ± 0,33	a		8	-4,15 ± 0,50	b		8
Pellingen 2	-0,82 ± 0,36	a		8	-4,35 ± 0,94	b		8
2002 (Juni)								
Fläche	Leguminosen			n	sonst. Kräuter			n
Hockweiler	-0,59 ± 0,53	a		5	+1,19 ± 1,04	b		10
Muhl 2	-0,33 ± 0,32	a		19	+0,09 ± 0,94	b		20
Waldweiler	-0,40 ± 0,26	a		18	-1,44 ± 1,44	b		20
Pellingen 3	-0,69 ± 0,24	a		13	-1,48 ± 0,77	b		15
Muhl 1	-0,75 ± 0,21	a		19	-1,54 ± 0,73	b		20
Züsch 2	-0,28 ± 0,26	a		16	-1,82 ± 0,96	b		20
Pellingen 4	-0,65 ± 0,30	a		19	-2,03 ± 0,77	b		20
Gutweiler	-0,82 ± 0,57	a		17	-2,76 ± 0,99	b		20
Gusterath 3	-1,33 ± 0,54	a		18	-3,14 ± 1,23	b		20
Pellingen 2	-0,52 ± 0,32	a		18	-3,34 ± 0,93	b		20
Oberemmeler Berg	-0,78 ± 0,26	a		18	-3,55 ± 0,87	b		20
Gusterath 1	-0,90 ± 0,36	a		20	-3,88 ± 0,66	b		20
Gusterath 2	-2,04 ± 0,44	a		19	-4,23 ± 0,91	b		20
Pellingen 5	-0,62 ± 0,19	a		4	-4,67 ± 0,90	b		4
Pellingen 1	-0,75 ± 0,19	a		18	-5,13 ± 0,96	b		20

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den funktionellen Gruppen, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$

Im Jahr 2002 zeigten die Leguminosen auf der Mehrzahl der Wiesen die höchsten, die Kräuter die niedrigsten und die Gräser mittlere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte. Von diesem Muster bildeten die beiden Flächen Hockweiler und Muhl 2 die Ausnahmen. Auf diesen Flächen lagen die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen zwar ebenfalls im negativen Wertebereich, die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Kräuter und der Gräser waren jedoch höher und lagen im positiven Wertebereich (> 0 ‰). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen und der Kräuter unterschieden sich auf allen Untersuchungsflächen im Jahr 2002 signifikant. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Gräser unterschieden sich mit Ausnahme der Flächen Pellingen 3 und Gusterath 3 signifikant von den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Leguminosen. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Kräuter waren auf 11 der 15 im Jahr 2002 untersuchten Flächen signifikant niedriger als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Gräser.

Für die Quantifizierung der Stickstoff-Fixierungsleistung der Leguminosen (Kap. 5.5) wurden diese Werte genutzt, indem je Fläche ein Mittelwert aus den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Kräuter- und Gräserfraktion gebildet und als Referenzwert ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Referenzpflanze}}$) in einer Berechnungsvariante verwendet wurde.

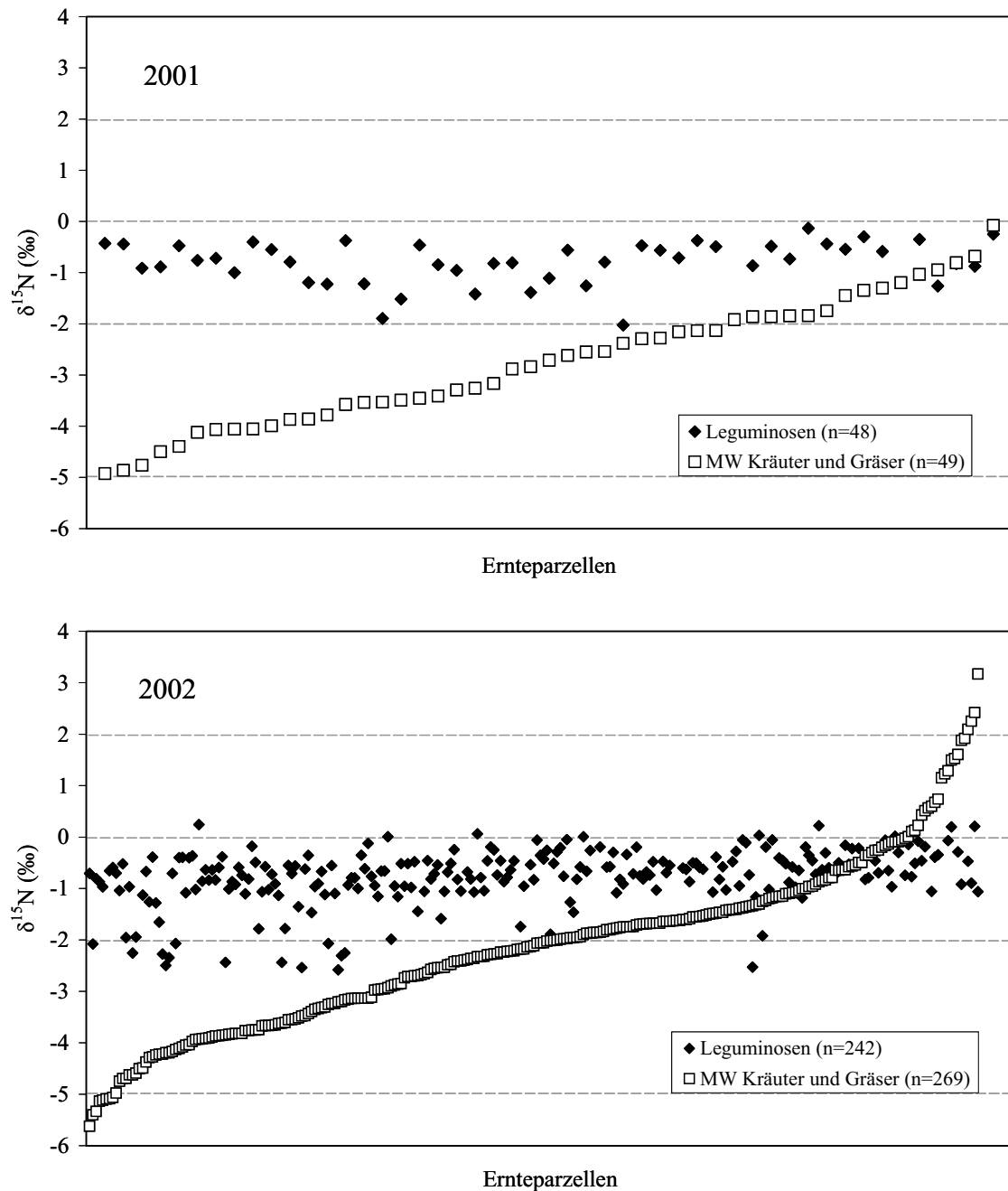


Abb. 6: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in der Sprossmasse der Leguminosen und gemittelter $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Nicht-Fixierer ($\delta^{15}\text{N}$ -Mittelwert Kräuter und Gräser) für jede Ernteparzelle. Im Jahr 2001 (obere Graphik): 49 Ernteparzellen, sechs Wiesen. Im Jahr 2002 (untere Graphik): 269 Ernteparzellen, 15 Wiesen. Sortierung nach $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Nicht-Fixierer. Leguminosen nicht in jeder Ernteparzelle enthalten.

In Abbildung 6 sind die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen für jede Ernteparzelle (d. h. Sprossmaterial einer bis mehrerer Leguminosenarten) sowie die gemittelten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Kräuter und der Gräser dargestellt (Werte im Anhang, Tab. A13). Die Daten sind so sortiert, dass erkennbar wird, wie groß die Unterschiede im $\delta^{15}\text{N}$ -Wert zwischen den gemittelten $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Nicht-Fixierer (MW Kräuter + Gräser als Referenzwert für die Berechnung der N_2 -Fixierung, siehe Kap. 5.5) und dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Luftstickstoffs (0 ‰) waren. Die unterbrochenen Querlinien bei +2, -2 und -5 ‰ kennzeichnen die für eine exakte Berechnung

der fixierten N-Menge empfohlene Mindestdifferenz von zwei δ -Einheiten (PEOPLES et al. 2002) bis fünf δ -Einheiten (HÖGBERG 1997) zwischen dem fixierten Luftstickstoff (= hypothetischer B-Wert von 0 ‰) und dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Nicht-Fixierer. Eine Differenz von mehr als 5 ‰ wird in natürlichen und halbnatürlichen Ökosystemen ohne eine Behandlung der Flächen mit ^{15}N -angereicherten oder ^{15}N -abgereicherten Stickstoffpräparaten häufig nicht erreicht. Von den 269 im Jahr 2002 untersuchten Ernteparzellen (bzw. von 242 Leguminosen-enthaltenden Parzellen) erfüllten weniger als 4 % das Kriterium einer 5 δ -Einheiten-Differenz (5 ‰).

Die Abbildung zeigt darüber hinaus die Lage der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen zueinander ($\delta^{15}\text{N}$ der Leguminosen > oder < $\delta^{15}\text{N}$ der Nicht-Fixierer). Diese Information ist wichtig für die Berechnung der symbiotisch fixierten N-Anteile, da bestimmte Konstellationen zu physiologisch nicht möglichen Ergebnissen (> 100 % oder < 0 % N-Anteil am N-Gesamtgehalt in der Pflanzenmasse) führten (siehe Kap. 5.5 und 6.3).

5.4.4 N-Isotopensignaturen und N-Gehalte in Leguminosenarten bei N_2 -Ernährung im Kulturversuch

Der Kulturversuch (N_0 -Anzucht) wurde durchgeführt, um die N-Isotopenwerte der Leguminosen bei reiner N-Ernährung aus symbiotischer N_2 -Fixierung zu ermitteln. Der erzielte $\delta^{15}\text{N}$ -Wert lässt eine potentielle Diskriminierung des schwereren ^{15}N -Isotops im Prozess der N_2 -Fixierung erkennen und fließt als Korrekturgröße (B-Wert) in die Berechnung der N_2 -Fixierungsleistung der Freilandleguminosen ein (SHEARER & KOHL 1991, HÖGBERG 1997).

Der Kulturversuch wurde in zwei Versuchsvarianten (VarB = Animpfung mit Bodenextrakt, VarR = Animpfung mit Radicin[®]-Produkten) durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Versuchsvarianten hinsichtlich der Biomasse (Anhang, Tab. A11) sind nicht direkt vergleichbar, da den Versuchen unterschiedliche Bedingungen zugrunde lagen (andere Gefäßgrößen und Pflanzenzahlen). Bei der Kulturdauer wurde darauf geachtet, dass die Pflanzen zum Zeitpunkt der Ernte ungefähr den gleichen Entwicklungszustand erreicht hatten. Daher wird eine Vergleichbarkeit der N-Gehalte und der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (Tab. 17) der Arten angenommen.

In der Variante Bodenextrakt-Animpfung wurde bei jeder Art in allen vier Parallelen Nodulation festgestellt. Die Art *Vicia sepium* konnte in dieser Variante nicht kultiviert werden, da nicht genügend geeignetes Samenmaterial zur Verfügung stand. In der Variante Radicin[®]-Animpfung waren bei den *Vicia*-Arten und *Lotus corniculatus* nur vereinzelt Wurzelknöllchen zu finden. Das hatte für *Vicia sepium* und *L. corniculatus* ein geringes Wachstum und schlechte Vitalität der Pflanzen zur Folge. Eine Isotopenanalyse war daher nicht sinnvoll. *Vicia cracca* war in dieser Variante zunächst gut gewachsen, zeigte aber nach sieben Wochen Blattschäden und wurde vorzeitig nach etwa zehn Wochen geerntet. Zu diesem Zeitpunkt waren nur in einem Gefäß Pflanzen mit Wurzelknöllchen zu finden (daher n=1 für den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert dieser Variante, Tab. 17).

Tab. 17: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte und N-Gehalte in Spross und Wurzel der Versuchspflanzen bei Kulturende. Versuchsvarianten: Radicin®- und Bodenextrakt-Animpfung. Dargestellt sind Mittelwerte aus $n = 4$ (1) Versuchstöpfen mit Standardabweichung (Sortierung nach $\delta^{15}\text{N}$ -Werten).

Animpfung mit Bodenextrakt		$\delta^{15}\text{N}$ -Wert (‰)				N-Gehalt (%)			
Leguminosenart	n	im Spross		in der Wurzel	Unterschied Spross / Wurzel	im Spross		in der Wurzel	Unterschied Spross / Wurzel
<i>Lotus corniculatus</i>	4	-2,44 ± 0,21	a	+1,74 ± 0,26	c **	2,94 ± 0,12	b	2,56 ± 0,14	b n.s.
<i>Lathyrus linifolius</i>	4	-1,59 ± 0,10	b	-1,25 ± 0,10	a *	2,49 ± 0,06	a	2,22 ± 0,01	a **
<i>Trifolium pratense</i>	4	-1,58 ± 0,12	b	-0,55 ± 0,16	b **	3,08 ± 0,12	b	2,67 ± 0,10	bc **
<i>Trifolium repens</i>	4	-1,55 ± 0,09	bc	-0,52 ± 0,22	b **	3,45 ± 0,08	c	2,87 ± 0,08	cd **
<i>Vicia cracca</i>	4	-1,34 ± 0,08	bc	-1,58 ± 0,10	a **	2,92 ± 0,12	b	2,95 ± 0,07	d n.s.
<i>Trifolium dubium</i>	4	-1,27 ± 0,16	c	-0,54 ± 0,09	b **	3,58 ± 0,16	c	3,15 ± 0,08	e **
Animpfung mit Radicin®		$\delta^{15}\text{N}$ -Wert (‰)				N-Gehalt (%)			
Leguminosenart	n	im Spross		in der Wurzel	Unterschied Spross / Wurzel	im Spross		in der Wurzel	Unterschied Spross / Wurzel
<i>Trifolium repens</i>	4	-1,78 ± 0,30	a	+1,64 ± 0,76	c **	3,06 ± 0,18	b	3,28 ± 0,24	c n.s.
<i>Trifolium dubium</i>	4	-1,40 ± 0,07	ab	-1,12 ± 0,17	ab *	3,46 ± 0,16	c	3,01 ± 0,15	c *
<i>Lathyrus linifolius</i>	4	-1,36 ± 0,22	b	-1,41 ± 0,10	a n.s.	2,66 ± 0,19	a	2,10 ± 0,17	a **
<i>Trifolium pratense</i>	4	-1,32 ± 0,10	b	-0,19 ± 0,61	b *	3,23 ± 0,15	bc	2,63 ± 0,07	b **
<i>Vicia cracca</i>	1	-0,95		-1,17		2,36		2,19	

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Arten, ANOVA und Tukey-Test mit $P < 0,05$

Unterschiede zwischen Spross und Wurzel sind gekennzeichnet durch ** ($P < 0,01$); * ($P < 0,05$); n.s. nicht signifikant, T-Test für gepaarte Stichproben

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Sprosse lagen ausnahmslos im negativen Bereich (^{15}N abgereichert). In der Bodenextrakt-Variante wurde der höchste $\delta^{15}\text{N}$ -Wert mit -1,27 ‰ bei der Art *Trifolium dubium* und der niedrigste mit -2,44 ‰ bei *Lotus corniculatus* festgestellt. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Sprosse von *Lathyrus linifolius* (-1,59 ‰), *Trifolium pratense* (-1,58 ‰), *Trifolium repens* (-1,55 ‰) und *Vicia cracca* (-1,34 ‰) unterschieden sich in dieser Versuchsvariante nicht signifikant voneinander. In der Radicin®-Variante konnten lediglich die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der drei *Trifolium*-Arten und von *Lathyrus linifolius* statistisch ausgewertet werden. Von diesen Arten wies *Trifolium pratense* mit -1,32 ‰ den höchsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wert auf. Dieser Wert und der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von *Lathyrus linifolius* (-1,36 ‰) unterschieden sich signifikant von dem in dieser Variante niedrigsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Art *Trifolium repens* (-1,78 ‰). *Trifolium dubium* unterschied sich mit einem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -1,40 ‰ im Spross nicht signifikant von den übrigen Arten. *Vicia cracca* zeigte einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert (Einzelwert!) von -0,95 ‰.

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Wurzeln befanden sich mit zwei Ausnahmen (*Lotus corniculatus* in der VarB und *Trifolium repens* in der VarR) ebenfalls im negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Bereich. In der Bodenextrakt-Variante zeigte *Lotus corniculatus* mit +1,74 ‰ einen signifikant höheren $\delta^{15}\text{N}$ -Wert als die übrigen Leguminosen. Der positive $\delta^{15}\text{N}$ -Wert bedeutet eine Anreicherung von ^{15}N gegenüber der Isotopenzusammensetzung des Luft- N_2 . Die drei *Trifolium*-Arten wiesen in dieser Variante untereinander sehr ähnliche $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf (*T. repens* -0,52 ‰, *T. dubium* -0,54 ‰, *T. pratense* -0,55 ‰). Diese Werte unterschieden sich signifikant von den niedrigeren $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Arten *Lathyrus linifolius* (-1,25 ‰) und *Vicia cracca* (-1,58 ‰). In der Radicin®-Variante wurde in den Wurzeln von *Trifolium repens* mit einem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von +1,64 ‰ eine Anreicherung des ^{15}N -Isotops festgestellt. Dieser positive $\delta^{15}\text{N}$ -Wert war

signifikant höher als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Arten *Trifolium pratense* (-0,19 ‰), *T. dubium* (-1,12 ‰) und *Lathyrus linifolius* (-1,41 ‰). (*Vicia cracca* wies in dieser Variante einen Wert (Einzelwert!) von -1,17 ‰ auf.)

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Sprosse unterschieden sich bei allen Arten mit Ausnahme von *Lathyrus linifolius* VarR signifikant von den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Wurzeln. Die Arten *Lotus corniculatus*, *Trifolium repens*, *T. pratense* und *T. dubium* wiesen im Spross signifikant niedrigere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte auf als in den Wurzeln. Bei *Vicia cracca* (VarB) wurde im Sprossmaterial ein signifikant höherer $\delta^{15}\text{N}$ -Wert festgestellt als im Wurzelmaterial ($P < 0,01$).

Die prozentualen N-Gehalte geben Aufschluss über den N-Ernährungszustand der Pflanzen. Bis auf geringe N-Vorräte, die in Samen vorhanden waren, mussten die Pflanzen ihren N-Bedarf über N_2 -Fixierung decken. Der höchste N-Gehalt im Spross wurde in beiden Versuchsvarianten bei der Art *Trifolium dubium* (3,58 % N in VarB, 3,46 % in VarR) gemessen. Alle drei *Trifolium*-Arten wiesen im Spross N-Gehalte über 3 % auf. *Lathyrus linifolius* zeigte in beiden Versuchsvarianten mit 2,49 % N (VarB) bzw. 2,66 % N (VarR) im Sprossmaterial signifikant geringere N-Gehalte als die *Trifolium*-Arten. Die Arten *Lotus corniculatus* und *Vicia cracca* waren nur in der VarB in allen vier Versuchsp parallelen gewachsen. Sie erreichten hier untereinander sehr ähnliche Spross-N-Gehalte (*Lotus corniculatus*: 2,94 % N, *Vicia cracca*: 2,92 % N), die nicht signifikant geringer waren als der N-Gehalt im Sprossmaterial von *Trifolium pratense*. Der Einzelwert von 2,36 % N im Spross von *Vicia cracca* in der Radicin®-Variante konnte nicht in die statistische Auswertung einbezogen werden.

Trifolium dubium wies in der Bodenextrakt-Variante mit 3,15 % N einen signifikant höheren N-Gehalt auf als die übrigen Leguminosen. *Lathyrus linifolius* zeigte in den Wurzeln einen signifikant geringeren N-Gehalt (2,22 % N) als die übrigen Arten. Mit 2,56 % N unterschied sich *Lotus corniculatus* nicht signifikant von *Trifolium pratense* (2,67 %). Jedoch war der N-Gehalt in der Wurzelmasse von *Lotus corniculatus* signifikant geringer als der N-Gehalt in den Wurzeln von *Trifolium repens* (2,87 % N) und *Vicia cracca* (2,95 % N). In der Radicin®-Variante wurde der höchste N-Gehalt mit 3,28 % im Wurzelmaterial von *Trifolium repens* festgestellt. Einen etwas geringeren N-Gehalt (3,01 %) zeigten die Wurzeln von *Trifolium dubium*. Die N-Gehalte in den Wurzeln von *Trifolium pratense* (2,63 %) und *Lathyrus linifolius* (2,10 %) waren signifikant geringer als die N-Gehalte im Wurzelmaterial von *T. dubium* und *T. repens*.

In beiden Versuchsvarianten wurden für *Lathyrus linifolius*, *Trifolium pratense* und *T. dubium* signifikant höhere N-Gehalte im Sprossmaterial als in den Wurzeln festgestellt ($P < 0,01$ bzw. $P < 0,05$). *Trifolium repens* zeigte in der Bodenextrakt-Variante ebenfalls signifikant höhere N-Gehalte im Spross gegenüber der Wurzel. Dagegen unterschieden sich die N-Gehalte in der Spross- und der Wurzelmasse bei *Trifolium repens* in der Radicin®-Variante sowie bei *Lotus corniculatus* und *Vicia cracca* in der Bodenextrakt-Variante nicht signifikant voneinander.

5.4.4.1 Vergleich der N-Gehalte der Leguminosen im Kulturversuch mit den N-Gehalten der Leguminosen auf den Versuchsflächen

Insgesamt haben die auf N-freiem Medium kultivierten Leguminosen mit im Mittel 3,08 % N-Gehalt (VarB) bzw. 2,95 % N (VarR) im Sprossmaterial die für Leguminosen im Freiland ermittelten N-Gehalte (Anhang, Tab. A12) annähernd erreicht. Die N-Gehalte in der Sprossmasse von *Trifolium repens*, *T. pratense* und *Lotus corniculatus* im Kulturversuch waren vergleichbar mit den N-Gehalten im Sprossmaterial dieser Arten im Freiland in den Jahren 2001 bis 2003. Die Weißkleeplanzen zeigten im Kulturversuch teilweise höhere N-Gehalte (3,06 bis 3,45 % N) im Spross als *Trifolium repens* im Freiland (2,90 % Juni 2002 bis 3,33 % August 2001). *Trifolium pratense* wies im Freiland mit mittleren Spross-N-Gehalten von 2,41 % (2002) bis 3,34 % (2001, Juni) zum Teil höhere und zum Teil geringere N-Gehalte auf als die Rotkleeplanzen im Kulturversuch (3,08 bis 3,23 % N). Für *Lotus corniculatus* wurden im Freiland mittlere N-Gehalte von 2,87 % (2002) bis 3,64 % (2001, Juni) im Spross festgestellt. Im Kulturversuch wurde im Sprossmaterial von *L. corniculatus* ein N-Gehalt in Höhe von 2,94 % gemessen. *Trifolium dubium* hat im Kulturversuch mit 3,46 bis 3,58 % höhere N-Gehalte im Spross erreicht als im Freiland (2,40 % N). Die Leguminosen *Lathyrus linifolius* und *Vicia cracca* zeigten im Kulturversuch mit 2,5 bis 2,7 % N bzw. 2,4 bis 2,9 % N geringere N-Gehalte im Spross als im Freiland (3,18 bis 3,58 % N bei *L. linifolius* und 3,73 bis 4,20 % N bei *V. cracca*).

Die N-Gehalte der Wurzeln der Kulturversuchspflanzen lagen im Mittel bei 2,74 % (VarB) bzw. 2,64 % (VarR). In den Wurzeln der Freiland-Leguminosen (ohne *Trifolium dubium*) wurde ein durchschnittlicher Stickstoffgehalt in Höhe von 2,57 % N ermittelt. Somit wiesen sowohl im Kulturversuch als auch im Freiland die Wurzeln der Leguminosen im Mittel geringere N-Gehalte auf als die Sprossmassen. Die höchsten N-Gehalte waren im Freiland in den Wurzeln der Arten *Trifolium repens* (2,99 % N) und *Vicia cracca* (2,92 % N) zu finden (Tab. A12, Anhang). *T. repens* zeigte im Kulturversuch mit 2,87 und 3,28 % N ähnlich hohe N-Gehalte in der Wurzel wie im Freiland. Im Wurzelmaterial von *Vicia cracca* wurden im Kulturversuch (VarB) mit 2,95% ebenso hohe N-Gehalte nachgewiesen wie bei *V. cracca* im Freiland. Das gleiche gilt für die N-Gehalte im Wurzelmaterial von *Lathyrus linifolius* (2,10 bis 2,22 % N im Kulturversuch, 2,27 % N im Freiland). Die N-Gehalte in den Wurzeln von *Lotus corniculatus* (2,56 % N) und *Trifolium pratense* (2,63 bis 2,67 % N) lagen im Kulturversuch nur wenig über den N-Gehalten der Freilandarten (*L. corniculatus* 2,27 % N, *T. pratense* 2,33 % N).

An den Wurzeln der Kulturversuchspflanzen waren gut entwickelte Wurzelknöllchen zu finden. Zudem zeigten die Leguminosen im Kulturversuch - bei Wachstum in N-freiem Substrat - mit den Freilandpflanzen vergleichbare N-Gehalte. Dies lässt auf eine aktive N₂-Fixierung der Knöllchenbakterien schließen.

5.4.5 Berechnung der Korrekturgröße für die N-Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung (B-Wert)

Die in Tabelle 17 aufgeführten Spross- $\delta^{15}\text{N}$ -Werte stellen die B-Werte der einzelnen Arten dar. Da auf den Wiesen Kombinationen mehrerer Leguminosenarten vorkamen, sollte ein gemeinsamer B-Wert verwendet werden. Tabelle 18 gibt die durch einfache Mittelwertbildung berechneten B-Werte der häufigen Leguminosen-Kombinationen an. Die B-Werte wurden aus den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten des Sprossmaterials berechnet. Die Wurzeln wurden nicht berücksichtigt, da auch im Freiland nur Sprossmaterial zur Berechnung der N₂-Fixierungsleistung geerntet wurde. Es wurden nur die Werte aus der Kulturvariante mit Bodenlösung-Animpfung herangezogen, da die Nodulierung mit Bakterienstämmen von dem tatsächlichen Untersuchungsstandort geeignetere Ergebnisse liefert als mit standortfremden (kommerziellen) Stämmen (HÖGBERG 1997, RIFFKIN et al. 1999a).

Tab. 18: Aus den Kulturversuchsdaten ($\delta^{15}\text{N}$) ermittelte Korrekturgrößen (B-Werte) für die Berechnung der Stickstoff-Fixierungsleistung der Leguminosen.

Leguminosenart	$\delta^{15}\text{N}$ -Werte (‰) im Spross [= B-Werte für Berechnung der N ₂ -Fixierleistung]				
	Arten einzeln	Mittelwert der kultivierten Arten	ohne <i>Lathyrus linifolius</i>	mit hypothetischem Wert für <i>Vicia sepium</i>	ohne <i>Lathyrus linifolius</i> mit <i>Vicia sepium</i>
<i>Trifolium pratense</i>	-1,58	-1,63	-1,64	-1,59	-1,59
<i>Trifolium repens</i>	-1,55				
<i>Trifolium dubium</i>	-1,27				
<i>Lathyrus linifolius</i>	-1,59				
<i>Lotus corniculatus</i>	-2,44				
<i>Vicia cracca</i>	-1,34				
<i>Vicia sepium</i> ¹⁾	-1,34				

Kulturvariante: Animpfung mit Bodenextrakt

¹⁾ hypothetischer Wert

Im Mittel der sechs erfolgreich kultivierten Arten ergab sich ein B-Wert von -1,63 ‰. Die Art *Lathyrus linifolius* kommt nur auf den Wiesen der höheren Lagen vor. Das Weglassen des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes dieser Art hatte nur einen geringen Einfluss auf den Mittelwert (-1,64 ‰). Die Art *Vicia sepium* konnte nicht erfolgreich kultiviert werden. Die N-Isotopenanalyse der Freilandproben (Kap. 5.4.1) hat für die beiden *Vicia*-Arten ähnliche $\delta^{15}\text{N}$ -Werte ergeben, die sich nicht signifikant unterschieden. Um die Art *Vicia sepium* mit in die Berechnung des B-Wertes einbeziehen zu können, wurde ein hypothetischer $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -1,34 ‰, der dem Wert von *V. cracca* in dieser Versuchsvariante entspricht, eingesetzt. Die vier Berechnungsvarianten des B-Wertes (mit/ohne *Lathyrus linifolius* bzw. *Vicia sepium*) unterschieden sich nicht signifikant ($P > 0,05$). Zur Quantifizierung der symbiotisch fixierten N-Menge in den Wiesen (Kap. 5.5) wurde daher als Korrekturgröße (B) der auf -1,6 ‰ gerundete Mittelwert verwendet.

5.4.6 Prozentualer N-Gehalt und Beziehung zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert

Die prozentualen N-Gehalte in der oberirdischen Biomasse wurden für einzelne Arten (Leguminosen und nicht-fixierende Pflanzen) sowie für die funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter und Gräser) bestimmt. Die N-Gehalte der ausgewählten Leguminosen und Nicht-Leguminosen sind für die drei Versuchsjahre 2001 bis 2003 in Tab. A12 (Anhang) aufgeführt. Neben den N-Gehalten der Sprossmasse wurde im Jahr 2003 zusätzlich die N-Gehalte im Wurzelmaterial der Pflanzenarten bestimmt.

Insgesamt wurden im Juni des Jahres 2001 auf sechs Wiesen, im Jahr 2002 auf zehn Wiesen und im Jahr 2003 auf sieben Wiesen verschiedene Leguminosen und Nicht-Leguminosen beerntet. Die N-Gehalte der Leguminosen waren in allen drei Jahren im Spross wie auch in der Wurzel signifikant höher als die N-Gehalte der Nicht-Leguminosen ($P < 0,001$). Die N-Gehalte der funktionellen Gruppen finden sich in Tab. A15 (Anhang).

5.4.6.1 Freilandpflanzen (Leguminosenarten und Nicht-Fixierer)

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte und prozentualen N-Gehalte der Freilandproben miteinander in Beziehung gesetzt. Die Symbole stehen für unterschiedliche Pflanzenarten aus der Gruppe der Leguminosen bzw. der nicht stickstofffixierenden Arten. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte finden sich in der Tab. A10, die N-Gehalte in Tab. A12 (Anhang). Jede analysierte Probe bestand aus Material von 15–20 Pflanzen jeder Art pro Fläche.

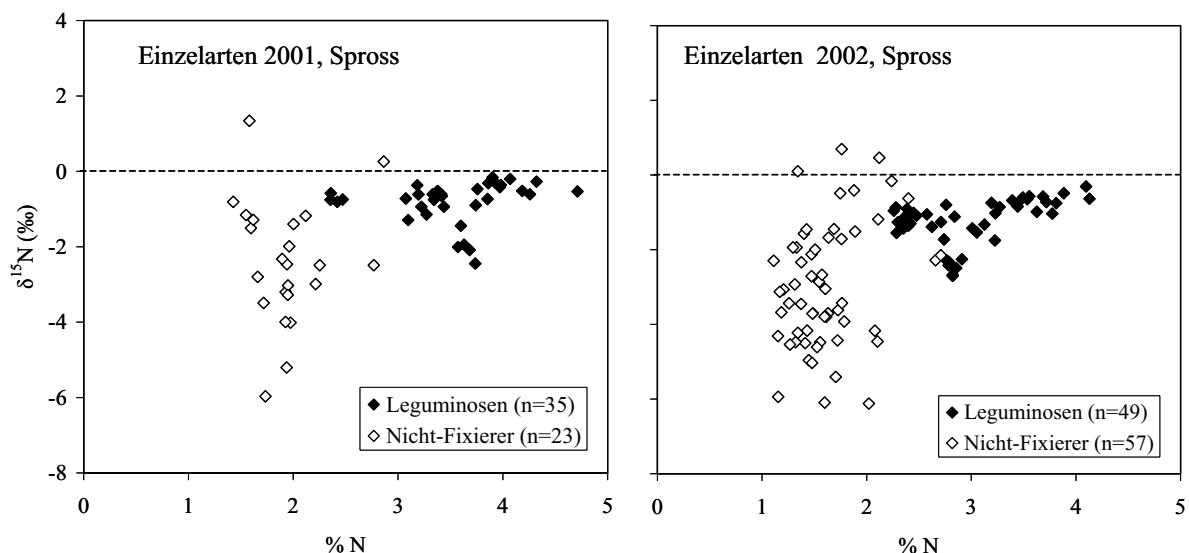


Abb. 7: Stickstoffgehalte (in %) und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial von Leguminosen und Nicht-Fixierern im Juni 2001 (linke Graphik, sechs Hauptuntersuchungsflächen) sowie im Juni 2002 (rechte Graphik, zehn Flächen). Dargestellt sind Werte einzelner Arten.

Die Leguminosen zeigten im Juni 2001 im Sprossmaterial N-Gehalte von 2,4 % bis 4,7 % und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen -0,16 ‰ und -2,45 ‰. Die N-Gehalte im Sprossmaterial der Nicht-Fixierer lagen im Juni 2001 zwischen 1,4 % und 2,9 %. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Fixierer

variieren zwischen $-5,96\text{ ‰}$ und $+1,34\text{ ‰}$. Die Parameter N-Gehalt und $\delta^{15}\text{N}$ -Wert zeigten im Juni 2001 eine schwache Korrelation ($r = 0,5$).

Im Juni 2002 wurden im Sprossmaterial der Leguminosen N-Gehalte von $2,2\text{ ‰}$ bis $4,1\text{ ‰}$ und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von $-2,70\text{ ‰}$ bis $-0,30\text{ ‰}$ festgestellt. Die Nicht-Fixierer wiesen N-Gehalte zwischen $1,1\text{ ‰}$ und $2,7\text{ ‰}$ und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von $-6,12\text{ ‰}$ bis $+0,70\text{ ‰}$ auf. Eine mittlere Korrelation zwischen den beiden Parametern N-Gehalt und $\delta^{15}\text{N}$ -Wert wurde für Juni 2002 festgestellt ($r = 0,6$).

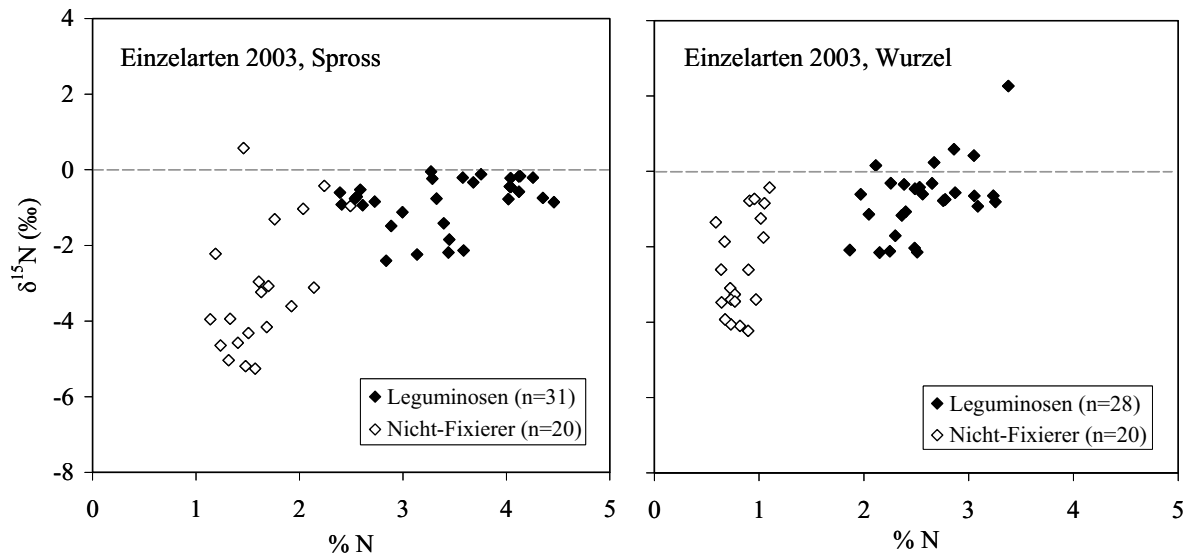


Abb. 8: Stickstoffgehalte (%) und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Spross- und Wurzelmaterial von Leguminosenarten und nicht-fixierenden Kräuterarten (sieben Wiesen, 2003). Dargestellt sind Werte einzelner Arten.

Im Jahr 2003 wurde sowohl Spross- als auch Wurzelmaterial der Pflanzen gesammelt und analysiert (Abb. 8). Die N-Gehalte im Sprossmaterial der Leguminosae lagen zwischen $2,4\text{ ‰}$ und $4,5\text{ ‰}$. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte variierten im Spross zwischen $-2,40\text{ ‰}$ und $-0,05\text{ ‰}$. Im Sprossmaterial der Nicht-Fixierer wurden N-Gehalte zwischen $1,1\text{ ‰}$ und $2,5\text{ ‰}$ ermittelt. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Fixierer lagen im Spross bei $-5,26\text{ ‰}$ bis $+0,57\text{ ‰}$. N-Gehalt und $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Sprossmaterial zeigten im Jahr 2003 eine mittlere Korrelation ($r = 0,66$).

Das Wurzelmaterial der Leguminosae enthielt $1,9$ bis $3,4\text{ ‰}$ N. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte lagen zwischen $-2,16\text{ ‰}$ und $+2,26\text{ ‰}$. Die Wurzeln der Nicht-Fixierer wiesen relativ geringe N-Gehalte zwischen $0,6\text{ ‰}$ und $1,1\text{ ‰}$ N auf. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Wurzelmaterial der Nicht-Fixierer variierten zwischen $-4,23\text{ ‰}$ und $-0,43\text{ ‰}$. Die Beziehung zwischen N-Gehalt und $\delta^{15}\text{N}$ -Wert ist im Wurzelmaterial enger ($r = 0,71$) als im Sprossmaterial.

5.4.6.2 Funktionelle Gruppen (Leguminosae, Kräuter, Gräser)

In Abbildung 9 sind die N-Gehalte und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen als Messwerte aller Ernteparzellen der Jahre 2001 (linke Graphik) und 2002 (rechte Graphik) dargestellt. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte können Tab. A13, die N-Gehalte Tab. A15 (Anhang) entnommen werden.

Wie schon anhand der Darstellungen der Beziehung zwischen N-Gehalt und $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Einzelarten (Leguminosen und Nicht-Fixierer, Kap. 5.4.6.1) zu sehen war, unterscheidet sich die funktionelle Gruppe der Leguminosen im N-Gehalt der oberirdischen Biomasse relativ deutlich von den beiden anderen funktionellen Gruppen ohne Fähigkeit zur symbiotischen N-Bindung. Im Jahr 2001 wiesen die Leguminosen in den Ernteparzellen N-Gehalte zwischen 2,4 und 4,5 % auf. Die funktionelle Gruppe Kräuter zeigte N-Gehalte von 1,5 bis 2,3 %. Die Gräser wiesen die insgesamt geringsten N-Gehalte auf (1,2 und 2,0 % N). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen in den Ernteparzellen lagen zwischen -2,02 ‰ und -0,13 ‰. Die Kräuter zeigten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen -5,90 ‰ bis +0,53 ‰. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Gräser variierten zwischen -5,34 ‰ und -0,69 ‰. Zwischen den N-Gehalten und den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten besteht insgesamt ein mittlerer Zusammenhang ($r=0,59$).

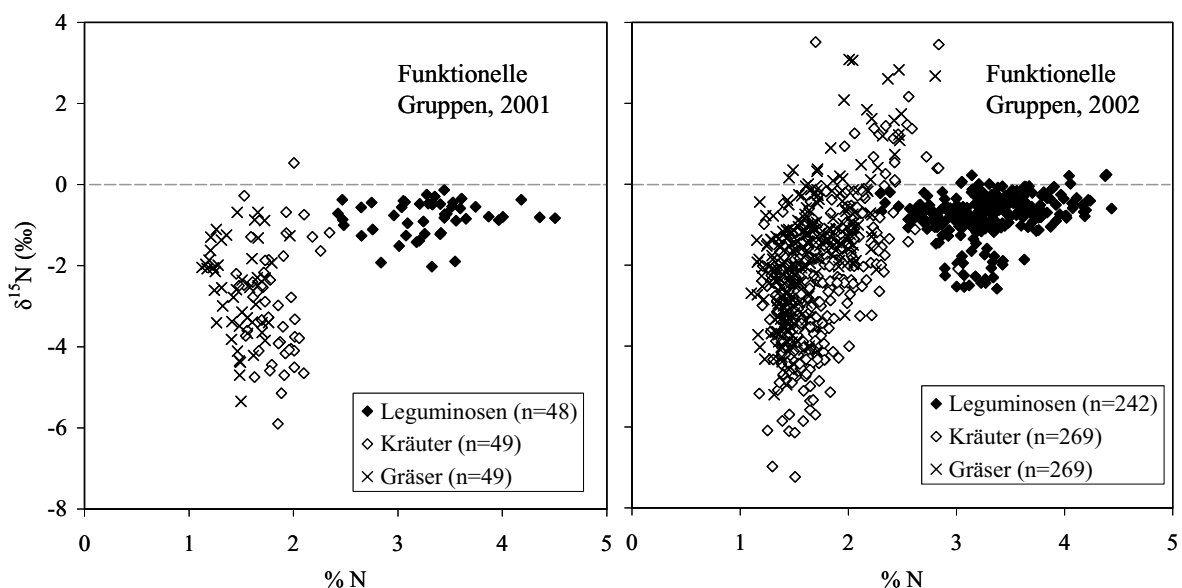


Abb. 9: Stickstoffgehalte (%) und $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in der oberirdischen Biomasse der Ernteparzellen. Die Symbole stehen für die je Parzelle geerntete Leguminosen-, Kräuter- bzw. Gräserprossmasse.

Im Jahr 2002 wurden in der funktionellen Gruppe der Leguminosen N-Gehalte zwischen 2,3 % und 4,4 % ermittelt. Die Kräuter der Ernteparzellen wiesen N-Gehalte in Höhe von 1,2 % bis 3,0 % auf. In der funktionellen Gruppe der Gräser bewegten sich die N-Gehalte zwischen 1,1 % und 2,8 %. Die Leguminosen der Ernteparzellen zeigten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen -2,58 ‰ und +0,24 ‰. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Kräuter lagen zwischen -7,23 ‰ und +3,51 ‰. Die Gräser zeigten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von -5,20 ‰ bis +3,08 ‰. Zwischen den N-Gehalten und den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten wurde insgesamt eine mittlere Korrelation ($r=0,54$) festgestellt.

5.4.6.3 Kulturversuchspflanzen (Leguminosenarten)

Ähnlich den Freilandleguminosen (Abb. 8) variieren auch bei den Kulturversuchsleguminosen die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in der Wurzel stärker als im Spross (Abb. 10). Zwischen den beiden Parametern prozentualer N-Gehalt und $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Pflanzenmaterial der auf N-freiem

Substrat kultivierten Leguminosen besteht kein linearer Zusammenhang. Eine Regressionsanalyse zeigte keinen signifikanten Einfluss des N-Gehaltes auf den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Sprossmaterial ($R^2 = 0,049$ und $P = 0,172$). Zwischen dem N-Gehalt und dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Wurzelmaterials wurde ebenfalls kein enger Zusammenhang festgestellt ($R^2 = 0,093$ und $P = 0,057$).

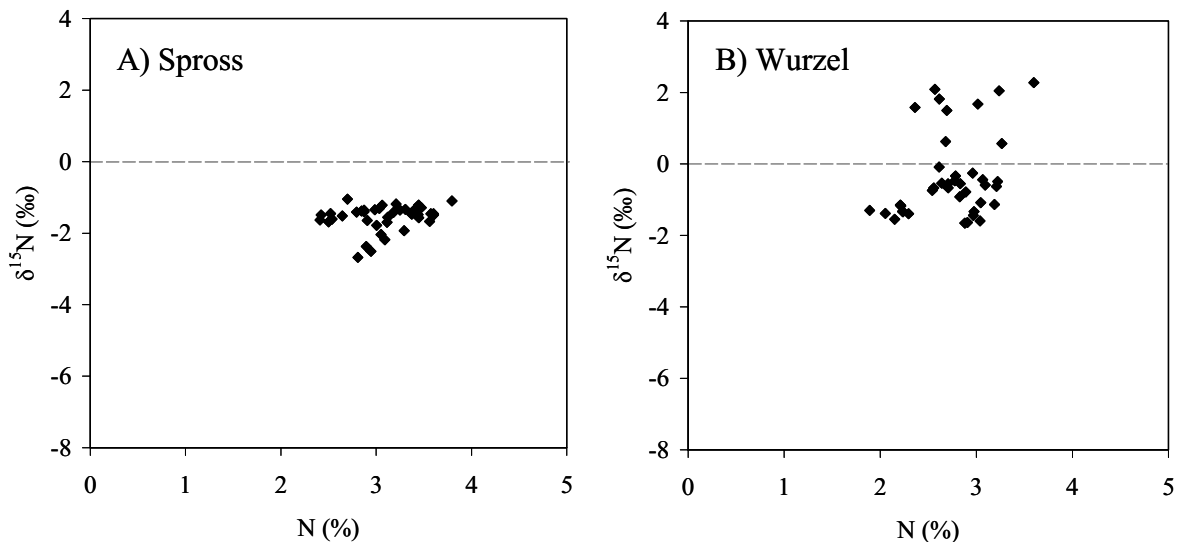


Abb. 10: Beziehung zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert (‰) und dem prozentualen N-Gehalt A) in der Sprossmasse und B) in der Wurzelmasse der auf N-freiem Substrat kultivierten Leguminosenarten, $n = 40$.

5.5 Symbiotisch fixierte Stickstoffmengen in den Wiesen

5.5.1 Quantifizierung und Berechnungsvarianten

Ein Ziel der Arbeit war die Quantifizierung der N-Mengen, die die Leguminosen durch symbiotische Stickstoff-Fixierung in die Wiesenbestände einbrachten. Die fixierten N-Mengen (Nfix) wurden mit der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (^{15}N natural abundance method) ermittelt. Grundlage der Berechnungen waren folgende Parameter: Schnittgut-Erträge (Kap. 5.1 und Kap. 5.2), N-Mengen im oberirdischen Pflanzenmaterial (Kap. 5.3), $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial von *Plantago lanceolata* sowie im Sprossmaterial der funktionellen Gruppen Leguminosen, sonstige Kräuter und Gräser (Kap. 5.4; Berechnungsformeln siehe Kap. 2.4.1.1 und Kap. 4.6.1).

Die Berechnung des fixierten N-Anteils (% Ndfa, nitrogen derived from the atmosphere) in der Leguminosenmasse lieferte zahlreiche ungültige Werte. Ndfa-Anteile $< 0\%$ oder $> 100\%$ am Gesamtstickstoffgehalt der Pflanzen sind physiologisch nicht möglich. Die ungültigen Werte entstanden vor allem bei der Berechnung mit dem im separaten Experiment bestimmten B-Wert in Höhe von $-1,6\%$ (Kap. 5.4.5). Lediglich für drei Wiesen (Flächen Hockweiler, Gusterath 2 und Muhl 2 im Juni 2002) wurden mit dem B-Wert $-1,6\%$ gültige Werte für die Höhe des fixierten N-Anteils in der Leguminosenmasse ermittelt. Der B-Wert fließt in die Berechnung des fixierten N-Anteils der Leguminosen als Korrekturwert für die

Stickstoff-Isotopenfraktionierung bei der N_2 -Fixierung ein. Findet keine Isotopenfraktionierung in diesem Prozess statt, wird der B-Wert mit 0 ‰ angegeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Berechnungen mit dem B-Wert -1,6 ‰ und ohne B-Wert (d. h. $B = 0,0 ‰$) vergleichend in den Tabellen aufgeführt. Für die Berechnung der fixierten N-Mengen in den Wiesen können nur die gültigen Ndfa-Werte genutzt werden.

5.5.2 Hauptuntersuchungsflächen

5.5.2.1 Fixierte N-Anteile (Ndfa) in der Leguminosenmasse

Für die sechs Hauptuntersuchungsflächen ergab die Berechnung mit der Referenz *Plantago lanceolata* im Juni 2001 höhere Ndfa-Anteile als die Berechnung mit der Referenz „Kräuter + Gräser“. Der höchste Ndfa-Anteil am Gesamt-N der Leguminosenmasse war in der Berechnungsvariante „*Plantago lanceolata*“ mit 86,6 % auf der Fläche Pellingen 1 gegeben (Tab. 19). Ähnlich hohe Ndfa-Anteile wurden für die Flächen Pellingen 2 (84,2 %) und Waldweiler (83,9 %) ermittelt. Der geringste Ndfa-Anteil wurde mit 69,5 % auf der Fläche Hockweiler festgestellt. In der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ bewegten sich die Anteile zwischen 51,6 % Ndfa (Fläche Hockweiler) und 80,2 % Ndfa (Fläche Pellingen 1).

Tab. 19: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N_2 -Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im Sprossmaterial der Leguminosen, sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni 2001 und im Juni 2002.

Ndfa (%) in der Leguminosenmasse der Hauptuntersuchungsflächen				
Juni 2001				
Fläche	Referenz <i>Plantago lanceolata</i>		Referenz Kräuter + Gräser	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Pellingen 1	86,6	(118,4)	80,2	(133,0)
Pellingen 2	84,2	(121,6)	78,6	(134,9)
Waldweiler	83,9	(180,5)	61,9	(-231,5)
Oberemmeler Berg	76,7	(127,6)	69,9	(144,2)
Gutweiler	74,8	(149,5)	61,6	(257,2)
Hockweiler	69,5	(128,4)	51,6	(189,6)
Juni 2002				
Fläche	Referenz <i>Plantago lanceolata</i>		Referenz Kräuter + Gräser	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Pellingen 2	91,4	(124,0)	83,1	(172,0)
Pellingen 1	83,7	(128,2)	82,6	(131,3)
Gutweiler	83,6	(123,4)	66,5	(194,3)
Oberemmeler Berg	82,6	(128,5)	74,5	(156,1)
Waldweiler	66,3	(-191,2)	69,8	(-341,4)
Hockweiler	(-45,2)	15,5	(135,3)	69,3

in Klammern: ungültige Werte

B: Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung bei der N_2 -Fixierung

Im Juni 2002 wurden für die sechs Hauptuntersuchungsflächen in der Berechnung mit *Plantago lanceolata* als Referenz Ndfa-Anteile in der Leguminosenmasse zwischen 15,5 % (Fläche Hockweiler, mit B-Wert) und 91,4 % (Fläche Pellingen 2) nachgewiesen. Während

im Juni 2002 die Flächen Pellingen 2, Gutweiler (83,6 %) und Oberemmeler Berg (82,6 %) höhere Ndfa-Anteile aufwiesen als im Juni 2001, zeigten die Flächen Waldweiler mit 66,3 %, Pellingen 1 mit 83,7 % und Hockweiler (15,5 %) im Jahr 2002 geringere Ndfa-Anteile als bei der Vorjahresernte. In der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ war die Differenz zwischen dem höchsten Ndfa-Anteil (Fläche Pellingen 2 mit 83,1 %) und dem niedrigsten Ndfa-Anteil (Fläche Hockweiler mit 69,3 %) in der Leguminosenmasse geringer als bei der Berechnung mit *Plantago lanceolata* als Referenz.

5.5.2.2 Fixierte N-Anteile (Ndfa) in der gesamten Erntemasse

Aus dem fixierten N-Anteil in den Leguminosen und dem Massenanteil der Leguminosen im Wiesenschnitt wurde der Ndfa-Anteil im gesamten Schnittgut berechnet. Entsprechend den gültigen Ndfa-Anteilen am Leguminosen-N wurden nur die daraus resultierenden Ndfa-Anteile und fixierten N-Mengen (Nfix) im Wiesenschnitt als gültige Werte angesehen. Die ungültigen Werte sind in den Tabellen dennoch zur Übersicht in Klammern angeführt.

Tab. 20: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N₂-Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im gesamten Wiesenschnitt, sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni 2001 und im Juni 2002.

Ndfa (%) im Wiesenschnitt der Hauptuntersuchungsflächen				
Juni 2001				
Fläche	Referenz <i>Plantago lanceolata</i>		Referenz Kräuter + Gräser	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Waldweiler	24,3	(52,3)	17,9	(-67,0)
Hockweiler	12,2	(22,4)	9,0	(33,2)
Pellingen 1	10,1	(13,80)	9,3	(15,5)
Oberemmeler Berg	8,4	(14,0)	7,6	(15,8)
Pellingen 2	8,1	(11,7)	7,5	(12,9)
Gutweiler	6,1	(12,3)	5,1	(21,2)
Juni 2002				
Fläche	Referenz <i>Plantago lanceolata</i>		Referenz Kräuter + Gräser	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Waldweiler	11,0	(-31,7)	11,6	(-56,6)
Pellingen 2	10,0	(13,5)	9,1	(18,8)
Pellingen 1	9,9	(15,2)	9,8	(15,6)
Gutweiler	9,6	(14,2)	7,6	(22,3)
Oberemmeler Berg	8,5	(13,3)	7,7	(16,2)
Hockweiler	(-1,8)	0,6	(5,3)	2,7

in Klammern: ungültige Werte

B: Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung

Der in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ ermittelte Ndfa-Anteil war für die meisten Flächen geringer als der mit der Referenzpflanze *Plantago lanceolata* berechnete Ndfa-Anteil. Der höchste fixierte N-Anteil an der Gesamtstickstoffmenge im Erntegut wurde im Juni 2001 auf der Fläche Waldweiler mit 24,3 % festgestellt (Referenzvariante *Plantago lanceolata*) (Tab. 20). Der relativ hohe Wert kam durch den höheren Leguminosenanteil in

den Ernteparzellen der Fläche Waldweiler zustande. Die Ndfa-Anteile auf den übrigen Flächen lagen mit 12,2 % (Fläche Hockweiler), 10,1 % (Fläche Pellingen 1), 8,4 % (Fläche Oberemmeler Berg) und 8,1 % (Fläche Pellingen 2) wesentlich niedriger. Der niedrigste Ndfa-Anteil wurde mit 6,1 % auf der Fläche Gutweiler beobachtet. In der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ wurden Anteile von 5,1 % Ndfa (Fläche Gutweiler) bis 17,9 % Ndfa (Fläche Waldweiler) ermittelt.

Im Juni 2002 wurde innerhalb der Hauptuntersuchungsflächen der geringste fixierte N-Anteil für die Fläche Hockweiler festgestellt (0,6 %, Referenzvariante *Plantago lanceolata*, mit B-Wert). In der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ hatte diese Fläche einen Ndfa-Anteil von 2,7 %. Den höchsten Ndfa-Anteil der Hauptuntersuchungsflächen wies die Fläche Waldweiler mit 11,0 bzw. 11,6 % auf. Die übrigen Flächen hatten in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* Ndfa-Anteile zwischen 8,5 und 10,0 % und in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ Ndfa-Anteile zwischen 7,6 und 9,8 %.

5.5.2.3 Fixierte N-Mengen (Nfix) in der Gesamtschnittmasse

Durch Multiplikation des Ndfa-Anteils mit der N-Menge in den Leguminosen wurde die fixierte N-Menge (Nfix) ermittelt. Die Berechnung mit *Plantago lanceolata* als Referenz ergab in fast allen Fällen höhere Werte als die Berechnung mit der Referenz „Kräuter + Gräser“. Ausnahmen bildeten die Flächen Hockweiler und Waldweiler im Juni 2002.

Tab. 21: Die durch Leguminosen fixierte N-Menge (Nfix) im Wiesenschnitt, sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni 2001 und im Juni 2002.

Nfix (kg ha ⁻¹) im Wiesenschnitt der Hauptuntersuchungsflächen				
Juni 2001				
Fläche	Referenz <i>Plantago lanceolata</i>		Referenz Kräuter + Gräser	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Waldweiler	13,8	(29,8)	10,2	(-38,2)
Hockweiler	6,7	(12,5)	5,0	(18,4)
Pellingen 1	5,3	(7,2)	4,9	(8,1)
Oberemmeler Berg	4,5	(7,6)	4,1	(8,5)
Gutweiler	4,3	(8,6)	3,5	(14,8)
Pellingen 2	3,4	(4,9)	3,2	(5,4)
Juni 2002				
Fläche	Referenz <i>Plantago lanceolata</i>		Referenz Kräuter + Gräser	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Gutweiler	5,2	(7,6)	4,1	(12,0)
Waldweiler	5,1	(-14,7)	5,4	(-26,2)
Pellingen 2	4,8	(6,5)	4,4	(9,0)
Oberemmeler Berg	3,9	(6,0)	3,5	(7,3)
Pellingen 1	3,8	(5,8)	3,7	(5,9)
Hockweiler	(-1,8)	0,6	(5,3)	2,7

in Klammern: ungültige Werte

B: Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung

Die fixierte N-Menge (Nfix) bewegte sich im Juni 2001 auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* zwischen 3,4 kg ha⁻¹ (Fläche Pellingen 2) und 13,8 kg ha⁻¹ (Fläche Waldweiler) bzw. 3,2 bis 10,2 kg ha⁻¹ in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ (Tab. 21). Lediglich die Berechnungen ohne B-Wert wurden als gültig betrachtet.

Im Jahr 2002 bewegte sich die fixierte N-Menge auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* zwischen 0,6 kg ha⁻¹ (Fläche Hockweiler) und 5,2 kg ha⁻¹ (Fläche Gutweiler). In der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ wurde für die Fläche Hockweiler eine fixierte N-Menge von 2,7 kg ha⁻¹ festgestellt. Hier zeigte die Fläche Waldweiler mit 5,4 kg ha⁻¹ die höchste fixierte N-Menge im Wiesenschnitt.

5.5.3 Nebenuntersuchungsflächen

Die Nebenflächen (Juni 2002) zeigten in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ N₂-Fixierungsraten in der Leguminosen-Sprossmasse zwischen 27,2 % (Fläche Muhl 2) und 83,8 % (Fläche Pellingen 5) (Tab. 22). Für die Fläche Gusterath 2 wurden in allen Berechnungsvarianten gültige Ergebnisse erzielt. Mit 80,5 % war hier der Ndfa-Anteil bei der Berechnung mit B-Wert deutlich höher als in der Berechnung ohne B-Wert (47,3 %, Variante „Kräuter + Gräser“). In der Referenzvariante *Plantago lanceolata* wurden insgesamt vergleichsweise höhere Ndfa-Anteile ermittelt. Flächen, die in der Berechnungsvariante „Kräuter + Gräser“ Ndfa-Anteile < 50 % aufwiesen, zeigten in der *Plantago*-Variante Ndfa-Anteile > 50 %. Der größte Unterschied wurde bei der Fläche Pellingen 3 mit 46 zu 76 % Ndfa-Anteil beobachtet.

Tab. 22: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N₂-Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im Sprossmaterial der Leguminosen, Nebenuntersuchungsflächen im Juni 2002.

Fläche	Ndfa (%) in der Leguminosenmasse der Nebenuntersuchungsflächen			
	Referenz Kräuter + Gräser		Referenz <i>Plantago lanceolata</i>	
	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Pellingen 5	83,8	(144,6)	n.b.	n.b.
Züsch 2	80,7	(-722,8)	n.b.	n.b.
Gusterath 1	72,6	(142,0)	80,1	(124,2)
Pellingen 4	62,7	(799,4)	n.b.	n.b.
Gusterath 2	47,3	80,5	59,4	87,1
Pellingen 3	46,0	(-185,5)	76,3	(168,3)
Gusterath 3	44,4	(134,1)	n.b.	n.b.
Muhl 1	42,7	(-186,6)	56,4	(865,9)
Muhl 2	(336,1)	27,2	n.b.	n.b.

in Klammern: ungültige Werte

n.b.: nicht berechnet, da kein δ¹⁵N-Wert für *Plantago lanceolata* ermittelt wurde

B: Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung

In der gesamten oberirdischen Biomasse wurden auf den Nebenuntersuchungsflächen in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ ohne B-Wert Ndfa-Anteile zwischen 4,8 % (Fläche

Gusterath 3) und 18,4 % (Fläche Gusterath 1) ermittelt (Tab. 23). Für die Fläche Gusterath 2 wurde bei der Berechnung ohne B-Wert ein Ndfa-Anteil von 12,1 %, mit B-Wert ein Ndfa-Anteil von 20,5 % festgestellt. In der Referenzvariante *Plantago lanceolata* wurde für diese Fläche der insgesamt höchste Ndfa-Anteil der Nebenuntersuchungsflächen mit 22,2 % (Berechnung mit B-Wert) registriert.

Tab. 23: Prozentuale Anteile des aus atmosphärischer N₂-Fixierung stammenden Stickstoffs (Ndfa) an der N-Menge im gesamten Wiesenschnitt, Nebenuntersuchungsflächen im Juni 2002.

Juni 2002	Ndfa (%) im Wiesenschnitt der Nebenuntersuchungsflächen			
	Referenz		Referenz	
	Kräuter + Gräser		<i>Plantago lanceolata</i>	
Fläche	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Gusterath 1	18,4	(36,0)	20,3	(31,5)
Pellingen 5	12,7	(21,9)	n.b.	n.b.
Gusterath 2	12,1	20,5	15,1	22,2
Muhl 1	8,6	(-37,6)	11,4	(174,5)
Pellingen 3	8,0	(-32,4)	13,3	(29,4)
Züsch 2	7,6	(-68,0)	n.b.	n.b.
Pellingen 4	5,8	(73,5)	n.b.	n.b.
Gusterath 3	4,8	(14,4)	n.b.	n.b.
Muhl 2	(66,3)	5,4	n.b.	n.b.

in Klammern: ungültige Werte

n.b.: nicht berechnet, da kein $\delta^{15}\text{N}$ -Wert für *Plantago lanceolata* ermittelt wurde

B: Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung

Tab. 24: Die durch Leguminosen fixierte N-Menge (Nfix), Nebenuntersuchungsflächen im Juni 2002.

Juni 2002	Nfix (kg ha ⁻¹) im Wiesenschnitt der Nebenuntersuchungsflächen			
	Referenz		Referenz	
	Kräuter + Gräser		<i>Plantago lanceolata</i>	
Fläche	ohne B	mit B	ohne B	mit B
Gusterath 1	8,3	(16,2)	9,1	(14,2)
Gusterath 2	6,4	10,9	8,0	11,7
Muhl 1	5,9	(-26,0)	7,9	(120,6)
Pellingen 5	4,7	(8,10)	n.b.	n.b.
Pellingen 3	4,6	(-18,6)	7,6	(16,9)
Züsch 2	3,9	(-34,9)	n.b.	n.b.
Pellingen 4	3,8	(48,3)	n.b.	n.b.
Gusterath 3	2,5	(7,5)	n.b.	n.b.
Muhl 2	(50,5)	4,1	n.b.	n.b.

in Klammern: ungültige Werte

n.b.: nicht berechnet, da kein $\delta^{15}\text{N}$ -Wert für *Plantago lanceolata* ermittelt wurde

B: Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung

Die symbiotisch fixierten N-Mengen im Wiesenschnitt lagen bei den Nebenuntersuchungsflächen bei Berechnung mit der Referenz „Kräuter + Gräser“ ohne B-Wert zwischen 2,5 kg ha⁻¹ (Fläche Gusterath 3) und 8,3 kg ha⁻¹ (Fläche Gusterath 1) (Tab. 24). Für die Fläche Gusterath 2 wurde bei Berechnung mit B-Wert eine höhere fixierte N-Menge (10,9 kg ha⁻¹) im Vergleich zur Berechnung ohne B-Wert (6,4 kg ha⁻¹) festgestellt. In der für vier Flächen

berechneten Referenzvariante *Plantago lanceolata* wurde ohne B-Wert eine fixierte N-Menge zwischen $7,6 \text{ kg ha}^{-1}$ (Fläche Pellingen 3) und $9,1 \text{ kg ha}^{-1}$ (Fläche Gusterath 1) ermittelt. Mit B-Wert wurde lediglich für die Fläche Gusterath 2 ein gültiger B-Wert erhalten ($11,7 \text{ kg ha}^{-1}$). Dieser Wert lag um etwa die Hälfte über dem ohne B-Wert ermittelten Wert von $8,0 \text{ kg ha}^{-1}$.

5.5.4 Einfluss der Referenzpflanze auf das Ergebnis der symbiotischen N_2 -Fixierung

Die Berechnung des Anteils symbiotisch fixierten Stickstoffs (Ndfa) an der Stickstoffmenge der Leguminosen-Sprossmasse (ohne B-Wert) brachte im Jahr 2001 für alle sechs Untersuchungsflächen gültige Werte. Im Jahr 2002 wurden ohne B-Wert in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* für neun Flächen und in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ für 13 der 15 untersuchten Flächen gültige Ndfa-Werte ermittelt. Für die zwei übrigen Flächen ergab die Berechnung mit B-Wert gültige Werte.

Ein Vergleich der Ndfa-Werte aus beiden Referenzvarianten ist in Abb. 11 für den Monat Juni der Untersuchungsjahre 2001 und 2002 anhand der Ergebnisse aller Ernteparzellen dargestellt.

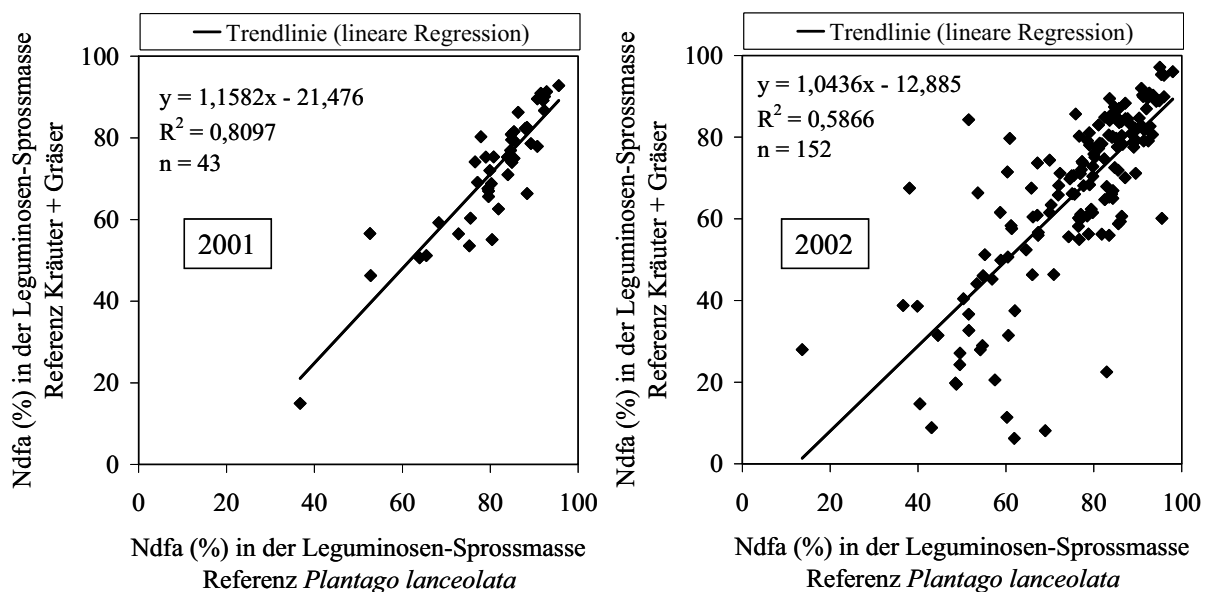


Abb. 11: Vergleich der aus der Berechnung mit den beiden Referenzvarianten *Plantago lanceolata* und Kräuter- plus Gräserfraktion erzielten Ergebnisse über die Höhe der aus symbiotischer N_2 -Fixierung stammenden N-Anteile in der Leguminosen-Sprossmasse (% Ndfa). Juni-Ernten der Jahre 2001 (sechs Wiesen) und 2002 (neun Wiesen), Berechnung ohne B-Wert, n = Anzahl der Ernteparzellen, nur gültige Ergebnisse ($0 \% \leq \text{Ndfa} \leq 100 \%$) dargestellt.

Der Vergleich zeigte einen engen linearen Zusammenhang der Ergebnisse beider Referenzvarianten sowohl im Juni 2001 als auch im Juni 2002. Die Bestimmtheitsmaße der linearen Regressionen lagen bei $R^2 = 0,81$ im Juni 2001 und $R^2 = 0,59$ im Juni 2002 ($P < 0,0001$, Abb. 11 und Tab. 25). Mit der Referenzpflanze *Plantago lanceolata* wurden im Mittel höhere Ndfa-Werte (80,4 % für 2001 und 75,7 % für 2002) berechnet als mit der Referenz „Kräuter + Gräser“ (71,6 % für 2001 und 66,1 % für 2002). Die Streuung der Werte war im Bereich $< 70 \% \text{ Ndfa}$ größer als im Bereich von 70 bis 100 % Ndfa.

Parzellen mit ungültigen Ndfa-Werten wurden nicht in die Regressionen einbezogen. Im Jahr 2001 wurden bei Berechnung des fixierten N-Anteils mit dem B-Wert von 0 ‰ in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* 100 % und in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ 91,7 % gültige Ndfa-Werte ermittelt. Im Jahr 2002 brachte die Berechnung mit B = 0 ‰ in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* 97 % und in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ 81 % gültige Ndfa-Ergebnisse.

Tab. 25: Statistischer Vergleich (lineare Regression) der Ergebnisse aus den beiden Referenzvarianten Berechnung ohne B-Wert).

Vergleich der Ergebnisse des symbiotisch fixierten N-Anteils (Ndfa) in der Leguminosen-Sprossmasse aus den beiden Referenzvarianten <i>Plantago lanceolata</i> und Kräuter + Gräser						
	MW Ndfa ± Stabw (%) (Kräuter + Gräser)	MW Ndfa ± Stabw (%) (<i>Plantago lanceolata</i>)	r	R ²	P	n
Juni 2001	71,6 ± 15,2	80,4 ± 11,8	0,900	0,810	< 0,0001	43
Juni 2002	66,1 ± 20,9	75,7 ± 15,3	0,766	0,587	< 0,0001	152

n: Zahl der gültigen Fälle (Ernteparzellen)

5.5.5 Einfluss der symbiotisch fixierten N-Menge (Nfix) auf die N-Mengen in der oberirdischen Biomasse

Es sollte geklärt werden, welchen Einfluss die Höhe der fixierten N-Menge (Nfix) auf die Höhe der N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiesen hatte. Zu diesem Zweck wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt (Berechnung mit *Plantago lanceolata* als Referenz, ohne B-Wert) (Abb. 12).

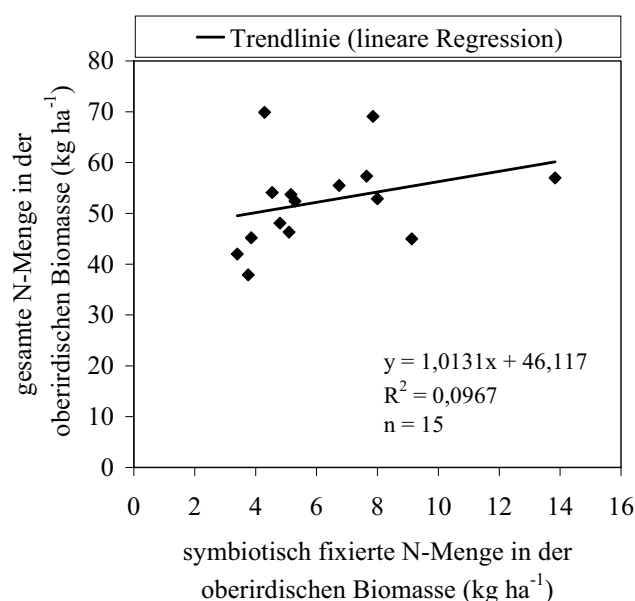


Abb. 12: Beziehung zwischen der N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Menge (berechnet mit *Plantago lanceolata* als Referenz, ohne B-Wert, Haupt- und Nebenuntersuchungsflächen im Juni der Jahre 2001 und 2002, ohne Fläche Hockweiler 2002).

Die Trendlinie zeigt an, dass mit steigender symbiotisch fixierter N-Menge eine Zunahme der Gesamtmenge an Stickstoff in der oberirdischen Biomasse zu erwarten ist. Diese Beziehung war jedoch relativ schwach ($R^2 = 0,1$; $r = 0,311$). Die fixierte N-Menge auf der Fläche Waldweiler im Juni des Jahres 2001 überstieg mit $13,8 \text{ kg ha}^{-1}$ die N_2 -Fixierungsraten der übrigen Flächen um ca. 5 kg. Die Regressionsanalyse ohne diesen Extremwert erbrachte jedoch keine wesentliche Verbesserung hinsichtlich der linearen Beziehung ($R^2 = 0,1$; $r = 0,318$).

Zwischen den N-Gesamtmenge und den symbiotisch fixierten N-Mengen, die in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ (ohne B-Wert) für 19 Wiesen ermittelt wurden, wurde ebenfalls keine enge Beziehung ($R^2 = 0,007$, Anhang, Abb. A2) festgestellt.

5.5.6 Einfluss des Leguminosenanteils an der oberirdischen Biomasse auf die symbiotisch fixierte N-Menge (Nfix) in der oberirdischen Pflanzenmasse

Die linearen Regressionen des Leguminosenanteils der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Menge (Nfix) zeigten einen engen Zusammenhang dieser beiden Parameter (Abb. 13). In der Berechnungsvariante mit der Referenzpflanze *Plantago lanceolata* wurde ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,83$ ($P < 0,001$) festgestellt. Aus der Berechnungsvariante mit der Referenz „Kräuter + Gräser“ resultierte ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$ ($P < 0,001$). Die Trendlinien zeigen in beiden Varianten eine Zunahme der fixierten N-Menge mit steigendem Leguminosenanteil. Diese Zunahme ist in der Referenzvariante *Plantago lanceolata* stärker als in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“.

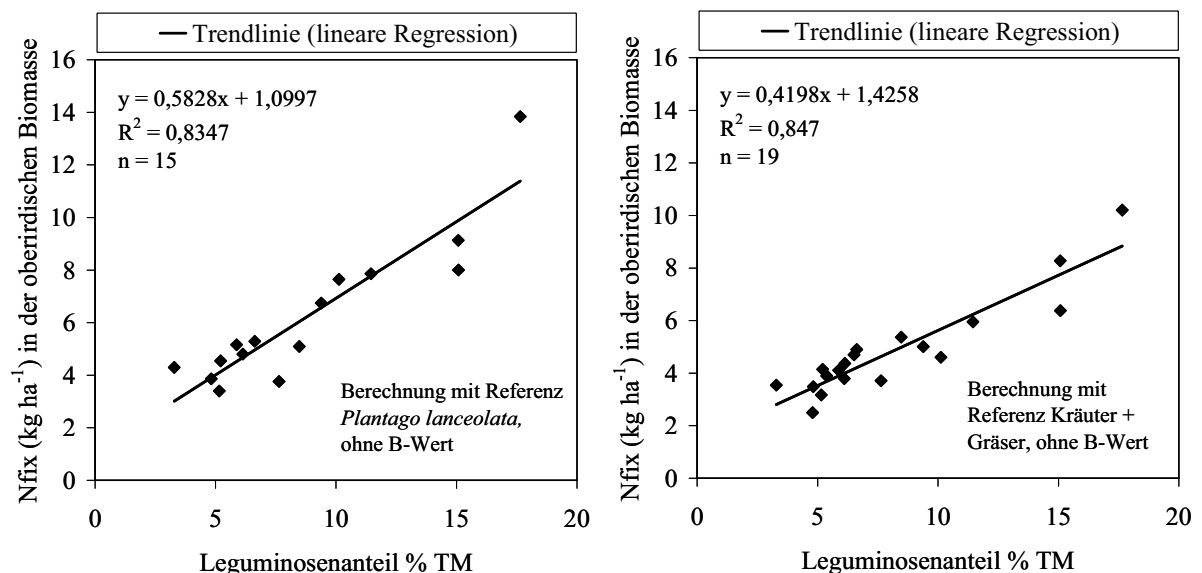


Abb. 13: Regression des Leguminosenanteils an der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Menge (Nfix). Berechnung mit der Referenzpflanze *Plantago lanceolata* (linke Graphik), Berechnung mit den Referenzgruppen Kräuter + Gräser (rechte Graphik), n = 15 bzw. 19 Flächen (jeweils Haupt- und Nebenuntersuchungsflächen, Juni 2001 und Juni 2002 kombiniert).

5.5.7 Ableitungsmöglichkeiten der fixierten N-Menge aus dem Gesamtertrag und dem Leguminosenanteil

In der Abbildung 14 sind die Spannen der fixierten N-Mengen (kg je dt Leguminosen-Sprossmasse) auf den sechs Flächen im Juni 2001 und neun (Referenzvariante *Plantago lanceolata*) bzw. 13 Wiesen (Referenzvariante „Kräuter + Gräser“) im Juni 2002 als Boxplots dargestellt.

In der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ (K + G) wurden mit Medianen von $2,0 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$ Leguminosen-Sprossmasse (Juni 2002, Mittelwert $2,1 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$) und $2,2 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$ (Juni 2001, Mittelwert $2,1 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$) geringere fixierte N-Mengen berechnet als mit der Referenzvariante *Plantago lanceolata* (Pla la). In dieser Variante wurden fixierte N-Mengen von $2,3 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$ (Juni 2002, Mittelwert $2,4 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$) bis $2,6 \text{ kg Nfix je dt Leguminosen-Sprossmasse}$ (Juni 2001, Mittelwert $2,5 \text{ kg Nfix dt}^{-1}$) berechnet. Die Werte für die einzelnen Untersuchungsflächen reichten von 1,3 bis $3,2 \text{ kg Nfix je dt Leguminosen-Sprossmasse}$.

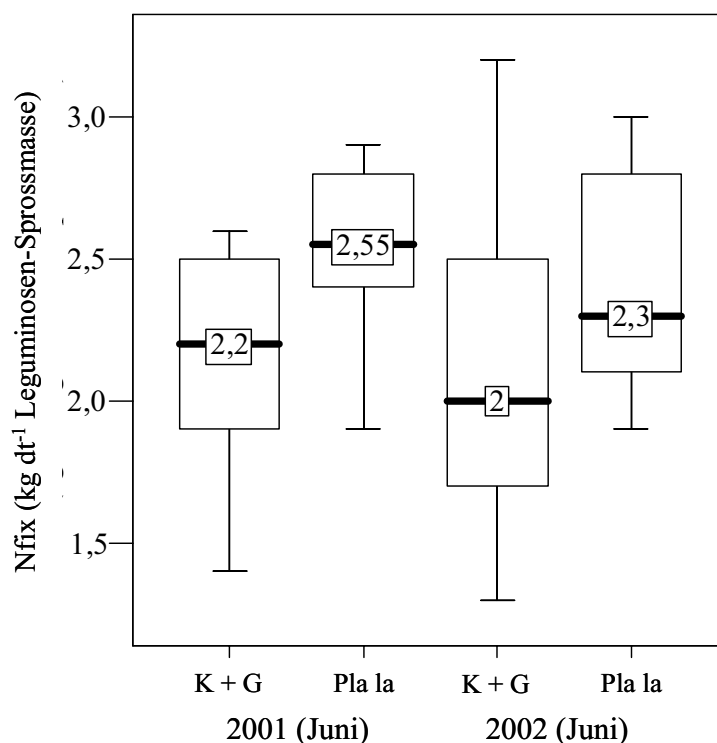


Abb. 14: Fixierte N-Mengen (kg) je dt Leguminosen-Sprossmasse. Spannen und Mediane von sechs Wiesen im Juni 2001 und neun Wiesen (Referenzvariante *Plantago lanceolata*, Pla la) bzw. 13 Wiesen im Juni 2002 (Referenzvariante „Kräuter + Gräser“, K+G).

Die Tabellen 26 A–C zeigen Kalkulationsmöglichkeiten der zu erwartenden symbiotisch fixierten N-Mengen einer Magerwiese aus den ermittelten Parametern „Gesamtertrag der Wiese“ und „prozentualer Leguminosenanteil“. Die Annahmen von 2 kg bis 3 kg fixierter N-Menge je dt Leguminosen-Sprossmasse wurden aus den Berechnungen der Jahre 2001 und 2002 abgeleitet.

Eine für die Hunsrück-Region typische Magerwiese mittleren Standorts mit 30 dt TM ha⁻¹ Heuertrag und einem Leguminosenanteil von 7 % hätte unter der Annahme A) = 4,2 kg unter der Annahme B) = 5,25 kg und unter der Annahme C) = 6,3 kg symbiotisch fixierten Stickstoff je Hektar Fläche erhalten.

Tab. 26 A–C: Ableitungsmöglichkeit der fixierten N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiese über die ermittelten Größen „Gesamtertrag“ und „prozentualer Leguminosenanteil“.

A) Annahme: 2 kg N ha⁻¹ werden je dt Leguminosen-Sprossmasse fixiert

oberirdische Biomasse der Wiese (dt TM ha ⁻¹)	Nfix (kg ha ⁻¹) bei einem Leguminosenanteil in der Wiese von											
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	15%	20%
10	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	3	4
20	0,4	0,8	1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	3,6	4	6	8
30	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	9	12
40	0,8	1,6	2,4	3,2	4	4,8	5,6	6,4	7,2	8	12	16
50	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
60	1,2	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12	18	24

B) Annahme: 2,5 kg N ha⁻¹ werden je dt Leguminosen-Sprossmasse fixiert

oberirdische Biomasse der Wiese (dt TM ha ⁻¹)	Nfix (kg ha ⁻¹) bei einem Leguminosenanteil in der Wiese von											
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	15%	20%
10	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	3,75	5
20	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	7,5	10
30	0,75	1,5	2,25	3	3,75	4,5	5,25	6	6,75	7,5	11,25	15
40	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
50	1,25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	8,75	10	11,25	12,5	18,75	25
60	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	22,5	30

C) Annahme: 3 kg N ha⁻¹ werden je dt Leguminosen-Sprossmasse fixiert

oberirdische Biomasse der Wiese (dt TM ha ⁻¹)	Nfix (kg ha ⁻¹) bei einem Leguminosenanteil in der Wiese von											
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	15%	20%
10	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	4,5	6
20	0,6	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	9	12
30	0,9	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	6,3	7,2	8,1	9	13,5	18
40	1,2	2,4	3,6	4,8	6	7,2	8,4	9,6	10,8	12	18	24
50	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15	22,5	30
60	1,8	3,6	5,4	7,2	9	10,8	12,6	14,4	16,2	18	27	36

Das im August des Jahres 2001 auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen geerntete Pflanzenmaterial wurde nicht hinsichtlich der Isotopenverhältnisse untersucht. Daher war eine Abschätzung der fixierten N-Menge im Schnittgut über die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode nicht möglich. Es wurden jedoch der Gesamtertrag der oberirdischen Biomasse und der Leguminosenanteil

bestimmt. Legt man die Annahmen A) bis C), also eine fixierte N-Menge von 2,0 kg bis 3 kg je dt Leguminosen-Sprossmasse zugrunde, können symbiotisch fixierte N-Mengen in der gesamten oberirdischen Biomasse aus den erhobenen Daten berechnet werden. Die fixierten N-Mengen bewegten sich bei der Annahme von 2,0 kg Nfix je dt Leguminosen-Sprossmasse demnach im August 2001 zwischen 2,0 kg Nfix ha⁻¹ (Fläche Oberemmeler Berg) und 5,8 kg Nfix ha⁻¹ (Fläche Waldweiler) (Tab. 27). Bei der Annahme von 3,0 kg Nfix je dt Leguminosen-Sprossmasse wären in diesen Wiesen 3,0 kg N ha⁻¹ bzw. 8,7 kg N ha⁻¹ fixiert worden.

Tab. 27: Kalkulation der symbiotisch fixierten N-Menge für die August-Ernte des Jahres 2001.

Fläche	Symbiotisch fixierte N-Menge (kg Nfix ha ⁻¹) in der oberirdischen Biomasse der Wiesen im August 2001		
	Bei einer Fixierleistung je dt Leguminosen-Sprossmasse von		
	A) 2,0 kg N	B) 2,5 kg N	C) 3,0 kg N
Oberemmeler Berg	2,0	2,5	3,0
Pellingen 1	2,4	3,0	3,6
Pellingen 2	3,2	4,0	4,8
Gutweiler	4,6	5,8	6,9
Hockweiler	5,0	6,3	7,5
Waldweiler	5,8	7,3	8,7

Aus den Kalkulationen der fixierten N-Menge für den August-Schnitt und aus den für Juni 2001 anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode berechneten fixierten N-Mengen lassen sich Jahressummen der fixierten N-Menge für eine Zweischnitt-Magerwiese ableiten (Anhang, Tab. A16). Bei einer mittleren Fixierungsleistung im August in Höhe von 2,5 kg N je dt Leguminosen-Sprossmasse, würden sich für die sechs Hauptuntersuchungsflächen bei Zweischnitt-Nutzung fixierte N-Mengen von insgesamt 7,0 kg Nfix ha⁻¹ a⁻¹ (Fläche Oberemmeler Berg) bis 21 kg Nfix ha⁻¹ a⁻¹ (Fläche Waldweiler) ergeben (Summen aus Juni- und August-Ernte).

Im Untersuchungsjahr 2003 wurden im Juni auf elf Wiesen erneut die oberirdische Biomasse (Juni-Schnitt) und der prozentuale Leguminosenanteil ermittelt, so dass für die Heuernte auf diesen Flächen ebenfalls symbiotisch fixierte N-Mengen kalkuliert werden können. Demnach wurden die höchsten N-Mengen auf der Fläche Gutweiler mit 8 bis 12 kg Nfix ha⁻¹ und die geringsten N-Mengen auf der Fläche Hockweiler mit 0,2 bis 0,3 kg Nfix ha⁻¹ symbiotisch fixiert (Tab. 28).

Diese Berechnung soll nur eine grobe Kalkulation darstellen, wie sie auch von Landwirten für ihre ungedüngten oder sporadisch gedüngten Wiesen anhand des Heuertrags und eines geschätzten mittleren Leguminosenanteils durchgeführt werden kann.

Tab. 28: Kalkulation der symbiotisch fixierten N-Menge für die Juni-Ernte des Jahres 2003.

Fläche	Symbiotisch fixierte N-Menge (kg Nfix ha ⁻¹) in der oberirdischen Biomasse der Wiesen im Juni 2003		
	Bei einer Fixierleistung je dt Leguminosen-Sprossmasse von		
	A) 2,0 kg N	B) 2,5 kg N	C) 3,0 kg N
Hockweiler	0,2	0,3	0,3
Pellingen 1	2,0	2,5	3,0
Züsch 2	2,2	2,8	3,3
Oberemmeler Berg	2,6	3,3	3,9
Gusterath 3	2,6	3,3	3,9
Pellingen 2	3,4	4,3	5,1
Waldweiler	4,2	5,3	6,3
Gusterath 2	5,2	6,5	7,8
Pellingen 5	7,2	9,0	10,8
Gusterath 1	7,6	9,5	11,4
Gutweiler	8,0	10,0	12,0

5.5.8 Artspezifische symbiotische N₂-Fixierung der Leguminosen

Neben der Berechnung des aus der symbiotischen N₂-Fixierung stammenden Stickstoffs (Nd_{fa}) für die Untersuchungsflächen wurde der fixierte N-Anteil für ausgewählte Leguminosen im Freiland bestimmt (Tab. 29).

Als Berechnungsgrundlage für den fixierten N-Anteil nach der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode wurden die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial der Leguminosen *Trifolium pratense*, *T. repens*, *T. dubium*, *Lotus corniculatus*, *Lathyrus linifolius*, *Vicia cracca* und *V. sepium* sowie der nicht stickstofffixierenden Arten *Plantago lanceolata*, *Sanguisorba minor*, *Leucanthemum vulgare* und *Holcus lanatus* herangezogen ($\delta^{15}\text{N}$ -Werte siehe Anhang, Tab. A10 sowie Kap. 5.4, Berechnung für den Nd_{fa}-Anteil siehe Formel (2) Kap. 2.4.1.1). Als Korrekturgröße für die Isotopenfraktionierung im Prozess der N₂-Fixierung wurde ein hypothetischer B-Wert von 0 ‰ verwendet. Das heißt, es wurde angenommen, dass keine Isotopenfraktionierung während der N₂-Fixierung stattfand.

Die Daten wurden nicht statistisch ausgewertet, da je Fläche nur $\delta^{15}\text{N}$ -Einzelwerte aus Mischproben mehrerer Exemplare einer Art vorlagen und nicht auf allen Flächen die gleichen Arten untersucht werden konnten. Die Ergebnisse sollen lediglich einen Überblick über die Höhe des Nd_{fa}-Anteils in der Sprossmasse der Leguminosenarten bzw. dessen Abweichung bei der Verwendung verschiedener Referenzarten geben. Wie schon in Kap. 5.5.1 erläutert, sind Nd_{fa}-Anteile in der Leguminosenmasse über 100 % und kleiner als 0 % physiologisch nicht möglich. Diese Ergebnisse wurden daher für ungültig erklärt (siehe auch Kap. 6.3). Die berechneten Nd_{fa}-Werte für die Fläche Hockweiler im Jahr 2002 und 2003 sind bis auf wenige Ausnahmen ungültig. Die auf dieser Wiese durch den Nutzer durchgeführte Düngung hat die Isotopenverhältnisse im Sprossmaterial der Nicht-Fixierer gegenüber dem Vorjahr verändert, so dass mit dem gewählten B-Wert keine gültigen Nd_{fa}-Anteile berechnet werden

konnten. Ferner wurden einige ungültige Ndfa-Anteile für *Lotus corniculatus* berechnet. Der Grund dafür ist der geringe Unterschied der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte dieser Art zu den Referenzpflanzen (siehe Kap. 5.4.1, Abb. 4).

Tab. 29: Anteile symbiotisch fixierten Stickstoffs (% Ndfa) an der N-Menge im Sprossmaterial von sieben Leguminosenarten, Berechnung mit B-Wert = 0 ‰ und verschiedenen Referenzarten (*Plantago lanceolata*, *Sanguisorba minor*, *Leucanthemum vulgare*, *Holcus lanatus*), Mischproben von mindestens 15 Pflanzen pro Fläche, Erntetermine im Juni (2001, 2002) und Ende Mai (2003), Werte zwischen 0 und 100 % werden als gültige Werte betrachtet.

Fläche	Referenzart	Ndfa (%) in der Leguminosensprossmasse						
		2001						
		<i>Trifolium pratense</i>	<i>Trifolium repens</i>	<i>Trifolium dubium</i>	<i>Lotus corniculatus</i>	<i>Lathyrus linifolius</i>	<i>Vicia cracca</i>	<i>Vicia sepium</i>
Gutweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	80,9	70,7	74,7	23,6	n.v.	90,2	85,3
	<i>Sanguisorba minor</i>	75,2	61,9	67,1	0,6	n.v.	87,3	80,9
	<i>Holcus lanatus</i>	47,3	19,2	30,2	-111,0	n.v.	73,0	59,4
Hockweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	78,3	67,3	78,6	40,3	n.v.	82,5	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	35,8	3,1	36,6	-76,9	n.v.	48,3	n.v.
	<i>Holcus lanatus</i>	41,3	11,3	41,9	-61,9	n.v.	52,7	n.v.
Oberremmeler Berg	<i>Plantago lanceolata</i>	85,0	76,6	n.v.	51,5	93,3	95,0	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	75,8	62,3	n.v.	21,8	89,2	91,9	n.v.
	<i>Holcus lanatus</i>	60,0	37,6	n.v.	-29,4	82,1	86,6	n.v.
Pellingen 1	<i>Plantago lanceolata</i>	89,5	78,3	87,3	66,3	91,3	91,3	95,4
	<i>Sanguisorba minor</i>	80,9	60,6	76,9	38,7	84,1	84,1	91,6
	<i>Holcus lanatus</i>	77,6	53,8	72,9	28,2	81,4	81,4	90,2
Pellingen 2	<i>Plantago lanceolata</i>	88,4	86,2	88,8	72,3	93,0	91,9	96,9
	<i>Sanguisorba minor</i>	84,8	82,0	85,4	63,8	90,9	89,5	95,9
	<i>Holcus lanatus</i>	25,0	11,0	28,0	-78,6	54,8	48,1	80,0
Waldweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	78,0	n.v.	n.v.	n.v.	75,5	82,2	n.v.
	<i>Holcus lanatus</i>	149,0	n.v.	n.v.	n.v.	154,7	139,7	n.v.
Fläche	Referenzart	2002						
		<i>Trifolium pratense</i>	<i>Trifolium repens</i>	<i>Trifolium dubium</i>	<i>Lotus corniculatus</i>	<i>Lathyrus linifolius</i>	<i>Vicia cracca</i>	<i>Vicia sepium</i>
		<i>Trifolium pratense</i>	<i>Trifolium repens</i>	<i>Trifolium dubium</i>	<i>Lotus corniculatus</i>	<i>Lathyrus linifolius</i>	<i>Vicia cracca</i>	<i>Vicia sepium</i>
Gutweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	81,7	n.v.	79,5	51,3	n.v.	84,8	90,2
	<i>Sanguisorba minor</i>	68,3	n.v.	64,4	15,5	n.v.	73,6	82,9
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	75,3	n.v.	72,4	34,3	n.v.	79,5	86,7
Hockweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	-111,7	-249,7	n.v.	-329,5	n.v.	25,4	-38,5
	<i>Sanguisorba minor</i>	-441,0	-793,4	n.v.	-997,4	n.v.	-90,6	-254,0
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	944,9	1495,3	n.v.	1813,9	n.v.	397,7	652,9
Gusterath 1	<i>Plantago lanceolata</i>	77,4	75,2	78,7	48,3	n.v.	n.v.	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	61,9	58,3	64,1	12,8	n.v.	n.v.	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	66,8	63,6	68,7	24,0	n.v.	n.v.	n.v.
Gusterath 2	<i>Plantago lanceolata</i>	77,1	n.v.	69,2	46,8	n.v.	85,6	84,8
	<i>Sanguisorba minor</i>	68,9	n.v.	58,2	27,7	n.v.	80,5	79,4
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	73,3	n.v.	64,1	37,9	n.v.	83,2	82,3
Oberremmeler Berg	<i>Plantago lanceolata</i>	69,6	70,4	71,9	49,6	n.v.	85,6	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	64,2	65,1	66,8	40,6	n.v.	83,0	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	56,5	57,6	59,7	27,9	n.v.	79,4	n.v.
Pellingen 1	<i>Plantago lanceolata</i>	76,1	62,6	72,5	50,4	83,8	87,4	85,2
	<i>Sanguisorba minor</i>	71,0	54,6	66,6	39,7	80,4	84,7	82,1
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	75,8	62,0	72,1	49,6	83,6	87,2	85,0
Pellingen 2	<i>Plantago lanceolata</i>	82,1	n.v.	76,5	59,2	86,9	83,2	86,1
	<i>Sanguisorba minor</i>	79,8	n.v.	73,5	54,0	85,2	81,0	84,4
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	81,7	n.v.	75,9	58,1	86,5	82,7	85,8
Pellingen 3	<i>Plantago lanceolata</i>	57,1	52,7	58,9	7,7	n.v.	n.v.	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	25,1	17,3	28,2	-61,3	n.v.	n.v.	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	45,3	39,6	47,6	-17,7	n.v.	n.v.	n.v.
Waldweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	11,4	n.v.	n.v.	n.v.	28,0	46,4	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	27,2	n.v.	n.v.	n.v.	40,9	56,0	n.v.
Muhl 1	<i>Plantago lanceolata</i>	24,3	10,1	n.v.	n.v.	64,7	42,4	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	17,7	2,3	n.v.	n.v.	61,6	37,4	n.v.

Fortsetzung Tab. 29:

Fläche	Referenzart	Ndfa (%) in der Leguminosensprossmasse						
		2003						
		<i>Trifolium pratense</i>	<i>Trifolium repens</i>	<i>Trifolium dubium</i>	<i>Lotus corniculatus</i>	<i>Lathyrus linifolius</i>	<i>Vicia cracca</i>	<i>Vicia sepium</i>
Gutweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	82,4	n.v.	n.v.	48,1	n.v.	95,2	95,9
	<i>Sanguisorba minor</i>	75,2	n.v.	n.v.	27,1	n.v.	93,2	94,2
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	65,8	n.v.	n.v.	-0,8	n.v.	90,6	92,0
Hockweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	-67,1	n.v.	n.v.	-333,3	n.v.	60,4	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	25,7	n.v.	n.v.	-92,6	n.v.	82,4	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	224,3	n.v.	n.v.	422,2	n.v.	129,4	n.v.
Gusterath 1	<i>Plantago lanceolata</i>	79,9	67,5	n.v.	47,5	n.v.	90,4	95,5
	<i>Sanguisorba minor</i>	69,0	49,8	n.v.	18,8	n.v.	85,1	93,1
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	76,8	62,4	n.v.	39,2	n.v.	88,9	94,8
Oberemmeler Berg	<i>Plantago lanceolata</i>	79,8	66,0	n.v.	47,4	n.v.	79,4	n.v.
	<i>Sanguisorba minor</i>	73,0	54,6	n.v.	29,8	n.v.	72,5	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	78,7	64,2	n.v.	44,5	n.v.	78,3	n.v.
Pellingen 1	<i>Plantago lanceolata</i>	88,4	78,4	n.v.	n.v.	95,5	91,2	95,8
	<i>Sanguisorba minor</i>	81,4	65,4	n.v.	n.v.	92,8	85,9	93,2
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	87,1	75,9	n.v.	n.v.	95,0	90,2	95,3
Pellingen 2	<i>Plantago lanceolata</i>	82,3	n.v.	n.v.	59,5	99,1	89,0	93,7
	<i>Sanguisorba minor</i>	74,1	n.v.	n.v.	40,9	98,7	83,9	90,8
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	81,5	n.v.	n.v.	57,7	99,0	88,5	93,4
Waldweiler	<i>Plantago lanceolata</i>	49,1	24,9	n.v.	n.v.	88,3	27,9	n.v.
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	59,7	40,7	n.v.	n.v.	90,8	43,0	n.v.

Berechnung des symbiotisch fixierten N-Anteils (Ndfa) mit dem hypothetischen B-Wert = 0 ‰
n.v.: Leguminose nicht in ausreichender Häufigkeit vorkommend bzw. Wert nicht bestimmt

Teilweise wurden sehr weite Spannen für die Höhe des Ndfa-Anteils je Art festgestellt. Zum Beispiel wurde für die Sprossmasse von *Trifolium repens* ein fixierter N-Anteil zwischen 2,3 % (Fläche Muhl 1, Referenz *Leucanthemum vulgare*) und 86,2 % (Fläche Pellingen 2, Referenz *Plantago lanceolata*) ermittelt (Tab. 29). Die Ursache hierfür sind die auf einigen Flächen bzw. bei manchen Arten (wie *Lotus corniculatus*) geringen Unterschiede zwischen den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Leguminosen und Nicht-Leguminosen. Dies ist ein methodischer Nachteil, der die Vertrauenswürdigkeit der Ndfa-Ergebnisse verringert.

Ein direkter Vergleich der fixierten N-Anteile der Arten ist nur auf der Grundlage der gleichen Berechnungsvariante (Referenzart) möglich. In den meisten Berechnungsvarianten zeigten die *Vicia*-Arten und *Lathyrus linifolius* höhere fixierte N-Anteile als die *Trifolium* Arten. Beim Vergleich der Arten zeigte *Lotus corniculatus* die geringsten Ndfa-Anteile. Diese Reihung entspricht dem Muster der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen (Kap. 5.4.1).

Im Vergleich zwischen den Berechnungsvarianten bringen die Referenzvarianten *Plantago lanceolata* und *Leucanthemum vulgare* sehr ähnliche Ergebnisse für die fixierten N-Anteile. Die mit der Referenzart *Plantago lanceolata* berechneten fixierten Stickstoffanteile in der Leguminosen-Sprossmasse liegen leicht über den mit der Art *Leucanthemum vulgare* errechneten Werten. Etwas niedriger sind die mit der Referenzart *Sanguisorba minor* berechneten Ndfa-Werte. Die niedrigsten Ndfa-Anteile wurden mit der Referenzart *Holcus lanatus* ermittelt. Diese Art scheint aufgrund der geringeren Differenz im $\delta^{15}\text{N}$ -Wert zu den Leguminosen am wenigsten für eine Berechnung des fixierten Stickstoffs geeignet.

5.6 Einfluss der Höhenlage der Flächen auf die Pflanzenerträge und die Stickstoffmengen in der oberirdischen Pflanzenmasse

Ein möglicher Einfluss der Höhenlage der Wiesen auf den Gesamtertrag, auf die Massenteile der funktionellen Gruppen sowie auf die Stickstoffmengen und die symbiotische Stickstoff-Fixierung wurde anhand der Daten für die 16 im Juni 2002 untersuchten Flächen überprüft. Die Flächen befanden sich in Höhenlagen von 350 bis 625 m über NN.

5.6.1 Beziehung zwischen Höhenlage und Gesamtertrag sowie Massenanteilen der funktionellen Gruppen

Zur Bestimmung des Höheneinflusses auf den Ertrag wurden Regressionen zwischen Gesamtertrag und Höhenlage sowie Massenanteilen und Höhenlage durchgeführt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,02$ wurde kein enger Zusammenhang zwischen dem Gesamtertrag im Juni 2002 und der Höhenlage festgestellt (Abb. 15). Die Regressionsanalyse ergab eine leichte, nicht signifikante ($P = 0,59$) Abnahme des Ertrages mit zunehmender Höhenlage.

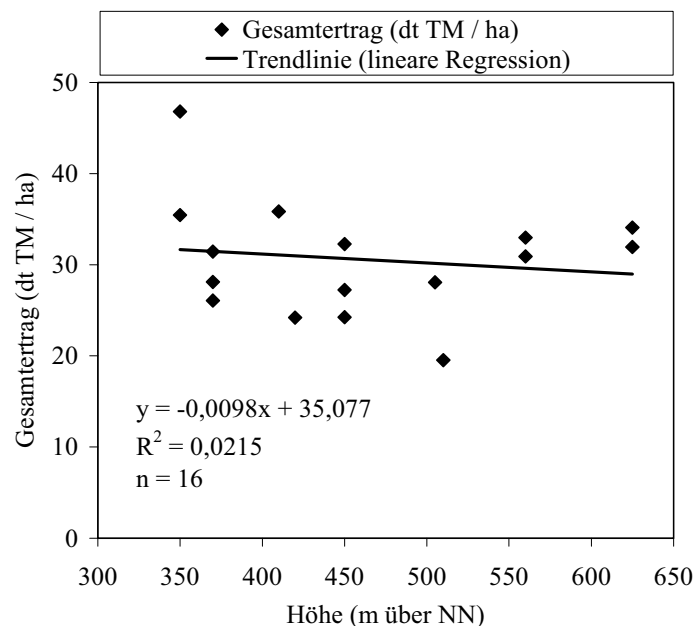


Abb. 15: Regression der Höhenlage der Wiesen und des Gesamtertrags (oberirdische TM) im Juni 2002.

Ein enger linearer Zusammenhang zwischen der Höhenlage der Wiesen und den Massenanteilen der funktionellen Gruppen bestand nicht (Abb. 16). Die Bestimmtheitsmasse der Regressionen lagen bei $R^2 = 0,13$ (Gräser), $R^2 = 0,20$ (Kräuter) und $R^2 = 0,02$ (Leguminosen). Eine Höhenzunahme ging mit einer leichten, nicht signifikanten Zunahme der Ertragsanteile der Gräser ($P = 0,171$) und der Leguminosen ($P = 0,636$) einher. Der Anteil der Kräuter sank tendenziell ($P = 0,079$) mit zunehmender Höhe.

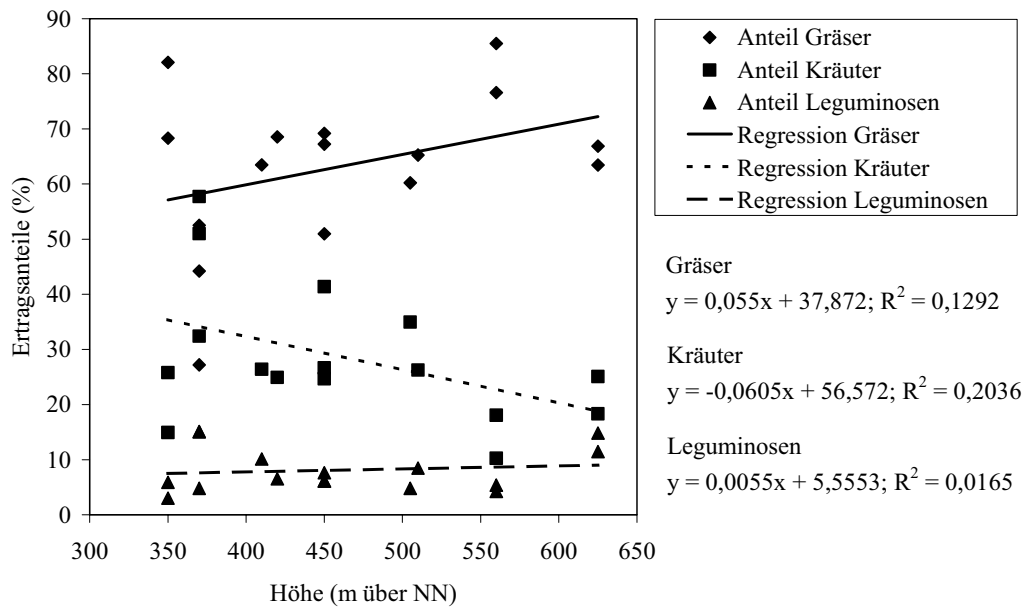


Abb. 16: Regressionen der Höhenlage der Wiesen mit den Massenanteilen der funktionellen Gruppen Gräser, Kräuter und Leguminosen im Juni 2002.

5.6.2 Beziehung zwischen Höhenlage und N-Menge sowie fixiertem N-Anteil

Der Einfluss der Höhenlage auf die N-Menge im Wiesenschnitt wurde als lineare Regression für die Juni-Ernte im Jahr 2002 berechnet. Eine enge Beziehung zwischen N-Menge und Höhenlage der Flächen war nicht gegeben ($R^2 = 0,02$; Abb. 17). Die Regressionsgleichung zeigte eine leichte, nicht signifikante ($P = 0,62$) Zunahme der N-Menge mit zunehmender Höhenlage.

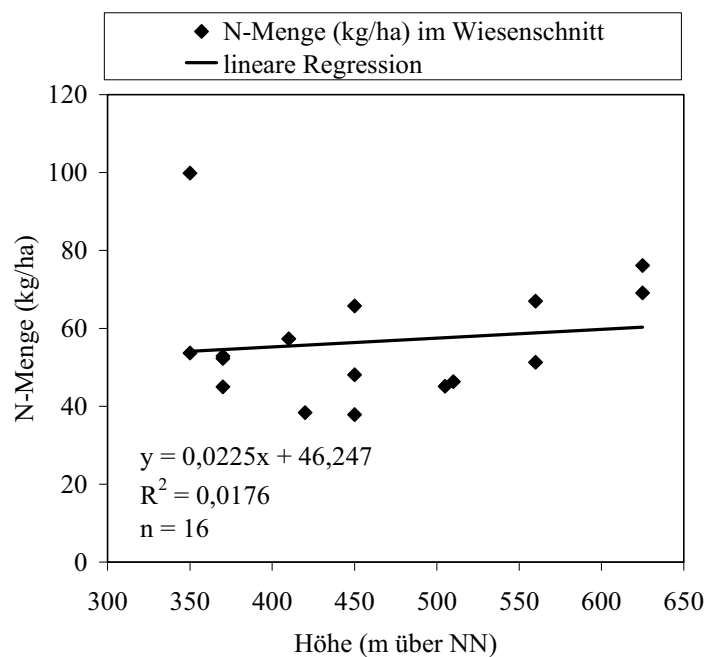


Abb. 17: Regression der Höhenlage der Untersuchungsflächen und der N-Menge im Wiesenschnitt im Juni 2002.

Ein signifikanter Einfluss der Höhenlage auf den symbiotisch fixierten Stickstoffanteil wurde nicht festgestellt. Für die Regression wurden die ohne Korrekturwert (d. h. B-Wert = 0 ‰) berechneten Ndfa-Anteile herangezogen (vgl. Kap. 5.5). Der Zusammenhang zwischen dem fixierten N-Anteil im Juni 2002 (Referenzvariante „Kräuter + Gräser“) und der Höhenlage war gering ($R^2 = 0,008$; $P = 0,76$). Tendenziell nahm der aus N_2 -Fixierung stammende N-Anteil (Ndfa) mit einer Zunahme der Höhe leicht ab (Abb. 18). Dieses Ergebnis wurde stark durch den hohen Anteil fixierten Stickstoffs auf der Fläche Gusterath 1 beeinflusst. Eine Berechnung ohne diese Fläche ergab eine positive Steigung der Ausgleichsgeraden und einen etwas engeren Zusammenhang zwischen Höhenlage und fixierter N-Menge ($R^2 = 0,02$; $P = 0,63$).

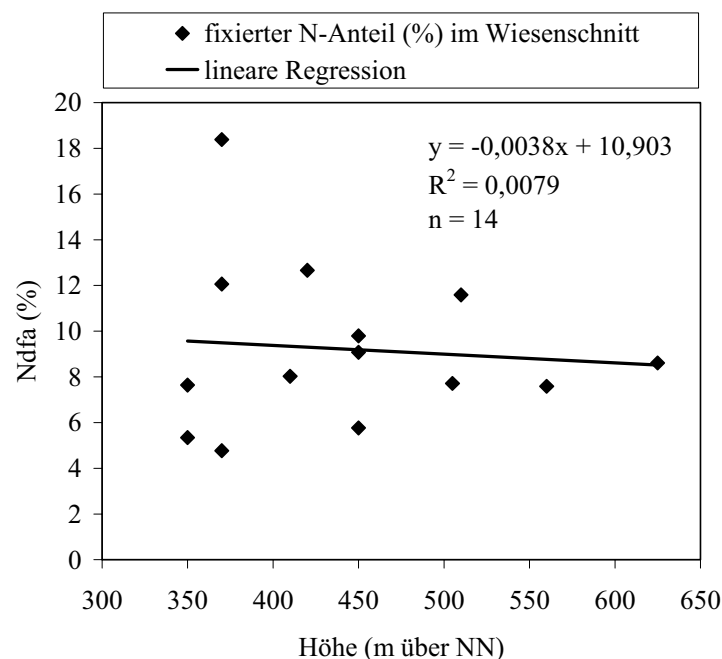


Abb. 18: Regression des durch Leguminosen fixierten Stickstoffs (Ndfa) im Juni 2002 und der Höhenlage der Wiesen.

5.7 Nicht-destruktive Ermittlung des Gesamtertrages und der Massenanteile der funktionellen Gruppen

5.7.1 Schätzung des Trockenmassenertrages über die Messung der Bestandeshöhe

Die Möglichkeit, von der Bestandeshöhe auf den TM-Ertrag zu schließen war bei den untersuchten artenreichen Wiesen gering. Abbildung 19 zeigt einen geringen Zusammenhang ($R^2 = 0,22$) zwischen der Bestandeshöhe (gemessenes Maximum) und dem gewogenen Ertrag. Auch zwischen der mittleren Bestandeshöhe (Mittelwert aus den maximalen Höhen der Kräuterschicht - inkl. Leguminosen - sowie der Gräserchicht) und dem TM-Ertrag wurde kein enger Zusammenhang festgestellt ($R^2 = 0,12$; nicht dargestellt).

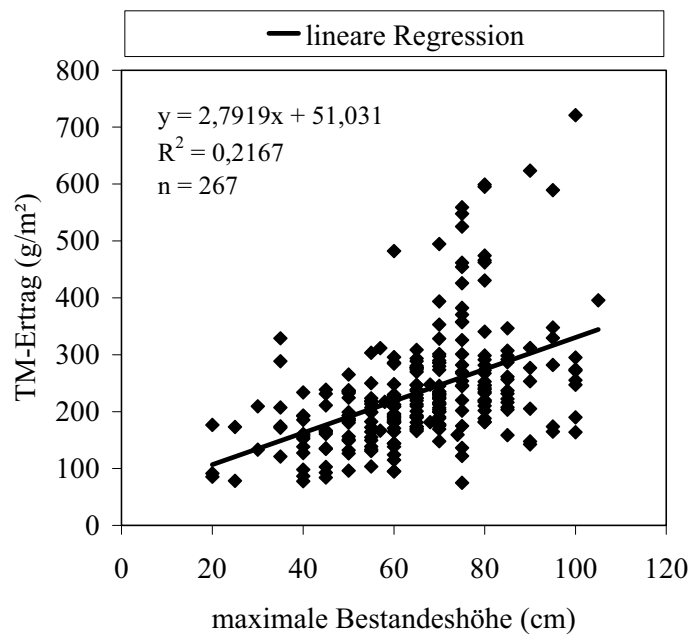


Abb. 19: Beziehung zwischen der Bestandeshöhe und dem Trockenmasse-Ertrag, in 267 Ernteparzellen im Juni 2003.

5.7.2 Schätzung der Massenanteile der funktionellen Gruppen – Vergleich mit den TM-Anteilen

Eine Schätzung der Massenanteile der Leguminosen in den Wiesen bedeutet eine Zeitersparnis gegenüber einer Bestimmung über die Trockenmassen und erlaubt die Bearbeitung einer größeren Anzahl von Flächen. Eine Schätzung birgt jedoch das Risiko einer größeren Ungenauigkeit gegenüber einer Anteilsbestimmung über die Trockenmassen. Es sollte daher untersucht werden, wie genau sich der Leguminosenanteil in den artenreichen Magerwiesen schätzen lässt. Die geschätzten wurden mit den tatsächlichen Biomasseanteilen verglichen, um die Genauigkeit der Schätzung beurteilen zu können.

In Tab. 30 sind für die sechs Hauptuntersuchungsflächen TM-Analysen und Schätzungen vergleichend für drei Versuchsjahre dargestellt (Flächenmittelwerte). Im Jahr 2002 wurde bei der Ernte nur der Anteil der Leguminosen, nicht aber der Kräuter- und Gräserfraktionen geschätzt. Daher ist hier lediglich der TM-Anteil angegeben.

Die Korrelationskoeffizienten zeigen für die Gruppe der Leguminosen mit $r = 0,68$ bis $0,99$ eine mittlere bis sehr hohe Übereinstimmung der Schätzungen mit den tatsächlichen Massenanteilen. Die positiven Abweichungen im Juni 2001 lassen erkennen, dass die Leguminosenmasse überschätzt wurde. Beim zweiten Schnitt im August 2001 wurden die Leguminosenanteile tendenziell unterschätzt. Für die Jahre 2002 und 2003 wurden mit Ausnahme der Fläche Gutweiler geringe Differenzen ($< 2\%$) zwischen TM-Anteil und Schätzung des Leguminosenanteils verzeichnet. Hier wurde die Leguminosenmasse teils über- teils aber auch unterschätzt.

Für die beiden funktionellen Gruppen sonstige Kräuter und Gräser wurden Korrelationskoeffizienten zwischen $r = 0,66$ und $0,94$ bzw. zwischen $r = 0,61$ und $0,95$ ermittelt. An den zumeist positiven Abweichungen bei den Kräutern wird eine Überschätzung dieser Fraktion deutlich. Die Gräser zeigen durchgehend eine negative Abweichung, das heißt eine Unterschätzung ihrer TM-Anteile.

Tab. 30: Abweichung der Schätzung der Massenanteile der funktionellen Gruppen gegenüber der Trockenmassen-Ermittlung auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen für die Juni-Ernten der Jahre 2001 bis 2003, (Größe und Anzahl der Parzellen siehe Kap. 4.1.1 Tab. 2).

	TM-Analyse				Schätzung			Abweichung			Korrelation		
	mittlere Anteile (%)				mittlere Anteile (%)			r			r		
	Juni	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003
Gutweiler													
Leguminosen		3,3	5,9	14,5	6,9	6,3	9,8	+ 3,6	+ 0,4	- 4,7	0,94	0,81	0,94
Kräuter		15,5	25,8	34,5	21,2	n.v.	51,2	+ 5,7		+ 16,7	0,72		0,74
Gräser		81,2	68,3	51,0	71,9	n.v.	39,0	- 9,3		- 12,0	0,61		0,77
Oberemmeler Berg													
Leguminosen		5,2	4,8	7,1	8,6	4,5	5,6	+ 3,4	- 0,3	- 1,5	0,99	0,88	0,68
Kräuter		33,1	35,0	45,0	41,0	n.v.	66,1	+ 7,9		+ 21,1	0,66		0,82
Gräser		61,7	60,2	47,9	50,4	n.v.	28,3	- 11,3		- 19,6	0,68		0,88
Waldweiler													
Leguminosen		17,7	8,5	10,3	26,5	9,9	11,6	+ 8,8	+ 1,4	+ 1,3	0,89	0,89	0,91
Kräuter		23,0	26,3	30,8	25,3	n.v.	43,4	+ 2,3		+ 12,6	0,94		0,92
Gräser		59,4	65,3	58,9	48,3	n.v.	44,3	- 11,1		- 14,6	0,95		0,89
Pellingen 1													
Leguminosen		6,6	7,6	4,7	18,2	6,1	4,8	+ 11,6	- 1,5	+ 0,1	0,68	0,82	0,90
Kräuter		42,5	41,4	45,4	39,0	n.v.	66,7	- 3,5		+ 21,3	0,67		0,74
Gräser		50,9	51,0	49,9	42,8	n.v.	28,4	- 8,1		- 21,5	0,79		0,79
Pellingen 2													
Leguminosen		5,2	6,1	7,8	10,3	6,2	8,6	+ 5,1	+ 0,1	+ 0,8	0,82	0,84	0,79
Kräuter		21,2	24,7	36,3	22,4	n.v.	47,4	+ 1,2		+ 11,1	0,88		0,79
Gräser		73,6	69,2	55,9	67,2	n.v.	43,6	- 6,4		- 12,3	0,66		0,88
Hockweiler													
Leguminosen		9,4	3,0	0,2	15,6	1,6	0,4	+ 6,2	- 1,4	+ 0,2	0,90	0,94	0,93
Kräuter		27,9	14,9	3,6	25,9	n.v.	5,5	- 2,0		+ 1,9	0,88		0,92
Gräser		62,7	82,1	96,2	58,5	n.v.	94,0	- 4,2		- 2,2	0,84		0,91

+ : Massenanteil überschätzt

- : Massenanteil unterschätzt

n.v.: keine Daten vorhanden

In den Abbildungen 20 a und b sind die Zusammenhänge zwischen Schätzung der Ertragsanteile und Trockenmasse der Leguminosen für die Ernten im Juni 2002 und im Juni 2003 auf der Grundlage aller Ernteparzellen ($n = 448$ bzw. 267) dargestellt. Sowohl für Juni 2002 als auch für Juni 2003 wurde ein ähnlich enger linearer Zusammenhang der Schätzung und TM-Bestimmung der Leguminosenanteile ermittelt (Bestimmtheitsmaße von $R^2 = 0,67$ bzw. $0,78$). Die Steigungen der Gleichungen geben die Abweichungen von der „idealen Schätzung“ (Steigung $m = 1$, Winkelhalbierende) an und hatten Werte von $m = 0,57$ und $0,65$, wichen demnach deutlich von 1 ab. Ein ähnlicher Zusammenhang wurde auch für die entsprechenden Daten der Juni-Ernte des Jahres 2001 auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen festgestellt ($R^2 = 0,79$; Steigung $= 0,58$; Anhang Abb. A5 a). Auf den Parzellen mit geringen Leguminosenanteilen ($< 5\%$) wurde die Masse tendenziell leicht unterschätzt, auf Parzellen mit höheren Leguminosenanteilen wurde die Masse häufiger überschätzt. Für die

August-Ernte des Jahres 2001 (zweiter Schnitt) zeigte die Steigung von $m = 0,93$ der linearen Gleichung eine höhere Übereinstimmung von Schätzung und Trockenmassebestimmung an (Anhang, Abb. A5 b).

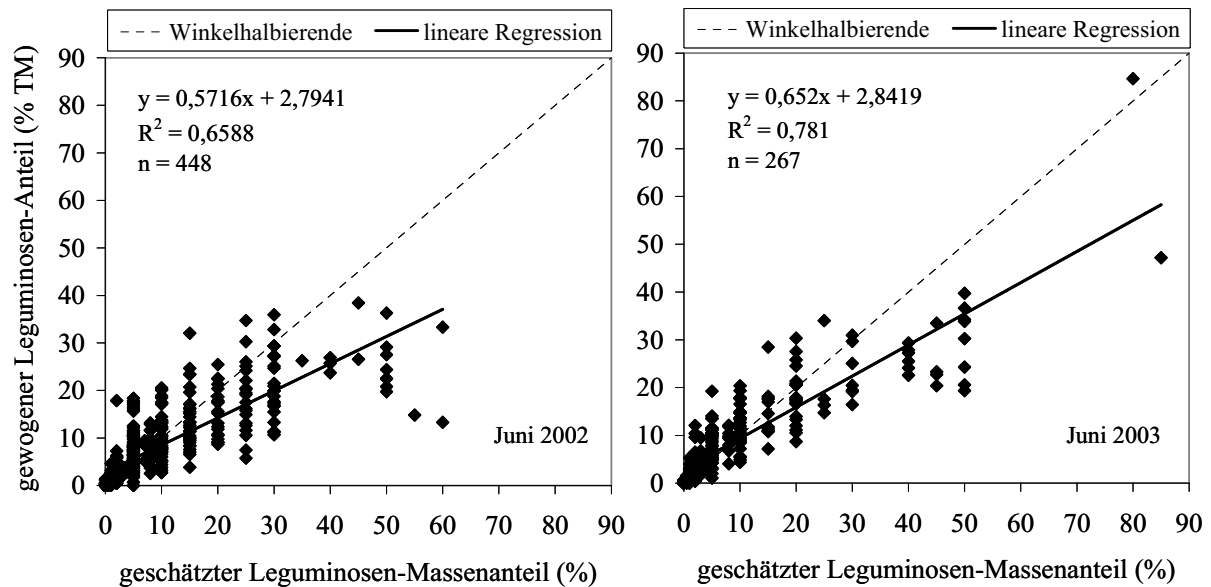


Abb. 20 a und b: Vergleich der Ergebnisse der Leguminosen-Anteilsschätzung im Juni 2002 (linke Graphik) und im Juni 2003 (rechte Graphik) mit der Anteilsermittlung über die Trockenmassenbestimmung.

Die Abhängigkeit der fixierten N-Menge (Nfix) in der oberirdischen Biomasse von dem Leguminosenanteil der Wiesen wurde in Kap. 5.5.6 betrachtet. Über die Steigungen der linearen Beziehung in Abb. 13 (Kap. 5.5.6) lässt sich die Abweichung der fixierten N-Menge bei einer Über- oder Unterschätzung des Leguminosenanteils beurteilen. Je Prozent Leguminosenanteil stieg die fixierte N-Menge um durchschnittlich $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Bei einer Schätzabweichung von 10 % würde folglich um 5 kg Nfix über- bzw. unterschätzt. Eine Abweichung der Schätzung der Leguminosenanteile von den gemessenen TM-Anteilen um mehr als 10 % wurde für etliche Ernteparzellen festgestellt (Abb. 20 a und b). Die Abweichung der Massenanteils-Schätzung von der TM-Analyse betrug für die gemittelten Leguminosenanteile pro Fläche zwischen 0,1 % (Fläche Pellingen 1 im Jahr 2003) und 11,6 % (Fläche Pellingen 1 im Jahr 2001, Tab. 30).

Obwohl die Daten der Jahre 2002/2003 und 2001 unterschiedlich erhoben wurden (Gewichtsanteil- bzw. Deckungsschätzung, siehe Kap. 4.2.2) und die Zahl der untersuchten Parzellen pro Fläche im Jahr 2002 stark erhöht wurde, resultierte im Mittel für die Juni-Ernten der drei Jahre eine ähnlich hohe Übereinstimmung der Schätzungen mit der TM-Ertragsbestimmung. Eine Verbesserung der Schätzgenauigkeit (Mittelwert) durch Anhebung der Anzahl von Ernte- und Schätzparzellen je Wiese war nicht erkennbar (siehe Tab. 30 und Tab. 2).

5.8 Böden der Untersuchungsflächen

Bodennährstoffe und der pH-Wert spielen eine wichtige Rolle für die Aktivität der Bodenorganismen und für das Pflanzenwachstum. Insbesondere die Bildung der Wurzelknöllchen bei Leguminosen sowie der Prozess der symbiotischen N_2 -Fixierung wird durch Bodenbedingungen beeinflusst. Der bakterielle Symbiosepartner kann nur bei ausreichendem Angebot der wichtigsten Nährstoffe (P, K, Mg, Spurenelemente) mit Photosyntheseprodukten gut versorgt werden. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die Effizienz der symbiotischen N_2 -Fixierung. Andererseits wird durch ein Überangebot an mineralischem Stickstoff im Boden die N_2 -Fixierungsrate verringert, da die Aufnahme mineralischen Bodenstickstoffs für die Leguminosen energetisch sinnvoller ist als eine Stickstoff-Fixierung über die Bakteriensymbiose (ROSCHER et al. 2004).

Anhand der Analyse bodenchemischer Kenngrößen (pH-Werte, Stickstoff- und Kohlenstoffgesamtgehalte, leicht mobilisierbare Nährstoffe) werden die Böden der 16 Wiesen allgemein charakterisiert und verglichen. Zudem wird beurteilt wie gut die Böden mit den wichtigsten Nährstoffen versorgt waren. Mögliche Auswirkungen einer ungünstigen Nährstoffversorgung auf die symbiotische N-Bindung werden in Kap. 6.1 diskutiert.

5.8.1 pH-Werte

Die in wässriger Suspension gemessenen pH-Werte der Böden lagen zwischen 4,9 und 5,9 (Tab. 31). Die niedrigsten pH-Werte zeigten die Flächen Muhl 1, Waldweiler und Züsch 1, Gusterath 1 und Muhl 2 ($pH_{(H_2O)} = 4,9\text{--}5,0$ in 0–5 cm Tiefe). Den höchsten $pH_{(H_2O)}$ -Wert wies mit 5,8–5,9 die Fläche Gutweiler auf. Die pH-Messungen in KCl-Lösung ergaben Werte zwischen 3,6 (Fläche Waldweiler) und 4,7 (Fläche Gutweiler) und lagen damit etwa eine pH-Einheit niedriger.

Nach KÖNIG & KERSCHBERGER (1996) liegt die optimale Bodenreaktion für Dauergrünland auf schluffigem Lehm bei pH 5,6 bis 6,6. Nach VDLUFA (zit. in FRITSCH 2000) sollte im Grünland auf schluffigem Lehm mit geringem Humusgehalt ein pH-Wert von 5,6 bis 6,3 angestrebt werden. Anhand der pH-Werte der Bödenlösung ($pH_{(H_2O)}$) können die Untersuchungsflächen folgendermaßen eingeschätzt werden. Im optimalen pH-Bereich befinden sich lediglich die Böden der Wiesen Gusterath 2, Oberremmeler Berg und Gutweiler. Mit einem pH von 5,5 wären die Flächen Pellingen 2, 3 und 4 als mäßig günstig und die übrigen Flächen mit pH-Werten von 5,3 und niedriger als ungünstig für die pflanzliche Biomasseproduktion einzustufen. Die Böden mit pH-Werten größer als 5,0 befinden sich im Silikat-Pufferbereich. Die Flächen Muhl 1 und 2, Waldweiler, Züsch 1 und Gusterath 1 liegen mit pH 4,9 bis 5,0 an der Grenze zum Austauscher-Pufferbereich.

Tab. 31: pH-Werte der Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm, sortiert nach pH (H₂O) in 0–5 cm Bodentiefe.

Fläche	pH-Wert (H ₂ O)		pH-Wert (KCl)	
	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
Muhl 1	4,9	5,0	3,9	3,9
Waldweiler	4,9	5,0	3,6	3,7
Züsch 1	5,0	5,0	3,9	4,0
Gusterath 1	5,0	5,2	4,0	4,1
Muhl 2	5,0	5,0	3,9	3,9
Hockweiler	5,2	5,3	4,1	4,2
Gusterath 3	5,3	5,2	4,1	4,0
Pellingen 1	5,3	5,3	4,0	4,0
Züsch 2	5,3	5,3	4,2	4,1
Pellingen 5	5,3	5,4	4,0	4,1
Pellingen 4	5,5	5,5	4,2	4,1
Pellingen 2	5,5	5,5	4,3	4,2
Pellingen 3	5,5	5,4	4,3	4,2
Gusterath 2	5,6	5,3	4,6	4,1
Oberemmeler Berg	5,6	5,5	4,3	4,2
Gutweiler	5,8	5,9	4,7	4,6

5.8.2 Gesamtkohlenstoff- und Gesamtstickstoffgehalte

Der Bodenvorrat an Stickstoff wurde durch die Messung der Gesamtstickstoffgehalte (N_t) bestimmt. Die Gesamtstickstoffgehalte bewegten sich in den oberen 0–5 cm des Bodens zwischen 0,3 und 0,5 %, in 5–10 cm Tiefe zwischen 0,2 und 0,4 % (Tab. 32). Der Kohlenstoffgesamtgehalt (C_t) lag in den oberen 0–5 cm zwischen 3,2 und 6,9 %, in 5–10 cm Tiefe zwischen 1,7 und 5,8 %. (Aktuelle Mineralstickstoffgehalte (N_{min}) siehe Kap. 5.8.10).

Durch die Analysen des Gesamtstickstoff- und Gesamtkohlenstoffgehaltes kann über das berechnete C_t/N_t-Verhältnis³ auf die Nährstoffnachlieferung durch Mineralisation geschlossen werden. Ein enges C/N-Verhältnis spricht für eine schnelle Mineralisation organischer Substanz durch den hohen Anteil an mikrobieller Biomasse und somit für eine gute Nährstoffnachlieferung. Ein weites C/N-Verhältnis deutet auf eine gehemmte Zersetzung und Mineralisation organischer Substanz hin (GISI 1997, SCHEFFER 2002). Das C_t/N_t-Verhältnis schwankte zwischen 9,6 (Flächen Pellingen 2 und 3) und 16,2 (Fläche Muhl 2) in den oberen 0–5 cm des Bodens. Dieses relativ enge C_t/N_t-Verhältnis weist auf günstige Bedingungen für den mikrobiellen Abbau organischer Substanzen im Boden und eine gute Nährstoffnachlieferung für die Pflanzen hin. Ähnliche C_t/N_t-Verhältnisse (6,9 bis 16,5) wurden von

³ Der anorganische Kohlenstoffanteil ist aufgrund der geringen CO₃-Gehalte der Hunsrück-Böden gering. Daher wird hier das C_t/N_t-Verhältnis anstelle des sonst üblicherweise benutzten C_{org}/N_t-Verhältnisses zur Einschätzung der Nährstoffnachlieferung angegeben.

SIMMERING et al. (2001) von Ginsterbeständen auf sauren Böden im Lahn-Dill-Bergland berichtet. Ein C/N-Verhältnis > 25 im Oberboden wurde von VOGEL (1981) als Hinweis auf einen Nährstoffmangel gewertet. In seiner Arbeit über Wiesen im Westharz beobachtete VOGEL ein steigendes C/N-Verhältnis mit zunehmender Höhenlage. In der vorliegenden Untersuchung zeigten die Wiesen der höheren Lagen ebenfalls etwas weitere C/N-Verhältnisse (um 12 bis 16) als die der tieferen Lagen (um 10 bis 11).

Tab. 32: Stickstoff- und Kohlenstoff-Gesamtgehalte und das C_t/N_t -Verhältnis in den Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.

Fläche	C_t/N_t		N total (%)		C total (%)	
	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
Pellingen 3	9,6	8,1	0,4	0,3	3,7	2,2
Pellingen 2	9,6	7,7	0,4	0,2	3,9	1,7
Pellingen 1	9,7	8,6	0,3	0,3	3,2	2,3
Gutweiler	9,8	8,7	0,5	0,3	4,4	3,0
Pellingen 5	9,8	8,5	0,4	0,3	3,6	2,4
Gusterath 3	9,8	8,6	0,4	0,3	3,9	2,7
Gusterath 1	9,9	7,9	0,4	0,3	3,7	2,1
Hockweiler	10,0	8,3	0,3	0,3	3,5	2,1
Pellingen 4	10,0	8,3	0,4	0,3	4,0	2,3
Oberemmeler Berg	10,6	9,7	0,5	0,4	5,5	4,0
Gusterath 2	10,8	8,5	0,5	0,3	5,6	2,6
Züsch 2	12,3	10,9	0,4	0,3	5,0	3,4
Züsch 1	12,8	12,4	0,5	0,4	6,4	4,6
Waldweiler	13,9	14,7	0,4	0,3	5,2	4,0
Muhl 1	15,2	16,4	0,4	0,3	6,2	4,9
Muhl 2	16,2	17,6	0,4	0,3	6,9	5,8

5.8.3 Phosphorgehalte

Die durch Ammoniumlactat-Austausch ermittelten Phosphorgehalte erreichten 0,4 bis 5,0 mg P/100 g TB in 0–5 cm Bodentiefe und 0,3 bis 4,4 mg P/100 g in 5–10 cm Tiefe (Tab. 33). Die höchsten P-Gehalte wurden für die Flächen Gutweiler (5,0 mg P/100 g), Pellingen 3 (4,4 mg P/100 g) und Hockweiler (4,3 mg P/100 g) ermittelt. Die niedrigste P-Konzentration wurde im Boden der Fläche Oberemmeler Berg nachgewiesen (0,4 mg P in 0–5 cm und 0,3 mg P in 5–10 cm Tiefe).

Der Phosphor-Gehalt im Boden der Fläche Gutweiler (5,0 mg P/100 g TB) liegt im unteren Grenzbereich der für Grünland auf mittleren Standorten anzustrebenden Versorgungsstufe von etwa 5 bis 9 mg P/100 g TB (entsprechend ca. 12–20 mg P_2O_5 /100g TB, Angabe für Horizonttiefe 0–30 cm, FRITSCH 2000). Die Flächen Pellingen 3 und Hockweiler können der niedrigen Gehaltsklasse zugeordnet werden, während alle übrigen Flächen mit $< 1,3$ mg P/100 g TB nach dieser Bewertung als sehr gering P-versorgt einzustufen sind. Dies ist eine Folge der bisher extensiven Nutzung. Die Fläche Gutweiler wurde bis zum Beginn des Untersuchungszeitraumes mäßig intensiv genutzt und regelmäßig gedüngt, so dass hier noch eine relativ gute P-Versorgung vorliegt. Diese hat vermutlich im Verlauf der drei

Untersuchungsjahre stetig abgenommen. Eine Verschlechterung der P-Versorgung kann neben klimatischen Faktoren - insbesondere ist hier die Trockenheit im Frühjahr und Sommer des Jahres 2003 zu nennen - für den signifikanten Rückgang der Erntemenge dieser Wiese verantwortlich sein. Eine relativ schnelle Verringerung der P-Versorgung extensivierter (ungedüngter) Wiesen wurde von RUTHSATZ (1995) festgestellt. Bereits nach sechsjährigem Düngungsverzicht zeigten zahlreiche Wiesen eine niedrige bis mangelhafte P-Versorgung (RUTHSATZ 1995). Eine Abnahme der Boden-Phosphorgehalte in ehemals intensiv genutztem Dauergrünland und sehr geringe Werte (1,3 mg P/100 g TB, DL-Extraktion) nach zehnjähriger Düngungspause wurden desgleichen von SCHUBERT et al. (2003) nachgewiesen. Der Verzicht auf mineralische P-Düngung kann wesentlich zum Erhalt von artenreichen Magerwiesen beitragen (RUTHSATZ 2001).

Tab. 33: Gehalte an austauschbarem Phosphor, Kalium (Ammoniumlactat-Austausch) und Magnesium (Ammoniumchlorid-Austausch) in den Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.

Fläche	Nährstoffgehalte (mg / 100 g TB)					
	P		K		Mg	
	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
Oberemmel Berg	0,4	0,3	5,3	3,5	19,3	9,8
Gusterath 3	0,6	0,3	6,5	4,3	13,6	6,8
Gusterath 1	0,7	0,5	7,3	4,4	7,6	4,5
Pellingen 1	0,8	0,6	4,3	3,3	9,0	5,1
Pellingen 5	0,8	0,5	6,4	4,4	7,5	4,7
Züsch 2	0,9	0,5	8,2	4,2	18,2	5,6
Pellingen 4	1,0	0,5	6,9	4,1	10,5	5,6
Pellingen 2	1,0	0,4	8,1	3,8	12,6	5,7
Muhl 1	1,0	0,7	11,0	5,7	5,0	2,2
Waldweiler	1,1	0,7	5,4	3,4	4,5	2,6
Gusterath 2	1,1	0,5	9,7	5,2	27,5	10,4
Muhl 2	1,2	1,0	8,8	6,5	6,7	3,4
Züsch 1	1,3	0,7	9,6	5,7	2,6	1,3
Hockweiler	4,3	4,4	6,3	3,5	5,9	3,0
Pellingen 3	4,4	2,8	11,3	6,4	11,9	6,6
Gutweiler	5,0	2,9	6,8	4,7	12,5	6,4

5.8.4 Kaliumgehalte

Die Gehalte an austauschbarem Kalium lagen in der oberen Bodenschicht (0–5 cm) zwischen 4,3 und 11,3 mg/100g TB und in 5–10 cm Tiefe zwischen 3,3 und 6,5 mg/100g (Tab. 33). Die höchsten K-Gehalte zeigten die Flächen Pellingen 3 (11,3 mg/100g) und Muhl 1 (11,0 mg/100g). Die niedrigsten K-Gehalte wiesen die Flächen Pellingen 1 (4,3 mg/100g), Oberemmel Berg (5,3 mg/100g) und Waldweiler (5,4 mg/100g) auf.

In der für Acker- und Grünlandböden anzustrebenden Kalium-Gehaltsklasse von etwa 10 bis 16 mg K/100g TB (entsprechend 12 bis 20 mg K₂O pro 100g TB, Angabe für 0–30 cm Bodentiefe, FRITSCH 2000) befinden sich die Flächen Pellingen 3 und Muhl 1. Die Flächen Gusterath 2 (9,7 mg K/100g TB) und Züsch 1 (9,6 mg K/100g TB) liegen im unteren

Grenzbereich einer optimalen Versorgung. Die übrigen Flächen sind mit 4,3 bis 8,8 mg K/100g TB nach dieser Klassifizierung als niedrig versorgt einzustufen. RUTHSATZ (1995) stellte in Böden extensivierter (ungedüngter) Grünlandflächen ähnliche K-Gehalte von etwa 5 bis 10 mg K/100g TB in 0–10 cm Tiefe fest. Nach SCHEFFER (2002) ist eine K-Nachlieferung im Oberboden von 5–9 mg K/100 g (Ca-Acetat-Lactat-Extraktion) für einen optimalen Ertrag ausreichend.

5.8.5 Magnesiumgehalte

Die Gehalte an austauschbarem Magnesium (NH₄Cl-Extraktion) lagen zwischen 2,6 und 27,5 mg/100g TB in 0–5 cm Bodentiefe und zwischen 1,3 und 10,4 mg/100 g TB in 5–10 cm Tiefe (Tab. 33). Die höchsten Mg-Konzentrationen wurden auf den Flächen Gusterath 2 (27,5 mg/100g), Oberremmeler Berg (19,3 mg/100g) und Züsch 2 (18,2 mg/100g) ermittelt. Die niedrigste Mg-Konzentration wurde im Boden der Fläche Züsch 1 mit 2,6 mg/100g (jeweils auf die oberen 0–5 cm bezogen) nachgewiesen.

Der Bewertung von SCHLICHTING et al. (1995) folgend ist die Mg-ärmste Fläche Züsch 1 (2,6 mg Mg/100 g TB) noch als mittel versorgt einzustufen. Die Flächen Waldweiler (4,5 mg Mg), Muhl 1 (5,0 mg Mg), Hockweiler (5,9 mg Mg) und Muhl 2 (6,7 mg Mg) zeigten eine erhöhte Mg-Versorgung. Alle übrigen Flächen waren hoch bis sehr hoch mit Mg versorgt. Der Maximalwert wurde auf der Fläche Gusterath 2 mit 27,5 mg Mg/100 g TB nachgewiesen. Nach SCHEFFER (2002) ist die optimale Magnesium-Versorgung auf lehmigen Ackerböden bei einer Konzentration von 4 bis 6 mg Mg/100g TB erreicht (CaCl₂-Extraktion).

Der Magnesium-Gehalt im Boden nahm mit der Tiefe stark ab. So war beispielsweise der hohe Mg-Gehalt der Fläche Gusterath 2 (27,5 mg Mg/100g TB in 0–5 cm Tiefe) in den darunter folgenden 5–10 cm Bodentiefe auf 10,4 mg Mg/100 g gesunken. Der Vergleich der Böden mit den Empfehlungswerten ist daher durch unterschiedliche Extraktionsmethoden und durch die unterschiedlichen Bodentiefen als Bezugsgrößen erschwert. Festzustellen bleibt jedoch, dass die Spanne der Magnesiumversorgung bei den untersuchten Wiesen relativ hoch ist, wobei die überwiegende Zahl der Flächen mit Mg-Gehalten von > 4 mg Mg/100 g TB in den oberen zehn Bodenzentimetern ausreichend versorgt scheint. Vermutlich hat das ehemals verbreitete Mergeln der Flächen (mit Magnesium enthaltenden Carbonatgesteinen) zu den relativ hohen Mg-Gehalten der Böden beigetragen (vgl. RUTHSATZ 2001). Eine ausreichende Versorgung mit Magnesium konnte ferner anhand der Mg-Gehalte im Sprossmaterial der auf den Magerwiesen geernteten Pflanzen nachgewiesen werden (Kap. 5.9).

5.8.6 Calciumgehalte

Die Spanne der Calciumkonzentration (NH₄Cl-Extraktion) lag in der obersten Bodenschicht (0–5 cm) bei 34,5 bis 152,0 mg/100 g TB (Tab. 34). In der folgenden Schicht (5–10 cm Tiefe) erreichten die Ca-Konzentrationen 18,2 bis 124,0 mg/100 g. Die höchsten Ca-Gehalte wurden

auf den Flächen Gutweiler (152 mg/100 g) und Gusterath 2 (143 mg/100 g) bestimmt. Die geringsten Ca-Gehalte zeigten die Flächen Waldweiler mit 34,5 und Züsch 1 mit 34,7 mg/100 g (jeweils in der obersten Bodenschicht gemessen).

Nach SCHLICHTING et al. (1995) gelten Böden mit einem Calcium-Gehalt über 25 mg/100 g TB bei extensiver Grünlandnutzung als gut Ca-versorgt. Die Böden der Untersuchungsflächen können daher als gut bis sehr gut Ca-versorgt eingestuft werden. Aufgrund des CaCO₃-armen Ausgangsgesteins hätte man geringere Ca-Gehalte in den Böden erwarten können. Doch die Wiesen sind durch jahrzehntelange landwirtschaftliche Nutzung geprägt. Der relativ hohe Ca-Gehalt der Böden ist höchstwahrscheinlich durch eine ehemalige Kalkung (Mergeln) der Flächen bedingt.

Tab. 34: Gehalte an austauschbarem Calcium, Mangan und Aluminium (Ammoniumchlorid-Austausch) in den Wiesenböden, Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm.

Fläche	Nährstoffgehalte (mg / 100 g TB)					
	Ca		Mn		Al	
	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
Waldweiler	34,5	25,5	1,9	1,5	29,3	28,0
Züsch 1	34,7	19,4	2,5	1,1	27,5	24,2
Muhl 1	37,8	18,2	1,9	0,7	21,2	23,9
Pellingen 1	54,3	38,3	4,9	3,7	6,8	9,2
Züsch 2	55,6	24,0	1,6	1,5	15,2	22,4
Hockweiler	59,3	38,3	6,4	3,2	4,9	4,7
Muhl 2	61,3	44,4	1,4	0,9	21,9	25,3
Pellingen 2	65,3	20,8	6,1	3,8	3,8	6,2
Pellingen 5	69,5	50,2	1,5	0,9	6,4	9,8
Gusterath 1	72,4	49,9	2,4	1,3	8,3	10,4
Gusterath 3	79,2	48,9	1,7	1,0	6,5	9,8
Pellingen 3	87,3	58,9	1,5	1,1	3,0	5,2
Pellingen 4	92,2	59,9	2,1	1,5	4,3	7,2
Oberemmelmer Berg	114,5	75,5	2,4	1,8	4,3	8,1
Gusterath 2	143,0	58,6	2,4	1,8	1,1	6,3
Gutweiler	152,0	124,0	3,5	3,0	0,5	1,0

5.8.7 Aluminiumgehalte

Die austauschbaren Aluminiumkonzentrationen (NH₄Cl-Extraktion) lagen in der oberen Bodenschicht zwischen 0,5 und 29,3 mg/100 g Trockenboden (Tab. 34). In 5–10 cm Bodentiefe waren die Al-Konzentrationen mit wenigen Ausnahmen höher (1,0 bis 28,0 mg/100 g) als in der obersten Bodenschicht. Die Böden der Flächen Waldweiler, Züsch 1, Züsch 2, Muhl 1 und Muhl 2 wiesen Al-Gehalte zwischen 15 und 30 mg in den beiden beprobten Bodentiefen 0–5 und 5–10 cm auf. Sehr geringe Al-Gehalte wurden auf der Fläche Gutweiler mit 0,5 bis 1 mg/100g TB festgestellt. Zu den möglichen Auswirkungen der höheren Al-Konzentrationen auf die symbiotische N-Bindung siehe Kap. 5.8.11 und Kap. 6.1.5.

5.8.8 Eisen- und Mangangehalte

Die Konzentrationen an Ammoniumchlorid-austauschbarem Mangan und Eisen wurde bestimmt, um diese sauer wirkenden Kationen in die Berechnung der Basensättigung und der Kationenaustauschkapazität einbeziehen zu können. Die Mangankonzentrationen lagen in den oberen 0–5 cm der Böden zwischen 1,4 mg/100g TB (Fläche Muhl 2) und 6,4 mg/100g TB (Fläche Hockweiler) (Tab. 34). In 5–10 cm Profiltiefe waren die Mn-Konzentrationen geringer und lagen bei 0,7 mg (Fläche Muhl 1) bis 3,8 mg/100g TB (Fläche Pellingen 2).

In den meisten Bodenproben konnten keine nennenswerten Eisenkonzentrationen nachgewiesen werden. Lediglich die Fläche Waldweiler (die Fläche mit den höchsten Al-Konzentrationen) zeigte in der oberen 0–5 cm Bodenschicht einen Fe-Gehalt von 0,8 mg/100g TB und in 5–10 cm Tiefe einen Fe-Gehalt von 0,4 mg/100g TB. Bei den übrigen Flächen lagen die Fe-Gehalte unterhalb der Nachweisgrenze der Methode. Die Mangan- und Eisenversorgung der Pflanzen wird daher anhand der Gehalte dieser Nährstoffe in der oberirdischen Biomasse beurteilt (Kap. 5.9 und Anhang, Tab. A14).

5.8.9 Basensättigung und effektive Kationenaustauschkapazität der Böden

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) (Tab. 35) gibt die Kationenbindung bei gegebenem pH-Wert an und ist ein Maß für die im Boden austauschbar gebundenen Pflanzennährstoffe. Der Basensättigungsgrad (BS, früher V-Wert) drückt den prozentualen Anteil basisch wirkender Kationen (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) an der KAK aus. Die Summe der basisch wirkenden Kationen wird durch den S-Wert, die Summe der sauer wirkenden Kationen (Al^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , H^+) durch den H-Wert ausgedrückt. Die Ergebnisse werden in mmol_c/kg Trockenboden angegeben. Das entspricht der älteren Bezeichnung mval/kg TB (AG BODEN 2005).

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) und die Basensättigung waren in den oberen 0–5 cm des Bodens höher als in 5–10 cm Profiltiefe. Die KAK_{eff} schwankte in 0–5 cm Tiefe zwischen 45,6 (Fläche Hockweiler) und 100,4 mmol_c/kg TB (Fläche Gusterath 2). In 5–10 cm Bodentiefe lag die KAK_{eff} zwischen 30,3 (Fläche Hockweiler) und 71,8 mmol_c/kg Boden (Fläche Gutweiler). Die Basensättigung zeigte in den oberen 0–5 cm des Bodens eine Spanne von 38,0 % (Fläche Waldweiler) bis 97,1 % (Fläche Gutweiler). In 5–10 cm Bodentiefe wurden Werte zwischen 31,4 und 95,2 % ermittelt.

Nach AG BODEN (2005) werden Böden mit einer Basensättigung von 20 bis 50 % als mittelbasisch, mit einer Basensättigung von 50 bis 80 % als basenreich und von 80 bis 100 % als sehr basenreich bis basengesättigt bewertet. Nach dieser Bewertungsskala sind die Flächen Waldweiler (38,0 %) und Züsch 1 (41,7 %) als mittelbasisch einzustufen. Die Flächen Muhl 1 (51,8 %) und Muhl 2 (61,0 %), Züsch 2 (70,6 %), Pellingen 1 (76,0 %), Hockweiler (79,1 %) und Gusterath 1 (80,0) können als basenreich und die übrigen acht Flächen mit 82,1 bis 97,1 % als sehr basenreich (0–5 cm Tiefe) bewertet werden. Das bedeutet, dass selbst die sauren Böden der Wiesen in Muhl, Waldweiler, Züsch 1 und Gusterath 1 über eine relativ gute Basenversorgung verfügen. POPKEN & LICHT (1998) beschrieben bereits basenreiche

saure Böden im östlichen Hunsrück und bestätigten, dass die Basensättigung nicht zwingend mit der Bodenreaktion korreliert ist.

Tab. 35: Basensättigung und effektive Kationenaustauschkapazität der Wiesenböden.

Fläche	BS		S-Wert		H-Wert		KAK _{eff}	
	(%)		(mmol _c /kg)		(mmol _c /kg)		(mmol _c /kg)	
	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm	0–5 cm	5–10 cm
Waldweiler	38,0	31,4	22,3	15,7	36,3	34,4	58,6	50,1
Züsch 1	41,7	31,5	21,9	12,2	30,7	26,5	52,6	38,7
Muhl 1	51,8	32,2	25,8	12,3	24,0	25,9	49,7	38,3
Muhl 2	61,0	48,9	38,3	26,6	24,5	27,8	62,8	54,4
Züsch 2	70,6	41,5	44,8	17,7	18,7	25,0	63,5	42,7
Pellingen 1	76,0	64,0	35,6	24,2	11,2	13,6	46,8	37,7
Hockweiler	79,1	74,1	36,0	22,5	9,5	7,9	45,6	30,3
Gusterath 1	80,0	70,1	44,3	29,7	11,1	12,6	55,4	42,3
Pellingen 5	82,1	70,9	42,5	30,0	9,3	12,3	51,7	42,3
Pellingen 2	85,1	62,2	45,0	16,0	7,9	9,7	52,9	25,7
Gusterath 3	85,5	71,9	52,4	31,1	8,9	12,2	61,3	43,3
Pellingen 4	88,8	78,4	56,4	35,5	7,2	9,8	63,6	45,3
Pellingen 3	91,2	82,7	56,2	36,5	5,4	7,6	61,6	44,1
Oberemmelberg	91,5	81,1	74,4	46,6	6,9	10,8	81,3	57,5
Gusterath 2	96,0	81,7	96,4	39,1	4,0	8,8	100,4	47,9
Gutweiler	97,1	95,2	87,9	68,3	2,6	3,4	90,5	71,8

KAK_{eff}: effektive Kationenaustauschkapazität (Summe aller Kationen)

BS: Basensättigung (S-Wert dividiert durch KAK_{eff} multipliziert mit Faktor 100)

S-Wert: Summe der basischen Kationen

H-Wert: Summe der sauren Kationen

5.8.10 Mineralstickstoffgehalte (N_{min})

Im Gegensatz zum Bodenvorrat an Gesamtstickstoff (N_t) stellt der mineralische Stickstoff (N_{min} bestehend aus NO₃-N und NH₄-N) die leichter für Pflanzen verfügbare Stickstoff-Fraktion des Bodens dar. Der mineralische Stickstoff beträgt gemeinhin bis zu einem Prozent des Gesamtstickstoffs im Boden (SCHEFFER 2002). Um eine ungefähre Einschätzung der N_{min}-Gehalte der Magerwiesen geben zu können, wurden an zwei Terminen (Juni und September) die aktuellen Nitrat- und Ammonium-Gehalte im Oberboden von sechs Hauptuntersuchungsflächen bestimmt.

Im Juni wurden gegenüber September höhere N_{min}-Werte festgestellt (12,6 bis 23,9 kg ha⁻¹ gegenüber 3,2 bis 7,6 kg ha⁻¹, Abb. 21). Die N_{min}-Mengen im Juni bestehen überwiegend aus NH₄-N (10,2 bis 19,1 kg ha⁻¹). Die NO₃-Mengen im Juni bewegten sich mit 2,4 bis 5,1 kg ha⁻¹ auf ähnlichem Niveau wie die NO₃- und NH₄-Mengen im September (2,0 bis 4,1 bzw. 1,2 bis 4,5 kg ha⁻¹). Im Juni wiesen die Böden der Flächen Pellingen 2 sowie Waldweiler mit fast 24 kg ha⁻¹ die höchsten N_{min}-Vorräte auf. Die Fläche Hockweiler zeigte mit 12,6 kg ha⁻¹ die geringsten N_{min}-Mengen. Im September bewegten sich die N_{min}-Mengen zwischen 3,2 kg ha⁻¹ (Fläche Oberemmelberg) und 7,6 kg ha⁻¹ (Fläche Hockweiler).

Die festgestellte $N_{\min}$ -Menge von maximal $24 \text{ kg } N_{\min} \text{ ha}^{-1}$ ist nach SCHLICHTING et al. (1995) als sehr gering bis gering zu bewerten. Jedoch ist bekannt, dass sich der $N_{\min}$ -Gehalt des Bodens im Jahresverlauf je nach den Bedingungen für die mineralisierenden Bakterien bzw. nach dem pflanzlichen N-Bedarf ändert (vgl. NEITZKE 1998). Hierauf weisen auf einigen Flächen die stark unterschiedlichen Ammoniumgehalte im Juni und September hin. Die vergleichsweise geringen Nitratgehalte sind vermutlich durch die stetig hohe Aufnahme dieser N-Verbindung durch die Pflanzen begründet. Ferner kann das mobile Nitrat bei hohen Niederschlagsmengen leicht ausgewaschen werden. Während der Wachstumsperiode der Pflanzen ist jedoch auf ungedüngten Wiesen eine Nutzung des Nitrats durch Pflanzen oder Bodenorganismen wahrscheinlicher. In Untersuchungen von MALLARINO & WEDIN (1990) zeigten die Böden ebenfalls im Sommer höhere Ammonium-Gehalte als im Herbst. Die Autoren vermuteten als Ursache eine abnehmende Mineralisationsrate organisch gebundenen Stickstoffs sowie einen geringeren pflanzlichen N-Bedarf im Herbst.

Weitere Bodeneigenschaften (Bodentyp, Bodenart) für die sechs Hauptuntersuchungsflächen sind im Anhang Tab. A17 aufgeführt.

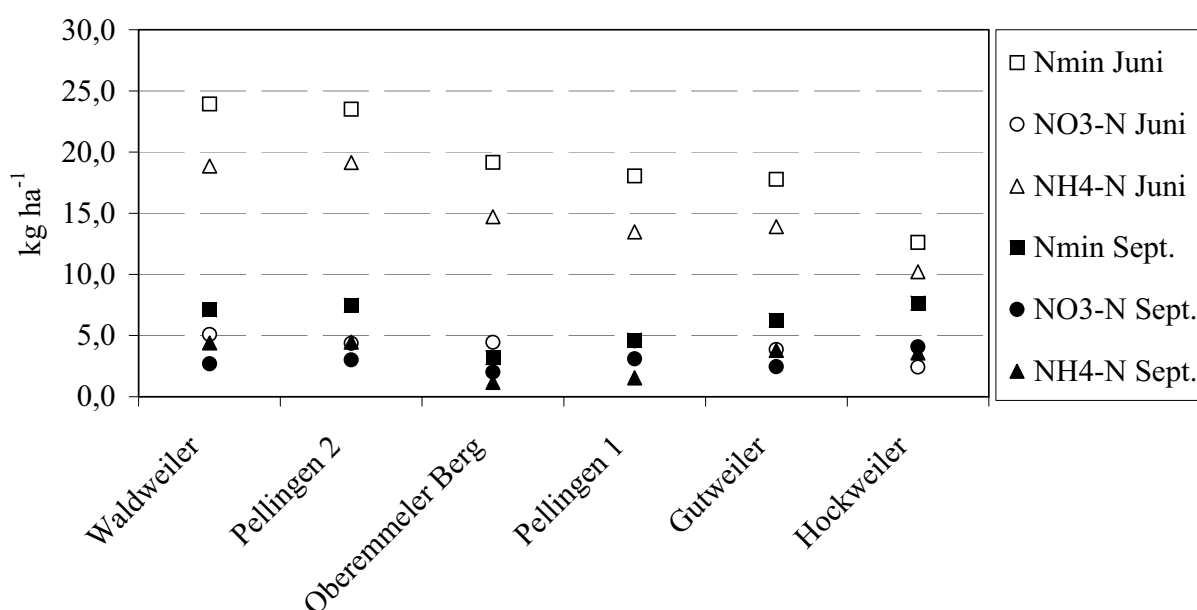


Abb. 21: Nitrat-N- und Ammonium-N-Gehalte im Oberboden (0–10 cm Tiefe) der sechs Hauptuntersuchungsflächen im Juni und im September des Jahres 2001.

5.8.11 Beziehungen zwischen der Bodenreaktion, wichtigen Pflanzennährstoffen (P, K, Mg) sowie dem Ca/Al-Verhältnis und der symbiotischen N_2 -Fixierung

Geprüft wurden mögliche negative Auswirkungen auf die symbiotische N_2 -Fixierung (Menge N_{fix}) durch niedrige pH-Werte, ungünstige Ca/Al-Verhältnisse und geringe P-Vorräte im Boden. Die Korrelationskoeffizienten und die Bestimmtheitsmasse aus den linearen Regressionen sind in Tabelle 36 zusammengefasst. Es sind beide N_2 -Fixierungs-Berechnungsvarianten (*Plantago lanceolata* sowie Kräuter + Gräser als Referenz)

berücksichtigt worden, da die Anzahl der untersuchten Wiesen sich in den Varianten unterschied (zu den fixierten N-Mengen und den Berechnungsvarianten siehe Kap. 5.5).

Für die pH-Werte und die fixierte N-Menge in der oberirdischen Biomasse von 10 bzw. 14 Flächen (Juni 2001 und 2002) wurde eine mittlere Korrelation festgestellt. In der Nfix-Berechnungsvariante *Plantago lanceolata* wurden Korrelationskoeffizienten von -0,67 (pH_{H2O}) und -0,64 (pH_{KCl}) erhalten. In der Berechnungsvariante Kräuter + Gräser wurden Korrelationskoeffizienten von -0,63 (pH_{H2O}) und -0,54 (pH_{KCl}) errechnet. Die Regressionsanalysen zeigten einen signifikanten Einfluss des pH-Wertes auf die Höhe der N₂-Fixierung ($P < 0,048$). Die negative Steigung deutet eine – entgegen den Erwartungen – mit steigendem pH-Wert abnehmende N₂-Fixierungsleistung an.

Tab. 36: Zusammenhang zwischen pH-Wert, Ca/Al-Verhältnis und P-Gehalt der Böden und der N₂-Fixierungsleistung beider Berechnungsvarianten (*Plantago lanceolata* bzw. Kräuter + Gräser-Sprossmasse als Referenz zum Leguminosen-Sprossmaterial).

Zusammenhang zwischen der symbiotischen Fixierleistung (kg Nfix ha ⁻¹) und Bodenparametern								
	pH (H ₂ O)		pH (KCl)		Ca/Al-Verhältnis		P-Gehalt	
Nfix-Berechnungs-variante	<i>Plantago lanceolata</i>	Kräuter + Gräser	<i>Plantago lanceolata</i>	Kräuter + Gräser	<i>Plantago lanceolata</i>	Kräuter + Gräser	<i>Plantago lanceolata</i>	Kräuter + Gräser
r	-0,67	-0,63	-0,64	-0,54	-0,32	-0,19	-0,17	-0,15
R ²	0,46	0,39	0,41	0,29	0,10	0,04	0,03	0,02
P	0,032	0,017	0,045	0,048	0,367	0,502	0,639	0,601
n	10	14	10	14	10	14	10	14

r : Pearson-Korrelationskoeffizient

R² : Bestimmtheitsmaß der linearen Regression

P : Irrtumswahrscheinlichkeit

n : Anzahl untersuchter Wiesen

Mit abnehmendem pH-Wert der Bodenlösung stieg die Konzentration der austauschbaren Aluminium-Ionen. Die Korrelation der gemessenen pH_(H2O)-Werte mit den Aluminiumgehalten im Boden (Anhang, Abb. A3) ergab einen engen Zusammenhang zwischen beiden Parametern (r = -0,8). Bekanntermaßen ist ein niedriger pH-Wert einhergehend mit einer höheren Konzentration gelöster Al-Ionen in der Bodenlösung. Bei pH-Werten kleiner 4,0 bis 5,0 werden im Boden größere Mengen Aluminiumionen freigesetzt (SCHEFFER 2002).

Die Al-Gehalte im Boden korrelierten wiederum relativ eng mit den Calcium-Gehalten (r = -0,67, Anhang Abb. A4). Das Ca/Al-Molverhältnis kann als Maß für eine mögliche schädigende Wirkung von Al-Ionen im Boden herangezogen werden. Nach SCHEFFER (2002) treten bei Waldbäumen bei pH-Werten unter 4,0 und einem Ca/Al-Molverhältnis in der Bodenlösung von < 0,2 bis < 0,1 starke Wurzelschäden auf, wobei Keimlinge schon bei einem Verhältnis unter 1,0 geschädigt werden. Ein Ca/Al-Molverhältnis unter 1,0 wurde in den Böden der Flächen Waldweiler (0,5), Züsch 1 (0,5) und Muhl 1 (0,6) festgestellt. Die Flächen Muhl 2 und Züsch 2 wiesen mit 1,1 bzw. 1,2 ebenfalls ein ungünstiges Ca/Al-Verhältnis auf.

Der Einfluss des austauschbaren P-Gehaltes und des Ca/Al-Verhältnisses der Böden auf die fixierten N-Mengen war sehr gering bis gering (Tab. 36). Die Parameter waren negativ korreliert. Bei vermeintlich günstigeren Bodenbedingungen wurden sinkende Fixierungsleistungen verzeichnet. Die Einflüsse der beiden Bodenparameter „P“ und „Ca/Al“ auf die Höhe der fixierten N-Menge waren jedoch nicht signifikant ($P > 0,367$); (Bewertung siehe Kap. 6.1.3 und 6.1.5).

Zwischen dem Gehalt an austauschbarem Kalium im Boden und der fixierten N-Menge im Erntegut bestand kein linearer Zusammenhang ($r < 0,1$). Ein geringer Zusammenhang ($r = 0,3$) wurde zwischen der Höhe des NH_4Cl -austauschbaren Magnesiums im Boden und der fixierten N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse der Wiesen festgestellt.

5.8.12 Beziehung zwischen den aktuellen $N_{\min}$ -Gehalten der Böden und der symbiotischen N_2 -Fixierung

Für den Bodenstickstoff wurde ein großer Einfluss auf die symbiotische N_2 -Fixierung angenommen. Da der Gesamt-N (N_t) im Boden nur einen Hinweis auf den langfristigen Vorrat gibt und sich die Böden der untersuchten Wiesen in diesem Parameter nur geringfügig unterscheiden, war eine unterschiedliche Auswirkung auf die symbiotische N_2 -Fixierung nicht zu erwarten. Die Unterschiede im leicht mobilisierbaren mineralischen Stickstoff ($N_{\min}$) können dagegen einen Einfluss ausüben.

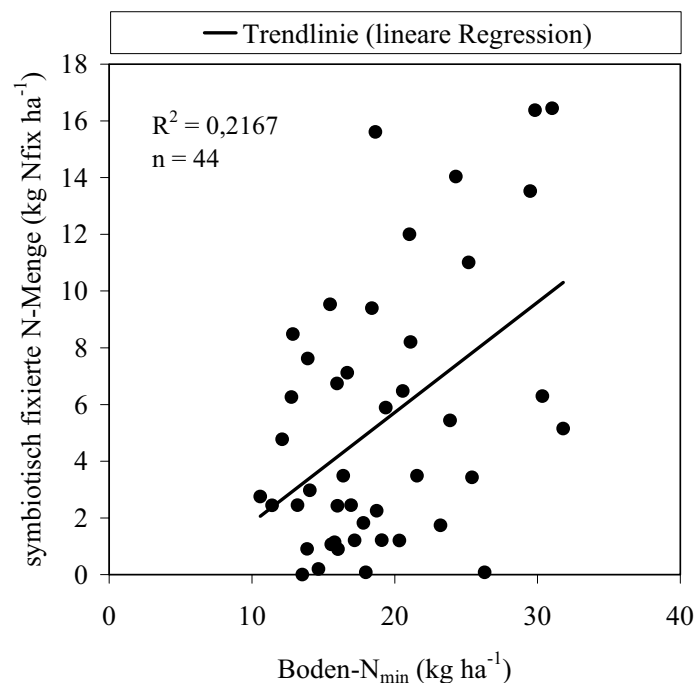


Abb. 22: Zusammenhang des mineralischen Bodenstickstoffs ($N_{\min}$) und der symbiotisch fixierte N-Menge (sechs Hauptuntersuchungsflächen, Juni 2001, Nfix-Berechnungsvariante „Kräuter + Gräser“).

Auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen wurden im Juni des Jahres 2001 von jeweils acht bis neun Parzellen Pflanzen- und Bodenproben hinsichtlich der symbiotisch fixierten

N-Menge und des $N_{\min}$ -Vorrats ausgewertet. Die Regressionsanalyse (Abb. 22) zeigte einen mittleren Zusammenhang der $N_{\min}$ -Menge und der Höhe der symbiotisch fixierten N-Menge in der oberirdischen Pflanzenmasse (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,22$; $P = 0,001$, Nfix-Berechnungsvariante „Kräuter + Gräser“ als Referenz, nur gültige Werte betrachtet). Das Ergebnis wird in Kap. 6.1.1 näher besprochen.

5.9 Mineralstoffgehalte im Sprossmaterial der Leguminosen und Nicht-Leguminosen

In Tabelle 37 sind die Mineralstoffgehalte (P, K, Mg, Ca, Mn und Fe) im Sprossmaterial der Wiesenpflanzen für drei Erntetermine (Juni und August 2001 sowie Juni 2002) aufgeführt. Dargestellt sind Mittelwerte der auf den Flächen beprobten Leguminosen und Nicht-Leguminosenarten. Die Mittelwerte dieser beiden funktionellen Gruppen (N_2 -Fixierer und Nicht-Fixierer) wurden für jede Untersuchungsfläche miteinander verglichen (t-Test für unabhängige Stichproben), um Hinweise auf Unterschiede in der Höhe der Nährstoffversorgung dieser Gruppen zu erhalten. Die Mineralstoffgehalte der untersuchten Pflanzenarten können Tab. A14 (Anhang) entnommen werden.

Die Calcium-, Magnesium-, Mangan- und Eisengehalte der Leguminosen und Nicht-Leguminosen unterschieden sich auf keiner Wiese und zu keinem Erntetermin signifikant voneinander. Bezüglich der Phosphor- und der Kaliumgehalte wurde lediglich auf fünf Flächen signifikante Unterschiede zwischen Leguminosen und Nicht-Leguminosen nachgewiesen ($P < 0,05$). Auf der Fläche Pellingen 2 zeigten die Nicht-Leguminosen im August 2001 signifikant höhere Kaliumgehalte als die Leguminosen ($P < 0,05$). Das Gleiche gilt für die Fläche Pellingen 3 im Juni 2002. Signifikant höhere Phosphorgehalte der Nicht-Leguminosen gegenüber Leguminosen wurden im August 2001 auf den Flächen Gutweiler und Hockweiler sowie im Juni 2002 auf den Flächen Gusterath 1 und Pellingen 3 nachgewiesen ($P < 0,01$).

Obwohl Pflanzen sich in ihrem Nährstoffbedarf mehr oder weniger unterscheiden, sind mittlere Ertragsgrenzwerte bzw. Spannen für eine optimale Nährstoffversorgung bekannt. Im Folgenden werden die eigenen Ergebnisse mit Ertragsgrenzwerten verglichen, die FINCK (1991) für Luzerne und Gräser anführt.

Die Phosphorgehalte in der Sprossmasse der Wiesenpflanzen waren mit 1,5 g P pro kg TS (Leguminosen Fläche Pellingen 2, August 2001) bis 3,3 g P kg⁻¹ TS (Nicht-Leguminosen Gutweiler, August 2001) vergleichsweise gering (Tab. 37). Dies deutet auf eine eher suboptimale Versorgung mit diesem Nährstoff hin. Als ausreichend für optimales Pflanzenwachstum wurden von FINCK (1991) Phosphorgehalte in Höhe von 3 bis 6 g Phosphor pro kg TS (Luzerne) und 3,5 bis 7 g P pro kg TS (Gras) genannt. Eine Anreicherung über den oberen Grenzwert hinaus wurde in Grünlandpflanzen nicht beobachtet (RIEDER 1983). Die Werte im Pflanzenmaterial bestätigen die Ergebnisse der Bodenanalysen. Die P-Versorgung der Untersuchungsflächen kann als vergleichsweise gering eingestuft werden. Ein echter

P-Mangel kann bei Gehalten unter $1,0 \text{ g P kg}^{-1}$ TS auftreten (MENDEL 1991). Derart geringe Werte wurden in den Wiesenpflanzen jedoch nicht gefunden.

Tab. 37: Mineralstoffgehalte im Sprossmaterial von Leguminosen und Nichtleguminosen an drei Ernteterminen (Juni und August 2001, Juni 2002). Angaben (Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung) in Gramm (P, K, Mg, Ca) oder Milligramm (Mn, Fe) je Kilogramm Trockensubstanz.

Nährstoffgehalte in der Sprossmasse											
Leguminosen, 2001 (Juni)											
Fläche	n	Phosphor (g/kg)	Kalium (g/kg)	Magnesium (g/kg)	Calcium (g/kg)	Mangan (mg/kg)	Eisen (mg/kg)				
Gutweiler	6	2,23 ± 0,56	11,48 ± 2,98	2,67 ± 0,62	11,54 ± 4,58	93,10 ± 31,26	78,12 ± 11,49				
Oberemmeler Berg	5	2,53 ± 0,53	11,70 ± 1,62	3,63 ± 1,11	10,01 ± 4,41	64,18 ± 5,30	71,41 ± 7,10				
Waldweiler	3	2,84 ± 0,72	14,33 ± 2,72	2,43 ± 1,25	8,45 ± 4,04	148,06 ± 24,12	58,90 ± 8,51				
Pellingen 1	7	2,07 ± 0,61	12,35 ± 3,82	2,51 ± 0,77	9,44 ± 4,87	165,29 ± 56,71	65,75 ± 6,59				
Pellingen 2	7	2,08 ± 0,57	13,95 ± 5,14	2,55 ± 0,77	9,79 ± 4,81	153,87 ± 47,12	95,32 ± 34,30				
Hockweiler	5	2,70 ± 0,78	10,21 ± 4,88	2,46 ± 0,75	14,15 ± 6,29	160,26 ± 72,13	74,88 ± 11,83				
Nicht-Leguminosen, 2001 (Juni)											
Fläche	n	Phosphor (g/kg)	Kalium (g/kg)	Magnesium (g/kg)	Calcium (g/kg)	Mangan (mg/kg)	Eisen (mg/kg)				
Gutweiler	4	2,25 ± 0,44	11,95 ± 4,39	2,43 ± 1,22	12,38 ± 6,94	160,25 ± 123,07	64,64 ± 16,79				
Oberemmeler Berg	4	2,19 ± 0,23	9,27 ± 3,21	3,74 ± 1,87	9,12 ± 4,80	95,87 ± 73,83	58,51 ± 10,18				
Waldweiler	2	1,65 ± 0,01	11,10 ± 3,41	1,74 ± 0,61	7,69 ± 6,70	258,75 ± 156,38	64,31 ± 5,86				
Pellingen 1	3	1,87 ± 0,22	11,96 ± 4,05	2,56 ± 1,44	7,68 ± 4,80	329,19 ± 205,89	53,16 ± 11,11				
Pellingen 2	4	1,83 ± 0,18	15,83 ± 3,88	2,78 ± 1,44	9,72 ± 5,15	194,25 ± 54,16	71,73 ± 30,22				
Hockweiler	4	2,75 ± 0,44	12,18 ± 2,20	2,02 ± 1,05	10,56 ± 5,53	252,69 ± 214,95	113,81 ± 113,55				
Leguminosen, 2001 (August)											
Fläche	n	Phosphor (g/kg)	Kalium (g/kg)	Magnesium (g/kg)	Calcium (g/kg)	Mangan (mg/kg)	Eisen (mg/kg)				
Gutweiler	5	2,16 ± 0,29	10,15 ± 2,48	4,68 ± 0,95	19,83 ± 7,18	103,61 ± 28,21	88,68 ± 13,06				
Oberemmeler Berg	4	2,08 ± 0,31	7,25 ± 1,02	6,77 ± 2,36	18,23 ± 5,65	118,60 ± 45,20	97,05 ± 30,00				
Waldweiler	4	2,26 ± 0,34	7,71 ± 0,58	3,72 ± 1,31	15,15 ± 4,96	238,00 ± 108,47	80,17 ± 21,68				
Pellingen 1	6	1,74 ± 0,18	12,74 ± 1,72	3,85 ± 0,79	13,90 ± 4,70	192,76 ± 74,45	98,62 ± 8,44				
Pellingen 2	6	1,50 ± 0,20	11,70 ± 1,90	3,93 ± 0,75	14,84 ± 4,52	188,45 ± 57,63	85,41 ± 23,49				
Hockweiler	5	2,24 ± 0,19	11,85 ± 1,67	3,44 ± 1,11	17,50 ± 8,29	174,58 ± 62,03	106,32 ± 55,18				
Nicht-Leguminosen 2001, (August)											
Fläche	n	Phosphor (g/kg)	Kalium (g/kg)	Magnesium (g/kg)	Calcium (g/kg)	Mangan (mg/kg)	Eisen (mg/kg)				
Gutweiler	4	3,33 ± 0,49	15,39 ± 5,96	3,30 ± 1,77	16,30 ± 6,20	196,01 ± 151,76	75,53 ± 26,30				
Oberemmeler Berg	4	2,34 ± 0,17	12,44 ± 5,78	4,10 ± 1,86	14,89 ± 7,00	193,90 ± 170,15	71,39 ± 28,76				
Waldweiler	2	1,79 ± 0,12	8,34 ± 1,32	2,31 ± 0,06	10,11 ± 8,08	321,19 ± 315,84	78,83 ± 44,34				
Pellingen 1	3	1,94 ± 0,22	14,99 ± 6,28	3,83 ± 2,49	14,66 ± 8,88	326,38 ± 252,00	76,49 ± 42,23				
Pellingen 2	4	1,68 ± 0,12	18,00 ± 4,83	3,89 ± 1,75	14,11 ± 6,14	401,62 ± 233,09	82,50 ± 25,66				
Hockweiler	4	3,30 ± 0,48	17,12 ± 5,44	2,96 ± 1,59	16,13 ± 6,67	303,43 ± 228,96	81,09 ± 27,23				

Fortsetzung Tab. 37:

Nährstoffgehalte in der Sprossmasse											
Leguminosen 2002											
Fläche	n	Phosphor (g/kg)	Kalium (g/kg)	Magnesium (g/kg)	Calcium (g/kg)	Mangan (mg/kg)	Eisen (mg/kg)				
Gutweiler	5	2,39 ± 0,54	6,87 ± 1,25	3,15 ± 0,99	12,56 ± 5,04	83,68 ± 22,32	59,41 ± 4,64				
Oberemmeler Berg	5	1,80 ± 0,19	7,80 ± 1,41	3,63 ± 0,79	11,68 ± 3,52	72,85 ± 16,09	65,00 ± 7,41				
Waldweiler	4	2,12 ± 0,43	8,54 ± 1,35	2,65 ± 0,77	9,65 ± 3,23	152,36 ± 52,81	65,57 ± 8,37				
Pellingen 1	7	1,67 ± 0,32	7,53 ± 3,09	2,75 ± 0,47	10,61 ± 3,57	115,59 ± 41,71	72,64 ± 9,80				
Pellingen 2	6	1,59 ± 0,19	10,27 ± 1,20	2,65 ± 0,56	9,15 ± 2,08	134,51 ± 39,35	68,44 ± 21,96				
Hockweiler	5	2,94 ± 0,38	17,90 ± 1,95	2,17 ± 0,33	8,90 ± 2,86	89,63 ± 22,42	62,74 ± 8,23				
Gusterath 1	4	1,63 ± 0,14	7,77 ± 1,93	3,46 ± 0,80	15,33 ± 3,82	123,14 ± 27,62	77,57 ± 8,54				
Gusterath 2	5	1,80 ± 0,28	9,19 ± 1,99	2,81 ± 0,42	8,43 ± 1,20	81,06 ± 30,16	63,71 ± 13,35				
Pellingen 3	4	2,03 ± 0,08	8,63 ± 2,68	3,08 ± 0,41	13,76 ± 5,57	120,60 ± 38,88	67,05 ± 10,28				
Muhl1	4	1,93 ± 0,28	13,41 ± 1,52	2,36 ± 0,60	9,54 ± 4,17	129,87 ± 35,38	75,90 ± 21,68				
Nicht-Leguminosen 2002											
Fläche	n	Phosphor (g/kg)	Kalium (g/kg)	Magnesium (g/kg)	Calcium (g/kg)	Mangan (mg/kg)	Eisen (mg/kg)				
Gutweiler	6	2,50 ± 0,45	9,39 ± 2,63	2,47 ± 1,05	11,55 ± 5,13	70,65 ± 23,97	56,59 ± 19,37				
Oberemmeler Berg	7	1,95 ± 0,15	11,06 ± 3,49	3,76 ± 1,65	12,48 ± 5,41	82,21 ± 38,54	58,21 ± 15,14				
Waldweiler	4	1,91 ± 0,16	9,41 ± 3,49	3,25 ± 1,49	12,91 ± 6,71	191,19 ± 74,87	84,89 ± 37,17				
Pellingen 1	6	1,77 ± 0,17	9,76 ± 2,48	3,37 ± 1,39	12,15 ± 5,24	139,37 ± 43,42	139,74 ± 118,74				
Pellingen 2	5	1,65 ± 0,08	13,91 ± 3,79	3,50 ± 1,14	13,14 ± 5,34	205,19 ± 67,60	54,07 ± 7,20				
Hockweiler	6	3,12 ± 0,35	17,20 ± 2,07	2,22 ± 0,63	9,78 ± 3,32	132,53 ± 44,32	64,07 ± 14,73				
Gusterath 1	7	2,21 ± 0,26	10,96 ± 2,59	3,25 ± 1,43	13,90 ± 6,07	150,59 ± 81,22	72,25 ± 12,12				
Gusterath 2	6	1,84 ± 0,20	10,54 ± 2,11	2,96 ± 0,91	9,53 ± 3,46	118,58 ± 42,59	52,97 ± 9,26				
Pellingen 3	6	2,78 ± 0,38	12,10 ± 1,75	2,80 ± 0,87	11,74 ± 4,85	125,29 ± 52,76	75,80 ± 35,55				
Muhl1	4	1,83 ± 0,32	16,03 ± 4,69	2,38 ± 0,72	9,68 ± 4,78	126,91 ± 36,93	95,78 ± 56,50				

n: Zahl der untersuchten Pflanzenarten (analysiert wurde eine Mischprobe mehrerer Exemplare einer Art je Fläche)

Dass eine höhere P-Versorgung die N₂-Fixierungsleistung von Leguminosen erhöht, wurde bereits mehrfach nachgewiesen (RIFFKIN et al. 1999a, LEIDI & RODRIGUEZ-NAVARRO 2000, RÖMER & LEHNE 2004). Umstritten ist jedoch, ob Leguminosen grundsätzlich einen höheren P-Bedarf haben als Nicht-Leguminosen (VITOUSEK et al. 2002). Der Vergleich der P-Gehalte in der Sprossmasse der beiden funktionellen Gruppen (Leguminosen, Nicht-Leguminosen) gibt keinen Hinweis auf einen höheren P-Bedarf der Leguminosen. Die P-Gehalte der Leguminosen waren auf den Magerwiesen tendenziell niedriger als die P-Gehalte der Nicht-Leguminosen. Allerdings ist zu vermuten, dass sich die Phosphorgehalte im Jahresverlauf ändern. Möglicherweise liegen die P-Gehalte an einem anderen Zeitpunkt über denen der Nicht-Leguminosen. NEITZKE (1993) konnte auf Halbtrockenrasen zu Beginn der Vegetationsperiode Mitte April bis Mitte Mai höhere P-Gehalte in Leguminosen gegenüber sonstigen Kräutern nachweisen. Im späteren Jahresverlauf glichen sich die Werte beider Gruppen an.

Die Kaliumgehalte im Sprossmaterial der Leguminosen und Nicht-Leguminosen lagen mit Mittelwerten von 6,9 bis 17,2 g Kalium pro kg TS unterhalb des optimalen Bereichs von 20 bis 40 g K kg⁻¹ TS (FINCK 1991). Dieses Ergebnis entspricht den Bodenanalysen bezüglich des Ammoniumlactat-austauschbaren Kaliums (Kap. 5.8.4). Die überwiegende Zahl der Flächen wies eine niedrige K-Versorgung auf. SACH (1999) fand in einer ungedüngten Weißklee-Weide in Norddeutschland in den funktionellen Gruppen Gräser und Kräuter

Kaliumgehalte von 23,3 bzw. 22,1 g K kg⁻¹ TS. Hier war durch die partielle Rückführung von Nährstoffen aus den Exkrementen des Weideviehs eine ausreichende K-Versorgung gewährleistet. Von den im Hunsrück untersuchten Magerwiesen zeigte der Aufwuchs der Fläche Hockweiler im Jahr 2002 nach Gülledüngung die höchsten K-Gehalte (17,2 g K kg⁻¹ TS). Während die Phosphorversorgung eine wichtige Rolle bei der Jugendentwicklung der Leguminosen spielt, wurde für Kalium ein geringerer Einfluss auf das Wachstum von Weißklee beobachtet (BAILEY & LAIDLAW 1999). Jedoch kann eine kombinierte Phosphor- und Kalium-Düngung die N₂-Fixierung fördern und (u. a. auf Rotklee) ertragssteigernd wirken (RÖMER & LEHNE 2004).

Die Magnesiumgehalte können mit mindestens 1,7 g Mg kg⁻¹ TS (Nicht-Leguminosen Fläche Waldweiler, Juni 2001) bzw. 2,2 g Mg kg⁻¹ TS (Fläche Hockweiler im Juni 2002) als ausreichend bewertet werden. Der untere Grenzwert für eine gute Mg-Versorgung ist je nach Pflanzenart bei 1,5 g Mg kg⁻¹ TS (Gräser) bis 3,0 g Mg kg⁻¹ TS (Luzerne) anzusetzen (FINCK 1991, MENGEL 1991). Der Wert von 1,5 g Mg kg⁻¹ TS wurde lediglich von *Holcus lanatus* unterschritten (Mittelwert 1,3 g Mg kg⁻¹ TS in Juni 2001, Anhang, Tab. A14). RIEDER (1983) nennt für gedüngte frische Glatthaferwiesen bei Dreischnittnutzung einen Mg-Gehalt von 1,8 g Mg pro kg TS im ersten Aufwuchs. Zum Ende der Vegetationsperiode hin stiegen die Magnesiumgehalte der Wiesenpflanzen an (vgl. die Erntetermine Juni und August des Jahres 2001). Die Magnesiumgehalte der Leguminosen und Nicht-Leguminosen unterschieden sich nicht signifikant (P>0,5). LEHMANN & MEISTER (1982) wiesen für Rotklee und Weißklee höhere Magnesium- und Calcium-Gehalte nach als für *Lolium perenne*.

Die Spanne einer optimalen Calcium-Versorgung wird mit 5 bis 20 g Ca kg⁻¹ TS (Gräser) bzw. 10 bis 30 g Ca kg⁻¹ TS (Luzerne) angegeben (FINCK 1991). Innerhalb dieser Spanne bewegten sich die Ca-Gehalte der untersuchten Pflanzen. Geringere Ca-Gehalte wurden lediglich im Sprossmaterial von *Holcus lanatus* (im Mittel 2,4 g Ca kg⁻¹ TS, Juni 2001) und *Hypericum perforatum* (4,8 g Ca kg⁻¹ TS im Juni 2002) nachgewiesen (Anhang, Tab. A14). Die Bodenanalysen wiesen ebenfalls auf eine ausreichende Calcium-Versorgung hin (Kap. 5.8.6). Diese wurde vermutlich durch das früher übliche Mergeln (Kalkung) der Flächen erreicht.

Die Untersuchungsflächen im Hunsrück zeigen eine mäßig bis schwach saure Bodenreaktion (pH_(H₂O)-Werte zwischen 4,9 und 5,9). Ein Manganmangel ist auf Böden mit einem pH-Wert unter 5,7 nicht zu erwarten (FINCK 1991). Der mittlere Ertragsgrenzwert liegt bei 40 mg Mn kg⁻¹ TS (FINCK 1991). Die Mangangehalte im Sprossmaterial der Pflanzen variierten in einer relativ weiten Spanne von 64,2 mg Mn kg TS⁻¹ (Leguminosen Fläche Oberemmeler Berg, Juni 2001) bis 401,6 mg Mn kg⁻¹ TS (Nicht-Leguminosen Fläche Pellingen 2, August 2001). Der von MENGEL (1991) angegebene obere Grenzwert der Spanne von 20 bis 200 mg Mn kg⁻¹ TS wird jedoch in den meisten untersuchten Proben (Juni-Termine) nicht überschritten. Zum zweiten Erntetermin im Jahr 2001 (August) enthielten die Pflanzen abgesehen von *Plantago lanceolata* durchschnittlich mehr Mangan als im Juni des gleichen Jahres. Die höchsten Gehalte wurden bei *Holcus lanatus* mit 381,7 mg Mn kg⁻¹ TS

(Juni 2001) und $541 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ TS}$ (August 2001) festgestellt (Anhang, Tab. A14). Die Aufnahme von Mangan übersteigt bei Pflanzen häufig den physiologischen Bedarf (MENDEL 1991). Eine toxische Wirkung der teilweise hohen Mn-Gehalte ist nicht zu vermuten, da die Toleranz der Pflanzen relativ hoch ist und eine schädigende Wirkung erst ab etwa $1000 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ TS}$ eintritt (FINCK 1991). GRZEGORCZYK et al. (2000) nennen mittlere Mn-Gehalte von $59,0 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ TS}$ für *Vicia cracca* und $79,2 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ TS}$ für *Trifolium repens* in Grünlandgesellschaften Polens. Auf den Magerwiesen im Hunsrück wurden mit $139,5$ bis $264 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ TS}$ (*Vicia cracca*) und $119,8$ bis $145,7 \text{ mg Mn kg}^{-1} \text{ TS}$ (*Trifolium repens*) höhere Mn-Gehalte nachgewiesen (Anhang, Tab. A14).

Die Eisengehalte der Pflanzen lagen mit $53 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (Nicht-Leguminosen Pellingen 1, Juni 2001) bis $139,7 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (Nicht-Leguminosen Pellingen 1, Juni 2002) im Bereich der für Pflanzenmaterial typischen Fe-Konzentration von 10 bis $300 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (MENDEL 1991). Eisen ist in der Rhizobien-Leguminosen-Symbiose unter anderem als Bestandteil der Nitrogenase sowie zur Bildung von Leghämoglobin wichtig. Von einer ausreichenden Versorgung der auf den Magerwiesen vorkommenden Leguminosen mit Eisen kann ausgegangen werden. GRZEGORCZYK et al. (2000) nennen Fe-Gehalte von $151,0 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ für *Vicia cracca* bzw. $188,6 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ für *Trifolium repens* in Grünlandgesellschaften Polens. In der vorliegenden Arbeit wurden für *Vicia cracca* Fe-Gehalte zwischen $72,0 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (Juni 2002) und $89,6 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (August 2001) ermittelt (Anhang, Tab. A14). Die Gehalte im Sprossmaterial von *Trifolium repens* lagen zwischen $66,0 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (Juni 2002) und $97,2 \text{ mg Fe kg}^{-1} \text{ TS}$ (August 2001).

Ein Mineralstoffmangel hat meist eine verringerte Produktion von Kohlenhydraten zur Folge. Bei pflanzlichen Symbiosen ist der Symbiosepartner - im Fall der Leguminosen die Knöllchenbakterien - auf eine Kohlenhydratnachlieferung durch die Pflanze angewiesen. Eine mangelnde Nährstoffversorgung kann daher die Funktion der Rhizobien einschränken und zu einer geringeren N_2 -Fixierung führen. Ein spezifischer Nährstoffmangel wurde phänologisch nicht festgestellt. Die meisten Arten sind vermutlich an die geringeren Nährstoffvorräte der Magerwiesen ausreichend angepasst und weisen dementsprechend geringe Wachstumsraten auf. Die suboptimale Versorgung der Wiesen mit Kalium und Phosphor wirkt vermutlich auf den Ertrag limitierend. Eine Verbesserung der Phosphor- und Kalium-Versorgung könnte den Anteil der Leguminosen im Bestand erhöhen und zu höheren fixierten N-Mengen führen (vgl. Kap. 2.5, 6.1.3 und 6.1.4). Durch eine Verbesserung der Nährstoffversorgung - insbesondere der N-Nachlieferung - würden jedoch vermutlich höherwüchsige Arten gefördert und konkurrenzschwache Magerrasenarten verdrängt werden (THORMANN & KIEHL 2003).

5.10 VA-Mykorrhiza in Leguminosen und Nicht-Leguminosen

Die Anfärbung mit Tinten-Essigsäurelösung bewirkte eine dunkelbraun-schwarze Färbung der Pilzstrukturen, während die Wurzelzellen nach Entfernen des plasmatischen Inhalts (durch KOH) hellbraun erschienen. Alle untersuchten Arten zeigten im Wurzelgewebe Bestandteile von Mykorrhiza-Pilzen. Bei jeder Art wurde ein interzelluläres Hyphennetz festgestellt. Bei

einigen Arten (*Trifolium pratense*, *T. repens*, *Lotus uliginosus*) waren in den Zellen Arbuskeln oder Hyphen-“coils“ zu sehen. Ebenso waren in allen Arten mit Ausnahme von *Lotus uliginosus* Speichervesikel des Pilzes zu erkennen (bei *Trifolium repens* Befund unsicher). In Tabelle 38 ist die Art der beobachteten Pilzstrukturen vermerkt.

Tab. 38: Strukturen von Mykorrhiza-Pilzen (VAM) im Wurzelgewebe der untersuchten Leguminosen und zweier Nicht-Leguminosen.

	Interzelluläres Hyphennetz	Intra- bzw. interzelluläre Speichervesikel	Arbuskeln o. a. intrazelluläre Strukturen
<u>Leguminosen</u>			
<i>Lathyrus linifolius</i>	X	X	O
<i>Lotus corniculatus</i>	X	X	O
<i>Lotus uliginosus</i>	X	O	X
<i>Trifolium pratense</i>	X	X	X
<i>Trifolium repens</i>	X	(X)	X
<i>Vicia cracca</i>	X	X	(X)
<i>Vicia sepium</i>	X	X	(X)
<u>Nicht-Leguminosen</u>			
<i>Plantago lanceolata</i>	X	X	(X)
<i>Sanguisorba minor</i>	X	X	O

X = vorhanden; O = nicht beobachtet; (X) = unsicher

6 Diskussion

6.1 Standortbedingungen und symbiotische N₂-Fixierung

In ungedüngten Wiesen mit regelmäßiger Mahdnutzung verringern sich im Laufe der Zeit die Nährstoffmengen im Boden. Dies führt einerseits zu geringeren Erträgen und kann andererseits weitere wichtige Funktionen beeinträchtigen. In der Leguminosen-Rhizobien-Symbiose beeinflusst beispielsweise die Ernährungssituation der Pflanze die N₂-Fixierungsleistung des bakteriellen Symbiosepartners, da dieser einen hohen Bedarf an Photosyntheseprodukten besitzt. Im Folgenden werden Auswirkungen der Standortbedingungen der untersuchten Wiesen auf die symbiotische N₂-Fixierung besprochen. In der vorliegenden Arbeit wurde eine signifikante Abhängigkeit der Höhe der fixierten N-Mengen von dem Leguminosenanteil der Flächen festgestellt (Kap. 5.5.6). Faktoren, die den Leguminosenanteil im Pflanzenbestand fördern oder verringern, wirken indirekt auf die Höhe der symbiotischen Stickstoff-Fixierung.

6.1.1 Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von den N-Gehalten des Bodens

Bei einem hohen Angebot an mineralischem Stickstoff im Boden decken auch Leguminosen ihren N-Bedarf bevorzugt aus dieser Quelle, da die symbiotische N₂ Fixierung mit einem verhältnismäßig hohen Energieaufwand verbunden ist (MARTIN 1990, LEIDI & RODRIGUEZ-NAVARRO 2000, ROSCHER et al. 2004).

Das geringe Angebot an mineralischem oder organischem Stickstoffdünger (Gülle, Stallmist) und der geringe N-Gehalt des Bodens ließen erwarten, dass die Leguminosen ihren N-Bedarf überwiegend durch symbiotische N₂-Fixierung decken. Hierdurch besitzen sie einen Konkurrenzvorteil gegenüber anderen funktionellen Gruppen, die sich nicht von Luft-N ernähren können.

Zwischen der N_{min}-Menge der sechs Hauptuntersuchungsflächen und der symbiotisch fixierten N-Menge wurde durch eine Regressionsanalyse ein lockerer bis mittlerer Zusammenhang ($R^2 = 0,22$) festgestellt (Kap. 5.8.12). Jedoch stieg entgegen den Erwartungen die fixierte N-Menge mit steigendem N_{min}-Vorrat leicht an. Bei RIFFKIN et al. (1999a) zeigte sich die fixierte N-Menge ebenfalls mit dem Boden-N (Gesamt-N) positiv korreliert. Die Autoren begründeten dies mit einer Stimulierung des Kleewachstums gegenüber weniger konkurrenzkräftigen Pflanzenarten. TSIALTAS et al. (2004) fanden dagegen eine negative Korrelation zwischen dem symbiotisch fixierten N-Anteil (N_{dfa}) in *Trifolium repens* und dem anorganischen N-Vorrat des Bodens. MØLLER-HANSEN et al. (2002) stellten zwar ebenfalls eine negative Korrelation zwischen dem Nitratgehalt des Bodens und dem symbiotisch fixierten N-Anteil (N_{dfa}) in Weiß- und Rotklee-Weiden fest. Allerdings wurde durch diese Autoren keine Beziehung zwischen dem Ammonium-Gehalt des Bodens bzw. dem N_{min}-Vorrat und dem symbiotisch fixierten N-Anteil (N_{dfa}) gefunden. In der vorliegenden Arbeit wurde der N_{min}-Vorrat im Juni überwiegend durch Ammonium-N

gebildet. Eine negative Auswirkung auf die fixierte N-Menge durch die vorliegenden Ammonium-Mengen wird auch hier nicht bestätigt.

Die Nmin-Mengen in den Böden der Untersuchungsflächen bewegten sich auf einem niedrigen Niveau. Eine leicht erhöhte N-Menge kann sich positiv auf die Jugendentwicklung der Leguminosen auswirken und dadurch die Fixierungsleistung fördern (SCHMIDTKE 1997). Allerdings stimulieren lediglich geringe mineralische N-Gaben die symbiotische N₂-Bindung (HARTWIG 1998). Beispielsweise beobachteten NESHEIM et al. (1990) bei einer Düngung von 25 kg Mineral-N ha⁻¹ in einem Weißklee-Gras-Bestand eine leichte Erhöhung der symbiotisch fixierten N-Menge sowie des Weißklee-Anteils im Vergleich zu einem ungedüngten Bestand. Bei einem höheren Düngenniveau von 75 kg Mineral-N ha⁻¹ wurde dagegen ein signifikanter Rückgang des fixierten N-Anteils sowie des Weißklee-Massenanteils am Gesamtertrag festgestellt.

Bei einer geringen N-Düngung kann sich also der Anteil der Leguminosen im Bestand erhöhen, da auch diese Gruppe von leicht verfügbarem N im Boden profitiert. Da keine stark gedüngten Wiesen untersucht wurden, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob ein stark erhöhter Nmin-Vorrat im Boden für eine Verminderung der fixierten N-Menge sorgen würde. Zu bedenken ist auch, dass in Wiesen mit weniger günstigen Wachstumsbedingungen (trockene Böden, geringe P- und K-Gehalte des Bodens, niedriger pH-Wert) die Biomasseproduktion vermindert ist und kein hoher Bedarf der Pflanzen an N vorliegt (HARTWIG 1998). Die Klärung einer Abhängigkeit der N₂-Fixierung bzw. des Leguminosenvorkommens von der pflanzenverfügbaren N-Menge im Boden ist zudem dadurch erschwert, dass Leguminosen durch ihren hohen N-Gehalt den mineralischen N-Gehalt des Bodens (u. a. nach Zersetzung der Wurzelknöllchen) erhöhen. Da die höheren mineralischen N-Mengen die konkurrierenden Pflanzen stärker begünstigt als die Leguminosen, verdrängen sich die Leguminosen gewissermaßen selbst (vgl. HARTWIG 1998, siehe auch Kap. 2.5). Das mag ein Grund sein, warum selbst in den stickstoffarmen Magerwiesen der Leguminosenanteil 20 % des Gesamtertrags nicht überstieg.

6.1.2 Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von der N-Deposition

Düngende Effekte können ebenso von Stickstoffverbindungen aus nasser und trockener Deposition ausgehen. DIERSCHKE & BRIEMLE (2002) halten Stickstoffeinträge aus der Luft jedoch für wenig bedeutend für das Kulturgrasland. SPRENT (2005) betont die Möglichkeit eines indirekten Effektes auf die symbiotische N₂-Fixierung über eine Veränderung der Artenkombination eines Pflanzenbestandes durch N-Deposition. Bei N-Depositionsraten über 15 kg N ha⁻¹ kann auch ein direkter Effekt auf die Nodulation und die N₂-Fixierung der Leguminosen im Grünland nicht ausgeschlossen werden (SPRENT 2005). HESTERBERG et al. (1996) untersuchten in der Zentralen Schweiz die Auswirkungen der Stickstoff-Deposition auf eine kleine extensiv genutzte Streuwiese, die von intensiv genutztem Ackerland umgeben war. Die Gesamt-Deposition atmosphärischer Stickstoff-Verbindungen wurde mit 28 kg N ha⁻¹ a⁻¹ angegeben. Ammoniak hatte einen Anteil von fast 50 % an der gesamten Depositionsrate und stammte überwiegend aus Emissionen der

umliegenden landwirtschaftlichen Betriebe. Obwohl der „critical load“ von $15 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Angabe von GRENNFELT & THÖRNELÖF 1992 für ungedüngtes Grasland) deutlich überschritten wurde, war anhand der Vegetation über einen Zeitraum von 15 Jahren kein Effekt durch den N-Eintrag festzustellen.

Die im westlichen Hunsrück gemessenen niedrigen N-Depositionsraten von etwa $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Ammonium- und Nitrat-N aus nasser Deposition, siehe Kap. 2.5) können auch für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wiesen angenommen werden. Über die N-Einträge aus trockener Deposition liegen keine Informationen vor. Ihre Höhe ist von der Lage der Wiesen zu NH_3 -emittierenden Quellen (Viehbetriebe, Intensivkulturen) abhängig. Eine Gesamtdeposition über $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ wird nicht angenommen. Ein direkter Effekt auf die N_2 -Fixierung der Leguminosen bzw. auf die Leguminosenanteile ist eher unwahrscheinlich oder wird durch weitere Einflussfaktoren wie beispielsweise die ehemalige und aktuelle Nutzung überdeckt.

6.1.3 Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von den P-Gehalten des Bodens

Neben der Stickstoffnachlieferung wird die Phosphor-Versorgung als bedeutender Einflussfaktor für die symbiotische N_2 -Fixierung gesehen (SADOWSKY 2005). Die maßgebliche Wirkung eines höheren P-Angebotes entsteht durch eine Verbesserung des Pflanzenwachstums und einer verstärkten Knöllchenentwicklung (MARTIN 1990, HELLSTEN & HUSS-DANEL 2000).

Die Regressionsanalyse zeigte keinen Zusammenhang zwischen dem P-Gehalt des Bodens und der fixierten N-Menge ($R^2 = 0,03$). Allerdings war die Spanne der P-Gehalte der untersuchten Böden gering, da die meisten Flächen einen sehr niedrigen P-Gehalt aufwiesen. Zur Frage einer Begrenzung der N_2 -Fixierungsleistung durch P-Mangel in Leguminosen wurden vor dem Hintergrund landwirtschaftlicher Nutzung zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Die Erkenntnisse hinsichtlich einer Wirkung auf die Nitrogenase-Aktivität unter P-Mangelbedingungen sind teilweise widersprüchlich und ein grundsätzlich höherer Bedarf der Leguminosen gegenüber anderen Pflanzen ist umstritten (HARTWIG 1998, SPRENT 1999, VITOUSEK et al. 2002). RIFFKIN et al. (1999a) haben jedoch auf Weideflächen in Australien einen signifikanten positiven Zusammenhang zwischen der Höhe des fixierten Stickstoffs und dem P-Gehalt des Bodens festgestellt. RÖMER & LEHNE (2004) machten einen verbesserten P-Ernährungszustand für eine höhere N-Bindung und TM-Bildung bei Rotkleeplanzen verantwortlich. In Untersuchungen von EDWARDS et al. (2006) wirkte sich eine hohe P-Versorgung in Verbindung mit erhöhten CO_2 -Konzentrationen der Atmosphäre fördernd auf die symbiotische N_2 -Fixierung von Weißklee aus.

Die Phosphor-Gehalte im oberirdischen Pflanzenmaterial der Magerwiesen lagen zwischen $1,6$ und $3,0 \text{ g kg}^{-1} \text{ TS}$ (Mittelwerte von Leguminosen und Nicht-Leguminosen auf 10 Wiesen im Juni des Jahres 2002, Kap. 5.9, Tab. 37). Für eine optimale P-Versorgung gibt FINCK (1991) Werte im Bereich von etwa $3,0$ bis $6,0 \text{ g kg}^{-1} \text{ TS}$ an. Die pflanzlichen P-Gehalte befanden sich demnach mit Ausnahme der Fläche Hockweiler unterhalb des

Ertragsgrenzwertes ($3,0 \text{ g kg}^{-1} \text{ TS}$). Die geringen P-Gehalte können begrenzend auf die Fixierungsleistung gewirkt haben. Bei einem höheren P-Angebot könnte die Produktivität und möglicherweise auch die Konkurrenzkraft und die Fixierungsleistung der Leguminosen gesteigert werden. Allerdings beginnt bereits bei Konzentrationen von über 2 bis $4 \text{ mg P/100g Boden}$ (in 0–5 cm Bodentiefe) die Verdrängung der Magergrünland-Pflanzen durch Arten nährstoffreicherer Standorte (RUTHSATZ 2001). Diese Entwicklung wäre besonders bei gleichzeitig verbesserter N-Verfügbarkeit zu erwarten.

Pflanzen zeigen Anpassungen an eine schlechte P-Verfügbarkeit der Böden. Sie haben diverse Strategien entwickelt, um bei P-Unterversorgung die Aufnahme von P-Verbindungen aus dem Boden zu erhöhen (VITOUSEK et al. 2002). So wird beispielsweise durch Ansäuerung der Rhizosphäre die P-Mobilisierung verstärkt (SADOWSKY 2005). Leguminosen säuern z. B. durch die Abgabe von Protonen und Citrat ihre Wurzelumgebung an (RÖMER & LEHNE 2004). Bei geringer P-Versorgung der Böden können Pflanzen zudem mit Hilfe von Mykorrhiza schwer lösliche Phosphate aufnehmen (SPRENT 1999, SCHEFFER 2002, FINLAY 2005). Dies kann auch für die Pflanzen der untersuchten P-ärmeren Wiesen gelten. In stichprobenartigen Untersuchungen wurden an den häufigsten Leguminosenarten und an den Nicht-Leguminosen *Plantago lanceolata* und *Sanguisorba minor* Strukturen von vesikulär-arbuskulärer Mykorrhiza in den Wurzeln nachgewiesen (Kap. 5.10).

6.1.4 Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von den Kalium und Magnesium-Gehalten des Bodens

Für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wiesen wurde kein enger Zusammenhang zwischen den Kalium-Gehalten oder den Magnesium-Gehalten der Böden und den fixierten N-Mengen festgestellt (Kap. 5.8.11). Auch MÖLLER-HANSEN et al. (2002) fanden keine Korrelation zwischen dem K-Gehalt des Bodens und der Höhe der symbiotischen N_2 -Fixierung in Weiß- und Rotkleewiden. Nach HARTWIG (1998) kann die Zahl der gebildeten Wurzelknöllchen bei geringer K-Verfügbarkeit vermindert sein. Dies wird jedoch häufig durch höhere Fixierungsraten je Knöllchen kompensiert. MARTIN (1990) betont die eher indirekte Wirkung einer ausreichenden K-Versorgung für die symbiotische N-Bindung durch die Sicherstellung einer hohen Photosyntheseleistung der Wirtspflanze. Ähnliches ist auch für die Mg-Versorgung anzunehmen.

6.1.5 Die Abhängigkeit der N-Fixierungsleistung von der Bodenreaktion, den Calcium- und den Aluminium-Gehalten des Bodens

Auch die Bodenreaktion hat Auswirkungen auf das System der symbiotischen N_2 -Fixierung. Saure Böden bieten ungünstige Bedingungen für die Aktivität der Rhizobien und können für eine geringe Nodulation und eine verminderte Fixierungsleistung verantwortlich sein (MARSCHNER 1995). Für die Rhizobien ist eine schwach saure bis schwach alkalische Reaktion günstig (SCHEFFER 2002). Nach erfolgreicher Nodulation ist jedoch keine spezifische Wirkung hoher Protonenkonzentrationen auf die N_2 -Fixierung zu beobachten (HARTWIG 1998). Nur wenige Rhizobien können bei pH-Werten unter 4,5 bis 5,0 existieren.

Allerdings können in sauren Böden Schwermetalle in toxischen Konzentrationen auftreten und eine Störung des pflanzlichen Stoffwechsels durch Ca-, Mg-, Mo- und P-Mangel ist ebenfalls möglich (HARTWIG 1998).

Die Korrelationsanalysen zeigten einen relativ engen linearen Zusammenhang ($r = -0,54$ bis $-0,67$) zwischen dem pH-Wert der Böden und der fixierten N-Menge. Entgegen den Erwartungen wurde jedoch mit steigendem pH-Wert eine abnehmende N_2 -Fixierungsleistung festgestellt. Vermutlich haben die niedrigen pH-Werte der Flächen Waldweiler, Gusterath 1 und Muhl keine nachteilige Wirkung auf die vorhandenen Leguminosen und ihre N_2 -Fixierung. Die Leguminosenanteile waren auf den Flächen Waldweiler und Gusterath 1 (19 % im Juni 2003) vergleichsweise hoch und haben trotz niedriger pH-Werte (Kap. 5.8.1, Tab. 31) zu höheren fixierten N-Mengen in diesen Wiesen, verglichen mit weiteren Flächen mit vermeintlich günstigeren pH-Werten, geführt.

Die vermeintlich ungünstigen pH-Bedingungen können ferner durch andere positive Bodeneigenschaften dieser Flächen kompensiert worden sein. Hier könnte eine bessere Wasserversorgung der Pflanzen durch höhere Niederschläge in den höheren Lagen (Muhl) oder eine bessere Wasserhaltekapazität der Böden bzw. eine geringere Austrocknungstendenz durch Tiefgründigkeit (Waldweiler) eine Rolle gespielt haben. Die Leguminosen-Rhizobien-Symbiose wird durch einen geringen Wassergehalt des Bodens bzw. Trockenstress der Pflanze negativ beeinflusst (SADOWSKY 2005).

Hohe Ca-Gehalte können die hemmende Wirkung hoher Protonenkonzentrationen auf die Knöllchenbildung vermindern (MARTIN 1990). Von den drei bodensauren Wiesen mit hohen Fixierungsleistungen wies die Fläche Gusterath 1 höhere Ca-Gehalte im Boden auf. Das könnte sich auf dieser Fläche positiv in Bezug auf einen höheren Leguminosenanteil (über 15 % am Gesamtertrag der Wiese, Kap. 5.2) ausgewirkt haben. Neben größeren Anteilen an *Lotus corniculatus*, *Trifolium pratense* und *Vicia sepium* waren in dieser Wiese auch die Arten *Trifolium repens*, *T. dubium* und *Vicia cracca* vertreten. Bei Betrachtung aller Untersuchungsflächen wurde jedoch kein positiver Zusammenhang zwischen dem Ca-Gehalt des Bodens und der fixierten N-Menge festgestellt (Kap. 5.8.11).

In Böden mit saurer Bodenreaktion steigen die Konzentrationen schädigender Aluminium-Ionen. Hohe Aluminiumkonzentrationen hemmen die Wurzelhaarbildung (MARSCHNER 1995) und haben einen negativen Einfluss auf die Nodulation der Leguminosen. Im Vergleich aller Untersuchungsstandorte sind die Flächen Waldweiler, Züsch 1, Muhl 1 und Muhl 2 hinsichtlich ihrer niedrigen pH-Werte und des Ca^{2+}/Al^{3+} -Verhältnisses als ungünstiger für das Pflanzenwachstum und die Nodulation zu beurteilen. Eine negative Auswirkung auf die Stickstoff-Fixierungsleistung und die Biomasseproduktion war jedoch nicht festzustellen. RIFFKIN et al. (1999a) konnten ebenfalls keinen Zusammenhang zwischen dem pH-Wert bzw. dem Al-Gehalt des Bodens und dem fixierten N-Anteil in Weißkleeweidens feststellen.

6.2 Isotopensignaturen und symbiotische N₂-Fixierung

6.2.1 Negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im oberirdischen Pflanzenmaterial der halbextensiv genutzten Wiesen

Bei im Grünland wachsenden Nicht-Fixierern wurden bislang sowohl positive als auch negative N-Isotopensignaturen festgestellt. PEOPLES et al. (2002) berichten von $\delta^{15}\text{N}$ -Werten nicht-fixierender Referenzpflanzen von +0,7 bis +5,8 ‰ auf europäischen und -1,1 bis +10,5 ‰ auf australischen Weideflächen. RIFFKIN et al. (1999a, 1999b) geben für nicht-fixierende Kräuter und Gräser in australischen Weiden $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von -2,1 bis +7,2 ‰ an.

Für europäisches Grünland der gemäßigten Zone lagen bis dato relativ wenige N-Isotopendaten vor (PEOPLES et al. 2002). In Biodiversitäts-Analysen, die sich mit den Auswirkungen der Artenvielfalt auf die Struktur und Funktion des Grünlands beschäftigen, wurden in jüngerer Zeit unter anderem auch N-Isotopensignaturen der angesäten Pflanzen bestimmt (beispielsweise in BIODPTH-Projekten, siehe hierzu SPEHN et al. 2002, MULDER et al. 2002).

In experimentellem Grünland in Portugal und Deutschland wurden in krautigen und grasartigen Referenzpflanzen u. a. in den Arten *Plantago lanceolata* und *Holcus lanatus* Isotopensignaturen im positiven $\delta^{15}\text{N}$ -Bereich ($> +1,5$ ‰) ermittelt (SPEHN et al. 2002). Ebenfalls positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zeigten die Referenzpflanzen *Lolium perenne* (+0,4 ‰) und *Ranunculus repens* (+0,05 ‰) in britischen (ungedüngten) Schafweiden (KERLEY & JARVIS 1999) sowie die Gräser *Festuca pratensis* und *Phleum pratense* in schwedischem Grünland mit im Mittel +4,7 bis +6,5 ‰ (HUSS-DANELL & CHAIA 2005). SCHEIDEGGER (2000) wies dagegen in Bergwiesen-Pflanzen der Ostalpen negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte bis zu -5,3 ‰ (*Potentilla aurea*) nach.

Bei SCHEIDEGGER (2000) waren die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von Nicht-Fixierern bei weniger intensiver Bewirtschaftung der Flächen niedriger als auf Intensivgrünland. Begründet wurde dies durch einen geringeren N-Umsatz und eine geringere mikrobiologische Aktivität. Auch PEOPLES et al. (2002) vermuten einen geringen N-Umsatz bzw. N-Transformationen, die den Boden nicht mit ^{15}N anreichern, als Ursache für die niedrigen ^{15}N -Gehalte in Referenzpflanzen.

Die N-fixierenden Leguminosen sollten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte aufweisen, die sich zwischen 0 ‰ ($\delta^{15}\text{N}$ des elementaren Luft-N) und dem $\delta^{15}\text{N}$ der Referenzpflanzen bewegen. Je mehr die Leguminose auf die symbiotische N₂-Fixierung angewiesen ist, desto näher sollte der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert an 0 ‰ liegen.

Bei Grünland-Leguminosen wurden bisher sowohl positive als auch negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte festgestellt. So fanden MULDER et al. (2002) in ihrem ungedüngten (experimentellen) Grünland (BIODPTH-Projekt, Schweden) im dritten Versuchsjahr $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von +0,02 ‰ im Sprossmaterial von *Lotus corniculatus*, +0,16 ‰ bei *Trifolium repens* und -0,22 ‰ bei *Trifolium pratense*. HUSS-DANELL & CHAIA (2005) berichten von $\delta^{15}\text{N}$ -Werten in

Trifolium pratense von -0,2 bis -0,9 ‰. KERLEY & JARVIS (1999) wiesen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von -2,7 bis +2,1 ‰ in Blättern von *Trifolium repens* nach. SPEHN et al. (2002) geben sowohl für die *Trifolium*-Arten *T. repens* und *T. pratense* als auch für die Artengruppe *Lotus corniculatus*, *Vicia sepium* und *V. cracca* einen Wertebereich von -2 bis +2 ‰ $\delta^{15}\text{N}$ an (nicht näher nach Arten differenziert, experimentelles Grünland, BIODPTH-Projekt, Deutschland). RIFFKIN et al. (1999a, 1999b) untersuchten *Trifolium repens* und Nichtfixierer in australischen Weiden und fanden $\delta^{15}\text{N}$ -Spannen von -3,4 bis +1,3 ‰ für *T. repens*.

In der vorliegenden Arbeit wurden im Sprossmaterial sowohl der nichtfixierenden Referenzpflanzen als auch der Leguminosen überwiegend negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte nachgewiesen (Anhang, Tab. A10 und Tab. A13). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen lagen mehrheitlich näher am $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Luft-N als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Fixierer, was auf das Vorhandensein symbiotisch fixierten Stickstoffs im Sprossmaterial hinweist. Der negative $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminosen kann mit einer ^{15}N -Diskriminierung im Fixierungsprozess sowie mit einer Aufnahme ^{15}N -abgereicherten Stickstoffs aus einer weiteren N-Quelle erklärt werden. Da die Referenzpflanzen ebenfalls negative $\delta^{15}\text{N}$ -Signaturen aufwiesen, ist die Aufnahme ^{15}N -abgereicherten Stickstoffs bei beiden funktionellen Gruppen wahrscheinlich. Das Vorhandensein ^{15}N -abgereicherter N-Quellen im Boden kann durch die halbextensive Bewirtschaftung (mit)verursacht sein. Auch für den Prozess der N-Assimilation kann eine leichte ^{15}N -Diskriminierung angenommen werden (vgl. HÖGBERG 1997). Die Veränderung der Isotopensignaturen der Nicht-Fixierer hin zu weniger negativen bzw. positiven $\delta^{15}\text{N}$ -Werten nach N-Düngung auf der Fläche Hockweiler (Anhang, Tab. A10 und Tab. A13) gibt Hinweise auf den Einfluss der Bewirtschaftung.

6.2.2 Einfluss diverser N-Quellen auf die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in den Referenzpflanzen

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode geht prinzipiell von der Nutzung zweier Stickstoffquellen (bodenbürtigen und luftbürtigen Stickstoffs) durch die Pflanzen aus (siehe auch Kap. 2.4.1.1). Bei einer funktionierenden symbiotischen Beziehung nehmen Leguminosen aus beiden N-Quellen (Boden- und Luft-N) Verbindungen mit unterschiedlichen ^{15}N -Gehalten auf. Referenzpflanzen (Nicht-Fixierer) ernähren sich nach diesem Modell ausschließlich von bodenbürtigen N-Verbindungen und repräsentieren daher den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert dieser N-Quelle. Stammt der Stickstoff der untersuchten Leguminose zu 100 % aus der symbiotischen N-Bindung, ist ihr $\delta^{15}\text{N}$ -Wert mit dem des atmosphärischen Stickstoffs identisch. Je mehr N die Leguminose aus der Boden-N-Quelle aufnimmt, desto näher rückt ihr $\delta^{15}\text{N}$ -Wert dem der Referenzpflanze (RIFFKIN et al. 1999a). Berücksichtigt wird in diesem Modell ferner die Isotopendiskriminierung im Prozess der N-Bindung (B-Wert, siehe Kap. 6.3).

Obwohl das Zwei-Stickstoffquellen-Modell eine Grundannahme der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode ist, kommen für die pflanzliche Ernährung diverse N-Quellen in Betracht. Es ist anzunehmen, dass die maßgebliche N-Quelle in den untersuchten Wiesen ^{15}N -abgereichert gegenüber elementarem Luftstickstoff ist. Die leicht verfügbaren Verbindungen Nitrat und Ammonium stellen normalerweise die wesentlichen N-Quellen für die pflanzliche Ernährung dar. Isotopenmessungen dieser N-Verbindungen wurden in der vorliegenden Arbeit nicht

durchgeführt, da diese sehr aufwendig und bei geringen Konzentrationen nahezu unmöglich durchzuführen sind (BODDEY et al. 2000). Zudem ist der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von N-Verbindungen variabel (HÖGBERG 1997), so dass einmalige Messungen keine verwertbaren Aussagen liefern. Man behilft sich stattdessen mit der Messung von Isotopensignaturen im Pflanzenmaterial von Nicht-Fixierern, um ein Maß für den ^{15}N -Gehalt der pflanzenverfügbaren N-Verbindungen im Boden zu erhalten (SHEARER & KOHL 1986, BODDEY et al. 2000). Da in der Literatur sowohl von positiven als auch von negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Nicht-Fixierer berichtet wird, kann man folgern, dass die Verbindungen Nitrat und Ammonium ebenfalls positive oder negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte aufweisen können. Das belegen auch Analysen von Böden unterschiedlicher Herkunft und Nutzung (HANDLEY & SCRIMGEOUR 1997). Im Prozess der Nitrifikation kann infolge einer Diskriminierung gegen das ^{15}N -Isotop der Ammonium-Pool mit ^{15}N angereichert und der Nitrat-Pool abgereichert werden (SHEARER & KOHL 1986, HÖGBERG 1997, ADAMS & GRIERSON 2001, WATZKA et al. 2006). Allerdings zeigten Blattanalysen überwiegend Ammonium-N ernährter Pflanzen häufig eine ^{15}N -Abreicherung (HANDLEY & SCRIMGEOUR 1997). Mögliche Ursachen sind eine N-Isotopenfraktionierung bei der Ammonium-Assimilation und/oder bei der innerpflanzlichen N-Verteilung.

Mögliche weitere N-Quellen für die pflanzliche Ernährung sind z. B. Aminosäuren, die als einfache organische N-Verbindungen im Boden vorkommen (KAYE & HART 1997, LIPSON & NÄSHOLM 2001). Die Bedeutung dieser organischen N-Verbindungen für die pflanzliche Ernährung ist noch wenig bekannt (HOBBIE et al. 1999). Ebenso unzureichend erforscht sind N-Isotopensignaturen von organischen N-Verbindungen in Böden (HANDLEY & SCRIMGEOUR 1997, HOBBIE et al. 1999, HOBBIE & COLPAERT 2003) sowie Isotopenfraktionierungseffekte bei der Aufnahme von organischen N-Verbindungen durch Pflanzen (HÖGBERG 1997).

Über die ^{15}N -Gehalte der für die pflanzliche Ernährung infrage kommenden organischen N-Verbindungen liegen widersprüchliche Vermutungen und Daten vor. Nach AERTS (2002) ist ein niedriger $\delta^{15}\text{N}$ -Wert ein Indikator dafür, dass Ericoid- oder Ektomykorrhiza-Pflanzen auf organische N-Ernährung stark angewiesen sind. Auch MICHELSEN et al. (1998) vermuten die Aufnahme von ^{15}N -abgereicherten organischen N-Verbindungen als Ursache für negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in mykorrhizierten Pflanzen in Heideland Nordschwedens. Messungen des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes von Aminosäuren im Boden ungedüngten Weidelands in Großbritannien haben jedoch bis auf wenige Ausnahmen positive Werte ergeben (OSTLE et al. 1999). Allerdings korrelierten die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der im Boden befindlichen Aminosäuren nicht mit den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der pflanzlichen Aminosäuren. Im Pflanzenmaterial wurden negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (-0,7 bis -3,2 ‰) ermittelt. Dies lässt auf eine Isotopenfraktionierung während der Aufnahme der Aminosäuren aus dem Boden schließen. Auch bei der vesikulär-arbuskulären Mykorrhiza kann die Aufnahme von N-Verbindungen mit einer N-Isotopenfraktionierung verbunden sein (LIPSON & NÄSHOLM 2001).

In den weniger intensiv genutzten Wiesen des westlichen Hunsrücks ist eine Mobilisierung von schwer verfügbaren Nährstoffen durch Mykorrhiza-Symbiosen wahrscheinlich. Durch eine stichprobenartige Untersuchung der Wurzeln mehrerer Leguminosen und der Nicht-Fixierer *Plantago lanceolata* und *Sanguisorba minor* konnten Strukturen von vesikulär-arbuskulärer Mykorrhiza nachgewiesen werden (siehe Kap. 5.10). Möglicherweise vereinfacht die Mykorrhizierung auch die Aufnahme von organischen N-Verbindungen. Dies könnte den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Wiesenpflanzen in Richtung einer negativeren Isotopensignatur beeinflusst haben. Jedoch ist die von Ericoid- und Ektomykorrhiza bekannte direkte Mobilisierung und Aufnahme organischer N-Formen bei der arbuskulären Mykorrhiza noch umstritten (FINLAY 2005). Es ist zu vermuten, dass eine Aufnahme von organischen N-Verbindungen höchstens einen geringen Stellenwert bei der N-Ernährung der Leguminosen einnimmt.

Der einfacher zu messende ^{15}N -Gehalt des gesamten Stickstoffvorrats des Bodens (Nt) gibt wenig Aufschluss über den ^{15}N -Gehalt des pflanzenverfügbaren Stickstoffs (HÖGBERG 1997). Auf den meisten landwirtschaftlich genutzten Flächen wurden im Boden-Gesamt-N positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen +3 und +12 ‰ ermittelt (SHEARER & KOHL 1986, MACKO & OSTROM 1994, BODDEY et al. 2000, WATZKA et al. 2006). Dies wurde mit Isotopenfraktionierungen in biologischen und chemischen Prozessen begründet, die ^{15}N -abgereicherte Produkte hervorbringen, die den Böden sowie der Biozönose verloren gehen wie z. B. NH_3 und N_2O (HÖGBERG 1997). In der vorliegenden Arbeit wurde das N-Isotopenverhältnis des Gesamt-Stickstoffs im Boden nicht gemessen, da der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des bodenbürtigen Stickstoffs über die nicht-fixierenden Referenzpflanzen bestimmt wurde. Eine Abgabe von N-Verbindungen in die Atmosphäre konnte nicht untersucht werden. Die beobachteten negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Pflanzen lassen auf eher geringe Verluste ^{15}N -abgereicherter Produkte in die Atmosphäre aus den vergleichsweise stickstoffarmen Böden der Magerwiesen schließen.

Die Abgabe von ^{15}N -abgereichertem Urin durch Weidetiere stellt eine mögliche Ursache von negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten in den Pflanzen dar (HÖGBERG 1997, ERIKSEN & HØGH-JENSEN 1998, MØLLER-HANSEN et al. 2002). Da die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wiesen im Untersuchungszeitraum nicht beweidet wurden, ist eine unmittelbare Wirkung von Urin nicht gegeben. Allerdings ist von zwei Flächen eine frühere Schafbeweidung bekannt und für die übrigen Wiesen kann eine ehemalige Nutzung als Weide oder eine gelegentliche Düngung mit Stallmist nicht ausgeschlossen werden. Möglicherweise macht sich eine derartige jahrzehntelange Nutzung heute noch in den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Böden bemerkbar. Allerdings sind die bisherigen Erkenntnisse über die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Urin von Weidevieh nicht einheitlich. So wiesen WATZKA et al. (2006) für Urin positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (ca. +8 ‰) nach.

In Rindergülle wurden häufig positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte festgestellt (+12 bis +14 ‰ GLASER et al. 2000 und ca. +8 ‰ WATZKA et al. 2006). Gölledüngung kann daher eine ^{15}N -Anreicherung des Bodenstickstoffs und des pflanzlichen Stickstoffs bewirken (vgl. WATZKA et al. 2006).

Dies belegen die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial der Nicht-Fixierer auf der Fläche Hockweiler, die nach beobachteter Gülledüngung im Folgejahr anstiegen.

Als ^{15}N -abgereicherte N-Quellen kommen ferner entsprechende synthetische Düngemittel oder ^{15}N -abgereicherte N-Verbindungen aus atmosphärischer Deposition in Betracht. Für gewöhnlich zeigen die im Haber-Bosch-Verfahren hergestellten Düngemittel einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert um 0 ‰ (wie ihr Ausgangssubstrat atmosphärischer elementarer Stickstoff) (WATZKA et al. 2006). Die Weiterverarbeitung zu Nitrat-, Ammonium- oder Harnstoffdünger bewirkt allerdings ein relativ weites Spektrum der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Düngemittel von -8 ‰ bis +7 ‰ (MACKO & OSTROM 1994). Aus der Übersicht bei MACKO & OSTROM (1994) ist zu entnehmen, dass $\delta^{15}\text{N}$ -Gehalte <-5 ‰ sowohl bei Nitrat- als auch bei Ammonium-Düngern festgestellt wurden. Viele Mineraldünger bewegten sich jedoch im Wertebereich von -2 bis +2 ‰. HANDLEY & SCRIMGEOUR (1997) berichten ferner von extremen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten von -14 und +22 ‰ in Mineraldüngern. BEDARD-HAUGHN et al. (2003) geben eine Übersicht über bisher beobachtete Variationsbreiten der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von verschiedenen organischen und anorganischen Quellen und Senken.

Die Aufnahme von ^{15}N -abgereicherten N-Verbindungen aus atmosphärischer Deposition wäre eine weitere mögliche Ursache für negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in Pflanzenmaterial (TOZER et al. 2005). Bisherige Analysen der N-Verbindungen aus atmosphärischer Deposition zeigten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte zwischen -20 und +30 ‰ (Übersicht bei MACKO & OSTROM 1994). Dies wird mit der unterschiedlichen Art der N-Verbindungen und deren variierenden ^{15}N -Gehalten begründet. In der vorliegenden Arbeit wurde die Höhe der atmosphärischen N-Deposition nicht bestimmt. Untersuchungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz belegen jedoch für den westlichen Hunsrück in den letzten Jahren eine relativ geringe nasse Freiland-Depositionsrate von etwa $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALDÖKOLOGIE UND FORSTWIRTSCHAFT RHEINLAND-PFALZ 2005). Hinzu kommen möglicherweise in ähnlicher Höhe Stickstoffeinträge aus trockener Deposition, so dass eine Gesamtdeposition in Höhe von bis zu $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ durchaus möglich ist (vgl. FRANKENBERG & RUTHSATZ 2001, QUIRIN 2004). Bei den vergleichsweise geringen N_{min} -Gehalten der Wiesenböden (maximal $40 \text{ mg N}_{\text{min}} \text{ kg}^{-1} \text{ TB}$ im Juni 2001) können N-Verbindungen aus atmosphärischer Deposition die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Pflanzenmaterial beeinflussen, auch wenn sie nicht die Haupt-N-Quellen darstellen.

Über eine Isotopendiskriminierung bei der N-Assimilation kann hinsichtlich der untersuchten Pflanzenarten keine eindeutige Aussage gemacht werden. Zwar geben die Wurzelanalysen einen Hinweis auf eine mögliche innerpflanzliche Diskriminierung bei *Trifolium repens* und *T. pratense* (signifikant höhere ^{15}N -Gehalte als im Spross), allerdings waren die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Sprosse und Wurzeln bei sieben weiteren Pflanzenarten (Freilandproben) nicht signifikant verschieden (siehe Kap. 5.4.2, Tab. 15). Eine systematische Wurzelanalyse würde verlässlichere Aussagen ermöglichen, wird jedoch durch das zeitintensive Trennen der Wurzelproben der im Grünland eng nebeneinander wachsenden Arten erheblich erschwert (vgl. MULDER et al. 2002).

Letztlich bleibt die Interpretation der gemessenen Isotopensignaturen schwierig, da zu wenig Informationen über die standortspezifischen Details des N-Kreislaufs mit den Isotopensignaturen der diversen beteiligten N-Quellen und -Senken vorliegen. Vermutlich sind die negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in den Pflanzen eine Folge von jahrzehntelangen N-Umsetzungsprozessen in den Wiesenböden (evtl. beginnend bei der Bodengenese), wobei ^{15}N -abgereichertes Pflanzenmaterial zu negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Streuschicht und weiteren ^{15}N -Anreicherungen im gesamten System führen kann (HANDLEY & SCRIMGEOUR 1997, BODDEY et al. 2000). Aufschluss über den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der verschiedenen pflanzenverfügbaren N-Quellen im Boden könnten nur aufwendige Analysen geben. Eine Aufnahme ^{15}N -abgereicherter organischer Substanzen aus dem Boden, die zu negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten in den Nicht-Fixierern führt ist denkbar, da die Bodenbedingungen eine Aufnahme anorganischen Stickstoffs in ausreichender Menge erschweren könnten (fehlende Düngung, starke Bodentrockenheit im Sommer, niedrige pH-Werte).

6.2.3 Fixierte N-Anteile (Ndfa) in den Leguminosen

Der Anteil fixierten Stickstoffs (Ndfa) in der gesamten Leguminosen-Sprossmasse der Wiesen wurde in der vorliegenden Arbeit mit 15,5 bis 91,4 % bestimmt. Nach LEDGARD & STEELE (1992) liegt der Anteil fixierten Stickstoffs in Leguminosen, die auf Böden mit geringer N-Verfügbarkeit wachsen, meist bei 90 %. Der niedrige Ndfa-Anteil von 15,5 % auf der Fläche Hockweiler bei Berechnung mit *Plantago lanceolata* als Referenz ist weniger verlässlich als der mit der Referenz „Kräuter + Gräser“ berechnete Ndfa-Anteil von 69,3 % für dieselbe Fläche. Infolge der Gülledüngung wurde auf der Wiese Hockweiler der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Nicht-Leguminosen erhöht, so dass beispielsweise die Differenz des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes von *Plantago lanceolata* (-0,4 ‰) zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminosen (-0,6 ‰) sehr gering wurde (Anhang, Tab. A10 und A13). Der gemittelte $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenz „Kräuter + Gräser“ zeigte mit ca. +1,7 ‰ dagegen eine Differenz > 2 ‰ zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminosen. Zu geringe Unterschiede im $\delta^{15}\text{N}$ -Wert führen zu größeren Fehlern bei der Berechnung der fixierten N-Anteile (PEOPLES et al. 2002). Das gleiche trifft für die Ndfa-Berechnung der Fläche Muhl 2 zu, deren Referenzwert „Kräuter + Gräser“ ($\delta^{15}\text{N}$ -Wert = +0,14 ‰) ebenfalls einen sehr geringen Unterschied zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminosen aufwies. Für alle Flächen gilt: Mit größeren $\delta^{15}\text{N}$ -Unterschieden zwischen Leguminosen und Referenzpflanzen wurden höhere fixierte Stickstoffanteile in der Leguminosen-Sprossmasse ermittelt. Auf den meisten Flächen wurde mit der geeigneteren Referenzvariante ein gebundener N-Anteil von über 60 % am Gesamtstickstoff der Leguminosenmasse berechnet (Kap. 5.5, Tab. 19 und 22).

Artspezifische Unterschiede in der N_2 -Fixierungsleistung zwischen den Leguminosen auf den Magerwiesen sind wahrscheinlich. Es wurde vermutet, dass sich das ökologische Verhalten der Arten hinsichtlich des N-Angebots des Standortes (abgeleitet aus der Stickstoff-Zahl „N“ nach ELLENBERG et al. 1992) auch in der spezifischen N_2 -Fixierungsleistung der Arten widerspiegelt. Einen größeren Anteil fixierten Stickstoffs zeigte tatsächlich die als Magerkeitszeiger geltende Berg-Platterbse (N = 2) gegenüber den auch auf stickstoffreicheren

Standorten anzutreffenden Klee-Arten *Trifolium pratense* und *T. repens*. Dagegen wies *Lotus corniculatus* (N = 3) trotz limitiertem N-Angebot des Standortes einen vergleichsweise geringen Anteil symbiotisch fixierten Stickstoffs in der Sprossmasse auf (Kap. 5.5.8).

Die Anteile fixierten Stickstoffs nahmen auf den Magerwiesen in der Reihenfolge *Vicia/Lathyrus* > *Trifolium* > *Lotus corniculatus* ab (siehe Kap. 5.5.8, Tab. 29). Der vergleichsweise geringe fixierte N-Anteil in der Hornklee-Sprossmasse (0,6 bis 72 %) sowie der gegenüber den anderen Leguminosen überwiegend signifikant niedrigere $\delta^{15}\text{N}$ -Wert dieser Art (Kap. 5.4.1) weisen auf eine geringere Abhängigkeit von atmosphärischem Stickstoff hin. SPEHN et al. (2002) beobachteten einen größeren Effekt auf Biomasse und N-Gehalt des Bestandes durch *Trifolium repens* und *T. pratense* als durch *Lotus corniculatus*. Sie schlussfolgerten, dass die *Trifolium*-Arten effizientere N_2 -Fixierer seien als *Lotus corniculatus*. Die N_2 -Fixierungsleistung wurde in jener Arbeit jedoch nicht quantifiziert, es wurden lediglich $\delta^{15}\text{N}$ -Werte gemessen.

Von diesen Ergebnissen abweichend wies *Lotus corniculatus* in einer Untersuchung von JACOT et al. (2000a) in artenreichem Dauergrünland (Arrhenatheretum, Höhe 900 m über NN) ähnlich hohe Anteile fixierten Stickstoffs auf wie *Trifolium pratense*. Im Sprossmaterial der Arten *Trifolium pratense*, *T. repens*, *Lotus corniculatus* und *Vicia sativa* wurden in jener Arbeit symbiotisch gebundene Stickstoffanteile in einer Höhe von 64 bis 78 % festgestellt, wobei *V. sativa* die höchsten Ndfa-Anteile zeigte. Von HEICHEL et al. (1985) wurden bei *Trifolium pratense* in einem einjährigen Bestand mit 65 % signifikant höhere Ndfa-Anteile als in *Lotus corniculatus* (40 %) nachgewiesen. In mehrjährigen Beständen zeigte *Lotus corniculatus* mit bis zu 85 % deutlich höhere Ndfa-Anteile als im einjährigen Bestand.

Zu Rot- und Weißklee liegen überwiegend Vergleichsdaten aus Weiden und Klee-Gras-Beständen vor. KERLEY & JARVIS (1999) beobachteten auf Weideflächen im Blattmaterial von *Trifolium repens* einen Ndfa-Anteil von 34 bis 100 % ($\delta^{15}\text{N}$ -Methode). RIFFKIN et al. (1999b) wiesen einen symbiotisch fixierten N-Anteil von durchschnittlich 65 % im Sprossmaterial von Weißklee-Pflanzen nach ($\delta^{15}\text{N}$ -Methode). HERRMANN et al. (2001) stellten in einem einjährigen Bestand mit *Trifolium pratense*, *Trifolium repens* sowie zwei Grasarten bei einer Düngung von 20 kg N ha^{-1} fixierte N-Anteile von 75 bis 92 % in *Trifolium repens* und 77 bis 92 % in *Trifolium pratense* fest (^{15}N -Verdünnungsmethode). FARNHAM & GEORGE (1993) zeigten für einen Rotklee-Knaulgras-Bestand einen fixierten N-Anteil in der Rotkleemasse von etwa 96 %.

Die eigenen Ergebnisse zur Höhe der Fixierungsleistung der Kleearten *Trifolium repens* und *Trifolium pratense* variieren je nach verwendeter Referenzart und Fläche. So zeigte *T. repens* fixierte N-Anteile zwischen 2 und 86 %. Für *T. pratense* wurden Ndfa-Anteile zwischen 11 und 90 % ermittelt. Die unterschiedlichen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Referenzpflanzen und deren zum Teil geringen Unterschiede zum $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminosen führten zu den hohen Spannen. Vergleichsdaten zur Fixierungsleistung der in der vorliegenden Arbeit untersuchten

Leguminosenarten *Lathyrus linifolius*, *Vicia cracca*, *V. sepium* sowie zur einjährigen Kleeart *Trifolium dubium* wurden nicht gefunden.

6.2.4 Bedeutung der fixierten N-Mengen für die Magerwiesen

Der Anteil fixierten Stickstoffs in der gesamten oberirdischen Pflanzenmasse der untersuchten Hunsrück-Wiesen bewegte sich zwischen 0,6 und 24,3 %. Das entsprach einer Zufuhr von 0,6 bis 13,8 kg N ha⁻¹ aus der symbiotischen Stickstoff-Fixierung, wobei der sehr geringe Wert von 0,6 kg N ha⁻¹ durch eine starke Düngung einer vormals ungedüngten Wiese bedingt war. Auf dieser Fläche in Hockweiler war der Leguminosenanteil nach der Düngung drastisch zurückgegangen. Auf den ungedüngten Wiesen wurden im Minimum 2,5 kg N ha⁻¹ (oder 4,8 % des gesamten N) symbiotisch fixiert. JACOT et al. (2000b) stellten bei Untersuchungen in alpinem Grasland symbiotisch gebundene N-Mengen in Höhe von 1 bis 26 kg N ha a⁻¹ fest.

Der Leguminosenanteil an der gesamten Trockenmasse hatte einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der fixierten N-Menge in der Gesamtbiomasse ($P < 0,001$). Ein starker Zusammenhang dieser beiden Parameter wurde ebenfalls von CARLSSON & HUSS-DANELLE (2003) beschrieben. Um unterschiedlich leguminosenreiche Bestände vergleichen zu können, bietet sich die Berechnung der Fixierungsrate (kg Nfix je dt Leguminosen-Sprossmasse) an. Diese N-Effizienz lässt sich aus den insgesamt symbiotisch fixierten N-Mengen und den Massenanteilen der Leguminosen an der gesamten Biomasse berechnen.

Die ermittelten N₂-Fixierungsraten von 2,2 bis 2,6 kg N pro dt Leguminosen-Sprossmasse für die im Juni des Jahres 2001 untersuchten Wiesen und von 2,0 bis 2,3 kg N pro dt Leguminosen-Sprossmasse für die im Juni 2002 untersuchten Wiesen (jeweils Mediane aller Flächen, beide Referenzvarianten) entsprechen annähernd den von FRITSCH (2000) für Futterbau-Leguminosen angegebenen Stickstoffbindungsraten von 2,5 kg N pro dt Leguminosen-TM. In einem für die Landwirtschaftliche Praxis in der Bundesrepublik Deutschland erstellten Leitfaden („Faustzahlen für die Landwirtschaft“) wird als Faustregel für die symbiotische Stickstoffbindung in Grünlandbeständen eine anzurechnende Menge von 3,0 kg fixiertem N pro dt Weißklee-Trockenmasse im oberirdischen Aufwuchs empfohlen (ZEHR & KLÖBLE 2005).

Von WEISSBACH (1995) wurden in einem Modell etwas höhere Fixierungsraten von 3 bis 4 kg N pro dt Weißklee-Sprossmasse in Weißklee-Gras-Beständen errechnet. HØGH-JENSEN et al. (2004) haben in einem Modell unter Berücksichtigung zusätzlicher Parameter wie „Transfer-Stickstoff“ und „Stickstoffmengen in Ernterückständen“ die Fixierungsraten von ein- bis zweijährigen Weißklee- und Rotklee-Grasbeständen berechnet und kamen auf wesentlich höhere Bindungsraten von 5,1 bzw. 8,6 kg N pro dt Klee-Sprossmasse. NEUENDORFF (1996) gibt in einer Literaturübersicht Fixierungsraten von 0,9 bis 7,4 kg N pro dt Klee-Sprossmasse für ungedüngte Weißklee-Grasbestände an.

Neben einer Angabe der N-Fixierungsrate in kg N pro dt Leguminosenmasse ist auch die Angabe in kg N pro % Leguminosenanteil gebräuchlich. BOLLER & NÖSBERGER (1987)

nennen z. B. für Weißklee im Feldfutterbau eine fixierte N-Menge zwischen 2,4 und 4,6 kg N ha⁻¹ pro % Klee-Anteil. In der landwirtschaftlichen Praxis wird der Klee-Anteil häufig geschätzt, da dies eine deutliche Zeitersparnis gegenüber einer Ermittlung der Trockenmassen bedeutet. Für die artenreichen Magerwiesen war die Bestimmung der Leguminosenanteile über die Trockenmassen jedoch genauer als über die Schätzung (siehe Kap. 5.7.2). Besonders bei den höheren Leguminosenanteilen fand häufig eine Überschätzung statt. Dies hätte eine Überschätzung der symbiotisch gebundenen N-Menge zur Folge.

Ferner lassen sich die im Feldfutterbau (mit meist nur einer Leguminosenart mit hohem Trockenmassenanteil) ermittelten N-Fixierungsraten nur eingeschränkt auf artenreiche Wiesen übertragen. Das zeigt auch die Untersuchung von TSIALTAS et al. (2004). Die Autoren wiesen in mediterranem Grasland mit einem 3 % igen Anteil von *Trifolium repens* geringe symbiotisch fixierte N-Mengen von maximal 3 kg N ha⁻¹ nach (Isotopenverdünnungsmethode), was einer Fixierungsrate von lediglich 1 kg N pro % Klee-Anteil entspricht. Untersuchungen von BOWMAN et al. (1996) in alpiner Tundravegetation haben bei einem Deckungs-Anteil von 2 bis 14 % der dort vorkommenden drei *Trifolium*-Arten (*T. dasyphyllum*, *T. nanum* und *T. parryi*) eine symbiotisch fixierte N-Menge von durchschnittlich 5 kg ha⁻¹a⁻¹ ergeben ($\delta^{15}\text{N}$ -Methode). Das würde einer Fixierungsrate von weniger als 1 kg N pro % Klee-Anteil entsprechen. In der vorliegenden Arbeit stieg die symbiotisch fixierte N-Menge je Prozent Leguminosenanteil um durchschnittlich 0,5 kg ha⁻¹ (siehe Kap. 5.5.6) Insgesamt waren in der Literatur nur wenige Ergebnisse für halbextensiv genutzte artenreiche Wiesen mittlerer Standorte mit einer Kombination verschiedener Leguminosenarten zu finden.

Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den in der vorliegenden Arbeit ermittelten Daten zur N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen in artenreichen Grünlandbeständen mit geringeren Leguminosenanteilen. Die eigenen Ergebnisse sind somit zwischen den in der landwirtschaftlichen Praxis gebräuchlichen Faustzahlen zur N₂-Fixierung und den geringen Werten aus natürlichem Grasland (CLEVELAND et al. 1999) einzuordnen. Der maßgebliche Grund ist der in Magerwiesen relativ geringe bis mäßige Trockenmassen-Anteil der Leguminosen von durchschnittlich 5 bis 15 % im Vergleich zu artenarmen Klee-Grasbeständen im Feldfutterbau oder Intensivgrünland mit teilweise mehr als 50 % Kleeanteil.

Aus den in den Jahren 2001 und 2002 ermittelten Fixierungsraten wurden vereinfachte Kalkulationen der symbiotisch fixierten N-Menge für das Jahr 2003 abgeleitet, da die Parameter „Gesamtbiomasse“ und „Leguminosen-Sprossmasse“ bekannt waren. Für die ungedüngten Wiesen wurden unter der Annahme einer Fixierungsrate von 2,5 kg N pro dt Leguminosen-Sprossmasse für die Juni-Ernte des Jahres 2003 fixierte N-Mengen von 2,5 bis 10 kg N fix ha⁻¹ errechnet (Kap. 5.5.7, Tab. 28). Voraussetzung für diese Annahme sind allerdings ähnliche Wachstumsbedingungen und Nutzungsweisen wie in den ersten beiden Versuchsjahren. Veränderte Standortbedingungen können jedoch die N₂-Fixierungsleistung beeinflussen bzw. zu Änderungen der Isotopensignaturen im Sprossmaterial der Fixierer und

Nicht-Fixierer führen (siehe Kap. 2.5). So kann sich beispielsweise die außergewöhnliche Trockenheit im Frühjahr und Sommer des Jahres 2003 negativ auf die Fixierungsleistung ausgewirkt haben. Aus Kostengründen wurde auf eine N-Isotopenanalyse der Ernteproben vom Juni 2003 und August 2001 verzichtet.

Auch für den August (zweiter Aufwuchs) des Jahres 2001 ist diese Kalkulation möglich. Sie führt zu einer fixierten N-Menge von 2,5 bis 7,3 kg Nfix ha⁻¹ auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen und zu einer Jahressumme von 7 bis 21 kg Nfix ha⁻¹ a⁻¹ (Kap. 5.5.7). Voraussetzung wäre eine ähnliche Fixierungsleistung in der Zeit zwischen erstem und zweitem Schnitt. HUSS-DANEL & CHAIA (2005) stellten in ihren Untersuchungen bei der Juni- und bei der August-Ernte ähnlich hohe Anteile fixierten Stickstoffs (Ndfa) im Pflanzenmaterial von *Trifolium pratense* fest. HANDLEY & SCRIMGEOUR (1997) wiesen dagegen in einer knapp 40jährigen Ackerbrache im Verlauf der Vegetationsperiode steigende $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial von Gräsern und Kräutern nach. Die Kalkulationen der fixierten N-Menge aus den Ergebnissen der Jahre 2001 und 2002 können daher nur als vereinfachte Schätzungen angesehen werden.

Zu bedenken ist, dass die in der vorliegenden Arbeit anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode berechneten fixierten N-Mengen auf Basis des Sprossmaterials ermittelt wurden. Die fixierten N-Mengen in Wurzeln und oberirdischen Ernteresten können nur mit vergleichsweise hohem Aufwand nachgewiesen werden (HEICHEL & HENJUM 1991, RIFFKIN et al. 1999b, JACOT et al. 2000b) und wurden daher nicht bestimmt. Die Beschränkung auf die fixierte N-Menge in der Sprossmasse führt höchstwahrscheinlich zu einer Unterschätzung des insgesamt fixierten Stickstoffs. JØRGENSEN & LEDGARD (1997) empfehlen zur Einbeziehung des symbiotisch fixierten Stickstoffs in den Ernteresten (oberirdische Biomasse unterhalb der Schnitthöhe plus Wurzelmasse) die Multiplikation der in der Sprossmasse bestimmten fixierten N-Menge mit einem Faktor 1,7. Das würde für die untersuchten Magerwiesen eine jährliche symbiotisch fixierte N-Menge von bis zu 24 kg N ha⁻¹ bei einem Schnitt (Juni) und bis zu 36 kg N ha⁻¹ bei Zweischnitt-Nutzung (Juni, August) bedeuten.

Bei mehreren Ernten im Jahr werden - gegenüber nur einer Ernte - höhere N-Mengen symbiotisch gebunden (SERESINHE et al. 1994). In der vorliegenden Arbeit wurde die symbiotische N₂-Fixierung im Wiederaufwuchs nach der Heuernte auf bis zu ca. 7 kg Nfix ha⁻¹ geschätzt. Die Wiesen wurden jedoch nicht regelmäßig mehrfach pro Jahr genutzt. Die in der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode fixierten N-Mengen verbleiben vermutlich zu einem Teil in den Pflanzenresten bzw. in den Erneuerungsknospen der Pflanzen und werden zu Beginn der folgenden Vegetationsperiode zum Wachstum verwendet. Ein Teil des fixierten Stickstoffs geht durch Zersetzung abgestorbener Pflanzenteile und Wurzelknöllchen in den organischen N-Pool des Bodens über (HEICHEL & HENJUM 1991, RUSSELLE et al. 1994, WAREMBOURG et al. 1997).

Die über die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode geschätzten symbiotisch fixierten N-Mengen sowie die vereinfachten Kalkulationen sind bei der Erstellung von Stickstoff-Flächenbilanzen für die artenreichen Wiesen hilfreich. Die für die Juni-Ernten ermittelten fixierten N-Mengen in

Höhe von maximal 14 kg N ha^{-1} sind vergleichbar mit der Höhe der N-Einträge aus atmosphärischer Deposition in dieser Region (10 bis $20 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). So ist eine N-Zufuhr aus diesen N-Quellen in einer Höhe etwa 30 kg N ha^{-1} in die betreffenden Bestände durchaus wahrscheinlich. Mit der Heuernte erfolgte ein N-Flächenentzug in Höhe von 37 bis 100 kg N ha^{-1} . Eine Auswaschung von Stickstoff (als Nitrat) ist bei den insgesamt geringen N-Umsatzmengen kaum zu erwarten.

Würden die beiden N-Quellen atmosphärische N-Deposition und symbiotische N_2 -Fixierung die alleinigen Input-Faktoren stellen, müssten sich negative Bilanzen ergeben (vgl. WATZKA et al. 2006). Vermutlich würde bei Berücksichtigung der Erntereste und Wurzeln eine etwas höhere N-Zufuhr aus der symbiotischen N_2 -Fixierung ermittelt werden. Als weitere N-Quellen kommen überdies die natürliche N-Nachlieferung der Böden, die nicht-symbiotische N_2 -Fixierung wie auch eine sporadische Gabe von Wirtschafts- oder Mineraldünger in Betracht.

6.3 Methodendiskussion

6.3.1 Vertrauenswürdigkeit des im Kulturversuch ermittelten B-Wertes

Während des biochemischen Prozesses der symbiotischen N_2 -Fixierung wird das schwerere Isotop (^{15}N) gegen das leichtere Isotop (^{14}N) diskriminiert (HÖGBERG 1997). Wie bereits in Kapitel 4.5 und 5.4.4 beschrieben, wird deshalb im Allgemeinen empfohlen, zur präziseren Schätzung der Fixierungsleistung einen Korrekturwert (B-Wert) zur Berechnung heranzuziehen. Der im Kulturversuch ermittelte B-Wert soll die Höhe dieser Isotopenfraktionierung angeben (Kap. 5.4.5). Als Fraktionierung wird die Abweichung im $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ -Isotopenverhältnis zwischen Substrat und Produkt bezeichnet. Da das $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ -Isotopenverhältnis des Luft-N allgemein als Standard verwendet wird ($\delta^{15}\text{N} = 0 \text{ ‰}$), zeigt ein $\delta^{15}\text{N}$ -Wert nahe 0 ‰ im Pflanzenmaterial (Produkt) eine geringe Fraktionierung des aus der Luft gebundenen Stickstoffs (Substrat) an. Die an der symbiotischen N-Fixierung beteiligten Rhizobien verursachen eine Diskriminierung des schwereren gegen das leichtere Isotop, die jedoch je nach Rhizobien-Stamm unterschiedlich stark ausfallen kann. Deshalb sollte zur Quantifizierung des symbiotisch fixierten N-Anteils in Leguminosen möglichst der auf den Untersuchungsflächen vorkommende Rhizobien-Stamm für den Kulturversuch verwendet werden (HÖGBERG 1997, RIFFKIN et al. 1999a). Dies wurde in der vorliegenden Arbeit durch Angießen der Versuchspflanzen mit einem wässrigen Bodenextrakt von den Versuchsflächen erreicht.

Aus den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten im Sprossmaterial der Kulturversuch-Leguminosen wurde ein B-Wert von $-1,6 \text{ ‰}$ errechnet (Kap. 5.4.5). Dies entspricht einem Fraktionierungsfaktor α von 1,0016 (Berechnungsformeln bei HÖGBERG 1997, ROBINSON 2001). Damit liegt der Wert in dem häufig für die symbiotische N_2 -Fixierung beobachteten Bereich von 1,002 bis 0,998 (SHEARER & KOHL 1993, HÖGBERG 1997). Im Gefäßversuch wurde lediglich das Sprossmaterial als Berechnungsgrundlage herangezogen, da auch bei der Freiland-

Untersuchung nur oberirdische Biomasse (Aufwuchs) verwendet wurde. Diese Vorgehensweise entspricht den Empfehlungen von SHEARER & KOHL (1986). Diese Autoren geben an, dass der B-Wert (dort bezeichnet mit $\delta^{15}\text{N}_a$) des Pflanzenorgans für die Berechnung des fixierten N-Anteils herangezogen werden soll, welches auch im Freiland untersucht wurde. Übersichten über die Höhe zahlreicher bisher in Kulturversuchen ermittelter B-Werte (baum- und strauchförmige sowie krautige Leguminosen) finden sich bei THIELEN-KLINGE (1997) sowie bei WEST et al. (2005). Die angegebenen B-Werte lagen zwischen -4 ‰ und +2 ‰ wobei in der überwiegenden Zahl der Untersuchungen in Gefäßversuchen ein B-Wert zwischen -0,5 ‰ und -2 ‰ festgestellt wurde.

Kulturversuche zur Ermittlung der Isotopenfraktionierung der N_2 -Fixierung heimischer Leguminosen wurden von mehreren Autoren beschrieben. Vornehmlich handelte es sich um Versuche mit landwirtschaftlich genutzten Sorten der Kleearten *Trifolium pratense* und *Trifolium repens*. Für *Trifolium dubium*, *Lathyrus linifolius*, *Lotus corniculatus*, *Vicia cracca* und *V. sepium* sind – soweit ersichtlich – in der Literatur keine Angaben vorhanden.

LEDGARD (1989) ermittelte in einem N-freien Kulturversuch unter Anwendung eines handelsüblichen Rhizobienstammes (PDD2668) im Sprossmaterial von *Trifolium repens* einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -0,82 ‰. Bei Verwendung eines Feld-Isolates wurde ein kleinerer $\delta^{15}\text{N}$ -Wert in Höhe von -1,47 ‰ beobachtet. Auch RIFFKIN et al. (1999a) stellten Unterschiede von bis zu 2,5 ‰ bei der Anwendung von indigenen gegenüber einem kommerziellen Bakterienstamm fest. Sie konnten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von -1,48 ‰ bis -3,93 ‰ im Sprossmaterial von Weißkleeplanzen nachweisen. ERIKSEN & HØGH-JENSEN (1998) ermittelten einen B-Wert für *Trifolium repens* von -1,4 ‰ mit einem handelsüblichen Bakterienstamm (*Rhizobium leguminosarum* biovar *trifolii* WPBS5, IGER Aberystwyth, Wales). Eine Spanne von B-Werten wiesen CARLSSON et al. (2006) bei Anwendung verschiedener Rhizobienstämme nach. Sie errechneten B-Werte im Sprossmaterial von *Trifolium repens* zwischen -4,5 und -0,6 ‰. Der Mittelwert wurde mit -1,7 ‰ angegeben. STEELE (1983) gibt für Weißklee-Sprossmaterial einen B-Wert von -0,82 ‰ an. YONEYAMA et al. (1986) berechneten die Isotopenfraktionierung der Gesamtpflanze (Spross- und Wurzelmasse) mit -0,98 ‰, wobei die Werte in Blättern und anderen Sprossanteilen mit -1,11 ‰ bzw. -1,36 ‰ niedriger waren als die Werte in der Wurzel (+0,33 ‰) und in den Wurzelknöllchen (+0,57 ‰).

In Kulturversuchen mit *Trifolium pratense* wurden überwiegend negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Sprossmaterial gemessen. LOGES (1998) ermittelte mit -3,25 ‰ einen relativ niedrigen B-Wert. YONEYAMA et al. (1986) fanden $\delta^{15}\text{N}$ -Werte von -1,13 ‰ in Blättern und -1,6 ‰ in Stängeln von Rotklee. Bei CARLSSON et al. (2006) reichte die Spanne der B-Werte im Sprossmaterial von *Trifolium pratense* von -2,6 bis 0 ‰, der Mittelwert lag bei -1,3 ‰. HUSS-DANELL & CHAIA (2005) zitieren Untersuchungen von MARIOTTI (1980) mit B-Werten von -0,7 bis -1,0 ‰ im Sprossmaterial von acht Wochen alten Rotklee-Pflanzen. B-Werte für *T. pratense* in ähnlicher Höhe (-0,67 bis -1,23 ‰) werden bei JUNG (2003) angegeben. Seltener wurde von positiven $\delta^{15}\text{N}$ -Werten im Sprossmaterial von auf N-freiem Substrat angezogenen Kleeplanzen berichtet. SCHMIDTKE (1997) ermittelte für drei

Rotkleesorten im Sprossmaterial B-Werte zwischen +1,8 und +2,4 ‰. KOHL & SHEARER (1980) geben für Gesamtpflanzen von *Trifolium pratense* im Gefäßversuch B-Werte zwischen +0,9 und +2,1 ‰ (im Mittel +1,88 ‰) an.

Bei der Übertragung der experimentell ermittelten Daten auf die unter natürlichen Bedingungen ablaufenden Prozesse sind jedoch die unterschiedlichen ökologischen und experimentell bedingten Einflussfaktoren zu bedenken. So können die Unterschiede in der Höhe der Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung nicht nur von art- oder sortenspezifischen Unterschieden der Leguminosen oder von den verwendeten Rhizobien-Stämmen (RIFFKIN et al. 1999a, CARLSSON et al. 2006) verursacht werden. Sie können ferner von den spezifischen Versuchsbedingungen abhängen. LEDGARD (1989) beobachtete beispielsweise eine Änderung der B-Werte bei stärkerer Bodennässe. In der vorliegenden Arbeit zeigten sich leichte Unterschiede zwischen den mit kommerziellen Bakterienstämmen und den mit Bodenextrakt angeimpften Pflanzen. Die mit dem Rhizobien-Präparat beimpften Rotkleepflanzen wiesen z. B. einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -1,6 ‰, die mit Bodenextrakt angeimpften Pflanzen einen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von -1,3 ‰ auf. Da die Versuchsbedingungen nicht genau identisch waren, kann der beobachtete Unterschied durch mehrere Faktoren wie unterschiedliche Wasserverfügbarkeit in den Gefäßen, andere Lichtbedingungen etc. zurückzuführen sein. Auch das Pflanzenalter und der Entwicklungszustand spielen vermutlich eine Rolle. Auf eine mögliche Ammonium-Freisetzung aus Vermiculit, welches als Substrat für den Gefäßversuch genutzt wurde, wird von BODDEY et al. (2000) hingewiesen. Ferner stellt das Entweichen von Ammoniak aus den Blättern eine mögliche Fehlerquelle bei der Ermittlung des symbiotisch fixierten Stickstoffs dar.

Der im Kulturversuch ermittelte B-Wert von -1,6 ‰ gilt für die heimischen Leguminosenarten in Symbiose mit standortangepassten Rhizobien unter den spezifischen Versuchsbedingungen. Dennoch war er für die meisten untersuchten Wiesen nicht geeignet, um die Berechnungen der N-Fixierungsleistung durchzuführen. Auf die Bedeutsamkeit, einen geeigneten B-Wert für die Berechnung der symbiotisch fixierten N-Menge zu nutzen, wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

6.3.2 Einflüsse auf die Berechnung der fixierten N-Menge durch die B-Werte und durch geringe $\delta^{15}\text{N}$ -Differenzen

Mathematisch und physiologisch gültige Ndfa-Werte (0 bis 100 %) lassen sich nur erreichen, wenn die nach dem Zwei-Quellen-Modell beschriebenen Bedingungen vorliegen (siehe Kap. 6.2.2). Die Abbildungen 23 a und b verdeutlichen graphisch die zwei grundsätzlich möglichen Fälle für a) ^{15}N -abgereicherte Böden ($\delta^{15}\text{N}$ des pflanzenverfügbaren N < 0 ‰) und b) ^{15}N -angereicherte Böden ($\delta^{15}\text{N}$ des pflanzenverfügbaren N > 0 ‰). Der B-Wert liegt, wie in der Mehrzahl der veröffentlichten Untersuchungen mit Grünlandpflanzen, im negativen Bereich. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Referenzpflanzen spiegeln jeweils die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des pflanzenverfügbaren Stickstoffs im Boden der untersuchten Fläche wieder.

Es gilt nun für gültige Ndfa-Werte im Fall a): $\delta^{15}\text{N}$ der Referenzpflanze $< \delta^{15}\text{N}$ der Freiland-Leguminose $< \text{B-Wert}$. Hingegen gilt für Fall b): $\text{B-Wert} < \delta^{15}\text{N}$ der Freiland-Leguminose $< \delta^{15}\text{N}$ der Referenzpflanze. Als Nebenaspekt ist zu beachten, dass der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze einen gewissen Abstand zu 0 ‰ sowie zum B-Wert aufweisen sollte, da sonst die mathematischen und physiologischen Grundvoraussetzungen der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode nicht erfüllt sind.

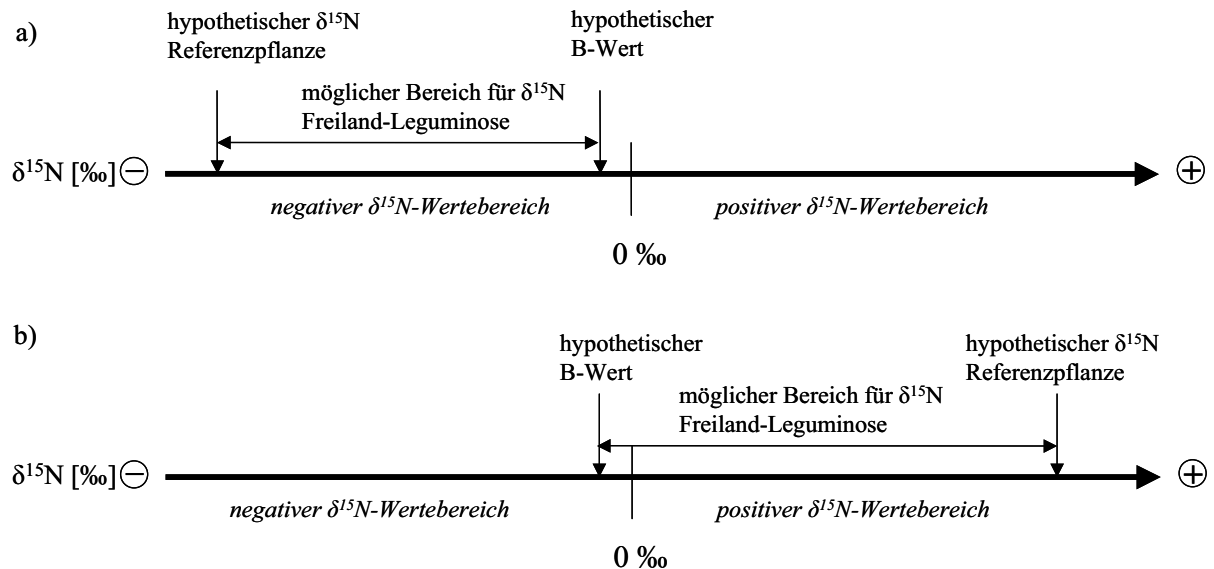


Abb. 23 a und b: Nach dem Modell der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode postulierte Lage der verschiedenen pflanzlichen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte. a) Boden-N sei ^{15}N -abgereichert gegenüber Luft-N b) Boden-N sei ^{15}N -angereichert gegenüber Luft-N.

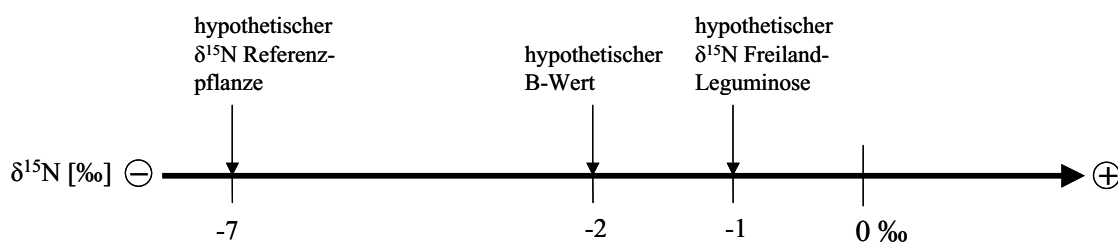
Je geringer die Differenz zwischen dem B-Wert und dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose ist, desto mehr Luft-N hat die Freilandpflanze fixiert. Die Referenzpflanze enthält normalerweise keinen symbiotisch gebundenen Stickstoff. Liegt der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose nahe dem Wert der Referenzpflanze, hat sie wenig Stickstoff fixiert.

In der vorliegenden Arbeit ergab sich bei Anwendung des im separaten Gefäßversuch ermittelten B-Wertes ein ungünstiges Ergebnismuster hinsichtlich der N-Isotopensignaturen der Referenzpflanzen, der Freiland-Leguminosen sowie der Leguminosen aus dem Kulturversuch. Dies führte bei der vorschriftsmäßigen Berechnung anhand der Formel (2) (Kap. 2.4.1.1) zu einem symbiotisch fixierten N-Anteil (Ndfa), der die Grenzwerte (0 % und 100 %) unter- oder überschritt.

Die meisten der im Freiland bestimmten $\delta^{15}\text{N}$ -Werte des Pflanzenmaterials lagen im negativen Bereich ($\delta^{15}\text{N} < 0$ ‰), so dass eine ^{15}N -Abreicherung des Pflanzenmaterials gegenüber Luftstickstoff vorlag. Dieses Ergebnis wurde bisher seltener beobachtet als der umgekehrte Fall (positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte). Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Referenzpflanzen (*Plantago lanceolata* bzw. die Kräuter- und Gräserfraktion) waren überwiegend kleiner als die der Leguminosen von den Untersuchungsflächen. Die Leguminosen aus N-freier Kultivierung im

Gewächshaus zeigten bis auf wenige Ausnahmen geringere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als die Leguminosen, die im Freiland gesammelt wurden (siehe Tab. 17 und Anhang, Tab. A10 und A13), so dass sich eine Reihenfolge $\delta^{15}\text{N}$ Referenzpflanze < $\delta^{15}\text{N}$ Kulturversuchs-Leguminose (B-Wert) < $\delta^{15}\text{N}$ Freiland-Leguminose ergab. Diese Kombination entspricht nicht dem in Abbildung 23 a dargestellten Fall, da der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose nicht zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze und dem B-Wert liegt.

Anteile über 100 % Ndfa sowie unter 0 % Ndfa sind in der Realität nicht möglich. In der mathematisch abstrakten Berechnungsformel für % Ndfa (Kap. 2.4.1.1 Gleichung 2) ist dies jedoch sehr wohl möglich. Folgende zwei Berechnungsbeispiele zeigen, welche Werte für die Terme der Gleichung entstehen können und wie diese zu unerwünschten Ergebnissen führen (Ndfa > 100 %; Ndfa < 0 %). Die Werte sind hypothetisch, die Lage der $\delta^{15}\text{N}$ -Werte entspricht jedoch den in der Arbeit erhaltenen Ergebnissen.

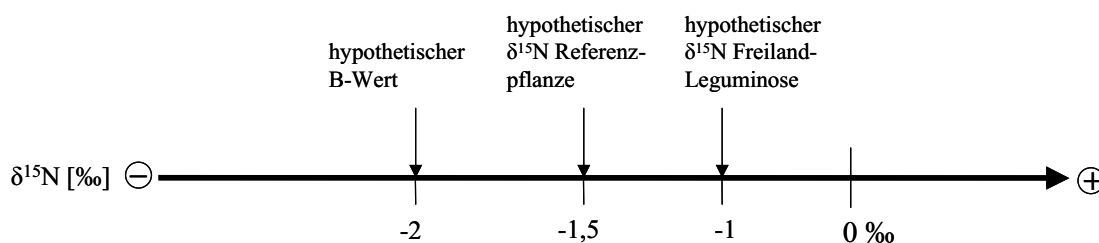


$$\text{Ndfa} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Leg}}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{B}}) * 100$$

$$\text{Ndfa} = (-7 - (-1)) / (-7 - (-2)) = (-6) / (-5) * 100 = 120 \%$$

Abb. 24: Berechnungsbeispiel 1: Ndfa > 100 %; Die Wertekombination entspricht nicht dem Idealfall, da der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose nicht zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze und dem B-Wert liegt.

Im Berechnungsbeispiel 1 (Abb. 24) ist der Betrag im Zähler des Quotienten größer als der Betrag im Nenner. Der Anteil fixierten Stickstoffs (Ndfa) würde folglich den Gesamt-Stickstoffgehalt (100 %) in der Leguminosenmasse übersteigen.



$$\text{Ndfa} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{Leg}}) / (\delta^{15}\text{N}_{\text{Ref}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{B}}) * 100$$

$$\text{Ndfa} = (-1,5 - (-1)) / (-1,5 - (-2)) = (-0,5) / (+0,5) * 100 = -100 \%$$

Abb. 25: Berechnungsbeispiel 2: Ndfa < 0 %; Die Wertekombination entspricht nicht dem Idealfall, da der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose nicht zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze und dem B-Wert liegt.

Im Berechnungsbeispiel 2 (Abb. 25) ist der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Kulturversuchs-Leguminose (B-Wert) kleiner als der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze. Dieser wiederum ist kleiner als der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose. Die Terme im Zähler und im Nenner des Quotienten erhalten hierdurch unterschiedliche Vorzeichen. Dies führt generell zu unrealistischen Ergebnissen kleiner 0 % Ndfa.

Nach HÖGBERG (1997) sollte die Differenz zwischen Referenzpflanze und fixiertem Stickstoff (B-Wert) mindestens 5 ‰ betragen, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Der Autor warnt vor einer Quantifizierung der fixierten N-Menge, wenn die Differenz zu gering ist. PEOPLES et al. (2002) dagegen berichten von vertrauenswürdigen Ergebnissen bei Unterschieden von ca. 2 ‰. Mit modernen Massenspektrometern ist eine Präzision der $\delta^{15}\text{N}$ -Messung mit maximalen Fehlern von 0,1–0,2 ‰ zu erreichen. Bei Differenzen von weniger als einer $\delta^{15}\text{N}$ -Einheit (1 ‰) zwischen Referenzpflanzen und B-Wert sollten die Daten jedoch mit Vorsicht verwendet werden (PEOPLES et al. 2002). Die für eine exakte Berechnung geforderte Differenz von größer 5 ‰ zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze und dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des fixierten Stickstoffs würde bei den gezeigten Beispielen dennoch nicht automatisch zu einem gültigen Ergebnis führen.

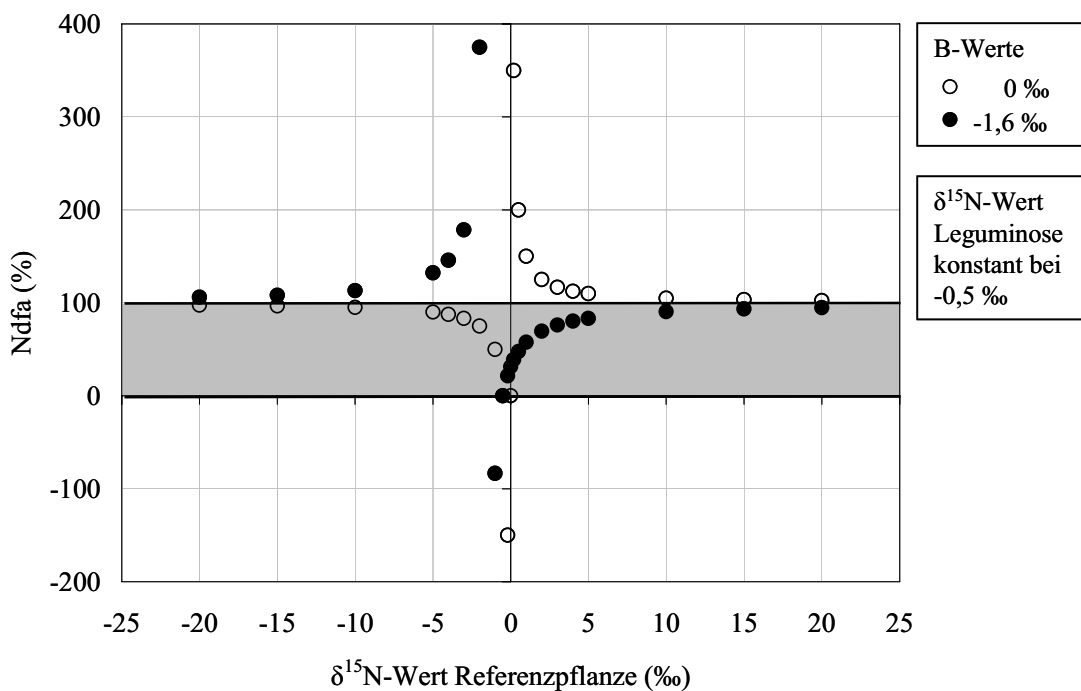


Abb. 26: Höhe der symbiotisch fixierten N-Anteile (Ndfa) bei einem gegebenen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Leguminose von -0,5 ‰, einem gegebenem B-Wert von -1,6 ‰ (geschlossene Symbole) bzw. 0 ‰ (offene Symbole) und hypothetischen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Referenzpflanze von -20 bis +20 ‰. Der Bereich für einen realistischen Ndfa-Anteil liegt zwischen 0 und 100 %.

Die Abbildung 26 soll verdeutlichen, wie bei einem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose in Höhe von -0,5 ‰ und einem B-Wert von -1,6 bzw. 0 ‰ der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze liegen müsste, um gültige Ergebnisse zu erhalten. Bei einem B-Wert von -1,6 ‰ wie er in dieser Arbeit experimentell ermittelt wurde, müsste der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze größer

sein als der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freiland-Leguminose, damit der Ndfa-Anteil im realistischen Bereich liegt. Bei einem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze von kleiner $-1,6\text{‰}$ resultieren Werte unter 0‰ oder über 100‰ Ndfa. Bei einem B-Wert von 0‰ (also der Annahme, dass im Prozess der symbiotischen N_2 -Fixierung keine Isotopenfraktionierung stattgefunden hat) muss der Wert der Referenzpflanze kleiner als der Wert der Freiland-Leguminose sein, um realistische symbiotisch fixierte N-Anteile anzuzeigen. Mit einer höheren Differenz zwischen dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze und dem der Leguminose nähert sich der Ndfa-Wert der 100‰ -Grenze an. Dies würde auf eine starke Abhängigkeit der Leguminose von der N_2 -Fixierung hinweisen.

Nach HÖGBERG (1997) ist die Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode auch möglich, wenn die Referenzpflanzen negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte aufweisen. Dies gilt, wie in Abb. 26 gezeigt, jedoch nur, wenn der B-Wert richtig gewählt wird. Die Möglichkeit einer Berechnung der prozentualen Anteile Luft-Stickstoffs (‰ Ndfa) mit negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Referenzpflanzen hängt also in entscheidendem Maß von der Höhe und der Qualität des B-Wertes ab. Diese Tatsache wird von einigen Autoren als Kritikpunkt der ^{15}N -natural-abundance-Methode hervorgehoben.

LAJTHA & MARSHALL (1994) betonen, dass ein ungenauer B-Wert bei geringen Differenzen $< 10\text{‰}$ $\delta^{15}\text{N}$ zwischen fixierender und nicht-fixierender Pflanze eine bedeutende Fehlerquelle darstellt. Wenn allerdings ein Fehler von 10 bis 20‰ im Ndfa-Anteil akzeptiert wird, kann die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode auch bei geringeren Differenzen angewendet werden (siehe THIELEN-KLINGE 1997).

Negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte bei Leguminosen und Referenzpflanzen wurden von THIELEN-KLINGE (1997) für Baumleguminosen beschrieben. Der B-Wert lag in jener Untersuchung im positiven $\delta^{15}\text{N}$ -Bereich ($+0,42\text{‰}$) und die meisten Berechnungen hatten realistische Ndfa-Werte zur Folge, wenn auch die teilweise geringen δ -Differenzen unter 2‰ zwischen Referenzpflanzen und B-Wert zu relativ großen Abweichungen (etwa 20‰) im Ndfa-Wert zwischen mehreren Referenzvarianten führten. Mit einer Differenz von 3‰ $\delta^{15}\text{N}$ wurden Abweichungen von ca. 10‰ Ndfa-Anteil beobachtet. Unrealistische Ndfa-Werte ergaben sich, wenn sich der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze zwischen dem Wert der Leguminose und dem B-Wert befand. Dies ist vergleichbar mit dem oben geschilderten Beispiel 2 (Abb. 25). THIELEN-KLINGE führte daraufhin alternative Berechnungen ohne die problematische Referenzpflanze durch.

In den untersuchten Magerwiesen waren die natürlichen Unterschiede der N-Isotopenverhältnisse der Leguminosen und Nicht-Leguminosen überwiegend geringer als 5‰ (5 δ -Einheiten (5 ‰ , Kap. 5.4.3, Abb. 6). Der Einfluss des B-Wertes auf das Ergebnis der symbiotischen N_2 -Fixierung zeigte sich unter anderem darin, dass mit dem im Experiment ermittelten B-Wert $-1,6\text{‰}$ für die untersuchten Leguminosen bei der Berechnung der N_2 -Fixierung im Freiland für über 80‰ der Ernteparzellen ungültige Ndfa-Anteile resultierten. Mit dem hypothetischen B-Wert 0‰ wurden dagegen für über 87‰ der Ernteparzellen gültige Ndfa-Anteile ermittelt. Die Fläche Gusterath 2 war der einzige Fall, bei

dem in beiden Referenzvarianten mit und ohne den experimentell ermittelten B-Wert gültige Ndfa-Werte berechnet werden konnten. Aus einer recht hohen Spanne des Ndfa-Anteils in der Leguminosenmasse von 47 % (B = 0 ‰, Referenz „Kräuter + Gräser“) bis 87 % (B = -1,6 ‰, Referenz *Plantago lanceolata*) resultierte ein Ndfa-Anteil von 12 % bis 22 % im Wiesen-schnitt der Fläche Gusterath 2. Diese Werte ergaben schließlich für Gusterath 2 eine fixierte Stickstoffmenge im Bereich von 6 bis 12 kg N ha⁻¹. Der große Unterschied wurde durch die B-Werte (-1,6 ‰ bzw. 0 ‰) verursacht. Die Referenzvariante spielte nur eine untergeordnete Rolle.

Nach BODDEY et al. (2000) können der B-Wert und die Wahl der Referenzpflanze die Berechnung der symbiotisch fixierten N-Menge erheblich beeinflussen. Der B-Wert hat die größte Bedeutung, wenn der Anteil des aus der symbiotischen N₂-Fixierung stammenden Stickstoffs am Gesamt-Stickstoff des Pflanzenmaterials hoch ist. Der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanze hat den größten Einfluss auf die Berechnung des fixierten Stickstoffs (Ndfa) bei einer geringen N₂-Fixierungsleistung.

In der vorliegenden Arbeit wurde auf den ungedüngten Flächen eine mittlere bis hohe Abhängigkeit der Leguminosen von der symbiotischen N₂-Fixierung festgestellt. Hierauf weisen die dem Luft-Stickstoff ähnliche N-Isotopenzusammensetzung des Sprossmaterials der Leguminosen (Kap. 5.4) und die ermittelten Anteile fixierten Stickstoffs von 56 bis 91 % (Referenz *Plantago lanceolata*, B = 0 ‰) am Gesamtstickstoffgehalt der Leguminosen-Sprossmasse (Kap. 5.5) hin.

Der gemittelte B-Wert -1,6 ‰ wurde verwendet, da sich die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosenarten im Kulturversuch nur geringfügig unterschieden (-1,22 ‰ bis -2,44 ‰ im Sprossmaterial). Idealerweise müsste für jede Ernteparzelle ein eigener B-Wert mit gewichtetem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der vorkommenden Leguminosen aus den Kulturversuchsdaten errechnet werden. Dafür müsste aber die Leguminosenfraktion jeder Parzelle noch in die einzelnen Arten getrennt und deren Anteile einzeln bestimmt werden. Diese Vorgehensweise wäre jedoch mit einem erheblichen finanziellen und zeitlichen Mehraufwand verbunden. Es ist zudem fraglich, ob die Anwendung solcher den Leguminosen-Vorkommen angepassten B-Werten wirklich zu besseren Ergebnissen, d. h. zu einem größeren Prozentsatz gültiger Ndfa-Anteile, geführt hätte. Das Problem bei der Verwendung des im Kulturversuch unter kontrollierten Bedingungen ermittelten B-Wertes liegt vermutlich eher in der fehlenden Übertragbarkeit auf die Freilandbedingungen (OKITO et al. 2004). Die Entstehung von Werten > 100 % Ndfa wurde von SHEARER & KOHL (1993) mit der fehlenden Berücksichtigung der Isotopendiskriminierung bei der N₂-Fixierung erklärt. Die Einbeziehung der Isotopendiskriminierung wird nach Auffassung jener Autoren wichtiger, je enger der ¹⁵N-Gehalt zweier N-Quellen beieinander liegt. Es wurde allerdings nicht darauf eingegangen, inwieweit ein „ungünstig“ liegender B-Wert Ursache von negativen oder unrealistisch hohen Ndfa-Anteilen sein kann. Die Autorin der vorliegenden Arbeit teilt die Ansicht von PEOPLES et al. (2002), dass ungültige Ndfa-Werte maßgeblich durch eine unterschiedliche Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung in Kulturversuchs- und Freilandleguminosen

verursacht werden, deren Grund in unterschiedlichen ökologischen und edaphischen Faktoren zu suchen ist. Hier sind unterschiedliche Licht- und Temperaturbedingungen, das N-Angebot im Boden, die Wasserverfügbarkeit, die (fehlende) Konkurrenz durch andere Pflanzenarten, das Vorhandensein bzw. Fehlen von Bodenorganismen sowie das Pflanzenalter zu nennen.

6.3.3 Nutzung geeigneter B-Werte zur Quantifizierung der N₂-Fixierung

Da in der überwiegenden Zahl der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Plots eine Wertekonstellation wie im Berechnungsbeispiel 1 (Abb. 24) gegeben war ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Referenzpflanze}} < \delta^{15}\text{N}_B < \delta^{15}\text{N}_{\text{Leguminose}}$) wurde der Korrekturwert für die Isotopenfraktionierung = 0 ‰ gesetzt. Es wurde also vorausgesetzt, dass keine Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung der Leguminosen stattgefunden hat. In der Folge wurden bis auf sehr wenige Ausnahmen realistische Ndfa-Werte (Spannweite zwischen 0 und 100 %) ermittelt. Das Vorgehen ist meines Erachtens vertretbar, da der im Kulturversuch ermittelte B-Wert zwar im Rahmen der bisher veröffentlichten Fraktionierungsfaktoren lag, jedoch offensichtlich nicht zu den im Freiland ermittelten Isotopensignaturen der Leguminosen „passte“. Ursache sind wahrscheinlich die sehr unterschiedlichen Wachstumsbedingungen im Freiland und im Gefäßversuch.

Die genannten Schwierigkeiten hinsichtlich des B-Wertes traten auch in anderen veröffentlichten Untersuchungen auf. Einige Autoren haben keinen eigenen B-Wert im Kulturversuch ermittelt, sondern einen oder mehrere hypothetische B-Werte oder Werte anderer Autoren zur Berechnung herangezogen. Wieder andere Autoren verwendeten als B-Wert den niedrigsten bei Freilandleguminosen vorkommenden $\delta^{15}\text{N}$ -Wert.

Hypothetische B-Werte (-1, -2, 0 und +1 ‰) wurden beispielsweise von JACOT et al. (2000a) für die Berechnung des fixierten N-Anteils in der Sprossmasse von alpinen Leguminosen in artenreichem Grünland herangezogen. Da der B-Wert einen großen Einfluss auf das Ergebnis (% Ndfa) ausübt und die natürlichen Unterschiede im ^{15}N -Gehalt zwischen Fixierern und Nicht-Fixierern häufig gering sind, halten JACOT et al. die Quantifizierung der biologischen N₂-Fixierung im Grünland anhand der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode für unsicher.

CARRANCA et al. (1999) berechneten den symbiotisch fixierten N-Anteil in *Trifolium subterraneum* (im Bestand mit *Lolium perenne* und *Dactylis glomerata*) einerseits ohne B-Wert für die Isotopenfraktionierung (0 ‰), andererseits mit einem im separaten Experiment ermittelten B-Wert (-1,13 ‰). Die resultierenden fixierten N-Mengen (zwischen 32 und 51 kg N ha⁻¹ a⁻¹) beider Berechnungsvarianten unterschieden sich nicht signifikant. Leider wurden in jener Arbeit die Isotopensignaturen der Freilandpflanzen nicht genannt.

Weitere Beispiele für die Nutzung hypothetischer B-Werte und B = 0 ‰ geben die Untersuchungen von GEHRING & VLEK (2004, Wälder Zentralamazoniens), GEHRING (2003) und PEOPLES et al. (2002). Von diesen Autoren wurden ebenfalls physiologisch nicht mögliche Ndfa-Werte festgestellt.

HUSS-DANELL & CHAIA (2005) verfolgten einen anderen Weg und benutzten den niedrigsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Sprossmaterial des auf der Untersuchungsfläche wachsenden *Trifolium pratense* als B-Wert (-0,8 ‰). Sie konnten den theoretischen B-Wert von 0 ‰ nicht verwenden, da er zu unrealistischen Ndfa-Werten von > 100 % geführt hätte. Diese Vorgehensweise wurde bereits von HANSEN & VINTHER (2001) für Weißkleewiden vorgeschlagen. Ferner haben WEST et al. (2005) sowie WATZKA et al. (2006) den niedrigsten im Freiland gefundenen $\delta^{15}\text{N}$ -Wert ihrer Leguminosen als B-Wert benutzt. In der vorliegenden Arbeit machte die Verwendung des niedrigsten $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes der Freilandleguminose als B-Wert keinen Sinn, da dies zu ungültigen Ergebnissen führte. Aufgrund der Wertekonstellation ist jedoch für die meisten Versuchspartzen die Anwendung des höchsten gemessenen $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes eines Leguminosenplots je Fläche als B-Wert möglich. Dadurch würde der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Freilandleguminosen - wie von der Methode verlangt - zwischen den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten ihrer beiden N-Quellen liegen. Diese Berechnung wurde versuchsweise für die Juni-Ernte 2001 durchgeführt (B-Werte zwischen -0,6 und -0,1 ‰, Ergebnisse nicht dargestellt) und führte zu einem durchschnittlich 5 bis 10 % höheren Ndfa-Anteil in der Leguminosen-Sprossmasse als die Berechnung mit B = 0 ‰. Durch die relativ geringen Leguminosen-Massenanteile an den Gesamterträgen der Wiesen wirkte sich der Unterschied nur unwesentlich auf die insgesamt fixierte N-Menge aus. Eine bei der Berechnung mit B = 0 ‰ mögliche Unterschätzung von 10 % des fixierten N-Anteils in der Leguminosen-Sprossmasse ändert somit die Gesamtaussage einer überwiegend vom Leguminosen-Biomasseanteil bestimmten Höhe der fixierten N-Menge der Magerwiesen kaum.

MØLLER-HANSEN et al. (2002) haben zur Berechnung der fixierten N-Anteile lediglich die Klee-Proben herangezogen deren $\delta^{15}\text{N}$ -Wert zwischen dem B-Wert (-1,4 ‰) und dem $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Referenzpflanzen lag, was also nach dem Zwei-Quellen-Modell einer plausiblen Wertekonstellation entsprach. Die Referenzpflanzen wiesen bei diesen Autoren im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit höhere ^{15}N -Gehalte als die Leguminosen auf. Der Ausschluss ungültiger Ndfa-Ergebnisse aufgrund ungünstiger $\delta^{15}\text{N}$ -Wertekonstellationen war für die eigene Untersuchung nicht sinnvoll, da mit dem B-Wert -1,6 ‰ über 80 % ungültige Ndfa-Werte verzeichnet wurden. Daher wurde der hypothetische B-Wert 0 ‰ für die Berechnung gewählt.

Eine weitere Alternative zur Ermittlung des B-Wertes schlugen DOUGHTON et al. (1992) vor. Da der im Kulturversuch ermittelte B-Wert aufgrund diverser Einflussfaktoren (siehe Kap. 6.3.1) mit Unsicherheiten behaftet ist, berechneten die Autoren ihren B-Wert aus vergleichenden Ndfa-Ergebnissen der ^{15}N -Anreicherungs- und der ^{15}N -natürlichen Abundanz-Methode unter Verwendung einer Spanne von hypothetischen B-Werten. Der B-Wert, der die geringsten Abweichungen im Ndfa-Ergebnis beider Methoden hervorbrachte, wurde schließlich als der wahrscheinlichste angenommen. Da in der vorliegenden Arbeit lediglich die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode verwendet wurde, war eine derartige Ableitung eines B-Wertes nicht möglich.

6.3.4 Eignung der ausgewählten Nicht-Fixierer als Referenzpflanzen und Einfluss der Referenzpflanze auf die Schätzung der fixierten N-Menge

In den artenreichen Wiesen kamen diverse Kräuter und Gräser als Referenzpflanzen für die Berechnung der N_2 -Fixierung der Leguminosen in Betracht. Grundsätzlich können sowohl die $\delta^{15}N$ -Werte einzelner Pflanzenarten als auch die N-Isotopenzusammensetzung einer Mischung aus verschiedenen Arten als Referenzwert genutzt werden.

Die Referenzpflanzen sollten möglichst einen deutlichen Unterschied im $\delta^{15}N$ -Wert gegenüber den Leguminosen bzw. dem fixierten Stickstoff (B-Wert) aufweisen ($> 2 \text{ ‰}$), der durch die überwiegende Aufnahme bodenbürtigen Stickstoffs durch die Referenzpflanze begründet ist.

In der vorliegenden Arbeit wurde *Plantago lanceolata* als Referenzpflanze für die Berechnung der N_2 -Fixierung gewählt, da diese Art von allen untersuchten Arten auf den meisten Wiesen die größte Differenz im $\delta^{15}N$ -Wert zu den Leguminosen aufwies. Zudem zeigte *P. lanceolata* die größte Stetigkeit. Die Art war auf allen Wiesen mit mittleren Deckungsanteilen vorhanden. Allerdings war sie nicht in jedem Ernteplot präsent. Es wurde daher ein $\delta^{15}N$ -Mittelwert des in der Nähe des Erntebereiches gesammelten *Plantago lanceolata*-Sprossmaterials als Referenzwert benutzt.

Als zweite Referenzvariante wurden sämtliche Gräser und sonstige Kräuter verwendet. Somit wurden alle in unmittelbarer Nähe der Leguminosen (im Ernteplot) wachsenden Arten in dieser zweiten Berechnungsvariante berücksichtigt. Nach Ansicht von HÖGBERG (1997) ist es von Vorteil, wenn sich die potentiellen Referenzpflanzen nicht stark in ihrem $\delta^{15}N$ -Wert unterscheiden, da es sonst bei Berechnungen mit verschiedenen Referenzpflanzen zu größeren Abweichungen im Ergebnis kommt. Dieses Problem wird umgangen, wenn statt einer gepaarten Probenahme (Leguminose und eine benachbarte Referenzart) eine gruppierte Probenahme (Leguminose und mehrere benachbarte Referenzarten) durchgeführt wird (SHEARER & KOHL 1993). In artenreichem Grünland haben JACOT et al. (2000a) die $\delta^{15}N$ -Werte mehrerer Referenzpflanzen gemittelt, weil dies ihrer Meinung nach ein besseres Abbild der N-Versorgung im Wurzelraum darstellt als die N-Isotopensignatur einer einzigen nicht-fixierenden Pflanzenart. RIFFKIN et al. (1999a) benutzten ein Aliquot der auf Weiden (Victoria, Australien) gesammelten Nicht-Leguminosen zur Bildung eines Referenzwertes.

Mit Hilfe der beschriebenen Referenzvarianten wurde überprüft, welchen Einfluss verschiedene Referenzpflanzen auf die Ergebnisse der N_2 -Fixierung ausübten. Im Juni 2001 und Juni 2002 wurden im Mittel um ca. 10 % geringere Ndfa-Werte in der Referenzvariante „Kräuter + Gräser“ verglichen mit der Referenzvariante *Plantago lanceolata* erzielt. Eine Korrelationsanalyse zur Prüfung der Ergebnisse erbrachte Bestimmtheitsmaße in Höhe von 0,8 bzw. 0,6 für die Ndfa-Ergebnisse aus beiden Referenzvarianten (Kap. 5.5.4). Diese recht guten Übereinstimmungen (80 bzw. 60 %) zeigen also, dass auch bei geringen Differenzen im $\delta^{15}N$ -Wert zwischen Referenzpflanze und Leguminose – wie es bei der Variante Kräuter + Gräser der Fall war – mit dem B-Wert 0‰ brauchbare Ndfa-Ergebnisse erzielt

werden. Eine größere $\delta^{15}\text{N}$ -Differenz zwischen Leguminosen und Referenzpflanzen bringt jedoch höhere Ndfa-Werte. Weitere Berechnungen wurden nicht durchgeführt, weil die übrigen geprüften Nicht-Leguminosen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte im Bereich zwischen dem Wert von *Plantago lanceolata* und den Kräutern + Gräsern aufwiesen bzw. zu geringe Differenzen ($< 2\text{‰}$) zu den Leguminosen aufwiesen.

Die Ergebnisse zeigen, dass trotz der überwiegend geringen Differenz (1 bis 5 ‰) zwischen den $\delta^{15}\text{N}$ -Werten der Leguminosen und der Referenzpflanzen, eine Bestimmung der symbiotisch fixierten N-Menge über die ^{15}N -natürliche Abundanzmethode möglich ist. Es sollten jedoch mehrere potentielle Referenzarten geprüft werden, um mögliche Einflüsse durch unterschiedliche N-Isotopenverhältnisse verschiedener Nicht-Fixierer bewerten zu können. Zudem muss ein geeigneter Korrekturwert für die N-Isotopenfraktionierung bei der N_2 -Fixierung gewählt werden.

6.3.5 Transfer-Stickstoff

Während der Vegetationsperiode wird ein gewisser Teil des von Leguminosen gebundenen Stickstoffs über verschiedene Wege den Bestandspartnern zur Verfügung gestellt. Zusammenfassend werden diese Prozesse als N-Transfer bezeichnet (HEICHEL & HENJUM 1991, PEOPLES et al. 1995). Den größten Anteil an einem potentiellen N-Transfer hat der mikrobielle Abbau von abgestorbenen Wurzeln, Knöllchen und oberirdischen Pflanzenresten (SCHNOTZ 1995). Ferner ist eine direkte Exkretion von Stickstoff-Verbindungen in die Rhizosphäre (Rhizodeposition, SCHMIDTKE 2005) sowie ein N-Transfer über Mykorrhizapilze möglich (HAYSTEAD et al. 1988).

Über die Höhe des Stickstoffanteils, der von den Leguminosen zu den Nicht-Fixierern transferiert wurde, kann in dieser Arbeit keine Aussage getroffen werden. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode ist nicht geeignet, die Höhe des Transfer-Stickstoffs zu quantifizieren. Im Gegenteil wird als Grundannahme der Methode ein signifikanter N-Transfer ausgeschlossen (siehe Kap. 2.4.1.3). Jedoch können die teilweise deutlichen Unterschiede der N-Isotopenzusammensetzung der untersuchten Pflanzenarten Hinweise auf einen unterschiedlich hohen N-Transfer darstellen. Ferner wurden zwischen den funktionellen Gruppen der sonstigen Kräuter einerseits und der Gräser andererseits signifikante Unterschiede in der N-Isotopenzusammensetzung beobachtet.

Bei der Analyse der artspezifischen Isotopensignaturen einiger potentieller Referenzpflanzen zeigte die Grasart *Holcus lanatus* eine geringere Differenz im $\delta^{15}\text{N}$ -Wert zu den Leguminosen als die (meisten) untersuchten krautigen Pflanzen. Ein Grund kann ein stärkerer N-Transfer von Leguminosen zu Gräsern sein. Die größte $\delta^{15}\text{N}$ -Differenz wurde zwischen der krautigen Art *Plantago lanceolata* und den Leguminosen gemessen. Ähnliche Effekte der Leguminosen auf den $\delta^{15}\text{N}$ -Wert von Gräsern beobachteten SPEHN et al. (2002) sowie PATE et al. (1994). In den Untersuchungen von SPEHN et al. wurde der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert der Art *Holcus lanatus* stärker durch die Anwesenheit von Leguminosen beeinflusst als beispielsweise der $\delta^{15}\text{N}$ -Wert in Blättern von *Plantago lanceolata*. PATE et al. (1994) mutmaßten einen Transfer fixierten

Stickstoffs als Ursache für Veränderung der ^{15}N -Gehalte von in Kombination mit *Trifolium subterraneum* wachsenden Gräsern. Eine Wirkung auf die dikotylen Begleitpflanzen durch den Klee wurde in jenem Experiment nicht festgestellt. Diese Beobachtung lässt Kräuter als Vergleichspflanzen geeigneter zur Bestimmung der Fixierungsleistung von Leguminosen erscheinen als Gräser.

JACOT et al. (2005) stellten eine Änderung des $\delta^{15}\text{N}$ -Wertes von *Agrostis tenuis* durch in unmittelbarer Nähe wachsenden Hornklee (*L. corniculatus*) fest und nennen einen Transfer von fixiertem N (nach Mineralisation des Leguminosen-N) als mögliche Ursache. In jener Studie zeigten die N-Isotopensignaturen sowohl der Kräuter als auch der Gräser eine geringere Differenz zu benachbarten Leguminosen als Nicht-Fixierer, die weit entfernt von Leguminosen wuchsen.

Ein N-Transfer zwischen Leguminosen und Gräsern in den untersuchten Wiesen kann nicht ausgeschlossen werden und ist sogar recht wahrscheinlich, betrachtet man die höheren $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Gräserfraktionen in den Plots. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode ist nicht geeignet um einen derartigen Transfer zu quantifizieren, da sich der von den Leguminosen abgegebene Stickstoff mit Boden-N mischt, und der ohnehin geringe Unterschied im ^{15}N -Gehalt zwischen fixiertem N und Boden-N verwässert wird (SHEARER & KOHL 1991). Zur Bestimmung des Transfer-Stickstoffs wäre die Anwendung von ^{15}N -angereichertem Dünger besser geeignet. Jedoch müssten zu diesem Zweck Bestände ohne Leguminosen und unterschiedlich Leguminosen-reiche Bestände mit exakt gleichen Standortbedingungen verglichen werden, was aufgrund der Durchmischung der Arten in den Wiesen schwierig zu erreichen wäre.

6.3.6 Beurteilung der Eignung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode für Untersuchungen in artenreichen Wiesen

Die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (^{15}N -natural abundance method) ist nur eingeschränkt zur Quantifizierung des symbiotisch fixierten Stickstoffs in artenreichen Wiesen anwendbar. Sie ist jedoch bisher ohne echte Alternative, wenn ein Eingriff in den N-Haushalt des zu untersuchenden Ökosystems vermieden werden soll. Die einfache Differenzmethode war aufgrund der relativ geringen Leguminosenanteile nicht anwendbar. Bei dieser Methode wird die Gesamt-N-Menge im Sprossmaterial der Nicht-Fixierer von der N-Menge der Leguminosen subtrahiert und die Differenz als fixierte N-Menge betrachtet. Wie bei CARRANCA et al. (1999) beschrieben, führt ein geringer Leguminosenanteil bei Anwendung der einfachen Differenzmethode zu negativen Werten für die symbiotische N_2 -Fixierung. Weitere bekannte Methoden wie der Acetylen-Reduktionstest und die $^{15}\text{N}_2$ -Reduktionsmethode sind für großflächige Freilandexperimente ungeeignet.

Im Feldfutterbau wird eine einfache Schätzmethode eingesetzt, bei der die fixierte N-Menge aus dem Ertrag und aus von landwirtschaftlichen Beratungsstellen genannten Faustzahlen (z. B. ZEHR & KLÖBLE in KTBL 2005) abgeleitet wird. Da sich diese Faustzahlen an Untersuchungen in Intensiv-Grünland orientieren, resultiert die Anwendung dieser einfachen Schätzmethode im Magergrünland vermutlich in unrealistisch hohen fixierten N-Mengen. Die

Berechnung der N-Fixierungsrate je dt Leguminosen-Sprossmasse (abgeleitet aus Ergebnissen dieser Arbeit) hat für die untersuchten Wiesen ergeben, dass die Fixierungsraten der Magerwiesen-Leguminosen etwas geringer sind als die angegebenen Faustzahlen für Kleepflanzen im Feldfutterbau und Intensiv-Grünland (Kap. 5.5.7 Abb. 14, Kap. 6.2.4).

Die ^{15}N -Verdünnungsmethode mit einer künstlichen ^{15}N -Anreicherung durch Düngung wurde (u. a. auch aus Kostengründen) nicht angewandt. Es sollte möglichst nicht in das zu untersuchende Ökosystem eingegriffen werden, da sich empfindliche, an N-arme Standorte angepasste Arten in den Wiesen befinden und zudem einige der Flächen in Agrarförderprogramme (FUL) mit der Auflage eines Düngungsverzichts eingebunden waren. Zudem zeigt auch die ^{15}N -Anreicherungsmethode Unsicherheiten hinsichtlich einer gleichzeitigen und gleichmäßigen Aufnahme des Düngers durch die Leguminosen und potentielle Referenzpflanzen, so dass die erzielten Ergebnisse nicht unbedingt verlässlicher sind, als bei der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode. Möglicherweise wären die berechneten Ndfa-Anteile bei Anwendung der ^{15}N -Anreicherungsmethode leicht von den jetzigen Werten abgewichen. In diversen vergleichenden Untersuchungen ergaben beide ^{15}N -Methoden zwar sehr ähnliche Ergebnisse. Bei hohen Fixierungsleistungen brachte die ^{15}N -Anreicherungsmethode jedoch teilweise leicht höhere, teilweise etwas niedrigere Ergebnisse als die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode (siehe z. B. NEUENDORFF 1996, HUSS-DANELL & CHAIA 2005).

Die Ergebnisse der Untersuchungen unterstreichen also die Funktion der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode als semiquantitative Schätzmethode. In dieser Arbeit wurde ein Bereich ermittelt, der die symbiotische N_2 -Fixierungsleistung der Leguminosen in Magerwiesen hinreichend genau widerspiegelt. Auf Grund diverser Einflussfaktoren auf die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte sowie wegen des Problems verschiedener möglicher N-Quellen bei der Pflanzenernährung, sollten die Ergebnisse gleichwohl unter Vorbehalt verwendet werden (vgl. Beurteilungen der Methode bei LAJTHA & MARSHALL 1994, HANDLEY & SCRIMGEOUR 1997, HÖGBERG 1997 ROGGY et al. 1999). Die Resultate bestätigen die Eingangshypothese. Die veröffentlichten N-Fixierungsleistungen für Leguminosen im Intensiv-Grünland und Feldfutterbau gelten nicht für artenreiche Wiesen, da hier die relativ geringen Leguminosenanteile mengenbegrenzend wirken.

6.3.7 Ausblick

Zur Absicherung der Ergebnisse der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode wäre die Messung von mehr als einem Element hilfreich. SHEARER & KOHL (1993) schlagen eine gleichzeitige Messung von stabilen Stickstoff- und Sauerstoffisotopen (^{16}O und ^{18}O) vor. Damit könnte die Herkunft des Stickstoffs genauer bestimmt und das Problem der potentiell unterschiedlichen N-Quellen der Leguminosen und Referenzpflanzen näher beleuchtet werden. Um eindeutiger Resultate zu erzielen, wäre jedoch eine im Freiland leicht handhabbare Methode zur Messung der symbiotischen N_2 -Fixierung unerlässlich.

Neben der Quantifizierung der N_2 -Fixierung kann die $\delta^{15}\text{N}$ -Methode weitere Erkenntnisse liefern. Die Analysen zeigten, dass die Leguminosenarten sich bei gleichen Ernährungs-

bedingungen in ihrem ^{15}N -Gehalt unterschieden. Hieraus können bei bisher noch nicht untersuchten Leguminosen Hinweise auf die Fähigkeit zur N_2 -Fixierung gewonnen werden (HÖGBERG 1997) bzw. effizientere und weniger effiziente N-Fixierer aufgespürt werden (LAJTHA & MARSHALL 1994). So weisen beispielsweise in der vorliegenden Untersuchung die N-Isotopensignaturen der Art *Lotus corniculatus* auf eine vergleichsweise geringere Fixierungsleistung hin, während für die einjährige Pflanzenart *Trifolium dubium* ähnlich hohe fixierte N-Anteile wie für *T. pratense* und *T. repens* nachgewiesen wurden. Die höchsten symbiotisch fixierten N-Anteile wurden bei *Lathyrus linifolius* und den beiden Wickenarten beobachtet (Kap. 5.5.8). Im Hinblick auf die hohen Kosten einer mineralischen N-Düngung könnte die gezielte Auswahl von Leguminosenarten mit hoher Fixierungsleistung bei der Einsaat bzw. Nachsaat von Grünlandbeständen einen wesentlichen Vorteil bringen. Natürlich ist hierbei zu beachten, dass die Fixierungsleistung von den Standortbedingungen abhängig ist und verschiedene Leguminosenarten zudem unterschiedliche Standortansprüche besitzen.

Zum Erhalt einer vielfältigen Kulturlandschaft werden unter anderem Grünlandextensivierungsprogramme durchgeführt. Das erzielte Ergebnis der geförderten Maßnahmen sollte anhand von regelmäßigen Kartierungen des Pflanzeninventars kontrolliert werden (FRANKENBERG & RUTHSATZ 2001). Zu den Bewirtschaftungsauflagen gehört häufig ein Düngeverzicht. Ergänzend zum Vegetationsmonitoring wäre in diesen Fällen eine stichprobenartige Kontrolle der N-Isotopensignaturen ausgewählter Pflanzenarten (Nicht-Fixierer) vorstellbar, da sich eine Düngung in vielen Fällen vermutlich unmittelbar auf die N-Isotopenzusammensetzung im Pflanzenmaterial auswirkt. SCHEIDEGGER (2000) fand bei Kräutern und Gräsern von weniger intensiv bewirtschaftetem Grünland (der subalpinen und alpinen Stufe) niedrigere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als auf Intensivgrünland. Hohe $\delta^{15}\text{N}$ -Werte wurden hier mit einem hohen Stickstoffumsatz aufgrund höherer mikrobieller Aktivität infolge der intensiven Nutzung und durch Isotopenfraktionierung bei Abbauprozessen erklärt. Desgleichen unterstreicht HOEFS (2004) die mögliche Nutzung von $\delta^{15}\text{N}$ -Signaturen als Indikator für Trophiestufen. Die auf einer der untersuchten Hunsrück-Wiesen beobachtete starke Gülledüngung wirkte sich ebenfalls direkt auf den ^{15}N -Gehalt der Nicht-Fixierer aus. Eine gleichzeitige Beobachtung veränderter $\delta^{15}\text{N}$ -Werte und eine Abnahme von Magergrünland-Arten wäre ein sicheres Indiz für eine Nutzungsintensivierung auf bewirtschafteten Flächen.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit wurde mit dem Ziel durchgeführt, Kenntnisse über den Beitrag von krautigen Leguminosen zur Stickstoffversorgung des Magergrünlands im westlichen Hunsrück zu erlangen. Über die symbiotische Stickstoff-Fixierung können Leguminosen elementaren Luftstickstoff nutzen und in ihre Biozönose einbringen. Das Wissen um die Höhe der symbiotischen Stickstoff-Fixierung in extensiv genutztem Magergrünland ist wichtig für ein umweltverträgliches Management (Verhinderung von Nitratauswaschung, Dünger- und Energieeinsparung) und für den Erhalt dieses im Rückgang begriffenen Biotoptyps. Während über die Stickstoff-Fixierungsleistung von Leguminosen im Feldfutterbau und in der Intensivweidewirtschaft bereits zahlreiche Ergebnisse vorliegen, wurde halbnatürliches Grünland bezüglich der symbiotischen N_2 -Fixierung der Leguminosen bislang kaum untersucht. Vor allem für die artenreichen Wiesen auf kalkarmen Böden der Mittelgebirgslagen, die meistens eine Kombination aus zahlreichen heimischen Leguminosen enthalten, fehlen diese Informationen.

Für die Quantifizierung der fixierten N-Mengen wurde die $\delta^{15}N$ -Methode (^{15}N natural abundance method) angewandt. Sie nutzt die natürlichen Unterschiede im Vorkommen der stabilen Stickstoffisotope ^{15}N und ^{14}N im Pflanzenmaterial von Leguminosen und Nicht-Leguminosen. Die Eignung der $\delta^{15}N$ -Methode zur Anwendung in artenreichem Dauergrünland wurde zudem kritisch bewertet.

Die Studie wurde auf ein- bis zweischürigen Wiesen auf Standorten mit mittlerer Wasser- und Basenversorgung in Höhenlagen zwischen 350 und 625 m über NN im westlichen Hunsrück (Rheinland-Pfalz) durchgeführt. In den Vegetationsperioden der Jahre 2001 bis 2003 wurden die Gesamterträge der Wiesen sowie die Anteile der funktionellen Gruppen Leguminosen, Gräser und sonstigen Kräuter bestimmt. Ferner wurden ausgewählte Leguminosen und Nicht-Fixierer untersucht. Für die Quantifizierung der symbiotisch fixierten N-Mengen mittels der $\delta^{15}N$ -Methode wurden die N-Gehalte und die Anteile der stabilen Stickstoffisotope ^{14}N und ^{15}N im Sprossmaterial der funktionellen Gruppen sowie der ausgewählten Nicht-Fixierer und Leguminosen analysiert. Die Nicht-Fixierer dienen bei der $\delta^{15}N$ -Methode als Referenz für das N-Isotopenverhältnis des bodenbürtigen Stickstoffs. Anhand der Referenzpflanzen kann somit der aus dem Boden stammende N-Anteil, und durch Subtraktion dieser Größe von der Gesamt-N-Menge der aus der Luft fixierte N-Anteil in der Leguminosenmasse bestimmt werden. Zur Überprüfung der N-Isotopenfraktionierung im Prozess der symbiotischen N-Bindung (ausgedrückt als B-Wert in der Einheit ‰) wurde in einem separaten Experiment die Isotopenzusammensetzung von Leguminosenpflanzen untersucht, die auf N-freiem Nährsubstrat gewachsen waren und Stickstoff ausschließlich über die Rhizobien-Symbiose aufnehmen konnten. Der B-Wert fließt als Korrekturwert in die Berechnung des fixierten N-Anteils (N_{dfa}) der Freiland-Leguminosen ein. Edaphische Einflüsse auf die fixierten N-Mengen wurden anhand der Analyse chemischer Bodenparameter untersucht.

Für die Juni-Ernten der drei Untersuchungsjahre wurden auf den Magerwiesen Gesamterträge der oberirdischen Pflanzenmasse zwischen 18 dt TM ha⁻¹ und 54 dt TM ha⁻¹ ermittelt. Durch einen zweiten Schnitt im August 2001 wurde für die ertragreichste Fläche (Gutweiler) eine Jahresgesamterntemenge in Höhe von 65 dt TM ha⁻¹ festgestellt. Die N-Mengen in der oberirdischen Biomasse der Wiesen bewegten sich zwischen 33 und 100 kg N ha⁻¹ (Juni-Ernten). Die Abnahme der N-Mengen im Erntematerial vom Jahr 2001 bzw. 2002 zum letzten Untersuchungsjahr (2003) auf der überwiegenden Zahl der Flächen ist vermutlich auf einen Ertragsrückgang infolge der geringen Niederschläge in der Vegetationsperiode 2003 zurückzuführen. Dazu dürfte auch eine verminderte N-Mineralisation im Boden beigetragen haben.

Die funktionelle Gruppe der Leguminosen war am Aufwuchs der Wiesen mit einem Massenanteil zwischen 0,2 % und 19 % vertreten. Mit hoher Stetigkeit kamen die Kleearten *Trifolium repens* und *T. pratense*, die Wickenarten *Vicia cracca* und *V. sepium* sowie *Lotus corniculatus* vor. Geringere Stetigkeiten zeigten *Trifolium dubium* sowie auf Flächen der höheren Lagen typischerweise *Lathyrus linifolius*. Die Massenanteile der Gräser variierten im ersten Aufwuchs zwischen 16 % und 96 %. Die funktionelle Gruppe Kräuter (ohne Leguminosen) zeigte Ertragsanteile von 4 % bis 70 %. Auf der Fläche Hockweiler wurde nach Intensivierung und organischer Düngung ein signifikanter Rückgang der Leguminosen- und Kräuteranteile (auf 0,2 % und annähernd 4 %) sowie ein signifikanter Anstieg des Gräseranteils (auf 96 %) am Gesamtertrag beobachtet. Die Ermittlung der Gewichtsanteile der Leguminosen an der oberirdischen Biomasse wurde mit einer in der landwirtschaftlichen Praxis üblichen prozentualen Anteilsschätzung der Leguminosen verglichen. Es wurde eine Abweichung der Schätzung der Leguminosenanteile von den berechneten Trockenmassenanteilen zwischen 0,1 % und 11,6 % je Fläche festgestellt.

Die Höhe der symbiotisch fixierten N-Anteile (Nd_{fa}, nitrogen derived from the atmosphere) in der Leguminosensprossmasse variierte je nach Berechnungsvariante. Die Quantifizierung mit der Referenzpflanze *Plantago lanceolata* resultierte in durchschnittlich 5 bis 10 % höheren fixierten N-Anteilen als die Berechnung mit der Kombination aus Kräuter- und Gräsersprossmasse als Referenz. Die Anwendung des im Kulturversuch ermittelten B-Wertes (-1,6 ‰) zur Bestimmung des Nd_{fa}-Anteils in der Sprossmasse der Leguminosen führte zu physiologisch nicht möglichen Werten (< 0 % oder > 100 %), da er im Vergleich zu den δ¹⁵N-Werten der meisten Freiland-Leguminosen zu niedrig war. In einer zweiten Berechnungsvariante wurde daher der hypothetische B-Wert von 0 ‰ verwendet, der zu einem höheren Prozentsatz gültiger Nd_{fa}-Anteile führte. Ein B-Wert von 0 ‰ setzt das Fehlen einer N-Isotopenfraktionierung im Prozess der symbiotischen N₂-Fixierung voraus. Dieses Vorgehen erschien legitim, da die Stärke der N-Isotopenfraktionierung während der N₂-Fixierung unter den Bedingungen des Kulturversuchs und des Freilands offenbar verschieden war und somit der B-Wert nicht experimentell ermittelt werden konnte.

Die Höhe der symbiotisch fixierten N-Menge pro Fläche korrelierte eng mit dem Massenanteil der Leguminosen in den Wiesen. Für die Juni-Ernten wurden fixierte N-Mengen in Höhe von 2,5 kg N ha⁻¹ bis 14 kg N ha⁻¹ (Wiese Hockweiler nach Düngung: < 1 kg fixierter N

pro ha) im Aufwuchs der Wiesen ermittelt. Das entsprach einem Anteil von etwa 5 % bis 24 % an der Gesamtstickstoffmenge in der oberirdischen Pflanzenmasse der Wiesen.

Aus den Gesamterträgen, den Leguminosenanteilen und den fixierten N-Mengen der Juni-Ernten 2001 und 2002 wurden Fixierungsraten in Höhe von 2,0 bis 2,6 kg Nfix pro dt Leguminosen-Sprossmasse abgeleitet. Diese Fixierungsraten ermöglichen in der landwirtschaftlichen Praxis eine einfache Kalkulation der symbiotisch fixierten N-Mengen über die Gesamterntemasse und den Leguminosenanteil in artenreichen Magerwiesen. Allerdings beschränkt sich die Anwendung der erstellten Kalkulationstabellen auf Magerwiesen, die in Vegetationszusammensetzung und Standortbedingungen sowie Nutzungsweise den Untersuchungsflächen entsprechen. Die ermittelten Fixierungsraten sind geringer als die in Leitfäden für die landwirtschaftliche Praxis genannten Faustzahlen für die N₂-Fixierung der Leguminosen im Feldfutterbau und Intensivgrünland.

Hinsichtlich der N-Isotopensignaturen und der N-Gehalte wurde ein bestimmtes Muster zwischen Leguminosen und Nicht-Leguminosen beobachtet. Die Leguminosen zeigten signifikant höhere N-Gehalte im Spross- und Wurzelmaterial als die Nicht-Leguminosen. Die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Leguminosen lagen mit einzelnen Ausnahmen näher am $\delta^{15}\text{N}$ -Wert des Standards Luft-N₂ ($\delta^{15}\text{N} = 0 \text{ ‰}$) als die $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der Nicht-Leguminosen. Ein $\delta^{15}\text{N}$ -Wert nahe 0 ‰ lässt eine effiziente N₂-Fixierung vermuten. *Lotus corniculatus* bildete eine Ausnahme von diesem Muster und zeigte signifikant niedrigere $\delta^{15}\text{N}$ -Werte als die übrigen Leguminosen. Dies sowie die durchschnittlich geringeren Ndfa-Anteile im Sprossmaterial dieser Art gegenüber den anderen Leguminosen lassen *Lotus corniculatus* als weniger effizienten N₂-Fixierer in den Magerwiesen erscheinen.

Im Gegensatz zu den meisten bewirtschafteten Grünlandflächen, deren Nicht-Fixierer aufgrund ^{15}N -angereicherten Bodenstickstoffs positive $\delta^{15}\text{N}$ -Werte aufwiesen, wurde auf den Magerwiesen im Pflanzenmaterial eine ^{15}N -Abreicherung gegenüber Luft-N₂ beobachtet (negative $\delta^{15}\text{N}$ -Werte). Die negativen $\delta^{15}\text{N}$ -Werte können durch ^{14}N -Verluste bei N-Umsetzungsprozessen im Ökosystem und/oder durch die Ernährung der Pflanzen aus ^{15}N -abgereicherten N-Quellen verursacht sein.

Einschränkungen bei Anwendung der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode ergeben sich aus den teilweise geringen natürlichen Unterschieden zwischen den N-Isotopenverhältnissen der Leguminosen und Nicht-Leguminosen, aus der Schwierigkeit den Korrekturfaktor für die N-Isotopenfraktionierung im Prozess der symbiotischen N₂-Fixierung zu bestimmen sowie durch das Vorhandensein von zahlreichen Stickstoffquellen für die pflanzliche Ernährung mit zeitlich und räumlich variierenden N-Isotopenverhältnissen.

Durch die Komplexität der Stoffumsetzungen im Ökosystem Wiese und die diversen Einflussfaktoren auf den Prozess der N₂-Fixierung und die beteiligten Organismen sind Quantifizierungen der symbiotisch fixierten N-Mengen mit allen bisher geläufigen Methoden mit Unsicherheiten behaftet. Die als semi-quantitativ bezeichnete $\delta^{15}\text{N}$ -Methode bietet den

Vorteil, dass nicht durch künstliche ^{15}N -Anreicherung in den Nährstoffhaushalt empfindlicher Pflanzenbestände eingegriffen werden muss.

Ungeachtet der relativ geringen Unterschiede der Stickstoffisotopenverhältnisse in Leguminosen und Nicht-Leguminosen konnten mit der $\delta^{15}\text{N}$ -Methode hinreichend genaue Ergebnisse zur N_2 -Fixierung der Leguminosen bestimmt werden. Da der natürliche Anteil der Leguminosen in den Magerwiesen im Vergleich zu angesätem Grünland oder Feldfutterbau gering ist und die Wachstumsraten der Pflanzen durch die allgemein geringen Nährstoffmengen der Böden niedrig sind, wurden zumeist wesentlich geringere fixierte Jahres-N-Mengen festgestellt als für *Trifolium repens*, *T. pratense* und *Lotus corniculatus* in der Literatur angegeben. Für *Trifolium dubium*, *Vicia cracca*, *V. sepium* sowie *Lathyrus linifolius* wurden mit dieser Arbeit - soweit ersichtlich - erstmals quantitative Angaben zur N_2 -Fixierung geliefert.

8 Summary

The knowledge about the magnitude of symbiotically fixed nitrogen in haymeadows is important for a sustainable management (prevention of nitrate leaching, reduction of fertilizer and energy saving) and conservation of this grassland type whose surface has decreased for decades in Germany as a result of intensification and/or abandonment. Although estimations of symbiotically fixed nitrogen in legume-grass forage mixtures and intensively managed pastures are reported in the literature, N_2 fixation rates of legumes in semi-natural grasslands are largely unknown. This is in particular the case for species rich unfertile meadows on non-calcareous soils in the low mountain range. The present study focused on the contribution of legumes to the nitrogen supply of extensively managed grassland (i.e. haymeadows) in the western Hunsrück mountains (Rhineland-Palatinate, Germany).

The investigated meadows were located in an altitudinal range from 350 to 625 metres above sea level. Historically, they are cut once or twice a year. Sites were moderate in soil moisture and in supply of cations. The soils were characterized by a low supply of nitrogen and phosphorus. During three growing seasons (2001 to 2003) total biomass productivity and proportions of functional groups (legumes, grasses and herbs) were examined. The amount of symbiotically fixed nitrogen was measured using the ^{15}N natural abundance method. This technique uses differences in the natural abundance of the stable nitrogen isotopes ^{15}N and ^{14}N in the plant tissue of legumes and non-legumes. Nitrogen concentration and nitrogen isotope signatures were therefore measured in plant biomass of selected legumes as well as selected non-legumes such as herbs and grasses. Herbs and grasses also served as reference for the isotope ratio of soil derived nitrogen. Nitrogen fractionation during symbiotic nitrogen fixation was examined by a greenhouse experiment. By analyzing the nitrogen isotope composition of legumes grown solely with atmospheric N_2 , the B-value was determined. This value (in ‰) is used to improve the accuracy of the estimation of symbiotically fixed nitrogen on experimental sites. The suitability of using the ^{15}N natural abundance method in species-rich mature grassland was critically discussed. Edaphic influences on the amount of fixed nitrogen were considered by the measurement of chemical soil parameters.

Total yield at the first cut (June) was between 1.8 to 5.4 t Dry Matter (DM) ha^{-1} considering all sites and investigation years. In 2001 annual productivity was highest in Gutweiler (6.5 t DM $ha^{-1} year^{-1}$, sum of harvests in June and August). Total nitrogen in aboveground plant material of the meadows ranged from 33 to 100 kg N ha^{-1} for the June harvests. The majority of the sites showed a reduction in total yield and nitrogen amount in 2003 compared to 2001 and 2002, probably due to less rainfall and drier soil conditions in the early growing period. This might have affected nitrogen net mineralization in the soil and hence restricted plant growth.

Legume mass proportion ranged from 0.2 % to 19 % of total yield. *Trifolium repens*, *T. pratense*, *Vicia cracca*, *V. sepium* and *Lotus corniculatus* were most commonly found in the meadows. *Trifolium dubium* was less abundant, as was *Lathyrus linifolius*, a species of

grasslands in higher altitudes. Grasses showed a proportion between 16 and 96 % in the meadows in the first cut. The proportion of other herbs (without legumes) ranged from 4 % to 70 % of total yield. The fertilization with cattle manure at the site in Hockweiler resulted in a significant decrease of legume proportion (down to 0.2 %) and proportion of other herbs (down to 4 %). Grass proportion increased up to 96 % due to the fertilization. The obtained results from *measuring* mass proportions of legumes were compared with an *estimation* of legume proportion. Estimating mass proportion is less time consuming and therefore a common technique in practical farming. In the present study the estimation varied from the weighed mass proportion by 0.1 % to 11.6 % depending on the investigated site.

The proportion of atmospherically fixed N_2 (nitrogen derived from the atmosphere, Ndfa) in legume shoot material varied due to the choice of reference species and B-value for this calculation. The use of *Plantago lanceolata* as reference plant resulted in 5 to 10 % higher Ndfa in comparison with the use of a combination of herbs and grasses as reference plants. Calculation with the experimentally determined B-value (-1.6 ‰) led to physiologically impossible results ($Ndfa < 0\%$ or $> 100\%$), because the B-value was lower than the $\delta^{15}N$ value of the majority of the legumes collected in the meadows. An alternative calculation was carried out with the hypothetical B-value of 0 ‰, which represents the case of no N-isotope fractionation in the process of nitrogen fixation. This led to a higher percentage of plausible Ndfa-proportions. Carrying out Ndfa-calculations without B-value correction seemed to be legitimate as nitrogen isotope fractionation under greenhouse and outdoor conditions obviously differed.

The amount of symbiotically fixed nitrogen correlated with the mass proportion of legumes in the meadows. Mean estimates of fixed shoot N ranged from 2.5 to 14 kg N ha⁻¹ in the June harvest. This corresponds with a proportion of 5 % to 24 % of total nitrogen in aboveground plant biomass. Total yield, legume proportion and amount of fixed shoot N were used to calculate the relative efficiency of N_2 -fixation (kg N fixed per t DM). Rates of 20 to 26 kg N fixed t⁻¹ legume shoot material were calculated.

The results are useful for an easy and less time consuming estimation of the symbiotic nitrogen fixation of species rich grassland on the basis of the parameters total yield and legume proportion. Use of the calculation tables developed in this study is restricted to grassland similar to the investigated meadows. The observed mean relative efficiency of N_2 fixation of the legumes in this investigation was lower than rates given in compendia for practical agriculture, which usually refer to intensively managed pastures or leguminous forage crops.

Nitrogen isotope signatures and N contents in legumes and non-legumes showed a specific pattern. Nitrogen content in shoots and roots of legumes was higher than nitrogen content in non-legumes. The $\delta^{15}N$ values of legumes were closer to the isotope signature of atmospheric nitrogen ($\delta^{15}N = 0\%$; this value is believed to represent efficient nitrogen fixation) than the $\delta^{15}N$ values of non-legumes, with few exceptions. One of these exceptions was *Lotus corniculatus*, the only legume species that showed significantly lower $\delta^{15}N$ values in shoot

material than all other legume species. In fact, the proportion of N derived from symbiotic N₂ in *Lotus corniculatus* was on average lower than in other legumes, which led to the assumption that this species is less efficient in fixing nitrogen than the other legumes.

In contrast to the majority of published results from field studies on cultivated grassland, the shoot material of non-legumes and legumes of the extensively managed meadows investigated in this study was found to be mostly depleted in ¹⁵N compared to atmospheric N₂. Negative δ¹⁵N values could be the result of ¹⁴N losses in nitrogen cycling in the ecosystem or may be caused by plant nutrition from ¹⁵N-depleted N sources.

Use of the ¹⁵N natural abundance method in the investigated grassland is limited by i) small natural isotopic differences between legumes and non-legumes, ii) the difficulty to determine a suitable correction value for isotopic fractionation in nitrogen fixation and iii) the existence of several N-sources for plant nutrition with nitrogen isotope signatures differing in space and time.

Due to the complexity of nutrient turnover in grassland ecosystems and diverse factors influencing nitrogen fixation and the symbiotic partners, an accurate determination of nitrogen fixation in the field is still not possible with the current methods. The ¹⁵N natural abundance technique provides semi-quantitative results for N₂ fixation rates (with variances due to reference plants and B-value) with the advantage that natural (unfertilized) systems do not have to be disturbed by ¹⁵N fertilization.

Despite the small differences between nitrogen signatures in legumes and non-legumes, the ¹⁵N natural abundance method provides feasible results for nitrogen fixation in extensively managed grassland sites. Legume proportion in the investigated meadows was relatively low compared to sown pastures or legume-grass mixtures for forage production. Moreover, the growth rate of the plants is low due to the low nutrient level in soils. The amount of fixed nitrogen in the meadows was therefore lower than N₂ fixation rates of *Trifolium repens*, *T. pratense* and *Lotus corniculatus* reported in the literature. To the authors' knowledge, this is the first publication of nitrogen isotopic signatures of *Trifolium dubium*, *Vicia cracca*, *V. sepium* and *Lathyrus linifolius*.

9 Literatur

- ADAMS, M.A. & P.F. GRIERSON 2001: Stable isotopes at natural abundance in terrestrial plant ecology and ecophysiology: an update. *Plant Biology* 3, 299–310.
- AERTS, R. 2002: The role of various types of mycorrhizal fungi in nutrient cycling and plant competition. In: M.G.A. van der Heijden, I.R. Sanders (Hrsg.): *Mycorrhizal Ecology*. Ecological Studies 157, 117–133, Springer, Berlin.
- AG BODEN, AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN DER STAATLICHEN GEOLOGISCHEN DIENSTE UND DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), Hannover, 5. Aufl., 438 S. und 4. Aufl. (1996), 392 S.
- AMARGER, N., MARIOTTI, A., MARIOTTI, F., DURR, J.C., BOURGUIGNON, C. & B. LAGACHERIE 1979: Estimate of symbiotically fixed nitrogen in field grown soybeans using variations in ^{15}N natural abundance. *Plant and Soil* 52, 269–280.
- ASAI, T. 1944: Über die Mykorrhizenbildung der Leguminosen-Pflanzen. *Japanese Journal of Botany* 13: 463–486.
- BAILEY, J.S. & A.S. LAIDLAW 1999: The interactive effects of phosphorus, potassium, lime, and molybdenum on the growth and morphology of white clover (*Trifolium repens* L.) at establishment. *Grass Forage Science* 54, 69–76.
- BAREA, J.M., EL-ATRACH, F. & R. AZCON 1989: Mycorrhiza and phosphate interactions as affecting plant development, N_2 -Fixation, N-Transfer and N-Uptake from soil in legume-grass mixtures by using a ^{15}N dilution technique. *Soil Biology & Biochemistry* 21(4), 581–589.
- BEDARD-HAUGHN, A., VAN GROENINGEN, J.W. & C. VAN KESSEL 2003: Tracing ^{15}N through landscapes: potential uses and precautions. *Journal of Hydrology* 272, 175–190.
- BERTKE, E., BIEWER, S. & J. ISSELSTEIN 2003a: Ökologische Güter des Grünlands in einem ergebnisorientierten Honorierungssystem für ökologische Leistungen der Landwirtschaft. *Mitt. Arbeitsgemeinschaft Grünland und Futterbau* 5, 247–250.
- BERTKE, E., GEROWITT, B. & J. ISSELSTEIN 2003b: Regionale Grünlandtypen - Erhaltung, Herstellung und Honorierung in einem ergebnisorientierten Ansatz. *Mitt. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 393, 46–53.
- BODDEY, R.M., PEOPLES, M.B., PALMER, B. & P.J. DART 2000: Use of the ^{15}N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 57, 235–270.
- BÖHM, W. 1986: Die Stickstoff-Frage in der Landbauwissenschaft im 19. Jahrhundert. *Zeitschrift Agrargeschichte und Agrarsoziologie* 34, 31–54.
- BOLLER, B.C. & J. NÖSBERGER 1987: Symbiotically fixed nitrogen from field-grown white and red clover mixed with ryegrasses at low levels of ^{15}N -fertilization. *Plant and Soil* 104, 219–226.

- BOROWICZ, V.A. & A.H. FITTER 1990: Effects of endomycorrhizal infection, artificial herbivory, and parental cross on growth of *Lotus corniculatus* L. *Oecologia* 82, 402–407.
- BOWMAN, W.D., SCHARDT, J.C. & S.K. SCHMIDT 1996: Symbiotic N₂-fixation in alpine tundra: ecosystem input and variation in fixation rates among communities. *Oecologia* 108, 345–350.
- BRIEMLE, G. 2003: Artenreiches Grünland in Baden-Württemberg – eine Übersicht. In: R. Oppermann, H.U. Gujer (Hrsg): Artenreiches Grünland bewerten und fördern – MEKA und ÖQV in der Praxis. Ulmer, Stuttgart, 15–26.
- BURRIS, R.H. 1974: Biological nitrogen fixation, 1924-1974. *Plant Physiology* 54, 443–449.
- CARLSSON, G. & K. HUSS-DANELLE 2003: Nitrogen fixation in perennial legumes in the field. *Plant and Soil* 253, 353–372.
- CARLSSON, G., PALMBORG C. & K. HUSS-DANELLE 2006: Discrimination against ¹⁵N in three N₂-fixing *Trifolium* species as influenced by *Rhizobium* strain and plant age. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 56, 31–38.
- CARRANCA, C., DE VARENNES, A. & D.E. ROLSTON 1999: Biological nitrogen fixation estimated by ¹⁵N dilution, natural ¹⁵N abundance, and N difference techniques in a subterranean clover-grass sward under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 10, 81–89.
- CLEVELAND, C.C., TOWNSEND, A.R., SCHIMEL, D.S., FISHER, H., HOWARTH, R.W., HEDIN, L.O., PERAKIS, S.S., LATTY, E.F., VON FISHER, J.C., ELSEROAD, A. & M.F. WASSON 1999: Global patterns of terrestrial biological nitrogen (N₂) fixation in natural ecosystems. *Global Biogeochemistry Cycles* 13, 623–645.
- CREWS, T.E. 1999: The presence of nitrogen fixing legumes in terrestrial communities: Evolutionary vs ecological considerations. *Biogeochemistry* 46, 233–246.
- DEUTSCHER WETTERDIENST 1957: Klima-Atlas von Rheinland-Pfalz. Bad Kissingen, 84 S.
- DIERSCHKE, H., & G. BRIEMLE 2002: Kulturgrasland. Eugen Ulmer, Stuttgart, 239 S.
- DOUGHTON, J.A., VALLIS, I. & P.G. SAFFIGNA 1992: An indirect method for estimating ¹⁵N isotope fractionation during nitrogen fixation by a legume under field conditions. *Plant and Soil* 144, 23–29.
- EDWARDS, E.J., MCCAFFERY, S. & J.R. EVANS 2006: Phosphorus availability and elevated CO₂ affect biological nitrogen fixation and nutrient fluxes in a clover-dominated sward. *New Phytologist* 169, 157–167.
- ELLENBERG, H. 1996: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. 5. Aufl., Eugen Ulmer, Stuttgart, 1095 S.
- ELLENBERG, H., WEBER, H.E., DÜLL, R., WIRTH, V., WERNER, W., & D. PAULIßEN 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 18, 2. Aufl., Verlag Erich Goltze, Göttingen, 258 S.
- ERIKSEN, J. & H. HØGH-JENSEN 1998: Variations in the natural abundance of ¹⁵N in ryegrass/white clover shoot material as influenced by cattle grazing. *Plant and Soil* 205, 67–76.

- ESSER, G. & W. HANS 1990: Angewandte Spektralphotometrie. Anwendungsgebiet C 2.2, Dr. Lange GmbH, Düsseldorf.
- FARNHAM, D.E. & J. R. GEORGE 1993: Dinitrogen fixation and nitrogen transfer among red clover cultivars. *Canadian Journal of Plant Science* 73, 1047–1054.
- FINCK, A. 1991: Pflanzenernährung in Stichworten. 5. Aufl. Hirt in der Gebrüder Bornträger Verlagsbuchhandlung, Berlin, 200 S.
- FINLAY, R. 2005: Action and interaction in the mycorrhizal hyposphere - a re-evaluation of the role of mycorrhizas in nutrient acquisition and plant ecology. In: BassiriRad, H. (Ed.), *Nutrient Acquisition by plants. An ecological perspective. Ecological Studies* 181, 221–276, Springer, Berlin.
- FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALDÖKOLOGIE UND FORSTWIRTSCHAFT RHEINLAND-PFALZ 2005: Regionaler Waldbericht Rheinland-Pfalz 2005 der PEFC-Arbeitsgruppe, www.uni-kl.de/FVA/de/, 8.3.2006.
- FRANKENBERG, Th. & B. RUTHSATZ 2001: Vergleichende Gegenüberstellung zweier Skalen der landwirtschaftlichen Nutzungsintensität am Beispiel der Grünlandbewirtschaftung im westlichen Hunsrück. *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung* 14, 388–397.
- FRITSCH, F. (Bearb.) 2000: Sachgerechte Düngung für Acker- und Grünland, Leitfaden. – Rheinland-Pfalz, Landesanstalt für Pflanzenbau und Pflanzenschutz (Hrsg.), Mainz, 34 S.
- GEHRING, C. 2003: The role of biological nitrogen fixation in secondary and primary forests of Central Amazonia. Dissertation Universität Bonn, Ecology and Development Series 9, Cuvillier Verlag, Göttingen, 170 S.
- GEHRING, C. & P.L.G. VLEK 2004: Limitations of the ^{15}N natural abundance method for estimating biological nitrogen fixation in Amazonian forest legumes. *Basic and Applied Ecology* 5, 567–580.
- GERLACH, A. 1973: Methodische Untersuchungen zur Bestimmung der Stickstoffnetto-mineralisation. *Scripta Geobotanica*, Band 5, Verlag Erich Goltze KG, Göttingen, 115 S.
- GISI, U. 1997: Bodenökologie, 2. Aufl., Thieme, Stuttgart, 351 S.
- GLASER, B., BOL, R., AMELUNG, W., PREEDY, N. & W. ZECH 2000: Tracing slurry-derived carbon and nitrogen in a temperate grassland soil using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ natural abundance. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 36(4), 358–359.
- GRENNFELT, P. & E. THÖRNELÖF 1992: Critical loads for nitrogen. Report from a workshop held at Lokeberg, Sweden, 6-10 April 1992. Nordic Council of Ministers Report Nord 1992, 41.
- GRZEGORCZYK, S., ALBERSKI, J., & T. BERNATOWICZ 2000: Zinc, copper, manganese and iron accumulation in *Lathyrus pratensis* L., *Vicia cracca* L. and *Trifolium repens* L. *Zeszyty problemowe Postępów nauk rolniczych* 471, 711–717.
- HANDLEY, L.L. & J.A. RAVEN 1992: The use of natural abundance of nitrogen isotopes in plant physiology and ecology. *Plant, Cell and Environment* 15, 965–985.

- HANDLEY, L.L. & C.C. SCRIMGEOUR 1997: Terrestrial plant ecology and ^{15}N natural abundance: The present limits to interpretation for uncultivated systems with original data from a scottish old field. In: M. Begon, A.H. Fitter (Hrsg.): Advances in ecological research 27, 133–212.
- HANSEN, J.P. & F.P. VINTHER 2001: Spatial variability of symbiotic N_2 fixation in grass-white clover pastures estimated by the ^{15}N isotope dilution method and the natural ^{15}N . Plant and Soil 230, 257–266.
- HARTWIG, U.A. 1998: The regulation of symbiotic N_2 fixation: a conceptual model of N feedback from the ecosystem to the gene expression level: Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics 1/1, 92–120.
- HASEMANN, G. 1986: Zur Vegetation des MTB 5910 Kastellaun (Mittlerer Hunsrück). Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv 24, 313–334.
- HAYSTEAD, A., MALAJCZUK, N. & T.S. GROVE 1988: Underground transfer of nitrogen between pasture plants infected with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist 108, 417–423.
- HEICHEL, G.H. & K.I. HENJUM 1991: Dinitrogen fixation, Nitrogen Transfer, and Productivity of Forage Legume-Grass Communities. Crop Science 31, 202–208.
- HEICHEL, G.H., VANCE, C.P., BARNES, D.K. & K.I. HENJUM 1985: Dinitrogen fixation, and N and dry matter distribution during 4 year stands of birdsfoot trefoil and red clover. Crop science 25, 101–105.
- HELLSTEN, A. & K. HUSS-DANEL 2000: Interaction effects of nitrogen and phosphorus on nodulation in red clover (*Trifolium pratense* L.). Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil and Plant Science 50, 135–142.
- HERRMANN, B., JONES, S.K., FUHRER, J., FELLER, U. & A. NEFTEL 2001: N budget and NH_3 exchange of a grass/clover crop at two levels of N application. Plant and Soil 235, 243–252.
- HESTERBERG, R., BLATTER, A., FAHRNI, M., ROSSET, M., NEFTEL, A., EUGSTER, W. & H. WANNER 1996: Deposition of nitrogen-containing compounds to an extensively managed grassland in Central Switzerland. Environmental Pollution 91(1), 21–34.
- HOBBIE, E.A. & J.V. COLPAERT 2003: Nitrogen availability and colonization by mycorrhizal fungi correlate with nitrogen isotope patterns in plants. New Phytologist 157, 115–126.
- HOBBIE, E.A., MACKO S.A., SHUGART H.H. 1999: Interpretation of nitrogen isotope signatures using the NIFTE model. Oecologia 120, 405–415.
- HOEFS, J. 2004: Stable isotope geochemistry. Springer, Berlin, 244 S.
- HÖGBERG, P. 1997: Tansley review No. 95. ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. New Phytologist 137, 179–203.
- HØGH-JENSEN, H. & J.K. SCHJOERRING 1994: Measurement of biological dinitrogen fixation in grassland: Comparison of the enriched ^{15}N dilution and the natural ^{15}N abundance methods at different nitrogen application rates and defoliation frequencies. Plant and Soil 166, 153–163.

- HØGH-JENSEN, H., LOGES, R., JØRGENSEN, F.V., VINTHER, F.P. & E.S. JENSEN 2004: An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *Agricultural Systems* 82, 181–194.
- HUSS-DANEL, K. & E. CHAIA 2005: Use of different plant parts to study N₂ fixation with ¹⁵N techniques in field-grown red clover (*Trifolium pratense*). *Physiologia plantarum* 125, 21–30.
- IAEA 2001: Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition. International Atomic Energy Agency, Training Course Series No. 14, Vienna, Austria.
- IBIJBEN, J., URQUIAGA, S., ISAMILI, M., ALVES, B.J.R., BODDEY, R.M. 1996: Effect of arbuscular mycorrhizas on growth, mineral nutrition and nitrogen fixation of three varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris*). *New Phytologist* 134, 353–360.
- JACOT, K.A., LÜSCHER, A., NÖSBERGER, J. & U.A. HARTWIG 2000a: Symbiotic N₂-fixation of various legume species along an altitudinal gradient in the Swiss Alps. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 1043–1052.
- JACOT, K.A., LÜSCHER, A., NÖSBERGER, J. & U.A. HARTWIG 2000b: The relative contribution of symbiotic N₂ fixation and other nitrogen sources to grassland ecosystems along an altitudinal gradient in the Alps. *Plant and Soil* 225, 201–211.
- JACOT, K.A., LÜSCHER, A., SUTER, M., NÖSBERGER, J. & U.A. HARTWIG 2005: Significance of legumes for the distribution of plant species in grassland ecosystems at different altitudes in the Alps. *Plant Ecology* 180, 1–12.
- JAMES, E.K. & J.I. SPRENT 1999: Development of N₂-fixing nodules on the wetland legume *Lotus uliginosus* exposed to conditions of flooding. *New Phytologist* 142 (2), 219–231.
- JANSSEN, J. & W. LAATZ 2003: Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 4. Aufl. Springer, Berlin, 722 S.
- JØRGENSEN, F.V. & S.F. LEDGARD 1997: Contribution from stolons and roots to estimates of the total amount of N₂ fixed by white clover (*Trifolium repens* L.). *Annals of Botany* 80, 641–648.
- JUNG, R. 2003: Stickstoff-Fixierleistung von Luzerne (*Medicago sativa* L.), Rotklee (*Trifolium pratense* L.) und Persischem Klee (*Trifolium resupinatum* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen. Experimentelle Grundlagen und Kalkulationsverfahren zur Ermittlung der Stickstoff-Flächenbilanz. Dissertation Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften.
- KAYE, J.P. & S.C. HART 1997: Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. *Trends in Ecology & Evolution* 12(4), 139–143.
- KERLEY, S.J. & S.C. JARVIS 1999: The use of nitrogen-15 natural abundance in white clover (*Trifolium repens* L.) to determine nitrogen fixation under different management practices. *Biology and Fertility of Soils* 29, 437–440.
- KLAPP, E. 1965: Grünlandvegetation und Standort. Verlag Paul Parey, Berlin, 384 S.
- KLAPP, E. & A. STÄHLIN 1936: Standorte, Pflanzengesellschaften und Leistung des Grünlandes. Eugen Ulmer, Stuttgart, 122 S.
- KOHL, D.H. & G. SHEARER 1980: Isotopic fractionation associated with symbiotic N₂ fixation and uptake of NO₃⁻ by plants. *Plant Physiology* 66, 51–56.

- KOHL, D.H., SHEARER, G. & J.E. HARPER 1980: Estimates of N₂ Fixation based on differences in the natural abundance of ¹⁵N in nodulating and nonnodulating isolines of soybeans. *Plant Physiology* 66, 61–65.
- KÖHLER, W., SCHACHTEL, G. & P. VOLESKE 2002: *Biostatistik*. 3. Aufl., Springer, Berlin, 301 S.
- KÖNIG, V. & M. KERSCHBERGER 1996: Ermittlung der optimalen Bodenreaktion für das Dauergrünland auf Mineralböden. *VDLUFA Kongreßband 1996 Trier*, 599–602.
- LAJTHA, K. & J.D. MARSHALL 1994: Sources of variation in the stable isotopic composition of plants. In: K. LAJTHA, R.H. MICHENER (Hrsg.): *Stable isotopes in ecology and environmental Science*. Blackwell Scientific publications, Oxford, 1–21.
- LEDGARD, S.F. 1989: Nutrition, moisture, and rhizobial strain influence isotopic fractionation during N₂ Fixation in pasture legumes. *Soil Biology & Biochemistry* 21, 65–68.
- LEDGARD, S.F. 2001: Nitrogen cycling in low input legume-based agriculture, with emphasis on legume/grass pastures. *Plant and Soil* 228, 43–59.
- LEDGARD, S.F. & M.B. PEOPLES 1988: Measurement of nitrogen fixation in the field. In: WILSON, J.R. (Ed.): *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*. CAB International, Wallington, U.K., 351–367.
- LEDGARD, S.F. & K.W. STEELE 1992: Biological nitrogen fixation in mixed legume/grass pastures. *Plant and Soil* 141, 137–153.
- LEHMANN, J. & E. MEISTER 1982: Die gegenseitige Beeinflussung von Klee und Gräsern bei unterschiedlicher Stickstoffdüngung in Bezug auf Wachstum, Eiweiß-, Rohfaser- und Mineralstoffgehalt. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* 151, 24–41.
- LEIDI, E.O. & D.N. RODRIGUEZ-NAVARRO 2000: Nitrogen and phosphorus availability limit N₂ fixation in bean. *New Phytologist* 147, 337–346.
- LIPSON, D. & T. NÄSHOLM 2001: The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems. *Oecologia* 128, 305–316.
- LOGES, R. 1998: Ertrag, Futterqualität, N₂-Fixierungsleistung und Vorfruchtwert von Rotklee- und Rotklee grasbeständen. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Heft 9, 262 S.
- LÜER, B. & A. BÖHMER 2000: Vergleich zwischen Perkolation und Extraktion mit 1 M NH₄Cl-Lösung zur Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) von Böden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163, 555–557.
- MACKO, S.A. & N.E. OSTROM 1994: Pollution studies using stable isotopes. In: LAJTHA, K. & R.H. MICHENER: *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 45–62, Blackwell Scientific Publications, London.
- MALLARINO, A.P. & W.F. WEDIN 1990: Seasonal distribution of topsoil ammonium and nitrate under legume-grass and grass swards. *Plant and Soil* 124, 137–140.
- MANZ, E. 1989: Grünlandgesellschaften magerer Standorte des südwestlichen Hunsrückvorlandes im Raum Birkenfeld. *Beiträge Landespflege Rheinland-Pfalz* 12, 23–48.
- MARIOTTI, A. 1983: Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ¹⁵N abundance measurements. *Nature (London)* 303, 685–687.

- MARRIOTT, C.A. & A. HAYSTEAD 1993: Nitrogen Fixation and transfer. In: DAVIES, A., BAKER, R.D., GRANT, S.A. & A.S. LAIDLAW (Ed.): Sward Measurement Handbook. British Grassland Society 2nd Ed., 245–264.
- MARSCHNER, H. 1995: Mineral nutrition of higher plants. 2. Aufl., Academic Press, San Diego, 889 S.
- MARTIN, P. 1990: Einfluss von Mineralstoffen auf das symbiontische N₂-Bindungssystem bei Leguminosen. Kali-Briefe 20 (1), 93–110.
- MENGEL, K. 1991: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. 7. Aufl., Gustav Fischer Jena, 466 S.
- MEYNEN, E. & J. SCHMITHÜSEN 1962: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Selbstverlag, Bad Godesberg.
- MICHELSSEN, A., QUARMBY, C., SLEEP, D. & S. JONASSON 1998: Vascular plant ¹⁵N natural abundance in heath and forest tundra ecosystems is closely correlated with presence and type of mycorrhizal fungi in roots. Oecologia 115, 406–418.
- MØLLER-HANSEN, E., HØGH-JENSEN, H. & J. DJURHUUS 2002: Biological nitrogen fixation in a grazed perennial grass/clover ley and correlation with herbage and soil variables. European Journal of Agronomy 16, 309–320.
- MORTON, J.B. & J.E. YARGER 1990: Soil solution P concentrations necessary for nodulation and nitrogen fixation in mycorrhizal and non-mycorrhizal red clover (*Trifolium pratense* L.). Soil Biology & Biochemistry 22, 127–129.
- MULDER, C.P.H., JUMPPONEN, A., HÖGBERG, P. & K. HUSS-DANEL 2002: How plant diversity and legumes affect nitrogen dynamics in experimental grassland communities. Oecologia 133, 412–421.
- NEITZKE, M. 1993 : Auswirkungen von Eutrophierungsprozessen auf Halbtrockenrasen in Rheinland-Pfalz. Habilitationsschrift, Universität Trier.
- NEITZKE, M. 1998: Changes in nitrogen supply along transects from farmland to calcareous grassland. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 161, 639–646.
- NESHEIM, L., BOLLER, B.C., LEHMANN, J. & U. WALTHER 1990: The effect of nitrogen in cattle slurry and mineral fertilizers on nitrogen fixation by white clover. Grass and Forage Science 45, 91–97.
- NEUENDORFF, J. 1996: Beitrag des Weißklee (*Trifolium repens* L.) zur Ertragsbildung von Grünlandnarben unter besonderer Berücksichtigung von Methoden zur Quantifizierung seiner Stickstoff-Fixierungsleistung. Dissertation Gesamthochschule Kassel Fachbereich Landwirtschaft, Internationale Agrarentwicklung und Ökologische Umweltsicherung. 130 S.
- OKITO, A., ALVES, B.R.J., URQUIAGA, S. & R.M. BODDEY 2004: Isotopic fractionation during N₂ fixation by four tropical legumes. Soil Biology & Biochemistry 36, 1179–1190.
- OPITZ VON BOBERFELD, W. & H. LASER 1999: Einfluß von *Lotus corniculatus* auf die Nutzungselastizität bestandsprägender Gräser der Extensiv-Weiden. Pflanzenbauwissenschaften 3(2), 88–93.

- OPPERMANN, R. 2003: Grünlandextensivierung zwischen Maßnahmen- und Ergebnisorientierung. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft 393, 54–59.
- OSTLE, N.J., BOL, R., PETZKE, K.J. & S.C. JARVIS 1999: Compound specific $\delta^{15}\text{N}$ ‰ values: amino acids in grassland and arable soils. Soil Biology & Biochemistry 31, 1751–1755.
- PALMBORG, C., SCHERER-LORENZEN, M., JUMPPONEN, A., CARLSSON, G., HUSS-DANELL, K. & P. HÖGBERG 2005: Inorganic soil nitrogen under grassland plant communities of different species composition and diversity. Oikos 110, 271–282.
- PATE, J.S., UNKOVICH, M.J., ARMSTRONG, E.L. & P. SANFORD 1994: Selection of reference plants for ^{15}N natural abundance assessment of N_2 -Fixation by crop and pasture legumes in South-west Australia. Australian Journal of Agricultural Research 45, 133–147.
- PEOPLES, M.B., BODDEY, R.M. & D.F. HERRIDGE 2002: Quantification of Nitrogen Fixation. In: G.J. LEIGH (Ed.): Nitrogen Fixation at the Millennium. Elsevier Science, 357–389.
- PEOPLES, M.B., HERRIDGE, D.F. & J.K. LADHA 1995: Biological nitrogen fixation: An efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? Plant and Soil 174, 3–28.
- POPKEN, M. & W. LICHT 1998: Bodenökologische Untersuchungen an wechselfeuchten Wiesen des östlichen Hunsrücks. Mitteilungen der Pollichia 85, 105–152.
- QUIRIN, M. 2004: Nährstoffbilanzen und Energiekenngrößen konventionell, integriert und biologisch bewirtschafteter Acker- und Grünlandschläge in einem Mittelgebirgsraum (Region Trier). Dissertation Universität Trier, Trierer Bodenkundliche Schriften, Band 8, 183 S.
- REDECKER, D., VON BERSWORDT-WALLRABE, P., BECK, D.P. & D. WERNER 1997: Influence of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on stable isotopes of nitrogen in *Phaseolus vulgaris*. Biology and Fertility of Soils 24, 344–346.
- REINHARD, S. 1995: Beeinflussung von N_2 -Fixierung und Pflanzenwachstum durch arbuskuläre Mycorrhiza bei Erbse (*Pisum sativum* L.). Dissertation Universität Hohenheim, Verlag U.E. Grauer, Stuttgart.
- RIEDER, J.B. 1983: Dauergrünland. BLV-Verlagsgesellschaft mbH, München, 192 S.
- RIFFKIN, P.A., QUIGLEY, P.E., KEARNEY, G.A., CAMERON, F.J., GAULT, R.R., PEOPLES M.B. & J.E. THIES 1999a: Factors associated with biological nitrogen fixation in dairy pastures in south-western Victoria. Australian Journal Agricultural Research 50, 261–272.
- RIFFKIN, P.A., QUIGLEY, P.E., CAMERON, F.J., PEOPLES M.B. & J.E. THIES 1999b: Annual nitrogen fixation in grazed dairy pastures in south-western Victoria. Australian Journal Agricultural Research 50, 273–281.
- ROBINSON, D. 2001: $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. Trends in Ecology & Evolution 16(3), 153–162.
- ROCHON, J.J., DOYLE, C.J., GREEF, J.M., HOPKINS, A., MOLLE, G., SITZIA, M., SCHOLEFIELD, D. & C.J. SMITH 2004: Grazing legumes in Europe: a review of their status, management, benefits, research needs and future prospects. Grass and Forage Science 59, 197–214.

- ROGGY, J.C., PRÉVOST, M.F., GOURBIERE, F., CASABIANCA, H., GARBAYE, J. & A.M. DOMENACH 1999: Leaf natural ^{15}N abundance and total N concentration as potential indicators of plant N nutrition in legumes and pioneer species in a rain forest of French Guiana. *Oecologia* 120, 171–182.
- RÖMER, W. & P. LEHNE 2004: Vernachlässigte Phosphor- und Kaliumdüngung im ökologischen Landbau senkt die biologische Stickstofffixierung bei Rotklee und den Kornertrag bei nachfolgendem Hafer. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167, 106–113.
- ROSCHER, C., SCHUMACHER J., BAADE, J., WILCKE, W., GLEIXNER, G., WEISSER, W., SCHMID, B. & E.-D. SCHULZE 2004: The role of biodiversity for element cycling and trophic interactions: an experimental approach in a grassland community. *Basic and Applied Ecology* 5, 107–121.
- ROTHMALER, W. 1994: Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: Kritischer Band. Gustav Fischer Verlag, Jena, 8. Aufl., 811 S.
- RUSSELLE, M.P., ALLAN, D.L. & C.J.P. GOURLEY 1994: Direct assessment of symbiotically fixed nitrogen in the rhizosphere of alfalfa. *Plant and Soil* 159, 233–243.
- RUTZSATZ, B. 1995: Erfolgskontrolle von "Biotopsicherungsmaßnahmen" im Niedermoorgrünland eines NSG in der westpfälzischen Moorniederung bei Kaiserslautern. *Berichte der ANL, Beiheft* 12, 79–98.
- RUTHSATZ, B. 2001: Pflanzen- und Boden-Indikatoren für die Intensivierung der Landwirtschaft in Mittelgebirgen – Am Beispiel des Wirtschaftsgrünlandes einer kleinen Gemeinde bei Trier. *Archiv für Naturschutz und Landschaftspflege* 40, 289–323.
- RUTHSATZ, B., FRANKENBERG, T. & J.-W. ZOLDAN 2004: Zustand und Gefährdung von Flora und Vegetation des genutzten Grünlandes einer Mittelgebirgslandschaft im westlichen Hunsrück. *Tuexenia* 24, 277–301.
- SACH, W. 1999: Vegetation und Nährstoffdynamik unterschiedlich genutzten Grünlandes in Schleswig-Holstein. *Dissertationes Botanicae* 308, 311 S.
- SACHS, L. 1988: Statistische Methoden: Planung und Auswertung. Band 1, 6. Aufl., Springer, Berlin. 298 S.
- SADOWSKY, M.J. 2005: Soil stress factors influencing symbiotic nitrogen fixation. In: WERNER, D. & W.E. NEWTON: Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology, and the environment, 89–112, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- SCHEFFER, F. 2002: Lehrbuch der Bodenkunde - Scheffer/Schachtschabel. 15. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 593 S.
- SCHEIDEGGER, Y. 2000: Effects of land-use change on the variation of stable isotopes in mountainous grassland species. Dissertation Geographisches Institut der Universität Bern, 75 S.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. & K. STAHR 1995: Bodenkundliches Praktikum. Blackwell Wissenschafts-Verlag Berlin, Wien, 2. Aufl., 295 S.
- SCHMIDTKE, K. 1997: Einfluß von Rotklee (*Trifolium pratense* L.) in Reinsaat und Gemenge mit Poaceen auf symbiontische N_2 -Fixierung, bodenbürtige N-Aufnahme und CaCl_2 -extrahierbare N-Fraktionen im Boden. Dissertation Universität Giessen, Fachbereich Agrarwissenschaften und Umweltsicherung, Eigenverlag, 201 S.

- SCHMIDTKE, K. 2005: N-Rhizodeposition bei Leguminosen: Messgenauigkeit, Modellierung und Bedeutung für den Pflanzenbau. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 17, 387–389.
- SCHNOTZ, G. 1995: Stickstoff-Fixierungsvermögen mehrjähriger Leguminosen des Dauergrünlandes. Dissertation. Verlag U.E. Grauer, Stuttgart.
- SCHRÖDER, D. 1983: Böden des Trierer Raumes. In: Exkursion 2, Geologie, Geomorphologie und Böden des Trierer Raumes, *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 37, 159–284.
- SCHUBERT, M., LÖSCH, S. & A. MILIMONKA 2003: Leguminosen unter Bedingungen extensiver Bewirtschaftung von Auengrünland. *Ökologische Ansprüche und Quantitäten. Archives of Agronomy and Soil Science* 49, 375–392.
- SEGUIN, P., RUSSELLE, M.P., SHEAFFER, C.C., EHLKE, N.J. & P.H. GRAHAM 2000: Dinitrogen Fixation in Kura Clover and Birdsfoot Trefoil. *Agronomy Journal* 92, 1216–1220.
- SERESINHE, T., HARTWIG, U.A., KESSLER, W. & J. NÖSBERGER 1994: Symbiotic nitrogen fixation of white clover in a mixed sward is not limited by height of repeated cutting. *Journal of Agronomy and Crop Science* 172, 279–288.
- SHEARER G. & D.H. KOHL. 1986: N₂-Fixation in Field Settings: Estimations based on natural ¹⁵N abundance. *Australian Journal of Plant Physiology* 13, 699–756.
- SHEARER G. & D.H. KOHL 1989: Estimates of N₂ Fixation in Ecosystems: The need for and the basis of the ¹⁵N natural abundance method. In: P.W. RUNDEL, J.R. EHLERINGER & K.A. NAGY (Hrsg.): *Stable Isotopes in Ecological Research. Ecological Studies* 68, 342–374. Springer, New York.
- SHEARER G. & D.H. KOHL 1991: The ¹⁵N natural abundance method for measuring biological nitrogen fixation: practicalities and possibilities. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (Hrsg.): *Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies*, 103–115.
- SHEARER G. & D.H. KOHL 1993: Natural abundance of ¹⁵N: Fractional contribution of two sources to a common sink and use of isotope discrimination. In: R. KNOWLES, T.H. BLACKBURN (Hrsg.): *Nitrogen Isotope Techniques*, Kap. 4, 89–125, Academic press, San Diego, California.
- SIMMERING, D., WALDHARDT, R. & A. OTTE 2001: Syndynamik und Ökologie von Besenginsterbeständen des Lahn-Dill-Berglands unter Berücksichtigung ihrer Genese aus verschiedenen Rasengesellschaften. *Tuexenia* 21, 51–89.
- SMOLLICH, M. & U. BERNERT 1986: Beiträge zur Vegetation des östlichen Hunsrück (MTB 5911 Kisselbach). *Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv* 24, 277–312.
- SPEHN, E.M., SCHERER-LORENZEN, M., SCHMID, B., HECTOR, A., CALDEIRA, M.C., DIMITRAKOPOULOS, P.G., FINN, J.A., JUMPPONEN, A., O'DONNOVAN, G., PEREIRA, J.S., SCHULZE, E.-D., TROUMBIS, A.Y. & C. KÖRNER 2002: The role of legumes as a component of biodiversity in a cross-European study of grassland biomass nitrogen. *OIKOS* 98, 205–218.
- SPRENT, J.I. 1999: Nitrogen fixation and growth of non-crop legume species in diverse environments. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 2(2): 149–162. Urban & Fischer Verlag, Jena.

- SPRENT, J.I. 2005: Biological nitrogen fixation associated with angiosperms in terrestrial ecosystems. In: BASSIRIRAD, H. (Ed.): Nutrient Acquisition by plants. An ecological perspective. Ecological Studies 181, 89–116, Springer, Berlin.
- SPRENT, J.I. & P. SPRENT 1990: Nitrogen fixing organisms. Pure and applied aspects. Chapman and Hall, London, 256 S.
- STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ (Hrsg.) 2005: Die Landwirtschaft 2004. Mit Vergleichszahlen seit 1949. Band 391, Bad Ems.
- STEELE, K.W. 1983: Quantitative measurements of nitrogen turnover in pasture systems with particular reference to the role of ^{15}N . In: Nuclear techniques in improving pasture management. 17–35. IAEA, Wien.
- THIELEN-KLINGE, A. 1997: Rolle der biologischen N_2 -Fixierung von Baumleguminosen im östlichen Amazonasgebiet, Brasilien. Anwendung der ^{15}N natural abundance Methode. Dissertation, Univ. Göttingen. Dokumentenserver SUB Göttingen.
- THOMPSON, K. & MASKELL L. 2005: The impact of atmospheric nitrogen deposition on British grasslands. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 35, 50.
- THORMANN, A. & K. KIEHL 2003: Einfluss der Nährstoffverfügbarkeit und der Anwesenheit von Leguminosen auf die Konkurrenzverhältnisse zwischen Magerrasenarten. In: PFADENHAUER, J. & K. KIEHL.: Renaturierung von Kalkmagerrasen. Zehn Jahre „Sicherung und Entwicklung der Heiden im Norden von München“ – ein E+E-Vorhaben des Bundesamtes für Naturschutz. Angewandte Landschaftsökologie 55, 119–133.
- TOZER, W.C., HACKELL, D., MIERS, D.B. & W.B. SILVESTER 2005: Extreme isotopic depletion of nitrogen in New Zealand lithophytes and epiphytes; the result of diffusive uptake of atmospheric ammonia? Oecologia 144, 628–635.
- TRANNIN, W.S., URQUIAGA, S., GUERRA, G., IBIJBIJEN, J. & G. CADISCH 2000: Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture. Biology and Fertility of Soils 32, 441–448.
- TREMP, H. 2005: Aufnahme und Analyse vegetationsökologischer Daten. Ulmer, Stuttgart, 141 S.
- TSIALTAS, J.T., KASSIOUMI, M. & D.S. VERESOGLOU 2004: Seasonal changes of N_2 -fixation by *Trifolium repens* in an upland Mediterranean grassland. European Journal of Agronomy 21(3), 335–346.
- UNKOVICH, M. & J.S. PATE 2001: Assessing N_2 fixation in annual legumes using ^{15}N natural abundance. In: M. UNKOVICH, J. PATE, A. MC NEILL, J.D. GIBBS (Hrsg.): Stable Isotope Techniques in the Study of Biological Processes and Functioning of Ecosystems. Current Plant Science and Biotechnology in Agriculture, Band 40, 103–118.
- VAN DER EERDEN, L.J.M., JÄGER H.-J. & A. FANGMEIER 2001: Wirkungen von Stickstoffdepositionen auf terrestrische Ökosysteme. In: GUDERIAN, R. (Hrsg.): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie. Band 2B, Terrestrische Ökosysteme, Wirkungen auf Pflanzen, Diagnose und Überwachung, Wirkungen auf Tiere. Springer, Berlin, 40–62.
- VAN GROENIGEN, K.J., SIX, J., HARRIS, D. BLUM, H. & C. VAN KESSEL 2003: Soil ^{13}C – ^{15}N dynamics in an N_2 -fixing clover system under long-term exposure to elevated atmospheric CO_2 . Global Change Biology 9, 1751–1762.

- VDLUFA (Hrsg.) 1991: VDLUFA Methodenbuch Band I, Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag Darmstadt, 4. Auflage.
- VIERHEILIG, H., COUGHLAN, A.P., WYSS, U. & Y. PICHE´ 1998: Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Applied and environmental microbiology* 64/12, 5004–5007.
- VITOUSEK, P.M., K. CASSMAN, C. CLEVELAND, T. CREWS, C.B. FIELD, N.B. GRIMM, R.W. HOWARTH, R. MARINO, L. MARTINELLI, E.B. RASTETTER & J.I. SPRENT 2002: Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. *Biogeochemistry* 57/58, 1–45.
- VOGEL, A. 1981: Klimabedingungen und Stickstoff-Versorgung von Wiesengesellschaften verschiedener Höhenstufen des Westharzes. *Dissertationes Botanicae* 60, Cramer, Vaduz.
- VOIGTLÄNDER, G. & N. VOSS 1979: Methoden der Grünlanduntersuchung und -bewertung. Eugen Ulmer, Stuttgart, 207 S.
- WAREMBOURG, F.R. 1993: Nitrogen Fixation in Soil and Plant Systems. In: KNOWLES, R. & T.H. BLACKBURN: Nitrogen Isotopes Techniques. Academic Press Inc. 127–156.
- WAREMBOURG, F.R., LAFONT, F. & M.P. FERNANDEZ 1997: Economy of Symbiotically Fixed Nitrogen Red Clover (*Trifolium pratense* L.). *Annals of Botany* 80, 515–523.
- WATZKA, M., BUCHGRABER, K. & W. WANEK 2006: Natural ^{15}N abundance of plants and soils under different management practices in a montane grassland. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 1564–1576.
- WEISSBACH, F. 1995: Über die Schätzung des Beitrags der symbiontischen N_2 -Fixierung durch Weißklee zur Stickstoffbilanz von Grünlandflächen. *Landbauforschung Völkenrode* 45(2), 67–74.
- WERNER, D. 1992: Symbiosis of plants and microbes, Chapman & Hall, London.
- WEST, J.B., HILLERISLAMBERS, J., LEE, T.D., HOBBIE, S.E. & P.B. REICH 2005: Legume species identity and soil nitrogen supply determine symbiotic nitrogen-fixation responses to elevated atmospheric $[\text{CO}_2]$. *New Phytologist* 167, 523–530.
- WILMANN, O. 1998: Ökologische Pflanzensoziologie. Quelle & Meyer, Wiesbaden, 6. Aufl. 405 S.
- WINKLER, J.B. & M. HERBST 2004: Do plants of a semi-natural grassland community benefit from long-term CO_2 enrichment? *Basic and Applied Ecology* 5, 131–143.
- YONEYAMA, T., FUJITA, K., YOSHIDA, T., MATSUMOTO, T. & I. KAMBAYASHI 1986: Variation in natural abundance of ^{15}N among plant parts and in $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ fractionation during N_2 fixation in the legume rhizobia symbiotic system. *Plant Cell Physiology* 27, 791–799.
- ZEHR M. & U. KLÖBLE 2005: Stickstoffbindung durch Leguminosen. In: KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT e.V. (KTBL) (Hrsg.): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 13. Aufl., Kap VI 4.3, 789–790.

Anhang

Verzeichnis der Tabellen

Tab. A1: Im Kulturversuch angezogene Leguminosen und stickstofffreie Radicin® - Produkte (Bodenhilfsstoffe) der Firma Jost GmbH (Iserlohn) zur Animpfung der Versuchspflanzen mit Rhizobien (Knöllchenbakterien).	150
Tab. A2: Zusammensetzung der stickstofffreien Nährlösung für die Anzucht von Leguminosen zur Bestimmung der N-Isotopenfraktionierung bei der N ₂ -Fixierung.	150
Tab. A3: Erträge der Augusternte 2001 und Jahressummen für den Juni- und August-Schnitt des Jahres 2001 auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen.	150
Tab. A4: Oberirdische Biomasse der funktionellen Gruppen (Gräser, sonstige Kräuter, Leguminosen) als Mittelwert pro Fläche und Erntetermin.	151
Tab. A5: Prozentuale N-Gehalte in der oberirdischen Biomasse der funktionellen Gruppen (Gräser, sonstige Kräuter, Leguminosen) als Mittelwert pro Fläche und Erntetermin.	152
Tab. A6: Stickstoffmengen im August-Schnitt 2001 und Jahressummen der N-Mengen aus beiden Ernten (Juni und August) im Jahr 2001, sechs Hauptuntersuchungsflächen.	153
Tab. A7: Statistischer Vergleich der Leguminosenanteile an der Gesamtstickstoffmenge im Aufwuchs der Hauptuntersuchungsflächen, Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 2001 bis 2003, Ernten im Juni.	153
Tab. A8: Stickstoffanteile der funktionellen Gruppen an der Gesamtstickstoffmenge des Ernteguts im August 2001.	153
Tab. A9: Statistischer Vergleich der Stickstoffanteile der Leguminosen an der Gesamtstickstoffmenge im Erntegut der Nebenuntersuchungsflächen, Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 2002 und 2003, Ernten im Juni.	154
Tab. A10: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (‰) der untersuchten Leguminosen und Nicht-Leguminosen, 2001 bis 2003, Werte der Mischproben und Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung.	154
Tab. A11: Trockenmassen der in N-freiem Substrat kultivierten Leguminosenarten bei Versuchsende.	157
Tab. A12: Prozentuale N-Gehalte der untersuchten Leguminosen und Nicht-Leguminosen der Jahre 2001 bis 2003.	158

Tab. A13: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen Kräuter, Gräser und Leguminosen. Erntetermine Juni 2001 und Juni 2002, Werte für jede Ernteparzelle.	161
Tab. A14: Nährstoffgehalte in der Sprossmasse verschiedener Leguminosen und Nicht-Leguminosen an drei Ernteterminen (Juni und August 2001, Juni 2002).....	167
Tab. A15: Prozentuale N-Gehalte in der oberirdischen Biomasse der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser), Erntetermine Juni 2001 und Juni 2002, Werte für jede Ernteparzelle.	175
Tab. A16: Jahressumme der symbiotisch fixierten N-Menge der sechs Hauptuntersuchungsflächen bei zwei Schnitt-Terminen (Juni und August 2001).....	178
Tab. A17: Weitere Bodeneigenschaften der sechs Hauptuntersuchungsflächen.	178

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. A1: Massenanteile der funktionellen Gruppen an der August-Ernte und Mittelwerte aus beiden Ernten 2001 (Juni + August) auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen.	179
Abb. A2: Regression der N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Mengen der Haupt- und Nebenuntersuchungsflächen im Juni der Jahre 2001 und 2002 (berechnet mit Kräuter + Gräser als Referenz, ohne B-Wert).....	179
Abb. A3: Korrelation der pH-Werte mit den Aluminiumkonzentrationen der Wiesenböden (16 Standorte) in den Profiltiefen 0–5 und 5–10 cm.	180
Abb. A4: Korrelation der Calcium- mit den Aluminiumkonzentration der Wiesenböden (16 Standorte) in den Profiltiefen 0–5 und 5–10 cm.	180
Abb. A5 a und b: Vergleich der Ergebnisse der Leguminosen-Anteilsschätzung im Juni 2001 (linke Graphik) und im August 2001 (rechte Graphik) mit der Anteils-ermittlung über die Trockenmassenbestimmung.....	181

Tab. A1: Im Kulturversuch angezogene Leguminosen und stickstofffreie Radicin[®]-Produkte (Bodenhilfsstoffe) der Firma Jost GmbH (Iserlohn) zur Animpfung der Versuchspflanzen mit Rhizobien (Knöllchenbakterien).

Beimpfte Leguminosen	Rhizobien-Produkt
<i>Trifolium</i> -Arten	Radicin [®] N° 1
<i>Lotus corniculatus</i>	Radicin [®] N° 3
<i>Vicia</i> -Arten und <i>Lathyrus linifolius</i>	Radicin [®] N° 4

Tab. A2: Zusammensetzung der stickstofffreien Nährlösung für die Anzucht von Leguminosen zur Bestimmung der N-Isotopenfraktionierung bei der N₂-Fixierung.

fünf Stammlösungen: (100 fach konzentriert)	in je 1 Liter H ₂ O dest. gelöst	kombinierte Stammlösung der Spurenelemente: (1000 fach konzentriert)	in 1 Liter H ₂ O dest. gelöst
K ₂ SO ₄	27,9 g	H ₃ BO ₃	1,43 g
MgSO ₄ *7H ₂ O	49,3 g	MnSO ₄ *H ₂ O	1,02 g
KH ₂ PO ₄ + K ₂ HPO ₄	2,3 g + 14,5 g	ZnSO ₄ *7H ₂ O	0,22 g
CaCl ₂ *2H ₂ O	37,1 g	CuSO ₄ *5H ₂ O	0,08 g
FeSO ₄ *7H ₂ O	1,24 g	Na ₂ MoO ₄ *2H ₂ O	0,05 g
		CoCl ₂ *6H ₂ O	0,10 g

Tab. A3: Erträge der Augusternte 2001 und Jahressummen für den Juni- und August-Schnitt des Jahres 2001 auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen.

Fläche	Trockenmasse (dt ha ⁻¹)	
	2. Schnitt ¹⁾ 2001 (August)	Jahressumme ²⁾ 2001
Oberremmeler Berg	8,3	38,8
Waldweiler	8,4	35,8
Pellingen 2	8,9	35,7
Pellingen 1	9,9	39,4
Gutweiler	11,1	64,8
Hockweiler	13,1	51,2

¹⁾ jeweils 8 Ernteparzellen, Schnittfläche 0,25 m²

²⁾ Summe aus Juni- und August-Ernte

Tab. A4: Oberirdische Biomasse der funktionellen Gruppen (Gräser, sonstige Kräuter, Leguminosen) als Mittelwert pro Fläche und Erntetermin.

Hauptuntersuchungsflächen		oberirdische Biomasse (dt ha ⁻¹)		
		Gräser	Kräuter	Leguminosen
Gutweiler	2001 (Juni)	43,7	8,3	1,8
	2002 (Juni)	24,2	9,1	2,1
	2003 (Juni)	13,9	9,4	4,0
	2001 (August)	5,6	3,2	2,3
Oberemmeler Berg	2001 (Juni)	18,9	10,1	1,6
	2002 (Juni)	16,9	9,8	1,4
	2003 (Juni)	8,7	8,2	1,3
	2001 (August)	3,1	4,2	1,0
Pellingen 2	2001 (Juni)	19,8	5,7	1,4
	2002 (Juni)	18,8	6,7	1,7
	2003 (Juni)	12,3	8,0	1,7
	2001 (August)	3,6	3,7	1,6
Waldweiler	2001 (Juni)	16,3	6,3	4,8
	2002 (Juni)	12,7	5,1	1,7
	2003 (Juni)	12,2	6,4	2,1
	2001 (August)	3,2	2,3	2,9
Pellingen 1	2001 (Juni)	15,0	12,5	2,0
	2002 (Juni)	12,4	10,0	1,9
	2003 (Juni)	10,7	9,7	1,0
	2001 (August)	2,1	6,6	1,2
Hockweiler	2001 (Juni)	23,9	10,6	3,6
	2002 (Juni)	38,4	7,0	1,4
	2003 (Juni)	43,3	1,6	0,1
	2001 (August)	5,3	5,2	2,5
Nebenuntersuchungsflächen		oberirdische Biomasse (dt ha ⁻¹)		
		Gräser	Kräuter	Leguminosen
Gusterath 1	2002 (Juni)	13,7	8,5	3,9
	2003 (Juni)	9,0	7,0	3,8
Gusterath 2	2002 (Juni)	7,6	16,2	4,2
	2003 (Juni)	2,7	12,2	2,6
Pellingen 5	2002 (Juni)	16,6	6,0	1,6
	2003 (Juni)	15,6	5,3	3,6
Gusterath 3	2002 (Juni)	13,9	16,0	1,5
	2003 (Juni)	6,6	10,0	1,3
Züsch 2	2002 (Juni)	23,7	5,6	1,7
	2003 (Juni)	15,7	5,6	1,1
Züsch 1	2002 (Juni)	28,2	3,4	1,4
Muhl 1	2002 (Juni)	20,5	8,1	3,7
Muhl 2	2002 (Juni)	23,9	6,5	5,3
Pellingen 3	2002 (Juni)	22,8	9,5	3,6
Pellingen 4	2002 (Juni)	21,7	8,6	2,0

Tab. A5: Prozentuale N-Gehalte in der oberirdischen Biomasse der funktionellen Gruppen (Gräser, sonstige Kräuter, Leguminosen) als Mittelwert pro Fläche und Erntetermin.

Hauptuntersuchungsflächen		N-Gehalte (%) in der oberirdischen Biomasse		
		Gräser	Kräuter	Leguminosen
Gutweiler	2001 (Juni)	1,3	1,6	3,2
	2002 (Juni)	1,2	1,4	3,2
	2003 (Juni)	1,4	1,6	3,5
	2001 (August)	2,5	2,2	4,0
Oberemmeler Berg	2001 (Juni)	1,6	1,9	3,8
	2002 (Juni)	1,4	1,6	3,5
	2003 (Juni)	1,6	1,7	3,5
	2001 (August)	2,1	2,0	3,8
Pellingen 2	2001 (Juni)	1,5	1,8	3,1
	2002 (Juni)	1,5	1,6	3,3
	2003 (Juni)	1,5	1,5	3,2
	2001 (August)	2,2	2,4	3,4
Waldweiler	2001 (Juni)	1,7	2,1	3,6
	2002 (Juni)	1,9	2,0	3,6
	2003 (Juni)	2,1	2,0	3,8
	2001 (August)	2,8	2,8	3,9
Pellingen 1	2001 (Juni)	1,6	1,9	3,3
	2002 (Juni)	1,4	1,4	3,1
	2003 (Juni)	1,5	1,5	2,9
	2001 (August)	2,2	2,2	3,3
Hockweiler	2001 (Juni)	1,2	1,6	2,8
	2002 (Juni)	2,3	2,3	3,5
	2003 (Juni)	2,0	2,6	4,3
	2001 (August)	2,3	2,0	3,6
Nebenuntersuchungsflächen		N-Gehalte (%) in der oberirdischen Biomasse		
		Gräser	Kräuter	Leguminosen
Gusterath 1	2002 (Juni)	1,4	1,6	3,0
	2003 (Juni)	1,6	1,8	3,3
Gusterath 2	2002 (Juni)	1,5	1,7	3,2
	2003 (Juni)	1,6	1,8	3,2
Pellingen 5	2002 (Juni)	1,4	1,4	4,0
	2003 (Juni)	1,3	1,4	3,1
Gusterath 3	2002 (Juni)	1,5	1,7	3,2
	2003 (Juni)	1,6	1,8	3,4
Züsch 2	2002 (Juni)	1,6	1,8	3,2
	2003 (Juni)	1,8	1,8	3,2
Muhl 1	2002 (Juni)	2,0	2,2	3,4
Muhl 2	2002 (Juni)	2,0	2,3	3,7
Pellingen 3	2002 (Juni)	1,5	1,7	2,8
Pellingen 4	2002 (Juni)	2,0	2,0	3,2

Tab. A6: Stickstoffmengen im August-Schnitt 2001 und Jahressummen der N-Mengen aus beiden Ernten (Juni und August) im Jahr 2001, sechs Hauptuntersuchungsflächen.

Fläche	N-Menge (kg ha ⁻¹)	
	Zweiter Schnitt 2001 (August)	Jahressumme 2001
Oberemmeler Berg	18,6	72,7
Pellingen 2	21,5	63,5
Pellingen 1	23,0	75,4
Waldweiler	26,7	83,7
Gutweiler	30,3	100,2
Hockweiler	31,8	87,2

Tab. A7: Statistischer Vergleich der Leguminosenanteile an der Gesamtstickstoffmenge im Aufwuchs der Hauptuntersuchungsflächen, Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 2001 bis 2003, Ernten im Juni.

Fläche	2001	2002	2003
Waldweiler	a	a	a
Hockweiler	a	b	b
Pellingen 1	a	a	a
Oberemmeler Berg	a	a	a
Pellingen 2	a	a	a
Gutweiler	a	a	a

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Kruskal-Wallis-Test und Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung durch Pfeil gekennzeichnet)

Tab. A8: Stickstoffanteile der funktionellen Gruppen an der Gesamtstickstoffmenge des Ernteguts im August 2001.

Fläche	N-Anteil (%)		
	Leguminosen	Kräuter	Gräser
Waldweiler	43,0	23,8	33,2
Gutweiler	30,9	23,5	45,7
Hockweiler	27,7	33,2	39,0
Pellingen 2	23,4	40,2	36,4
Oberemmeler Berg	18,6	46,4	35,0
Pellingen 1	16,8	62,9	20,3

Tab. A9: Statistischer Vergleich der Stickstoffanteile der Leguminosen an der Gesamtstickstoffmenge im Erntegut der Nebenuntersuchungsflächen, Unterschiede zwischen den Versuchsjahren 2002 und 2003, Ernten im Juni.

Fläche	2002	2003
Gusterath 2 →	a	a
Gusterath 1	a	a
Pellingen 5	a	b
Gusterath 3	a	a
Züsch 2	a	a

verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, Mann-Whitney U-Test mit $P < 0,05$ (Leserichtung durch Pfeil gekennzeichnet)

Tab. A10: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte (‰) der untersuchten Leguminosen und Nicht-Leguminosen, Jahr 2001 (sechs Wiesen), Jahr 2002 (zehn Wiesen), Jahr 2003 (sieben Wiesen), jeweils eine Mischprobe aus Material von mindestens 15 Pflanzen pro Fläche, Werte der Mischproben und Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung.

2001, Juni				2001, Juni			
Art	Fläche	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross		Art	Fläche	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross	
		MW Stabw				MW Stabw	
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	-0,61	-0,64 $\pm$ 0,06	<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	-3,20	-4,14 $\pm$ 1,19
	Oberemmeler Berg	-0,60			Oberemmeler Berg	-4,01	
	Waldweiler	-0,66			Waldweiler	-2,99	
	Pellingen 1	-0,63			Pellingen 1	-5,96	
	Pellingen 2	-0,61			Pellingen 2	-5,20	
	Hockweiler	-0,76			Hockweiler	-3,49	
<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	-0,94	-1,01 $\pm$ 0,22	<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	-2,46	-2,68 $\pm$ 1,05
	Oberemmeler Berg	-0,94			Oberemmeler Berg	-2,49	
	Pellingen 1	-1,29			Pellingen 1	-3,27	
	Pellingen 2	-0,72			Pellingen 2	-3,99	
	Hockweiler	-1,14			Hockweiler	-1,18	
<i>Trifolium dubium</i>	Gutweiler	-0,81	-0,72 $\pm$ 0,10	<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	-1,40	-2,18 $\pm$ 0,68
	Pellingen 1	-0,76			Oberemmeler Berg	-3,02	
	Pellingen 2	-0,58			Pellingen 2	-2,32	
	Hockweiler	-0,75			Hockweiler	-1,99	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	-2,45	-1,99 $\pm$ 0,36	<i>Holcus lanatus</i>	Gutweiler	-1,16	-1,04 $\pm$ 1,35
	Oberemmeler Berg	-1,95			Oberemmeler Berg	-1,50	
	Pellingen 1	-2,01			Waldweiler	+1,34	
	Pellingen 2	-1,44			Pellingen 1	-2,80	
	Hockweiler	-2,08			Pellingen 2	-0,81	
<i>Lotus uliginosus</i>	Waldweiler	-0,36	-0,63 $\pm$ 0,38	<i>Rumex acetosa</i>	Hockweiler	-1,29	
	Pellingen 2	-0,90			Waldweiler	+0,26	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Oberemmeler Berg	-0,27	-0,47 $\pm$ 0,20	<i>Leontodon hispidus</i>	Waldweiler	-2,49	
	Pellingen 1	-0,52					
	Pellingen 2	-0,37					
	Waldweiler	-0,73					
	Hockweiler	-0,61					
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	-0,31	-0,43 $\pm$ 0,15				
	Oberemmeler Berg	-0,20					
	Waldweiler	-0,53					
	Pellingen 1	-0,52					
	Pellingen 2	-0,42					
<i>Vicia sepium</i>	Hockweiler	-0,61	-0,30 $\pm$ 0,16				
	Gutweiler	-0,47					
	Pellingen 1	-0,27					
	Pellingen 2	-0,16					

Fortsetzung Tab. A10:

2002, Juni			2002, Juni		
Art	Fläche	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross MW Stabw	Art	Fläche	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross MW Stabw
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	-0,91	<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	-4,96
	Gusterath 1	-1,02		Gusterath 1	-4,50
	Gusterath 2	-1,15		Gusterath 2	-5,03
	Oberemmeler Berg	-1,36		Oberemmeler Berg	-4,48
	Waldweiler	-1,05		Waldweiler	-1,19
	Pellingen 1	-1,10		Pellingen 1	-4,61
	Pellingen 2	-1,09		Pellingen 2	-6,10
	Hockweiler	-0,87		Hockweiler	-0,41
	Muhl 1	-1,30		Muhl 1	-1,71
<i>Trifolium repens</i>	Pellingen 3	-1,26	<i>Sanguisorba minor</i>	Pellingen 3	-2,93
	Gusterath 1	-1,11		Gutweiler	-2,86
	Oberemmeler Berg	-1,33		Gusterath 1	-2,67
	Pellingen 1	-1,72		Gusterath 2	-3,70
	Hockweiler	-1,43		Oberemmeler Berg	-3,80
<i>Trifolium dubium</i>	Muhl 1	-1,54	<i>Centaurea nigra agg.</i>	Pellingen 1	-3,79
	Pellingen 3	-1,39		Pellingen 2	-5,41
	Gutweiler	-1,02		Hockweiler	-0,16
	Gusterath 1	-0,96		Pellingen 3	-1,68
	Gusterath 2	-1,55		Gutweiler	-3,44
<i>Lotus corniculatus</i>	Oberemmeler Berg	-1,26	<i>Leucanthemum vulgare</i>	Gusterath 1	-2,34
	Pellingen 1	-1,27		Gusterath 2	-4,23
	Pellingen 2	-1,43		Oberemmeler Berg	-3,70
	Pellingen 3	-1,20		Pellingen 1	-3,45
	Gutweiler	-2,42		Pellingen 2	-4,48
	Gusterath 1	-2,33		Hockweiler	-0,49
	Gusterath 2	-2,68		Pellingen 3	-1,94
	Oberemmeler Berg	-2,26		Gutweiler	-3,68
	Pellingen 1	-2,29		Gusterath 1	-3,06
<i>Lotus uliginosus</i>	Pellingen 2	-2,49	<i>Galium mollugo</i>	Gusterath 2	-4,31
	Hockweiler	-1,76		Oberemmeler Berg	-3,13
	Pellingen 3	-2,70		Waldweiler	-1,45
	Waldweiler	-1,04		Pellingen 1	-4,54
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	-0,86		Pellingen 2	-5,94
	Pellingen 1	-0,75		Hockweiler	+0,10
	Pellingen 2	-0,80		Muhl 1	-1,57
	Muhl 1	-0,60		Pellingen 3	-2,30
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	-0,75		Gutweiler	-2,13
	Gusterath 2	-0,72	<i>Leontodon hispidus</i>	Gusterath 1	-1,46
	Oberemmeler Berg	-0,65		Gusterath 2	-2,71
	Waldweiler	-0,64		Oberemmeler Berg	-3,05
	Pellingen 1	-0,58		Hockweiler	+0,70
	Pellingen 2	-1,03		Pellingen 3	-2,00
	Hockweiler	-0,30		Gusterath 1	-3,92
	Muhl 1	-0,99		Oberemmeler Berg	-4,46
	Gutweiler	-0,49		Waldweiler	-2,28
	Gusterath 2	-0,76	<i>Hypericum perforatum</i>	Pellingen 1	-4,17
<i>Vicia sepium</i>	Pellingen 1	-0,68		Pellingen 2	-6,12
	Pellingen 2	-0,85		Muhl 1	-2,15
	Hockweiler	-0,57		Gutweiler	-4,17
				Gusterath 1	-3,71
				Gusterath 2	-3,62
<i>Hypericum maculatum</i>				Hockweiler	+0,46
				Pellingen 3	-1,94
				Oberemmeler Berg	-4,43
				Waldweiler	-0,63
				Pellingen 1	-3,43
				Muhl 1	-1,51

Fortsetzung Tab. A10:

2003, Mai			$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			2003, Mai			$\delta^{15}\text{N}$ (‰) in der Wurzel		
Art	Fläche	MW Stabw				Art	Fläche	MW Stabw			
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	-0,76	-0,76 ± 0,15			<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	-0,32	-0,37 ± 0,26		
	Oberemmeler Berg	-0,84					Oberemmeler Berg	-0,60			
	Waldweiler	-0,53					Waldweiler	+0,16			
	Pellingen 1	-0,60					Pellingen 1	-0,46			
	Pellingen 2	-0,93					Pellingen 2	-0,35			
	Hockweiler	-0,71					Hockweiler	-0,42			
<i>Trifolium repens</i>	Gusterath 1	-0,92	-1,20 ± 0,32			<i>Trifolium repens</i>	Gusterath 1	-0,61	+0,42 ± 0,87 ± 0,94		
	Oberemmeler Berg	-1,41					Oberemmeler Berg	+0,42			
	Waldweiler	-0,78					Waldweiler	+2,26			
	Pellingen 1	-1,12					Pellingen 1	+0,24			
<i>Lotus corniculatus</i>	Gusterath 1	-1,48	-2,16 ± 0,20			<i>Lotus corniculatus</i>	Gusterath 1	+0,59	-2,03 ± 0,19		
	Gutweiler	-2,24					Gutweiler	-2,15			
	Oberemmeler Berg	-2,19					Oberemmeler Berg	-2,16			
	Pellingen 2	-2,13					Pellingen 2	-1,71			
<i>Lotus uliginosus</i>	Hockweiler	-1,85	-0,13 ± 0,09			<i>Lotus uliginosus</i>	Hockweiler	-2,03	-1,13 ± 0,05		
	Gusterath 1	-2,40					Gusterath 1	-2,12			
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	-0,76	-0,13 ± 0,09			<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	-2,09	-1,07 ± 0,05		
	Waldweiler	-0,12					Waldweiler	-1,07			
	Pellingen 1	-0,23					Pellingen 1	-1,14			
<i>Vicia cracca</i>	Pellingen 2	-0,05	-0,49 ± 0,26			<i>Vicia cracca</i>	Pellingen 2	-1,17	-0,65 ± 0,23		
	Gutweiler	-0,21					Gutweiler	-0,93			
	Oberemmeler Berg	-0,86					Oberemmeler Berg	-0,93			
	Waldweiler	-0,74					Waldweiler	-0,65			
	Pellingen 1	-0,45					Pellingen 1	-0,57			
	Pellingen 2	-0,58					Pellingen 2	-0,78			
<i>Vicia sepium</i>	Hockweiler	-0,17	-0,23 ± 0,07			<i>Vicia sepium</i>	Hockweiler	-0,32	-0,74 ± 0,08		
	Gusterath 1	-0,44					Gusterath 1	-0,75			
	Gutweiler	-0,18					Gutweiler	-0,81			
	Pellingen 1	-0,22					Pellingen 2	-0,65			
	Pellingen 2	-0,33					Gusterath 1	-0,75			
<i>Plantago lanceolata</i>	Gusterath 1	-0,21	-3,56 ± 1,99			<i>Plantago lanceolata</i>	Gusterath 1	-0,75	-2,67 ± 1,52		
	Gutweiler	-4,32					Gutweiler	-2,61			
	Oberemmeler Berg	-4,16					Oberemmeler Berg	-3,40			
	Waldweiler	-1,03					Waldweiler	-0,78			
	Pellingen 1	-5,19					Pellingen 1	-4,23			
	Pellingen 2	-5,26					Pellingen 2	-4,10			
<i>Sanguisorba minor</i>	Hockweiler	-0,43	-2,82 ± 0,94			<i>Sanguisorba minor</i>	Hockweiler	-0,43	-2,24 ± 1,06		
	Gusterath 1	-4,57					Gusterath 1	-3,10			
	Gutweiler	-3,07					Gutweiler	-1,87			
	Oberemmeler Berg	-3,11					Oberemmeler Berg	-3,26			
	Pellingen 1	-3,23					Pellingen 1	-2,61			
	Pellingen 2	-3,61					Pellingen 2	-3,48			
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Hockweiler	-0,96	-2,93 ± 2,03			<i>Leucanthemum vulgare</i>	Hockweiler	-0,85	-2,66 ± 1,37		
	Gusterath 1	-2,96					Gusterath 1	-1,35			
	Gutweiler	-2,22					Gutweiler	-1,76			
	Oberemmeler Berg	-3,94					Oberemmeler Berg	-4,06			
	Waldweiler	-1,31					Waldweiler	-1,25			
	Pellingen 1	-4,65					Pellingen 1	-3,93			
	Pellingen 2	-5,03					Pellingen 2	-3,40			
	Hockweiler	+0,57					Hockweiler	-0,74			
	Gusterath 1	-3,95					Gusterath 1	-3,45			

Tab. A11: Trockenmassen der in N-freiem Substrat kultivierten Leguminosenarten bei Versuchsende.

Leguminosenart	Gesamtpflanzliches Trockengewicht (g)			
	Animpfung mit Radicin®	n	Animpfung mit Bodenextrakt	n
<i>Trifolium pratense</i>	20,09 ± 14,45	4	5,10 ± 0,72	4
<i>Trifolium repens</i>	9,82 ± 3,44	4	3,65 ± 2,15	4
<i>Trifolium dubium</i>	8,11 ± 3,47	4	8,20 ± 1,08	4
<i>Lathyrus linifolius</i>	2,43 ± 1,55	4	1,24 ± 0,37	4
<i>Lotus corniculatus</i>	0,64 ± 0,34	4 ¹⁾	3,36 ± 0,99	4
<i>Vicia cracca</i>	2,88 ± 4,09	4	11,01 ± 1,03	4
<i>Vicia sepium</i>	0,45 ± 0,18	4 ¹⁾	n.v.	

n.v.: Art in dieser Variante nicht vorhanden

¹⁾ keine sichtbare Nodulierung der Wurzeln

Tab. A12: Prozentuale N-Gehalte der untersuchten Leguminosen und Nicht-Leguminosen der Jahre 2001 bis 2003 (je Fläche eine Mischprobe aus Material von mindestens 15 Pflanzen).

2001, Juni			Stickstoff-Gehalt (%) im Spross		2001, August			Stickstoff-Gehalt (%) im Spross	
Art	Fläche	MW Stabw			Art	Fläche	MW Stabw		
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	3,19	3,34 ± 0,08		<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	3,18	3,22 ± 0,15	
	Oberemmeler Berg	3,41				Oberemmeler Berg	3,30		
	Waldweiler	3,42				Waldweiler	3,43		
	Pellingen 1	3,36				Pellingen 1	3,27		
	Pellingen 2	3,33				Pellingen 2	3,03		
	Hockweiler	3,34				Hockweiler	3,10		
<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	3,44	3,22 ± 0,15		<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	3,46	3,33 ± 0,27	
	Oberemmeler Berg	3,22				Oberemmeler Berg	3,56		
	Pellingen 1	3,10				Waldweiler	3,61		
	Pellingen 2	3,07				Pellingen 1	3,31		
	Hockweiler	3,27				Pellingen 2	2,92		
<i>Trifolium dubium</i>	Gutweiler	2,42	2,40 ± 0,06		<i>Lotus corniculatus</i>	Hockweiler	3,14	3,01 ± 0,12	
	Pellingen 1	2,36				Gutweiler	2,97		
	Pellingen 2	2,36				Oberemmeler Berg	3,22		
	Hockweiler	2,47				Pellingen 1	3,01		
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	3,74	3,64 ± 0,07		<i>Lotus uliginosus</i>	Pellingen 2	2,92	3,27 ± 0,48	
	Oberemmeler Berg	3,63				Hockweiler	2,93		
	Pellingen 1	3,57				Waldweiler	3,60		
	Pellingen 2	3,60				Pellingen 2	2,93		
<i>Lotus uliginosus</i>	Hockweiler	3,68	3,86 ± 0,17		<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	3,44	3,23 ± 0,19	
	Waldweiler	3,98				Pellingen 1	3,18		
	Pellingen 2	3,74				Pellingen 2	3,07		
<i>Lathyrus linifolius</i>	Oberemmeler Berg	3,91	3,58 ± 0,36		<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	4,05	4,08 ± 0,21	
	Waldweiler	3,85				Oberemmeler Berg	4,06		
	Pellingen 1	3,38				Waldweiler	4,40		
	Pellingen 2	3,18				Pellingen 1	4,22		
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	3,86	4,18 ± 0,30		<i>Vicia sepium</i>	Pellingen 2	3,76	3,46 ± 0,16	
	Oberemmeler Berg	4,07				Hockweiler	4,01		
	Waldweiler	4,71				Gutweiler	3,59		
	Pellingen 1	4,19				Pellingen 1	3,55		
	Pellingen 2	3,97				Pellingen 2	3,22		
<i>Vicia sepium</i>	Hockweiler	4,26	3,99 ± 0,29			Hockweiler	3,46		
	Gutweiler	3,76			<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	1,70	1,72 ± 0,15	
	Pellingen 1	4,32				Oberemmeler Berg	1,59		
Pellingen 2	3,90		Waldweiler	1,98					
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	1,93	1,92 ± 0,18		<i>Sanguisorba minor</i>	Pellingen 1	1,67	2,06 ± 0,08	
	Oberemmeler Berg	1,97				Pellingen 2	1,60		
	Waldweiler	2,21				Hockweiler	1,79		
	Pellingen 1	1,73				Gutweiler	2,12		
	Pellingen 2	1,94				Oberemmeler Berg	1,98		
	Hockweiler	1,72				Pellingen 1	2,02		
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	1,94	2,04 ± 0,14		<i>Galium mollugo</i>	Pellingen 2	2,16	1,78 ± 0,09	
	Oberemmeler Berg	2,25				Hockweiler	2,01		
	Pellingen 1	1,95				Gutweiler	1,76		
	Pellingen 2	1,93				Oberemmeler Berg	1,69		
	Hockweiler	2,12				Pellingen 2	1,90		
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	2,00	1,95 ± 0,05		<i>Holcus lanatus</i>	Hockweiler	1,77	1,75 ± 0,06	
	Oberemmeler Berg	1,95				Gutweiler	1,76		
	Pellingen 2	1,89				Oberemmeler Berg	1,66		
	Hockweiler	1,96				Waldweiler	1,84		
<i>Holcus lanatus</i>	Gutweiler	1,55	1,57 ± 0,08		<i>Hypericum maculatum</i>	Pellingen 1	1,70	2,38 ± 0,55	
	Oberemmeler Berg	1,60				Pellingen 2	1,73		
	Waldweiler	1,58				Hockweiler	1,79		
	Pellingen 1	1,66				Waldweiler	2,77		
	Pellingen 2	1,43				Pellingen 1	1,99		
	Hockweiler	1,62				Waldweiler	3,11		
<i>Rumex acetosa</i>	Waldweiler	2,86		<i>Rumex acetosa</i>	Waldweiler	2,49			
<i>Leontodon hispidus</i>	Waldweiler	2,77		<i>Leontodon hispidus</i>	Waldweiler	2,49			
				<i>Ononis spiosa</i>	Pellingen 2	3,36			

Fortsetzung Tab. A12:

2002, Juni			Stickstoff-Gehalt (%) im Spross	2002, Juni			Stickstoff-Gehalt (%) im Spross
Art	Fläche	MW Stabw		Art	Fläche	MW Stabw	
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	2,39	2,41 ± 0,08	<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	1,45	1,61 ± 0,24
	Gusterath 1	2,40			Gusterath 1	1,41	
	Gusterath 2	2,35			Gusterath 2	1,48	
	Oberemmeler Berg	2,40			Oberemmeler Berg	1,55	
	Waldweiler	2,57			Waldweiler	2,11	
	Pellingen 1	2,39			Pellingen 1	1,53	
	Pellingen 2	2,48			Pellingen 2	1,60	
	Hockweiler	2,28			Hockweiler	1,88	
	Muhl 1	2,42			Muhl 1	1,76	
<i>Trifolium repens</i>	Pellingen 3	2,40	<i>Sanguisorba minor</i>	Pellingen 3	1,31	1,69 ± 0,23	
	Gusterath 1	2,84		Gutweiler	1,54		
	Oberemmeler Berg	3,13		Gusterath 1	1,57		
	Pellingen 1	2,74		Gusterath 2	1,63		
	Hockweiler	3,01		Oberemmeler Berg	1,61		
	Muhl 1	3,05		Pellingen 1	1,60		
<i>Trifolium dubium</i>	Pellingen 3	2,62	<i>Centaurea nigra agg.</i>	Pellingen 2	1,70	1,40 ± 0,15	
	Gutweiler	2,45		Hockweiler	2,24		
	Gusterath 1	2,26		Pellingen 3	1,64		
	Gusterath 2	2,29		Gutweiler	1,26		
	Oberemmeler Berg	2,71		Gusterath 1	1,38		
<i>Lotus corniculatus</i>	Pellingen 1	2,30	<i>Leucanthemum vulgare</i>	Gusterath 2	1,34	1,27 ± 0,17	
	Pellingen 2	2,35		Oberemmeler Berg	1,48		
	Pellingen 3	2,37		Pellingen 1	1,37		
	Gutweiler	2,78		Pellingen 2	1,32		
	Gusterath 1	2,79		Hockweiler	1,75		
	Gusterath 2	2,82		Pellingen 3	1,33		
	Oberemmeler Berg	2,91		Gutweiler	1,19		
	Pellingen 1	2,77		Gusterath 1	1,21		
<i>Lotus uliginosus</i>	Pellingen 2	2,86	<i>Galium mollugo</i>	Gusterath 2	1,15	1,54 ± 0,12	
	Hockweiler	3,23		Oberemmeler Berg	1,17		
	Pellingen 3	2,82		Waldweiler	1,69		
	<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler		3,77	Pellingen 1		1,27
		Waldweiler		3,27	Pellingen 2		1,15
Pellingen 1		3,19	Hockweiler	1,34			
Pellingen 2		2,76	Muhl 1	1,40			
<i>Vicia cracca</i>	Muhl 1	3,49	<i>Leontodon hispidus</i>	Pellingen 3	1,11	2,23 ± 0,37	
	Gutweiler	3,81		Gutweiler	1,47		
	Gusterath 2	3,72		Gusterath 1	1,43		
	Oberemmeler Berg	3,53		Gusterath 2	1,47		
	Waldweiler	4,13		Oberemmeler Berg	1,60		
	Pellingen 1	3,69		Hockweiler	1,76		
	Pellingen 2	3,23		Pellingen 3	1,51		
	Hockweiler	4,10		Gusterath 1	1,79		
<i>Vicia sepium</i>	Muhl 1	3,63	<i>Hypericum perforatum</i>	Oberemmeler Berg	2,10	1,61 ± 0,32	
	Gutweiler	3,88		Waldweiler	2,66		
	Gusterath 2	3,44		Pellingen 1	2,08		
	Pellingen 1	3,39		Pellingen 2	2,02		
	Pellingen 2	3,44		Muhl 1	2,71		
	Hockweiler	3,56		Gutweiler	1,43		
<i>Hypericum maculatum</i>			<i>Hypericum maculatum</i>	Gusterath 1	1,48	1,94 ± 0,31	
				Gusterath 2	1,73		
				Hockweiler	2,12		
				Pellingen 3	1,30		
				Oberemmeler Berg	1,72		
			Waldweiler	2,40	1,94 ± 0,31		
			Pellingen 1	1,77			
			Muhl 1	1,89			

Fortsetzung Tab. A12:

2003, Ende Mai			Stickstoff-Gehalt (%) im Spross		2003, Ende Mai			Stickstoff-Gehalt (%) in der Wurzel						
Art	Fläche		MW	Stabw	Art	Fläche		MW	Stabw					
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	2,54		2,55 ± 0,12	<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	2,26		2,33 ± 0,22					
	Oberemmeler Berg	2,73				Oberemmeler Berg	2,56							
	Waldweiler	2,59				Waldweiler	2,11							
	Pellingen 1	2,39				Pellingen 1	2,49							
	Pellingen 2	2,61				Pellingen 2	2,38							
	Hockweiler	2,55				Hockweiler	2,53							
	Gusterath 1	2,41				Gusterath 1	1,97							
<i>Trifolium repens</i>	Oberemmeler Berg	3,39		3,32 ± 0,51	<i>Trifolium repens</i>	Oberemmeler Berg	3,05		2,99 ± 0,30					
	Waldweiler	4,02				Waldweiler	3,38							
	Pellingen 1	3,00				Pellingen 1	2,67							
	Gusterath 1	2,89				Gusterath 1	2,86							
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	3,14		3,29 ± 0,30	<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	2,51		2,34 ± 0,15					
	Oberemmeler Berg	3,44				Oberemmeler Berg	2,15							
	Pellingen 2	3,59				Pellingen 2	2,30							
	Hockweiler	3,45				Hockweiler	2,48							
	Gusterath 1	2,84				Gusterath 1	2,25							
<i>Lotus uliginosus</i>	Waldweiler	3,32		3,44 ± 0,28	<i>Lotus uliginosus</i>	Waldweiler	1,87		2,27 ± 0,19					
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	3,75					3,44 ± 0,28			<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	2,40		
	Pellingen 1	3,28									Pellingen 1	2,05		
	Pellingen 2	3,27									Pellingen 2	2,36		
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	4,26					4,20 ± 0,16			<i>Vicia cracca</i>	Oberemmeler Berg	3,09		2,92 ± 0,24
	Oberemmeler Berg	4,46	Waldweiler	3,24										
	Waldweiler	4,35	Pellingen 1	2,87										
	Pellingen 1	4,04	Pellingen 2	2,76										
	Pellingen 2	4,12	Hockweiler	2,65										
	Hockweiler	4,13	<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	3,26			3,03 ± 0,24						
	Gusterath 1	4,03		Pellingen 2	3,05									
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	4,12			3,85 ± 0,27				Gusterath 1	2,77				
	Pellingen 1	4,04	<i>Plantago lanceolata</i>			Gutweiler	0,90		0,90 ± 0,12					
	Pellingen 2	3,68				Oberemmeler Berg	0,97							
	Gusterath 1	3,58				Waldweiler	0,91							
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	1,51			1,70 ± 0,31					Pellingen 1	0,90			
	Oberemmeler Berg	1,68								Pellingen 2	0,82			
	Waldweiler	2,04								Hockweiler	1,10			
	Pellingen 1	1,48								Gusterath 1	0,73			
	<i>Sanguisorba minor</i>	Pellingen 2	1,57				1,92 ± 0,35	<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	0,67		0,73 ± 0,17		
		Hockweiler	2,24						Oberemmeler Berg	0,77				
		Gusterath 1	1,40						Pellingen 1	0,64				
<i>Sanguisorba minor</i>		Gutweiler	1,70		1,92 ± 0,35								Pellingen 2	0,64
		Oberemmeler Berg	2,14										Hockweiler	1,05
		Pellingen 1	1,63										Gusterath 1	0,59
	<i>Leucanthemum vulgare</i>	Pellingen 2	1,92				1,35 ± 0,21	<i>Leucanthemum vulgare</i>	Gutweiler	1,04		0,85 ± 0,15		
		Hockweiler	2,49						Oberemmeler Berg	0,73				
Gusterath 1		1,61	Waldweiler	1,02										
Gutweiler		1,19	Pellingen 1	0,68										
Oberemmeler Berg		1,33	Pellingen 2	0,73										
Waldweiler		1,76	Hockweiler	0,96										
Pellingen 1		1,24	Gusterath 1	0,77										
Pellingen 2		1,32												
Hockweiler	1,46													
Gusterath 1	1,14													

Tab. A13: $\delta^{15}\text{N}$ -Werte der funktionellen Gruppen Kräuter, Gräser und Leguminosen. Erntetermine Juni 2001 und Juni 2002, Werte für jede Ernteparzelle.

2001 (Juni)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Leguminosen	MW Kräuter + Gräser
Gutweiler	a	-1,395	-1,297	-0,297	-1,346
	b	-2,198	-2,075	-0,372	-2,137
	c	-1,290	-1,106	n.v.	-1,198
	d	-2,771	-1,987	-2,024	-2,379
	e	-2,352	-1,368	-0,483	-1,860
	f	-2,535	-2,046	-0,470	-2,291
	g	-2,403	-1,864	-0,491	-2,133
	h	-3,600	-3,381	-1,516	-3,491
Oberem- meler Berg	a	-4,100	-2,956	-1,895	-3,528
	b	-0,680	-0,683	-0,876	-0,682
	c	-3,751	-3,399	-0,373	-3,575
	d	-4,649	-4,347	-0,887	-4,498
	e	-2,980	-3,843	-0,843	-3,411
	f	-2,779	-2,304	-0,793	-2,542
	g	-3,323	-2,354	-1,386	-2,839
	h	-3,273	-2,491	-0,807	-2,882
	i	-3,879	-4,107	-0,549	-3,993
Waldweiler	a	-1,857	-1,825	-0,133	-1,841
	b	0,534	-0,687	-0,248	-0,076
	c	-1,634	-1,264	-0,542	-1,449
	d	-1,759	-1,930	-0,732	-1,845
	e	-1,289	-1,317	-0,585	-1,303
	f	-1,195	-2,294	-0,436	-1,745
	g	-1,183	-0,886	-0,348	-1,034
	h	-0,744	-0,871	-0,829	-0,808
Pellingen 1	a	-4,047	-2,534	-0,955	-3,290
	b	-4,166	-3,393	-1,225	-3,779
	c	-3,786	-3,286	-1,215	-3,536
	d	-3,505	-3,403	-0,460	-3,454
	e	-3,919	-4,211	-0,718	-4,065
	f	-4,094	-4,697	-0,476	-4,396
	g	-4,508	-5,343	-0,428	-4,926
	h	-5,147	-4,380	-0,911	-4,763
Pellingen 2	a	-2,642	-2,591	-0,559	-2,617
	b	-4,074	-3,647	-1,192	-3,860
	c	-4,442	-3,671	-1,001	-4,056
	d	-4,589	-3,147	-0,791	-3,868
	e	-4,699	-3,407	-0,399	-4,053
	f	-4,748	-3,487	-0,760	-4,117
	g	-5,901	-3,819	-0,441	-4,860
	h	-3,731	-2,781	-1,417	-3,256
Hockweiler	a	-2,509	-2,044	-0,563	-2,277
	b	-2,171	-2,142	-0,712	-2,157
	c	-2,476	-1,246	-0,864	-1,861
	d	-2,489	-2,608	-1,259	-2,549
	e	-0,272	-1,622	-1,261	-0,947
	f	-1,868	-1,967	-1,924	-1,918
	g	-2,883	-2,544	-1,107	-2,713
	h	-3,341	-2,993	-0,820	-3,167

n.v.: keine Leguminosen in Ernteparzelle enthalten

Fortsetzung Tab. A13:

2002 (Juni)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Leguminosen	MW Kräuter + Gräser
Gutweiler	1	-4,752	-3,194	-0,366	-3,973
	2	-5,173	-4,323	-1,041	-4,748
	3	-2,083	-2,731	-1,052	-2,407
	4	-2,251	-1,855	-0,430	-2,053
	5	-2,270	-1,760	-1,890	-2,015
	6	-2,880	-2,067	-0,513	-2,474
	7	-2,555	-2,091	-0,789	-2,323
	8	-2,870	-1,853	-0,819	-2,362
	9	-3,346	-2,040	-1,445	-2,693
	10	-3,187	-1,926	-0,718	-2,557
	11	-2,996	-2,268	-0,456	-2,632
	12	-2,019	-1,473	n.v.	-1,746
	13	-2,293	-2,255	-0,252	-2,274
	14	-3,639	-2,695	-2,250	-3,167
	15	-2,559	-2,525	-0,542	-2,542
	16	-2,991	-1,382	n.v.	-2,187
	17	-2,750	-1,525	n.v.	-2,138
	18	-0,683	-0,440	-0,224	-0,562
	19	-1,857	-2,264	-0,356	-2,061
	20	-2,114	-1,362	-0,716	-1,738
Gusterath 1	1	-4,693	-3,178	-1,021	-3,936
	2	-4,132	-3,392	-1,106	-3,762
	3	-4,539	-3,277	-0,839	-3,908
	4	-4,861	-4,387	-0,965	-4,624
	5	-4,145	-2,933	-0,562	-3,539
	6	-4,354	-2,676	-1,353	-3,515
	7	-3,080	-2,347	-0,519	-2,714
	8	-4,327	-2,885	-1,780	-3,606
	9	-3,521	-1,542	-1,059	-2,532
	10	-4,444	-3,272	-0,381	-3,858
	11	-3,879	-2,384	-0,614	-3,132
	12	-3,733	-2,543	-0,794	-3,138
	13	-4,324	-2,460	-1,470	-3,392
	14	-2,009	-1,870	-0,580	-1,940
	15	-3,215	-2,098	-1,057	-2,657
	16	-3,887	-2,068	-0,943	-2,978
	17	-3,433	-3,202	-0,671	-3,318
	18	-3,577	-1,822	-0,480	-2,700
	19	-3,435	-2,462	-0,660	-2,949
	20	-4,019	-2,446	-1,097	-3,233
Gusterath 2	1	-1,982	-1,735	n.v.	-1,859
	2	-3,277	-2,654	-1,154	-2,966
	3	-3,291	-2,501	-1,985	-2,896
	4	-4,148	-2,814	-2,538	-3,481
	5	-4,525	-3,909	-2,274	-4,217
	6	-4,270	-4,119	-2,345	-4,195
	7	-3,494	-2,919	-2,581	-3,207
	8	-3,366	-3,030	-2,305	-3,198
	9	-4,526	-3,865	-2,499	-4,196
	10	-3,965	-3,526	-1,782	-3,746
	11	-3,706	-3,532	-2,437	-3,619
	12	-4,423	-4,025	-1,653	-4,224
	13	-4,340	-3,355	-2,438	-3,848
	14	-5,105	-4,073	-1,946	-4,589
	15	-4,566	-3,693	-2,071	-4,130
	16	-4,578	-3,890	-1,280	-4,234
	17	-4,141	-4,429	-1,261	-4,285
	18	-5,696	-3,551	-2,255	-4,624
	19	-5,853	-4,955	-2,078	-5,404
	20	-5,355	-4,024	-1,954	-4,690

Fortsetzung Tab. A13:

2002 (Juni)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Leguminosen	MW Kräuter + Gräser
Gusterath 3	1	-1,902	-1,447	n.v.	-1,675
	2	-1,914	-1,124	n.v.	-1,519
	3	-2,411	-1,941	-1,741	-2,176
	4	-4,003	-2,509	-2,070	-3,256
	5	-1,519	-1,148	-2,528	-1,334
	6	-2,548	-1,164	-1,860	-1,856
	7	-3,941	-1,136	-1,588	-2,539
	8	-2,573	-1,338	-1,461	-1,955
	9	-5,331	-2,764	-1,084	-4,047
	10	-4,990	-3,994	-1,130	-4,492
	11	-1,054	-1,452	-1,920	-1,253
	12	-2,874	-1,046	-1,266	-1,960
	13	-3,145	-0,749	-0,820	-1,947
	14	-2,717	-0,261	-1,070	-1,489
	15	-4,292	-2,414	-0,964	-3,353
	16	-5,141	-2,114	-1,136	-3,628
	17	-3,866	-1,559	-0,981	-2,713
	18	-2,907	-1,135	-0,257	-2,021
	19	-2,026	-1,476	-0,911	-1,751
	20	-3,744	-1,976	-1,157	-2,860
Oberem- meler Berg	1	-1,231	-0,775	-1,183	-1,003
	2	-3,099	-1,542	-1,045	-2,321
	3	-3,510	-2,764	-1,000	-3,137
	4	-4,334	-3,339	-1,010	-3,837
	5	-4,061	-3,269	-1,024	-3,665
	6	-2,811	-0,258	-0,624	-1,535
	7	-2,395	-0,966	-0,740	-1,681
	8	-2,812	-1,638	-0,785	-2,225
	9	-4,755	-5,198	-0,702	-4,977
	10	-4,311	-3,197	-0,181	-3,754
	11	-4,508	-3,716	-0,398	-4,112
	12	-4,031	-3,074	-0,550	-3,553
	13	-3,761	-2,848	-1,118	-3,305
	14	-3,370	-1,993	n.v.	-2,682
	15	-4,235	-3,544	-0,638	-3,890
	16	-4,618	-3,013	-0,743	-3,816
	17	-3,629	-3,467	-0,710	-3,548
	18	-3,024	-1,952	-0,683	-2,488
	19	-3,343	-3,327	-0,906	-3,335
	20	-3,169	-1,619	n.v.	-2,394
Waldweiler	1	-1,847	-1,404	n.v.	-1,626
	2	-0,596	-0,391	-0,216	-0,494
	3	-1,813	-1,888	-0,195	-1,851
	4	-1,486	-0,973	-0,195	-1,230
	5	-1,302	-0,283	-0,600	-0,793
	6	-0,838	-0,738	n.v.	-0,788
	7	-0,109	-0,161	-0,653	-0,135
	8	-1,349	-1,499	-1,026	-1,424
	9	-4,098	-3,235	-0,576	-3,667
	10	-2,551	-1,983	-0,736	-2,267
	11	-2,629	-1,953	-0,465	-2,291
	12	-1,546	-1,726	-0,551	-1,636
	13	-0,995	-0,934	-0,353	-0,965
	14	-1,661	-1,063	-0,109	-1,362
	15	-2,657	-1,348	-0,287	-2,003
	16	-2,289	-1,841	-0,059	-2,065
	17	-1,176	-1,182	-0,055	-1,179
	18	-1,527	-1,283	-0,277	-1,405
	19	-1,866	-1,098	-0,390	-1,482
	20	3,452	0,735	-0,470	2,094

Fortsetzung Tab. A13:

2002 (Juni)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Leguminosen	MW Kräuter + Gräser
Pellingen 1	1	-4,035	-3,267	-0,910	-3,651
	2	-5,575	-4,660	-0,968	-5,118
	3	-7,230	-3,441	-0,807	-5,336
	4	-5,692	-4,580	-0,872	-5,136
	5	-3,864	-2,447	-0,933	-3,156
	6	-4,034	-4,041	-0,404	-4,038
	7	-5,087	-3,658	-0,670	-4,373
	8	-4,770	-2,870	-0,590	-3,820
	9	-4,855	-2,883	-0,836	-3,869
	10	-4,905	-2,417	-0,725	-3,661
	11	-4,330	-3,014	-1,063	-3,672
	12	-4,624	-2,244	-0,357	-3,434
	13	-4,426	-3,218	-0,922	-3,822
	14	-4,442	-3,385	-0,634	-3,914
	15	-4,729	-2,927	-0,870	-3,828
	16	-4,700	-4,313	n.v.	-4,507
	17	-6,098	-4,028	-0,592	-5,063
	18	-6,086	-4,094	-0,657	-5,090
	19	-6,137	-4,051	n.v.	-5,094
	20	-6,976	-4,269	-0,707	-5,623
Pellingen 2	21	-2,390	-2,042	-0,639	-2,216
	22	-3,880	-1,981	0,004	-2,931
	23	-3,306	-2,389	-0,519	-2,848
	24	-4,747	-3,590	-0,706	-4,169
	25	-4,382	-3,349	-0,591	-3,866
	26	-4,191	-3,650	-0,857	-3,921
	27	-3,608	-3,896	-0,489	-3,752
	28	-3,559	-2,704	-0,124	-3,132
	29	-4,430	-3,737	-0,397	-4,084
	30	-4,142	-3,721	0,241	-3,932
	31	-3,008	-2,904	-0,664	-2,956
	32	-1,792	-2,436	-0,832	-2,114
	33	-2,211	-2,213	-0,463	-2,212
	34	-3,470	-2,800	-0,351	-3,135
	35	-4,193	-3,331	-0,818	-3,762
	36	-1,200	-2,064	n.v.	-1,632
	37	-2,799	-2,955	-0,953	-2,877
	38	-3,293	-3,186	-0,556	-3,240
	39	-2,939	-1,909	-0,245	-2,424
	40	-3,256	-2,217	-0,957	-2,737
Hockweiler	1	1,132	2,079	-0,288	1,606
	2	0,680	3,083	-0,918	1,882
	3	1,444	3,063	-0,897	2,254
	4	3,511	2,827	-1,062	3,169
	5	0,677	1,621	n.v.	1,149
	6	1,234	1,218	n.v.	1,226
	7	1,256	1,738	0,198	1,497
	8	-0,711	1,845	n.v.	0,567
	9	1,235	2,605	n.v.	1,920
	10	1,475	1,578	n.v.	1,527

Fortsetzung Tab. A13:

2002 (Juni)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Leguminosen	MW Kräuter + Gräser
Muhl 2	1	-2,036	-1,637	n.v.	-1,837
	2	-1,344	-1,413	-0,054	-1,379
	3	-0,040	0,896	-0,460	0,428
	4	0,257	0,201	-0,081	0,229
	5	1,379	1,197	-0,069	1,288
	6	-0,381	-0,128	-0,698	-0,254
	7	1,372	-0,172	-1,056	0,600
	8	0,537	0,485	-0,187	0,511
	9	0,393	1,082	-0,346	0,738
	10	2,166	2,676	0,208	2,421
	11	0,937	0,413	-0,393	0,675
	12	0,399	-0,139	-0,511	0,130
	13	0,063	-0,050	-0,145	0,007
	14	-0,173	-0,226	-0,213	-0,200
	15	-0,183	0,131	-0,743	-0,026
	16	0,102	0,114	-0,772	0,108
	17	-0,033	-0,162	0,014	-0,097
	18	-0,704	0,372	-0,063	-0,166
	19	-0,343	0,162	-0,301	-0,091
	20	-0,527	0,003	-0,461	-0,262
Muhl 1	1	-1,941	-0,756	-0,738	-1,348
	2	-0,719	-0,575	-0,723	-0,647
	3	-2,098	-0,671	-0,949	-1,384
	4	-0,285	0,085	-0,965	-0,100
	5	-0,934	-1,231	-0,581	-1,083
	6	-3,239	-1,526	-0,679	-2,382
	7	-2,436	-1,110	-1,085	-1,773
	8	-1,296	-1,095	-1,020	-1,196
	9	-1,415	-1,941	-1,030	-1,678
	10	-0,543	-0,613	-0,531	-0,578
	11	-1,060	-1,079	-0,975	-1,069
	12	-1,116	-0,962	-0,649	-1,039
	13	-2,434	-1,587	-0,514	-2,010
	14	-2,164	-1,444	-0,585	-1,804
	15	-1,488	-1,443	-0,579	-1,466
	16	-1,971	-0,844	-0,481	-1,408
	17	-1,116	-0,715	-0,727	-0,915
	18	-1,992	-1,294	-0,474	-1,643
	19	-1,194	-1,002	-0,881	-1,098
	20	-1,411	-1,423	n.v.	-1,417
Pellingen 3	1	-1,502	-1,127	-1,165	-1,314
	2	-2,274	-2,074	-0,957	-2,174
	3	-2,254	-1,116	-0,678	-1,685
	4	-1,446	-1,639	-0,593	-1,543
	5	-2,210	-1,187	-0,754	-1,698
	6	-1,623	-1,489	-0,500	-1,556
	7	-1,223	-0,782	-0,194	-1,002
	8	-1,829	-1,376	-0,603	-1,603
	9	-2,909	-2,241	-0,819	-2,575
	10	-1,881	-1,324	-0,630	-1,602
	11	-0,825	-0,464	-0,500	-0,645
	12	-0,712	-0,275	n.v.	-0,493
	13	-0,209	-0,504	-0,824	-0,356
	14	-0,568	-0,136	-0,791	-0,352
	15	-0,692	-0,578	n.v.	-0,635

Fortsetzung Tab. A13:

2002 (Juni)		$\delta^{15}\text{N}$ (‰) im Spross			
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Leguminosen	MW Kräuter + Gräser
Pellingen 4	1	-0,283	-2,034	-1,189	-1,158
	2	-1,643	-1,741	-0,817	-1,692
	3	-2,364	-1,593	-0,764	-1,978
	4	-2,939	-1,881	-0,824	-2,410
	5	-2,024	-1,492	-0,820	-1,758
	6	-2,029	-1,250	-0,692	-1,639
	7	-2,394	-1,350	-0,667	-1,872
	8	-1,359	-0,950	-0,407	-1,155
	9	-2,649	-1,300	-0,047	-1,974
	10	-2,330	-1,165	-0,338	-1,748
	11	-3,257	-1,453	-1,071	-2,355
	12	-2,360	-1,215	-0,298	-1,788
	13	-1,491	-1,689	-0,868	-1,590
	14	-2,367	-2,108	-0,868	-2,238
	15	-1,765	-1,168	-0,823	-1,467
	16	-1,753	-1,607	-0,480	-1,680
	17	-2,457	-1,150	-0,577	-1,804
	18	-0,182	-0,424	n.v.	-0,303
	19	-2,436	-1,535	-0,207	-1,985
	20	-2,433	-1,829	-0,539	-2,131
Züschen 2	1	-0,688	-1,521	-0,520	-1,104
	2	-1,318	-1,290	0,032	-1,304
	3	-0,431	-0,837	-0,159	-0,634
	4	-0,461	0,347	n.v.	-0,057
	5	-1,657	-0,646	-0,450	-1,151
	6	-1,560	-0,130	-0,636	-0,845
	7	-1,404	0,320	n.v.	-0,542
	8	-0,988	-0,930	-0,458	-0,959
	9	-1,299	-0,370	-0,307	-0,834
	10	-2,367	-2,112	-0,459	-2,240
	11	-2,526	-0,896	-0,197	-1,711
	12	-0,767	-0,977	0,222	-0,872
	13	-2,007	-0,991	n.v.	-1,499
	14	-2,491	-1,251	-0,262	-1,871
	15	-1,693	-1,412	-0,508	-1,553
	16	-2,017	-1,233	n.v.	-1,625
	17	-2,649	-1,147	0,006	-1,898
	18	-2,718	-1,849	-0,193	-2,283
	19	-4,033	-2,910	-0,621	-3,471
	20	-3,319	-1,342	0,064	-2,331
Pellingen 5	1	-4,905	-3,646	-0,388	-4,276
	2	-4,045	-2,235	-0,791	-3,140
	3	-3,899	-2,331	-0,763	-3,115
	4	-5,848	-3,542	-0,519	-4,695

n.v.: keine Leguminosen in Ernteparzelle enthalten

Tab. A14: Nährstoffgehalte in der Sprossmasse verschiedener Leguminosen und Nicht-Leguminosen an drei Ernteterminen (Juni und August 2001, Juni 2002). Mischproben von 15–20 Pflanzen je Art.

Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (g pro kg TS)									
Art	Fläche	Phosphor		Kalium		Magnesium		Calcium	
2001, Juni		MW Art		MW Art		MW Art		MW Art	
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	2,12	2,05 ± 0,28	11,92	11,77 ± 2,35	3,68	4,00 ± 0,69	16,19	15,63 ± 3,21
	Oberemmeler Berg	2,09		9,34		5,40		13,43	
	Waldweiler	2,31		11,52		3,87		13,12	
	Pellingen 1	1,55		14,08		3,74		15,39	
	Pellingen 2	1,96		14,72		3,68		13,91	
	Hockweiler	2,28		9,00		3,61		21,72	
<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	2,48	1,95 ± 0,44	12,92	11,82 ± 1,91	3,03	3,21 ± 0,55	18,39	18,01 ± 1,43
	Oberemmeler Berg	1,87		11,88		3,92		15,93	
	Pellingen 1	1,56		11,03		3,33		17,41	
	Pellingen 2	1,53		14,17		3,34		18,54	
	Hockweiler	2,33		9,12		2,40		19,76	
<i>Trifolium dubium</i>	Gutweiler	1,19	1,41 ± 0,31	7,97	6,02 ± 2,01	1,92	1,97 ± 0,08	10,19	10,24 ± 1,72
	Pellingen 1	1,32		5,66		1,94		8,32	
	Pellingen 2	1,26		7,09		1,94		9,95	
	Hockweiler	1,86		3,38		2,08		12,51	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	2,83	3,01 ± 0,36	16,31	16,68 ± 3,77	2,63	2,72 ± 0,19	8,57	7,79 ± 0,82
	Oberemmeler Berg	2,77		13,45		3,04		7,56	
	Pellingen 1	2,93		17,86		2,56		7,20	
	Pellingen 2	2,87		22,46		2,76		6,91	
	Hockweiler	3,64		13,30		2,60		8,72	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Oberemmeler Berg	2,76	2,39 ± 0,68	12,87	13,06 ± 4,51	2,49	1,92 ± 1,69	5,75	5,90 ± 6,72
	Waldweiler	2,56		14,50		1,77		6,21	
	Pellingen 1	2,18		12,79		1,80		6,00	
	Pellingen 2	2,06		12,09		1,60		5,62	
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	2,35	2,98 ± 0,51	10,65	14,50 ± 3,06	2,27	2,09 ± 0,64	7,92	7,17 ± 0,91
	Oberemmeler Berg	3,15		10,98		3,30		7,38	
	Waldweiler	3,66		16,96		1,64		6,03	
	Pellingen 1	2,64		14,44		1,77		6,04	
	Pellingen 2	2,64		17,76		1,97		7,64	
	Hockweiler	3,42		16,24		1,60		8,02	
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	2,44	2,33 ± 0,11	9,09	9,69 ± 0,77	2,48	2,48 ± 0,07	7,97	6,56 ± 1,22
	Pellingen 1	2,32		10,56		2,41		5,75	
	Pellingen 2	2,21		9,40		2,55		5,98	
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	2,75	2,16 ± 0,70	8,74	10,47 ± 4,16	2,02	2,31 ± 0,60	19,23	13,60 ± 3,21
	Oberemmeler Berg	1,88		5,35		3,27		12,09	
	Waldweiler	1,64		8,69		2,17		12,43	
	Pellingen 1	1,62		11,05		2,21		9,69	
	Pellingen 2	1,79		17,78		2,65		13,61	
	Hockweiler	3,31		11,23		1,52		14,56	
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	1,69	2,05 ± 0,27	7,61	8,76 ± 1,09	4,15	4,46 ± 0,83	14,03	12,61 ± 1,18
	Oberemmeler Berg	2,36		7,97		5,76		12,59	
	Pellingen 1	1,99		8,45		4,15		11,14	
	Pellingen 2	1,92		10,19		4,68		11,81	
	Hockweiler	2,28		9,56		3,55		13,48	
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	2,39	2,36 ± 0,36	15,47	15,06 ± 2,45	2,25	2,50 ± 1,41	13,56	9,79 ± 5,64
	Oberemmeler Berg	2,36		11,45		4,53		9,63	
	Pellingen 2	2,02		18,82		2,59		11,33	
	Hockweiler	2,86		13,58		1,82		11,75	
<i>Holcus lanatus</i>	Gutweiler	2,17	2,03 ± 0,36	15,99	14,85 ± 1,73	1,30	1,28 ± 0,08	2,70	2,44 ± 0,33
	Oberemmeler Berg	2,18		12,30		1,39		2,19	
	Waldweiler	1,65		13,51		1,30		2,96	
	Pellingen 1	2,01		16,39		1,33		2,20	
	Pellingen 2	1,60		16,54		1,19		2,13	
	Hockweiler	2,56		14,36		1,20		2,46	

Fortsetzung Tab. A14:

Art	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (mg pro kg TS)			
		Mangan		Eisen	
2001, Juni			MW Art		MW Art
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	79,32	113,86 ± 36,40	56,53	65,48 ± 9,72
	Oberemmeler Berg	59,39		73,40	
	Waldweiler	149,60		55,19	
	Pellingen 1	144,16		59,59	
	Pellingen 2	123,72		78,60	
	Hockweiler	126,98		69,55	
<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	91,07	123,50 ± 44,89	83,18	77,76 ± 14,35
	Oberemmeler Berg	70,09		76,10	
	Pellingen 1	182,31		64,90	
	Pellingen 2	149,91		99,41	
	Hockweiler	124,11		65,22	
<i>Trifolium dubium</i>	Gutweiler	153,43	218,05 ± 57,90	80,15	82,06 ± 8,53
	Pellingen 1	258,56		76,79	
	Pellingen 2	185,64		76,66	
	Hockweiler	274,55		94,63	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	72,19	109,94 ± 62,69	88,95	89,42 ± 41,54
	Oberemmeler Berg	69,79		66,02	
	Pellingen 1	96,26		62,51	
	Pellingen 2	220,16		161,40	
	Hockweiler	91,32		68,22	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Oberemmeler Berg	61,20	112,05 ± 48,85	79,30	64,31 ± 12,42
	Waldweiler	123,22		68,63	
	Pellingen 1	174,68		58,67	
	Pellingen 2	89,09		50,63	
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	94,27	150,08 ± 58,04	75,46	73,44 ± 16,35
	Oberemmeler Berg	60,42		62,24	
	Waldweiler	171,37		52,87	
	Pellingen 1	198,36		72,04	
	Pellingen 2	191,70		101,20	
	Hockweiler	184,36		76,82	
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	68,32	95,97 ± 24,97	84,42	83,17 ± 16,82
	Pellingen 1	102,72		65,76	
	Pellingen 2	116,88		99,33	
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	61,50	107,75 ± 45,15	84,98	104,62 ± 87,28
	Oberemmeler Berg	45,01		56,65	
	Waldweiler	148,17		60,16	
	Pellingen 1	154,88		60,21	
	Pellingen 2	122,26		84,86	
	Hockweiler	114,70		280,87	
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	97,48	159,11 ± 83,57	62,19	64,34 ± 4,51
	Oberemmeler Berg	77,30		65,37	
	Pellingen 1	276,33		58,92	
	Pellingen 2	213,19		71,15	
	Hockweiler	131,23		64,06	
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	144,33	146,22 ± 63,99	67,21	79,22 ± 15,91
	Oberemmeler Berg	56,39		67,16	
	Pellingen 2	190,35		100,73	
	Hockweiler	193,79		81,78	
<i>Holcus lanatus</i>	Gutweiler	337,71	381,73 ± 152,82	44,17	42,77 ± 14,37
	Oberemmeler Berg	204,78		44,88	
	Waldweiler	369,33		68,45	
	Pellingen 1	556,35		40,36	
	Pellingen 2	251,19		30,18	
	Hockweiler	571,04		28,56	

Fortsetzung Tab. A14:

Art	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (g pro kg TS)							
		Phosphor		Kalium		Magnesium		Calcium	
		MW Art		MW Art		MW Art		MW Art	
2001, August									
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	1,78	1,75 ± 0,28	10,36	10,35 ± 3,39	6,24	5,73 ± 1,22	30,16	24,29 ± 4,16
	Oberemmeler Berg	1,85		6,01		7,95		24,98	
	Waldweiler	2,02		7,50		5,54		20,24	
	Pellingen 1	1,53		15,24		4,75		21,24	
	Pellingen 2	1,31		12,90		4,76		20,97	
	Hockweiler	2,01		10,09		5,15		28,15	
<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	2,19	2,02 ± 0,52	14,02	10,72 ± 2,85	4,16	4,64 ± 2,41	23,97	21,11 ± 2,71
	Oberemmeler Berg	2,38		7,95		9,51		20,79	
	Waldweiler	2,56		6,97		3,39		18,57	
	Pellingen 1	1,60		12,61		3,47		18,26	
	Pellingen 2	1,18		12,74		3,91		20,31	
	Hockweiler	2,20		10,04		3,39		24,77	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	1,96	1,87 ± 0,19	8,57	10,29 ± 2,50	3,99	3,97 ± 0,91	13,96	12,07 ± 1,86
	Oberemmeler Berg	1,77		6,83		5,08		13,93	
	Pellingen 1	1,81		11,38		3,66		9,90	
	Pellingen 2	1,66		11,90		4,46		11,97	
	Hockweiler	2,15		12,78		2,65		10,60	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	1,90	1,72 ± 0,16	8,15	8,92 ± 1,40	2,40	2,70 ± 0,27	10,70	10,75 ± 0,49
	Pellingen 1	1,64		10,53		2,87		10,29	
	Pellingen 2	1,62		8,07		2,84		11,26	
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	2,48	2,24 ± 0,37	10,32	10,56 ± 2,02	4,09	3,54 ± 0,77	13,23	12,34 ± 0,84
	Oberemmeler Berg	2,30		8,21		4,53		13,20	
	Waldweiler	2,55		8,20		3,57		11,10	
	Pellingen 1	2,02		12,59		3,49		12,08	
	Pellingen 2	1,60		11,39		3,26		12,64	
	Hockweiler	2,51		12,64		2,29		11,80	
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	2,39	2,04 ± 0,38	7,50	12,12 ± 3,10	4,93	4,47 ± 0,55	17,81	13,37 ± 2,96
	Pellingen 1	1,83		14,09		4,86		11,64	
	Pellingen 2	1,61		13,21		4,35		11,90	
	Hockweiler	2,33		13,67		3,74		12,16	
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	3,20	2,38 ± 0,79	10,63	10,88 ± 3,73	2,47	2,76 ± 0,50	19,84	17,05 ± 2,12
	Oberemmeler Berg	2,47		6,26		3,28		15,97	
	Waldweiler	1,88		7,40		2,35		15,82	
	Pellingen 1	1,72		10,79		2,85		14,67	
	Pellingen 2	1,57		15,61		3,40		16,46	
	Hockweiler	3,42		14,60		2,22		19,52	
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	3,01	2,43 ± 0,56	10,49	12,19 ± 2,58	5,89	6,16 ± 0,62	20,74	21,82 ± 1,57
	Oberemmeler Berg	2,14		9,09		6,81		23,04	
	Pellingen 1	2,17		11,97		6,66		23,54	
	Pellingen 2	1,81		13,85		6,17		19,75	
	Hockweiler	3,04		15,57		5,26		22,01	
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	3,05	2,49 ± 0,64	17,64	16,02 ± 2,14	2,91	3,34 ± 0,64	17,38	15,73 ± 1,31
	Oberemmeler Berg	2,49		15,61		3,70		14,56	
	Pellingen 2	1,59		17,68		4,04		14,80	
	Hockweiler	2,82		13,16		2,70		16,21	
<i>Holcus lanatus</i>	Gutweiler	4,06	2,60 ± 1,09	22,79	20,52 ± 5,96	1,95	2,07 ± 0,33	7,26	5,94 ± 1,01
	Oberemmeler Berg	2,25		18,82		2,61		5,99	
	Waldweiler	1,71		9,28		2,27		4,40	
	Pellingen 1	1,94		22,21		1,97		5,77	
	Pellingen 2	1,74		24,86		1,95		5,43	
	Hockweiler	3,91		25,14		1,68		6,79	

Fortsetzung Tab. A14:

Art	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (mg pro kg TS)			
		Mangan		Eisen	
2001, August			MW Art		MW Art
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	109,98	149,80 ± 26,43	83,37	76,66 ± 16,55
	Oberemmeler Berg	153,64		68,50	
	Waldweiler	180,59		59,54	
	Pellingen 1	139,54		99,62	
	Pellingen 2	138,52		59,82	
	Hockweiler	176,51		89,09	
<i>Trifolium repens</i>	Gutweiler	95,17	145,71 ± 49,00	106,17	97,19 ± 18,45
	Oberemmeler Berg	74,38		90,87	
	Waldweiler	184,21		106,17	
	Pellingen 1	177,70		87,68	
	Pellingen 2	155,00		122,65	
	Hockweiler	187,80		69,58	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	80,18	129,34 ± 57,97	71,43	114,20 ± 57,61
	Oberemmeler Berg	85,09		139,34	
	Pellingen 1	179,88		89,50	
	Pellingen 2	203,68		67,14	
	Hockweiler	97,89		203,57	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	186,53	198,87 ± 36,28	65,35	81,76 ± 22,94
	Pellingen 1	170,36		107,97	
	Pellingen 2	239,71		71,95	
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	149,50	264,40 ± 98,28	86,90	89,57 ± 8,09
	Oberemmeler Berg	161,28		89,48	
	Waldweiler	400,67		89,62	
	Pellingen 1	341,05		100,53	
	Pellingen 2	267,58		94,53	
	Hockweiler	266,32		76,32	
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	83,19	125,46 ± 29,75	95,55	97,84 ± 5,89
	Pellingen 1	148,06		106,43	
	Pellingen 2	126,22		96,35	
	Hockweiler	144,37		93,06	
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	59,67	84,09 ± 25,37	50,74	51,58 ± 9,72
	Oberemmeler Berg	49,99		46,93	
	Waldweiler	97,86		47,48	
	Pellingen 1	80,48		38,38	
	Pellingen 2	101,61		62,79	
	Hockweiler	114,90		63,15	
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	116,59	222,58 ± 106,45	55,65	57,00 ± 7,60
	Oberemmeler Berg	120,03		48,81	
	Pellingen 1	314,58		69,20	
	Pellingen 2	345,36		57,92	
	Hockweiler	216,36		53,43	
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	201,63	284,47 ± 162,52	103,69	100,38 ± 11,86
	Oberemmeler Berg	166,83		83,35	
	Pellingen 2	523,34		103,57	
	Hockweiler	246,06		110,90	
<i>Holcus lanatus</i>	Gutweiler	406,17	541,01 ± 98,64	92,04	105,52 ± 10,46
	Oberemmeler Berg	438,76		106,46	
	Waldweiler	544,52		110,19	
	Pellingen 1	584,07		121,89	
	Pellingen 2	636,15		105,70	
	Hockweiler	636,38		96,87	

Fortsetzung Tab. A14:

Art	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (g pro kg TS)							
		Phosphor		Kalium		Magnesium		Calcium	
		MW Art		MW Art		MW Art		MW Art	
2002, Juni									
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	2,03	1,75 ± 0,34	6,02	10,12 ± 3,14	4,84	3,52 ± 0,76	21,23	13,23 ± 3,24
	Gusterath 1	1,74		8,52		3,77		15,17	
	Gusterath 2	1,62		10,76		3,33		10,12	
	Oberemmeler Berg	1,50		7,84		4,74		12,94	
	Waldweiler	1,63		7,80		3,59		14,44	
	Pellingen 1	1,46		9,38		3,19		12,22	
	Pellingen 2	1,34		10,70		3,18		12,47	
	Hockweiler	2,49		17,44		2,58		10,58	
	Muhl 1	1,69		12,07		2,70		10,74	
	Pellingen 3	1,99		10,64		3,30		12,42	
<i>Trifolium repens</i>	Gusterath 1	1,65	1,85 ± 0,45	10,16	10,42 ± 5,93	4,08	3,27 ± 0,77	20,70	17,47 ± 3,48
	Oberemmeler Berg	1,79		7,52		4,15		17,16	
	Pellingen 1	1,35		1,09		2,98		17,50	
	Hockweiler	2,67		18,48		2,14		12,69	
	Muhl 1	1,68		14,32		2,89		14,83	
	Pellingen 3	1,97		10,95		3,39		21,97	
<i>Trifolium dubium</i>	Gutweiler	2,13	1,69 ± 0,35	5,21	6,21 ± 1,04	2,60	2,45 ± 0,22	12,75	10,42 ± 1,46
	Gusterath 1	1,43		6,22		2,28		11,86	
	Gusterath 2	1,52		6,58		2,35		8,47	
	Oberemmeler Berg	1,91		5,61		2,85		10,59	
	Pellingen 1	1,30		6,32		2,24		9,56	
	Pellingen 2	1,44		8,25		2,31		9,75	
	Pellingen 3	2,13		5,31		2,48		9,97	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	1,88	1,94 ± 0,58	7,17	9,72 ± 4,79	2,38	3,07 ± 0,47	9,97	10,28 ± 1,73
	Gusterath 1	1,70		6,18		3,69		13,60	
	Gusterath 2	1,64		7,70		3,10		8,78	
	Oberemmeler Berg	1,81		8,73		3,30		9,51	
	Pellingen 1	1,60		7,86		3,05		11,49	
	Pellingen 2	1,55		11,67		3,49		10,28	
	Hockweiler	3,33		20,88		2,40		7,94	
	Pellingen 3	2,04		7,60		3,14		10,66	
<i>Lotus uliginosus</i>	Waldweiler	2,13		7,53		2,91		8,41	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	2,03	1,91 ± 0,23	8,35	10,55 ± 3,09	1,83	1,87 ± 0,25	8,38	7,09 ± 1,30
	Pellingen 1	1,83		8,85		2,07		6,92	
	Pellingen 2	1,62		9,94		2,04		7,71	
	Muhl 1	2,15		15,08		1,53		5,37	
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	2,81	2,37 ± 0,52	7,65	11,14 ± 2,75	2,75	2,46 ± 0,34	9,78	8,03 ± 0,79
	Gusterath 2	2,11		11,21		2,44		7,94	
	Oberemmeler Berg	2,02		9,28		3,09		8,19	
	Waldweiler	2,68		10,50		2,27		7,35	
	Pellingen 1	2,11		10,15		2,52		7,87	
	Pellingen 2	1,74		11,14		2,37		7,73	
	Hockweiler	3,31		17,06		1,95		8,15	
	Muhl 1	2,18		12,17		2,30		7,22	
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	3,11	2,40 ± 0,57	8,32	10,53 ± 2,93	3,20	2,71 ± 0,60	9,07	7,35 ± 1,60
	Gusterath 2	2,10		9,69		2,84		6,83	
	Pellingen 1	2,01		9,08		3,22		8,74	
	Pellingen 2	1,86		9,93		2,53		6,95	
	Hockweiler	2,92		15,66		1,76		5,14	
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	2,57	2,17 ± 0,73	7,35	9,96 ± 4,18	1,95	2,41 ± 0,39	17,09	13,19 ± 2,39
	Gusterath 1	2,34		7,83		2,53		16,04	
	Gusterath 2	1,55		9,30		2,76		12,39	
	Oberemmeler Berg	1,78		5,89		2,82		15,02	
	Waldweiler	1,95		5,73		2,17		14,14	
	Pellingen 1	1,51		6,42		2,22		11,84	
	Pellingen 2	1,63		13,74		2,95		10,81	
	Hockweiler	3,54		18,36		2,00		11,05	
	Muhl 1	1,61		13,24		1,98		9,91	
	Pellingen 3	3,25		11,75		2,69		13,63	

Fortsetzung Tab. A14:

Art 2002, Juni	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (g pro kg TS)							
		Phosphor		Kalium		Magnesium		Calcium	
		MW Art		MW Art		MW Art		MW Art	
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	2,22	2,05 ± 0,46	7,21	9,34 ± 2,93	4,38	4,54 ± 0,54	16,90	16,50 ± 1,95
	Gusterath 1	2,04		8,46		5,10		17,91	
	Gusterath 2	1,71		7,86		4,76		13,53	
	Oberemmeler Berg	1,79		6,80		4,95		17,07	
	Pellingen 1	1,64		7,75		4,59		17,45	
	Pellingen 2	1,68		10,08		4,89		17,56	
	Hockweiler	2,94		15,71		3,41		13,31	
	Pellingen 3	2,42		10,87		4,21		18,28	
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	2,76	2,33 ± 0,41	13,75	13,83 ± 1,84	2,41	2,61 ± 0,44	13,39	12,78 ± 1,31
	Gusterath 1	1,82		13,43		2,23		13,34	
	Gusterath 2	2,00		12,59		2,89		11,61	
	Oberemmeler Berg	2,12		12,00		3,24		12,09	
	Hockweiler	2,80		17,28		2,09		11,40	
	Pellingen 3	2,49		13,95		2,82		14,82	
<i>Centaurea nigra</i> agg.	Gutweiler	1,76	2,07 ± 0,45	7,42	12,03 ± 3,83	2,02	2,31 ± 0,20	9,87	9,66 ± 0,99
	Gusterath 1	2,01		11,41		2,14		10,82	
	Gusterath 2	1,76		9,32		2,44		8,05	
	Oberemmeler Berg	1,88		13,57		2,48		9,21	
	Pellingen 1	1,84		10,27		2,23		8,98	
	Pellingen 2	1,76		11,33		2,30		9,22	
	Hockweiler	2,90		20,23		2,27		11,01	
	Pellingen 3	2,63		12,68		2,64		10,09	
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Gutweiler	2,66	2,15 ± 0,47	11,10	13,17 ± 2,39	2,74	2,75 ± 0,38	7,52	7,86 ± 0,81
	Gusterath 1	2,31		12,82		3,04		9,13	
	Gusterath 2	1,96		13,32		2,73		6,54	
	Oberemmeler Berg	1,99		13,79		3,01		7,30	
	Waldweiler	2,13		9,28		3,17		8,32	
	Pellingen 1	1,74		10,42		2,84		7,43	
	Pellingen 2	1,54		14,51		2,83		8,05	
	Hockweiler	2,94		17,33		1,99		7,86	
	Muhl 1	1,68		15,30		2,19		7,43	
	Pellingen 3	2,61		13,86		2,94		9,06	
<i>Leontodon hispidus</i>	Gusterath 1	2,57	2,05 ± 0,36	14,04	16,55 ± 3,88	5,48	5,24 ± 1,19	24,13	20,44 ± 2,62
	Oberemmeler Berg	2,14		14,74		7,01		20,71	
	Waldweiler	1,76		14,12		5,38		21,89	
	Pellingen 1	1,89		13,61		5,58		19,64	
	Pellingen 2	1,62		19,90		4,53		20,06	
	Muhl 1	2,30		22,86		3,44		16,23	
<i>Hypericum perforatum</i>	Gutweiler	3,04	2,86 ± 0,64	9,54	10,57 ± 2,21	1,32	1,76 ± 0,43	4,51	4,81 ± 0,72
	Gusterath 1	2,34		8,71		2,25		5,93	
	Gusterath 2	2,07		10,85		2,20		5,03	
	Hockweiler	3,61		14,27		1,56		4,03	
	Pellingen 3	3,26		9,49		1,48		4,55	
<i>Hypericum maculatum</i>	Oberemmeler Berg	1,96	1,88 ± 0,11	10,64	10,49 ± 1,74	2,81	2,45 ± 0,44	5,95	6,49 ± 1,14
	Waldweiler	1,82		8,52		2,27		7,27	
	Pellingen 1	1,98		10,08		2,79		7,59	
	Muhl 1	1,74		12,73		1,90		5,16	

Fortsetzung Tab. A14:

Art	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (mg pro kg TS)			
		Mangan		Eisen	
			MW Art		MW Art
2002, Juni					
<i>Trifolium pratense</i>	Gutweiler	102,35	84,07 ± 24,2532	56,39	58,85 ± 10,59
	Gusterath 1	91,79		86,06	
	Gusterath 2	58,70		48,92	
	Oberemmeler Berg	55,04		53,07	
	Waldweiler	139,14		55,93	
	Pellingen 1	78,60		58,26	
	Pellingen 2	80,94		52,73	
	Hockweiler	65,58		56,25	
	Muhl 1	84,02		66,51	
	Pellingen 3	84,58		54,39	
<i>Trifolium repens</i>	Gusterath 1	138,03	119,75 ± 27,44864386	71,22	66,02 ± 7,06
	Oberemmeler Berg	79,06		68,72	
	Pellingen 1	107,93		65,09	
	Hockweiler	113,60		53,46	
	Muhl 1	120,13		64,30	
	Pellingen 3	159,75		73,34	
<i>Trifolium dubium</i>	Gutweiler	101,74	131,64 ± 35,43621619	64,72	75,08 ± 16,73
	Gusterath 1	153,15		69,28	
	Gusterath 2	111,88		82,43	
	Oberemmeler Berg	82,25		71,09	
	Pellingen 1	186,77		64,75	
	Pellingen 2	137,51		110,05	
	Pellingen 3	148,18		63,27	
<i>Lotus corniculatus</i>	Gutweiler	53,90	94,37 ± 40,89026164	64,24	68,87 ± 10,85
	Gusterath 1	109,60		83,71	
	Gusterath 2	67,64		53,05	
	Oberemmeler Berg	56,77		62,55	
	Pellingen 1	104,76		82,07	
	Pellingen 2	181,36		63,02	
	Hockweiler	91,07		65,12	
	Pellingen 3	89,88		77,20	
<i>Lotus uliginosus</i>	Waldweiler	96,95		70,34	
<i>Lathyrus linifolius</i>	Waldweiler	149,48	138,46 ± 25,26719866	61,58	64,22 ± 9,60
	Pellingen 1	100,81		76,98	
	Pellingen 2	148,48		53,90	
	Muhl 1	155,07		64,41	
<i>Vicia cracca</i>	Gutweiler	94,48	139,53 ± 45,26396061	55,84	71,99 ± 16,68
	Gusterath 2	115,14		68,98	
	Oberemmeler Berg	91,11		69,55	
	Waldweiler	223,88		74,45	
	Pellingen 1	157,58		78,05	
	Pellingen 2	164,19		56,16	
	Hockweiler	109,62		64,56	
	Muhl 1	160,26		108,38	
<i>Vicia sepium</i>	Gutweiler	65,93	70,68 ± 15,46003836	55,85	70,68 ± 10,48
	Gusterath 2	51,94		65,17	
	Pellingen 1	72,65		83,29	
	Pellingen 2	94,61		74,79	
	Hockweiler	68,29		74,30	
<i>Plantago lanceolata</i>	Gutweiler	47,16	80,35 ± 20,55702519	48,94	61,90 ± 14,49
	Gusterath 1	94,41		85,59	
	Gusterath 2	65,84		48,73	
	Oberemmeler Berg	50,60		50,59	
	Waldweiler	87,49		56,64	
	Pellingen 1	93,72		75,83	
	Pellingen 2	102,16		46,56	
	Hockweiler	104,84		77,75	
	Muhl 1	71,67		72,54	
	Pellingen 3	85,60		55,77	

Fortsetzung Tab. A14:

Art 2002, Juni	Fläche	Nährstoffgehalte in der Sprossmasse (mg pro kg TS)					
		Mangan		Eisen			
		MW Art		MW Art			
<i>Sanguisorba minor</i>	Gutweiler	68,03	140,31 ± 68,219	40,35	87,51 ± 116,18		
	Gusterath 1	150,58		52,50			
	Gusterath 2	122,94		39,46			
	Oberemmeler Berg	78,69		39,03			
	Pellingen 1	182,64		374,61			
	Pellingen 2	283,09		49,46			
	Hockweiler	117,94		55,69			
	Pellingen 3	118,60		48,99			
<i>Galium mollugo</i>	Gutweiler	101,60	162,57 ± 41,536	49,12	65,76 ± 14,19		
	Gusterath 1	178,35		66,32			
	Gusterath 2	151,64		66,39			
	Oberemmeler Berg	140,19		65,08			
	Hockweiler	179,95		56,51			
	Pellingen 3	223,71		91,13			
<i>Centaurea nigra</i> agg.	Gutweiler	41,00	86,53 ± 53,283	70,90	66,75 ± 10,24		
	Gusterath 1	75,57		85,23			
	Gusterath 2	81,51		55,49			
	Oberemmeler Berg	47,20		62,31			
	Pellingen 1	91,19		76,23			
	Pellingen 2	211,27		56,02			
	Hockweiler	64,55		61,98			
	Pellingen 3	79,93		65,84			
<i>Leucanthemum vulgare</i>	Gutweiler	73,88	130,52 ± 43,012	89,07	101,12 ± 45,91		
	Gusterath 1	130,52		69,00			
	Gusterath 2	109,93		49,38			
	Oberemmeler Berg	63,39		60,50			
	Waldweiler	186,89		136,32			
	Pellingen 1	139,38		151,28			
	Pellingen 2	188,50		53,08			
	Hockweiler	163,90		85,69			
	Muhl 1	143,18		175,64			
	Pellingen 3	105,65		141,28			
<i>Leontodon hispidus</i>	Gusterath 1	107,47	153,92 ± 70,928	80,47	81,29 ± 9,01		
	Oberemmeler Berg	62,51		84,81			
	Waldweiler	234,94		88,00			
	Pellingen 1	134,05		78,74			
	Pellingen 2	240,95		65,25			
	Muhl 1	143,61		90,45			
<i>Hypericum perforatum</i>	Gutweiler	92,23	178,27 ± 84,431	41,18	52,94 ± 9,92		
	Gusterath 1	317,22		66,61			
	Gusterath 2	179,61		58,35			
	Hockweiler	164,00		46,79			
	Pellingen 3	138,27		51,78			
<i>Hypericum maculatum</i>	Oberemmeler Berg	132,90	183,19 ± 54,931	45,12	57,50 ± 17,45		
	Waldweiler	255,45		58,60			
	Pellingen 1	195,23		81,79			
	Muhl 1	149,18		44,50			

Tab. A15: Prozentuale N-Gehalte in der oberirdischen Biomasse der funktionellen Gruppen (Leguminosen, sonstige Kräuter, Gräser), Erntetermine Juni 2001 und Juni 2002, Werte für jede Ernteparzelle.

2001, Juni					2001, Juni				
N-Gehalt (%) im Spross					N-Gehalt (%) im Spross				
	Parzelle	Kräuter	Gräser	Legumi- nosen		Parzelle	Kräuter	Gräser	Legumi- nosen
Gutweiler	a	1,5	1,2	3,4	Pellingen 1	a	1,9	1,6	3,1
	b	1,6	1,2	2,5		b	2,1	1,6	3,4
	c	1,6	1,3	n.v.		c	1,9	1,6	3,3
	d	1,8	1,3	3,3		d	1,9	1,7	3,3
	e	1,7	1,3	3,4		e	2,0	1,6	3,5
	f	1,6	1,2	3,3		f	2,0	1,5	3,2
	g	1,6	1,2	3,3		g	1,9	1,5	3,1
	h	1,7	1,4	3,0		h	1,7	1,5	3,2
Oberemmeler Berg	a	1,9	1,6	3,5	Pellingen 2	a	2,0	1,5	3,0
	b	2,0	1,5	4,0		b	1,8	1,7	3,4
	c	2,1	1,8	4,2		c	1,8	1,6	2,5
	d	1,9	1,5	3,6		d	1,9	1,5	3,9
	e	2,0	1,7	3,7		e	1,6	1,3	3,1
	f	2,0	1,7	4,0		f	1,9	1,5	3,0
	g	1,8	1,5	3,2		g	1,5	1,4	2,7
	h	1,9	1,7	4,4		h	1,7	1,4	3,2
Waldweiler	i	1,8	1,5	3,7	Hockweiler	a	1,7	1,1	2,6
	a	2,0	1,6	3,4		b	1,5	1,3	2,4
	b	2,3	1,7	3,3		c	1,5	1,4	2,5
	c	1,9	2,0	3,5		d	1,5	1,2	3,1
	d	2,2	1,8	3,4		e	1,7	1,2	2,7
	e	1,9	1,7	3,6		f	1,7	1,2	2,8
	f	2,3	1,7	3,5		g	1,7	1,3	2,8
	g	2,1	1,7	3,6		h	1,4	1,3	3,4
	h	2,0	1,6	4,5					

Fortsetzung Tab. A15:

2002, Juni		N-Gehalt (%) im Spross		
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Legumi- nosen
Gutweiler	1	1,5	1,4	2,9
	2	1,2	1,2	3,0
	3	1,5	1,2	3,9
	4	1,3	1,2	3,3
	5	1,4	1,3	3,4
	6	1,3	1,2	3,8
	7	1,5	1,3	4,0
	8	1,4	1,3	3,8
	9	1,3	1,3	2,8
	10	1,3	1,2	3,0
	11	1,2	1,2	2,3
	12	1,2	1,3	n.v.
	13	1,5	1,3	3,2
	14	1,3	1,1	3,1
	15	1,8	1,2	2,5
	16	1,4	1,2	n.v.
	17	1,3	1,2	n.v.
	18	1,4	1,2	2,3
	19	1,5	1,3	3,6
	20	1,4	1,3	3,2
Gusterath 1	1	1,6	1,5	3,1
	2	1,5	1,4	2,7
	3	1,6	1,3	2,8
	4	1,7	1,4	2,7
	5	1,6	1,6	2,7
	6	1,6	1,4	3,2
	7	1,5	1,4	3,0
	8	1,7	1,5	3,1
	9	1,6	1,4	2,8
	10	1,6	1,5	3,3
	11	1,4	1,3	2,8
	12	1,5	1,4	2,8
	13	1,6	1,5	2,8
	14	1,8	1,6	2,9
	15	1,5	1,3	3,3
	16	1,6	1,6	3,4
	17	1,8	1,4	3,0
	18	1,5	1,4	3,3
	19	1,6	1,4	3,2
	20	1,6	1,5	3,3
Gusterath 2	1	1,8	1,6	n.v.
	2	1,7	1,4	3,7
	3	1,7	1,3	3,4
	4	1,8	1,5	3,1
	5	1,5	1,4	3,2
	6	1,6	1,7	3,3
	7	1,7	1,5	3,4
	8	1,6	1,3	3,3
	9	1,6	1,5	3,1
	10	1,7	1,6	3,3
	11	1,7	1,7	3,3
	12	1,7	1,5	3,1
	13	1,8	1,6	3,2
	14	1,6	1,5	3,1
	15	1,6	1,3	3,3
	16	1,6	1,4	2,9
	17	1,9	1,5	2,9
	18	1,7	1,5	2,9
	19	1,6	1,4	2,9
	20	1,6	1,4	3,0
Gusterath 3	1	1,8	1,5	n.v.
	2	1,9	1,8	n.v.
	3	1,7	1,5	3,3
	4	2,0	1,5	3,0
	5	1,8	1,4	3,0
	6	1,4	1,4	3,6
	7	1,8	1,5	3,3
	8	1,6	1,4	3,2
	9	1,7	1,6	3,2
	10	1,6	1,6	3,8
2002, Juni		N-Gehalt (%) im Spross		
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Legumi- nosen
Gusterath 3 (Forts.)	11	1,9	1,8	3,3
	12	1,8	1,5	3,0
	13	1,5	1,6	3,1
	14	1,6	1,5	2,6
	15	1,9	1,6	2,9
	16	1,8	1,3	2,9
	17	1,7	1,6	3,0
	18	1,7	1,4	4,0
	19	1,5	1,6	3,1
	20	1,7	1,5	3,2
Hockweiler	1	2,4	2,0	2,7
	2	2,7	2,0	3,7
	3	2,3	2,0	3,1
	4	1,7	2,5	3,7
	5	2,2	2,2	n.v.
	6	2,5	2,5	n.v.
	7	2,1	2,5	4,4
	8	2,1	2,2	n.v.
	9	2,3	2,4	n.v.
	10	2,5	2,4	n.v.
Pellingen 1	1	1,5	1,4	2,9
	2	1,6	1,4	3,0
	3	1,5	1,5	2,7
	4	1,5	1,4	2,6
	5	1,4	1,3	2,8
	6	1,4	1,4	3,6
	7	1,3	1,3	2,3
	8	1,4	1,5	4,1
	9	1,4	1,3	2,7
	10	1,5	1,5	2,8
Pellingen 2	11	1,3	1,5	2,8
	12	1,5	1,4	4,0
	13	1,7	1,6	2,6
	14	1,4	1,4	3,4
	15	1,4	1,4	2,6
	16	1,4	1,3	n.v.
	17	1,5	1,2	3,4
	18	1,3	1,6	n.v.
	19	1,5	1,6	3,7
	20	1,3	1,4	3,1
Pellingen 3	21	1,5	1,6	3,6
	22	1,3	1,4	3,2
	23	1,5	1,3	2,8
	24	1,6	1,4	2,9
	25	1,5	1,5	3,2
	26	1,4	1,3	3,3
	27	1,8	1,5	3,2
	28	1,8	1,6	3,1
	29	1,6	1,5	3,3
	30	1,8	1,4	4,4
Pellingen 3	31	1,7	1,4	3,6
	32	1,8	1,5	4,0
	33	1,6	1,7	3,2
	34	1,4	1,4	3,0
	35	1,4	1,4	3,5
	36	1,7	1,5	n.v.
	37	1,4	1,4	3,2
	38	1,6	1,4	3,1
	39	1,5	1,4	3,5
	40	1,8	1,5	3,3
Pellingen 3	1	1,5	1,7	3,2
	2	1,7	1,4	2,7
	3	1,7	1,4	2,7
	4	1,7	1,4	2,9
	5	1,5	1,5	2,6
	6	1,5	1,4	2,7
	7	1,5	1,3	2,4
	8	1,5	1,3	2,6
	9	1,7	1,5	2,6
	10	1,6	1,4	2,9

Fortsetzung Tab. A15:

2002, Juni		N-Gehalt (%) im Spross		
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Legumi- nosen
Pellingen 3 (Forts.)	11	2,3	1,7	3,3
	12	1,8	1,7	n.v.
	13	2,0	1,4	3,8
	14	2,1	1,7	2,6
	15	2,0	1,6	n.v.
Pellingen 4	1	2,1	1,9	3,2
	2	2,3	1,9	3,2
	3	2,2	2,0	3,3
	4	2,0	1,9	3,0
	5	2,1	1,9	3,6
	6	1,8	2,0	3,0
	7	1,8	1,8	3,0
	8	2,1	2,0	4,2
	9	2,3	2,0	3,7
	10	1,9	1,9	4,1
	11	2,1	1,9	3,4
	12	2,0	1,7	3,2
	13	1,9	2,0	2,8
	14	2,0	2,3	3,0
	15	2,0	2,2	2,8
	16	2,3	2,2	3,2
	17	2,0	2,0	3,0
	18	2,1	1,9	n.v.
	19	2,0	1,9	2,7
	20	1,9	1,7	2,9
Pellingen 5	1	1,4	1,4	4,2
	2	1,4	1,5	4,2
	3	1,5	1,4	3,6
	4	1,4	1,4	4,2
Oberemmeler Berg	1	1,9	1,2	3,3
	2	1,5	1,4	3,2
	3	1,8	1,5	3,3
	4	1,8	1,3	2,9
	5	1,7	1,7	3,4
	6	1,6	1,7	3,6
	7	1,7	1,7	2,6
	8	1,6	1,6	2,7
	9	1,5	1,3	3,5
	10	1,4	1,4	3,5
	11	1,6	1,2	3,4
	12	1,4	1,4	3,5
	13	1,4	1,2	3,4
	14	1,5	1,5	n.v.
	15	1,4	1,4	4,2
	16	1,5	1,4	3,7
	17	1,7	1,5	3,8
	18	1,7	1,6	4,2
	19	1,8	1,4	3,9
	20	1,5	1,5	n.v.
Waldweiler	1	1,8	1,8	n.v.
	2	1,6	1,4	3,4
	3	1,7	2,1	3,1
	4	1,7	2,0	3,8
	5	2,0	1,6	4,4
	6	1,7	2,0	n.v.
	7	2,1	1,9	3,6
	8	2,4	2,0	3,3
	9	1,7	2,0	3,3
	10	2,1	2,0	3,6
	11	1,9	2,0	3,5
	12	2,3	1,8	3,7
	13	1,7	1,7	3,9
	14	1,7	1,7	3,9
	15	1,8	1,7	3,8
	16	1,9	1,7	3,6

2002, Juni		N-Gehalt (%) im Spross		
Fläche	Parzelle	Kräuter	Gräser	Legumi- nosen
Waldweiler (Forts.)	17	1,8	1,6	3,6
	18	2,2	1,8	3,5
	19	1,9	1,9	3,6
	20	2,8	2,4	4,1
Züsch 2	1	2,1	1,4	2,7
	2	1,6	1,3	3,0
	3	1,6	1,6	3,6
	4	1,4	1,5	n.v.
	5	1,7	1,6	3,6
	6	1,5	1,7	2,7
	7	1,7	1,7	n.v.
	8	1,2	1,6	3,6
	9	2,1	1,7	3,4
	10	1,9	1,5	3,5
	11	2,1	1,5	3,2
	12	2,2	1,7	3,1
	13	1,9	1,6	n.v.
	14	1,6	1,6	3,3
	15	2,0	1,6	3,9
	16	2,0	1,6	n.v.
	17	1,5	1,6	3,3
	18	2,0	1,7	2,9
	19	1,4	1,4	2,6
	20	1,9	1,4	3,1
Muhl 1	1	2,2	2,2	3,7
	2	2,1	2,0	3,3
	3	3,0	2,0	3,5
	4	2,1	1,9	3,4
	5	2,0	2,1	3,4
Muhl 2	6	2,2	1,7	3,4
	7	1,8	1,7	3,1
	8	1,8	1,8	3,6
	9	2,6	2,0	3,1
	10	2,0	2,0	3,6
	11	2,2	2,0	3,0
	12	2,0	2,0	3,3
	13	2,0	1,9	3,4
	14	2,3	2,0	3,3
	15	2,0	1,9	3,1
	16	2,3	1,9	3,4
	17	2,6	2,2	3,7
	18	2,3	2,2	3,3
	19	2,3	2,1	3,2
	20	1,8	1,8	n.v.
	1	2,1	1,5	n.v.
	2	2,3	1,5	3,4
	3	1,7	1,8	3,5
	4	2,3	1,9	3,4
	5	2,2	2,3	3,6
	6	1,8	2,2	3,8
	7	2,6	2,2	3,1
	8	2,4	2,1	3,7
	9	2,8	2,5	3,8
	10	2,6	2,8	4,0
	11	2,0	2,3	3,6
	12	2,8	2,0	3,6
	13	2,4	1,6	3,5
	14	2,0	1,9	3,7
	15	1,8	1,9	4,0
	16	2,4	2,2	4,0
	17	2,3	1,8	4,1
	18	2,4	1,7	3,9
	19	2,2	1,5	3,6
	20	2,0	1,6	3,6

n.v.: keine Leguminosen in Ernteparzelle enthalten

Tab. A16: Jahressumme der symbiotisch fixierten N-Menge der sechs Hauptuntersuchungsflächen bei zwei Schnitt-Terminen (Juni und August 2001).

Fläche	Symbiotisch fixierte N-Menge (kg Nfix ha ⁻¹) bei zweimaligem Schnitt der Wiesen (Erntejahr 2001)		
	Juni ¹⁾	August ²⁾	Summe
Oberemmeler Berg	4,5	2,5	7,0
Pellingen 2	3,4	4,0	7,4
Pellingen 1	5,3	3,0	8,3
Gutweiler	4,3	5,8	10,1
Hockweiler	6,7	6,3	13,0
Waldweiler	13,8	7,3	21,1

¹⁾ Berechnung siehe Kap. 5.6.2.3, Referenzvariante *Plantago lanceolata*, B-Wert = 0 ‰

²⁾ Schätzung für August 2001 mittels Leguminosen-Spross-TM und Annahme einer Fixierleistung von 2,5 kg fixiertem N je dt Leguminosen-Sproßmasse

Tab. A17: Weitere Bodeneigenschaften der sechs Hauptuntersuchungsflächen, Nomenklatur nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (AG BODEN 1994).

Fläche	Gestein	Bodentyp	Bodenart	Gründigkeit Spanne (cm)
Gutweiler	Hunsrück-Schiefer	Braunerde	Lu	-10 bis -15
Hockweiler	Hunsrückschiefer, reiner schwach-sandiger Tonschiefer, vereinzelt quarzitischer Sandstein	Braunerde	Lu	-2 bis -13
Pellingen 1	Hunsrück-Schiefer und Aufschüttungen durch Strassenbau	Braunerde	Lu	-10 bis -28
Pellingen 2	Hunsrück-Schiefer	Braunerde	Lu	-6 bis -17
Oberemmeler Berg	Hunsrück-Schiefer	Braunerde	Lu	-6 bis -20
Waldweiler	Hangschutt, steinige und lehmige Verwitterungsmassen	Pseudogley-Braunerde	Ls2	-20 bis -40

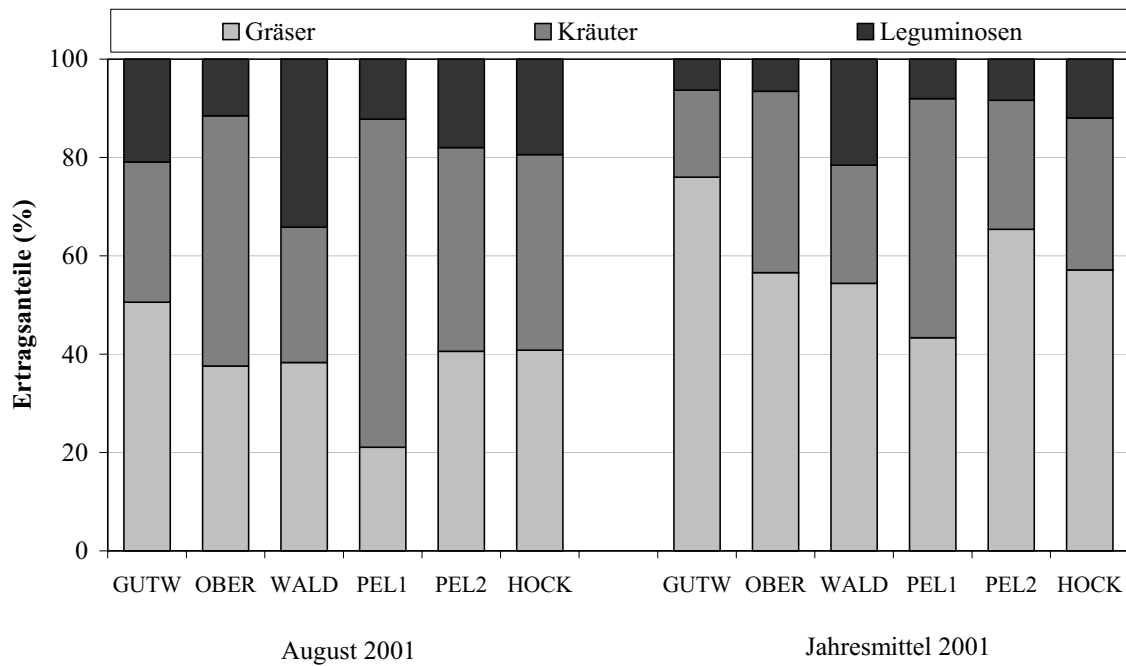


Abb. A1: Massenanteile der funktionellen Gruppen an der August-Ernte und Mittelwerte aus beiden Ernten 2001 (Juni + August) auf den sechs Hauptuntersuchungsflächen.

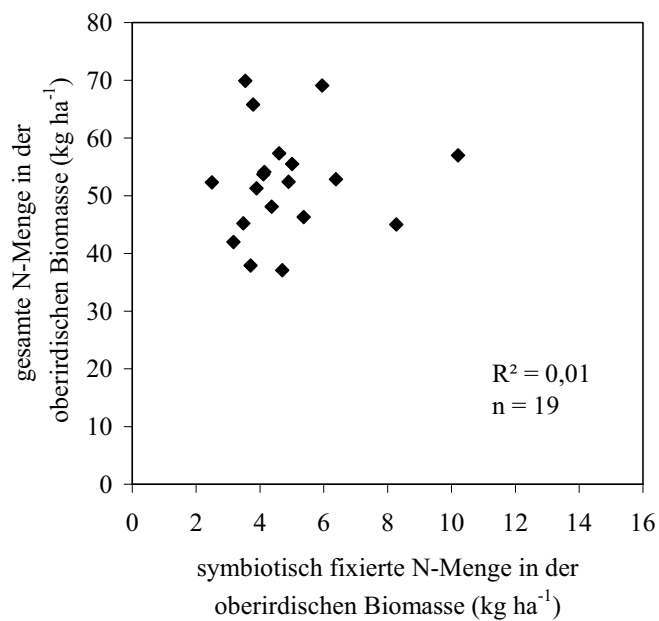


Abb. A2: Regression der N-Menge in der oberirdischen Biomasse der Wiesen und der symbiotisch fixierten N-Mengen der Haupt- und Nebenuntersuchungsflächen im Juni der Jahre 2001 und 2002 (berechnet mit Kräuter + Gräser als Referenz, ohne B-Wert, nur gültige Werte).

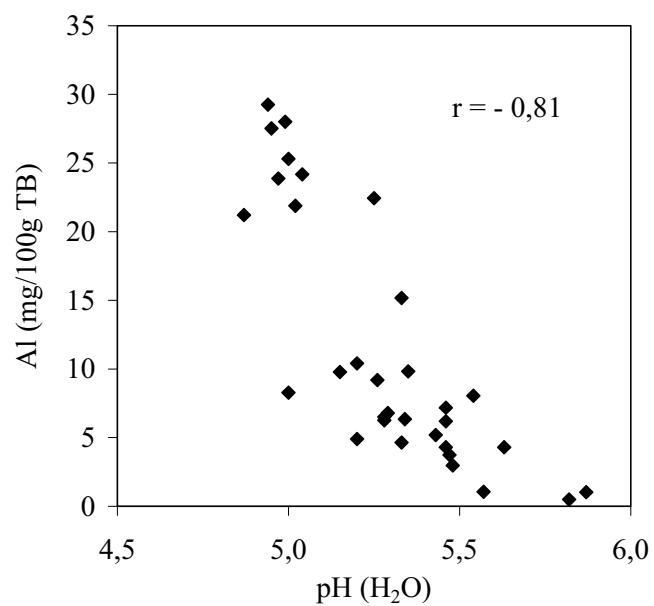


Abb. A3: Korrelation der pH-Werte mit den Aluminiumkonzentrationen der Wiesenböden (16 Standorte) in den Profiltiefen 0–5 und 5–10 cm.

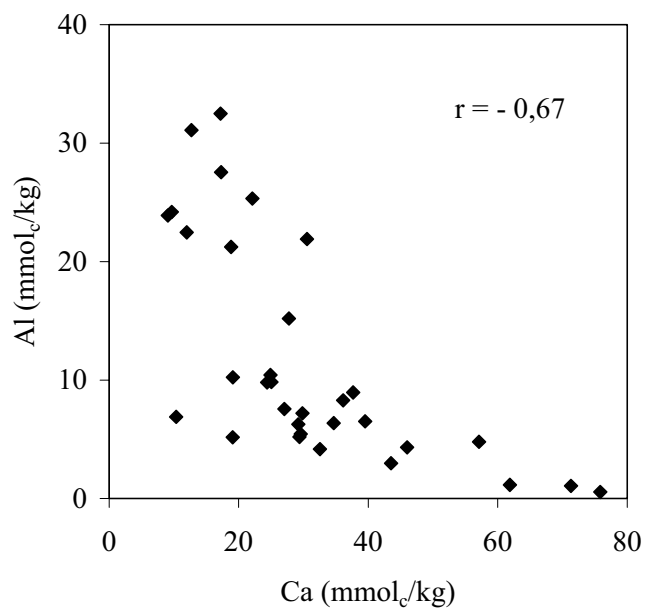


Abb. A4: Korrelation der Calcium- mit den Aluminiumkonzentration der Wiesenböden (16 Standorte) in den Profiltiefen 0–5 und 5–10 cm.

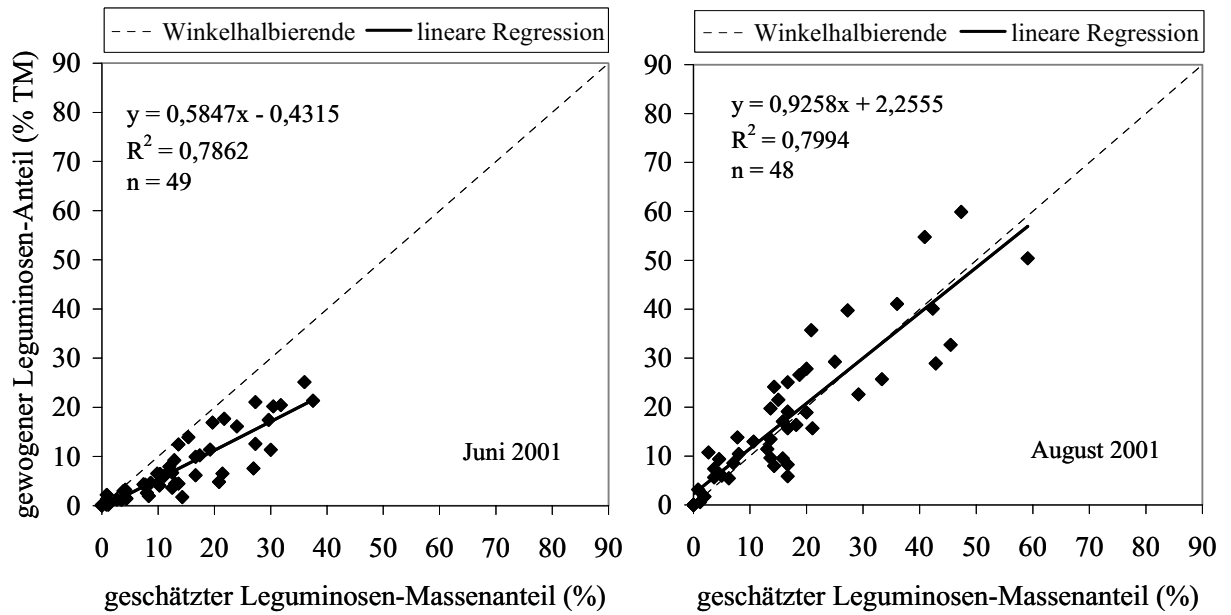


Abb. A5 a und b: Vergleich der Ergebnisse der Leguminosen-Anteilsschätzung im Juni 2001 (linke Graphik) und im August 2001 (rechte Graphik) mit der Anteilsermittlung über die Trockenmassenbestimmung.

Beschreibung der beiden Versuchsvarianten im Kulturversuch

Die Samen aller Leguminosenarten wurden ca. 30 min in H₂O₂ sterilisiert und mehrmals mit destilliertem Wasser gespült. Die *Lotus*-, *Vicia*- und *Lathyrus*-Samen wurden mit einer Rasierklinge angeritzt, damit das Wasser besser in die Samenschale dringen konnte. Die Samen wurden dann 24 Stunden zum Vorquellen im Wasser belassen.

Versuchsvariante 1: Beimpfung mit Radicin®-Produkten (VarR)

Die vorgequollenen Samen der *Trifolium*-Arten wurden kurz in der vom Hersteller (Firma Jost GmbH, Iserlohn) empfohlenen Radicin-Rhizobienlösung geschwenkt und dann in die mit Vermiculit befüllten Töpfe (Maße 18*18 cm, 5 Liter) ausgelegt (etwa 0,5 cm tief). Entsprechend der Keimrate wurden bis zu 125 Samen pro Gefäß ausgesät. Die Töpfe wurden mit verdünnter Radicin-Lösung (1:5 mit H₂O dest.) angegossen. Nach ein- bis zweiwöchiger Kulturdauer wurden die Pflanzen in den Gefäßen auf je 25 pro Topf vereinzelt bzw. in Töpfen mit wenigen Keimlingen wurden Pflanzen nachgesetzt. Die *Vicia*-, *Lotus*- und *Lathyrus*-Samen wurden nach dem Vorquellen in Petrischalen zum Keimen ausgelegt und erst nach Entwicklung einer Keimwurzel in Vermiculit eingesetzt. Dies brachte einen besseren Keimerfolg und eine gleichmäßigere Verteilung der Pflanzen im Topf. Das Angießen mit verdünnter Bakterienlösung wurde in den ersten Versuchswochen mehrfach wiederholt.

Versuchsvariante 2: Beimpfung mit verdünntem Bodenextrakt (VarB)

Die sterilisierten und vorgequollenen Samen wurden in Petrischalen auf mit dest. Wasser befeuchtetem Filterpapier vorgekeimt. Die gekeimten Pflanzen wurden in die Versuchsgefäße (Maße 11*11*12 cm) eingesetzt (in 4 Parallelen). Für den Bodenextrakt wurde ca. 180 g ungesiebter Frischboden einer ungedüngten Wiese (Mischung aus Bodenproben, die mit *Lathyrus linifolius*, *Lotus corniculatus*, *Trifolium pratense* und den beiden *Vicia*-Arten durchwurzelt waren) mit 500 ml H₂O dest. versetzt und durch 5 minütiges Schütteln in einer PE-Flasche gut durchmischt. Das Gemisch wurde zum Absetzen der Bodenpartikel über Nacht stehen gelassen. Der wässrige Bodenextrakt wurde schließlich vorsichtig abdekantiert. Jeder Topf wurde mit ca. 15 ml Extrakt angegossen. Alle Töpfe wurden nach Bedarf reichlich mit der N-freien Nährlösung gegossen.

Zuerst 14täglich später wöchentlich wurden die Töpfe mit etwa 2 Litern destilliertem Wasser durchgespült, um Wurzelausscheidungen der Pflanzen und Fäulnisbakterien auszuspülen.

Das Gewächshaus wurde auf eine Temperatur von 19°C / 15°C eingestellt. An sonnigen Tagen wurde es allerdings deutlich wärmer. Die künstliche Beleuchtung war für 13 Stunden täglich angeschaltet. Mitte Mai wurde die künstliche Beleuchtung abgestellt, da das Tageslicht als ausreichend für das Wachstum der Pflanzen erachtet wurde. Während der Phase der künstlichen Beleuchtung wurden die Töpfe unter den Lampen regelmäßig umgestellt (rotiert), um eine gleichmäßige Beleuchtung der Versuchsp parallelen zu erwirken.

Stetigkeit

(abs.)

16	ZÜS2	MUH1	WALD	MUH2	ZÜS1	PEL5	PEL3	GUS1	HOCK	GUTW	GUS3	GUS2	9	34	34	33	34	34	30	31
15	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
14	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47
13	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a	2a
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Säure- und Magerkeitszeiger

Mäßigfeuchte- und Feuchtezeiger

Lotus uliginosus

Schwachbasen- und Magerkeitszeiger

Sonst. Magerkeitszeiger

Weitere Grünlandpflanzen

Trifolium pratense

Vicia cracca

Luzula campestris

Cerastium holosteoides

Agrostis capillaris

Hypericum maculatum

Ranunculus acris

Heracleum sphondylium

Senecio jacobaea

Festuca pratensis

Bellis perennis

Rhinanthus minor

Lolium perenne

Phleum pratense

Trifolium campestre

Tragopogon orientalis

Begleiter

Anthoxanthum odoratum

Festuca rubra

Centaura nigra agg.

Campanula rotundifolia

Vicia sepium

Dactylis glomerata

Galium mollugo

Veronica chamaedrys

Achillea millefolium

Poa pratensis

Taraxacum officinale

Alchemilla vulgaris

Campanula rapunculus

Linaria vulgaris

Stellaria graminea

Fragaria vesca

Cardamine pratensis

Daucus carota

Galeopsis cf tetrahit

Prunus spec. Jungwuchs

* Zeigerwerte nach Ellenberg et al. (1992)

Lebenslauf

Personalien	Simone Klatt geboren am 29. November 1971 in Braunschweig
Anschrift	Schillerstraße 2 37083 Göttingen E-Mail: sklatt@uni-goettingen.de

Ausbildung und Berufstätigkeit

1978 – 1982	Grundschule in Vallstedt
1982 – 1984	Orientierungsstufe in Vechelde
1984 – 1991	Gymnasium in Braunschweig Abschluss: Abitur
1991 – 1992	Landwirtschaftliches Praktikum
1992 – 1998	Diplomstudiengang Biologie mit Hauptfach Botanik, Georg-August-Universität Göttingen Abschluss: Diplom-Biologin
1999	Wissenschaftliche Hilfskraft, Abteilung für Ökologie und Ökosystemforschung, Albrecht- von-Haller-Institut für Pflanzenwissenschaften, Universität Göttingen
2000 – 2006	Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Dozentin, Abteilung Geobotanik, Universität Trier

