

D-04: Waldböden im Solling: Umweltmonitoring, Melioration und forstliche Bewirtschaftungsoptionen

Henning Meesenburg¹, Heike Fortmann¹, Jan Evers¹, Markus Wagner¹, Ralf Volker Nagel¹, Nils König¹, Uwe Klinck¹, Ulrike Talkner¹, Stefan Fleck², Karl Josef Meiwes¹

¹ Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen

² Thünen-Institut für Waldökosysteme, Alfred-Möller-Straße 1, 16225 Eberswalde

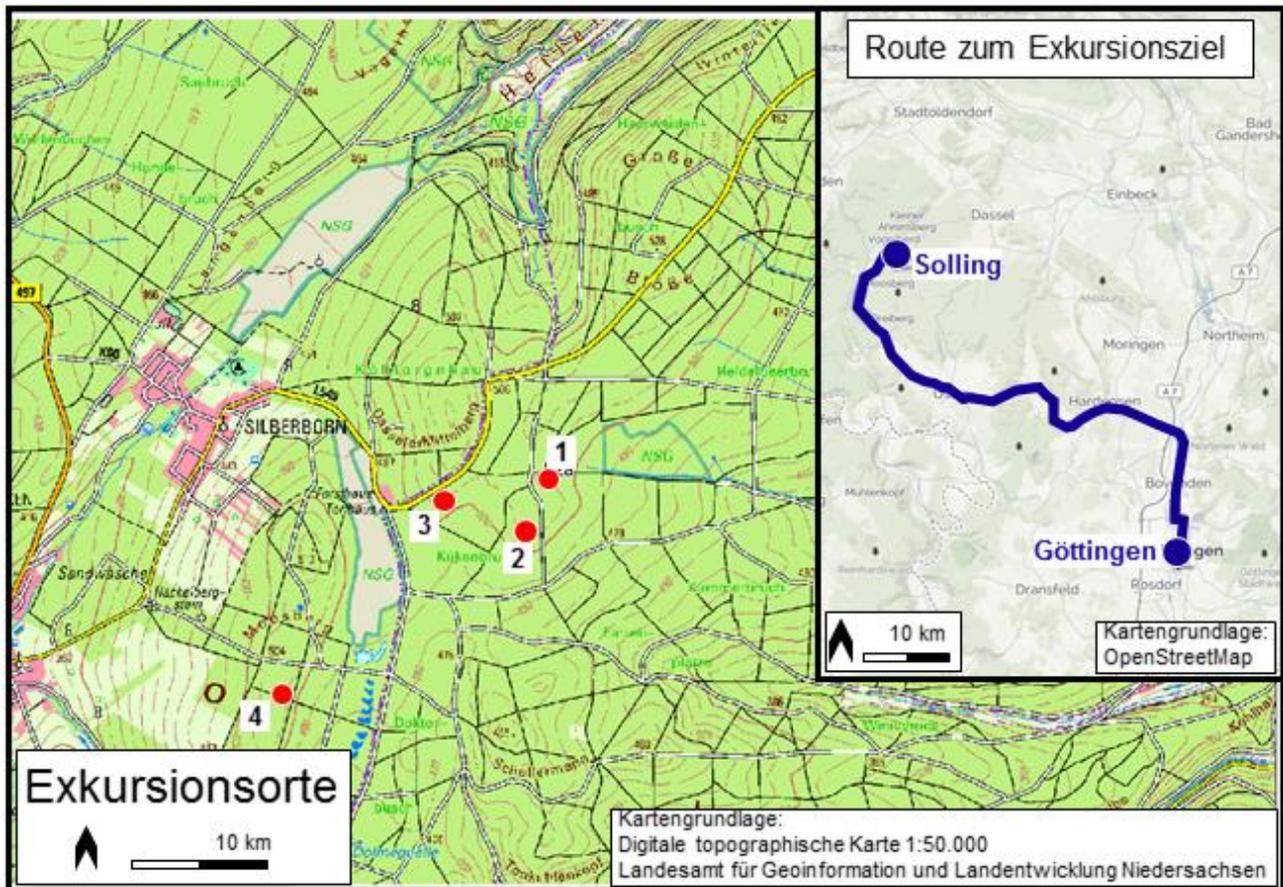


Abb. 1: Exkursionsroute und Exkursionsorte

Einleitung

Als vor mehr als 50 Jahren im Rahmen des Internationalen Biologischen Programms mit den Untersuchungen auf den Waldflächen im Solling begonnen wurden, war ein Umweltmonitoring im heutigen Sinne weder bekannt noch Intention der Studien (Ellenberg et al. 1986). Vielmehr legten die anerkannten forstlichen Paradigmen nahe, dass die Standorteigenschaften weitgehend konstant sind und die Walddynamik daher nur durch die Witterung und biotische Risiken gesteuert wird. Dennoch zeigten insbesondere die Arbeiten von Ulrich und Mitarbeitern anhand

von Flüssebilanzen nach vergleichsweise kurzer Beobachtungszeit, dass sich die Waldökosysteme im Solling nicht im Gleichgewicht befanden und unter dem Einfluss atmosphärischer Stoffeinträge massive Standortveränderungen zu erwarten waren (Ulrich et al. 1979).

Die Monitoringflächen

Die Monitoringflächen befinden sich im Zentrum des Solling-Plateaus auf ca. 500 m ü. NN unter vergleichbaren Standortbedingungen. Die Fich-

ten- und Buchenflächen wurden 1966 eingerichtet (**Exkursionspunkte 1** und **2**). Die Integration in das niedersächsische Boden-Dauerbeobachtungsprogramm (Höper u. Meesenburg 2012) und als ICP Forests Level-II-Flächen in das Europäische intensive Waldmonitoring (de Vries et al. 2003) ermöglichte eine weitgehende Methodenharmonisierung. Das Programm umfasst eine Kombination von Zustands- und Prozessbeschreibung. Die Vernetzung mit anderen Umweltmonitoringprogrammen wie der Umweltprobenbank des Bundes (Koschorreck et al. 2012), der Lufthygienischen Überwachung Niedersachsen sowie Forschungsnetzwerken wie dem Long Term Ecological Research Network (Müller et al. 2016) erlaubt integrierende Auswertungen über verschiedene Ökosystemtypen und Umweltmedien.

Das Ausgangsmaterial der Bodenbildung sind Löss-Fließerden von 60 bis 80 cm Mächtigkeit,

die von einer Übergangszone (bis ca. 95 cm) und umgelagerten Buntsandsteinmaterial (bis 135–150 cm) unterlagert werden (Deutschmann 1994). Eine Lage von stark verwittertem Tonstein bildet die Basis des Profils. Die hydraulischen Eigenschaften werden durch die Zweischichtigkeit der Böden geprägt. Sowohl das Gesamtporenvolumen wie auch die hydraulische Leitfähigkeit nehmen mit der Tiefe ab, wodurch insbesondere auf der Fichtenfläche häufig Staunässe auftritt (Benecke 1984).

Die Fichten-Monitoringfläche (**Exkursionspunkt 1**) ist mit einem 129 Jahre alten Reinbestand bewachsen, der aus einer Weidenaufforstung hervorgegangen ist. Die Monitoringfläche mit einem derzeit 164 Jahre alten Reinbestand aus Buche (**Exkursionspunkt 2**) ist aus Naturverjüngung hervorgegangen (Tab. 1).

Tab. 1: Beschreibung der Intensiv-Monitoringflächen im Solling

	Einheit	Solling Fichte F1	Solling Buche B1
Breite	[°]	N51°46'	N51°46'
Länge	[°]	E09°34'	E09°34'
Höhenlage	[m] ü. NN	508	504
Neigung	[°]	0-2	0-3
Exposition		Osten	Süden
Waldbestand	Art	<i>Picea abies</i> (Karst.)	<i>Fagus sylvatica</i> (L.)
Bestandesalter (2015)	[Jahre]	131	166
Bestandesdichte (2010)	[Bäume/ha]	354	139
Mittlerer BHD Dg (2010)	[cm]	43,5	48,5
Mittlere Höhe Hg (2010)	[m]	32,4	30,1
Vorrat (2010)	[m ³]	732	393
natürliche Vegetation	PNV	Luzulo-Fagetum	Luzulo-Fagetum
Geologie		Tonstein mit Lösslehmauflage	Tonstein mit Lösslehmauflage
Niederschlag	[mm]	1168	1168
Niederschlag (Mai–Okt.)	[mm]	504	504
mittlere Lufttemperatur	[°C]	7,3	7,3
mittl. Temp. (Mai–Okt.)	[°C]	12,7	12,7

In unmittelbarer Nachbarschaft zu den Monitoringflächen wurde eine Vielzahl von Versuchsflächen zur experimentellen Untersuchung von

Fragen zur Kalkung, Düngung, Bodenversauerung und zum forstlichen Management angelegt. Erste Kalkungsversuche wurden bereits

1973 als Ergänzung zu den Hauptuntersuchungsflächen angelegt. Zur Frage der Melioration von tiefgründig versauerten Standorten wurden 1982 auf einer Teilfläche des Buchenbestands 30 t ha⁻¹ dolomitischer Kalk appliziert (Meesenburg et al. 2009), 1990 wurde ein Versuch zur tiefgründigen Melioration von stark versauerten Böden angelegt (Meiwes et al. 2013, **Exkursionspunkt 3**). Im Buchenbestand wurde von 1983 bis 1993 eine Teilfläche jährlich mit 140 kg ha⁻¹ Stickstoff in Form von Ammoniumsulfat zur Induktion einer zusätzlichen Versauerung gedüngt (Meesenburg et al. 2004). Im sogenannten Hiebsvergleich wurde untersucht, welche waldbaulichen Optionen unter den Bedingungen von Bodendegradation für die Endnutzung und Neubegründung von Waldbeständen bestehen (Nagel et al. 2014, **Exkursionspunkt 4**).

Erhebungen im Rahmen des Monitorings

Die Zustandsbeschreibung umfasst die periodische Inventur von Vorräten und Zuständen wie Bodenzustand, Biomassevorräte, Kronenzustand und Bodenvegetation. Als Prozessbeschreibung werden Flüsse von Energie, Wasser und sonstigen Stoffen beobachtet. Als wesentliche Flüsse über die Ökosystemgrenzen werden für die wichtigsten Nähr- und Schadstoffe die atmosphärische Deposition, die Mineralverwitterung, die Biomasseaufnahme und der Sickerwasserantrag erfasst (Ulrich 1994). Damit können Elementbilanzen als wichtige Indikatoren für die Nachhaltigkeit forstlicher Bewirtschaftung berechnet werden.

Mit dem Monitoring der Stoffflüsse mit Freilandniederschlag, Kronentraufe, Stammablauf und Bodenlösung wurde 1968 begonnen. Damit gehört dieser Datensatz heute zu den weltweit längsten Zeitreihen von Stoffflüssen in Waldökosystemen.

Waldbestände üben einen starken Einfluss auf die Höhe der atmosphärischen Deposition aus. Dabei liegen die Stoffeinträge unter Fichte über denen der Buche. Aufbauend auf den Flussmessungen im Solling, wurde von Ulrich (1994) ein Schema zur Berechnung der Säurequellen und -senken in Waldökosystemen vorgelegt.

Dabei wurde die besondere Bedeutung der Anionen starker Säuren („mobile Anionen“-Konzept) für die Bodenversauerung und den Austrag von Säuren in benachbarte Ökosysteme herausgestellt. Die aus Flussmessungen abgeleiteten Versauerungsraten dienen auch dem Postulat einer Destabilisierung von Waldökosystemen im Zusammenhang mit den „neuartigen Waldschäden“ (Ulrich et al. 1979). Im Zusammenhang mit den angegliederten Experimentalstudien konnten auch Erkenntnisse zur Bedeutung der hohen Stickstoffeinträge für die Stickstoffsättigung der Waldökosysteme im Solling gewonnen werden (Corre u. Lamersdorf 2004, Meeseburg et al. 2004). Weiterhin stellen die Ergebnisse des Monitorings einen idealen Datensatz für die Parametrisierung und Validierung von Ökosystemmodellen dar (z. B. Bonten et al. 2011).

Die Flüsse von SO₄, Azidität, Cl, Mg, Ca, Mn und verschiedenen N-Spezies mit der atmosphärischen Deposition haben während der letzten drei Jahrzehnte im Solling abgenommen. Die SO₄-Flüsse nahmen aufgrund von Emissionsminderungsmaßnahmen in Deutschland sogar um mehr als 80 % ab. Im Gegensatz dazu haben die Stickstoffeinträge bis Ende der 1980er-Jahre gar nicht und seitdem nur leicht abgenommen. Dabei stieg der Anteil von NH₄ am Gesamt-N-Eintrag kontinuierlich an, sodass NH₄ auch einen bedeutenden Anteil an der Säurebelastung einnimmt.

Die langjährigen Stoffbilanzen zeigen für beide Monitoringflächen jeweils unabhängig von der angenommenen Nutzungsintensität eine positive Bilanz für Stickstoff, d. h. eine Anreicherung im Ökosystem (Klinck et al. 2012). Dies kann auf eine Zunahme der Vorräte in der Humusaufgabe zurückgeführt werden (Meiwes et al. 2009). Calcium zeigt sowohl bei Buche wie bei Fichte nur bei Annahme einer nutzungsfreien Bewirtschaftung eine positive Bilanz. Derbholz- oder Vollbaumnutzung könnte ohne Calcium-Rückführung (z. B. durch Kalkung) nicht nachhaltig betrieben werden. Für Magnesium ergeben sich für die Buchenfläche für alle Nutzungsoptionen positive Bilanzen, für die Fichtenfläche bei angenommener Derbholz- oder Vollbaumnutzung negative Bilanzen.

Aufgrund von veränderten Umweltbedingungen wie z. B. Klimawandel oder reduzierte Säureeinträge ergeben sich neue Fragestellungen und damit auch neue Anforderungen an das Waldmonitoring. Aufgrund des Klimawandels ist u. a. mit einer veränderten Wasserverfügbarkeit für die Wälder und mit veränderten Kohlenstoffumsätzen zu rechnen (Meiwes et al. 2007). Für die Buchen- und Fichtenflächen im Solling konnte gezeigt werden, dass in den vergangenen 50 Jahren einerseits die Bodenwasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode abnahm, andererseits während der Vegetationsruhe vermehrt Wassersättigung auftrat (Raspe et al. 2013).

Für die Klimaberichterstattung im Rahmen des Kyoto-Protokolls sind sowohl die oberirdische als auch die unterirdische Kohlenstoffspeicherung von Belang. Die Streufallmessungen haben ergeben, dass die Anlieferung von Kohlenstoff an den Boden während der letzten 35 Jahre sowohl unter Buche als auch unter Fichte zugenommen hat. Dies ist vermutlich auf erhöhte Fruktifikationsraten zurückzuführen. Auch die mikrobielle Aktivität hat sich auf beiden Flächen in den letzten 10 Jahren erhöht (Mindrup u. Höper 2012). Unklar ist, auf welchem Niveau sich die Boden-Kohlenstoffvorräte unter den veränderten klimatischen Bedingungen einstellen werden. Hier können Ökosystemmodelle eine Hilfe darstellen, wobei wiederum die Länge der Zeitreihen und die Vollständigkeit der Datensätze aus dem Solling nützlich sind (Jochheim et al. 2009).

Melioration und forstliche Bewirtschaftungsoptionen

Die Böden im Solling sind überwiegend stark versauert und an Nährstoffkationen verarmt. Trotz reduzierter Säureeinträge schreitet die Erholung der Böden langsam voran, wobei ungekalkte, versauerungssensitive Böden sogar weiterhin versauern (Wellbrock et al. 2016), sodass forstliche Anpassungen notwendig sind, um die Ökosystemleistungen der Wälder zu gewährleisten. Hierfür kommen einerseits Kalkungen, andererseits waldbauliche Maßnahmen, wie u. a. die Vermehrung von Laub- und Mischwäldern, infrage.

Eine Melioration von versauerten Böden ist bei praxisüblichen Kalkungen ein äußerst langsamer Prozess, weil der Kalk in kleinen Gaben (3 t ha^{-1}) und großen zeitlichen Intervallen (>10 Jahre) auf die Bodenoberfläche ausgebracht wird und die Lösungsprodukte des Kaltes nur langsam in tiefere Bodenschichten gelangen. Daher wurde ein Experiment zur Melioration eines stark versauerten Bodens eingerichtet, in dem größere Mengen Kalk in den Mineralboden eingemischt wurden, um innerhalb kurzer Zeit eine Basensättigung (BS) von ca. 50 % zu erreichen (**Exkursionspunkt 3**). Der Versuch soll die Wirkung von Kalk- und Düngerapplikation (oberflächlich und eingearbeitet) auf den chemischen Bodenzustand und die aufwachsenden Bestände dokumentieren (Meiwes et al. 2013).

Der Versuch im Hochsolling wurde im Sommer 1990 in einfacher Wiederholung angelegt. Der Fichtenvorbestand wurde 1989 geschlagen und 1990 der Schlagabraum geräumt. Es wurden folgende Varianten der Bodenbehandlung eingerichtet (Abb. 2):

- KO: unbehandelte Kontrolle
- KD: oberflächige Kalkung mit 4 t ha^{-1} Dolomit ($228 \text{ mg Ca g}^{-1} \text{ TM}$ und $134 \text{ mg Mg g}^{-1} \text{ TM}$)
- VK: Rodung der Wurzelstöcke, Kalkung mit $18,5 \text{ t ha}^{-1}$ carbonatischem Kalk ($442 \text{ mg Ca g}^{-1} \text{ TM}$; $8,6 \text{ mg Mg g}^{-1} \text{ TM}$) und Einmischung des Kalkes mittels Tiefpflügen bis in 70 cm Tiefe. Kalkung mit 4 t ha^{-1} Dolomit und Einarbeitung des Kalkes mit einer Scheibenegge bis in 20 cm Tiefe. Düngung mit 50 kg K ha^{-1} als K_2SO_4 und 105 kg P ha^{-1} als teilaufgeschlossenes Rohphosphat.

Im Frühjahr 1991 wurden in Blöcken von $15 \times 15 \text{ m}$ abwechselnd jeweils Buchen (2-jährig; Verband $1,5 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$) und Fichten (Verband $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) gepflanzt. Ferner wurden auf der gesamten Versuchsfläche Schwarzerlen (*Alnus glutinosa*) im Verband $4,5 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ als Vorwald zum Schutz vor Spätfrösten gepflanzt.

Im Solling ist auf großen Flächen ein Umbau von Nadelholzreinbeständen vorgesehen, der möglichst kahlschlagfrei im Zuge von Zielstärkennutzungen erfolgen soll. In starkholzreichen

Altbeständen oder in windwurfgefährdeten Lagen kann jedoch eine raschere Räumung durch

Femel- oder Saumhieb bis hin zu kleineren Kahlschlägen waldbaulich sinnvoll sein.

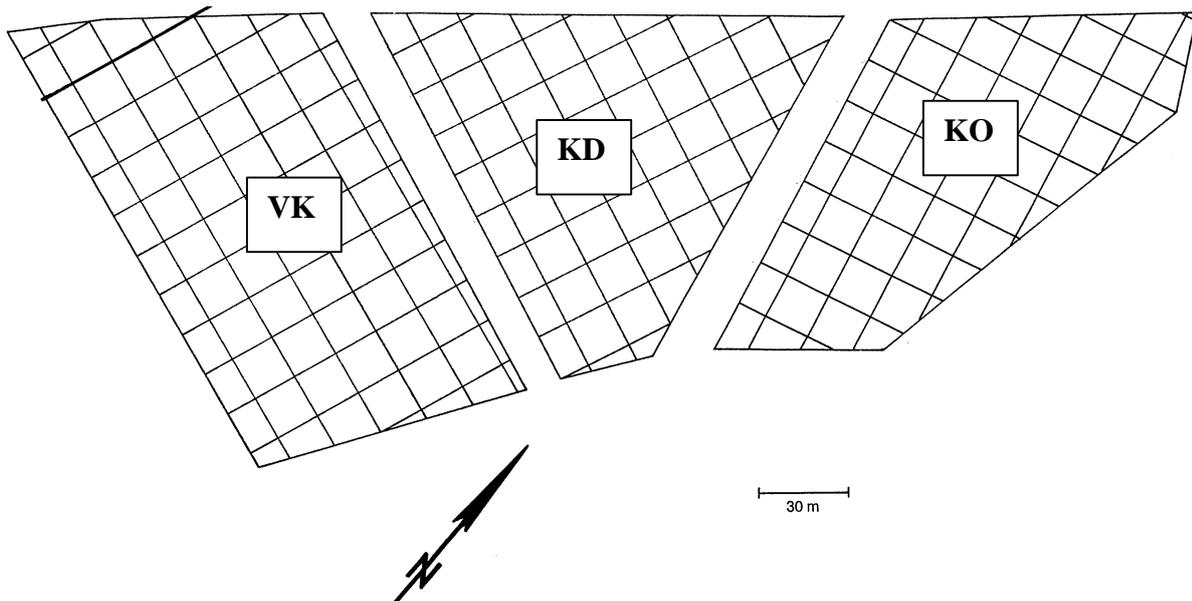


Abb. 2: Anordnung der Parzellen im Meliorationsversuch (KO = Kontrolle; KD = oberflächige Kalkung, VK = Vollumbruch mit Kalkung und Düngung, aus Beese et al. 1999)

Zur Bewertung waldbaulicher und ökologischer Effekte verschiedener Hiebsformen wurden 2003/2004 zwei Versuche im Solling eingerichtet (Nagel et al. 2014).

Auf der Fläche „Neuhaus“ werden Zielstärkenutzung, Saumschlag und Kleinkahlschlag im Vergleich zu unbehandelten Kontrollen, wo weder Eingriffe im Schirm noch Verjüngungsmaßnahmen stattfinden, miteinander verglichen (**Exkursionspunkt 4**). Die Hiebsform Kleinkahlschlag besteht aus einer 1 ha großen Kernfläche und einer 30 m breiten Umfassung. Der

Saumschlag gliedert sich in vier 30 m tiefe Säume, wobei dem aktuellen Außensaum immer ein vorbereiteter, aufgelockerter Innensaum folgt. Für die Hiebsform Zielstärkenutzung wurde eine Mindestzielstärke von ≥ 45 cm BHD unterstellt. Jede beschriebene Hiebsform ist zweifach wiederholt. Nach der Versuchsanlage erfolgen die weiteren Abnutzungen der Säume sowie Nachlichtungen bzw. Zielstärkenutzungen planmäßig nach 5, 10, 15 und 20 Jahren.

Exkursionspunkt 1: Umweltmonitoringfläche Solling, Fichte

Profil Nr. 1: Bearbeiter: Stüber, Paar, Evers, Dammann, Hövelmann
 TK 25: 4223 Aufnahmedatum: 15.5.2013
 Höhe ü. NN: 508 m
 Geologie: Pleistozän über Trias; Lösslehm über Buntsandstein
 Nutzung: Forst, Fichtenreinbestand
 Relief: Plateau

Profilbeschreibung 1: Umweltmonitoringfläche Solling, Fichte

Hor.-Nr.	Horizont	Tiefe	Horizontbeschreibung
1	L	+11	Fichtenstreu, locker
2	Of	+9	schichtige Nadelförna
3	Oh	+4	schwarzbraune, brechbare Humussubstanz
4	Ahe	-10	dunkelbrauner, schwach toniger Schluff; 5 % Skelett; mittelhumos; kohärentes bis subpolyedrisches Gefüge, starke Durchwurzelung
5	Bsv	-15	kräftig-brauner, schwach toniger Schluff, 5 % Skelett; schwach humos; kohärentes bis subpolyedrisches Gefüge, starke Durchwurzelung
6	S/AIBv	-40	gelblich-brauner, schluffiger Lehm; 5 % Skelett, schwach humos; kohärentes bis subpolyedrisches Gefüge, schwache Durchwurzelung
7	Btv	-75	hell rötlich-brauner, schluffiger Lehm; 20 % Skelett, schwach humos; subpolyedrisches bis polyedrisches Gefüge, sehr schwache Durchwurzelung
8	II SwdBtv/BvCv	-75+	rötlich-brauner, toniger Lehm, 25 % Skelett; schwach humos; subpolyedrisches bis polyedrisches Gefüge, sehr schwache Durchwurzelung

aus Meesenburg et al. (2013)

Profilkennzeichnung 1: Umweltmonitoringfläche Solling, Fichte

Bodenform: schwach podsolierte, schwach pseudovergleyte, lessivierte Braunerde

Humusform: feinhumusreicher, rohhumusartiger Moder

WRB: Haplic Cambisol, dystric, densic

Anmerkung: Bei den nachfolgenden bodenphysikalischen und -chemischen Daten handelt es sich um Flächenmittelwerte aus jeweils 9 bis 24 Einzelproben.

Physikalische Analysen 1: Umweltmonitoringfläche Solling, Fichte

Nr.	Tiefenst. cm	>2 mm Vol.-%	Sand	Schluff - % -	Ton	Bodenart n. KA5	TRD [g/cm ³]	nFK %
1	3-8	3	9,3	71,1	19,7	Ut4	0,90	34
2	25-30	5	9,3	71,2	19,5	Ut4	1,08	35
3	70-75	23	15,1	61,1	23,8	Lu	1,57	17
4	100-105	23	21,6	46,6	31,8	Lt2	1,66	12

pH und Elementgehalte¹ 1: Umweltmonitoringfläche Solling, Fichte 2010

Nr.	Tiefenst. cm	pH CaCl ₂	pH H ₂ O	C _{org} - mg/g -	Nt	C/N g/g	S - mg/g -	P	C/P g/g	Cu - µg/g -	Zn
1	L	3,82	4,26	528	15,2	35	1,13	0,84	631	8	50
2	Of	3,08	3,85	515	20,9	25	2,11	0,87	589	17	57
3	Oh	2,77	3,42	436	18,0	24	2,15	0,87	503	39	83
4	0-5	3,01	3,59	53	2,9	19	0,37	0,47	112	13	29
5	5-10	3,34	3,88	29	1,7	17	0,23	0,37	81	14	33
6	10-20	3,77	4,27	21	1,3	16	0,20	0,33	62	18	41
7	20-30	4,10	4,48	16	1,1	14	0,22	0,35	45	21	55
8	30-40	4,21	4,56	9	0,8	11	0,22	0,32	28	23	65
9	40-50	4,12	4,46	5	0,6	9	0,20	0,28	19	28	67
10	50-70	3,98	4,41	3	0,4	7	0,18	0,27	11	48	78
11	70-80	3,89	4,35	1	0,4	4	0,16	0,30	5	96	99
12	80-100	3,86	4,33		0,4	3	0,16	0,33	3	127	108

¹C, N: Elementaranalyse; S, P: HNO₃-Druckaufschluss; Cu, Zn: Königswasser-Extraktion

Austauscherbelegung¹ 1: Umweltmonitoringfläche Solling, Fichte 2010

Nr.	Tiefenst. cm	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	H+	KAK eff	BS %
		- mmol/kg -									
1	L	43,5	108,6	35,2	4,2	4,3	0,73	35,2	37,4	269	71
2	Of	20,2	95,9	24,1	3,6	21,2	5,18	16,2	175,7	362	40
3	Oh	9,1	36,7	12,4	3,8	84,3	13,9	4,1	205,5	370	17
4	0-5	1,08	2,16	1,89	1,09	69,3	8,65	0,61	15,39	100	6,2
5	5-10	0,80	0,97	1,15	0,91	67,1	4,65	1,42	6,10	83,1	4,6
6	10-20	0,61	0,73	0,69	0,78	46,6	1,45	1,54	1,45	53,8	5,1
7	20-30	0,51	1,30	0,50	0,73	25,6	0,61	1,35	0,23	30,8	9,9
8	30-40	0,53	0,72	0,44	0,66	19,0	0,52	0,81	0,42	23,1	9,5
9	40-50	0,65	0,38	0,34	0,44	24,3	0,43	0,74	0,07	27,4	6,6
10	50-70	0,94	0,35	0,42	0,41	41,4	0,38	1,17	0,33	45,4	4,7
11	70-80	1,47	0,31	0,59	0,38	51,9	0,52	1,31	0,59	57,0	4,8
12	80-100	1,44	0,43	0,66	0,45	52,6	0,40	1,34	0,65	58,0	5,1

¹BaCl-Extraktion

Exkursionspunkt 2: Umweltmonitoringfläche Solling, Buche

Profil Nr. 2: Bearbeiter: Pagels, Beisecker
 TK 25: 4223 Aufnahme datum: 21.4.2010
 Höhe ü. NN: 504 m
 Geologie: Pleistozän über Trias; Lösslehm über Buntsandstein
 Nutzung: Forst, Buchenreinbestand
 Relief: Plateau

Profilkennzeichnung 2: Umweltmonitoringfläche Solling, Buche

Bodenform: schwach podsolierte, schwach pseudovergleyte Braunerde
 Humusform: feinhumusarmer, typischer Moder
 WRB: Haplic, Cambisol

Anmerkung: Bei den nachfolgenden bodenphysikalischen und -chemischen Daten handelt es sich um Flächenmittelwerte aus jeweils 9 bis 24 Einzelproben.

Physikalische Analysen 2: Solling, Buche 2010

Nr.	Tiefenst. cm	>2 mm Vol.-%	Sand	Schluff - % -	Ton	Bodenart n. KA5	TRD [g/cm ³]	nFK %
1	10-15	19	22,0	54,5	23,5	Lu	1,14	23,6
2	25-30	14	22,4	54,0	23,6	Lu	1,16	17,2
3	40-45	7	22,3	55,1	22,7	Lu	1,32	17,6

aus Fleck et al. (2016)

pH und Elementgehalte¹ 2: Solling, Buche 2010

Nr.	Tiefenst. cm	pH CaCl ₂	pH H ₂ O	C _{org} - mg/g -	Nt	C/N g/g	S - mg/g -	P	C/P g/g	Cu - µg/g -	Zn
1	L	4,45	4,96	510	17,2	30	1,28	1,08	471	11	48
2	Of	3,43	3,99	471	21,0	22	2,02	0,98	479	21	62
3	Oh	3,11	3,71	426	20,6	21	2,24	0,99	432	24	79
4	0-5	3,18	3,67	48	2,6	18	0,32	0,45	107	5	17
5	5-10	3,44	3,99	28	1,6	17	0,19	0,38	73	4	18
6	10-20	3,75	4,30	21	1,3	17	0,15	0,36	60	4	20
7	20-30	4,00	4,46	16	1,0	15	0,14	0,34	46	3	23
8	30-40	4,17	4,57	11	0,8	13	0,15	0,34	32	4	31
9	40-50	4,19	4,55	7	0,7	11	0,13	0,27	27	3	33
10	50-70	4,04	4,47	4	0,5	9	0,10	0,23	17	4	28
11	70-80	3,95	4,39	2	0,3	6	0,08	0,22	9	5	24
12	80-100	3,94	4,41	2	0,3	6	0,08	0,21	8	5	22

¹C, N: Elementaranalyse; S, P: HNO₃-Druckaufschluss; Cu, Zn: Königswasser-Extraktion

Austauscherbelegung¹ 2: Solling, Buche 2010

Nr.	Tiefenst. cm	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	H+	KAK eff	BS %
		- mmol/kg -									
1	L	38,8	173,5	51,2	3,5	0,9	0,25	49,5	1,2	319	84
2	Of	22,7	112,0	28,1	3,8	14,1	3,05	29,4	15,1	228	71
3	Oh	15,4	77,0	20,6	3,3	33,8	7,61	15,8	25,5	199	57
4	0-5	1,48	3,13	1,36	0,76	53,81	4,62	0,76	9,21	75,1	8,9
5	5-10	0,96	1,50	0,74	0,43	57,30	1,89	1,26	4,39	68,5	5,3
6	10-20	0,68	0,71	0,48	0,37	43,84	0,52	0,98	1,42	49,0	4,5
7	20-30	0,48	0,51	0,32	0,32	28,67	0,30	0,59	0,29	31,5	5,1
8	30-40	0,42	0,44	0,25	0,28	20,96	0,32	0,36	0,08	23,1	6,0
9	40-50	0,43	0,33	0,23	0,26	21,01	0,35	0,27	0,02	22,9	5,5
10	50-70	0,64	0,25	0,26	0,24	36,35	0,36	0,25	0,06	38,4	3,6
11	70-80	0,89	0,19	0,32	0,23	48,79	0,52	0,24	0,11	51,3	3,2
12	80-100	0,93	0,21	0,32	0,21	47,66	0,55	0,21	0,17	50,3	3,3

¹BaCl-Extraktion

Exkursionspunkt 3: Melioration

Profil Nr. 3: Bearbeiter: Stüber, Paar, Evers, Dammann, Hövelmann
TK 25: 4223 Aufnahmedatum: 16.5.2013
Höhe ü. NN: 500 m
Geologie: Pleistozän über Trias; Fließerde aus Buntsandstein und Löss über älterer Buntsandsteinfließerde
Nutzung: Forst, Fichte, Buche, Schwarzerle
Relief: Plateau

Profilbeschreibung 3: Melioration

Hor. Nr.	Horizont	Tiefe	Horizontbeschreibung
1	L	+4	Streu- und Blattreste
2	Of	+3	überwiegend Fönamaterial
3	Oh	+1	loser bis feinkrümeliger Humus
4	Aeh	-10	dunkel gelblich-brauner, schwach toniger bis toniger Schluff (Ut3); schwach steinig; schwach ausgeprägtes Feinpolyedergefüge; halboffen gelagert; geschätzte TRD 0,9–1,0; mittel humos; sehr stark durchwurzelt; Übergang schwach wellig, fließend
5	AIBv	-20	gelblich-brauner, stark toniger Schluff (Ut4); schwach steinig; mäßig ausgeprägtes Feinpolyedergefüge; halboffen; geschätzte TRD 1,1; schwach humos; stark bis sehr stark durchwurzelt; Übergang fließend, schwach ausgeprägt
6	BtBv	-40	bräunl.-gelber, schluffiger Lehm (Lu); steinig (15 %); Feinpolyedergefüge; halboffen; geschätzte TRD 1,2; sehr schwach humos; stark durchwurzelt; Übergang wellig fließend, undeutlich
7	II Bv	-100	gelblich-brauner, toniger Lehm (Lt); schwach steinig (5 %); Feinpolyedergefüge; halboffen; geschätzte TRD 1,3; sehr schwach humos bis humusfrei; mäßig durchwurzelt; Übergang wellig fließend
8	III BvCv	-100+	gelblich-brauner, schluffig-lehmiger Sand (Sl3); mittel steinig (20 %); kohärentes Subpolyedergefüge; geschätzte TRD 1,4; humusfrei (h0); schwach pseudovergleyt; sehr schwach durchwurzelt; Übergang eben-horizontal, mäßig deutlich

aus Meiwes et al. (2013)

Profilkennzeichnung 3: Melioration

Bodenform: schwach podsolige, im Unterboden schwach pseudovergleyte, lessivierte Braunerde
Humusform: feinhumusarmer Moder

Physikalische Analysen 3: Melioration 1999

Nr.	Tiefenst. cm	>2 mm Vol.-%	Sand	Schluff - % -	Ton	Bodenart n. KA5	TRD [g/cm ³]	nFK %
1	0							
2	0-5		8,1	79,9	12	Ut3	0,97	25,4
3	10-15						1,49	16,4
4	20-25						1,45	19
5	30-35		28,8	50,7	20,4	Lu	1,41	18,4
6	60-65						1,65	12,7
7	100-105	20	58	24,7	17,2	Ls4	1,77	11,6

aus Beese et al. (1999)

pH und Elementgehalte¹ 3: Melioration 1999

Nr.	Tiefenst. cm	pH KCl	pH H ₂ O	C _{org} - mg/g -	Nt	C/N g/g	S - mg/g -	P	C/P g/g	Cu - µg/g -	Zn
1	0	2,83	3,62	388	16,6	23		1,17	332		
2	0-5	2,90	3,68	99	4,9	20		0,68	146		
3	10-15	2,91	3,65	36	1,7	21		0,41	88		
4	20-25	3,70	4,10	19	1,0	19		0,33	58		
5	30-35	4,16	4,46	14	0,9	16		0,35	40		
6	60-65	4,04	4,34	3	0,3	10		0,23	13		
7	100-105	3,80	4,28					0,16			

¹C, N: Elementaranalyse; P: HNO₃-Druckaufschluss; aus Beese et al. (1999)

Austauscherbelegung¹ 3: Melioration 1999

Nr.	Tiefenst. cm	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	H+	KAK eff	BS %
		- mmol _e /kg -									
1	0										
2	0-5	2,42	14,05	2,81	0,59	54,1	19,80	0,66	34,6	129	17
3	10-15	0,90	5,29	1,34	0,43	58,7	19,20	0,46	27,7	111	8,0
4	20-25	0,66	1,57	0,55	0,37	66,5	1,17	2,25	2,4	76,0	5,0
5	30-35	0,60	0,74	0,22	0,30	42,9	0,23	1,11	0,0	46,1	5,3
6	60-65	1,24	0,57	0,26	0,23	42,5	0,04	0,43	0,0	45,3	7,8
7	100-105	0,40	0,69	0,22	0,21	41,6	0,00	0,35	0,0	43,4	4,4

¹NH₄Cl-Perkolation, aus Beese et al. (1999)

Exkursionspunkt 4: Hiebsvergleich

Profil Nr. 4 Bearbeiter: Stüber, Paar, Evers, Dammann, Hövelmann
 TK 25: 4223 Aufnahmedatum: 31.5.2013
 Höhe ü. NN: 500 m
 Geologie: Pleistozän über Trias; Lösslehm über Buntsandstein
 Nutzung: Forst, Fichtenreinbestand
 Relief: Plateau, schwach SW-geneigt

Profilbeschreibung 4: Hiebsvergleich

Hor. Nr.	Horizont	Tiefe	Horizontbeschreibung
1	L	+7	locker gelagerte Nadelstreu
2	Of	+6	vernetzt, stellenweise auch locker gelagertes Förnamaterial, mittelstark durchwurzelt
3	Oh	+3,5	kompakt, schwach brechbares, teilweise loses Humusmaterial, auch bröckelig, mittel bis stark durchwurzelt
4	Ahe	-9,5	dunkel rötlich-brauner, locker gelagerter Lehm; mittel humos; carbonatfrei; 10 % Grus und 5 % Steine; subpolyedrisch; mittel fein- und gering grobdurchwurzelt
5	Bv	-50	rötlich-brauner, schwach toniger bis toniger Lehm, 10 % Grus und 5 % Steine; kleine Subpolyeder; mittel fein- und gering grobdurchwurzelt
6	II CvSwd	-95	gelblich-roter, schwach toniger bis toniger Lehm, mittlere bis hohe Lagerungsdichte; dunkel- und hellrostfarbene Oxidationsflecken, Bleichungen; Mangan- und Eisenkonkretionen; sehr schwach durchwurzelt; Subpolyeder
7	SdCv	-115	gelblich-roter, toniger Lehm
8	il Cv	-125	rötlich-brauner, lehmiger bis toniger Sand

aus Nagel et al. (2013)

Profilkennzeichnung 4: Hiebsvergleich

Bodenform: schwach podsolierte Pseudogley-Braunerde

Humusform: feinhumusreicher, rohhumusartiger Moder

Anmerkung: Analysenergebnisse aus Nagel et al. (2013)

pH und Elementgehalte¹ 4: Hiebsvergleich 2013

Nr.	Tiefenst. cm	pH CaCl ₂	pH H ₂ O	C _{org} - mg/g -	Nt	C/N g/g	S - mg/g -	P	C/P g/g	Cu - µg/g -	Zn
1	LOf	4,03	4,61	453	18,0	25	1,78	1,08	418	19	83
2	Oh	3,31	4,01	392	17,1	23	1,96	1,03	380	40	81
3	0-5	3,22	3,94	57	3,1	18					
4	5-10	3,33	3,99	32	2,0	16					
5	10-30	3,74	4,25	13	1,1	12					
6	30-60	3,98	4,37	6,0	0,6	10					
7	60-90	3,89	4,29	1,5	0,3	5					

¹ C, N: Elementaranalyse; S, P: HNO₃-Druckaufschluss; Cu, Zn: Königswasser-Extraktion

Austauscherbelegung¹ 4: Hiebsvergleich 2013

Nr.	Tiefenst. cm	K	Ca	Mg	Na	Al	Fe	Mn	H+	KAK eff	BS %
- mmol _c /kg -											
1	LOf	1,7	8,8	2,4	0,1	3,8	4,48	2,2			
2	Oh	1,9	4,2	1,3	0,1	7,5	10,24	0,4			
3	0-5	1,59	23,89	7,74	0,97	68,1	4,82	0,98	23,80	132	25,9
4	5-10	1,09	10,30	4,60	0,72	81,3	1,50	1,36	13,12	114	14,7
5	10-30	1,38	2,69	1,16	0,58	66,2	0,21	0,80	1,55	75	7,8
6	30-60	1,33	1,01	0,78	0,50	50,1	0,05	0,51	0,00	54	6,7
7	60-90	1,73	0,68	0,62	0,42	63,7	0,00	0,25	0,00	67	5,1

¹ LOf, Oh: Königswasser-Extraktion, Mineralboden: NH₄Cl-Perkolation

Literatur

- Beese F, Deutschmann G, Meiwes KJ (1999): Exkursion G5: Belastung, Manipulation und Sanierung von Waldböden am Beispiel des Sollings. Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 90: 307–326
- Benecke P (1984): Der Wasserumsatz eines Buchen- und eines Fichtenwaldökosystems im Hochsolling. Schr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen u. Nieders. Forstl. Versuchsanst. 77
- Bonten LTC, Groenenberg JE, Meesenburg H, de Vries W (2011): Using advanced surface complexation models for modelling soil chemistry under forests: Solling forest, Germany. Environmental Pollution 159: 2831–2839, doi: 10.1016/j.envpol.2011.05.002
- Corre MD, Lamersdorf NP (2004): Reversal of nitrogen saturation after long-term deposition reduction: Impacts on soil nitrogen cycling. Ecology 85: 3090–3104
- Deutschmann G (1994): Zustand und Entwicklung der Versauerung des Bodens und des oberflächennahen Buntsandsteinuntergrundes eines Waldökosystems im Solling. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme A118
- De Vries W, Vel E, Reinds GJ, Deelstra H, Klap JM, Leefters EJM, Hendriks CMA, Kerkvoorden M, Landmann G, Herkendel J, Hausmann T, Erisman JW (2003): Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe: 1. Objectives, set-up and evaluation strategy. Forest Ecol. Managem. 174: 77–95
- Ellenberg H, Mayer R, Schaueremann J (Hrsg.) (1986): Ökosystemforschung: Ergebnisse des Solling-Projekts. Stuttgart, Ulmer
- Fleck S, Cools N, de Vos B, Meesenburg H, Fischer R (2016): The Level II aggregated forest soil condition database links soil physicochemical and hydraulic properties with long-term observations of forest condition in Europe. Annals of Forest Science 73: 945–957, doi: 10.1007/s13595-016-0571-4
- Höper H, Meesenburg H (Hrsg.) (2012): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. Geoberichte 23. 254 S.
- Jochheim H, Puhlmann M, Beese F, Berthold D, Einert P, Kallweit R, Konopatzky A, Meesenburg H, Meiwes KJ, Raspe S, Schulte-Bisping H, Schulz C (2009): Modelling the carbon budget of intensive forest monitoring sites in Germany using the simulation model BIOME-BGC. iForest 2: 7–10 [online: 2009-01-21] URL: <http://www.sisef.it/forest/show.php?id=475>, doi: 10.3832/ifor0475-002
- Klinck U, Rademacher P, Scheler B, Wagner M, Fleck S, Ahrends B, Meesenburg H (2012): Ökosystembilanzen auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. In: Höper H, Meesenburg H (Hrsg.) 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. Geoberichte 23: 163–174
- Koschorreck J, Conrad A, Körner A, Rüter M, Schröter-Kermani C, Mohaupt V, Kolossa-Gehring M, Fliedner A, Rüdell H (2012): Die Umweltprobenbank: Umweltbeobachtung mit Proben von Mensch und Umwelt. Umweltbundesamt
- Meesenburg H, Merino A, Meiwes KJ, Beese FO (2004): Effects of long-term application of ammonium sulphate on nitrogen fluxes in a beech ecosystem at Solling, Germany. Water, Air, and Soil Pollution: Focus 4: 415–426
- Meesenburg H, Brumme R, Jacobsen C, Meiwes KJ, Eichhorn J (2009): Soil properties. In: Brumme R, Khanna PK (Hrsg.) Functioning and Management of European Beech Ecosystems, Ecol. Studies 208: 33–47
- Meesenburg H, Klinck U, Dammann I, Ahrends B, Scheler B, Fortmann H, Fleck S (2013): Die Intensiv-Waldmonitoringflächen mit Buche und Fichte im Solling. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.) Ergebnisse der Waldökosystemforschung im Solling, Jahrestagung der AFSV vom 11.–14. September 2013 im Solling: 44–53, http://www.afsv.de/download/literatur/AFSV_2013_Solling.pdf

- Meiwes KJ, Badeck FW, Beese F, Berthold D, Einert P, Jochheim H, Kallweit R, Konopatzky A, Lasch P, Meesenburg H, Puhlmann M, Raspe S, Schulte-Bisping H, Schulz C, Suckow F (2007): Kohlenstoffumsatz in Waldökosystemen und deren Böden: Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen. *AFZ-DerWald* 20: 1075–1077
- Meiwes KJ, Meesenburg H, Eichhorn J, Jacobsen C, Khanna PK (2009): Changes in C and N contents of soil under beech forests over a period of 35 years. In: Brumme R, Khanna PK (Hrsg.) *Functioning and Management of European Beech Ecosystems*. *Ecol. Studies* 208: 49–64
- Meiwes KJ, Noltensmeier A, Mindrup M (2013): Kalkungsversuche: Wirkung von oberflächiger Kalkapplikation und von Vollumbruch mit Kalkeinmischung auf Boden, Kultur und Jungbestand sowie das Feinwurzelwachstum der Fichte. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.) *Ergebnisse der Waldökosystemforschung im Solling, Jahrestagung der AFSV vom 11.–14. September 2013 im Solling*: 62–71, http://www.afsv.de/download/literatur/AFSV_2013_Solling.pdf
- Mindrup M, Höper H (2012): Bodenbiologische Untersuchungen. In: Höper H, Meesenburg H (Hrsg.) *20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen*. *Geoberichte* 23: 79–94
- Müller F, Bergmann M, Dannowski R, Dippner JW, Gnauck A, Haase P, Jochimsen MC, Kasprzak P, Kröncke I, Kümmerlin R, Küster M, Lischeid G, Meesenburg H, Merz C, Millat G, Müller J, Padisák J, Schimming CG, Schubert H, Schult M, Selmečzy G, Shatwell T, Stoll S, Schwabe M, Soltwedel T, Straile D (2016): Assessing resilience in long-term ecological data sets. *Ecological Indicators* 65: 10–43, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.066
- Nagel R-V, Rumpf H, Klinck U, Meiwes KJ (2013): Hiebsformen: Umbau von Fichtenreinbeständen. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.) *Ergebnisse der Waldökosystemforschung im Solling, Jahrestagung der AFSV vom 11.–14. September 2013 im Solling*: 72–81, http://www.afsv.de/download/literatur/AFSV_2013_Solling.pdf
- Nagel R-V, Rumpf H, Meiwes KJ, Klinck U, Spellmann H (2014): Hiebsformen zum Umbau älterer Fichtenreinbestände. *AFZ-DerWald* 10: 22–26
- Raspe S, Bastrup-Birk A, Fleck S, Weis W, Mayer H, Meesenburg H, Wagner M, Schindler D, Gartner K (2013): Meteorology. In: Ferretti M, Fischer R (Hrsg.) *Forest Monitoring: Methods for terrestrial investigations in Europe with an overview of North America and Asia*. *Developments in Environmental Science*, Vol. 12, Amsterdam, Elsevier: 319–336
- Ulrich B. (1994): Nutrient and acid/base budget of central European forest ecosystems. In: Hüttermann A, Godbold DL (Hrsg.) *Effects of acid rain on forest processes*. New York, Wiley: 1–50
- Ulrich B, Mayer R, Khanna PK (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schriften aus der Forstl. Fak. der Univ. Göttingen und der Nieders. Forstl. Versuchsanstalt* 58. 291 S.
- Wellbrock N, Lauer A, Eickenscheidt N, Grüneberg E, Evers J, Ahrends B, Schimming CG, Nagel H-D, Riek W, Meiwes KJ, Meesenburg H (2016): Bodenversauerung und Nährstoffverfügbarkeit. In: Wellbrock N, Bolte A, Flessa H (Hrsg.) *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*, Thünen Report 43: 75–134, doi: 10.3220/REP1473930232000 urn:nbn:de:gbv:253-201609-dn057211-6