



Federal Environment Agency – Austria



Institute of Meteorology
and Physics



Institut für
Waldbau



Federal Forest
Research Centre

THE SENSITIVITY OF THE AUSTRIAN FORESTS TO SCENARIOS OF CLIMATIC CHANGE

A Large-scale Risk Assessment

**Lexer M.J., Hönninger K., Scheifinger H., Matulla Ch., Groll N.,
Kromp-Kolb H., Schadauer K., Starlinger F. and Englisch M.**

MONOGRAPHIEN

Band 132

M-132

Wien, 2001

Authors

Lexner M.J.^λ, Hönninger K.^λ, Scheifinger H.* , Matulla Ch.* , Groll N.* , Kromp-Kolb H.* ,
Schadauer K.[¶], Starlinger F.[¶] und Englisch M.[¶]

^λInstitute of Silviculture, Univ. of Agricultural Sciences, Vienna

*Institute of Meteorology and Physics, Univ. of Agricultural Sciences, Vienna

[¶]Federal Forest Research Centre, Vienna

Setting/Layout

Anne Moser, Lisa Lössl

Front cover photo

Manfred J. Lexner, Monika Lex

Acknowledgements by the authors:

The present study was supported by a joint grant from the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management and the Federal Environment Agency. We are grateful for the co-operation and the interest in our work demonstrated in several project meetings during the life span of the project. Special thanks are due to Peter Weiss from the Federal Environment Agency for his steady motivation and for prove reading the manuscript. Any remaining shortcomings are entirely in the responsibility of the authors. Thanks to Karl Reiter from the Institute of Plant Physiology at the University of Vienna for technical support in the early phase of the project, to Heimo Schaffer from the Federal Forest Research Centre for providing the GIS-maps included in this report, and to Monika Lex and Dietmar Jäger from the Institute of Silviculture at the University of Agricultural Sciences, Vienna for their support in preparing the final report.

Imprint

Published and edited by: Umweltbundesamt GmbH (Federal Environment Agency Ltd)
Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien, Austria

Printed by: Radinger, Scheibbs

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2001
All rights reserved (Alle Rechte vorbehalten)
ISBN 3-85457-566-1

CONTENTS

LIST OF FIGURES	5
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	9
LIST OF TABLES	13
TABELLENVERZEICHNIS	15
SUMMARY	17
KURZFASSUNG	19
1 INTRODUCTION	25
2 OBJECTIVES	28
3 METHODS	29
3.1 Risk assessment procedures	29
3.1.1 Defining assessment endpoints	30
3.1.2 Evaluation of endpoint measures	33
3.1.3 Combining indicators of climate change impacts	35
3.2 The forest dynamics model PICUS v1.2	37
3.2.1 Model structure	37
3.2.2 Growth	39
3.2.3 Recruitment of new trees	39
3.2.4 Tree mortality	39
3.2.5 The abiotic environment	40
3.2.5.1 Temperature	40
3.2.5.2 Water supply	40
3.2.5.3 Light 41	
3.2.5.4 Nutrient supply	41
3.2.5.5 Combining the effect of environmental factors	42
3.3 Initialising PICUS v1.2 with forest inventory data	43
3.3.1 Site and soil data	43
3.3.2 Vegetation data	43
3.4 Climate data	45
3.4.1 The baseline scenario: Current climate	45
3.4.2 Climate change scenarios	45
3.4.2.1 From global to regional scales	45
3.4.2.2 Regionalizing GCM-output	46
4 DATA RESULTS	48
4.1 Climate data	48
4.1.1 Current climate	48

4.1.2	Climate change scenarios.....	50
4.1.2.1	Scenario ScA.....	50
4.1.2.2	Scenario scB.....	55
4.1.2.3	Scenario scC.....	56
4.2	Selecting sub samples of the Austrian Forest Inventory.....	57
5	RISK ASSESSMENT RESULTS.....	58
5.1	Simulated potential natural vegetation (PNV) under current climate.....	58
5.2	Simulated potential natural vegetation (PNV) under climate change scenarios.....	64
5.3	Bioclimatic indices.....	68
5.4	The sensitivity of current forests to scenarios of climatic change.....	74
5.4.1	Short- to midterm response to transient climatic change scenarios.....	74
5.4.1.1	Short- to midterm sensitivity to climatic change: Tree mortality.....	74
5.4.1.2	Short to midterm sensitivity to scenarios of climatic change: Total represented forest.....	77
5.4.1.3	Short- to midterm sensitivity to scenarios of climatic change: Altitudinal zones.....	79
5.4.1.4	Short- to midterm sensitivity to scenarios of climatic change: Ecoregions.....	81
5.4.2	The potential long-term impact of climatic change on current forests.....	83
5.4.2.1	Similarity of current forests to simulated potential natural vegetation under current climate.....	83
5.4.2.2	Potential long-term impact of climatic change: Total represented forest.....	86
5.4.2.2.1	<i>Shifts in potential natural species composition (PNV).....</i>	<i>86</i>
5.4.2.2.2	<i>Effect of climatic change on the divergence of current forest composition to simulated PNV.....</i>	<i>88</i>
5.4.2.2.3	<i>Indicator of the potential long-term impact of climatic change (LI).....</i>	<i>89</i>
5.4.2.3	Potential long-term impact of climatic change: Altitudinal zones.....	90
5.4.2.3.1	<i>Shifts in potential natural species composition.....</i>	<i>90</i>
5.4.2.3.2	<i>Effect of climatic change on the divergence of current forest composition to simulated PNV.....</i>	<i>92</i>
5.4.2.3.3	<i>Indicator for the potential long-term impact of climatic change (LI).....</i>	<i>94</i>
5.4.2.4	Potential long-term impact of climatic change: Ecoregions.....	96
5.4.2.4.1	<i>Shifts in potential natural species composition.....</i>	<i>96</i>
5.4.2.4.2	<i>Effect of climatic change on the divergence of current forest composition to simulated PNV.....</i>	<i>98</i>
5.4.2.4.3	<i>Indicator for the potential long-term impact of climatic change.....</i>	<i>99</i>
5.5	Combined assessment of potential short-/midterm and long-term impacts... 101	
5.5.1	Total represented forest.....	101
5.5.2	Altitudinal zones.....	104
5.5.3	Ecoregions.....	106
5.5.4	Sensitivity of Norway spruce forests.....	108
5.5.5	Evaluation of current regeneration.....	110
6	DISCUSSION.....	111
7	CONCLUSIONS.....	115
8	REFERENCES.....	117
ANNEX 1	122
ANNEX 2	129
ANNEX 3	129
ANNEX 4	131

LIST OF FIGURES

Figure 3-1.	Schematic frame for an ecological risk assessment.....	29
Figure 3-2.	Scheme for the quantification of climate change impacts on existing forest vegetation at sample points of the Austrian Forest Inventory.....	32
Figure 3-3.	Relationship between assessment criteria ac(i) and their relevance regarding the expected adverse impact of a changing climate.....	34
Figure 3-4.	Hierarchy of criteria used to evaluate the sensitivity of current forests to scenarios of climatic change.	35
Figure 3-5.	Model structure of PICUS v1.2.....	38
Figure 4-1a.	Statistically interpolated winter temperature.....	48
Figure 4-1b.	Statistically interpolated summer temperature.	48
Figure 4-2a.	Statistically interpolated winter precipitation.....	49
Figure 4-2b.	Statistically interpolated summer precipitation.	49
Figure 4-3a.	Spatial distribution of monthly mean temperature increase in winter under climate change scenario scA.	50
Figure 4-3b.	Spatial distribution of monthly mean temperature increase in spring under climate change scenario scA	51
Figure 4-3c.	Spatial distribution of monthly mean temperature increase in summer under the climate change scenario scA	51
Figure 4-3d.	Spatial distribution of monthly mean temperature increase in autumn under the climate change scenario scA	52
Figure 4-4.	Example of climate change scenario data used within PICUS v1.2: Transient phase (years 2000 - 2050) of climate change scenario scA derived by statistical downscaling for a investigated sample point of the Austrian Forest Inventory.....	53
Figure 4-5a.	Spatial distribution of monthly mean precipitation changes in winter under climate change scenario scA	53
Figure 4-5b.	Spatial distribution of monthly mean precipitation changes in spring under climate change scenario scA	54
Figure 4-5c.	Spatial distribution of monthly mean precipitation changes in summer under the climate change scenario scA	54
Figure 4-5d.	Spatial distribution of monthly mean precipitation changes in autumn under the climate change scenario scA	55
Figure 4-6.	Scheme for the construction of the transient phase for temperature in scenario scB	56
Figure 5-1.	Comparison of simulated potential natural vegetation at selected sample points of the Austrian Forest Inventory under current climate with PNV as expected by the Austrian Forest Inventory.	62
Figure 5-2.	Share [aboveground biomass] of <i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> and <i>Quercus</i> spp. in the simulated equilibrium species composition at selected sample points of the Austrian Forest Inventory under current climate.....	63

Figure 5-3.	Simulated potential natural vegetation under current climate (baseline scenario) and under climate change scenario scA at selected sample points of the Austrian Forest Inventory.....	65
Figure 5-4.	Share [aboveground biomass] of <i>Picea abies</i> in the simulated equilibrium species composition at selected sample points of the Austrian Forest Inventory under climate change scenarios scA, scB and scC	67
Figure 5-5a.	Average heat sum above 5.5 °C at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory under current climate and climate change scenario scA	69
Figure 5-5b.	Average heat sum above 5.5 °C at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory under climate change scenario scB and climate change scenario scC	70
Figure 5-6.	Average soil moisture index at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory as calculated within PICUS v1.2 under current climate	71
Figure 5-7a.	Simulated average potential completed life cycles of <i>Ips typographus</i> at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory under the baseline scenario and the climate change scenario scA	72
Figure 5-7b.	Simulated average potential completed life cycles of <i>Ips typographus</i> at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory under the climate change scenarios scB and scC.....	73
Figure 5-8a.	Sample points of the Austrian Forest Inventory with substantial simulated tree mortality during the period 2000 to 2050 under current climate and climate change scenario scA	75
Figure 5-8b.	Sample points of the Austrian Forest Inventory with substantial simulated tree mortality during the period 2000 to 2050 under climate change scenario scB and climate change scenario scC	76
Figure 5-9.	Percentage of investigated Austrian Forest Inventory sample points within the impact categories 1 - 5 of the short- to midterm sensitivity index SMS under three climate change scenarios	78
Figure 5-10.	Distribution of impact categories of the short- to midterm index of forest sensitivity to climate change at selected sample points of the Austrian Forest Inventory under the climate change scenario scA.....	79
Figure 5-11.	Percentage of investigated Austrian Forest Inventory points within impact categories of short- to midterm forest sensitivity to scenarios of climatic change in altitudinal zones under three climate change scenarios.....	80
Figure 5-12.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within impact categories of the short- to midterm index of forest sensitivity to climate change in the main ecoregions of Austria under three climate change scenarios	82
Figure 5-13.	Similarity of current forests at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory to simulated potential natural vegetation under current climatic conditions.....	84
Figure 5-14.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within classes of similarity of current forest species composition to simulated potential natural vegetation under current climatic conditions in altitudinal zones.....	85

Figure 5-15.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within classes of similarity of current forest species composition to simulated potential natural vegetation under current climatic conditions in the main ecoregions.....	85
Figure 5-16.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within classes of similarity of simulated equilibrium species composition under current climate to PNV under three climate change scenarios.....	87
Figure 5-17.	Effect of climate change scenario scA on simulated equilibrium species composition at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory (assessment criterion ac_6).....	87
Figure 5-18.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within classes of assessment criterion ac_7	88
Figure 5-19.	Spatial distribution of assessment criterion ac_7	89
Figure 5-20.	The potential long-term impact of scenarios of climatic change on current forests at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory.....	90
Figure 5-21.	Effect of three climate change scenarios on simulated equilibrium species composition at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory (assessment criterion ac_6) stratified for altitudinal zones.....	91
Figure 5-22.	Effect of three climate change scenarios on assessment criterion ac_7 at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory stratified for altitudinal zones.....	93
Figure 5-23.	The potential long-term impact of climate change scenarios on current forests at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory stratified for altitudinal zones.....	95
Figure 5-24.	Effect of three climate change scenarios on simulated equilibrium species composition at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory (assessment criterion ac_6) stratified for the main ecoregions.....	97
Figure 5-25.	Effect of three climate change scenarios on assessment criterion ac_7 at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory stratified for the main ecoregions.....	98
Figure 5-26.	The potential long-term impact of climate change scenarios on current forests at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory stratified for the main ecoregions.....	100
Figure 5-27.	Spatial distribution of the overall climate change impact index CCI for three climate change scenarios at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory.....	102
Figure 5-28.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within the overall climate change impact categories under the climate change scenarios scA, scB and scC.....	103
Figure 5-29.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within overall potential climate change impact categories under three climate change scenarios within altitudinal zones.....	105
Figure 5-30.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within overall potential climate change impact categories under three climate change scenarios within the main ecoregions.....	107

Figure 5-31. Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory with a share of <i>Picea abies</i> >50% of aboveground standing biomass within overall potential climate change impact categories under three climate change scenarios within altitudinal zones	109
Example A1-1. Simulated secondary Norway spruce stand in the submontane zone in ecoregion 7 according to Kilian et al. (1994) (northern piedmont of the Alps) under current climatic conditions and three climate change scenarios	123
Example A1-2. Simulated secondary Norway spruce stand in the lower montane zone at a site in ecoregion 4 according to Kilian et al. (1994) (northern peripheral region of the Alps) under current climatic conditions and three climate change scenarios.....	124
Example A1-3. Simulated beech stand in the submontane zone in ecoregion 4 according to Kilian et al. (1994) (northern peripheral region of the Alps) under current climate and three climate change scenarios	125
Example A1-4. Simulated "close to nature" mixed spruce/fir/beech-stand in the montane vegetation zone in ecoregion 4 according to Kilian et al. (1994) (northern peripheral region of the Alps) under current climate and three climate change scenarios.....	126
Example A1-5. Simulated larch/spruce – stand in the lower subalpine zone in ecoregion 2 according to Kilian et al. (1994) (northern transitional region of the Alps) under current climate and three climate change scenarios	127
Example A1-6. Simulated "close to nature" mixed oak/hornbeam stand in the colline vegetation zone in ecoregion 8 according to Kilian et al. (1994) (eastern lowlands) under current climate and three climate change scenarios	128
Figure A3-1. The main ecoregions of Austria according to Kilian et al. (1994)	130

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 3-1:	Schema für eine ökologische Risikoanalyse.....	29
Abb. 3-2:	Ansatz zur Quantifizierung des Effektes einer Klimaänderung auf aktuell existierende Wälder auf Probepunkten der Österreichischen Waldinventur.....	32
Abb. 3-3:	Gutachtliche Beziehung zwischen Kriterium ac(i) und daraus erwartetem negativen Effekt.....	34
Abb. 3-4:	Hierarchische Anordnung der Analysekriterien zur Beurteilung der Effekte einer Klimaänderung.....	35
Abb. 3-5:	Modellstruktur von PICUS v1.2.....	38
Abb. 4-1a:	Interpolierte Wintertemperaturen als Durchschnitt der Periode 1961-1995.....	48
Abb. 4-1b:	Interpolierte Sommertemperatur als Durchschnitt der Periode 1961-1995.....	48
Abb. 4-2a:	Interpolierter Niederschlag als Durchschnitt der Periode 1961-1995.....	49
Abb. 4-2b:	Interpolierter Niederschlag als Durchschnitt der Periode 1961-1995.....	49
Abb. 4-3a:	Anstieg monatlicher Mitteltemperaturen als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	50
Abb. 4-3b:	Anstieg monatlicher Mitteltemperaturen als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	51
Abb. 4-3c:	Anstieg monatlicher Mitteltemperaturen als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	51
Abb. 4-3d:	Anstieg monatlicher Mitteltemperaturen als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	52
Abb. 4-4:	Beispiel für ein punktbezogenes Klimaänderungsszenario unter Szenario scA. Transiente Phase 2000-2050 wie regionalisiert, ab 2050 stochastisch generiert auf Basis der regionalisierten Periode 2035-2065.....	53
Abb. 4-5a:	Veränderung monatlicher Niederschlagswerte als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	53
Abb. 4-5b:	Veränderung monatlicher Niederschlagswerte als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	54
Abb. 4-5c:	Veränderung monatlicher Niederschlagswerte als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	54
Abb. 4-5d:	Veränderung monatlicher Niederschlagswerte als Durchschnitt 2035-2065 bezogen auf 1961-1995 für Szenario scA.....	55
Abb. 4-6:	Schema für die Konstruktion der transienten Phase in Klimaänderungsszenario scB.....	56
Abb. 5-1:	Vergleich von simulierter PNV unter aktuellem Klima und Expertenansprachen der PNV auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur.....	62
Abb. 5-2:	Anteile [oberirdische Biomasse] ausgewählter Baumarten in der auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur simulierten PNV unter aktuellem Klima.....	63

Abb. 5-3:	Auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur simulierte PNV unter aktuellem Klima und unter dem Klimaänderungsszenario scA.....	65
Abb. 5-4:	Anteil [oberirdische Biomasse] von <i>Picea abies</i> in der auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur simulierten PNV unter Klimaänderungsszenarien scA, scB und scC.....	67
Abb. 5-5a:	Durchschnittliche Temperatursumme >5.5 °C auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter aktuellem Klima und Klimaänderungsszenario scA.....	69
Abb. 5-5b:	Durchschnittliche Temperatursumme >5.5 °C auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter Klimaänderungsszenario scB und Klimaänderungsszenario scC	70
Abb. 5-6:	Von PICUS v1.2 simulierter durchschnittlicher Wasserversorgungsindikator SMI auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter aktuellem Klima	71
Abb. 5-7a:	Simulierte durchschnittliche potentielle Generationszahl von <i>Ips typographus</i> auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter aktuellem Klima und dem Klimaänderungsszenario scA.....	72
Abb. 5-7b:	Simulierte durchschnittliche potentielle Generationszahl von <i>Ips typographus</i> auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter Klimaänderungsszenario scB und dem Klimaänderungsszenario scC	73
Abb. 5-8a:	Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur auf denen erhebliche simulierte Baummortalität in der Periode 2000-2050 auftrat.	75
Abb. 5-8b:	Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur auf denen erhebliche simulierte Baummortalität in der Periode 2000-2050 auftrat	76
Abb. 5-9:	Anteil untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Kurz-/Mittelfristindikators SMS unter drei Klimaänderungsszenarien	78
Abb. 5-10:	Räumliche Verteilung der Kategorien des Kurz-/Mittelfristindikators SMS anhand untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur unter dem Klimaänderungsszenario scA	79
Abb. 5-11:	Anteil untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Kurz-/Mittelfristindikators SMS unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Höhenstufen	80
Abb. 5-12:	Anteil untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Kurz-/Mittelfristindikators SMS unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Hauptwuchsgebieten	82
Abb. 5-13:	Ähnlichkeit der aktuellen Baumartenzusammensetzung auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur mit simulierter PNV unter aktuellem Klima	84
Abb. 5-14:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in Kategorien der Ähnlichkeit zwischen aktueller Baumartenzusammensetzung und simulierter PNV unter aktuellem Klima gegliedert nach Höhenstufen.....	85
Abb. 5-15:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in Kategorien der Ähnlichkeit zwischen aktueller Baumartenzusammensetzung und simulierter PNV unter aktuellem Klima gegliedert nach Hauptwuchsgebieten.....	85

Abb. 5-16:	Anteil untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in Klassen der Ähnlichkeit zwischen simulierter PNV unter aktuellem Klima und simulierter PNV unter drei Klimaänderungsszenarien (Analysekriterium ac_6).....	87
Abb. 5-17:	Der Effekt von Klimaänderungsszenario scA auf die simulierte Baumartenzusammensetzung der PNV für untersuchte Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur.....	87
Abb. 5-18:	Anteil untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in Klassen für das Analysekriterium ac_7	88
Abb. 5-19:	Räumliche Verteilung für Klassen des Analysekriteriums ac_7 auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur.....	89
Abb. 5-20:	Potentielle langfristige Auswirkung von drei Klimaänderungsszenarien auf aktuelle Wälder für untersuchte Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur.....	90
Abb. 5-21:	Der Effekt von drei Klimaänderungsszenarios auf die simulierte Baumartenzusammensetzung der PNV für untersuchte Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur gegliedert nach Höhenstufen.....	91
Abb. 5-22:	Der Effekt von drei Klimaänderungsszenarien auf das Analysekriterium ac_7 auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur gegliedert nach Höhenstufen.....	93
Abb. 5-23:	Potentieller Langfristeffekt von drei Klimaänderungsszenarien auf aktuell bestehende Wälder auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur gegliedert nach Höhenstufen.....	95
Abb. 5-24:	Der Effekt von drei Klimaänderungsszenarios auf die simulierte Baumartenzusammensetzung der PNV für untersuchte Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur gegliedert nach Hauptwuchsgebieten.....	97
Abb. 5-25:	Der Effekt von drei Klimaänderungsszenarien auf das Analysekriterium ac_7 auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur gegliedert nach Hauptwuchsgebieten.....	98
Abb. 5-26:	Potentielle langfristige Auswirkung von drei Klimaänderungsszenarien auf aktuell bestehende Wälder auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur gegliedert nach Hauptwuchsgebieten.....	100
Abb. 5-27:	Räumliche Verteilung des Indikators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung einer Klimaveränderung auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter drei Klimaänderungsszenarien.....	102
Abb. 5-28:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Indikators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter den Klimaänderungsszenarios scA, scB und scC.....	103
Abb. 5-29:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in Kategorien des Indikators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Höhenstufen.....	105

Abb. 5-30:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Indikators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Hauptwuchsgebiete	107
Abb. 5-31:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur mit Fichtenanteil >50% [oberirdische stehende Biomasse] in den Kategorien des Indikators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Höhenstufen	109
Beispiel A1-1:	Simulierter sekundärer Fichtenwald in der submontanen Höhenstufe (Hauptwuchsgebiet 7) unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarios	123
Beispiel A1-2:	Simulierter sekundärer Fichtenwald in der tiefmontanen Höhenstufe (Hauptwuchsgebiet 4) unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarios	124
Beispiel A1-3:	Simulierter Buchenwald in der submontanen Höhenstufe (Hauptwuchsgebiet 4) unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarios	125
Beispiel A1-4:	Simulierter "naturnaher" Fichten/Tannen/Buchenwald in der montanen Höhenstufe (Hauptwuchsgebiet 4) unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarios.....	126
Beispiel A1-5:	Simulierter sekundärer Fichtenwald in der unteren subalpinen Höhenstufe (Hauptwuchsgebiet 2) unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarios.....	127
Beispiel A1-6:	Simulierter "naturnaher" Eichen/Hainbuchenwald in der kollinen Höhenstufe (Hauptwuchsgebiet 8) unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarios.....	128
Abb. A3-1:	Die Hauptwuchsgebiete in Österreich nach Kilian et al. (1994).....	130

LIST OF TABLES

Table 3-1.	Species groups for the comparison of current vegetation observed at sample points of the Austrian Forest Inventory with the species composition of simulated potential natural vegetation	33
Table 3-2.	Numerical values and corresponding linguistic terms for the pairwise comparisons.....	34
Table 3-3.	Parameter values for calculating the climate change impact indices SMS and LI.....	36
Table 3-4.	Potential overall impact of climatic change on current forests for combinations of the short-/midterm index SMS and the long-term index LI.....	37
Table 3-5.	Site and soil parameters required to initialise PICUS v1.2.	43
Table 4-1.	Characteristics of climate change scenarios used in the impact analyses.	50
Table 5-1.	Types of potential natural vegetation according to FBVA (1995) represented by the complete sample of 2830 inventory plots selected for this study.	59
Table 5-2.	Number and percentage of unclassified inventory points regarding the expert scheme of potential natural vegetation for all simulated climate scenarios.	59
Table 5-3.	Additional equilibrium forest types identified by means of cluster analyses of all unclassified cases under the baseline and three climate change scenarios.....	60
Table 5-4.	Comparison of simulated potential natural vegetation with expert-PNV at sample plots of the Austrian Forest Inventory.....	61
Table 5-5.	Number of sites within the potential natural forest types as simulated by PICUS v1.2 under the baseline scenario and the climate change scenario scA	66
Table 5-6.	Wilcoxon-Mann-Whitney tests on changes in shares [aboveground biomass] of <i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i> and <i>Quercus</i> spp. under the climate change scenarios scA, scB and scC compared to the baseline scenario	68
Table 5-7.	Percentage of investigated Austrian Forest Inventory points with substantial decennial tree mortality in the period 2000-2050 under current climate and three climate scenarios	77
Table 5-8.	Percentage of investigated Austrian Forest Inventory points within impact categories of the short- to midterm index for forest sensitivity to climate change under three climate change scenarios.....	79
Table 5-9.	Similarity of current forest tree species composition at investigated sample points of the Austrian Forest Inventory to simulated PNV under current climate	84
Table 5-10.	Distribution of the long-term index LI for three climate change scenarios	90
Table 5-11.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within the overall climate change impact categories under the climate change scenarios scA, scB and scC.....	103

Table 5-12.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within overall potential climate change impact categories under three climate change scenarios within altitudinal zones	104
Table 5-13.	Percentage of investigated sample points of the Austrian Forest Inventory within overall potential climate change impact categories under three climate change scenarios within the main ecoregions.....	106
Table 5-14.	Percentage of sample points of the Austrian Forest Inventory with regeneration data which meet the regeneration requirement regarding similarity of current regeneration to simulated PNV under four climate scenarios	110
Table A1-1.	Climate change impact indices SMS, LI and overall climate change impact index CCI for 6 demonstration examples.....	122
Table A2-1.	Modified table for regular densities of regeneration based on Table 7.6.4 in FBVA (1995).	129
Table A3-1.	The main ecoregions of Austria based on Kilian et al. (1994).	129
Table A4-1a.	Altitudinal zones in the main ecoregions in Austria according to Kilian et al. (1994)	131
Table A4-1b.	Altitudinal zones in the main ecoregions in Austria according to Kilian et al. (1994)	132

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 3-1:	Artengruppen für den Vergleich von aktueller Baumartenzusammensetzung auf Inventurpunkten mit der simulierten PNV.	33
Tab. 3-2:	Numerische Werte und linguistische Terme für den paarweisen Vergleich nach Saaty (1996).	34
Tab. 3-3:	Parameterwerte zur Berechnung der Indikatoren SMS und LI.	36
Tab. 3-4:	Ansprache des Indicators CCI für den potentiellen Gesamteffekt einer Klimaänderung anhand des Kurz-/Mittelfristindikators SMS und des Langfristindikators LI.....	37
Tab. 3-5:	Zur Initialisierung von PICUS v1.2 benötigte allgemeine Standortmerkmale und Bodenparameter.....	43
Tab. 4-1:	Charakterisierung der verwendeten Klimaänderungsszenarien.	50
Tab. 5-1:	Potentielle natürliche Waldtypen wie sie von der Österreichischen Waldinventur verwendet werden	59
Tab. 5-2:	Anzahl und Prozentsatz nicht klassifizierter simulierter Equilibriumartenzusammensetzungen unter allen Szenariobedingungen.....	59
Tab. 5-3:	Durch Clusteranalysen aus den unklassifizierten Fällen gebildete zusätzliche simulierte potentielle natürliche Waldtypen.....	60
Tab. 5-4:	Vergleich simulierter PNV mit Expertenansprachen auf Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur	61
Tab. 5-5:	Probepunkte je PNV-Typ auf Basis simulierter PNV unter aktuellem Klima und unter dem Klimaänderungsszenario scA.....	66
Tab. 5-6:	Wilcoxon-Mann-Whitney Tests auf Unterschiede in Biomassenanteilen für Fichte, Buche und Eichen unter den Klimaänderungsszenarien scA, scB und scC im Vergleich zu aktuellem Klima	68
Tab. 5-7:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur mit erheblicher simulierter Baum mortalität in der Periode 2000-2050 unter aktuellem Klima und drei Klimaänderungsszenarien.....	77
Tab. 5-8:	Anteil untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Kurz-/Mittelfristindikators SMS unter drei Klimaänderungsszenarien.....	79
Tab. 5-9:	Ähnlichkeit der aktuellen Baumartenzusammensetzung auf untersuchten Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur mit simulierter PNV unter aktuellem Klima.....	84
Tab. 5-10:	Verteilung der Kategorien des Langfristindikators LI.....	90
Tab. 5-11:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Indicators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter den Klimaänderungsszenarios scA, scB und scC.....	103
Tab. 5-12:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Indicators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Höhenstufen.....	104

Tab. 5-13:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur in den Kategorien des Indikators CCI für die kombinierte kurz-/mittelfristige und langfristige Auswirkung unter drei Klimaänderungsszenarien gegliedert nach Hauptwuchsgebieten.....	106
Tab. 5-14:	Anteile untersuchter Erhebungspunkte der Österreichischen Waldinventur mit vorhandenen Verjüngungsdaten, die ausreichend Verjüngung in bezug auf die simulierte PNV unter vier Klimaszenarien aufweisen	110
Tab. A1-1:	Indikatoren für den Effekt von Klimaänderungsszenarios SMS, LI und allgemeiner Klimafolgenindikator CCI für die 6 Demonstrationsbeispiele....	122
Tab. A2-1:	Richtgrößen für waldbaulich erforderliche Mindestpflanzenzahlen nach FBVA (1995).....	129
Tab. A3-1:	Die Hauptwuchsgebiete in Österreich nach Kilian et al. (1994).....	129
Tab. A4-1a:	Höhenstufengliederung in den Hauptwuchsgebieten Österreichs (nach Kilian et al. 1994, verändert).....	131
Tab. A4-1b:	Höhenstufengliederung in den Hauptwuchsgebieten Österreichs (nach Kilian et al. 1994, verändert).....	132

Summary

In the present study a large-scale climate change impact assessment for Austrian forests is presented. Due to ongoing discussions on a possible global climate change the study aimed at (i) identifying areas which are sensitive to changing climatic conditions, and (ii) indicating the magnitude of potential impacts of a changing climate on currently existing forests. Further key issues of the present study were to integrate available data of the Austrian Forest Inventory, the Austrian Forest Soil Survey and an extensive network of weather stations (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hydrographischer Dienst) with ecological models.

A recently developed 3D-patch model was initialised at a representative subset of sample points of the Austrian Forest Inventory (AFI) with ground-true spatially explicit site and stand data. Current climatic conditions at the inventory points were represented by the period 1961-1995. Monthly temperature and precipitation data of that period were interpolated to the inventory plots from an extensive network of more than 600 weather stations of the Austrian weather services. The construction of climate change scenarios was based on regionalized output of the global circulation model (GCM) ECHAM4. In an attempt to regionalize scenario output of the global circulation model statistical downscaling techniques were employed. Principal component analysis (PCA) was used to condense the information content of temperature, relative humidity and geopotential height fields at three pressure levels at the coarse grid scale of global circulation models for a window extending from Central Europe west across the Atlantic ocean. Principal components of the meteorological variables at the coarse scale were then used as predictors in multiple linear regression models of temperature and precipitation respectively at each inventory plot at the local scale. The regression models were calibrated with the NCEP/NCAR data set. The regression models calibrated with the NCEP/NCAR data were used to regionalize the climate data as simulated by ECHAM4 under both, a control run with a trace gas concentration of the atmosphere according to 1990, and the "business as usual" greenhouse gas emission scenario IS92a of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ("disturbed run") from the coarse grid scale to the inventory plots at the local scale for the period 2000-2065. The time series of monthly temperature and precipitation from 2000 to 2050 was used to simulate the transient response of currently existing forests to a changing climate. From 2050 on the climate was considered as being stable and was represented by the regionalized climate scenario data of the period 2035-2065. Monthly values for temperature and precipitation were stochastically sampled from a normal distribution fitted to data from that period in case of temperature, and from a 2-parameter gamma distribution in case of precipitation.

This attempt to regionalize transient climate data from GCM experiments under the "business as usual" scenario IS92a of the IPCC yielded spatial heterogeneous results for both temperature and precipitation. While temperature showed a generally increasing trend with a mean increase for the represented forest area of appr. +0.8 °C by the year 2050 compared to the average of the period 1961-1995, the pattern of regionalized precipitation anomalies comprised both increases and decreases of up to +/-7%. To complete the envelope of possible future climatic conditions two additional climate change scenarios were constructed based on the regionalized scenario (scA). Scenario scB with a temperature increase of +2 °C by the year 2050 and precipitation as under scenario scA, and scenario scC with the same temperature assumptions as in scenario scB but with an additional decrease in summer precipitation of -15 % by the year 2050 compared to scenario scA.

Vegetation development at each investigated sample point was simulated under current climate (baseline scenario) as well as under the three climate change scenarios without management interventions. Under baseline conditions as well as under scenario scA a total of 2830 sample points were simulated, under scenarios scB and scC the sample size was reduced to 708 inventory points. Similarity measures between simulated vegetation under baseline and under climate change conditions were used to evaluate the impact of a chang-

ing climate for (1) the transient phase 2000 to 2050, and (2) the equilibrium state (i.e., potential natural vegetation (PNV)). Prior to the risk assessment the plausibility of simulated equilibrium species composition was compared to expert reconstructions of PNV available for the forest inventory plots. Based on this model evaluation it was concluded that the employed forest model PICUS v1.2 was capable of reproducing the expected spatial pattern of equilibrium species composition in the Eastern Alps reasonably well.

Major findings of the risk assessment were:

- (1) Severe short-/midterm impact of the moderate warming scenario scA on existing forests with substantial tree mortality was simulated for appr. 3% of the inventory plots included in the study. However, stands not well adapted to site conditions showed substantial periodic tree mortality even under the baseline scenario. The latter result is corroborated by statistics on salvage cuttings in Austrian forests. Under conditions of scenarios scB (strong warming) the proportion of sample points showing severe impacts due to the changing climate increased to 12%, while under scenario scC (strong warming, additional decrease of precipitation) just a slight additional increase of such severe impact stands to 14% occurred. Particularly Norway spruce stands at low elevations in the eastern and partly in the southern parts of Austria responded rather sensitive to small variations in soil moisture supply.
- (2) Short-/midterm impact indices representing the transient response of currently existing forests as recorded by the Austrian Forest Inventory from 2000 to 2050 differed strongly from long-term indices derived from PNV. At lower elevations (today's colline and submontane vegetation belt below 900 m a.s.l.) with frequently occurring secondary Norway spruce forests at sites naturally supporting broad-leaved species mixtures increased tree mortality compared to current climatic conditions was simulated due to increased frequency of drought periods and subsequent bark beetle infestations. While this was an expected response of current forests which are known to suffer from periodical mortality events even under current climatic conditions, the simulated potential natural vegetation at such sites in general showed only minor indications of climate change impacts. The opposite holds true for high altitude sites. At these sites the substantial increase of temperature under scenarios scB and scC resulted in a major shift of the simulated PNV species pool towards broad-leaved species. Thus, despite no indications for immediate adverse effects of a changing climate (as indicated by low impact categories of short-/midterm indices), the long-term implications of the applied climate change scenarios for the competitive interrelationships of tree species might be substantial.
- (3) Under the marked warming conditions of scenarios scB and scC (+2 °C by 2050) the potential impact derived from short-/midterm (2000-2050) as well as from long-term indices (derived from simulated shifts in PNV) was significantly larger compared to the moderate warming conditions of scenario scA. According to a sensitivity index based on both, short-/midterm and long-term measures, the share of sample points with low expected climate change impacts decreased from 67.3 % under conditions of scenario scA (moderate warming) to 18 % under scenario scB (strong warming), and finally to 15.5 % under scenario scC (strong warming, reduced precipitation). From these simulation results it might be concluded that climate change conditions as represented by scenario scA seemed to characterise some kind of threshold beyond which the severity of potential climate change impacts might increase substantial.

Kurzfassung

Hintergrund und Problemstellung

Szenarien einer anthropogen bedingten Klimaänderung werfen die Frage nach möglichen Auswirkungen auf heimische Waldökosysteme auf. Prognosen über das Ausmaß sowie die zeitliche Entwicklung einer solchen Klimaänderung sind nach wie vor hochgradig mit Unsicherheit verbunden. Im wesentlichen deuten alle verfügbaren globalen Klimamodelle (GCM; global circulation models) denselben Entwicklungstrend für den Bereich Mitteleuropa an: Eine mehr oder weniger starke Erhöhung der Jahresmitteltemperatur im Ausmaß von etwa +1 bis +2.5 °C bis zum Jahr 2050. Hinweise deuten darauf hin, dass die Temperaturen im Winter stärker ansteigen werden als im Sommer, die Temperaturminima wiederum stärker als die Maxima. Die Aussagen in bezug auf den Niederschlag variieren zwischen den Klimamodellen sowohl in bezug auf die Richtung der Veränderung als auch in bezug auf Größenordnung und saisonale Differenzierung.

Aufgrund der Bedeutung von Waldökosystemen für den Kohlenstoffhaushalt, die Erhaltung der Biodiversität, den Schutz vor Naturgefahren, die Sicherung der Trinkwasserressourcen und die nachhaltige Produktion des Rohstoffes Holz beschäftigten sich weltweit bereits viele Klimafolgenabschätzungen mit Wäldern. Neben der generellen Komplexität von Waldökosystemen erschwert die Langlebigkeit von Baumpopulationen diese Studien. In Form von Szenarioanalysen ("Was wäre, wenn ...?") wird dabei versucht, mit Simulationsmodellen die Wirkung von Klimaänderungsszenarien auf Ökosysteme abzuschätzen, um so die Bandbreite möglicher Systemreaktionen zu identifizieren. Die Relevanz einer möglichen tiefgreifenden Veränderung in den ökologischen Rahmenbedingungen für die Waldbewirtschaftung ist offensichtlich, hängt doch der Bewirtschaftungserfolg weitgehend von der Angepasstheit der Waldbestände an die jeweiligen Standortsbedingungen ab.

Für Österreich liegen bis dato keine quantitativen flächendeckenden Studien der möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf heimische Waldökosysteme vor.

Angewendete Methoden

In der vorliegenden Studie wurden Daten der Österreichischen Waldinventur (FBVA 1995), der Österreichischen Waldbodenzustandsinventur (Englisch et al. 1991), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik sowie des Hydrographischen Dienstes mit ökologischen Simulationsmodellen integriert. Um den österreichischen Wald (Wirtschaftswald, Schutzwald im Ertrag) repräsentativ zu erfassen, wurden 2830 Erhebungspunkte der Waldinventur ausgewählt. Auf diesen Inventurpunkten wurde das Waldsukzessionsmodell PICUS v1.2, welches am Institut für Waldbau an der Universität für Bodenkultur entwickelt wurde, gemäß den von der Waldinventur bzw. der Waldbodenzustandsinventur erhobenen Standorts- und Bestandesmerkmalen initialisiert. Simuliert wird von PICUS Wachstum, Verjüngung sowie Mortalität von Einzelbäumen auf vielen jeweils 100 m² großen Kleinflächen, die in Summe die Entwicklung eines Waldbestandes charakterisieren. Da der Effekt von Temperatur, Wasser- und Nährstoffversorgung an einem simulierten Standort dabei explizit berücksichtigt wird, können mit PICUS die Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Waldentwicklung abgeschätzt werden.

Um das Waldmodell anwenden zu können, werden monatliche Temperatur- und Niederschlagsdaten zu dessen Betrieb benötigt. Um das gegenwärtige Klima zu repräsentieren, wurden Temperatur- und Niederschlagsdaten der Periode 1961-1995 von über 600 Messstationen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und des Hydrographischen Dienstes an die Waldinventurpunkte extrapoliert. Zur Konstruktion von Klimaänderungsszenarios wurde erstmals flächendeckend für Österreich versucht, ein durch ein globales Klimamodell berechnetes Klimaänderungsszenario zu regionalisieren. Globale Klimamodelle berechnen Klimaänderungsszenarios auf sehr grober Auflösung auf einem Gitternetz von etwa 100 x 100 km². Die direkte Verwendung der auf diesen Gitterpunkten simulierten Klimaszenarios auf lokaler Ebene kann zu groben Fehlinterpretationen führen und entspricht heute nicht mehr dem Stand des Wissens.

Um Ergebnisse des Klimamodells ECHAM4 des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) für Inventurpunkte zu "regionalisieren", wurde folgende Methode angewendet. Ein vom National Centre of Atmospheric Research in Boulder, Colorado (NCEP/NCAR) zur Verfügung gestellter Datensatz (Temperatur, relative Feuchte, geopotentielle Höhe auf Monatsbasis) liegt auf einem dem Modelloutput von ECHAM4 vergleichbaren Gitternetz vor. Die Daten eines geographischen "Fensters", welches von Zentraleuropa bis in den Nordatlantik reichte und das für das Wettergeschehen in Mitteleuropa entscheidend ist, wurde dazu verwendet, um einen statistischen Zusammenhang zwischen den Klimadaten auf dem groben Gitternetz (Makrovariable) und den Klimadaten auf den Inventurpunkten (Mikrovariable) herzuleiten. Um die Datenmenge (429 Gitterpunkte x 420 Monate der Periode 1961-1995) zu reduzieren, wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Die resultierenden Hauptkomponenten der Klimavariablen auf dem groben Gitternetz wurden in multiplen linearen Regressionsmodellen als Prediktoren der lokalen Temperatur- bzw. Niederschlagsdaten verwendet. Dabei erklärten die Modelle für monatliche Temperaturmittel im Mittel 86% der Variabilität, die Modelle für den Monatsniederschlag im Mittel 55%.

Im Allgemeinen bestätigte sich, dass Niederschlagsdaten für stark gegliedertes Gelände wie den Alpenraum jedoch schwierig zu regionalisieren sind. Nachdem die Modelle mit den NCEP/NCAR-Daten parametrisiert wurden, wurden die Temperatur- bzw. Niederschlagsanomalien von zwei durch das Klimamodell ECHAM4 gerechnete Klimaszenarien an die Waldinventurpunkte „transferiert“. Bei den zwei Szenarien handelte es sich um (a) den sogenannten "control run" unter den Treibhausgasbedingungen des Jahres 1990, und (b) um den sogenannten "disturbed run" der dem "business as usual" – Szenario IS92a des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entspricht (historische Treibhausgaskonzentration von 1860 bis 1990, danach bis 2099 eine jährliche Zunahme der Treibhausgase um 1%). Beide Szenarien lagen für die Periode 2000 bis 2065 vor. Die regionalisierte Periode 2000-2050 wurde verwendet, um die transiente Übergangsphase einer Klimaänderung zu charakterisieren. Ab dem Jahr 2050 wurde das Klima wiederum als stabil angenommen.

Das veränderte Klima ab dem Jahr 2050 wurde durch die Periode 2035-2065 repräsentiert. Dieses regionalisierte Klimaänderungsszenario wurde als Szenario scA bezeichnet. Bezogen auf das Jahr 2050 betrug die Temperaturerhöhung im Mittel über Österreich etwa +0.8 °C. Die relativ stärkste Erwärmung entfiel auf (a) die Sommermonate, und (b) die nördlichen und westlichen Landesteile. Die Niederschlagsveränderungen des regionalisierten Szenarios scA wiesen eine höhere räumliche Heterogenität auf als die Temperaturveränderungen (Abb. 4-3a-d) und betrugen bis +/-7% bezogen auf die Jahresniederschlagssumme. Am stärksten reduzierten sich die Niederschläge in den nördlichen Randalpen. Winterniederschlagsveränderungen wiesen eine höhere räumliche Heterogenität auf als die Veränderungen der Sommerniederschläge. Die sommerlichen positiven Anomalien (Zunahmen) des Niederschlags waren relativ klein und auf einige kleinere Regionen im Süden Österreichs beschränkt (Abb. 4-5a-d).

Um die Bandbreite möglicher zukünftiger Klimabedingungen für die Risikoanalyse zu vergrößern, wurden zwei weitere Klimaänderungsszenarien konstruiert. Szenario scB ging von einer Temperaturzunahme bezogen auf das Jahr 2050 von +2 °C aus. Dabei wurde die Variabilität der Temperaturzeitreihe des Szenarios scA beibehalten (Abb. 4-6). Der Niederschlag wurde wie im Szenario scA verwendet. Das Szenario scC schließlich kombinierte die stärkere Temperaturzunahme des Szenarios scB mit einer zusätzlichen Niederschlagsreduktion während des Sommerhalbjahres (April-September) von 15% bezogen auf die Niederschlagsverhältnisse im Szenario scA (vgl. Tab. 4-1).

Die Waldentwicklung auf jedem der ausgewählten Inventurpunkte wurde nun beginnend mit dem "heutigen" Bestandeszustand laut Waldinventur simuliert. Unter gegenwärtigem Klima (baseline scenario) und unter dem Klimaänderungsszenario scA wurden alle ausgewählten Waldinventurpunkte verwendet, unter den Szenarien scB und scC jeweils ein reduzierter Datensatz von etwa 700 Punkten. In den Simulationen wurde keine Bestandesbehandlung

berücksichtigt ("natürliche Waldentwicklung"). Dieses Vorgehen wurde gewählt, da (a) die Festlegung auf ein bestimmtes Bestandesbehandlungsprogramm in plausibler Weise wegen der vielen variierenden Merkmale (Ausgangsbestand, Standort, Klimaänderung, Besitzstruktur, Bewirtschaftungsziele) nicht möglich war und ein Szenario im Szenario dargestellt hätte, und (b) eine simulierte waldbauliche Behandlung es erschwerte bis unmöglich gemacht hätte, den Effekt des Klimaänderungsszenarios auf die aktuell bestehenden Wälder isoliert zu betrachten. Für die Simulationsperiode 2000-2050 konnten sich laut Szenariodefinition neben Pionierbaumarten nur solche Baumarten potentiell im Modell verjüngen, die im Ausgangsbestand laut Waldinventur vertreten waren. Danach waren alle Baumarten potentiell verfügbar und es von der jeweiligen Konkurrenz- und Umweltsituation abhängig, ob und welche Arten sich verjüngen konnten. Für die Simulationsperiode 2000-2050 wurde die Zeitreihe des jeweiligen Klimaänderungsszenarios zum Betrieb des Modells verwendet. Ab dem Simulationsjahr 2050 wurde das Klima mit dem Wettergenerator in PICUS auf der Grundlage der Periode 2035-2065 des jeweiligen Klimaänderungsszenarios stochastisch erzeugt. Insgesamt wurden je Inventurpunkt und Szenario 1400 Simulationsjahre absolviert. Diese Simulationsdauer ist für PICUS notwendig, um eine im Gleichgewicht mit dem jeweiligen Standort befindliche Baumartenzusammensetzung zu simulieren (entspricht der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) im Sinne Tüxens (1956)).

Um den Effekt eines Klimaänderungsszenarios auf aktuell bestehende Wälder abzubilden, wurde wie folgt vorgegangen (Abb. 3-2).

- (1) Um die Reaktion des Ausgangsbestandes auf den simulierten Inventurpunkten in der transienten Phase 2000-2050 zu erfassen, wurde alle zehn Jahre (Simulationsjahre 2010, 2020, 2030, 2040, 2050) die simulierte Vegetation unter dem gegenwärtigen Klima (baseline scenario) jeweils mit der simulierten Vegetation unter einem der drei Klimaänderungsszenarien (scA, scB, scC) verglichen und der Unterschied mittels eines Ähnlichkeitsmaßes quantifiziert.
- (2) Um die potentielle langfristige Auswirkung eines Klimaänderungsszenarios auf einen bestehenden Waldbestand abzuschätzen, wurden zwei Analyse Kriterien abgeleitet, die auf dem Konzept der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) basieren. Um eine mögliche Veränderung des ökologischen Standortpotentials zu erfassen, wurde die simulierte PNV unter aktuellem Klima (baseline scenario) mit der simulierten PNV unter einem Klimaänderungsszenario verglichen. Schließlich wurde noch geprüft, ob sich die Abweichung der Baumartenzusammensetzung des aktuell existierenden Waldbestandes auf einem Inventurpunkt von der simulierten PNV unter einem Klimaänderungsszenario vergrößert im Vergleich zur simulierten PNV unter aktuellem Klima.

Die so ermittelten Analyse Kriterien wurden im Hinblick auf mögliche Effekte bewertet (Abb. 3-3) und in einem hierarchischen Ansatz sowohl zu einem Indikator für das Kurz-/Mittelfristverhalten von Wäldern unter Klimaänderungsbedingungen (SMS) als auch zu einem Indikator für potentielle Langfristwirkungen einer Klimaänderung (LI) aggregiert. SMS und LI wurden schließlich zu einem allgemeinen Klimafolgenindex (CCI) verbunden.

Ergebnisse

Bevor PICUS v1.2 zur Abschätzung der potentiellen Auswirkung von Klimaänderungsszenarios auf bestehende Wälder eingesetzt wurde, erfolgte eine Überprüfung, inwieweit das Modell unter den für diese Studie gegebenen Rahmenbedingungen (Einsatz auf Inventurpunkten, extrapolierte Klimadaten) imstande ist, plausible potentielle natürliche Vegetationszusammensetzungen auf 2830 Erhebungspunkten der Österreichischen Waldinventur unter aktuellem Klima zu simulieren. Die simulierte potentielle natürliche Vegetationszusammensetzung wurde mit den für sämtliche Inventurpunkte vorliegenden Expertenansprüchen der PNV verglichen. Wurden nur solche simulierten Baumartenzusammensetzungen als korrekt bezeichnet, die sämtliche Bedingungen in bezug auf Basis der Vegetationskunde

für jeden PNV-Typ definierte maximal mögliche bzw. minimal erforderliche Artenanteile erfüllten, stimmten in 40.2% aller Fälle Simulation und Expertenansprache überein (Tab. 5-4). Dies stimmt gut mit den Resultaten anderer Modellevaluierungen in der Literatur überein. Bedenkt man zusätzlich, dass (a) natürlich eine simulierte Baumartenkombination nicht als unplausibel zu bezeichnen ist, sollten Schwellenwerte für einzelne Arten geringfügig über- oder unterschritten worden sein, und (b) die Expertenansprache natürlich ebenfalls nur ein (allerdings nicht formalisiertes) Modell darstellt, wurde gefolgert, dass PICUS imstande ist, für den Ostalpenraum überaus plausible Vegetationszusammensetzungen zu generieren.

Wesentliche Ergebnisse der Risikoanalyse waren:

- (1) Unter den Bedingungen des Klimaänderungsszenarios scA (moderate Erwärmung) zeigten sich für ca. 3% aller betrachteten Inventurpunkte starke Auswirkungen durch das veränderte Klima (Wirkungsklassen 4 und 5 von insgesamt 5 Klassen für den Kurz-/Mittelfristindikator SMS). Dieser Anteil erhöhte sich unter den Bedingungen des Szenarios scB (starke Erwärmung) auf ca. 13%, im Falle des Szenarios scC (starke Erwärmung, zusätzliche Abnahme des Niederschlages im Sommerhalbjahr von 15%) auf ca. 14%. Für einen Großteil der in diesen Kategorien erfassten Bestände bedeutet dies, dass in der Periode 2000-2050 starke Baum mortalität (Nettobiomassenverlust innerhalb einer Dekade >20%) simuliert wurde. Der Anteil von Inventurpunkten, auf denen PICUS v1.2 schon unter gegenwärtigem Klima (baseline scenario) periodische Mortalität dieser Größenordnung simuliert, betrug 1.3%. Hauptsächlich betroffen waren davon Fichtenbestände (*Picea abies* (L.) karst.), die gemäß den Modellannahmen sehr sensitiv auf Veränderungen des Wasserhaushalts reagierten. Die Klassen 4 und 5 des Kurz-/Mittelfristindikators SMS beschränkten sich unter den Bedingungen der Szenarien scA und scB auf die heutige kolline, submontane und tiefmontane Höhenstufe. Unter Szenario scC erstreckte sich der Vorkommensbereich solcher starken Klimaänderungseffekte bis in die heutige mittelmontane Höhenstufe. Der Anteil der Inventurpunkte, auf denen die simulierten Bestände kaum oder nur sehr schwache Wirkung erkennen ließen, reduzierte sich von knapp 71% unter Szenario scA (moderate Erwärmung) auf ca. 53% unter den Szenariobedingungen von scB (starke Erwärmung) und scC (starke Erwärmung, zusätzliche Reduktion des Niederschlags im Sommerhalbjahr um 15%).
- (2) Der von Veränderungen der simulierten potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) und Vergleichen der Baumartenzusammensetzung in aktuell bestehenden Beständen mit simulierter PNV abgeleitete Langfristindikator LI zeigt ein deutliches Ansteigen des Anteiles von Inventurpunkten, für die die Modellergebnisse starke bis sehr starke Auswirkungen von klimatischen Veränderungen anzeigen (Kategorien 4 und 5 des Indikators LI), von 1.2% unter Bedingungen des Szenarios scA, über 25.8% unter Szenario scB bis 43.4% unter den Bedingungen des Szenarios scC. Gleichzeitig reduziert sich der Anteil derjenigen Punkte, für die nur sehr schwache langfristige Auswirkungen erwartet wurden, von ca. 42% unter Szenario scA, auf knapp 1% unter Szenario scC (Tab. 5-10). Der Anteil von Inventurpunkten, die den LI-Kategorien 4 und 5 zugeordnet wurden, konzentrierte sich auf höhergelegene Standorte. Unter Szenario scA auf die heutige subalpine Höhenzone beschränkt, erweitert sich der Vorkommensbereich solcher Punkte unter Szenario scB jedoch bis in die heutige mittelmontane, unter Szenario scC bis in die tiefmontane Höhenstufe.
- (3) Werden Kurz-/Mittelfristindikator SMS und Langfristindikator LI zu einem Index für die allgemeine Wirkung einer Klimaänderung auf bestehende Wälder kombiniert (CCI), zeigt sich wiederum deutlich das Ansteigen von starker und sehr starker simulierter Klimafolgenwirkung (CCI-Kategorien 3 und 4) unter den Szenarien scB (24.4%) und scC (39.9%) im Vergleich zu den Bedingungen unter dem Szenario scA (6.7%) (Tab. 5-11 und Abb. 5-28). Verglichen nach heutigen Höhenzonen erwies sich die Zunahme der Klimaänderungsfolgen unter Szenario scB (starke Erwärmung) im Vergleich zu Szenario scA (moderate Erwärmung) mit Ausnahme der kollinen Stufe immer als signifikant ($\alpha = 0.05$). Unter Szenario scC (starke Erwärmung, zusätzliche Reduktion der Niederschläge im Sommerhalbjahr um 15%) erfolgte eine weitere signifikante Zunahme des Indikators CCI

verglichen mit dem Szenario scB nur mehr in der mittel- und hochmontanen Höhenstufe. Werden die Ergebnisse getrennt nach Hauptwuchsgebieten betrachtet, ist die Zunahme der CCI-Kategorie 4 (sehr starke Auswirkung einer Klimaänderung) in den Hauptwuchsgebieten 4 (Nördliche Randalpen), 5 (Östliche Randalpen), 6 (Südliche Randalpen), 7 (Nördliches Alpenvorland), und 9 (Mühl- und Waldviertel) am stärksten. Nur relativ gering ist die CCI-Kategorie 4 im Hauptwuchsgebiet 8 (Sommerwarmer Osten) vertreten. Dies ist allerdings primär darauf zurückzuführen, dass die Indikatoren den Effekt einer Klimaänderung charakterisieren und viele aktuelle Bestände bereits unter dem gegenwärtigen Klima (baseline scenario) nur mangelhaft an die jeweiligen Standortsverhältnisse angepasst erscheinen. Der zusätzliche negative Effekt einer klimatischen Veränderung fällt dann oft nur mehr geringfügig aus. Mag somit der Anteil der Punkte in Wirkungskategorie 4 (starke Auswirkung einer Klimaänderung) aus diesem Grund oft als niedrig erscheinen, ist aber im Gegensatz dazu der Anteil der CCI-Kategorie 1 (schwache Auswirkung einer Klimaänderung) im Sommerwarmen Osten am niedrigsten (Tab. 5-13). Als besonders anfällig für Klimaänderungsfolgen erweisen sich wie erwartet fichtenreiche Bestände in Tieflagen. Unter den Bedingungen des Klimaänderungsszenarios scC wurden in der heutigen kollinen Höhenstufe über 66% aller Bestände mit mindestens 50% Biomassenanteil der Fichte der CCI-Kategorie 4 zugeordnet, 54% in der submontanen Zone und immerhin noch knapp 44% in der tiefmontanen Höhenstufe (Abb. 5-31).

- (4) Alle Inventurpunkte, für die eine Ansprache der Verjüngungssituation durch die Österreichische Waldinventur vorlag, wurden daraufhin analysiert, inwieweit die vorhandene Verjüngung mit der Artenzusammensetzung der unter den drei Klimaänderungsszenarien (scA, scB, scC) simulierten potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) übereinstimmt. In einem solchen Fall kann das natürliche Adaptionspotential von heute bestehenden Waldbeständen als günstig eingestuft werden. Betrug der Anteil solcher Inventurpunkte unter gegenwärtigem Klima (baseline scenario) über 76% und unter Szenario scA (moderate Erwärmung) immerhin knapp über 75%, reduzierte sich dieser Anteil unter Szenario scB (starke Erwärmung) auf 66%, unter Szenario scC (starke Erwärmung, zusätzliche Reduktion des Niederschlags im Sommerhalbjahr um 15%) auf ca. 45% (Tab. 5-14).

Folgerungen

Anhand der Ergebnisse kann gefolgert werden, dass eine Temperaturerhöhung von etwa +1 °C (Jahresmittel) bezogen auf die Periode 1961-1995 bei im wesentlichen unveränderten Niederschlägen einen Schwellenwert darzustellen scheint, ab dem es zu starkem Ansteigen der Auswirkungen auf bestehende Wälder kommen dürfte. Zusätzlich reduzierte Niederschläge während der Vegetationsperiode verschärfen diese Situation zusätzlich. Bereits unter gegenwärtigem Klima (repräsentiert durch die Periode 1961-1995) treten in Tieflagen insbesondere in fichtendominierten Waldbeständen klimainduzierte Schäden auf. Auffallend das stark kontrastierende Verhalten von Kurz-/Mittelfristindikator SMS und Langfristindex LI. Während der Indikator SMS vor allem konzentriert in tieferen Lagen erhebliche Probleme im Falle von klimatischen Veränderungen wie sie durch die drei Klimaänderungsszenarien (scA, scB, scC) repräsentiert wurden anzeigt, deutet der auf dem PNV-Konzept beruhende Langfristindikator LI auf deutliche subtiler wirkende Folgen einer Klimaveränderung in höheren Lagen hin. In diesen Lagen stellen die Temperaturverhältnisse für viele Laubbaumarten einen limitierenden Faktor dar, was im Falle einer Erwärmung zu einer drastischen Veränderung der Konkurrenzverhältnisse zwischen den Baumarten führen dürfte. In den heute schon trockenen und warmen Regionen (Sommerwarmer Osten, Alpenvorland, Niederösterreichischer Alpenostrand, Klagenfurter Becken) nimmt den Modellresultaten zufolge der Anteil von trockenoleranteren Eichenarten (*Quercus petraea*, *Quercus cerris*, teilw. *Quercus pubescens*) und teilweise Weißkiefer (*Pinus sylvestris*) auf heutigen Eichenstandorten zwar zu, jedoch deutet unter den analysierten Klimaänderungsszenarien nichts auf eine Tendenz zur Versteppung hin. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die in dieser Studie involvierten Waldinventurpunkte eventuell nicht die extremsten Standorte der östlichen Regionen Öster-

reichs repräsentieren. Für heutige potentielle natürliche Buchenwaldstandorte wird auch in den meisten Fällen unter den Klimaänderungsszenarien eine buchendominierte PNV simuliert. Der Buchenanteil in den montanen Höhenstufen nimmt unter den wärmeren Bedingungen der Szenarien scA, scB und scC deutlich zu. Es sollte jedoch Klarheit darüber bestehen, dass die Interpretation von ausgewiesenen Klimafolgenkategorien, die in einem indirekten Ansatz von der potentiellen natürlichen Vegetation abgeleitet wurden (z.B., Indikator LI), natürlich entsprechend limitiert ist und der Berücksichtigung der jeweiligen Standortverhältnisse bedarf. So ist es offensichtlich, dass beispielsweise ein berechnetes Ähnlichkeitsmaß von $PS = 0.5$ zwischen der simulierten PNV unter gegenwärtigem Klima und unter einem Klimaänderungsszenario auf einem Eichenstandort im Sommerwarmen Osten anders zu interpretieren ist, als ein entsprechendes Ergebnis auf einem heutigen hochmontanen Fichtenstandort.

Was bedeuten die Ergebnisse im Hinblick auf die Waldbewirtschaftung? In höhergelegenen Lagen (heutige montane bis subalpine Höhenstufe) wären die grundsätzlichen Konsequenzen einer klimatischen Veränderung wie sie in den Klimaänderungsszenarien scA, scB und scC abgebildet wurden, ein vergrößerter waldbaulicher Entscheidungsraum sowohl in Fragen von Baumartenwahl als auch in Fragen geeigneter Naturverjüngungsverfahren. Dies würde den Anspruch an den waldbaulichen Planungsprozess in diesen Höhenlagen deutlich steigern. Die Modellergebnisse zeigen auch, dass unter den Bedingungen der Klimaänderungsszenarien scB und scC mit Temperaturerhöhungen von jeweils $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ davon ausgegangen werden kann, dass eine geregelte nachhaltige Bewirtschaftung von Fichtenwäldern in der heutigen kollinen, submontanen und teilweise in der tiefmontanen Höhenstufe weitestgehend ausgeschlossen werden kann. In Tieflagen ließe in Fragen der Baumartenwahl eine Orientierung an der potentiellen natürlichen Vegetation (PNV) eine Milderung der laut Modellberechnungen erwarteten Klimaänderungsfolgen erwarten. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass ein großer Anteil der heutigen Waldbestände schon unter den gegenwärtigen Klimaverhältnissen eindeutig als schlecht an die jeweiligen Standortverhältnisse angepasst bezeichnet werden muss. Worauf jedoch ebenfalls hingewiesen werden soll, ist der Umstand, dass die potentielle natürliche Vegetation zwar indirekt die Eignung der in der PNV vertretenen Baumarten anzeigt, in Mischung nachhaltig quasi "natürlich" koexistieren zu können ohne die Standortqualität negativ zu beeinträchtigen, jedoch keine fundierten Aussagen zur ökophysiologischen Eignung (d.h. zur physiologischen Amplitude) der einzelnen Arten per se zulässt. Der Vollständigkeit halber sei noch angemerkt, dass eine Baumartenzusammensetzung die aus der "Orientierung" an der PNV resultiert, keinesfalls den Zielsetzungen der Waldbewirtschaftung entsprechen muss. Angesichts der in der Praxis naturgemäß eingeschränkten Detailliertheit bei der Rekonstruktion von potentiellen natürlichen Vegetationseinheiten und der damit verbundenen Unsicherheiten ist eine stärkere Berücksichtigung autökologischer Arteigenschaften anzuraten.

Schließlich muss angemerkt werden, dass die Ergebnisse der vorliegenden Studie nicht als Prognosen aufgefasst werden dürfen. Ausschlaggebend dafür sind sowohl die Unsicherheiten in bezug auf die zukünftige Klimaentwicklung als auch in bezug auf das vorhandene Wissen zu physiologischen Ansprüchen und synökologischem Verhalten der heimischen Baumarten. Schließlich muss berücksichtigt werden, dass neben den ökologischen Rahmenbedingungen die gesellschaftliche und sozioökonomische Entwicklung wesentliche Determinanten der zukünftigen Entwicklung unserer Wälder sein werden. Der präsentierte methodische Ansatz erwies sich als gut geeignet, um Regionen und ökologische Bedingungen, unter denen heute bestehende Wälder besonders sensitiv auf klimatische Veränderungen reagieren könnten, zu identifizieren. Für besonders sensible Regionen empfehlen sich zusätzliche Detailanalysen zur Identifizierung von Risikopotentialen mit detaillierteren Modellansätzen. Solche detaillierteren Modellansätze würden einen bei weitem höheren Datenaufwand bedeuten (Klima, Boden) und könnten in einem großräumigen Maßstab wie in der vorliegenden Studie nur mit erheblichem Mehraufwand durchgeführt werden. Schließlich bedarf die modellgestützte Entwicklung und Analyse von optimierten Waldbehandlungsstrategien im Rahmen einer Mehrzweckforstwirtschaft unter Berücksichtigung veränderlicher Umweltbedingungen vermehrter Aufmerksamkeit.