

Treibhausgas Inventar: Waldkennzahlen und jährlicher Klimaeinfluss

Esther Thürig¹, Edgar Kaufmann¹, Stéphanie Schmid² und Harald Bugmann²

¹ Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL; Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

² Waldökologie, Departement Umweltwissenschaften, ETH Zürich, Sämistrasse 101, 8092 Zürich

1 Einleitung

Das Treibhausgasinventar verlangt Kennzahlen über Waldzustand und Waldwachstum. Die Kennzahlen für die Kategorie „forest remaining forest“ werden aus den beiden Landesforstinventaren (LFI I und II) hergeleitet. Die Herleitung erfolgt nur mittels der terrestrischen Stichproben. Minimale Unterschiede zwischen den hergeleiteten Kennzahlen und dem LFI II Resultatband sind darauf zurückzuführen, dass beim Resultatband zusätzliche Information zur Stratifikation aus den Luftbildinterpretationen verwendet wurde.

Die Kennzahlen über das Waldwachstum stellen konstante jährliche Werte dar. Für zukünftige Treibhausgasinventare soll jedoch auch die interannuelle Variabilität des Wachstums aufgrund des Klimas berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der Wachstums-Variabilität werden bestehende Klimareihen von Klimastationen der Meteo-Schweiz verwendet. Anhand dieser Daten und des Ökosystem-Simulationsmodelles Biome-BGC werden durch multiple lineare Regression einfache empirische Formeln für die Abhängigkeit des Waldwachstums vom Klima hergeleitet.

2 Stratifizierung

Alle berechneten Kennzahlen werden bezüglich der LFI-Merkmale Produktionsregion, Höhenstufe, Baumartengruppe und BHD unterschieden (Tab. 1). Eine Varianzanalyse der Kennzahlen zeigt, dass die Unterscheidung in BHD-Gruppen bei den Biomasse-Expansionsfaktoren (Tab. 2a) den kleinsten Anteil der Varianz erklärt. Deshalb und aus Gründen der Praktikierbarkeit wird bei den folgenden Berechnungen der Kennzahlen auf die Stratifizierung bezüglich BHD verzichtet. Auch bezüglich „Bruttozuwachs“ wurde eine Varianzanalyse durchgeführt, um die statistische Signifikanz und Reihenfolge der stratifizierenden Grössen zu bestimmen. Die Resultate in Tabelle 2b zeigen, dass alle stratifizierenden Grössen hoch signifikant sind, und dass sie die gleiche Reihenfolge aufweisen wie schon bei den Expansionsfaktoren.

Tab. 1: Stratifizierung in 5 Produktionsregionen, 3 Höhenstufen, 2 Baumartengruppen und 2 BHD Klassen.

Merkmal	Ausprägungen				
Produktionsregion	Jura	Mittelland	Voralpen	Alpen	Südalpen
Höhenstufe	≤600 müM (600)	601-1200 müM (1200)	>1200 müM (1800)		
Baumartengruppe	Nadelholz	Laubholz			
BHD	≤36 cm	>36 cm			

Tab. 2a: Varianzanalyse der Biomasse-Expansionsfaktoren.

	F Wert	P Wert
Nadel/Laub	18'832	<0.0001
Produktionsregion	2434	<0.0001
Höhenstufe	103	<0.0001
BHD	13	0.0003

Tab. 2b Varianzanalyse des Bruttozuwachses.

	F Wert	P Wert
Nadel/Laub	421	<0.0001
Produktionsregion	45	<0.0001
Höhenstufe	34	<0.0001

Zur Abschätzung des Klimaeinflusses auf den jährlichen Zuwachs werden die beiden tiefer gelegenen Höhenstufen (≤600 müM und 601-1200 müM) der Produktionsregion Alpen zusätzlich in zwei Regionen aufgeteilt: Alpen West (Wirtschaftsregionen 9 und 12 gemäss LFI) und Alpen Ost (Wirtschaftsregionen 10, 11 und 13 gemäss LFI). Die Aufteilung erfolgt aufgrund der Tatsache, dass sich diese beiden Regionen hinsichtlich des Klimas stark unterscheiden, v.a. was den Niederschlag und die Temperatur während der Vegetationsperiode betrifft (vergleiche Baumgartner 1983¹ und Kirchhofer 2000²). Daher enthalten die Tabellen 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13 und 14, deren Daten zur Berechnung des jährlichen Zuwachses (als totale Biomasse pro Stratum) benötigt werden, einzelne Werte für diese vier Regionen. Dies ergibt insgesamt 34 Straten (Tab. 3)

¹ Baumgartner, A., E. Reichel und G. Weber. 1983. Der Wasserhaushalt der Alpen. München Wien Oldenbourg.

² Kirchhofer, W. 2000. Klimaatlas der Schweiz (1:1'750'000). Verlag des Bundesamtes für Landestopographie, Wabern-Bern.

Tab. 3: Zusammenfassung der 34 Straten. Pro Produktionsregion wurden jeweils 3 Höhenstufen gebildet: ≤ 600 müM (600); 601-1200 müM (1200) und >1200 müM (1800). In den Alpen wurden die beiden tiefer gelegenen Höhenstufen zusätzlich noch in die Regionen West und Ost eingeteilt.

Stratum- Nummer	Produktions- region	Region	Höhenstufe	Baumartengruppe
1	Jura		600	Nadelholz
2	Jura		600	Laubholz
3	Jura		1200	Nadelholz
4	Jura		1200	Laubholz
5	Jura		1800	Nadelholz
6	Jura		1800	Laubholz
7	Mittelland		600	Nadelholz
8	Mittelland		600	Laubholz
9	Mittelland		1200	Nadelholz
10	Mittelland		1200	Laubholz
11	Mittelland		1800	Nadelholz
12	Mittelland		1800	Laubholz
13	Voralpen		600	Nadelholz
14	Voralpen		600	Laubholz
15	Voralpen		1200	Nadelholz
16	Voralpen		1200	Laubholz
17	Voralpen		1800	Nadelholz
18	Voralpen		1800	Laubholz
19	Alpen	Ost	600	Nadelholz
20	Alpen	Ost	600	Laubholz
21	Alpen	West	600	Nadelholz
22	Alpen	West	600	Laubholz
23	Alpen	Ost	1200	Nadelholz
24	Alpen	Ost	1200	Laubholz
25	Alpen	West	1200	Nadelholz
26	Alpen	West	1200	Laubholz
27	Alpen		1800	Nadelholz
28	Alpen		1800	Laubholz
29	Südalpen		600	Nadelholz
30	Südalpen		600	Laubholz
31	Südalpen		1200	Nadelholz
32	Südalpen		1200	Laubholz
33	Südalpen		1800	Nadelholz
34	Südalpen		1800	Laubholz

3 Flächenanteil Nadelholz/Laubholz

Für jedes Stratum wird der Flächenanteil vom Nadelholz aus dem entsprechenden Basalflächenanteil berechnet. Die Summe der Basalfläche des Nadelholzes in jedem Stratum wird dividiert durch die Summe der gesamten Basalfläche im Stratum. Der Laubholzanteil berechnet sich als 1 minus den Nadelholzanteil. Tabelle 4 zeigt die Quotienten für die verschiedenen Straten.

Tab. 4: Prozent Basalflächenanteil Nadelholz/Laubholz.

Produktionsregion	Region	Höhenstufe	Nadelholz	Laubholz
Jura		600	0.352	0.648
Jura		1200	0.581	0.419
Jura		1800	0.751	0.249
Mittelland		600	0.558	0.442
Mittelland		1200	0.646	0.354
Mittelland		1800	0.902	0.098
Vorlappen		600	0.395	0.605
Vorlappen		1200	0.713	0.287
Vorlappen		1800	0.925	0.075
Alpen	Ost	600	0.472	0.528
Alpen	West	600	0.258	0.742
Alpen	Ost	1200	0.687	0.313
Alpen	West	1200	0.596	0.404
Alpen		1800	0.962	0.038
Südalpen		600	0.06	0.94
Südalpen		1200	0.152	0.848
Südalpen		1800	0.81	0.19

4 Produktive Waldfläche A [ha]

Die Produktive Waldfläche wird folgendermassen berechnet. Die totale Waldfläche wird aus der Luftbildinterpretation hergeleitet und ergibt 1'234'000 ha. Aus dem Luftbild wird der Gebüschwald bestimmt. Für das Kyoto Reporting wurde entschieden, folgende LFI Kategorien zum produktiven Wald zu rechnen.

- Bisheriger produktiver Wald (typ30517 in 4,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16) → Tabelle 5!
- Dauernd nicht bestockte Fläche (Waldstrassen, Kehrplätze, Lawinenzüge, typ30517=3)
- Böschungen (unter Luftseilbahnen, Sesselliften oder an Bahndämmen, typ30517=5).

Folgende LFI Kategorien werden zum unproduktiven Wald gerechnet

- Gebüschwald (aus Luftbild)
- Unzugänglicher Wald (auch aus Luftbild)

Die Flächen pro Stratum sind in der Tabelle 6 aufgelistet.

Tab. 5. Waldtypen, welche im LFI unterschieden werden.

TYP30517	COUNT(*)	Name
3	150	Dauernd nicht bestockte Fläche
4	63	Vorübergehend nicht bestockte Fläche
5	29	Schneisen und Böschungen
6	268	Dauernd aufgelöste Bestockung
7	18	Selven und Plantagen
8	105	Niederwald
9	119	Mittelwald
10	249	Plenterartiger Hochwald
11	464	Ungleichförmiger Hochwald
12	292	Jungwuchs/Dickung
13	823	Stangenholz
14	861	Schwaches Baumholz
15	1191	Mittleres Baumholz
16	793	Starkes Baumholz

Tab. 6. Waldfläche in der Schweiz, stratifiziert nach Produktionsregion, Höhenstufe und Baumartentyp. Prodreg: Produktionsregion, Reg: Region, JU: Jura, ML: Mittelland, VOR: Voralpen, ALP: Alpen, SÜD: Südalpen.

Prod-reg	Reg	Höhenstufe	Kyoto Wald Nadel	Kyoto Wald Laub	Kyoto Wald Total	Gebüschwald	Unzugänglicher Wald	Dauernd nicht bestockte Fläche	Tracks
			[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]	[ha]
JU		600	18734	34488	53222	25	356	2670	1
JU		1200	69393	50045	119438	1	1780	3916	712
JU		1800	17779	5895	23674	1	178	178	178
ML		600	77771	61603	139374	25	534	1780	890
ML		1200	58874	32262	91136	25	356	2670	178
ML		1800	2408	262	2670	1	0	178	1
VOR		600	3234	4954	8188	25	356	356	1
VOR		1200	96328	38774	135102	50	3204	5874	356
VOR		1800	67836	5500	73336	2100	1780	2670	356
ALP	Ost	600	1680	1880	3560	0	356	178	0
ALP	West	600	1240	3566	4806	100	0	356	178
ALP	Ost	1200	40354	18386	58740	750	2848	1780	178
ALP	West	1200	27901	18913	46814	1175	2136	1958	0
ALP		1800	234936	9280	244216	36925	7120	5340	1958
SÜD		600	1164	18238	19402	200	534	178	356
SÜD		1200	8360	46642	55002	2550	3560	1958	178
SÜD		1800	50751	11905	62656	16875	5162	534	178
Total									
Waldfläche:			778743	362593	1141336	60828	30260	32574	5699

5 Vorrat/Zuwachs/Abgänge

Vorrat, Zuwachs und Abgänge (Nutzung und Mortalität) werden auf der Basis jener Stichprobepunkte berechnet, welche sowohl im LFI I wie auch im LFI II erhoben worden sind (5425 Stichprobepunkte). Es wurden die LFI Waldtypen 3-16 verwendet. Die Kennzahlen beziehen sich auf die Grösse „Schaftholz in Rinde und mit Stock“ (siehe Anhang). Für jedes Stratum sind die Kennzahlen in „m³ pro ha“ berechnet. Die ha Werte lassen sich auf die Produktive Waldfläche hochrechnen. In Tabelle 7 sind die Kennzahlen für die Nadelbäume aufgelistet, in Tabelle 8 die Kennzahlen für Laubbäume.

Tab. 7. Vorrat, Zuwachs und Nutzung (inkl. Mortalität) für Nadelbäume. Prodreg: Produktionsregion.

Prodreg	Region	Höhen- stufe	Vorrat 1985 [m³ ha⁻¹]	Vorrat 1995 [m³ ha⁻¹]	Brutto Zuwachs (inkl. Nutzung und Mortalität) [m³ ha⁻¹ 10.1yr⁻¹]	Nutzung und Mortalität [m³ ha⁻¹ 10.1yr⁻¹]
Jura		600	354.12	381.29	96.96	69.73
Jura		1200	372.10	393.62	97.35	75.82
Jura		1800	255.32	265.31	61.42	52.01
Mittelland		600	414.90	425.15	144.14	133.34
Mittelland		1200	458.41	477.94	146.70	127.01
Mittelland		1800	282.75	291.16	34.55	26.14
Voralpen		600	473.58	506.79	132.36	99.14
Voralpen		1200	482.43	515.95	132.71	98.85
Voralpen		1800	356.09	372.59	76.12	59.58
Alpen	Ost	600	346.60	352.32	52.87	47.16
Alpen	West	600	171.38	202.15	75.19	44.42
Alpen	Ost	1200	370.39	386.05	85.09	69.80
Alpen	West	1200	260.16	276.19	71.59	55.59
Alpen		1800	295.36	304.62	56.58	47.51
Südalpen		600	234.46	236.89	18.19	15.76
Südalpen		1200	245.82	263.12	46.73	29.43
Südalpen		1800	229.02	258.05	42.89	13.88

Tab. 8. Vorrat, Zuwachs und Nutzung (inkl. Mortalität) für Laubbäume. Prodreg: Produktionsregion.

Prodreg	Region	Höhen- stufe	Vorrat 1985 [m³ ha⁻¹]	Vorrat 1995 [m³ ha⁻¹]	Brutto Zuwachs (inkl. Nutzung und Mortalität) [m³ ha⁻¹ 10.1yr⁻¹]	Nutzung und Mortalität [m³ ha⁻¹ 10.1yr⁻¹]
Jura		600	322.29	357.28	96.07	61.19
Jura		1200	318.04	354.25	91.93	55.75
Jura		1800	196.67	233.21	50.95	12.38
Mittelland		600	342.05	377.85	134.41	99.01
Mittelland		1200	370.66	424.40	142.1	88.57
Mittelland		1800	144.81	233.50	110.57	21.88
Voralpen		600	379.93	427.12	115.75	68.56
Voralpen		1200	374.75	427.88	113.4	60.82
Voralpen		1800	257.27	311.70	72.32	17.88
Alpen	Ost	600	382.98	373.57	107.96	117.38
Alpen	West	600	156.46	190.79	78.05	45.32
Alpen	Ost	1200	249.86	299.12	83.94	35.02
Alpen	West	1200	193.29	217.06	46.78	23.01
Alpen		1800	168.69	225.99	81.64	24.41
Südalpen		600	152.1	176.26	52.55	28.43
Südalpen		1200	134.02	163.17	49.93	20.96
Südalpen		1800	142.14	186.53	60.34	16.26

6 Mortalität

Der Anteil Mortalität oder natürlicher Abgänge wird nur für die Produktionsregionen unterschieden. Tabelle 9 ist ein Auszug aus dem LFI Resultatband (S.94)

Tab. 9. Natürliche Abgänge im Zeitraum 1983/85-1993/95 als % der gesamten Abgänge pro Produktionsregion.

	Jura	Mittelland	Voralpen	Alpen	Alpensüdseite	Schweiz
In % der Nutzung	8%	6%	16%	27%	50%	14%
In % des Vorrats LFI I	1.4%	1.6%	2.7%	4.7%	4.6%	2.6%

7 Holzdichten

Tab. 10. Verwendete Holzdichten für Nadelholz und Laubholz.

	Dichte [t Trockengewicht/ m ³ Holz]
Nadelholz	0.4
Laubholz	0.55

8 Biomasse Expansionsfaktoren

Im LFI werden die Kennzahlen Vorrat, Zuwachs und Nutzung als „Schaftholz in Rinde und Stock“ ausgedrückt. Diese Kennzahlen, multipliziert mit der Holzdichte aus Tabelle 10, lassen sich mittels Biomasse-Expansionsfaktoren in Biomasse umrechnen. Die Expansionsfaktoren wurden im Artikel von Perruchoud et al. 1999³ berechnet. Abhängig vom BHD wurden einzelne Baumteile wurden mit Hilfe von allometrischen Funktionen geschätzt. Um die Funktionen zu kalibrieren standen unterschiedlich viele gemessene Baumdaten zur Verfügung. Um die Schaftholzfunktion zu kalibrieren wurden 38'000 Bäume verwendet, für die Ast-Funktion 12'000 Bäume, die Funktion für grobe Wurzeln wurde mit 100 Bäumen kalibriert und diejenige für Nadeln/Blätter mit 400 Bäume. Zur Abschätzung der Rinde wurde ein schon bestehendes Modell von Altherr et al. 1978⁴ verwendet. Die Funktionen wurden auf die Einzelbaumdaten des LFI II angewendet. Die Biomasse-Expansionsfaktoren besitzen keine Einheit. In den Tabellen 11 und 12 sind die Faktoren für alle Straten aufgelistet.

³ Perruchoud, D., F. Kienast, E. Kaufmann und O. U. Bräker. 1999. 20th century carbon budget of forest soils in the Alps. *Ecosystems* 2:320-337.

⁴ Altherr, E., P. Unfried, J. Hradetzky und V. Hradetzky. 1978. Statistische Rindenbeziehungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes, Teil IV. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 90.

Da für Nadelholz in den Südalpen nicht genügend Daten zu Verfügung standen (Tab. 11), wurden in dieser Produktionsregion alle Daten bis 1200 m zusammengenommen um den Faktor zu bestimmen. Ebenfalls mangels genügender Daten wurde für Laubholz in der Produktionsregion Mittelland (Tab. 12) nur Daten unter 600 m und über 600 m unterschieden.

Tab. 11. Biomasse Expansionsfaktoren für Nadelholz von Schaftholz in Rinde und Stock (kg/ha; t/ha) in totale Biomasse, respektive oberirdische Biomasse.

Produktions- region	Region	Höhen- stufe	Anzahl Bäume	Totale Biomasse	Oberirdische Biomasse	Root/Shoot
Jura		600	801	1.47	1.18	0.24
Jura		1200	2855	1.5	1.2	0.25
Jura		1800	549	1.6	1.24	0.29
Mittelland		600	2965	1.46	1.18	0.23
Mittelland		1200	2563	1.47	1.19	0.23
Mittelland		1800	106	1.65	1.26	0.3
Voralpen		600	129	1.48	1.19	0.24
Voralpen		1200	4220	1.48	1.2	0.24
Voralpen		1800	2909	1.59	1.25	0.27
Alpen	Ost	600	97	1.43	1.17	0.22
Alpen	West	600	45	1.44	1.16	0.24
Alpen	Ost	1200	1574	1.49	1.18	0.26
Alpen	West	1200	976	1.48	1.18	0.26
Alpen		1800	8556	1.57	1.21	0.29
Südalpen		600				
Südalpen		1200	260	1.54	1.18	0.3
Südalpen		1800	1576	1.61	1.22	0.32

Tab. 12. Biomasse Expansionsfaktoren für Laubholz von Schaftholz in Rinde und Stock (kg/ha; t/ha) in Biomasse und oberirdische Biomasse.

Produktions- region	Region	Höhen- stufe	Anzahl Bäume	Totale Biomasse	Oberirdische Biomasse	Root/Shoot
Jura		600	1371	1.5	1.19	0.26
Jura		1200	2392	1.5	1.19	0.27
Jura		1800	225	1.55	1.19	0.31
Mittelland		600	2447	1.54	1.24	0.24
Mittelland		1200	1504	1.55	1.25	0.23
Mittelland		1800				
Voralpen		600	239	1.49	1.17	0.28
Voralpen		1200	1980	1.49	1.18	0.27
Voralpen		1800	241	1.56	1.18	0.32
Alpen	Ost	600	73	1.52	1.2	0.26
Alpen	West	600	104	1.57	1.17	0.34
Alpen	Ost	1200	806	1.56	1.17	0.33
Alpen	West	1200	622	1.57	1.18	0.34
Alpen		1800	327	1.62	1.16	0.39
Südalpen		600	547	1.64	1.16	0.42
Südalpen		1200	1225	1.67	1.16	0.43
Südalpen		1800	369	1.7	1.18	0.44

Soll eine andere Grösse als „Schaftholz in Rinde und mit Stock“ zu Biomasse umgerechnet werden, so müssen die Faktoren mit den nachfolgenden Zahlen korrigiert werden.

9 Schaftholz versus Derbholz

Auch hier mussten wegen Datenmangels für Nadelholz in tieferen Lagen in den Südalpen (Tab. 13) und für Laubholz in Höheren Lagen im Mittelland (Tab. 14) jeweils die Werte von zwei Straten zusammengefasst werden zur Berechnung der Schaftholz-Volumenanteile.

Tab. 13. Schaftholz-Volumentanteile für Nadelholz. Prodreg: Produktionsregion, Reg: Region.

Prodreg	Reg	Höhen- stufe	Schaftholz in Rinde, mit Stock	Schaftholz ohne Rinde, mit Stock	Schaftholz ohne Rinde, ohne Stock	Schaftholz mit Ast- derbholz (=Derbholz) ohne Rinde, ohne Stock
Jura		600	100%	88	85	86
Jura		1200	100%	88	86	86
Jura		1800	100%	89	86	86
Mittelland		600	100%	88	86	86
Mittelland		1200	100%	89	86	86
Mittelland		1800	100%	89	86	86
Voralpen		600	100%	89	86	86
Voralpen		1200	100%	89	86	86
Voralpen		1800	100%	89	86	86
Alpen	Ost	600	100%	87	84	84
Alpen	West	600	100%	88	84	84
Alpen	Ost	1200	100%	88	85	85
Alpen	West	1200	100%	87	84	84
Alpen		1800	100%	87	84	84
Südalpen		600	100%	87	84	84
Südalpen		1200	100%			
Südalpen		1800	100%	86	82	82

Tab. 14. Schaftholz-Volumentanteile für Laubholz. Prodreg: Produktionsregion, Reg: Region.

Prodreg	Reg	Höhen- stufe	Schaftholz in Rinde, mit Stock	Schaftholz ohne Rinde, mit Stock	Schaftholz ohne Rinde, ohne Stock	Schaftholz mit Ast- derbholz (=Derbholz) ohne Rinde, ohne Stock
Jura		600	100%	89	86	94
Jura		1200	100%	91	88	95
Jura		1800	100%	92	88	94
Mittelland		600	100%	89	86	99
Mittelland		1200	100%	90	88	102
Mittelland		1800	100%			
Voralpen		600	100%	90	87	95
Voralpen		1200	100%	91	88	95
Voralpen		1800	100%	92	88	98
Alpen	Ost	600	100%	90	87	101
Alpen	West	600	100%	87	83	92
Alpen	Ost	1200	100%	90	86	96
Alpen	West	1200	100%	90	86	95
Alpen		1800	100%	89	84	90
Südalpen		600	100%	85	80	86
Südalpen		1200	100%	88	83	88
Südalpen		1800	100%	91	85	94

10 Klimaeinfluss

Der pro Stratum ermittelte Zuwachs („Brutto-Zuwachs inkl. Nutzung und Mortalität [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1} 10.1\text{yr}^{-1}$]“ gemäss Tab. 7 und 8) entspricht dem mittleren Zuwachs zwischen LFI I und LFI II. Um zukünftige jährliche Zuwächse zu bestimmen, werden Formeln verwendet, welche die Abweichung des jährlichen Zuwachses vom mittleren Zuwachs aufgrund klimatischer Bedingungen beschreiben.

Die Abweichung des jährlichen Zuwachses vom mittleren Zuwachs wird als das relative Verhältnis des jährlichen Zuwachses zum mittleren Zuwachs beschrieben und als „Klimafaktor“ bezeichnet:

$$\text{Klimafaktor} = \text{jährlicher Zuwachs} / \text{mittlerer Zuwachs}_{\text{LFI I-LFI II}}. \quad (1)$$

Die Formeln zur Ermittlung des jährlichen Zuwachses beschreiben nun die Abhängigkeit des jährlichen Klimafaktors von den jeweiligen jährlichen Klimagrössen. Die Formeln basieren auf Regressionsanalysen (multiple lineare Regression) zwischen dem jährlichen Klimafaktor und den dazugehörigen jährlichen Werten verschiedener Klimagrössen, d.h.

$$\text{Klimafaktor}_{\text{Jahr } x} = f(\text{Klimagrösse1}_{\text{Jahr } x}, \text{Klimagrösse2}_{\text{Jahr } x}, \dots). \quad (2)$$

In dieser Arbeit werden folgende Klimagrössen berücksichtigt:

- Jährliche Mitteltemperatur **T** [$^{\circ}\text{C}$]
- Mitteltemperatur während der Vegetationsperiode (April-September) **T_{VEG}** [$^{\circ}\text{C}$]
- Jährliche Niederschlagssumme **N** [cm]
- Niederschlagssumme während der Vegetationsperiode (April-September) **N_{VEG}** [cm]
- Tagesgradsumme (Summe der Tage mit Mitteltemperatur $>5^{\circ}\text{C}$) **dd** [Zahl]
- Jährlicher Wasserhaushalts-Index gemäss Bugmann und Cramer 1998⁵ (potenzielle Evapotranspiration⁶/Niederschlagssumme; 0: feucht, ca. 2: trocken) **PP** [Zahl]
- Wasserhaushalts-Index während der Vegetationsperiode (April-September) gemäss Bugmann und Cramer 1998 (Potenzielle Evapotranspiration/Niederschlagssumme; 0: feucht, ca. 2: trocken) **PP_{VEG}** [Zahl]
- Ariditätsindex gemäss Bugmann und Cramer 1998 **DrN** bzw. **DrL** (N: Nadel, L: Laub; 0: feucht, 1: trocken) [Zahl]

⁵ Bugmann, H. and Cramer, W. (1998). Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients. *Forest Ecology and Management* 103(2-3): 247-263.

⁶ Berechnet gemäss Thornthwaite, C.W. und J.R. Mather. 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publ. Climatol.* **10**: 183-311.

Für die Berechnung dieser acht Klimagrößen werden monatliche Mitteltemperaturen und monatliche Niederschlagssummen benötigt. Diese Werte stammen von Messstationen der MeteoSchweiz (vergleiche Tab. 15). Falls innerhalb eines Stratum keine geeignete Messstation vorhanden ist (z.B. keine Messstation mit genügend langer Messreihe), werden die Klimawerte einer nahegelegenen Messstation mit Hilfe des Wettergenerators MTCLIM⁷ auf das entsprechende Stratum hin extrapoliert. Für die Extrapolationen werden folgende Höhen-Gradienten eingesetzt:

- Für die Temperaturgradienten werden die Werte des Modells MTCLIM verwendet: -0.6 °C pro 100 Höhenmeter (Maximumtemperatur) und -0.3 °C pro 100 Höhenmeter (Minimumtemperatur).
- Regionale Niederschlagsgradienten für die Schweiz stammen aus Baumgartner et al.⁸.

Da die verschiedenen Messstationen unterschiedlich lange Messreihen aufweisen, geht auch in die Regressionsanalyse der einzelnen Straten eine unterschiedliche Anzahl Jahre ein. Die kürzeste verwendete Klima-Messreihe umfasst 27 Jahre (Straten 5 und 6, siehe Tab. 15).

Die für die Regressionsanalysen benötigten jährlichen Werte des Klimafaktors werden gemäss Formel (1) berechnet. Sowohl der jährliche als auch der mittlere Zuwachs jedes Stratum in Formel (1) wird mit Hilfe des Ökosystem-Simulationsmodelles Biome-BGC⁹ bestimmt. Die dem Zuwachs entsprechende Grösse im Modell ist die Netto Primär-Produktion (NPP). Für die Berechnung des Klimafaktors werden für jedes Stratum die zugehörigen Klima- und Boden-Daten sowie die Stickstoff-Depositionswerte in das Modell eingegeben:

- Die Klimadaten (Temperatur und Niederschlag) für die verschiedenen Straten stammen von denselben Messstationen, welche bereits für die Berechnung der Klimagrößen verwendet wurden (vergleiche Tab. 15)
- Die Bodendaten (Bodentiefe und Bodentextur) pro Stratum stammen aus der Bodeneignungskarte der Schweiz¹⁰
- Stickstoffdepositionswerte für jedes Stratum werden der Stickstoffdepositionskarte der Schweiz entnommen¹¹

⁷ Thornton, P.E., H. Hasenauer und E.W. White. 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology* **104**: 255-271.

⁸ Baumgartner, A., E. Reichel, und G. Weber. 1983. *Der Wasserhaushalt der Alpen*. München Wien Oldenbourg.

⁹ Thornton, P.E. 1998. Regional ecosystem simulation: combining surface- and satellite-based observations to study linkages between terrestrial energy and mass budgets, Ph.D. thesis, University of Montana, Missoula, MT, 280 pp.

¹⁰ BFS 1992. Bodeneignungskarte der Schweiz. GEOSTAT, Bundesamt für Statistik (BSF), Bern.

¹¹ BUWAL 1996. Critical loads of nitrogen and their exceedances. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, Environmental Series No. 275; Rihm, A. und D. Kurz. 2001. Deposition and Critical Loads of nitrogen in Switzerland. *Water, Air, and Soil Pollution* **130**: 1223-1228.

Tab. 15. Verwendete Messstationen der MeteoSchweiz und Anzahl der Jahre der Klima-Messreihe, welche für die Regressionsanalysen genutzt werden.

Stratum- Nummer	Produktions- region	Region	Höhen- stufe	Messstation MeteoSchweiz (Höhe in müM)	Anzahl Jahre der Klima-Messreihe
1, 2	Jura		600	Delemont (416)	44
3, 4	Jura		1200	Chaumont (1141)	41
5, 6	Jura		1800	La Fretaz (1202)	27
7, 8	Mittelland		600	Bern-Liebefeld (570)	104
9, 10	Mittelland		1200	Bern-Liebefeld (570)	104
11, 12	Mittelland		1800	Bern-Liebefeld (570)	104
13, 14	Voralpen		600	Château-d'Oex (980)	68
15, 16	Voralpen		1200	Château-d'Oex (980)	68
17, 18	Voralpen		1800	Château-d'Oex (980)	68
19, 20	Alpen	Ost	600	Chur-Ems (555)	104
21, 22	Alpen	West	600	Sion-Aérodrom (483)	104
23, 24	Alpen	Ost	1200	Chur-Ems (555)	47
25, 26	Alpen	West	1200	Sion-Aérodrom (483)	47
27, 28	Alpen		1800	Davos (1590)	104
29, 30	Südalpen		600	Locarno-Monti (379)	69
31, 32	Südalpen		1200	Locarno-Monti (379)	69
33, 34	Südalpen		1800	San Bernardino Dorf (1639)	37

Die Regressionsanalysen ergeben für jedes Stratum eine andere Formel für die Berechnung des Klimafaktors aus den Klimagrössen (Tab. 16). Die in den Formeln vorkommenden Klimagrössen haben alle einen signifikanten Einfluss auf den jeweiligen Klimafaktor (P-Wert ≤ 0.05). Die Beurteilung des Einbezugs der verschiedenen Klimagrössen in die Formel erfolgt gemäss Bestimmtheitsmass R^2 (Tab. 16), Residuenanalyse (Tukey-Anscombe plot und Normal Q-Q plot; hier nicht gezeigt) und einer Analyse der Korrelation zwischen den Klimagrössen (Bestimmung des Varianzinflationsfaktors; hier nicht gezeigt).

Tab. 16. Resultat der Regressionsanalysen. R^2 : Bestimmtheitsmass der Formeln in der Regressionsanalyse. Für die Berechnung des mittleren Klimafaktors (1985-19896) wurden die Werte der Klimagrößen der Jahre 1986-1995 (LFI I-LFI II) in die Formeln eingesetzt.

Stratum- Nummer	Formel zur Berechnung des Klimafaktors aus den Klimagrößen, Resultat der Regressionsanalyse (multiple lineare Regression)	R^2	Mittlerer Klimafaktor (1986-1995)
1	$0.834981 + 0.080181 \cdot T - 0.079275 \cdot T_{VEG} + 0.011138 \cdot N_{VEG} - 1.640165 \cdot DrN$	0.809	0.975
2	$0.13174 + 0.01904 \cdot T + 0.01240 \cdot N_{VEG}$	0.672	1.022
3	$-0.019060 - 0.069244 \cdot T_{VEG} + 0.007834 \cdot N + 0.003622 \cdot N_{VEG} + 1.382790 \cdot PP$ $- 1.619877 \cdot DrN$	0.688	1.000
4	$1.09228 - 1.53325 \cdot DrL$	0.429	1.035
5	$1.402440 - 0.067597 \cdot T_{VEG} + 0.004855 \cdot N_{VEG} - 3.167794 \cdot DrN$	0.560	1.000
6	$0.3176957 + 0.0625601 \cdot T + 0.0025521 \cdot N - 1.4969078 \cdot DrL$	0.607	1.036
7	$-0.017350 + 0.014823 \cdot N_{VEG}$	0.556	0.956
8	$0.6811610 + 0.0530841 \cdot T - 0.0478327 \cdot T_{VEG} + 0.0091123 \cdot N_{VEG}$	0.698	1.062
9	$-0.015101 + 0.002915 \cdot N + 0.010592 \cdot N_{VEG}$	0.595	1.014
10	$1.15576 + 0.04507 \cdot T + 0.21663 \cdot PP - 0.80214 \cdot PP_{VEG}$	0.680	0.991
11	$0.728066 + 0.008098 \cdot N_{VEG} - 0.568573 \cdot PP$	0.595	1.000
12	$0.99026 + 0.05494 \cdot T + 0.44659 \cdot PP - 0.75283 \cdot PP_{VEG}$	0.531	1.008
13	$0.809570 + 0.008623 \cdot N_{VEG} - 0.955067 \cdot PP$	0.597	0.997
14	$0.532059 + 0.038816 \cdot T + 0.005156 \cdot N_{VEG} - 0.420808 \cdot PP_{VEG}$	0.697	0.980
15	$0.0278921 - 0.0010379 \cdot T + 0.0023472 \cdot N + 0.0085578 \cdot N_{VEG}$	0.578	0.999
16	$0.585974 + 0.049457 \cdot T + 0.004274 \cdot N_{VEG} - 0.443687 \cdot PP_{VEG}$	0.700	0.988
17	$1.70860 - 1.30973 \cdot PP_{VEG}$	0.450	0.933
18	$0.4228431 + 0.0447836 \cdot T + 0.0045391 \cdot N_{VEG}$	0.501	1.008
19	$0.640808 + 0.014345 \cdot N_{VEG} - 0.478292 \cdot PP$	0.706	0.984
20	$0.041918 + 0.040977 \cdot T + 0.012455 \cdot N_{VEG} - 0.439562 \cdot DrL$	0.820	1.015
21	$1.042750 + 0.014677 \cdot N_{VEG} - 0.154429 \cdot PP_{VEG} - 1.031510 \cdot DrN$	0.737	0.958
22	$0.2262 + 0.01917 \cdot N_{VEG} + 0.000112 \cdot dd - 0.09508 \cdot PP_{VEG}$	0.737	1.020
23	$0.059680 + 0.018345 \cdot N_{VEG}$	0.683	1.000
24	$0.1738 + 0.01 \cdot N_{VEG} + 0.0001399 \cdot dd - 0.779 \cdot DrL$	0.817	1.016
25	$0.500409 + 0.023137 \cdot N_{VEG} - 0.154758 \cdot PP_{VEG}$	0.751	0.967
26	$0.3108 + 0.01488 \cdot N_{VEG} + 0.0001596 \cdot dd - 0.881 \cdot DrL$	0.724	0.964
27	$0.144878 + 0.007301 \cdot N + 1.475357 \cdot PP - 0.982094 \cdot PP_{VEG}$	0.569	0.926
28	$0.0780733 + 0.0561380 \cdot T_{VEG} + 0.0070861 \cdot N_{VEG}$	0.436	1.031
29	$2.0734 - 2.3252 \cdot PP - 3.0822 \cdot DrN$	0.644	0.969
30	$0.7950095 + 0.0027124 \cdot N_{VEG} - 1.1345963 \cdot DrL$	0.570	1.008
31	$2.0328 - 2.6984 \cdot PP$	0.514	1.030
32	$0.7506 + 0.00009799 \cdot dd - 1.237 \cdot DrL$	0.566	1.039
33	$1.8116 - 3.0177 \cdot PP$	0.452	0.991
34	$0.3891201 + 0.0006847 \cdot dd - 1.7365914 \cdot PP$	0.578	1.046

11 Diskussion Klimaeinfluss

Um den Einfluss des Klimafaktors auf den jährlichen Zuwachs zu veranschaulichen, wurden mit Hilfe der Formeln aus Tabelle 16 die Klimafaktoren der letzten Jahrzehnte berechnet. Es zeigte sich, dass sich die Mehrzahl dieser Werte zwischen 0.8 und 1.2 befinden. Das bedeutet, dass der jährliche Zuwachs mehrheitlich um maximal $\pm 20\%$ vom mittleren Zuwachs zwischen LFI I und LFI II (1986-1995) abweicht (vgl. Formel (1)). Bei den Nadelbäumen ist dabei häufig eine grössere Streuung des Zuwachses aufgrund des Klimas zu finden ist als bei den Laubbäumen. Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 1 den Verlauf des jährlichen Klimafaktors der sechs Straten der Produktionsregion Voralpen, berechnet für die Jahre 1986-1995.

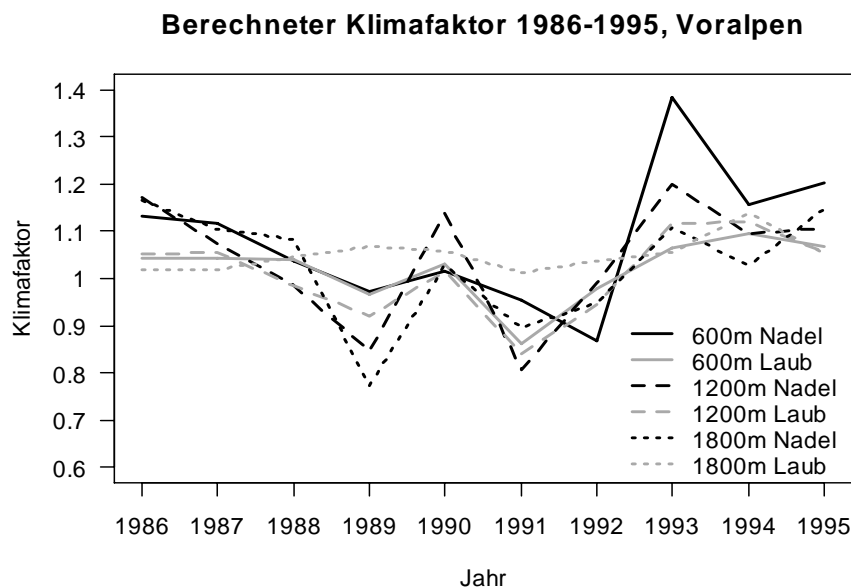


Abb. 1. Jährlicher Klimafaktor der sechs Straten der Produktionsregion Voralpen, berechnet für die Jahre 1986-1995 mit Hilfe der Formeln aus Tab. 16.

Die Diskussion der Qualität dieser den Klimaeinfluss bestimmenden Formeln sollte vor allem die folgenden drei Aspekte beinhalten:

- Die Abschätzung der Güte des Simulationsmodelles Biome-BGC.
 - ➔ Die Anwendbarkeit des Modells Biome-BGC in der Schweiz wurde bereits getestet in Schmid 2005¹². Diese Analysen ergaben, dass das Modell den (Biomasse-)Zuwachs unter den verschiedenen klimatischen Bedingungen unterschiedlicher Regionen der Schweiz zufriedenstellend simuliert.

¹² Schmid, S. 2005. Carbon budget of Swiss forests: Evaluation and application of process models for assessing the future impact of management and environmental change, Dissertation ETH No. 16038, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz: 141 pp.

- Die Beurteilung der Repräsentativität der verwendeten Klima-Messstationen für das jeweilige Stratum.
 - ➔ Es wird davon ausgegangen, dass die gewählten Klimastationen und die Klimaextrapolationen – im Rahmen der relativ geringen Auswahlmöglichkeiten an geeigneten Klimastationen – repräsentativ sind für das jeweilige Stratum. Klimastationen an Extremlagen (z.B. bei Berggipfeln) wurden vermieden. Durch Verwendung möglichst langer Klima-Messreihen wurde versucht, ein breites Spektrum an jährlichen Klimamustern abzudecken, und somit den beschränkten geographischen Geltungsbereich einer einzigen Messstation etwas zu kompensieren.

- Das Testen der Formeln anhand des Modelles Biome-BGC.

Für die Berechnung des Klimafaktors mit dem Modell Biome-BGC wird eine grosse Menge detaillierter Eingabedaten benötigt. Mit den hier hergeleiteten Formeln lässt sich der Klimafaktor anhand von nur acht Klimagrössen (bzw. anhand der 12 monatlichen Werte der Mitteltemperatur und der Niederschlagssumme) berechnen. Da die Formeln daher für die 34 Straten jeweils eine starke Vereinfachung des komplexen Modelles Biome-BGC darstellen, ist es wichtig zu wissen, wie viel Qualität durch diese Reduktion auf eine einzige Formel verloren geht.

 - ➔ Die Berechnung des Bestimmtheitsmasses R^2 ergibt für 88% der Straten einen Wert über 0.500, und für 26% der Straten einen Wert über 0.700 (Tab. 16). In Anbetracht der Komplexität von Biome-BGC und der Einfachheit der hergeleiteten Formeln (multiple lineare Regression) sind diese Werte sehr hoch, d.h. die gewählten Klimagrössen können einen grossen Teil der Varianz des Klimafaktors erklären.

 - ➔ Um die Qualität der Formeln zu testen, wurden mit Hilfe der Formeln die Klimafaktoren der Jahre 1986-1995 (LFI I - LFI II) berechnet und gemittelt. Da der Klimafaktor die relative Abweichung des jährlichen Zuwachses vom mittleren Zuwachs der Jahre 1986-1995 darstellt (siehe Formel (1)), müsste er gemittelt über die Jahre 1986-1995 den Wert 1 aufweisen. Die Tabelle 16 zeigt, dass die Abweichung vom optimalen Wert 1 maximal 7.4% beträgt (Stratum 27). Im Durchschnitt über die 34 Straten liegt die Abweichung bei 2.4%. Die Formeln gelten daher als ausreichend gut für die Berechnung zukünftiger jährlicher Zuwächse.

12 Anhang

12.1 Beschreibung der Baumteile

	Beschreibung	Einheit	Holzdicke
Schaftholz in Rinde	Schaftholz mit Stock und mit Rinde	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Schaftholz ohne Rinde	Schaftholz mit Stock, ohne Rinde	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Rinde		m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Schaftderbholz	Schaftholz ohne den Spitz des Schaftes (<7cm unter der Rinde) und ohne Stock	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Stock	Stock ohne Rinde	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Nadeln	Nadeln und Blätter	kg Bio-masse	Trockengewicht gewogen
Reisig	Äste mit Durchmesser < 7 cm.	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Astderbholz	Äste mit Durchmesser >= 7 cm	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Derbholz	Schaftderbholz plus Astderbholz	m ³	Nadelholz: 0.4 Laubholz: 0.55
Grobe Wurzeln	Wurzeln >1 mm	kg Bio-masse	Trockengewicht gewogen
Feine Wurzeln	Wurzeln <=1 mm, 5% der Grobwurzeln (Perruchoud et al. 1999)	kg Bio-masse	Trockengewicht gewogen

12.2 Erklärungen zur Berechnung des Klimafaktors mit Excel

Die beigelegte Excel-Datei *Klimafaktoren.berechnen.xls* dient zur Berechnung des jährlichen klimakorrigierten Zuwachses. Die acht Klimagrößen (Eingangsrößen für die Klimafaktor-Formeln, berechnet aus den 12 monatlichen Werten der Mitteltemperatur und der Niederschlagssumme) und der Klimafaktor selber werden mit Hilfe von Makros (Visual Basic-Code) berechnet. Um diese zu aktivieren muss im Dialogfenster, welches beim Öffnen der Excel-Datei automatisch erscheint, auf *Enable Macros* bzw. *Makros aktivieren* geklickt werden.

Auf dem **Blatt „Eingabe“** werden die monatlichen Werte der Mitteltemperatur (in °C) und der Niederschlagssumme (in cm) der zehn benötigten Klimastationen eingegeben. Zur Berechnung der Klimafaktoren (mit Hilfe der Makros) muss nach der Eingabe der neuen Klimawerte auf „Klimafaktoren berechnen“ geklickt werden; die neuen Klimafaktoren erscheinen dann auf dem Blatt „Ausgabe“.

Auf dem **Blatt „Ausgabe“** erscheint der aus den monatlichen Klimawerten berechnete Klimafaktor für jedes der 34 Straten. Zusätzlich sind für jedes Stratum auch noch folgende Werte angegeben:

- Bruttozuwachs zwischen LFI I und LFI II angegeben als Schaftholz in Rinde und Stock („Brutto-Zuwachs inkl. Nutzung und Mortalität [$\text{m}^3 \text{ha}^{-1} 10\text{yr}^{-1}$]“ gemäss Tab. 7 und 8)
- Biomasse-Expansionsfaktor („Totale Biomasse“ gemäss Tab. 11 und 12)
- Holzdichte für Nadel- und Laubholz („Dichte [$\text{t C}/\text{m}^3 \text{Holz}$]“ gemäss Tab. 10)
- Anteil Kohlenstoff am Trockengewicht; es wurde der Wert 0.5 angenommen
- Kyoto-Waldfläche („Kyoto Wald Nadel [ha]“ bzw. „Kyoto Wald Laub [ha]“ gemäss Tab. 6)

Diese Werte können bei Bedarf manuell verändert werden; die folgenden Schlussresultate werden dann direkt in der Excel-Tabelle berechnet (ohne Makros):

- Klimakorrigierter Zuwachs an totaler Biomasse in t Kohlenstoff pro ha und Jahr
(Zuwachs = Bruttozuwachs · Expansionsfaktor · Holzdichte · Anteil C / 10)
- Klimakorrigierter Zuwachs an totaler Biomasse in t Kohlenstoff pro Stratum und Jahr
(Zuwachs = Bruttozuwachs · Expansionsfaktor · Holzdichte · Anteil C · Waldfläche / 10)

Das **Blatt „Details (Klimagrössen)“** enthält die Werte der acht aus den monatlichen Klimawerten berechneten Klimagrössen. Dieses Blatt dient nur zur Information, die Werte können nicht manuell verändert werden.

Auf dem **Blatt „Details (Parameter)“** sind die für die einzelnen Straten hergeleiteten Parameterwerte zu sehen, welche für die Berechnung der Klimagrössen und des Klimafaktors verwendet werden. Diese Parameterwerte können bei Bedarf verändert werden. Zur Berechnung der Klimafaktoren (mit Hilfe der Makros) muss aber nach der Änderung der Parameterwerte auf „Klimafaktoren berechnen“ geklickt werden; die neuen Klimafaktoren erscheinen dann auf dem Blatt „Ausgabe“.

Der gesamte Code zur Berechnung der Klimagrössen und des Klimafaktors kann in der Excel-Datei *Klimafaktoren.berechnen.xls* im Menu *Extras* unter *Makro Visual Basic-Editor* gefunden werden.