

Supplementary Material

Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps

Trees – Structure and Function

Claudia Hartl-Meier*, Christoph Dittmar, Christian Zang, Andreas Rothe

* corresponding author:

Address: Department of Geography, Johannes Gutenberg University,
Johann-Joachim-Becher-Weg 21, 55099 Mainz, Germany

Phone: +49 6131 39 23183

Fax: +49 6131 39 24735

Email: c.hartl-meier@geo.uni-mainz.de

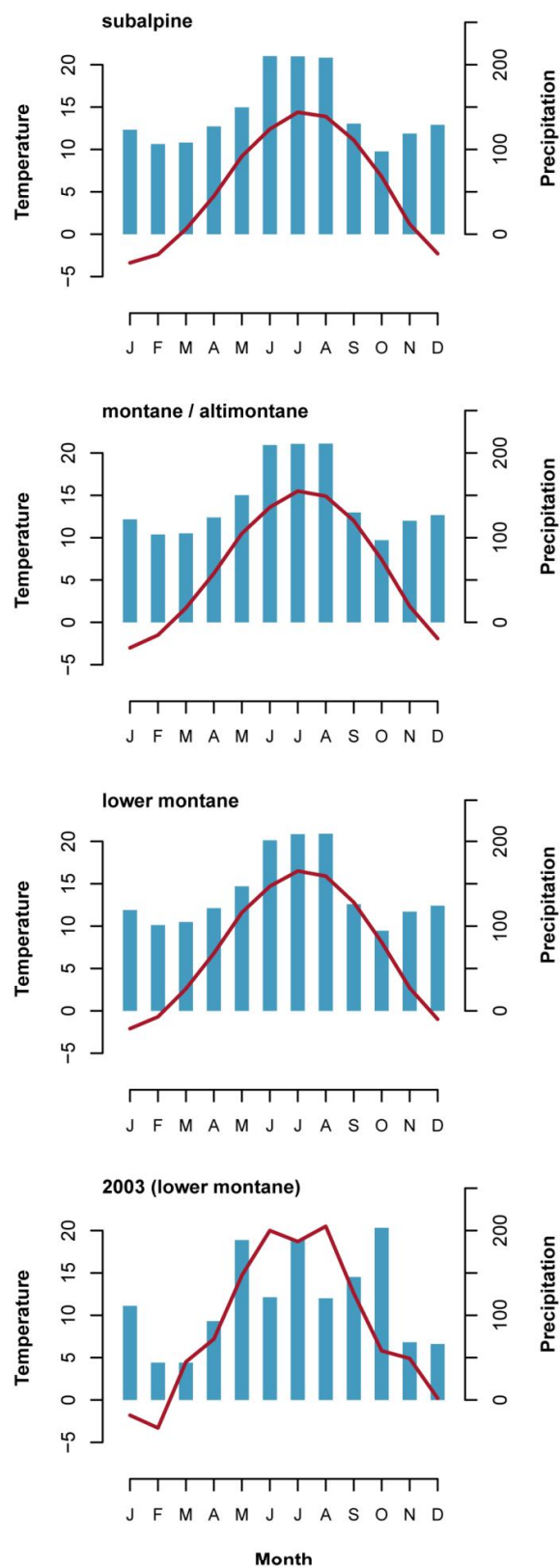


Fig. S1 Climate diagrams of the elevation belts and the exceptional year 2003 (data basis: HISTALP).

Table S1 Selected grid points of the HISTALP database representative for elevation belts, annual mean temperature and precipitation sum with relation to 1961-1990 period.

Elevation belt	Lat.	Lon.	Temp. [°C]	Prec. [mm]
lower montane	N47°35'	E13°0'	7.3	1673
montane / altimontane	N47°35'	E12°50'	6.4	1708
subalpine	N47°35'	E12°45'	5.5	1719

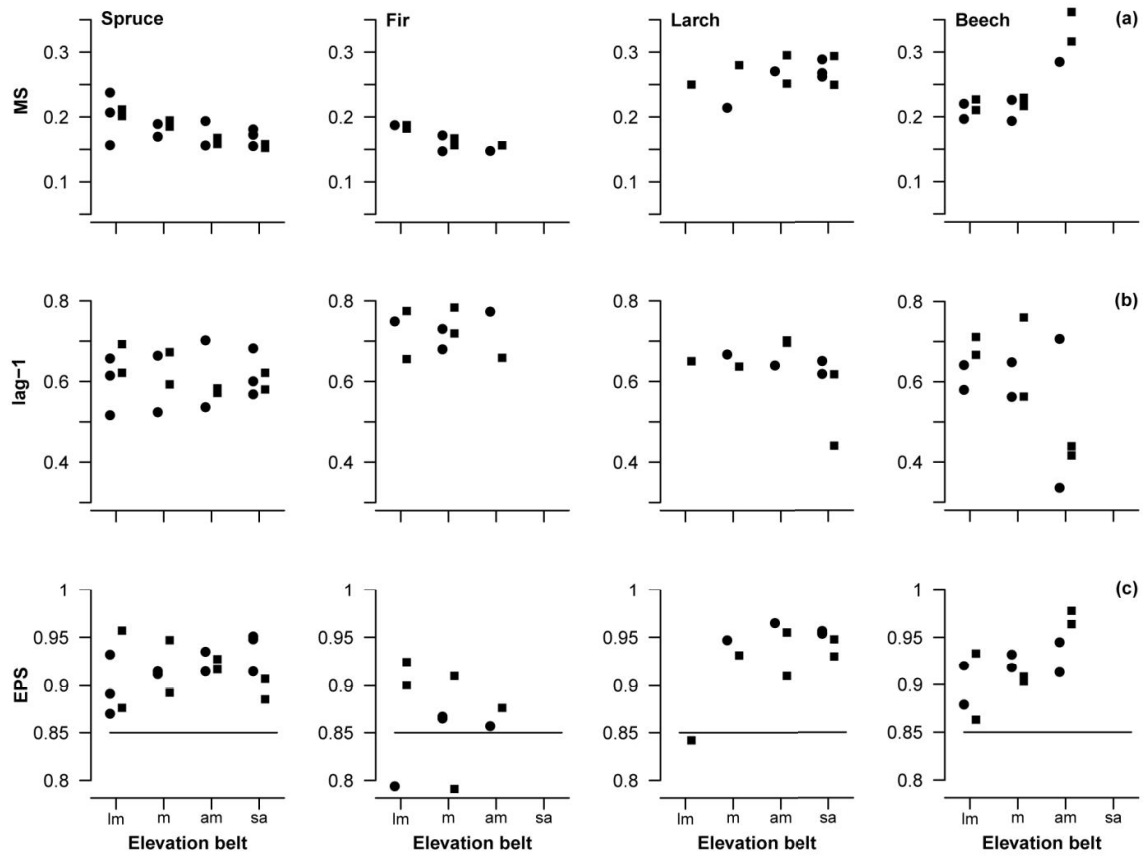


Fig. S2 (a) Mean sensitivity (MS), (b) first order autocorrelation (lag-1) and (c) EPS for spruce, fir, larch and beech at different elevation belts in the 1959-2008 period. Circles denote sunny and squares shady slopes (lm = lower montane, m = montane, am = altimontane, sa = subalpine belt).

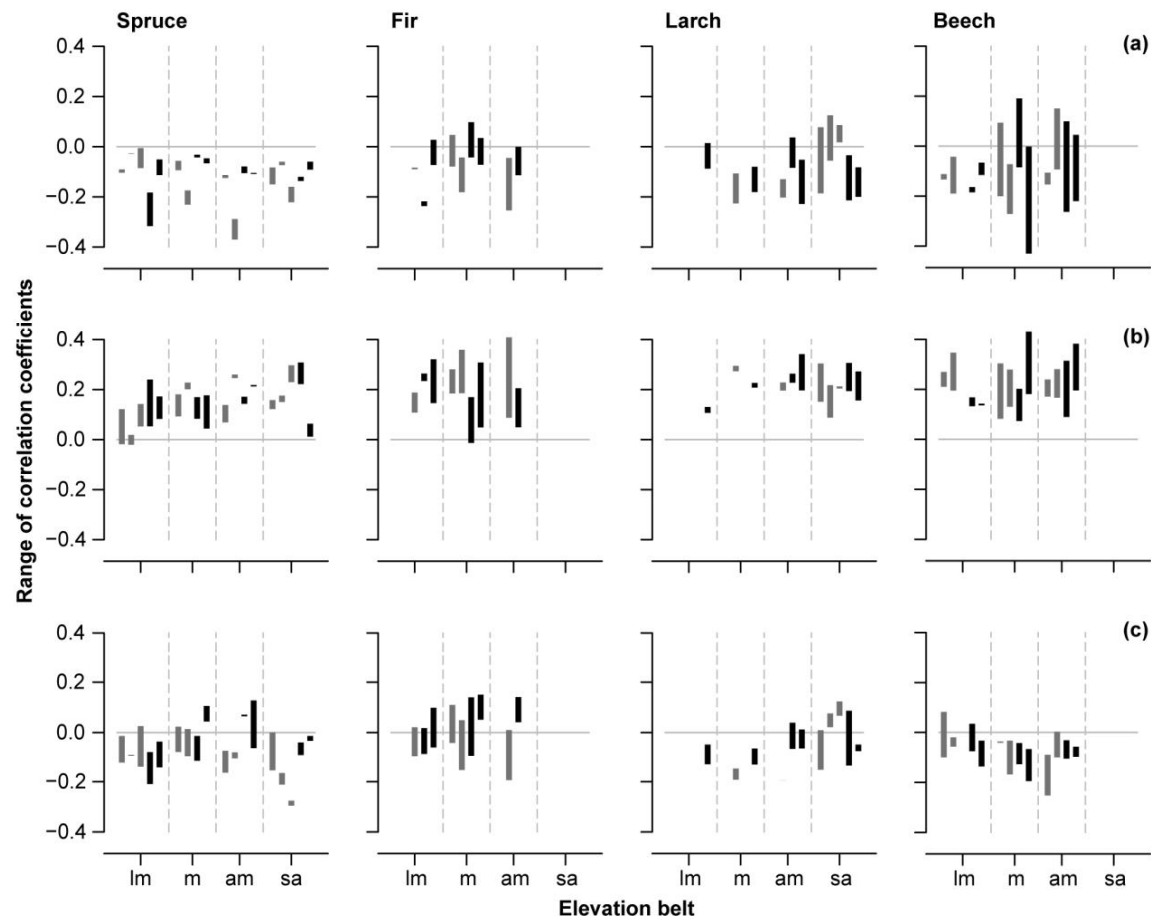


Fig S3 Range of correlation coefficients for the growth/climate response of different previous year seasons (pJA, pAS (see Table S2) for (a) temperature, (b) precipitation and (c) sunshine duration. Grey bars denote sunny and black bars shady slopes. Sequence of the sites within an elevation level follows Table 1 (lm = lower montane, m = montane, am = altimontane, sa = subalpine belt).

Table S2 Correlation coefficients for the growth/climate response of different previous year seasons (pJA = previous year July/August, pAS = previous year August/September) for temperature, precipitation and sunshine duration. Bold numbers indicate $p \leq 0.05$ significant correlations.

			Site #																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SPRUCE	Temp.	pJA	-0,09	-0,03	-0,01	-0,18	-0,05	-0,06	-0,23	-0,04	-0,07	-0,12	-0,37	-0,11	-0,11	-0,15	-0,07	-0,22	-0,14	-0,09
		pAS	-0,10	-0,03	-0,09	-0,32	-0,11	-0,09	-0,17	-0,03	-0,05	-0,11	-0,29	-0,08	-0,11	-0,08	-0,06	-0,16	-0,12	-0,06
	Prec.	pJA	-0,02	0,02	0,05	0,05	0,08	0,09	0,20	0,08	0,04	0,14	0,25	0,17	0,21	0,12	0,18	0,23	0,22	0,01
		pAS	0,12	-0,02	0,14	0,24	0,17	0,18	0,23	0,17	0,18	0,07	0,26	0,14	0,22	0,16	0,15	0,30	0,31	0,06
	Sun.	pJA	-0,01	-0,10	0,03	-0,08	-0,04	0,02	0,01	-0,01	0,11	-0,07	-0,08	0,07	0,13	-0,15	-0,17	-0,29	-0,09	-0,01
		pAS	-0,12	-0,09	-0,14	-0,21	-0,14	-0,08	-0,10	-0,12	0,04	-0,16	-0,11	0,07	-0,06	0,00	-0,21	-0,28	-0,04	-0,03
FIR	Temp.	pJA			-0,08	-0,24	0,03	0,05	-0,04	0,10	0,03		-0,05	0,00						
		pAS			-0,09	-0,22	-0,07	-0,08	-0,18	-0,04	-0,07		-0,25	-0,11						
	Prec.	pJA			0,11	0,23	0,15	0,18	0,19	-0,01	0,05		0,09	0,05						
		pAS			0,19	0,26	0,32	0,28	0,36	0,17	0,31		0,41	0,21						
	Sun.	pJA			0,02	0,02	0,10	0,11	0,05	0,14	0,15		0,01	0,14						
		pAS			-0,10	-0,08	-0,06	-0,04	-0,15	-0,09	0,05		-0,19	0,04						
LARCH	Temp.	pJA					-0,09		-0,23		-0,18		-0,20	-0,08	-0,23	-0,19	-0,06	0,02	-0,21	-0,20
		pAS					0,01		-0,11		-0,08		-0,13	0,04	-0,05	0,08	0,13	0,09	-0,03	-0,08
	Prec.	pJA					0,11		0,29		0,23		0,20	0,26	0,34	0,30	0,22	0,20	0,31	0,27
		pAS					0,13		0,27		0,21		0,23	0,23	0,20	0,15	0,09	0,21	0,19	0,16
	Sun.	pJA					-0,13		-0,15		-0,13		-0,20	-0,06	-0,06	-0,15	0,02	0,12	-0,14	-0,07
		pAS					-0,05		-0,19		-0,06		-0,20	0,04	0,01	0,01	0,08	0,07	0,09	-0,05
BEECH	Temp.	pJA	-0,13	-0,19		-0,16	-0,12	-0,20	-0,27	-0,08	-0,43	-0,15	-0,09	-0,26	-0,22					
		pAS	-0,11	-0,04		-0,18	-0,07	0,09	-0,07	0,19	0,00	-0,11	0,15	0,10	0,04					
	Prec.	pJA	0,21	0,35		0,13	0,14	0,30	0,28	0,20	0,43	0,24	0,28	0,31	0,38					
		pAS	0,27	0,20		0,17	0,14	0,08	0,13	0,07	0,18	0,17	0,17	0,09	0,20					
	Sun.	pJA	0,08	-0,02		0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,04	-0,19	-0,09	0,00	-0,10	-0,10					
		pAS	-0,10	-0,06		-0,07	-0,14	-0,04	-0,17	-0,13	-0,07	-0,25	-0,10	-0,03	-0,06					

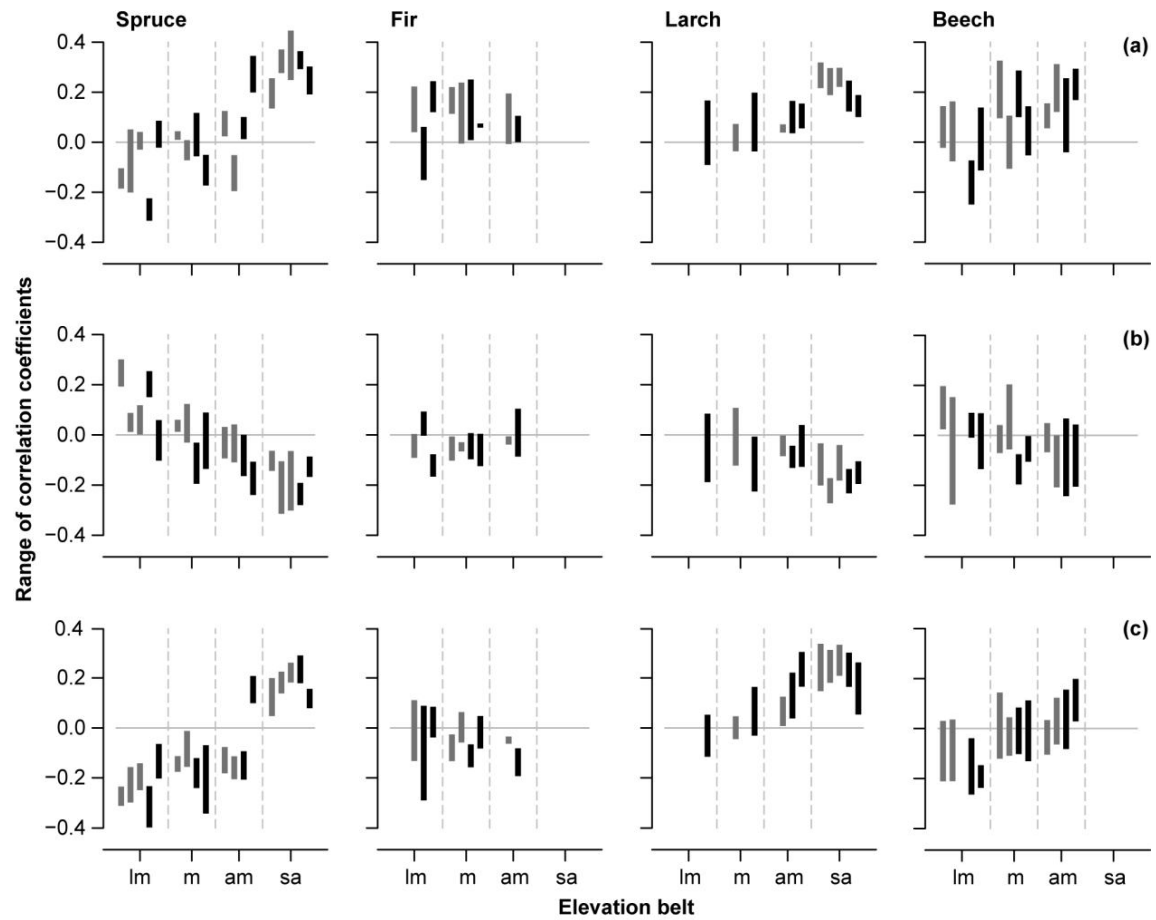


Fig S4 Range of correlation coefficients for the growth/climate response of different current year seasons (MJ, JJ, JA, MJJ, JJA, MJJA (see Table S3)) for (a) temperature, (b) precipitation and (c) sunshine duration. Grey bars denote sunny and black bars shady slopes. Sequence of the sites within an elevation level follows Table 1 (lm = lower montane, m = montane, am = altimontane, sa = subalpine belt).

Table S3 Correlation coefficients for the growth/climate response of different current year seasons (MJ = May/June, JJ = June/July, JA = July/August, MJJ = May/June/July, JJA = June/July/August, MJJA = May/June/July/August) for temperature, precipitation and sunshine duration. Bold numbers indicate $p \leq 0.05$ significant correlations.

			Site #																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SPRUCE	Temperature	MJ	-0,12	-0,20	0,02	-0,22	0,04	0,04	-0,06	-0,06	-0,16	0,02	-0,20	0,03	0,20	0,14	0,28	0,25	0,29	0,19
		JJ	-0,12	-0,06	-0,01	-0,29	-0,02	0,01	0,01	-0,04	-0,17	0,12	-0,16	0,01	0,29	0,26	0,30	0,45	0,31	0,30
		JA	-0,14	0,05	0,01	-0,23	0,09	0,03	-0,04	0,12	-0,05	0,08	-0,05	0,10	0,35	0,25	0,32	0,35	0,32	0,24
		MJJ	-0,10	-0,08	0,04	-0,25	0,06	0,04	0,01	0,03	-0,13	0,08	-0,14	0,06	0,29	0,22	0,37	0,37	0,36	0,27
		JJA	-0,19	-0,08	-0,03	-0,31	0,02	0,01	-0,07	0,00	-0,15	0,09	-0,17	0,05	0,34	0,25	0,30	0,40	0,33	0,27
		MJJA	-0,15	-0,09	0,01	-0,26	0,08	0,03	-0,06	0,04	-0,12	0,06	-0,15	0,08	0,32	0,23	0,36	0,35	0,36	0,25
	Precipitation	MJ	0,24	0,01	0,00	0,15	-0,10	0,01	0,00	-0,15	-0,14	-0,09	0,04	-0,16	-0,20	-0,06	-0,20	-0,21	-0,24	-0,17
		JJ	0,19	0,09	0,11	0,19	-0,06	0,06	-0,03	-0,17	-0,05	0,03	-0,11	0,00	-0,23	-0,14	-0,21	-0,26	-0,26	-0,13
		JA	0,21	0,04	0,12	0,22	0,06	0,06	0,12	-0,03	0,09	0,02	-0,06	-0,01	-0,11	-0,14	-0,12	-0,06	-0,19	-0,09
		MJJ	0,22	0,01	0,07	0,20	-0,10	0,04	-0,02	-0,19	-0,07	-0,05	-0,05	-0,05	-0,24	-0,14	-0,31	-0,30	-0,28	-0,16
		JJA	0,28	0,09	0,11	0,24	0,02	0,06	0,10	-0,07	0,01	0,02	-0,06	-0,07	-0,18	-0,14	-0,11	-0,11	-0,26	-0,14
		MJJA	0,30	0,03	0,09	0,25	-0,02	0,05	0,09	-0,11	-0,01	-0,05	-0,02	-0,11	-0,20	-0,13	-0,21	-0,17	-0,28	-0,16
	Sunshine duration	MJ	-0,25	-0,30	-0,14	-0,38	-0,20	-0,16	-0,08	-0,24	-0,34	-0,08	-0,18	-0,09	0,10	0,05	0,14	0,18	0,18	0,14
		JJ	-0,24	-0,21	-0,17	-0,30	-0,18	-0,12	-0,01	-0,19	-0,23	-0,09	-0,20	-0,21	0,14	0,13	0,14	0,26	0,19	0,12
		JA	-0,24	-0,16	-0,24	-0,23	-0,06	-0,11	-0,16	-0,12	-0,07	-0,18	-0,11	-0,15	0,21	0,20	0,19	0,20	0,27	0,08
		MJJ	-0,26	-0,28	-0,17	-0,38	-0,18	-0,15	-0,07	-0,22	-0,32	-0,10	-0,17	-0,15	0,13	0,11	0,22	0,26	0,24	0,16
		JJA	-0,30	-0,24	-0,25	-0,34	-0,18	-0,16	-0,12	-0,20	-0,19	-0,17	-0,21	-0,18	0,20	0,18	0,15	0,25	0,27	0,11
		MJJA	-0,31	-0,30	-0,23	-0,40	-0,18	-0,18	-0,14	-0,23	-0,28	-0,16	-0,19	-0,14	0,18	0,16	0,21	0,25	0,29	0,14
FIR	Temperature	MJ			0,04	-0,15	0,12	0,11	-0,01	0,01	0,06		-0,01	0,00						
		JJ			0,12	-0,07	0,14	0,22	0,24	0,23	0,06		0,19	0,08						
		JA			0,22	0,06	0,24	0,17	0,17	0,25	0,07		0,18	0,11						
		MJJ			0,13	-0,09	0,18	0,18	0,12	0,15	0,07		0,09	0,05						
		JJA			0,15	-0,04	0,20	0,19	0,17	0,21	0,06		0,18	0,10						
		MJJA			0,15	-0,06	0,21	0,16	0,09	0,15	0,07		0,10	0,06						
	Precipitation	MJ			-0,04	0,09	-0,15	-0,08	-0,03	0,01	-0,12		-0,03	-0,06						
		JJ			0,00	0,03	-0,08	-0,01	-0,05	0,00	0,00		-0,01	0,10						
		JA			-0,09	0,00	-0,11	-0,08	-0,03	-0,10	-0,02		-0,03	-0,07						
		MJJ			-0,05	0,05	-0,14	-0,07	-0,03	-0,04	-0,08		-0,02	0,03						
		JJA			-0,05	0,04	-0,12	-0,06	-0,07	-0,04	-0,03		-0,03	-0,04						
		MJJA			-0,09	0,05	-0,17	-0,10	-0,04	-0,07	-0,10		-0,04	-0,09						
	Sunshine duration	MJ			-0,13	-0,29	-0,04	-0,13	-0,06	-0,13	-0,06		-0,06	-0,08						
		JJ			-0,07	-0,19	-0,04	-0,08	0,06	-0,07	-0,08		-0,04	-0,19						
		JA			0,11	0,09	0,08	-0,03	0,00	-0,11	0,05		-0,03	-0,17						
		MJJ			-0,06	-0,25	0,00	-0,11	-0,02	-0,13	-0,04		-0,06	-0,16						
		JJA			-0,03	-0,08	0,00	-0,09	0,02	-0,12	-0,04		-0,05	-0,17						
		MJJA			-0,03	-0,16	0,02	-0,11	-0,04	-0,16	-0,02		-0,06	-0,15						

Continuation Table S3

		Site #																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
LARCH	Temperature	MJ				0,17		0,07		0,20		0,05	0,14	0,15	0,22	0,19	0,26	0,17	0,17
		JJ				-0,09		0,03		0,00		0,07	0,04	0,06	0,26	0,28	0,22	0,15	0,15
		JA				0,00		-0,04		-0,04		0,04	0,13	0,11	0,25	0,23	0,24	0,15	0,10
		MJJ				0,09		0,05		0,14		0,06	0,12	0,11	0,23	0,22	0,25	0,12	0,12
		JJA				-0,02		0,00		-0,01		0,06	0,12	0,13	0,32	0,30	0,29	0,25	0,19
		MJJA				0,10		0,02		0,09		0,06	0,17	0,15	0,27	0,25	0,30	0,20	0,16
	Precipitation	MJ				-0,19		-0,11		-0,17		0,00	-0,13	-0,13	-0,16	-0,17	-0,12	-0,14	-0,11
		JJ				-0,09		-0,12		-0,23		-0,08	-0,09	-0,10	-0,20	-0,27	-0,18	-0,21	-0,16
		JA				0,08		0,11		-0,01		-0,01	-0,04	0,04	-0,03	-0,23	-0,04	-0,17	-0,17
		MJJ				-0,16		-0,09		-0,22		-0,03	-0,11	-0,12	-0,19	-0,27	-0,14	-0,16	-0,16
		JJA				0,01		0,00		-0,09		-0,06	-0,09	-0,03	-0,11	-0,26	-0,14	-0,23	-0,19
		MJJA				-0,05		0,01		-0,11		-0,01	-0,11	-0,05	-0,12	-0,27	-0,11	-0,20	-0,20
	Sunshine duration	MJ				0,05		0,05		0,16		0,12	0,19	0,25	0,34	0,30	0,29	0,28	0,26
		JJ				-0,12		0,02		-0,03		0,05	0,04	0,17	0,25	0,29	0,21	0,18	0,17
		JA				0,02		-0,04		0,01		0,01	0,14	0,22	0,15	0,18	0,21	0,16	0,05
		MJJ				0,05		0,03		0,15		0,12	0,18	0,28	0,30	0,31	0,27	0,21	0,21
		JJA				-0,07		0,00		-0,02		0,03	0,12	0,22	0,29	0,30	0,30	0,30	0,19
		MJJA				0,05		0,01		0,13		0,09	0,22	0,30	0,33	0,31	0,34	0,30	0,22
BEECH	Temperature	MJ	0,03	-0,08		-0,09	-0,11	0,10	-0,11	0,15	-0,01	0,09	0,13	-0,04	0,17				
		JJ	-0,02	-0,06		-0,25	-0,02	0,12	-0,04	0,10	-0,05	0,06	0,12	0,03	0,17				
		JA	0,14	0,16		-0,07	0,14	0,33	0,11	0,29	0,14	0,15	0,31	0,26	0,28				
		MJJ	0,06	0,00		-0,14	-0,02	0,15	-0,05	0,19	0,00	0,08	0,19	0,02	0,18				
		JJA	0,06	0,02		-0,16	0,02	0,26	0,02	0,21	0,07	0,15	0,23	0,17	0,29				
		MJJA	0,11	0,04		-0,09	0,01	0,24	0,00	0,25	0,07	0,14	0,25	0,12	0,27				
	Precipitation	MJ	0,20	0,15		0,09	0,09	0,04	0,20	-0,09	0,00	-0,04	0,00	0,07	0,02				
		JJ	0,09	-0,03		0,08	-0,03	0,04	0,00	-0,08	-0,09	0,05	-0,12	-0,01	0,04				
		JA	0,02	-0,28		-0,01	-0,14	-0,07	-0,06	-0,18	-0,11	-0,06	-0,21	-0,24	-0,21				
		MJJ	0,08	-0,06		0,05	-0,07	-0,01	0,04	-0,20	-0,10	-0,05	-0,14	-0,04	-0,05				
		JJA	0,15	-0,10		0,07	-0,01	0,01	0,06	-0,09	-0,06	0,01	-0,14	-0,12	-0,07				
		MJJA	0,13	-0,11		0,05	-0,05	-0,03	0,09	-0,19	-0,08	-0,07	-0,16	-0,14	-0,14				
	Sunshine duration	MJ	-0,12	-0,14		-0,24	-0,18	-0,04	-0,09	0,07	-0,01	0,03	0,03	-0,02	0,13				
		JJ	-0,21	-0,21		-0,26	-0,24	-0,12	-0,11	-0,10	-0,13	-0,10	-0,06	-0,08	0,03				
		JA	0,03	0,04		-0,04	-0,15	0,14	0,04	0,05	0,11	0,01	0,12	0,16	0,20				
		MJJ	-0,13	-0,12		-0,25	-0,20	-0,03	-0,07	0,06	-0,02	0,00	0,04	-0,02	0,12				
		JJA	-0,11	-0,13		-0,18	-0,23	0,02	-0,05	-0,03	0,00	-0,03	0,03	0,06	0,15				
		MJJA	-0,07	-0,08		-0,19	-0,21	0,05	-0,04	0,08	0,06	0,03	0,09	0,08	0,20				

Table S4: Statistical significance of differences between GR of the different elevation belts and respective slope exposures for spruce, fir, larch and beech (lm = lower montane, m = montane, am = altimontane, sa = subalpine belt; su = sunny, sh = shady slope; *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001, ****p<0.0001, n.s. = not significant, - = not available).

Spruce	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	n.s.						
m su	n.s.	n.s.					
m sh	n.s.	n.s.	n.s.				
am su	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.			
am sh	**	*	**	*	**		
sa su	****	****	****	****	****	n.s.	
sa sh	****	****	****	****	****	n.s.	n.s.
Fir	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	n.s.						
m su	n.s.	n.s.					
m sh	n.s.	n.s.	n.s.				
am su	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.			
am sh	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
sa su	-	-	-	-	-	-	
sa sh	-	-	-	-	-	-	-
Larch	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	-						
m su	-	n.s.					
m sh	-	n.s.	n.s.				
am su	-	n.s.	n.s.	n.s.			
am sh	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
sa su	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
sa sh	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Beech	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	n.s.						
m su	n.s.	n.s.					
m sh	n.s.	n.s.	n.s.				
am su	*	n.s.	*	n.s.			
am sh	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
sa su	-	-	-	-	-	-	
sa sh	-	-	-	-	-	-	-

Table S5: Statistical significance of differences between GC of the different elevation belts and respective slope exposures for spruce, fir, larch and beech (lm = lower montane, m = montane, am = altimontane, sa = subalpine belt; su = sunny, sh = shady slope; *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001, ****p<0.0001, n.s. = not significant, - = not available).

Spruce	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	n.s.						
m su	n.s.	*					
m sh	n.s.	n.s.	n.s.				
am su	n.s.	**	n.s.	n.s.			
am sh	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
sa su	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
sa sh	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Fir	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	n.s.						
m su	n.s.	n.s.					
m sh	n.s.	n.s.	n.s.				
am su	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.			
am sh	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
sa su	-	-	-	-	-	-	
sa sh	-	-	-	-	-	-	-
Larch	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	-						
m su	-	n.s.					
m sh	-	n.s.	n.s.				
am su	-	n.s.	n.s.	n.s.			
am sh	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.		
sa su	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
sa sh	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Beech	lm su	lm sh	m su	m sh	am su	am sh	sa su
lm sh	n.s.						
m su	n.s.	n.s.					
m sh	n.s.	n.s.	n.s.				
am su	n.s.	*	n.s.	*			
am sh	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*		
sa su	-	-	-	-	-	-	
sa sh	-	-	-	-	-	-	-

Table S6 Percentage growth change (GC) for spruce, fir, larch and beech since 1990 compared to the 1961-1990 reference period averaged for elevation belts based on a robust mean.

Elevation belt	Spruce	Fir	Larch	Beech
Lower montane	15 %	38 %	-2 %	3 %
Montane	7 %	17 %	-13 %	9 %
Altimontane	10 %	8 %	4 %	14 %
subalpine	10 %		4 %	