

Zur langfristigen Verjüngungsdynamik der Eichen (*Quercus petraea* MATT. Liebl und *Quercus robur* L.) in Kieferrein- und Eichenmischbeständen – Struktur, Wachstum, waldbauliche Behandlung

Kilian Stimm, Enno Uhl und Hans Pretzsch

Zusammenfassung Naturnahe Waldbewirtschaftungsmethoden rücken vermehrt in den Fokus waldbaulicher Verjüngungsverfahren. Klassische Verjüngungsverfahren werden bei der Eiche meist auf großer Fläche durchgeführt. Langfristige und kleinflächige Verfahren, auch aufgrund der Konkurrenz durch die Mischbaumarten, stellen dabei die Ausnahme dar. Auf langfristigen Versuchsflächen im Steigerwald, Spessart und Nürnberger Reichswald wurde die Eiche unter unterschiedlichen Überschirmungssituationen langfristig verjüngt. Die Verjüngungszeiträume erreichten dort 30 bis 40 Jahre. In diesem Zeitraum konnten beachtliche Biomassezuwächse in der Verjüngung, insbesondere bei stärkerer Auflichtung bzw. geringeren Vorräten des Altbestands beobachtet werden. Dabei war die Entwicklung der Buche durch die Überschirmung anders als bei der Eiche kaum gebremst. Eine Überschirmung von mehr als 40% erschwerte die Verjüngung der Eiche merklich. Mit einer Konkurrenzreduktion durch Absenken des Buchenanteils unter 30% scheint eine erfolgreiche Verjüngung der Eiche auch kleinflächig und langfristig möglich. Hohe Verjüngungsbiomassen wirkten auf die Altbestandsproduktivität zwar negativ, konnten damit aber gleichzeitig mögliche Zuwachsverluste in Folge der Vorratsreduktion im Altbestand kompensieren. Die Studie zeigt, dass die kleinflächige und langfristige Verjüngung der Eiche durchaus möglich ist.

Schlüsselwörter Eiche, langfristige Verjüngung, Überschirmung, Konkurrenz, langfristige Versuche, Mischbestände, Waldbau

Abstract Natural forest management methods are increasingly becoming the focus of silvicultural regeneration procedures. Classical oak regeneration techniques are mostly carried out on large areas. Long-term and small-scaled regeneration are hardly applied. Also due to competition from mixed tree species. On long-term experiments in the Steigerwald, Spessart and Nuremberg, oak was long-term regenerated under different canopy cover situations. The regeneration periods reached 30 to 40 years. During this period, considerable regeneration biomass growth could be observed, especially in the case of heavy thinnings or lower standing volume of the old stand. The development of beech is scarcely slowed down by the canopy cover compared to oak. A canopy cover of more than 40% noticeably impeded the regeneration of the oak regeneration. A reduction of competition within the regeneration by lowering the share of beech below 30% made a successful regeneration of oak possible even in small areas and in the long-term. High regeneration biomasses seemed to slow down old-growth productivity, but at the same time compensated for possible increment losses as a result of the volume reduction. The study shows that small-scaled and long-term oak regeneration is basically possible.

Keywords Oak species, long-term regeneration, close to nature silviculture, canopy cover, mixed stands, long-term experiments

1 Einleitung

Die Begründung und Erhaltung von Mischwäldern gilt als eine Option den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen (Ammer 2017; Bolte et al. 2009). Die heimischen Eichenarten (*Quercus sp.*) spielen dabei aufgrund ihrer ökologischen Eigenschaften beim Aufbau solcher Wälder eine wichtige Rolle (Albert et al. 2017). Ein Baustein einer erfolgreichen Eichenbeteiligung ist dabei die Verjüngung bzw. Etablierung von Eichenmischbeständen. Zwei häufige Ausgangssituationen sind unter anderem neben der Begründung von Eichenbeständen auf der Kahlfäche, (1) der Umbau von nicht standortgerechter Bestockung bzw. die Anreicherung von Monokulturen und (2) die Verjüngung von Eiche in Eichenmischbeständen. Wie die „erfolgreiche“ Verjüngung von Eiche gelingen kann ist dabei häufig Thema waldbaulicher Diskussionen. Weitgehende Einigkeit herrscht darüber, dass die Eiche beim heimischen Schalenwild beliebt ist und eine erfolgreiche Etablierung nur bei angepassten Wildbeständen und/oder mit Schutzmaßnahmen zu erreichen ist (Jensen et al. 2020; Kohler et al. 2020; Petersson et al. 2020; Götmark et al. 2005). Geeignete waldbauliche Maßnahmen in der Behandlung des Oberstands und in der Verjüngung sind hingegen noch nicht abschließend geklärt. So werden beispielsweise zu den, in der Vergangenheit erfolgreiche meist großflächigen Verjüngungsmethoden (Fleder 1983) zunehmend auch kleinflächigere waldbaulichen Bewirtschaftungsmethoden diskutiert (Mölder et al. 2019a; Löff et al. 2016). Dadurch sind die heimischen Eichen, auch aufgrund ihrer Lichtbedürftigkeit jedoch gegenüber der meisten ihrer Mischbaumarten, insbesondere der Buche benachteiligt (Krahl-Urban 1959; Mosandl und Abt 2016; Lüpke 1998; Maleki et al. 2020). Die relative Konkurrenzkraft der Eiche scheint durch die naturnahen Waldbauverfahren auf vielen Standorten gegenüber der Mischbaumarten zusätzlich geschwächt zu sein (Mölder et al. 2019b; Modrow et al. 2019; Mölder et al. 2019a), was häufig zu geringeren Eichenanteilen oder dem Verlust der Eiche in den Endbeständen führt. Die gezielte Lichtsteuerung durch Eingriffe im Altbestand kann dabei das Konkurrenzgleichgewicht zwischen Eiche und Mischbaumart etwas abschwächen. Einige Studien beschäftigen sich daher mit der Etablierung von Eichenverjüngung in Abhängigkeit der Lichtintensität, insbesondere in den ersten 10 Jahren (Kohler et al. 2020). Längerfristige Studien, die über 20 Jahre hinausgehen liegen für die Eiche kaum vor (Kohler et al. 2020), obwohl neben einer erfolgreichen Begründung die Überführung ins Stangenholz für die Erhaltung nennenswerter Eichenanteile sowie vitaler Einzelbäume im Altbestand eine bedeutende Rolle spielen. Das gilt insbesondere auch bei naturnahen Waldbauverfahren, die häufig mit Verjüngungszeiträumen von 40 Jahren und mehr planen.

Vor diesem Hintergrund wurden in der vorliegenden Studie daher folgende Forschungsfragen mit Fokus auf die Eiche betrachtet.

- i. Wie entwickelten sich die Höhen- und die Biomassen der Verjüngung sowie das entsprechende Eichenvorkommen in den Verjüngungsbeständen?
- ii. Wie groß ist dabei der Einfluss der Überschirmung durch den Altbestand auf die langfristige Entwicklung der Verjüngung?
- iii. Welche Rolle spielt die interspezifische Konkurrenz innerhalb der Verjüngung für die langfristige Entwicklung der Eichenverjüngung?
- iv. Ist eine Rückkopplung von Verjüngung/Unter- und Zwischenstand auf die Produktivität des Oberstands zu erkennen?

Abschließend wurden auf Basis der Ergebnisse mögliche waldbauliche Behandlungsweisen für die langfristige Entwicklung einer erfolgreichen Eichenverjüngung diskutiert und vorgeschlagen.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsflächen

Für die Studie wurden die ertragskundlichen Daten von drei Verjüngungsversuchen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde im Steigerwald bei Ebrach, im Spessart bei Burgsinn und im Nürnberger Reichswald herangezogen. Die Verjüngungsaufnahmen begannen in den Jahren 1982/83, 1986 und 1991 und wurden seitdem bis zu dreimal wiederholt. Damit waren Verjüngungszeitreihen von bis zu 39 Jahren vorhanden. Die Versuche lagen in drei verschiedenen Wuchsgebieten mit unterschiedlicher standörtlicher Ausgangssituation (Abb. 1). Die Bestände in Nürnberg unterschieden sich dabei wesentlich von denen in Burgsinn und Ebrach. In Nürnberg handelte es sich um Kiefernreinbestände, die im Rahmen des Reichswaldunterbauprogramms mit Eiche und Buche unterbaut wurden. Die Bestände in Burgsinn und Ebrach waren Eichen-Buchen- bzw. Eichen-Buchen-Kiefern-Mischbestände, die natürlich sowie künstlich verjüngt wurden. Die insgesamt 10 Verjüngungsbestände (Parzellen) wurden kahlschlagfrei begründet und seitdem kleinflächig naturnah bewirtschaftet. Die Größe der einzelnen Parzellen variiert zwischen 0,09 und 1,0 ha.

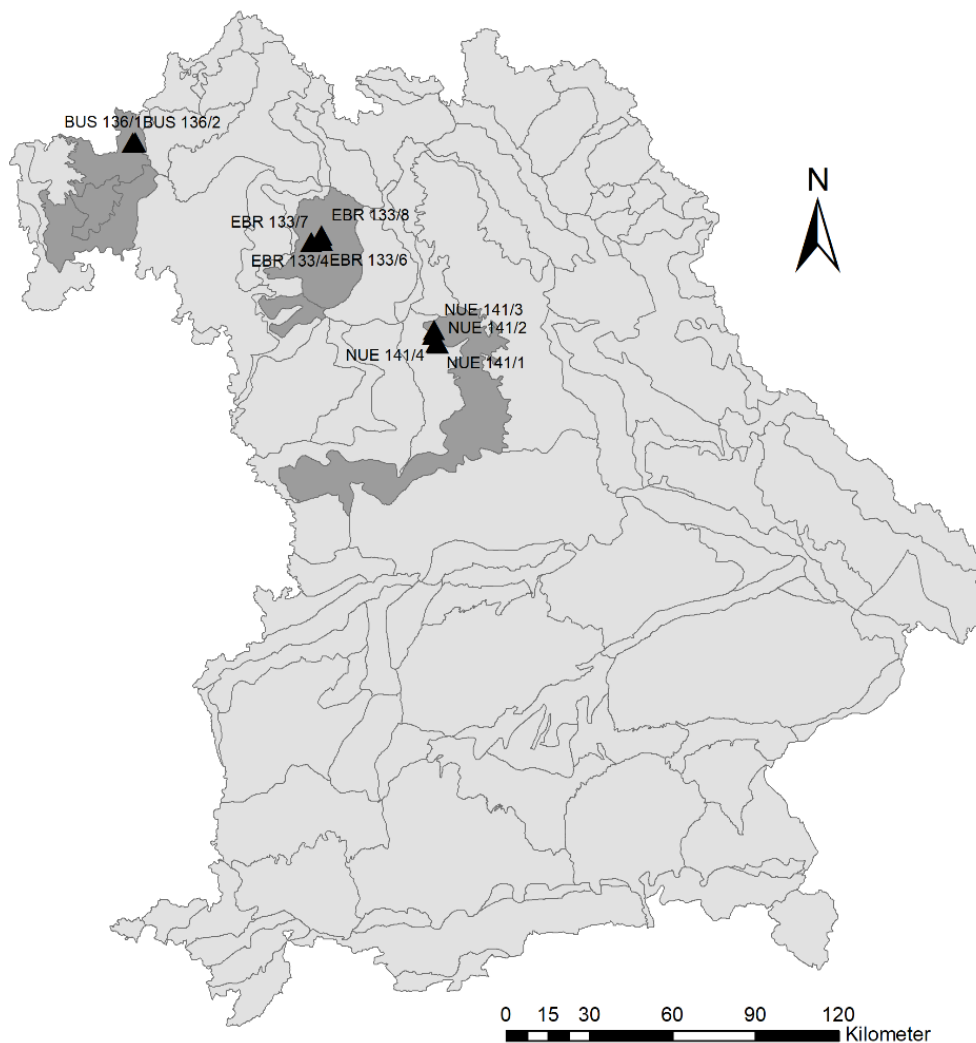


Abbildung 1: geografische Lage der Versuchsflächen
Figure 1: geographical location of the experimental plots

Tabelle 1: Allgemeine Beschreibung der drei betrachteten Verjüngungsversuche; N Parz – Anzahl der Parzellen pro Versuch; Ei-Bu-(Kie) – Eichen-Buchen-(Kiefern)-Bestand; NVj – Naturverjüngung; RW – Rechtswert; HW – Hochwert, WG – forstliches Wuchsgebiet; NS – Jahresniederschlagssumme in [mm/J]; TEMP – Jahresmitteltemperatur in [°C]; Höhe ü. NN – Höhe über Normalnull in [m]
Table 1: General description of the three considered experiments; N parz - number of plots per experiment; Ei-Bu-(Kie) - oak-beech (pine) stand; NVj - natural regeneration; RW - right value; HW - high value, WG - growing area; NS - annual precipitation total in [mm/yr]; TEMP - annual mean temperature in [°C]; altitude a.s.l. - height above sea level in [m]

Versuch	N Parz	Bestand	Art d. Verjüngung	Aufnahmezeitraum	RW	HW	WG	NS [mm/J]	TEMP [°C]	Höhe ü. NN [m]
BUS 136	2	Ei-Bu	NVj	1986-2012	4328028	5557502	2.2/2	796	7,8	445
EBR 132	1	Ei-Bu-Kie	NVj	1982-2019	4395600	5523200	5.2	683	8,1	338
EBR 133	5	Ei-Bu-(Kie)	NVj/Saat	1984-2019	4395600	5525100	5.2	675	7,9	385
NUE 141	4	Kie	Saat	1991-2019	4438100	5485000	5.8	759	8,7	333

2.2 Ertragskundliche Kennwerte Altbestand (Tab. 2)

Die ertragskundlichen Kennwerte des Altbestands der drei Versuchsflächen wurden mit der lehrstuhl-internen Auswertungssoftware für jeden Aufnahmezeitpunkt berechnet. Alle Aufnahmen und Auswertungen erfolgten nach der DESER-Norm (Johann 1993). Dafür lagen von allen Bäumen die Baumart und der Brusthöhendurchmesser vor. Die Höhenmessung erfolgte an 30 Bäumen pro Baumart und wurde für die verbliebenen Bäume mit einer Höhenfunktion ausgeglichen. Neben den vorgenannten Bestandsparametern wurden zusätzliche Kronenablotungen in 8 Himmelsrichtungen aller Altbestandsbäume vorgenommen. Daraus konnte für jeden Baum die entsprechende Kronenschirmfläche durch Anpassung einer Splinefunktion berechnet werden (lehrstuhlinternes Auswertungsprogramm). Mit den daraus resultierenden Kronenschirmflächen konnten in einem weiteren Schritt die Überschirmungsprozente für die Versuchsparzelle sowie für die einzelnen Verjüngungsquadrate berechnet werden.

2.3 Kennwerte Verjüngung (Tab. 3)

Zur Aufnahme der Verjüngung waren die einzelnen Parzellen in 5 x 5 m Quadrate unterteilt. Diese waren Grundlage für die statistischen Analysen. Es wurden alle auf der Fläche vorkommenden Verjüngungspflanzen aufgenommen. Bis zu einer Pflanzenhöhe von 2 m war die Baumart und Höhenstufe (0-50 cm, 51-100 cm, 101-150 cm, 151-200 cm) bekannt. Größere Verjüngungspflanzen (> 2 m) waren zusätzlich durch ihren BHD charakterisiert. Die Höhenmessung erfolgte analog zum Altbestand an 30 jungen Bäumen pro Baumart und wurde für die übrigen Pflanzen mit einer Höhenausgleichsfunktion angepasst. Allen Pflanzen (< 2 m), für die kein gemessener BHD vorliegt wurde mittels logarithmischer Ausgleichskurve ein geschätzter Durchmesser (D) in Abhängigkeit von ihrer Höhe zugewiesen.

Die Biomasseberechnung der Verjüngung erfolgte baumartenweise mit der Formel von Forrester et al. (2017).

$$\log(\text{Biomasse}_{i,j}) = \log(\beta_0) + \beta_1 \log(D) + \varepsilon \quad (1)$$

Dabei entsprachen die Indizes i dem Baum und j der Baumart. Die berechnete Biomasse ist die oberirdische Biomasse der einzelnen Pflanze in kg. D war der Durchmesser in cm sowie h die gemessene Höhe des entsprechenden Baumes in m. β_0 und β_1 waren die baumartenspezifischen Funktionsparameter.

Zur langfristigen Verjüngungsdynamik der Eichen

Tabelle 2: Ertragskundliche Bestandsdaten Altbestand; Alter – Bestandsalter; N – Anzahl der Bäume pro ha; H₁₀₀ – Oberhöhe in [m]; D₁₀₀ – Durchmesser der 100 stärksten Bäume [cm]; Gfl – Grundfläche [m²/ha]; Vol – Vorrat [Vfm/ha]; Üb – Überschirmung in %; ZG – period. Jährl. Grundflächenzuwachs [m²/ha/J]; ZV – period. Jährl. Volumenzuwachs [m³/ha/J]; Periode – Beobachtungszeit [J]
 Table 2: Yield data of the main stand; Alter - stand age; N - number of trees per ha; H₁₀₀ - top height [m]; D₁₀₀ - diameter of the 100 largest trees [cm]; Gfl - stand basal area [m²/ha]; Vol – standing volume [Vfm/ha]; Üb – canopy closure in %; ZG – periodic annual basal area increment [m²/ha/yr]; ZV – periodic annual volume increment [m³/ha/yr]; period - observation period [yrs].

		Erstaufnahme								Letztaufnahme									
Versuch (räuml. Lage)	Parzelle	Baumart	Alter	N	H ₁₀₀ [m]	D ₁₀₀ [cm]	Gfl [m ² /ha]	Vol [Vfm/ha]	Üb [%]	Alter	N	H ₁₀₀ [m]	D ₁₀₀ [cm]	Gfl [m ² /ha]	Vol [Vfm/ha]	ZG [m ² /ha/J]	ZV [m ³ /ha/J]	Üb [%]	Periode
132 (Steigerwald)	1	Kiefer	147	21	30,9	53,3	4,65	66,14	37	184	12	33,27	65,01	4,15	63,15	0,05	0,76	30	36
		Buche	147	42	31,34	45,12	6,66	110,2		184	21	33,05	69,6	7,93	138,81	0,1	1,76		
		Eiche	147	4	31,59	46,9	0,72	12,26		184	4	32,78	67,4	1,49	26,99	0,02	0,38		
		Gesamt		67			12,03	188,61			37			13,56	228,94	0,17	2,9		
	2	Kiefer	143	8	27,03	51,64	1,66	20,98	60	178	2	32,07	52,2	0,39	5,79	0,01	0,11	43	36
		Buche	143	77	32,44	47,15	12,24	209,08		178	53	34,78	64,37	15,44	282,88	0,19	4,09		
		Eiche	143	14	29,02	46	2,33	36,71		178	13	32,65	62,1	3,94	71,18	0,05	1,05		
		Gesamt		99			16,23	266,78			68			19,77	359,84	0,24	5,24		
	4	Buche	164	44	34,88	49,35	8,42	159,51	22	199	33	35,1	70,11	12,74	237,99	0,16	3,35	43	36
		Eiche	164	12	33,55	46,74	2,06	37,18		199	12	33,33	61,5	3,56	65,38	0,04	0,87		
		Hainbuche	164	1	24,38	30,7	0,07	0,92		199	1	28,44	42,5	0,14	2,11	0	0,04		
		Gesamt		57			10,55	197,61			46			16,44	305,48	0,2	4,27		
133 (Steigerwald)	6	Kiefer	162	11	27,09	53,14	2,4	30,21	62	197	9	28,68	60,38	2,44	32,49	0,02	0,18	54	36
		Buche	162	44	28,72	46,56	4,92	71,82		197	34	31,29	60,43	5,64	107,13	0,07	1,51		
		Eiche	162	67	28,67	43,7	9,46	145,15		197	62	30,91	54,69	14,58	241,67	0,15	3,33		
		Hainbuche	162	10	23,53	22,54	0,24	1,81		197	10	20,37	28,98	0,49	4,73	0	0,07		
		Gesamt		132			17,02	249		115			23,98	386,03	0,24	5,08			
	7	Fichte	146	1	27,55	47	0,17	2,18	22	181	16	28,5	50,85	3,25	42,9	0,03	0,55	30	36
		Kiefer	146	24	27,02	41,36	3,22	40,31											
		Buche	146	25	30,12	44,64	3,91	62,53		181	19	27,76	58,43	5,09	74,79	0,06	0,72		
		Eiche	146	18	25,97	40,38	2,3	32,22		181	17	26,44	57,23	4,37	64,48	0,06	1,04		
		Gesamt		68			9,61	137,25		52			12,72	182,17	0,15	2,31			
	8	Buche	153	13	32,81	48,84	2,44	42,33	25	188	4	26,21	64,18	1,29	18,11	0,01	0,11	9	36
		Eiche	153	19	29,34	41,73	2,6	40,89		188	15	27,67	55,3	3,6	55,22	0,05	0,85		
		Hainbuche	153	1	21,72	18	0,03	0,26											
		Gesamt		33			5,06	83,48			19			4,9	73,33	0,06	0,96		
136 (Spessart)	1	Buche	192	40	24,97	43,52	2,52	30,58	67	218	4	27,01	39,6	0,42	5,52	0,02	0,3	38	26
		Eiche	192	66	29,31	60,12	18,74	305,77		218	52	31,34	70,58	20,34	356,57	0,19	3,82		
		Gesamt		106			21,26	336,35			56			20,76	362,09	0,21	4,11		
		2	Buche	202	106	28,08	44,76	7,03	88,29	67	228	26	27,78	49,97	3,78	53,8	0,08	0,94	41
Eiche	202	74	28,18	61	21,63	340,19	228	48	30,92		68,54	17,71	305,72	0,16	3,24				
Gesamt		180			28,66	428,48		74				21,48	359,52	0,24	4,17				
141 (Nürnberg)	1	Kiefer	88	400	24,1	35,76	27,07	287,45	66	116	144	26,77	39,99	16,69	203,99	0,23	3,52	35	28
	2	Kiefer	97	400	25,52	35,95	29,53	332,25	77	125	233	30	43,83	29,25	389,24	0,45	7,44	57	28
	3	Kiefer	125	189	27,57	47,56	27,62	346,41	63	153	111	30,19	52,67	23,59	327,32	0,29	4,95	42	28
	4	Kiefer	130	133	31,65	48,8	22,46	324,85	57	158	44	29,79	54,33	10,3	141,56	0,1	1,03	23	28

Tabelle 3: ertragskundliche Daten der Verjüngung bei der Erst- und Letztaufnahme; Alter – Alter der Verjüngung [Jahre]; Anzahl – Anzahl der Verjüngungspflanzen [n/ha]; Biomasse – Biomasse der Verjüngung [kg/ha]; Höhe – mittlere Höhe der Verjüngung [m]
**Table 3: Yield data of regeneration at first and latest inventory; Alter - age of regeneration [years]; Anzahl – plant density [n/ha]; Bio-
 masse – regeneration biomass [kg/ha]; Höhe - mean height of regeneration [m]**

Versuch (räuml. Lage)	Parzelle	Baumart	Erstaufnahme			Letztaufnahme					
			Alter	Anzahl [n/ha]	Biomasse [kg/ha]	Höhe [m]	Alter	Anzahl [n/ha]	Biomasse [kg/ha]	Höhe [m]	
132 (Steigerwald)	1	Kiefer	4	3.504	182	0,67	40	4	202	16,07	
		Buche		18.308	2.033	1,05		3.492	55.745	7,41	
		Eiche		22.104	562	1,07		271	11.015	13,45	
		Hainbuche		3.383	605	1,21		354	9.235	7,99	
		Sonstige		350	33	1,55		4	26	8,19	
	2	Kiefer	6	366	22	0,89	42	3.709	27.696	7,1	
		Buche		15.464	1.767	1,11		5	68	11,48	
		Eiche		8.892	165	0,87		6	716	15,48	
		Hainbuche		130	16	1,74		59	3.305	12,06	
		Sonstige		697	118	2,85		6	0	0,62	2.394
133 (Steigerwald)	4	Buche	22	30.554	6.100	3,19	58	6	279	13,97	
		Eiche		1.140	15	1,44		6	1.038	18	
		Hainbuche		197	28	1,64		98	32.299	19,89	
		Sonstige		284	60	4,71		5	125	9,27	
		Kiefer		100	4	0,36		5.280	49.307	5,72	
	6	Buche	6	15.791	1.056	0,65	42	98	921	7,12	
		Eiche		119.009	833	0,32		95	2.033	9,87	
		Hainbuche		69	9	0,87		77	8.714	10,21	
		Sonstige		153	15	1,07		59	4.672	13,24	
		Kiefer		2.198	161	1,44		3.972	49.136	7,13	
7	Buche	11	19.284	2.863	1,71	47	613	43.182	14,41		
	Eiche		17.402	479	1,84		453	7.973	9,51		
	Hainbuche		2.925	594	1,67		184	9.655	9,54		
	Sonstige		3.609	477	2,03		16	2.340	16,55		
	Kiefer		70	5	1,36		3.203	29.103	5,72		
8	Buche	13	7.634	891	1,53	49	2.500	102.447	10,07		
	Eiche		41.570	1.483	1,89		1.553	33.505	7,81		
	Hainbuche		3.642	897	2,14		22	6.699	14,86		
	Sonstige		219	27	2,37		11.628	12.644	2,8		
	Kiefer		15.878	1.052	0,67		6.678	10.142	3,52		
136 (Spessart)	1	Eiche	5	54.286	1.686	0,3	31	8.175	23.505	3,9	
		Buche		12.245	812	0,64		5	26	7,13	
	2	Buche	3	13.302	411	0,25	29	2.133	2.753	2,77	
		Kiefer		31.911	849	0,3		1.478	8.653	6,35	
		Buche		1.278	130	0,32		2.444	6.696	3,1	
		Eiche		18.889	785	0,45		356	1.714	4,67	
	141 (Nürnberg)	1	Sonstige	3	544	162	0,47	31	122	92	2,81
			Kiefer		86.967	2.429	0,32		3.567	46.948	8,17
			Buche		1.122	129	0,43		822	3.120	5,09
			Eiche		42.911	1.742	0,53		222	950	6,14
2		Sonstige	5	156	47	0,38	33	2.622	76.353	10,96	
		Kiefer		2.300	157	0,88		89	3.900	14,34	
		Buche		5.011	1.095	1,75		322	13.313	10,41	
		Eiche		40.211	4.230	1,56		1.800	128	0,89	
3		Sonstige	9	7.089	3.060	1,22	37	322	13.313	10,41	
		Kiefer		1.800	128	0,89		500	3888	3,58	
	Buche	322		54	0,94	1.733		100.861	11,58		
	Eiche	23.911		2.517	1,54	256		6497	6,86		
4	Sonstige	9	1633	670	1,22	37	256	6497	6,86		

2.4 Statistische Auswertungen

Zur Beschreibung des zeitlichen Trends des Eichenvorkommens in den langfristigen bewirtschafteten Verjüngungsbeständen (Forschungsfrage i) wurde zunächst über alle Verjüngungsdaten hinweg ein logistisches Modell gerechnet, das die Vorkommenswahrscheinlichkeit der Eiche in Abhängigkeit der Verjüngungsdauer (VJ_dauer) und des entsprechenden Versuchsstandorts ($StaO$) beschrieb. Die damit modellierte Wahrscheinlichkeit beruhte auf dem Vorkommen der Baumart Eiche in dem jeweiligen Verjüngungsquadrat. Jedes Verjüngungsquadrat wurde mit der binären Variable entweder in 1 (Eiche kommt vor) oder 0 (Eiche kommt nicht vor) kategorisiert.

$$\frac{p_{ijk}}{1 - p_{ijk}} = a_0 + a_1 * VJ_dauer_{ik} + a_2 * StaO_i + b_i + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

Die Indizes i , j und k bezeichnen die Parzelle innerhalb des Versuchs und das Verjüngungsquadrat innerhalb der Parzelle sowie die einzelne Beobachtung. a_0 bis a_n stellen die geschätzten Parameter der fixen Effekte dar. Die entsprechenden Zufallseffekte waren b_i und b_{ij} zur Beachtung der räumlichen und zeitlichen Autokorrelation. ε_{ijk} war die Reststreuung der Residuen.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen (ii-iv) wurden jeweils lineare gemischte Modelle verwendet (Zuur et al. 2009), da eine Unabhängigkeit der einzelnen Daten je Parzelle und Aufnahmezeitpunkte nicht gegeben war. Die Modelle wurden jeweils für die einzelnen Versuchsstandorte angepasst.

Für Forschungsfrage (ii) wurde zunächst die Verjüngung in Abhängigkeit der Überschirmung durch den Altbestand betrachtet und folgendes Modell entwickelt.

$$\log(y_{ijk}) = a_0 + a_1 * \log(Alter_{ik}) + a_2 * BA + a_3 * \ddot{U}b_{ijk} + a_4 * BA * \ddot{U}b_{ijk} + b_i + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (3)$$

Dabei war y die Höhe bzw. Biomasse der Verjüngung. Als erklärende Variablen wurden das Alter ($Alter$) und die Überschirmung ($\ddot{U}b$) als kontinuierliche, sowie die Baumart (BA) als faktorielle Variable im Modell betrachtet.

$$\log(y_{ijk}) = a_0 + a_1 * \log(Alter_{ik}) + a_2 * BA + a_3 * \ddot{U}b_{ijk} + a_4 * bio_bu_{ijk} + a_5 * BA * \ddot{U}b_{ijk} + a_6 * BA * bio_bu_{ijk} + b_i + b_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

Gegenüber dem Basismodell, das die Überschirmung des Altbestands berücksichtigt (Formel 3) wurde zur Beantwortung der Forschungsfrage (iii) und zur Beschreibung der interspezifischen Konkurrenz zusätzlich die Biomasse der Mischbaumart Buche (bio_bu) mit in das Modell genommen.

Die Produktivität des Altbestands, beschrieben durch den periodischen jährlichen Bestandeszuwachs der jeweils letzten Aufnahmeperiode wurde in Abhängigkeit des Vorrats und der Verjüngungsbiomasse geschätzt (Forschungsfrage iv).

$$\log(y_{ik}) = a_0 + a_1 * \log(Vol_{ik}) + a_2 * Bio_VJ_{ik} + a_3 * \log(Vol_{ik}) * Bio_VJ_{ik} + b_i + \varepsilon_{ik} \quad (5)$$

Die unabhängigen Variablen waren der Bestandsvorrat Vol sowie die Biomasse der Verjüngung Bio_VJ .

Die statistischen Auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm R und dem Paket lme4 (Bates et al. 2015; R Core Team 2018) durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Gemessene Entwicklung von Altbestand und Verjüngung

Die einzelnen Altbestände im Steigerwald unterschieden sich in ihren Vorräten stark und variierten zu Beginn der Aufnahmen von 83,5 bis 266,8 Vfm/ha. Mit Ausnahme der Parzelle 8 nahmen die Vorräte über die Beobachtungsdauer vom Beginn der Aufzeichnungen wieder zu und erreichten Vorräte von bis zu 386,0 Vfm/ha im Jahr 2019. Anders stellte sich die Situation in den Beständen des Spessarts dar. Beide Parzellen hatten zu Beginn mit 336,4 Vfm/ha und 428,5 Vfm/ha die höchsten Vorräte, die jedoch für beide Parzellen zunächst abgesenkt wurden und dann wieder auf aktuell 362,1 bzw. 359,5 Vfm/ha anstiegen. In Nürnberg nahm der Vorrat zunächst auf allen Parzellen stark ab, bevor er bis zum Jahr 2019 auf drei der vier Parzellen wieder angestiegen ist (Abb. 2).

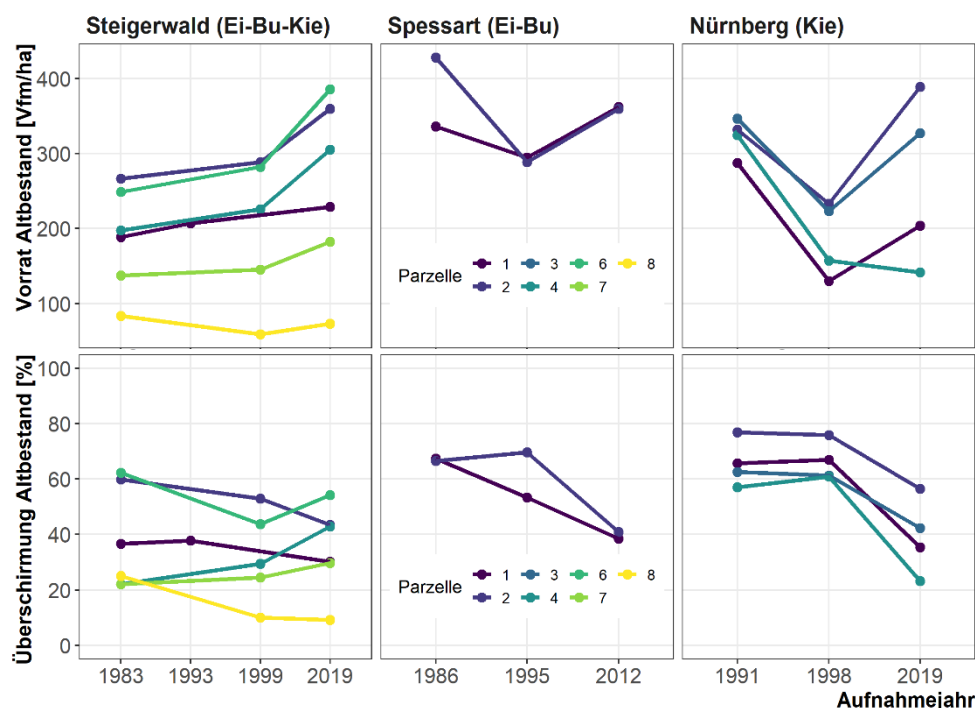


Abbildung 2: Beobachtete Vorratsentwicklung und mittlere Überschirmungsprozente über den Verjüngungszeitraum im Altbestand für die drei verschiedenen Standorte getrennt nach den einzelnen Parzellen (Bestände).

Figure 2: Observed standing volume development and canopy cover over the regeneration period of the old stand for the three different sites separated by individual plots.

Auf den Versuchsflächen konnten sich die Verjüngungshöhen über den beobachteten Verjüngungszeitraum unterschiedlich gut entwickeln. Die parzellenweise Entwicklung zeigte, dass die Gesamtverjüngung in den Eichen-Buchen Beständen des Spessart nach 26 Jahren und einem Verjüngungsalter von 30 Jahren im Mittel eine Höhe von 6,5 m bzw. 8,0 m erreicht hatte. In den Beständen der Eichen-Buchen-Kiefern sowie Kiefern-Beständen konnten im Jahr 2019 und einem Verjüngungsalter von 38 bis 58 Jahren mittlere Höhen der Verjüngung von bis zu 17,5 m bzw. 14,5 m beobachtet werden. Innerhalb der untersuchten Bestände war jedoch abhängig von der Überschirmungssituation eine starke Variation der Verjüngungshöhe zu erkennen (Abb. 3).

Bei der Entwicklung der Biomassen unterschieden sich die beiden Parzellen in den Eichen-Buchen Beständen des Spessarts kaum. 2012 lag die Verjüngungsbiomasse bei jeweils ca. 30 t/ha auf den beiden Flächen. Auf den beiden anderen Standorten waren die Unterschiede zwischen den Parzellen wesentlich deutlicher. Die Biomassen reichten von 30 t/ha bis zu 170 t/ha (Abb. 3). Die Verjüngung war in diesen Parzellen jedoch auch um bis zu 30 Jahre älter (Tab. 3).

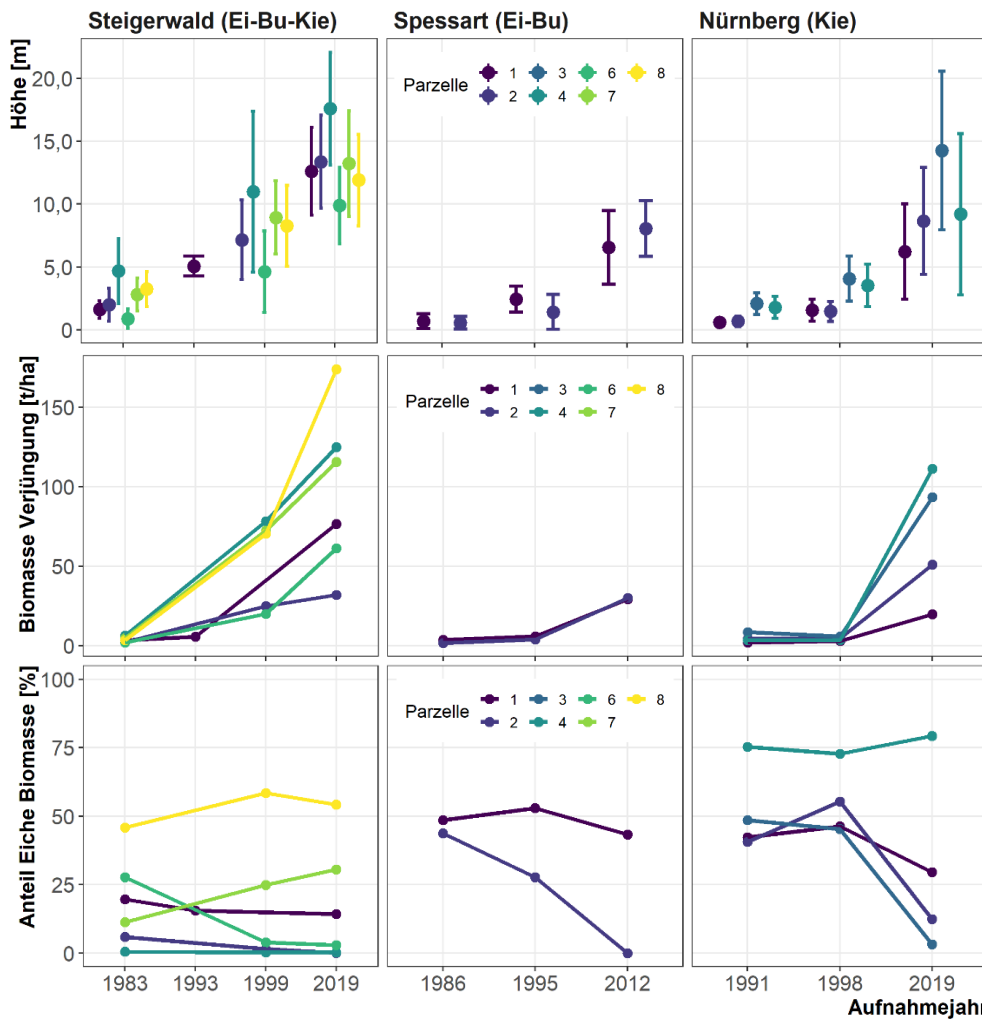


Abbildung 3: Beobachtete Höhen- und Biomasseentwicklung der Gesamtverjüngung und Entwicklung der Eichenanteile für die drei verschiedenen Standorte getrennt nach den einzelnen Parzellen. Dargestellt sind die maximalen Höhen der Verjüngung auf den einzelnen Verjüngungsquadraten mit ihrer Standardabweichung

Figure 3: Observed height and biomass development of regeneration and the oak proportions for the three different sites separated by individual plots. Shown are the maximum heights of the regeneration on the individual regeneration squares with their standard deviation

Eine Betrachtung der Eiche zeigte, dass die Eichenanteile – gemessen an der Biomasse – auf 6 der 10 Versuchspartellen während des Beobachtungszeitraums abgenommen haben. Insgesamt, über alle Bestände, lagen die Eichenanteile am Ende der Beobachtungsperiode in den Beständen des Steigerwalds bei 17% (-2%), im Spessart bei 22% (-24%) und in Nürnberg um bei 31% (-21%). Demnach waren die Eichenanteile in den Beständen, die den höchsten Anteil an Eiche schon zu Beginn der Aufzeichnungen hatten mehr oder weniger stabil. Dies galt für die jeweiligen Bestände aller drei Standorte (Abb. 3).

Zu Beginn des Beobachtungszeitraums waren 99,4% (1.905 von 1.916) aller Verjüngungsquadrate verjüngt. Dabei kam die Eiche über alle Standorte hinweg auf 81,2% aller verjüngten Verjüngungsquadrate vor und war auf 36,0% die höchste Baumart. Bei der aktuellen Aufnahme war die Eiche noch auf 39,1% der Verjüngungsquadrate vertreten und auf 23,0% die höchste Baumart.

3.2 Vorkommenswahrscheinlichkeit der Eiche

Mit den Daten von den einzelnen Verjüngungsquadraten konnten für die betrachteten Bestände Wahrscheinlichkeiten für das Vorkommen der Eiche über den Verjüngungszeitraum und die betrachteten Bestände modelliert werden. Der Verjüngungszeitraum hatte in dem Modell einen signifikanten Einfluss auf das Eichenvorkommen in den Beständen. Mit einem Chancenverhältnis (Odds Ratio, OR) von 0,89 nahm mit zunehmender Verjüngungsdauer die Wahrscheinlichkeit ab, die Eiche in der Verjüngung zu finden (Tab. 4).

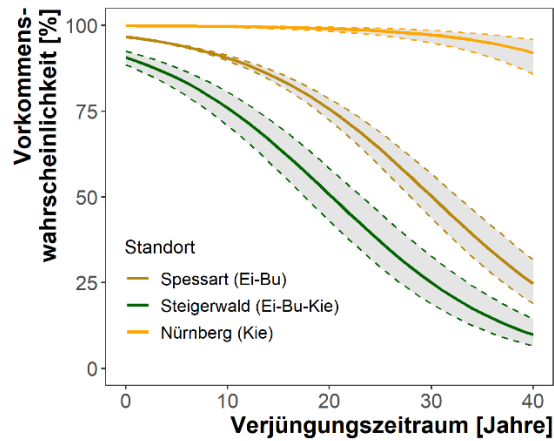


Abbildung 4: Modellierte Vorkommenswahrscheinlichkeit der Eiche für die untersuchten Standorte in Abhängigkeit vom Verjüngungszeitraum

Figure 4: Estimated occurrence probability of oak for the studied sites depending on the regeneration period.

In dem Modell waren die gefundenen Chancenverhältnisse für das Vorkommen der Eiche auf den drei untersuchten Standorten signifikant verschieden. Werte von 0,33 für die Bestände im Steigerwald und 35,44 für die Kiefernbestände in Nürnberg zeigten eine deutliche Abnahme bzw. Zunahme im Vergleich zur Referenz, den Spessarter Eichen-Buchen-Mischbeständen (Tab. 4). Insgesamt fiel in den Kiefernbeständen die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen der Eiche in den langfristig und kleinflächig verjüngten Beständen auch nach 40 Jahren kaum ab. Für die beiden Standorte Spessart und Steigerwald zeichnete sich diese Abnahme schon deutlich früher und stärker ab (Abb. 4).

Tabelle 4: Modellstatistik des Modells zur Vorkommenswahrscheinlichkeit der Eiche (Formel 2) für die drei untersuchten Standorte; der Referenzstandort ist der Spessart; OR, Odds Ratio; SE, Standardfehler; p, P-Wert

Table 4: Model statistics of the oak occurrence probability model (formula 2) for the three studied sites; the reference site is the Spessart; OR, odds ratio; SE, standard error; p, P-value.

Feste Effekte	OR	SE	p
(Konstante)	29.33	1.02	0.001
Verjüngungszeitraum	0.89	0	<0.001
Spessart (Ei-Bu)	Referenz		
Steigerwald (Ei-Bu-Kie)	0.33	0.12	<0.001
Nürnberg (Kie)	35.44	0.35	<0.001
Zufallseffekte			
σ^2	3.29		
$\tau_{00 \text{ Quad:P}}$	0.24		
$\tau_{00 \text{ P}}$	7.08		
N_{Quad}	256		
N_{P}	7		
n Messungen	5748		
AIC	4046.7		

3.3 Entwicklung der Verjüngung in Abhängigkeit von der Überschirmung

Für die beobachtete Höhenentwicklung der Verjüngung konnte für die beiden Standorte im Steigerwald und im Spessart ein signifikanter Einfluss des Altbestands festgestellt werden (Tab. 5). Dabei wurden insbesondere unterschiedlich starke Effekte zwischen den betrachteten Baumarten festgestellt und im Folgenden für die Eichen und die beigemischten Buchen dargestellt (Abb. 5).

Die Höhen der Eichenverjüngung waren von der Überschirmung auf allen Standorten negativ beeinflusst. Die modellierten Koeffizienten lagen bei -0,89 (Steigerwald), -0,55 (Spessart) und -0,28 (Nürnberg). In den Nürnberger Kiefernbeständen war dieser Wert jedoch nicht statistisch abgesichert. Der stärkste negative Effekt der Überschirmung konnte demnach für die Bestände im Steigerwald gefunden werden. Bei einem Alter von 15 Jahren und einer Überschirmung von 50% waren die Eichenhöhen dort im Mittel um 36% niedriger als bei 0% Überschirmung. Für die Standorte im Spessart und Nürnberg waren die Eichen um 24% bzw. 13% niedriger (Abb. 5).

Insgesamt wirkte die Überschirmung auf allen Standorten stärker auf die Eichenverjüngung als auf die Verjüngung der beigemischten Buche. Die Höhen der Buchen waren demzufolge kaum negativ von der Überschirmung beeinflusst. In den Kieferbeständen in Nürnberg war der Effekt der Überschirmung auf die Buchenhöhen positiv. Dort wurden die Buchen bei einer Zunahme der Überschirmung von 0 auf 50% im Alter 15 im Durchschnitt 5% höher (Tab. 5, Abb. 5).

Tabelle 5: Modellstatistik des Modells zur Höhenentwicklung in Abhängigkeit der Überschirmung (Formel 3) für die drei untersuchten Standorte; die Referenzbaumart ist die Eiche; Est, Schätzwert; SE, Standardfehler; p, P-Wert
Table 5: Model statistics of the model for height development as a function of canopy cover (equation 3) for the three sites studied; the reference tree species is oak; Est, estimated value; SE, standard error; p, p-value.

	Steigerwald (Ei-Bu-Kie)			Spessart (Ei-Bu)			Nürnberg (Kie)		
Feste Effekte	<i>Est</i>	<i>SE</i>	<i>p</i>	<i>Est</i>	<i>SE</i>	<i>p</i>	<i>Est</i>	<i>SE</i>	<i>p</i>
(Konstante)	-0,48	0,11	<0,001	-3,57	0,22	<0,001	-1,72	0,24	<0,001
log (Alter)	0,79	0,03	<0,001	1,52	0,05	<0,001	1,15	0,06	<0,001
Überschirmung	-0,89	0,05	<0,001	-0,55	0,09	<0,001	-0,28	0,18	0,109
Buche	0,04	0,03	0,150	0,41	0,08	<0,001	-0,24	0,17	0,177
Buche x Überschirmung	0,76	0,05	<0,001	0,49	0,10	<0,001	0,38	0,24	0,123
Kiefer	-0,28	0,06	<0,001	--	--	--	-0,81	0,25	0,001
Kiefer x Überschirmung	0,84	0,11	<0,001	--	--	--	0,14	0,34	0,684
Hainbuche	-0,25	0,03	<0,001	--	--	--	--	--	--
Hainbuche x Überschirmung	0,70	0,07	<0,001	--	--	--	--	--	--
Sonstige	0,03	0,06	0,628	--	--	--	-0,96	0,18	<0,001
Sonstige x Überschirmung	0,15	0,15	0,313	--	--	--	0,35	0,26	0,187
Zufallseffekte									
σ^2	0,31			0,42			0,52		
$\tau_{00 \text{ Quad:P}}$	0,03			0,05			0,01		
$\tau_{00 \text{ P}}$	0,03			0,06			0,06		
N_{Quad}	256			200			36		
N_{P}	6			2			4		
N Messungen	5195			1307			772		
AIC	9092,1			2746,6			1747,8		

Bei einer mittleren Überschirmung von 50% und einem Verjüngungsalter von 15 Jahren überragten die Buchen die Eichen im Durchschnitt um 1,2 und 1,8 m auf den Eichenmischbeständen im Spessart bzw. Steigerwald. In den Kiefernbeständen bei Nürnberg erreichten beide Baumarten vergleichbare Höhen, bei einem leichten (nicht signifikanten) Höhenvorteil der Eiche von 0,1 m. In den Eichen-Buchen-(Kiefer) Mischbeständen nahm die negative Höhenrelation der Eichen gegenüber der Buchen mit abnehmender Überschirmung ab ohne jedoch die Höhen der Buchen zu erreichen. In den Kiefernbeständen wurde der Vorteil der Lichtbaumart Eiche deutlicher. Überschirmungsprozente unter 62% hatten dort eine positive Höhenrelation der Eiche gegenüber der Buche zur Folge.

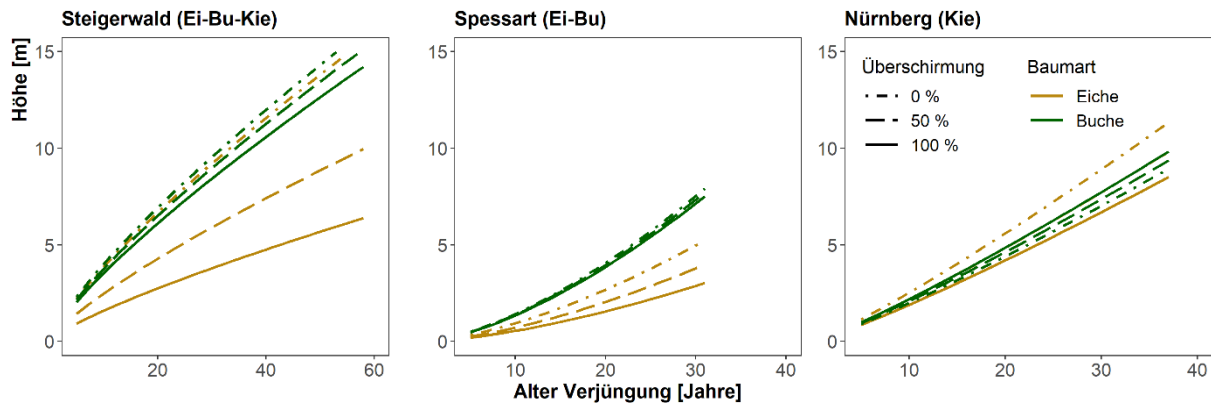


Abbildung 5: Ergebnisse des Modells zur Höhenentwicklung der Eichen- und Buchenverjüngung in den untersuchten Beständen (Formel 3); Dargestellt sind die Entwicklungen der Baumarten Eiche und Buche
 Figure 5: Results of the model for the height development of oak and beech regeneration in the investigated stands (equation 3); shown are the developments of the tree species oak and beech.

Bei der Entwicklung der Verjüngungsbiomasse konnte ein vergleichbarer Effekt der Überschirmung beobachtet werden. Der Effekt der Überschirmung auf die Verjüngungsbiomasse der Eiche war auf allen betrachteten Standorten negativ. Jedoch war der negative Effekt für die Bestände im Spessart nicht statistisch abgesichert. Für den Steigerwald und die Kiefernbestände hingegen war der Effekt signifikant (Tab. 6).

Dementsprechend steigerte sich die Biomasse der Eichenverjüngung auf den Standorten Steigerwald, Spessart und Nürnberg und ohne Überschirmung im Alter 30 um 12,1 t/ha, 1,3 t/ha bzw. 7,3 t/ha gegenüber voll übershirmten Flächen.

Tabelle 6: Modellstatistik des Modells zur Biomasseentwicklung in Abhängigkeit der Überschirmung (Formel 3) für die drei untersuchten Standorte; Die Referenzbaumart ist die Eiche; Est, Schätzwert; SE, Standardfehler; p, P-Wert
 Table 6: Model statistics of the model for biomass development as a function of canopy cover (equation 3) for the three studied sites; The reference tree species is oak; Est, estimated value; SE, standard error; p, p-value.

	Steigerwald (Ei-Bu-Kie)			Spessart (Ei-Bu)			Nürnberg (Kie)		
Feste Effekte	Est	SE	p	Est	SE	p	Est	SE	p
(Konstante)	-3,71	0,29	<0,001	-3,99	0,34	<0,001	-3,04	0,47	<0,001
log (Alter)	2,11	0,08	<0,001	1,93	0,10	<0,001	1,90	0,12	<0,001
Überschirmung	-2,90	0,13	<0,001	-0,26	0,19	0,168	-0,95	0,38	0,013
Buche	0,24	0,08	0,002	0,76	0,17	<0,001	-0,93	0,38	0,015
Buche x Überschirmung	2,69	0,15	<0,001	0,01	0,24	0,955	0,99	0,54	0,065
Kiefer	-1,32	0,17	<0,001	--	--	--	-2,51	0,55	<0,001
Kiefer x Überschirmung	2,46	0,32	<0,001	--	--	--	1,53	0,75	0,041
Hainbuche	-1,13	0,09	<0,001	--	--	--	--	--	--
Hainbuche x Überschirmung	2,64	0,21	<0,001	--	--	--	--	--	--
Sonstige	0,22	0,17	0,194	--	--	--	-1,85	0,40	<0,001
Sonstige x Überschirmung	0,81	0,42	0,056	--	--	--	0,84	0,58	0,144
Zufallseffekte									
σ^2	2,61			2,15			2,50		
τ_{00} Quad:p	0,10			0,18			0,00		
τ_{00} p	0,07			0,01			0,09		
N Quad	256			200			36		
N P	6			2			4		
N Messungen	5195			1307			772		
AIC	19983,3			4829,5			2931,8		

Wenn keine Überschirmung durch den Altbestand bestand, erreichten die Eichen im Steigerwald annähernd die Biomassen der Buchenverjüngung. Im Spessart wurden die Werte der Buchenbiomasse

hingegen bei keiner Überschirmungssituation von den Eichen erreicht. Dagegen übertrafen die Eichenbiomassen in den Kiefernbeständen die Buchenbiomasse annähernd bei jeder Überschirmungssituation (Abb. 6).

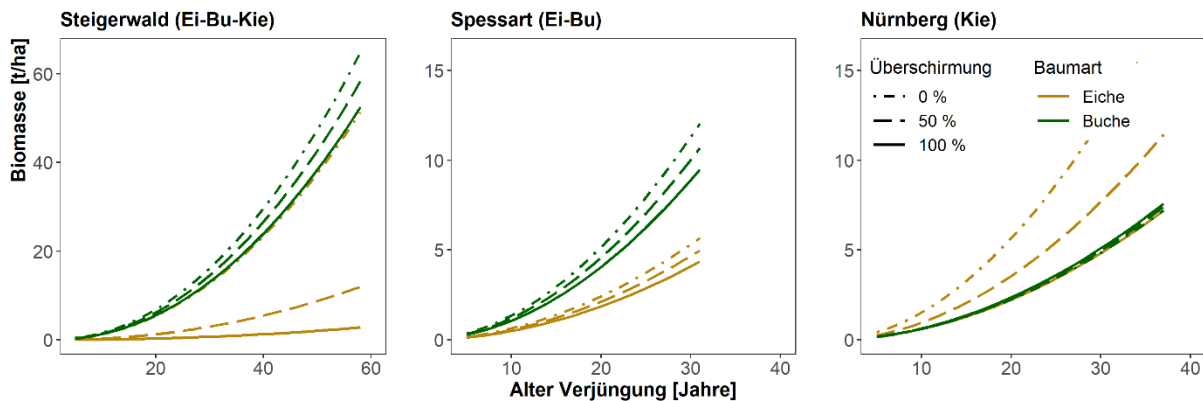


Abbildung 6: Ergebnisse des Modells zur Biomasseentwicklung für die drei untersuchten Standorte (Formel 3); Dargestellt sind die Entwicklungen der Baumarten Eiche und Buche
 Figure 6: Results of the biomass development model for the three sites studied (equation 3); the developments of the tree species oak and beech are shown.

3.4 Einfluss der interspezifischen Konkurrenz auf die Eichenverjüngung

Neben der Überschirmungssituation durch den Altbestand konnte für die untersuchten Bestände ein Einfluss der Konkurrenz innerhalb der Verjüngung gefunden werden. Mit der Zunahme der Buchenbiomasse als Konkurrenzparameter konnte das Vorhersagemodell verbessert werden. Somit zeigte sich ein signifikant negativer Effekt der Buchenbiomasse auf die Höhe der Eichenverjüngung (Tab. 7).

Tabelle 7: Ergebnisse zum Höhenmodell in Abhängigkeit von der Überschirmung und Buchenbiomasse (Formel 4) für die drei untersuchten Standorte; Die Referenzbaumart ist die Eiche; Est, Schätzwert; SE, Standardfehler; p, P-Wert
 Table 7: Results on the height model as a function of canopy cover and beech biomass (equation 4) for the three sites studied; The reference tree species is oak; Est, estimated value; SE, standard error; p, p-value.

	Steigerwald (Ei-Bu-Kie)			Spessart (Ei-Bu)			Nürnberg (Kie)		
Feste Effekte	Est	SE	p	Est	SE	p	Est	SE	p
(Konstante)	-0,20	0,10	0,251	-2,60	0,30	<0,001	-1,70	0,40	<0,001
log(Alter)	0,77	0,00	<0,001	1,24	0,00	<0,001	1,20	0,10	<0,001
Überschirmung	-0,80	0,10	<0,001	-0,50	0,10	<0,001	-0,20	0,30	0,387
Bu-Anteil	-0,70	0,10	<0,001	-0,40	0,10	0,001	-1,90	0,70	0,008
Buche	-0,50	0,00	<0,001	-0,50	0,10	<0,001	-0,40	0,30	0,077
Buche x Bu-Anteil	1,13	0,10	<0,001	1,52	0,10	<0,001	2,25	0,70	0,001
Buche x Überschirmung	0,58	0,10	<0,001	0,48	0,10	<0,001	0,12	0,30	0,703
Kiefer	0,01	0,10	0,932	--	--	--	-0,80	0,40	0,052
Kiefer x Bu-Anteil	-0,20	0,20	0,546	--	--	--	0,15	1,00	0,880
Kiefer x Überschirmung	0,69	0,20	<0,001	--	--	--	-0,20	0,50	0,631
Hainbuche	-0,50	0,10	<0,001	--	--	--	--	--	--
Hainbuche x Bu-Anteil	0,66	0,10	<0,001	--	--	--	--	--	--
Hainbuche x Überschirmung	0,66	0,10	<0,001	--	--	--	--	--	--
Sonstige	-0,10	0,10	0,147	--	--	--	-1,10	0,30	<0,001
Sonstige x Bu-Anteil	0,43	0,20	0,010	--	--	--	0,90	0,80	0,242
Sonstige x Überschirmung	0,12	0,20	0,425	--	--	--	0,33	0,40	0,354
Zufallseffekte									
σ^2	0,27			0,33			0,53		
$\tau_{00 \text{ Quad:P}}$	0,03			0,07			0,06		
$\tau_{00 \text{ P}}$	0,03			0,18			0,06		
N Quad	256			200			36		
N P	6			2			4		
N Messungen	3519			1266			464		
AIC	5752,0			2423,0			1103,3		

Über alle Standorte hinweg war mit abnehmender Buchenbeimischung eine höhere Eichenverjüngung zu beobachten. Für die wuchskräftigsten Standorte im Steigerwald war die Höhenrelation der Eiche gegenüber der Buche noch bis zu einem Buchenanteil von 47% bei 0% Überschirmung positiv. Bei einer Überschirmung von 50% konnte die positive Höhenrelation nur noch bei einem Buchenanteil von 20% beobachtet werden. Im Spessart lagen diese Werte bei 30% bzw. 14% Buchenanteil und in Nürnberg bei 19% bzw. 16%.

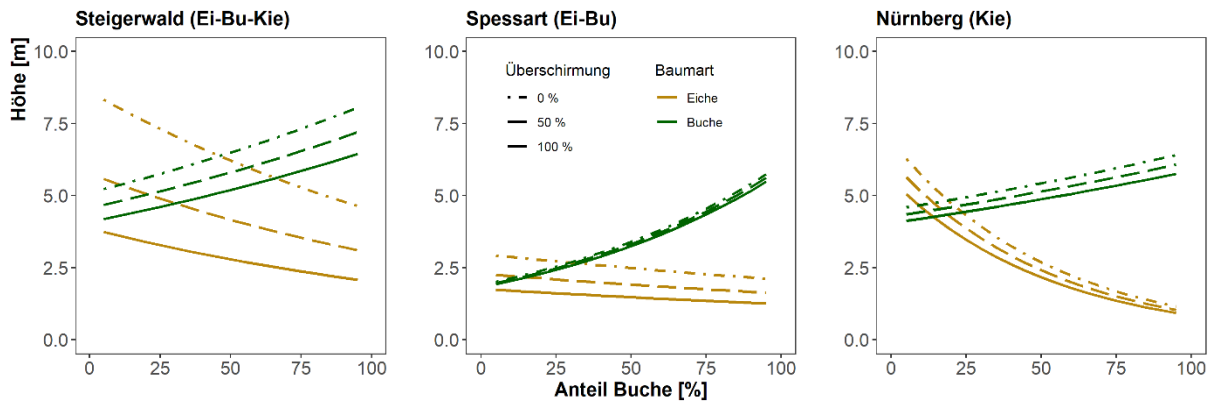


Abbildung 7: Ergebnisse des Modells zur Höhenentwicklung der Eichen- und Buchenverjüngung in Abhängigkeit von der Buchenkonkurrenz für die drei untersuchten Standorte (Formel 4); Dargestellt sind die Entwicklungen der Baumarten Eiche und Buche
Figure 7: Results of the model for the height development of oak and beech regeneration as a function of the beech proportion for the three sites studied (equation 4); shown are the developments of the tree species oak and beech.

Für die Entwicklungen der Biomassen konnten vergleichbare Effekte wie bei der Höhenentwicklung beobachtet werden. Hier war der gefundene Einfluss zusätzlich verstärkt, da die Biomassenentwicklung der beiden Baumarten Eiche und Buche direkt durch den Buchenanteil in der Vorperiode beeinflusst war (s. Tab. 8). Ein signifikant negativer Einfluss durch die Überschirmung auf die Biomasse der Eichenverjüngung konnte nur noch in den Beständen des Steigerwalds gefunden werden. Die Buchenbiomasse hingegen reduzierte auf allen drei Standorten die beobachtete Eichenbiomasse signifikant.

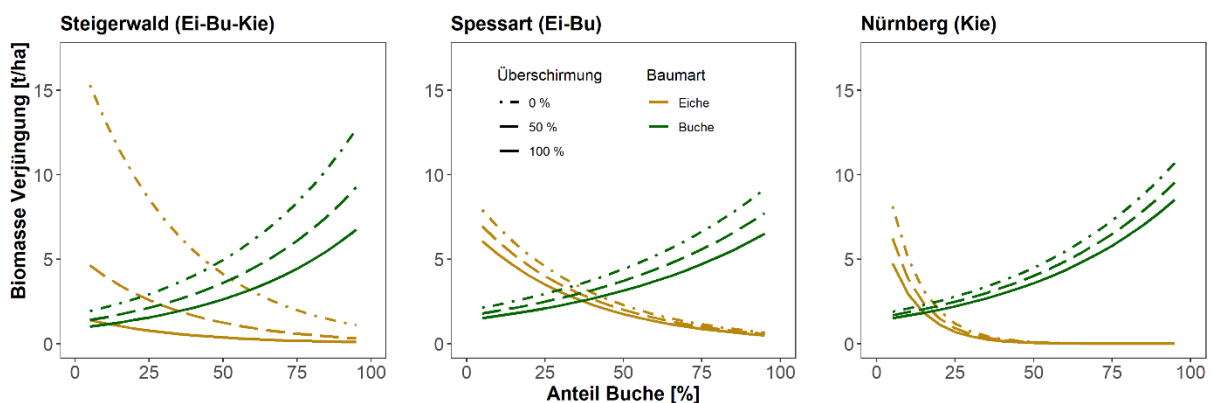


Abbildung 8: Ergebnisse des Modells zur Biomassenentwicklung der Eichen- und Buchenverjüngung in Abhängigkeit von der Buchenkonkurrenz für die drei untersuchten Standorte (Formel 4); Dargestellt sind die Entwicklungen der Baumarten Eiche und Buche
Figure 8: Results of the model for the biomass development of oak and beech regeneration as a function of the beech proportion for the three sites studied (equation 4); shown are the developments of the tree species oak and beech.

Tabelle 8: Ergebnisse zum Biomassenmodell in Abhängigkeit von der Überschirmung und Buchenbiomasse (Formel 4) für die drei untersuchten Standorte; Die Referenzbaumart ist die Eiche; Est, Schätzwert; SE, Standardfehler; p, P-Wert
Table 8: Results on the biomass model as a function of canopy cover and beech biomass (equation 4) for the three sites studied; The reference tree species is oak; Est, estimated value; SE, standard error; p, p-value.

	Steigerwald (Ei-Bu-Kie)			Spessart (Ei-Bu)			Nürnberg (Kie)		
	Est	SE	p	Est	SE	p	Est	SE	p
Feste Effekte									
(Konstante)	-2,23	0,30	<0,001	-1,25	0,30	<0,001	-3,34	0,70	<0,001
log(Alter)	2,01	0,10	<0,001	1,46	0,10	<0,001	2,28	0,20	<0,001
Überschirmung	-2,39	0,20	<0,001	-0,26	0,20	0,140	-0,55	0,50	0,298
Bu-Anteil	-2,92	0,20	<0,001	-2,75	0,20	<0,001	-9,51	1,40	<0,001
Buche	-2,32	0,10	<0,001	-1,52	0,20	<0,001	-2,03	0,50	<0,001
Buche x Bu-Anteil	5,01	0,20	<0,001	4,36	0,30	<0,001	11,42	1,40	<0,001
Buche x Überschirmung	1,76	0,20	<0,001	-0,08	0,20	0,693	0,33	0,70	0,619
Kiefer	-1,14	0,40	0,001	--	--	--	-3,20	0,80	<0,001
Kiefer x Bu-Anteil	0,05	0,70	0,934	--	--	--	3,21	2,00	0,114
Kiefer x Überschirmung	2,25	0,50	<0,001	--	--	--	1,66	1,00	0,098
Hainbuche	-1,96	0,10	<0,001	--	--	--	--	--	--
Hainbuche x Bu-Anteil	2,05	0,30	<0,001	--	--	--	--	--	--
Hainbuche x Überschirmung	2,28	0,20	<0,001	--	--	--	--	--	--
Sonstige	-0,52	0,30	0,037	--	--	--	-2,29	0,60	<0,001
Sonstige x Bu-Anteil	1,86	0,50	<0,001	--	--	--	6,60	1,60	<0,001
Sonstige x Überschirmung	0,48	0,40	0,231	--	--	--	0,45	0,70	0,528
Zufallseffekte									
σ^2	1,99			1,68			2,21		
$\tau_{00 \text{ Quad:P}}$	0,17			0,26			0,12		
$\tau_{00 \text{ P}}$	0,08			0			0,17		
N Quad	256			200			36		
N P	6			2			4		
N Messungen	3519			1266			464		
AIC	12744,6			4436,8			1733,3		

3.5 Rückkopplung der Verjüngung auf die Produktivität des Hauptbestands

Der Bestandeszuwachs war im Wesentlichen vom Bestandsvorrat abhängig, was statistisch signifikant abgesichert werden konnte. Eine Zunahme des Vorrats um 100 m³/ha im Altbestand steigerte im Mittel den Bestandeszuwachs um 1,8 bis 2,7 m³/ha/Jahr (Abb. 9).

Tabelle 9: Ergebnisse des Modells zum Zuwachs des Altbestands in Abhängigkeit der Verjüngungsbiomasse
Table 9: Results of the model on periodic annual increment of the main stand as a function of the regeneration biomass.

Feste Effekte	Est	SE	Stat	p
(Konstante)	-7,23	1,79	-4,04	<0,001
Biomasse VJ	0,03	0,03	0,92	0,358
log(Vorrat)	1,58	0,33	4,82	<0,001
log(Vorrat) * Biomasse VJ	-0,01	0,01	-1,08	0,279
Zufallseffekte				
σ^2	0,23			
$\tau_{00 \text{ P}}$	0			
N P	7			
N Messungen	24			
AIC	62,5			

Im Haupteffekt und in Wechselwirkung mit dem Bestandsvorrat konnte der Einfluss der Verjüngungsbiomasse statistisch nicht abgesichert werden. Es zeigte sich jedoch ein negativer Trend, der mit zunehmenden Bestandsvorräten im Altbestand verstärkt wurde (Abb. 9). Der Bestandeszuwachs des Hauptbestands schien demnach bei einer Verjüngungsbiomasse von 30 und 60 t/ha im Mittel um 23% bzw. 40% abzunehmen. In absoluten Werten entsprach das einer Reduktion des Zuwachses im Altbe-

stand um 1,0 bzw. 1,8 m³/ha/Jahr gegenüber nicht verjüngten Beständen ab. Bei hohen Bestandsvorräten war dieser Trend prozentual und auch absolut stärker ausgeprägt als in Beständen mit geringen Vorräten.

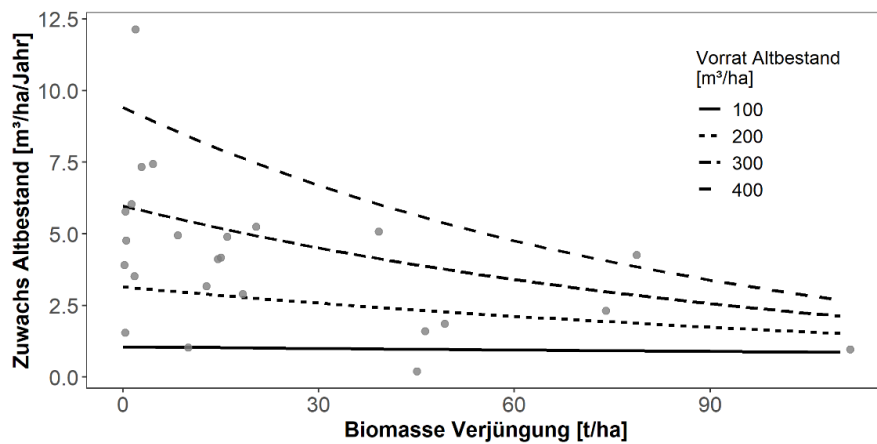


Abbildung 9: Zuwachs des Altbestands in Abhängigkeit von der Verjüngungsbiomasse und vom Bestandsvorrat
 Figure 9: Periodic annual increment of the main stand as a function of regeneration biomass and growing stock.

4 Diskussion

4.1 Entwicklung der (Eichen)Verjüngung

Die beobachteten Entwicklungsgänge zeigten, dass eine naturnahe Bewirtschaftungsweise mit einer langfristigen, kahlschlagfreien und kleinflächigen Verjüngungsmethode grundsätzlich auch zur Verjüngung der Eiche angewendet werden kann. Die Bandbreite innerhalb der Bestände war jedoch groß und reichte vom Verlust der Eiche bis hin zur Steigerung der Eichenanteile über den gesamten Verjüngungszeitraum (s. Abb. 3). Vergleichsweise hohe Eichenanteile zu Beginn des Verjüngungszeitraums begünstigen den Erfolg der Eichenverjüngung, bedeuten jedoch nicht zwangsläufig einen entsprechenden Eichenanteil am Ende der Bestandsverjüngung (s. Abb. 3). Eine aktuelle Literaturstudie von Kohler et al. (2020) kam ebenfalls zu dem Schluss, dass die Verjüngung der Eiche prinzipiell auch kleinflächig möglich ist, merkte aber gleichzeitig an, dass die Datenlage insbesondere zu längerfristigen Entwicklungsgängen bei der Eiche noch sehr gering sei. Mit der vorliegenden Studie konnte insbesondere dieser Verjüngungszeitraum von mehr als 15 Jahren abgedeckt werden. Die Schlussfolgerungen zur Durchführbarkeit langfristiger und kleinflächiger aus früheren Studien konnten demnach durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden (Kohler et al. 2020; Březina und Dobrovolný 2011; Kuehne et al. 2020). Die sich abzeichnende Entwicklung in der Verjüngung bestätigte jedoch ebenso die Aussagen früherer Studien, die die konkurrenzkräftige Buche früher oder später in der Verjüngung als dominierend ansahen (Ligot et al. 2013; Lüpke 1998; Petritan et al. 2017).

Dies war ebenfalls bei der Betrachtung der Vorkommenswahrscheinlichkeit in den langfristig und kleinflächig verjüngten Beständen zu beobachten. Insbesondere deuteten die abnehmenden Wahrscheinlichkeiten auf die Notwendigkeit waldbaulicher Unterstützung unter den gegebenen Bestandssituationen hin (s. Abb. 4). Diese waldbauliche Schlussfolgerung war nicht neu und bestätigte die Ergebnisse einiger früherer Studien (Manso et al. 2020; Kuehne et al. 2020; Mölder et al. 2019b; Lüpke 1998), welche sich ebenso in den frühen waldbaulichen Grundsätzen zur Eichenbewirtschaftung finden lassen (Lüpke 1998; Fleder 1983; Vanselow 1960). Gut erkennbar waren die standörtlichen Unterschiede zwischen den Versuchsstandorten, die sich in der Folge auch auf die standörtlich notwendigen waldbaulichen Eingriffe auswirken sollten. Dabei schien der Konkurrenzfähigkeit der Eichen zum einen die höhere Lichtverfügbarkeit unter der Kiefer und zum anderen, die durch die geringere Standortsgüte in Nürnberg gebremste Buche zugute zu kommen. Die beobachteten Wahrscheinlichkeiten nach mehr

als 20 Jahren Verjüngungsdauer (Abb. 3) zeigten auch das Potenzial junger Eichen unter der Anwendung langfristiger Verjüngungsmaßnahmen. Diese Art der Bewirtschaftung war insbesondere auf geringwüchsigeren Standorten und/oder lichten Kiefernbeständen auch zur Verjüngung der Eiche erfolgsversprechend. Vergleichsweise hohe Wahrscheinlichkeiten verdeutlichten zudem das zugrundeliegende Verjüngungspotenzial, insbesondere auch auf betrieblicher Ebene, wenn kleinflächige Verjüngungsmaßnahmen angewendet wurden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch auch anzumerken, dass die dargestellten Wahrscheinlichkeiten das reine Auftreten der Eiche in der Verjüngung darstellen, d.h. die Eiche wurde in der Verjüngung gefunden. Es wurde nicht nach der Dominanz der Eiche auf dem entsprechenden Verjüngungsquadrat unterschieden.

Die Biomasseentwicklung auf den Parzellen zeigte ein beachtliches Wuchspotenzial der Verjüngung. Selbst scheinbar schwachwüchsiger Standorte (Nürnberg) zeigten ein großes Wuchspotenzial der Eiche und erreichten Biomassen, vergleichbar mit wuchskräftigeren Standorten (Steigerwald) (s. Tab. 3). Ohne entsprechende Eingriffe im Altbestand und in der Verjüngung zugunsten der Eiche blieb dieses Potenzial jedoch ungenutzt. Gleichmäßig hohe oder steigende Vorräte im Altbestand wirkten dem entgegen (s. Abb. 2 und 6). Dies galt gleichermaßen auch für die Entwicklung nennenswerter Eichenanteile zur Übernahme in den Folgebestand. Ebenso erkennbar war das Potenzial zur natürlichen Verjüngung der Eiche, das im Großteil der Bestände die Basis der beobachteten Eichenverjüngung war. Zusammen mit den Ergebnissen von Löff et al. (2021), die die Kosten für die Eichen-Naturverjüngung am niedrigsten bewerteten ergibt sich dadurch ein zusätzliches betriebswirtschaftliches Einsparpotenzial.

4.2 Einfluss der Überschirmung und der Buchenkonkurrenz

Die Eiche als Lichtbaumart reagierte auf allen Standorten verstärkt auf die Überschirmung durch den Altbestand. Die Buche als schattentolerante Mischbaumart zeichnete sich durch eine verringerte Abhängigkeit von der Überschirmungssituation aus. Damit reihen sich die beobachteten Ergebnisse in die mehrerer Studien ein, die eine ähnliche Entwicklung beobachten konnten (Lüpke 1998; Modrow et al. 2019; Lüpke 2008). Interessant ist, dass die Buche im Modell ohne Konkurrenz bei jeder Überschirmungssituation der Eiche noch überlegen war. Diese Beobachtung legte den Schluss nahe, dass eine erfolgreiche Eichenverjüngung in den betrachteten Mischbeständen scheinbar nicht durch die alleinige Steuerung der Überschirmung möglich war. Zu einem vergleichbaren Ergebnis kamen auch Modrow et al. (2019), die unabhängig von der Lochgröße der Verjüngung eine Kontrolle der Mischbaumarten empfehlen. Lediglich auf den schlechteren Standorten in Nürnberg und unter der Kiefer schien die Eiche bei Überschirmungsprozenten von weniger als 10% der Buche im Höhenwachstum überlegen zu sein. Diese Höhenrelationen deuteten darauf hin, dass die Eiche der Buche nur auf geringwüchsigen Standorten und/oder besonders lichten Bestandsverhältnissen (bspw. Kiefernaltbestand) überlegen ist. Vergleichbare Beobachtungen machten auch schon Lüpke und Hauskeller-Bullerjahn (2004) und Ligot et al. (2013) für eine noch etwas jüngere Eichenverjüngung. Demnach benötigt die Eiche zur erfolgreichen Etablierung auf vielen Standorten die Unterstützung durch waldbauliche Konkurrenzregelung, wie sie unter anderem schon in verschiedenen Studien beschrieben wurde (Manso et al. 2020; Mölder et al. 2017; Lüpke 1998).

Die gefundenen Ergebnisse zur Buchenkonkurrenz auf die Höhenentwicklung der Eichenverjüngung vertiefen und ergänzen die Schlussfolgerungen aus früheren Studien mit meist kürzerer Verjüngungs- und Beobachtungsdauer (Kohler et al. 2020; Modrow et al. 2019). Hauskeller-Bullerjahn (1997) fand beispielsweise bei 30% des vollen Lichtes ein im Mittel durch die Konkurrenz um 24% reduziertes Höhenwachstum bei der Eiche. Die Konkurrenz, die in den untersuchten Beständen durch die Beimischung der Buche auf die Eiche ausgeübt wurde, stellte neben der Steuerung der Überschirmung durch den Altbestand den wichtigsten Faktor zur erfolgreichen Etablierung der Eiche im Folgebestand dar. Der beobachtete Konkurrenzeffekt durch die Buche schien besonders in den Kiefernbeständen zum einen von der höheren Lichtverfügbarkeit und damit geringen Einfluss der Überschirmung

(Skrzyszewski und Pach 2015) und zum anderen von einer gestiegenen Wurzelkonkurrenz beeinflusst zu sein (Leuschner et al. 2001).

Hohe Eichenanteile zu Beginn des Verjüngungszeitraums und eine dementsprechend geringere Buchenkonkurrenz zeigte sich demnach positiv auf die Entwicklung der Eichenverjüngung (Kohler et al. 2020). Die Zunahme der Buche in der Verjüngung führte zu einer Abnahme der positiven Konkurrenzrelation der Eiche gegenüber der Buche. Dies schien auf den interspezifischen Konkurrenzdruck der Buche auf die Eiche zurückzuführen (Annighöfer et al. 2015). Bei der Begründung der Mischung sollten daher die Konkurrenzverhältnisse besonders beachtet werden. Dies ist wichtig für den Erfolg der Mischung, die Begrenzung des Pflegeaufwands und Nutzung der natürlichen Entwicklung. Meesenburg et al. (2015) empfehlen beispielsweise eine gruppen- bis horstweise Mischung der Baumarten, die vor allem bei Umbaubeständen ein Mindestgröße von 0,3 ha haben sollten.

4.3 Einfluss der Verjüngung auf die Altbestandsproduktivität

Aufgrund langer Beobachtungszeiträume konnten Verjüngungsbiomassen bis über 100 t/ha in den Versuchsbeständen beobachtet werden (s. Abb. 3). Gleichzeitig leistete der verbliebene Altbestand über die gesamte Verjüngungsdauer weiterhin Holzzuwächse. Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen dem Bestandesvorrat und dem Volumenzuwachs konnte auch in vorliegender Betrachtung bestätigt werden. Der Einbezug der Verjüngungsbiomasse zur Erklärung der Altbestandsproduktion zeigte zudem eine negative Tendenz. Mit zunehmender Biomasse sank demnach die Produktivität des Altbestands. Dies schien insbesondere auf eine verstärkte unterirdische Konkurrenz um Ressourcen zwischen Altbestand und Verjüngung zurückzuführen zu sein (Pretzsch et al. 2015; Knapp 1991). Diese Schlussfolgerung wird zudem durch die Beobachtung unterstützt, dass der Effekt mit höheren Vorräten im Altbestand stärker ausgeprägt war. Im Umkehrschluss bedeutete dies aber auch, dass die hohen Biomassen in der Verjüngung die entstehenden Zuwachsverluste, infolge der Vorratsabsenkung durch die Verjüngungsmaßnahmen teilweise kompensieren konnten. Um den Einfluss der Verjüngung auf den Altbestand jedoch abschließend beurteilen zu können, sollten weitere Untersuchungen zum beobachteten Trend durchgeführt werden.

5 Waldbauliche Konsequenzen

Wie Eichenbestände bzw. Waldbestände generell bewirtschaftet werden ist grundsätzlich sehr stark durch das Produktionsziel in dem jeweiligen Bestand vorgegeben (s. Stimm et al. 2021). Dies gilt ebenfalls für die Beteiligung der Eiche am zukünftigen Bestandesaufbau. Will man die Eiche in nennenswerten Anteilen zur Holzproduktion oder als ökologische Beimischung erhalten bzw. etablieren, sind weiterhin entsprechende Maßnahmen notwendig. Die gewählte waldbauliche Vorgehensweise ist dadurch kein statisches System, sondern kann sich mit den (standörtlichen) Gegebenheiten und dem entsprechenden betrieblichen Ziel verändern. Grundsätzlich können die beiden heimischen Eichenarten, sowohl Trauben- als auch Stieleichen, beim Aufbau klimastabiler und strukturierter Mischbestände einen wertvollen Beitrag leisten (Schroeder et al. 2021; Albert et al. 2017). Die in der vorliegenden Studie betrachteten langfristigen und kleinflächigen Verjüngungsmethoden sind dabei eine Option für die Etablierung der Eiche bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung eines ausgeglichenen Waldinnenklimas.

Hierbei sollte neben angepassten Wildbeständen, die Grundvoraussetzung für die Verjüngung der verbleibenden Eichen sind (Annighöfer et al. 2015; Götmark et al. 2005) der Vorrat des Altbestands inkl. des Nebenbestands im Bereich der zu verjüngenden Fläche konsequent gesenkt werden. Die Größe, der zu verjüngenden Fläche kann in diesem Fall durchaus 0,1 ha betragen. Abhängig vom Standort sollte der Vorrat auf unter 250 Vfm/ha auf in den Buchen-Eichen-Mischbeständen und auf unter

350 Vfm/ha in den Kieferreinbeständen geringerer Standortsgüte gesenkt werden. Im Laufe des Verjüngungsgangs ist ein erneuter Vorratsaufbau zu vermeiden. Prioritäres Ziel muss in diesen Bereichen die Verjüngung sein. Eine Vorausverjüngung der Mischbaumarten ist im Optimalfall nicht vorhanden. Sollten Mischbaumarten in der Verjüngung vorkommen muss mit einer verstärkten Pflege zugunsten der Eiche kalkuliert werden, da eine alleinige Regulierung des Altbestands nicht ausreichend ist. Mischbaumartenanteile, insbesondere der Buche, die über 30% hinausgehen beeinträchtigen die Eichenverjüngung maßgebend. Eine klare räumliche Trennung der Verjüngungsmaßnahmen im Bestand kann auf Teilflächen, wenn beispielsweise Altbäume noch nicht ausgereift sind als Altdurchforstung oder Eichenüberführung mit höheren Vorräten weiter gewirtschaftet werden. Ökologische Aspekte, wie etwa die von Mölder et al. (2019a) beschriebene Habitatkontinuität können durch ein solches Vorgehen ebenfalls unterstützt werden.

Vor dem Hintergrund des rasch voranschreitenden Klimawandels ist die Vorbereitung unserer Wälder auf diesen durch die Schaffung gemischter und strukturierter Bestände das Gebot der Stunde. Insbesondere Mischbestände mit Beteiligung der Eiche können dabei einen wichtigen Beitrag für resilientere Bestände leisten (Schroeder et al. 2021).

Dank und Förderung

An dieser Stelle sei insbesondere den ehemaligen Studenten Sebastian Spatz, Matthias Meier und Tobias Geiger sowie studentischen Hilfskräften gedankt, die durch ihre tatkräftige Unterstützung bei den wiederholten Verjüngungsaufnahmen die langfristigen Verjüngungszeitreihen Wert gesetzt haben und damit grundsätzliche Vorarbeit zu dieser Studie geleistet haben. Des Weiteren gilt der Dank dem Bayerischen Staatministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Förderung des Kuratoriumsprojekts „W45 – Entwicklungspotenzial der Eiche“, welches den Rahmen für die vorliegende Studie gegeben hat.

Literatur

- Albert, M.; Nagel, R.-V.; Nuske, R.; Suttmöller, J.; Spellmann, H. (2017): Tree Species Selection in the Face of Drought Risk—Uncertainty in Forest Planning. In: *Forests* 8 (10), S. 363. DOI: 10.3390/f8100363.
- Ammer, C. (2017): Unraveling the Importance of Inter- and Intraspecific Competition for the Adaptation of Forests to Climate Change. In: Francisco M. Cánovas, Ulrich Lüttge und Rainer Matyssek (Hg.): *Progress in Botany* Vol. 78, Bd. 78. Cham: Springer International Publishing (Progress in Botany), S. 345–367.
- Annighöfer, P.; Beckschäfer, P.; Vor, T.; Ammer, C. (2015): Regeneration patterns of European oak species (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus robur* L.) in dependence of environment and neighborhood. In: *PLOS ONE* 10 (8), e0134935. DOI: 10.1371/journal.pone.0134935.
- Bates, D.; Mächler, M.; Bolker, B.; Walker, S. (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. In: *J. Stat. Soft.* 67 (1). DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- Bolte, A.; Ammer, C.; Löf, M.; Madsen, P.; Nabuurs, G.-J.; Schall, P. et al. (2009): Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 24 (6), S. 473–482. DOI: 10.1080/02827580903418224.
- Březina, I.; Dobrovolný, L. (2011): Natural regeneration of sessile oak under different light conditions. In: *JOURNAL OF FOREST SCIENCE* 57, S. 359–368.
- Fleder, W. (1983): Vom unterfränkischen Verjüngungsbetrieb. In: *Allgemeine Forstzeitschrift* 38, S. 1013–1014.
- Forrester, D. I.; Tachauer, I.H.H.; Annighoef, P.; Barbeito, I.; Pretzsch, H.; Ruiz-Peinado, R. et al. (2017): Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. In: *Forest Ecology and Management* 396, S. 160–175. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.04.011.
- Götmark, F.; Berglund, Å.; Wiklander, K. (2005): Browsing damage on broadleaved trees in semi-natural temperate forest in Sweden, with a focus on oak regeneration. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 20 (3), S. 223–234. DOI: 10.1080/02827580510008383.
- Hauskeller-Bullerjahn, K. (1997): Wachstum junger Eichen unter Schirm. Dissertation. Universität, Göttingen.

- Jensen, A. M.; Petersson, L. K.; Felton, A.; Löf, M.; Persson, M. (2020): What happens to oak growth and survival when there is both competition and browsing?
- Johann, K. (1993): DESER-Norm 1993. Normen der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten zur Aufbereitung von waldwirtschaftlichen Dauerversuchen. In: *Berichte der Jahrestagung des Deutschen Verbandes Forstlicher Sektion Ertragskunde*, S. 96–104.
- Knapp, E. (1991): Zur Wuchsleistung der Unterbaubuche im ungleichaltrigen Kiefern-Buchen-Mischbestand vor und nach ihrer Übernahme als Hauptbestand auf ...
- Kohler, M.; Pyttel, P.; Kuehne, C.; Modrow, T.; Bauhus, J. (2020): On the knowns and unknowns of natural regeneration of silviculturally managed sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) forests—a literature review. In: *Annals of Forest Science* 77 (4). DOI: 10.1007/s13595-020-00998-2.
- Krahl-Urban, J. (1959): Die Eichen: forstliche Monographie der Traubeneiche und der Stieleiche: P. Parey. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=54ROAAAAMAAJ>.
- Kuehne, C.; Pyttel, P.; Modrow, T.; Kohnle, U.; Bauhus, J. (2020): Seedling development and regeneration success after 10 years following group selection harvesting in a sessile oak (*Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.) stand. In: *Annals of Forest Science* 77 (3). DOI: 10.1007/s13595-020-00972-y.
- Leuschner, C.; Hertel, D.; Coners, H.; Büttner, V. (2001): Root competition between beech and oak: a hypothesis. In: *Oecologia* 126 (2), S. 276–284. DOI: 10.1007/s004420000507.
- Ligot, G.; Balandier, P.; Fayolle, A.; Lejeune, P.; Claessens, H. (2013): Height competition between *Quercus petraea* and *Fagus sylvatica* natural regeneration in mixed and uneven-aged stands. In: *Forest Ecology and Management* 304, S. 391–398. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.05.050.
- Löf, M.; Barrere, J.; Engman, M.; Petersson, L. K.; Villalobos, A. (2021): The influence of fencing on seedling establishment during reforestation of oak stands: a comparison of artificial and natural regeneration techniques including costs. In: *Eur J Forest Res*. DOI: 10.1007/s10342-021-01369-w.
- Löf, M.; Brunet, J.; Filyushkina, A.; Lindbladh, M.; Skovsgaard, J. P.; Felton, A. (2016): Management of oak forests: striking a balance between timber production, biodiversity and cultural services. In: *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 12 (1-2), S. 59–73. DOI: 10.1080/21513732.2015.1120780.
- Lüpke, B. von (1998): Silvicultural methods of oak regeneration with special respect to shade tolerant mixed species. In: *Forest Ecology and Management* 106 (1), S. 19–26. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00235-1.
- Lüpke, B. von (2008): Einfluss unterschiedlicher Hiebsformen auf die Naturverjüngung eines Traubeneichen-Buchen-Mischbestandes. In: *Forstarchiv* 79, S. 4–15, zuletzt geprüft am 15.01.2019.
- Lüpke, B. von; Hauskeller-Bullerjahn, K. (2004): Beitrag zur Modellierung der Jungwuchsentwicklung am Beispiel von Traubeneichen-Buchen-Mischverjüngungen.
- Maleki, K.; Zeller, L.; Pretzsch, H. (2020): Oak often needs to be promoted in mixed beech-oak stands - the structural processes behind competition and silvicultural management in mixed stands of European beech and sessile oak. In: *iForest* 13 (2), S. 80–88. DOI: 10.3832/ifor3172-013.
- Manso, R.; Ligot, G.; Fortin, M. (2020): A recruitment model for beech–oak pure and mixed stands in Belgium. In: *Forestry: An International Journal of Forest Research* 93 (1), S. 124–132. DOI: 10.1093/foresj/cpz056.
- Meesenburg, H.; Schmidt, M.; Suttmöller, J.; Albert, M. (2015): Klimaanpassung ist Vorsorge für den Wald. In: *proWald* November, S. 4–10, zuletzt geprüft am 21.11.2018.
- Modrow, T.; Kuehne, C.; Saha, S.; Bauhus, J.; Pyttel, P. L. (2019): Photosynthetic performance, height growth, and dominance of naturally regenerated sessile oak (*Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.) seedlings in small-scale canopy openings of varying sizes. In: *Eur J Forest Res* 116, S. 346. DOI: 10.1007/s10342-019-01238-7.
- Mölder, A.; Meyer, P.; Nagel, R.-V. (2019a): Integrative management to sustain biodiversity and ecological continuity in Central European temperate oak (*Quercus robur*, *Q. petraea*) forests: An overview. In: *Forest Ecology and Management* 437, S. 324–339. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.01.006.
- Mölder, A.; Nagel, R.-V.; Meyer, P.; Schmidt, M.; Rumpf, H.; Spellmann, H. (2017): Historischer Rückblick auf die Verjüngung von Eichen im Spessart des 19. Jahrhunderts—Bedeutung der angewandten Verfahren für die heutige Eichenwirtschaft. In: *Forstarchiv* 88 (Heft 3), S. 67–78.
- Mölder, A.; Sennhenn-Reulen, H.; Fischer, C.; Rumpf, H.; Schönfelder, E.; Stockmann, J.; Nagel, R.-V. (2019b): Success factors for high-quality oak forest (*Quercus robur*, *Q. petraea*) regeneration. In: *For. Ecosyst.* 6 (1), S. 262. DOI: 10.1186/s40663-019-0206-y.
- Mosandl, R.; Abt, A. (2016): Waldbauverfahren in Eichenwäldern gestern und heute. In: *AFZ - Der Wald* (20), S. 28–32, zuletzt geprüft am 05.12.2017.
- Petersson, L. K.; Dey, D. C.; Felton, A. M.; Gardiner, E. S.; Löf, M. (2020): Influence of canopy openness, ungulate exclosure, and low-intensity fire for improved oak regeneration in temperate Europe. In: *Ecol Evol* 99, S. 30. DOI: 10.1002/ece3.6092.

- Petritan, A. M.; Bouriaud, O.; Frank, D. C.; Petritan, I. C. (2017): Dendroecological reconstruction of disturbance history of an old-growth mixed sessile oak-beech forest. In: *J Veg Sci* 28 (1), S. 117–127. DOI: 10.1111/jvs.12460.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Uhl, E.; Dauber, E. (2015): Long-term stand dynamics of managed spruce–fir–beech mountain forests in Central Europe: structure, productivity and regeneration success. In: *Forestry* 88 (4), S. 407–428. DOI: 10.1093/forestry/cpv013.
- R Core Team (2018): R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Schroeder, H.; Nosenko, T.; Ghirardo, A.; Fladung, M.; Schnitzler, J.-P.; Kersten, B. (2021): Oaks as Beacons of Hope for Threatened Mixed Forests in Central Europe. In: *Front. For. Glob. Change* 4, S. 78. DOI: 10.3389/ffgc.2021.670797.
- Skrzyszewski, J.; Pach, M. (2015): Crookedness of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) growing under a canopy of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 30 (8), S. 688–698. DOI: 10.1080/02827581.2015.1048713.
- Stimm, K.; Ambs, D.; Uhl, E.; Pretzsch, H. (2021): Ziele und Wege der Eichenbewirtschaftung in Europa. In: Kilian Stimm (Hg.): *Die Eiche. Facetten zu Ökologie, Naturschutz, Wachstum und waldbauliche Perspektiven*. Forstliche Forschungsberichte München, Bd. 221. Freising (2021), S. 31–46.
- Vanselow, K. (1960): Die Waldbautechnik der Eiche im bayerischen Spessart in geschichtlicher Betrachtung. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 79 (9), S. 270–286.