



Modellökosystem-
anlage der Eidg.
Forschungsanstalt WSL
in Birmensdorf (ZH)

Die Eiche im Klimawandel, Teil 1: Wachstum

Die Eiche reagiert flexibel

Die Eidg. Forschungsanstalt WSL hat von 2006 bis 2012 in ihrem QUERCO-Experiment das Verhalten von jungen Eichen unter veränderten Umweltbedingungen erforscht. Ziel dieses breit angelegten Experimentes war es, die Auswirkungen von Trockenheit und erhöhter Lufttemperatur auf Mikroklima, Boden und Bäume zu untersuchen. Rund 770 Jungeichen wurden in Modellökosystemen während dreier Jahre beobachtet und vermessen. Die Resultate dieses Forschungsvorhabens werden nun der Forstpraxis in einer dreiteiligen Artikelfolge vorgestellt und kommentiert. Dieser erste Artikel ist dem Wachstum als Indikator für das Verhalten unter veränderten Umweltbedingungen gewidmet.

Von P. Bonfils, M. Arend, T.M. Kuster,
P. Junod, M.S. Günthardt-Goerg.

Die globale Erwärmung wird heute von vielen Forstleuten als eine der grossen Herausforderungen für den Wald im 21. Jahrhundert bezeichnet. Die Klimaszenarien der Zukunft zeichnen sich insbesondere durch wärmere Sommer aus, welche durch lang andauernde Hitzeperioden und Niederschlagsdefizite (Trockenperioden) gekennzeichnet sind [1]. In der Schweiz wird gemäss einem mittleren Klimaszenario bis ins Jahr 2100 mit einer um 2,7–4,1°C erhöhten Jahresmitteltemperatur und einer Abnahme der Niederschlagsmenge im Sommer von 18–24% gerechnet [2]. Diese Klimaänderungen werden nicht ohne Auswirkungen auf die Stabilität und Produktivität der Wälder bleiben [3;4]. So muss bei trockenheitsempfindlichen Baumarten wie Buche, Fichte und Tanne mit erhöhten Waldschäden gerechnet werden, während trockenere Baumarten wie die Eiche besser auf die Klimaveränderung vorbereitet sein sollten [5;6]. Die Eichen dürften vom Klimawandel sogar profitieren und ihre Konkurrenzfähigkeit gegenüber anderen Baumarten steigern [7]. Waldbauliche Strategien mit dem Ziel, anpas-

sungsfähige, gesunde und damit leistungsfähige Wälder zu erhalten, müssen diesen Gegebenheiten Rechnung tragen. Der Forstdienst muss deshalb heute schon waldbauliche Entscheidungen treffen (Waldverjüngung, Baumartenwahl, Betriebsformen u.a.), die den möglichen Klimaszenarien der Zukunft gerecht werden (s. dazu auch Kasten «Praxisgespräch»). Sämtliche Informationen zum Verhalten der Eiche – einer waldbaulich anspruchsvollen und aufwendigen Baumart – bei zunehmender Temperatur und Trockenheit sind daher willkommen.

Das Querco-Experiment

Im Jahre 2003 wurden an der WSL in Birmensdorf von der Biologin *Madeleine Günthardt-Goerg* und ihrer Forschungsgruppe erste Schritte zur Einrichtung eines gross angelegten Experimentes unternommen. In den Modellökosystemanlagen der WSL (Abb. 2) sollten Eichen unter verschiedenen Umweltbedingungen auf Herz und Nieren geprüft werden. Dazu wurden im Herbst 2003 zuerst Eichen von je vier autochthonen Stiel-, Trauben- und Flaumeichenprovenienzen geerntet (s. Tab. 1). Die im Versuchsgarten der WSL angezogenen Pflanzen wurden

dann im Frühling 2006 als zweijährige Jungeichen in 16 Modellökosystemkammern auf zwei verschiedenen Bodentypen ausgebracht (s. Abb. 2). Letztere stammten aus Eichenbeständen auf basischer Unterlage (pH 7) in Brugg (AG) und saurem Untergrund (pH 4) in Eiken (AG).

Über einen Zeitraum von drei Jahren wurden die Jungeichen vier verschiedenen Klimabehandlungen unterzogen: *Trockenheit* (1), *Lufteerwärmung* (2), *Kombination* von Trockenheit und Lufteerwärmung (3) sowie eine *Kontrollbehandlung* (4) ohne besondere Massnahmen. Durch verschiedene Öffnungsweiten der Seitenwände wurden in acht Modellökosystemkammern die Temperatur um ein bis zwei Grad erhöht. Dank automatisch schliessender Dächer über den Kammern wurde der natürliche Niederschlag ferngehalten. Stattdessen wurden die Eichen mit einer Sprinkleranlage beregnet. In den Behandlungsvarianten *Lufteerwärmung* und *Kontrolle* wurden die Bäume regelmässig bewässert. In den Behandlungen *Trockenheit* sowie der *Kombination* aus Trockenheit und Lufteerwärmung wurde diese Bewässerung während der Vegetationszeit zwei Mal für mehrere Wochen unterbrochen (simulierte Tro-

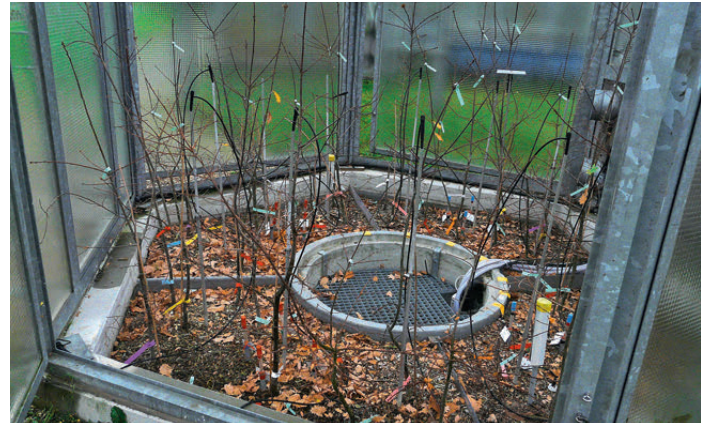
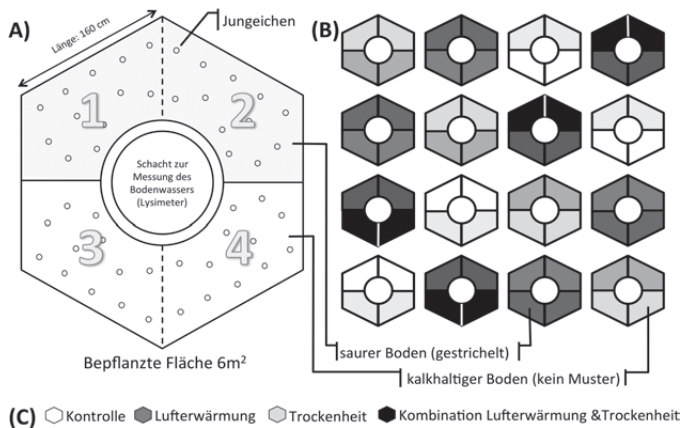


Abb. 2: Eichen in der Modellökosystemanlage. In jedem Viertel der sechseckigen Kammern wurden zwölf Jungeichen (zweijährig) einer Herkunft in zufälliger Anordnung gepflanzt (A). Gesamthaft wurden je vier Herkünfte von Stieleiche, Traubeneiche und Flaumeiche eingebracht (s. Tab. 1). Foto rechts: Modellökosystemkammer im Winterzustand. (Grafik und Foto: M. Günthardt-Goerg).

ckenperioden). Die Behandlungen *Lufterwärmung* und *Trockenheit* entsprechen etwa den erwarteten Klimaveränderungen. Die WSL-Forscher haben zusammen mit Kollegen aus der Schweiz, Deutschland, Österreich, Frankreich und China interdisziplinär das Wachstum der Pflanzen sowie eine Vielzahl von Einflussgrößen im Boden, in den Pflanzen und in anderen Organismen untersucht. Dank der aufgezeichneten Klimadaten, des homogenen Pflanzenmaterials und des statistischen Designs des Experiments (s. Abb. 2) konnten Fragestellungen bearbeitet werden, welche im freien Feld nicht hätten geprüft werden können. Die im Folgenden dargestellten Resultate betreffen beide Bodentypen. Der Einfluss des Bodens wird Thema des zweiten Artikels dieser Folge sein.

Wachstum als Indikator

Wachstum ist ein elementarer Ausdruck von Leben und eignet sich daher gut zur Beobachtung der Entwicklung von Lebe-

wesen. Um Rückschlüsse auf das Verhalten der Jungeichen im Umweltwandel zu ziehen, haben die Forscher im Querco-Experiment folgende Wachstumsgrößen untersucht:

- Das Höhenwachstum wurde jeweils Ende Jahr am Haupttrieb gemessen (inkl. Johannistriebe!).
- Das Dickenwachstum wurde jährlich mit der Zunahme des Durchmessers 10 cm über Boden erfasst.
- Nach dreijähriger Behandlung wurde 2010 das Trockengewicht von Blatt, Holz- und Wurzelmasse ermittelt.

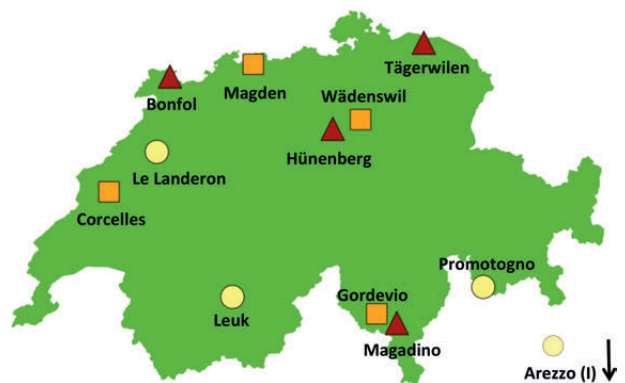
Resultate

Temperatur fördert Höhenwachstum. Statistische Auswertungen zeigen, dass die erhöhte Lufttemperatur das Baumwachstum beeinflusst hat. Die verschiedenen Messungen haben aber z.T. gegenteilige Resultate gezeitigt. So wirkte die Lufterwärmung positiv auf das Höhenwachstum, welches im Vergleich zur Kontrolle im Durchschnitt um 15% zu-

nahm. Interessanterweise ging der Durchmesser am Stammfuß aber um 3% zurück. Dies mag eine Erklärung dafür sein, dass die oberirdische Holzmasse nahezu unverändert blieb. Die Bestimmung der Wurzelmasse pro Baum ergab bei Lufterwärmung gegenüber der Kontrolle eine Reduktion um 8%. In der Kontrolle wuchs die Stieleiche stärker als die Flaumeiche, welche ihrerseits etwas mehr leistete als die Traubeneiche (Abb. 3).

Trockenheit bremst massiv. Ganz deutlich bremste die Trockenheit das Wachstum: Sprosslänge und Stammdurchmesser nahmen um 40% bzw. 23% ab, und auch die Holzmasse verringerte sich im Durchschnitt um gut die Hälfte (Tab. 2). Die Wurzelmasse bildete sich durchschnittlich um 30% zurück [8;9]. Der Vergleich zwischen den Kontrollbehandlungen und den Behandlungen mit Trockenheit zeigte für alle Provenienzen eine deutliche Abnahme der gebildeten Laubmasse um rund 28%. Alle Arten erlitten durch den Trockenstress statistisch

Provenienz	Eichenart	m ü.M.	Temp. [C°]	Niederschlag [mm]
Tägerwilen	SEi	510	8,7	929
Bonfol	SEi	450	8,9	1035
Hünenberg	SEi	398	9,1	1147
Magadino	SEi	199	10,5	1772
Corcelles (p. Concise)	TEi	550	9,0	893
Magden	TEi	308	8,9	974
Wädenswil	TEi	430	8,9	1353
Gordevio	TEi	450	11,0	1668
Leuk	FIEi	720	8,1	657
Le Landeron	FIEi	700	8,0	932
Promontogno	FIEi	900	6,1	1459
Arezzo (Italien)	FIEi	296	14,0	410



Tab. 1: Die untersuchten Eichenherkünfte wurden so ausgewählt, dass sie ein grosses Spektrum an Standortverhältnissen repräsentieren. Stieleiche = SEi = Δ; Traubeneiche = TEi = □; Flaumeiche = FIEi = ○.

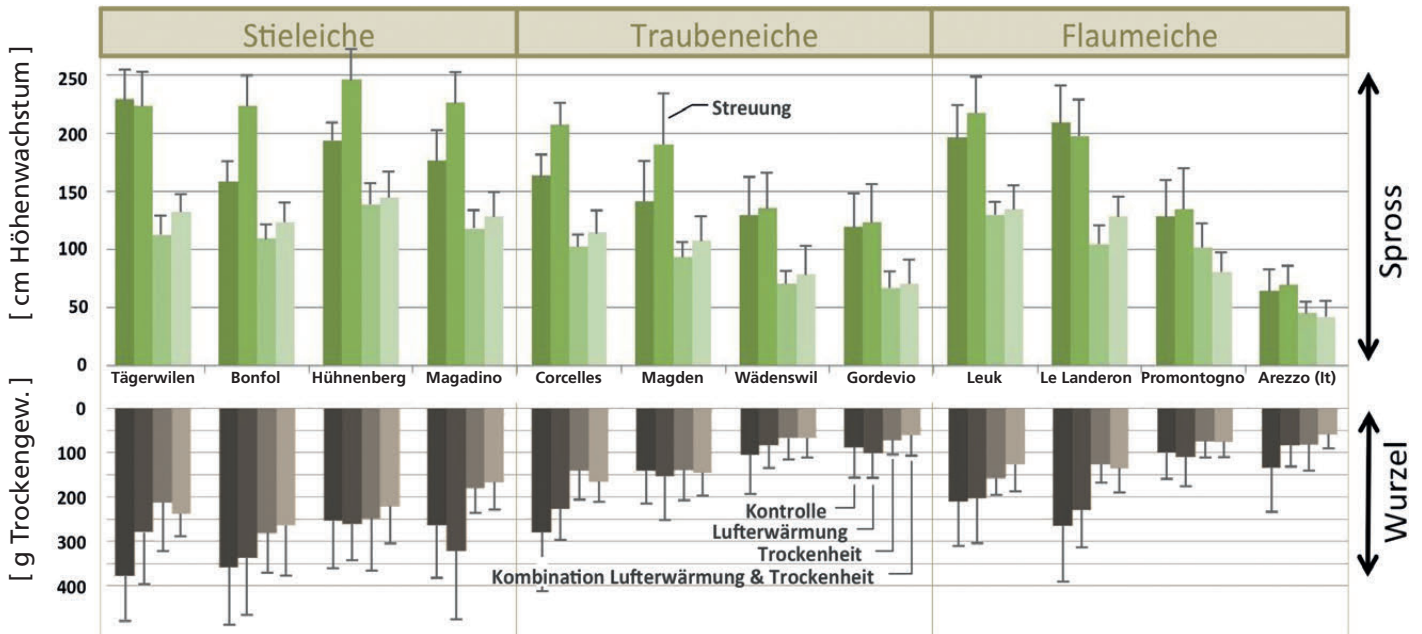


Abb. 3: Gesamthöhe des Hauptsprosses (mit Johannistrieben) und Wurzelmasse für jede Eichenherkunft und Klimabehandlung. Resultate nach drei Jahren QUERCO-Experiment (Mittelwerte mit Streuung).

gesehen eine ähnliche Reduktion ihrer Biomassenleistung (Blattwerk-, Holz- und Wurzelbildung).

Grosse Unterschiede. Bereits innerhalb der Kontrollgruppe (keine Behandlung) zeigten sich grosse Unterschiede im Wachstum der verschiedenen Provenienzen. Das Längenwachstum nach drei Jahren (2007 bis 2009) variierte sowohl innerhalb als auch zwischen den Arten stark. Während die Stieleichen aus Tägerwilen im Durchschnitt 230 cm wuchsen (± 53 cm Standardabweichung), erreichte die Provenienz aus Bonfol nur gerade 159 cm (± 36 cm). Auch bei der Flaumeiche wurden sehr grosse Unterschiede festgestellt: 210 cm (± 67 cm) für Le Landeron und 129 cm (± 67 cm) für die Herkunft Promotogno. Arezzo, die am südlichsten gelegene Herkunft, wies ein noch geringeres Wachstum auf. Der Durchmesserzuwachs der Stämme im dritten Jahr variierte bei den CH-Provenienzen zwischen 2,7 mm (Wädenswil) und 5,4 mm (Tägerwilen). Auch bei der Reaktion auf Trockenheit zeigten die zwölf Eichenherkünfte stark unterschiedliches Verhalten. So wurde z.B. das Höhenwachstum der Stieleichenherkunft Tägerwilen stark beeinträchtigt (Sprosslänge -46% gegenüber der Kontrolle), während bei der Stieleiche aus Hünenberg der Rückgang schwächer war (36%).

Folgerungen

Hinweis auf hohe genetische Diversität. Die grosse Bandbreite unterschiedli-

	Gebildete Laubmasse/Baum (g)		Gebildete Holzmasse/Baum (g)	
	Bewässert	Trocken	Bewässert	Trocken
Stieleiche	66 (33)	48 (25); [-28%]	388 (176)	185 (93); [-52%]
Traubeneiche	36 (25)	26 (18); [-26%]	157 (130)	74 (61); [-53%]
Flaumeiche	38 (27)	26 (20); [-31%]	193 (165)	86 (65); [-55%]

Tab. 2: Mittlere Laub- und Holzmasse, welche pro Baum in drei Jahren gebildet wurde. Vergleich zwischen den Behandlungen mit normaler Beregnung und Trockenbehandlungen. (Runde Klammer = Streuung) [Eckige Klammer = Unterschied zur Behandlung mit Bewässerung]

cher Wuchsreaktionen zwischen den Provenienzen – in Bezug auf das Wachstum im Allgemeinen sowie im Verhalten gegenüber Trockenheit und Erwärmung im Speziellen – kann als Hinweis auf eine hohe genetische Diversität verstanden werden. Frühere Untersuchungen zur Genetik der Eiche hatten bereits eine überdurchschnittlich hohe genetische Diversität festgestellt [10].

Anpassung an Trockenheit. Unterschiedliche Reaktionen des Längen- und Dickenwachstums des Sprosses sowie der Wurzeln führen zu anderen Pflanzenproportionen. Dies zeigte das veränderte Verhältnis von Durchmesserzuwachs zu Höhenzuwachs sowie von Wurzelwachstum zu Sprosswachstum nach der Behandlung mit Trockenheit und erhöhter Temperatur gegenüber der Kontrolle. So ergab die erhöhte Temperatur eine Überbetonung der oberirdischen Organe (Spross und Blattmasse), während das Trockenexperiment zu einem erhöhten

Wurzelanteil führte. Diese Feststellung stimmt mit Erfahrungen aus anderen Projekten überein. Demnach scheinen die Pflanzen gerade bei Trockenheit mehr Energie in die Bildung der Wurzeln zu investieren, um die Versorgung mit Wasser sicherzustellen.

Interessante Johannistriebe. Die Eiche hat die Fähigkeit, mit einem zweiten Trieb (Johannis- bzw. Augusttrieb) auf besondere Wuchsbedingungen zu reagieren. Ein Teil der festgestellten Höhenunterschiede zwischen Arten und Provenienzen ist auf dieses Phänomen zurückzuführen. Stieleichen bildeten generell oft Johannistriebe. Bei Trauben- und Flaumeiche war das Bild heterogener. So bildete etwa die Flaumeiche aus Leuk relativ oft Johannistriebe, während dies bei der Traubeneiche aus Wädenswil selten vorkam.

Diese Feststellungen sollen nicht als Kriterium für oder gegen eine Art oder Herkunft verstanden werden. Sie zeigen lediglich, dass Eichenarten über einen sehr

Im Gespräch mit der Praxis

Pascal Junod (PJ) ist Leiter der Fachstelle Waldbau am Bildungszentrum Lyss und bewirtschaftet als Kreisförster im Kanton Neuenburg zahlreiche Eichenwälder. Über das Quercu-Experiment der WSL hat Patrick Bonfils (PB) mit ihm diskutiert.

PB. Welchen Stellenwert hat die Diskussion «Eiche im Klimawandel» in der Praxis? Was traut man dieser Baumart für die Zukunft zu?
 PJ. Die verschiedenen Eichenarten verfügen über eine bemerkenswerte Fähigkeit, auf die zahlreichen Störungen, welche im Laufe eines Bestandeslebens auftreten können, zu reagieren. Im Mittelland stellen sie das physische und biologische Gerüst zahlreicher Wälder dar und sind in der Lage, diese Ökosysteme zu stabilisieren (z.B. bei Trockenheit, Sturm u.a.). Zudem zeichnen sich eichenreiche Wälder durch eine hohe Multifunktionalität aus: Sie produzieren wertvolles Holz, beherbergen eine sehr grosse Biodiversität und bieten einen attraktiven Erholungsraum für die Öffentlichkeit. Mit der Klimaerwärmung wird sich die Konkurrenzfähigkeit der Eiche gegenüber anderen Arten zweifellos verbessern. Denkt man zudem an die grossen gesellschaftlichen Herausforderungen, wie etwa an die Ressourcenknappheit oder den Bedarf nach naturnahen Lebensräumen hoher Qualität, werden multifunktionale, eichenreiche Wälder bestimmt an Bedeutung gewinnen.

PJ. Welche Bedeutung haben Untersuchungen von Jungeichen in Modellökosystemen für die Praxis? Wie weit können die Resultate dieses Experiments extrapoliert werden?

PB. Mit der experimentellen Versuchsanordnung kommt man einfacher zu statistisch gesicherten Resultaten, was bei Untersuchungen in der Natur schwieriger ist. So können etwa einzelne Faktoren variiert werden (z.B. Temperatur und Niederschlag), während andere Wuchsbedingungen identisch bleiben. Das Experiment imitiert die Situation in der Verjüngungs- und Dickungsstufe, zwei wichtige waldbauliche Lebensphasen eines Eichenbestandes. Die Resultate des Experiments müssen aber korrekt und mit Vorsicht interpretiert werden und sind nicht eins zu eins auf andere Situationen übertragbar.

PB. Was bedeutet das schnellere Jugendwachstum bei erhöhten Temperaturen für den Waldbauer?

PJ. Dieses könnte die Konkurrenzkraft der Eiche vor allem gegenüber der Buche und anderer Konkurrenzvegetation verbessern, was die Anzahl der Pflegeeingriffe und damit die Kosten verringern würde. Die waldbauliche Begleitung der Eiche würde etwas weniger aufwendig. Das schnellere Höhenwachstum bei gleichbleibendem oder sogar verringertem Dickenwachstum führt in der Jugendphase aber möglicherweise zu einer verminderten Stabilität des Einzelbaumes. Damit sind aus waldbaulicher Sicht angepasste Pflegekonzepte notwendig, welche z.B. der Gefahr von Nassschneeschäden Rechnung tragen. Strukturiertere (ungleichförmige) Bestände, gute Kronenpflege (Stärke und Zeitpunkt der Pflegeeingriffe) und die Frage von Mischbeständen müssen hier geprüft werden (s. Kommentar Abb. 3).

PB. Wie siehst du als Waldbauer die grossen Unterschiede bei den Wuchsreaktionen, welche innerhalb und zwischen den Provenienzen beobachtet wurden?

PJ. Dieses Resultat überrascht mich nicht und freut mich sehr! Es überrascht mich nicht, weil im Wald jeder Bestand, jede Art und jeder Baum verschieden sind; und dies nicht nur wegen der Heterogenität des Standortes. Entsprechend bin ich nicht erstaunt darüber, dass sich auch unter homogenen Verhältnissen jedes Individuum und jede Provenienz unterschiedlich verhält. Es ist für mich absolut nachvollziehbar, dass die aus einem so komplexen Milieu wie dem Wald stammenden Pflanzen (Eicheln) auf die verschiedenen Stresskombinationen nicht homogen oder linear reagieren. Das Resultat freut mich sehr, weil ich Diversität als Chance betrachte. Je grösser die Diversität, desto ausgeprägter die Fähigkeit der Eichenpopulation zur Differenzierung. Damit werden auch die am besten an den Standort angepassten, vitalsten Individuen einfacher sichtbar. In der heutigen Situation des Klima- und Umweltwandels ist es am besten, mit einer Baumart zu arbeiten, welche über eine grosse genetische Basis verfügt und eine breite Palette an Reaktionsnormen verfügt. Das erhöht meinen Spielraum als Waldbauer und ist zweifellos von grossem Vorteil, wenn es um die Erhaltung von anpassungsfähigen und stabilen Waldbeständen geht. Allerdings stellt sich natürlich auch die Frage nach dem Umgang mit der festgestellten Diversität. Insbesondere bei der Verjüngung stellen sich einige Fragen: Welche Provenienz wähle ich? Nach welchen Kriterien? Sollte ich Saatgut/Pflanzgut verschiedener Herkunft verwenden (mischen) usw.



Abb. 3: Dickungspflegekurs. Ein schnelleres Jugendwachstum der Eiche könnte ihre Konkurrenzkraft steigern und die Pflegekosten vermindern. Der schlankere Wuchs sorgt allerdings für Instabilität. Hier sind neue bzw. angepasste Pflegekonzepte gefragt.

Die Fortsetzung dieses Gespräch wird im nächsten W+H publiziert.

interessanten Wuchsmechanismus verfügen, welcher bei veränderten Klimabedingungen eine flexible Reaktion erlaubt.

Patrick Bonfils

Bonfils-Naturavali. www.naturavali.com

Dr. Matthias Arend

Eidg. Forschungsanstalt WSL. www.wsl.ch

Dr. Thomas Kuster

Eidg. Forschungsanstalt WSL. www.wsl.ch

Pascal Junod

Leiter Forstkreis Boudry (NE) und Fachstelle Waldbau am BZW Lyss. www.bzwlyss.ch

Dr. Madeleine S. Günthardt-Goerg

Eidg. Forschungsanstalt WSL. www.wsl.ch

Quellen:

- 1 SCHAR C. ET AL. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- 2 CH2011 (2011). Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zürich, Switzerland: 88.
- 3 CIAIS P. ET AL. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437: 529–533.

4 LEUZINGER S. ET AL. (2005). Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe. *Tree Physiol.* 25: 641–650.

5 OHLEMÜLLER R. ET AL. (2006). Quantifying components of risk for European woody species under climate change. *Global Change Biol.* 12: 1788–1799.

6 GESSLER A. ET AL. (2007). Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1–11.

7 ZIMMERMANN N.E. ET AL. (2006). Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? In *Wald und Klimawandel. Forum für Wissen* 2006. Ed. T. Wohlgemuth. WSL, Birmensdorf, Switzerland: 63–71. ISSN 1021–2256.

8 AREND M., KUSTER T.M., GÜNTHARDT-GOERG M.S., DOBBERTIN M. (2011). Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). *Tree Physiol.*, 31: 287–297.

9 KUSTER T.M., AREND M., BLEULER P., GÜNTHARDT-GOERG M.S., SCHULIN R. (2012). Water regime and growth of young oak stands subjected to air-warming and drought on two different forest soils in a model ecosystem experiment. *Plant Biology*, doi: 10.1111/j.1438–8677.2011.00552.x.

10 KLEINSCHMIT J. (1993). Intraspecific variation of growth and adaptive traits in European oak species. *Ann. Sci. For.* 50: 166–185.

Wissenstransfer

Der Austausch von Wissen und Erfahrung ist unverzichtbarer Bestandteil eines umfassenden gesellschaftlichen Wissensmanagements und wesentliche Voraussetzung für nachhaltige Entwicklung. Das Projekt Querco-Praxis hat zum Ziel, das im Querco-Experiment der WSL erworbene Forschungswissen für die Forstpraxis und den Naturschutz aufzuarbeiten und zu kommunizieren. Dabei soll auch das Verständnis und die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis weiter verbessert und intensiviert werden. Die vorliegende Artikelserie ist Teil des Umsetzungsprojektes QUERCO-Praxis. Dieses wird finanziert vom Bundesamt für Umwelt BAFU, von der Eidg. Forschungsanstalt WSL und von proQuercus.

Weitere Angaben

www.wsl.ch/querco

Pajero. Zugpferd ohne Konkurrenz

Leasing
3.9% **



ab **39'999.-**

inkl. Swiss CashBonus 8'000.-

- Robust und geräumig
- Variabler Laderaum, 5 oder 7 Sitze
- 3.2 DID, 200 PS/441 Nm, Super Select 4WD
- Anhängelast 2.8 bis 3.5 Tonnen
- 3-Door Profi, CHF 39'999.-*
- 5-Door Profi, CHF 43'499.-*
- Preis-Hit: Worker-Pack mit Anhängerkupplung nur CHF 399.-

Normverbrauch 5-Door, 3.2 DID/200 PS: 8.1 l, 213 g/km CO₂, Kat. F. CO₂-Durchschnitt aller verkauften Neuwagen: 153 g/km. *BEST OFFER Nettopreise inkl. Swiss CashBonus 8'000.- (3-Door), 7'000.- (5-Door). **3.9% Leasing: 1.1.–30.6.2013 bei Vertrag + Immatrikulation, reduzierter Swiss CashBonus (1'000.-). MultiLease AG gewährt keine Finanzierung, falls diese zu einer Überschuldung des Leasingnehmers führen kann. △ MultiLease



OFFICIAL CAR PARTNER

Genial bis ins Detail.



www.mitsubishi-motors.ch