

DISS. ETH No. 20577

**Root Growth, Soil Nutrient Availability and Water Flow in Model
Ecosystems of Young Oaks Subjected to Air-warming and
Drought**

A dissertation submitted to

ETH ZÜRICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

THOMAS M. KUSTER

dipl. Umwelt-Natw. ETH

born 2nd Februar 1980

citizen of Eschenbach/SG and Uznach/SG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Rainer Schulin, ETH Zürich

Dr. Madeleine Günthardt-Goerg, Eidg. Forschungsanstalt WSL

Prof. Dr. Rainer Matyssek, TU München

Zürich, 2012

Summary

Global climate change is expected to increase annual temperatures and decrease summer precipitation in Central Europe. Being tolerant to heat and drought, oaks are considered promising trees to replace beech and spruce on forest sites that will become too warm and dry for these species. Oak provenances from dry sites are expected to be especially drought tolerant. However, little is known on how the oak species growing in Switzerland (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*) will respond to the changing climate and how these responses depend on soil properties. Apart from direct drought and heat stress effects on biochemical and physiological processes, trees like other plants will also have to cope with indirect effects such as changes in soil nutrient availability. For example, nitrogen (N) availability depends on soil microbial processes, which are sensitive to soil temperature and moisture. We expected warming to increase and drought to decrease soil N availability and thus N supply to the trees.

In a 3-year factorial model ecosystem experiment, we investigated the responses of young mixed oak stands with *Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*, growing on either acidic or calcareous soil, to air-warming (+1 to 2 °C) and drought treatments (-43% to -60% precipitation), corresponding to the IPCC climate change Scenario A2. The air-warming and drought treatments were applied separately as well as in combination on both soils.

The mild air-warming treatment had no effect on soil water availability, evapotranspiration or stand biomass, neither above nor below ground. Water limitation, which was severe during drought periods as shown in low leaf water potentials, significantly reduced the stand foliage, stem + twigs and root biomass. However, no tree died during the

experimental period. The drought treatment led to higher root:shoot mass ratios and only little reduction in fine root biomass compared to total root mass. Allocating relatively more biomass into structures for water and nutrient uptake than for above ground assimilation can be seen as a response to balance impeded soil water extraction with reduced transpirational water loss. Moreover, evapotranspiration increased within a few days after re-watering to pre-drought levels, indicating a fast recovery potential of the oaks photosynthetic activity. Decreased evapotranspiration from the drought-exposed stands led to significantly higher air and soil temperatures, which were attributed to reduced transpirational cooling. As a major finding of our results, we point out that additional air warming did not enhance the drought effects on evapotranspiration and biomass, although more negative leaf water potentials were observed.

In an additional neutron radiography experiment, it has been shown for the first time that root-shoot growth patterns of oak seedlings are not altered by either water availability or soil properties. Independent from soil type and drought treatment, peaks and dips of shoot and root growth rates occurred at the same time. We conclude therefore that during the first year after germination, environmental conditions were overruled by endogenous growth patterns. Moreover, it has been shown for the first time that neutron radiography is a well-suited, non-destructive method to track root growth patterns of young oak trees.

Stands not subjected to the drought treatment produced significantly less biomass on the calcareous than on the acidic soil. This was probably due to phosphor (P) or manganese (Mn) limitation. In the acidic soil, root mass was maximal in the nutrient-rich topsoil, whereas in the calcareous soil maximum root mass occurred between 0.25 and 0.5 m depth. There was no difference in biomass and water regime between the two soils under drought conditions. As another highlight of our results, we therefore emphasise that nutrient availability was governed by water availability under these conditions.

While total amounts, vertical distribution and availability of soil N showed substantial differences between the two soils, neither warming nor drought had a significant effect on N availability in either of them, in contrast to our expectations. Air-warming also had no effect on N accumulation in the biomass of the trees, whereas the drought treatment increased or tended to increase N accumulation, indicating that growth was not limited by N. ^{15}N -labelling revealed that this increase was associated with a higher fraction of tracer-N accumulation deriving from ^{15}N applied in the form of nitrate to the soil surface, while the fraction of ^{15}N accumulated in the plants decreased when it had been applied as ammonium. As a further highlight of our study, we therefore conclude that climate change is not expected to have major effects on the N dynamics of young oak stands in central Europe.

The provenances of *Quercus robur* showed more vigorous growth in all treatments than those of the other two species, irrespective of soil type, air-warming and drought treatments. However, drought-tolerance in relation to root:shoot mass ratio, leaf stress injuries, photosynthesis and wood anatomy was higher in *Q. petraea* and *Q. pubescens* than in *Q. robur*. Therefore, *Q. robur* appeared to be the most promising species when drought periods are only short, whereas long and severe drought periods would favour *Q. petraea* and *Q. pubescens*. Within each species, provenances originating from drier sites produced more root mass than those from more humid sites. However, given that the provenances from drier sites reacted more sensitive to water limiting conditions than those from more humid sites, it remains questionable whether these provenances are better suited for a future climate. Also other aspects such as frost tolerance and wood quality must be considered in selecting provenances for future forestry. In any case, we demonstrated for the first time under controlled experimental conditions that independent from soil properties young saplings of all three central European oak species can successfully cope with severe drought periods and

Summary

increased air temperatures, and thus are suited from this point of view for future forestry in central Europe under conditions of climate change.

Zusammenfassung

Als Folge des globalen Klimawandels wird erwartet, dass bis Ende dieses Jahrhunderts in Mitteleuropa die Sommer wärmer und trockener sein werden als heute. Die in Mitteleuropa vorherrschenden Stiel-, Trauben-, und Flaumeichen (*Quercus robur*, *Q. petraea* und *Q. pubescens*) sind als trocken- und hitzetaugliche Bäume bekannt. Damit dürften sie in Zukunft die heute vorherrschenden Buchen und Fichten in warmen und trockenen Tieflagen ersetzen. Eichenprovenienzen aus niederschlagsarmen Regionen dürften dabei besonders erfolgreich sein. Die Effekte von höherer Lufttemperatur und Trockenheit auf das Eichenwachstum sind bereits gut erforscht. Allerdings haben bisherige Studien diese Effekte getrennt voneinander untersucht, weshalb nur wenig über die Auswirkungen von Interaktionen dieser zwei Faktoren untereinander und mit Bodeneigenschaften bekannt ist. Neben den direkten Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf Stoffwechselprozesse der Eichen müssen auch indirekte Effekte des Klimawandels auf Bäume berücksichtigt werden, zum Beispiel eine Veränderung der Stickstoffverfügbarkeit (N). Dabei wird erwartet, dass höhere Lufttemperaturen die Verfügbarkeit und damit das N-Angebot für Eichen erhöhen, während Trockenheit die Verfügbarkeit von N verringert.

In einem 3-jährigen Lysimeterexperiment wurden die Auswirkungen von Lufterwärmung (+1 bis 2 °C) und Trockenstress (-43% bis -60% Niederschlag) auf Eichenbestände mit jungen Stiel-, Trauben- und Flaumeichen auf einem sauren Boden und auf einem Kalkboden untersucht. Die Behandlungen Lufterwärmung und Trockenstress wurden entweder voneinander getrennt oder in Kombination angewendet und orientierten sich

dabei am IPCC Szenario A2, welches auf einem hohen Populationswachstum, einer langsamer Wirtschaftsentwicklung und einem geringen Technologiewandel basiert.

Die Lufterwärmung hatte keinen Effekt auf die Verfügbarkeit des Bodenwassers, die Evapotranspiration oder die Biomasse der Eichenbestände. Im Gegensatz dazu reduzierte Trockenstress die Wurzel-, Stamm- und Blattbiomasse deutlich. Diese Trockenstressbehandlung erwies sich als ziemlich extrem, was gut sichtbar an den sehr tiefen Blattwasserpotentialen war. Trotz dieser starken Trockenstressbehandlung starb während des ganzen Experiments keine einzige Eiche. Darüber hinaus stieg die Evapotranspiration innerhalb weniger Tage nach Beendigung der Trockenperioden auf das Niveau der Kontrolle an, was auf ein hohes Regenerationspotential der Eichen hindeutet. Unter Trockenstress entwickelten die Eichen ein höheres Wurzel:Spross Verhältnis. Außerdem waren die Effekte der Wasserlimitation auf die Feinwurzelbiomasse geringer als auf die Gesamtwurzelbiomasse. Diese Anpassungen ermöglichten es den Eichen auch unter Trockenheit effizient Wasser und Nährstoffe aufzunehmen und gleichzeitig Wasserverluste durch Transpiration zu reduzieren. Die Evapotranspiration von trockengestressten Eichenbeständen war zeitweise sehr gering, was durch eine geringe Transpirationskühlung zu höheren Luft- und Bodentemperaturen führte. Als wichtige Erkenntnis dieser Studie möchten wir hervorheben, dass die zusätzliche Lufterwärmung in der kombinierten Behandlung jedoch zu keiner Verstärkung der Trockenstressbehandlung auf die Evapotranspiration oder Biomasse der Eichen führte obwohl tiefere Blattwasserpotentiale gemessen wurden.

In einem zusätzlichen Neutronenradiographieexperiment wurde zum ersten Mal gezeigt, dass periodisches Wurzel- und Sprosswachstum von Eichenkeimlingen weder durch Wasserverfügbarkeit noch durch Bodeneigenschaften verändert wird. Unabhängig von Trockenstressbehandlung und Bodentyp traten die höchsten wie auch die tiefsten Wachstumsraten von Spross und Wurzeln immer zur gleichen Zeit auf. Wir folgern daher,

dass die Auswirkungen von Umweltbedingungen auf das Eichenwachstum in der frühen Phase nach der Keimung durch endogene Wachstumsmuster überlagert wurden. Dieses Muster kann durch den hohen Vorrat an Nährstoffen und Assimilaten in den Eicheln erklärt werden. Weiter wurde in diesem Experiment zum ersten Mal gezeigt, dass Neutronenradiographie eine geeignete Methode ist um das Wurzelwachstum von jungen Eichen ohne Störung zu messen.

Bei guter Wasserversorgung produzierten Eichen auf dem Kalkboden deutlich weniger Biomasse als auf dem sauren Boden. Der Grund dafür ist sehr wahrscheinlich limitierende Phosphor- oder Manganverfügbarkeit. Das Maximum der Wurzelbiomasse im sauren Boden befand sich in der nährstoff- und wasserreichen Bodenoberfläche, währenddem sich der Schwerpunkt der Wurzelverteilung im Kalkboden nach unten verschoben hatte. Unter Trockenstress unterschieden sich die Biomasse und der Wasserverbrauch der Eichen nicht mehr zwischen den beiden Bodentypen. Wir möchten daher, als ein Highlight unserer Ergebnisse, hervorheben, dass bei einer geringen Wasserversorgung die Nährstoffversorgung nur sekundär ist.

Im Gegensatz zu den aufgestellten Hypothesen beeinflussten weder Lufterwärmung noch Trockenstress die Stickstoffverfügbarkeit in diesen beiden Böden. Dagegen gab es deutliche Unterschiede zwischen den beiden Böden in den totalen und verfügbaren N-Gehalten. Während die Lufterwärmung keinen Einfluss auf die Akkumulation von N in der Biomasse hatte, war diese in trockengestressten Bäumen höher als in der Kontrolle. Dies deutet darauf hin, dass das Wachstum der trockengestressten Eichen nicht durch die Verfügbarkeit von N limitiert war. Ein Markierungsversuch mit ^{15}N ergab, dass diese Erhöhung vor allem auf eine vermehrte Aufnahme in Form von Nitrat zurückzuführen war, währenddem die Akkumulation von N in Form von Ammonium tiefer war. Wir sehen es

daher als wichtiges Ergebnis dieser Studie, dass der Klimawandel wohl keine grösseren Effekte auf die Stickstoffdynamik in mitteleuropäischen Eichenökosystemen haben wird.

Die Stieleichen haben unabhängig vom Bodentyp und den Behandlungen Lufterwärmung und Trockenstress immer die grösste Biomasse akkumuliert. Die Trauben- und Flaumeichen wiesen jedoch bezüglich Verhältnis zwischen Wurzel- und Sprossmasse, Blattstresssymptome, Photosynthese und Holzanatomie eine höhere Toleranz gegenüber Trockenstress auf. Somit dürfte bei einer schwachen Ausprägung des Klimawandels die Stieleiche durch ihr schnelleres Wachstum gegenüber den anderen Eichenarten im Vorteil sein. Bei langanhaltenden Trockenperioden allerdings sollten Trauben- und Flaumeiche durch ihre Trockenheitstoleranz der Stieleiche überlegen sein. Provenienzen aus Regionen mit trockenem Klima hatten in diesem Versuch höhere Biomassen als jene aus Regionen mit mehr Niederschlag, unabhängig von der Behandlungsvariante und vom Bodentyp. Gleichzeitig reagierten Provenienzen aus ariden Regionen stärker auf die Trockenbehandlung als Provenienzen aus feuchteren Gebieten. Weiter stehen im Bezug auf Frosttoleranz und Holzqualität dieser Provenienzen noch weitere Untersuchungen aus.

Zusammenfassend wir haben in dieser Studie zum ersten Mal unter kontrollierten Bedingungen gezeigt, dass junge Eichen unabhängig vom Bodentyp heiße und trockene Sommer gut überstehen können. Somit sollten alle drei mitteleuropäischen Eichenarten in der zukünftigen Forstwirtschaft Verwendung finden und die heute dominierenden Buchen und Fichten ersetzen können.