



Projekt Testpflanzungen zukunftsfähiger Baumarten¹

Versuchsdesign der Testpflanzungen

Dieser Bericht informiert über das geplante Versuchsdesign für das Projekt Testpflanzungen. Das hier beschriebene Versuchsdesign kann noch geringfügige Änderungen erfahren. Die Wahl der Baumarten und die Auswahl der Versuchsflächen werden in separaten Berichten² aufgearbeitet: „Baumartenwahl für Testpflanzungen“, „Auswahl der Versuchsflächen für Testpflanzungen“. Eine französische Version dieses Dokuments ist in Erarbeitung und wird den französischsprachigen Kantonen nachgereicht werden.

Abkürzungen: BA = Baumart(en); TP = Testpflanzung(en); PV = Provenienz(en) (Synonym: Herkünfte)

Autoren: Esther Frei, Kathrin Streit, Peter Brang, WSL

Version 1, 19.03.2018

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
1 Einleitung.....	2
1.1 Projektziele und Fragestellung.....	2
1.2 Bedeutung des Versuchsdesigns.....	3
2 Vorgehen bei der Erarbeitung des Versuchsdesigns.....	3
3 Erarbeitetes Versuchsdesign.....	4
3.1 Zwei Typen von Testpflanzungen.....	4
3.1.1 Testpflanzungen im fixen Design.....	4
3.1.2 Testpflanzungen im flexiblen Design.....	4
3.2 Anzahl und Verteilung der Testpflanzungen.....	4
3.3 Verteilung der Baumarten auf die Testpflanzungen.....	5
3.4 Versuchsdesign für eine Testpflanzung.....	5
3.4.1 Flächengrösse und Pflanzenanzahl.....	8
3.5 Weitere Aspekte des Versuchs.....	10
3.6 Auswertung des Versuchs.....	11
4 Fazit und Ausblick.....	11
5 Literatur.....	12
Anhang: Baumartenset für Testpflanzungen im fixen Design.....	13

¹ Das Projekt wird im Rahmen des Forschungsprogramms „Wald und Klimawandel“ von BAFU und WSL durchgeführt.

² Beide genannten Berichte wurden zusammen mit diesem Bericht verschickt.

Zusammenfassung

Die Klimaänderung wird sich auf die klimatische Eignung der Baumarten auf ihren heutigen Standorten auswirken. Im Projekt „Testpflanzungen zukunftsfähiger Baumarten“ wird das Potenzial von Baumarten getestet, unter verschiedenen Klimabedingungen zu überleben und gedeihen. Dazu wird untersucht, welche Umweltfaktoren das Gedeihen von 18 Baumarten mit jeweils 7 Provenienzen entlang von grossen Umweltgradienten bestimmen. Damit aussagekräftige statistische Auswertungen möglich sind, müssen alle Testpflanzungen ein konsistentes Versuchsdesign aufweisen, welches sowohl die Verteilung der Testpflanzungen und der Baumarten auf die Testpflanzungen als auch die Anordnung der Pflanzen innerhalb jeder einzelnen Testpflanzung beinhaltet. Das Versuchsdesign wurde zusammen mit anderen Forschenden erarbeitet, durch externe Statistiker überprüft und in der Folge so optimiert, dass die Ergebnisse möglichst aussagekräftig sein werden. Es soll nun ein Netzwerk von 50 bis 60 Testpflanzungen angelegt werden, die über alle in der Schweiz vorkommenden biogeographischen Regionen und Höhenstufen verteilt sind und über 30 bis 50 Jahre beobachtet werden. Jede Testpflanzung wird in 3 Blöcke unterteilt. Innerhalb jedes Blocks kommen alle für die jeweilige Testpflanzung vorgesehenen Baumarten und Provenienzen einmal vor. Jede Baumart wird zufällig einem Plot zugeteilt, wobei die Anzahl Baumarten pro Testpflanzung und damit die Anzahl Plots variabel ist. Jeder Plot ist wiederum in 4 Subplots unterteilt, denen 4 der 7 Provenienzen zufällig zugeordnet werden. Jeder Subplot enthält 9 Einzelbäume einer Provenienz. Der grosse Gewinn des geplanten Projekts liegt im koordinierten Vorgehen, das Aussagen zum Gedeihen der Baumarten über grosse Umweltgradienten möglich macht.

1 Einleitung

1.1 Projektziele und Fragestellung

Die Klimaänderung wird sich auf die klimatische Eignung der Baumarten (BA) auf ihren heutigen Standorten und damit auf zukünftige Waldleistungen auswirken. Auf vielen Waldstandorten werden unter den klimatischen Bedingungen, welche gegen Ende des 21. Jahrhunderts erwartet werden, andere BA besser wachsen als diejenigen, welche heute dort gedeihen (Pluess *et al.* 2016). Während ein Teil der zukunftsfähigen BA bereits dort vorkommt, wo ihnen das Klima in Zukunft wahrscheinlich zusagt, fehlen andere ganz. In diesem Kontext stellt sich in der Forstpraxis die wichtige Frage, auf welchen der gegen Ende des 21. Jahrhunderts als geeignet angenommenen Standorte diese BA schon heute überleben und gedeihen können. Aus wissenschaftlicher Sicht interessiert, welche Umweltfaktoren die Überlebensfähigkeit, die Vitalität und das Wachstum der untersuchten BA und Provenienzen³ (PV, Synonym: Herkünfte) entlang von grossen Umweltgradienten bestimmen. Dadurch lässt sich die Zukunftsfähigkeit der einzelnen BA bzw. PV vergleichend testen. Zur Untersuchung dieser Fragen wurde das Projekt „Testpflanzungen zukunftsfähiger Baumarten“ initiiert. Im Rahmen dieses Projekts soll ein Netzwerk von koordinierten Testpflanzungen (TP) in der ganzen Schweiz eingerichtet werden, in dem sich über eine Beobachtungsdauer von 30 bis 50 Jahren wichtige Fragestellungen zur Anpassung des Waldes an das zukünftige Klima untersuchen lassen. Insbesondere sollen Erkenntnisse aus dem Programm „Wald und Klimawandel“ geprüft, Beiträge zu Baumartenempfehlungen für die Praxis erarbeitet und eine langfristige Infrastruktur für die praxisnahe Forschung aufgebaut werden. Parallel zur in diesem Bericht vorgestellten Erarbeitung des Versuchsdesigns wurde in Konsultation mit den kantonalen Waldämtern festgelegt, dass 18 BA untersucht werden sollen. Während ein Kernset

³ Ein separater Bericht über das Vorgehen bei der Provenienzwahl ist in Erarbeitung.

von 9 BA ausführlich getestet wird, werden die 9 BA des Ergänzungssets nur in reduziertem Ausmass untersucht.

1.2 Bedeutung des Versuchsdesigns

Ein Versuchsdesign beschreibt, wie ein Versuch angelegt wird. Das beinhaltet sowohl die Verteilung der TP über Umweltgradienten und die Verteilung der BA auf die TP als auch die Anordnung der Pflanzen innerhalb jeder TP. Damit aussagekräftige statistische Auswertungen möglich sind, sind die Prinzipien Replikation und Randomisierung zu beachten (Underwood 1997; Binkley 2008). Unter Replikation versteht man, dass die „Versuchseinheiten“ (z.B. Einzelbaum, PV, BA, TP) mehrfach wiederholt werden. Damit kann bei der Auswertung festgestellt werden, ob zum Beispiel das überdurchschnittliche Wachstum einer BA ein Zufallsergebnis ist oder ob diese BA grundsätzlich rascher wächst. Unter Randomisierung versteht man, dass die Versuchseinheiten zufällig angeordnet werden. Damit wird zum Beispiel verhindert, dass eine bestimmte BA nur am Rand einer Versuchsfläche gepflanzt wird und dort unter anderen Umweltbedingungen wächst als eine andere BA im Inneren der Versuchsfläche. Alle TP im fixen Design (siehe Kapitel 3.1.1) müssen gleichartig angelegt, behandelt und beobachtet werden. Nur dies ermöglicht statistisch gesicherte Aussagen über die Zukunftsfähigkeit der getesteten BA und PV.

2 Vorgehen bei der Erarbeitung des Versuchsdesigns

Das Versuchsdesign wurde in einem mehrstufigen Prozess erarbeitet. Ein erster Entwurf wurde den KantonsvertreterInnen⁴ im Rahmen von Workshops im Juli 2017 präsentiert. Danach wurde das Versuchsdesign in Workshops mit Vertretern aus Praxis und Forschung weiterentwickelt. Im Herbst 2017 wurde ein externes Team von Statistikern mit der Evaluation des Versuchsdesigns beauftragt (Biomathematics and Statistics Scotland, James Hutton Institute, Aberdeen). Der Auftrag bestand darin, die statistische Aussagekraft des geplanten Versuchsdesigns mit Hilfe von Daten aus ähnlichen waldwachstumkundlichen Versuchen der WSL abzuschätzen. Im Januar 2018 präsentierten die Statistiker die Ergebnisse ihrer Prüfung des Versuchsdesigns (Meyer & Brocklehorst 2018). Das wichtigste Ergebnis dieser Evaluation war, dass zum Nachweis von Umwelteinflüssen auf die BA mehr TP pro BA benötigt werden als ursprünglich geplant. Jede BA soll statt in durchschnittlich 15 TP in mindestens 35 TP vertreten sein. Diese Erhöhung der Anzahl TP pro BA wirkt sich auf den gesamten Versuch aus, indem tendenziell mehr und grössere Versuchsflächen benötigt werden. Um den Flächenbedarf nicht übermässig zu vergrössern, wurde im Gegenzug die Anzahl Blöcke (Wiederholungen) in jeder TP von 4 auf 3 reduziert. Dies ist gerechtfertigt, weil die Anzahl Blöcke einen deutlich geringeren Einfluss auf die statistische Aussagekraft des Versuchs hat als die Anzahl TP (Meyer & Brocklehorst 2018). Da sich die Anzahl TP stark auf die statistische Aussagekraft der Resultate auswirkt, kann das Versuchsdesign noch Änderungen erfahren abhängig von der definitiven Anzahl gemeldeter Versuchsflächen für TP im fixen Design. Sollten zu wenige Versuchsflächen zur Verfügung gestellt werden, müsste allenfalls die Anzahl BA reduziert werden.

⁴ Einbezogen wurden alle Kantone sowie das Fürstentum Liechtenstein. Im Laufe des Prozesses nahmen insgesamt über 20 Kantone teil.

3 Erarbeitetes Versuchsdesign

3.1 Zwei Typen von Testpflanzungen

3.1.1 Testpflanzungen im fixen Design

Im Zentrum des Projekts stehen TP des sogenannten fixen Designs. Für diese gelten enge Vorgaben, welche eine statistische Auswertung ermöglichen. Die BA und PV sowie das Versuchsdesign sind von der WSL vorgegeben. TP im fixen Design werden durch die WSL wissenschaftlich eng begleitet. Die Inventuren erfolgen nach einem einheitlichen Protokoll mit wenigen aussagekräftigen und einfach zu erhebenden Merkmalen, die in allen TP erfasst werden: Mortalität, Wachstum (Baumhöhe, Stammdurchmesser), abiotische und biotische Schäden. Die in diesem Bericht beschriebenen Vorgaben für das Versuchsdesign gelten, wenn nicht anders erwähnt, für TP im fixen Design.

3.1.2 Testpflanzungen im flexiblen Design

Ergänzend zum fixen Design besteht die Möglichkeit, TP im sogenannten flexiblen Design einzurichten. In diesen TP können zum Beispiel weitere BA bzw. PV getestet oder zusätzliche Fragestellungen untersucht werden, welche einzelne Beteiligte besonders interessieren. Es wird empfohlen, sich bei TP im flexiblen Design soweit möglich an die Vorgaben für das fixe Design anzulehnen und nur soweit davon abzuweichen, als für die spezifische Fragestellung erforderlich ist. Die wissenschaftliche Begleitung durch die WSL ist für diese TP in der Regel nur lose. Für die Erarbeitung des Designs kann die WSL aber fallweise beratend beigezogen werden. Da TP im flexiblen Design nicht alle Designvorgaben erfüllen, können sie nicht in die statistische Auswertung einbezogen werden, sondern haben eher den Charakter von Fallstudien. Sie zählen daher auch nicht zur Anzahl TP, die für die Aussagekraft der statistischen Auswertungen wichtig ist.

3.2 Anzahl und Verteilung der Testpflanzungen

Die statistische Überprüfung des Versuchsdesigns ergab, dass die Anzahl TP den grössten Einfluss auf die statistische Aussagekraft hat. Für den Erfolg des Projekts ist daher ausschlaggebend, dass genügend TP im fixen Design angelegt werden und dass diese gleichmässig über alle in der Schweiz vorkommenden biogeographischen Regionen und Höhenstufen verteilt sind. Wir streben deshalb im fixen Design 50 bis 60 TP an, die über die ganze Schweiz verteilt sind (Abbildung 1) und damit insgesamt grosse Umweltgradienten abdecken. Ebenfalls sollen die Versuchsflächen unterschiedliche Bodentypen bzw. Grundgesteine aufweisen.



Abbildung 1. Beispiel einer möglichen Verteilung von 50 TP über die ganze Schweiz. Kartenbasis: swisstopo.

3.3 Verteilung der Baumarten auf die Testpflanzungen

Die WSL hat in Konsultation mit den Kantonen und weiteren Beteiligten die BA für das fixe Design ausgewählt. Das Baumartenset umfasst ein Kernset und ein Ergänzungsset von je 9 BA (siehe Tabelle 2 im Anhang und Bericht „Baumartenwahl für Testpflanzungen“). Die statistische Evaluation des Versuchsdesigns ergab, dass eine BA in ungefähr 35 TP gepflanzt werden muss, damit statistisch aussagekräftige Schlüsse gezogen werden können. Daher wird jede BA des Kernsets in mindestens 35 TP gepflanzt, während jede BA des Ergänzungssets nur in einer reduzierten Anzahl von ca. 15 TP getestet wird. Für die BA des Kernsets sind damit belastbare Aussagen über ihre Eignung und ihr Wachstumspotenzial über breite Umweltgradienten sowie Vergleiche zwischen den BA möglich. Für die BA des Ergänzungssets hingegen kann die Abhängigkeit der Pflanzenmerkmale von Umweltgradienten weniger präzise bestimmt werden.

Die BA werden in den biogeographischen Regionen und Höhenstufen sowie auf den Böden gepflanzt, die ihrer aktuellen ökologischen Amplitude entsprechen, sowie um eine bis zwei Höhenstufen höher. Zudem werden die BA über die heutige regionale Verbreitung hinaus gepflanzt, um ihre ökologischen Grenzen besser erfassen zu können (Details siehe Bericht „Baumartenwahl für Testpflanzungen“). Damit eine ausgewogene Verteilung der BA erreicht wird, bestimmt die WSL für jede TP die zu testenden BA. Eine grobe Verteilung der 18 BA auf 50 TP unter Berücksichtigung der Höhenstufen zeigte, dass TP in Hochlagen (in diesem Bericht die subalpine und oberhalb subalpine Höhenstufe sowie auf wenig produktiven Standorten auch die hochmontane Höhenstufe umfassend) etwa 4 – 8 BA enthalten und daher relativ klein sein können. TP in Tieflagen (in diesem Bericht die kolline bis hochmontane Höhenstufe umfassend) hingegen enthalten eher 8 – 15 BA und sollten daher grösser sein. Der Grund dafür liegt darin, dass die Baumartenvielfalt mit der Höhenlage abnimmt, was sich bis Ende des 21. Jahrhunderts nicht grundlegend ändern wird.

3.4 Versuchsdesign für eine Testpflanzung

Die Versuchsanordnung für eine einzelne TP ist ein geschachteltes, randomisiertes Blockdesign (Abbildung 2; Underwood 1997). Dafür wird jede Versuchsfläche zunächst in 3 Blöcke (Wiederholungen) unterteilt. Innerhalb jedes Blocks kommen alle für die jeweilige TP vorgesehenen BA und PV einmal vor. Jede BA wird zufällig einem quadratischen Plot zugeteilt, wobei die Anzahl BA pro TP und damit die Anzahl Plots variabel ist. Die Plots sind wiederum in 4 quadratische Subplots unterteilt, denen zufällig je eine PV der entsprechenden BA zugeordnet wird. In jedem Subplot werden 9 Setzlinge (Einzelbäume) der jeweiligen PV in einer quadratischen Anordnung von 3 x 3 Setzlingen gepflanzt. Diese Setzlinge sind eine Zufallsauswahl aus der Gesamtmenge der angezogenen Setzlinge dieser PV.

Das in Abbildung 2 dargestellte Layout einer TP mit 8 BA à je 4 PV ist idealisiert; bei der konkreten Realisierung der TP im Wald muss die Anordnung der Blöcke und Plots an die Gegebenheiten im Gelände angepasst werden. Die WSL wird für jede TP einen individuellen Bepflanzungsplan erstellen, der den hier beschriebenen Überlegungen Rechnung trägt.

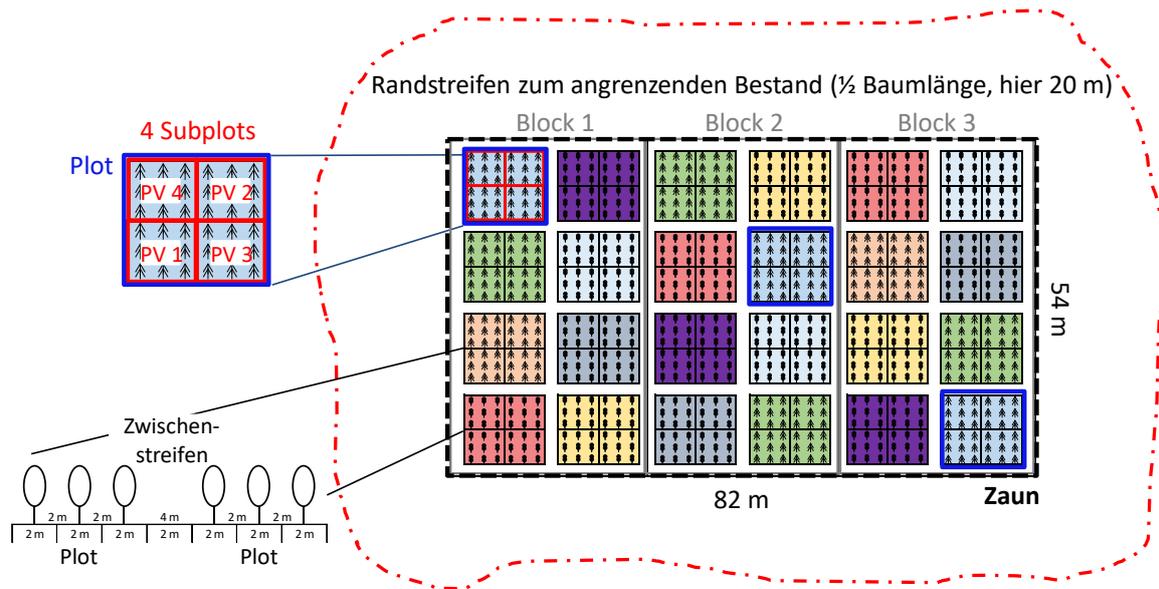


Abbildung 2. Idealisierte Versuchsanordnung für das fixe Design für eine TP in Tieflagen mit 3 Blöcken, 8 BA und 4 PV pro BA. Die 9 Setzlinge derselben BA und PV in einem Block werden als Subplot und die 4 Subplots zusammen als Plot bezeichnet. Zwischen den Plots liegt jeweils ein Zwischenstreifen von 2 m Breite, um die Konkurrenz zwischen den BA zu reduzieren. Die TP ist von einem Randstreifen umgeben, der so breit ist wie die halbe Höhe des angrenzenden Bestandes.

Mit dem randomisierten Blockdesign wurde ein Mittelweg gewählt zwischen der vollständigen Randomisierung, bei welcher die einzelnen Bäume aller BA und PV zufällig über die ganze Versuchsfläche verteilt würden, und der vollständigen Segregation ohne Replikation, bei welcher jede BA mit allen Individuen ihrer PV nur einmal innerhalb einer TP vorkommt (Quinn & Keough 2002). Eine vollständig randomisierte Anordnung wäre zwar aus statistischer Sicht vorteilhaft, aber aus ökologischer Sicht nachteilig, weil schnell wachsende BA langsam wachsende BA zunehmend stärker bedrängen würden. Ausserdem ist ein vollständig randomisiertes Design in der Umsetzung fehleranfällig. Bei einer vollständigen Segregation bestünde die Gefahr, dass Standortunterschiede innerhalb der Versuchsfläche die Resultate verzerren oder Störungen auf einem Teil der Fläche die einzelnen BA unterschiedlich stark beeinträchtigen.

Im Folgenden werden einzelne Aspekte des Versuchsdesigns genauer erläutert.

Blöcke

Als Block (Wiederholung) bezeichnet man eine Teilfläche innerhalb einer TP, in der alle BA mit all ihren PV einmal vertreten sind. Die Blöcke dienen dazu, in der statistischen Auswertung den Einfluss von bekannten und unerkannten Standortunterschieden innerhalb der Versuchsfläche von den interessierenden Einflussgrößen (z.B. Lufttemperatur) trennen zu können (König 2005). Im Weiteren können Blöcke den Schaden begrenzen, falls eine Störung einen Teil einer TP so stark beeinträchtigt, dass dort keine auswertbaren Messungen mehr möglich sind. Die Blockbildung gewährleistet in diesem Fall, dass der betroffene Block als Ganzes ausgeschlossen werden kann, während alle BA und PV in den übrigen Blöcken immer noch repliziert vorkommen. Drei Blöcke stellen einen Kompromiss dar zwischen dem statistischen Anspruch auf viele Blöcke (Quinn & Keough 2002) und dem mit der Anzahl Blöcke steigenden Flächenbedarf sowie den steigenden Kosten. Drei Blöcke sind als Minimum vertretbar, weil die Anzahl Blöcke gegenüber der Anzahl TP nur einen geringen Einfluss auf die statistische Aussagekraft des Versuchs hat (Meyer & Brocklehorst 2018).

Soweit als möglich sollen Standortunterschiede innerhalb einer TP vermieden werden (Details siehe Bericht „Auswahl der Versuchsflächen für Testpflanzungen“). Falls es solche in einzelnen Umweltfaktoren dennoch gibt (z.B. Gradienten in der Bodenfeuchte), sollen die Blöcke so angelegt werden, dass sie den Gradienten „abbilden“: Ein Block wird dann auf dem feuchtesten Teil der Versuchsfläche platziert, ein Block auf ihrem trockensten Teil und der dritte Block dazwischen. Kleinräumige Standortunterschiede (z.B. Baumstümpfe, Felsblöcke, Fusswege, kleine Bäche) sollten ausgespart werden; allerdings erhöht sich dadurch der Flächenbedarf. Falls nicht anders lösbar können die 3 Blöcke einer TP auch räumlich getrennt sein, was kleinere Schlagflächen ermöglicht. Allerdings wird bei dieser Variante ein grösserer Flächenanteil für Randstreifen benötigt und die benötigte Zaunlänge ist ebenfalls grösser.

Baumarten-Plots

Jeder Block wird in eine bestimmte Anzahl Plots eingeteilt, welche der Anzahl der in dieser TP getesteten BA entspricht. Daher variiert die Anzahl Plots in jeder TP. In den 3 Blöcken einer TP hingegen ist die Anzahl Plots gleich gross. Innerhalb jedes Blocks werden die BA zufällig den Plots zugeteilt. Um die Konkurrenz zwischen schnell und langsam wachsenden BA zu reduzieren, werden die Plots von Nadel- und Laubbäumen innerhalb eines Blocks separiert.

Provenienzen-Subplots

Jeder Plot wird in einer 2 x 2 Anordnung in 4 Subplots unterteilt. Den 4 Subplots werden 4 PV einer BA zufällig zugeteilt. Im gesamten Versuch sollen für jede BA 7 PV getestet werden. Damit die Versuchsfläche jedoch deswegen nicht grösser wird, werden pro TP jeweils nur 4 der 7 PV jeder BA getestet. Während eine PV als Referenz-PV in allen TP getestet wird, in denen die BA vorkommt, werden jeder TP 3 der restlichen 6 PV zufällig zugeteilt. Jede dieser 6 PV kommt somit in der Hälfte der TP vor. Dieser Kompromiss ermöglicht, die herkunftsbedingte Variabilität innerhalb der BA relativ breit abzudecken, ohne den Flächenbedarf pro TP zu vergrössern. Für die einzelne PV reduziert sich allerdings die statistische Aussagekraft. Eigentliche Provenienzempfehlungen sind aber nicht das Ziel dieses Versuchs, denn dazu müssten wesentlich mehr PV getestet werden (König 2005).

Einzelbäume

Die 9 Bäume einer PV pro Block ergeben bei 3 Blöcken zusammen 27 Bäume pro PV und TP bzw. 108 Bäume pro BA und TP. Bei der Untersuchung von Wachstumsmerkmalen spielt die Anzahl der Individuen innerhalb einer TP eine untergeordnete Rolle gegenüber der Anzahl Versuchsflächen. Aus statistischer Sicht bringt deswegen eine Vergrösserung der Anzahl Individuen weniger Zusatznutzen als eine grössere Anzahl TP pro BA. Zur Bestimmung der Mortalität in jeder TP braucht es allerdings eine ausreichend grosse Anzahl von Individuen pro TP, damit auch relativ kleine Mortalitätsraten detektiert werden können. So entspricht der Tod eines einzelnen Baumes einer Mortalität von 3.7%, wenn eine TP 27 Bäume pro PV umfasst.

Zusätzlich muss auch die Mortalität während der Laufzeit des Experiments berücksichtigt werden, weil sich dadurch die Anzahl Bäume reduziert, die für Wachstumsmessungen zur Verfügung steht. Mit der vorgeschlagenen Anzahl Individuen ist gewährleistet, dass auch bei Ausfällen noch genügend Bäume für Wachstumsmessungen vorhanden sind. Gehen wir von einer Mortalität von 50% über 30 Jahre aus, sind nach 30 Jahren im Durchschnitt noch 13.5 Bäume pro PV bzw. 54 Bäume pro BA in jeder TP vorhanden, was immer noch aussagekräftige statistische Auswertungen erlaubt.

Pflanzabstand (2 m bzw. 1 m)

Die Pflanzabstände innerhalb eines Plots betragen in Tieflagen 2 m, in Hochlagen jedoch 1 m. Diese Abstände sollten so genau wie möglich, d.h. ± 30 cm, eingehalten werden, um die Konkurrenz durch benachbarte Setzlinge gleich zu halten. Aus praktischen Gründen sind auch die Pflanzabstände zwischen verschiedenen PV derselben BA gleich gross, da davon auszugehen ist, dass sich die PV nur in wenigen Fällen stark im Wachstum unterscheiden.

Aus Machbarkeitsgründen werden die Pflanzabstände in Hochlagen (subalpin und ober-subalpin) auf 1 m verkleinert. Die unterschiedlichen Pflanzabstände haben zur Folge, dass der Einfluss der Pflanzabstände nicht unabhängig von der Höhenlage untersucht werden kann, denn die beiden Einflüsse sind vermengt („confounded“). Da die Konkurrenzbedingungen in Hochlagen wegen des geringeren Wachstums ähnlich wie in Tieflagen mit den grösseren Abständen sein werden, stellt dies für die Gesamtanalyse kein Problem dar.

Zwischenstreifen zwischen den Plots (4 m bzw. 2 m)

Um die Konkurrenz zwischen BA in benachbarten Plots zu reduzieren, werden die Pflanzabstände zwischen den Plots auf 4 m (bzw. 2 m in Hochlagen) verdoppelt (Abbildungen 2 und 3). Ebenso wird zwischen den Blöcken der doppelte Abstand von 4 m bzw. 2 m eingehalten.

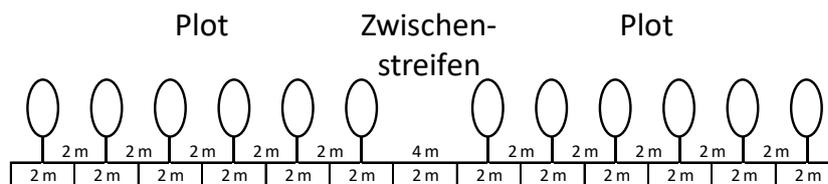


Abbildung 3. Pflanzabstände und Breite des Zwischenstreifens dargestellt für 2 Plots einer TP in Tieflagen.

Rückegassen

Bei der Platzierung der Plots auf der Versuchsflächen müssen bestehende und geplante Rückegassen berücksichtigt werden. Damit die Versuchsbäume durch Befahren der Wurzeln und Rückeschäden nicht beeinträchtigt werden, müssen Rückegassen etwas breiter sein als die geplanten Zwischenstreifen.

Randstreifen

Um möglichst ähnliche Umweltbedingungen zu schaffen, z.B. die Beschattung durch angrenzende Bestände zu reduzieren, wird jede TP mit einem Randstreifen umgeben, der ebenfalls vor der Pflanzung geschlagen werden muss. Der Randstreifen soll ungefähr halb so breit sein wie die Höhe des angrenzenden Bestandes (Abbildung 2; Skovsgaard *et al.* 2006). Der Randstreifen soll natürlich verjüngt werden, womit der aufwachsende Jungwald ein ähnliches Bestandesalter wie die TP hat. Um Zaunlänge zu sparen, kann der Randstreifen ausserhalb des Wildschutzzaunes angelegt werden.

3.4.1 Flächengrösse und Pflanzenanzahl

Die benötigte Flächengrösse für die einzelnen TP ergibt sich aus der Anzahl der zu testenden BA, dem Pflanzabstand und der Höhe des angrenzenden Bestandes. In TP in Tieflagen (kollin bis hochmontan), wo voraussichtlich ca. 80% der TP liegen werden, führen die grössere Anzahl zu testender BA, die

grösseren Pflanzabstände und der erforderliche breitere Randstreifen zu einem grösseren Flächenbedarf verglichen mit TP in Hochlagen (subalpin und obersubalpin).

Tabelle 1. Flächenbedarf und Anzahl Pflanzen pro TP in Abhängigkeit der Anzahl BA für TP in Tieflagen (kollin bis hochmontan) und Hochlagen (subalpin und obersubalpin).

Anzahl BA	Anzahl Pflanzen pro TP	TP in Tieflagen					TP in Hochlagen				
		Pflanzung [ha]	Zwischenstreifen [ha]	Randstreifen [ha]	TP Fläche total [ha]	Zaunlänge [m]	Pflanzung [ha]	Zwischenstreifen [ha]	Randstreifen [ha]	TP Fläche total [ha]	Zaunlänge [m]
4	432	0.17	0.04	0.54	0.75	188	0.04	0.01	0.23	0.29	94
5	540	0.22	0.06	0.59	0.86	216	0.05	0.01	0.25	0.32	108
6	648	0.26	0.07	0.65	0.98	244	0.06	0.02	0.27	0.36	122
7	756	0.30	0.08	0.70	1.09	272	0.08	0.02	0.29	0.39	136
8	864	0.35	0.10	0.70	1.15	272	0.09	0.02	0.29	0.40	136
9	972	0.39	0.13	0.76	1.27	300	0.10	0.03	0.32	0.44	150
10	1080	0.43	0.13	0.76	1.32	300	0.11	0.03	0.32	0.45	150
11	1188	0.48	0.15	0.87	1.50	356	0.12	0.04	0.36	0.51	178
12	1296	0.52	0.15	0.87	1.54	356	0.13	0.04	0.36	0.52	178
13	1404	0.56	0.20	0.93	1.68	384	0.14	0.05	0.38	0.57	192
14	1512	0.60	0.20	0.93	1.73	384	0.15	0.05	0.38	0.58	192
15	1620	0.65	0.20	0.93	1.77	384	0.16	0.05	0.38	0.59	192

In der Tabelle grau hinterlegte Zellen enthalten im Text erwähnte Werte.

Für eine TP in Tieflagen, in der 10 BA getestet werden können, wird eine Gesamtfläche inklusive Zwischen- und Randstreifen von ca. 1.32 ha benötigt (Tabelle 1 und Abbildung 4). Bei 8 BA reduziert sich der Flächenbedarf auf ca. 1.15 ha, während bei 12 BA mit einer Fläche von ca. 1.54 ha gerechnet werden muss. In Hochlagen ist der Flächenbedarf wegen der kleineren Pflanzabstände mit 0.45 ha bei 10 BA deutlich kleiner. Ausserdem ist davon auszugehen, dass in Hochlagen in der Regel weniger BA getestet werden. Für 4 BA wird eine Gesamtfläche von 0.29 ha und für 6 BA eine solche von 0.36 ha benötigt.

In einer TP werden 108 Pflanzen pro BA getestet. Das ergibt bei 4 BA 432 Pflanzen pro TP, bei 8 BA 864 Pflanzen pro TP, bei 12 BA 1'296 Pflanzen pro TP und bei 15 BA 1'620 Pflanzen pro TP. Pro PV werden in einer TP 27 Pflanzen gepflanzt. Für eine PV ergibt das im ganzen Versuch einen Pflanzenbedarf von 945 Pflanzen für BA des Kernsets, die in 35 TP gepflanzt werden sollen. Für BA des Ergänzungssets, die nur in 15 TP gepflanzt werden, ergeben sich 405 Pflanzen. Insgesamt wird bei der Anzucht ein Zuschlag von 67% für Ausfälle und für Nachpflanzungen einberechnet, womit pro PV rund 1'600 bzw. 700 Setzlinge angezogen werden müssen. Für alle BA zusammen ergeben sich 83'000 zu produzierende Setzlinge. Wird mit effektiven Nachpflanzungen von 20% gerechnet, dann werden davon für alle TP zusammen allerdings nur 50'000 Setzlinge tatsächlich benötigt.

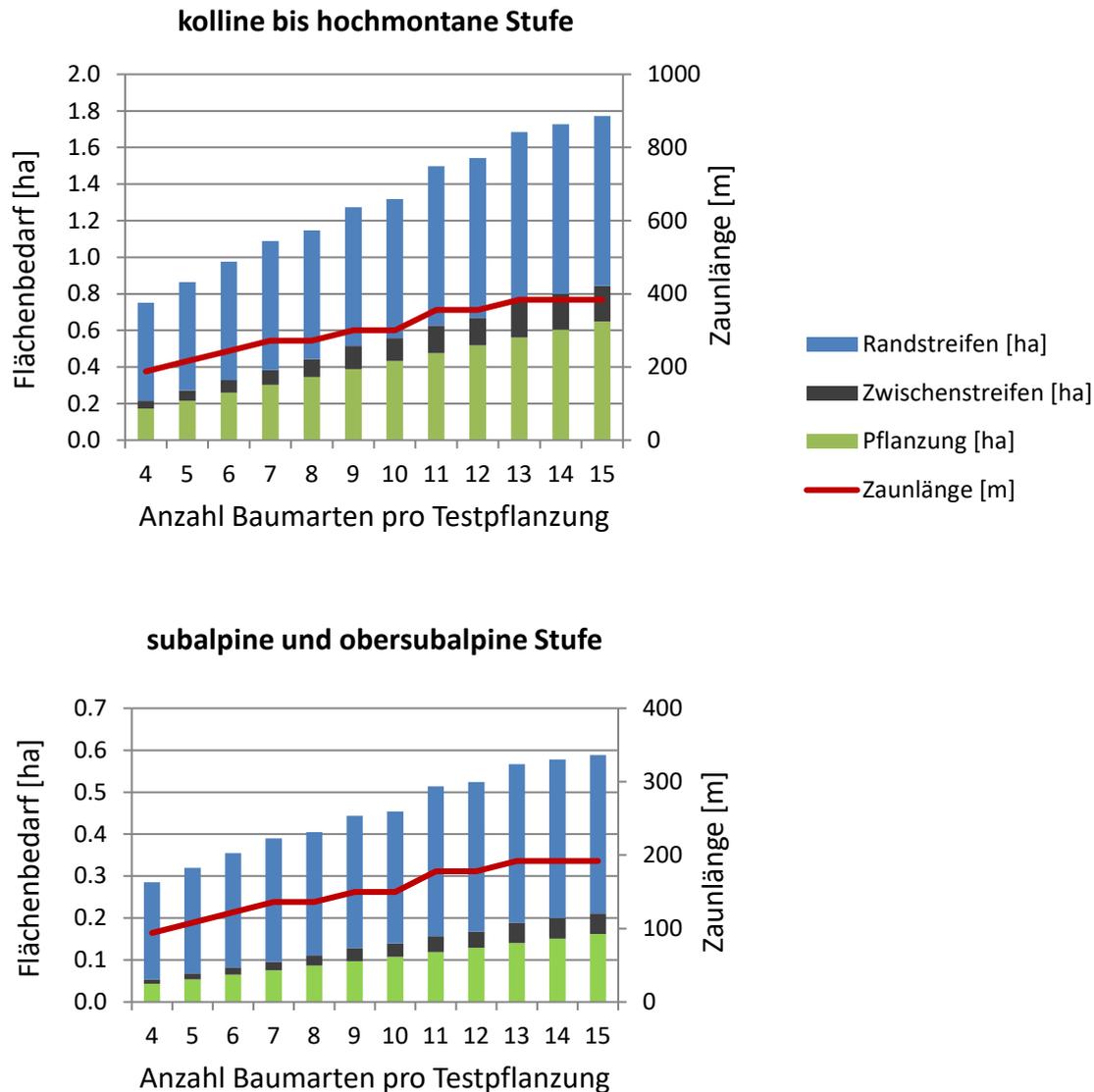


Abbildung 4. Flächenbedarf und Zaunlänge für eine TP bei unterschiedlicher Anzahl BA in Tieflagen (oben) und in Hochlagen (unten). Der Flächenbedarf für die bepflanzte Fläche, die Zwischenstreifen zwischen den BA und die Randstreifen am Rand der Fläche sind separat ausgewiesen.

3.5 Weitere Aspekte des Versuchs

Vorwald

Unter Vorwald versteht man schnell wachsende Bäume einer anderen Art (z.B. *Betula pendula* oder *Alnus incana*), die den getesteten BA in den ersten Jahren nach der Pflanzung Schatten spenden und damit günstige Aufwuchsbedingungen schaffen. Der Vorwald wird nach einigen Jahren entfernt, bevor er die getesteten BA zu stark bedrängt. Im Rahmen des TP-Projekts wird auf einen Vorwald verzichtet, weil dieser nur bei einzelnen BA (z.B. *Abies alba*) nützlich wäre. Ein selektiver Einsatz nur bei einzelnen BA würde aber dazu führen, dass die BA unterschiedliche Behandlungen erhalten und somit nicht mehr vergleichbar wären.

Naturverjüngung

Naturverjüngung wird grundsätzlich nicht in den Versuch integriert. Allerdings ist es möglich, auf einem Teil des Randstreifens oder in dafür reservierten Plots innerhalb der bepflanzten Fläche die Naturverjüngung zu beobachten und so das Wachstumspotenzial der lokalen BA und PV zu veranschaulichen.

Ausdünnung

Es ist davon auszugehen, dass nach 10 – 15 Jahren eine Ausdünnung der gepflanzten Bäume notwendig sein wird, um die Konkurrenz zwischen den Bäumen zu reduzieren. Dabei ist wichtig, dass die Ausdünnung auf allen Versuchsflächen nach den gleichen Regeln durchgeführt wird, damit alle TP auch nach dem Ausdünnen vergleichbar bleiben. Der Entscheid, ob die Ausdünnung nach statistischen oder forstlichen Kriterien erfolgen soll, ist noch nicht gefallen. Er wirkt sich auf die Aussagekraft des Versuchs aus. Bei einer zufälligen Ausdünnung nach experimentellen Kriterien ist gewährleistet, dass die übrigbleibenden Bäume auch nach dem Ausdünnen einer zufälligen Stichprobe aus der Gesamtpopulation entsprechen. Bei einer Ausdünnung nach forstlichen Kriterien hingegen wird nach Vitalität selektiert; dadurch entsprechen die übrigbleibenden Bäume einer Zufallsstichprobe der vitalsten Individuen.

3.6 Auswertung des Versuchs

Für die statistische Auswertung des Versuchs ist die Verwendung von regressionsähnlichen gemischten Modellansätzen („mixed effect models“) vorgesehen (Bates *et al.* 2015). Diese haben zum Ziel, Beziehungen zwischen einer abhängigen Variablen (Wachstum, Mortalität) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Umweltvariablen) zu modellieren. Für eine aussagekräftige statistische Analyse sollten die Unterschiede in den Umweltbedingungen zwischen den TP möglichst gross, innerhalb jeder TP hingegen möglichst gering sein.

4 Fazit und Ausblick

Nach unserem Wissen ist dies der umfangreichste waldwachstumskundliche Versuch, der je in der Schweiz durchgeführt wurde. Daher massen wir der Erarbeitung eines aussagekräftigen Versuchsdesigns grossen Wert zu. Das Versuchsdesign für die TP im fixen Design wurde in einem mehrstufigen Prozess erarbeitet, von der Information der KantonsvertreterInnen über einen Designentwurf und Rücksprachen mit Forschenden bis hin zur Überprüfung durch externe Statistiker. Dabei handelte es sich um einen Optimierungsprozess mit Trade-Offs: Während die Anzahl Blöcke auf 3 reduziert wurde, wurde die Anzahl benötigter TP pro BA erhöht, um statistisch aussagekräftige Resultate zu erhalten. Dies wirkt sich auf Grösse und Anzahl der benötigten Versuchsflächen aus. Insgesamt werden 50 bis 60 TP benötigt, die in Tieflagen eine Grösse von ca. 1.15 bis 1.54 ha (bei 8 bis 12 BA) haben werden. Es sind aber auch grössere und kleinere TP möglich.

Mit den Anpassungen am Baumartenset wurde ein Weg gefunden, insgesamt 18 BA in den Versuch zu integrieren. Damit werden viele der BA, die in den Schweizer Wäldern im Klimawandel als potenziell zukunftsfähig gelten, in den geplanten TP vertreten sein. Für die BA des Kernsets sind belastbare Aussagen und Vergleiche über breite Umweltgradienten möglich, wogegen für die BA des Ergänzungsets, die auf einer kleinere Anzahl TP gepflanzt werden, Aussagekraft und Vergleichbarkeit geringer sind. Die Erhöhung der Anzahl PV von ursprünglich 4 auf 7 ermöglicht zudem, die Herkunftsvariabilität der getesteten BA besser abzudecken.

Der grosse Gewinn dieses Projekts liegt im koordinierten Vorgehen. Während eine einzelne TP nur Aussagen zum Gedeihen der gepflanzten Bäume auf der jeweiligen Versuchsfläche erlauben würde, kann aus einem Netzwerk von 50 bis 60 TP abgeleitet werden, wie die getesteten BA unter unterschiedlichen Klimabedingungen langfristig gedeihen. Der Langzeitversuch wird zudem erlauben, die Auswirkungen von Witterungseinflüssen und Extremereignissen auf die getesteten BA und PV besser zu verstehen.

Der nächste Schritt bei der Präzisierung des Versuchsdesigns ist die Zuteilung der BA auf die Versuchsflächen, welche der WSL von den Kantonen gemeldet werden. Dabei ist sicherzustellen, dass für jede BA der zu testende Umweltgradient möglichst gut abgedeckt wird. Zudem wird die WSL geeignete PV suchen und die Saat- und Pflanzgutbeschaffung für die TP im fixen Design mit den Baumschulen koordinieren. Nach einer je nach BA 2- bis 4-jährigen Anzuchtphase werden die Setzlinge in die einzelnen TP gepflanzt. Es ist geplant, die TP in den Jahren 2020 bis 2022 anzulegen.

5 Literatur

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M. & Walker, S. C. (2015) Fitting linear mixed effects models using lme4. *Journal of Statistical Software* 67:1-48.
- Binkley, D. (2008) Three key points in the design of forest experiments. *Forest Ecology and Management* 255: 2022–2023.
- König, A. O. (2005) Provenance research: evaluating the spatial pattern of genetic variation. In: Geburek T. & Turok J. [Eds.] *Conservation and Management of Forest Genetic Resources in Europe*, Abora Publishers, Zvolen 693 p.
- Meyer, C.-D. & Brocklehorst, S. (2018) Power calculations for the planned WSL research infrastructure testing tree species adapted to future climates. *Final Report Experimental Design Evaluation*. Biomathematics and Statistics Scotland (BioSS), The James Hutton Institute, Aberdeen.
- Pluess, A. R., Augustin, S. & Brang, P. (2016). Kernaussagen und Empfehlungen zum Wald im Klimawandel. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. (eds A.R. Pluess, S. Augustin & P. Brang) pp. 421-440. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- Quinn, G. P. & Keough, M. J. (2002) *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge, Cambridge University Press, 527 p.
- Skovsgaard, J. P., O'Connor, E., Graversgaard, H. C., Hochbichler, E., Mohni, C., Nicolescu, N., Niemistö, P., Pelleri, F., Spiecker, H., Stefancik, I. & Övergaard, R. (2006) Procedures for forest experiments and demonstration plots. *Scientific report from a COST E42 meeting in Denmark 28-30 Nov. 2006*.
- Underwood, A. J. (1997) *Experiments in ecology: Their logical design and interpretation using analysis of variance*. Cambridge University Press, Cambridge, 504 p.

Anhang: Baumartenset für Testpflanzungen im fixen Design

Tabelle 2. Definitives Baumartenset für TP im fixen Design. Die BA im Kernset werden in ca. 35 TP pro BA getestet. Die BA im Ergänzungsset hingegen werden nur auf ca. 15 TP pro BA getestet. Quelle: Bericht „Baumartenwahl für Testpflanzungen“.

Kernset (9 Arten)	Ergänzungsset (9 Arten)
<i>Abies alba</i> (Weisstanne)	<i>Acer opalus</i> (Schneeballblättriger Ahorn)
<i>Acer pseudoplatanus</i> (Bergahorn)	<i>Acer platanoides</i> (Spitzahorn)
<i>Fagus sylvatica</i> (Buche)	<i>Cedrus atlantica</i> (Atlaszeder)
<i>Larix decidua</i> (Lärche)	<i>Corylus colurna</i> (Baumhasel)
<i>Picea abies</i> (Fichte)	<i>Juglans regia</i> (Nussbaum)
<i>Pinus sylvestris</i> (Föhre)	<i>Prunus avium</i> (Kirschbaum)
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Douglasie)	<i>Quercus cerris</i> (Zerreiche)
<i>Quercus petraea</i> (Traubeneiche)	<i>Quercus robur</i> (Stieleiche)
<i>Tilia cordata</i> (Winterlinde)	<i>Sorbus torminalis</i> (Elsbeere)