

Beschleunigung von Züchtungsaktivitäten der FICHTE und Überführung erster Ergebnisse in die Forstpraxis durch Bereitstellung ausgewählter Genotypen als SE-vermehrte Forst-Containerpflanzen

Endbericht

Juni 2025

Autoren und Beitragende:

Silvio Schüler¹, Johannes Persch¹, Muhammad Ahmad¹, Marcela van Loo¹, Carlos Trujillo-Moya¹, Bernd Igler², Roland Oberwimmer², Christoph Hartleitner², Christofer Rhén², Magnus Hertzberg³, Malin Abrahamson³, Magnus Eriksson³. 2025: **Beschleunigung von Züchtungsaktivitäten der FICHTE durch somatische Embryogenese**. Endbericht. BFW, Wien. 32 S.



1 - Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für
Wald, Naturgefahren und Landschaft



2 - LIECO GmbH & Co KG, Kalwang



3 - SweTree Technologies AB, Umeå, Sweden

Das Projekt wurde
gefördert von



Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	3
2. Abstract	4
3. Ziele	5
4. Saatgutauswahl	5
5. Produktion der SE-Pflanzen.....	7
6. Vertopfung in Lieco Container und Pflanzenentwicklung.....	14
7. Trockenstresstests der SE-Pflanzen.....	19
8. Anlage der Versuchsflächen	24
9. Literatur	30
10. Abbildungsverzeichniss.....	31

1. Zusammenfassung

Für die Durchführung des vorliegenden Projektes stand Fichtensaatgut zur Verfügung, dass bereits im Herbst 2018 von wertvollen Klonen bzw. Herkünften auf Versuchsflächen des BFW beerntet wurde. Dieses Material wurden bereits seit 1978 (Versuch Porrau) und 1983 (Versuch Hintergams) vom BFW im Hinblick auf Leistung und Trockenresistenz getestet. Aus dem zur Verfügung stehenden Saatgut wurden die wertvollsten und vielversprechendsten Nachkommenschaften zum Projektpartner SweTree nach Umea, Schweden gesendet. Im dortigen SE-Labor wurden insgesamt 1.805 Embryonen wurden aus 10 Saatgutpartien isoliert und so insgesamt 122 Zelllinien aus 10 Nachkommenschaften gewonnen. Die durchschnittliche Initiierungsfrequenz betrug 6,8 % über alle Familien. Nach Evaluierung wurden 73 Zelllinien aus 6 Familien für eine längerfristige Lagerung kryokonserviert. Für die Produktion des Testmaterials erwiesen sich etwa 47% der evaluierten Zelllinien als Produzenten von guten reifen Embryonen, wobei 5 Familien und 22 Zelllinien beteiligt waren. Daraus keimten 13.629 Pflanzen. Nach Entwicklung im Nährmedium konnten 4.765 Keimlinge aus 5 Familien und 29 Zelllinien in ein Torfsubstrat überführt werden, von denen 4.268 Keimlinge überlebten und im April 2023 nach Österreich geliefert wurden. Die in Minicontainern zur Lieco gelieferten Pflanzen wurden kurz nach der Anlieferung in den Standardcontainer L15 überführt. Im Vergleich mit einjährigen Sämlingen derselben Nachkommenschaft waren die SE-Pflanzen beim Vertopfen jedoch weniger gut durchwurzelt und insgesamt schwächer. Diesen Rückstand konnten sie auch nach 2 Jahren im Forstgarten nicht aufholen. Allerdings waren die SE-Pflanzen vital, zeigten keine besonderen Ausfälle und insbesondere die Wurzeln entwickelten sich sehr gut, so dass von einer guten Voraussetzung für die Auspflanzung im Wald ausgegangen werden kann. Besonders augenscheinlich war die große Heterogenität der SE-Pflanzen, insbesondere die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Zelllinien. Diese Unterschiede können auf die genetischen Unterschiede der Zelllinien (jede Zelllinie ist ein einzelner Klon) oder die letzten Schritte beim Transfer der Pflanzen vom Nährmedium zum Torfsubstrat zurückzuführen sein. Eine bessere Abstimmung zwischen SE-Labor und Forstgarten könnten in Zukunft dazu beitragen, gleichförmigere Pflanzen in der Containerproduktion bereit zu stellen. Ein kleiner Teil der SE-Pflanzen wurde noch im Sommer 2023 einem Trockenstressexperiment unterzogen. Die Ergebnisse des Experimentes bestätigt die hohe genetische Variation der Trockentoleranz der SE-Pflanzen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Effizienz des Photosystems. Im Experiment konnte erstmalig gezeigt werden, dass Zelllinien, die aus Herkünften abstammen deren Altbäume in Voruntersuchungen als besonders trockenresistent charakterisiert wurden, auch im Klimakammerversuch eine weniger ausgeprägte Stressreaktionen zeigen, während andere, die sich in den langjährigen Anbauversuchen als besonders wüchsig erwiesen haben, von der Trockenheit stärker betroffen waren. Unter gut bewässerten Bedingungen blieb die Erblichkeit konstant hoch, was auf starke genetische Beiträge hinweist. Unter Trockenstress stieg die Erblichkeit zunächst an, sank jedoch mit fortschreitendem Stress stark ab, was auf die zunehmende Dominanz von Umwelteinflüssen hindeutet. Wie geplant wurden im Frühjahr 2025 drei Versuchsflächen mit den SE-Pflanzen und den parallel dazu angezogenen Sämlingen angelegt. Die Versuchsflächen decken ein breites Standortsspektrum ab, von Rand der klimatischen Eignung im Wienerwald auf 400m bis auf 1300m in Kalwang. Die Variation der Standortsbedingungen ist eine gute Grundlage, um die Eignung der SE-Pflanzen unter verschiedenen Klimaszenarien einschätzen zu können. Um Extremereignisse und deren mögliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Fichten abschätzen zu können wurde jede Versuchsfläche mit einfachen Klimastationen ausgestattet.

2. Abstract

For the implementation of the present project, spruce seeds were available that had already been harvested in autumn 2018 from valuable clones and provenances on experimental plots of the BFW. This material had already been tested by the BFW since 1978 (Porrau experiment) and 1983 (Hintergams experiment) with regard to performance and drought resistance. From the available seeds, the most valuable and promising progenies were sent to the project partner SweTree in Umeå, Sweden. In the SE laboratory there, a total of 1,805 embryos were isolated from 10 seed lots, resulting in a total of 122 cell lines from 10 progenies. The average initiation frequency was 6.8% across all families. After evaluation, 73 cell lines from 6 families were cryopreserved for long-term storage. For the production of the test material, about 47% of the evaluated cell lines proved to be producers of good mature embryos, involving 5 families and 22 cell lines. From these, 13,629 plants germinated. After development in the nutrient medium, 4,765 seedlings from 5 families and 29 cell lines could be transferred to a peat substrate, of which 4,268 seedlings survived and were delivered to Austria in April 2023. The plants delivered to Lieco in mini-containers were transferred to the standard container L15 shortly after delivery. Compared to one-year-old seedlings of the same progeny, the SE plants were less well-rooted and overall weaker when repotted. They were unable to make up for this deficit even after 2 years in the forest nursery. However, the SE plants were vital, showed no particular failures, and especially the roots developed very well. This is a good prerequisite for its planting in the forest. Particularly noticeable was the great heterogeneity of the SE plants, especially the large differences between the individual cell lines. These differences can be attributed to the genetic differences of the cell lines (each cell line is a single clone) or the last steps in the transfer of the plants from the nutrient medium to the peat substrate. Better coordination between the SE laboratory and the forest nursery could help to provide more uniform plants in container production in the future. A small part of the SE plants was subjected to a drought stress experiment in the summer of 2023. The results of the experiment confirm the high genetic variation in the drought tolerance of the SE plants with regard to their effect on the efficiency of the photosystem. For the first time, the experiment was able to show that cell lines descended from origins whose old trees had been characterized as particularly drought-resistant in preliminary studies also showed less pronounced stress reactions in the climate chamber experiment, while others that had proven to be particularly vigorous in long-term cultivation experiments were more affected by the drought. Under well-watered conditions, heritability remained constantly high, indicating strong genetic contributions. Under drought stress, heritability initially increased but then decreased sharply with progressing stress, indicating the increasing dominance of environmental influences. As planned, three experimental plots were established with the SE plants and the seedlings grown in parallel in the spring of 2025. The experimental plots cover a wide range of site conditions, from the edge of the climatic suitability in the Wienerwald at 400m altitude up to 1300m in Kalwang. The variation in site conditions is a good basis for assessing the suitability of the SE plants under different climate scenarios. To assess extreme events and their possible effects on the development of the spruces, each experimental plot was equipped with simple climate stations.

3. Ziele

Das langfristige Ziel des hier abgeschlossenen Forschungsprojekt ist eine Verkürzung der Umtriebszeiten und Erhöhung der Stabilität mitteleuropäischer Fichtenbestände durch Einsatz von genetisch verbesserten Forstpflanzen. Eine höhere Produktivität und verkürzte Umtriebszeiten führen zu einer Risikominimierung gegenüber Kalamitäten und zur Möglichkeit auf geringeren Anbauflächen eine zumindest gleichbleibende bzw. sogar gesteigerte Holzmenge zu produzieren. Zur Erreichung dieses Zieles verfolgt das Projekt die folgenden Teilziele:

- 1) Vermehrung von Saatgut getesteter mitteleuropäischer Fichtenklone durch somatische Embryogenese
- 2) Entwicklung einer Anschlusstechnologie, um die bei der Fa. SWETREE vermehrten Pflanzen in ein für mitteleuropäische Standorte geeignetes Pflanzensortiment (Alter/Größe) zu überführen
- 3) Prüfung einer großen Zahl geeigneter Zelllinien auf Wuchsleistung und Trockenstresstoleranz
- 4) Anbau von 3-5 Versuchsflächen zur Erprobung und Demonstration der gewonnenen Forstpflanzen und des Waldbausystems

4. Saatgutauswahl

In Vorbereitung des Projektes wurden von BFW, LIECO und Mayr-Melnhof-Forst bereits im Herbst 2018 aufgrund der vorliegenden Vollmast, geeignete Klone auf BFW-Versuchsflächen beerntet. Dabei handelte es sich um zwei Samenquellen:

1. **Einzelbaumnachkommenschaften ausgelesener wüchsiger Klone einer Klonprüfung**
2. **Einzelbaumnachkommenschaften ausgewählter Herkünfte eines Herkunftsversuches, die in vorangegangenen Projekten auf ihre Trockenstressresistenz getestet wurden.**

Zu 1) Der **Fichtenklonversuch Klagenbach/Hirzybachgraben** wurde im Jahr 1984 in Zusammenarbeit zwischen dem BFW und dem Forstbetrieb Mayr-Melnhof angelegt. Die Klone waren zuvor vom BFW als Stecklinge vermehrt worden. Insgesamt wurden auf der Fläche 1047 Fichtenstecklingen von 265 Klonen verschiedenster Herkünfte aufgeforstet. Die Herkünfte selbst stammen aus ganz Europa und wurden vorher für die Anlage der Fichtenherkunftsversuchsserie 1978 angezogen (siehe Kapeller et al. 2012). Der Versuch wurde wissenschaftlich vom BFW betreut und regelmäßig gemessen. Die forstliche Betreuung wurde vom Forstbetrieb Mayr-Melnhof gewährleistet.

Für die Saatguternte im Herbst 2018 wurden Zapfen von 10 verschiedenen Klonen beerntet, über die genaue Messdaten bezüglich Wuchsleistung vorlagen. Die beernteten Klone zeichneten sich durch überdurchschnittliche Wuchsleistung und hohe Überlebensraten aus, der wüchsigste Klon Westerhof (Nr. 80271702) zum Beispiel erreicht nach 40 Jahren (Messung im Jahr 2024) eine durchschnittliche Wuchsleistung von 503 VFM/ha und dabei einen BHD von bis zu 50 cm.

Tabelle 1: Übersicht der im Versuch Klagenbach/Hirzybachgraben beernteten Klone, die Samenmenge der geklengten Samen, die Keimfähigkeit und eine Einschätzung der Produktivität auf Basis vorangegangener Messungen.

Trial type	Code	Provenance/Clone origin	Weight (g)	Germination capacity (%)	Growth performance
Clonal Trial	81/4420	Ma. Lankowitz, Piber (Q14)	22	65	++
Clonal Trial	81/4437	Pfannberg, Mixnitz (R1)	30	85	-

Clonal Trial	80271702	Westerhof (a17)	21	53	+++
Clonal Trial	81/2721	Millstatt (G10)	21	74	++
Clonal Trial	81/4237	Enknach/Neukirchen (V11)	23	78	+++
Clonal Trial	81/4144	Stadtgemeinde Hartberg (Y18)	19	79	++
Clonal Trial	81/4149	Stadtgemeinde Hartberg (Y18)	14	72	++
Clonal Trial	81/4016	Wisla (d2)	18	85	++
Clonal Trial	81/4450	Pfannberg, Abt. 2e1 (R9)	13	40	-
Clonal Trial	81/2452	Trofaiach, Gössgraben (D19)	29	83	++

Zu 2. Der **Herkunftsversuch Porrau** wurde im Jahr 1978 vom BFW auf Flächen des Forstbetriebs Schönborn im Weinviertel im Rahmen der Fichtenherkunftsversuchsserie 1978 ((siehe Kapeller et al. 2012, Schueler et al. 2021)) angelegt. Insgesamt wurden in der Fichtenherkunftsversuchsserie 1978 42 Versuchsflächen auf einer Vielzahl von Standorten in ganz Österreich angelegt. Die am höchsten gelegenen Standorte befinden sich in Tirol auf über 1600m. Der Versuch Porrau befindet sich dagegen deutlich außerhalb des natürlichen Vorkommens der Fichte und ist diejenige Versuchsfläche, welche die höchste Jahresmitteltemperaturen und die geringsten Niederschläge aufweist. Aufgrund dieser standörtlichen Eigenschaften wurde die Fläche im Jahr 2007 ausgewählt, um die genetische Variation der Trockenresistenz im von FHP und FFG geförderten Projekt Green Heritage zu untersuchen. Auf Basis dieser genetischen Untersuchungen, mit denen erstmals gezeigt werden konnte, dass die Fichte eine hohe genetische Variation in der Trockenstresseignung aufweist (siehe Trujillo-Moya et al. 2018, Schueler et al. 2022), wurden die beiden in den Trockenstressuntersuchungen am besten abgeschnittenen Herkünfte (R6-Hintergams und d14-Tschebelare, Bulgarien) ausgewählt und beerntet. Darüber hinaus drei sehr wüchsigste Herkünfte des Versuches ausgewählt und ebenso beerntet: die polnische Herkunft Istebna, die deutsche Herkunft Burgjoß und die slowakische Herkunft Cierny Balog.

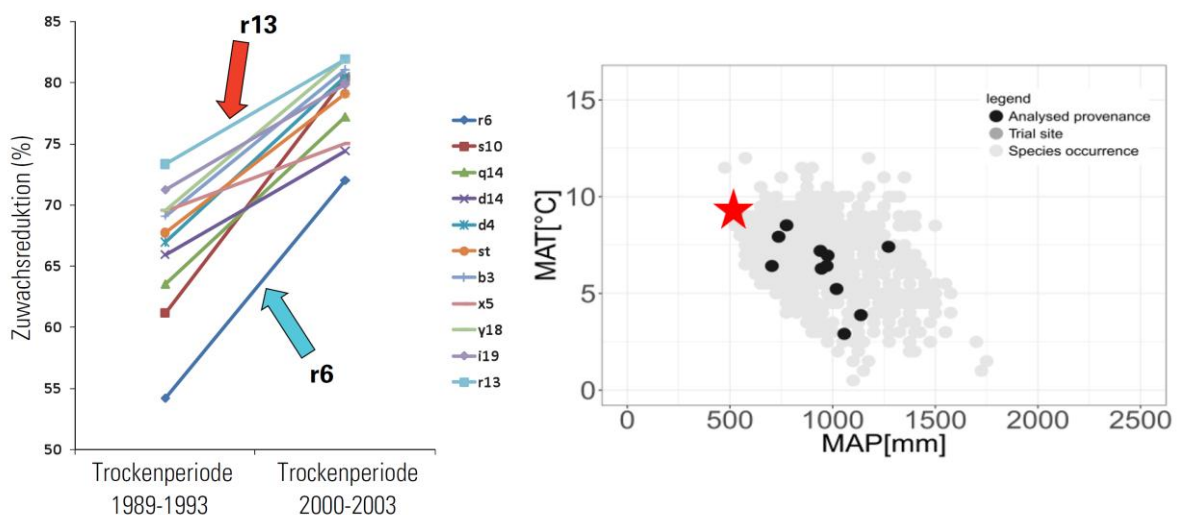


Abbildung 1. Links: Herkunftsunterschiede in der Trockenreaktion zwischen 11 Fichtenherkünften in zwei mehrjährigen Trockenperioden die auf der Versuchsfläche Porrau aufgetreten sind. Die Versuchsfläche Porrau liegt an der warm-trockenen Grenze des natürlichen Verbreitungsgebietes der Fichte (rechts).

Tabelle 2: Übersicht der im Versuch Porrau beernteten Einzelbäume, die Samenmenge der geklengten Samen, die Keimfähigkeit und eine Einschätzung der Produktivität und Trockenresistenz auf Basis vorangegangener Messungen und Untersuchungen.

Trial type	Code	Provenance / origin	Clone	Weight	Germination capacity	Growth performance	Drought sensitivity
Provenance test	R6	Hintergams		159	10	-	+++
Provenance test	R6	Hintergams		144	33	-	+++
Provenance test	a16	Burgjoß		357	76	+++	-
Provenance test	a16	Burgjoß		209	80	+++	-
Provenance test	a16	Burgjoß		98	79	+++	-
Provenance test	a16	Burgjoß		149	64	+++	-
Provenance test	d14	Tschbelare Bulgaria		148	64	-	+++
Provenance test	d14	Tschbelare Bulgaria		182	67	-	+++
Provenance test	d4	Istebna		223	73	+++	-
Provenance test	d4	Istebna			39	+++	-
Provenance test	d14	Tschebelare		183	65	-	+++
Provenance test	d14	Tschebelare		121	61	-	+++
Provenance test	b8	Ciorny Balog		277	62	++	-
Provenance test	b8	Ciorny Balog		230	80	++	-

Nach der Samenernte der Bäume im Herbst 2018 wurden die Zapfen einzelbaumweise geklengt und ans BFW überführt. Im Saatgutlabor des BFW wurden Keimfähigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Einige, als besonders wertvoll eingeschätzte Klone bzw. Herkünfte wiesen nur geringe Keimfähigkeiten auf (z.B. Herkunft R6 Hintergams). Das Fichtensaatgut wurde am BFW gelagert und anschließend als Basis für die somatische Embryogenese und die Anzucht von Sämlingen bereitgestellt.

5. Produktion der SE-Pflanzen

Die Produktion der SE-Pflanzen erfolgte beim Projektpartner SweTree Technologies AB in Umea, Schweden. Ziel der Vermehrung und der mit SweTree vereinbarten Kooperation war die Produktion von mittels somatischer Embryogenese vermehrten Pflanzen aus 20-30 initiierten Zelllinien, zum Beispiel von je 300 Pflanzen von 5 Zelllinien aus 4 Nachkommenschaften. Aufgrund der zu erwartenden großen Unterschiede im Erfolg der Initiierung der Zelllinien, wurden keine festen Anzahl Nachkommen je Zelllinie und Nachkommenschaft vereinbart. Darüber hinaus sollten die 50-60 vielversprechendsten Zelllinien von 5-6 Nachkommenschaft bei SweTree kryokonserviert werden.

Vor der Anzucht wurden aus allen vorhandenen Einzelbaumnachkommenschaften (Tabelle 1 und 2) 10 Nachkommenschaften ausgewählt, die unbedingt vermehrt werden sollten. Da die Erfahrungen mit der somatischen Embryogenese zeigen, dass es große Unterschiede im Erfolg der somatischen Embryogenese zwischen Herkünften und Klone gibt, wurden zwei weitere Nachkommenschaften als Ersatz vorgesehen (Tabelle 3)

Tabelle 3: Liste der zur somatischen Embryogenese vorgesehenen Einzelbaumnachkommenschaften aus dem Herkunftsversuch Porrau und dem Klonversuch Klagenbach/Hirzybachgraben.

ID	Trial type	Code	Provenance/Clone origin	Priority
AT-CT-1	Clonal Trial	81/4437	Pfannberg, Mixnitz (R1)	2nd Priority
AT-CT-7	Clonal Trial	80271702	Westerhof (a17)	1st Priority
AT-CT-2	Clonal Trial	81/2721	Millstatt (G10)	1st Priority
AT-CT-3	Clonal Trial	81/4237	Enknach/Neukirchen (V11)	1st Priority
AT-CT-4	Clonal Trial	81/4149	Stadtgemeinde Hartberg (Y18)	1st Priority

AT-CT-5	Clonal Trial	81/4016	Wisla (d2)	1st Priority
AT-CT-6	Clonal Trial	81/2452	Trofaiach, Gössgraben (D19)	2nd Priority
AT-PT-1	Provenance test	R6	Hintergams	1st Priority
AT-PT-2	Provenance test	A16	Burgioiß	1st Priority
AT-PT-3	Provenance test	D14	Tschbelare Bulgaria	1st Priority
AT-PT-4	Provenance test	D4	Istebna	1st Priority
AT-PT-5	Provenance test	B8	Ciorny Balog	1st Priority

Initiierung der Embryogenese

Der Prozess der somatischen Embryogenese umfasst mehrere Stufen, beginnend mit der Exzision von zygotischen Embryonen aus Samen. Darauf folgt die Proliferation (Vermehrung) des embryogenen Gewebes, die Reifung somatischer Embryonen, die Keimung und die Etablierung von Mikropflanzen

Die Initiierung startete im Juni 2021. Für die Initiierung der Embryogenese konnten 1805 Embryonen aus den zur Verfügung gestellten Samen der 10 Nachkommenschaften isoliert werden, wobei die Anzahl der Embryos zwischen 110 und 300 Embryonen schwankte. Nach der Isolation wurden die Zelllinien auf geeigneten Nährmedien zur Vermehrung gebracht. Auch hier variierte die Vermehrungsrate stark zwischen den Nachkommenschaften: zwischen 2,3% und 13% der isolierten Zelllinien konnten zur Vermehrung gebracht werden, das sind über alle Nachkommenschaften 6,8% und in Summe 122 Zelllinien.

Für die beiden als besonders wertvoll eingeschätzten Nachkommenschaften AT-CT-7 (wüchsigster Klon im Klonversuch) und AT-PT-1 (Herkunft mit bester Trockenresistenz) konnten nur vergleichsweise wenige Zelllinien etabliert werden, daher wurde eine zusätzliche Embryoisolation und Initiierung im August 2021 durchgeführt.

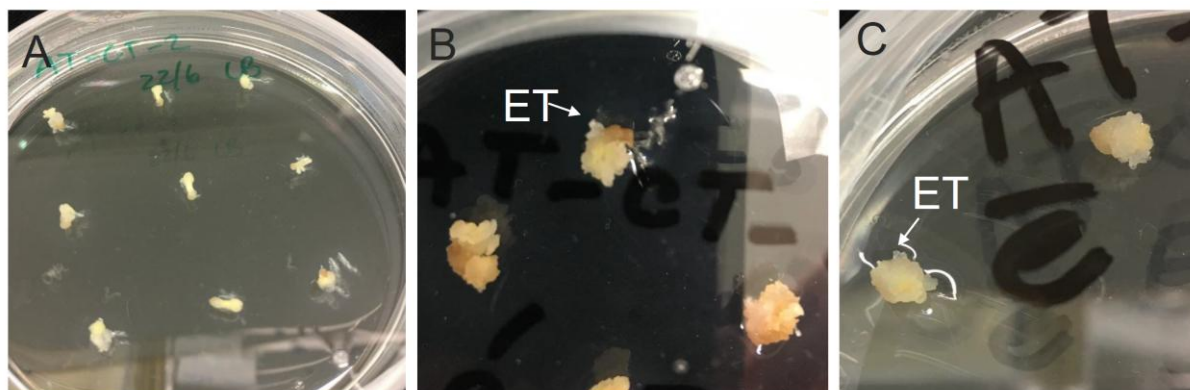


Abbildung 2. Die ersten Anzeichen der Initiierung von embryogenem Gewebe. (A) Isolierte Embryonen auf Initiierungsmedium. Die Embryonen beginnen anzuschwellen und entwickeln Kallusgewebe und/oder embryogenes Gewebe. (B-C) Vergrößerte Aufnahmen von isolierten Embryonen auf Initiierungsmedium, die erste Anzeichen der Entwicklung von embryogenem Gewebe zeigen. ET = Embryogenes Gewebe.

Tabelle 4: Erfolg der Embryoisolation und Initiierung auf Nährmedium.

ID	Germination capacity	Growth performance	Drought sensitivity	Isolated embryos	Number of isolated cell lines	% isolated cell lines	Selected for cryo preservation
AT-CT-2	74	++		130	3	2.3	Back-up
AT-CT-3	78	+++		197	8	4.1	Back-up
AT-CT-4	72	++		144	11	7.6	Selected
AT-CT-5	85	++		268	35	13.1	Back-up
AT-CT-7	53	+++		180	8	4.4	Selected

AT-PT-1	33	-	Best drought resistant provenance	142	9	6.3	Selected
AT-PT-2	80	+++		296	13	4.4	Selected
AT-PT-3	67	-	Bulgarian provenance with good drought performance	107	10	9.3	Selected
AT-PT-4	73	+++		205	21	10.2	Selected
AT-PT-5	80	++		136	4	2.9	Throw
Total				1805	122	6.8	

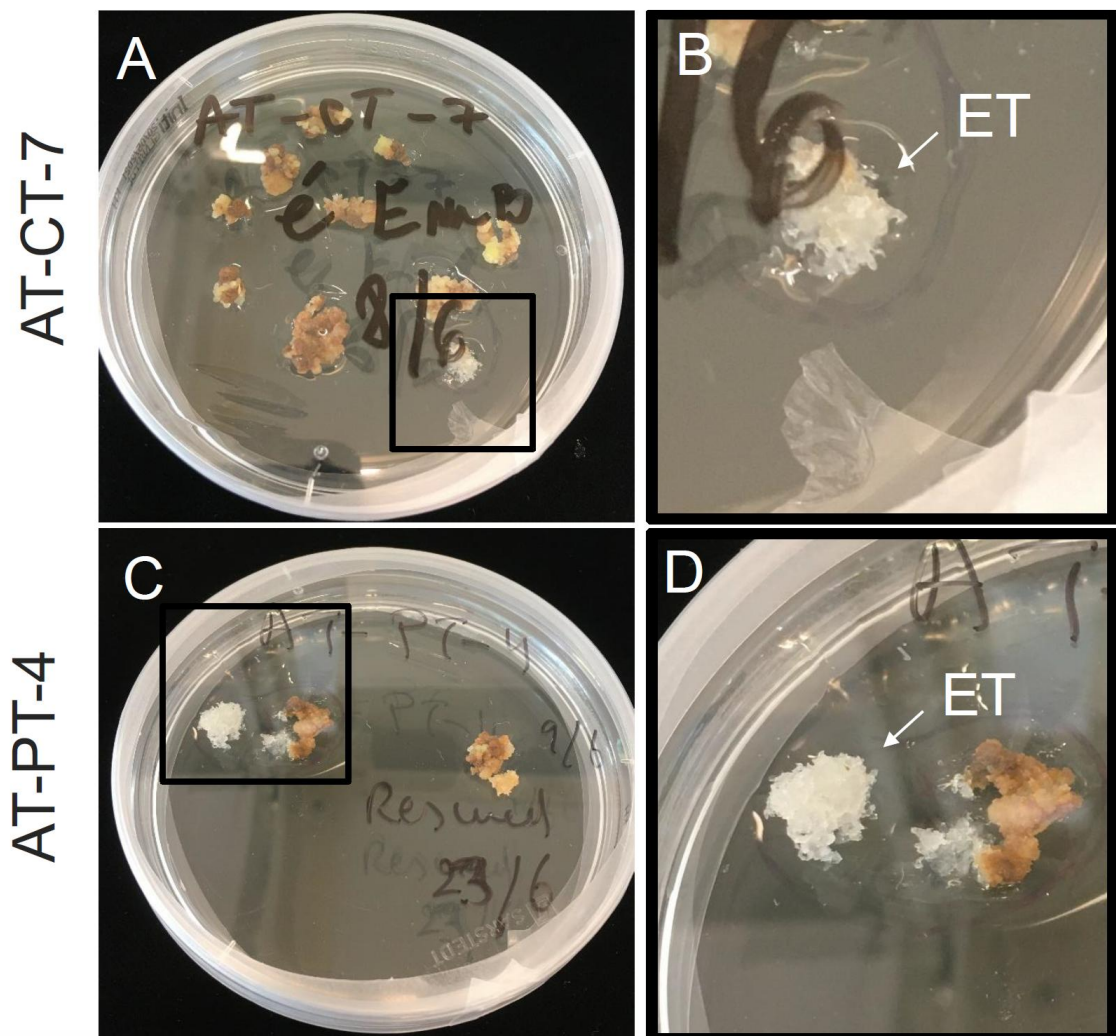


Abbildung 3. A und C - isoliertes embryogenes Gewebe von Zelllinien der Nachkommenschaften AT-PT-4 und AT-CT-7, welches begonnen hat sich zu vermehren. B und D - vergrößerter Bereich von A und C, angezeigt durch das schwarze Quadrat. ET = Embryogenes Gewebe.

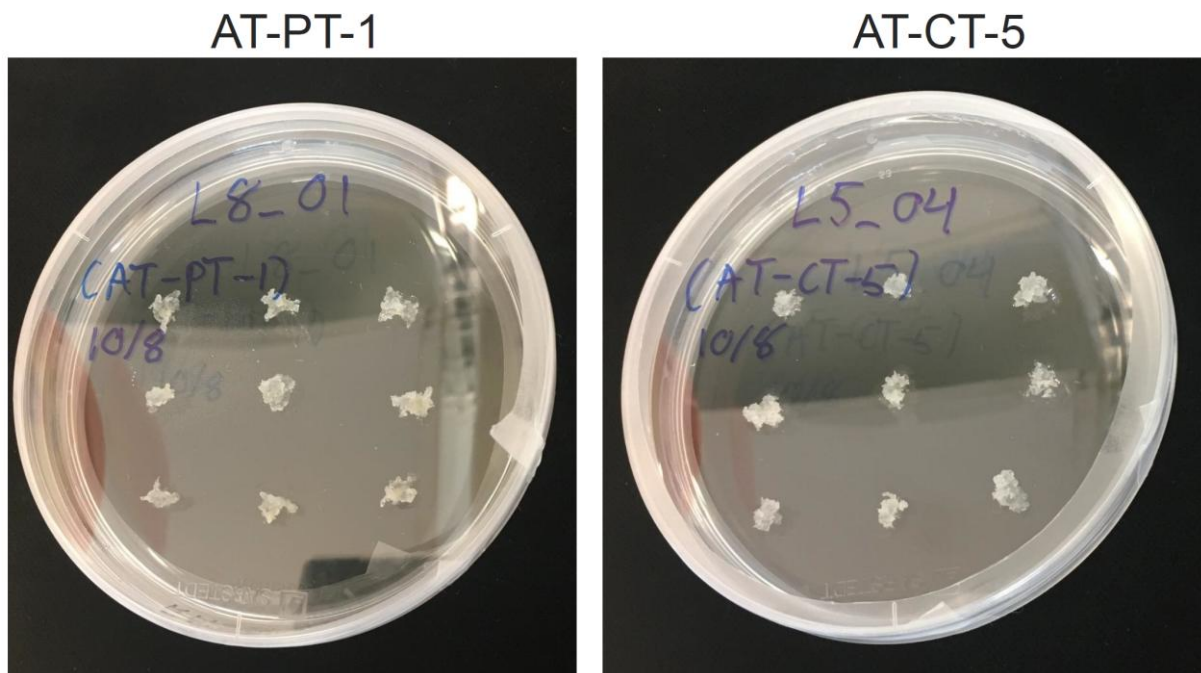


Abbildung 4. Isoliertes embryogenes Gewebe/Zelllinie, dass nach der Initiierungsphase auf Proliferationsplatten übertragen wurde. Die Zelllinien müssen für die spätere Kryokonservierung vermehrt werden. In diesem Stadium wurde dem embryogenen Gewebe bzw. der Zelllinie eine eindeutige ID vergeben (in diesem Fall L8_01 und L5_04).

Tabelle 5: Erfolg der Embryoisolation und Initiierung auf Nährmedium.

ID	Cell lines cryopreserved	Cell lines selected to be evaluated	Cell lines evaluated	Cell lines produced many/interm. number of embryos	Additional cell lines produced few embryos	Good cell lines
AT-CT-4	10	11	11	4	3	3
AT-CT-7	10	8	7	4	0	3
AT-PT-1	12	9	9	6	1	6
AT-PT-2	12	0	0	0	0	0
AT-PT-3	9	10	9	5	2	6
AT-PT-4	20	12	11	8	0	4
Total	73	50	47	27	6	22

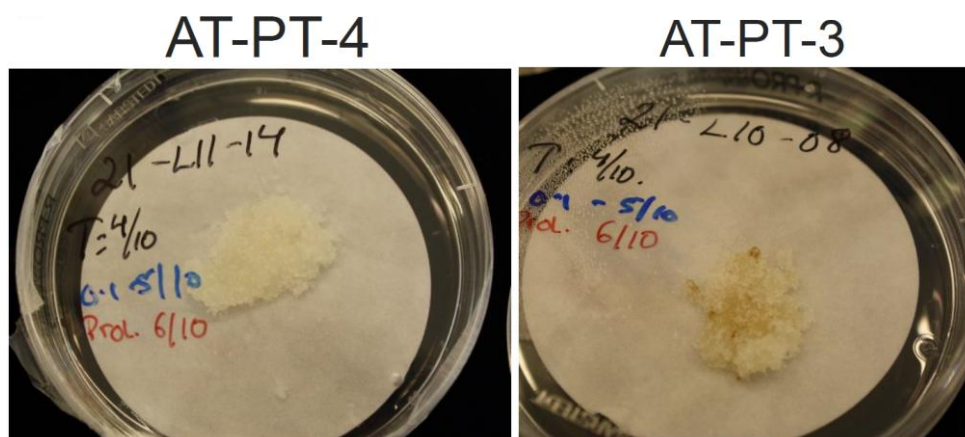


Abbildung 5. Test-Auftauen von 2 kryokonservierten Zelllinien. Nicht alle Zelllinien sind lagerfähig und auftaufähig in der Kryokonservierung. Das Testauftauen hat ergeben, dass ca. 79% der in der Kryokonservierung eingelagerten Zelllinien überleben.

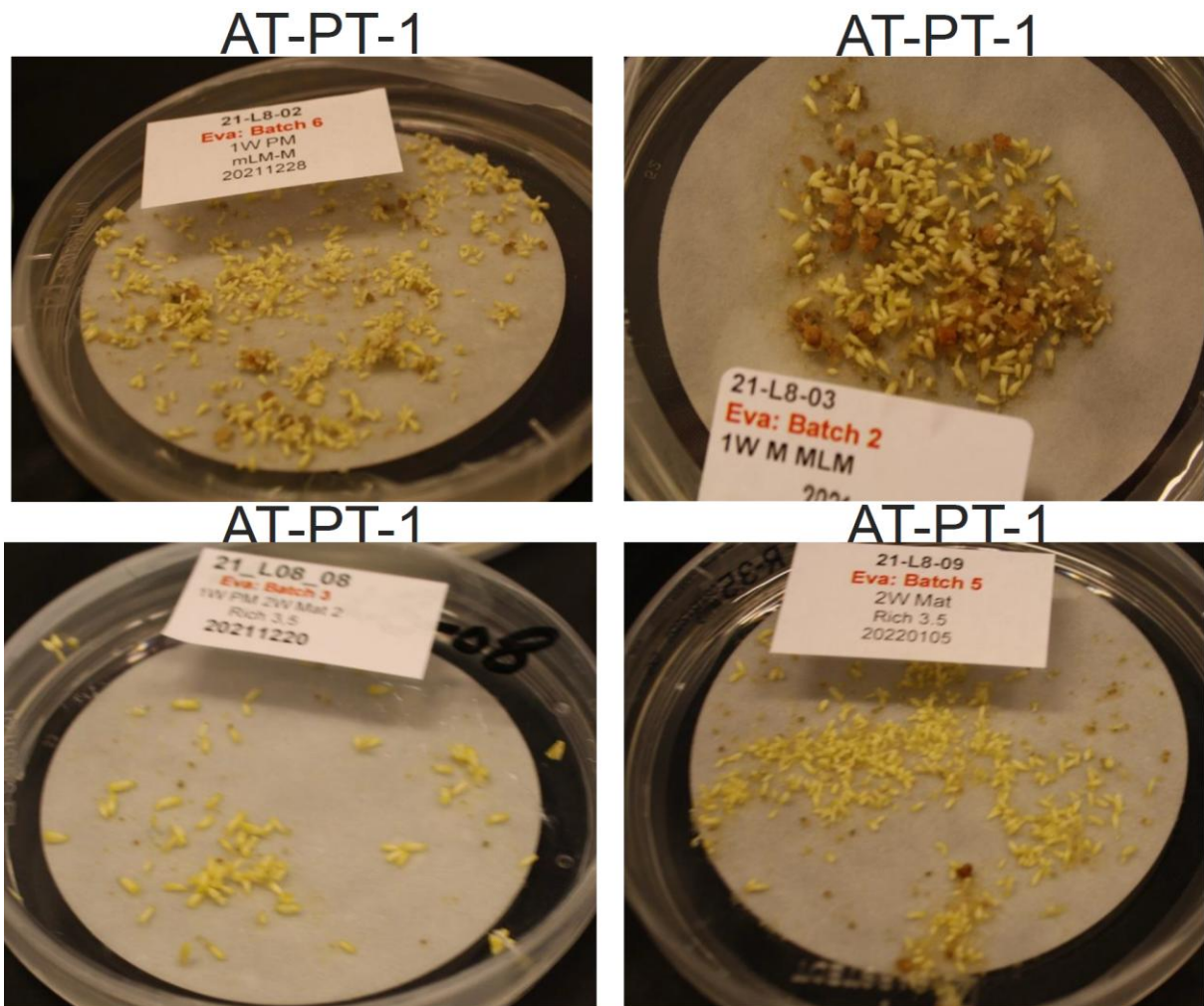


Abbildung 6. Reifung der vermehrten Embryonen der ausgewählten Zelllinien

Kryokonservierung

Auf Basis der Ergebnisse der Initiierung wurden 62 Zelllinien aus den sechs ausgewählten Nachkommenschaften (siehe Tabelle 4) für die Kryokonservierung ausgewählt. Aus der zweiten Initiierung der Nachkommenschaften CT-7 und PT-1 konnten weitere 5 Zelllinien gewonnen werden. Zudem wurde die Auswahl durch sechs zusätzliche Initiierungen von PT-4 ergänzt. Gleichzeitig sind je eine Zelllinie der Nachkommenschaften von CT-4 und PT-3 ausgefallen, so dass am Ende insgesamt 73 Zelllinien in die Kryokonservierung geschickt wurden und für die Weitervermehrung weiter evaluiert wurden. Zur Evaluierung gehört u.a. eine Test-Auftauen, um die Lager- und Wiederauftaufähigkeit der Zelllinien zu überprüfen. Zudem wurde die weitere Vermehrungsfähigkeit überprüft.

Evaluierung

Für die vollständige Evaluierung wurden fünf Nachkommenschaften mit insgesamt 50 Zelllinien ausgewählt (Tabelle 5). Schließlich wurden 47 Zelllinien evaluiert, wobei sich drei Zelllinien nicht in der Suspensionskultur etablieren konnten. 33 Zelllinien produzierten Embryonen unterschiedlicher Qualität, das entspricht 70%. Von diesen 33 Zelllinien produzieren 27 Zelllinien (57%) eine hohe bis eine mittlere Anzahl an Embryonen. 6 Zelllinien (13%) produzieren dagegen nur wenige Embryonen produziert. Daher wurden 22 Zelllinien (47%) aufgrund der Embryonenmorphologie und der Produktionskapazität als gute Linien eingestuft. Auf dieser Basis wurden Embryonen aus den 22 guten Zelllinien aller fünf Familien sowie Embryonen aus 7 einigen der qualitativ minderwertigeren Zelllinien zur Keimung weiterverarbeitet werden.

Keimung und Pflanzenproduktion

Insgesamt wurden schlussendlich 13.819 getrocknete Embryonen aus den 29 Zelllinien für die weitere Keimung verwendet (Abbildung 7). Von diesen Keimlingen konnten 12.109 in Minicontainer mit einem Torfsubstrat transferiert werden (Abbildung 8). Bis zum November 2022 hatten sich 4.765 Pflanzen etabliert, bis zum Februar 2023 haben davon 4268 Pflanzen überlebt. Die Anzahl an Pflanzen pro Zelllinien die sich bis Februar im Torf etabliert hatten und überlebt habe schwankte beträchtlich zwischen 4 und 386 (Tabelle 6).

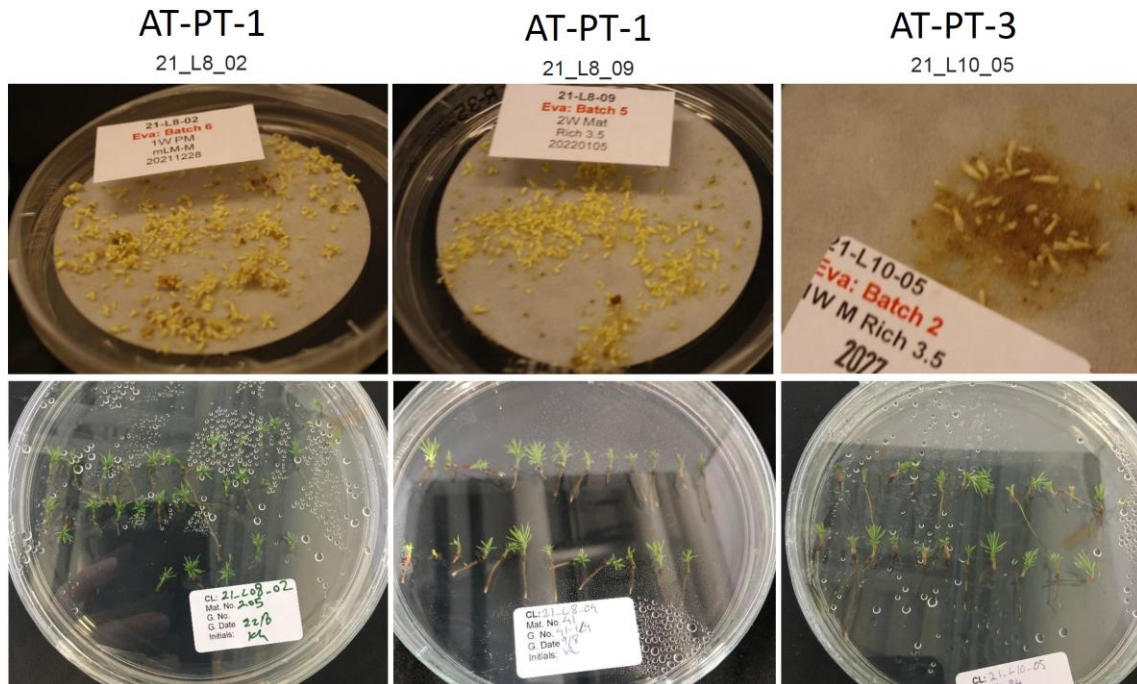
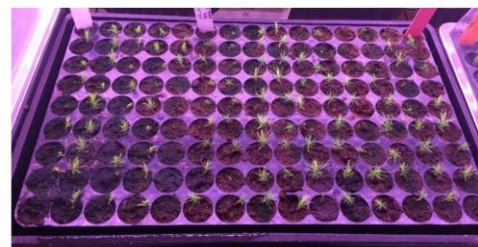


Abbildung 7. Reifung der vermehrten Embryonen der ausgewählten Zelllinien und deren Keimung nach Übertragung in das Nährmedium.



HIKO V-13
LxWxH (mm): 352x216x50
No. cells: 135
Cells/m²: 1776
Volume/cell (cc) 13



Acclimatization



Plant establishment and growth



Plant establishment and growth

Abbildung 8. Transplantation der gekeimten Pflanzen in Minicontainer mit Torfsubstrat im Oktober/November 2022.

Tabelle 6: Übersicht über die Anzahl der produzierten Pflanzen pro Zelllinie und Nachkommenschaft

ID	Cell lines selected for germination	Cell line	Embryos picked for germination	Plants transplanted to peat	Plants established November	Plants established February
AT-CT-4	6	21-L4-03	354	283	115	59
		21-L4-05	437	391	251	303
		21-L4-07	452	440	209	352
		21-L4-09	707	585	296	345
		21-L4-10	726	675	314	301
		21-L4-11	705	653	384	386
AT-CT-7	2	21-L7-05	270	241	49	64
		21-L7-08	520	442	19	18
AT-PT-1	5	21-L8-02	901	796	325	173
		21-L8-03	290	276	120	126
		21-L8-04	50	49	5	4
		21-L8-08	146	105	33	13
		21-L8-09	433	368	154	197
AT-PT-3	8	21-L10-01	747	712	225	182
		21-L10-02	399	335	122	96
		21-L10-03	788	586	135	53
		21-L10-04	903	716	282	298
		21-L10-05	94	93	42	34
		21-L10-07	587	577	222	183
		21-L10-08	341	318	101	72
		21-L10-10	399	341	86	84
AT-PT-4	8	21-L11-02	700	685	351	369
		21-L11-06	332	198	69	51
		21-L11-09	639	612	267	194
		21-L11-14	101	34	11	4
		21-L11-15	562	526	263	126
		21-L11-17	726	700	122	115
		21-L11-18	460	329	167	103
		21-L11-23	47	43	26	63
Total	29		13816	12109	4765	4268

Auslieferung der Mikropflanzen nach Österreich

Die Auslieferung der Pflanzen von SweTree zur Lieco Containerproduktion in Kalwang erfolgte Ende April 2023. Jede Zelllinie wurde in einem bis drei Plattencontainern geliefert, die eindeutig markiert waren. Die Lieferung erfolgte in Kühlcontainern.

Kurzfassung SE-Produktion

- 1.805 Embryonen wurden aus 10 Saatgutpartien isoliert. Beginn Juni 2021
- Die durchschnittliche Initiierungsfrequenz betrug 6,8 %, was zu 122 Zelllinien aus 10 Familien führte.
- 73 Zelllinien aus 6 Familien wurden kryokonserviert.
- 47 % der evaluierten Zelllinien produzierten gute reife Embryonen, wobei 5 Familien und 22 Zelllinien beteiligt waren.
- 13.629 Embryonen keimten aus 5 Familien und 29 Zelllinien.

- 4.765 Keimlinge wurden in Torf aus 5 Familien und 29 Zelllinien etabliert.
- 4.268 Keimlinge überlebten und wurden im April 2023 nach Österreich zur Weiterverarbeitung in Pflanzcontainer des Projektpartners Lieco geliefert

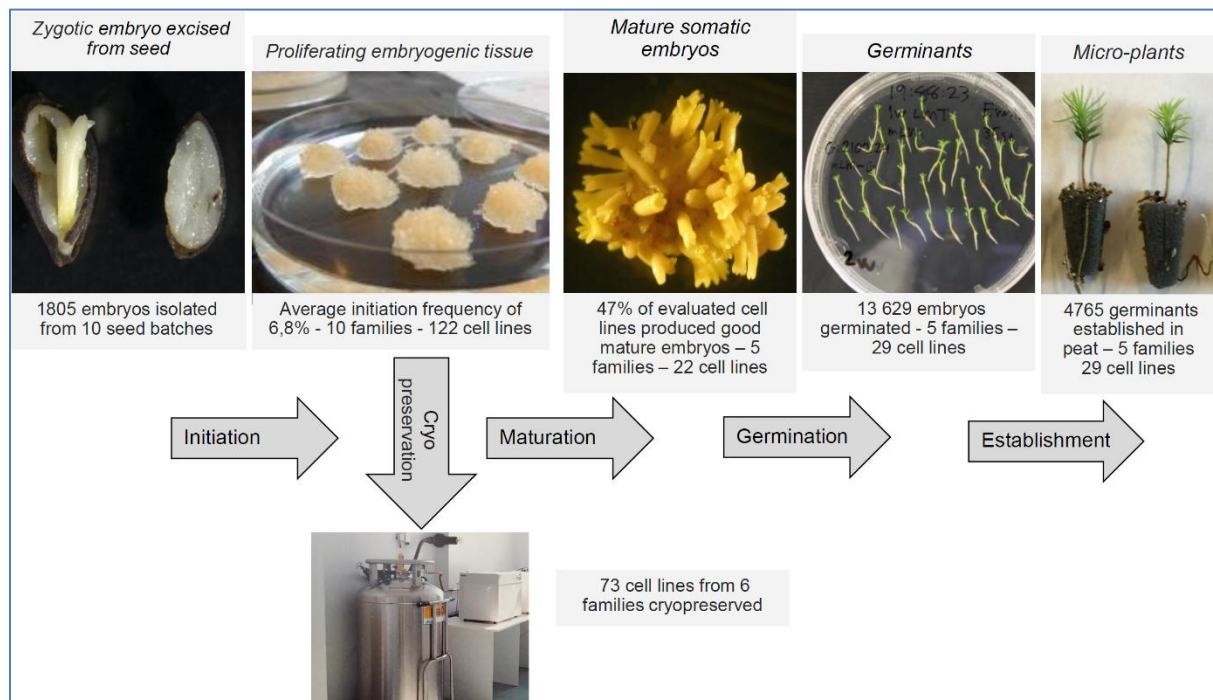


Abbildung 9. Übersicht über den Ablauf der gesamten SE-Produktion bis zur Etablierung der Zelllinien in Torf

6. Vertopfung in Lieco Container und Pflanzenentwicklung

Für die Anlage von Versuchsflächen und die Bereitstellung von Pflanzen für weiterführende Untersuchungen wie die Trockenstresssensitivität sowie zur Etablierung eines Protokolls für den Transfer der in Mikrocontainern angezogenen SE-Pflanzen in das handelsübliche Lieco Containersystem wurden die SE-Pflanzen in den Lieco Forstgarten Kalwang verbracht. Zusätzlich zur Überführung der SE-Pflanzen in Lieco Container produzierte LIECO von demselben Saatgut normale Sämlinge, um das Wuchsverhalten der SE-Pflanzen mit den Standard-Sämlingen zu vergleichen und eine ausreichende Stückzahl für die nachfolgenden Feldtests zur Verfügung zu haben.

Anzucht von Sämlingen für Vergleichsuntersuchungen

Tabelle 7: Übersicht über Nachkommenschaften deren Sämlinge im Forstgarten Kalwang für Vergleichszwecke angezogen wurden.

ID	Klone/Herkunft	Herkunft	Keimfähigkeit	Seehöhe
AT-CT-7	80271702	Westerhof	K % = 53	600-800
AT-CT-4	81/4149	Hartberg	K % = 72	500
AT-PT-1	R6	Hintergams	K % = 33	600-800
AT-PT-2	A 16	Burgjoß	K % = 80	500
AT-PT-3	D14	Tschbelare Bulgaria	K % = 67	500
AT-PT-4	D4	Istebna	K % = 73	500

Produktion von Sämlingen der in den Tabelle 7 aufgeführten sechs Nachkommenschaften. Mit der Anzucht wurde im Sommer 2022 begonnen, um zum Zeitpunkt des Eintreffens der SE-Pflanzen etwa 5-8 cm große Sämlinge zur Verfügung zu haben. Eine ähnliche Größe wurde auch für die SE-Pflanzen erwartet. Die Aussaat erfolgte in L67 Containern im Juli 22'. Im Dezember 22' erfolgte die Einschneigung im Freiland. Im Juni 23' wurden die Pflanzen gemeinsam mit den mittlerweile eingetroffenen SE-Pflanzen in L15 vertopft.

Behandlung der SE-Pflanzen

Die Anlieferung der SE-Pflanzen erfolgte Anfang Mai 2023 im HIKO System 135 mit einem Zellvolumen von nur 13 cm³. Da die Pflanzen für den Sommer zu schwach waren und die Töpfe zu klein, wurden sie bereits im Juni 2023 in Lieco L15 umgetopft. Insgesamt machten die SE-Pflanzen zu diesem Zeitpunkt einen schwachen Eindruck (Abbildung 10, 11), zeigten aber auch eine sehr hohe Variation. Vielfach erschien der Wurzelballen nicht durchwurzelt, der Wurzelaustrieb war schwach bis fehlend, möglicherweise aufgrund einer zu kurzen Überwinterung bzw. zu kurzen Forstphase. Dagegen zeigten die LIECO Sämlinge eine normale Entwicklung und überragten die SE-Pflanzen.



Abbildung 10. Links: Schwache Durchwurzlung der SE-Pflanzen im Juni '23 unmittelbar vor dem Vertopfen. Rechts: Vergleich Pflanzenentwicklung LIECO (links) und SE (rechts), Juni '23. (Fotos: Lieco).

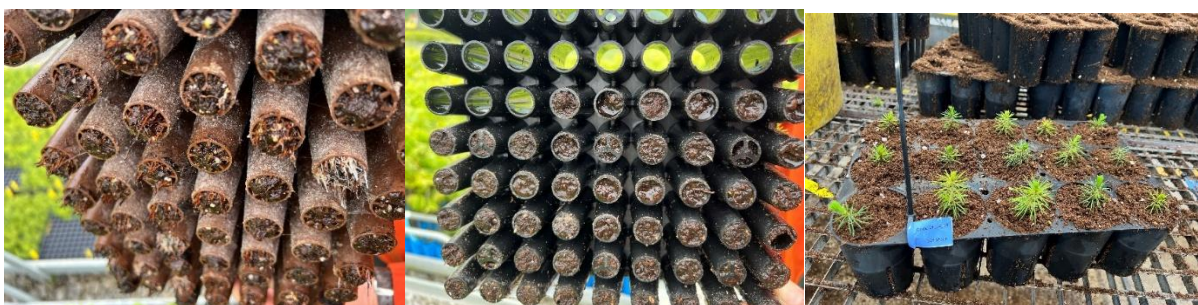


Abbildung 11. Vergleich Wurzelentwicklung und -austrieb im Juni '23 (links: LIECO; Mitte: SE). Rechts: vertopfte SE-Pflanzen im Lieco-System L15, Juni '23. (Fotos: Lieco).

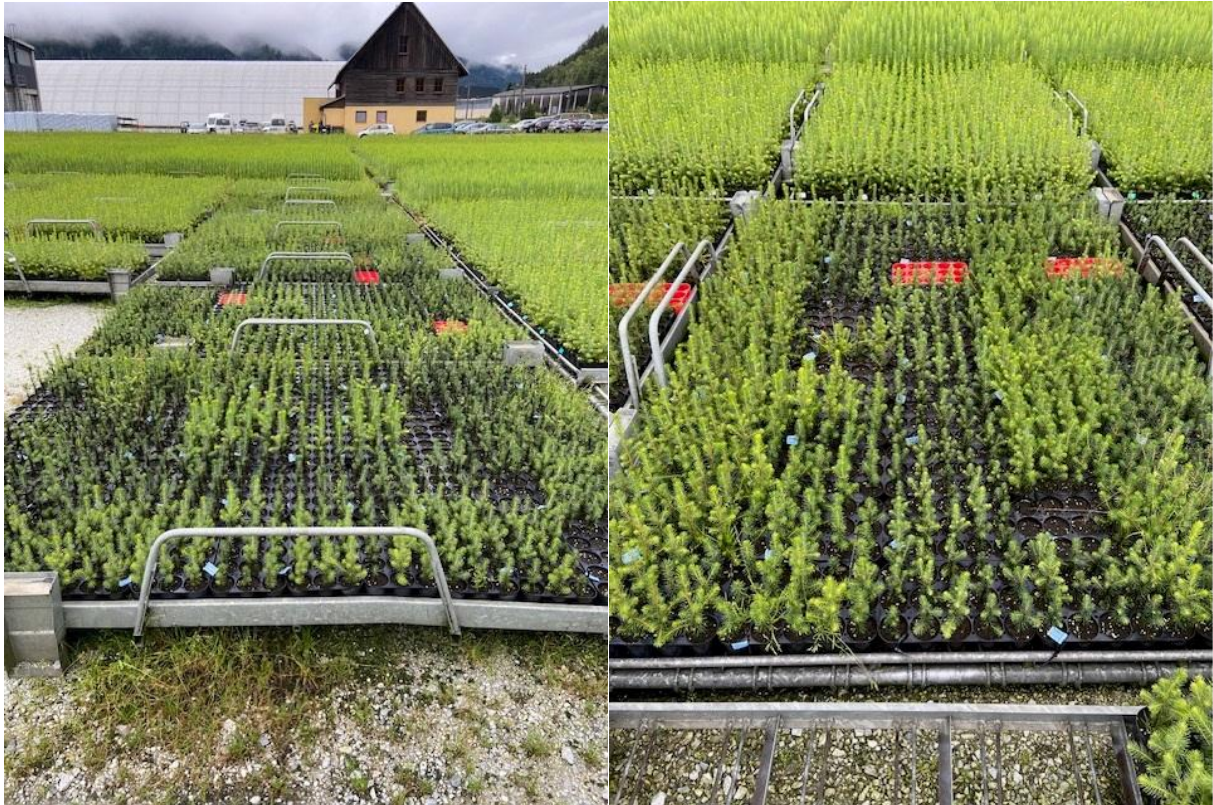


Abbildung 12. Fotos der SE-Pflanzen Im August 2023. Der überwiegende Teil der Pflanzen wirkt gesund. Allerdings fallen die großen Unterschiede zwischen den Zelllinien und teilweise auch innerhalb der Zelllinien auf. Diese sind weitaus größer als zwischen üblichen Sämlingsherkünften. (Fotos: Lieco).



Abbildung 13. Fotos der SE-Pflanzen im Mai 2024. Die SE-Pflanzen haben sich gut entwickelt und sind weiterhin gesund. Allerdings wirken sie weiterhin sehr heterogen. (Fotos: Lieco).

Entwicklung der Sämlinge und SE-Pflanzen im Vergleich

Zur Einschätzung der Vitalität und des Wachstumsverlaufes wurden sowohl die SE-Pflanzen als auch die Sämlinge im Forstgarten zweimal in der Höhe und im Wurzelhalsdurchmesser vermessen: einmal nach dem Ende der ersten Vegetationsperiode in Winter 23/24 (Messabschluss im März 24') und ein zweites Mal nach dem Ende der zweiten Vegetationsperiode im Winter 24/25 (Messabschluss im März 24'). Die Sämlinge wiesen bei beiden Messungen deutlich höhere Pflanzen und einen stärkeren Wurzelhalsdurchmesser auf (Abbildungen 14, 15), sehr wahrscheinlich, aufgrund der Tatsache, dass die Sämlinge bereits bei der Vertopfung gut durchwurzelt und größer waren. Nach dem ersten Jahr (Abbildung 14) erreichten die Sämlinge eine durchschnittliche Höhe von 27 cm und einen Wurzelhalsdurchmesser von 0,47 cm, dagegen erreichten die SE-Pflanzen nur eine mittlere Höhe von 14 cm und einen Durchmesser von 0,26 cm. Nach der zweiten Vegetationsperiode im L15 Container konnten beide Pflanzen ihre Größe nahezu verdoppeln, die Sämlinge erreichten im Mittel 52 cm Höhe, die SE-Pflanzen im Mittel 25 cm (Abbildung 15). Im Hinblick auf das Wurzelwachstum zeigten die SE-Pflanzen eine stärkere Zunahme des Wurzelhalsdurchmesser auf 0,52 cm, während der Durchmesser der Sämlinge nur auf 0,69 cm anstieg. Das deutet darauf hin, dass die im ersten Jahr nur mäßige Durchwurzlung der SE-Pflanzen sich bis zum Ende der 2. Vegetationsperiode deutlich verbessert hat und die Pflanzen zunächst vor allem in ein gutes Wurzelwachstum investiert haben. Auf der anderen Seite ist bei den Sämlingen aufgrund der guten Höhenentwicklung bereits im zweiten Jahre eine Konkurrenz um Licht entstanden, so dass diese stärker in die Höhe gewachsen sind. Diese beiden Entwicklungen zeigen sich auch in der Entwicklung des Höhe-Durchmesser Verhältnisses: zum Ende des ersten Jahres war diese noch ausgeglichen, zum Ende des zweiten Jahres wiesen die Sämlinge ein deutlich höheres H-D Verhältnis auf (Abbildung 17).

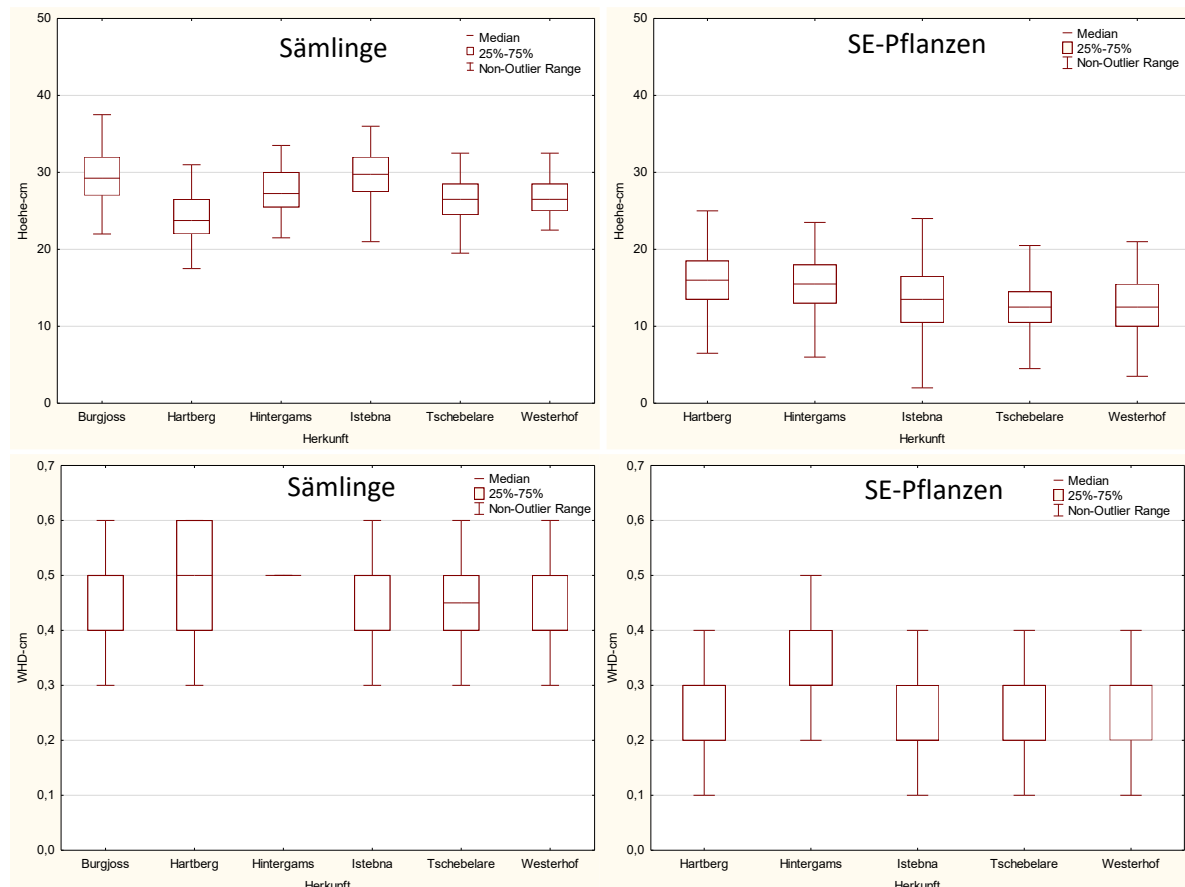


Abbildung 14. Höhe (oben) und Wurzelhalsdurchmesser (unten) der Sämlinge und SE-Pflanzen im März 2024, d.h. eine Vegetationsperiode nach dem Vertopfen.

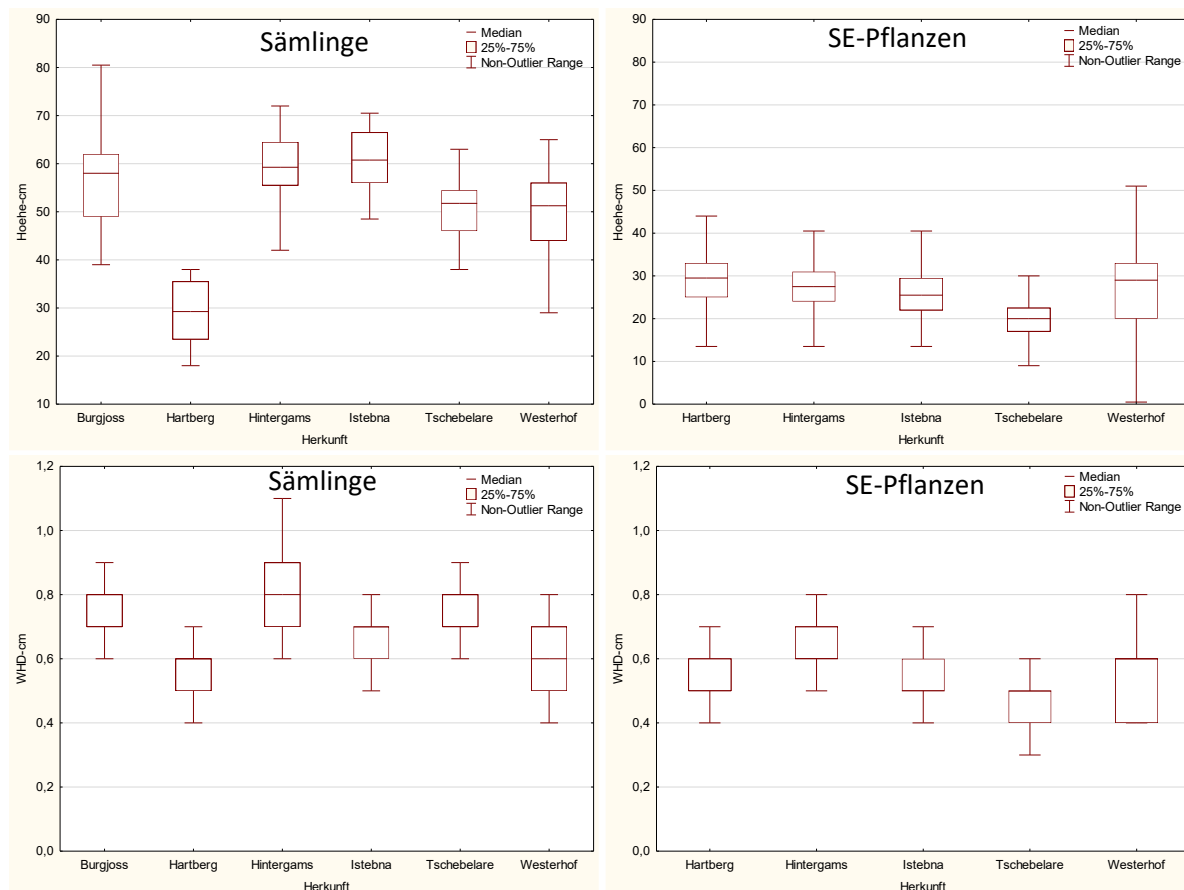


Abbildung 15. Höhe (oben) und Wurzeldurchmesser (unten) der Sämlinge und SE-Pflanzen im März 2025, d.h. zwei Vegetationsperioden nach dem Vertopfen.

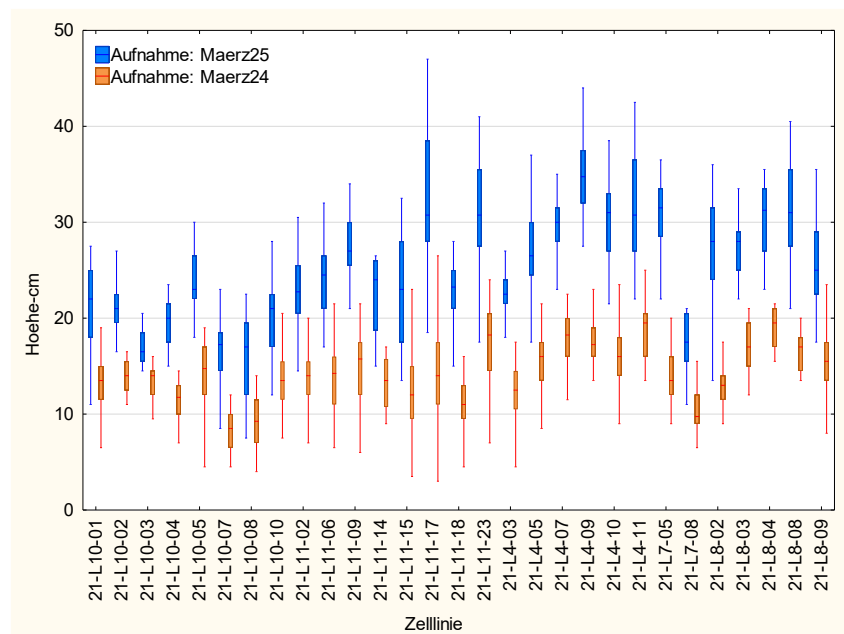


Abbildung 16. Höhe der verschiedenen Zelllinien der SE-Pflanzen im März 2024 und 2025.

Die Sämlinge wiesen insgesamt eine höhere Gleichförmigkeit auf (Abbildung 12), auch wenn die Unterschiede zwischen den Herkünften nach der zweiten Vegetationsperiode leicht zunahm. Auch bei den SE-Pflanzen waren Unterschiede zwischen den Herkünften zu beobachten, die größten Unterschiede fanden sich allerdings zwischen den einzelnen Zelllinien (Abbildung 16). Tendenziell zeigten Zelllinien, die bereits im ersten Jahr ein gutes Wachstum aufwiesen, auch eine bessere

Entwicklung im zweiten Jahr. Das legt nahe, dass der Zeitpunkt der Transplantation im SE-Labor vom Nährmedium in das Torfsubstrat und die Bedingungen der ersten Wochen einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung im Forstgarten spielen. Daher liegt in der Schnittstelle zwischen SE-Labor und Forstgarten noch ein Verbesserungspotential für die Umsetzung der Technologie in größere Stückzahlen.

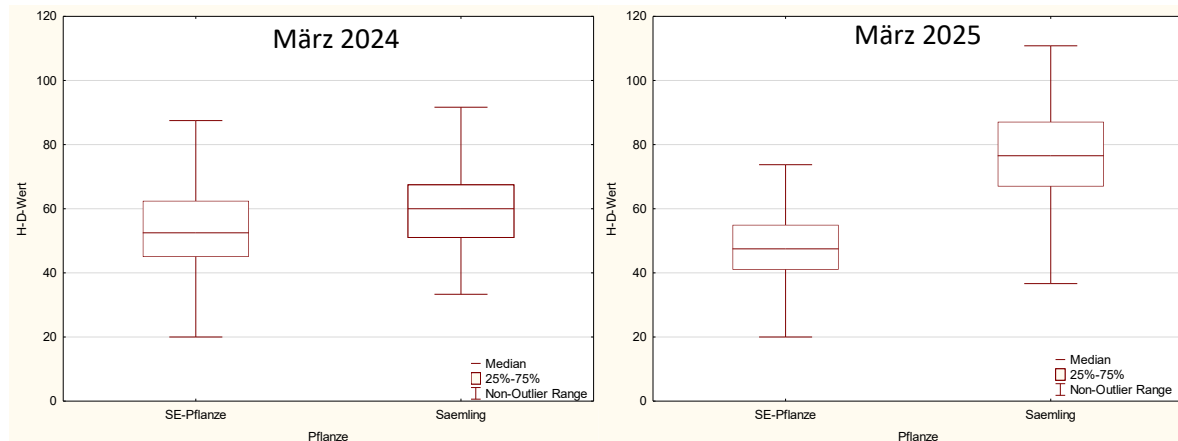


Abbildung 17. Entwicklung des Verhältnisses zwischen Sämlingshöhe und Wurzeldurchmesser (H-D Wert). Nach einem Jahr im Forstgarten weisen Sämlinge und SE-Pflanzen ein vergleichbares H-D Verhältnis auf, im zweiten Jahr sind die Sämlinge dagegen stärker in die Höhe und die SE-Pflanzen stärker in die Dicke gewachsen.

Kurzfassung Vertopfung und Pflanzenentwicklung

Der Transfer der SE-Pflanzen in Minicontainern von Nordschweden nach Österreich im Frühjahr 2023 erlaubte eine erfolgreiche Etablierung der Pflanzen im Standardcontainersystem der Lieco. Im Vergleich mit einjährigen Sämlingen derselben Nachkommenschaft waren die SE-Pflanzen beim Vertopfen jedoch weniger gut durchgewurzelt und insgesamt schwächer. Diesen Rückstand konnten sie auch nach 2 Jahren im Forstgarten nicht aufholen. Allerdings waren die SE-Pflanzen vital, zeigten keine besonderen Ausfälle und insbesondere die Wurzeln entwickelten sich sehr gut, so dass von einer guten Voraussetzung für die Auspflanzung im Wald ausgegangen werden kann. Besonders augenscheinlich war die große Heterogenität der SE-Pflanzen, insbesondere die großen Unterschiede zwischen den einzelnen Zelllinien. Diese Unterschiede können auf die genetischen Unterschiede der Zelllinien (jede Zelllinie ist ein einzelner Klon) oder die letzten Schritte beim Transfer der Pflanzen vom Nährmedium zum Torfsubstrat zurückzuführen sein. Eine bessere Abstimmung zwischen SE-Labor und Forstgarten könnten in Zukunft dazu beitragen, gleichförmigere Pflanzen in der Containerproduktion bereit zu stellen.

7. Trockenstresstests der SE-Pflanzen

Zusätzlich zu den Messungen der SE-Pflanzen im Lieco Forstgarten Kalwang, war es Ziel des vorliegenden Projektes, die Trockenstresssensitivität ausgewählter Herkünfte bzw. Zelllinien zu testen. Dazu sollten insbesondere die im Herkunftsversuch Porrau als besonders trockenstressresistent identifizierten Herkünfte geprüft werden, aber auch die sehr wuchskräftigen Herkünfte aus dem Klonversuch. Eine Prüfung aller Zelllinien konnte aus Kostengründen und aufgrund der dafür nötigen hohen Stückzahlen an Pflanzen, die ja weitestgehend für die Feldversuche vorgesehen waren, nicht durchgeführt werden.



Abbildung 18. Transport der SE-Pflanzen zum PHENOPlant Labor am Vienna Biocenter (links). Einblick in das PHENOPlant Testsystem (rechts).

Der Trockenstressversuch selbst wurde im PHENOPlant Labor des Vienna BioCenters nach einem von BFW und Vienna BioCenter entwickelten Protokoll für Fichtensämlinge (Ahmad et al. 2025) durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden Ende Juli 2023, 8 Container mit je 10 Pflanzen pro Zelllinie (Tabelle 8) vom Forstgarten Kalwang an das Vienna Biocenter (VBC) überführt und in eine kontrollierte Klimakammer gebracht. Die Pflanzen wurden unter Bedingungen von $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD, 60% relativer Luftfeuchtigkeit, 21°C Temperatur und einem 16:8-Stunden-Tag-Nacht-Zyklus gehalten. Nach einer Woche wurden die Pflanzen sorgfältig in größere 1-L-Töpfe umgesetzt, wobei das anfängliche Gewicht des feuchten Bodens für alle Pflanzen auf 333 g standardisiert wurde. Nach der Umsetzung wurden die Pflanzen zur Trockenstress-Experimentieranlage PHENOPlant (Plant Science Facility, VBCF Vienna BioCenter Core Facilities GmbH) gebracht, wo die gleichen Umweltbedingungen aufrechterhalten wurden.

Tabelle 8: Übersicht über die im Trockenstresstest geprüften Zelllinien. Von jeder Zelllinie wurden 10 Pflanzen geprüft.

Herkunft	Trial type	Herkunft	Zelllinie	Bemerkungen
AT-CT-4	Clonal trial	Hartberg (Y18)	21-L4-11	gute Wuchsleistung
AT-CT-4	Clonal trial	Hartberg (Y18)	21-L4-09	gute Wuchsleistung
AT-PT-1	Provenance test	Hintergams (R6)	21-L8-02	beste Trockenresistenz
AT-PT-1	Provenance test	Hintergams (R6)	21-L8-09	beste Trockenresistenz
AT-PT-3	Provenance test	Tschebelare-Bulgarien (d14)	21-L10-07	gute Trockenresistenz
AT-PT-3	Provenance test	Tschebelare-Bulgarien (d14)	21-L10-04	gute Trockenresistenz
AT-PT-4	Provenance test	Istebna-Polen (d4)	21-L11-02	beste Wuchsleistung
AT-PT-4	Provenance test	Istebna-Polen (d4)	21-L11-09	beste Wuchsleistung

Simulation der Trockenbehandlung und Phänotypisierung

Zur Simulation von Trockenstress wurde die Hälfte der Pflanzen jeder Zelllinie ($n=5$) zufällig einer Trockenbehandlung zugewiesen, während die restlichen Pflanzen eine gut bewässerte (Kontroll-) Behandlung erhielten. Das Topfgewicht für trockenbehandelte Pflanzen wurde schrittweise auf 155 g reduziert, während das Topfgewicht für gut bewässerte Pflanzen bei 400 g gehalten wurde (Abbildung 19). Die Pflanzen wurden zweimal täglich über das automatisierte Wiege- und Bewässerungssystem von PHENOPlant bewässert, um diese Zielgewichte während des gesamten Experiments

aufrechtzuerhalten. Die Phänotypisierung unter Trockenbedingungen wurde über 18 Tage mit einem PSI-Pflanzenscreen-Modulsystem (Photo System Instruments, Drasov, Tschechien) in der PHENOPlant-Anlage durchgeführt. Die Pflanzen wurden automatisch in die Bildgebungsplattform transportiert, wo jede Pflanze von oben mit einem CHLF-Bildgebungssensor abgebildet wurde. Am Ende des Experiments wurde das Trockengewicht des Bodens durch Trocknen des Bodens bei 70°C für 48 Stunden bestimmt, um sicherzustellen, dass die anfänglichen Bodengewichte zwischen den Zelllinien vergleichbar waren.

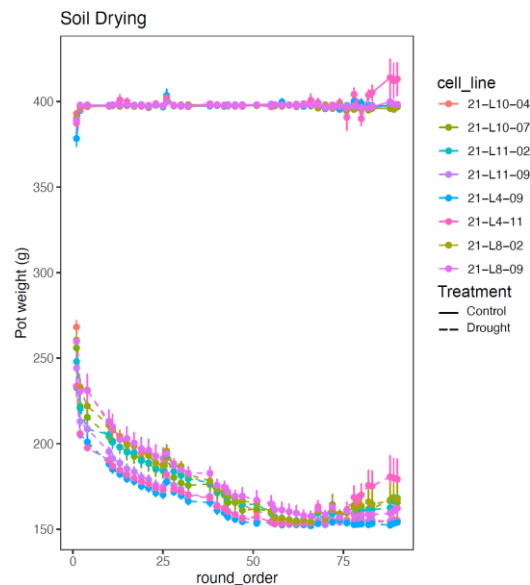


Abbildung 19. Fortschreiten der Trockenheit (Topfgewicht) während des 18-tägigen Trockenstress-Experiments. Das Gewicht der Töpfe wurde durch das Ausbleiben der Bewässerung auf 155 g reduziert und während des Experiments auf diesem Niveau gehalten

Schätzung der klonalen Wiederholbarkeit/Breit-Sinn-Erblichkeit (H^2)

Um die klonale Repeatability (H^2) des F_v/F_m – Verhältnisses als Merkmal für Effizienz des Photosystems unters Trockenstressbedingungen auf tagespezifischer Basis zu schätzen, wurde ein lineares gemischtes Modell unter Verwendung des lme4-Pakets in R implementiert. Die Analyse wurde separat für gut bewässerte (WW) und Trockenstress (WS) Behandlungen sowie für den kombinierten Datensatz durchgeführt, wobei die Behandlung als fester Effekt einbezogen wurde, um Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen zu kontrollieren. Für jeden Tag wurde ein vollständiges gemischtes Modell angepasst, wobei F_v/F_m als abhängige Variable, die relative Bodenfeuchtigkeit als fester Kovariable und der Klon als zufällige Variable verwendet wurden. Wenn die Behandlung als fester Effekt einbezogen wurde, berücksichtigte das Modell die Variabilität aufgrund von Unterschieden zwischen WW- und WS-Bedingungen und isolierte die Variabilität aufgrund von Klonen nach Kontrolle der Behandlungseffekte. Ohne Behandlung im Modell wurde die Variabilität aufgrund der Behandlung in die Residualvarianz einbezogen, was ein breiteres Bild der klonalen Wiederholbarkeit lieferte, das behandlungsbezogene Variabilität einschloss.

Für die behandlungsspezifische Analyse wurden die Daten für WW und WS separat für jeden Tag analysiert. In diesen Fällen wurde die Behandlung nicht in das Modell einbezogen, und das vollständige Modell wurde mit der relativen Bodenfeuchte als fester Effekt und dem Klonnummer als zufälliger Effekt spezifiziert. Varianzkomponenten, einschließlich der Varianz zwischen Klonen und Residualvarianz, wurden mit der VarCorr-Funktion extrahiert. Ein Likelihood-Ratio-Test (LRT) wurde mit der ranova-Funktion durchgeführt, um die Signifikanz des zufälligen Effekts des Klons zu bewerten. Die klonale Repeatability (H^2) wurde als Anteil der Klonvarianz an der gesamten phänotypischen

Varianz (Klonvarianz + Residualvarianz) berechnet. Der Vergleich der H^2 -Schätzungen zwischen WW- und WS-Behandlungen sowie mit und ohne Behandlung als festem Effekt im kombinierten Datensatz lieferte Einblicke in den Einfluss der Behandlung auf die Variabilität und klonale Wiederholbarkeit. Alle Analysen wurden mit dem lme4-Paket in R durchgeführt, wobei die Ergebnisse für jeden Tag und jede Bedingung berichtet wurden.

Ergebnisse

Acht Zelllinien wurden 18 Tage lang Trockenstress ausgesetzt und mittels eines CHLF-Top-View-Bildgebungssensors phänotypisiert. Fünf Merkmale wurden aus den Bildgebungsdaten abgeleitet und für eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) verwendet. Die multivariate Analyse zeigte eine klare Trennung zwischen trockenstressbehandelten und Kontrollpflanzen entlang von PC1, die 81% der beobachteten Variation erklärte (Abbildung 20). Auf der Ebene der Zelllinien zeigte sich ein Gradient, der anzeigt, wie unterschiedlich jede Zelllinie auf Trockenstress im Vergleich zu dem gut bewässerten Kontrollpflanzen reagierte. Beispielsweise waren trockenstressbehandelte Sämlinge von 21-L8-02 (ursprünglich als "beste Trockenresistenz" charakterisiert) und 21-L10-04 (gute Trockenresistenz, Bulgarien) nahe an gut bewässerten Pflanzen auf PC1 positioniert, was auf einen minimalen Trockeneinfluss hindeutet. Im Gegensatz dazu zeigten 21-L4-09 und 21-L4-11, beide aus derselben Herkunft (AT-CT-4), die größte Trennung von gut bewässerten Pflanzen auf PC1, was auf einen starken Trockeneffekt und eine höhere Empfindlichkeit hindeutet. Die Zelllinien 21-L11-09 und 21-L11-02, die ursprünglich als "sehr gut wachsend" beschrieben wurden, waren die nächststärksten von Trockenheit betroffenen. Unterdessen zeigten die Zelllinien 21-L10-07 (bulgarischer Ursprung) und 21-L8-09 (ebenfalls als "beste Trockenresistenz" gekennzeichnet) mittlere Reaktionen, was auf eine moderate Trockenresistenz hindeutet. Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass Zelllinien, die ursprünglich als "gut wachsend" charakterisiert wurden, am stärksten von Trockenheit betroffen waren, während diejenigen, die als "trockenresistent" oder bulgarischen Ursprungs beschrieben wurden, vergleichsweise weniger betroffen waren.

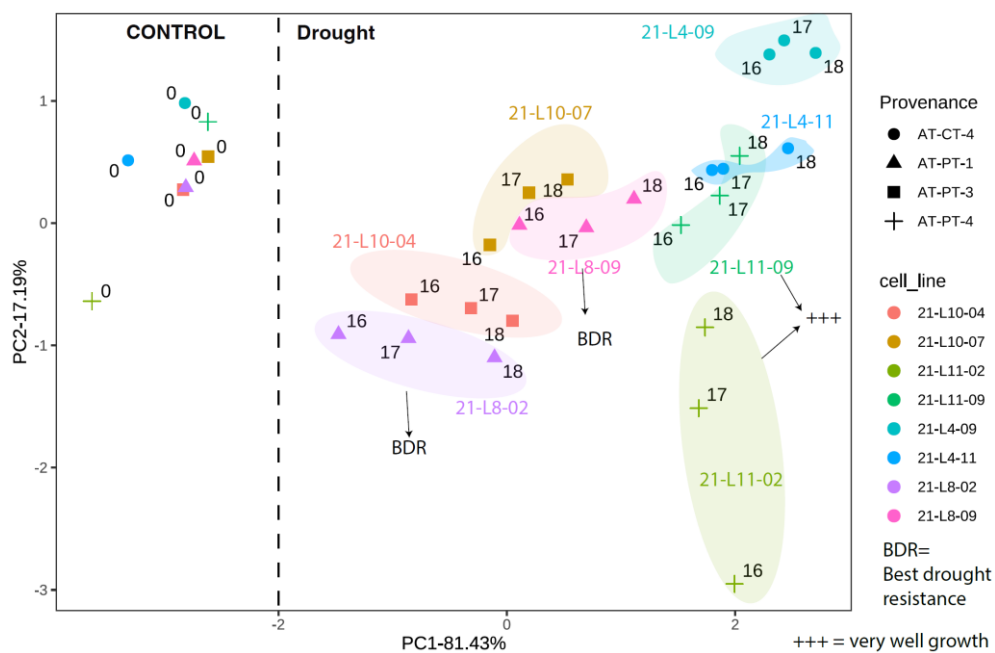


Abbildung 20. Hauptkomponentenanalyse (PCA) basierend auf fünf Merkmalen, die aus der CHLF-Bildgebung abgeleitet wurden und Unterschiede zwischen Zelllinien erfassen. Nur der erste (dargestellt als 0 = Kontrolle) und die letzten vier Zeitpunkte der trockenstressbehandelten Proben werden dargestellt. Jedes Symbol ist ein individueller Zeitpunkt, wie durch die Nummerierung angegeben. Die PCA wurde unter Verwendung von Durchschnittswerten ($n = \text{fünf Individuen pro Zelllinie, Behandlung und Zeit}$) jedes Merkmals abgeleitet.

Erblichkeit im weiteren Sinne (H^2)

Die tagespezifische Erblichkeit H^2 (Abbildung 20) von Fv/Fm (Abbildung 21) unterschied sich zwischen den Behandlungsvarianten und zeigt den Einfluss von Behandlung und Umweltvariabilität sowie klonalen Unterschieden. Unter gut bewässerten (WW) Bedingungen blieb H^2 konstant hoch (0.58 ± 0.12) über den gesamten Ablauf des Experiments. Dass lässt sich mit einer hohen genetischen Komponente in einer stabilen Umwelt erklären. Unter Trockenstress (WS) betrug die Erblichkeit H^2 durchschnittlich 0.414 ± 0.21 , wobei sie zunächst anstieg und um Tag 7 ihren Höhepunkt erreichte, was auf signifikante klonale Unterschiede zu Beginn der Trockenstressreaktion hindeutet. Danach sank sie jedoch stark ab und erreichte bis Tag 27 nahezu null. Zu diesem Zeitpunkt hatte die lange andauernde Trockenheit einen weit größeren Einfluss im Vergleich zu den genetischen Beiträgen. Die Einbeziehung der Behandlung als fester Effekt (grüne Linie in Abbildung 21: „With Treatment“) führte zu moderaten H^2 -Schätzungen (0.35 ± 0.23), während das Ausschließen der Behandlung als fester Effekt (rote Linie in Abbildung 21: „Overall“) zu ähnlichen H^2 -Werten von 0.38 ± 0.22 führte. Zusammenfassend betonen diese Ergebnisse die Rolle klonaler Unterschiede unter stabilen Bedingungen und frühem Trockenstress, während sie die zunehmende Dominanz von Umwelteffekten mit fortschreitendem Trockenstress hervorheben.

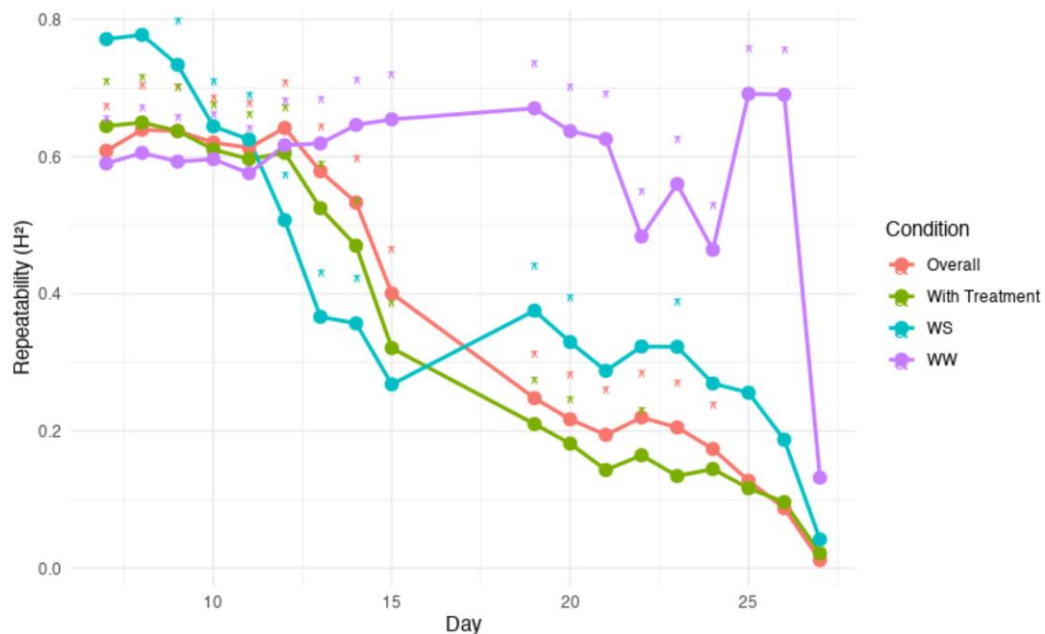


Abbildung 21. Tagespezifische klonale Repeatability (H^2) von Fv/Fm über den gesamten Beobachtungszeitraum und für die unterschiedlichen Behandlungen. „WW“ (lila): Gut bewässerte Behandlung. „WS“ (blau): Trockenstress-Behandlung. „Overall“ (rot): Kombiniertes Datensatz ohne explizite Modellierung der Behandlung. „With Treatment“ (grün): Kombiniertes Datensatz mit Behandlung als fester Effekt; passt sich der behandlungsbezogenen Variabilität an. Symbole (*) bezeichnen signifikante klonale Effekte basierend auf Likelihood-Ratio-Tests.

Kurzfassung Trockenstressexperiment

Die Ergebnisse des Trockenstressexperimentes bestätigen die hohe genetische Variation der Trockentoleranz der SE-Pflanzen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Effizienz des Photosystems. Bemerkenswert ist, dass in dem vorliegenden Experiment erstmalig gezeigt werden konnte, dass Zelllinien, die aus Herkünften abstammen deren Altbäume in Voruntersuchungen als besonders trockenresistent charakterisiert wurden, auch im Klimakammerversuch einer weniger ausgeprägte

Stressreaktionen zeigen, während andere, die sich in den langjährigen Anbauversuchen als besonders wüchsig erwiesen haben, von der Trockenheit stärker betroffen waren.

Unter gut bewässerten Bedingungen blieb die Erblichkeit konstant hoch, was auf starke genetische Beiträge hinweist. Unter Trockenstress stieg die Erblichkeit zunächst an, sank jedoch mit fortschreitendem Stress stark ab, was auf die zunehmende Dominanz von Umwelteinflüssen hindeutet.

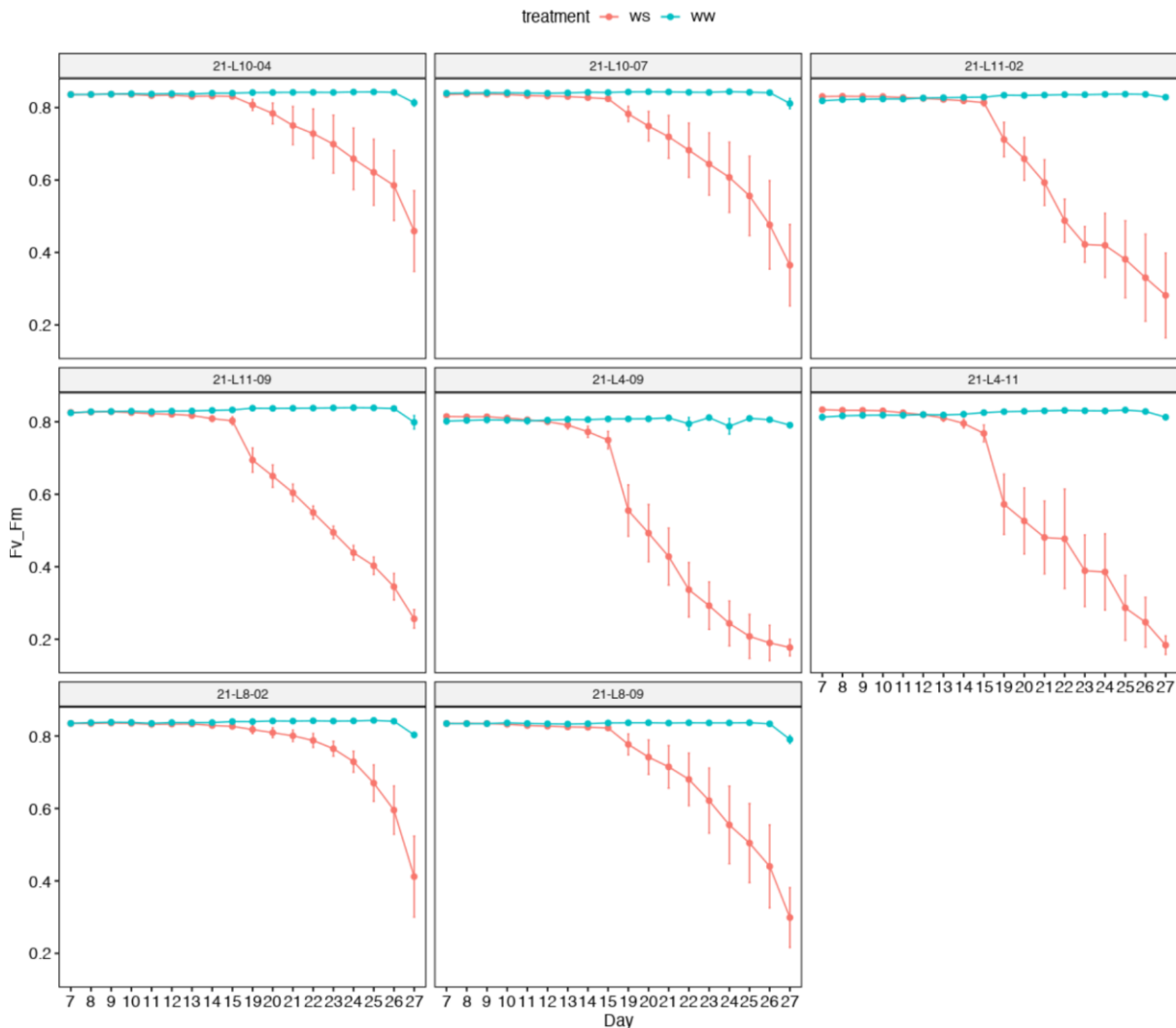


Abbildung 22. Variation des Fv/Fm – Verhältnisses als Merkmal für die Effizienz des Photosystems unter Trockenstressbedingungen im Laufe des Experiments für die 8 getesteten Zelllinien.

8. Anlage der Versuchsfächen

Versuchskonzept

Ziel der Versuchsplanung war, alle Zelllinien und Herkünfte im Vergleich zu Sämlingen derselben Nachkommenschaften auf möglichst vielen Versuchsfächen zu prüfen. Die Versuchsfächen selbst sollten Standorte in tieferen Lagen (d.h. am warm-trockenen Rand der Fichtenverbreitung) und in verschiedenen mittleren bzw. höheren Lagen umfassen. Geplant waren vier Versuchsfächen auf unterschiedlichen Höhenstufen in 4 Wuchsgebieten. Vorgesehen waren die Versuchsfächen Sparbach (Naturpark Sparbach, Guts- und Forstbetrieb Wilfersdorf, Liechtenstein Gruppe), MMF (Laufnitztal,

Forstbetrieb Franz Mayr-Melnhof-Saurau), Kalwang (Wald am Schoberpass, Forst Kalwang, Liechtenstein Gruppe) und eine weitere Fläche im Mühlviertel. Bereits gepflanzt sind die Flächen Sparbach, MMF und Kalwang. Die Fläche im Mühlviertel konnte aus Zeitgründen noch nicht etabliert werden.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Anzahl an Pflanzen pro Zelllinie und Herkunft konnten nicht alle Flächen dieselbe Ausstattung an Pflanzen bekommen. Daher wird auf jeder Versuchsfläche eine andere Kombination von Zelllinien verwendet werden, abhängig von Standort und Lage sowie der Anzahl an verfügbaren Pflanzen. Trotzdem erlaubt das Versuchsdesign einen Vergleich der Flächen, denn eine Mindestanzahl an Zelllinien und Nachkommenschaften ist für alle Versuchsflächen vorgesehen. Ein vollständiger Versuch besteht aus drei Wiederholungen (Blöcken). Jeder Block ist in eine vorgesehene Anzahl an Parzellen eingeteilt, wobei eine Parzelle mit je einer Zelllinie bzw. einer Sämlingsnachkommenschaft bepflanzt wird. Jede Parzelle umfasst je 20 Pflanzen, die in einem Raster von 4 Reihen mit je 5 Pflanzen gesetzt werden. Der Pflanzabstand beträgt 2 m, der Reihenabstand 2,5 m. Bei allen gepflanzten Versuchsflächen laufen die Reihen immer bergauf. Die Verteilung der Parzellen in den Wiederholungen wurde zufällig mithilfe von Zufallszahlen festgelegt. Sofern Parzellen mit derselben Zelllinie in Wiederholungen direkt nebeneinander zu liegen kamen wurden diese - soweit möglich - im Raster verschoben. Unvollständige Parzellen wurden aus Platzgründen bei der ersten Fläche an den Rändern platziert, bei den späteren Flächen wurde dies entsprechend gehandhabt. Unvollständige Parzellen weisen 15, 10 oder nur 5 Pflanzen auf. Die Parzellen wurden zumindest im Frühjahr 2025 nicht mit anderen Pflanzen angefüllt, teilweise gibt es eine Randbepflanzung. Aufgrund der Größe und Form der Flächen musste teilweise vom geplanten Design abgewichen werden, zum Beispiel wenn die Fläche zu klein war.

Versuchsfläche Sparbach

Zuerst wurde die Fläche Sparbach angelegt. Diese liegt im Wuchsgebiet 5.1 auf einer Seehöhe von etwa 400 bis 420 m (48.082078, 16.200161). Es handelt sich um eine Kahlfäche am Hang von ungefähr 1 ha, die aufgrund eines Windwurfes 2025 geschlägert wurde. Der Vorbestand waren Fichten und einige Eichen. Die Versuchsfläche Sparbachs liegt in einem geologischen Übergangsbereich. Auf der ganzen Fläche liegt ein Gemisch von Sandstein, Kalk und Dolomit als Ausgangsgestein vor. Die darauf vorhandenen Böden sind Braunlehm, teilweise pseudoverlgeyt und tiefgründig entkalkt. Von der Struktur liegt lehmiger Sand, bzw. sandiger Lehm vor.

Das BFW hat gemeinsam mit dem zuständigen Revierleiter Thomas Rupp einen Zaunverlauf festgelegt und für diesen die Eckpunkte per GPS sowie die Winkel und Entfernungen zwischen den Ecken vermessen. Im Anschluss wurde die geräumte Fläche gemulcht sowie die Stöcke gerodet. Nachdem der Zaun gebaut war, konnte das Punktraster für die Pflanzung in die Fläche gelegt werden. Mithilfe des Leica TS30 Theodolit wurden Eckpunkte für rechtwinklig zueinander verlaufende Grundlinien festgelegt und mithilfe von Setzschnur und Bodenspray wurde das Punktraster auf der gesamten Fläche markiert. Aufgrund des eines Grats auf der Fläche und der Hangneigung konnte nicht gleichzeitig der Pflanz- bzw. Reihenabstand eingehalten werden und die Fluchten gerade bleiben. Daher wurde gerade Fluchten angestrebt, damit die Parzellen in Zukunft möglichst einfach identifiziert werden können. Auf der Fläche konnte das geplante Versuchsdesign umgesetzt werden.

Am 20.03.2025 wurden die benötigten Pflanzen im Forstgarten Kalwang vorsortiert anschließend durch die LIECO GmbH & Co. KG zusammen mit den ebenfalls von LIECO erzeugten Handelsware Herkunftsnachweisen zum Naturpark Sparbach geliefert, zusammen mit etwa 30 leeren L15 Töpfen. Am 02.04.2025 wurden die Pflanzen für jede Parzelle auf zwei L15 Töpfe aufgeteilt und am beschrifteten

Bambusstab an der entsprechenden Parzelle abgestellt. So konnte am 03.04.2025 mit der Hilfe eines Unternehmers und maximal 4 weiteren Pflanzern neben den BFW Mitarbeitern sämtliche Pflanzen gesetzt werden. Es wurden hauptsächlich blaue Lieco Hohlsparren und in steinigem Gelände auf dem Grat eine Winkelhaue zum Pflanzen verwendet. In den Tagen vor der Pflanzung gab es Regenfälle in Sparbach, die Anwuchschancen sind dadurch erheblich verbessert. Im Anschluss wurde noch der genaue Pflanzplan aufgezeichnet und ein Bambusstab zur besseren Wiederauffindbarkeit an jede Pflanze gesteckt.



Abbildung 23. Oben links: Versuchsfeldfläche Sparbach. Oben rechts: Pflanzvorbereitung. Unten links: vorläufige Markierung während der Pflanzarbeiten.

Versuchsfläche Laufnitztal – Mayr-Melnhof Forst

Die Fläche bei MMF im Laufnitztal wurde am 08.04.2025 von Mitarbeitern des BFW sowie den MMF Mitarbeitern Jürgen Gasser und Martin Jocham begangen. Die Fläche befindet sich im Wuchsgebiet

5.3 auf einer Seehöhe von 710 bis 730 m (47.326962, 15.270758). Es handelte sich um ein geschlägerte Windwurffläche, ehemals mit Fichte bestockt. Die Fläche hat eine Größe von etwa 1 ha, allerdings führen Weg und ein Maschinenweg in der Fläche. Zudem begrenzen eine Ruine und der Waldrand sowie die nahe Forststraße die Fläche, so dass die effektiv nutzbare Fläche kleiner ist und dreigeteilt werden muss. Zusätzlich war die Fläche nicht geräumt und es bestanden nur die Optionen die Schlagreste auf Haufen oder in Reihen zu räumen. Es wurde entschieden, Haufen möglichst am Rand der Fläche zu platzieren. Aufgrund der Größe und den umliegenden, wahrscheinlich ebenfalls instabilen Fichtenbeständen wurde ein Zaun als nicht praktikabel angesehen. Stattdessen sollten die Pflanzen mit dem Verbisschutzmittel Trico behandelt werden. Die Lage der Fläche an einer zentralen Forststraße erlaubt außerdem eine engmaschige Betreuung durch das MMF Team.

Nachdem die Schlagreste auf Haufen konzentriert worden waren, konnte die genauere Flächenvermessung und das Anlegen des Rasters folgen. Aufgrund der eingeschränkten Größe fanden nur 9x3 Wiederholungen auf der Fläche Platz finden würden. Sämtliche Parzellen wurden mithilfe von 3 m Messstangen und Bussole ausgehend von diesen Grundlinien angelegt und mit Bodenspray markiert, in den beiden kleineren Teilflächen komplett ohne Grundlinien. Auch hier wurden die Parzellen mit Bambusstäben und Bodenspray nummeriert.

Anschließend wurden im Forstgarten Kalwang die benötigten Pflanzen vorsortiert und vom BFW zur Pflanzfläche transportiert. Dort wurden wieder je 20 Pflanzen je Parzelle auf 2 L15 Töpfe verteilt und diese auf die entsprechenden Parzellen gestellt. Da die Pflanzen zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit Trico vorbehandelt waren, wurden sie bis zum nächsten Tag mit Ästen abgedeckt. Am 28.04.2025 wurde die Fläche von BFW-Mitarbeitern und 3 Pflanzern an einem Tag komplett gepflanzt, hauptsächlich mit der Winkelhaue. Die Rüsselkäferbehandlung folgte am nächsten Tag. In den Tagen vor der Pflanzung regnete es, dies sollte die Bedingungen für die Pflanzen verbessern. Im Nachgang wurden Bambusstäbe bei jeder Pflanze eingesteckt, es fehlen noch die nummerierten Aluminiumprofile und die Wetterstation.



Abbildung 24. Versuchsfläche Laufnitztal MMF(2025).

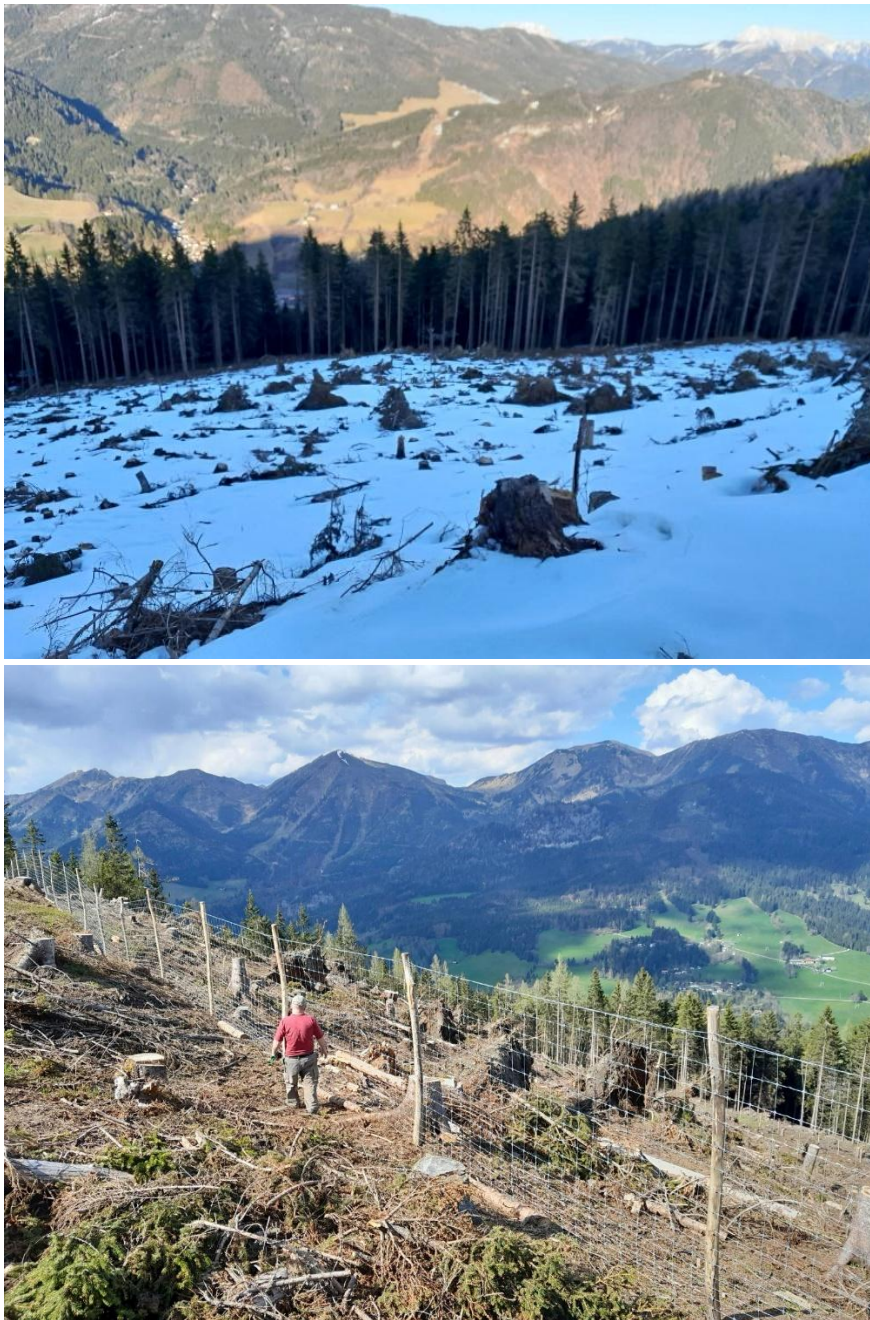


Abbildung 25. Versuchsfläche Kalwang bei der Erstbegehung (oben) und nach vor der Pflanzung (unten) mit Zaun (2025).

Kalwang

Die Fläche bei der Forstverwaltung Kalwang am Nordhang oberhalb des Waldes am Schoberpass wurde am 20.03.2025 von Mitarbeitern des BFW und dem zuständigen Revierleiter Martin Jeitler begangen. Die Fläche befindet sich im Wuchsgebiet 3.1 auf ungefähr 1300 bis 1350 m Seehöhe (47.442113, 14.65942). Es wurden direkt die Eckpunkte des geplanten Zaunes in der Fläche markiert. Die Fläche ist ebenfalls eine 2025 geschlägerte Windwurffläche. Es wurde hier vor allem in der Hauptwindrichtung auf einen ausreichenden Abstand zu den umliegenden, von Fichte dominierten Wäldern, geachtet. Als Beihölzer sind Lärche, Rotbuche und Birken vorhanden. Eine Lärche verbleibt auf Wunsch des Revierleiters am Rand in der Versuchsfläche. Es wurde versucht mit Busole und Vertex eine möglichst quadratische, mindestens 1 ha große Versuchsfläche zu erzeugen. Die Fläche weist eine starke Hangneigung auf, außerdem befinden sich noch viele Stöcke und Wurzelteller im Gelände, dies machte die Vermessung und Markierung ungleich schwieriger als bei den anderen Versuchsflächen. Nachdem

der Zaun gebaut worden war, wurden die Pflanzstellen markiert. Aufgrund der Wurzelteller und des schwierigen Geländes wurden mit dem Theodolit zwei Grundlinien gelegt. Auf diesen wurden mit dem Theodolit alle 10 m ein Punkt gesetzt. Ausgehend von diesen Linien wurde per Theodolit ein 10 m Raster über die gesamte Versuchsfläche gezogen. Bei diesem wurden die Entfernungen nicht horizontalisiert damit alle weiteren Messungen sich am Gelände orientieren können. Es stellte sich heraus, dass auf der Fläche 90 Parzellen untergebracht werden konnten, mehr als geplant. Anschließend wurde mit einem Maßband bergauf jeweils zwischen zwei der 10 m Punkte alle 2 m ein Punkt gesetzt. In einem letzten Schritt wurde zwischen diesen Linien von einem 10 m Punkt zum nächsten hangparallel alle 2,5 m ein Pflanzpunkt gesetzt. Dann wurden wiederum die Parzellengrenzen markiert und jeweils mit einem Bambusstab und Nummerierung versehen.



Abbildung 26. Einmessung der Versuchsfläche Kalwang und Transport der Pflanzen von BFW Mitarbeitern (2025).

Am 20.05.2025 wurden im Forstgarten Kalwang die benötigten Pflanzen sortiert und gegen Rüsselkäfer behandelt. Am Folgetag wurden die Pflanzen zur Fläche transportiert, je maximal 20 auf 2 L15 Container verteilt und diese mit LIECO Rückentragen auf die Parzellen verteilt. Am 22.05.2025 Tag wurden die Pflanzen gesetzt. Vor und während der Pflanzung regnete es, dies sollte die Anwuchsbedingungen verbessern. Zusätzlich zu den Fichten wurden 200 Weißtannen für die Randbepflanzung zur Fläche verbracht. Am Vortag und am Pflanztag setzte Regen ein. Es konnte die gesamte Fläche mit der Hilfe von 4 Forstarbeitern bepflanzt werden. Am Folgetag wurden noch die genaue Bepflanzung einiger Randparzellen verändert und aufgezeichnet und ein paar Bambusstäbe gesetzt.

Wetterstationen

Alle Versuchsflächen werden mit Wetterstationen vom Typ TOMST TMS 4 Datalogger bestückt. Diese Stationen messen Lufttemperatur, Bodentemperatur und Bodenfeuchte über einen Zeitraum von bis zu 14 Jahren, müssen allerdings vor Ort manuell ausgelesen werden. Dafür notwendig ist auch eine gründliche standörtliche Einordnung der Fläche. Diese konnte für die Fläche Sparbach bereits vorgenommen werden. Die Bestimmung der Bodenart ist wichtig für die Kalibrierung der Bodenfeuchtemessung, außerdem sollte die Sonde kein Gestein berühren. Mithilfe der Sensoren sollten Niederschlagsunterschiede zwischen den Versuchsflächen als Einflussvariable auszuschließen sein.

Kurzfassung Versuchsflächen

Im vorliegenden Projekt war die Anlage von 3-5 Versuchsflächen geplant. Drei Flächen wurden bereits im Frühjahr 2025 angelegt, das Pflanzenmaterial reicht zudem für eine weitere Fläche, die im Herbst 2025 geplant ist. Die bisher angelegten Versuchsflächen decken ein breites Standortsspektrum ab, von Rand der klimatischen Eignung im Wienerwald auf 400m bis auf 1300m in Kalwang. Die Variation der Standortbedingungen ist eine gute Grundlage, um die Eignung der SE-Pflanzen unter verschiedenen Klimaszenarien einschätzen zu können. Um Extremereignisse und deren mögliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Fichten abschätzen zu können wurde jede Versuchsfläche mit einfachen Klimastationen ausgestattet.

9. Literatur

Ahmad, M., Seitner, S., Jez, J., Espinosa-Ruiz, A., Carrera, E., Martínez-Godoy, M. Á., Baños, J., Ganthaler, A., Mayr, S., Priemer, C., Grubb, E., Ufimov, R., van Loo, M., & Trujillo-Moya, C. (2025). Full title: Drought stress responses deconstructed: a comprehensive approach for Norway spruce seedlings using high-throughput phenotyping with integrated metabolomics and transcriptomics. *Plant Phenomics (Washington, D.C.)*, 100037, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.plaphe.2025.100037>

Kapeller, S., Lexer, M. J., Geburek, T., Hiebl, J., & Schueler, S. (2012). Intraspecific variation in climate response of Norway spruce in the eastern Alpine range: Selecting appropriate provenances for future climate. *Forest Ecology and Management*, 271, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.039>

Schueler, S., George, J.-P., Karanitsch-Ackerl, S., Mayer, K., Klumpp, R. T., & Grabner, M. (2021). Evolvability of drought response in four native and non-native conifers: Opportunities for forest and genetic resource management in Europe. *Frontiers in Plant Science*, 12, 648312. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.648312>

Trujillo-Moya, C., George, J.-P., Fluch, S., Geburek, T., Grabner, M., Karanitsch-Ackerl, S., Konrad, H., Mayer, K., Sehr, E. M., Wischnitzki, E., & Schueler, S. (2018). Drought sensitivity of Norway spruce at the species' warmest fringe: Quantitative and molecular analysis reveals high genetic variation among and within provenances. *G3 (Bethesda, Md.)*, 8(4), 1225–1245. <https://doi.org/10.1534/g3.117.300524>

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Links: Herkunftsunterschiede in der Trockenreaktion zwischen 11 Fichtenherkünften in zwei mehrjährigen Trockenperioden die auf der Versuchsfläche Porrau aufgetreten sind. Die Versuchsfläche Porrau liegt an der warm-trockenen Grenze des natürlichen Verbreitungsgebietes der Fichte (rechts).	6
Abbildung 2. Die ersten Anzeichen der Initiierung von embryogenem Gewebe. (A) Isolierte Embryonen auf Initiierungsmedium. Die Embryonen beginnen anzuschwellen und entwickeln Kallusgewebe und/oder embryogenes Gewebe. (B-C) Vergrößerte Aufnahmen von isolierten Embryonen auf Initiierungsmedium, die erste Anzeichen der Entwicklung von embryogenem Gewebe zeigen. ET = Embryogenes Gewebe.	8
Abbildung 3. A und C - isoliertes embryogenes Gewebe von Zelllinien der Nachkommenschaften AT-PT-4 und AT-CT-7, welches begonnen hat sich zu vermehren. B und D - vergrößerter Bereich von A und C, angezeigt durch das schwarze Quadrat. ET = Embryogenes Gewebe.	9
Abbildung 4. Isoliertes embryogenes Gewebe/Zelllinie, dass nach der Initiierungsphase auf Proliferationsplatten übertragen wurde. Die Zelllinien müssen für die spätere Kryokonservierung vermehrt werden. In diesem Stadium wurde dem embryogenen Gewebe bzw. der Zelllinie eine eindeutige ID vergeben (in diesem Fall L8_01 und L5_04).	10
Abbildung 5. Test-Auftauen von 2 kryokonservierten Zelllinien. Nicht alle Zelllinien sind lagerfähig und auftaufähig in der Kryokonservierung. Das Testauftauen hat ergeben, dass ca. 79% der in der Kryokonservierung eingelagerten Zelllinien überleben.	10
Abbildung 6. Reifung der vermehrten Embryonen der ausgewählten Zelllinien	11
Abbildung 7. Reifung der vermehrten Embryonen der ausgewählten Zelllinien und deren Keimung nach Übertragung in das Nährmedium.	12
Abbildung 8. Transplantation der gekeimten Pflanzen in Minicontainer mit Torfsubstrat im Oktober/November 2022.	12
Abbildung 9. Übersicht über den Ablauf der gesamten SE-Produktion bis zur Etablierung der Zelllinien in Torf..	14
Abbildung 10. Links: Schwache Durchwurzelung der SE-Pflanzen im Juni '23 unmittelbar vor dem Vertopfen. Rechts: Vergleich Pflanzenentwicklung LIECO (links) und SE (rechts), Juni '23. (Fotos: Lieco).	15
Abbildung 11. Vergleich Wurzelentwicklung und -austrieb im Juni '23 (links: LIECO; Mitte: SE). Rechts: vertopfte SE-Pflanzen im Lieco-System L15, Juni '23. (Fotos: Lieco).	15
Abbildung 12. Fotos der SE-Pflanzen im August 2023. Der überwiegende Teil der Pflanzen wirkt gesund. Allerdings fallen die großen Unterschiede zwischen den Zelllinien und teilweise auch innerhalb der Zelllinien auf. Diese sind weitaus größer als zwischen üblichen Sämlingsherkünften. (Fotos: Lieco).	16
Abbildung 13. Fotos der SE-Pflanzen im Mai 2024. Die SE-Pflanzen haben sich gut entwickelt und sind weiterhin gesund. Allerdings wirken sie weiterhin sehr heterogen. (Fotos: Lieco).	16
Abbildung 14. Höhe (oben) und Wurzeldurchmesser (unten) der Sämlinge und SE-Pflanzen im März 2024, d.h. eine Vegetationsperiode nach dem Vertopfen.	17
Abbildung 15. Höhe (oben) und Wurzeldurchmesser (unten) der Sämlinge und SE-Pflanzen im März 2025, d.h. zwei Vegetationsperioden nach dem Vertopfen.	18
Abbildung 16. Höhe der verschiedenen Zelllinien der SE-Pflanzen im März 2024 und 2025.	18
Abbildung 17. Entwicklung des Verhältnisses zwischen Sämlingshöhe und Wurzeldurchmesser (H-D Wert). Nach einem Jahr im Forstgarten weisen Sämlinge und SE-Pflanzen ein vergleichbares H-D Verhältnis auf, im zweiten Jahr sind die Sämlinge dagegen stärker in die Höhe und die SE-Pflanzen stärker in die Dicke gewachsen.	19
Abbildung 18. Transport der SE-Pflanzen zum PHENOPlant Labor am Vienna Biocenter (links). Einblick in das PHENOPlant Testsystem (rechts).	20
Abbildung 19. Fortschreiten der Trockenheit (Topfgewicht) während des 18-tägigen Trockenstress-Experiments. Das Gewicht der Töpfe wurde durch das Ausbleiben der Bewässerung auf 155 g reduziert und während des Experiments auf diesem Niveau gehalten.	21
Abbildung 20. Hauptkomponentenanalyse (PCA) basierend auf fünf Merkmalen, die aus der CHLF-Bildgebung abgeleitet wurden und Unterschiede zwischen Zelllinien erfassen. Nur der erste (dargestellt als 0 = Kontrolle) und die letzten vier Zeitpunkte der trockenstressbehandelten Proben werden dargestellt. Jedes Symbol ist ein individueller Zeitpunkt, wie durch die Nummerierung angegeben. Die PCA wurde unter Verwendung von Durchschnittswerten (n = fünf Individuen pro Zelllinie, Behandlung und Zeit) jedes Merkmals abgeleitet.	22
Abbildung 21. Tagespezifische klonale Repeatability (H^2) von Fv/Fm über den gesamten Beobachtungszeitraum und für die unterschiedlichen Behandlungen. „WW“ (lila): Gut bewässerte Behandlung. „WS“ (blau): Trockenstress-Behandlung. „Overall“ (rot): Kombierter Datensatz ohne explizite Modellierung der Behandlung. „With Treatment“ (grün): Kombierter Datensatz mit Behandlung als fester Effekt; passt sich der behandlungsbezogenen Variabilität an. Symbole (*) bezeichnen signifikante klonale Effekte basierend auf Likelihood-Ratio-Tests.	23

Abbildung 22. Variation des F_v/F_m – Verhältnisses als Merkmal für die Effizienz des Photosystems unter Trockenstressbedingungen im Laufe des Experiments für die 8 getesteten Zelllinien.	24
Abbildung 23. Oben links: Versuchsfläche Sparbach. Oben rechts: Pflanzvorbereitung. Unten links: vorläufige Markierung während der Pflanzarbeiten.	26
Abbildung 24. Versuchsfläche Laufnitztal MMF(2025).	27
Abbildung 25. Versuchsfläche Kalwang bei der Erstbegehung (oben) und nach vor der Pflanzung (unten)mit Zaun (2025).	28
Abbildung 26. Einmessung der Versuchsfläche Kalwang und Transport der Pflanzen von BFW Mitarbeitern (2025).	29