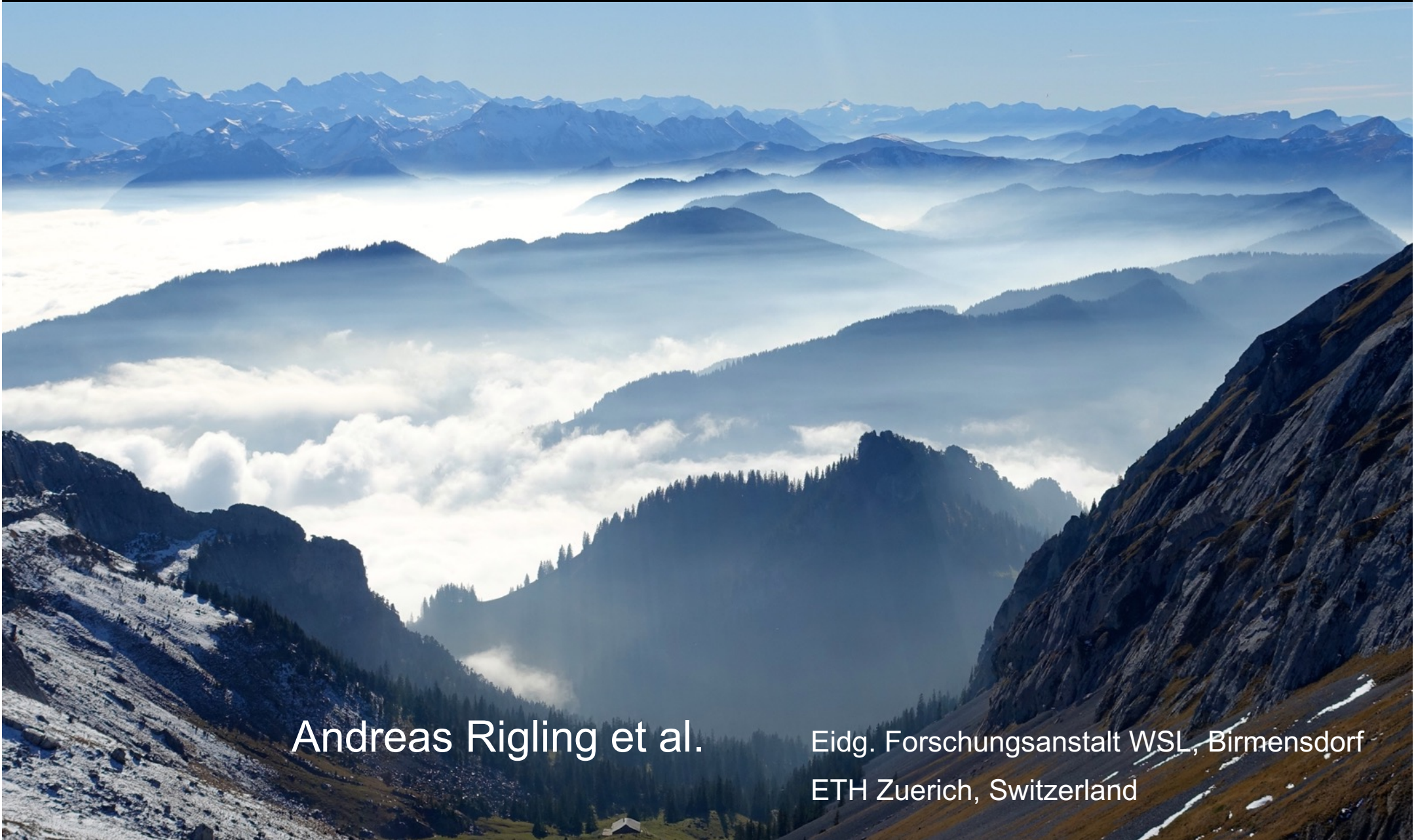


# Wald im Klimawandel – Trends und Massnahmen



Andreas Rigling et al.

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf  
ETH Zuerich, Switzerland

# Inhalt

- Das Klima ändert sich
- Sensitive Gebiete und Prozesse (Früherkennung)
- Waldbauliche Massnahmen - Feldexperimente
- Sensitivität Baumarten
- Konsequenzen für die Waldbewirtschaftung



# Sensitive Ökosysteme und Prozesse der zukünftigen Waldentwicklung?...

**Limitierungen:**  
Frost, kurze Vegetationsperiode



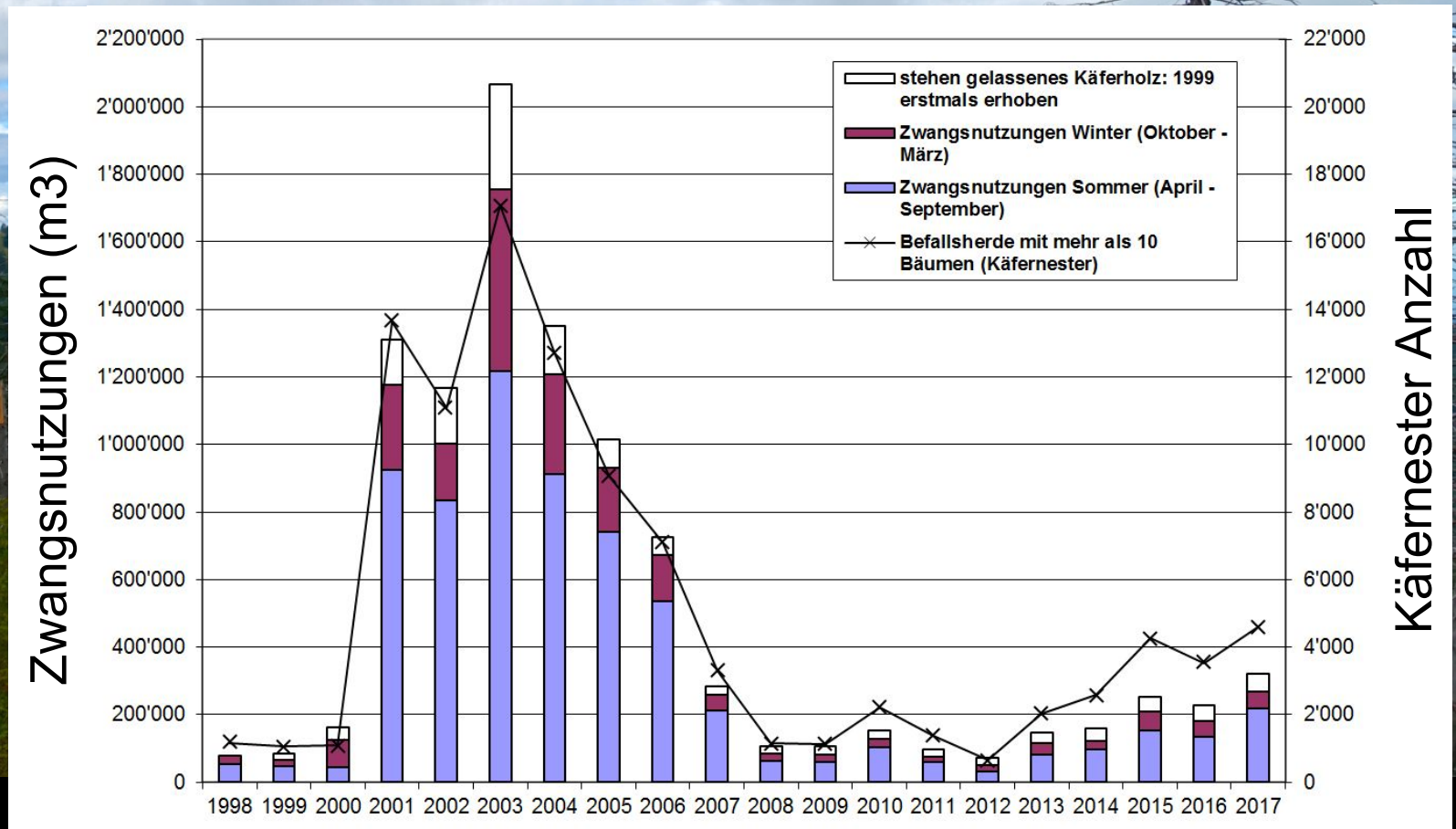
**Limitierungen:**  
Einheimische und neue  
Schädlinge und Krankheiten



**Limitierungen:**  
Hitze, Trockenheit



# Biotische Risiken: Buchdrucker



- Befall ausgelöst durch Stürme und stimuliert durch Hitze und Trockenheit
- Seit 2008 Buchdruckerbefall auf tiefem Niveau, ab 2015 leichter Anstieg, **2018??**

# Befallsrisiko Buchdrucker

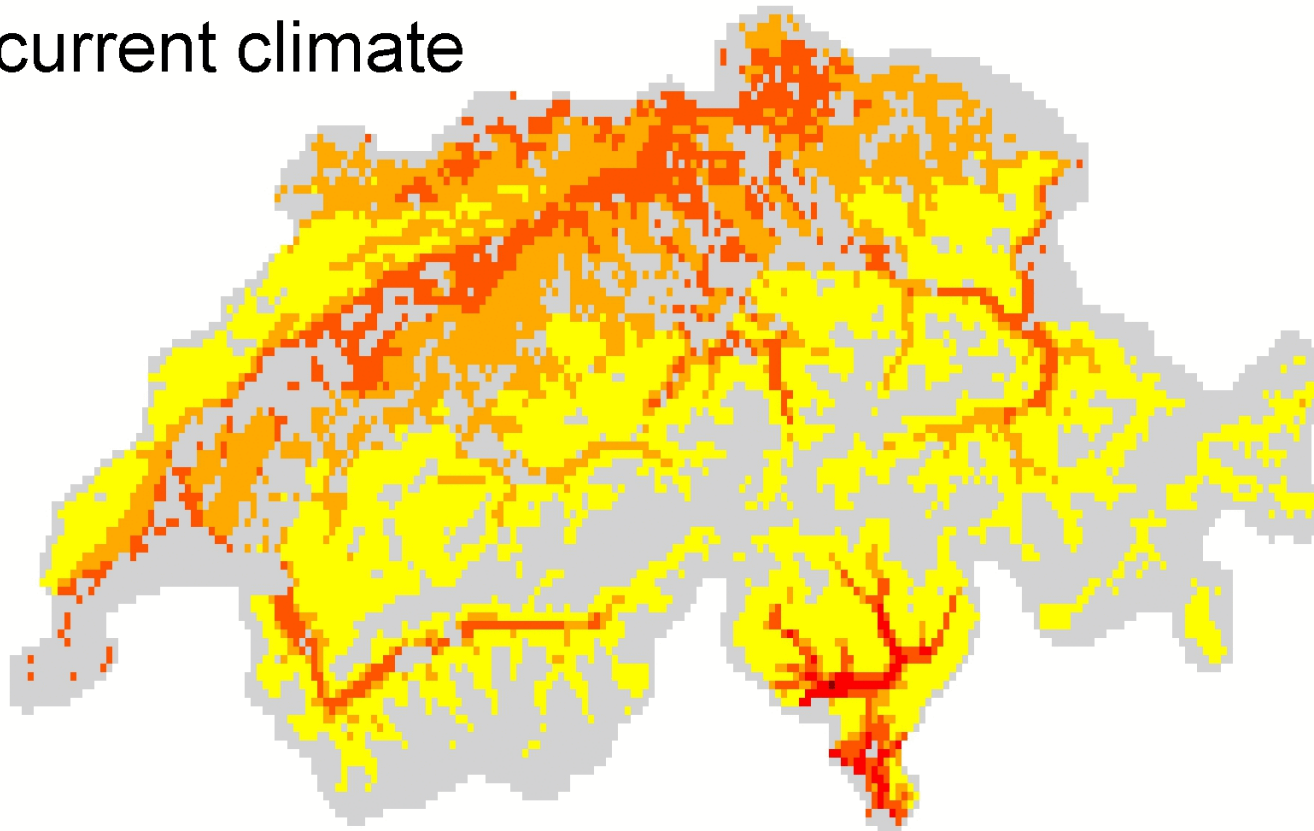
Schweizer Klimawandelszenario CH2011

- Veränderungen Populationsdynamik Buchdrucker

→ Anstieg Anzahl Generationen

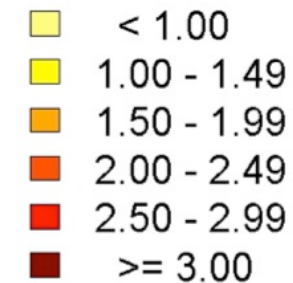
→ Früherer Beginn des Fluges

current climate



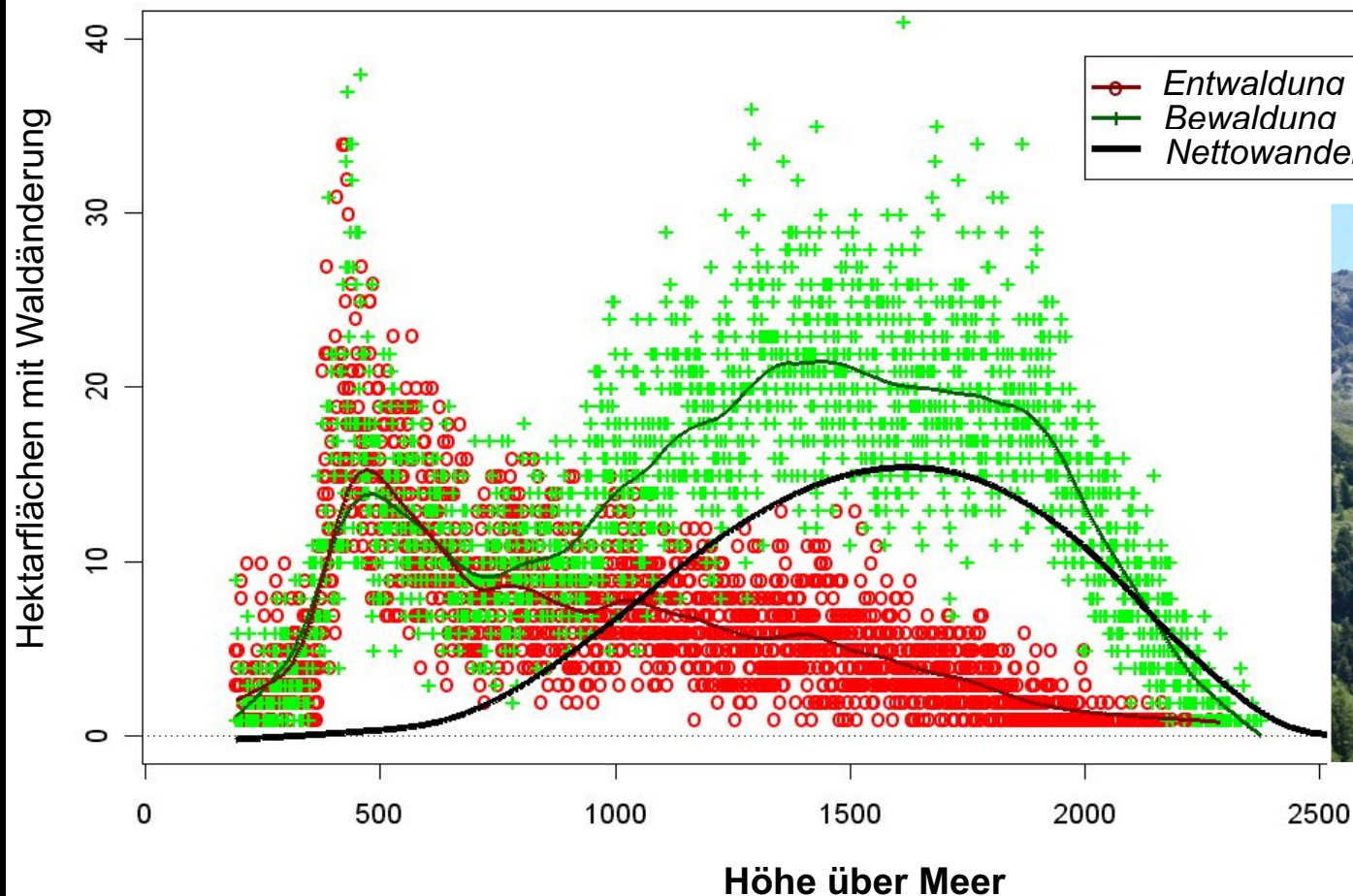
*Jacoby et al. 2016*

average number  
of generations



# Waldgrenzverschiebungen in der CH

Areal-Statistik  
1979/85 bis 1992/95



- Auch in Alpen steigt Waldgrenze grossflächig an (seit 1950 um 1.3 m / Jahr)
- Schwierigkeit Trennung von Veränderungen im Klima und der Landnutzung

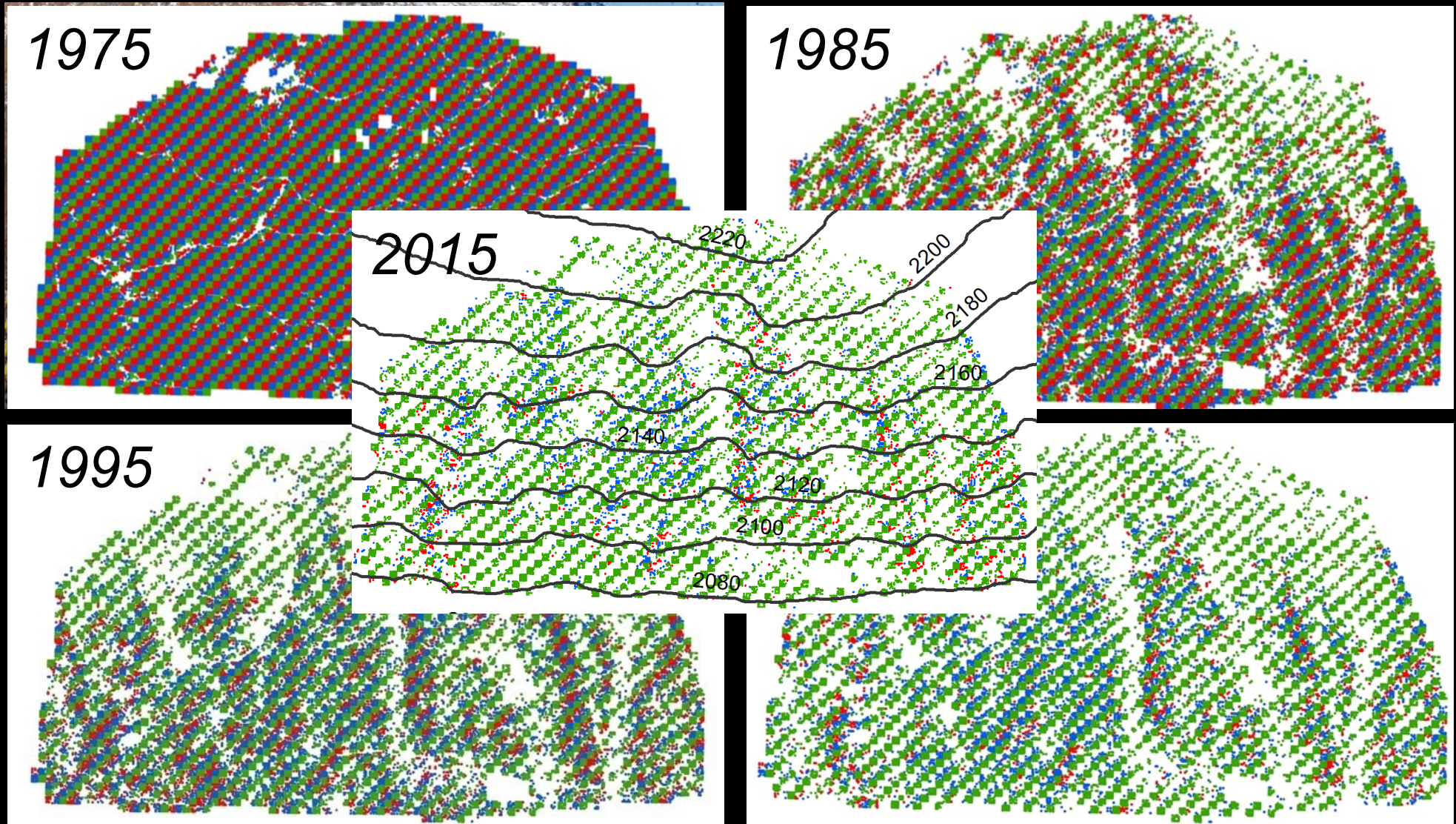
# Obere Waldgrenze – Forschungsplattform “Stillberg”



- **Aufforstungsexperiment:** 92'000 Bäume gepflanzt 1975
- 3 verschiedene Baumarten; Inventar alle 3-10 Jahre, **>40 Jahre Monitoring**
- **Mortalität, Wachstum,** Vegetationskonkurrenz, Schädlinge und Krankheiten, Bodenentwicklung, Schneedynamik, ...
- **Experimente:** Düngung, CO<sub>2</sub>-Begasung, Schneedeckenmanipulation, Bodenerwärmung

# 40 Jahre Monitoring Wachstum und Mortalität

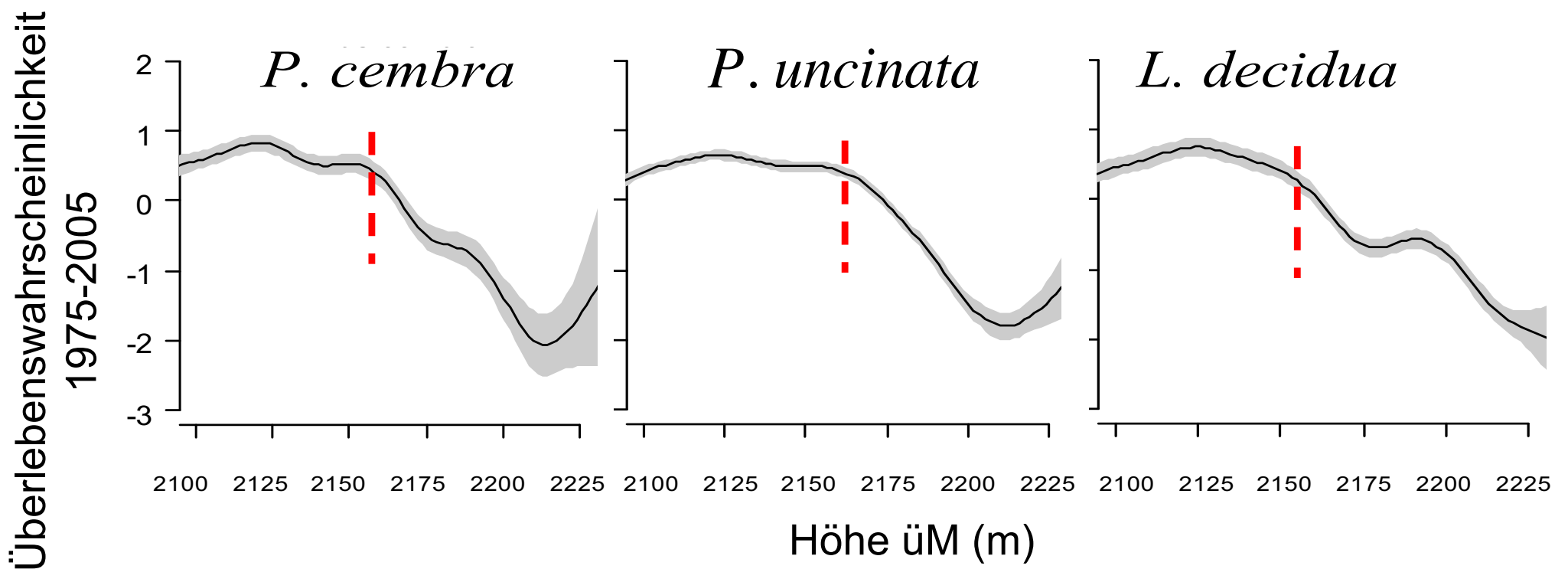
■ *L. decidua* ■ *P. uncinata* ■ *P. cembra*



- Die meisten Föhren abgestorben. Schneereiche Kleinstandorte: immergrüne Föhren leiden unter Schneeschimmelpilzen (*Gremmeniella abietina* and *Phacidium infestans*)



# Kurze Sommer und kalte winter ...



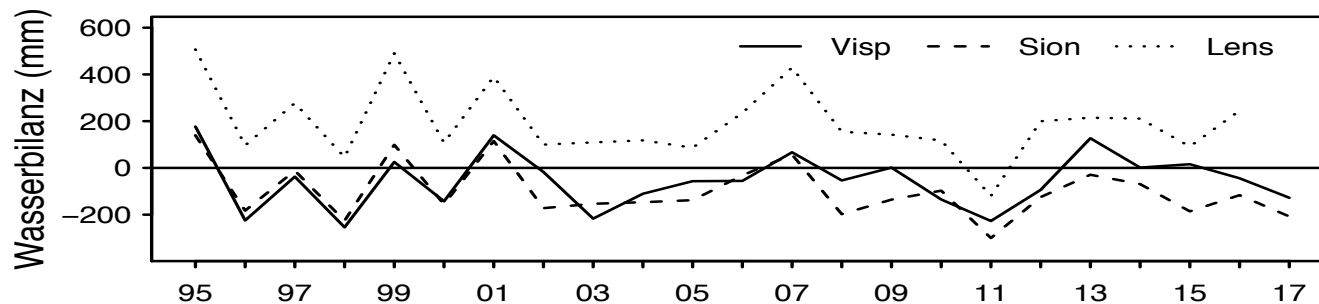
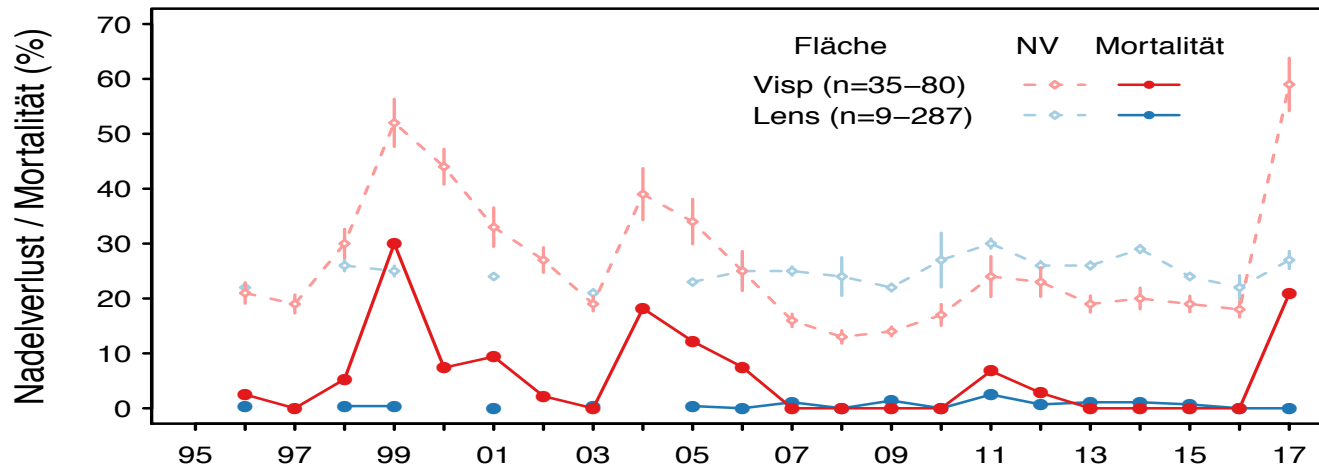
- Oberhalb 2160 m üM sinkt die Überlebenswahrscheinlichkeit → Schneedecke und Zeitpunkt der Schneeschmelze als entscheidende Faktoren
- → Winterniederschläge entscheidend für Verjüngung
- → Sommertemperaturen bestimmen das Baumwachstum
- → Klimawandel wird Wachstumsdynamik in den Hochlagen verändern

# Umweltgradienten – Untere Waldgrenze



Wiederholte Waldföhrenmortalität in den inneralpinen Trockentälern

# Trockenheit als auslösender Faktor



- Viele Trockenjahre
- Mortalität nach Trockenjahren
- Höchste Mortalität auf trockenen Standorten mit hoher Bestandesdichte

# Welche Faktoren führen zum Absterben?

Bestandesspezifische  
Kombination von  
Stressfaktoren (Manion 1981):

- **Trockenheit** (Frequenz und Intensität von Trockenperioden, „hotter droughts“ (Allen et al. 2015)
- **Entnadelung** (zB *Tomicus* spec., *Thaumetopoea* p.)
- **Mistelinfektionen**
- **Primäre Schädlinge** (e.g. *Phaenops* c.)
- **Pathogene** (Nadel- und Zweigkrankheiten, Bläuepilze)
- **Neue Schädlinge / Krankheiten?** (zB Nematoden)



# 2018 vermehrt Mortalität bei Buchen im VS ...

... auf trockenen Grenzstandorten....



Saillon VS 2018

# ... und verfrühte Blattverfärbung im Mittelland...

Können sich die Buchen wieder erholen? Oder Vorboten von Mortalität?



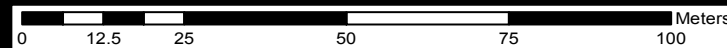
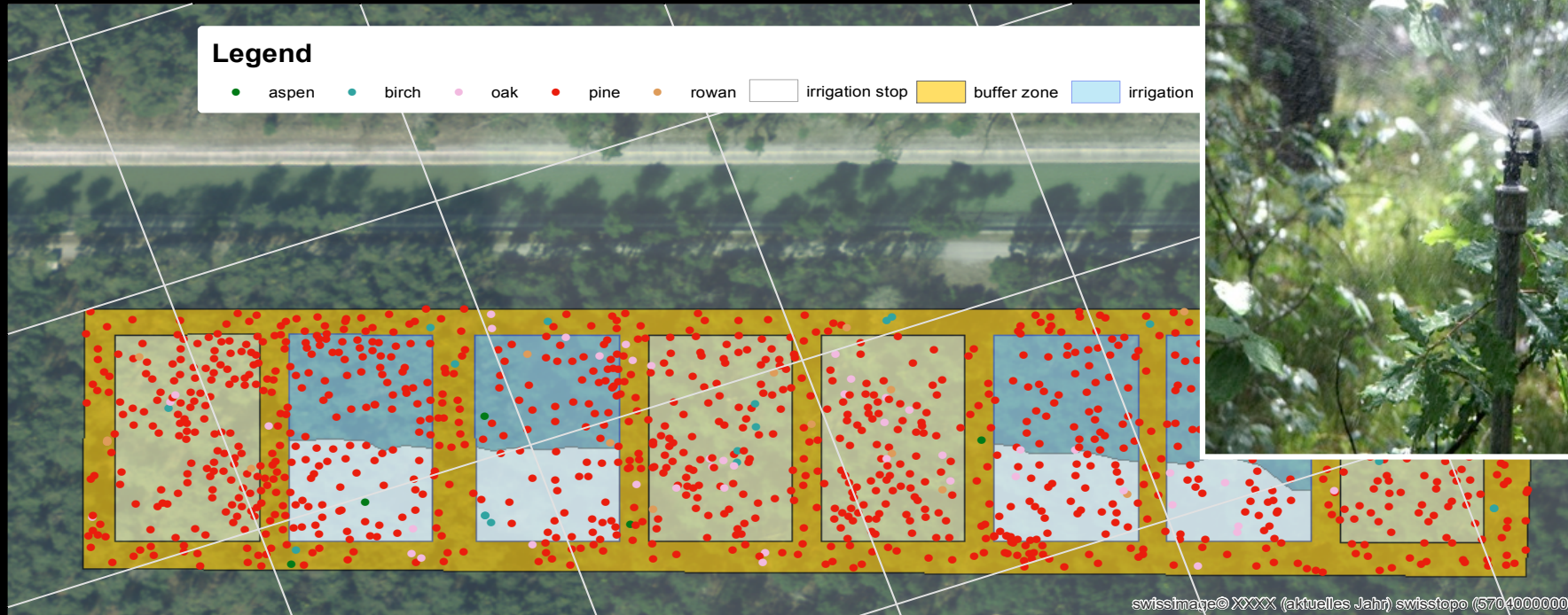
# Testen von waldbaulichen Eingriffen um Trockenstress zu reduzieren ...



# Bewässerungsexperiment Pfywald

Können sich geschwächte Bäume wieder erholen?

- 800 dominante Waldföhren
- Bewässerung Juni 2003 - Oktober 2022
- Verdoppelung der Jahresniederschläge (600 → 1200 mm)



WSL/LWF, Flurin Sutter, 2014

- Bewässerung führt zu **+++ Wachstum, Vegetationszeit, Samenqualität, Bodenlebewesen, ...** und **--- Baummortalität**



# Durchforstungen mit verschiedenen Eingriffsstärken

Effekte auf Baumwachstum, -mortalität und –physiologie, und Mikrostandort?

**Kontrolle: 0%**

**Schwache Df: -20%**

**Mittlere Df: - 40%**

**Starke Df: -70%**



Plot 12



Plot 7



Plot 3



Plot 4

- *Wiederholung Durchforstungsexperiment im Pfywald: trockener Föhrenwald*
- *4 Behandlungen mit 3 Wiederholungen; Df in 1965, 1971, 1978, 2009*
- **Nur starke Df mit langfristigem Effekt auf Baumwachstum**
- **Df erhöht Bodenfeuchtigkeit**
- **Df verringert Baummortalität um das 4-fache**

# Entfernung der Unterschicht

- Intensive Waldweide bis ca. 1950
  - Ziegenbestand von >45'000 (1940) auf <5'000 (1980) reduziert
  - Wälder erholten sich und wurden wieder dichter
  - Vegetationskonkurrenz erhöht sich.

Rigling et al. 2006 *Merkblatt*; Gimmi et al. 2009 *For Ecol Man*



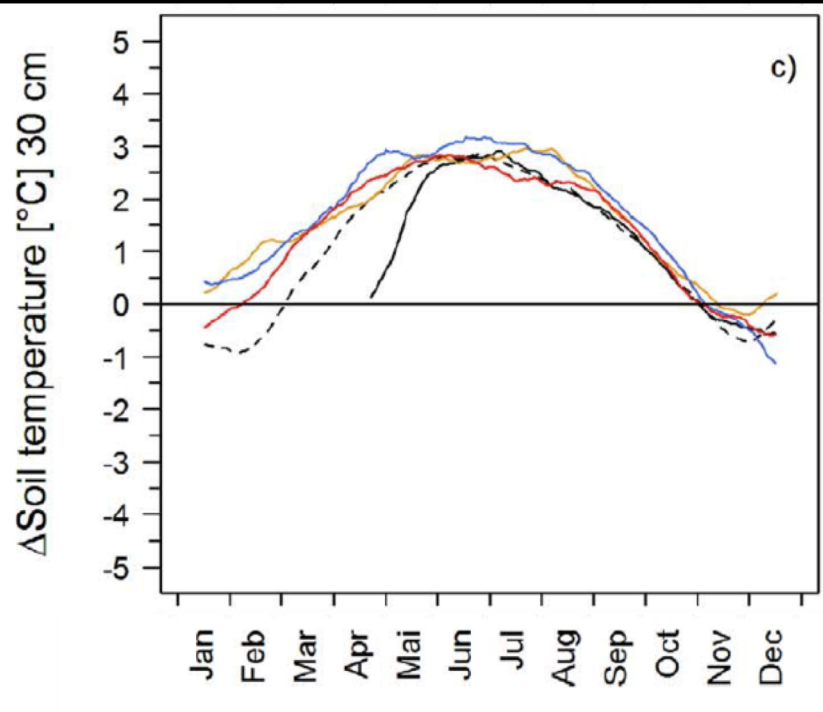
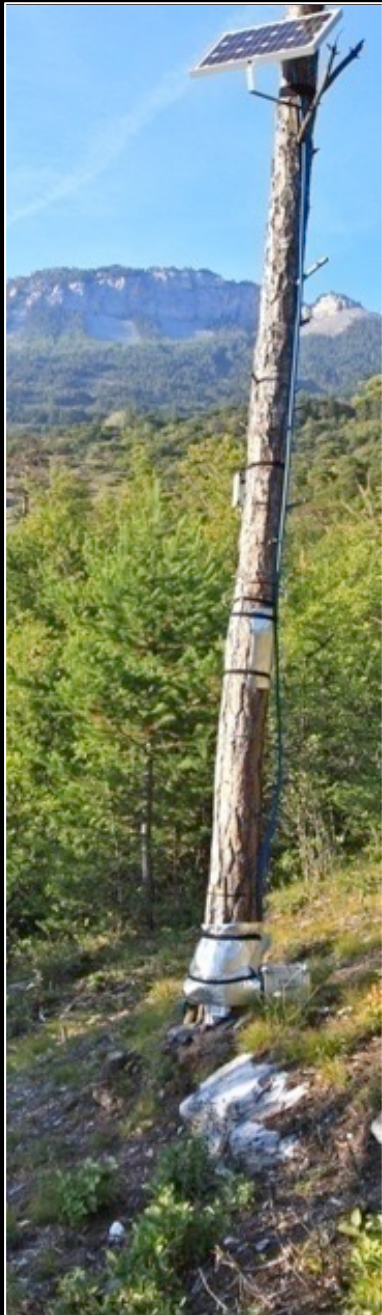
- Experimentelle Entfernung der Unterschicht als „Imitation“ von extremer Waldweide:



- Wie reagieren geschwächte Föhren auf Entfernung der Unterschicht?
- 12 dominante Föhren (6inkl. 6 Kontrollbäume)
- Wiederholte Entfernung Unterschicht  
Radius of 6 m

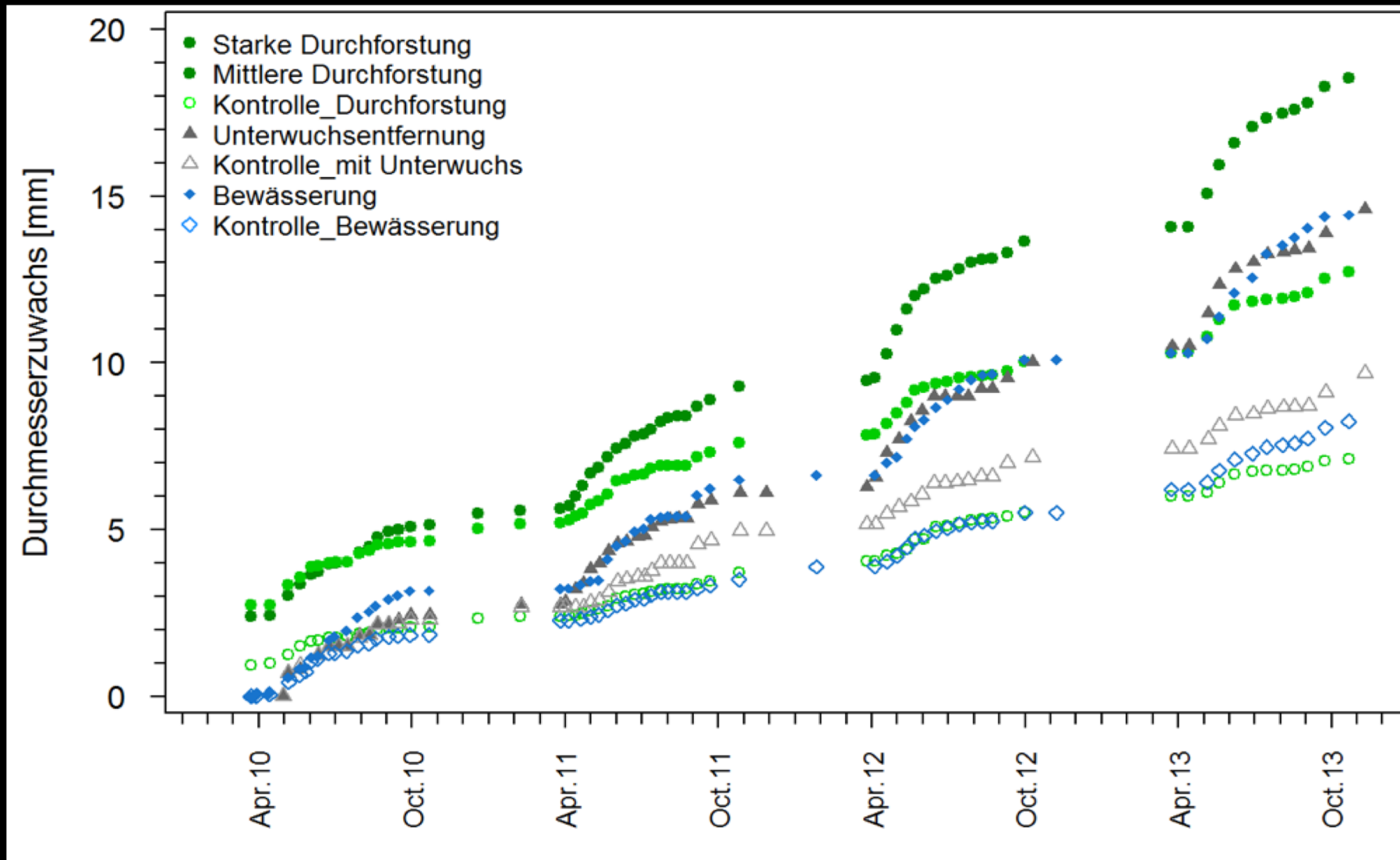
Giuggiola et al. 2018 *For Ecol Man*

# ... Wirkung auf Boden-Mikroklima?



- Entfernung Unterschicht führt zu **+++ Bodentemperatur** aber auch **+++ Bodenfeuchtigkeit** → Reduktion Wasserverbrauch überwiegt erhöhte Verdunstung (Wegfall Bodenbedeckung)
- **Baumwachstum +++** wegen Reduktion Wasserdefizit. Zudem auch Saftfluss und Nadelwachstum **+++** und **Bäume erholen sich von Trockenstress**.

# Synthese waldbauliche Eingriffe



**Wachstumsanstieg:** +50% Unterwuchsentfernung; +80% mittlere Df;  
+90% Bewässerung (Verdoppelung Niederschlag); **+150% starke Df**

*Giuggiola et al. 2013 For Ecol Man; 2016 New Phytol; 2018 For Ecol Man*

# Regendach- & Bewässerungsexp., Testpflanzungen

- Verjüngung als Flaschenhals der zukünftigen Waldentwicklung?



# Aufforstungsexperimente mit Bewässerung

Trockenheitsempfindlichkeit verschiedener Baumarten. Experimente in Schutzwäldern oberhalb Bratsch und bei Mund (BLS-Lötschbergsüdrampe)



**Bewässerung**

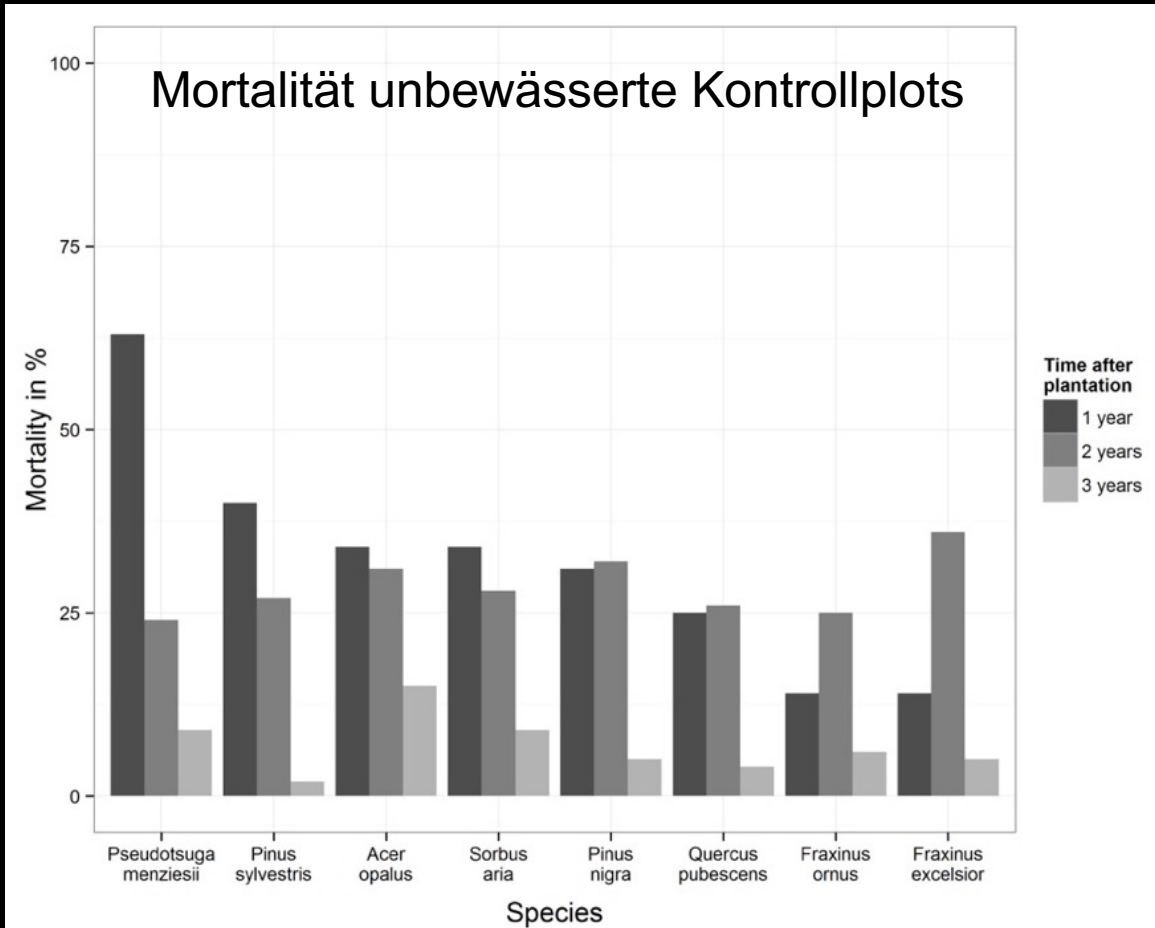


**Kontrolle trocken**

8 einheimische und **nicht-einheimische** Baumarten: **Waldföhre**, **Schwarzföhre**, **Douglasie**, **Flaumeiche**, **Mehlbeere**, **Schneeballbl.** **Ahorn**, **Esche**, **Blumenesche**.

# Aufforstungsexperiment BLS-Lötschbergsüdrampe

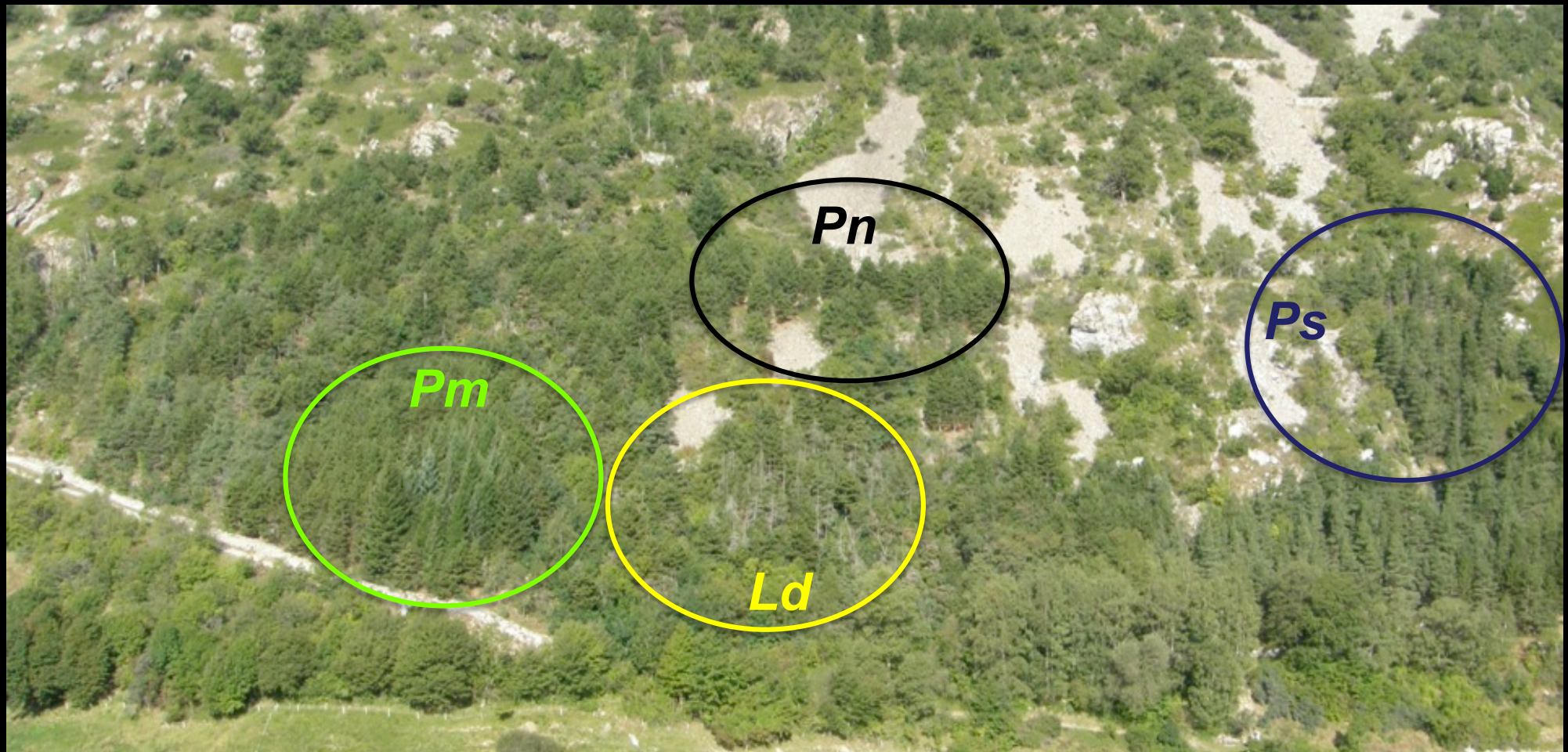
Bewässerung reduzierte die Mortalität um 50-100%



- Unbewässerte Kontrolle: Hohe Mortalität, nach 3 Jahren 58-98%
- Douglasie am empfindlichsten im 1. Jahr, Totalausfall nach 3 Jahren
- **Blumenesche, Flaumeiche und Schwarzföhre am besten angepasst**

# Aufforstungsexperiment Gampel

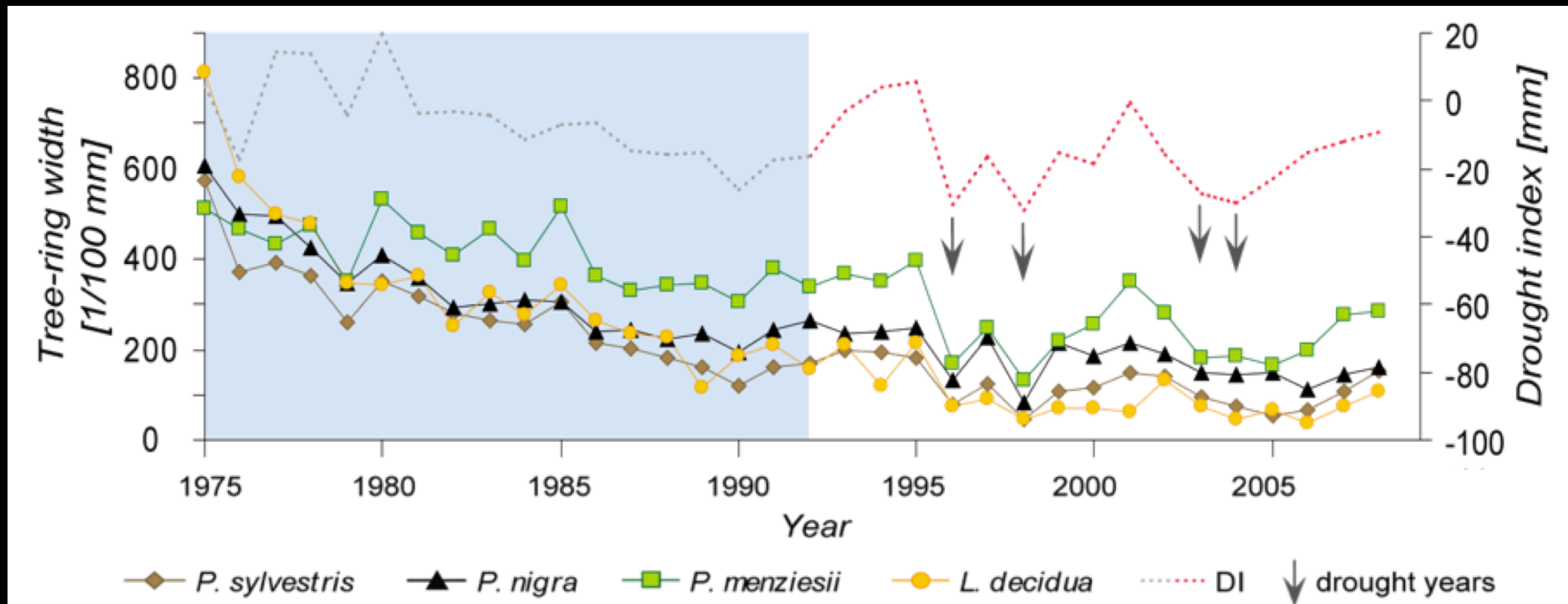
- Was ist der Effekt von 4 extremen Trockenjahren (1996, 1998, 2003, 2004) und Bewässerungsstop und auf Wachstum und Mortalität von adulten Bäumen?



- Aufforstung 1970 mit Bewässerung bis 1992
- *Waldföhre, Lärche, Douglasie, Schwarzföhre*



# Aufforstungsexperiment Gampel



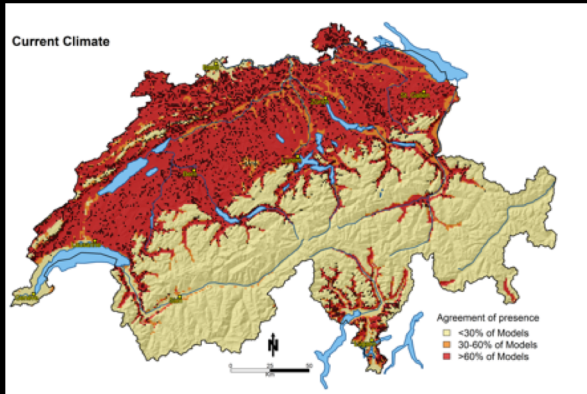
Analyse von a) Wachstumsniveau, b) **abrupte Veränderungen** Wachstumsniveau, c) Wachstumseinbrüche in Trockenjahren, d) Wachstumserholung nach Trockenheit

- **Waldföhre, Lärche:** Mortalität und Wipfeldürre, Wachstumsabfall, viele Wachstumseinbrüche, geringe Wachstumsraten, langsame Erholung nach Trockenheit, deutlicher Effekt des Bewässerungsabbruches
- **Douglasie, Schwarzföhre:** keine Mortalität, vitale Kronen, relativ hohe Wachstumsraten, variables Wachstum, schnelle Erholung nach Trockenheit.
- **Douglasie weniger empfindlich auf Trockenjahre als Fichte**

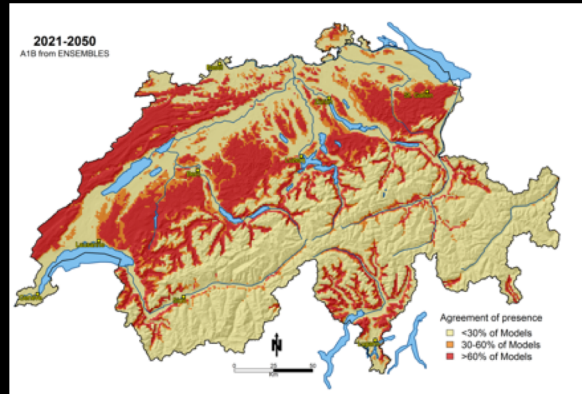
# Standortseignung: SDM und Klimaszenarien CH

**Buche**  
(*Fagus sylvatica*)

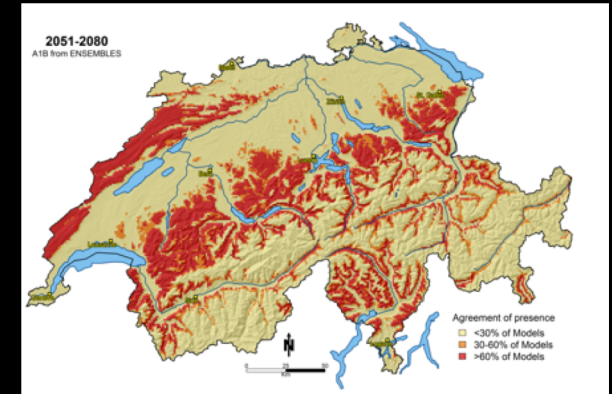
Heutiges Klima



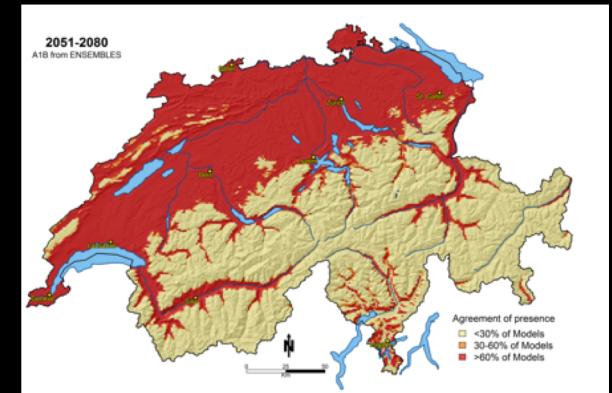
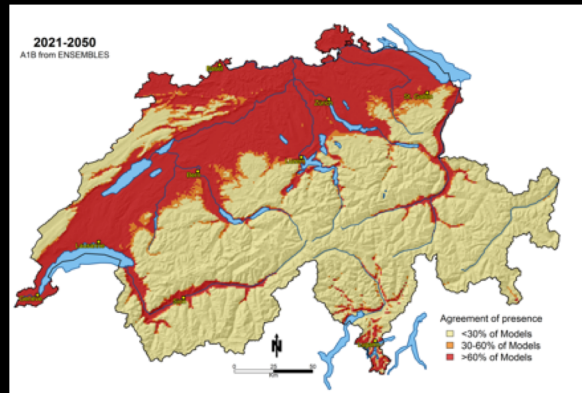
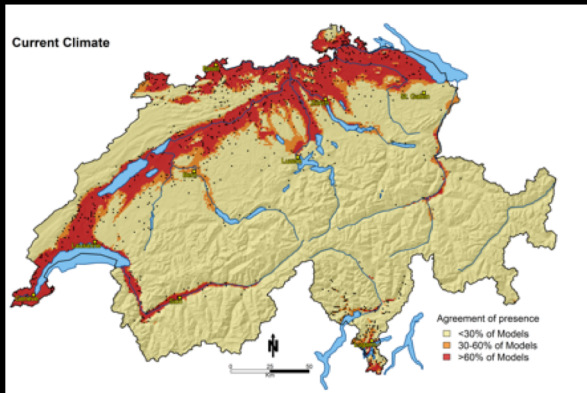
2021-2050



2051-2080



**Eichen**  
(*Q. robur, petraea, pubescens*)



(A1B scenario 1.4-6.4 ° C)

## Mögliche Alternativen/Beimischung:

- Eichen (**Wild**), Hagebuche, Linden, Kirsche
- Edelkastanie?, Hopfenbuche?
- Esche? (Eschenwelke); Blumenesche?
- Robinie? (Biodiversität)

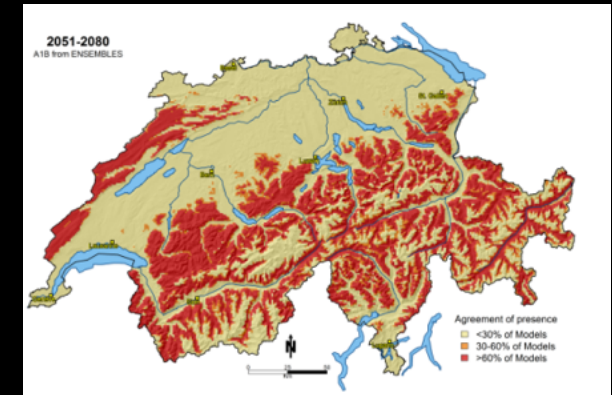
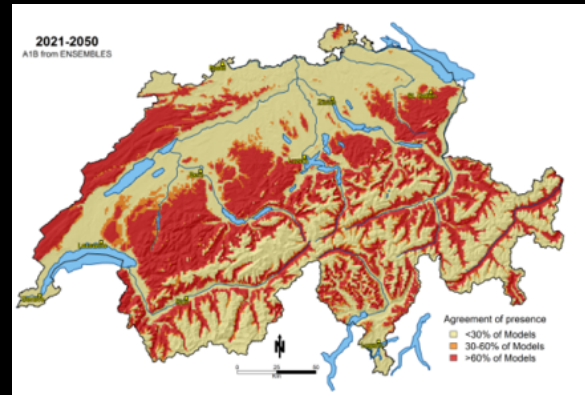
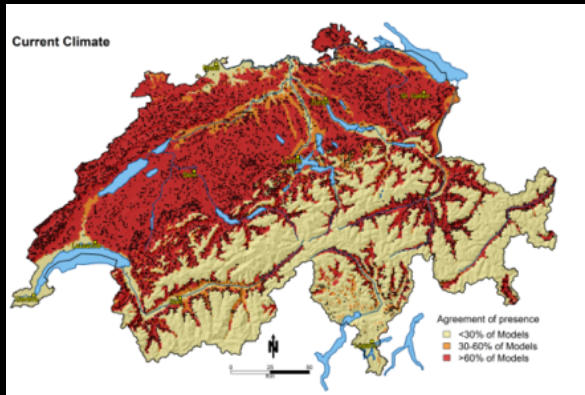
# Standortseignung: SDM und Klimaszenarien CH

Current climate

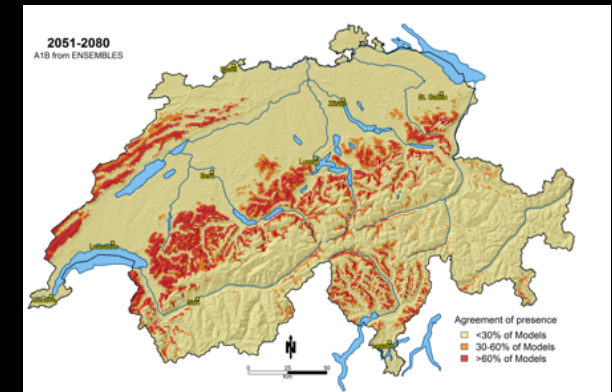
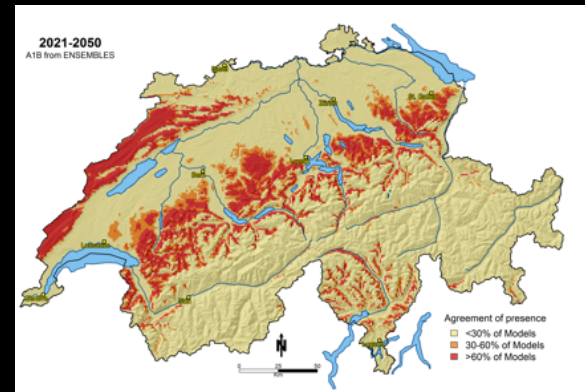
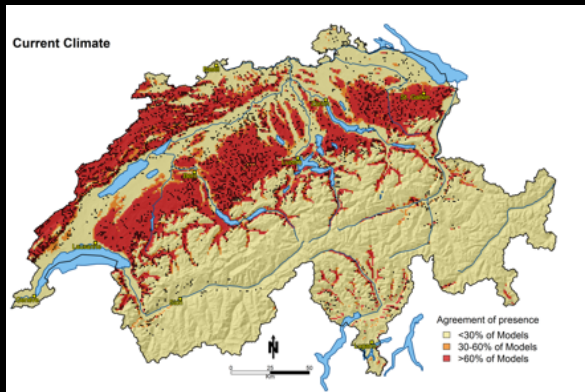
2021-2050

2051-2080

Fichte  
(*Picea abies*)



Tanne  
(*Abies alba*)



(A1B scenario 1.4-6.4 ° C)

## Mögliche Alternativen/Ergänzungen:

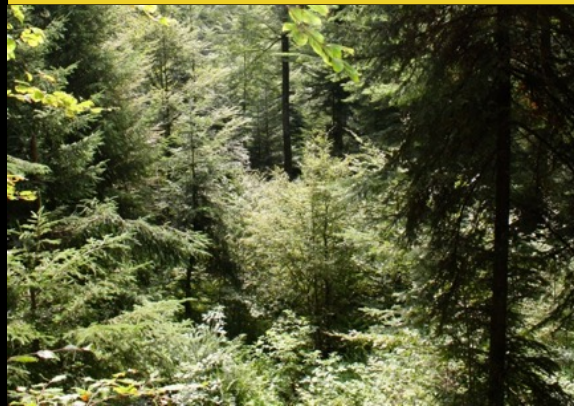
- Weisstanne auf tiefgründigen Standorten (**Wild**)
- Waldföhre auf heute mittleren Standorten
- Douglasie? (Frosttrocknis, Trockenheit Verjüngungsphase, **Wild**)
- Schwarzföhre? (Schädlinge und Krankheiten)
- Zedern? ...

# Prinzipien Anpassung: Risikoverminderung & Waldleistungen

↗ Baumartenvielfalt



↗ Strukturelle Vielfalt



↗ Genetische Vielfalt



↗ Widerstandskraft  
Störungen (Einzelbaum)



↘ Umtriebszeit,  
Zieldurchmesser

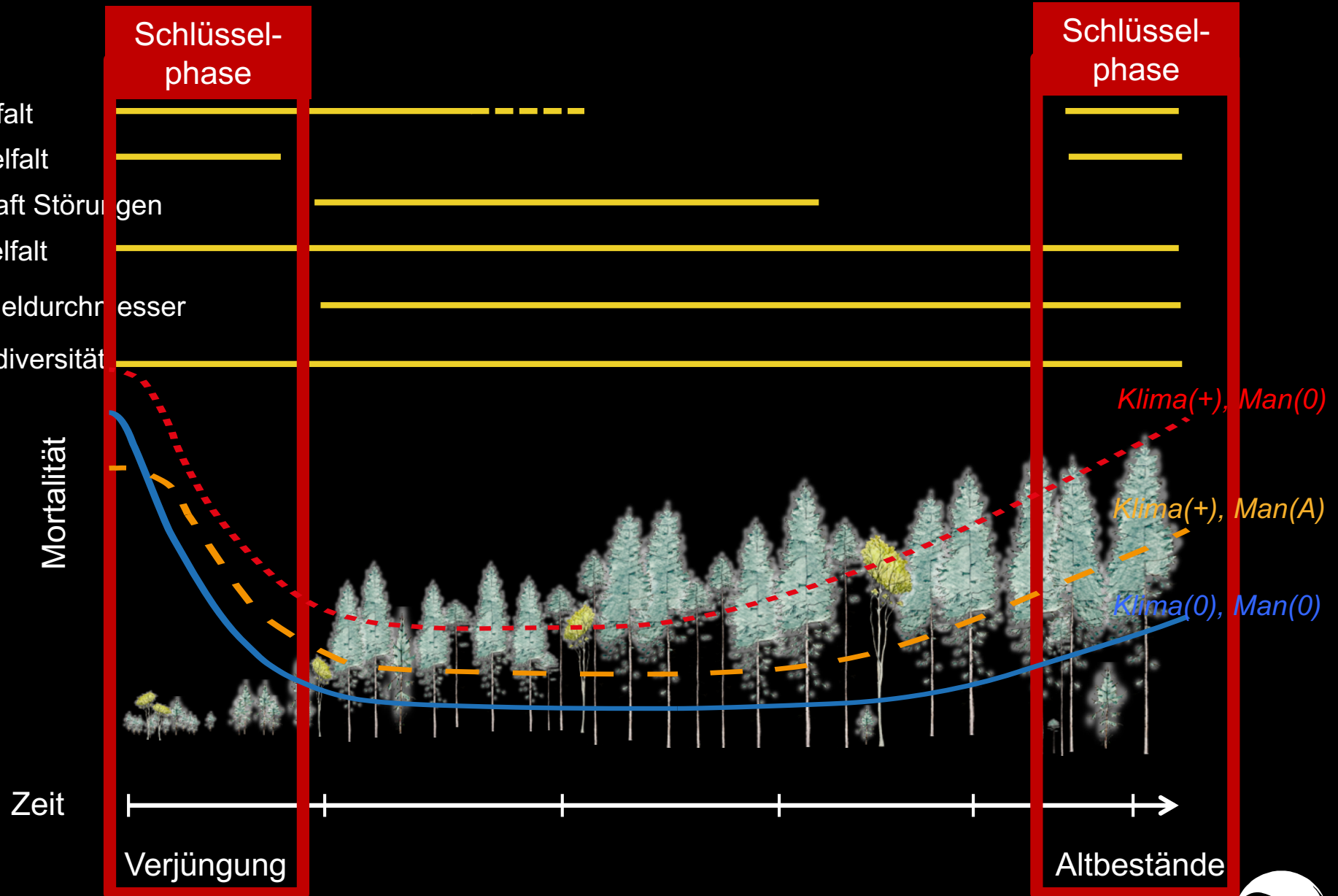


↗ Natürliche Biodiversität  
für **resiliente** Wälder



# Anpassungsprinzipien und Bestandesentwicklungen

- Baumartenvielfalt
- Genetische Vielfalt
- Widerstandskraft Störungen
- Strukturelle Vielfalt
- Umtriebszeit, Zieldurchmesser
- Natürliche Biodiversität



Zeichnung: A. B. Nielsen

Brang et al. 2014 Forestry; Huber et al. 2013 Ecol & Society



# Zusammenfassung

- **Biotische Risiken als Schlüsselfaktoren** für die zukünftige Waldentwicklung
  - Waldgrenze: **Zunahme Baumwachstum und Waldfläche** → zeitliche Dynamik nicht linear und abhängig von Verjüngungserfolg (Schneedecke und Ausaperung).
  - In Tieflagen (600 - 1000 m ü.M.): Häufigere Trockenjahre → **Trockenheit als Auslöser für Wachstumsreduktion und Baumsterben.**
  - **Feldexperimente zeigen Potential von waldbaulichen Eingriffen** zur Erhöhung von Wasserverfügbarkeit und Widerstandskraft gegenüber direkten und indirekten Effekten von Trockenheit → testen **zukünftiges Baumartenportfolio.**
  - Zuverlässliche langfristige **Monitoringdaten**, kombiniert mit kurz- und mittelfristigen **Feldexperimenten** in verschiedenen Waldtypen als Grundlage zur
    - Verbesserung Systemverständnis
    - Kalibrierung Modellierungsansätze
    - Schärfung Szenarien der Waldentwicklung
- **Zukunftsgerichtete, klimaeffiziente Waldbewirtschaftung** (climate-smart forestry)!

# Was wird sich im Waldbau ändern?

- **Keine waldbauliche Entscheidung** ohne Berücksichtigung des Klimawandels ...
- Waldbewirtschaftung und Wissenschaft erarbeiten gemeinsam fundiertes Wissen und Entscheidungsgrundlagen → kritische ökologische Entwicklungen und Anpassungen der Waldbewirtschaftung in schnell veränderndem Umfeld
- **Heute beginnen Waldbau anzupassen** – aber mehr graduell als radikal, Anpassung anstatt Umbau:
  - Erhöhen **Baumartenvielfalt (Wild)** zur Verringerung zukünftiger Risiken → Veränderungen Baumartenzusammensetzung dürfte häufiger werden.
  - Erhöhen **genetische Vielfalt bei Pflanzungen** (zukünftige Bedingungen?)
  - Vielfalt in **waldbaulichen Konzepten** (klein- u. grossflächige Eingriffe, Plenter- und Femelschlagsysteme, (grossflächige) natürliche Störungen nutzen für Neuausrichtung, etc.)
  - **Erhöhung der Widerstandskraft der Wälder** indem Biodiversität auf allen trophischen Ebenen gefördert wird (oberirdisch und unterirdisch)

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



SWISS  
FOREST  
LAB



nfz.forestnet  
NANCY | FREIBURG | ZÜRICH