

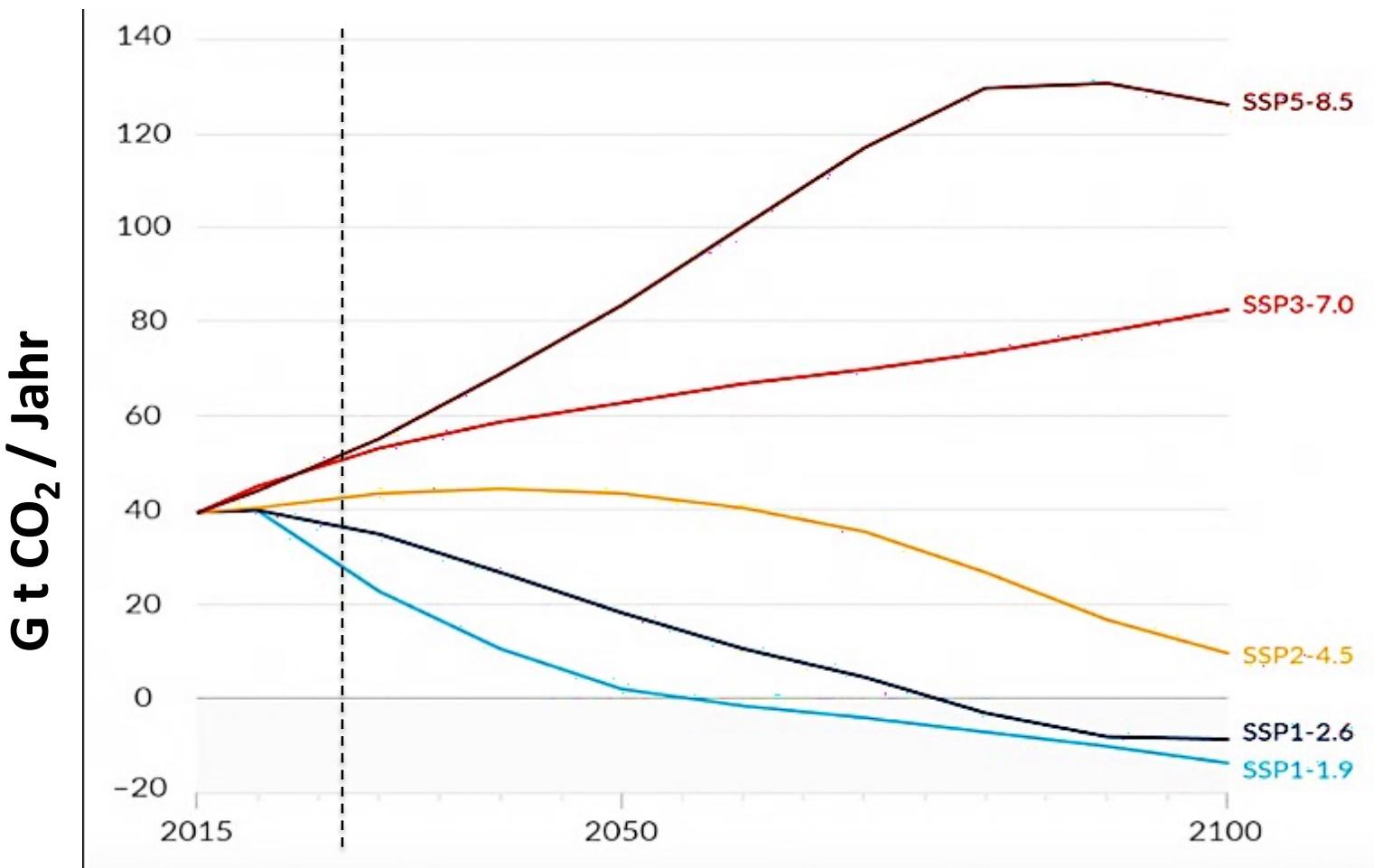
Baumartenwahl im Klimawandel

Was die Forstwirtschaft wissen muss

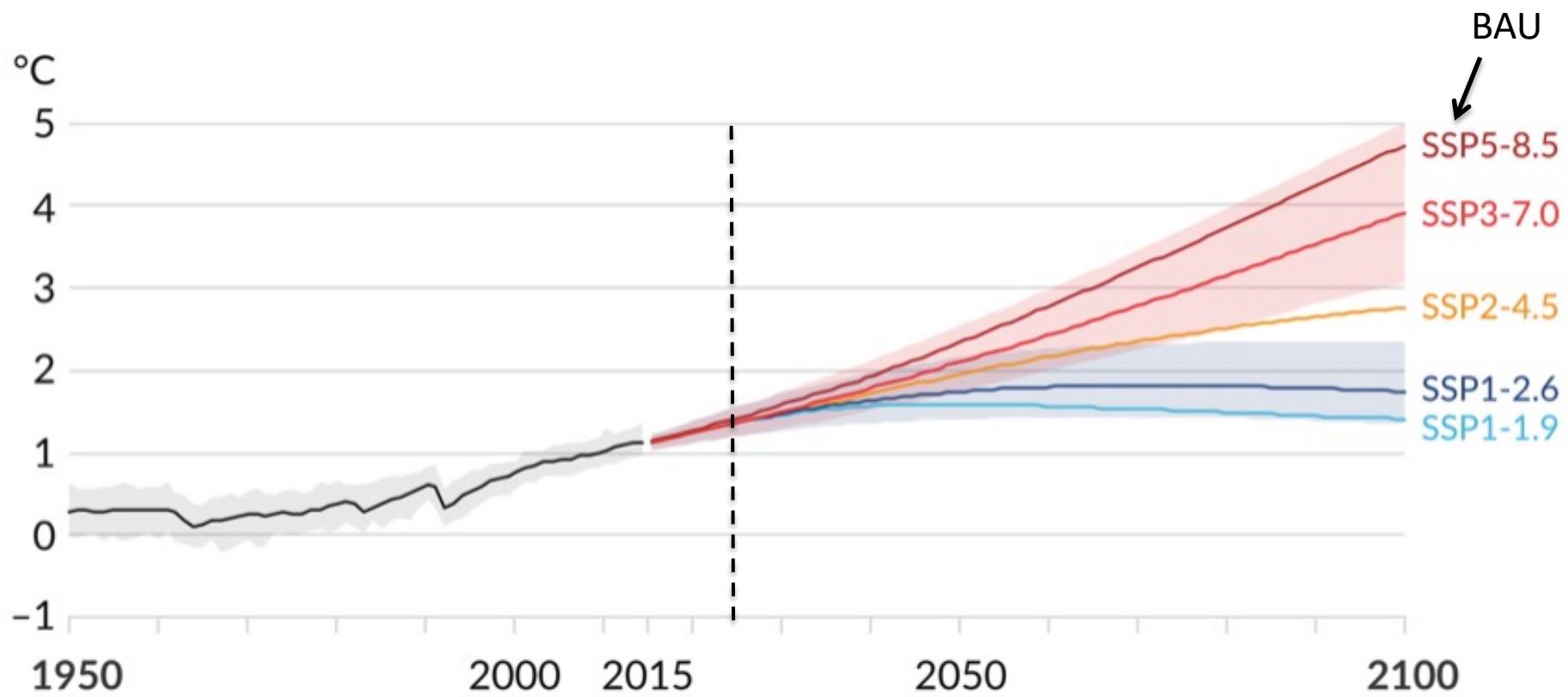
Christoph Leuschner
Lehrstuhl Pflanzenökologie
Georg-August-Universität Göttingen

Rezente Klimatrends

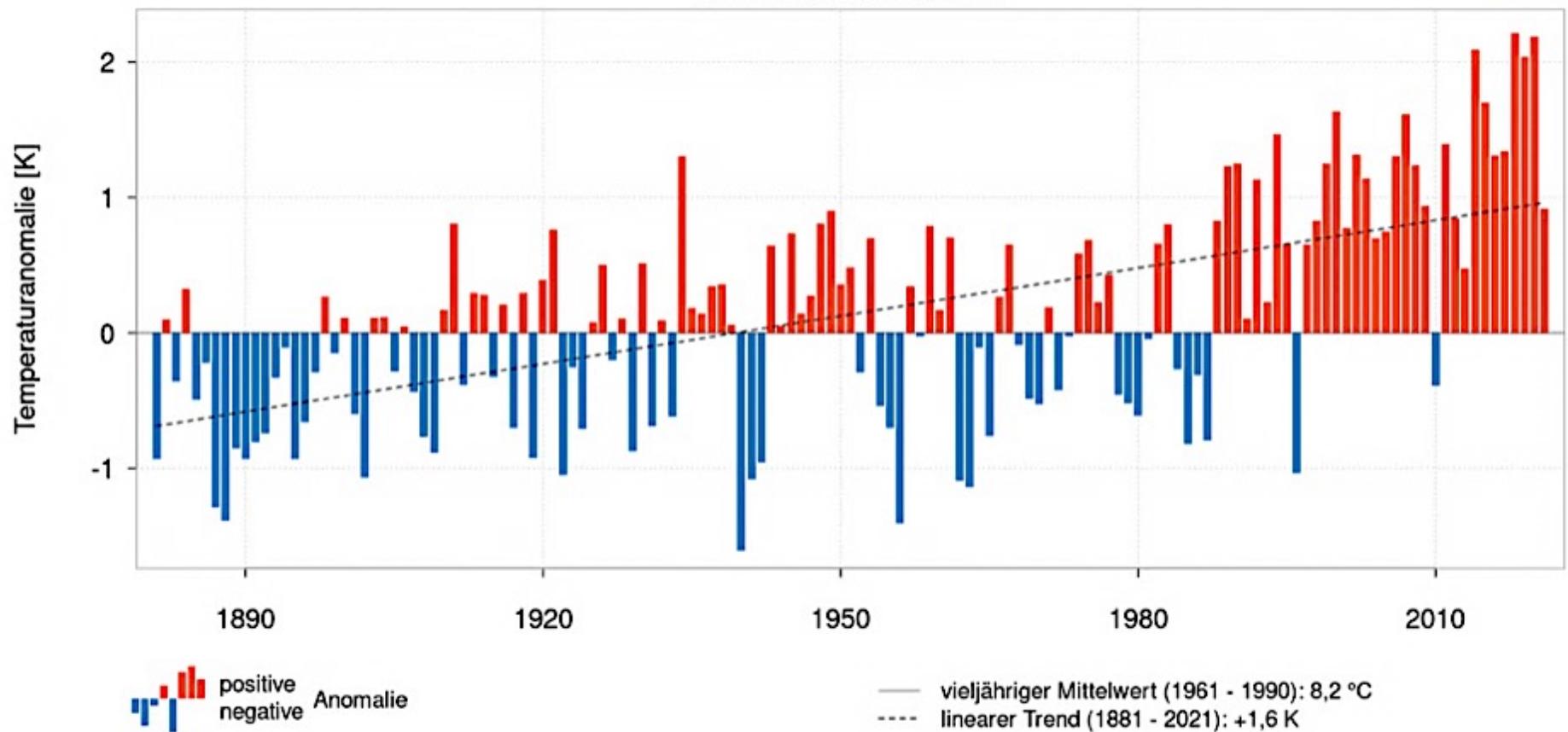
Zukünftige jährliche CO₂-Emission nach verschiedenen Szenarien



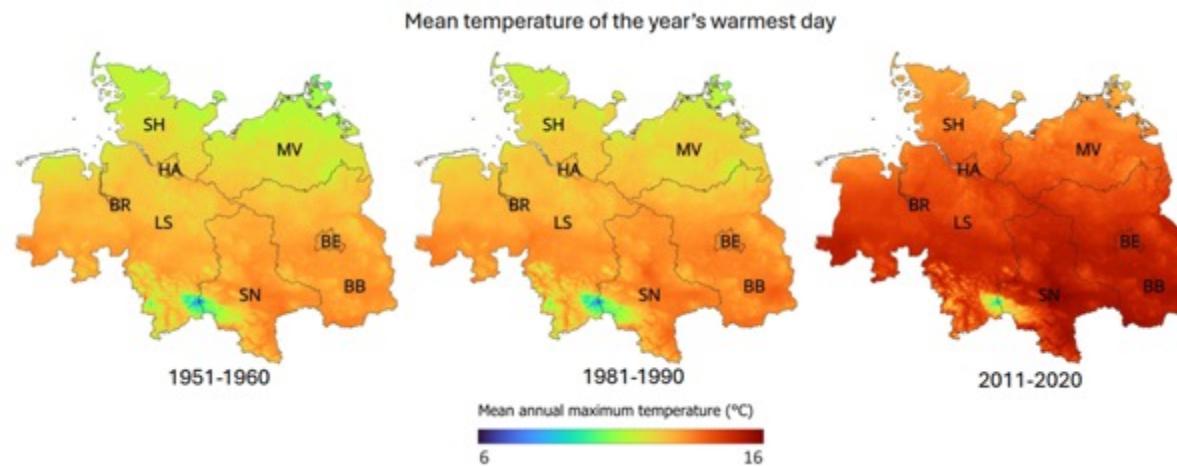
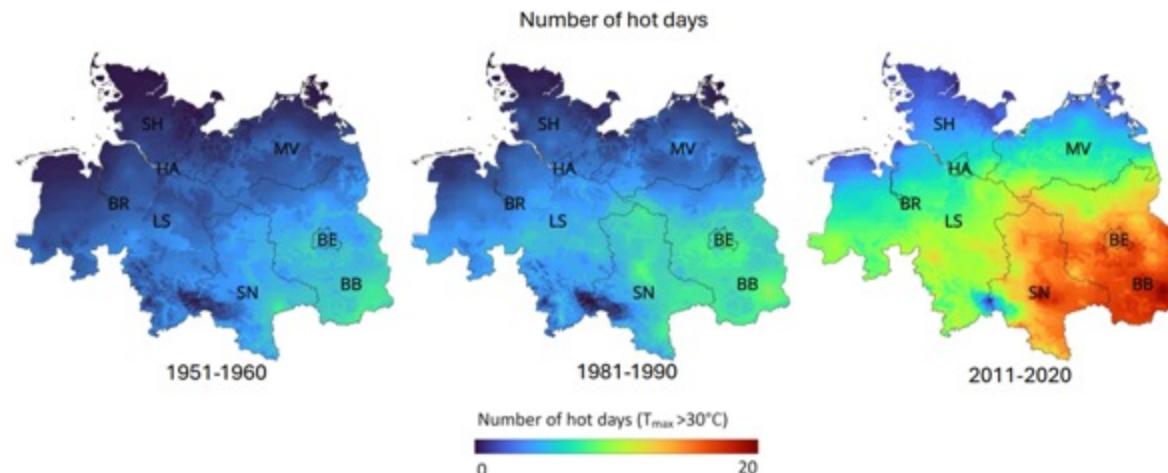
Änderung der globalen Oberflächentemperatur gegenüber 1850-1900



Klimaerwärmung in Deutschland seit 1881: 1.6 °C

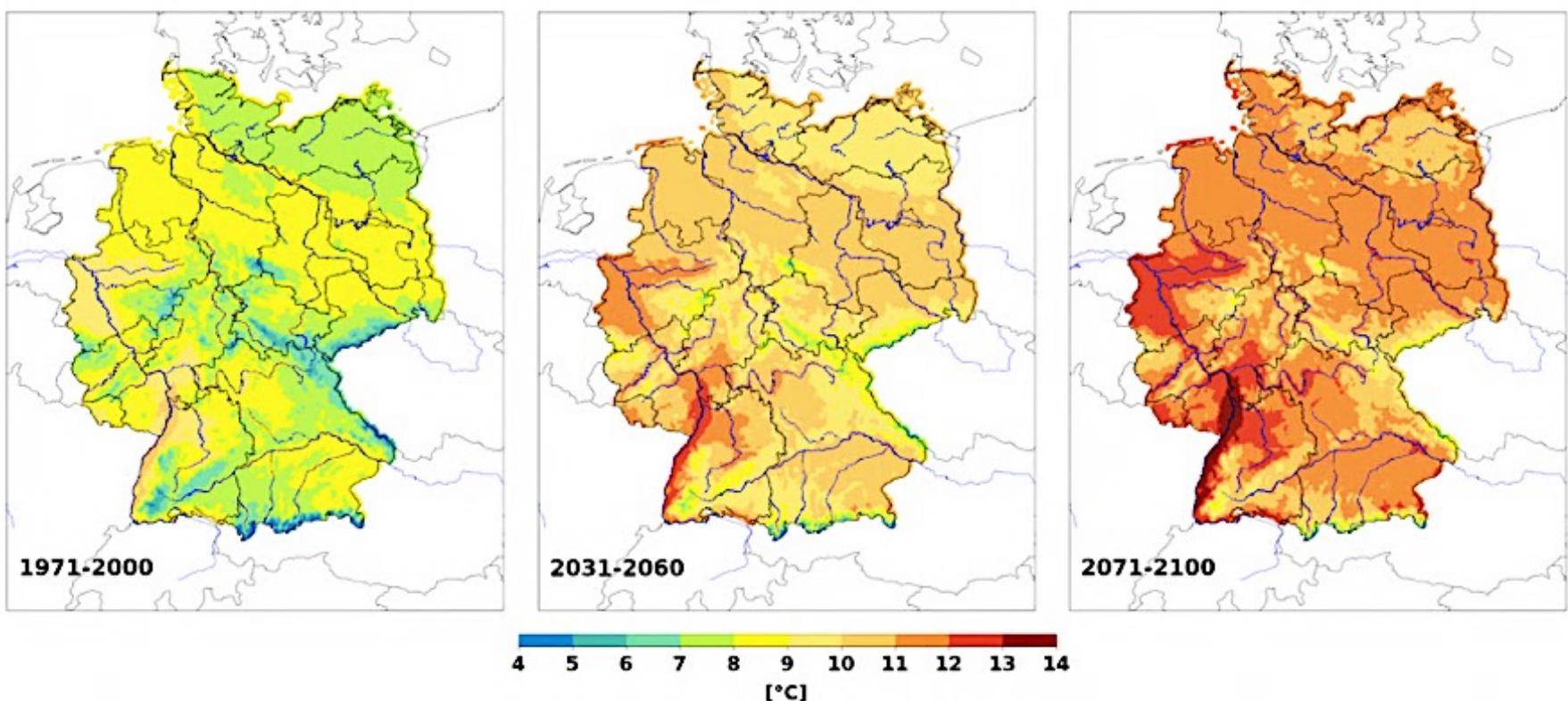


Erwärmung in Norddeutschland 1950-2020

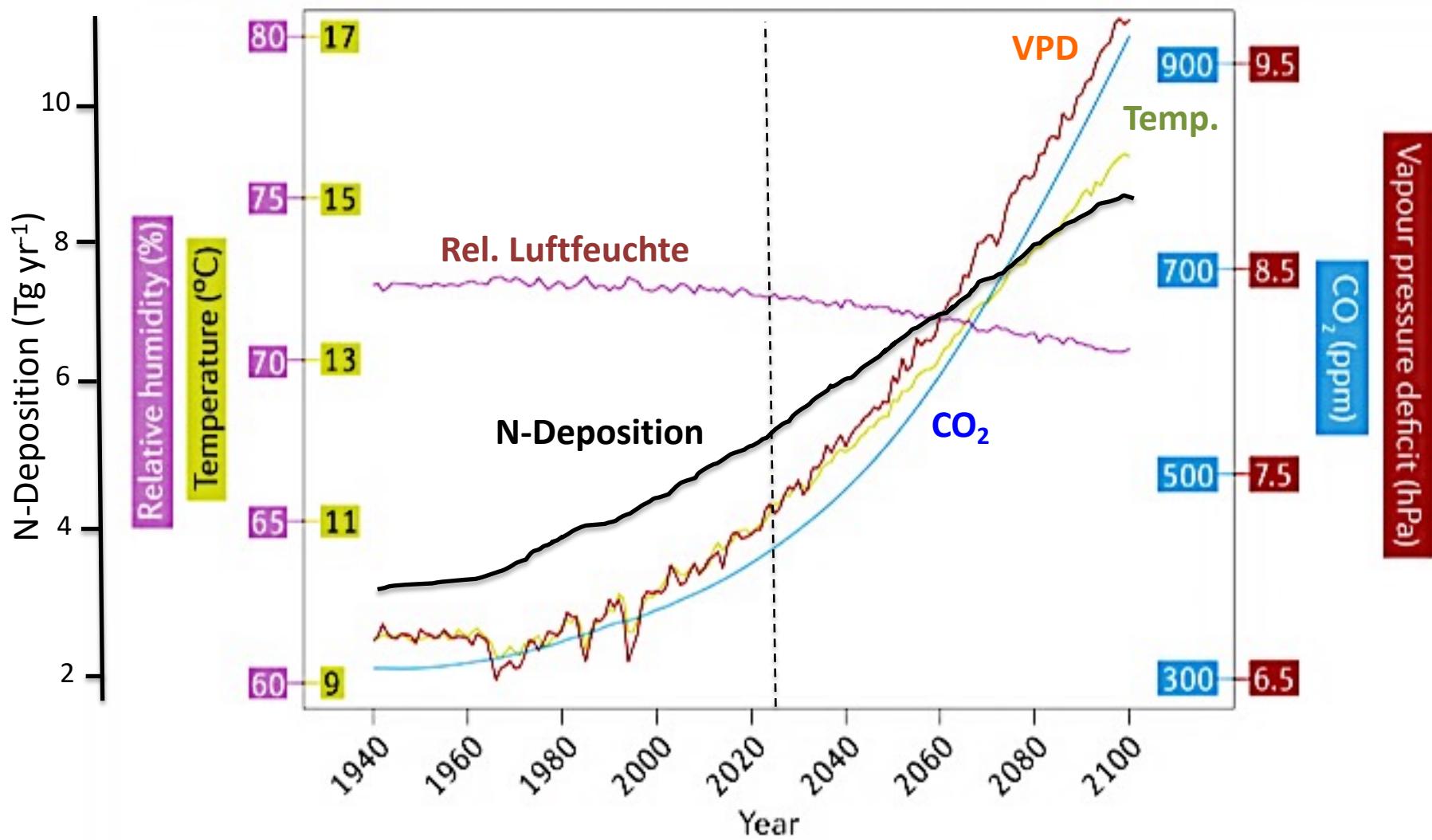


Klimaprojektion bis 2100

COSMO-CLM Simulation nach RCP8.5 Szenario

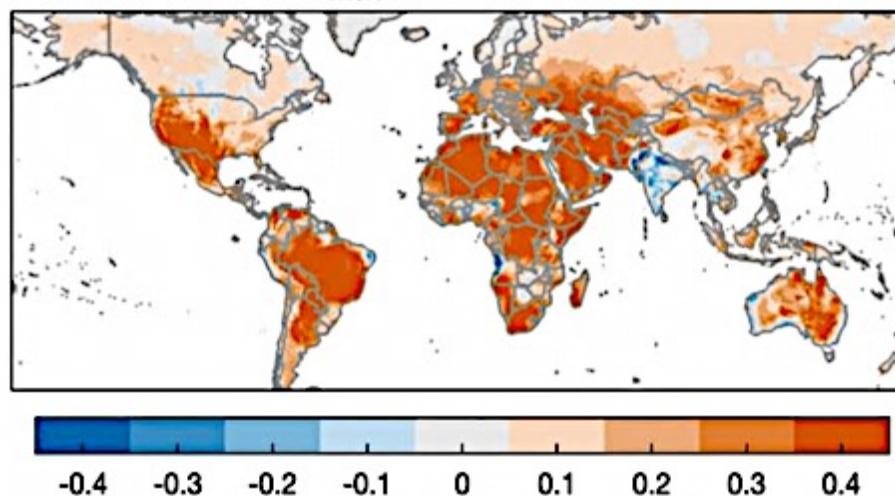


Veränderungen der atmosphärischen Umwelt

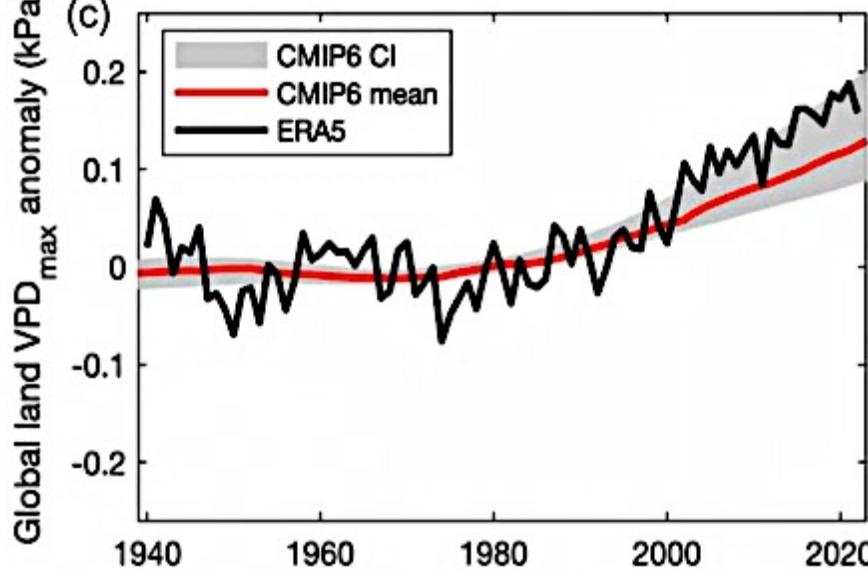


Increasing atmospheric vapor pressure deficit (VPD)

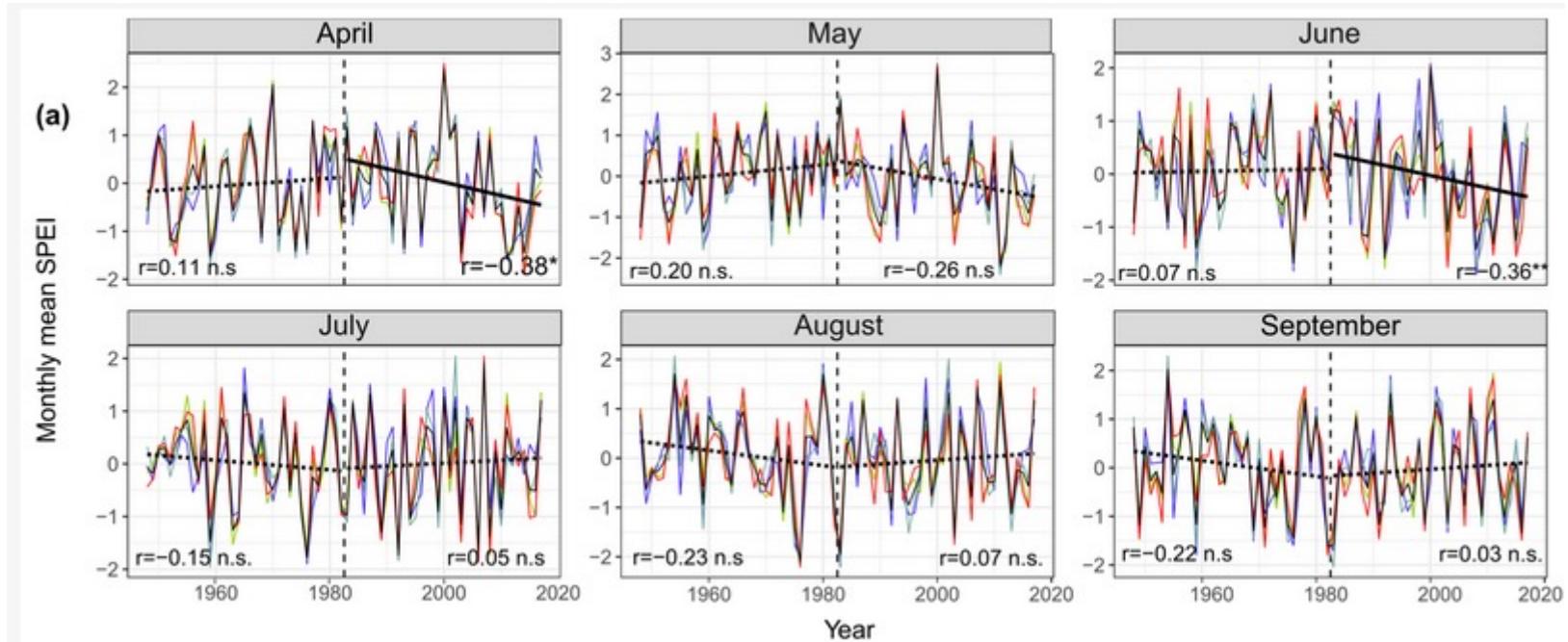
(a) Trends in VPD_{max}



(c)



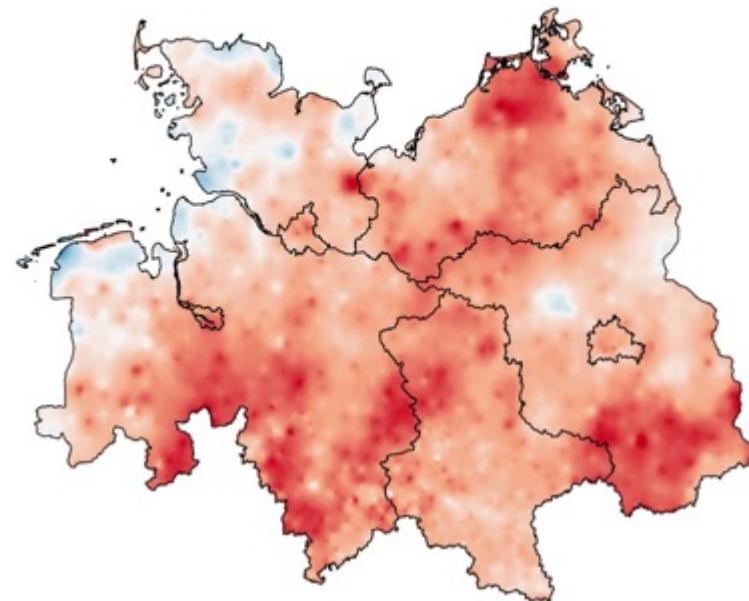
Wachstumsrelevante Klimatrends in Norddeutschland 1948-2017



SPEI – Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

Aridisierung des Frühsommers (April, (Mai), Juni,
aber nicht des Spätsommers

Langfristige Veränderung in der Klimatischen Wasserbilanz des Sommers (April – September) von 1948/1982 bis 1983/2017



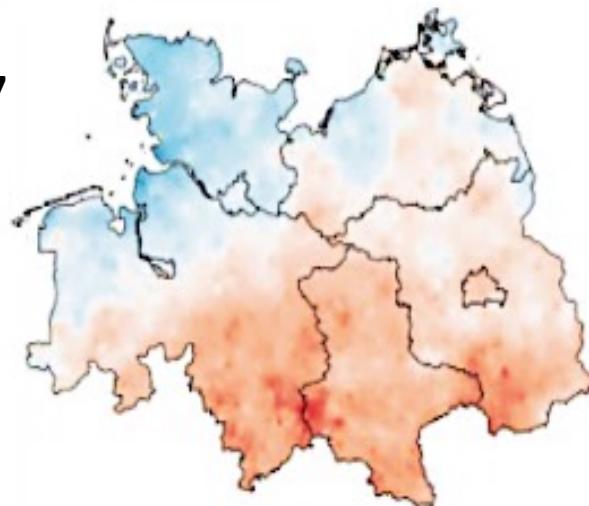
Vielerorts Abnahme um 20-40 mm



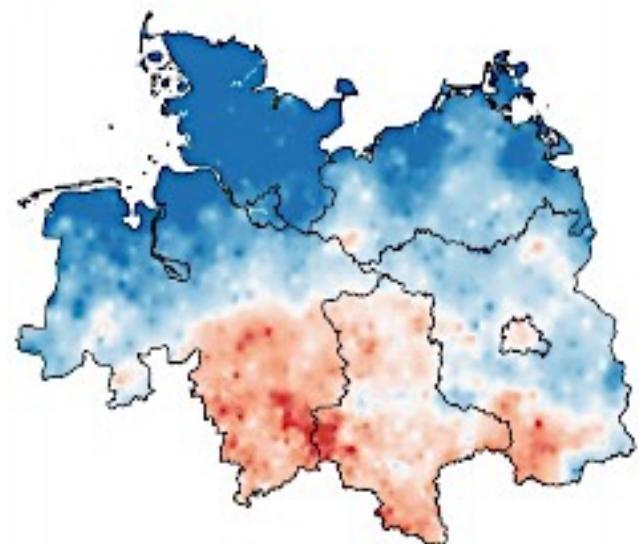
Wachstumsrelevante Klimatrends in Norddeutschland 1948-2017

Langfristige Veränderung
in Juni-SPEI und
Juni-Niederschlag
1948/1982 bis 1983/2017

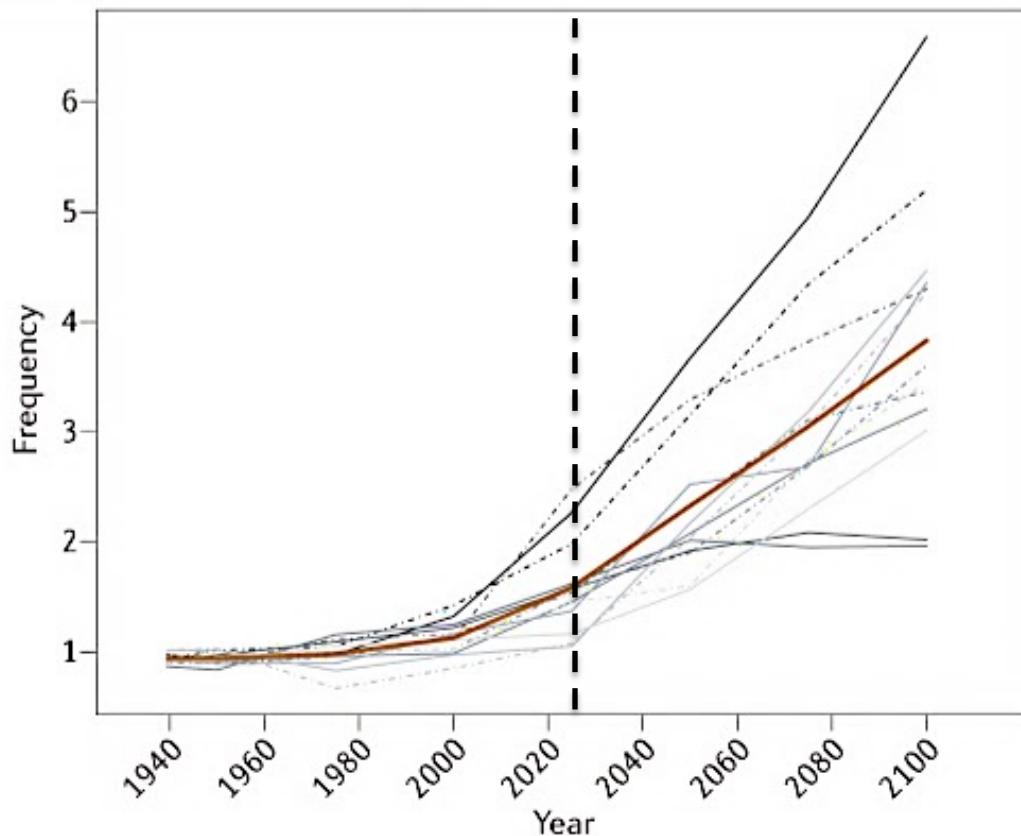
Juni-Aridität (SPEI)



Juni-Niederschlag

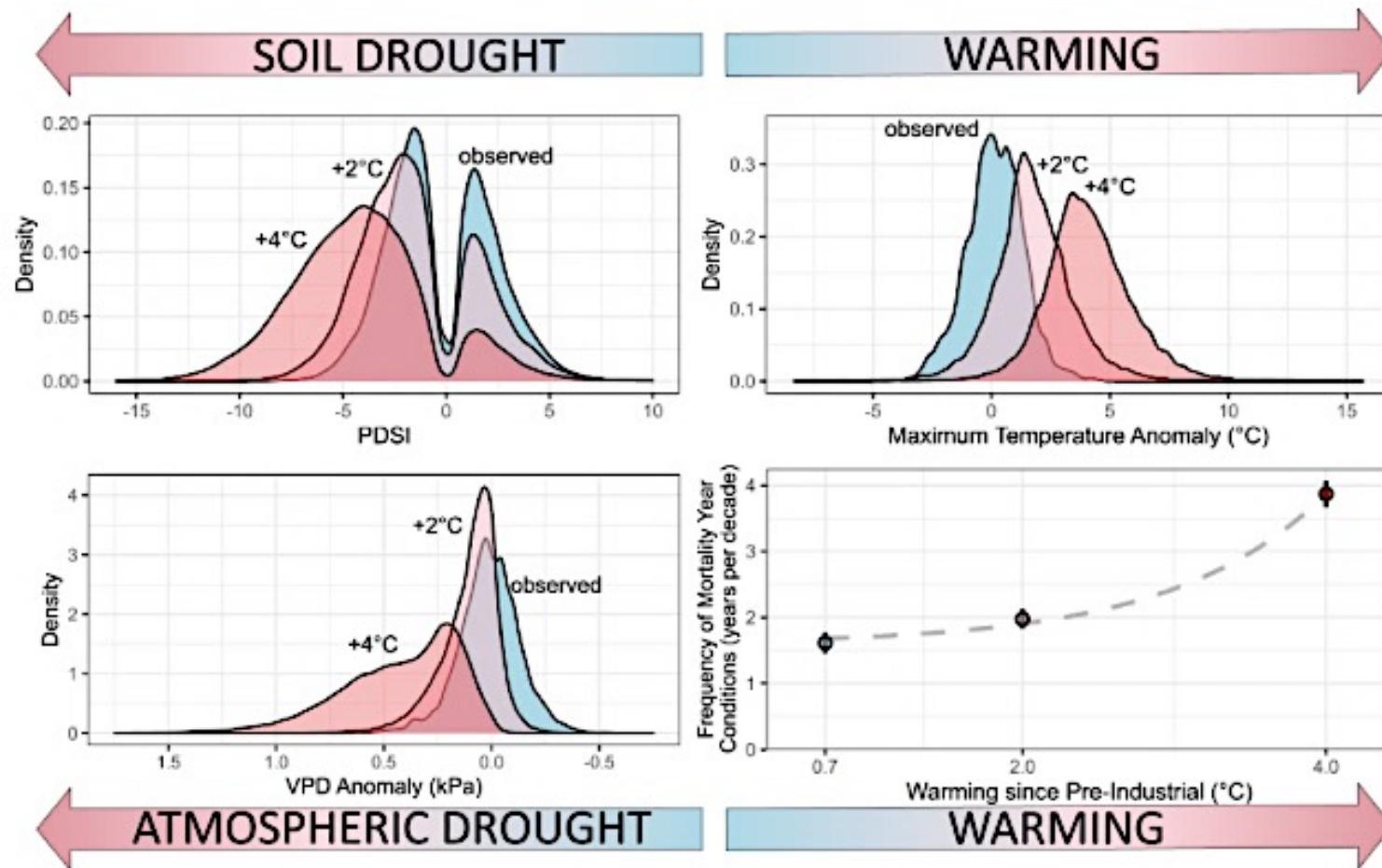


Häufigkeit von Dürren



— GFDL-ESM2G	— GISS-E2-R	— INMCM4	— NorESM1-ME
---- GFDL-ESM2M	---- GISS-E2-R-CC	— MIROC-ESM	— Multi-model
— GISS-E2-H	— HadGEM2-CC	---- MIROC-ESM-CHEM	mean
---- GISS-E2-H-CC	---- HadGEM2-ES	— NorESM1-M	

3 threats to tree vitality will increase in future

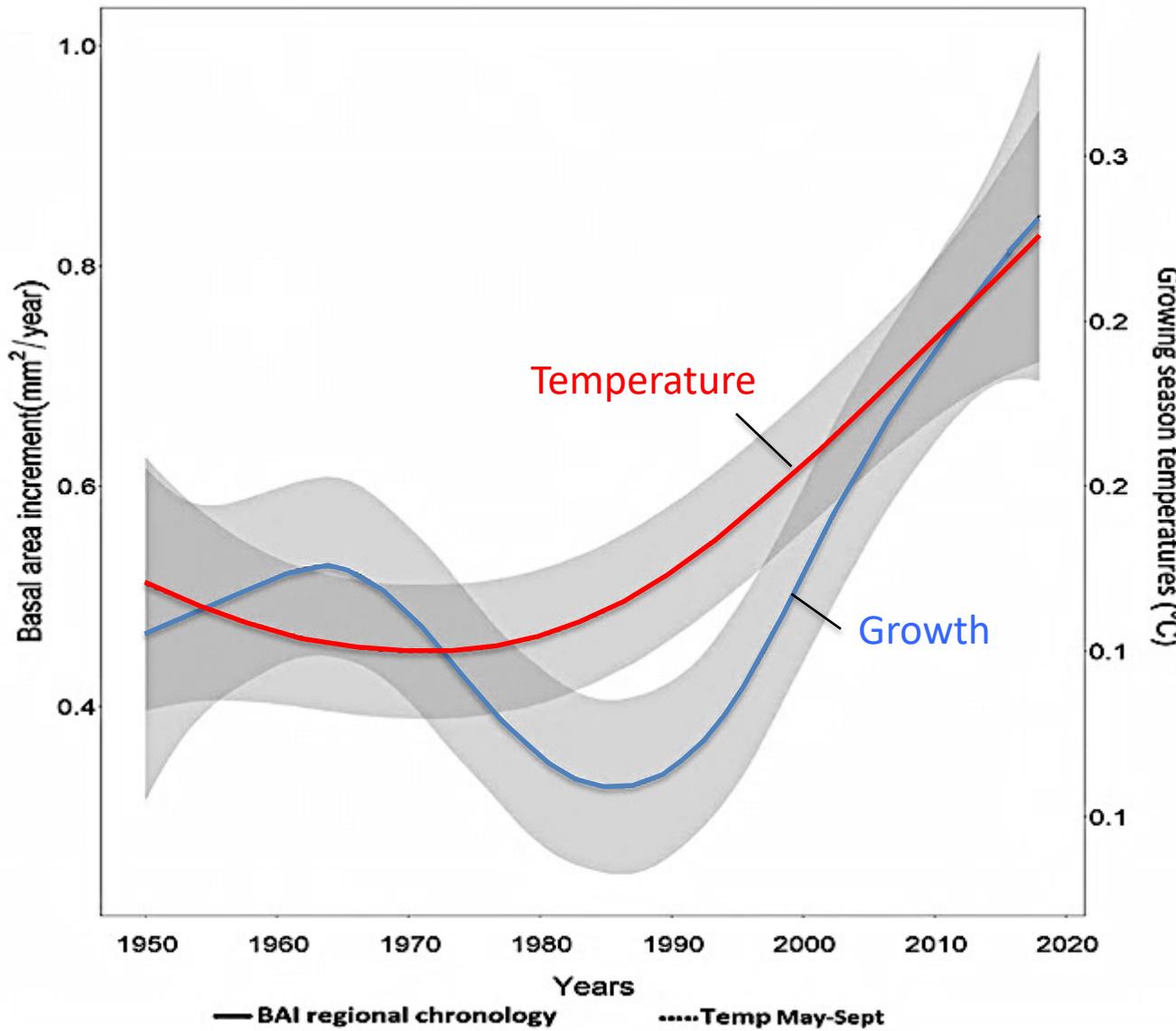


Kombinierte Wirkung von - Erwärmung (Hitzeeffekte)
- Bodentrockenheit
- Sättigungsdefizit der Luft

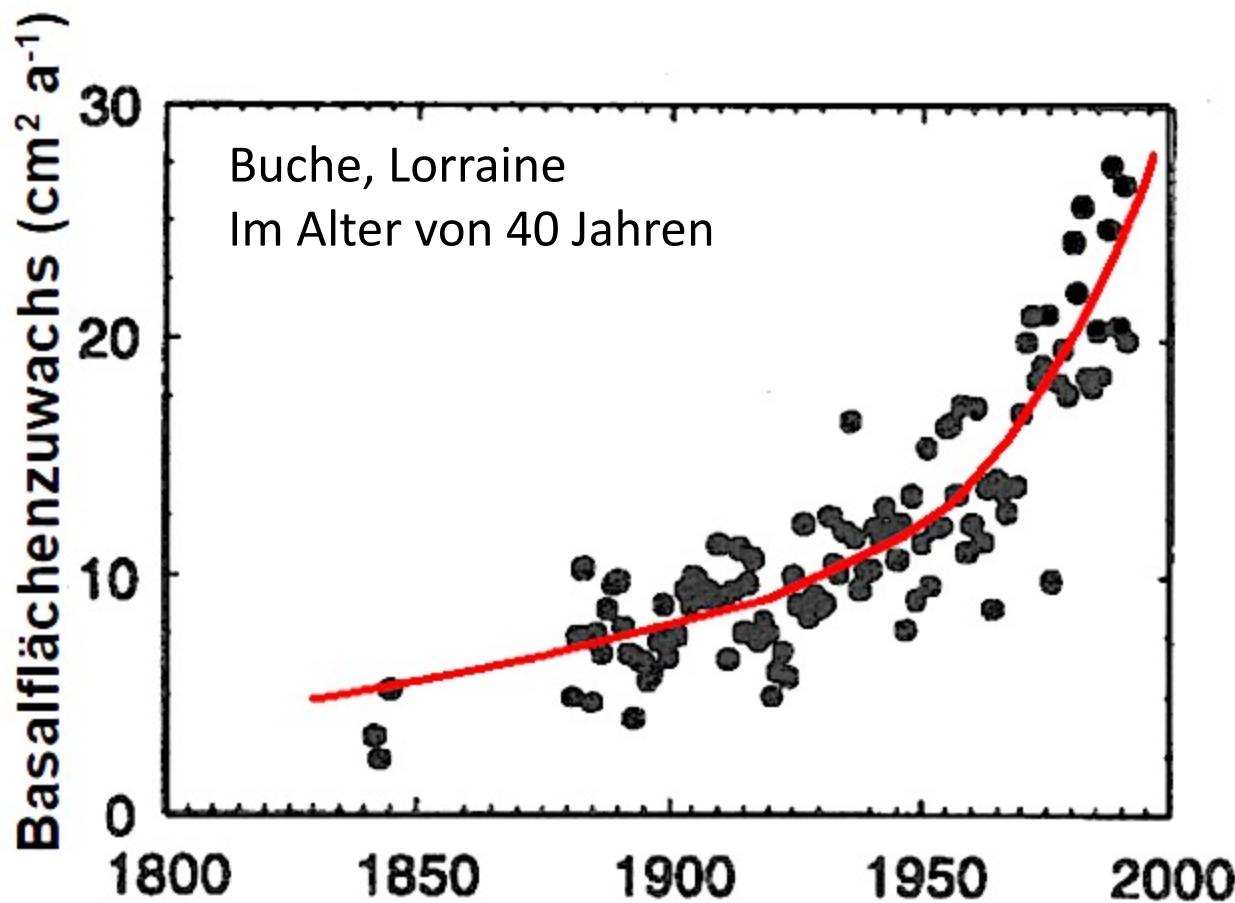
Wachstumstrends in der Vergangenheit

Warming increases growth

(Natural spruce forests in Slovakia)



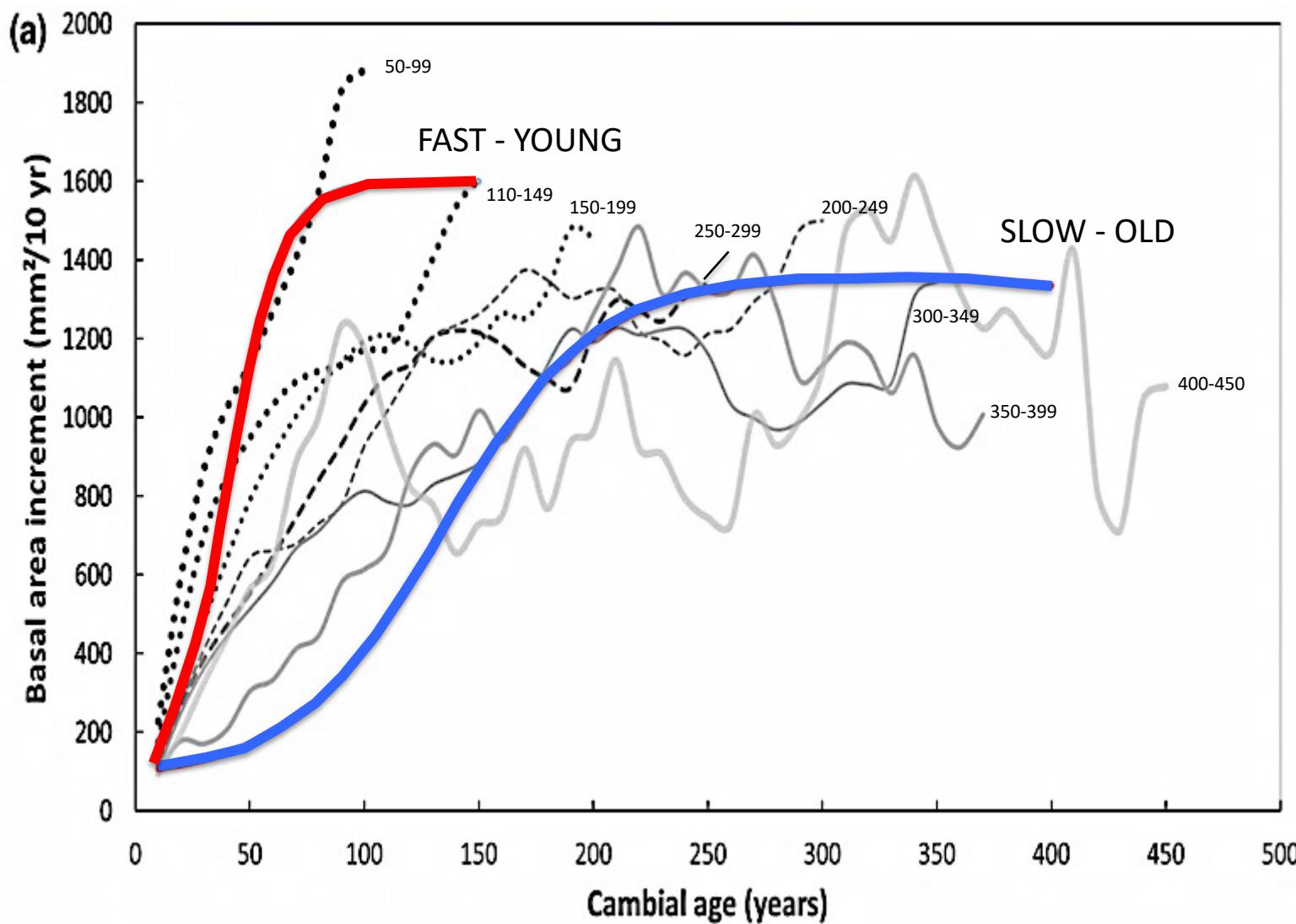
Starke Wachstumsteigerung im letzten Jahrhundert



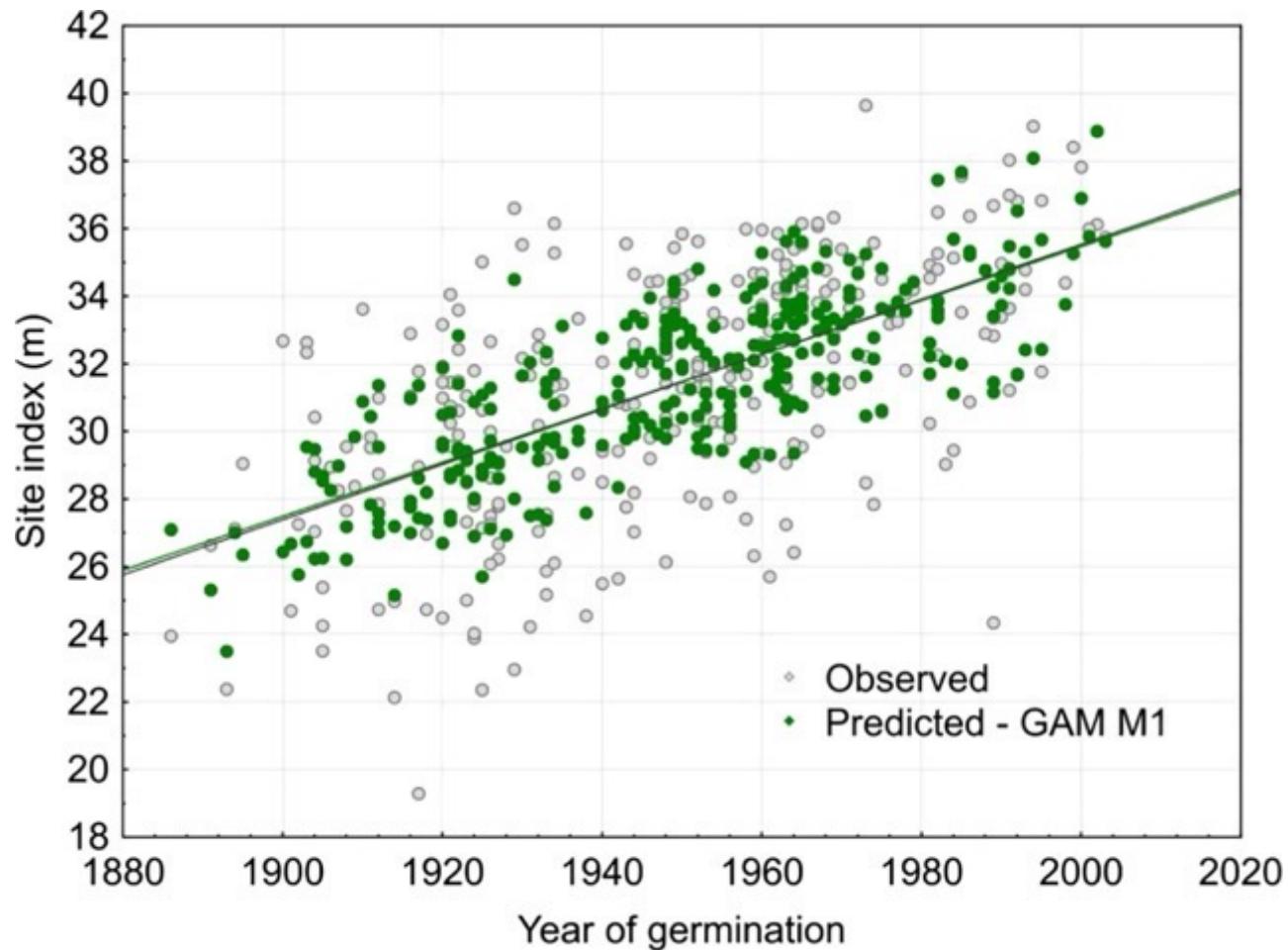
Etwa Verdreifachung des Zuwachses von 1900 - 2000

Acceleration of tree growth

(Natural spruce forests in Slovakia)

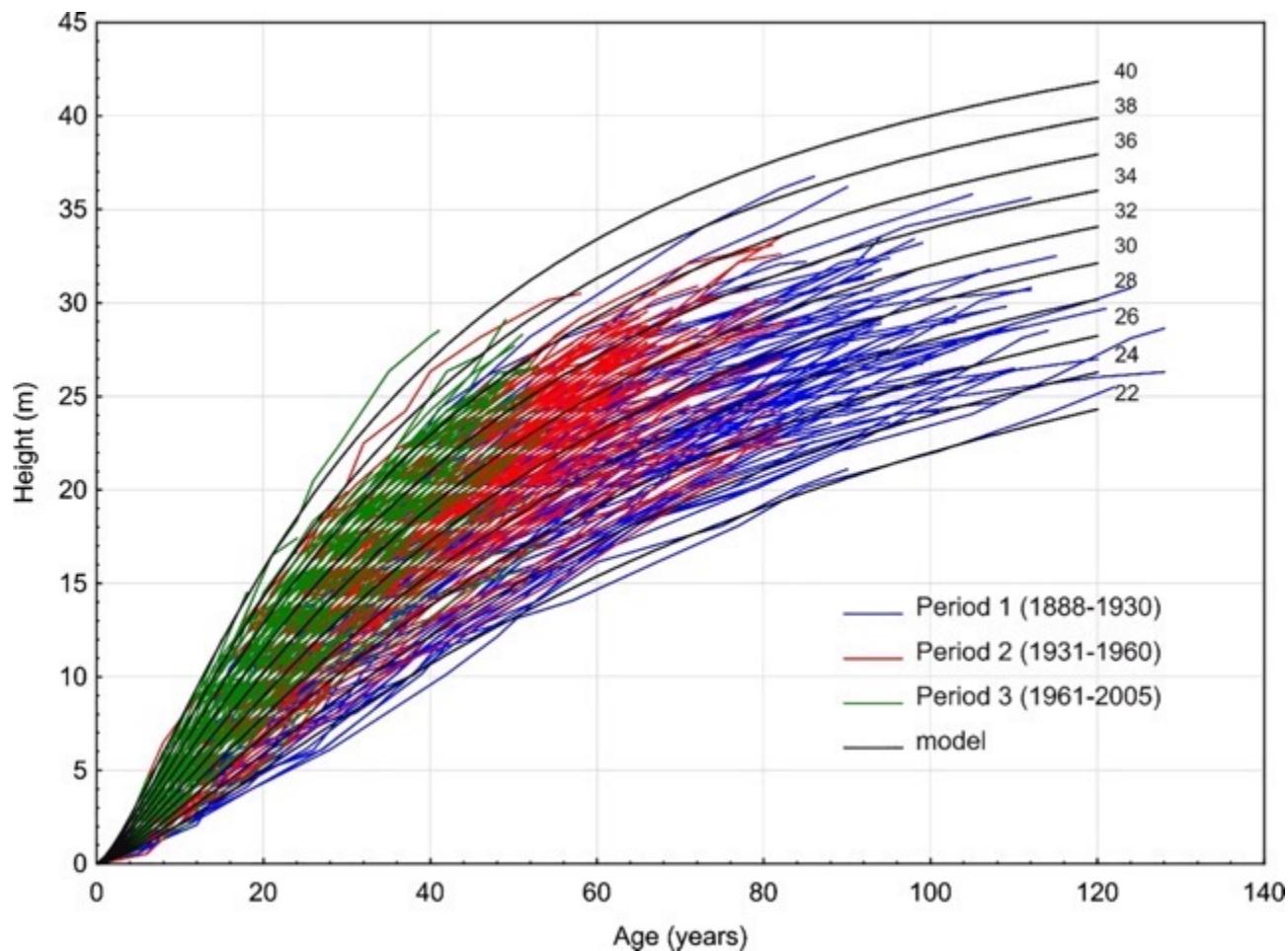


Produktivität von polnischen Kiefernbeständen



Zunahme Höhenzuwachs von 1900 bis 2000 um 29 %

Produktivität von polnischen Kiefernbeständen



Zunahme Höhenzuwachs von 1900 bis 2000 um 29 %

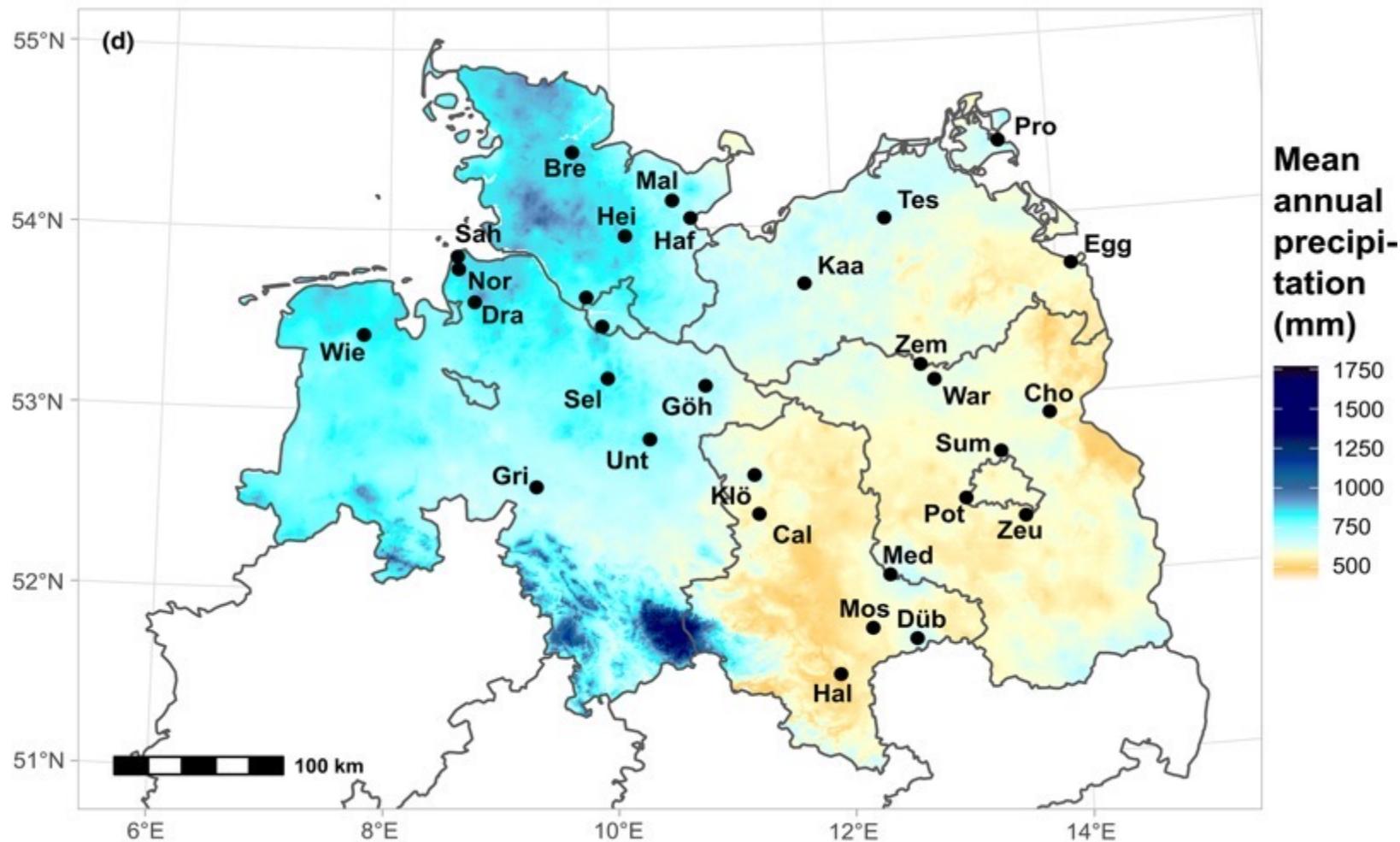
Rezente Wachstumstrends und Klimasensitivität des Zuwachses

Buche



Klimasensitivität der Buche in Norddeutschland

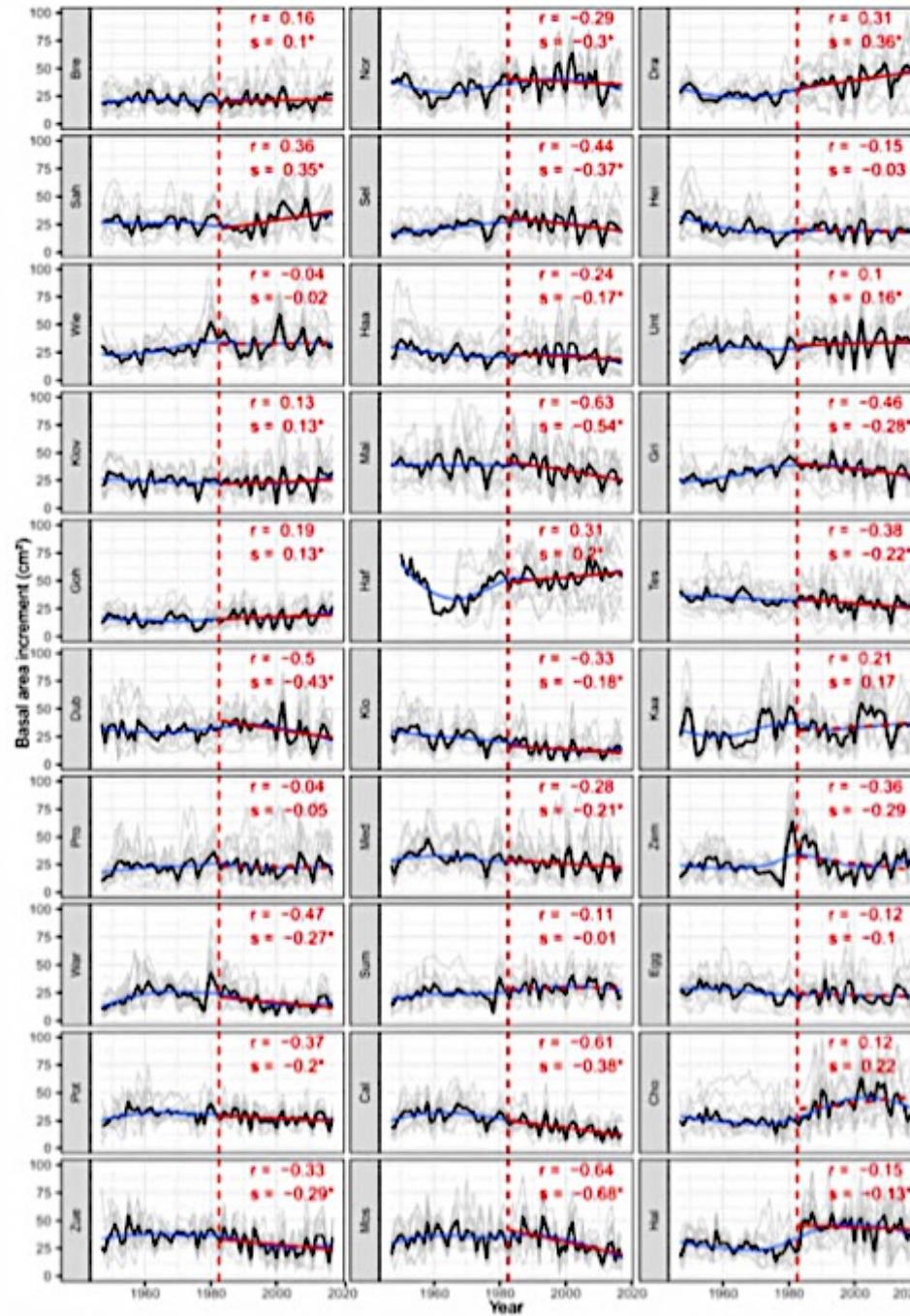
30 Buchenbestände entlang eines Niederschlagsgradienten ($850 - 500 \text{ mm a}^{-1}$)



Zuwachstrends 1947-2017 in 30 Buchenbeständen

30 Buchenbestände
entlang eines
Niederschlagsgradienten
(850 – 500 mm a⁻¹)

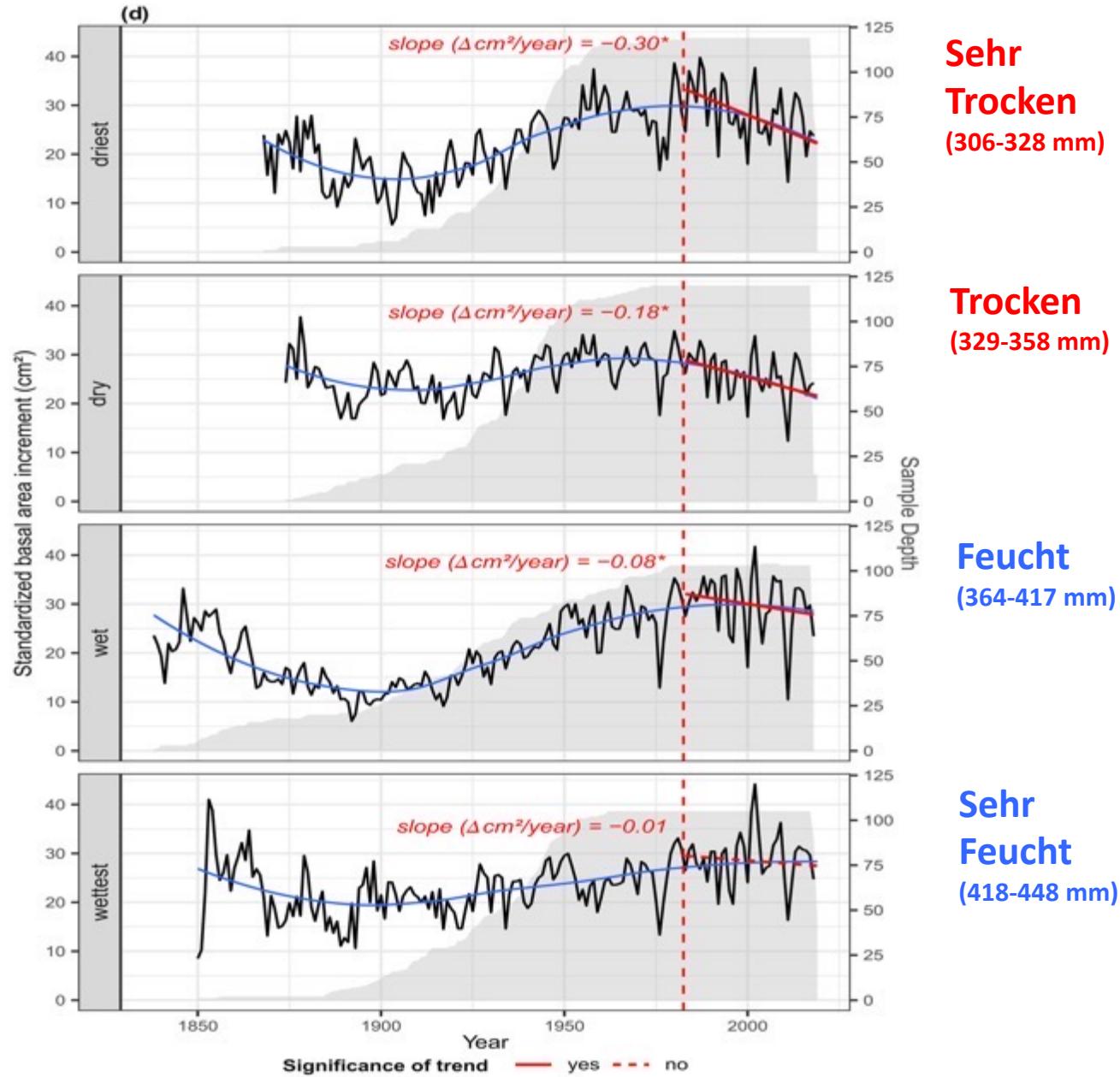
60% der Bestände
mit negativem
Zuwachstrend seit
1980
(signifikant oder
tendenziell)



Mehr als 60 % der norddeutschen Buchenbeständen mit Wachstums- rückgang

30 Buchenbestände
entlang eines
Niederschlagsgradienten
(850 – 500 mm a⁻¹)

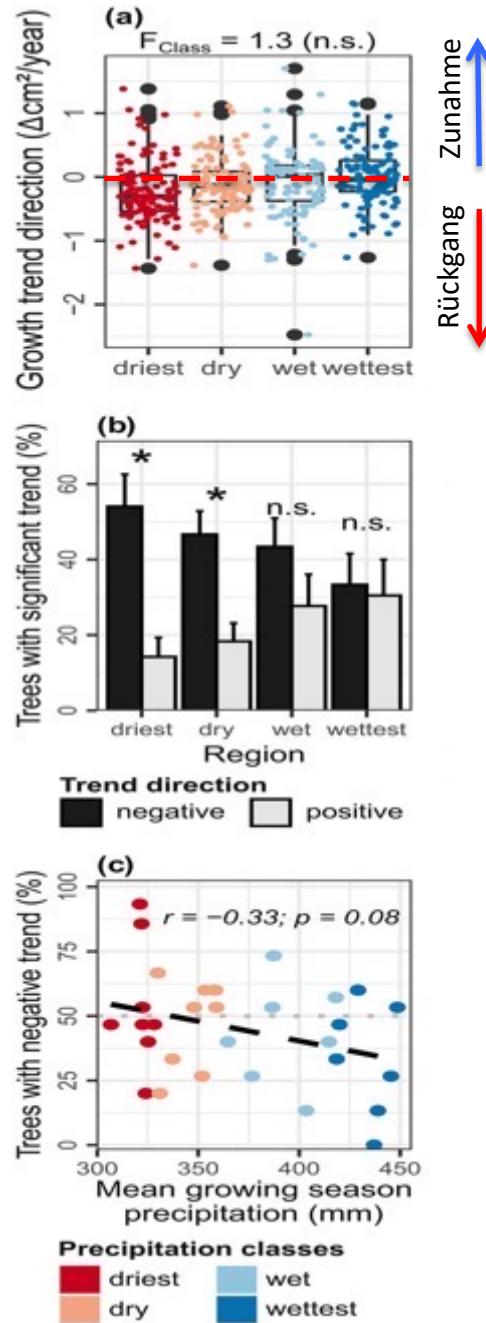
Nur in den
feuchtesten
Beständen
noch stabile
Zuwächse



Je geringer der Niederschlag, umso größer der Anteil an Bäumen mit Wachstumsrückgang

30 Buchenbestände entlang eines Niederschlagsgradienten (850 – 500 mm a⁻¹)

Je trockener, umso mehr negativer Zuwachstrends

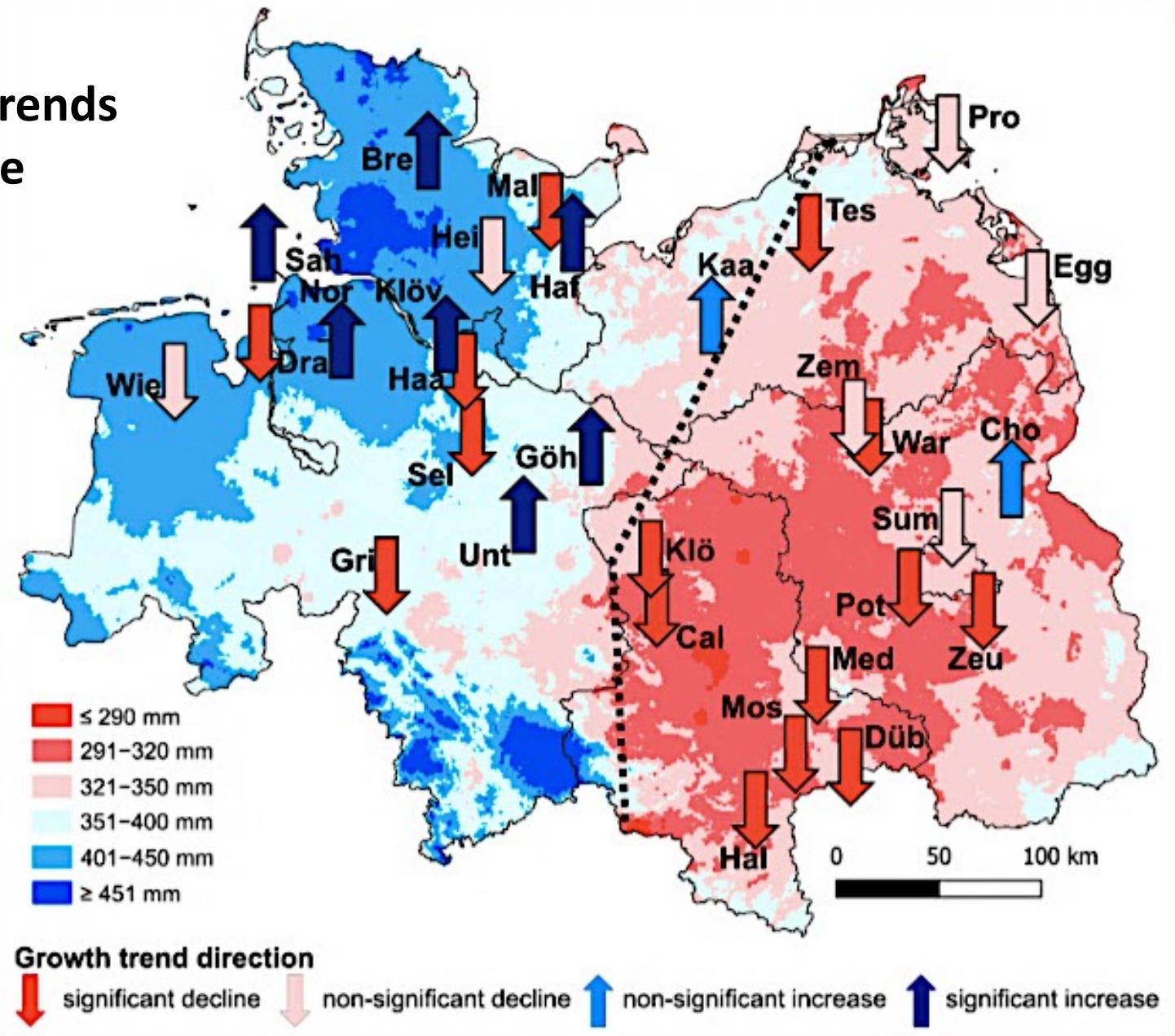


Wachstumstrends der Einzelbäume

Anzahl der Bäume mit positivem/negativem Wachstumstrend

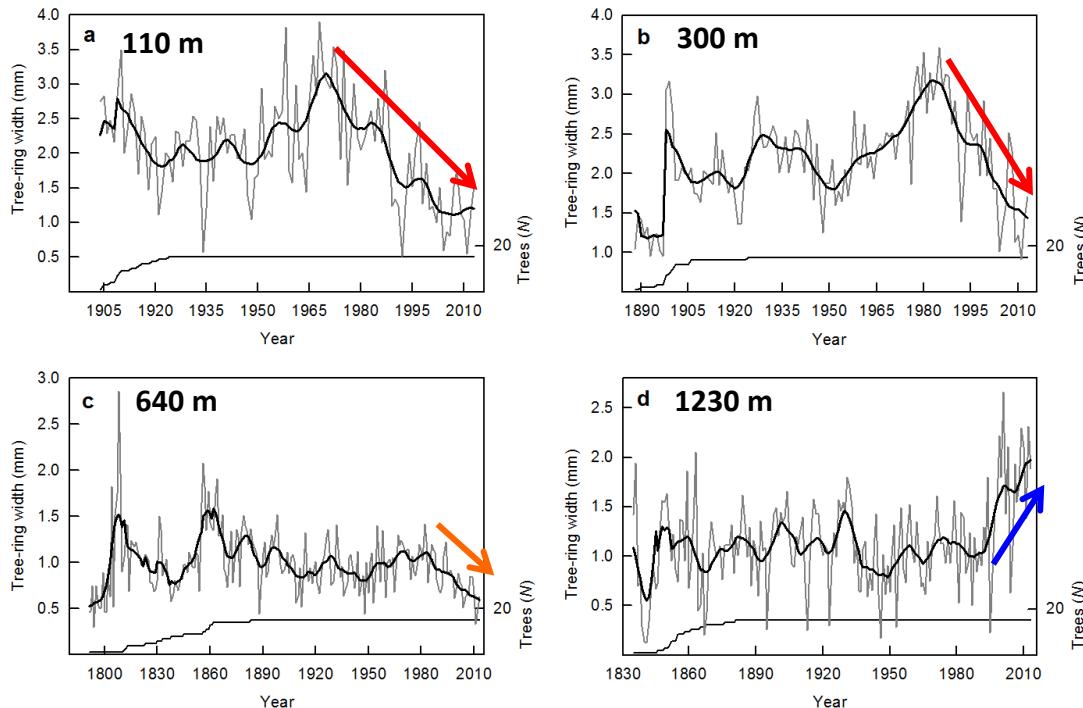
Anteil der Bäume mit Wachstumsrückgang

Aktuelle Wachstumstrends bei der Buche



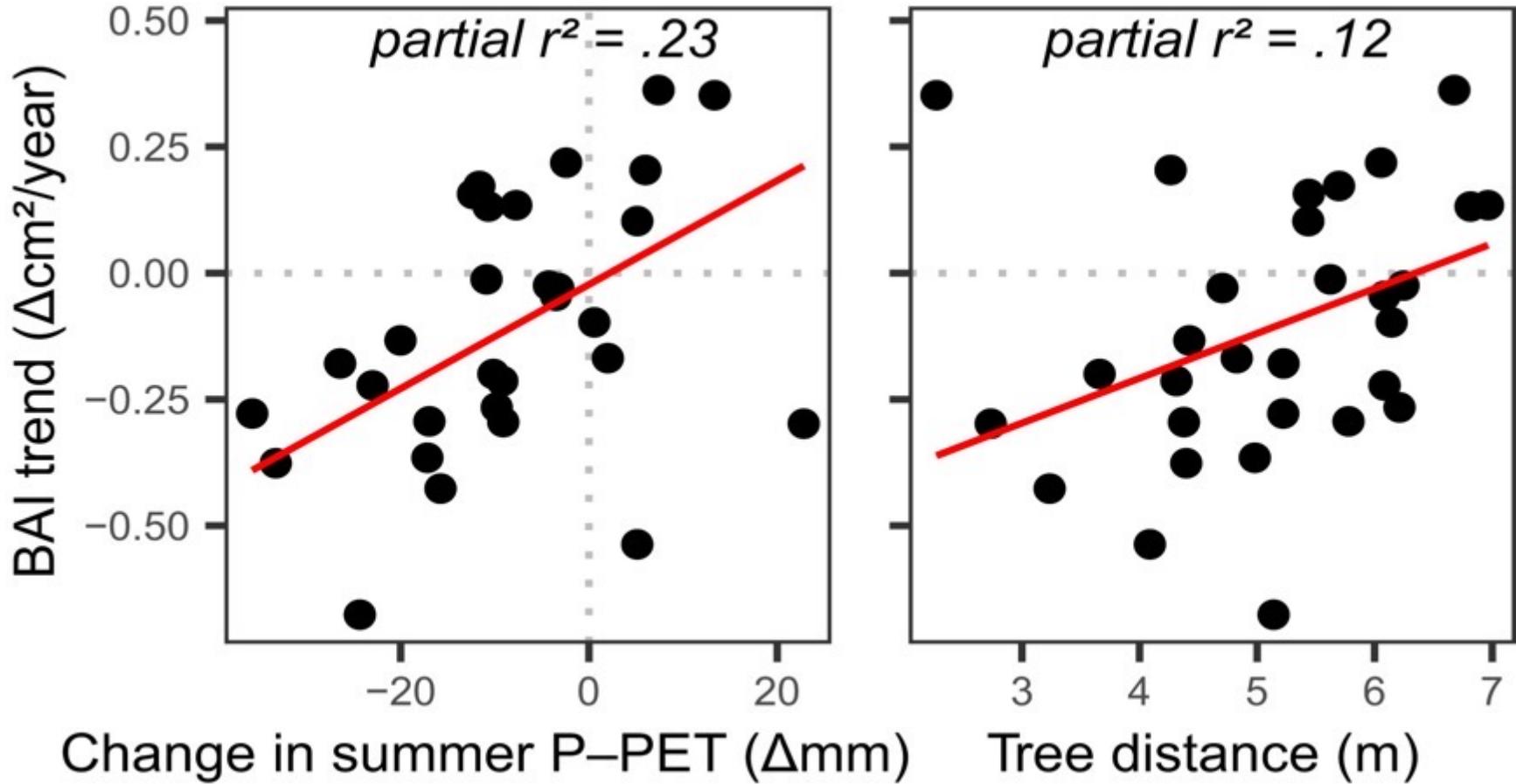
Wachstumsrückgänge der Buche in niederen Lagen, Anstiege in den Hochlagen

(Schwarzwald, 100 – 1230 m)



Ursachen des Wachstumsrückgangs

30 Buchenbestände entlang eines Niederschlagsgradienten ($850 - 500 \text{ mm a}^{-1}$)

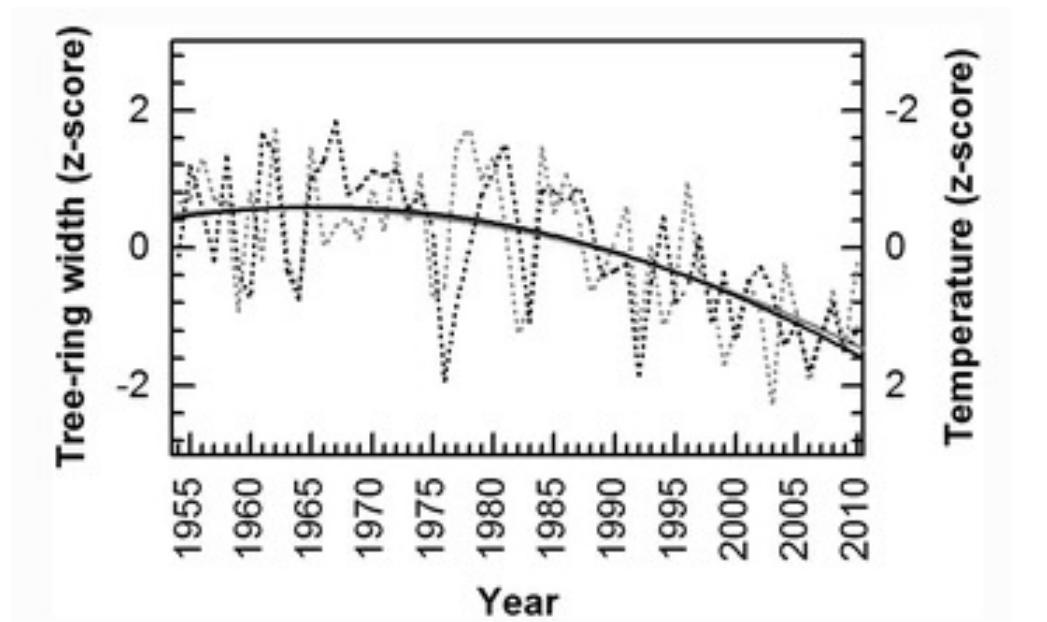


Wichtigster Treiber: Langfristige Abnahme der klimat. Wasserbilanz

Weniger wichtig: Bestandesdichte

Hitzeempfindlichkeit als limitierender Faktor?

(mitteldeutsches Trockengebiet)

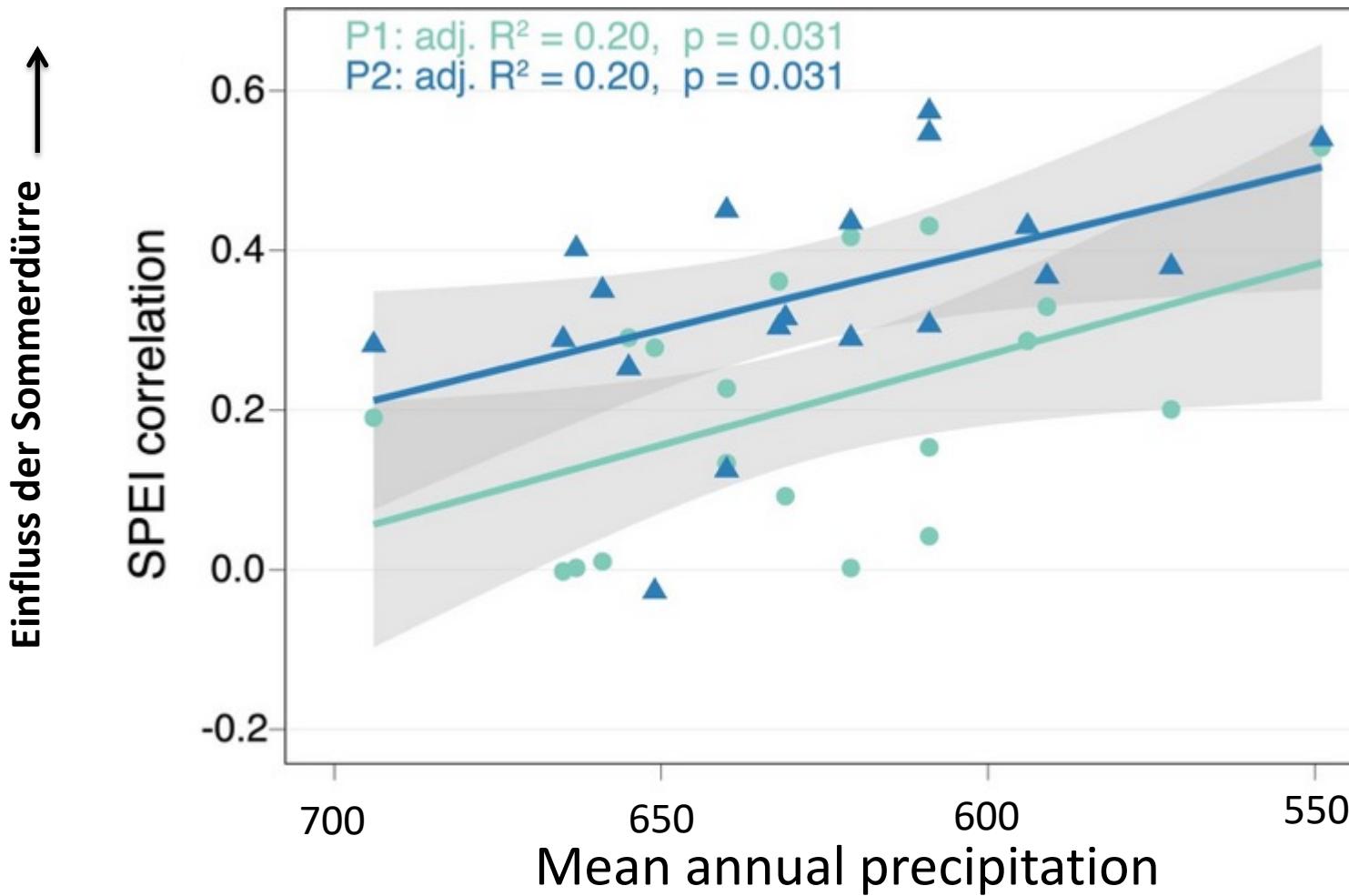


(negativ aufgetragen)

Zuwachsrückgang verläuft seit 1975 parallel zum Temperaturanstieg

Klimasensitivität der Buche

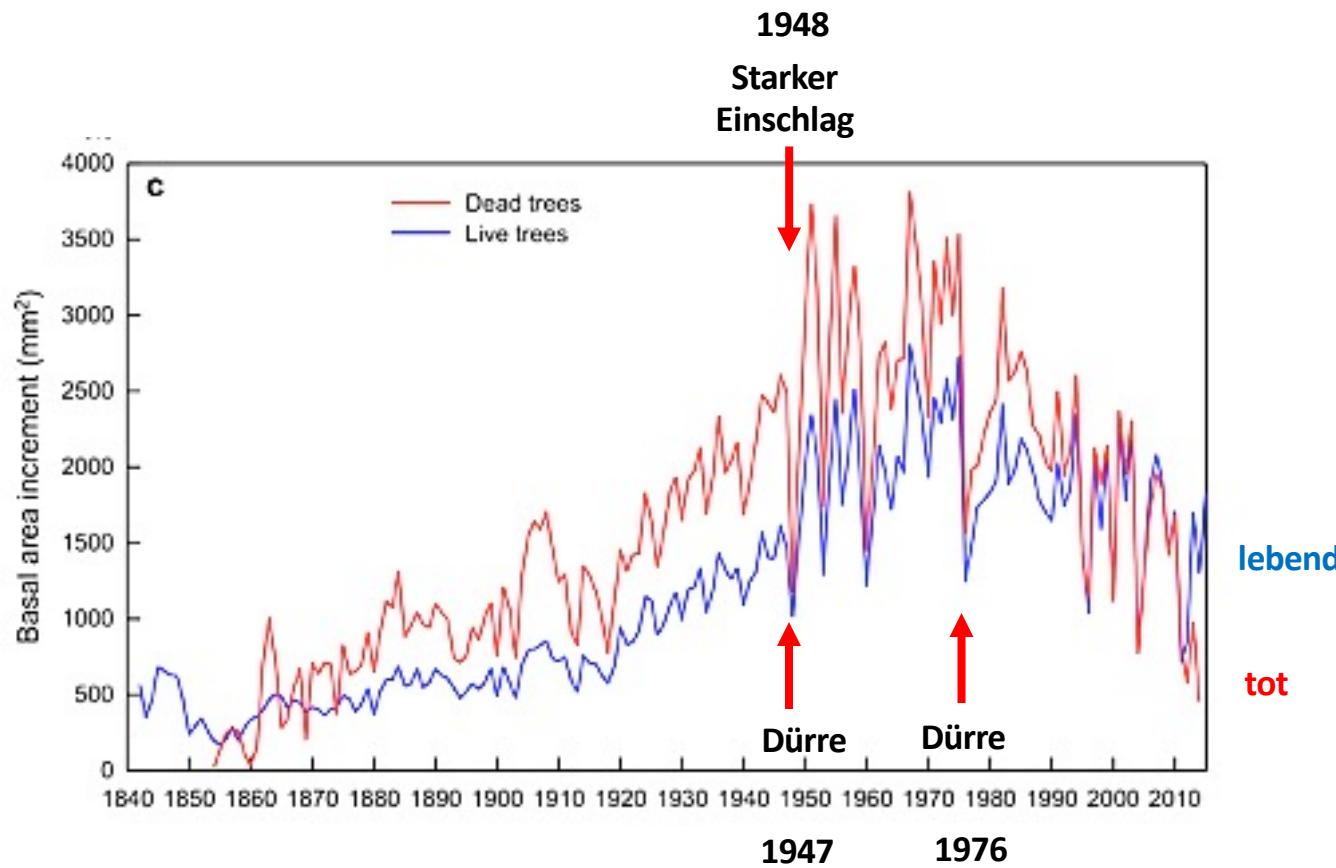
(Nordostdeutschland)



Höhere Trockenstressempfindlichkeit an trockeneren Standorten

Destabilisierung der Buche durch Dürre und starken Einschlag

Buchen-Naturwaldreservat Limker Strang (Solling)



Stark erhöhte interannuelle Zuwachsvariabilität nach Einschlag + Dürre – führt nach ca. 60 Jahren zum Tod

Ist Anpassung an den Klimawandel möglich ?

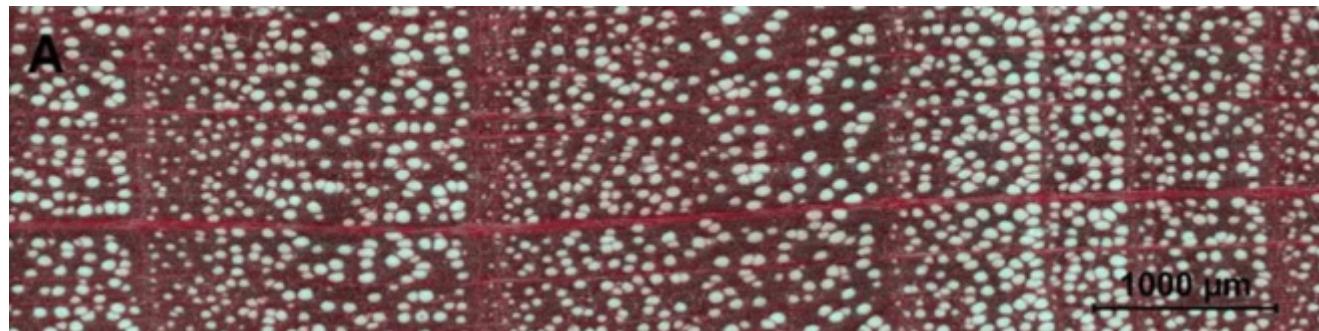
Beispiel Buche

Trockenstressantwort des hydraulischen Systems

(3 Buchenbestände in NW-Thüringen)

Langfristige Abnahme des mittleren Gefäßdurchmessers um **2.4 % pro Dekade**

Langfristige Zunahme der Gefäßdichte um **6.8 % pro Dekade**



Trockenheit führt zu Embolien im Xylem

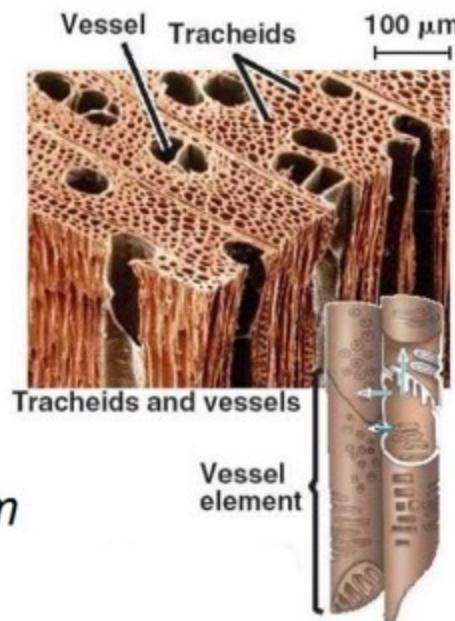
Vessel anatomy: Embolism and loss of hydraulic conductivity

High VPD

→ Risk of embolism in water conducting tissue

drought-induced
frost-induced

} embolism



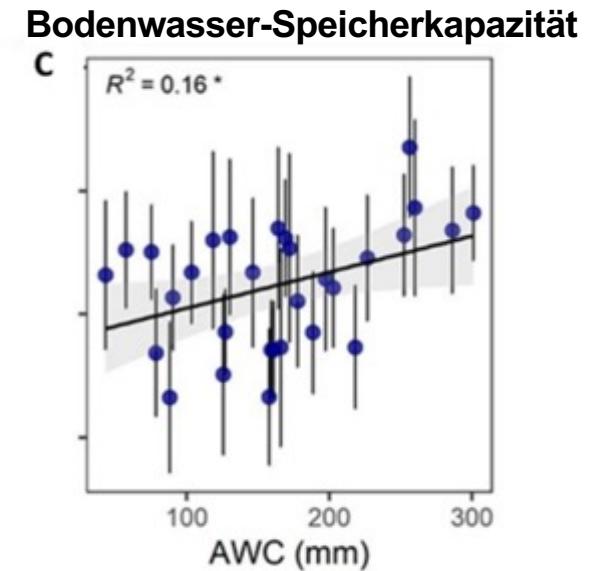
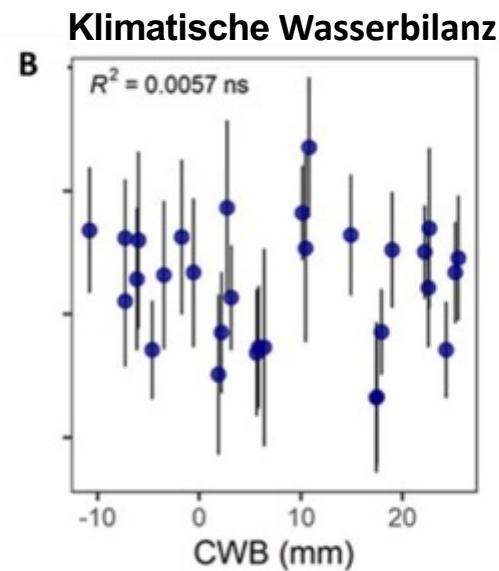
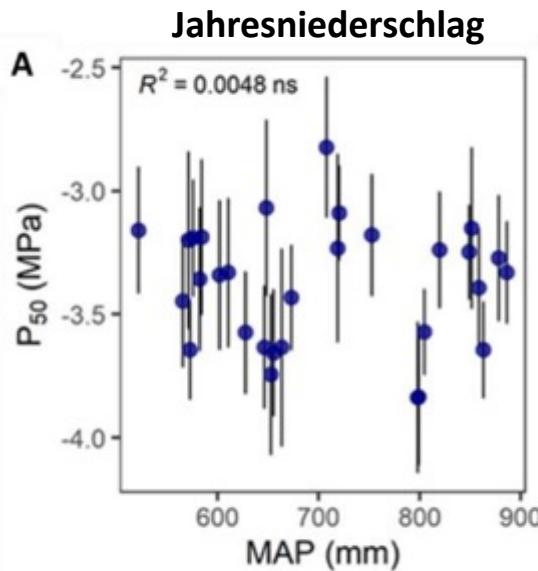
Drought resistance of plants defined as water pressure at which 50% of hydraulic conductivity is lost (P_{50})

Trockenstressantwort des hydraulischen Systems

(30 Bestände im Tiefland)

Oberirdisch

Embolieresistenz der Zweige (P_{50})



Keine erhöhte Embolieresistenz in trockenen Klimaten

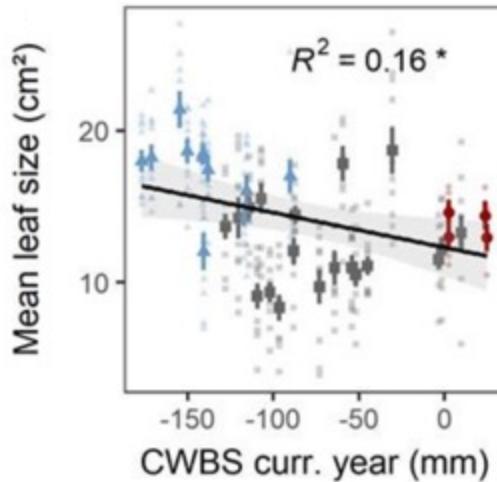
Aber Embolieresistenz-Erhöhung auf Böden mit reduzierter Wasserspeicherung

Trockenstressantwort auf der Blattebene

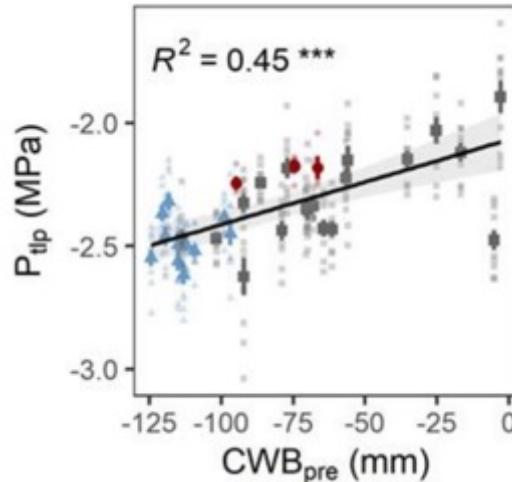
(30 Bestände im Tiefland)

Oberirdisch

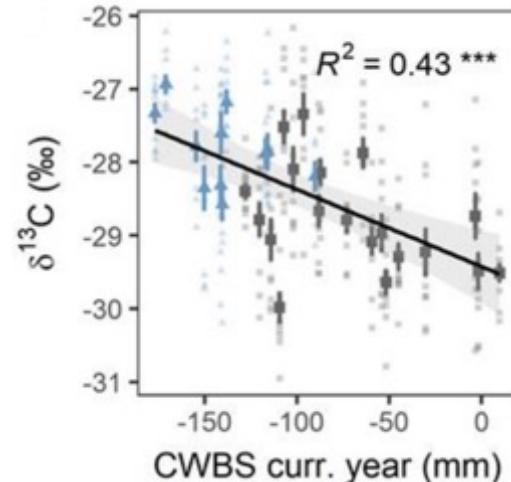
Blattgröße



Turgorverlust-Punkt



Stomatische Leitfähigkeit ($\delta^{13}\text{C}$)



K l i m a t i s c h e W a s s e r b i l a n z

Blattgröße nimmt mit
abnehmender Wasserbilanz
zu !

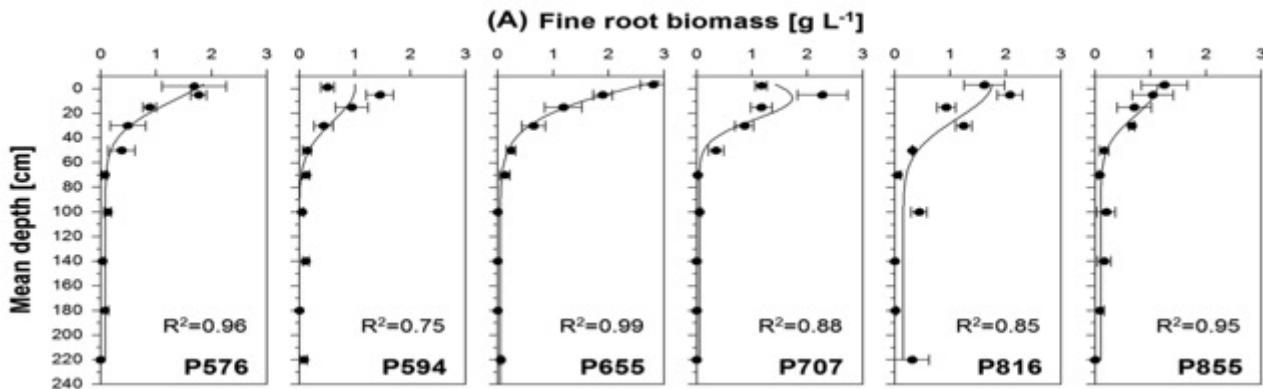
Absenkung des Turgorverlust-
Punktes mit
abnehmender Wasserbilanz

Reduzierte stomatische Leitfähigkeit
mit abnehmender Wasserbilanz

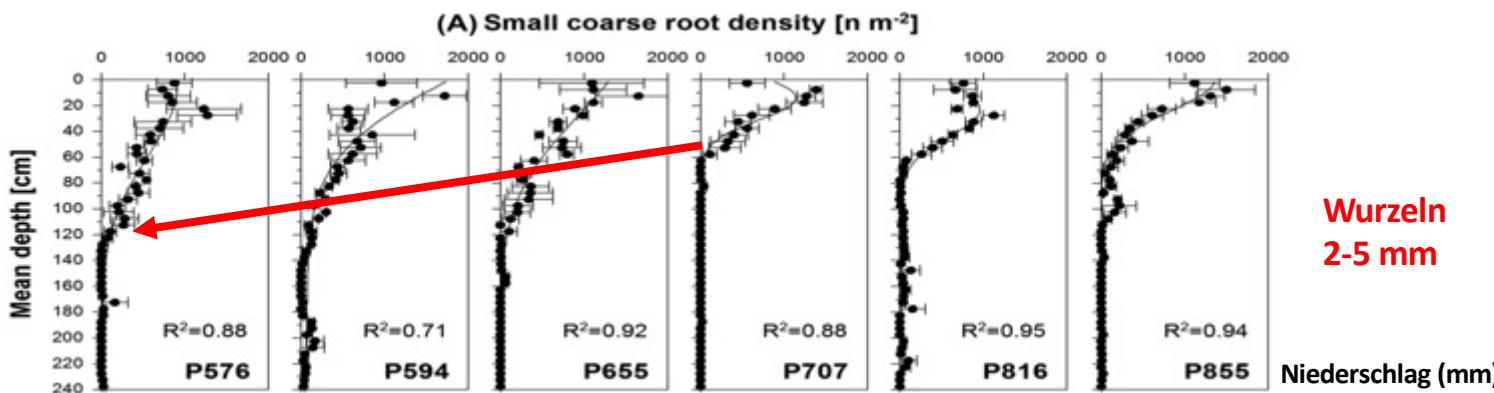
Wurzeln Buchen in trockenen Klimaten tiefer ?

Unterirdisch

Keine Anpassung
des Feinwurzelsystems



Größere Tiefen-
erstreckung des
Schwachwurzelsystems

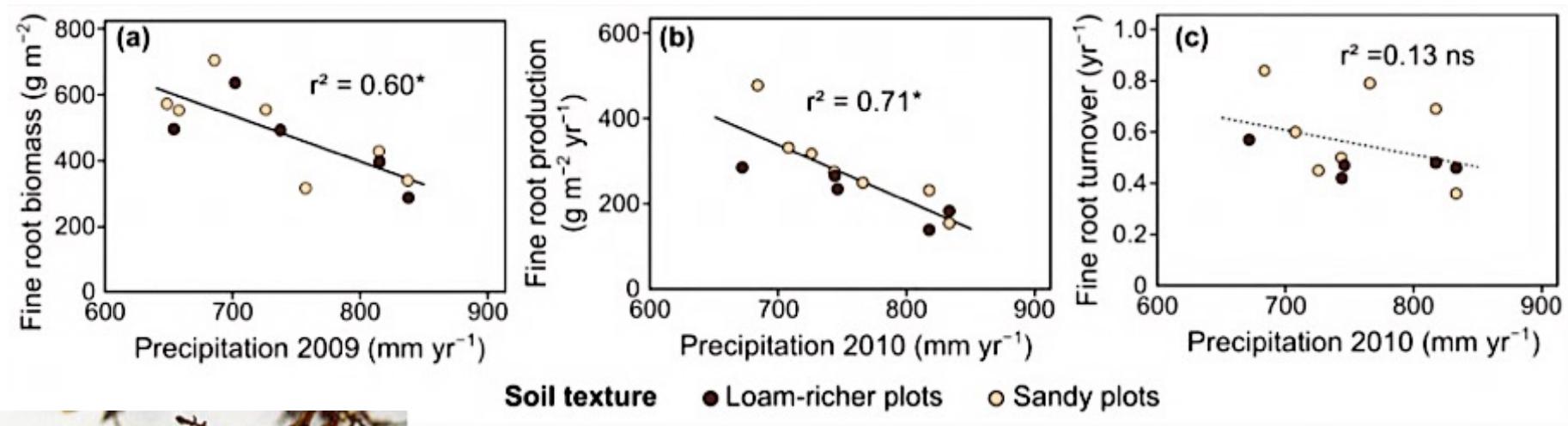


trockener

feuchter

Anpassung des Feinwurzelsystems der Buche an Trockenheit

12 Buchenbestände in Norddeutschland



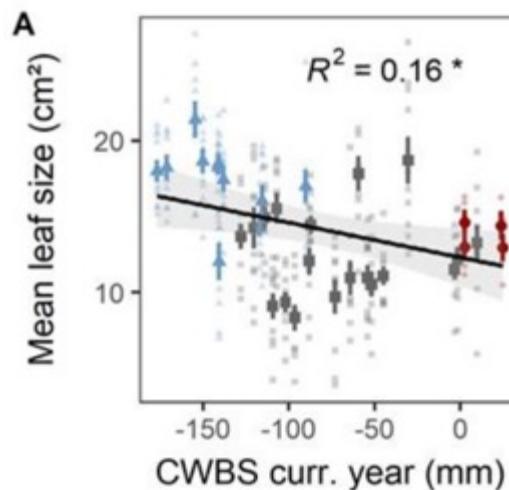
Zunahme der Feinwurzelbiomasse und Feinwurzelproduktion
hin zu trockeneren Standorten

Höhere Wurzelmortalität und rascherer Feinwurzelumsatz
an trockeneren Standorten

Verstärkte C-Allokation zu den Wurzeln an trockeneren Standorten

Blattfläche und Niederschlag

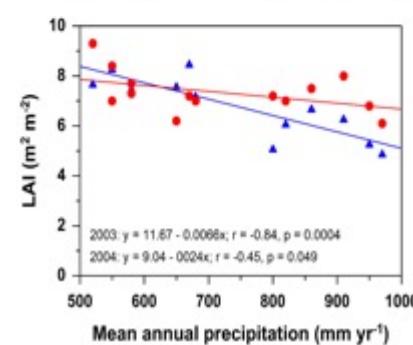
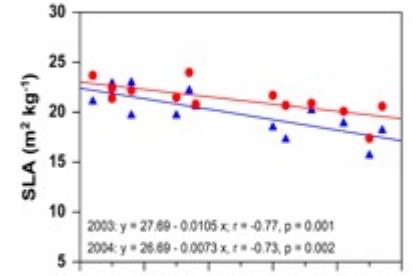
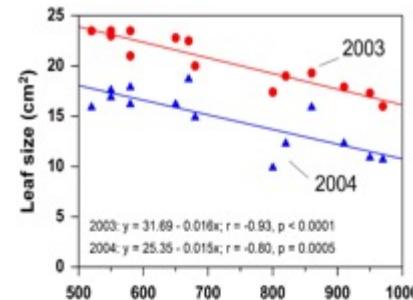
Oberirdisch



Blattflächenvergrößerung mit
Niederschlagsabnahme und
Verschlechterung der
Klimatischen Wasserbilanz

Weithmann et al. 2022

Höherer Blattflächenindex
an trockeneren Standorten !



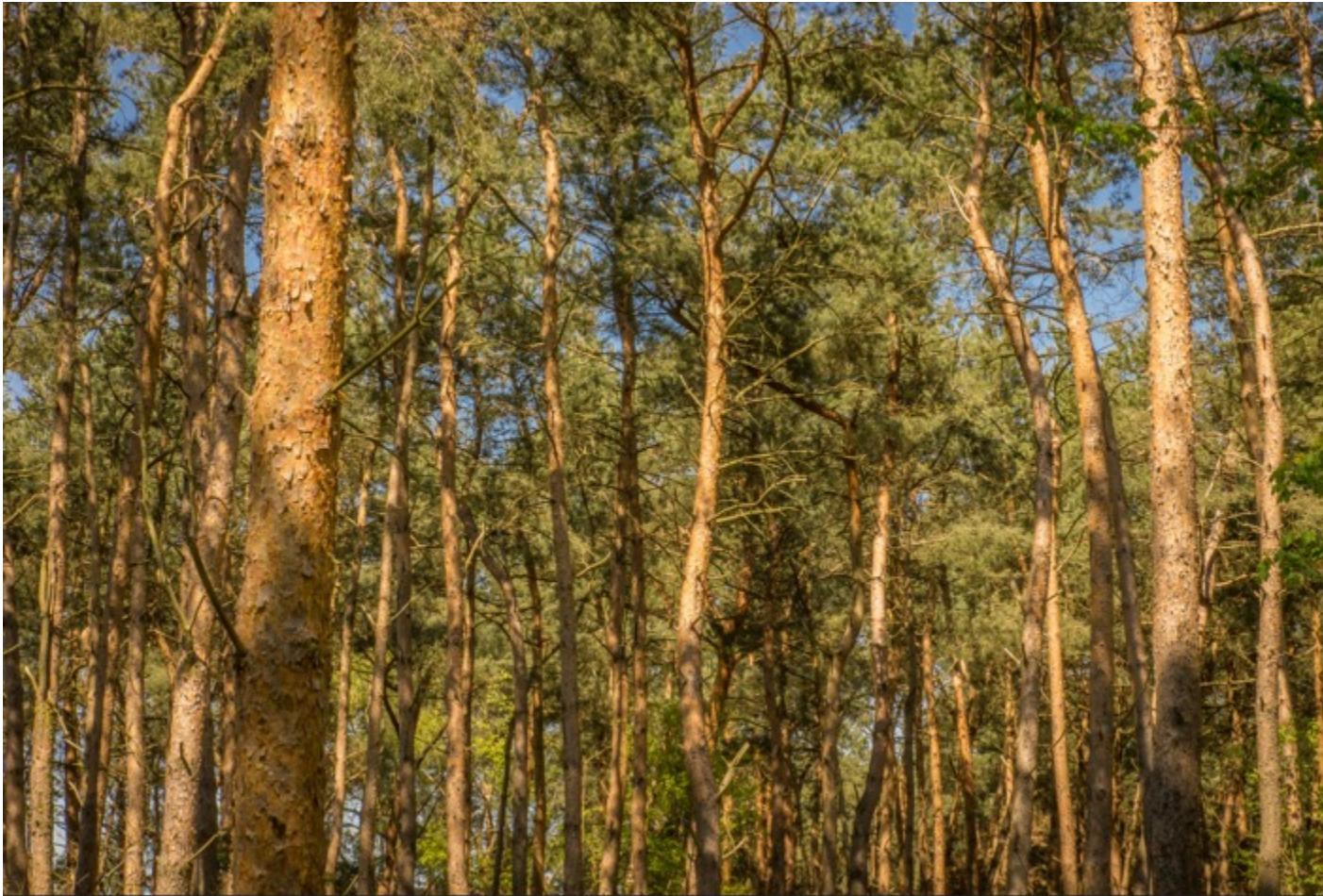
trockener

Blattgröße

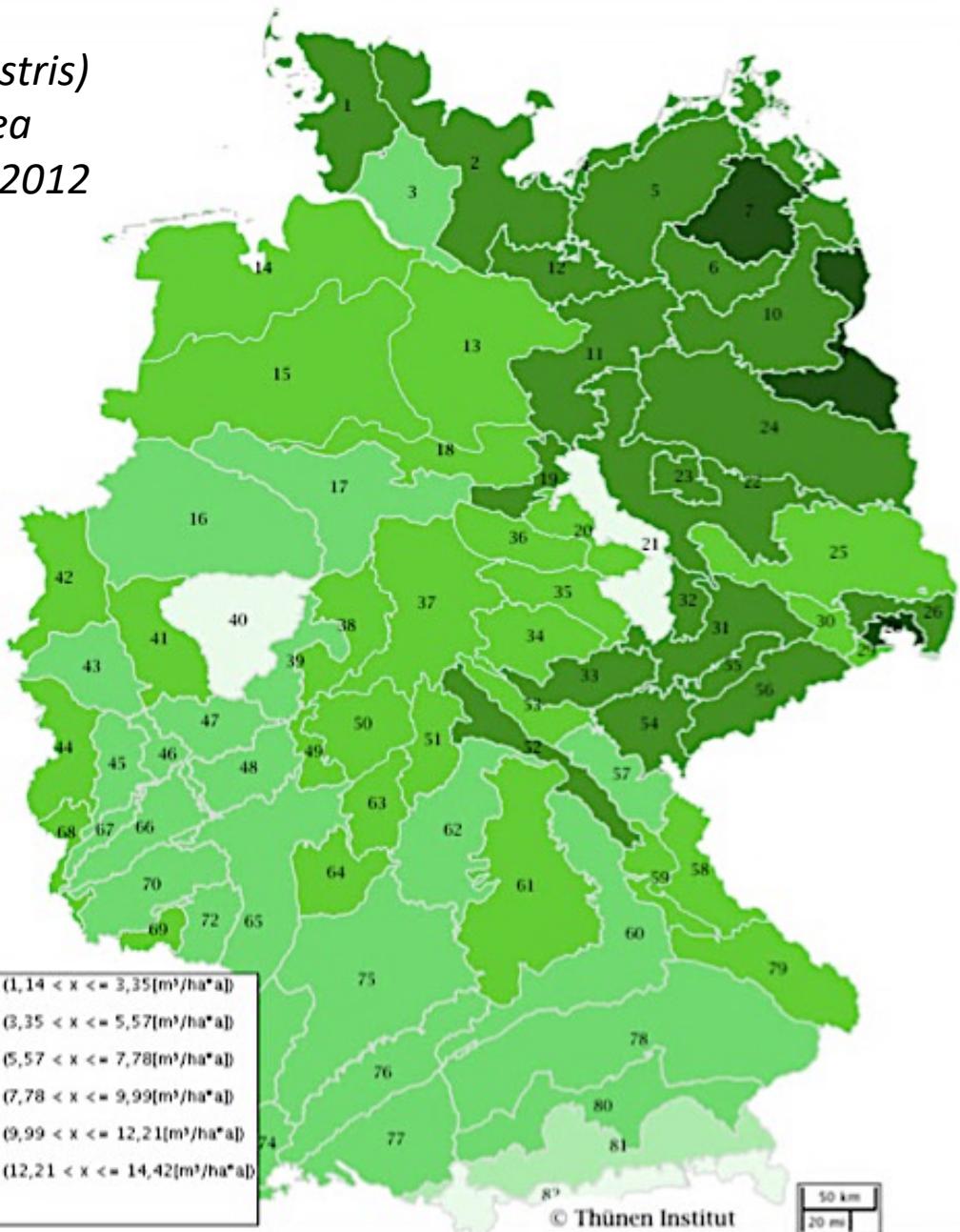
Spezifische
Blattfläche

Blattflächen-
Index

Waldkiefer



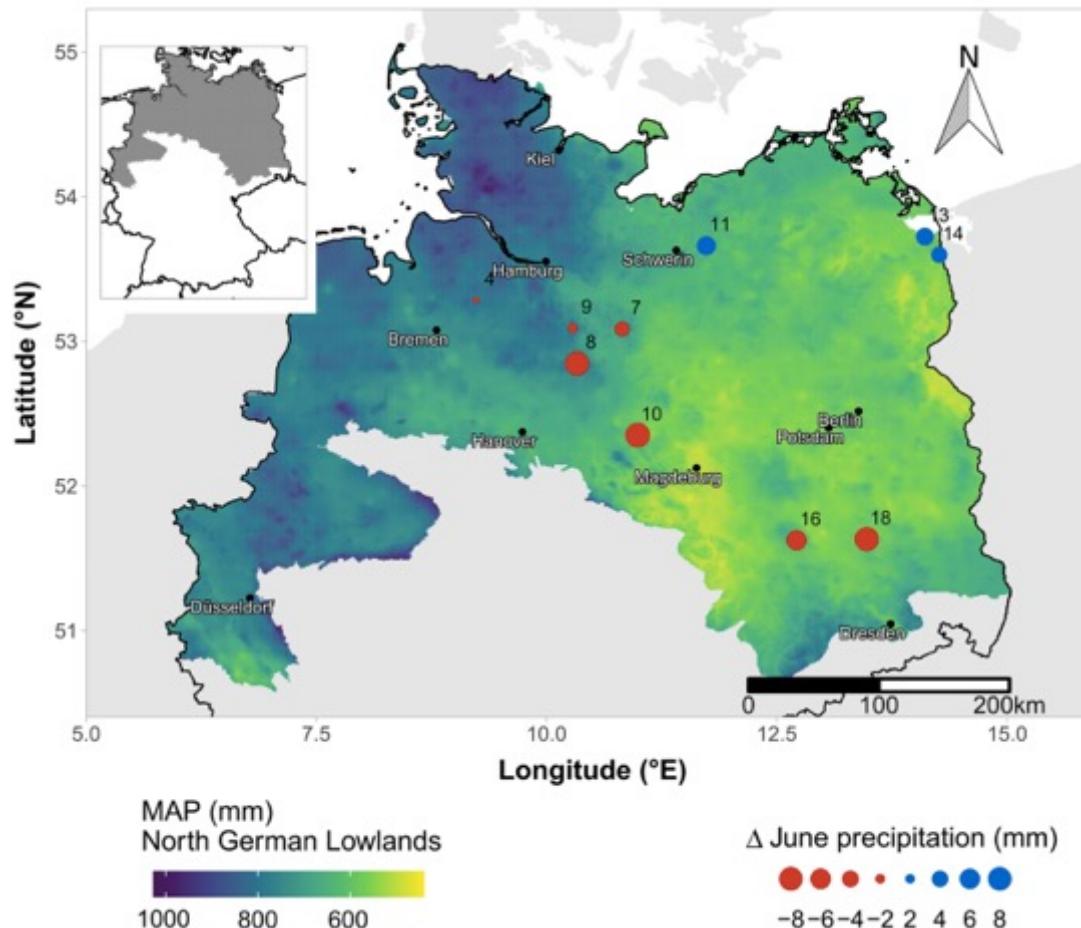
*Increase in stand volume of pine (*P. sylvestris*)
in m⁻³ per hectare and year by growth area
(calculated net stock) between 2002 and 2012
(Thünen-Institut 2022b)*



**Bisher noch höchste
Kiefernzuwächse in
den wärmeren und
trockeneren Regionen**

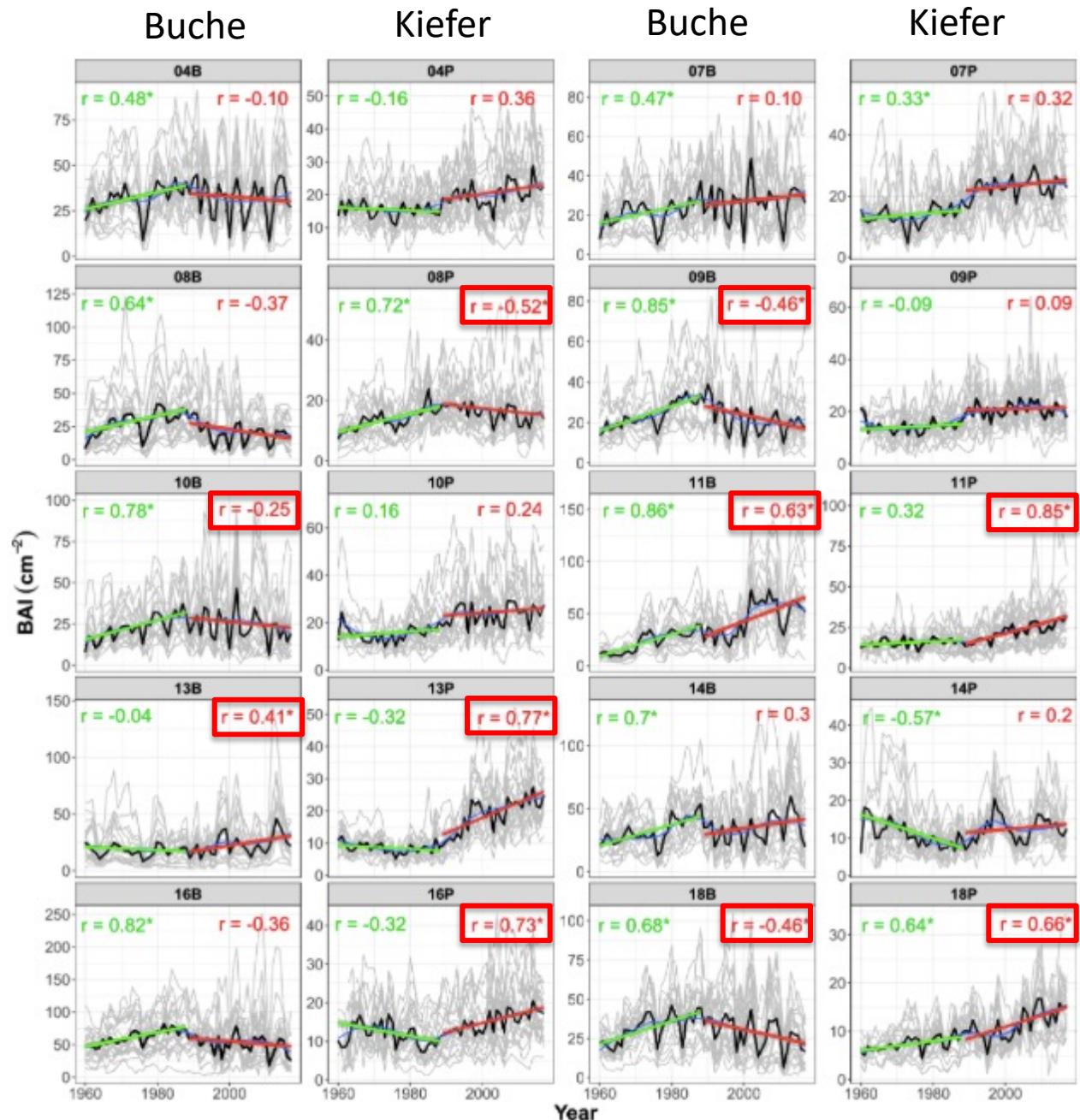
Zuwachsvergleich Kiefer – Buche in Norddeutschland

Je 10 Bestände entlang Niederschlagsgradient

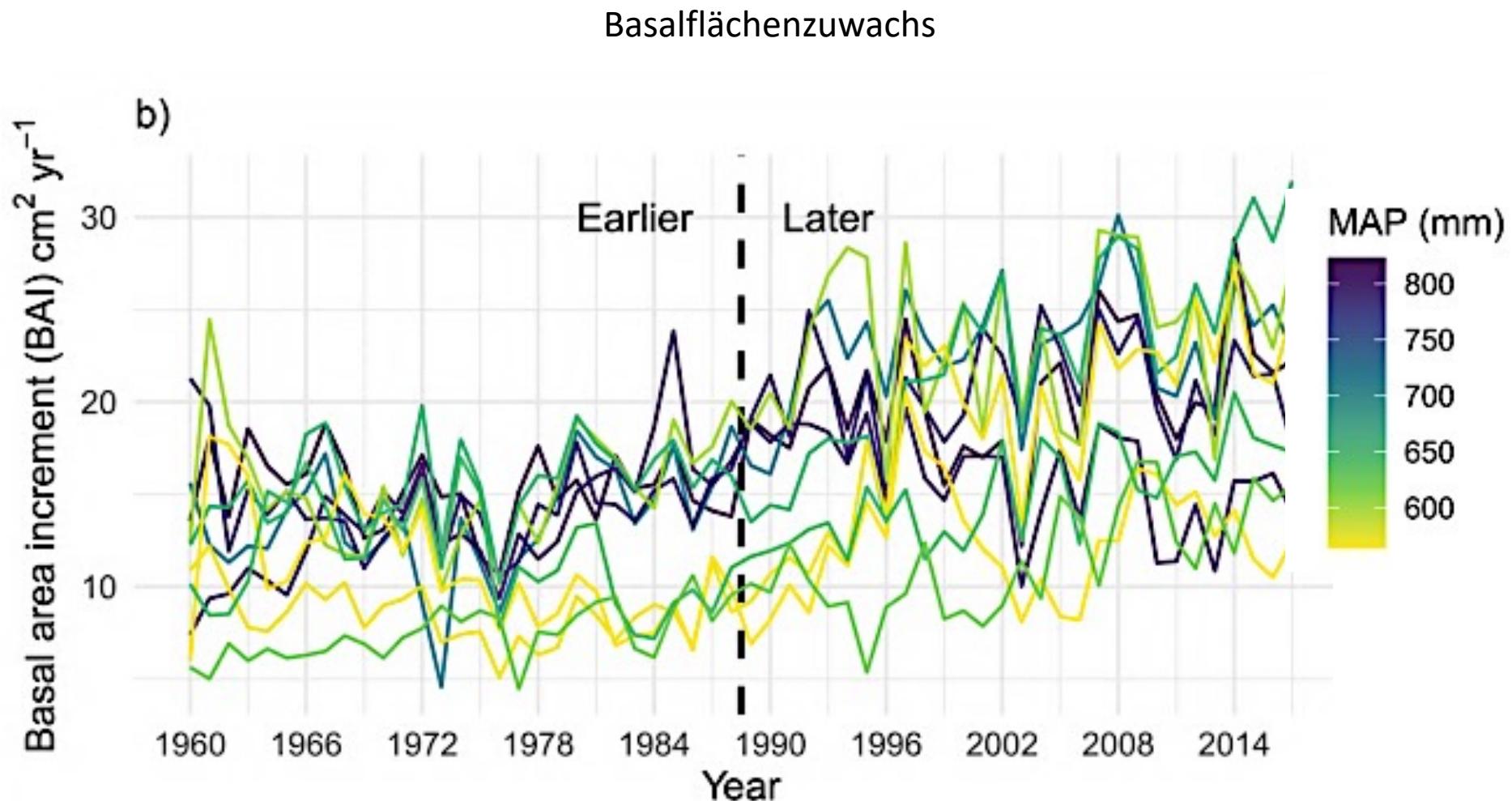


Wachstumstrends in je 10 Kiefern- und Buchenbeständen in Norddeutschland

7 von 10 Trends
bei Kiefer **positiv**,
6 von 10 Trends
bei Buche **negativ**



Zuwachstrends der Kiefer in Norddeutschland

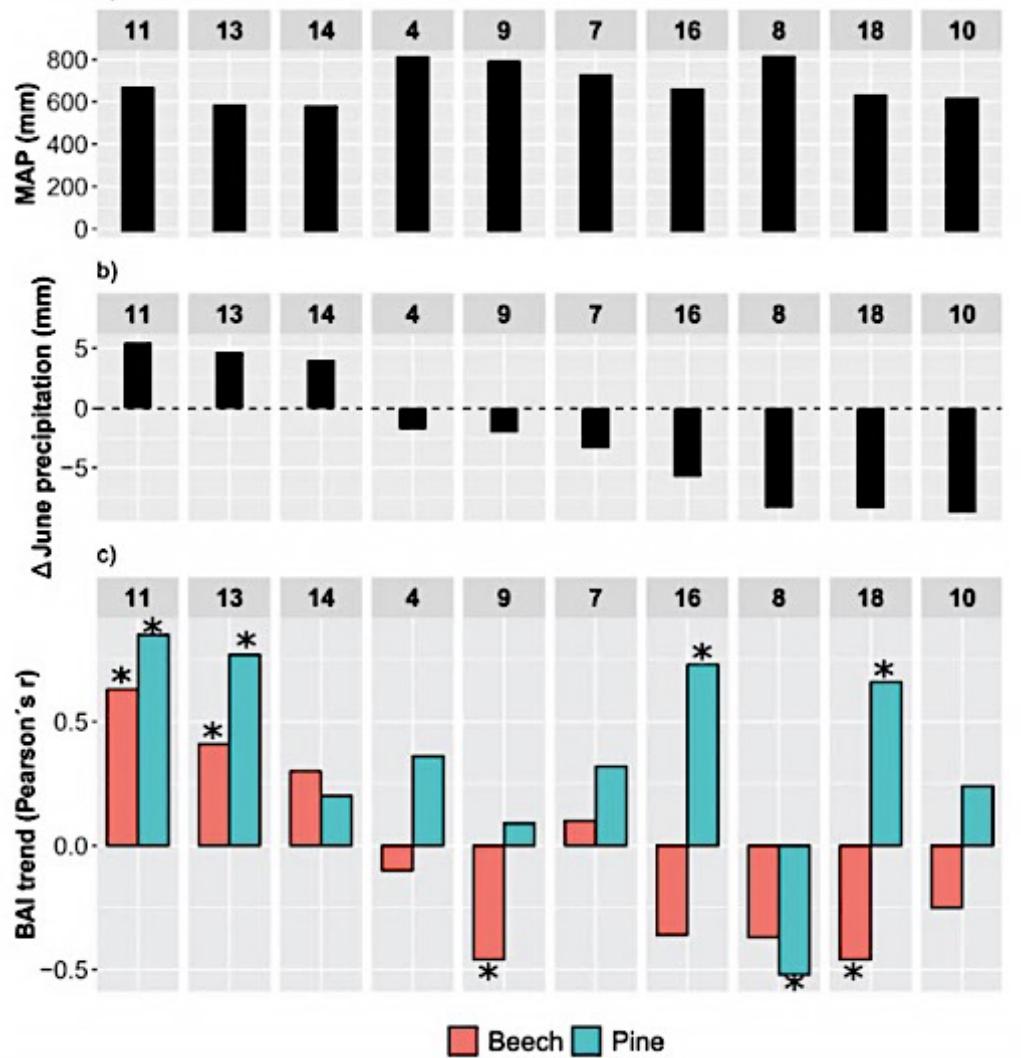


Stabile Zuwächse bei der Kiefer

Sinkender Juni-Niederschlag führt zu Wachstumsrückgang bei der Buche, aber nicht bei der Kiefer

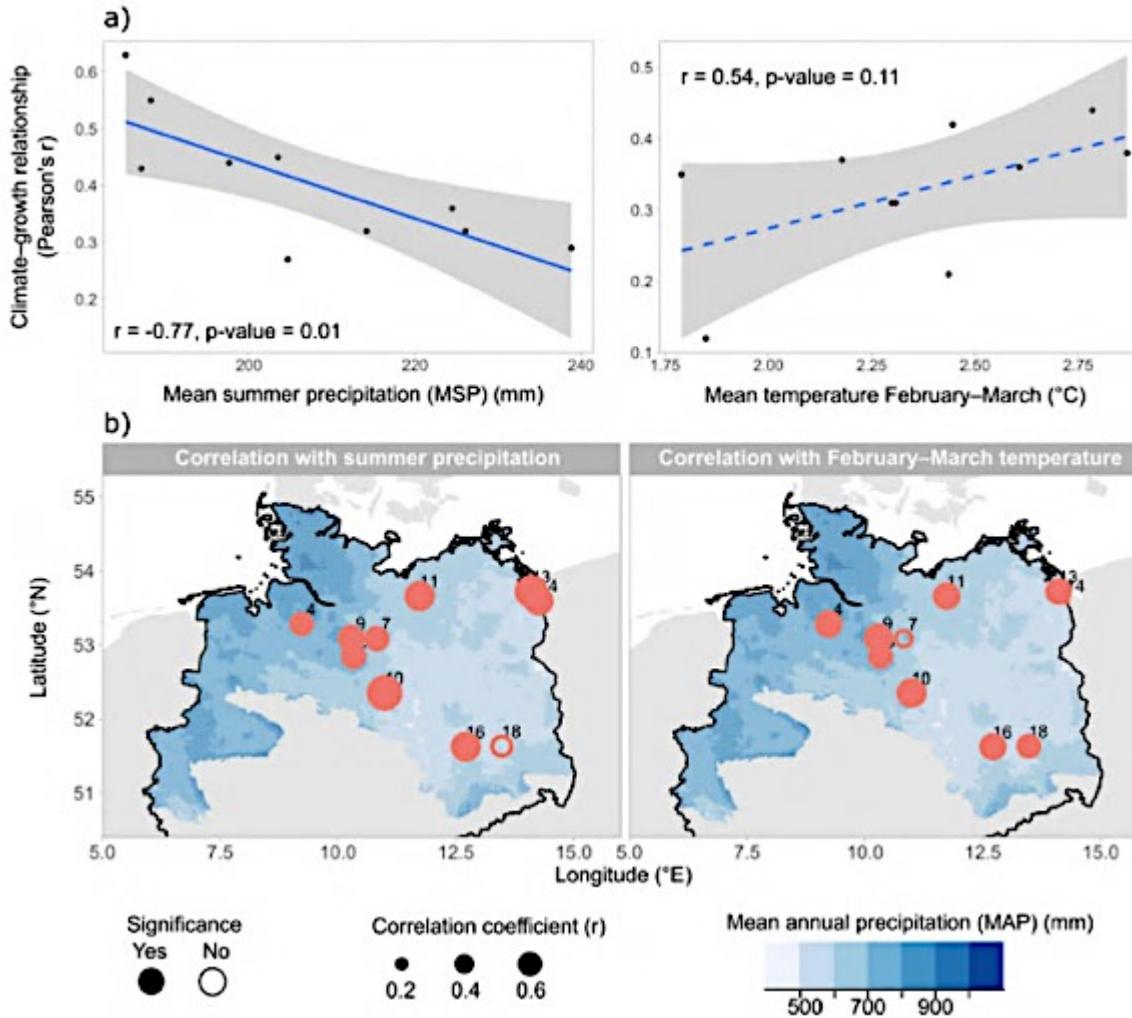
Je 10 Kiefern- und Buchenbestände in Norddeutschland

Juni-Niederschlags-Trend als wichtiger Treiber des Zuwachstrends



Zunehmend negativer Juni-Niederschlags-Trend

Wachstumsabhängigkeit der Kiefer von Sommerniederschlag und Spätwinter-Temperatur

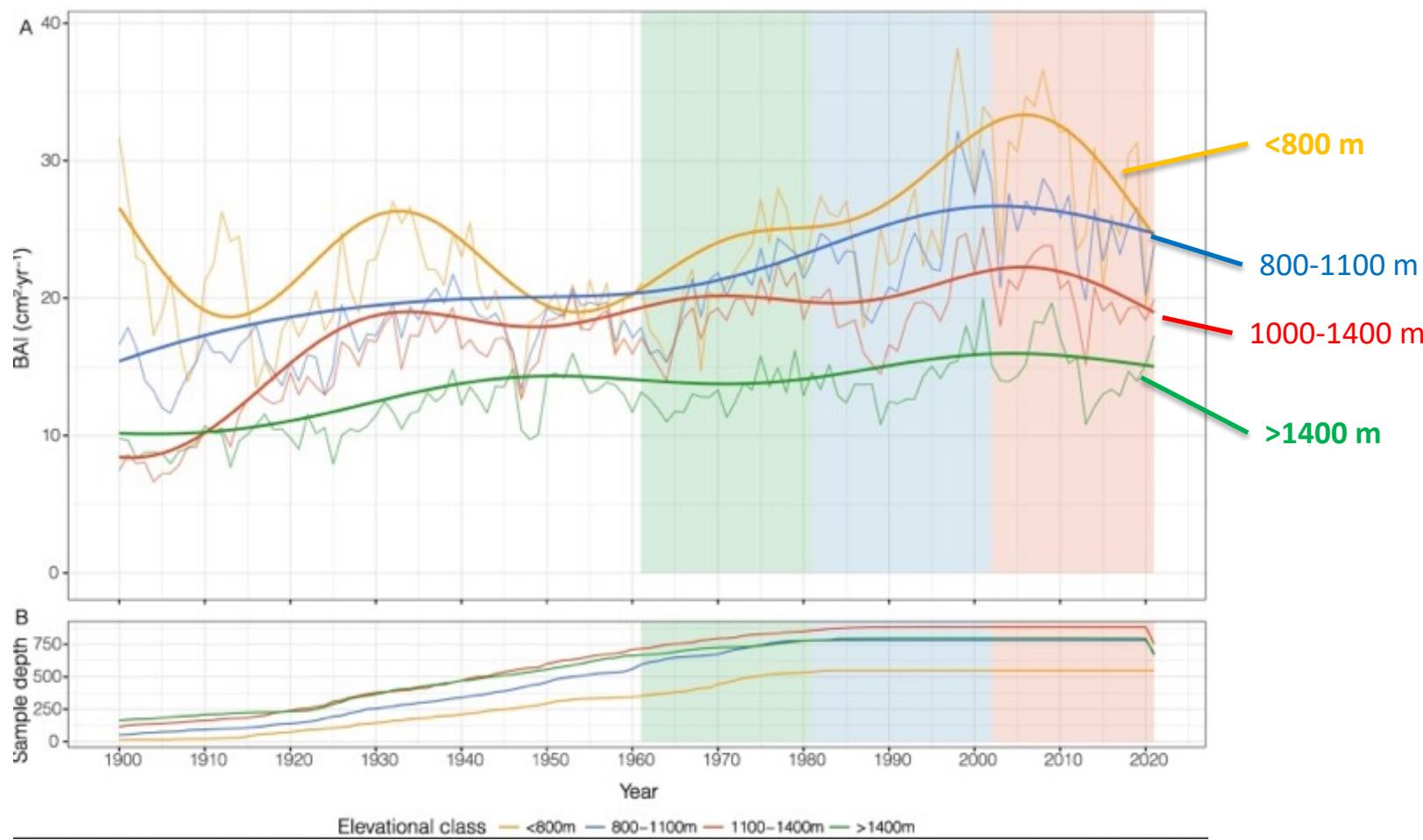


Fichte



Abnehmende Zuwächse der Fichte in den Tieflagen, stabile Zuwächse in den Hochlagen

(Ost-Karpaten)



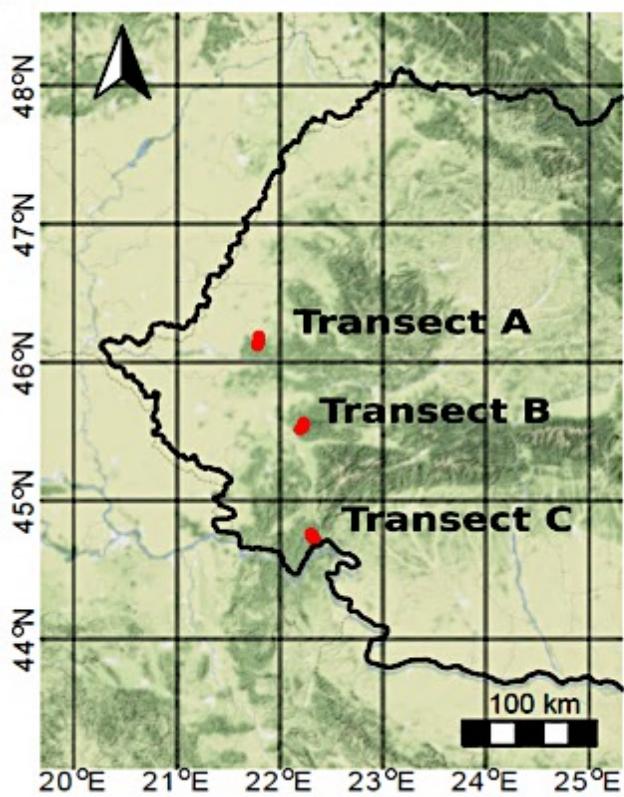
Trauben-/Stieleiche



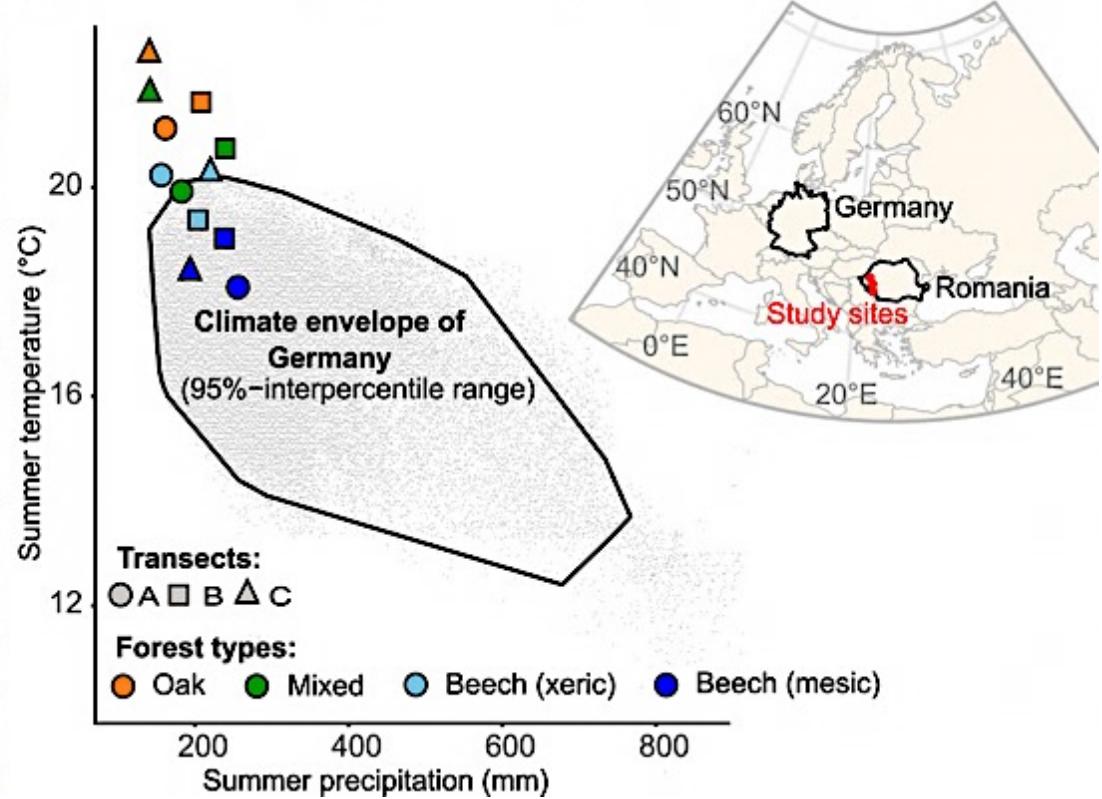
Äquivalenz-Klima zum künftigen Klima in Mitteleuropa

West-Rumänien

(a) Transects A-C in Western Romania



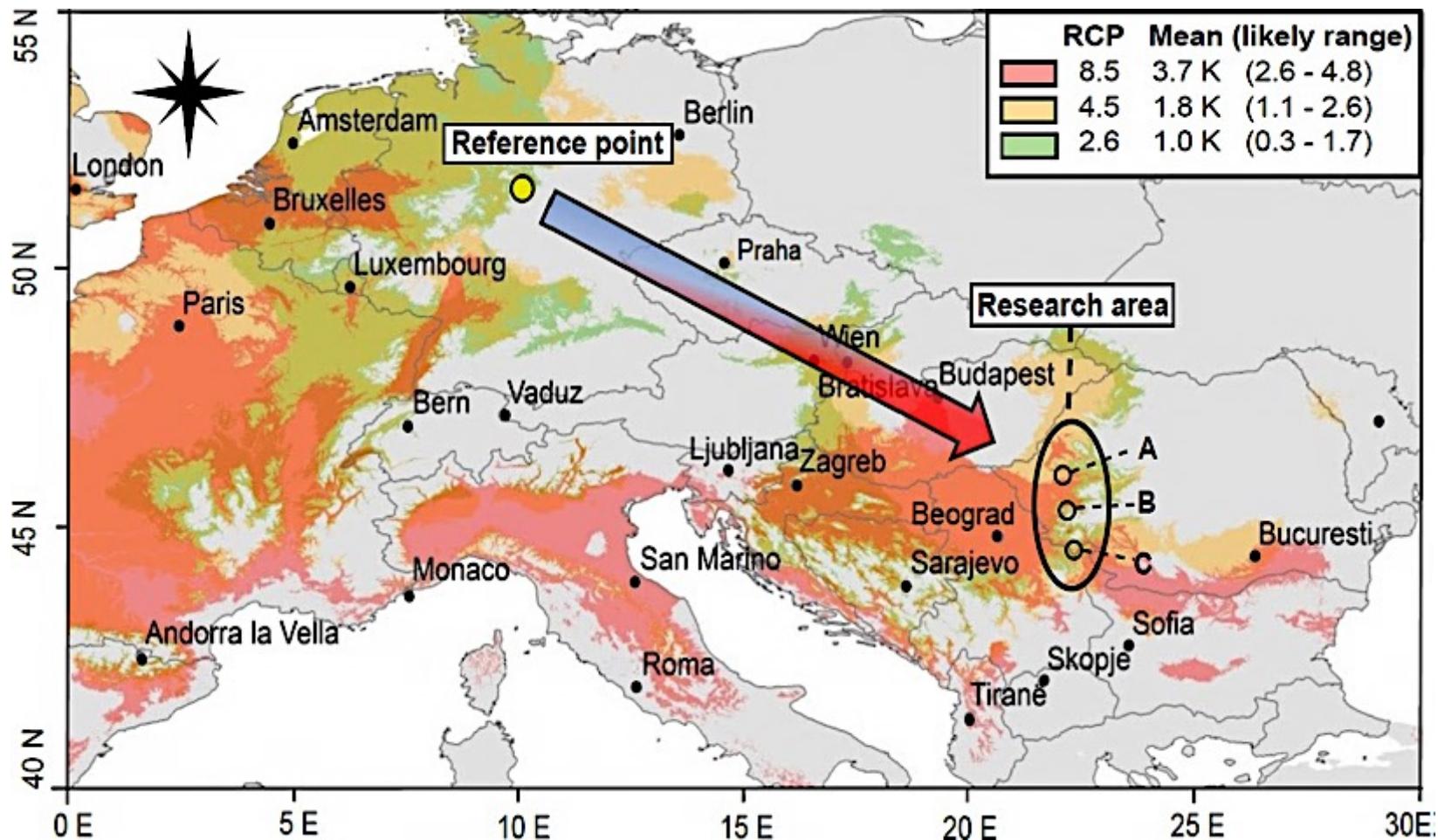
(b) Climate in forest types (transects A-C) vs. current climate in Germany



Space-for-time substitution

Kasper et al. 2023

Mitteleuropäisches Äquivalenzklima: West-Rumänien



Referenz: Nordbayern

Zukünftiges Klima: +1.8 K (RCP 4.5) - +3.7 K RCP 8.5 = BAU)



Traubeneiche (*Q. petraea*)



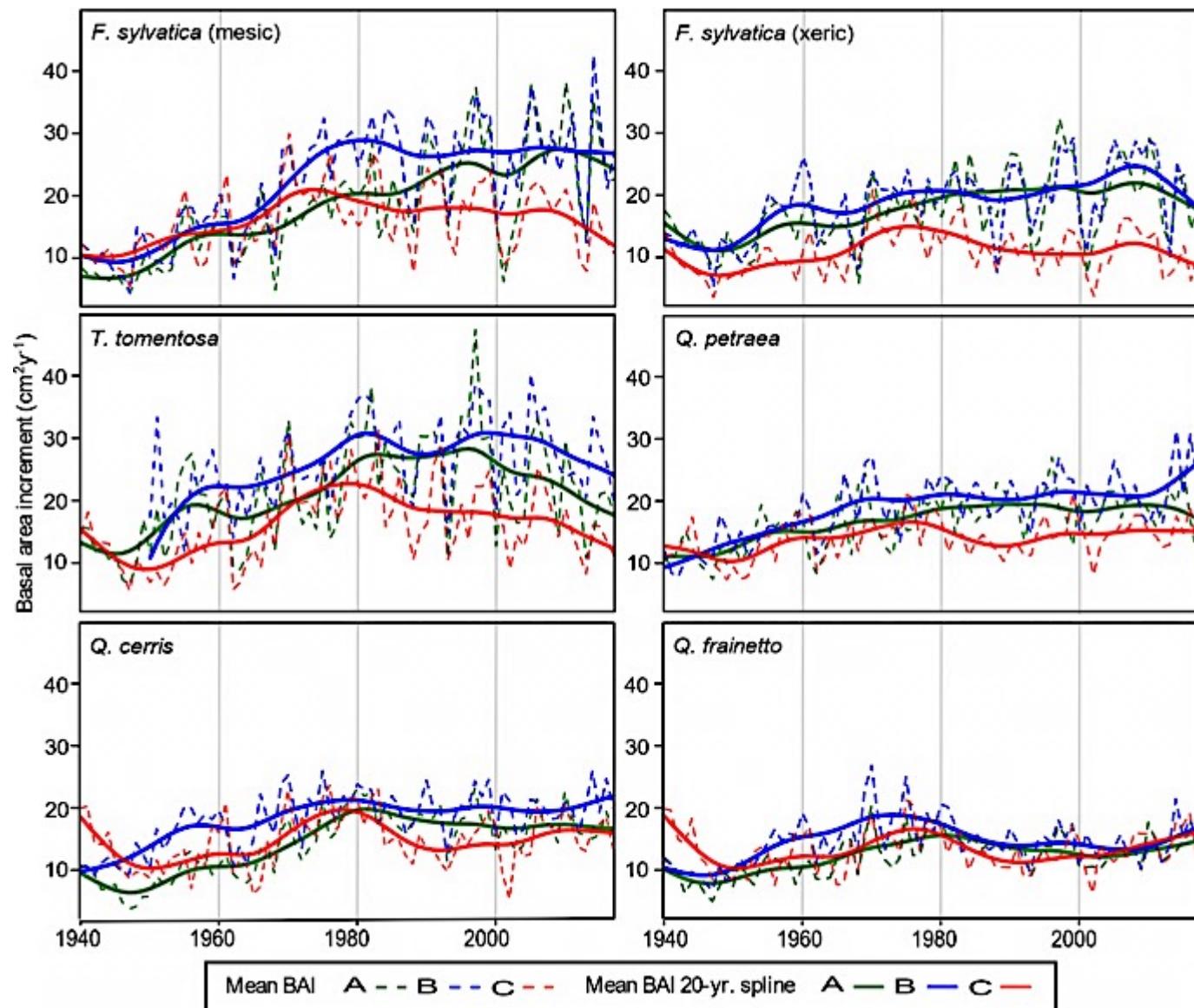
Ungarische Eiche (*Q. frainetto*)



Zerreiche (*Q. cerris*)

Rezente Zuwachsrück- gänge bei Buche + Silber- linde, Anstiege bei den 3 Eichen

Rotbuche
Silberlinde
Trauben-Eiche
Zerr-Eiche
Ungarische Eiche

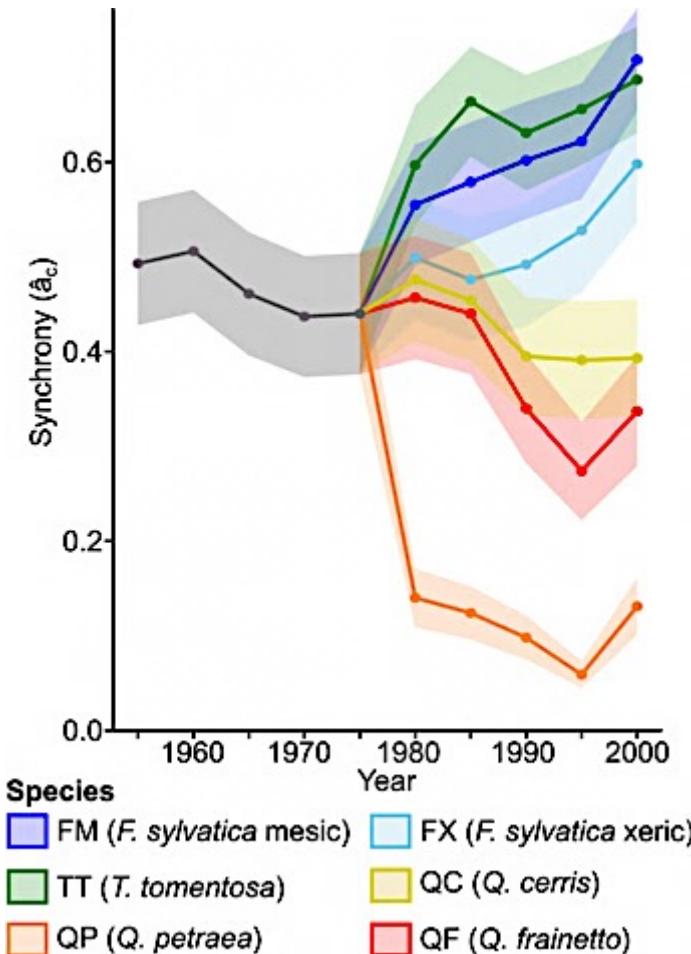


Zunehmende Wachstumssynchronität bei Buche, abnehmende bei den Eichen

3 Transekte in West-Rumänien

Rotbuche
Silberlinde
Trauben-Eiche
Zerr-Eiche
Ungarische Eiche

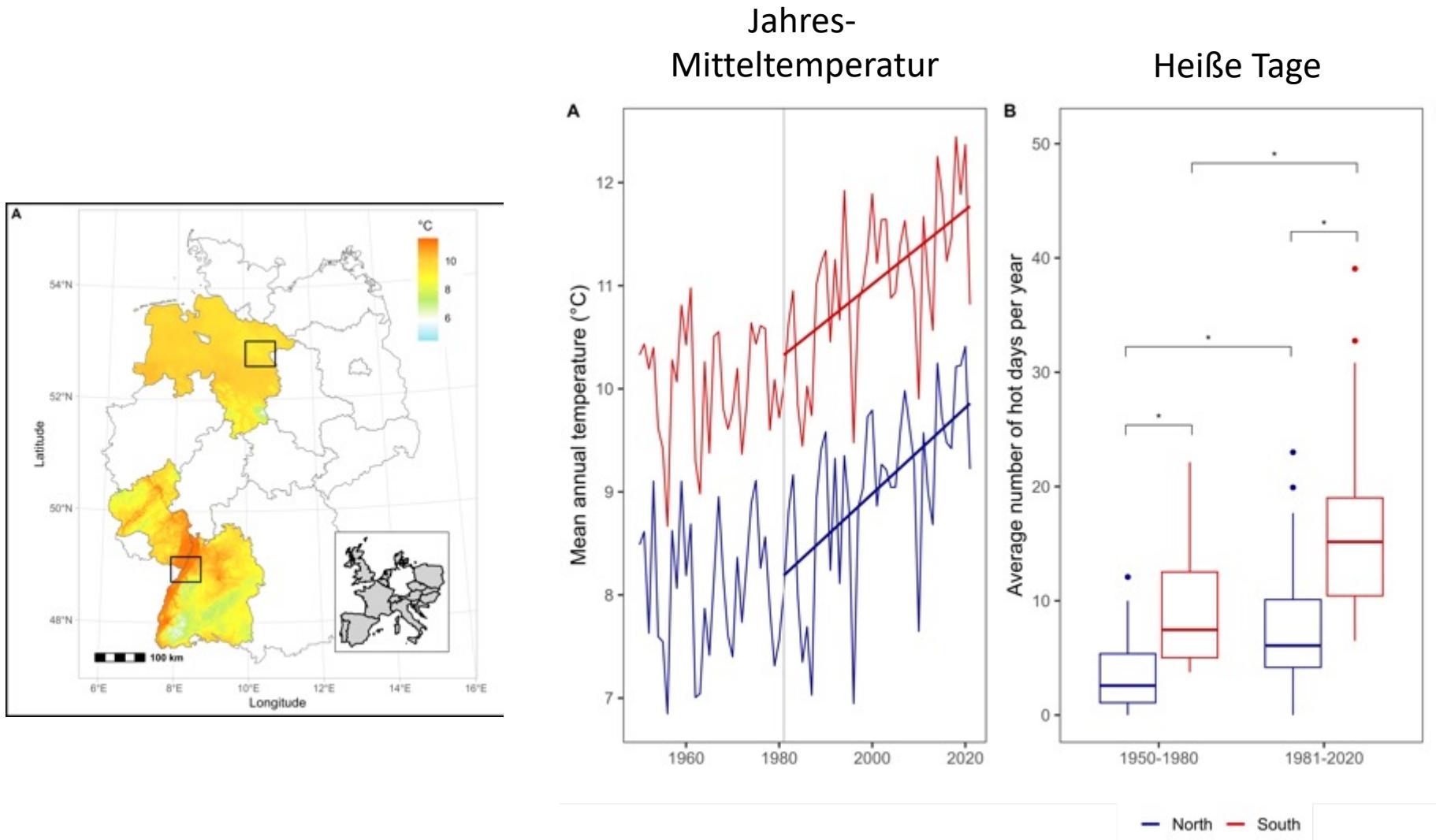
Seit ca. 1975 Anstieg der Synchronität bei Buche + Silberlinde, Konstanz/Abnahme bei den Eichen



Douglasie



Erwärmung in NW- und SW-Deutschland seit 1950

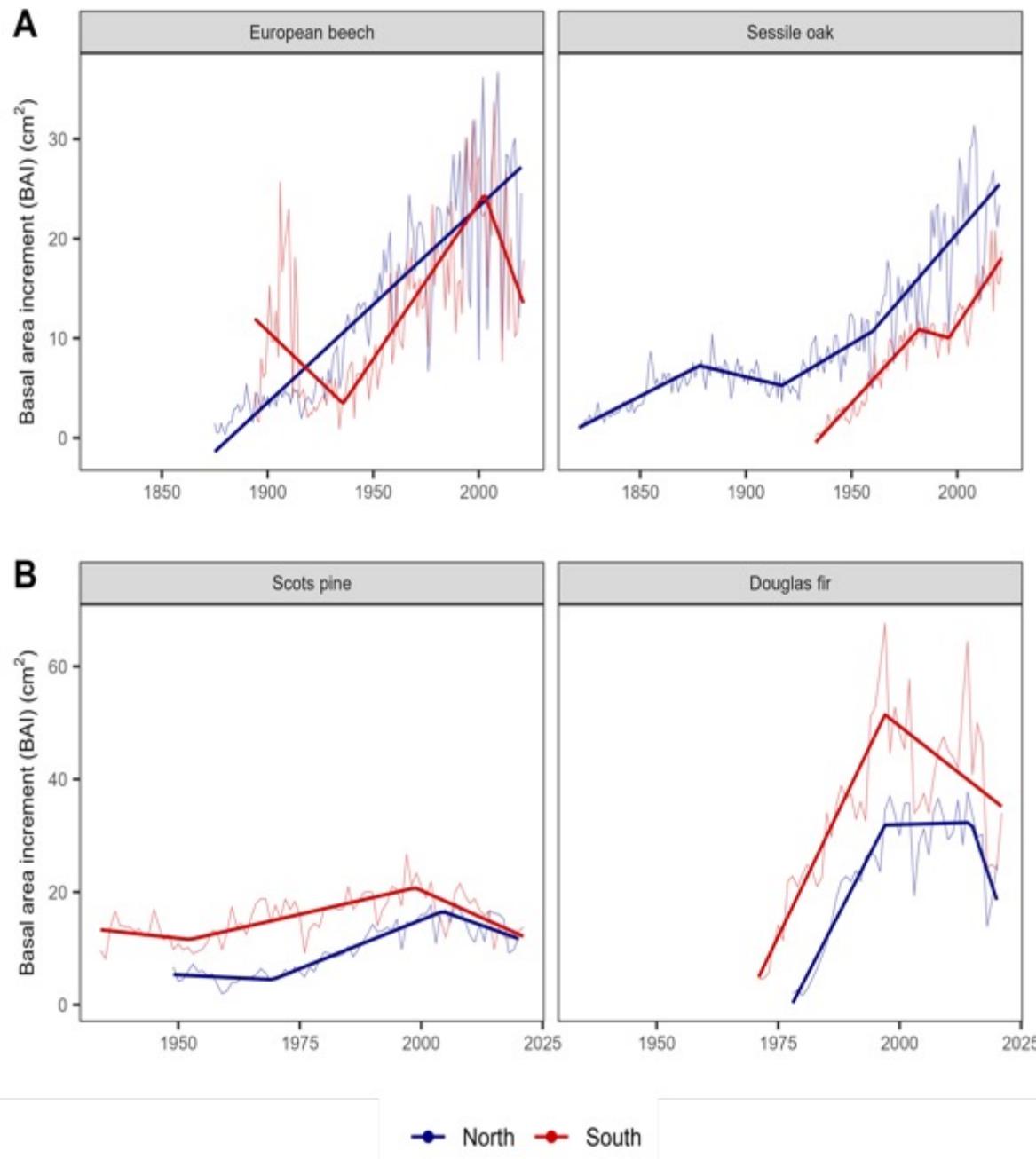


Erwärmung seit 1980: Anstieg der Mitteltemperaturen und der Extreme

Enderle et al., Sci Tot Env

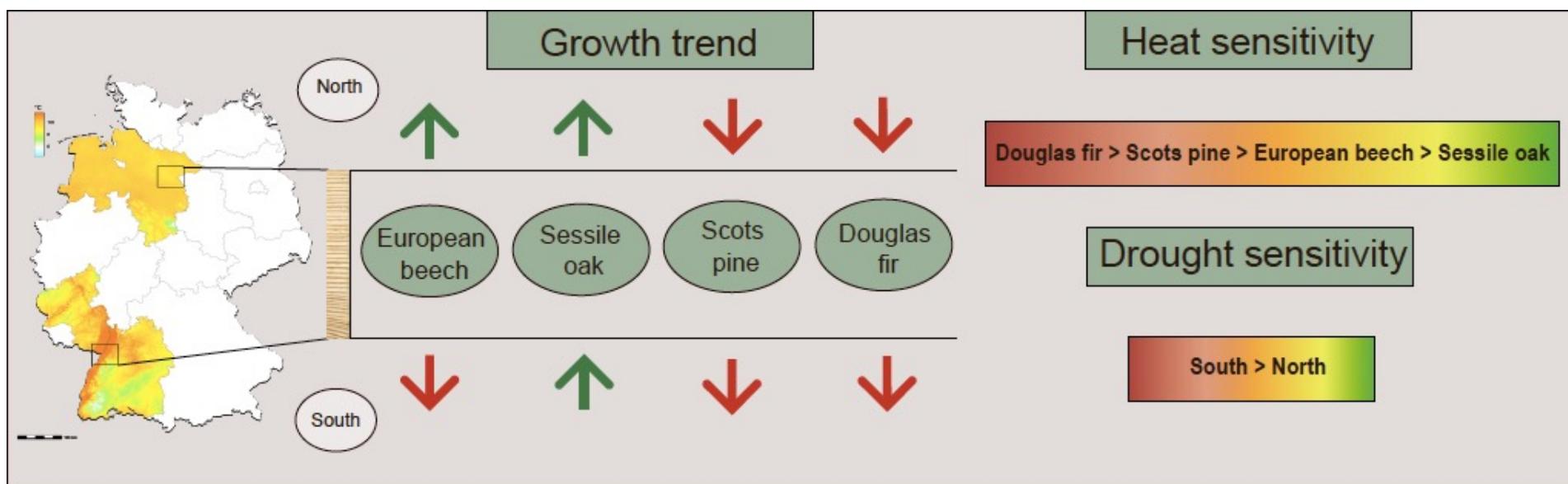
Zuwachstrends von Buche, Eiche, Kiefer und Douglasie in NW- und SW-Deutschland

Starker Rückgang bei Douglasie (beide Regionen) und Buche (nur Süden)



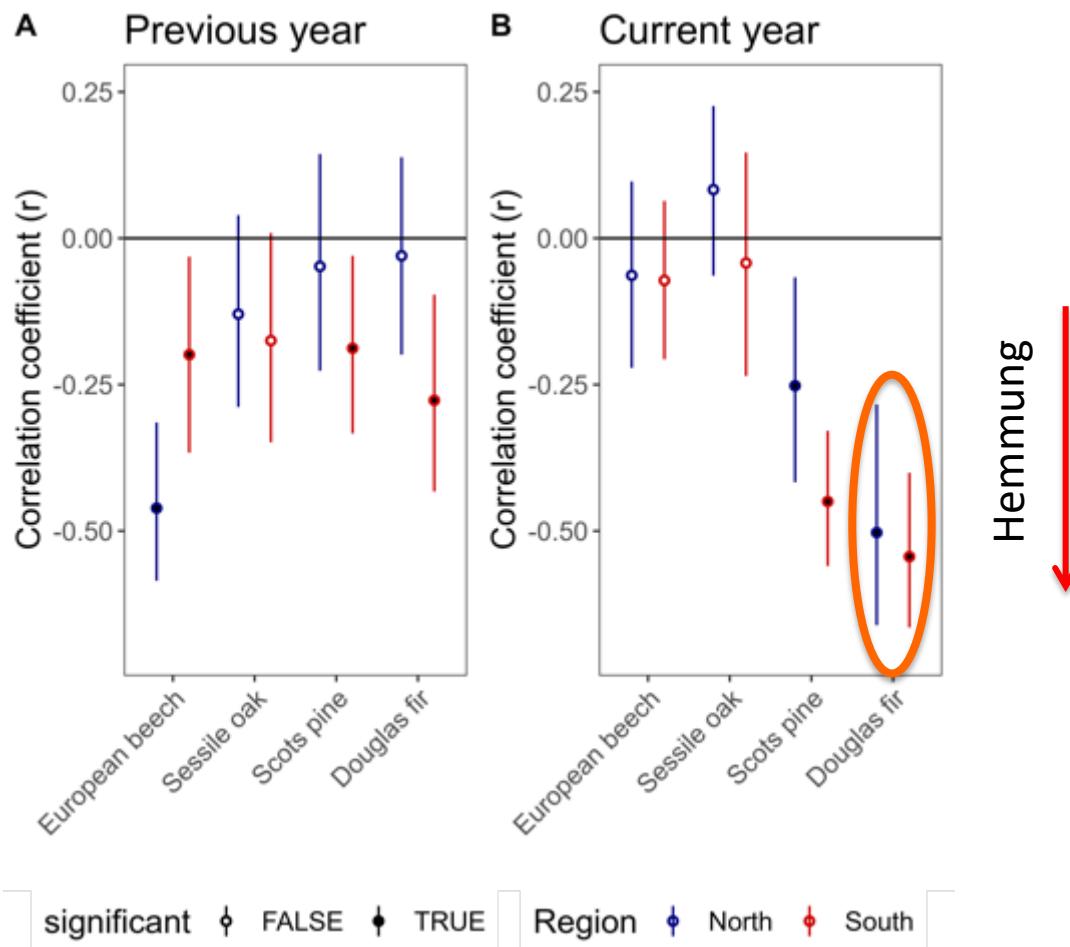
Growth trends of beech, pine, oak and Douglas-fir

Lowland areas in NW and SW Germany



Douglasie, Buche und Kiefer empfindlicher als Eiche

Hitzeeffekte auf den Zuwachs



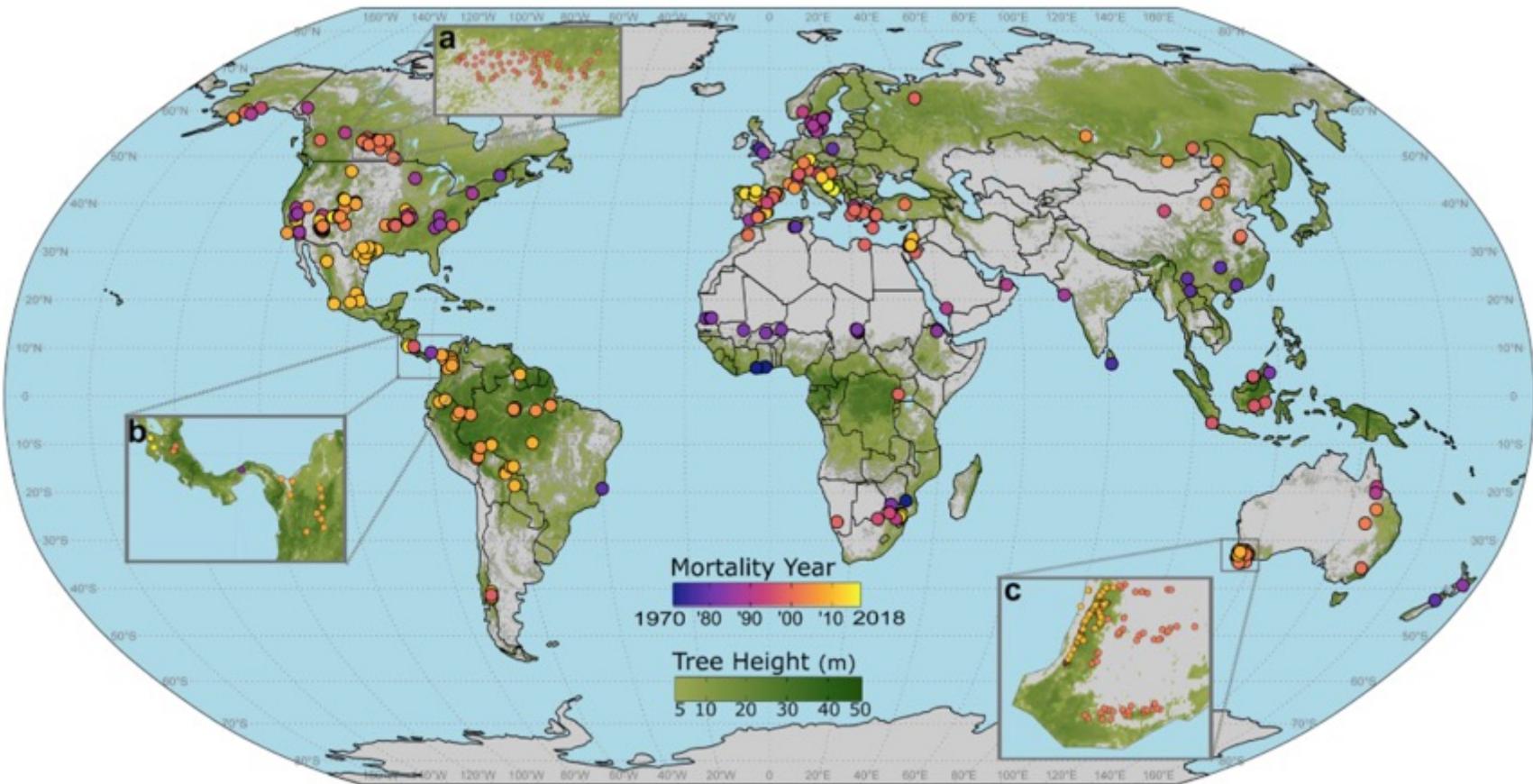
Douglasie besonders hitzeempfindlich, Eiche wenig empfindlich

Kronenschäden und Mortalität

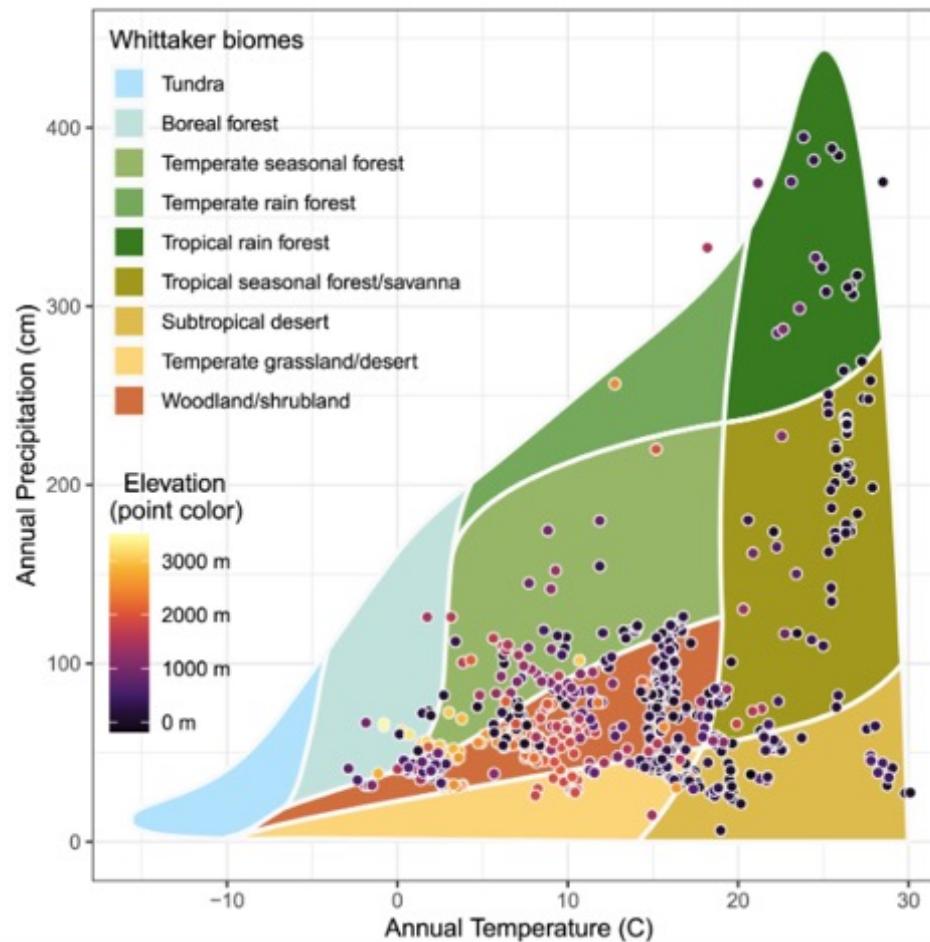
Absterbende Buchen
im NP Hainich
2020



Tree mortality due to hot droughts

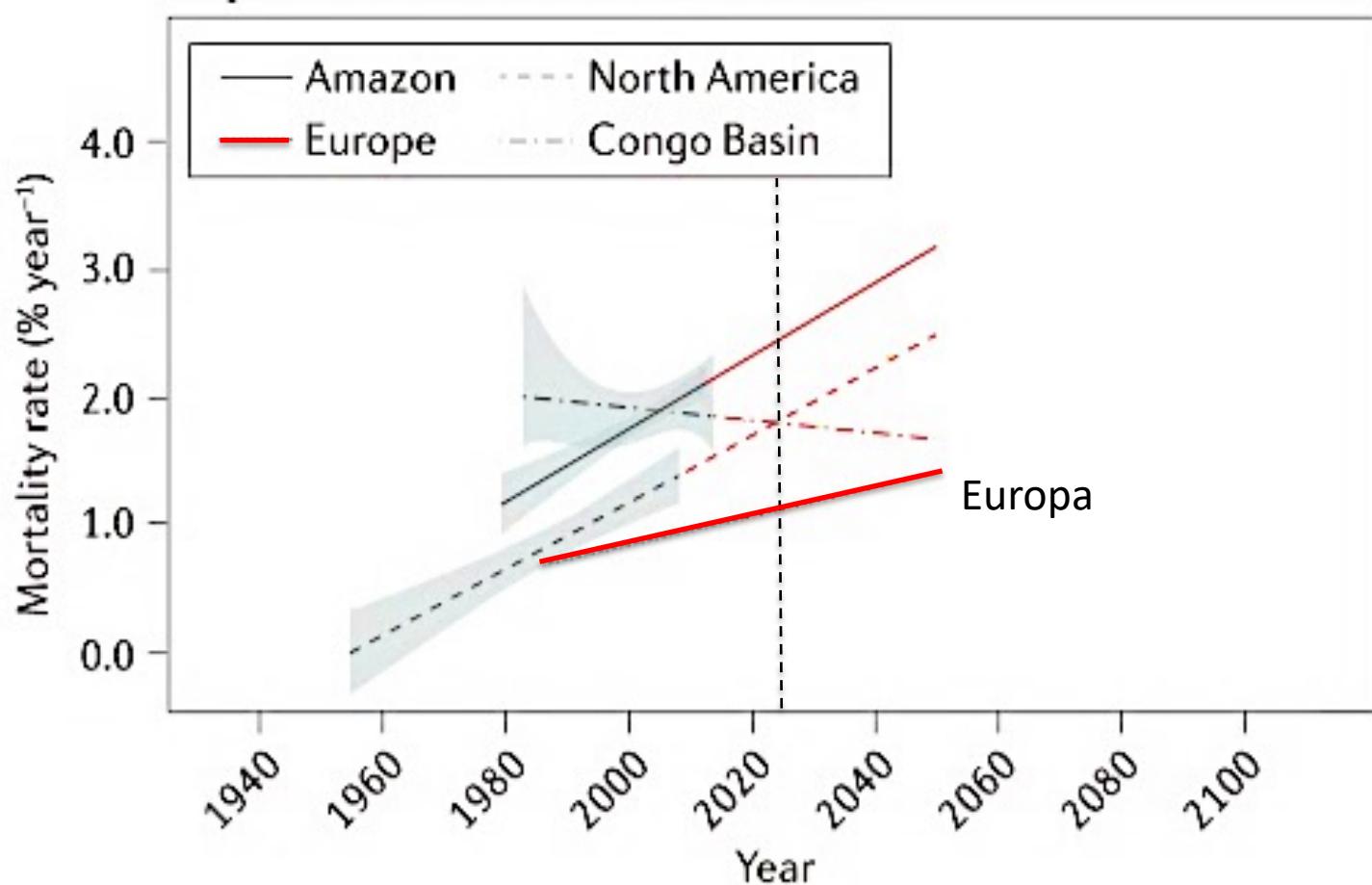


Tree mortality in world biomes

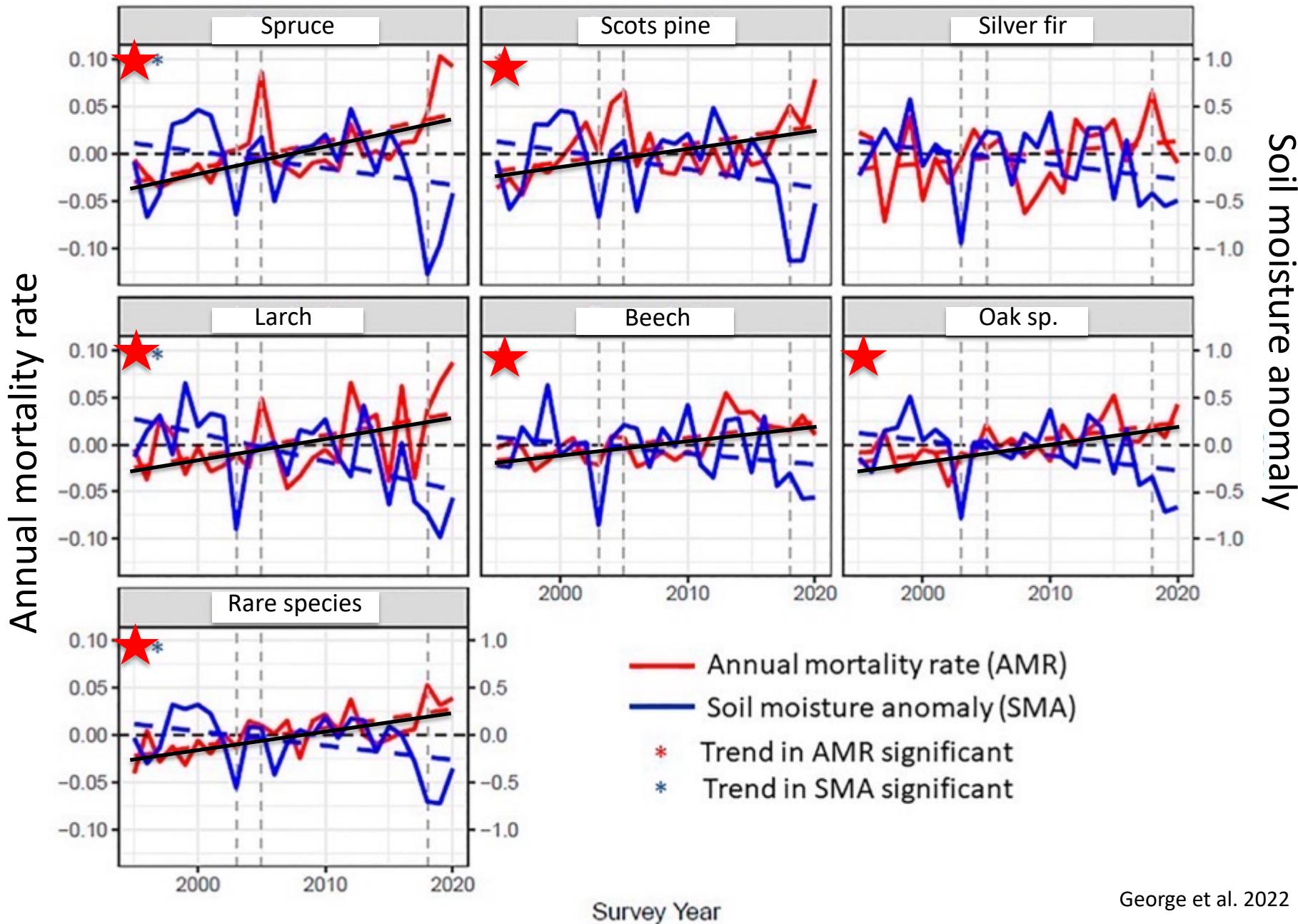


Erhöhte Mortalität in allen Waldbiomen vom südlichen borealen bis zum tropischen Waldbiom

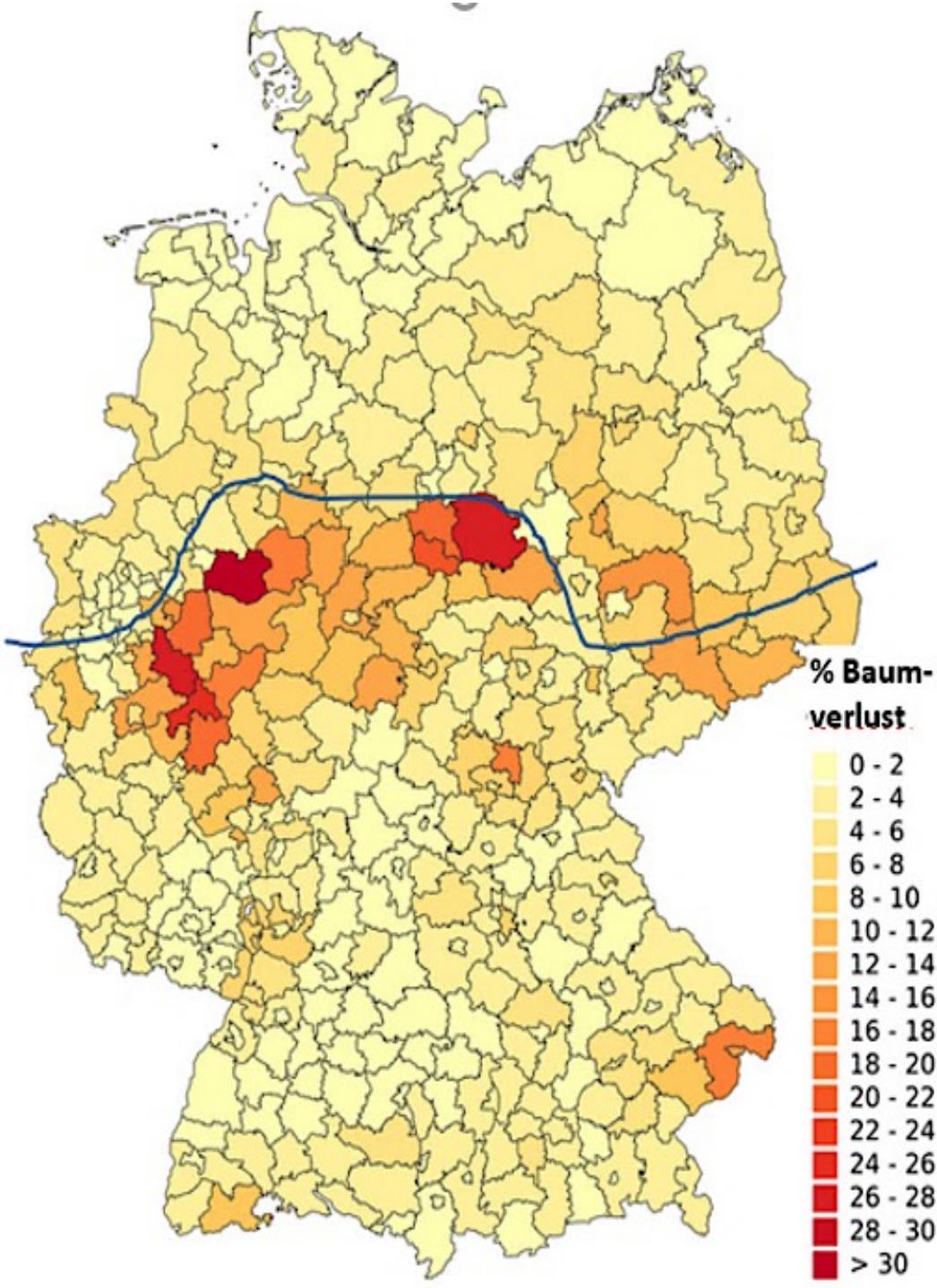
Steigende Baummortalität weltweit



Tree mortality in Europe 1994 - 2020



Waldschäden nach der 2018-2022 Dürre



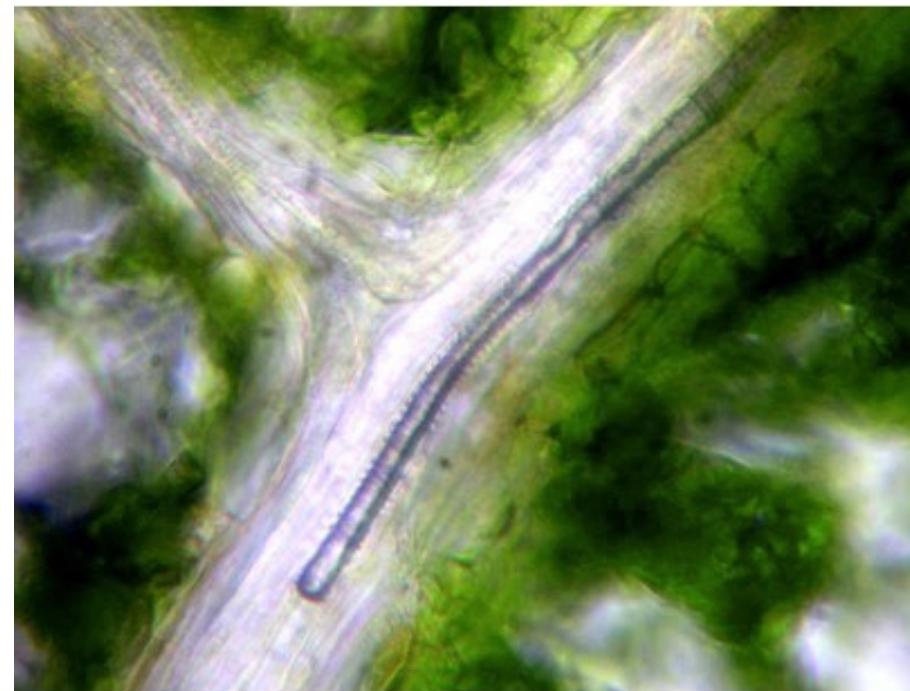
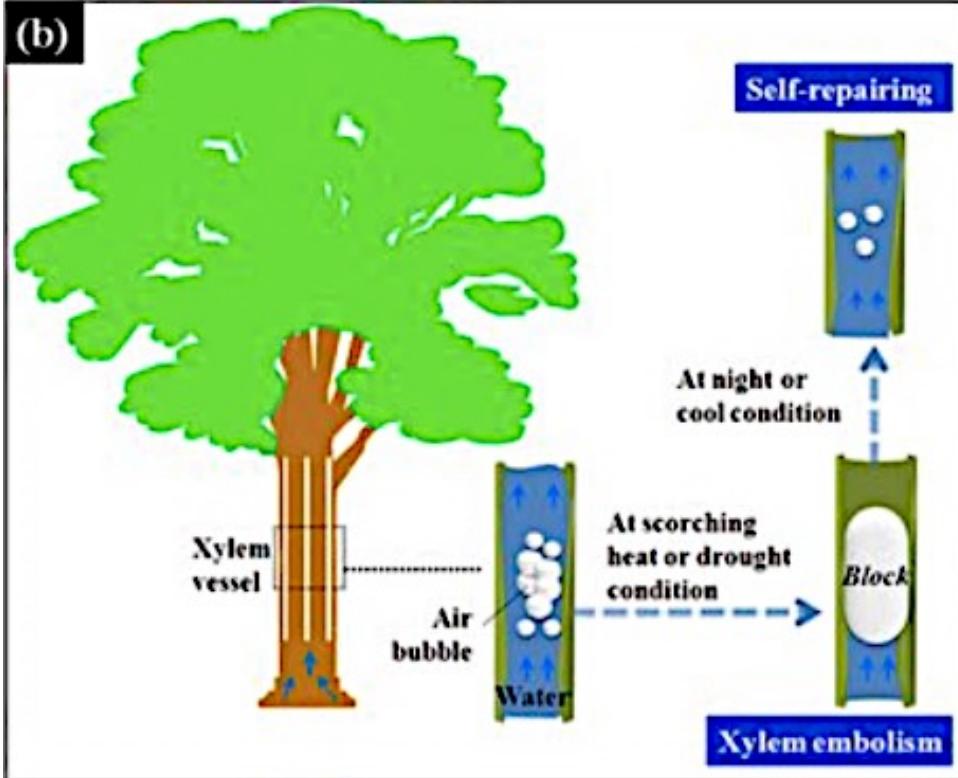
Fichtensterben (Brocken/Harz)

Mortalitätsursachen

3 wichtige Mechanismen:

- Stomataschluss – eingeschränkte Photosynthese (**carbon starvation**)
- Embolien im Xylem – Blockade der Wasserleitung (**hydraulic failure**)
- Geschwächte Abwehr – Schädlingsbefall (Insekten, Pilze)

Embolien im Xylem

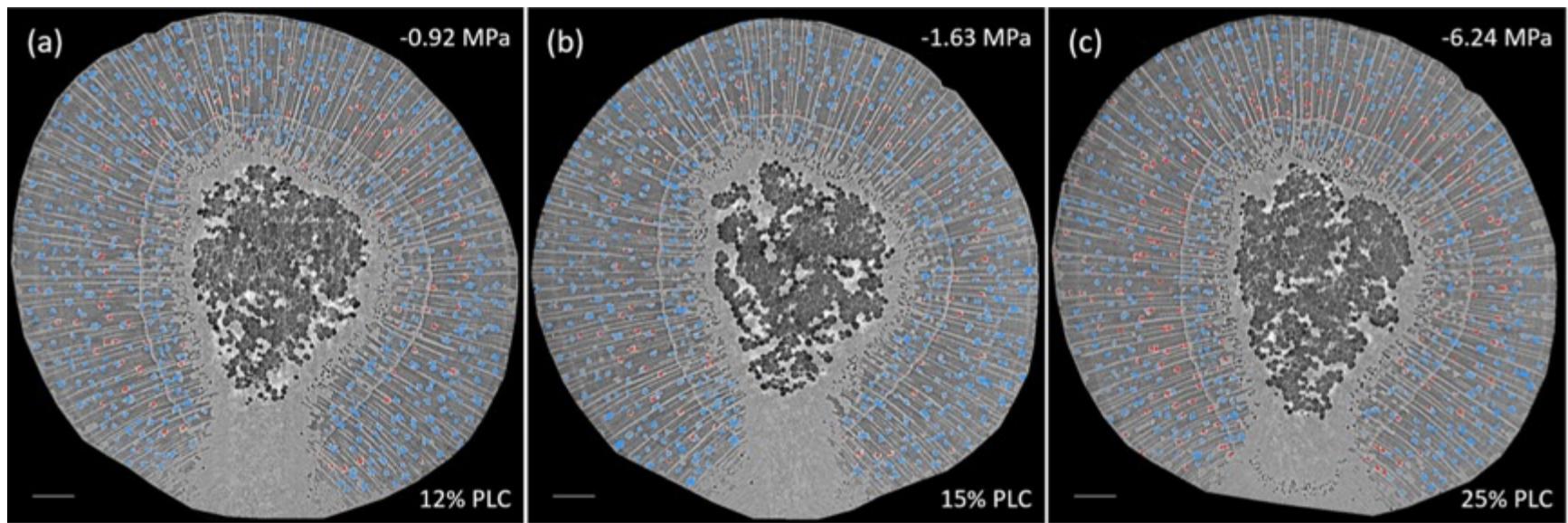


H. Cochard

Embolien lassen sich im Lichtmikroskop und durch μ -Computer-Tomographie sichtbar machen

Embolien im Xylem

(Stamm von *Laurus nobilis*)



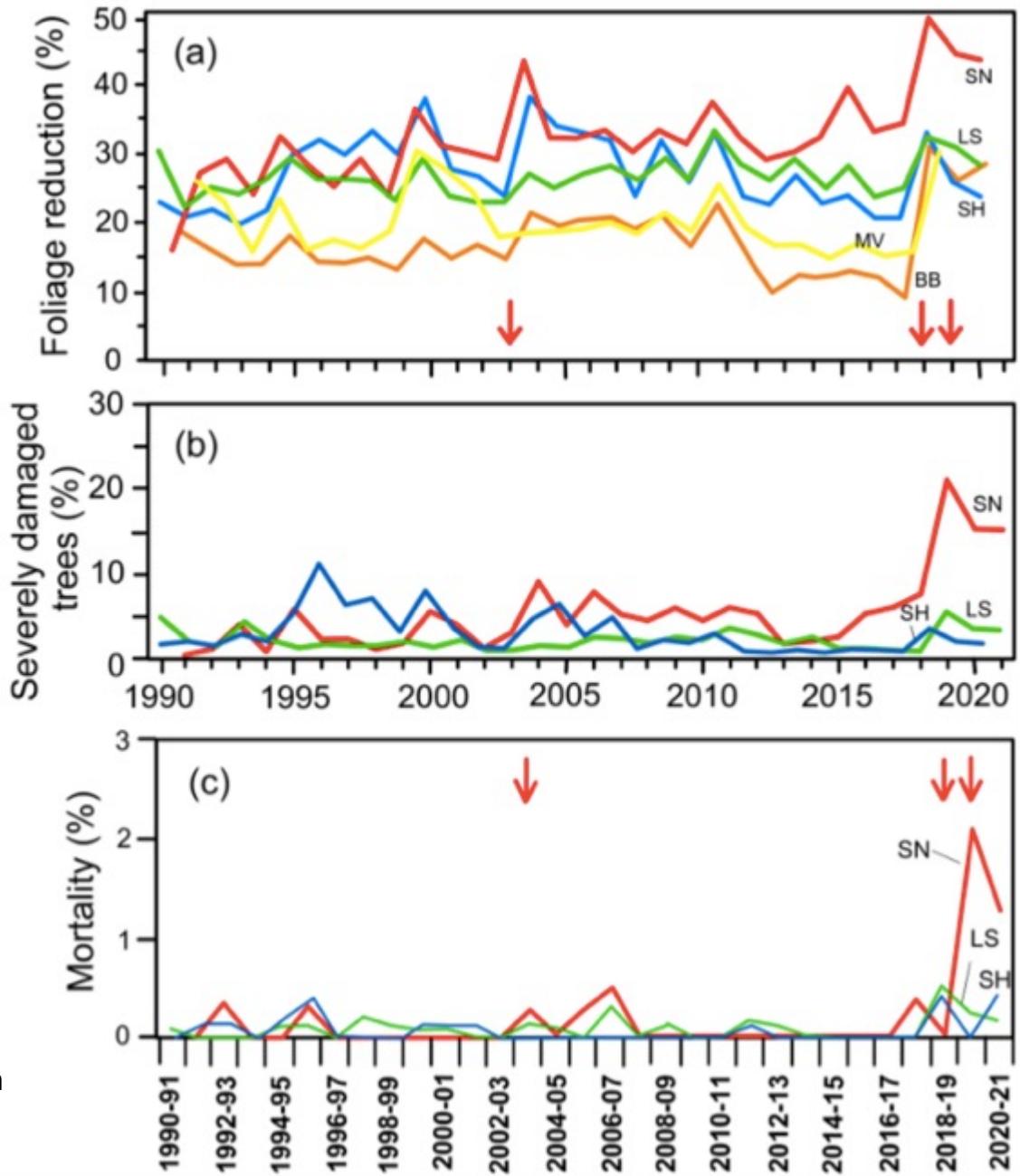
Wassergefüllte Gefäße: blau, kavitierte Gefäße: rot

Unterdruck im Xylem führt zur Emboliebildung (Kavitation) durch air-seeding

Kronenschäden an der Buche in den norddeutschen Ländern 1991-2021

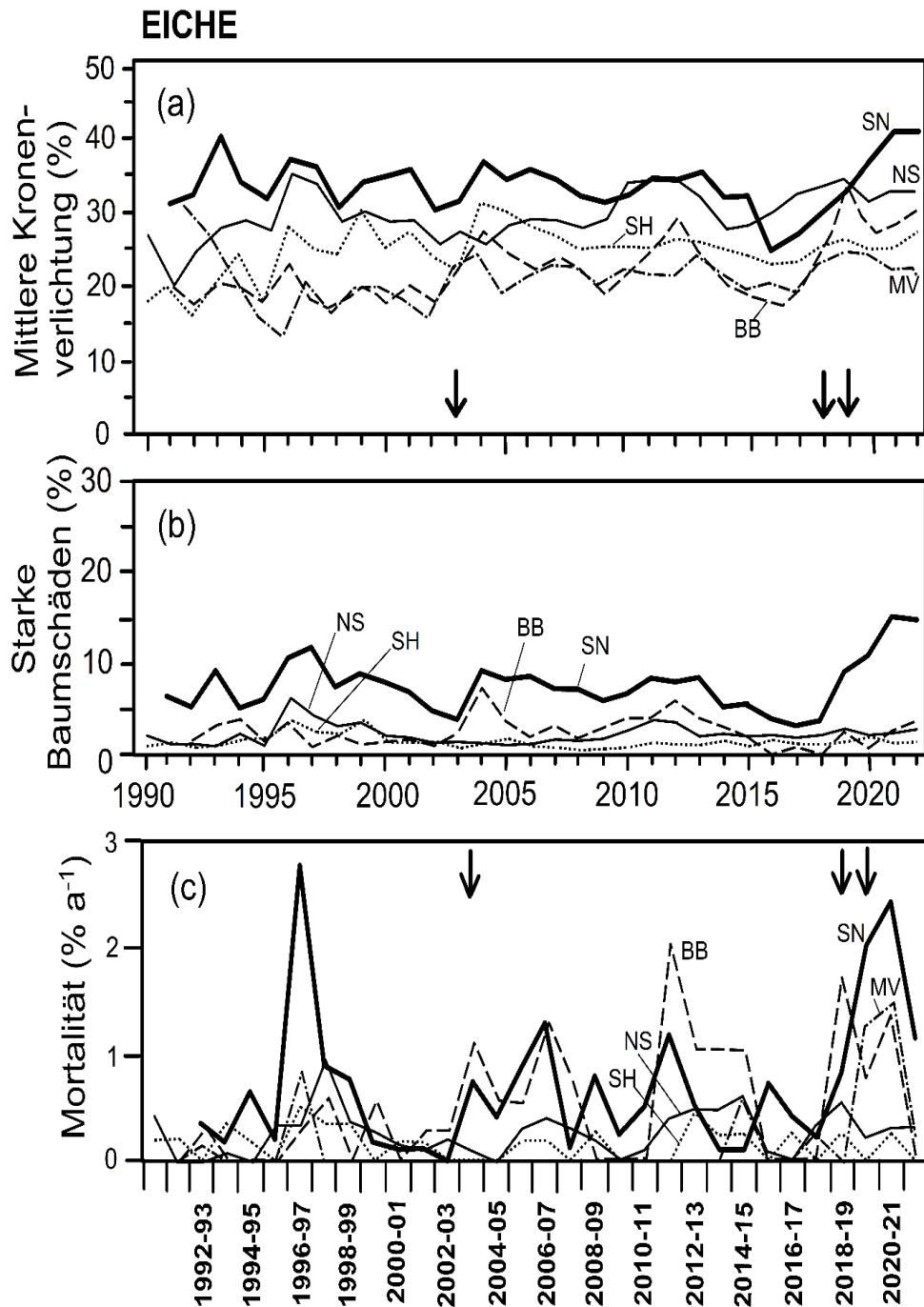
Stark erhöhte Kronenschäden nach 2018/2019 in Sachsen-Anhalt

Daten: Forstliche Versuchsanstalten Nordwestdeutschland, Brandenburg u. Meckl.-Vorpommern



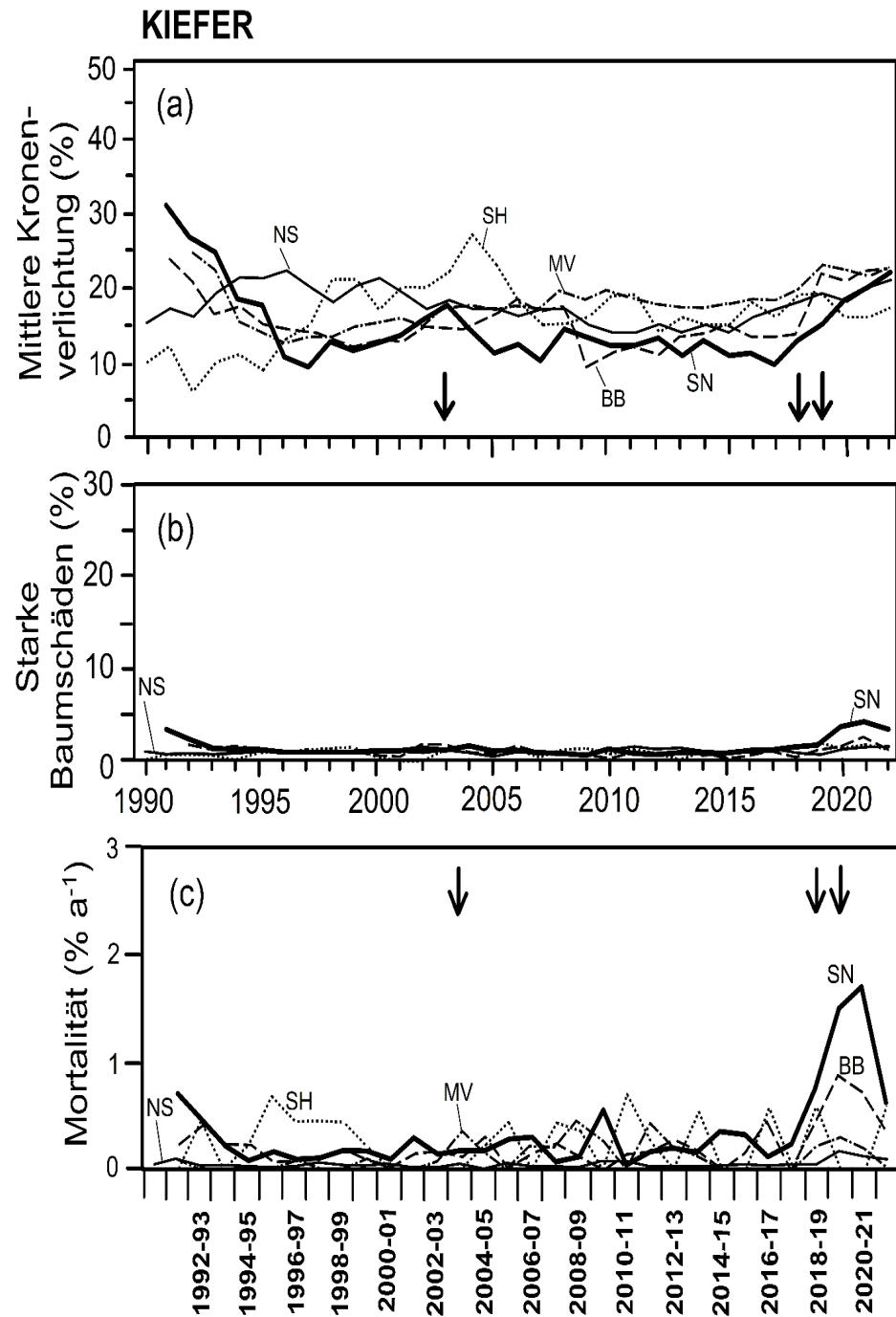
Kronenschäden und Mortalität

Kronenschäden weniger von Dürre als von Kalamitäten abhängig



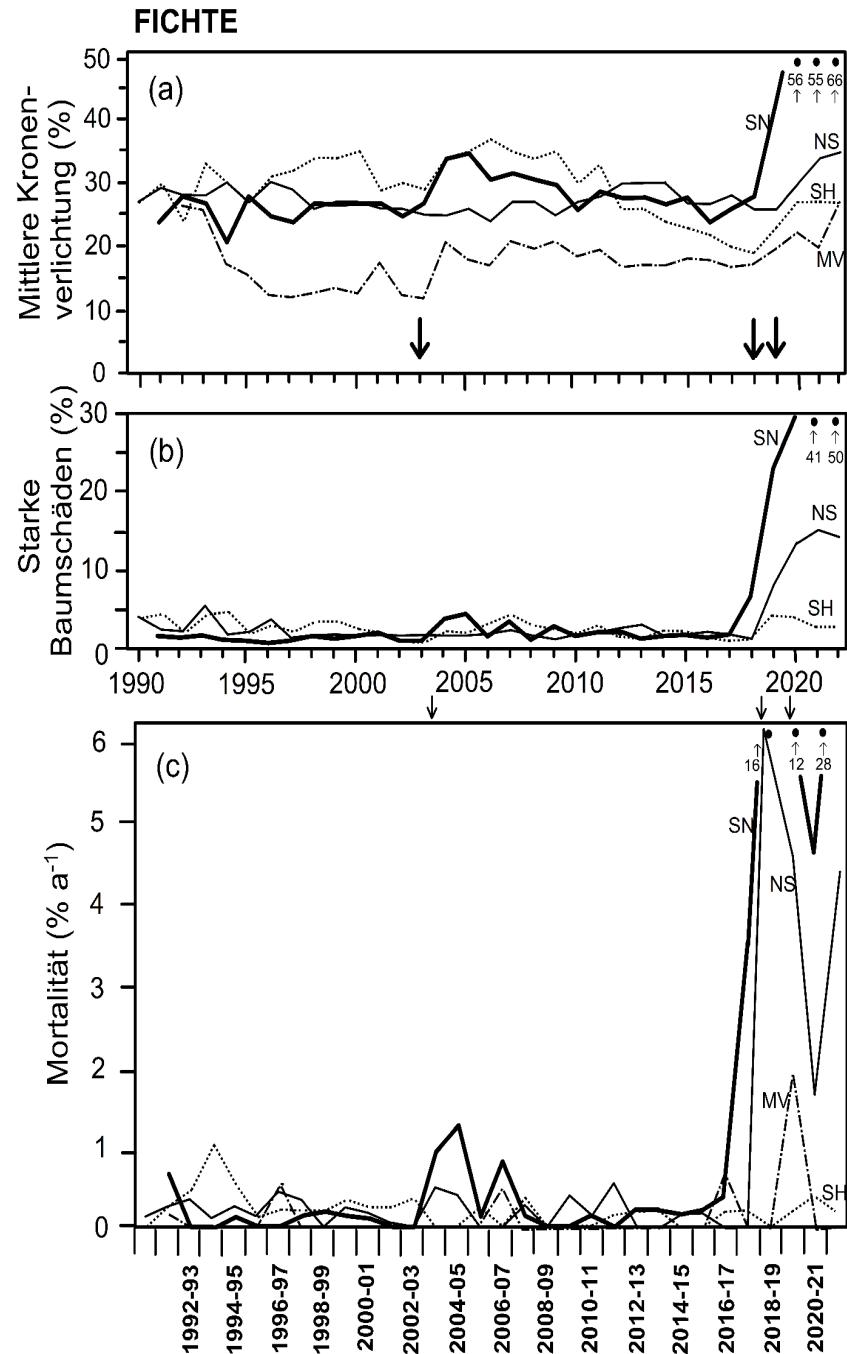
Kronenschäden und Mortalität

Bisher generell recht geringe Schäden, aber nach 2018/2019 in Sachsen-Anhalt und Brandenburg erhöht



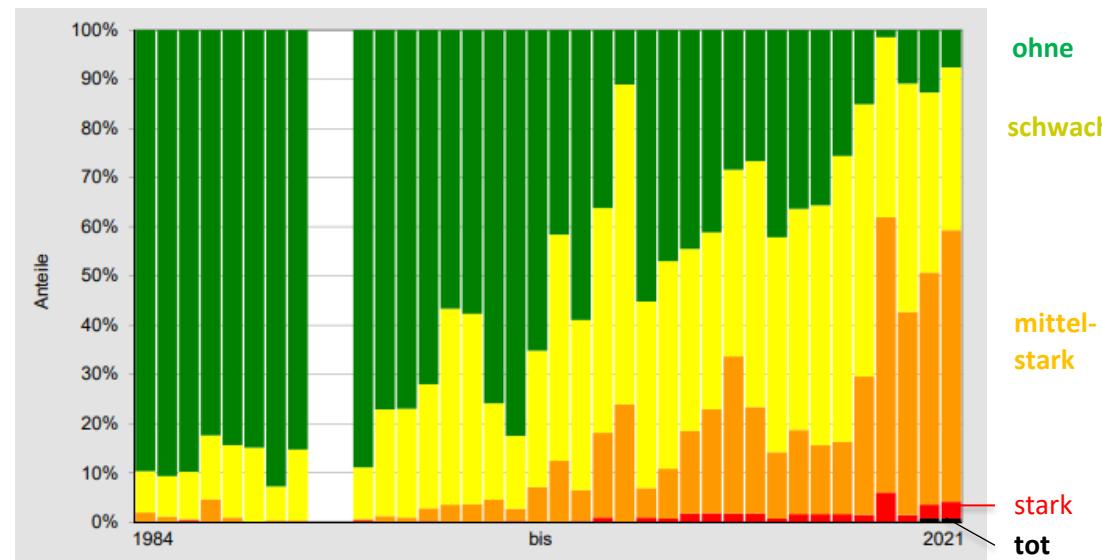
Kronenschäden und Mortalität

Extrem starke Schäden
nach 2018/2019 in den
Berglagen (vor allem Harz),
weniger im Tiefland

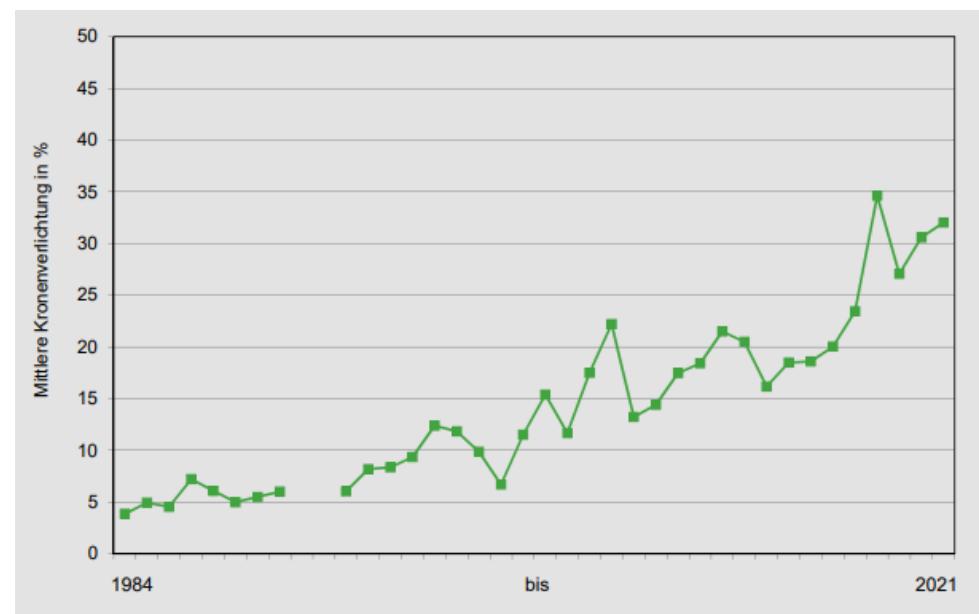


Kronenschäden Douglasie 1984-2021 in Rheinland-Pfalz

Schadstufen



Kronenverlichtung



Kontinuierlicher Anstieg der
Schäden
2021 >50% der Bäume mit
mittelstarken Schäden

Alternative Baumarten im Klimawandel



Traubeneiche



Hainbuche



Spitzahorn



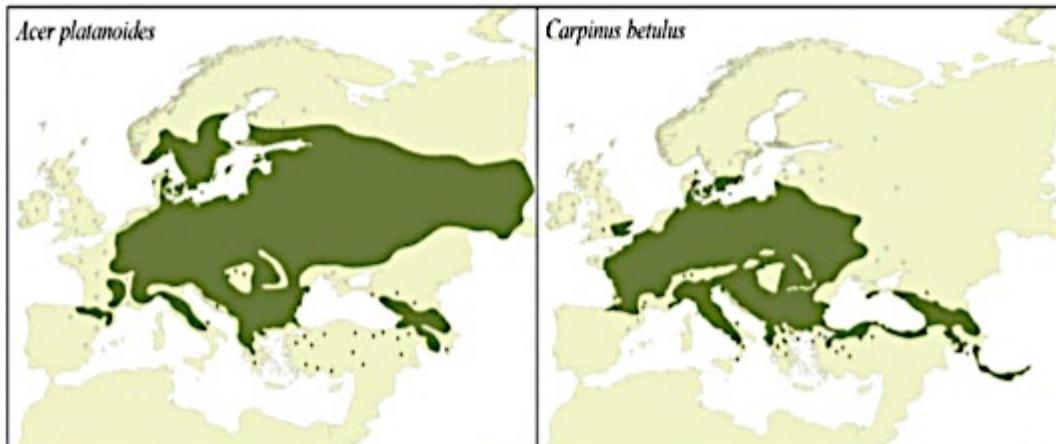
Winterlinde



Esche

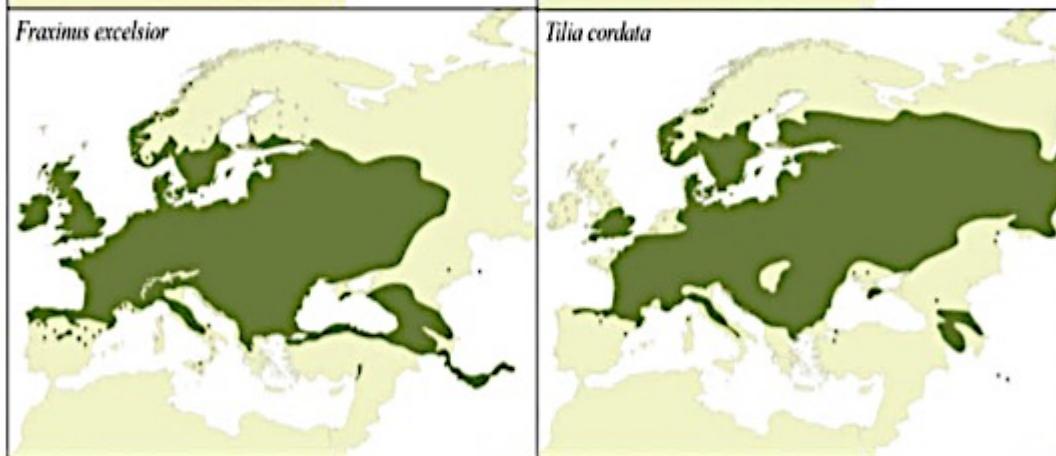
Verbreitungsareale von 5 mitteleuropäischen Laub-Nebenbaumarten und der Buche

Spitz-ahorn



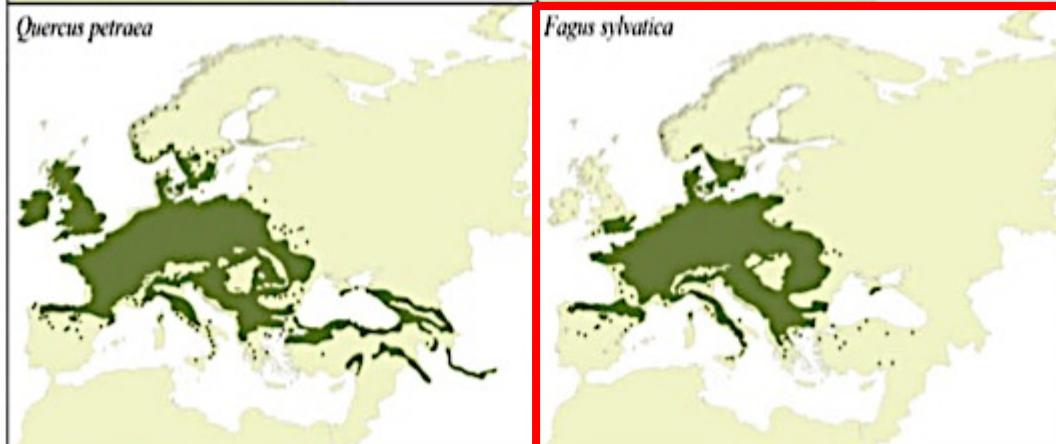
Hainbuche

Esche



Winterlinde

Traubeneiche



Buche

Fagus sylvatica

Based on Caudullo 20



Traubeneiche (*Q. petraea*)



Ungarische Eiche (*Q. frainetto*)



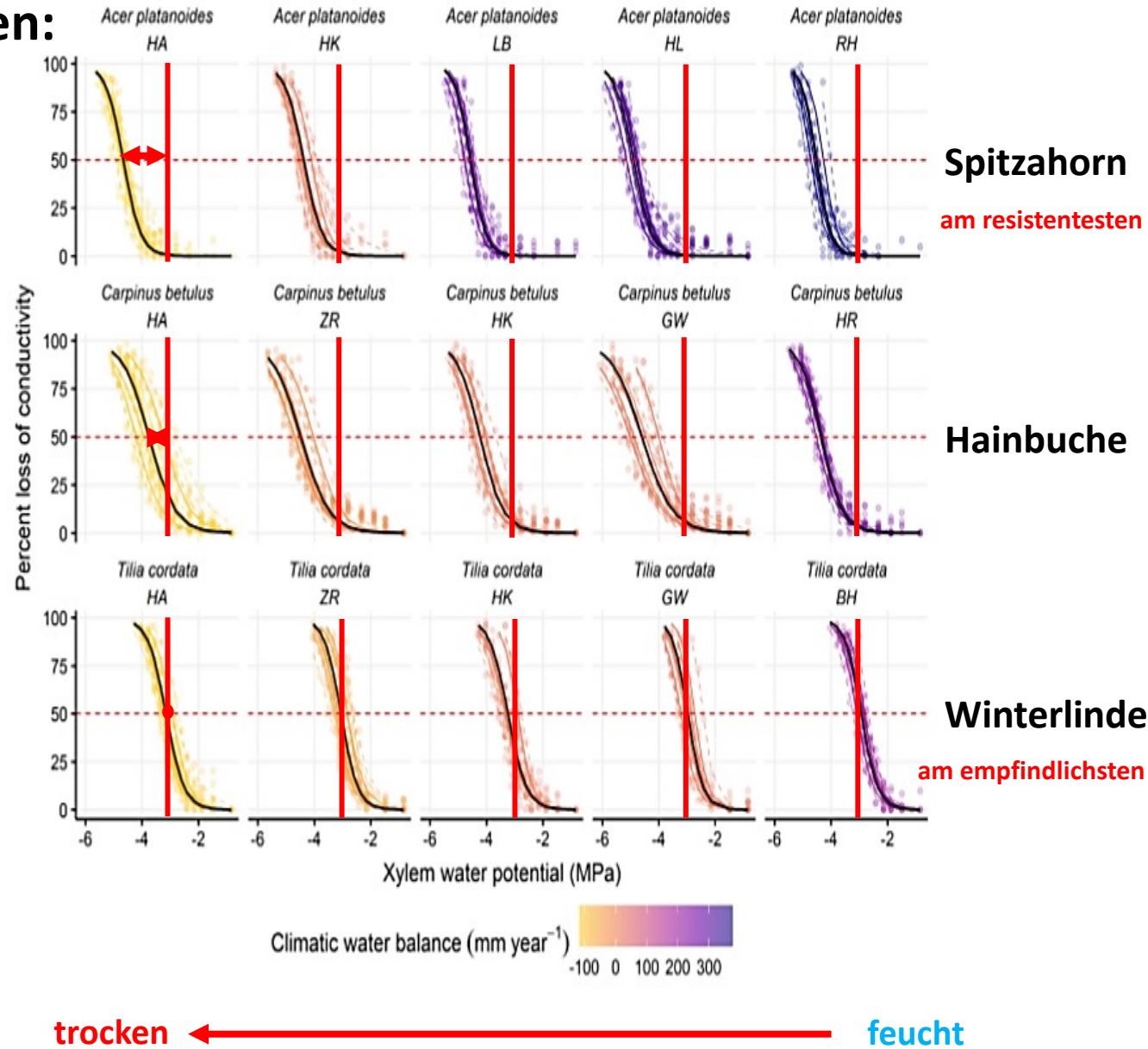
Zerreiche (*Q. cerris*)

Trockenstressantwort der Nebenbaumarten:

Embolieresistenz-
Anpassung
an den Niederschlag

Mitteldeutsches
Trockengebiet

Nur geringe
Anpassung
an steigende
Trockenheit
bei allen Arten



Trockenstressantwort der Nebenbaumarten:

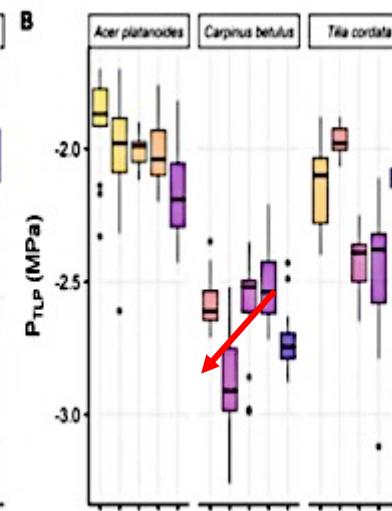
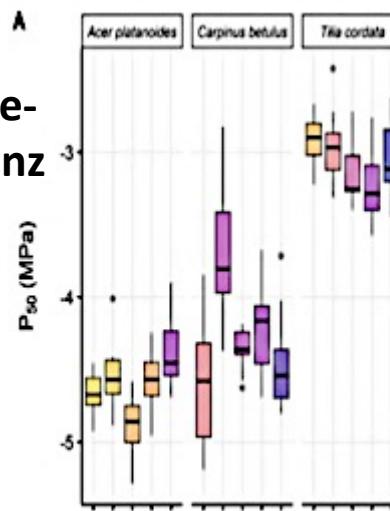
Embolieresistenz-
Anpassung
an die Bodenfeuchte

Mitteldeutsches Trockengebiet

Spitz- ahorn Hain- buche Winter- linde

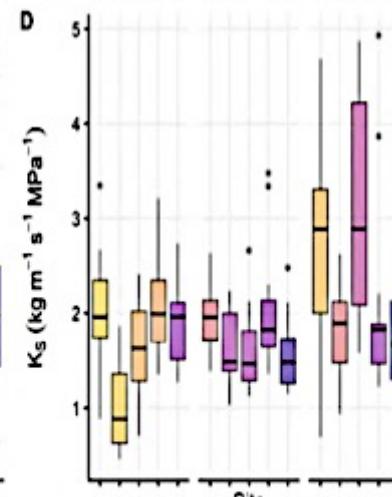
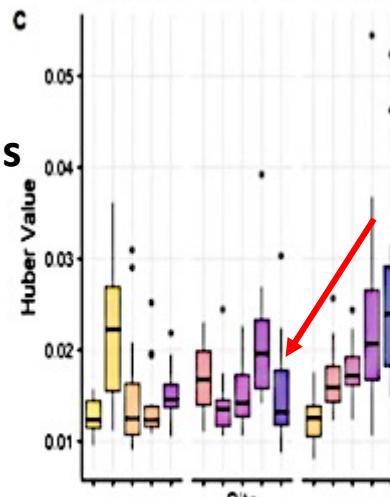
Spitz- ahorn Hain- buche Winter- linde

Embolie-
Resistenz



Turgorverlust-
Punkt

Huber-
Verhältnis



Hydraulische
Leitfähigkeit

Nur geringe hydraulische
Anpassung an Bodentrockenheit

Available water capacity
of the soil (mm)
50 100 150 200



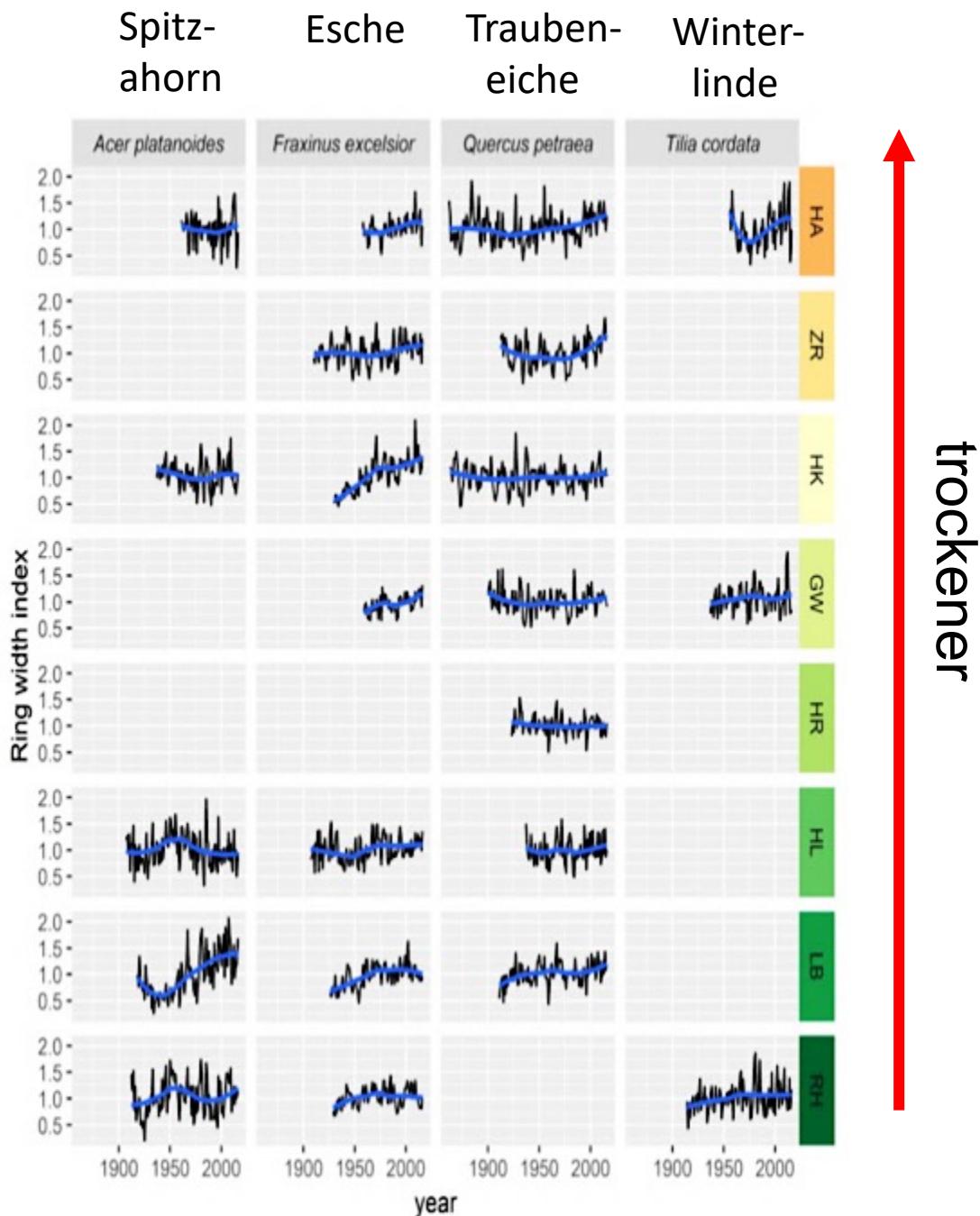
Abnahme Bodenwasserspeicher

Produktivität der Nebenbaumarten:

Zuwachstrends

Mitteldeutsches Trockengebiet

Keine negativen Trends
in jüngster Zeit bei
den 4 Arten

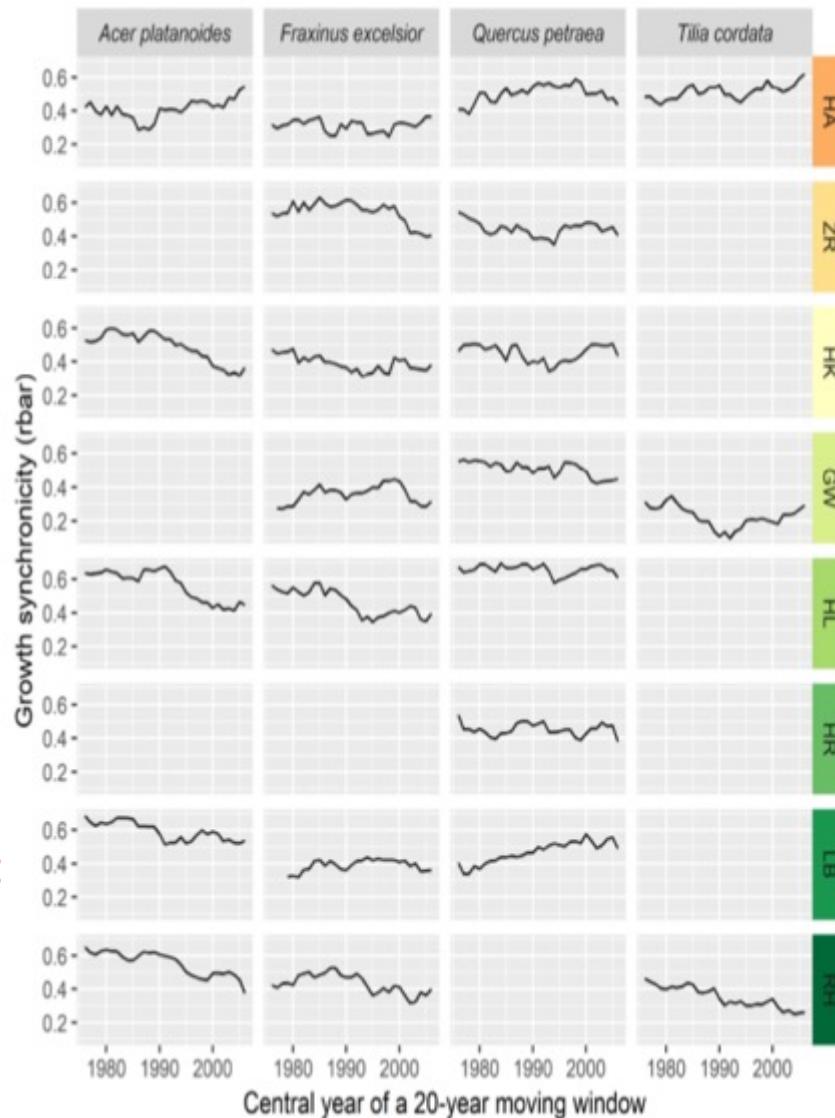


Produktivität der Nebenbaumarten:

Synchronizität des Zuwachses
(1967-2016, 20-Jahres-Fenster)

Mitteldeutsches Trockengebiet

**Keine überregionalen Trends
in der Zuwachs-Synchronizität
bei den 4 Arten – anders als
bei der Buche**



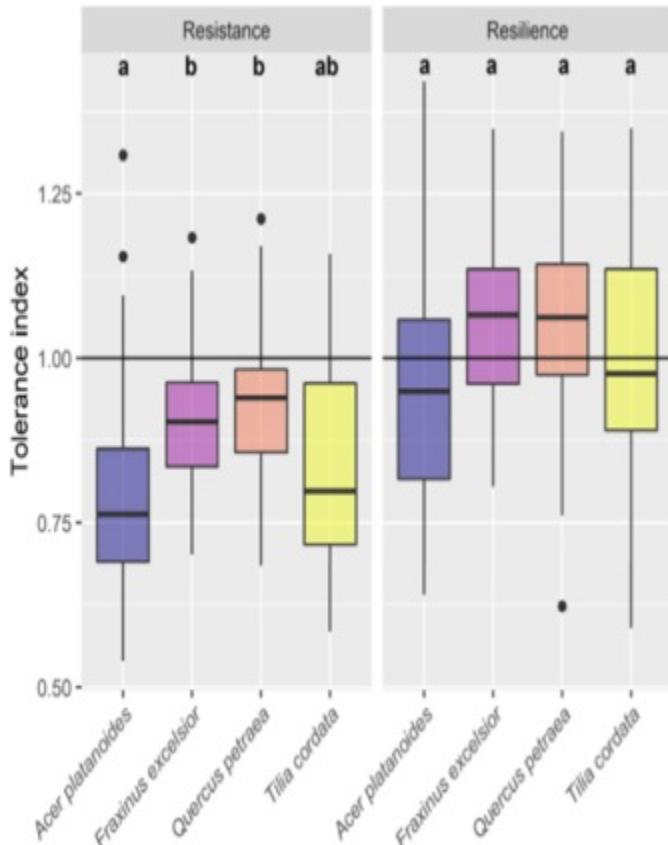
Produktivität der Nebenbaumarten:

Zuwachsreaktion auf
extreme Trockenheit

Mitteldeutsches Trockengebiet

Resistenz und Resilienz gegenüber Dürren

(SPEI_{August} < -0.84, 11-Jahres-Fenster)

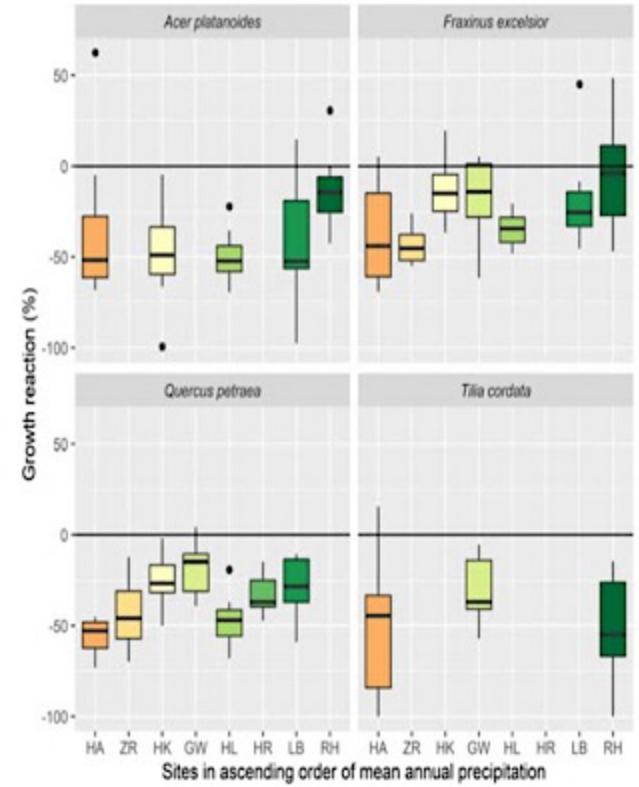


Alle 4 Arten zeigen eine hohe Zuwachsresilienz gegenüber Dürren

Stärke der BAI-Reduktion (%)
in der 1976-Dürre

Spitzahorn

Esche



trocken ← feucht

Fuchs et al. 2021

Die extreme 1976-Dürre hat bei Esche, Eiche und Ahorn an trockenen Standorten zu stärkeren Zuwachsreduktionen geführt

Produktivität der Nebenbaumarten:

Konträre Wachstums-
trends von Buche
und 3 Eichenarten

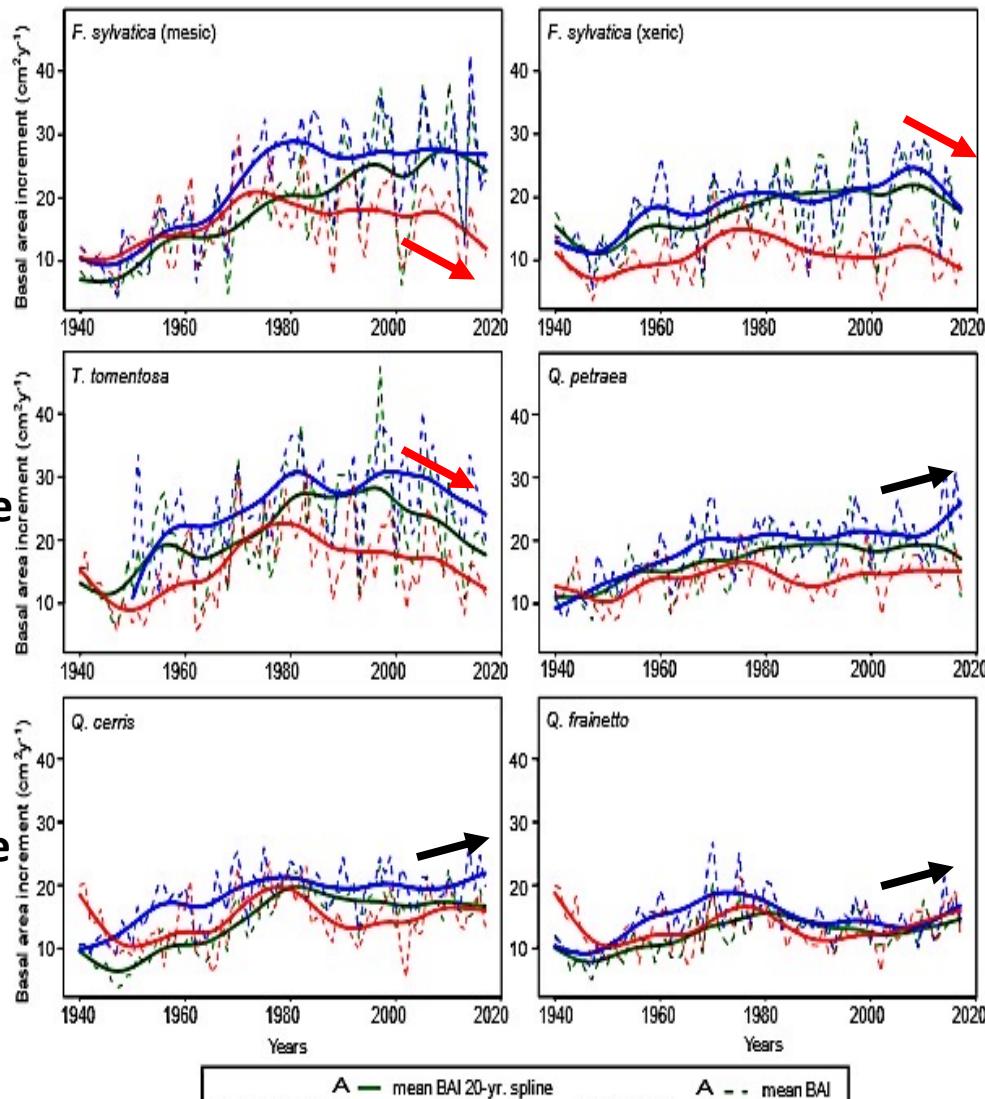
(West-Rumänien)

Buche
(frisch)

Silberlinde

Zerr-Eiche

Negative Trends
bei Buche und
Silberlinde seit 2000,
positive bei 3 Eichen



A — mean BAI 20-yr. spline
Transect B — mean BAI 20-yr. spline
C — mean BAI 20-yr. spline

A - - mean BAI
Transect B - - mean BAI
C - - mean BAI

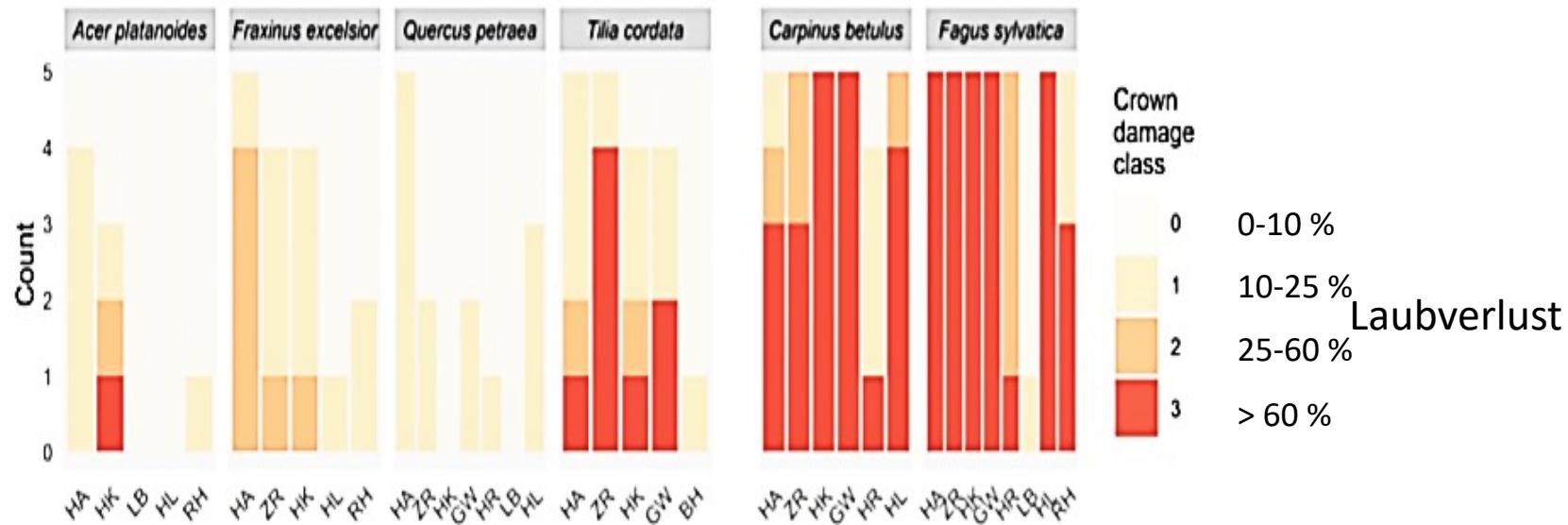
Buche
(trocken)

Trauben-
eiche

Ungarische
Eiche

Kronenschäden der Nebenbaumarten nach der 2018/19-Dürre

(September 2019; mitteldeutsches Trockengebiet)



Schäden bei Buche > Hainbuche > Winterlinde > Spitzahorn > Esche > Traubeneiche

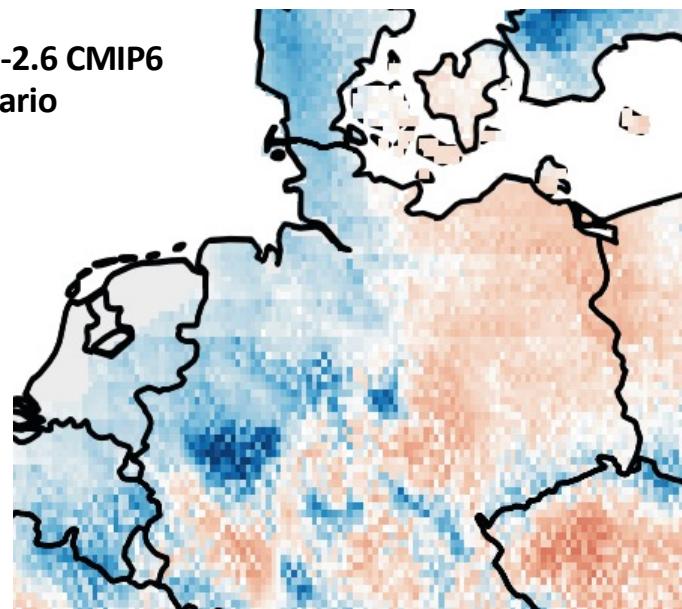
Klimasensitivität der Baumarten im Vergleich

Fazit – Empfehlungen für die Forstwirtschaft

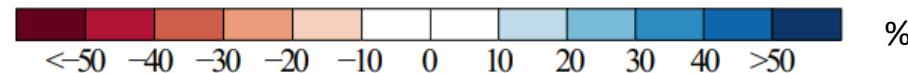
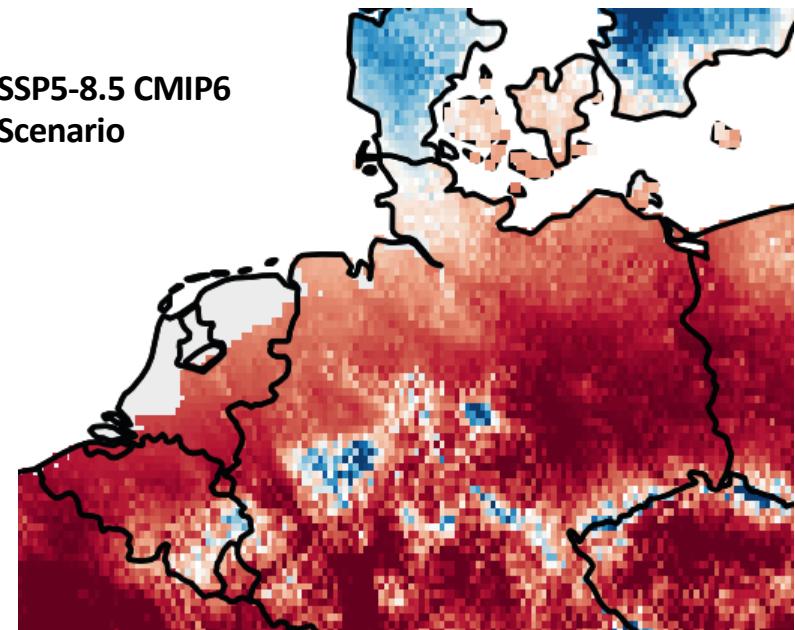
Die Zukunft der Buche: Vorhergesagte Veränderung des Zuwachses der Buche in 2060-90 relativ zur 1986-2016 Periode

nach zwei Klima-Szenarien

SSP1-2.6 CMIP6
Scenario



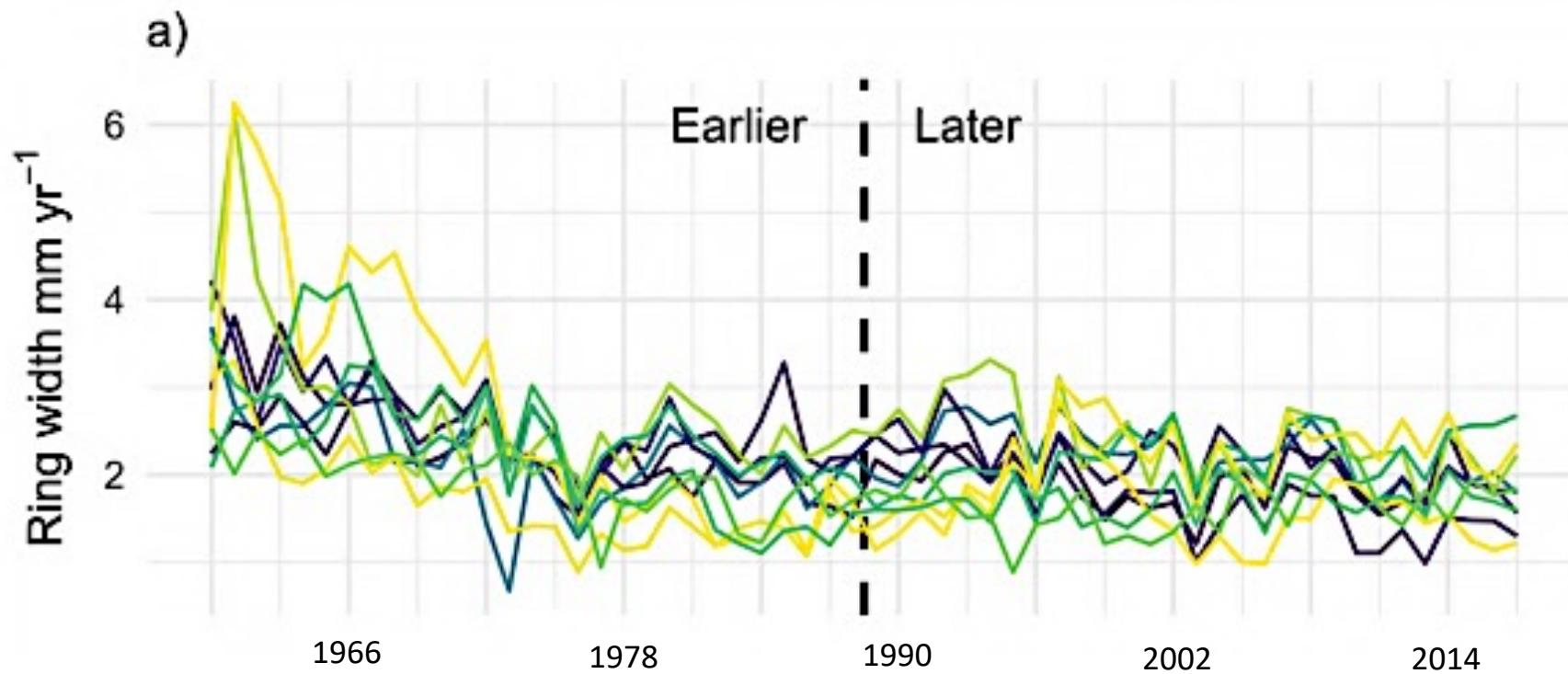
SSP5-8.5 CMIP6
Scenario



Martinez des Castillo et al. 2022

Zuwachstrends der Kiefer in Norddeutschland

Ringbreiten (Originaldaten)

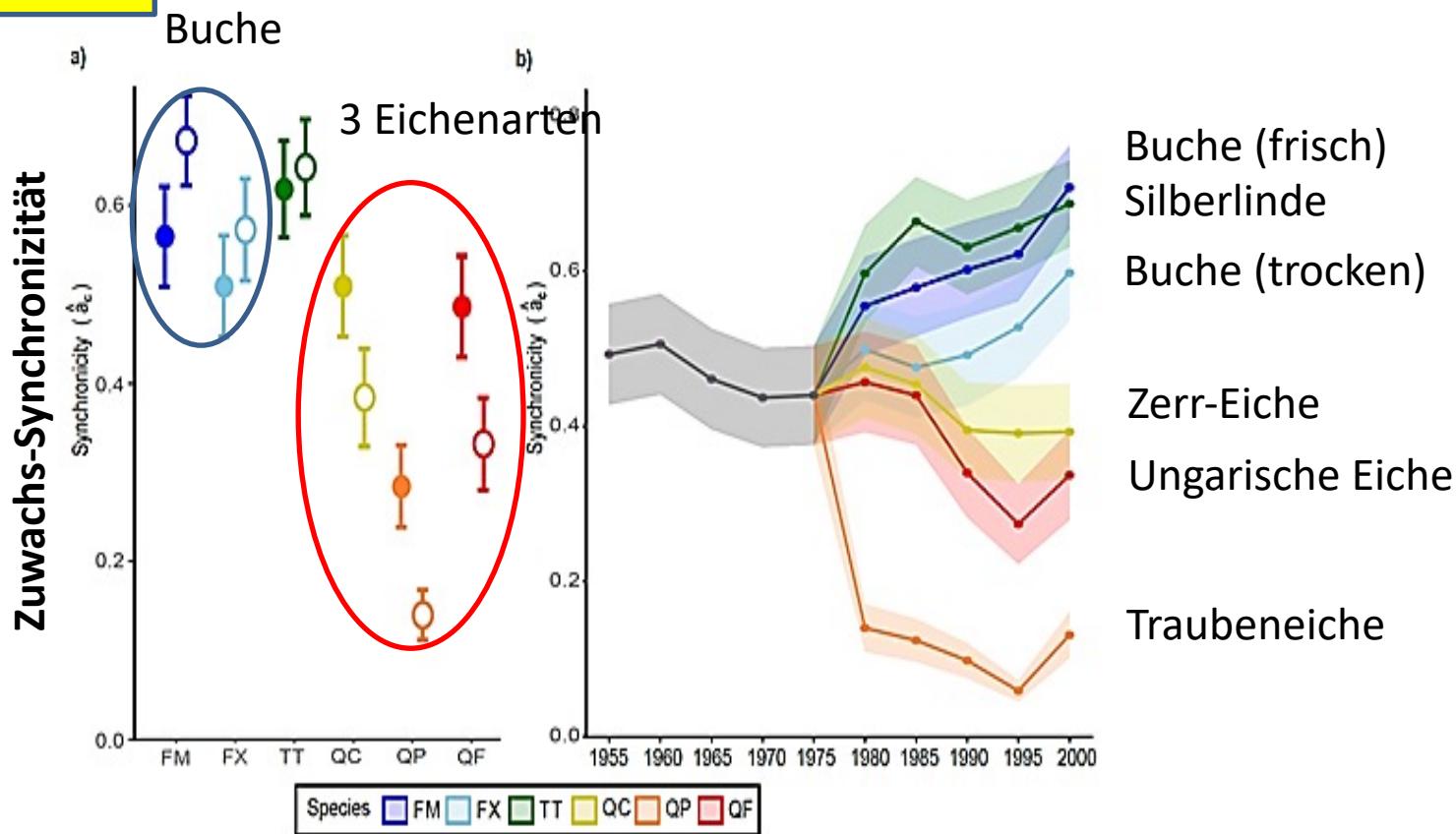


Stabile Zuwächse bei der Kiefer

Produktivität der Nebenbaumarten:

Zuwachs-Synchronizität
als Indikator für
klimatischen Stress

(West-Rumänien)



Seit 1980 steigende Wachstums-Synchronizität im Bestand bei Buche und Silberline,
dagegen fallende oder gleichbleibende bei den 3 Eichenarten

Indikator für höhere und steigende Klimasensitivität bei Buche und Silberlinde