

Waldböden – worauf bei der Bewirtschaftung zu achten ist

Klaus Katzensteiner Institut für Waldökologie, BOKU Wien

„Martian Soil“: Ist das wirklich Boden?



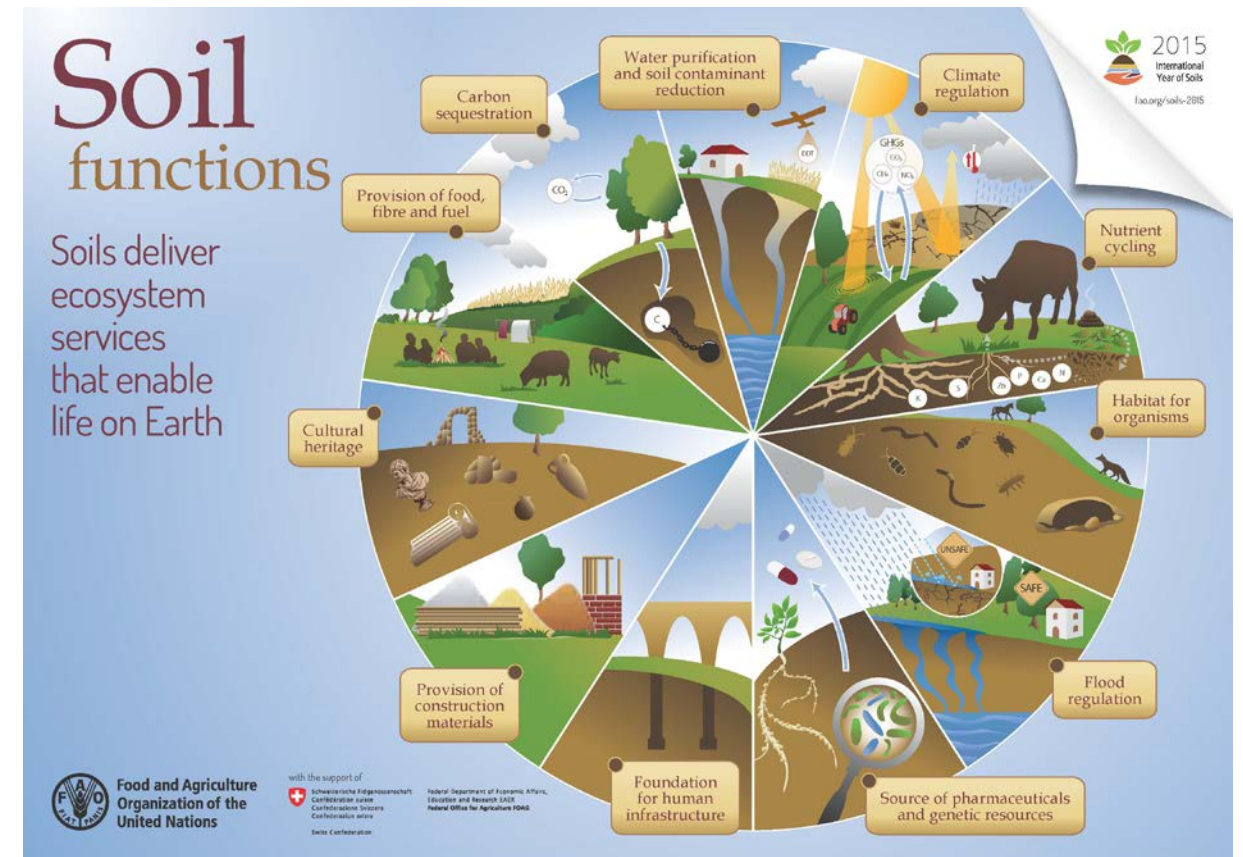
©NASA/JPL-Caltech/MSSS

Boden ist die oberste, verwitterte und **belebte Schicht** der Erdkruste

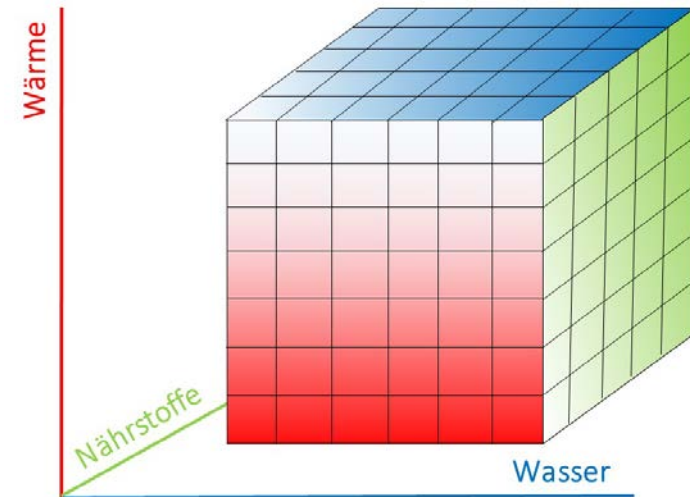
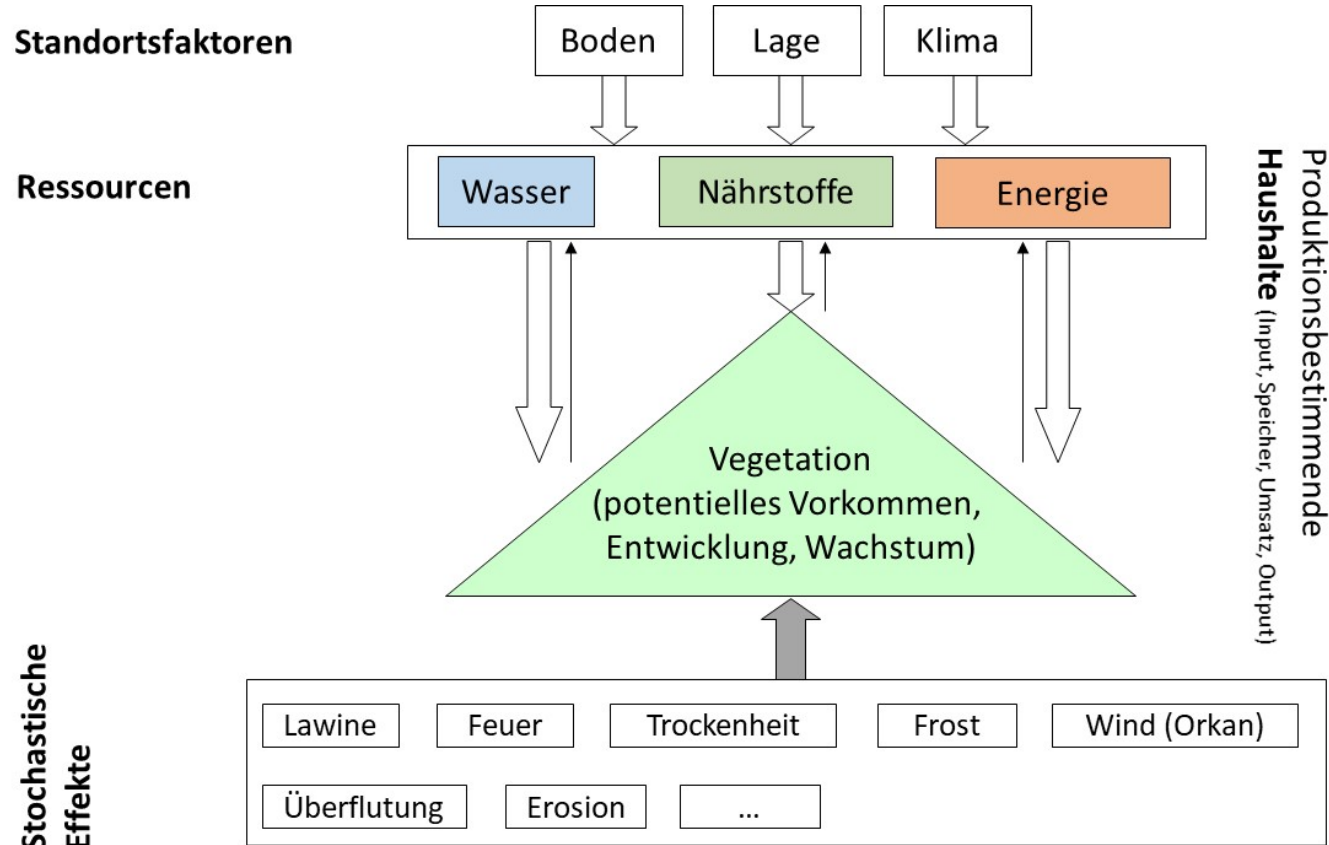


Böden haben vielfältige Funktionen:

- *Land- und forstwirtschaftliche Produktion*
- *Boden als Filter, Puffer, Speicher, Transformator:*
 - Filterung von Schadstoffen
 - Pufferung von Säureeinträgen
 - Speicherung von Wasser, Kohlenstoff und Nährstoffen
 - Verzögerung des Wasserabflusses
 - chemische und mikrobielle Umsetzung
- *Boden als Lebensraum:*
 - Für Pflanzen: Verankerung, Wasser- und Nährstoffversorgung
 - Für Tiere: Wohnraum, Nahrung...
 - Genpool /Biodiversität
- *Boden als Rohstofflieferant*
- *Boden als Siedlungsraum*
- *Boden als paläontologisches/archäologisches Archiv*



Böden sind ein wesentliches Element des **Standorts**:



Standort: Gesamtheit der an einem Wuchsort auf Pflanzen einwirkenden **Umweltbedingungen** - **abiotischen Faktoren**

Arbeitskreis Standortskartierung 1996; Englisch & Kilian 1998, Englisch et al. 2022

Was ist an **Waldböden** so besonders?

- Teil eines Ökosystems mit langen Entwicklungszeiträumen
- Seltene Störungen
- **Stoffkreisläufe** zwischen Biomasse und Boden spielen eine wichtige Rolle



Burgenländischer Forsttag, Neutal 2023

Beispiel: Jährlicher Streufall und darin gebundene Elementmengen in drei mitteleuropäischen Buchenbeständen

Biomasse	5000 kg ha ⁻¹ a ⁻¹
N	45-70 kg ha ⁻¹ a ⁻¹
P	3-4 kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Ca	30-80 kg ha ⁻¹ a ⁻¹
Mg	3-5 kg ha ⁻¹ a ⁻¹

(Daten gerundet, n. Bartsch & Röhrig)

Im Vergleich: jährliche Stickstoffdüngemengen für landwirtschaftliche Kulturen: 70 bis 150 kg ha⁻¹ a⁻¹

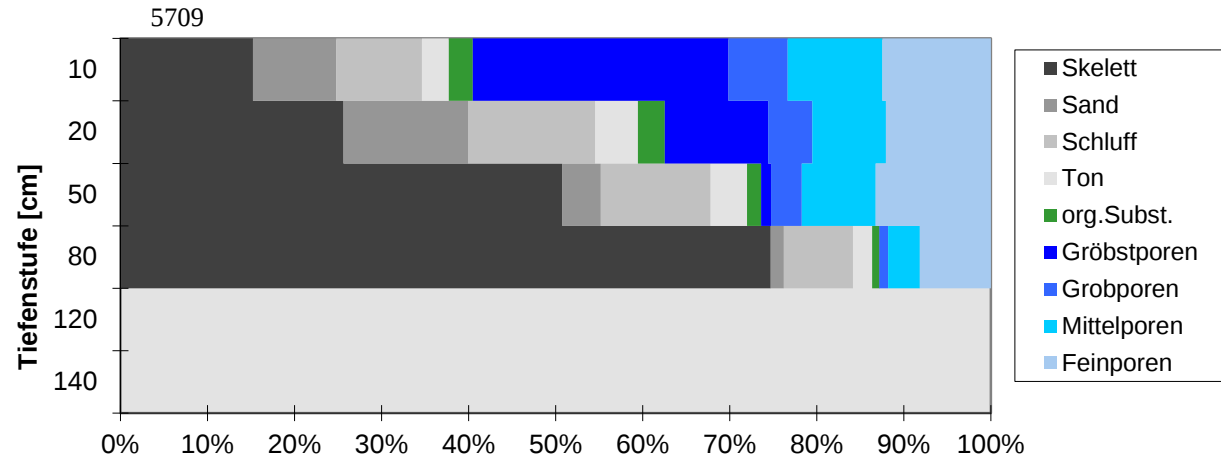
Was bring es wenn man auf Waldböden genauer hinsieht?



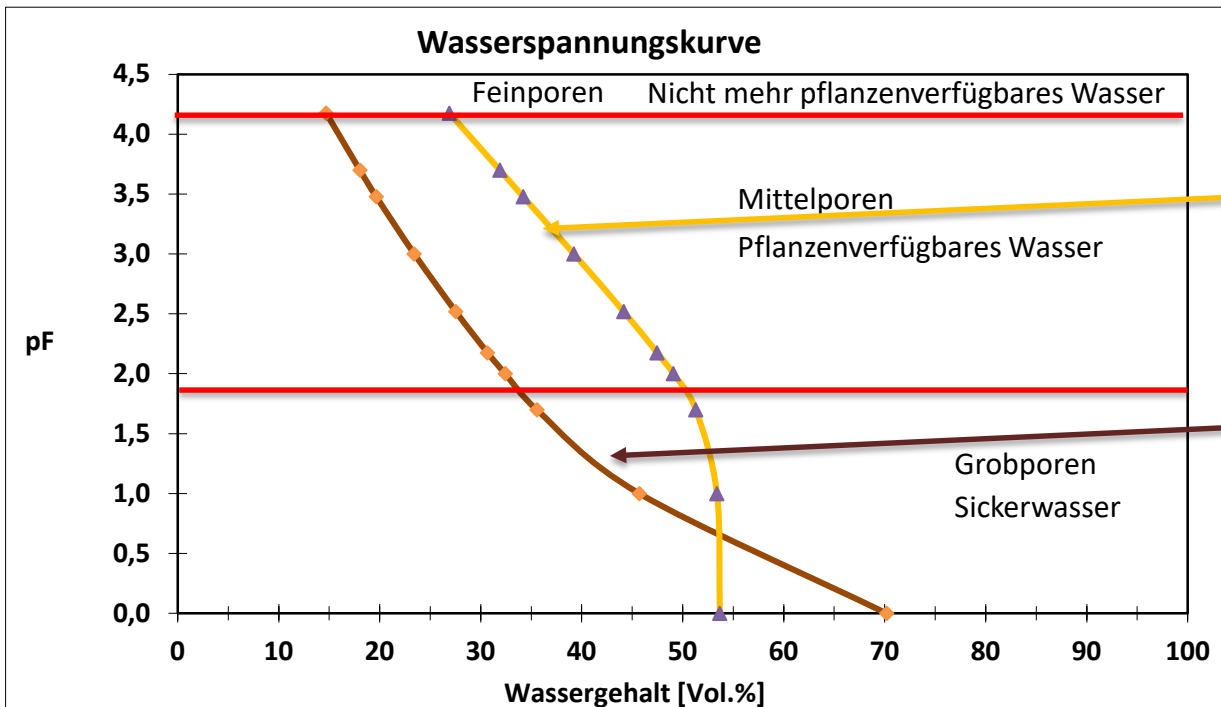
Pseudogley in Unterpullendorf

Lockersediment-Braunerde in Buchenmais

Was erkennen wir am Boden?



Pseudogley in Unterpullendorf



Der Unterboden ist dicht und speichert einen hohen Anteil des Wassers als ‚Totwasser‘

Der Oberboden ist grobporenreich
→ rasche Versickerung und hohe ‚Luftkapazität‘

z.B. Information über den **Bodenwasserspeicher**

Feldkapazität (FK): Wassermenge, die der Boden gegen die Schwerkraft halten kann

Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt (PWP): Wasser wird durch Oberflächenkräfte so fest gebunden dass es von der Pflanzenwurzel nicht mehr aufgenommen wird („Totwasser“)

nutzbare Feldkapazität (nFK): $FK - PWP \rightarrow$ Damit muss ein Bestand in Trockenphasen das Auslangen finden



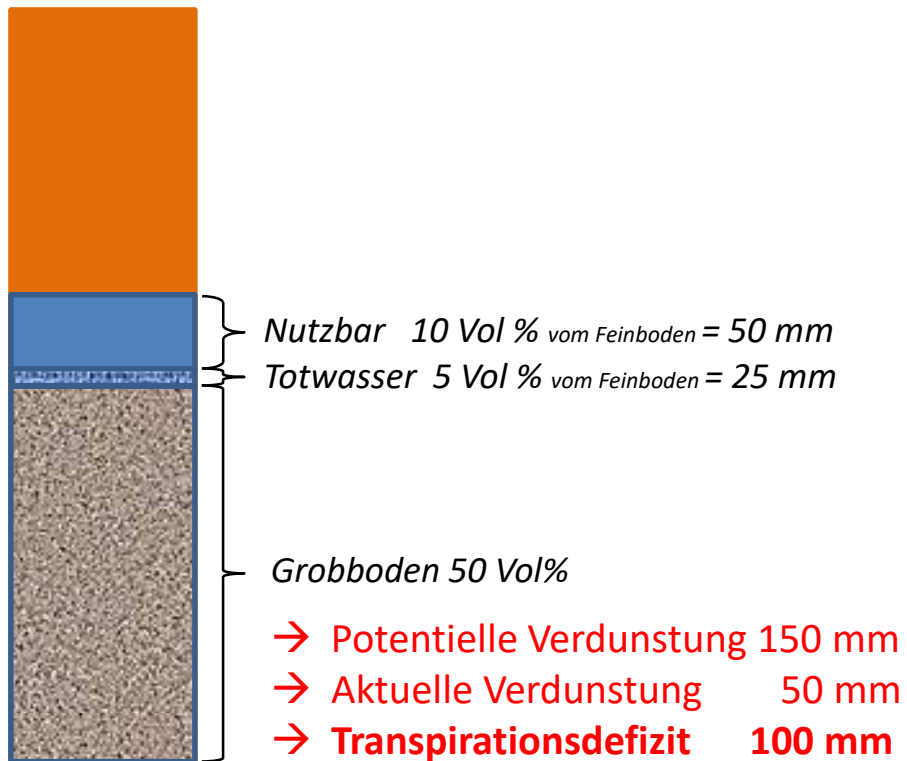
Die nutzbare Feldkapazität (pflanzenverfügbare Wasserspeicherkapazität) eines Bodenprofils hängt von folgenden Faktoren ab:

- Gründigkeit
- Grobbodenanteil (Steine speichern kein Wasser)
- & Bodenart Bodenstruktur/Lagerungsdichte
- Humusgehalt

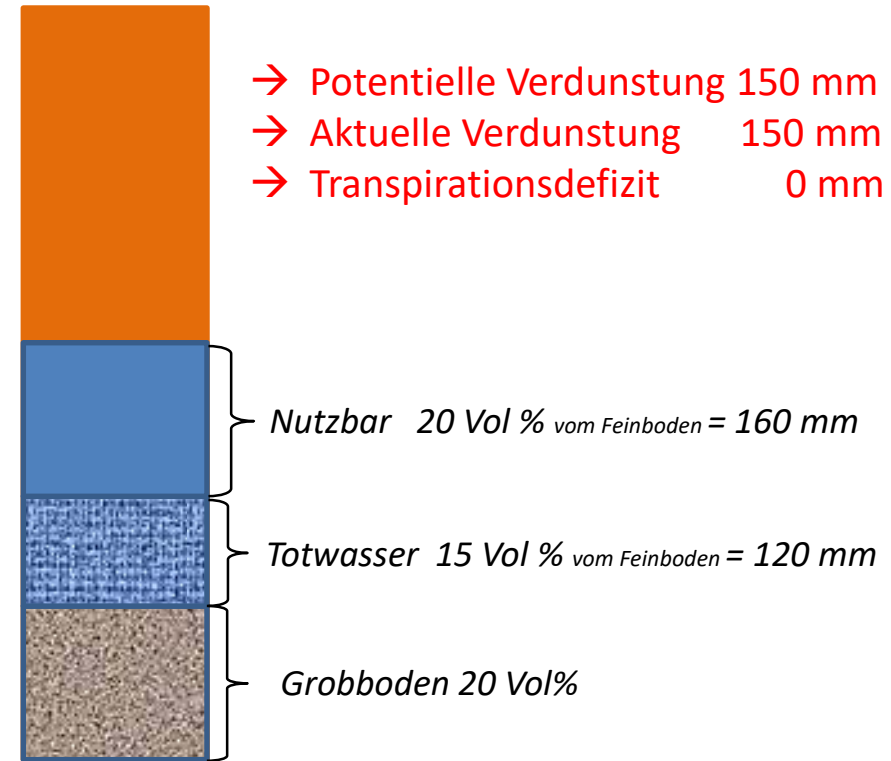
z.B. Information über den **Bodenwasserspeicher**

Wie viele Tage kommt ein Waldbestand in einer **Trockenperiode von 30 Tagen** mit einem **„vollen“ Bodenwasserspeicher** aus?
Annahme potentielle Verdunstung 5 mm / Tag

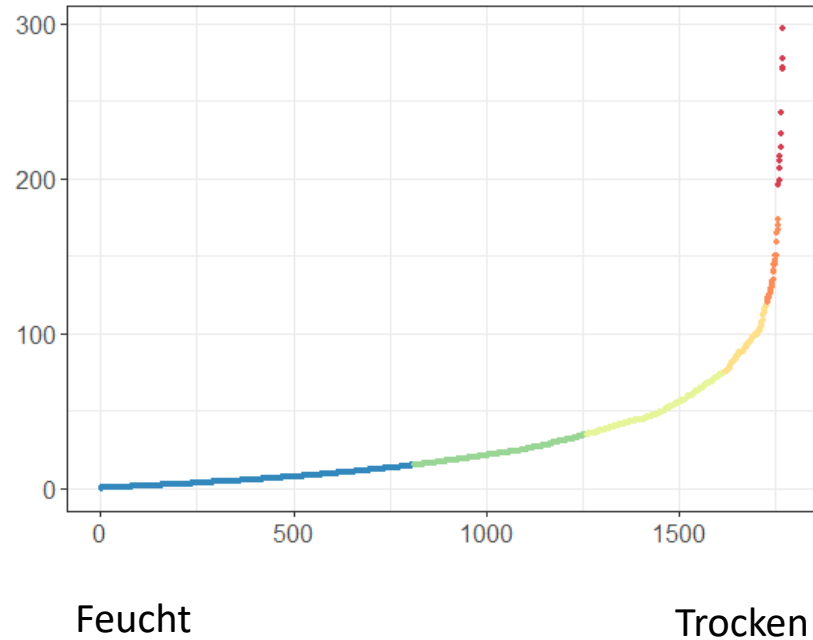
Profil 1: Gründigkeit 1 m, 50 % Grobboden
Sand, (FK 15 %, WP 5 %, nFK 10 %)



Profil 2: Gründigkeit 1 m, 20 % Grobboden
Lehm, (FK 35 %, WP 15 %, nFK 20 %)

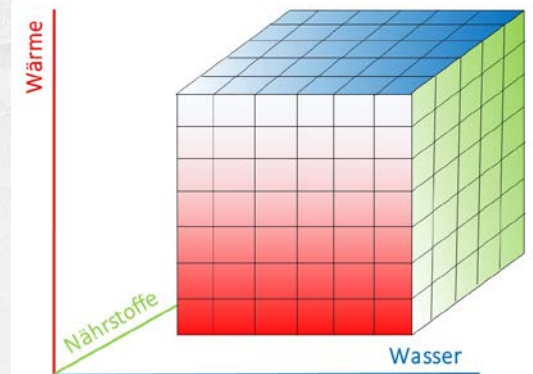
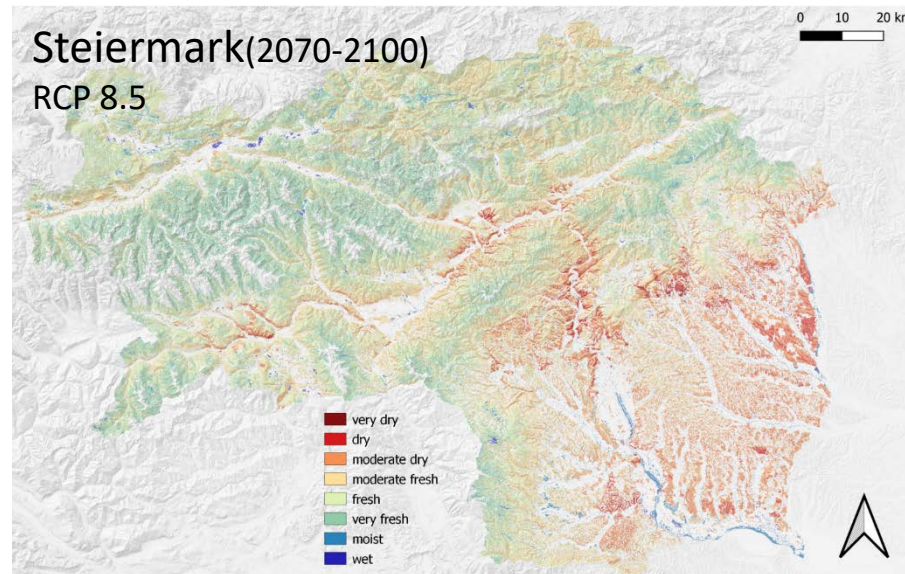
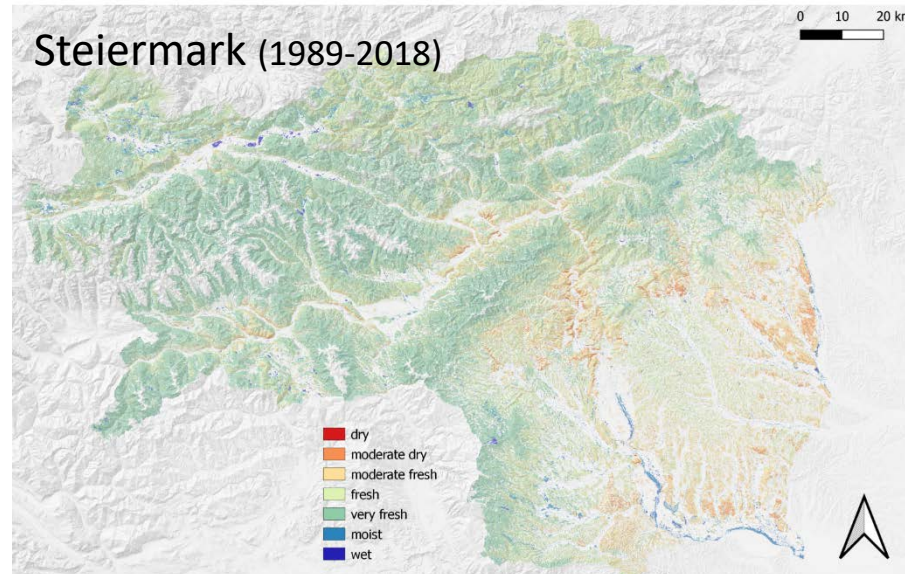


Die Wasserhaushaltsachse – Einstufung auf Basis des Transpirationsdefizits



*4° C wärmer bedeutet höhere Verdunstung
Wenn der Boden ausgetrocknet ist, können die
Pflanzen nicht mehr ausreichend transpirieren
und stehen unter Trockenstress*

Basis für Abschätzung der Baumarteneignung



Kann man Bodeneigenschaften über Bewirtschaftung verändern?



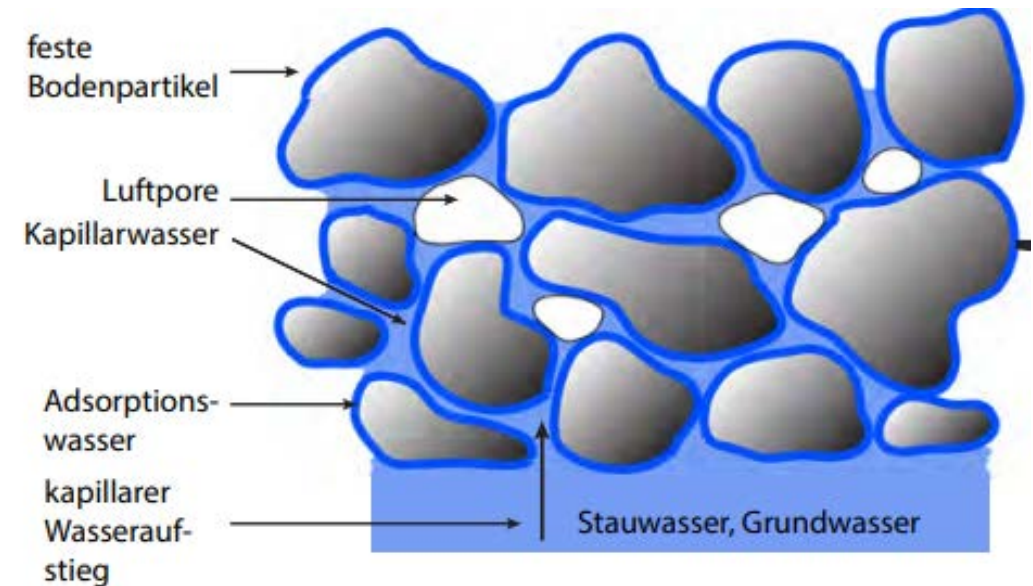
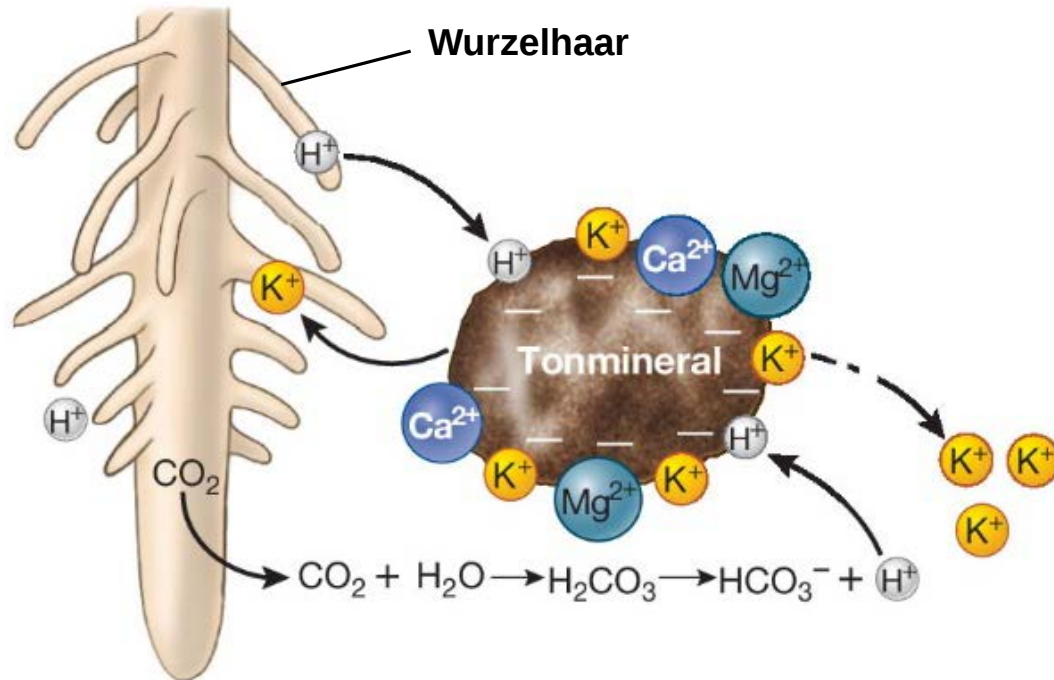
Der durchwurzelbare **Porenraum** im Boden bestimmt die Versorgung der Waldbäume

Bereitstellung

von verfügbaren **Pflanzennährstoffen**

und

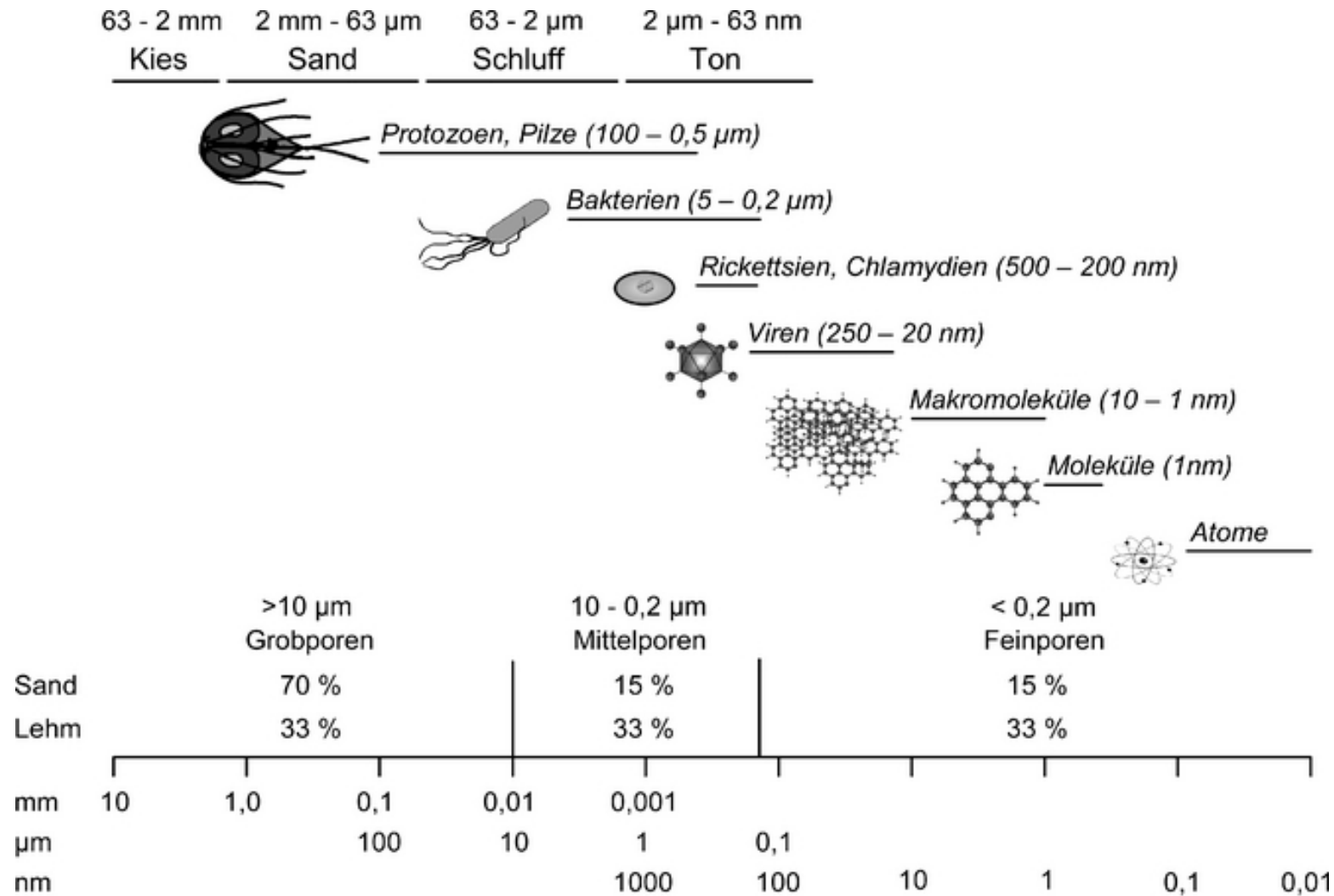
verfügbarem **Wasser**



https://media.springernature.com/original/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-662-58172-8_35/MediaObjects/154381_10_De_35_Fig6_HTML.png

<https://www.natur-erforschen.net/wp-content/uploads/2017/11/Niederschlag-Bodenwasser-1a.jpg>

Das Bodenleben spielt sich in den Grob- und Mittelporen ab



Wurzelhaare > 5 µm
Pilzhypen: 2 – 100 µm

Aus: Scheffer/Schachtschabel: *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl. © Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2010

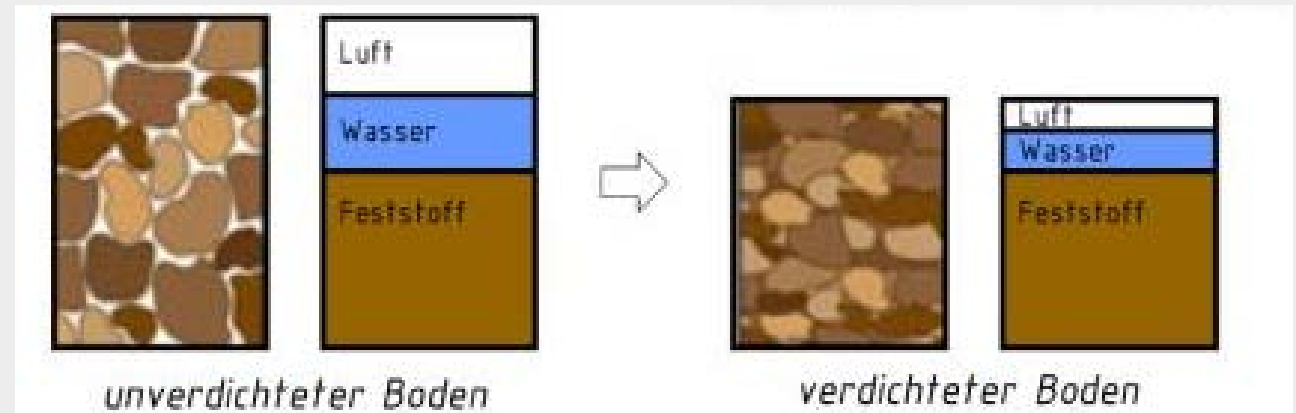
Makroporen sind biologisch-chemische Hotspots



- Versickerung
- Gasaustausch
- **Biologisch - chemische Hotspots**
→ Bodenleben und Wurzelentwicklung

Bei Verdichtung

„geht dem Boden die Luft aus“,



auch die Menge an speicherbarem Wasser wird weniger!

Durchlüftungsprobleme



Mangankonkretionen

Die kleinen dunkelvioletten bis schwarzen Flecken kennzeichnen die schwächste Stufe der Vernässung.



Marmorierungen/Fahl-Rot-Färbungen

Marmorierungen/Fahl-Rot-Färbungen entstehen bei einem kleinräumigen Wechsel von gebleichten und rostfarbigen Zonen, bedingt durch örtliche Verdichtungen.



Reduktionsfarben

Die blaugrauen Reduktionsfarben entstehen dort, wo ein Bereich des Bodens ständig wassergesättigte Poren aufweist.



Burgenländischer Forsttag, Neutal 2023

WSL Merkbl. Prax. 45 (2019)

Was ist das Problem bei Anaerobie?

→ Energieversorgung der Wurzeln – universelle Energiewährung ist ATP

- Im Normalbetrieb durch Zellatmung
- Assimilate aus Photosynthese werden zum Verbrauchsort transportiert und mit O₂ von außen verbrannt



Energieausbeute:
24 - 36 Mol ATP pro Mol Glukose

- Bei Luftmangel umschalten auf Gärung (Glykolyse)
(zuerst Milchsäure- dann alkoholisch Gärung)
- Ethanol und CO₂ als Stoffwechselprodukte



Energieausbeute:
2 - 3 Mol ATP pro Mol Glukose

Es kommt zur **Hemmung zahlreicher Energie verbrauchender Prozesse:**

z.B. Aufnahme von N-Verbindungen, Synthese von Saccharose, Proteinen, Lipiden, Stopp des Wurzelwachstums,
Abbau von Proteinen → **Organschäden / Absterben**

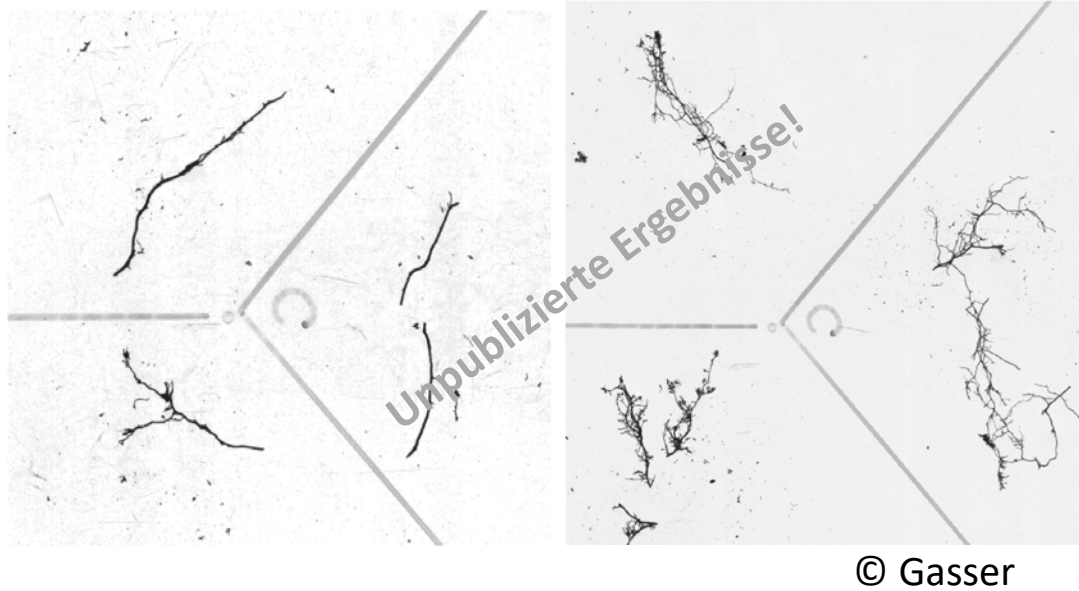
Bei Wiederbelüftung des Bodens kann es zu „post-anoxischen Schock“ kommen mit massiven Schäden durch Sauerstoffradikale

Was ist das Problem bei Anaerobie?

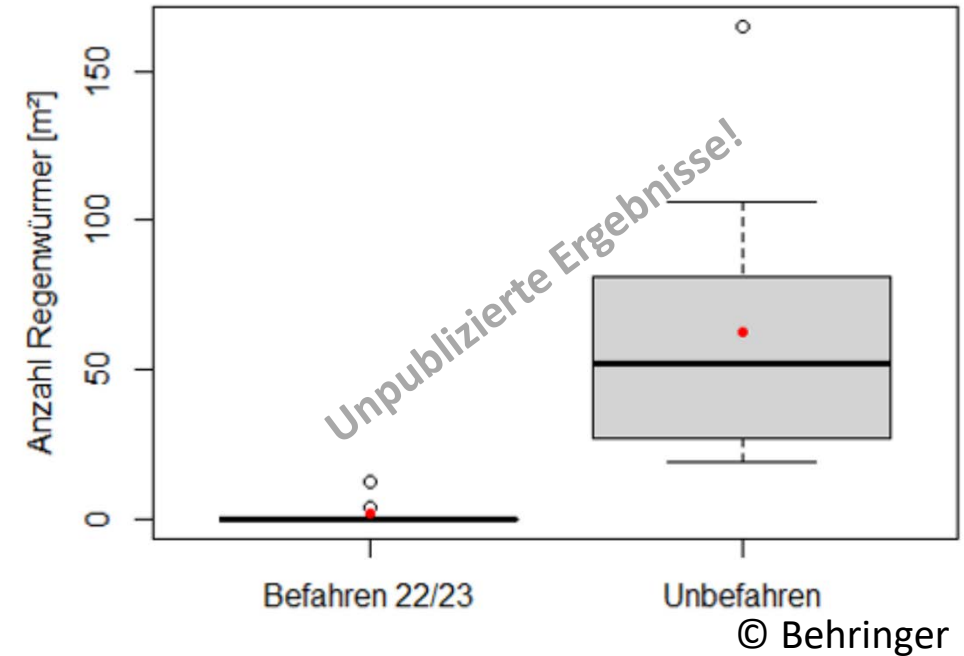


Windwurfteiler von Buche (li) und Eiche (re) auf einem Pseudogley im Wienerwald:
Die Eiche (Durchwurzelung 1 m Bodentiefe) vermag den Staukörper zu erschließen, die Buche (Durchwurzelung 40 cm Bodentiefe) nicht

Was ist das Problem bei Anaerobie?



Wurzelmorphologie von Buche in einer Schlepperspur (li)
Und im unbefahrenen Bereich (re)



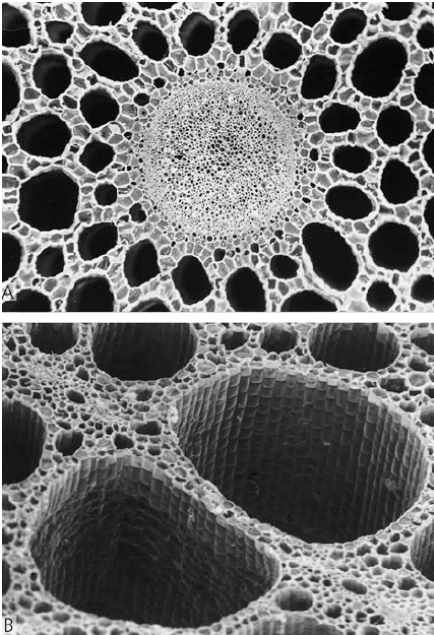
Lumbrizidendichte in einer Schlepperspur (li)
und im unbefahrenen Bereich (re)

Wie gehen Bäume mit Sauerstoffmangel (Anaerobie) um?

Schwarzerle - *Alnus glutinosa*

- Aufgerissene Borke mit **Lentizellen** an Stamm und Wurzelhals plus **Adventivwurzeln**
- O₂ Versorgung bis in Wurzelspitzen über **Aerenchyme**

Alnus glutinosa - Borke



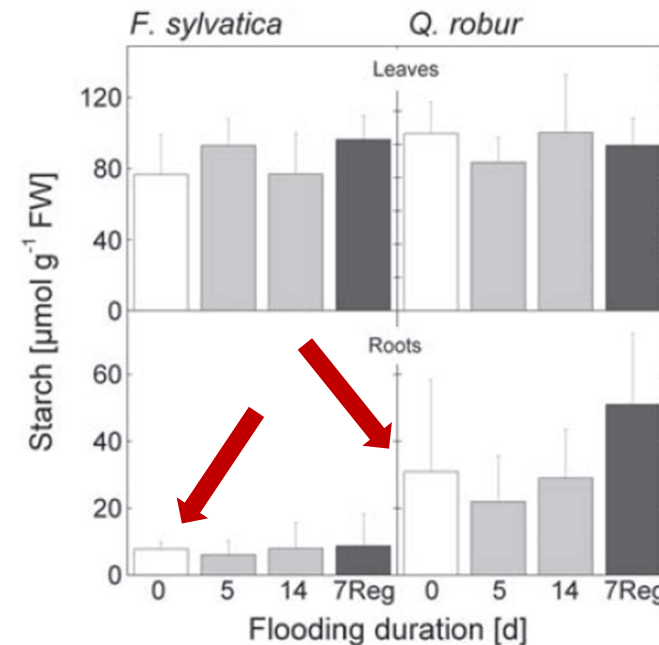
Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften S79



Stieleiche - *Quercus robur*

- Aufgerissene Borke mit **Lentizellen** und Fähigkeit der **Adventivwurzelbildung**
- **Stärkeeinlagerung in den Wurzeln** zur Aufrechterhaltung der Glykolyse

Quercus robur - Borke



Ferner et al. (2012)

Überschwemmungstoleranz mitteleuropäischer Baumarten

Flooding tolerance classes

1 Very low

Fagus sylvatica
Picea abies
Acer pseudoplatanus
Abies alba
Tilia platyphyllos
Prunus avium
Larix decidua
Ilex aquifolium
Quercus petraea
Quercus pubescens
Juniperus communis
Crataegus laevigata
Prunus mahaleb
Amelanchier ovalis



2 Low

Acer platanoides
Carpinus betulus
Viburnum lantana
Corylus avellana
Robinia pseudoacacia
Castanea sativa
Berberis vulgaris
Crataegus monogyna
Prunus spinosa
Tilia cordata
Ulmus glabra
Juglans regia
Aesculus hippocastanum
Malus sylvestris
Pinus sylvestris
Taxus baccata
Sorbus aria
Sambucus nigra
Betula pendula

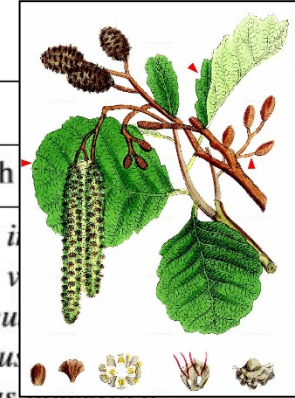
3 Intermediate

Acer campestre
Ulmus minor
Lonicera xylosteum
Ligustrum vulgare
Rhamnus cathartica
Cornus sanguinea
Hippocrepis emerus
Fraxinus excelsior
Quercus robur
Viburnum opulus
Populus alba
Populus tremula
Sorbus aucuparia



4 High

Alnus incana
Alnus viridis
Fraxinus excelsior
Populus nigra
Prunus domestica
Prunus padus
Salix purpurea
Salix appendiculata
Salix caprea



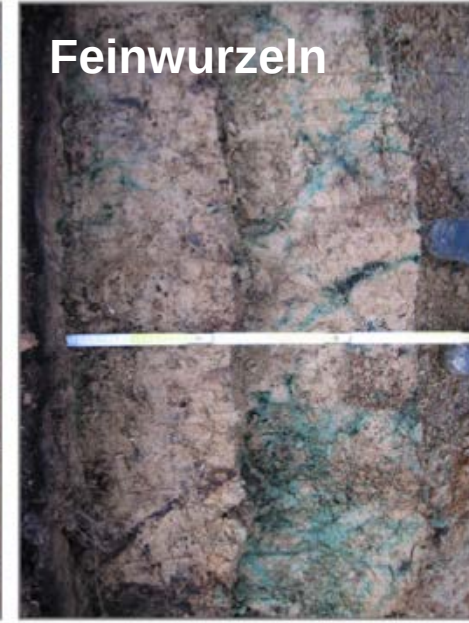
5 Very high

Alnus glutinosa
Salix cinerea
Salix triandra
Salix viminalis
Salix elaeagnos
Salix daphnoides
Salix m. nigricans
Salix alba
Salix fragilis
Salix pentandra



Glenz et al., 2006

Makroporen – ein effizientes Drainagesystem



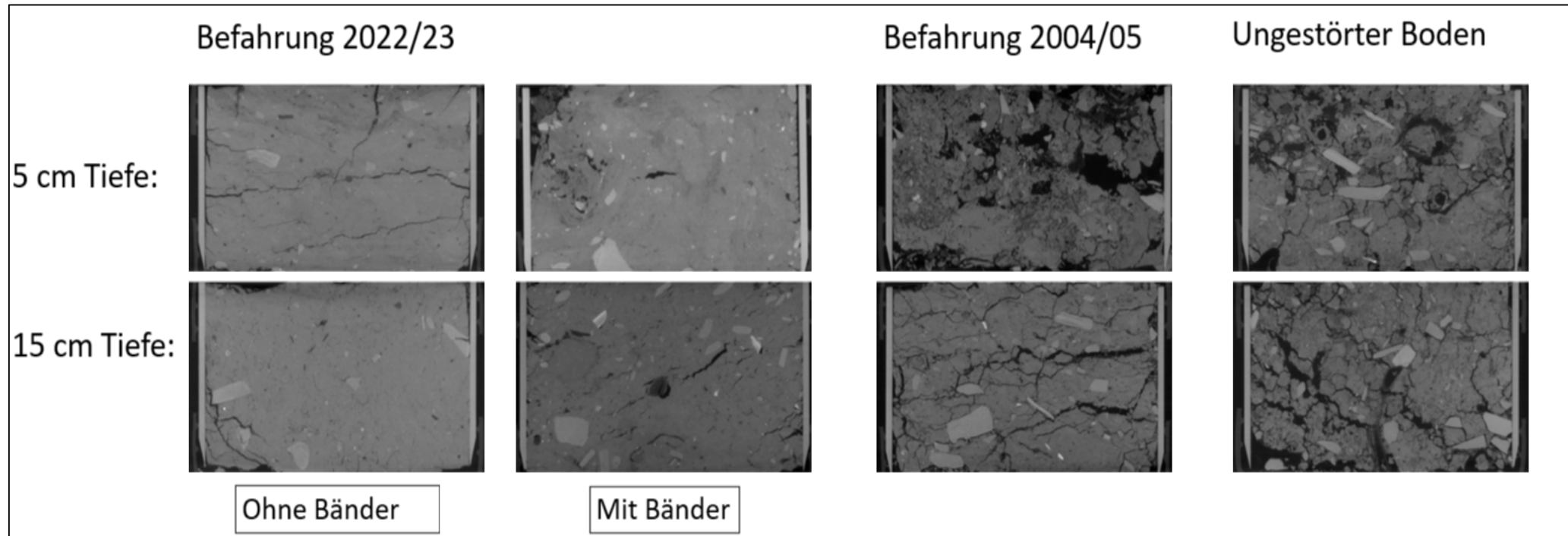
[Zurück zu Porengößen](#)

Schwärzel, K., Ebermann, S. and Schalling N.(2012): Evidence of double-funneling effect of beech-trees by visualization of flow pathways using dye tracer. Journal of Hydrology, 470-471, 184-192.

Biogene Tätigkeit und **tiefreichende, intensive Durchwurzelung** erhöhen die **Infiltrationsrate** sowie die **Aufnahmekapazität** des Bodens.



Befahren zerstört Makroporen und die Porenkonnektivität



© Behringer

Beregnungsversuche von Harvestergassen im Flyschwienerwald zeigen Abflussbeiwerte von über 50% während Der Abfluss in Seilgassen und unbefahrenen Kontrollflächen gleich Null war!

Rasch abfließendes Oberflächenwasser steht dem Bestand in Trockenperioden nicht mehr zur Verfügung!

Bodenverdichtung kann mittelfristig die Produktivität von Waldböden beeinträchtigen

Ertragsrückgang durch Bodenverdichtung zu erwarten

Mehrere Untersuchungen aus den Jahren 1970 bis 1990 in Douglasien- und Pinus Ponderosa-Beständen belegen, dass Zuwachsverluste je nach Verdichtungsgrad von 13 bis 69 % des Volumszuwachses zu erwarten sind, wenn mehr als 10 % des Durchwurzelungsbereiches Verdichtungseffekte aufweisen (MARGANNE, M.A., 1997).

Besonders beachtenswert ist, dass bei allen publizierten Untersuchungen bereits ab einer geringfügigen Verdichtung des Bodens - Zunahme der Bodendichte um ca. 10 % - ein signifikanter Rückgang des Zuwachses feststellbar war. Es ist anzunehmen, dass unsere flach wurzelnde Hauptbaumart Fichte ähnlich reagiert. Untersuchungen zum Zusammenhang Bodenverdichtung/Zuwachs an mitteleuropäischen Hauptbaumarten bzw. Untersuchungen jüngerer Datums fehlen.

<https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/forsttechnik-und-holzernte/bodenschutz/bodenverdichtung-ertragseinbussen>

Massnahmen zur Vermeidung von **Bodenschäden**

Siehe Vortrag Nemestothy!

Planung und Ausführung

- Feinerschliessung in Schuss halten und dokumentieren
- Räumliche Ordnung einhalten
- Befahren in trockenem oder gefrorenem Zustand
- Klare Abbruchkriterien definieren
- Fahrbereich mit Reisigmatten polstern
- Bodenschutzvorgaben schriftlich festhalten
- Pönale für Schäden vereinbaren
- Wo möglich auf Seilrückung setzen

Maschinentechnik

- Last verringern
- Ausgeglichene Lastverteilung
- Kontaktfläche vergrößern
- Schlupf minimieren



Verdichtung vermeiden hat Priorität, aber man kann mit Hilfe von Pflanzen den Boden eventuell rascher regenerieren

Annals of Forest Science (2017) 74: 73
<https://doi.org/10.1007/s13595-017-0672-8>



ORIGINAL PAPER

Initial recovery of compacted soil—planting and technical treatments decrease CO₂ concentrations in soil and promote root growth

Juan Luis Flores Fernández¹ • Peter Hartmann¹ • Jürgen Schäffer² • Heike Puhmann¹ • Klaus von Wilpert¹

Pflanzung von **Erle**, Faulbaum und Weide in Kombination mit Mulchen und Kalkung verbesserte das Wurzelwachstum

Siehe auch [Aktive Regeneration von Bodenschäden \(waldwissen.net\)](https://www.waldwissen.net)

Welche Behandlung eignet sich am besten?

Beide Erlenarten (*Alnus incana* und *Alnus glutinosa*) haben sich als am anpassungsfähigsten erwiesen. Hohe Überlebensraten sowie gutes Wachstum belegen deren Eignung für die Pflanzung auf stark verdichteten Böden. Durch die Kombination der Pflanzung wurzelaktiver Baumarten mit unterschiedlichen technischen Verfahren wie Mulchen und Kalkung wurden Verbesserungen der Belüftungssituation, der Durchwurzelbarkeit und auch der Bodenstruktur erwirkt. Allerdings sind die Wirkungen bisher auf den Oberboden beschränkt. Die Untersuchungen müssen noch längerfristig

Warum **Waldböden** auch im Hinblick auf **Biomassenutzung** sorgfältig bewirtschaftet werden sollten: Intensive Biomasseentzüge führen zu **Nährstoffverarmung** und **Bodenversauerung**



Burgenländischer Forsttag, Neutal 2023

Intensive Biomasseentzüge führen zu **Nährstoffverarmung** und **Bodenversauerung**

Nährstoffgehalte von Derbholz Fichte i.R. und Schlagabraum

Nährstoffgehalt [kg] 1 t Holz i.R.

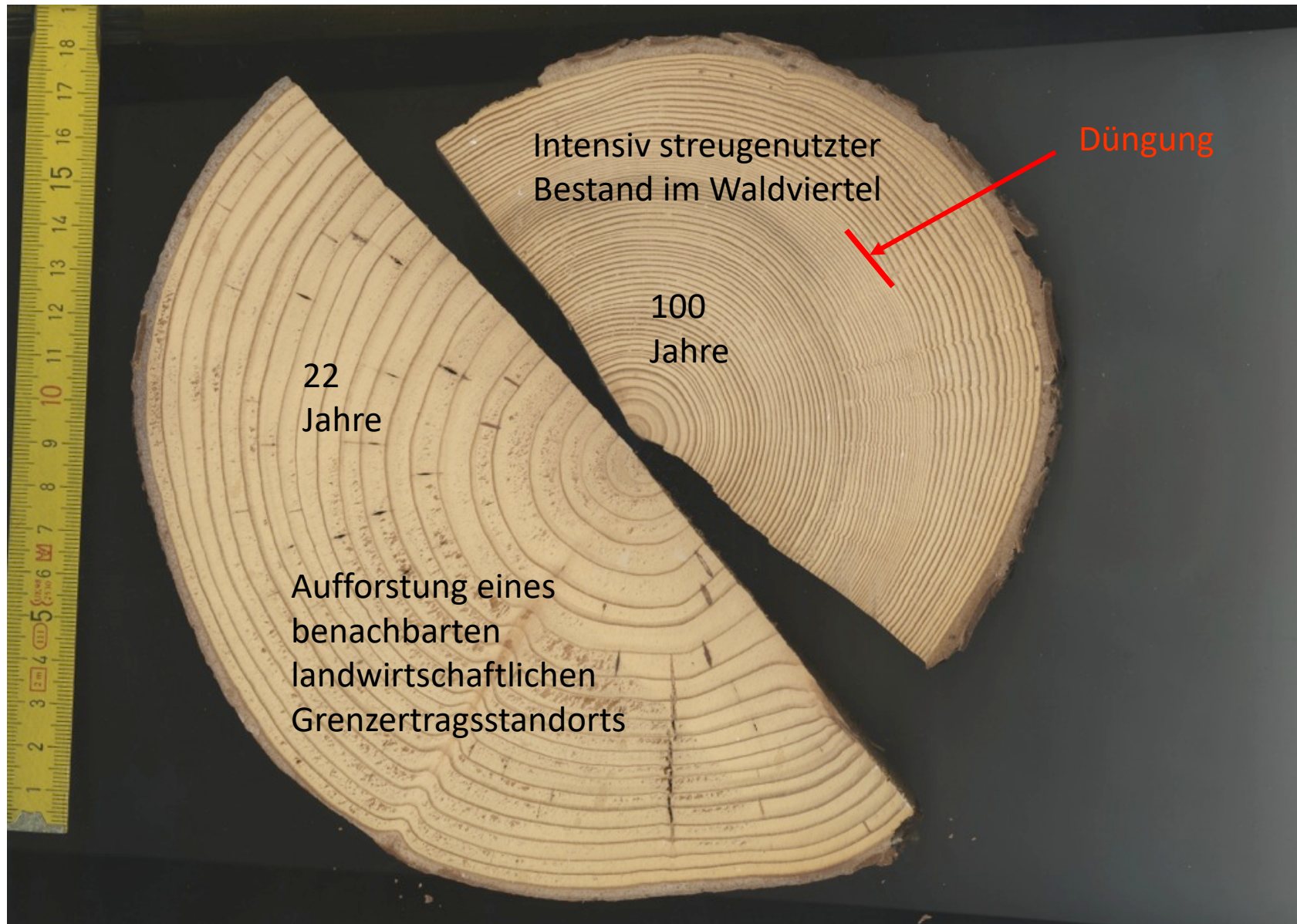
N 0.7
P 0.2
K 0.7
Ca 2.0
Mg 0.3

Nährstoffgehalt [kg] 1 t Reisig mit Nadeln

N 6.5
P 0.9
K 3.8
Ca 6.5
Mg 1.1

Restbiomasse enthält wesentlich mehr Nährstoffe als Derbholz (auch i.R.)

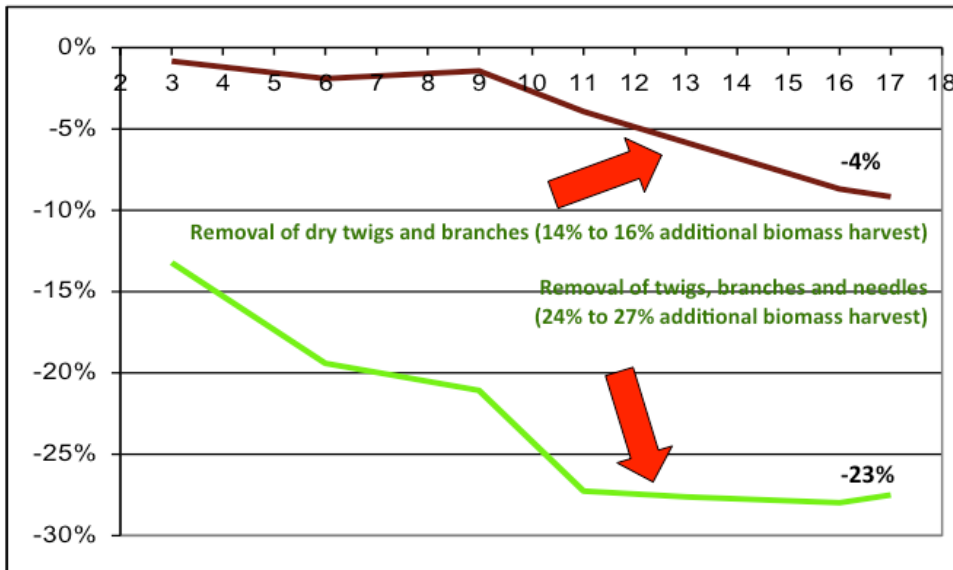
Intensive Biomasseentzüge führen zu **Nährstoffverarmung** und **Bodenversauerung** und **Produktivitätsrückgang**



Intensive Biomasseentzüge führen zu **Nährstoffverarmung** und **Bodenversauerung** und beeinträchtigen die **Produktivität**



Zuwachsverlust nach 10 bis 20 Jahren bei Vollbaumnutzung Fichte **8-13%**, bei Kiefer **5-8%** verglichen zu Nutzung Stammholz in Rinde



Österreich: bei Stammzahlreduktion fanden (Sterba et al. 2003) sogar **23 % Zuwachsverlust bei Nutzung der Restbiomasse** im Vergleich zu Flächen wo Restbiomasse belassen wurde

Bei Beachtung der **Bodenverhältnisse** können langfristige negative Effekte durch **Biomassenutzung** minimiert werden

Nährstoffbilanzen

ein Entscheidungswerkzeug für die Nutzungsplanung?

Nährstoffnachhaltigkeit

$$\Delta \text{ Nährstoffkapital (basische Kationen, Phosphor)} =$$
$$\begin{aligned} & \text{Eintrag aus der Atmosphäre} \\ & + \text{Freisetzung aus Mineralverwitterung} \\ & + \text{Düngung} \\ & - \text{Austrag mit dem Sickerwasser} \\ & - \text{Austrag durch Ernte} \end{aligned}$$
$$\geq 0$$

Berechnung der Nachhaltigkeit der Nutzung im Baumverfahren für die Punkte der Österreichischen Waldinventur basierend auf Verhältnis Nährstoffentzug über die Umtriebszeit zu verfügbaren Vorräten von N, P, K, Ca & Mg (*Englisch and Reiter 2009*):

nachhaltig: 49 %

problematisch: 27 %

nicht nachhaltig: 24 %

Katzensteiner K., Englisch M. and Nemestothy K. 2013: Impacts of increased biomass utilization on soil sustainability in Austria. In: Helmisaari, H-S. & Vanguelova, E. (Eds.): Proceedings of the Workshop W6.1 Forest bioenergy and soil sustainability at EUROSOL Congress 2nd July to 6th July 2012, Bari, Italy, 72 p. www.oecd.org/tad/crp/forest-bioenergy-soil-sustainability_proceedings.pdf

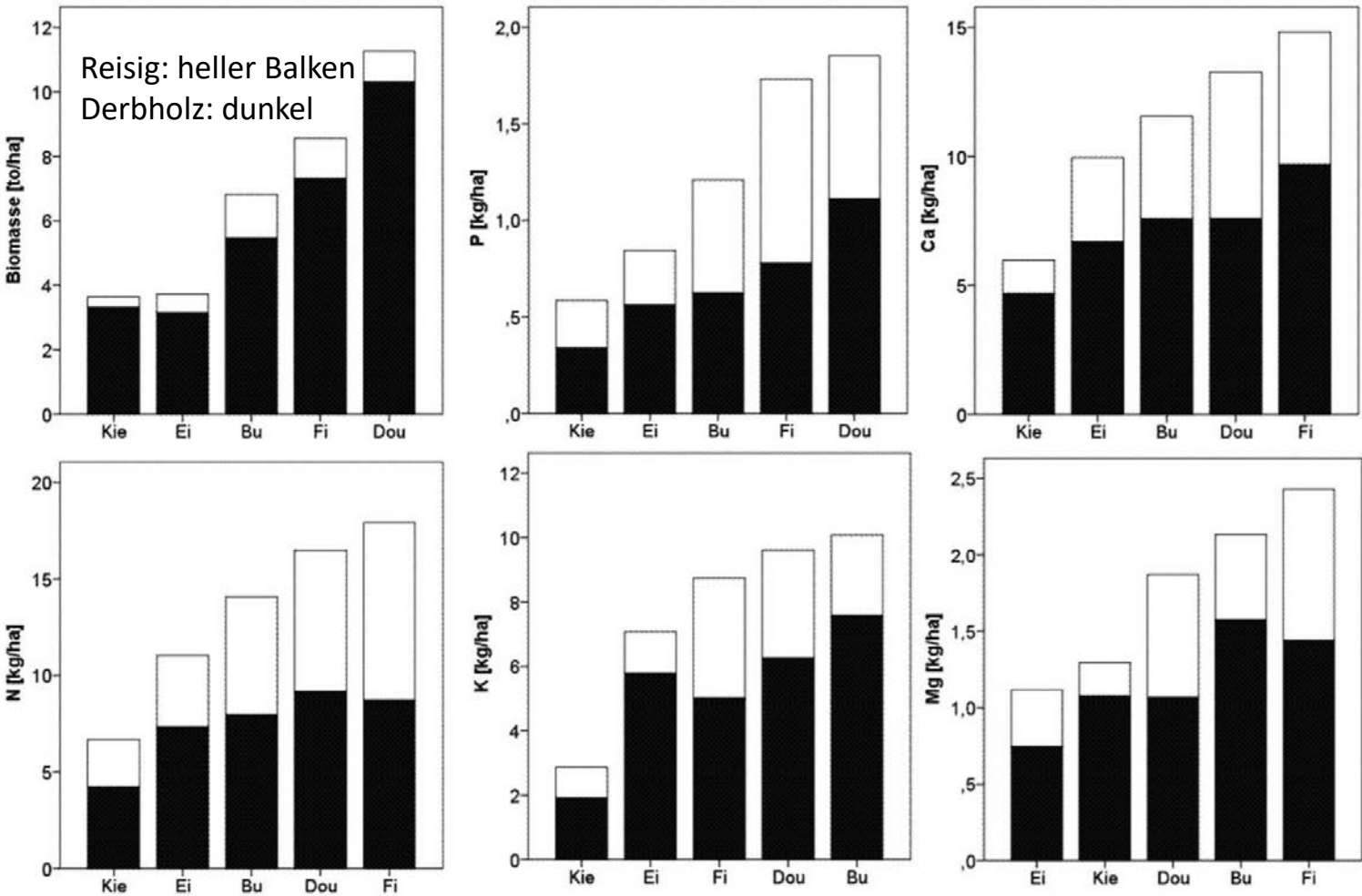
Die Datenbasis für Nährstoffentzugsberechnungen durch **Biomassenutzung** wird laufend besser!

Nährstoffentzüge durch die Holz- und Biomassenutzung in Wäldern. Teil 1: Schätzfunktionen für Biomasse und Nährelemente und ihre Anwendung in Szenariorechnungen

(Mit 8 Abbildungen und 6 Tabellen)

HANS PRETZSCH¹⁾, JOACHIM BLOCK³⁾, JOCHEN DIELER¹⁾, JÜRGEN GAUER⁴⁾,
AXEL GÖTTLEIN²⁾, RALF MOSHAMMER^{1),5)}, JULIUS SCHUCK³⁾, WENDELIN WEIS²⁾ und UWE WUNN³⁾

(Angenommen Mai 2013)



Pretzsch et al. 2014: Baumarteneffekt auf potentielle Nährstoffentzüge über die Umtriebszeit für eine Substratklasse

Eine forstliche Standortskartierung/Waldtypisierung kann/soll auch ohne komplexe Modellierung **Entscheidungshilfe für Biomassenutzung** bieten

Waldtypisierung Tirol

Biomasse & Befahrbarkeit

1: geringe Auswirkung	2: mittlere negative Auswirkung	3: starke negative Auswirkung
-----------------------	---------------------------------	-------------------------------

Mit Unterstützung von Bund, Land und
Europäischer Union



Herausgegeben vom
Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Forstplanung
Innsbruck, 2019

1.4 Eignung zur Biomassenutzung in Abhängigkeit von Standortmerkmalen

Je nach Ausprägung kann bereits ein Merkmal für die Zuordnung in die jeweilige Klasse ausschlaggebend sein.			
Klasse	1	2	3
Bezeichnung	Geringe Auswirkung	Mittlere negative Auswirkung	Starke negative Auswirkung
Empfehlung	Ganzbaumnutzung vertretbar	Modifiziertes Baumverfahren mit Abzopfung und Teilentastung am Schlagort vertretbar	Nur Sortimenstverfahren vertretbar
Merkmal	1	2	3
Bodentyp	Reiche carbonathaltige Braunerden, Kalkbraunlehm, Auböden, Kolluviole	Semiposdol, arme Braunerde, Kalklehm-Rendzina	Rohboden, Rendzina, Ranker, Podsole
Substratgruppe	M, M+, C, C+, B, , B+, K+	K, I, M-, D	K-, D-, C-, S+, I-/B-
Gründigkeit	Mittel – tiefgründig	Flach – mittelgründig	Flachgründig
Skelett	< 40%	> 40%	> 70%
Relief	Mittelhänge, Unterhänge, Gewinnlagen	Oberhang, Verlustlagen	Kuppe, Rücken, Steilhang
Wasserhaushalt	Frisch, sehr frisch, feucht	Mäßig frisch	Sehr trocken, trocken, mäßig trocken
Hangneigung	-----	-----	> 70%

