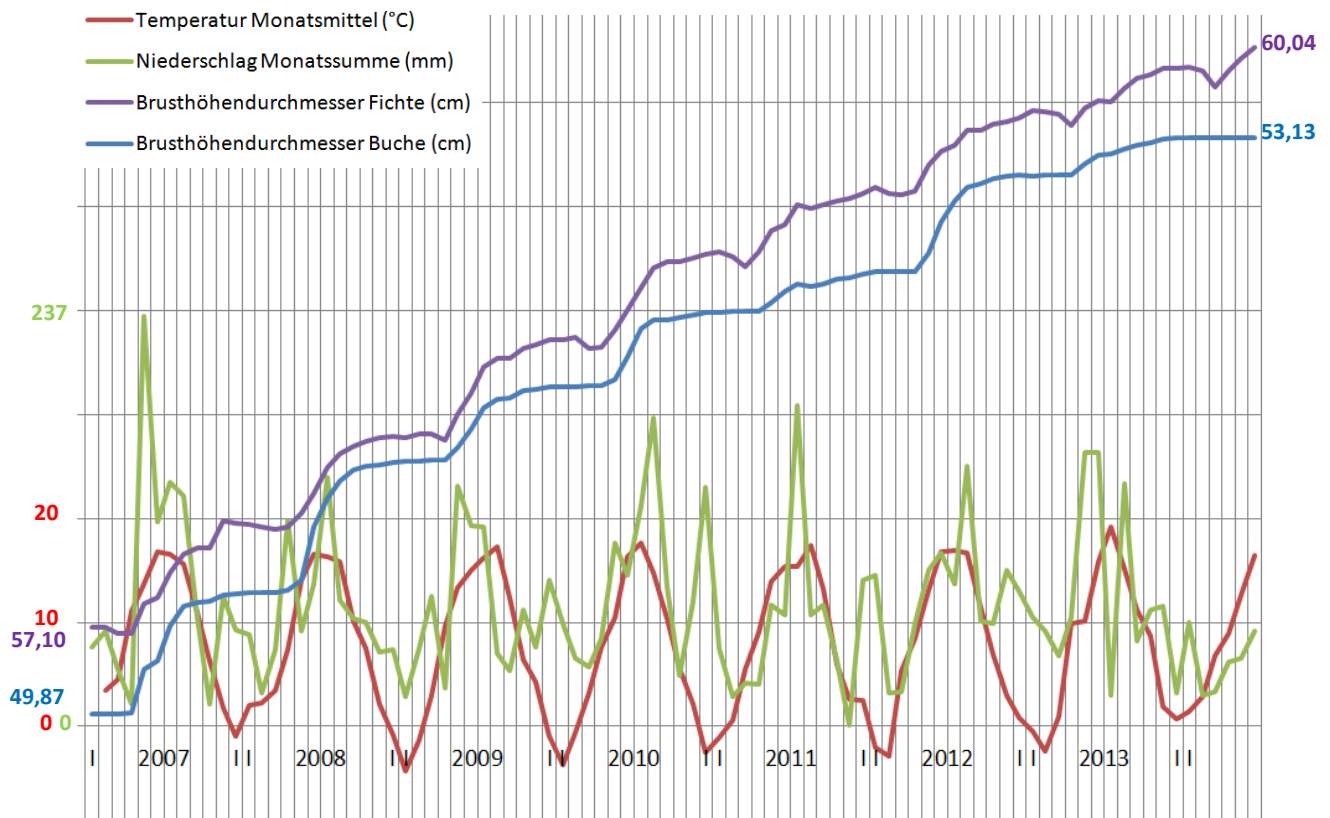


## Aufgabe 1

### Durchmesseränderungen von Baumstämmen in Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlag

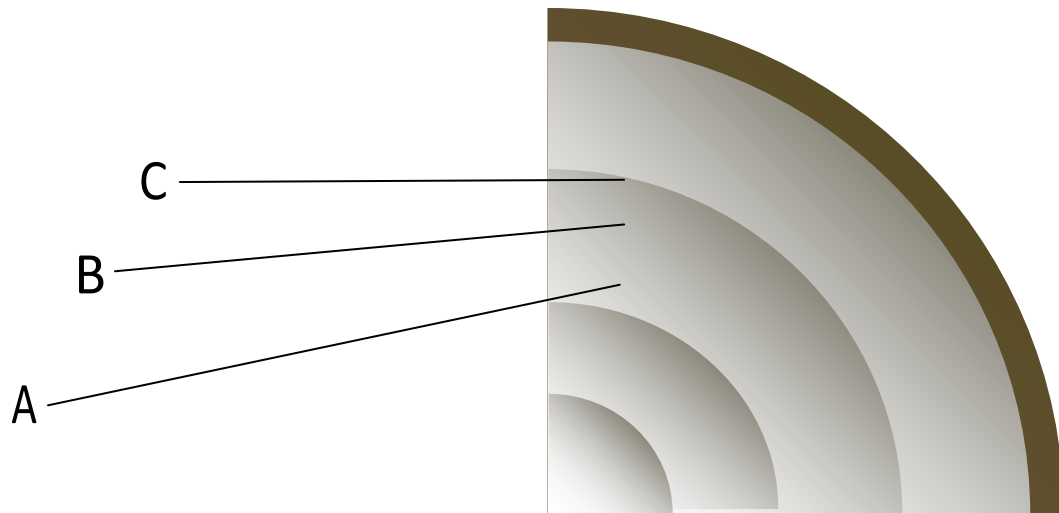


Dieses Diagramm aus der Waldklimastation Roggenburg zeigt den monatlich erfassten Durchmesser einer Fichte (Flachwurzler auf diesem Standort) und einer Buche (Herzwurzler). Außerdem sind die monatlichen Niederschlagsmengen und Durchschnittstemperaturen aufgeführt. Der Zeitraum umfasst 7,5 Jahre: Januar 2007 bis Juni 2014.

Zusatzinformationen zur Lösung der Aufgaben:

- Die Wachstumsschicht des Baumes befindetet unter der Rinde. Der äußerste Jahrring ist somit stets der jüngste.
- Durchmesserabnahmen haben ihre Ursache darin, dass Holz schwindet, wenn ihm Wasser entzogen wird.

1. Erläutere den Jahresgang des Holzdickenwachstums anhand der Buchenkurve und der in folgender Abbildung gekennzeichneten Zonen!  
Welche Eigenschaften hat das jeweils gebildete Holz?



2. Erläutere, inwieweit aus dem Diagramm ersichtlich ist, dass die Jahrringsbreite vom Temperatur- bzw. Niederschlagsangebot abhängt!
3. Erkläre, weshalb es im Winter bei der Fichte zu deutlichen Durchmesserabnahmen kommt, bei der Buche hingegen nicht!
4. Erkläre, warum im Diagramm nur die Fichte auch im Sommer manchmal einen Durchmesserrückgang zeigt!
5. Der Buche brach bei einem Gewittersturm im August 2013 die gesamte Krone ab. Erkläre die Reaktion des Buchenstammes auf dieses Ereignis!

## Lösungen:

- A. Im Frühjahr wächst das Holz sehr schnell in die Breite. Es ist hell und von geringer Dichte.

B. Nach einem fließenden Übergang im Sommer bildet sich bis weit in den Herbst hinein das langsam wachsende, dunkle, dichte Spätholz.

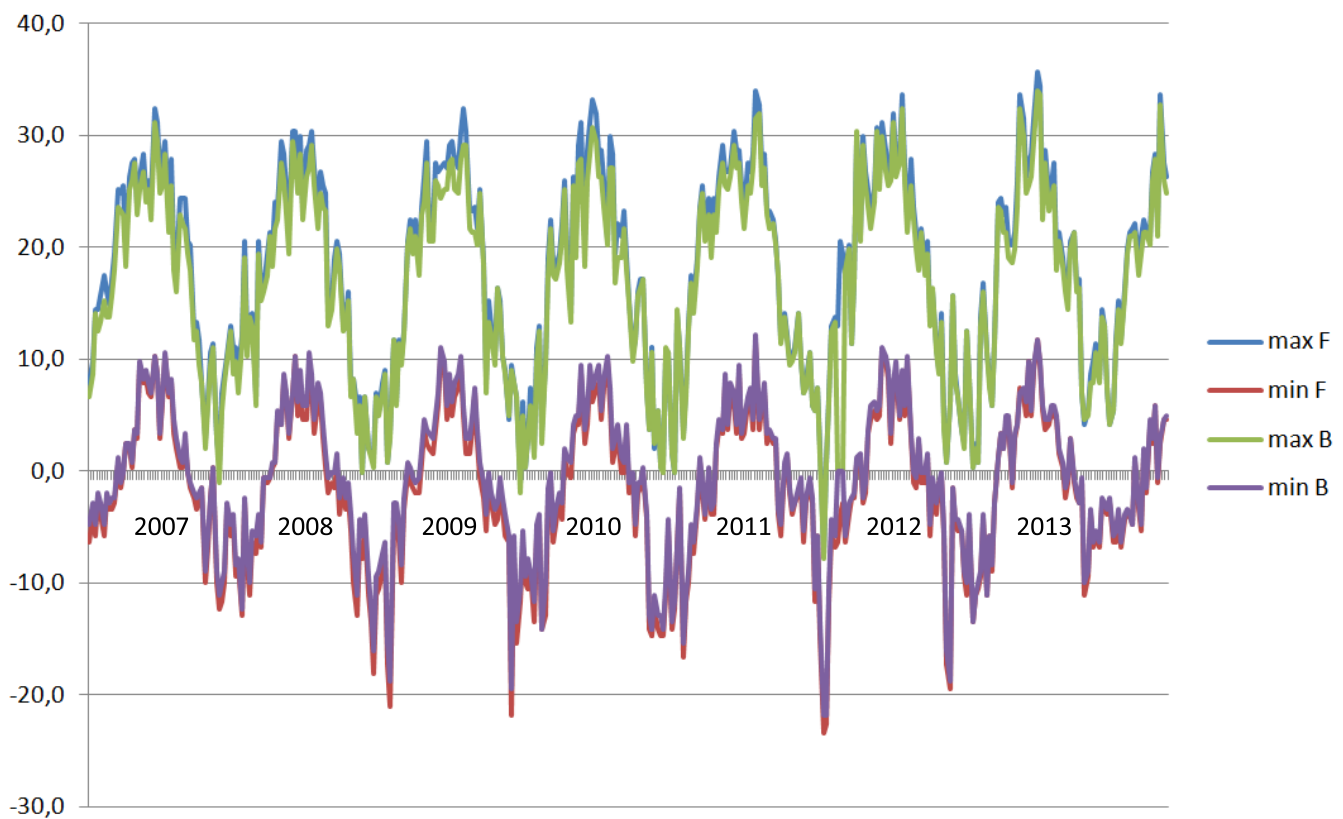
C. Während des Winters herrscht eine Wachstumspause, die sich in einer scharfen Grenze des Jahresrings zum folgenden Frühholz zeigt.
- Die Temperaturkurve ist sehr regelmäßig und ohne markante Abweichungen. Aus dem Diagramm lässt sich daher nicht schließen, wie der Durchmesserzuwachs auf mögliche Abweichungen reagieren würde.

Das Niederschlagsangebot ist unregelmäßiger verteilt. Hier scheint ein Zusammenhang ersichtlich. Die Wachstumsperiode 2007 war die niederschlagsreichste des dargestellten Zeitraumes und der Zuwachs zugleich der höchste. 2011 waren die Niederschläge eher gering (Ausnahme Juli) und entsprechend flach verläuft hier die Wachstumskurve.
- Die Buche wirft über den Winter ihr Laub ab und schützt sich so sehr effektiv gegen Verdunstungsverluste. Die Fichte hingegen behält ihre Nadeln ganzjährig und verdunstet deshalb auch dann Wasser, wenn ihre Wurzeln wenig Wasser aus dem Boden nachziehen können – wegen der niederschlagsärmeren Wintermonate oder weil der Boden gefroren ist. Dabei entzieht die Verdunstung in der Fichtenkrone auch dem Baumstamm so viel Wasser, dass der Stammdurchmesser schwindet.
- Als Flachwurzler reagiert die Fichte sehr schnell auf Wettereinflüsse. Heiße, trockene Sommermonate bedingen eine hohe Verdunstung in der Baumkrone bei trockenem Oberboden, dem Hauptwurzelschicht der Fichte. Wenn die Fichte mehr Wasser verdunstet als sie mit den Wurzeln erhält, schwindet auch der Stammdurchmesser aufgrund des Wasserverlustes im Holz.

Die Buche als Herzwurzler ist von kurzfristigen Trockenphasen wenig betroffen, da sie auf tiefere, immer noch ausreichend wasserhaltige Bodenschichten zugreifen kann.
- Die noch im Stamm vorhandenen Nährstoffe ermöglichen drei weitere Monate ein geringes Dickenwachstum. Seitdem herrscht Stillstand. Mit der Krone fehlt das Fotosyntheseorgan des Baumes. Die Zellen in Stamm und Wurzel erhalten keine Assimilate mehr und sterben ab.

## Aufgabe 2

### Temperaturrextreme inner- und außerhalb des Waldes



Dieses Diagramm aus der Waldklimastation Roggenburg zeigt die wöchentlichen Temperaturmaxima und –minima in °C für jede Woche vom 01.02.2007 bis 30.06.2014. Dabei gibt es eine Messstelle im Freiland (F) und eine im Waldbestand (B). Das Messgerät im Bestand lieferte im März 2012 keine Daten. Die wärmsten Temperaturen werden an sonnigen Hochsommertagen erreicht, die kältesten in winterlichen „Strahlungs Nächten“, wenn keine Wolken vorhanden sind, welche die abgestrahlte Erdwärme reflektieren.

1. Erläutere anhand des Diagramms den Einfluss des Waldes auf extreme Temperaturen!
2. Erkläre, was die Ursachen für dieses Phänomen sind!
3. Erläutere die Bedeutung des Waldes bezüglich des Klimawandels!

## Lösungen:

1. Der Wald mildert Temperaturextreme im Vergleich zur Freilandsituation. Je extremer die Temperatur, desto stärker dieser Effekt. An sehr heißen Sommertagen ist die Temperatur im Wald bis über 2 °C kühler als im Freiland, in sehr kalten Winternächten bis über 2 °C wärmer.
2. An heißen Tagen bewirkt die Verdunstungskälte v.a. aus dem Kronenraum einen Kühleffekt im Wald. Die Nadeln und Blätter verdunsten über ihre Spaltöffnungen Wasser, um nicht zu überhitzen (Transpiration). Das ist derselbe Kühleffekt, den der Mensch beim Schwitzen nutzt.  
An kalten Tagen und in kalten Nächten halten die Baumkronen die Luft im Wald etwas wärmer, indem sie abstrahlende Erdwärme zurück reflektieren.
3. Der Wald wirkt mäßigend auf den Klimawandel. Szenarien, die von einer Temperaturerhöhung von 2-4 °C ausgehen, werden vom Wald deutlich positiv beeinflusst. Der klimamildernde Effekt wirkt nicht nur lokal im Wald selbst, sondern auch in waldnahe Städte hinein.  
Außerdem wandelt der Wald das Treibhausgas CO<sub>2</sub> in Kohlenstoff (gebunden im Holz) und Sauerstoff (wird bei der Fotosynthese freigesetzt) um. Das CO<sub>2</sub> wird somit der Atmosphäre entzogen, der Wald wirkt als CO<sub>2</sub> - Senke. Wenn darüber hinaus durch die Intensivierung der Holzverwendung dieses CO<sub>2</sub> langfristig in Holzprodukten gespeichert bleibt, verstärkt sich die positive Auswirkung auf die CO<sub>2</sub> -Bilanz.  
Da der Klimawandel ein globales Problem darstellt, ist es notwendig, den Zustand des Waldes weltweit zu betrachten, vor allem seinen Gesundheitszustand sowie seine Flächenzunahmen und Flächenabnahmen.

### Aufgabe 3

#### Säurewerte im Waldwasser

| pH-Werte             | Durchschnitt | Durchschnitt | Höchstwert | Tiefstwert |
|----------------------|--------------|--------------|------------|------------|
|                      | Roggenburg   | Bayern       | Bayern     | Bayern     |
| Freilandniederschlag | 6,0          | 5,4          | 9,1        | 3,4        |
| Waldniederschlag     | 5,9          | 5,7          | 9,4        | 2,9        |
| Humuswasser          | 5,6          | 4,8          | 8,8        | 3,0        |
| Bodenwasser          | 6,1          | 5,8          | 9,6        | 3,1        |

Die Tabelle zeigt pH-Werte von Wasserproben, die in bayerischen Waldklimastationen gemessen wurden:

Die Durchschnittswerte an der Waldklimastation Roggenburg, die bayerischen Durchschnittswerte aller Waldklimastationen sowie die je gemessenen Höchst- und Tiefstwerte aller bayerischen Waldklimastationen.

Die folgenden 4 Fragen folgen – ebenso wie der Aufbau der Tabelle - chronologisch dem Wasser auf seinem vertikalen Weg durch den Wald.

Der Freilandniederschlag ist derselbe Niederschlag der auf den Wald fällt, bevor er die Baumkronen erreicht.

1. Erkläre, warum der Freilandniederschlag in der Regel einen leicht sauren pH-Wert besitzt?

Fängt man nun den Niederschlag im Wald auf, ergibt sich meist ein abweichender pH-Wert. Er ist mal etwas höher, mal etwas niedriger als der des Freilandniederschlags.

2. Erkläre, woran das liegt!

Der Niederschlag erreicht nun den Waldboden und sickert zunächst durch die Humusschicht. Humus ist totes organisches Material, das von unzähligen Kleinlebewesen, v.a. Pilzen und Bakterien, zersetzt und mineralisiert wird. Dabei entstehen u.a. langkettige Huminsäuren, die dem Humuswasser eine gelbliche Farbe verleihen.

3. Erkläre, warum das Humuswasser den bisher durchschnittlich niedrigsten pH-Wert zeigt!

Im Bodenwasser, das nun im Mineralboden weitersickert, steigen die pH-Werte wieder an. Basisch wirksame Kationen (z.B.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) gehen in Lösung, saure  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Kationen werden

bei diesem Austausch an Gesteinspartikel gebunden.

Für die Nährstoffaufnahme durch Baumwurzeln sind leicht saure Böden am besten geeignet. pH-Werte unter 4 schaden dem Wald, weil hierbei  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen im Mineralboden freigesetzt werden, welche auf Pflanzenwurzeln und Bodenlebewesen toxisch wirken.

4. Erläutere, wie es um die Waldböden in Bayern bezüglich des Säuregrades bestellt ist!

Lösungen:

1. Im Regentropfen sind verschiedene Säuren gelöst. Das Kohlendioxid der Atmosphäre reagiert im Niederschlag zu Kohlensäure, aus den Abgasen Schwefeldioxid und Stickoxiden bilden sich Schwefel- und Salpetersäure.
2. Beim Tropfen durch die Baumkronen wäscht der Niederschlag Stäube und Stoffe von Nadeln und Blättern, die diese zuvor aus der Luft ausgekämmt haben. Diese Partikel ändern nun den Chemismus des Niederschlagswassers. Je nachdem, um welche Stoffe es sich handelt, wirken sie eher sauer oder basisch.
3. Die genannten Huminsäuren senken den pH-Wert deutlich. Außerdem befindet sich im Humus aufgrund der Atmung der zahllosen Kleinstlebewesen eine hohe Kohlendioxidkonzentration, die wiederum zur Bildung von Kohlensäure führt.
4. Im Schnitt weisen die bayerischen Waldböden für das Pflanzenwachstum ideale, da leicht saure pH-Werte auf.  
Es gibt auch Messwerte aus dem leicht basischen Bereich, was wohl unproblematisch ist.  
Schädliche Messwerte unter 4 kommen offenbar auch vor. Waldorte, an denen solche Werte regelmäßig auftreten, können nicht als gesund gelten.

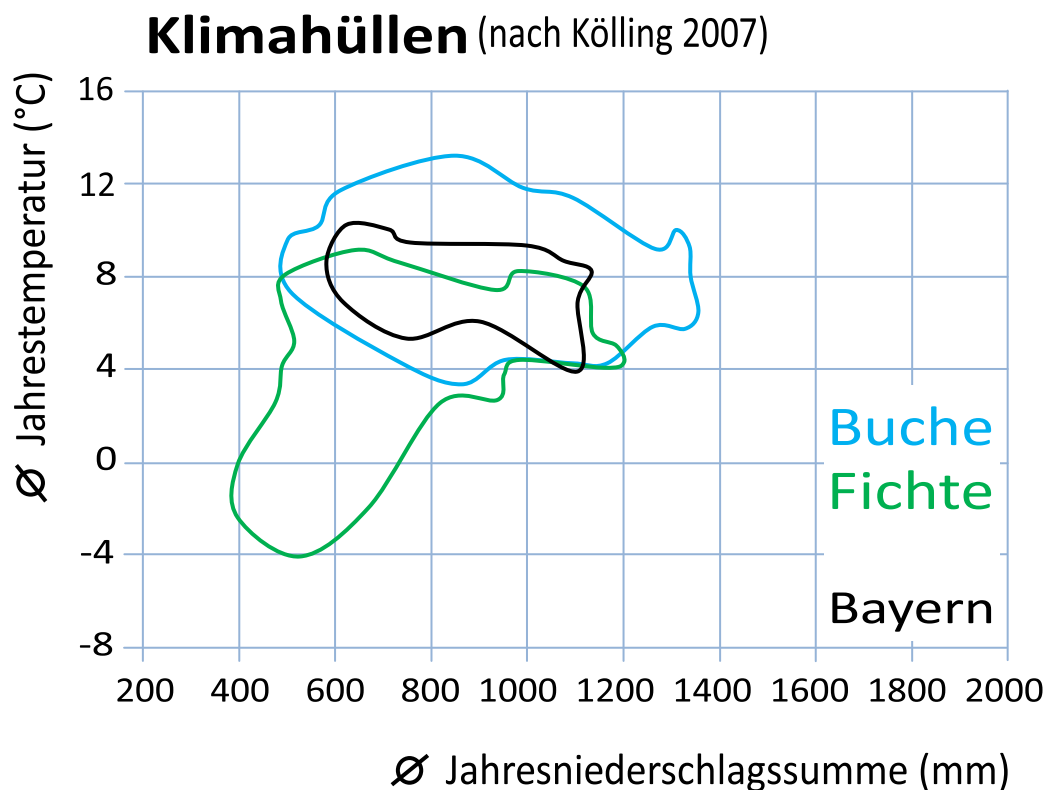
## Aufgabe 4

### Klimawandel und Baumartenwahl

Die Grafik zeigt die Wohlfühlbereiche von Buche und Fichte bezüglich Niederschlag und Temperatur. Die sogenannte Klimahülle (für Buche in blau und für Fichte in grün) zeigt also an, bei welchen, an einem Standort vorkommenden Jahresdurchschnittswerten für Niederschlag und Temperatur, diese Baumarten gut gedeihen. Bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt sind andere Wuchsfaktoren wie Steilheit, Frostlage oder Vernässung.

Die kleinere schwarze Klimahülle zeigt die aktuell in Bayern vorkommenden Klimaverhältnisse.

Man erkennt, dass die Buche derzeit praktisch überall in Bayern mit den aktuellen Niederschlags- und Temperaturverhältnissen zurechtkommt, außer bei sehr tiefen Jahresdurchschnittstemperaturen. Die Fichte kommt an ihre Grenzen wenn die Jahresdurchschnittstemperatur über ca. 8°C steigt.

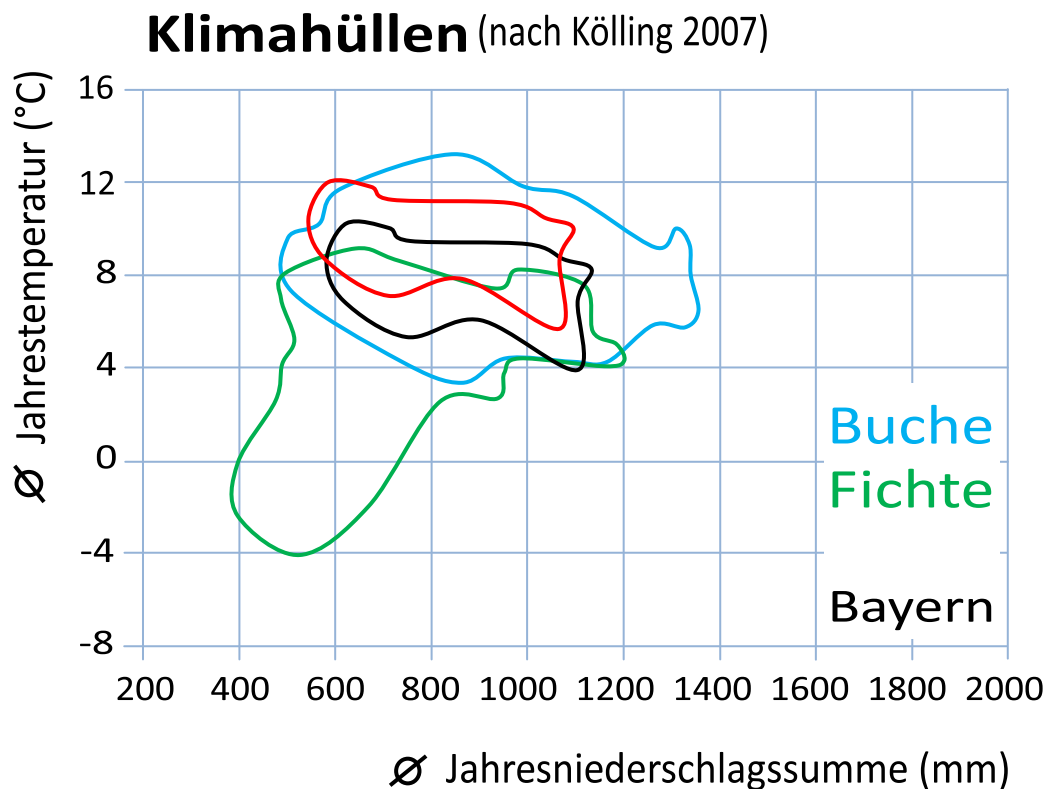




1. Skizziere die zukünftige Klimahülle Bayerns für ein - von Experten inzwischen als äußerst optimistisch betrachtetes – Szenario, bei dem eine Temperaturerhöhung von 1,8 °C und ein Rückgang der Niederschläge um 40 mm prognostiziert wird!
2. Erläutere, was die bayerische Forstwirtschaft beim Anbau der beiden Baumarten in Bezug auf den Klimawandel beachten muss!

Lösungen:

1.

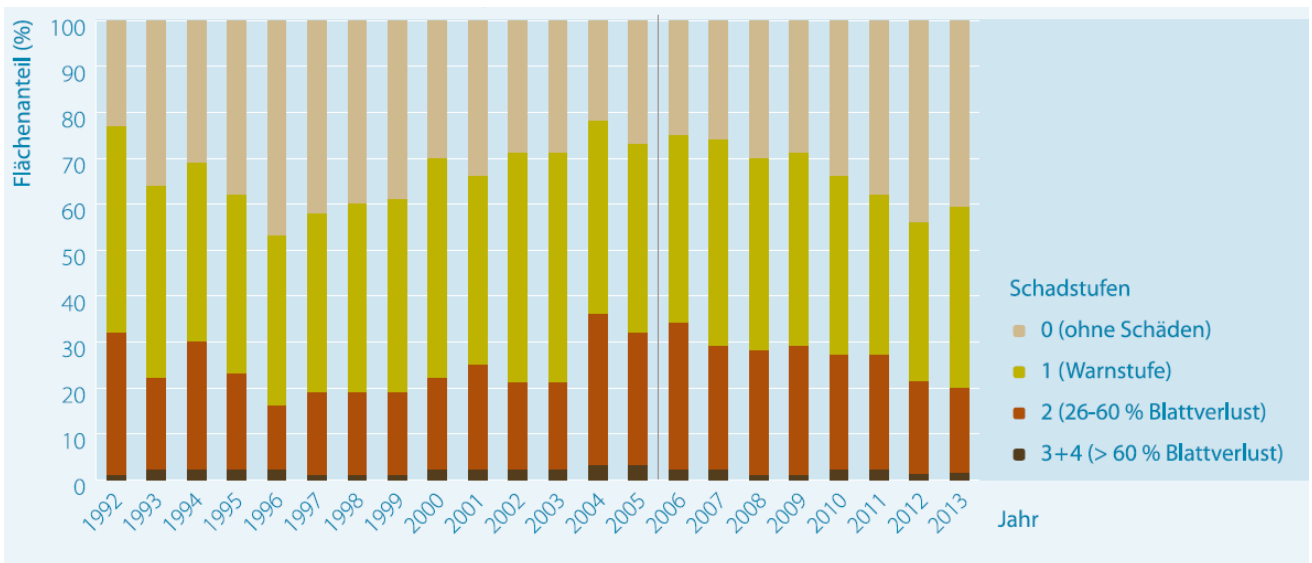


2. Die Buche kann nach wie vor fast überall in Bayern angebaut werden. Kam sie bisher nur an den allerkältesten Standorten an ihre Wohlfühlgrenze, so wird sie diese beim beschriebenen Szenario zukünftig an den besonders warm-trockenen erreichen. Bei der Fichte sind die Auswirkungen drastischer. War sie bisher in den kühleren zwei Dritteln Bayerns gut geeignet, so ist sie es künftig nur noch im kältesten Viertel.

## Aufgabe 5

### Waldzustand

Der Gesundheitszustand der bayerischen Waldbäume wird jedes Jahr im Sommer über eine visuelle Kronenansprache ermittelt. Dabei wird der Nadel- bzw. Blattverlust im Verhältnis zu vitalen, gesunden Bäumen ermittelt. Die Grafik zeigt die Entwicklung des Waldzustandes – über alle aufgenommenen Baumarten gemittelt – für die beiden vergangenen Jahrzehnte.



Witterungsverhältnisse und Schäden durch Insektenfraß beeinflussen das jährliche Ergebnis. Langfristig bedeutungsvoll sind jedoch in erster Linie der Klimawandel und Luftschadstoffe wie Stickoxide, Schwefeldioxid und Schwermetallverbindungen.

1. Erkläre, auf welchen Wegen Schadstoffe in den Baum gelangen, um dort ihre giftige Wirkung zu entfalten?
2. Nenne den Prozentsatz, um welchen der Anteil der Bäume mit deutlichen Schäden pendelt? Als Bäume mit deutlichen Schäden gelten solche, denen mindestens ein Viertel ihrer Nadel- oder Blattmasse fehlt.

2003 war ein ausgesprochenes Trockenjahr. Die Prognosen für den Klimawandel prognostizieren für die Zukunft häufiger derartige Witterungsextreme.

3. Erläutere unter Berücksichtigung des Diagramms, was diese Prognosen für die Gesundheit des Waldes bedeuten.

Zur Baumkronenansprache werden jedes Jahr Forstleute speziell geschult. Die Ansprache erfolgt nach baumartenspezifischen Kriterien.

Eine vereinfachte Ansprache kann jedermann selbst vornehmen:

Die Einwertung des Nadel- bzw. Blattverlustes in 5%-Stufen  
von 0 % Verlust – Baumkrone ist blickdicht; der Himmel scheint nicht durch -  
bis 100 % Verlust – Baum ist abgestorben; Krone trägt keine Nadeln oder Blätter mehr.  
Dabei liegt das Augenmerk auf dem oberen, sonnenbeschienenen Teil der Krone, der Lichtkrone.

4. Werte die abgebildeten Baumkronen mit dieser vereinfachten Ansprache ein!  
Die Lichtkrone ist markiert.



a. Fichte



b. Kiefer



c. Tanne



d. Lärche



e. Eiche



f. Buche

## Lösungen:

1. Die Schadstoffe können zum einen als Luftbestandteile über die Spaltöffnungen in die Nadeln und Blätter dringen und dort Gewebe und Stoffwechsel beeinträchtigen.  
Zum anderen können sie im Regenwasser gelöst in den Boden sickern und gelangen dort in die Wurzeln und ihre Mykorrhiza.
2. Der Anteil der Bäume mit deutlichen Schäden pendelt in der Regel zwischen 20 und 30 %, liegt also im Schnitt bei 25 %.
3. Das Trockenjahr 2003 machte sich in der Aufnahme 2003 noch nicht bemerkbar, allerdings deutlich in den 3 Folgejahren. Das Niveau von 2003 stellte sich erst 2012 wieder ein.  
Extremjahre scheinen sich deutlich und längerfristig auf den Waldzustand auszuwirken. Eine Häufung solcher Jahre könnte die Gesundheit des Waldes sehr stark beeinträchtigen.
4. a. 5 %; b. 20 %; c. 90 %; d. 50 %; e. 75 %; f. 30%

## Aufgabe 6

### Wasserbilanz

An der Waldklimastation Roggenburg werden monatliche Niederschlagsmengen erfasst. Der auf der Freifläche aufgefangene Niederschlag beträgt durchschnittlich  $70 \text{ l/m}^2$  monatlich, der im Waldbestand nur  $49 \text{ l/m}^2$ . Der Grund dafür ist die sogenannte Interzeption.

1. Erkläre, was es damit auf sich hat!

Im August 2008 betrug der Freilandniederschlag  $73 \text{ l/m}^2$ , der Bestandesniederschlag  $62 \text{ l/m}^2$ .

Im Mai 2010 betrug der Freilandniederschlag  $106 \text{ l/m}^2$ , der Bestandesniederschlag  $54 \text{ l/m}^2$ .

2. Berechne für beide Monate den Prozentsatz des Freilandniederschlags, der den Waldboden erreicht!  
Begründe den Unterschied!



Ein Teil des Niederschlags, der den Waldboden erreicht, ist der sogenannte Stammabfluss.

Auch dieser wird in der Waldklimastation Roggenburg aufgefangen – am Fuß einer dicken Buche. Der Zähler der dort angebrachten Kippschalenwaage zeigt im Monatsdurchschnitt den Wert 34. Der Zähler erhöht sich um den Wert 1, wenn  $8 \text{ l}$  Wasser die Waage durchlaufen haben. Eine Projektion der Buchenkrone auf den Boden ergab eine Fläche von  $145 \text{ m}^2$ .

3. Berechne, welchen Anteil des durchschnittlichen Freilandniederschlags von  $70 \text{ l/m}^2$  die Buchenkrone auffängt und dann an ihrem Stamm zu Boden leitet!

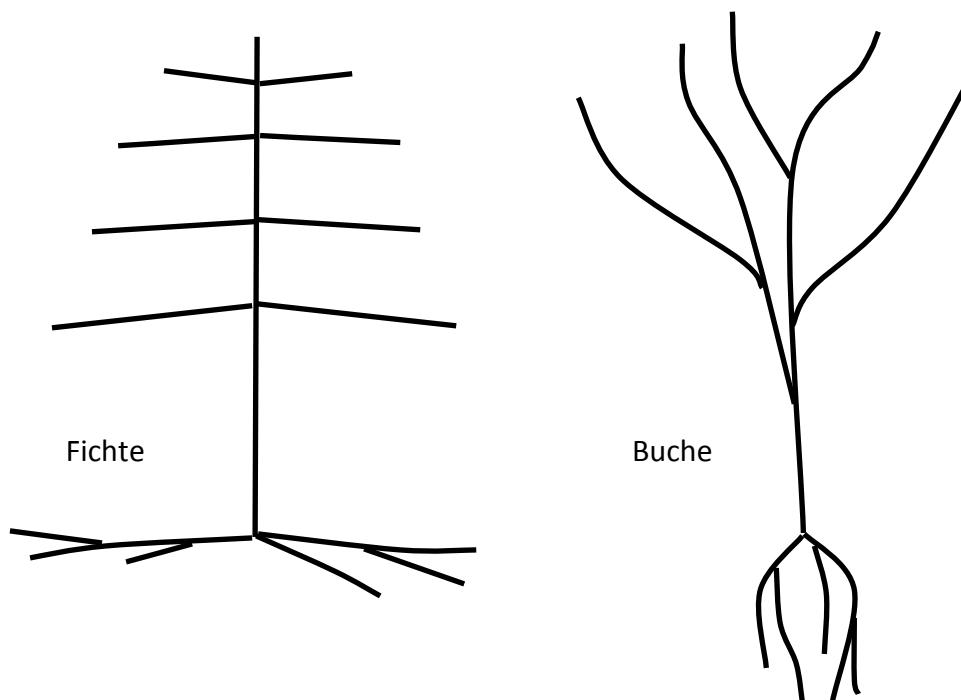


Die Buche zeigt bei Starkregen deutlichen Stammabfluss, die Fichte hingegen kaum.

Beide Baumarten sind auch unterschiedlich gebaut:

Die Fichte besitzt eher waagrechte Äste, eine raue Rinde und ein oft flaches, weitreichendes Wurzelsystem.

Die Buche besitzt steile Äste, eine glatte Rinde und eine relativ kompakte Herzwurzel.



4. Erläutere die unterschiedlichen Strategien beider Baumarten, ihre Wasserversorgung zu optimieren!

## Lösungen:

1. Ein Teil des Niederschlages bleibt an den Blätter, Nadeln und Zweigen in den Kronen hängen und erreicht so die Messbehälter nicht. In diesem Fall sind das 21 l/m<sup>2</sup> bzw. 30 % des Freilandniederschlags. Nach Ende des Niederschlags verdunstet dieses Wasser wieder aus den Baumkronen in die Atmosphäre (Evaporation). Der Begriff Interzeption ist lateinischen Ursprungs und bedeutet sinngemäß „unterwegs abgefangen“.
2. August 2008: 85 %  
Mai 2010: 51 %  
Bei längeren und heftigen Niederschlägen, wie sie im August typisch sind, sind die Baumkronen schnell nass und können kein weiteres Wasser mehr halten. Die Interzeption ist somit gering.  
Bei Nieselregen, der immer wieder von trockenen Phasen unterbrochen wird, können die Baumkronen einen wesentlich größeren Teil des Niederschlags abfangen und wieder verdunsten. Der Mai 2010 scheint ein feuchter Monat gewesen zu sein, mit sehr vielen, aber eher kurzen und wenig heftigen Niederschlägen. Daher die hohe Interzeption.
3.  $34 \text{ l} \times 8 / 145 \text{ m}^2 = 1,88 \text{ l/m}^2$   
Das sind knapp 3 % des Freilandniederschlags.
4. Die Fichte versucht mit ihrem weitreichenden, oberflächennahen Wurzelsystem das Wasser, das in den Waldboden eindringt, zu erreichen.  
Die Buche versucht, das Wasser bereits im Kronenraum aufzufangen und an ihren Stamm zu leiten (Stammabfluss!). Aufgrund dieser Strategie genügt ihr ein vergleichsweise kompaktes Wurzelsystem.