

CO₂-MODELL

Studie 2018



HERAUSGEBER

natureOffice GmbH

Tennelbachstraße 71

65193 Wiesbaden

Telefon: +49 69 173 20 20 0

Fax +49 69 173 20 20 99

Email: info@natureOffice.com

Website: www.natureoffice.com

2018

Copyright © natureOffice GmbH, Wiesbaden, Alle Rechte vorbehalten.



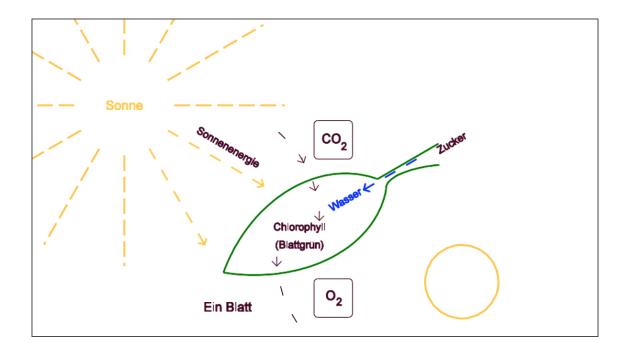
Grundlagen

Biochemische Grundlagen

"Das Wachstumeines Baumes beruht auf Assimilation (Umwandlung) von Nährsalzlösungen aus dem Boden und Kohlendioxid aus der Luftzu Traubenzucker und Stärke bzw. Zellulose. Zellulose ist der Grundstoff der Holzzellwände, die sich teilweise durch Aufnahme von weiteren Stoffen wie Eiweiß, Zucker und Salzen in Lignin verwandeln. Lignin versteift (verholzt) das Zellulosegerüst der Holzzellwände."¹Der wichtigste Prozess bei der Bildung der organischen Bausteine ist die Photosynthese. Sie ist eine komplexe, biochemische Reaktion bei der im Blattgrün (Chlorophyll) unter der Einwirkung von Lichtenergie aus Kohlendioxid und Wasser, Glukose und Sauerstoff gebildet werden.

6 CO₂ + 6 H₂O
$$\xrightarrow{Licht}$$
 C₆H₁₂O₆ + 6 O₂
Nettoreaktionsgleichung der Photosynthese

Durch die lineare Verknüpfung der Glucose mittels Kondensationsreaktion entsteht die wasserunlösliche Zellulose, der Grundbaustein verholzender und nicht verholzender Pflanzen.² Durch die Einlagerung von Lignin verfestigt sich die Pflanzenstruktur - sie verholzt.





Kennzahlen der CO₂-Bindung

Aus der Menge der hölzernen Biomasse, die ein Baum bildet, wird die Menge des gebunden CO_2 bestimmt. Um eine Aussage über die durch das Aufforstungsprojekt gebundene Menge CO_2 zu geben und eine Mengegenerierter Zertifikate zu prognostizieren, wird die voraussichtlich gebundene CO_2 Menge unter Zuhilfenahme von Wachstumsprognosen bestimmt. Für die Berechnung werden wissenschaftlich fundierte Wachstumsprognosen verwendet und glaubhafte Quellen angegeben.

Zur Berechnung der gebundenen CO₂ Menge aus prognostiziertem Wachstum werden Kennzahlen benötigt.

Biomasse-Expansion-Faktor

BEF = Biomasse-Expansions-Faktor

$$\mathsf{BEF} = \frac{\mathsf{oberirdische\ Biomasse}}{\mathsf{Stammvolumen}}$$

Der Biomasse Expansions-Faktor ist artspezifisch, sein Wert ist glaubwürdigen, wissenschaftlichen Quellen zu entnehmen. Eine mögliche Quelle ist: IPCC GPG-LULUCF Table 3A.1.10.

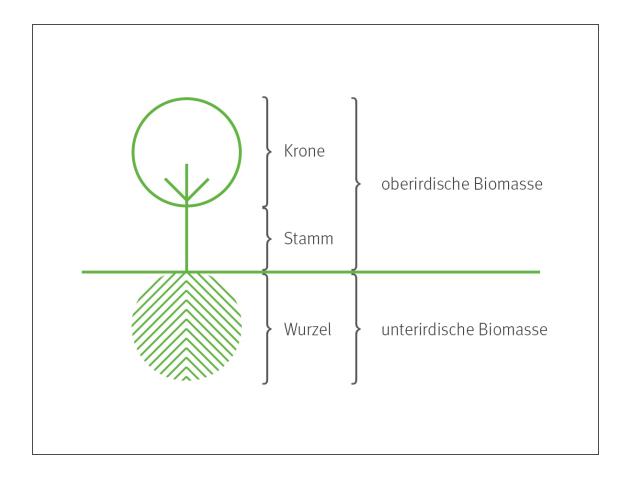
Root-to-Shoot-ratio

RTSR = Root-to-Shoot-ratio

$$RTSR = \frac{unterirdische Biomasse}{oberirdische Biomasse}$$

Die Root-to-Shoot-ratio ist artspezifisch, auch hier ist wenn möglich ein wissenschaftlich fundierter Wert zu verwenden. Eine mögliche Quelle ist: IPCC GPG-LULUCF Table 3A.1.8.





Holzdichte

 ρ_H = Holzdichte

Die Holzdichte ist artspezifisch, ihr Wert ist glaubwürdigen, wissenschaftlichen Quellen zu entnehmen. Eine mögliche Quelle ist:

- IPCC GPG-LULUCF Table 3A.1.9,
- 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory Table 4.13.



Kohlenstoffanteil

 p_C = Kohlenstoffanteil

Der Kohlenstoffanteil in hölzerner Biomasse beträgt circa 50%.

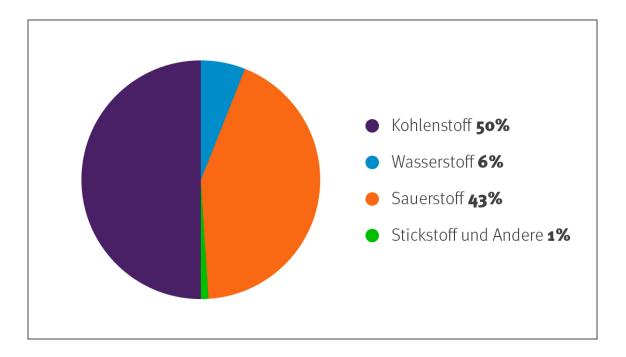


Abbildung: Elementarzusammensetzung von Holz

Allometrie

Um die CO₂-Bindung auf Einzelbaumebene zu ermitteln, ist es notwendig aus einfach zu erfassenden Variablen wie Brusthöhendurchmesser (BHD) oder Höhe die oberirdische Biomasse abzuleiten. Man verwendet dafür allometrische Biomassefunktionen.

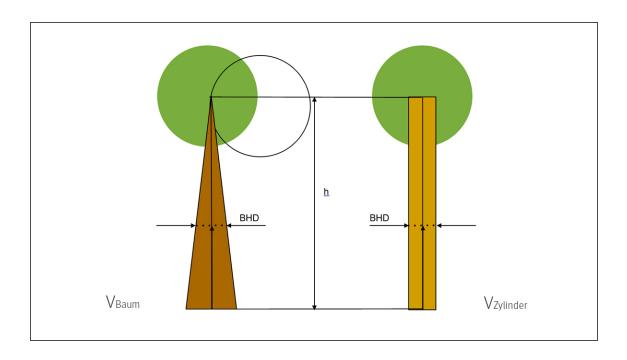
 $V_{Stamm} = f(BHD, h)$



Ist für die betreffende Baumart keine allometrische Funktion bekannt, ist das vereinfachte Modell unter Anwendung des Formfaktors f zu verwenden.

Formfaktor

Der Formfaktor eines Baumes gibt an, wie sich das Volumen des Baumes zu dem Volumen verhält, welches ein Zylinder mit dem gleichen Brusthöhendurchmesser einnehmen würde.



f = Formfaktor

 $V_{\text{Baum}} = \text{Baumvolumen}$

 $V_{\text{Zylinder}} = \text{Volumen eines Zylinders mit d} = \text{BHD}$

$$f = \frac{V_{\text{Baum}}}{V_{\text{Zylinder}}}$$



Umrechnungsfaktor C: CO₂

Mc = molare Masse Kohlenstoff

$$Mc = 12 \frac{g}{mol}$$

McO2 = molare Masse Kohlendioxid

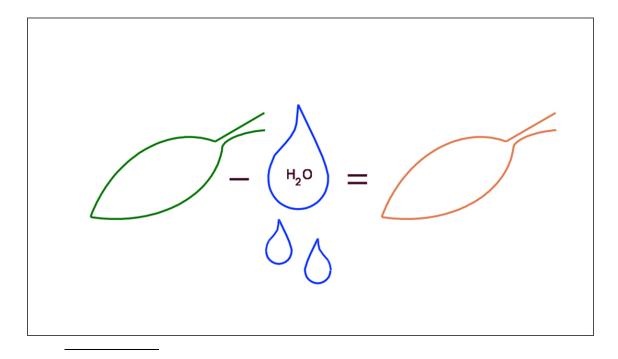
$$Mco_2 = 44 \frac{g}{mol}$$

 $\frac{\text{CO}_2}{\text{C}}$ = Umrechnungsfaktor oder Massenverhältnis

$$\frac{CO_2}{C} = \frac{M_{CO_2}}{M_C} = \frac{44 \frac{g}{mol}}{12 \frac{g}{mol}} \approx 3,666$$

WTDR - Trockenmassegehalt nichthölzerner Biomasse (Wet-to-dry-ratio)

Der Trockenmassegehalt nicht hölzerner Biomasse sagt aus, um wie viel Prozent sich das Biomassevolumen durch den Entzug von Wasser verringert. Der Wert ist anhand von Stichproben individuell zu bestimmen.





Berechnung der prognostizierten CO_2 -Bindung in Abhängigkeit der Wachstumsfunktion $V_{Stamm}(t)$

Die prognostizierte Menge ${\rm CO_2}$ ist eine Funktion der Wachstumscharakteristik ${\rm V}$ Stamm. Das Stammvolumen wiederum ist eine Funktion der Zeit.

$$CO_2$$
 Bindung(t) = $f(V_{Stamm}(t))$

Für die Berechnung langfristig gebundenen Kohlendioxids wird nur die hölzerne Biomasse herangezogen. Die hölzerne Biomasse unterteilt sich in oberirdische (Stamm und Krone) und unterirdische hölzerne Biomasse:

Hölzerne Biomasse = oberirdische hölzerne Biomasse + unterirdische hölzerne Biomasse

Das Volumen der Biomasse lässt sich aus dem Stammvolumen anhand der oben erläuterten Kennzahlen berechnen:

$$V_{\text{Biomasse}}(t) = \frac{\text{BEF} \cdot V_{\text{Stamm}}(t)}{\text{oberirdische Biomasse}} + \frac{\text{BEF} \cdot \text{RTSR} \cdot V_{\text{Stamm}}(t)}{\text{unterirdische Biomasse}}$$

Die Berechnung der Masse erfolgt über die artspezifische Holzdichte:

$$\mathsf{Mh\"olzerne\ Biomasse}\,(\,t\,) = \rho_H \cdot (\mathsf{BEF} \cdot \mathsf{VStamm}\,(\,t\,) + \mathsf{BEF} \cdot \mathsf{RTSR} \cdot \mathsf{VStamm}\,(\,t\,))$$

Unter Verwendung des Wissens zur elementaren Zusammensetzung von Holz lässt sich die in der Biomasse enthaltene Kohlenstoffmenge bestimmen:

$$m_c(t) = p_C \cdot \rho_H \cdot (BEF \cdot V_{Stamm}(t) + BEF \cdot RTSR \cdot V_{Stamm}(t))$$

Die gebundene CO₂ Menge ergibt sich aus dem Massenverhältnis CO₂:C:

$$\mathsf{m}_{\mathsf{CO}_2}(\mathsf{t}) = \frac{\mathsf{CO}_2}{\mathsf{C}} \cdot p_{\mathit{C}} \square \cdot \square \rho_{\mathit{H}} \cdot (\mathsf{BEF} \cdot \mathsf{V}_{\mathsf{Stamm}}(\mathsf{t}) + \mathsf{BEF} \cdot \mathsf{RTSR} \cdot \mathsf{V}_{\mathsf{Stamm}}(\mathsf{t}))$$



Für einen Baum lässt sich dessen CO₂ Bindung daher folgendermaßen berechnen:

$$CO_2 \ \mathsf{Bindung} = \frac{CO_2}{\mathsf{C}} \cdot p_{\mathit{C}} \square \cdot \square \rho_{\mathit{H}} \cdot (\mathsf{BEF} \cdot \mathsf{VStamm} \ (\mathsf{t}) + \mathsf{BEF} \cdot \mathsf{RTSR} \cdot \mathsf{VStamm} \ (\mathsf{t}))$$

Unter Verwendung der Bepflanzungsdichte lässt sich für jede Verwaltungseinheit die ${\rm CO_2}$ Bindung je ${\rm m^2}$ bestimmen.

$$\frac{\mathsf{CO}_2\mathsf{BindungBaum}\,(\mathsf{t})}{\mathsf{gebundene}\,\mathsf{CO}_2\mathsf{-Menge}\,\mathsf{je}\,\mathsf{Baum}} \xrightarrow{\mathsf{Bepflanzungsdichte}} \frac{\mathsf{CO}_2\mathsf{BindungFläche}\,(\mathsf{t})}{\mathsf{gebundene}\,\mathsf{CO}_2\mathsf{-Menge}\,\mathsf{je}\,\mathsf{m}^2}$$

$$ho_{
m Bepflanzung}$$
 = Bepflanzungsdichte
 CO₂BindungFläche (t) = CO₂Bindung (t) \cdot $ho_{
m Bepflanzung}$

Die Anzahl generierter Zertifikate ergibt sich für jede Verwaltungseinheit wie folgt:

Zertifikate $VE = AVE bepflanzt \cdot (CO_2BindungFläche (t) - CO_2Baseline - CO_2Projektemissionen - CO_2Verlust)$

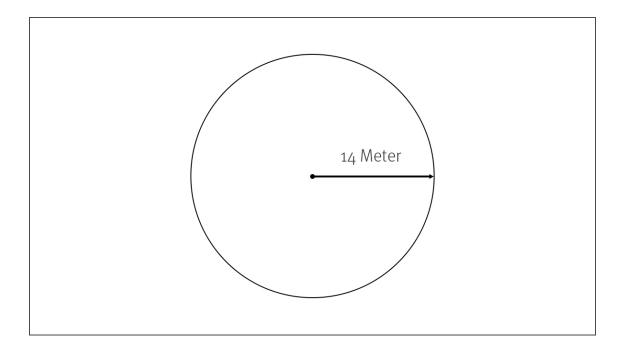


Baseline

Die Baseline ist die Menge CO₂, welche vor Projektbeginn in hölzerner und nichthölzerner Biomasse gebunden ist. Die Berechnung erfolgt durch Vermessung und Auswertung repräsentativer Probeflächen und ist durch statistische Ermittlung der Anzahl notwendiger Probeflächen auf eine hinreichende Genauigkeit abzusichern.

Berechnung der gebundenen CO₂-Menge

1.) zufällige Auswahl von 6 vorläufig permanenten Probeflächen, Aufnahme der Koordinaten der Probeflächen und Markierung des Probeflächenmittelpunktes.



- **2.)** Ermitteln der hölzernen und nichthölzernen Biomasse innerhalb der Probefläche: Vermessung der Bäume, Bestimmung der nichthölzernen Biomasse durch Verwiegen.
- **3.)** Berechnung der oberirdischen CO₂-Bindung für jeden Baum anhand einer artenspezifischen allometrischen Gleichung:



$$V_{Stamm} = f(BHD, h)$$

Berechnung der oberirdischen hölzernen CO₂-Bindung je Baum und Probefläche:

$$\mathsf{m}_{\mathsf{CO2i};\mathsf{h\"{o}lzern\ oberirdisch}} = \frac{\mathsf{CO}_2}{\mathsf{C}} \cdot p_{\mathit{C}} \square \cdot \square \rho_{\mathit{H}} \cdot \mathsf{BEF} \cdot \mathsf{V}_{\mathsf{Stamm}}$$

Summation der oberirdischen CO₂-Bindung für jede Probefläche:

Anzahl Bäume Probefläche

$$m_{\text{CO2i};h\"{o}lzern\ oberirdisch} = \sum_{i=1}^{m_{\text{CO2i};h\"{o}lzern\ oberirdisch}} m_{\text{CO2i};h\"{o}lzern\ oberirdisch}$$

4.) Berechnung der unterirdischen CO₂-Bindung für jeden Baum anhand einer artenspezifischen allometrischen Gleichung:

$$V_{Stamm} = f(BHD, h)$$

Berechnung der oberirdischen hölzernen CO₂-Bindung je Baum und Probefläche:

$$\mathsf{m}_{\mathsf{CO2i};\mathsf{h\"{o}lzern\ unterirdisch}} = \frac{\mathsf{CO}_2}{\mathsf{C}} \cdot p_{\mathit{C}} \square \cdot \square \rho_{\mathit{H}} \cdot \mathsf{BEF} \cdot \mathsf{V}_{\mathsf{Stamm}}$$

Summation der unterirdischen CO₂-Bindung für jede Probefläche:

Anzahl Bäume Probefläche

$$m_{\text{CO2i};h\"{o}lzern\ unterirdisch} = \sum_{i=1}^{m_{\text{CO2i};h\"{o}lzern\ unterirdisch}} m_{\text{CO2i};h\"{o}lzern\ unterirdisch}$$

5.) Berechnung der CO₂-Bindung durch nichthölzerne Biomasse je Probefläche:

$$m_{\text{CO2i;nichth\"{o}lzern}} = \frac{\text{CO}_2}{\text{C}} \cdot p_C \square \cdot \text{WTDR} \cdot m_{\text{nichth\"{o}lzerneBiomasse}}$$



6.) Berechnung der gesamten gebundenen CO₂ Menge je Probefläche:

 $m_{\text{CO}2} = m_{\text{CO}2;\text{h\"olzernoberirdisch}} + m_{\text{CO}2;\text{h\"olzernunterirdisch}} + m_{\text{CO}2;\text{nichth\"olzern}}$

7.) Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung des gesamten Kohlenstoffs aus den vorläufigen Probeflächen

N = Anzahl potenzieller Probeflächen

8.) Berechnung der Anzahl notwendiger Probeflächen für eine Genauigkeit von +/- 10% bei einem Vertrauensbereich von 95% für den Mittelwert:

n = Anzahl potenzieller Probeflächen

N = Anzahl potenzieller Probeflächen

s = Standardabweichung aus Schritt 7

E = erlaubter Fehler; 10% des in Schritt 7 berechneten Mittelwertes

t=t-Wert aus der t-Verteilung für 95%iges Konfidanzniveau; bei unbekannter Stichprobengröße t=2

$$n = \frac{(N \cdot s)^2}{\frac{N^2 \cdot E^2}{t^2} + N \cdot s^2}$$

- **9.)** Wenn n unpraktikabel groß: Erhöhung der Anzahl vorläufiger Probeflächen, Wiederholung von Schritt 1 bis 8 für die zusätzlichen Probeflächen.
- 10.) Schritt 1 bis 6 für alle Probeflächen
- **11.)** CO₂-Bindung der Projektfläche:

mco2 = vollständig gespeichertes CO2

mco2i = Mittelwert in Probefläche i

Ai = Fläche Zone i

 $\omega \cdot r_{i^2}$ = Flächeninhalt der Probefläche



Formel CO₂-Bindung der Projektfläche von Zone i

$$\mathsf{m}_{\mathsf{CO2}} = \frac{44}{12} \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathsf{m}_{\mathsf{CO2}i}}{(\omega \cdot \mathsf{r}^2)} \cdot \mathsf{A}_{\mathsf{i}}$$

Berechnung für Projekt Togo

Leider sind für die Zielstellung der Schaffung eines Naturwaldes in der Guinea Savanne Westafrikas keine auswertbaren Ertragstafeln zur Ermittlung von Volumenfunktionen verfügbar. Daher wurde auf Methoden und Daten der Good Practice Guidance for Landuse, Land-use change and forestry des Intergovernmental Panel on climate change (IPCC) zurückgegriffen.

Die Verwendeten Daten, ihre Auswahl sowie die Berechnung der prognostizierten ${\rm CO_2}$ -Bindung wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

Methodik nach IPCC Good Practice Guidance for LULUCF

Annual increase in carbon stocks due to biomass increment in forest land remaining forest land (equation 3.2.4)

 ΔC_{FFG} = Annual increase in carbon stocks due to biomass increment in forest land remaining forest land by forest type and climatic zone, in tonnes Cyr⁻¹

 A_{ij} = area of forest land remaining forest land, by forest type (i=1 to n) and climatic zone (j=1 to m), in ha

 $G_{Totalij} = average$ annual increment rate in total biomass in units of dry matter, by forest type (i=1 to n) and climatic zone (j=1 to m), in tonnes d.m. ha^{-1} yr⁻¹

CF = carbon fraction of dry matter (default=0,5), in tonnes C (tonnes d.m.) $^{-1}$:



$$\Delta C_{FFG} = (\sum\nolimits_{ij} (A_{ij} \cdot G_{Totalij}) \cdot CF)$$

Average annual increment in biomass (equation 3.2.5)

G_{Total} = average annual biomass increment above and belowground, in tonnes d.m. ha⁻¹ yr⁻¹

GW = average annual aboveground biomass increment, in tonnes d.m. ha-1 yr-1

R = root-to-shoot ratio appropriate to increment, dimensionless

$$G_{Total} = GW \cdot (1 + R)$$

Bestimmung der benötigten Kennzahlen nach IPCC Good Practice Guidance for LULUCF

GW - average annual aboveground biomass increment

Für die Bestimmung von GW wurde Tabelle 3A.1.5 des Annex der IPCC Good Practice Guidance for LULUCF verwendet, da es sich bei der Schaffung des Waldes um einen Naturwald handelt, welcher ohne aufwendige Bewirtschaftung einer eigenen Regeneration überlassen wird.

Als Waldtyp wurde "Tropical and subtropical Forests" gewählt, da der Wald in seiner Zuordnung zur feuchten Guinea Savanne als solcher einzuodnen ist. Das Klima wurde als "Moist with short dry season" dem Klima in der Region entsprechend angewandt.

Für GW ergeben sich somit über die Projektlaufzeit von 30 Jahren 2 Werte:



Jahr o bis 20:

 $GW = 5.3 \text{ tonnes d.m. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (IPCC GPG-LULUCF Annex 3A Tabelle 3A.1.5, Zeile 2, Spalte 3)

Jahr 21 bis 30:

GW = 1,3 tonnes d.m. ha⁻¹ yr⁻¹ (IPCC GPG-LULUCF Annex 3A Tabelle 3A.1.5, Zeile 2, Spalte 3)

R - root-to-shoot ratio

Für die Auswahl der root-to-shoot ratio war es nötig den Wald nach IPCC GPG-LULUCF näher zu charakterisieren. Daher wurde zusätzlich zur Aussage, dass es sich um "Tropical or subtropical forest" handelt, ermittelt welche Gesamtbiomasse die angestrebte Art von Wald im ökologischen Gleichgewicht haben wird. Hierfür wurde Tabelle 3A.1.2 ABOVEGROUND BIOMASS STOCK in naturally regenerated forests herangezogen.

Mit der geografischen Zuordnung zu Afrika und der climatischen Zuordnung "Moist with short dry season" konnte ein Biomass Stock im Gleichgewicht von 260 tonnes d.m. ha-1 (IPCC GPG-LULUCF Annex 3A Tabelle 3A.1.2, Zeile 2, Spalte 3) ermittelt werden.

Mit dieser Information konnte die Bestimmung der root-to-shoot ratio durchgeführt werden, der zukünftige Wald wurde als "Primary tropical/ subtropical moist forest" kategorisiert, die root-to-shoot ratio beträgt somit:

R = 0,27 (IPCC GPG-LULUCF Annex 3A Tabelle 3A.1.8, Zeile 4, Spalte 4)



Wachstumsmodell für PROJECT TOGO

Aufgrund der Tatsache, dass für den Angestrebten Naturwald im Wachstum zwischen zwei Biomasse-Zuwachsraten unterschieden wird, ergeben sich für das project zwei zeitdifferenzierte Wachstumsprognosen.

Zuwachs hölzerner Biomasse in tonnes d.m. ha-1 yr-1:

$$m_{h\"{o}lzern} = GW \cdot (1 + R)$$

$$m_{h\"{o}lzern} = o bis 20 Jahre \rightarrow 5,3 \frac{tonnes d.m.}{ha \cdot yr} \cdot (1 + 0,27) = 6,731 \frac{tonnes d.m.}{ha \cdot yr}$$

$$m_{h\"{o}lzern} = 21 \text{ bis 30 Jahre} \rightarrow 1,3 \frac{\text{tonnes d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{yr}} \cdot (1 + 0,27) = 1,651 \frac{\text{tonnes d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{yr}}$$

Zuwachs an C in hölzerner Biomasse in tonnes C ha-1 yr-1:

 $\mathsf{Ch\"{o}lzern} = m_{\mathsf{h\"{o}lzern}} \, \cdot \, \mathsf{CF}$

$$C_{h\"{o}lzern} = o bis 2o Jahre \rightarrow 6,731 \frac{tonnes d.m.}{ha \cdot yr} \cdot o,5 \frac{tonnes C}{tonnes d.m.} = 3,365 \frac{tonnes C}{ha \cdot yr}$$

$$C_{h\"{o}lzern} = 21 \text{ bis 30 Jahre} \rightarrow 1,651 \frac{\text{tonnes d.m.}}{\text{ha} \cdot \text{yr}} \cdot 0,5 \frac{\text{tonnes C}}{\text{tonnes d.m.}} = 0,825 \frac{\text{tonnes C}}{\text{ha} \cdot \text{yr}}$$

CO₂-Bindung in hölzerner Biomasse in tonnes CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹:

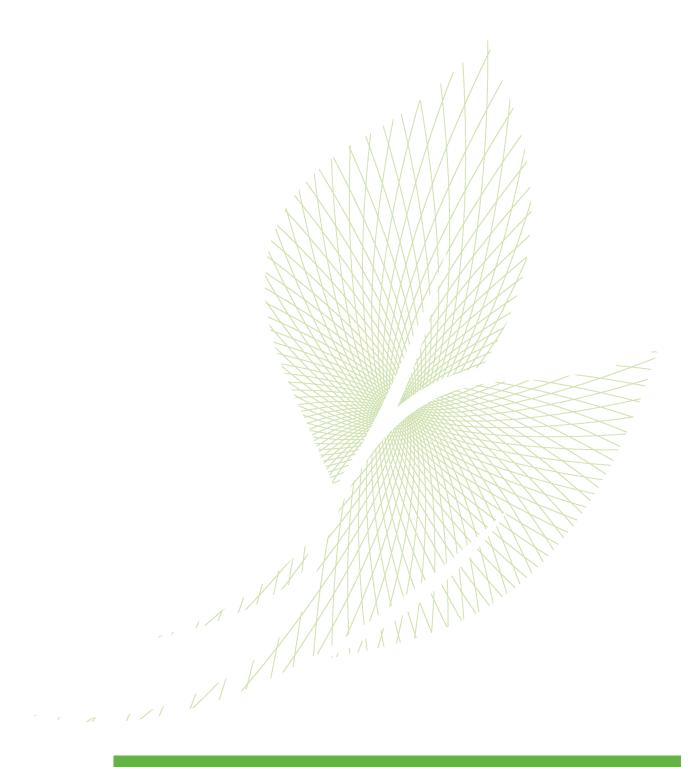
$$CO2_{h\"{o}lzern} = CO2_{h\"{o}lzern} \cdot \frac{44}{12}$$

$$CO2_{h\"{o}lzern} = \text{ o bis 2o Jahre} \rightarrow 3,365 \frac{\text{tonnes C}}{\text{ha} \cdot \text{yr}} \cdot \frac{44 \text{ tonnes CO}_2}{12 \text{ tonnes C}} \approx 12,338 \frac{\text{tonnes CO}_2}{\text{ha} \cdot \text{yr}}$$



 $\mathsf{CO}_2\text{-Bindung}$ in hölzerner Biomasse in tonnes CO_2 ha $^{\!\scriptscriptstyle -1}$ über die Projektlaufzeit :

$$\mathrm{CO2_{total}} = \sum_{i=1}^{30} \mathrm{CO2_{h\"{o}lzerni}} = 277,\! \mathrm{O1} \frac{\mathrm{tonnes} \; \mathrm{CO}_2}{\mathrm{ha}}$$



HERAUSGEBER

Tennelbachstraße 71

www.natureoffice.com

