

Eine wissenschaftlich-fachliche Analyse zu Bodenkohlenstoff in Grass- und Buschland

Autoren: Dr. Gerhard Ohlde, Prof. Dr. Peter Heck, Dr. Felix Flesch

Stand 21.06.2021

1. Vorwort

Aufgrund der Verlautbarungen des HET, Robin Woods und von Biofuel Watch wird die angestrebte Biomassepartnerschaft zwischen Namibia und Hamburg einseitig stark auf das Thema THG Bilanz und hier insbesondere auf den Aspekt des Bodenkohlenstoffes Soil Organic Carbon (SOC) eingengt. Dabei werden – bewusst oder unbewusst – wichtige Aspekte des komplexen Themas nicht erwähnt bzw. irreführend interpretiert. Im Folgenden wird der Sachstand der Literatur hierzu in Bezug zu dem im Rahmen der *Partnerschaft geplanten Landnutzungskonzept* betrachtet.

Vorweg muss erwähnt werden, dass die Reduktion auf die THG Thematik aus Sicht Namibias als extrem klimaugerecht empfunden werden muss, da hier die Verursacher des Klimaproblems (wir) dem Geschädigten die Anpassung untersagen wollen. Im Kontext betrachtet wiegen der dramatische Verlust der Biodiversität und der Grundwasservorräte sowie der fast vollständig eingeschränkte wirtschaftliche Nutzen von durch invasiven Busch stärker als die Argumente, die isoliert eine mehr oder weniger ausgeprägte Kohlenstoff-Sequestrierung betrachten (Coetsee et al. 2013; Ratter et al. 1997). Aber dennoch soll gerade durch eine Partnerschaft auch der Aspekt der Optimierung der CO₂ Senke betrachtet werden.

2. Aktueller Forschungsstand zu SOC

Ökosysteme der Savannen enthalten 10 – 30 % des weltweiten SOC-pools und bilden im Ergebnis wichtige Kohlenstoffsenken (Dintwe and Okin 2018; Grace et al. 2006). Gehalt, Zusammensetzung und Verteilung des SOC wird bestimmt durch die Pflanzengesellschaft und die dominanten Pflanzenarten (Gräser und Bäume), die sich unterscheiden in chemischer Zusammensetzung der Pflanzenstreu, Art des abzubauenden Materials und der Wurzeltiefe (Chen et al. 2005). Mehrere Untersuchungen haben einen Anstieg verholzter Biomasse in Savannen und Grasland weltweit beobachtet (Buitenwerf et al. 2012; Nackley et al. 2017; Wigley et al. 2010). Dieser Anstieg an hölzerner Biomasse wird auch „bushencroachment“ genannt. Dieser weltweit beobachteten Zunahme an encroacherbush steht ein bislang unvollständiges Wissen über die damit zusammenhängende Bodenatmung / Kohlenstoff Ab- und -Umbau in Savannenböden und die Anteile der daran beteiligten Hauptpflanzenarten Gräser und Bäume gegenüber.

Savannenlandschaften zeigen historisch einen Gras-betonten Bewuchs (C_4 -Gräser) und im Verlauf der vergangenen Dekaden, letzten 100 Jahre, eine Zunahme an C_3 -Vegetation (Frost et al. 1986). Diese beiden Pflanzentypen verändern in Abhängigkeit ihrer proportionalen Anteile die Savannen- Struktur. Mischformen zwischen C_3 -Bäumen und C_4 -Gräsern finden sich in einer Verbreitzonenzone vom ausgesprochen trockenen Südrand der Kalahari mit nur etwa 280 mm Jahresniederschlag und einigen verstreuten Bauminseln bis in die 2500 mm Llanos in Südamerika (Lehmann et al., 2014). Gemeinsam ist diesen Zonen eine deutliche Saisonalität der Niederschläge mit einer 5- 8 Monate langen warmen und feuchten Regenzeit, gefolgt von einer trockenen und kühleren Phase, in welcher die Bodenfeuchtigkeit unter den Welkepunkt fallen kann (February and Higgins 2016). Der Mangel an Feuchtigkeit in der Trockenzeit führt dazu, dass Gräser wie Bäume das Wachstum einstellen (February and Higgins 2016). Obwohl Bäume der Savanne entweder Laubbäume oder Immergrüne sind, ist die Trockenzeit immer verbunden mit einer Reduktion von Blattfläche und Kohlenstoff-Aufnahmeraten (February and Higgins 2016; Seghieri et al. 1995). Im Ergebnis zeigt die Saisonalität der Niederschläge in der Savanne einen sehr starken Einfluss auf die Produktivität mit hohen Raten der Photosynthese und Bodenatmung in der Regenzeit (Bowling et al. 2015; Makhado and Scholes 2011; Richards et al. 2012). Da Bäume und Gräser die dominanten Pflanzentypen der Savanne sind, wird der organische Bodenkohlenstoff vor allen Dingen aus dem Kohlenstoff dieser beiden Pflanzentypen gebildet. Bäume tragen in der Regel zur Bildung oberirdischer Biomasse bei, während Gräser substanzuell mehr zur Bildung von Bodenkohlenstoff beitragen (February et al. 2013; Hudak et al. 2003; Jackson et al. 2002; Wigley et al. 2020). Es konnte auch gezeigt werden, dass die Raten der N-Mineralisierung unter Gras höher sind als unter Bäumen (Higgins et al. 2015). Der höhere Kohlenstoffbeitrag und die höheren Mineralisierungsraten geben Anlass dazu, eine erhöhte Kohlenstoff-Fluktuation (C-Mobilität, C-Abbau- und Zubauren) unter Gras zu vermuten (Higgins et al. 2015). Andere Untersuchungen belegen, dass unter den Baumkronen der Savanne SOC-Gehalte und N-pools größer sind als zwischen den Baumgruppen (Coetsee et al. 2010; February et al. 2013; February and Higgins 2010; Holdo and Mack 2014). Dies begründet die Wiederherstellung der ursprünglichen Savanne als berechnigte Zielvorstellung einer zukünftigen Landschaftsgestaltung. Zunahme an Baumbiomasse verändert auch den pool an Boden-C, die Richtung der Fließgrößen / Veränderungen und Reduzierung der Nährstoffdynamik (Coetsee et al. 2010; Craine et al. 2008).

Gräser, die einen photosynthetisch anderen Weg des Kohlenhydrataufbaus (C_4) verwenden als die Bäume (C_3), zeigen eine größere Blattfläche auf und vermeiden im Gegensatz zu den C_3 -Pflanzen Verluste durch Photorespiration. Gräser zeigen eine höhere Durchwurzelung des Bodens – etwa 70 % der Grasbiomasse befindet sich unterirdisch – wurzeln aber nicht so tief wie Bäume. So zeigt die Studie von February et al, 2020, **dass Gräser mehr zum Bodenkohlenstoffpool und zur Kohlenstoffdynamik im Boden beitragen als Bäume (Fig.1)**. Beachtenswert sind die Tiefen der jeweiligen Durchwurzelungshorizonte. Gräser durchwurzeln in der Masse die obersten 50 cm des Bodens, erreichen aber auch unter geschlossenen Grasnarben bis zu 100 cm (Fig.5). **Dabei bilden sie 30 % der Biomasse oberirdisch und 70 % unterirdisch aus. Bäume bilden nur unter 30 % ihrer Biomasse unterirdisch aus und mehr als 70 % oberirdisch.** Daraus resultiert besonders in trocken-heißer Umgebung die ausgesprochene Gefährdung der Baumbiomasse und des darin gebundenen Kohlenstoffs durch Feuer.

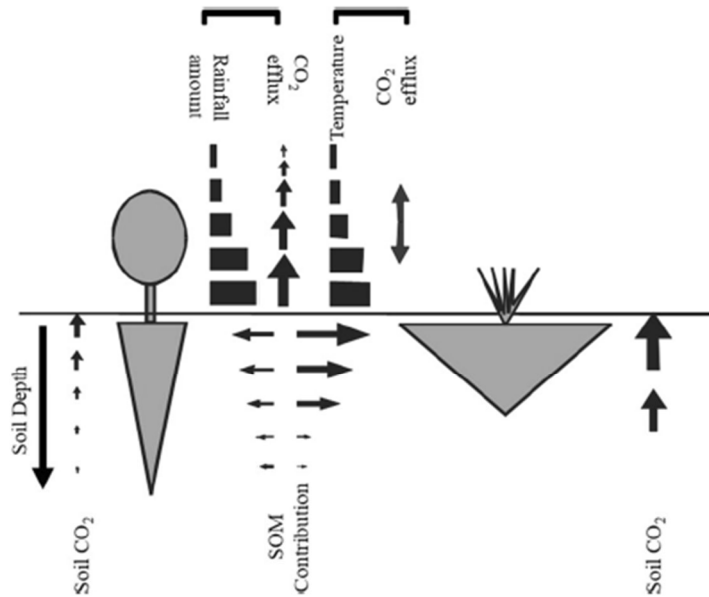


Fig. 1 A conceptual model illustrating the influence of grass, tree, temperature, rainfall and rooting depth on surface CO₂ efflux based on stable carbon isotope analysis of SOC, fine roots and soil CO₂ in a savanna system

February et al, 2020

Es wird belegt, dass Wurzeln von Gräsern den größten Eintrag organischer Substanz und mit 60 – 80 % den größten Beitrag zum SOC (Bodenkohlenstoff) liefern (February et al., 2020). Im reinen Grasland sogar bis zu 97% (Fig.4).

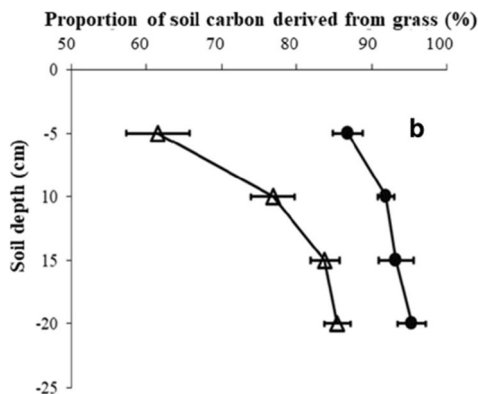


Fig. 4 Percentages of soil carbon at our study site both under (Δ) and away (\bullet) from the canopy of a tree, (a) and (b) the results of a mixing model showing the relative proportion of grass in the SOC both under (Δ) and away (\bullet) from the canopy of a tree

February et al, 2020

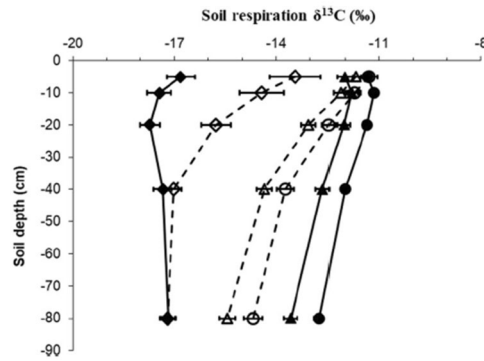


Fig. 5 Wet, closed symbols, and dry, open symbols, season changes in soil $\delta^{13}C_R$ values at 5, 10, 20, 40 and 80 cm for our three treatments (\diamond Tree + no grass, \circ Grass + no tree and \blacktriangle Tree + Grass) from Sept 2011 to Feb 2013

February et al, 2020

Zur Beachtung: niedrigere $\delta^{13}C$ -Werte entsprechen höheren Kohlenstoffgehalten

Die Untersuchungen von February et al., 2020, wurden an, zwischen und unter wachsenden C₃-Bäumen durchgeführt, also Pflanzhöhen von 2 bis 5 Metern, wie sie typisch sind für die von „encroacherbush“ bedrohten Savannen im südlichen Afrika. Die Ergebnisse stimmen überein mit Arbeiten aus Afrika, Australien und Südamerika unter direkt vergleichbaren Bedingungen und zeigen den höchsten Anteil feiner Wurzeln in den obersten 20 cm des Bodens unter Gras und unter Bäumen (De Castro and Kauffman 1998; February et al. 2013; February and Higgins 2010; Riginos 2009; Wigley et al. 2020).

Die Proben zu den Arbeiten von February, Pausch und Higgins, 2020, wurden über jeweils zwei Trocken- und zwei Regenzeiten genommen. Sie zeigen die Bodenkohlenstoffverhältnisse im hydraulisch relevanten Wechsel von Trockenstress und Wasserverfügbarkeit bzw. Wachstum und stattfindender Kohlenstoffdynamik.

Die Jahreszeit und damit verbunden die Wasserverfügbarkeit beeinflusst direkt die Kohlenstoffbindung und -veratmung im Boden. In der Trockenzeit sterben die Blätter von Gräsern ab (Higgins et al. 2011). Mit sehr geringen Photosyntheseraten während der Trockenzeit bildet der zum Erhalt notwendige Gasaustausch den letzten noch verbliebenen Anteil der Pflanzenatmung im Wurzelraum, wobei auch die Mikrobenaktivität im Boden drastisch zurückgefahren wird (Coetsee et al. 2010; Higgins et al. 2015; Makhado and Scholes 2011). So akkumuliert während der Trockenzeit der vor allem von den Graswurzeln erzeugte SOC sowie die reduzierte Aktivität von Bodenmikroben aufgrund von Feuchtigkeitsdefizit einen pool von hochwertigem SOC (Higgins et al. 2015). Mit einsetzendem Regen werden die Bodenmikroben wieder aktiv und zerlegen / verstoffwechseln die eher labilen nicht-strukturgebenden Kohlenhydrate der Gräserwurzeln, wobei vor allem CO₂ aus dem SOC-pool der Graswurzeln abgebaut bzw. freigesetzt wird (February et al., 2020).

Der SOC-Akkumulationseffekt während der Trockenzeit ist ursächlich für hohe nachweisbare SOC-Werte in der Analytik. Ein Anstieg oberirdischer C₃-Biomasse führt zu einer Verlangsamung der Kohlenstoff-Dynamik im Boden. Dabei verringert sich der SOC-Umsatz mit nachfolgender Reduktion der Bodenatmung. Im Ergebnis wird weniger SOC auf- und abgebaut (February et al., 2020). In der Logik der SOC-Dynamik bedeutet dies, dass

- a) C₃-Bäume nicht ursächlich sind für den Hauptanteil des SOC. Dieser Hauptteil wird von Gräsern festgelegt. C₃-Bäume „addieren“ quasi ihren eigenen C-Anteil zum Gras-SOC.
- b) C₃-Bäume den Abbau einmal gebildeten SOC's verlangsamen. Unter Bäumen findet sich oberirdisch eine stark eingeschränkte Artenvielfalt und unterirdisch ein verlangsamter, eher konservierender SOC-Abbau.
- c) Gras-betonte Savannen im Aufbau von SOC einer reinen C₃-Buschvegetation überlegen sind.

Die genannten Untersuchungen zeigen, dass bei der Interpretation von Ergebnissen der Bodenkohlenstoffwerte zu beachten ist, ob die Proben für $\delta^{13}\text{C}$ und SOC in der Trocken- oder der Regenzeit genommen wurden. Aus der punktuellen Analytik, wie z.B. bei Zhou et al, 2019, basiert die Auswertung der Ergebnisse auf einer zwar statistisch genügenden Probenanzahl aber auf nur einem Probennahme Zeitpunkt. In diesem Fall war das der Juli 2014, der peak der Trockenzeit in Texas. Ein weiterer Faktor, der die verallgemeinernde Eignung der Ergebnisse einschränkt, ist die botanische Zusammensetzung der dort wachsenden C₃-Spezies. Es

handelt sich um honey-mesquites (*Prosopis glandulosa*), eine invasive Leguminosenart, die aus Zentralamerika stammt und tiefer wurzelt als beispielsweise *Acacia spp.*

Eine bekannte Strategie von C₃-Pflanzen, die saisonal extremen Wassermangel zu überstehen haben, ist die Ausbildung von flachen Wurzeln, um Zugang zu geringen Wassermengen / Niederschlägen zu erhalten.



Quantifying Harvestable Encroacher Bush, Support to De-Bushing Project, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Published: 2015

Der durch Ausspülung sichtbar gewordene Kreis verdeutlicht die Anpassung an knappe Niederschläge. Der Durchmesser des Regencatchments ist um ein Vielfaches größer als der Kronendurchmesser des noch kleinen C₃-Busches. Bei geschlossenem Kronenstand im dichten encroacher-Gehölz reduziert sich der Zugang zu Wasser, da die aufhaltende Wirkung der oberirdischen Schoßteile verhindert, dass bis zur Hälfte des Niederschlags den Boden erreicht. Pflanzen können Wasser nur durch Wurzeln aufnehmen.

In Gras-betonter Savanne dringt **Niederschlagswasser zu 88 % ein** mit nur 12 % Verlusten und unter Busch ist die **Eindringmenge nur 58 % des Niederschlags**, die Verluste aber 42 % (Impacts of bush encroachment on groundwater recharge: evidence from 9 years of soil hydrological monitoring in the Namibian thornbush Savanna, Institute of Soil Science, Universität Hamburg). Entsprechend gering ist der Regenwassereintrag in das Grundwasser unter encroacherbusch.

C₃-Pflanzen haben sich in der Vergangenheit erfolgreich in vormals von C₄-Gräsern dominierten Ökosystemen durchgesetzt. Mehrere Ursachen können dafür benannt werden:

Faktoren humanogener Art, wie einseitige, zu starke Nutzung durch Rinder. Bei starkem Weidedruck reduzieren Weidetiere (grazer) zunächst die besser schmeckenden mehrjährigen Gräser, um dann auch in die weniger schmackhafte Klasse der einjährigen Gräser vorzudringen. In der Konkurrenz um die Wachstumsfaktoren Licht und Wasser geraten Büsche in eine Vorteilslage, da sie Futter für Blattfresser (browser) zur Verfügung stellen. Meist geht jedoch die Nutzung des Landes durch extensive Weide einher mit dem Ausschluss wilder Blattfresser (browser), die den Aufwuchs von C₃-Pflanzen kurzhalten können.

Weiterer Faktor: das Verbot / die Reduzierung von Feuereinsatz zur Buschkontrolle. Der Abbrand trockener Bodenstreu, standing-hay, im Grasland vernichtet in der Hauptsache Büsche und Bäume bis zu einer Höhe von etwa 2 m zuverlässig. Im Management von Rangeland kann Weideland damit erhalten und gefördert werden. Einem Symposium für Landmanager, 2005, in Kerrville, Texas, ist zu entnehmen, dass im Versuchsgelände am Rio Grande, in welchem beispielsweise Zhou und Boutton über Jahre ihre Proben sammelten, nicht erst seit dem Eintreffen weißer Siedler ein Weidedruck und Nutzung mit Rindern einsetzte und sukzessive der Busch das Gras verdrängte. Hier haben bereits indigene Interessenten an Weidetieren lange vorher schon durch regelmäßigen Abbrand des Buschs dafür gesorgt, dass Bisons zu ihnen kamen und genau diese Abbrandgegenden als bevorzugte Weiden aufsuchten. Das vereinfachte die Jagd auf diese großen Grazer deutlich.

Weiterer Faktor: die Zunahme des CO₂ in der Atmosphäre.

Andere Studien (Kulmatiski and Beard, 2013; Venter et al., 2018) zeigen, dass Busch-encroachment von zunehmenden Niederschlagsmengen profitiert. Zhou, 2019, beschreibt für sein Versuchsgelände in den lowlands von Texas zwischen 1890 und 2019 eine Zunahme vom 7 mm/Dekade und bei der Temperatur einen Anstieg um 0,1 °C/Dekade.

Die Masse des Kohlenstoffs im Boden beschreibt Zhou als Effekt der originären Herkunft des SOC, der ursprünglich ausschließlich aus abgebauter C₄-Gras-Wurzelmasse stammt und der Zeitdauer, mit welcher invasive C₃-Baumspezies sich an den Ufern des Rio Grande ausbreiten konnten. Seine untersuchten Bodenproben weisen eine Mischung aus C₄- und C₃-Pflanzenherkünften auf.

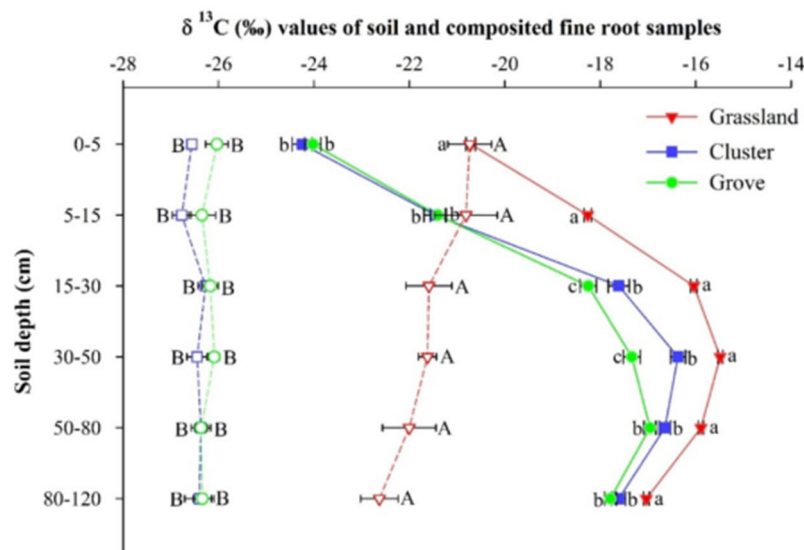


Figure 3. The $\delta^{13}\text{C}$ values (‰) of soil (solid symbols, solid lines) and composited fine root samples (hollow symbols, dashed lines) for grasslands, clusters, and groves throughout the 1.2 m profile. Significant differences ($p < 0.05$) between means of landscape elements are indicated with uppercase letters for fine root samples, and lowercase letters for soil samples. Number of soil samples: Grassland = 200, cluster = 41, and grove = 79. The $\delta^{13}\text{C}$ values (‰) of composited fine root samples for different landscape elements are based on three replicates.

Woody patches had significantly lower soil $\delta^{13}\text{C}$ values than grasslands throughout the soil profile. Soil $\delta^{13}\text{C}$ values were significantly lower in groves than clusters, but only in the 15–30 and 30–50 cm depth increments (Figure 3). Soil $\delta^{13}\text{C}$ values increased with soil depth, reached maximum values between 30–80 cm depth increments, and then decreased slightly in the deeper increments (Figure 3).

Obige Darstellung zeigt, dass selbst bis in Tiefen von 120 cm Gräser einen höheren Beitrag zum Kohlenstoffeintrag beitragen. Das von Zhou verwendete Berechnungsmodell (simple mass balance mixing model) ermittelte in den oberen Bodenschichten des Graslands einen **relativen Anteil des SOC mit C₃-Pflanzenherkunft auf nur 27 %**. Frühere Radiocarbon-Arbeiten von Boutton et al., 1998, im selben Untersuchungsfeld hatten bereits eine lange Verweildauer von Kohlenstoff im Boden festgestellt: 270 Jahre ± 40 Jahre in den oberen 15 - 30 cm, bis zu 1480 Jahre ± 35 Jahre in der Tiefe von 90 bis 120 cm und 75 Jahre ± 4 Jahre für die obersten 15 cm Bodentiefe. Daraus wird geschlossen, dass der Landbewuchs bis vor 200 Jahren von C₄-Gräsern dominiert wurde. Aus den δ¹³C-Werten errechnet Zhou, 2019, einen SOC-Anteil aus C₃-Herkunft von 35 – 51 %. In der Summe des vorhandenen Bodenkohlenstoffs ermittelt Zhou et al., 2019, in seiner Tabelle 1 einen erhöhten Kohlenstoffanteil im Boden unter Busch. Die Werte variieren in Abhängigkeit von der Bodentiefe, fallen mit zunehmender Bodentiefe ab und lassen bei 120 cm praktisch keinen nachweisbaren SOC-Beitrag aus C₃ zum Gesamt-SOC mehr erkennen. **Im Umkehrschluss lässt sich ausdrücken, dass sich in den oberen 15 cm auch nach Jahrzehnten der Bewuchsverdrängung durch C₃-Buschwerk immer noch 49 bis 65 % des SOC aus C₄-Gräserherkunft nachweisen lässt.**

Häufig anzutreffen in Arbeiten zum C-Anteil im Boden und zum Nachweis seiner C₄- oder C₃-Herkunft sind Bodenproben, die in statistisch auswertbarer hoher Zahl genommen werden, aber nur flache Bohrungen erfordern. Ein Beispiel ist Wang et al., 2009. Im Kalahari Transect bei Tsane, 396 mm MAP, wurden 296 Proben in nur 0-5 cm Tiefe gezogen. Zur Jahreszeit der Probenziehungen sagt die Arbeit leider nichts. Ergebnisse zeigen unter Busch immer noch einen SOC-Anteil von 40 %, der aus C₄-Gräsern stammt. Dies deckt sich mit Ergebnissen von Zhou et al., 2019, der in den obersten 5 cm einen C₄-Kohlenstoffanteil von 40 % ermittelte. Im Umkehrschluss stammten hier 60 % des C aus Buschwachstum. Dies geht einher mit hohen absoluten C-Gehalten, welche aus oberirdischem Eintrag erfolgte. Zhou ermöglicht jedoch einen Einblick in die Boden-Kohlenstoffverteilung in den verschiedenen Tiefen bis zu 120 cm.

Bodentiefe in cm	SOC (g C kg ⁻¹ soil) unter Gras*	Gesamt-SOC unter Busch (g C kg ⁻¹ soil)*	SOC-Anteil unter Busch, der C ₃ -Busch entstammt, nach 200 a Busch-encroachment*	SOC-Anteil unter Busch, der nicht aus C ₃ -Busch stammt, nach 200 a Busch-encroachment
0-5	6.7	22.1	62.3 %	37.7 %
5-15	5.4	8.8	38.9 %	61.1 %
15-30	5.1	6.3	21.8 %	78.2 %
30-50	5.0	5.3	17.4 %	82.6 %
50-80	3.5	3.9	10.2 %	89.8 %
80-120	2.3	2.6	8.4 %	91.6 %

- Zhou et al., 2019

Coetsee et al., 2013, konnten unter 40 Jahre altem encroacherbush den Gehalt an feinen Busch-Wurzeln als Indikator oder Ursache/Quelle für Boden-Kohlenstoff ausschließen. Sie vermuteten, dass eher der hohe oberflächliche Eintrag an Blätterfall von niederer Qualität und langsamem Umsatz den SOC-pool vergrößert. Offensichtlich unterliegt Kohlenstoff aus C₄-Gräsern einer höheren Dynamik beim Abbau. Und Kohlenstoff aus dem Eintrag aus C₃-Pflanzen einem langsameren Abbau (Winn and Bird, 2007; Saiz et al., 2015), wie Coetsee et al. bereits vermuteten. Die Angaben von Zhou et al, 2019, scheinen zu belegen, dass Busch den

SOC gegenüber Grass steigert. Seine Werte in den oberen 5 cm Boden sind so frappierend höher als im Grasland oder unter Busch in tieferen Schichten, dass auch hier angenommen werden kann, dass im topsoil vor allem oberflächliche Einträge organischer Substanz ursächlich für die gemessenen SOC-Werte sind. In seinen Conclusions ordnet er dem gestiegenen SOC als Ursache klar eine Zunahme von rezemem C₃-Kohlenstoff zu („we provide $\delta^{13}\text{C}$ evidence to show that this new SOC accrual is derived from C₃ woody plants“). Dass er zusätzliche, äußere Einflüsse von C-Eintrag unberücksichtigt lässt, kann durchaus kritisch bewertet werden. Im untersuchten Probengelände am Rio Grande bilden die Bäume (*Prosopis g.* und Folge-C₃-Vegetation) im Ökosystem den bevorzugten konkreten Lebens- und Aufenthaltsraum für Insekten, Reptilien, Vögel und Säuger. Die Blüten ziehen Bienen und andere Insekten an, welche wiederum als Nahrung für Vögel etwa dienen. Der kühlere Schatten und die im Vergleich zum offenen Grasland höhere Luftfeuchtigkeit macht die C₃-Vegetation allgemein attraktiv. Neben dem Anfall von Baum- und Buschspreu auf dem Boden ist durchaus auch der Anfall von C- und N-haltigen tierischen Ausscheidungen zu berücksichtigen. Die Nähe zum Fluß läßt, wie im typischen Galeriewald, überdurchschnittliches Tierleben erwarten.

Die unter Busch höheren SOC-Werte lassen nicht den Schluss zu, dass Busch (C₃-Pflanzen) einen den Gräsern gegenüber höhere SOC-Aufbaufähigkeit besitzen. Es zeigt sich, dass C₃-Kohlenstoff einen deutlich langsameren, weil biochemisch schwierigeren Abbau bedeutet. **So addiert sich im Boden zur vorhandenen Kohlenstoffmenge aus C₄-Pflanzen noch eine weitere Kohlenstoffmenge aus den rezenten C₃-Pflanzen. Und letztere ist im Boden nur schwierig abbaubar, verstoffwechselbar, weil sie neben Lignin auch andere aliphatische Bestandteile aufweist (Boutton et al, 2009; Filley et al., 2008; Creamer et al. 2013).** Die Aktivität der Mykorrhiza ist vom Wassergehalt des Bodens abhängig. Daraus ist erkennbar, dass C₃-Wurzeln in arider / trockenheißer Umgebung einen nahezu abbaufreien Beitrag in den SOC-pool liefern. In gesteigertem Masse wird dies während der Trockenzeit der Fall sein (siehe die Ergebnisse von Zhou et al., 2019).

Pflanzen, die wie Bäume, einen aufrechten Wuchs gegen die Gravitation realisieren, sind von Lignin (Holzstoff) als verfestigendem Härter zwischen Zellulose und Hemizellulosen abhängig, da hierdurch Druck- und Zugfestigkeit erzeugt wird. Diese Eigenschaft ist im Boden wichtig, da der Baum vom Transport in Wasser gelöster Nährstoffe aus dem Boden abhängt als auch Wasser in den Blättern zur Photosynthese benötigt.

Um zu entscheiden, ob nun am subtropischen trocken-heißen Standort C₃-Pflanzen oder C₄-Pflanzen über ihr Wurzelwerk einen höheren Eintrag in den SOC erzeugen, müßte idealiter ein Vergleichsstandort gewählt werden, der weder seit Jahrhunderten ein reiner Baumbestand ohne nennenswerten Unterwuchs war noch ein reiner C₄-Grasbestand war. Zhou, 2019, hat sich bemüht, den C₃-Anteil am Gesamt-SOC über Isotopentechnik zu bestimmen, konnte aber lediglich das Alter der bestehenden C₃-Invasion im reinen Grasland abschätzen und feststellen, dass unter den C₃-Bäumen besonders viel SOC zu finden war, der sich nur schlecht und langsam abbauen lässt, und unter der Grasdecke natürlich gar nicht vorhanden ist.

Neue Arbeiten von Wigley et.al. (2020) stellen klar, dass eine C₄-Grassavanne in der Kohlenstoffsequestrierung dem encroacherbusch deutlich überlegen ist. Betrachtet man in der Literatur die bereits vorliegenden detaillierten Forschungsergebnisse, wie von Zhou et al., 2019, ergibt sich eine verblüffend neue Sicht zur bislang oberflächlichen Frage, ob denn nun unter Gras, also in der Savanne, oder unter dem encroacherbush mehr Bodenkohlenstoff

vorzufinden ist. Im vormalig dominant mit C₄-Gras bewachsenen Land am selben Versuchsstandort wie Zhou, konnten Bai et al. (2011) in den seit 200 Jahren vom C₃-Busch übernommenen Flachland immer noch einen ausgeprägten Isotopennachweis des dort mal normalen C₄-Grases nachweisen. Dies wird von anderen Arbeiten an diesem Standort bestätigt (Archer, 1995; Boutton et al., 1998, 1999; Archer et al., 2001; Boutton et al., 2009a). Zitiert man Zhou aus dem Text seines abstracts „Tree/shrub encroachment has substantially increased SOC and the proportion of new SOC derived from C₃ plants in the SOC pool“, ergibt sich eine quasi fotografische Momentaufnahme des Istzustandes der Kohlenstoffsituation unter Busch. Daraus ein Postulat abzuleiten, der Busch sei unter allen Umständen zu erhalten, um die Menge des im Boden sequenzierten Kohlenstoffs nicht zu reduzieren / zu gefährden ist irreführend. Erfreulicherweise hat Zhou die pflanzentyp-spezifische Herkunft des Bodenkohlenstoffs bis in eine Tiefe von 120 cm untersucht. Er selbst bezeichnet die beiden obersten Bodenschichten als topsoil, die darunterliegenden als subsoil. Die Daten zeigen, dass

- Wurzeln von C₃-Busch über einen 200 Jahre dauernden Zeitraum den alten Kohlenstoffbestand, der noch aus vormaligem C₄-Gras-Bewuchs stammte, aufstockte,
- mit zunehmender Tiefe der Gesamt-SOC abnimmt,
- in 120 cm Tiefe über 90 % des vorgefundenen C aus Grasvegetation stammt,
- Busch im dryland vor allem im topsoil wurzelt,
- Sich Beiträge des Kohlenstoffeintrags durch Busch zum Gesamt-SOC in Tiefen von 120 cm und tiefer in der Messgenauigkeit gegenüber C₄-Kohlenstoff gegen Null bewegen, bzw. kaum noch nachweisen lassen,
- Aus Kenntnis der Pflanzenphysiologie Gras eher flach und Bäume eher tiefer wurzeln, am Untersuchungsstandort jedoch auch in 120 cm Tiefe über 90 % des C vom Graseintrag stammt. Beiträge der C₃-Bäume nach 200 Jahren äußerst marginal ausfallen (siehe obige Tabelle).
- Sich die SOC-Werte der obersten 5 cm Boden und vielleicht auch der darunterliegenden Schicht durch Vermischung mit Oberflächeneintrag organischer Substanz erhöht darstellen (siehe oben: Hinweise auf Blätterfall, C₃-Kräuter, Tierexkremete, etc.)
- Arbeiten und Analyseergebnisse aus topsoil-Untersuchungen auf ihre Eignung zur Einschätzung von Bodenkohlenstoff zu prüfen sind.

Gerade der Blätterfall (litterfall) unter Busch spielt eine standortspezifische wichtige Rolle, da der Busch regelmäßig auf die Schwankungen von Temperatur und Wasserverfügbarkeit im Sinne des Überlebens mit Blätterabwurf reagiert. Man vermag die großen dabei anfallenden Mengen in einem Zeitraum von 200 Jahren kaum abzuschätzen.

Die höheren Werte ergeben sich durch Addition von C₃-C zum überall hohen C₄-C, so dass im Ergebnis unter Bäumen mehr analytisch nachweisbarer Kohlenstoff vorgefunden wird.

Zahlreiche Arbeiten zeigen jedoch unter ungestörtem Savannen-Grasland höhere SOC-Werte.

So konnten Wigley et al. (2020) in semi-arider afrikanischer Savanne allein durch Schonung der Grasnarbe (Wegfall der Beweidung durch Herbivore) eine um 22 % sehr deutliche Zunahme des Grasaufwuchses feststellen. Der SOC steigerte sich durch die Förderung des Grasaufwuchses um 54 %, welcher in einer Bodentiefe von 30 cm zu 71 % aus den C₄-Graswurzeln stammte. Diese Ergebnisse unterstreichen den von Jackson et al. (2002) und Hudak et

al. (2003) beschriebenen starken Einfluß des Grases und seiner Wurzeln auf die C-Sequestrierung in semi-ariden Savannen. Obwohl auch der Busch in den 17 Jahren Versuchsdauer (Wigley et al, 2020) pro ha um 8 m² Stamm-Grundfläche zunahm, die von Busch-Kronen überdachte Fläche um 31 % zunahm, insgesamt die oberirdische C-Masse um 8,5 t/ha zunahm, konnten Wigley et al. über diesen Zeitraum einen SOC-Kohlenstoffeintrag von 14,5 t/ha aus dem Wachstum von C₄-Gras nachweisen. Ganz grob lässt sich durch diese Ergebnisse der SOC-Eintrag durch Förderung von C₄-Gras auf etwa 0,9 t/a/ha quantifizieren.

Bisherige Wirkungsbezüge erklären den starken Effekt, den Gras auf den Bodenkohlenstoff und den starken Effekt, den C₃-Busch auf die Menge an synthetisierter oberirdischer Biomasse besitzt.

Man kann unschwer erkennen, dass in der Darstellung einer Kohlenstoffsénke am semi-ariden Standort das Management der Landnutzung von entscheidender Bedeutung ist.

3. Landnutzung, Weidemanagement, Buschmanagement

Betrachtet man nun die Entwicklung des Bodenkohlenstoff im Rahmen der oben beschriebenen Nutzung (Ausdünnung auf einem 1/3 ha mit Nachsaat mehrjähriger Gräser und folgender angepasster Nutzung), lassen sich die pflanzlichen Produkte des Range-/ Buschlands aufteilen in:

- Oberirdische Teile, die entweder der Nutzung durch den Menschen oder Tieren zufallen als Futter, Baustoff, Brennstoff, Biotop. Pflanzentyp-spezifisch stellt C₄-Gras hier etwa 30 % seiner Syntheseprodukte bereit, C₃-Busch etwa 70 %. Alles ist de facto Feuer-gefährdet. Ohlde et al. (2019) ermittelte für C₃-Bäume am ariden Standort mit 18 % Wurzelanteil ein noch weiteres Verhältnis.
- Unterirdische Teile, die neben Grundwasser, Pflanzenwurzeln, Nährstoffe wie etwa Kohlenstoff enthalten. Hier fallen 70 % der Grasteile und 30 % der Buschteile als Wurzelmasse an. Chen et al. (2003) ermittelte in einer Trockensavanne in Nordaustralien für Gras mit 84 % Wurzelanteil noch höhere Werte.

Bei Entnahme bzw. Ausdünnung um etwa 12 t TS des Buschs /ha kann diese oberirdisch geerntete Menge einer anderen Nutzung zugeführt werden, ohne dass die Pflanzen absterben. Man hat versucht, sie nach der Ernte mit Arboriziden nachhaltig zu unterdrücken oder hat Buschkontrolle gar mit Feuer durchgeführt. Nach wie vor zielen eine Nutzung und Wertschöpfungskette des Menschen auf die oberirdischen Teile. Nach Ernte der oberirdischen Holz-/Buschteile verbleiben der Sägestumpf und die Wurzeln im Boden. Das heißt: der gesamte SOC bleibt erhalten. **Ist das Holz ausgedünnt und entfernt, verschiebt sich die Lichtkonkurrenz an der Oberfläche zugunsten der Gräser.** Diese beginnen – sofern Niederschlagswasser dies ermöglicht – sofort mit dem Wachstum. Modernes Management der Landnutzung wird dem Gras die Möglichkeit geben, die Grasnarbe zu schließen und selbständig auszusamen, bevor eine oberirdische Nutzung des Grases geplant wird. Der Wurzelhorizont der Gräser wird eine Menge von etwa 170tC (Chen et al., 2002) bis 260 tC /ha (Neely et al., 2009) in den Boden einbringen. Über den langen Zeitraum von 17 Jahren konnten Wigley et al. (2020), wie oben erwähnt, via C₄-Gras 14,5 t/ha C sequestrieren. Dies geschieht zusätzlich zum SOC,

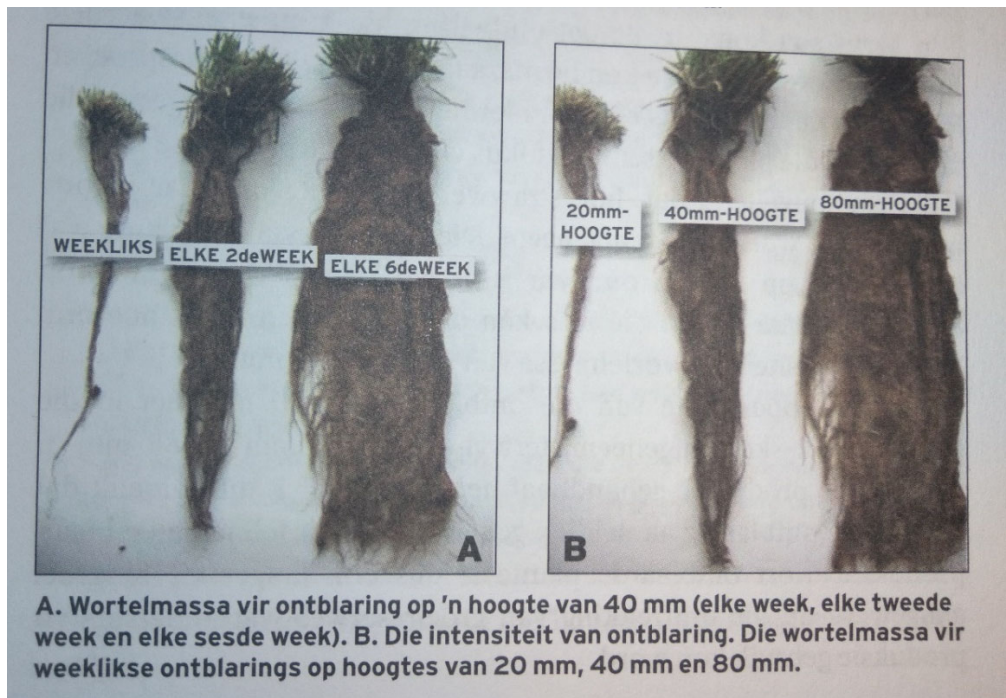
der sich bereits unter dem vegetationsarmen Boden unter dem Busch befand. **Einmal dem Licht ausgesetzt wird auch der vormals vom Busch beschattete Boden produktiv.**

Die noch vorhandenen Stümpfe der Buschvegetation werden sofort nach der Ausdünnung beginnen, erneut auszutreiben. Das Landmanagement wird diesen Stockausschlag unter Schonung der wachsenden Grasnarbe mit browsern (Blattfressern) kurzhalten (Wild oder Ziegen). Ebenso wird maschinelle Ernte hochwertige junge Busch-Schößlinge zur Herstellung von Bushfeed-pellets nutzen. Erst gesichert robuster Grasneuaufwuchs wird genutzt: Beweidung durch Rinder, Ernte zur Futtermittelerzeugung, Ernte zur Rohstoffgewinnung von Papier. Nach einer Nutzung von etwa 7-9 Jahren (abhängig vom Niederschlag) in einem Rotationsverfahren werden die immer wieder ausschlagenden Busch-Stümpfe nicht mehr genutzt und wachsen einer weiteren thermischen Nutzung nach weiteren 10 – 12 Jahren zu.

Vom Prinzip her wird also der Status quo des SOC nach jeder Buschausdünnung zu einer Grasphase auf gleicher Fläche führen, die zusätzlichen Kohlenstoff über die Graswurzelmasse in den Boden einbringt. Langzeitstudien zur SOC-Entwicklung müssen den Aufbau der Kohlenstoffsенke in diesem Nutzungssystem begleiten.

Persönlicher Austausch mit Prof. Dr. Ulf Amelung und Dr. Sandhage-Hofmann vom Institut für Bodenkunde der Universität Bonn deutet auf einen dort zunächst vermuteten Abstieg des SOC nach Buschausdünnung mit nachfolgendem Anstieg bis zum vor Ausdünnung bekannten Niveau. Sie gehen unter Verweis auf andere Arbeiten davon aus, dass nach Entfernung von Busch-Pflanzen in Abhängigkeit vom Bodenfeuchtegehalt sofort mit der Veratmung von SOC zu rechnen ist. Die zugrunde liegenden Arbeiten beschränkten sich jedoch auf die Beobachtung des SOC nach Buschentfernung samt Wurzeln, der damit zusammenhängenden Bodenauflockerung und einer nicht durchgeführten gezielten Nachsaat, wie wir es im Bereich aftercare vorsehen. Es ist bekannt, dass sich nach undifferenzierter alleiniger Buschentnahme ohne aftercare-Management-Massnahmen, meist noch kombiniert mit unmittelbarer Beweidung des Neuaufwuchses von Gras, keine SOC-steigernden Wirkungen einstellen. Im vorgesehenen ersten Schritt des aftercare-Managements soll OHNE Beweidung nach Ansaat mehrjähriger Gräser eine geschlossene Grasnarbe erzeugt werden. Solche Untersuchungen haben bislang noch nicht stattgefunden. Wigley et al., 2020, wiesen allein schon durch den Effekt der Nicht-Beweidung einen deutlichen Anstieg des SOC nach. Mit einer größeren SOC-Zunahme durch vermehrte OM-Einträge unter nachgesäten perennierenden Gräsern ist nach Ausdünnung zu rechnen. In der Praxis kann durch angemessene „nicht-destruktive“ Beweidung das Graswachstum und die Gras-Wurzelbildung weiter gezielt gefördert werden. Arbeiten von Snyman, 2012, in Namibia, zeigen die positive wachstumsstimulierende Wirkung behutsamer Beweidung auf das Gras-Schoss- und Wurzelwachstum:

OM-Eintrag in den Boden in Abhängigkeit der Beweidungsintensität



SNYMAN, H.A., 2012. *Gids Tot die Volhoubare Produksie van Weiding (Guide to the sustainable production of grass pastures)*. Landbouweekblad & Landbou.com, Heerengracht, Cape Town, South Africa

Vergleichsbild A zeigt die Wirkung der Beweidung auf die Wurzelmassenbildung wenn auf eine Gras-Stoppelhöhe von 40 mm abgeweidet wird:

Links, wenn die Beweidung jede Woche stattfindet

Mitte, wenn die Beweidung alle 2 Wochen stattfindet

Rechts, wenn die Beweidung alle 6 Wochen stattfindet

Vergleichsbild B zeigt die Wirkung einer wöchentlich stattfindenden Beweidung bis zu einer Stoppelhöhe von

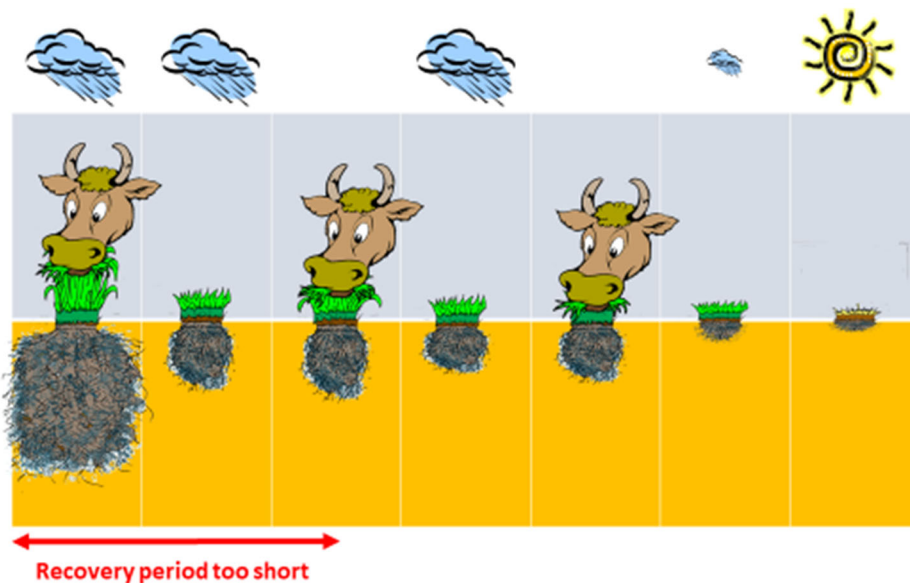
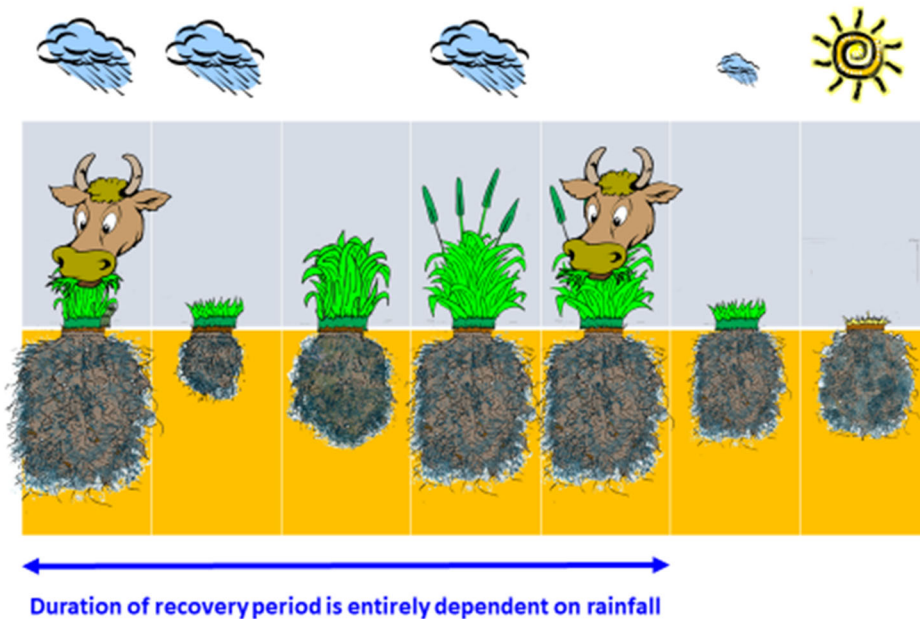
Links, bis auf 20 mm Höhe, Mitte, bis auf 40 mm Höhe, Rechts, bis auf 80 mm Höhe

Beide Vergleichsbilder machen zwei Stellgrößen deutlich, die direkt die Ausbildung von Wurzelmasse beeinflussen:

1. Weidefrequenz
2. Beweidungsintensität, ausgedrückt durch verbleibende Gras-Stoppelhöhe.

Handreichung für eine Beweidung von Gras nach Buschausdünnung:

- WENN Standweide das Gras bis auf 20mm kürzt, dann nur mit Abstand zur erneuten Beweidung. Die Länge der Ruheperiode wird vom Regen bestimmt: je mehr und zuverlässiger es regnet, desto kürzer die benötigte Ruheperiode, und umgekehrt. In Namibia: oftmals bis zu 150 Tage Ruhe.



- Abweiden einer zu beweidenden Fläche nur bis zur Stoppelhöhe von 80mm. Das wäre unteres limit einer einzuhaltenden Stoppelhöhe. Praktische Empfehlung: 10-15 cm Stoppelhöhe hinterlassen, um Bodenkruke gegen Sonnenbestrahlung und Wind zu schützen.
- Beide Empfehlungen führen zu einer Stimulierung des Wachstums, zu einem Schließen der Grasnarbe. Man beachte die ungeheure Wurzelbildung und -bodendurchdringung durch Grasswurzeln. Der damit einhergehende hohe Eintrag an Organischer Substanz in den Boden geht einher mit üppigem Wachstum des Grasschosses an der Oberfläche. Die inhaltliche Verzahnung von großer Futtermenge und dichtem und tiefem Wurzelwerk ist hervorzuheben. In der mäßigen Futterbereitstellung durch zu häufiges und zu intensives Abweiden sowie der daraus resultierenden Unterentwicklung

des Wurzelsystems werden die negativen Effekte eines Weidemissmanagements direkt sichtbar.

Daten von Snyman zeigen das Gewichtsverhältnis auf Trockensubstanzbasis zwischen oberirdischen und unterirdischen Grasanteilen:

	kg DM / ha	
oberirdisch	368	1238
unterirdisch	615	2341

Bei schlecht gemanagter Weide mit nur 368 kg DM Futterangebot braucht ein Rind für die Gewichtszunahme von 60 kg auf 300 kg in zwei Jahren eine Weidefläche von 11,4 ha (keine Zufütterung). Hier kommen zusammen:

Zu hohe stocking rate, zu lang währende Weideperiode pro Fläche. Hier wird Gras entweder zu häufig abgeweidet oder zu tief abgeweidet. Gras entwickelt nur ein dürftiges Wurzelwerk, welches für ein verbessertes oberirdisches Wachstum Voraussetzung ist. Graszusammensetzung ändert sich, von mehr- zu einjährig. Letzteres hat gravierende Auswirkungen auf den Futterwert des Aufwuchses, da zwischen ein- und mehrjährigem Gras enorme Unterschiede in der freiwilligen Futteraufnahme durch Weidetiere besteht.

Bei gut gemanagter Weide mit 1238 kg DM Futterangebot braucht ein Rind für die Gewichtszunahme von 60 auf 300 kg in zwei Jahren eine Weidefläche von 3,4 ha.

Angepasste Weideintensität (Häufigkeit und Dauer der Beweidung) stresst das Gras nicht, stimuliert im Gegenteil das Wachstum ober- und unterirdischer Pflanzenteile, vor allem wenn die Grasnarbe noch überwiegend mehrjährig ist. Im Ergebnis sind hier neben 1238 kg Futter /ha nutzbar unter gleichzeitiger Einbringung von 2341 kg Organischer Masse in den Boden.

Persönliche Kommunikation mit A. Rothauge und C. Lindeque, beide Namibia, deuten auf TS-Hektarerträge im Bereich von 3 t oberirdisch hin. Unterirdisch würde ein solcher Ertrag einer Wurzeltrockenmasse von 5,7 t/ha entsprechen.

Kennzeichen einer gut gemanagten Weide

Zusammensetzung der Grasnarbe zeigt überwiegend mehrjährige Gräser. Tierzahl pro Fläche kann ruhig hoch sein, wenn der Auftrieb pro Fläche (Aufenthalt auf der Weidefläche) nur kurzfristig ist.

Farmer monitort laufend die Höhe des abgeweideten Grases. Er verhindert ein Abweiden unter 12 - 8 cm Höhe. Er passt die Tierzahl dazu mit Blick auf Weidegröße und zur Verfügung stehende Futtermenge an. Da es etwa 400 verschiedene Grassorten mit höchst unterschiedlicher Schmackhaftigkeit und Nährwert gibt, ist das Monitoring der Stoppelhöhe auch auf das spezifische Monitoring der sechs von Rindern bevorzugten Grassorten auszudehnen (Indikator-Gräser). Der Farmer ist in der Lage, auch große Herden schnell auf andere Weiden umzutreiben. Hoher Tierbesatz bei der Weide verhindert im Prinzip selektives Fressverhalten. Somit ist der Aufwand für Weidegrasmonitoring erhöht. Aufwand an Personal zum Weideumtrieb/-wechsel erhöht. Futtermenge optimiert. Flächenbedarf pro Rind unter 4 ha.

Änderung der Landnutzung im encroacherbush

Weltweit wird in Zeiten des Klimawandels steigendes Gewicht auf die Carbon-Sequestrierung gelegt. Messgröße ist SOC. SOC als Dauerform eines Kohlenstoffeintrags entspringt ursprünglich der Eintragsmenge an organischer Substanz in den Boden. Wir wollen quantifizieren, wieviel SOC sich aus OM bildet unter namibischen Klimabedingungen. Wir wissen, daß

Im Mix-Vegetationsbereich C3-Busch und C4-Gras, wie typisch unter encroacherbush, auch nach Jahrzehnten der Busch Invasion die Masse an SOC aus der Grasproduktion vergangener Zeiten stammt. Je tiefer im Boden, desto deutlicher überwiegt der Kohlenstoff aus C4-Quellen. VIELE Arbeiten konstatieren unter Busch höhere C-Werte als unter Gras. Dies ist begründet mit dem oberflächlichen Eintrag von litter-fall / Tier-C in die oberste Bodenschicht. Bei Betrachtung größerer Bodentiefen / -profile erkennt man die Oberflächenwirkung des Buschs auf den Gesamtboden-SOC. Prinzipiell wurzelt Busch tiefer als Gras, hat damit potenziell die Möglichkeit, an tiefer liegende Wasserressourcen zu gelangen. Im semiariden Savannenbereich bildet Busch in der Hauptsache flache Wurzelsysteme aus, um via Regencatchment auch geringe Niederschläge zu nutzen.



Typische Wurzelstruktur eines Busches, *Acacia mellifera*. Jede Stufe = 1 m

Mittlerweile ist man auch in den temperierten Zonen zu der Erkenntnis gelangt, dass Dauergrünland ebensoviel C sequestriert wie Wald. Die historische Bevorzugung von Wald als C-Senke muss korrigiert werden. Solch traditionelle Ansichten transferieren sehr leicht die historische „temperierte“ Waldfunktion auf den „Busch“ am semiariden Standort.

- Über ein innovatives und intelligentes extensives Land-Nutzungsmanagement sowohl eine angepasste traditionelle namibische Beef-Produktion, als auch Holzenergie-Gewinnung und Bushfeed-Herstellung kombiniert erreicht werden kann.
- Über die Buschdünnung nach den offiziellen Vorgaben in Namibia quasi eine Savanne-auf-Zeit wiederhergestellt werden kann. Licht am Boden und ein im Vergleich zu unter Busch erhöhter Niederschlagseintrag und Bodenerwärmung fördert ein intensives Graswachstum. Dies kann durch zeitgleiche Nachsaat mehrjähriger Gräser in Richtung erhöhten Futterwerts gezielt beeinflusst werden.
- Dem Gras durch Nichtbeweidung über den notwendigen Zeitraum Gelegenheit gegeben werden muss, die Grasnarbe zu schließen, einen geschlossenen starken Verband zu bilden und auszusamen. In dieser Zeit ist der Busch-Stockausschlag zu kontrollieren. Dies könnte mit browsern geschehen, oder selective foliar arboricide application (spraying).
- Stockausschlag über manuelles Schneiden der Neuaustriebe in Richtung von 2 stärkeren Trieben durchgeführt werden kann im Bereich von holzhaltigen Neutrieben für

die Holzkohleherstellung. Jedoch dauert die Ausbildung genügend verholzter Teile für diese Nutzung etliche Jahre.

- Dass insbesondere die Ernte von dünnen und weniger verholzten Trieben geeignet ist, hochwertiges Bushfeed zu produzieren. Futterwert-bestimmend sind die Blätter und die Kambiumschicht unter der Rinde.
- Es einen direkten Zusammenhang gibt zwischen **Viel Futter** für Weiderinder und **Viel Wurzel**produktion für einen großen Kohlenstoffeintrag in den Boden.

Obige Darstellung des Beweidungseinflusses auf oberirdische Futtermenge und unterirdische Wurzelmasse-Bildung erfordert schnelles und fachgerechtes Reagieren des Farmers. Seine Weidebestockung kann ruhig hoch sein, wenn er gleichmäßiges Abfressen sicherstellen kann und die Höhe des abgefressenen Weidegrases sicher erfasst. Stellgröße könnte eine Nachweide-Stoppelhöhe von 8 cm sein, die als Pflanzenrest erhalten bleiben muss. Ist sie erreicht, müssen die Tiere auf eine neue Weide (Veld?) getrieben werden. Hier entstehen erhöhte Anforderungen an Aufsicht und Management und Umtriebsschlagkraft.

Soweit holzschnittartig und noch nicht bis ins letzte Detail ausgearbeitet könnte ein neuer Ansatz einer innovativen Landnutzung aussehen. **Von zentraler Bedeutung ist der Eintrag organischer Substanz durch Gras in den durch Ausdünnung erzeugten Grasphasen. OS-Eintrag ist Voraussetzung zur Bildung von SOC.**

Eine stufenweise Vergrößerung der sequenzierten C-Menge ist mit jeder Grasförderungsphase im Management zu erwarten, da physiologisch

- C4-Pflanzen (Gras) einen höheren Blattflächenindex besitzen als C3-Busch <https://de.wikipedia.org/wiki/>
- C4-Pflanzen eine höhere Photosyntheserate bei hohen Temperaturen erzielen <https://de.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/photorespiration--c3-c4-cam-plants/a/c3-c4-and-cam-plants-agriculture>
- C4-Pflanzen mindestens 70 % ihrer Masse als Wurzeln ausbilden

Es bleibt Standort-abhängig (Boden, Temperatur, Niederschlag) welche Mengen C/a von Gras genau gebildet werden können. Nicht bekannt ist derzeit, wie schnell die nicht abgestorbenen Baumstümpfe mit ihrem Stockausschlag einen erneuten Netto-Kohlenstoffeintrag in den Boden fortsetzen können. Das unterirdische Wachstum beträgt, vorsichtig geschätzt, beim C₃-Busch zwar nur unter 1/3 der Gesamtmassenzunahme, es könnte aber aufgrund der Tatsache, dass ihr Wurzelsystem über Jahre intakt erhalten bleibt und lediglich realisierten Stockausschlag zu versorgen hatte, überraschend schnell gehen, da ein übergroßer Wurzelteller dicht unter der Oberfläche arbeitsfähig erhalten bleibt.

Als sicher kann angenommen werden, dass sich im Wechsel von Buschausdünnung und der beschriebenen Nutzungsvarianten der oberirdischen Teile der SOC aufgrund der Gras-Wachstumseinschübe mit positivem Vorzeichen entwickeln wird.

Ganz neue Beiträge von Zhou et al., 2021, Nitrogen availability controls plant carbon storage with warming, Research Square, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-432920/v2>, stützen die Erwartung, dass in Zeiten bereits vorliegender Temperaturerhöhung der Atmosphäre ein gesteigertes Pflanzenwachstum und damit ein gesteigerter C-Eintrag stattfindet. Zhou et al. stellen dies insbesondere für Standorte fest, in denen unter Temperatursteigerung das Pflanzenwachstum durch einen N-Mangel limitiert wird. Da im extensiven rangeland in der Regel keine

Düngungsmaßnahmen wie in der Landwirtschaft erfolgen, kann hier eine erhöhte C-Einlagerung erwartet werden. Zitat. *In factorial N × warming experiments, warming increased plant biomass more strongly under low N than under high N availability. Together, these results suggest that warming stimulates plant C storage most strongly in ecosystems where N limits plant growth.*

Terrer et al., 2021, A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂, nature, vol. 591, March 2021, p. 599ff, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8>, weisen für Gräser eine stärkere SOC-Bildung als für „forests“ unter dem Einfluss gesteigerter atmosphärischer CO₂-Werte nach. Zitat: *We found that, overall, SOC-stocks increase with eCO₂ in grasslands (8 ± 2 per cent) but not in forests (0 ± 2 per cent).*

So verstetigen die Ergebnisse von Zhou et al., 2021, und Terrer et al., 2021, die berechnete Annahme, dass die grasbetonte Vegetation nach Buschdünnung über ein erhöhtes Wachstum bzw. Wurzelwachstum zu einem erhöhten C-Eintrag (SOC-stock) führen wird.

Die angepasste und hohe Photosyntheseleistung von C₄-Gräsern, die mindestens 70 % ihrer Biomasse als Wurzelwerk in den Boden einbringen und darüber hinaus durch eine erhöhte C- und Nährstoffdynamik zu intensiverem Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit beitragen, lassen Savannen-Ökosysteme geeigneter erscheinen für eine wirtschaftliche Nutzung durch den Menschen. Im direkten Vergleich unter sonst gleichen Bedingungen sequestrieren C₄-Gräser mehr Kohlenstoff im Boden als C₃-Gehölze (Wigley et al., 2020). Ein direkter Nachweis auf unbelasteten neutralen Böden (ohne historischen Bewuchs oder Mischbewuchs) steht noch aus. **Aus bereits vorhandenen Erkenntnissen an trockenen Standorten in Afrika kann eine Sequestrierungs-Mehrleistung durch Gräser im Vergleich zu encroacher-Spezies in der Größenordnung von etwa 2-3-mal mehr erwartet werden.** Dies ist kombinierter Effekt aus mehrfach höherer Photosynthesefläche, effektiverer CO₂-Bindung, bessere Anpassung an hohe Licht- und Temperaturbedingungen und der Verteilung der produzierten Pflanzenmasse. Gräser entwickeln ein mehrfach größeres Wurzelsystem als Busch.

Der erweiterte Blick auf die Artenvielfalt, eine deutlich bessere Wasserbilanz (Grundwassergewinnung) und der Nutzungseinschränkungen für die Menschen lässt eine reine encroacher-busch-Vegetation als vergleichsweise minderwertig und nicht erstrebenswert erscheinen (February et al., 2020; Coetsee et al., 2013). Namibia benötigt hierfür Lösungen, die praktisch sind, dem Land, seiner Wirtschaft und seinen Menschen dienen.

Was bedeuten die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse für die Biomassepartnerschaft Hamburgs mit Namibia?

- Die SOC Forschung gibt Hinweise für eine **THG optimierte Bewirtschaftung** der Buschbiomasse. Die genaue Quantifizierung am namibischen Standort bedarf weiterer Forschung.
- Der unter gewissen klimatischen, geologischen und botanischen Aspekten nachweisbare höhere SOC Gehalt im Boden geht zum größten Teil auf **die vorherige Graslandschaft** zurück. Unter Busch akkumuliert sich C₃-SOC zum vorhandenen Gras-SOC.

- Ein Großteil der Kohlenstofffestlegung durch C₄ Gräser wird selbst durch die Überformung durch invasive Baumarten nicht wieder veratmet, sondern **bleibt im Boden weitgehend erhalten**

Wenn wir den Busch ausdünnen (Entnahme von 30% der aufstehenden Biomasse) und danach über 6 bis 8 Jahre eine Grasnarbe entwickeln, können wir einen Großteil der Grasbiomasse (50% der unterirdischen Wurzelbiomasse) dauerhaft und zusätzlich zum vorhandenen Biomassepotenzial sequestrieren. Nach Wang et al., 2009, können am trockenen Standort (390 mm, Rand der Kalahari) die Hälfte der von Graswurzeln eingebrachten Kohlenstoffmenge dauerhaft eingelagert werden.

Die aufstehende Biomasse wird zum Teil entnommen und kann über 20 Jahre nachwachsen. Auf den freigestellten Flächen entwickelt sich eine Grasnarbe, die von Weidetieren oder durch manuelles Ernten genutzt wird. Die Stockausschläge der Encroacherbüsche werden beerntet, um Tierfutter zu produzieren, welches in Namibia insbesondere in Trockenzeiten sehr wertvoll ist.

Die Grasnarbe wird oberirdisch genutzt bzw. verdorrt in der Trockenzeit. Der weitaus größere unterirdische Teil (70%) bleibt jedoch erhalten und akkumuliert C über die 6 Jahre Grasnutzung. Danach mit allmählicher Wiederkehr der Büsche wird die Grasnarbe sukzessive verdrängt und verschwindet nach wenigen Jahren unter den zuwachsenden Büschen. Setzt man hier die Ergebnisse von Zhou und anderen voraus, so wird ein Teil (ca. 50%) dieser in 6 Jahren gebildeten unterirdischen Grasbiomasse nicht verstoffwechselt und bleibt somit im System als sequestrierter Kohlenstoff vorhanden. Dieser addiert sich dann zu dem im Kreislauf geführten Kohlenstoff der invasiven Büsche (wie in einer nachhaltigen Forstwirtschaft wird der entnommene und veratmete Kohlenstoff durch das Aufwachsen der Büsche wieder festgelegt). Zudem werden durch die Ausdünnung also die Entnahme von konkurrierenden Büschen die **Wachstumsbedingungen der Restbiomasse** verbessert.

Buschdünnung und Savannen-/Grasförderung haben deutliche Auswirkungen auf eine höhere Artenvielfalt. Die Hälfte der Artenvielfalt geht durch die Invasion von Buschvegetation in Grasbiome verloren (Coetsee et al., 2013; Bond & Parr 2010, Parr et al. 2012). Bush-encroachment verschlechtert das Funktionieren des Ökosystems negativ, indem die Bodenhydrologie und die Nährstoffkreisläufe negativ verändert werden (Asner et al. 2004, Bond 2008). Puttock et al., 2014, stellten einen direkten Bezug zwischen Busch und fluvialen Erosionen der oberen Bodenschichten dar. Schlagartiger unwetterartiger Starkregen ist in der Lage unter encroacher-Busch im vormaligen Grasland (Turnbull et al., 2008b; Puttock et al., 2012) erhebliche SOC-Mengen auszuwaschen. So geht nicht nur vom Gras vormals sequestrierter und sicher in der Bodenstruktur eingebrachter SOC verloren. Es kommt zu Nährstoffverlusten aus den oberen Bodenschichten. Allgemein leidet darunter die Bodenfruchtbarkeit. Unbedeckte Flächen, wie sie unter Busch eher die Regel sind, sind in verstärktem Masse erosionsgefährdet (Reid et al., 1999; Ridolfi et al., 2008; Wainwright et al., 2011). Unbedeckter Boden in der Folge von fortschreitender Buschdehnung birgt potenziell die Möglichkeit, durch niederschlagsbedingte Auswaschungen zum Verlust vorhandener Kohlenstoffsinken beizutragen.

Ein interessanter Einwurf von E. Gray, zitiert aus Coetsee et al., 2013, bemerkt, dass auch der Anblick von Wildtieren durch Buschdickicht beeinträchtigt wird, ein Umstand, der insbesondere

den Wildlife-Tourismus trifft. Ebenso negativ beeinträchtigt wird die Weidetierhaltung (Burrows *et al.* 1990, Mugasi *et al.* 2000, de Klerk 2004).

Buschdünnung und Savannen-/Grasförderung haben deutliche Auswirkungen auf einen höheren Eintrag von Niederschlagswasser in das Grundwasser, weil Buschvegetation dreimal mehr Wasser oberirdisch aufhält als Gras. Wasser, das nicht den Boden erreicht, steht nicht für Wachstum, Nährstoff-turnover und Kohlenstoffsequestrierung zur Verfügung und füllt auch die vorhandenen Grundwasserbestände nicht auf.

Welche möglichen Vorteile hätte demnach eine gezielte und nachhaltige Bewirtschaftung der Buschbiomasse für den THG Haushalt:

1. Nachhaltige Nutzung der aufstehenden Biomasse zur Substitution fossiler Energieträger
2. Nachhaltige Nutzung von Stockausschlägen zur Substitution von THG entlang der Produktions- und Lieferkette von Futtermitteln
3. Nachhaltige Substitution von THG durch Nutzung des Grasaufwuchses zu z.B. Papierproduktion
4. Zusätzliche C4 Sequestrierung durch Einbau von Graswurzelbiomasse unter dem invasiven Buschsystem
5. THG Reduktion durch die Produktion von „Rain Fed“ Beef und die daraus resultierende Substitution von „Grain Fed Beef“ (Siehe Anhang).

Welche möglichen Probleme und Unsicherheiten existieren?

1. Es kann aufgrund der Literaturexegese nicht eindeutig gesagt werden welche Mengen von Graswurzelbiomasse an einem bestimmten Standort in Namibia wirklich nachhaltig im Boden festgelegt werden. Dies gilt jedoch im gleichen Maße für C₃-Wurzelbiomasse.
2. Es kann nicht endgültig bestimmt werden, wie stark der Nachwuchs des ausgedünnten Bestandes über die 20 Jahre sein wird und wie stark dieser die Neubildung von Stockausschlägen und Grasnarbe beeinträchtigt (Breiten statt Höhenwachstum?)
3. Es kann noch nicht endgültig bestimmt gesagt werden welche THG Emissionen durch den Ersatz des konventionellen Tierfutters durch heimisches Buschfutter vermeiden werden können.
4. Abhängig von den Niederschlägen haben wir mehr oder weniger Grasaufwuchs. Im ungünstigsten Fall sehen wir eine langjährige Dürre ohne nennenswerte Zunahme an Grasbiomasse. In diesem Extremfall würde jedoch auch der Buschbestand degradieren und CO₂ freisetzen.
5. Die Zahlen zu den THG Emissionen von „Rain Fed“ und „Grain Fed“ Rindern schwanken stark je nach Land, Art der Haltung, Rasse und Nutzungsrichtung (Milch oder Fleisch).

4. Zusammenfassung

Zieht man die Literatur zu Rate und existiert ein echter Wille, dem Wunsch der namibischen Regierung nach Unterstützung zu entsprechen, sollte über eine Partnerschaft an einem konkreten Beispiel nachgedacht werden.

Wenn die oben formulierte These zutrifft, besteht die reale Möglichkeit, dass Namibia sein CO₂ Speicherpotential erhöhen, kann bei gleichzeitiger stofflicher und energetischer Nutzung der Biomasse. Die erhöhten Sequestrationspotenziale könnten genügen, um die vergleichsweise geringen THG Emissionen durch Ernte, Verarbeitung und Transport weitgehend zu kompensieren.

Im Entwicklungsinteresse von Namibia, im Interesse der Natur und Umwelt Namibias und im Interesse des globalen Klimaschutzes und der internationalen Solidarität sollte man die Prüfung dieser Option nicht verweigern.

Zumal alle Biomasseentnahmen, die unter dem jährlichen Zuwachs von ca. 12 Mio t. Biomasse liegen, ohnehin das Gesamtspeichervolumen der Buschbiomasse nicht reduzieren. Ein Biomassehof würde gerade einmal 250.000 t Biomasse jährlich entnehmen.

Vollständig im Rahmen der nationalen Strategie Namibias zur Nutzbarmachung für den Menschen ist eine Inwertsetzung des encroacher-Buschs auf zwei Drittel der Namibischen Fläche zu sehen. Der Beginn einer solchen Nutzung wurde mit einem Biomasseindustriepark (BIP) ins Auge gefasst. Natürlich ist ein einziges und erstes BIP nicht in der Lage, auch nur den Zuwachs der ständig weiter wuchernden encroacher-Vegetation zu kompensieren. Jedoch kann hier on-the-job ein Wertschöpfungsweg beschrritten und untersucht werden. Das Verhindern des Betretens dieses Weges stellt jedoch für Namibia das Auslassen einer tragfähigen und nachhaltigen Möglichkeit dar, die nationale Buschkatastrophe konstruktiv anzugehen. Namibische Gesetze und Verordnungen lassen nur im bestimmten Rahmen eine Ausdünnung zu, Buschernte ist antragspflichtig, Arbeiten nach erteilter Lizenz werden von Fachbehörden überwacht. Es ist bekannt, dass Managementfehler in der Weideführung u.a. zur Invasion indigener Gehölze beitragen. Es ist auch bekannt, dass reine Totalrodungen eine wenig brauchbare und nachhaltig nicht nutzbare Pflanzengesellschaft erzeugen. Es ist bekannt, dass eine **lokale** Nutzung der ungeheuren Holzmengen nicht möglich ist. Hier sind weder die Holzkohleherstellung, noch die Verstromung, noch die Herstellung von Schulmöbeln oder die Herstellung von Pfählen zum Zaunbau geeignete stoffliche Nutzungen, um die nationale Katastrophe der Verbuschung zu beherrschen.

Daher ist angedacht, die kaskadische Nutzung des Buschholzes als einkommensgenerierenden Kern wirtschaftlich sinnvoller Lösungen anzugehen. Selbst die **im Brennglas akademischer Bedenken existierenden Befürchtungen**, an irgendeiner Stelle würden sich suboptimale Ergebnisbestandteile in der Zukunft ergeben, dürfen kein Grund sein, den sozioökonomischen status-quo und den gefährlich weiterwachsenden Busch zu erhalten und damit das Leben, die Lebensqualität der namibischen Landbevölkerung weiter zu verschlechtern. In dem Zusammenhang durchgeführte Rechenversuche, die Größe des Problems kleinzurechnen, dürften aus namibischer Sicht als recht durchschaubar eingestuft werden. Namibia hat sich hilfesuchend an Deutschland gewandt. Man muss nicht abwarten, bis Namibia sich an andere wendet.

5. Wie geht es weiter?

Ein zukünftiges Landnutzungssystem im Nachgang einer beginnenden Buschausdünnung ist in seinen Konturen und Komponenten schon erkennbar. Beim Betrieb des ersten BIP sind wichtige Erhebungen durchzuführen, Untersuchungen der Veränderungen auf Bewuchs und Kohlenstoffeinlagerungen sind vorzunehmen, damit nicht wieder Erkenntnisse von anderen Orten auf der Welt, die andere Böden, andere Pflanzen und vielleicht doppelt so hohe Niederschläge aufweisen, zu grundlegenden Übertragungsungenauigkeiten und Fehl-Annahmen führen.

Die in sinnvollen Kontext zu stellenden Nutzungsphasen schließen ein: Nachsaat mit mehrjährigen Gräsern bei Ausdünnung, Grasaufwuchs und natürliches Aussamenlassen, Ernte des Busch-Stockausschlags (Busch kurzhalten), Grasernte zur Futtermittelsgewinnung, Grasernte zur Papierherstellung, Beweidung durch Grazer, Beweidung durch Haustier-browser (Ziegen) zur Buschkontrolle, Beweidung durch wilde browser zur Buschkontrolle, erneutes Wachsenlassen des Buschs zur wiederholten Verwendung. In schachbrettartigem Muster oder in Streifenform wird etwa ein Drittel des Landes in das Nutzungssystem überführt. Dabei fallen etwa 12 t Holztrockenmasse pro Hektar bei der Ausdünnung an. Ausdünnung bedeutet, dass die oberirdischen Teile des Buschs entfernt werden. 30 bis 35 % des Busch-Gesamtbiomasse verbleibt im Boden. Diese bleibt am Leben, der nachwachsende Stockausschlag wird im System genutzt/geerntet. Nach 6 bis 8 Jahren (der Zeitraum ist im Vorhinein nicht exakt planbar, weil die zukünftigen Regenfälle nicht vorhersehbar sind) erhält der Busch die Möglichkeit, oberirdisch wieder Holz zu entwickeln. Dieses wird nach 12 bis 15 Jahren geerntet und das rollierende Nutzungsmuster beginnt wieder von vorne.

Auf ausgedünntem Land, in welchem die Buschwurzeln und der darin enthaltene Boden-Kohlenstoff erhalten bleiben, wird sich Gras innerhalb von zwei Jahren ohne Weidedruck zu einer geschlossenen Grasnarbe schließen. Das bedeutet, dass auf diesem 1/3 ha statt Busch nun Gras wächst und einen **netto 2- bis 3-mal höheren Kohlenstoffeintrag über die Wurzeln einbringt**. Vier bis sechs Jahre lang wird sich das Graswurzelwerk bei sachgerechter Nutzung des Landes vergrößern bei variierender Nutzung der oberirdischen Grasteile. Auf diese Weise erhöht diese Fläche den Kohlenstoffeintrag kontinuierlich. Mit beginnendem Holznachwuchs (Stockausschlag) wird das Graswachstum zurückgehen, jedoch verbleiben die Wurzeln und der eingebrachte Kohlenstoff im Boden. Ein Teil des Gras-SOC wird im Boden unter Busch veratmet.

Damit beginnt er, wenn auch pro Zeiteinheit nicht so intensiv, wie Gras das pro Flächeneinheit könnte, Kohlenstoff einzulagern. Wie oben erläutert, hält die Produktion von lange nachweisbarem, weil nur schlecht abbaubarem C₃-Wurzel-C über 12 Jahre an. In der Summe wird sich der Bodenkohlenstoff durch regelmäßige Einschübe von Gras-Aufwuchsphasen auf der Zeitachse anreichern. Die exakten Mengen der Einträge sind durch Langzeit-Monitoring zu erfassen und zu quantifizieren. An die Genauigkeit des Nachweises objektiver C-Zunahmen im Boden dürften hohe Ansprüche zu stellen sein, weil hierdurch eine nutzungsinduzierte Zunahme, ein Wachstum der Boden-Kohlenstoffsenske dokumentiert wird.

Literatur

- ASNER, G. P., ELMORE, A. J., OLANDER, L. P., MARTIN, R. E. & HARRIS, A. T. 2004. Grazing systems, ecosystem responses, and global change. *Annual Review of Environment and Resources* 29:261–299.
- BOND, W. J. & PARR, C. L. 2010. Beyond the forest edge: ecology, diversity and conservation of the grassy biomes. *Biological Conservation* 143:2395–2404.
- BOND, W. J. 2008. What limits trees in C4 grassland and savannas? *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 39:641–659.
- Boutton, T.W.; Liao, J.D.; Filley, T.; Archer, S.R. Belowground carbon storage and dynamics accompanying woody plant encroachment in a subtropical savanna. In *Soil Carbon Sequestration and the Greenhouse Effect*, 2nd ed.; Lal, R., Follett, R., Eds.; Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 2009; pp. 181–205.
- Boutton, T.W.; Archer, S.R.; Midwood, A.J.; Zitzer, S.F.; Bol, R. $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. *Geoderma* **1998**, 82, 5–41.
- Bowling D, Egan J, Hall S, Risk D (2015) Environmental forcing does not induce diel or synoptic variation in the carbon isotope content of forest soil respiration. *Biogeosciences* 12: 5143–5160
- Buitenwerf R, Bond W, Stevens N, Trollope W (2012) Increased tree densities in South African savannas: > 50 years of data suggests CO₂ as a driver. *Glob Change Biol* 18:675–684
- BURROWS, W. H., CARTER, J. O., SCANLAN, J. C. & ANDERSON, E. R. 1990. Savanna ecology and management: Australian perspectives and intercontinental comparisons. *Journal of Biogeography* 17:503–512.
- Chen X, Hutley LB, Eamus D (2005) Soil organic carbon content at a range of north Australian tropical savannas with contrasting site histories. *Plant Soil* 268:161–171
- Creamer, C.A.; Filley, T.R.; Boutton, T.W. Long-term incubations of size and density separated soil fractions to inform soil organic carbon decay dynamics. *Soil Biol. Biochem.* **2013**, 57, 496–503. [[CrossRef](#)] *Soil Syst.* **2019**, 3, 73 18 of 18
- Coetsee C, Gray EF, Wakeling J, Wigley BJ, Bond WJ (2013) Low gains in ecosystem carbon with woody plant encroachment in a South African savanna. *J Trop Ecol* 29:49–60
- Coetsee C, Bond WJ, February EC (2010) Frequent fire affects soil nitrogen and carbon in an African savanna by changing woody cover. *Oecologia* 162:1027–1034. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1490-y>
- Craine JM, Morrow C, Stock WD (2008) Nutrient concentration ratios and co-limitation in South African grasslands. *New Phytol* 179:829–836
- De Castro EA, Kauffman JB (1998) Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *J Trop Ecol* 14:263–283

De Klerk, J.N. (2004). Bush encroachment in Namibia. Report on Phase 1 of the Bush Encroachment Research, Monitoring and management Project, Ministry of environment and tourism, Windhoek, Namibia.

Dintwe K, Okin GS (2018) Soil organic carbon in savannas decreases with anthropogenic climate change. *Geoderma* 309:7–16

February EC, Higgins SI (2010) The distribution of tree and grass roots in savannas in relation to soil nitrogen and water. *South Afr J Bot* 76:517–523. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2010.04.001>

February EC, Cook GD, Richards AE (2013) Root dynamics influence tree–grass coexistence in an Australian savanna. *Austral Ecol* 38:66–75. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2012.02376.x>

February EC, Higgins SI (2016) Rapid leaf deployment strategies in a deciduous savanna. *PLoS One* 11

February EC, Pausch J and Higgins SI (2020) Major contribution of grass roots to soil carbon pools and CO₂ fluxes in a mesic savanna. *Plant Soil* <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04649-3>

Filley, T.R.; Boutton, T.W.; Liao, J.D.; Jastrow, J.D.; Gamblin, D.E. Chemical changes to non-aggregated particulate soil organic matter following grassland-to-woodland transition in a subtropical savanna. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* **2008**, 113, G03009.

Frost P, Menaut JC, Walker B, Medina E, Solbrig T (1986) Responses of savannas to stress and disturbance. International Union of Biological Sciences Special Issue 10 Paris, France

Grace J, José JS, Meir P, Miranda HS, Montes RA (2006) Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. *J Biogeogr* 33:387–400

Higgins SI, Keretsetse M, February EC (2015) Feedback of trees on nitrogen mineralization to restrict the advance of trees in C₄ savannas. *Biol Lett* 11:20150572

Higgins SI, Delgado-Cartay MD, February EC, Combrink HJ (2011) Is there a temporal niche separation in the leaf phenology of savanna trees and grasses? *J Biogeogr* 38:2165–2175. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02549.x>

Holdo RM, Mack MC (2014) Functional attributes of savanna soils: contrasting effects of tree canopies and herbivores on bulk density, nutrients and moisture dynamics. *J Ecol* 102: 1171–1182

Hudak A, Wessman C, Seastedt T (2003) Woody overstorey effects on soil carbon and nitrogen pools in South African savanna. *Austral Ecol* 28:173–181

Jackson RB, Banner JL, Jobbágy EG, Pockman WT, Wall DH (2002) Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature* 418:623–626

Kulmatiski, A.; Beard, K.H. Woody plant encroachment facilitated by increased precipitation intensity. *Nat. Clim. Chang.* 2013, 3, 833–837.

Lehmann CE, Anderson TM, Sankaran M, Higgins SI, Archibald S, Hoffmann WA, Hanan NP, Williams RJ, Fensham RJ, Felfili J (2014) Savanna vegetation–fire–climate relationships

differ among continents. *Science* 343:548–552

Makhado RA, Scholes RJ (2011) Determinants of soil respiration in a semi-arid savanna ecosystem, Kruger National Park, South Africa. *Koedoe* 53:00–00

MUGASI, S. K., SABIITI, E. N. & TAYEBWA, B. M. 2000. The economic implications of bush encroachment on livestock farming in rangelands of Uganda. *African Journal of Rangeland and Forage Science* 17:64–69.

Nackley LL, West AG, Skowno AL, Bond WJ (2017) The nebulous ecology of native invasions. *Trends Ecol Evol* 32:814–824

Neely, C., and S. Bunning, FAO 2009. Review of Evidence on Dryland Pastoral Systems and Climate Change: Implications and opportunities for mitigation and adaptation

Ohlde, G. et al., 2019, Biomass Production and Carbon Sequestration by Cultivation of Trees under Hyperarid Conditions using Desalinated Seawater (Sewage Water) *Journal of Agriculture Food and Development*, Vol. 5

Paech, K., *Biochemie und Physiologie der Sekundären Pflanzenstoffe* © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1950

PARR, C. L., GRAY, E. F. & BOND, W. J. 2012. Cascading biodiversity and functional consequences of a global change-induced biome switch. *Diversity and Distributions* 18:493–503.

Polley, H.W.; Mayeux, H.S.; Johnson, H.B.; Tischler, C.R. Viewpoint: Atmospheric CO₂, soil water, and shrub/grass ratios on rangelands. *J. Range Manag.* **1997**, 50, 278–284.

Puttock, A., J. A. J. Dungait, R. Bol, E. R. Dixon, C. J. A. Macleod, and R.E. Brazier (2012), Stable carbon isotope analysis of fluvial sediment fluxes over two contrasting C₄-C₃ semi-arid vegetation transitions, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 26(20), 2386–2392, doi:10.1002/rcm.6257.

Puttock, A, Dungait, J. A. J., Macleod C.J.A., Bol, R., and Brazier R.E., 2014, Woody plant encroachment into grasslands leads to accelerated erosion of previously stable organic carbon from dryland soils, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 119, 2345–2357, doi:10.1002/2014JG002635.

Ratter JA, Ribeiro JF, Bridgewater S (1997) The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Ann Bot* 80:223– 230

Reid, K. D., B. P. Wilcox, D. D. Breshears, and L. MacDonald (1999), Runoff and erosion in a pinon-juniper woodland: Influence of vegetation patches, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1869–1879, doi:10.2136/sssaj1999.6361869x.

Ridolfi, L., F. Laio, and P. D’Odorico (2008), Fertility island formation and evolution in dryland ecosystems, *Ecol. Soc.*, 13(1), 5.

Riginos C (2009) Grass competition suppresses savanna tree growth across multiple demographic stages. *Ecology* 90: 335–340. <https://doi.org/10.1890/08-0462.1>

Richards AE, Dathe J, Cook GD (2012) Fire interacts with season to influence soil respiration in tropical savannas. *Soil Biol Biochem* 53:90–98

Saiz, G.; Bird, M.; Wurster, C.; Quesada, C.A.; Ascough, P.; Domingues, T.; Schrod, F.; Schwarz, M.; Feldpausch, T.R.; Veenendaal, E.; et al. The influence of C3 and C4 vegetation on soil organic matter dynamics in contrasting semi-natural tropical ecosystems. *Biogeosciences* **2015**, 12, 5041–5059.

Seghier J, Floret C, Pontanier R (1995) Plant phenology in relation to water availability: herbaceous and woody species in the savannas of northern Cameroon. *J Trop Ecol* 11:237–254

Terrer C., R. P. Phillips, B. A. Hungate, J. Rosende, J. Pett-Ridge, M. E. Craig, K. J. van Groenigen, T. F. Keenan, B. N. Sulman, B. D. Stocker, P. B. Reich, A. F. A. Pellegrini, E. Pendall, H. Zhang, R. D. Evans, Y. Carrillo, J. B. Fisher, K. Van Sundert, Sara Vicca & R. B. Jackson, 2021, A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂, *nature*, vol. 591, March 2021, p. 599ff, <https://doi.org/101038.s41586-021-03306-8>

Turnbull, L., R. E. Brazier, J. Wainwright, L. Dixon, and R. Bol (2008b), Use of carbon isotope analysis to understand semi-arid erosion dynamics and long-term semi-arid land degradation, *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 22, 1697, doi:10.1002/rcm.3514.

https://www.unique-landuse.de/images/publications/vereinheitlicht/2020-05_Greenhouse_Gas_Assessment_Namibia.pdf

Venter, Z.S.; Cramer, M.D.; Hawkins, H.J. Drivers of woody plant encroachment over Africa. *Nat. Commun.* 2018, 9, 2272.

Wainwright, J., L. Turnbull, T. G. Ibrahim, I. Lexartza-Artza, S. F. Thornton, and R. E. Brazier (2011), Linking environmental regimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity, *Geomorphology*, 126, 387–404, doi:10.1016/j.georph.2010.07.027.

Wang, Lixin, Okin, Gregory S., Caylor, Kelly K., Macko, Stephen A. (2009) Spatial heterogeneity and sources of soil carbon in southern African savannas. *Geoderma* 149 (2009) 402–408

Wigley BJ, Augustine DJ, Coetsee C, Ratnam J, Sankaran M (2020) Grasses continue to trump trees at soil carbon sequestration following herbivore exclusion in a semi-arid African savanna. *Ecology*

Wigley BJ, Bond WJ, Hoffman M (2010) Thicket expansion in a South African savanna under divergent land use: local vs. global drivers? *Glob Change Biol* 16:964–976

Wynn, J.G.; Bird, M.I. C4-derived soil organic carbon decomposes faster than its C3 counterpart in mixed C3/C4 soils. *Glob. Chang. Biol.* 2007, 13, 2206–2217.

Zhou Y, Boutton TW, Wu XB (2019) A Three-Dimensional Assessment of Soil ¹³C in a Subtropical Savanna: Implications for Vegetation Change and Soil Carbon Dynamics. *Soil Syst.* 2019, 3, 73; doi:10.3390/soilsystems3040073

Zhou Guiyao, César Terrer, Bruce Hungate, Natasja van Gestel, Xuhui Zhou, Kees Jan van Groenigen, 2021, Nitrogen availability controls plant carbon storage with warming, *Research Square*, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-432920/v2>