

# Augmentation des stocks d'humus dans un système agroforestier de sept ans en Suisse centrale

Benjamin Seitz<sup>1</sup>, Emilie Carrard<sup>2</sup>, Stéphane Burgos<sup>2</sup>, Dylan Tatti<sup>2</sup>, Felix Herzog<sup>1</sup>, Mareike Jäger<sup>3</sup> et Firesenai Sereke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, 8046 Zürich, Suisse

<sup>2</sup>Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL, 3052 Zollikofen, Suisse

<sup>3</sup>AGRIDEA, 8315 Lindau, Suisse

Renseignements: Benjamin Seitz, e-mail : benjamin.seitz@agroscope.admin.ch



**Figure 1** | La parcelle agroforestière étudiée en Suisse centrale, avec 545 pommiers et engrais vert dans la zone cultivée, a accumulé des quantités significatives de carbone et d'azote après sept ans déjà. (Photo: Emilie Carrard, HAFL)

## Introduction

Dans la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle, les arbres fruitiers à haute tige constituaient un élément du paysage culturel suisse. Plus de 80 % de ces arbres ont été abattus en raison de la mécanisation de la production agricole, de l'expansion des zones de peuplement et du commerce international des produits agricoles. Des 13,5 millions d'arbres fruitiers à haute tige existant en 1951, seulement 2,9 millions existaient encore en 2001 et leur nombre se stabilise actuellement à environ 2,0 millions (Walter *et al.* 2010). Le développement de systèmes agroforestiers mo-

dernes veut contrer cette tendance (Nehrllich *et al.* 2013). L'utilisation combinée de cultures arables et d'arbres (concernant aussi bien la production de bois de valeurs que celle d'arbres fruitiers à haute tige) permet de créer des systèmes productifs qui peuvent être travaillés avec une technique agricole moderne et qui sont économiquement viables (Sereke *et al.* 2015).

Les systèmes agroforestiers sont également très intéressants du point de vue agroécologique. Les services écosystémiques de tels systèmes modernes incluent la protection contre l'érosion, la régulation des ressources en eau, l'accumulation de carbone dans le sol et la biomasse, la promotion de la biodiversité aérienne ou encore un paysage attractif (Kaeser *et al.* 2010). Les données concernant ces différents services écosystémiques sont encore lacunaires et beaucoup de déclarations se basent actuellement sur de la modélisation. De plus, l'expression des différents services écosystémiques peut sans doute varier selon la région et la combinaison des espèces d'arbres et de cultures utilisées.

Dans cette étude, nous voulions étudier la possibilité d'un monitoring régulier des stocks d'humus dans des systèmes agroforestiers suisses en complément à un monitoring aérien existant (Kuster *et al.* 2012). Pour cela, un système agroforestier de sept ans a été choisi en Suisse centrale et les stocks de carbone organique et d'azote totale présents dans les sols y ont été mesurés.

## Matériel et méthodes

### Parcelle agroforestière en Suisse centrale

La parcelle agroforestière étudiée se trouve dans le canton de Lucerne (fig. 1). La parcelle mesure 5,6ha et est cultivée selon les réglementations PER. En 2009, 545 pommiers des variétés Boskoop et Spartan ont été plantés en lignes orientées nord-ouest à sud-est. Les lignes d'arbres occupent 22 % de la surface de la parcelle. Entre les rangs, une rotation de blé d'hiver, de maïs, de colza, de fraises

et de jachères tournantes est cultivée (Kuster *et al.* 2012). Les cultures sont fertilisées avec des engrais minéraux ou avec un lisier mixte issu de la détention des vaches allaitantes et de l'élevage porcin. Les lignes d'arbres ne sont pas fertilisées.

Le sol est de type brun calcaire profond, non pierreux et présente une texture limon sableux jusqu'à limon (BGS 2010). Les horizons le constituant sont les suivants: Ahp (0–25 cm; horizon de surface labouré) – Bx (25–32 cm; horizon d'altération compacté) – B (32–60 cm; horizon d'altération) – Bcn (60–100 cm; horizon d'altération avec des concrétions ponctuelles).

Depuis 2011, le développement des arbres et des cultures est suivi dans les quatre lignes au nord de la parcelle. Les mesures de l'humus ont été effectuées dans la troisième ligne d'arbres et la zone cultivée adjacente, ceci afin d'éviter au maximum les effets de bord de champs (fig. 2).

### Echantillonnage

Le 4 novembre 2016, la récolte des échantillons a été effectuée sur la troisième ligne d'arbres et la zone cultivée adjacente. Dans la ligne d'arbres, cinq répétitions ont été fixées entre les arbres N° 6 et 7, N° 11 et 12, N° 16 et 17, N° 21 et 22 et N° 26 et 27 (fig. 2). Les échantillons de sol ont été prélevés à mi-distance entre deux arbres au milieu de la ligne des arbres (fig. 3). Pour chaque répétition, des échantillons ont également été prélevés dans la zone cultivée à une distance de 3,5 et 7,25 m de la ligne d'arbres (fig. 3). La distance de 7,25 m correspond à la moitié de la distance entre deux lignes d'arbres. Le plan d'échantillonnage comprend donc trois emplacements (ligne d'arbres, quart et centre de la zone cultivée) avec chacun cinq répétitions. Par répétition, quatre prélèvements ont été effectués à la tarière à une profondeur de 60 cm pour l'analyse de la granulométrie du sol et de la teneur en carbone (C) et azote (N). Trois échantillons ont également été prélevés au cylindre aux profondeurs de 13–18 cm et de 38–43 cm (fig. 3).

### Analyses de laboratoire

La granulométrie, les teneurs totales de C et N ( $C_{\text{tot}}$  et  $N_{\text{tot}}$ ) et de calcaire ont été mesurées sur les échantillons prélevés à la tarière pour les profondeurs de 0–20 cm, 20–40 cm et 40–60 cm. La densité de la terre fine et la fraction de squelette ont été déterminées sur les échantillons au cylindre pour les profondeurs de 13–18 cm et 38–43 cm. Les échantillons à la tarière ont été séchés au four durant 72 heures à 40 °C puis tamisés à 2 mm. La granulométrie a été mesurée selon la méthode de référence fédérale KOM (Agroscope 1996). Les teneurs de  $C_{\text{tot}}$  et  $N_{\text{tot}}$  ont été mesurées avec un CN-Analyzer (Vario MAX CN, Elemen-

**Résumé** ■ Les systèmes agroforestiers modernes ont le potentiel de relier une agriculture productive avec les «objectifs environnementaux pour l'agriculture». Ces systèmes étant testés depuis peu de temps par quelques agriculteurs, il n'y a pour l'instant que très peu de données concernant leurs effets environnementaux. Dans cette étude, nous avons examiné comment les stocks d'humus ont changé dans un système agroforestier de sept ans en Suisse centrale. Les résultats montrent qu'après sept ans déjà, une accumulation substantielle d'humus a eu lieu dans la ligne des arbres (+18 %) comparé avec la zone cultivée. Étonnamment, l'accumulation d'humus n'est pas limitée à la couche superficielle du sol. Elle est aussi détectable jusqu'à 60 cm de profondeur. Une première estimation de l'accumulation d'humus annuelle est de 0,86 t de carbone par hectare et par année et de 91 kg d'azote par hectare et par année pour les 60 premiers centimètres du sol. L'ampleur de cette première estimation montre que d'autres recherches sur la dynamique de l'humus dans les systèmes agroforestiers sont d'une grande importance pour la protection du sol, du climat et de l'eau.

tar). La teneur de calcaire et la teneur de carbone inorganique ( $C_{\text{inorg}}$ ) en résultant ont été déterminées selon la méthode de référence fédérale  $\text{CaCO}_3$  (Agroscope 1996). La teneur de C organique ( $C_{\text{org}}$ ) a été calculée selon la formule  $C_{\text{org}} = C_{\text{tot}} - C_{\text{inorg}}$ . La densité de la terre fine et de la fraction de squelette ont été déterminées sur les trois échantillons au cylindre (100 cm<sup>3</sup>) prélevés aux 15 emplacements et à deux profondeurs (13–18 et 38–43 cm). Les échantillons au cylindre ont été séchés au four durant 72 heures à 40 °C puis pesés (Poids<sub>tot</sub>). Après saturation des échantillons en eau pendant une nuit, la fraction de squelette a été séparée à l'aide d'un tamis de 2 mm. Le poids des pierres sèches (Poids<sub>pi</sub>) a été déterminé et leur volume (Vol<sub>pi</sub>) estimé selon le déplacement d'eau dans un cylindre gradué. La densité de la terre fine (D) a été calculée selon la formule  $D = (\text{Poids}_{\text{tot}} - \text{Poids}_{\text{pi}}) / (100 \text{ cm}^3 - \text{Vol}_{\text{pi}})$ .

### Stocks d'humus et accumulation d'humus

Pour le calcul des stocks d'humus, le profil du sol a été divisé en quatre segments: 0–20 cm, 20–25 cm, 25–40 cm et 40–60 cm. Les teneurs déterminées de  $C_{org}$  et  $N_{tot}$  ont été attribuées aux segments respectifs selon leurs profondeurs du sol. La densité de la terre fine pour la profondeur de 13–18 cm a été utilisée pour les deux segments de l'horizon de labour (0–20 et 20–25 cm). La densité de la terre fine pour la profondeur de 38–43 cm a été utilisée pour les deux segments plus profonds.

Les stocks de  $C_{org}$  et  $N_{tot}$  calculés ont été normalisés afin de pouvoir être comparés à une masse uniforme de terre fine par  $m^2$  selon la méthode *Equivalent-Soil-Mass* (Lee et al. 2009; Schrumpf et al. 2011). Dans le cas présent, les couches de sol suivantes ont été retenues: 0–350 kg terre fine/ $m^2$  ( $\approx$  0–25 cm), 350–550 kg terre fine/ $m^2$  ( $\approx$  25–40 cm) et 550–900 kg terre fine/ $m^2$  ( $\approx$  40–60 cm).

Comme il n'existe pas de données antérieures à 2009 concernant l'état du sol de la parcelle étudiée, ni une parcelle de contrôle agronomique, l'accumulation de C et N dans le sol ne peut être calculée que sous certaines assumptions: les stocks moyens de  $C_{org}$  et  $N_{tot}$  présents dans la zone cultivée entre les lignes d'arbres se trouvent en équilibre et n'ont pas changé depuis 2009; les stocks

moyens du sol dans la zone cultivée correspondent à ceux d'une hypothétique parcelle de contrôle non agroforestière.

Ainsi, l'accumulation de C et N par hectare et par année est calculée en utilisant la formule suivante:

Taux d'accumulation par hectare et par année =  $(0,22 [\text{Surface des lignes d'arbres}] * \text{Stock du sol ligne d'arbre} - 0,22 * \text{Stock du sol zone cultivée}) / 7$  [Nombres d'années].

Il est important de noter que les taux calculés d'accumulation de C et N sont une estimation et que, de plus, celle-ci est spécifique pour ce lieu et ce système. Les taux peuvent donc être différents sur d'autres sols ou dans des systèmes avec d'autres espèces d'arbres.

## Résultats

### Carbone organique et azote total

Des différences significatives concernant les stocks de  $C_{org}$  et  $N_{tot}$  ont déjà pu être détectées sept ans après l'établissement de ce système agroforestier (tabl. 1). Les stocks de  $C_{org}$  et  $N_{tot}$  présents dans le sol sont plus élevés de 18 % dans la ligne des arbres que dans la zone cultivée entre les lignes d'arbres. L'enrichissement du sol en C et N est significativement détectable dans la couche superficielle



Figure 2 | Vue aérienne de la parcelle agroforestière étudiée. Les échantillons du sol ont été prélevés dans la troisième ligne d'arbres et la zone cultivée adjacente (r = répétition). (Photo: swisstopo)

**Tableau 1 | Stocks de carbone organique et d'azote total du sol, normalisés par des masses uniformes de terre fine (TF) par mètre carré. Les masses choisies correspondent environ à la profondeur du sol 0–25 cm (0–350 kg TF/m<sup>2</sup>), 25–40 cm (350–550 kg TF/m<sup>2</sup>), 40–60 cm (550–900 kg TF/m<sup>2</sup>). Les stocks du sol sont présentés comme valeur moyenne  $\pm$  1 erreur type, des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $p < 0,05$ ).**

Location	Stock de C 0–350 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de C 350–550 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de C 550–900 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de C 0–900 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de N 0–350 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de N 350–550 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de N 550–900 kg TF/m <sup>2</sup>	Stock de N 0–900 kg TF/m <sup>2</sup>
	kg C/m <sup>2</sup>				kg N/m <sup>2</sup>			
Ligne d'arbres	8,31 $\pm$ 0,38 a	3,97 $\pm$ 0,21 a	5,14 $\pm$ 0,23 a	17,42 $\pm$ 0,76 A	0,92 $\pm$ 0,04 a	0,46 $\pm$ 0,02 a	0,62 $\pm$ 0,02 a	2,00 $\pm$ 0,08 A
Zone cultivée (quart)	6,72 $\pm$ 0,27 b	3,50 $\pm$ 0,17 b	4,45 $\pm$ 0,37 b	14,67 $\pm$ 0,79 B	0,77 $\pm$ 0,02 b	0,41 $\pm$ 0,01 b	0,51 $\pm$ 0,02 b	1,69 $\pm$ 0,06 B
Zone cultivée (centre)	6,63 $\pm$ 0,38 b	3,41 $\pm$ 0,22 b	4,64 $\pm$ 0,18 b	14,69 $\pm$ 0,75 B	0,78 $\pm$ 0,04 b	0,41 $\pm$ 0,02 b	0,53 $\pm$ 0,02 b	1,72 $\pm$ 0,08 B

( $\approx$  0–25 cm) mais également dans les couches sous-jacentes ( $\approx$  25–40 cm et 40–60 cm). Aucune différence n'a été détectée dans la zone cultivée en fonction de la distance à la ligne d'arbre.

#### Taux d'accumulation de carbone et d'azote

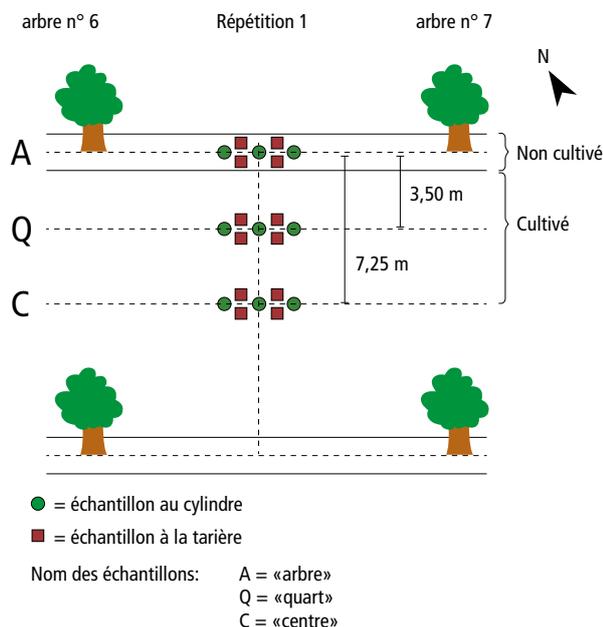
Les taux d'accumulation de C et de N ont été calculés pour la parcelle agroforestière entière (soit 22 % de la surface occupée par les lignes d'arbres et 78 % de la surface occupée par la zone cultivée) par rapport à une hypothétique parcelle de contrôle (100 % de la surface occupée par la zone cultivée). La couche superficielle ( $\approx$  0–25 cm) de la parcelle agroforestière présente une accumulation de  $C_{org}$  à un taux de 0,51 t C par hectare et année. Pour l'ensemble de la profondeur du sol étudiée ( $\approx$  0–60 cm), il résulte un taux d'accumulation de 0,86 t C par hectare et année et de 91 kg N par hectare et année.

## Discussion

Les résultats montrent qu'après quelques années déjà, l'établissement d'une parcelle agroforestière a une influence significative sur l'état du C et du N de la parcelle considérée. Dans le contexte de notre étude, des quantités significatives de C et de N ont été accumulées dans la couche superficielle ainsi que dans les couches sous-jacentes du sol de la ligne d'arbres. Les taux d'accumulation de C calculés de 0,51 t C par hectare et par année pour la couche superficielle, respectivement de 0,86 t C par hectare et année pour toute la profondeur de sol étudiée, doivent être classés comme élevés, mais se trouvent néanmoins dans un cadre réaliste. Des futurs travaux avec une résolution plus détaillée de la densité du sol (p.ex. un échantillonnage de cylindres tous les 10 cm) pourraient améliorer la précision de cette première estimation. L'enrichissement d'azote de 91 kg N par hectare et année pour l'ensemble du sol étudié provient du ratio C/N relativement constant de  $8,62 \pm 0,10$

en moyenne. Ce nombre doit cependant être considéré comme très élevé, d'autant plus que le taux d'accumulation a été calculé pour la parcelle mais que l'accumulation se situe sous les lignes d'arbres. Il est également nécessaire de considérer que dans la parcelle étudiée, il n'y a pas de fixation d'azote imputable aux cultures plantées (blé d'hiver, maïs, colza, fraises, jachères tournantes et pommiers). Presque aucune légumineuse n'a été trouvée dans la végétation herbacée appartenant à la ligne d'arbre, une étude approfondie de la végétation n'a toutefois pas été entreprise. L'origine et le reste alternatif de l'azote accumulé représentent donc une question de recherche prioritaire pour l'importance pratique des résultats démontrés ici. Si une partie de l'azote accumulé était expliquée avec des pertes d'azote inférieures, des systèmes agroforestiers pourraient être une alternative intéressante pour des régions de grandes cultures, qui comportent actuellement des valeurs élevées de nitrate dans les eaux souterraines (Kaeser *et al.* 2010).

Un regard dans la littérature internationale montre que les connaissances concernant la dynamique de l'humus dans les systèmes agroforestiers restent encore fortement lacunaires. Peu de données sont actuellement disponibles concernant les systèmes agroforestiers dans les zones tempérées, d'autant plus que la plupart des études se cantonne au C et aux couches superficielles du sol (Lorenz et Lal 2014). Comme pour toute recherche concernant l'humus, il ressort également ici que la création de méthodes de référence pour la détermination des stocks d'humus est un élément impératif (Jandl *et al.* 2014). La plupart des études montrent une accumulation de C de 0,25–0,3 t C par hectare et par année dans la couche superficielle (Lorenz et Lal 2014; Cardinael *et al.* 2017), bien que pas de changement mais une accumulation pouvant aller jusqu'à 1,04 t C par hectare et par année ait également été documentée (Lorenz et Lal 2014). Pour les couches profondes du sol, les données sont encore moins abondantes. Cependant, Upson et Burgess (2013)



**Figure 3** | Schéma de l'échantillonnage concernant la première répétition. Les échantillons des autres répétitions ont été prélevés selon le même schéma.

montrent que la dynamique du C peut être différente en fonction de la profondeur du sol, ce qui implique que le profil de sol entier doit être considéré. Dans leur étude, Upson et Burgess montrent que leur système agroforestier étudié a mené à une forte accumulation de C dans les 60 premiers centimètres, mais que ceci est en partie compensé par des pertes de C dans les couches plus profondes du sol. Cela se recoupe avec des résultats expérimentaux qui montrent que des contributions de C élevées dues à des exsudats racinaires peuvent mener à une minéralisation renforcée de la matière organique (effet de priming; Bernal *et al.* 2016).

De plus, Cardinael *et al.* (2017) montrent que, selon une étude basée sur cinq systèmes agroforestiers en France, dans de tels systèmes jeunes, l'accumulation d'humus se déroule dans la ligne d'arbres et non dans la zone cultivée entre les lignes d'arbres. C'est seulement dans un système agroforestier plus âgé, quand les arbres sont plus larges et ont formé un système racinaire plus grand, que l'accumulation d'humus peut aussi être décelée dans la zone cultivée entre les lignes d'arbres. Cela renforce notre assomption concernant le fait que les stocks de C et N dans la zone cultivée de la parcelle agroforestière de sept ans en Suisse centrale ne sont pas différents d'une parcelle avec de grandes cultures.

L'accumulation rapide de C, qui peut être détectée déjà dans des systèmes agroforestiers jeunes, soulève la question de savoir si les arbres d'un système agroforestier sont la seule cause de l'accumulation de C. Dans la présente étude, des échantillons de sol ont été prélevés aux endroits présentant la distance maximale par rapport aux arbres plantés. Aussi, Cardinael *et al.* (2017) suspectent que, dans les premières années, l'accumulation de C dans la ligne d'arbres est causée en particulier par la végétation herbacée. Conséquemment, une hypothèse pour de futurs travaux est donc la suivante: un système agroforestier consiste en deux puits de C: un à court terme par la végétation herbacée dans la ligne d'arbres, et un deuxième à plus long terme par les arbres matures dans la zone cultivée entre les lignes d'arbres.

## Conclusions

La parcelle agroforestière étudiée présente, après sept ans déjà, un enrichissement significatif des quantités de C et de N dans le sol. Ceci non seulement dans la couche superficielle, mais également dans les couches sous-jacentes du sol. Le C ainsi accumulé dans le sous-sol pourrait être d'un grand intérêt dans le contexte de séquestration de C étant donnée sa durée de résidence plus élevée. Il est cependant important que des projets de recherche futurs sur ce sujet considèrent l'ensemble de la profondeur du sol.

L'accumulation rapide de C après la constitution du système agroforestier n'est vraisemblablement pas causée par les arbres, mais par la végétation herbacée dans les lignes des arbres, ce qui soulève des questions intéressantes sur la durée du puits de C. De plus, la question de la provenance du N accumulé, et ce que serait son pool alternatif, doit être considérée par d'autres mesures et par un bilan de N détaillé. Si le N accumulé consiste en des pertes de N évitées, ceci serait un grand gain pour l'agriculteur mais aussi pour l'environnement.

**Riassunto**

**Aumento delle riserve di humus in un sistema agroforestale settennale nella Svizzera centrale**

I sistemi agroforestali moderni hanno il potenziale di coniugare un'agricoltura produttiva con il raggiungimento migliorato degli «obiettivi ambientali per l'agricoltura». Tuttavia, in Svizzera, questi sistemi sono testati solo recentemente da pochi agricoltori. Pertanto non sono praticamente disponibili dati sugli effetti ambientali dei sistemi agroforestali moderni. Nel presente studio, abbiamo analizzato i cambiamenti delle riserve di humus in un sistema agroforestale settennale della Svizzera centrale. I risultati dimostrano che già dopo sette anni è possibile osservare un aumento sostanziale dell'accumulo di humus (+18 %) nei filari di alberi rispetto alle superfici coltivate. Sorprendentemente l'aumento di humus non si limita solamente allo strato più superficiale del terreno, ma è stato attestato anche fino a una profondità di 60 cm. Una prima stima dell'aumento annuo di humus nella parcella agroforestale studiata si eleva a 0,86 t di carbonio per ettaro e anno e 91 kg di azoto per ettaro e anno per la profondità del terreno 0–60 cm. L'ordine di grandezza di questa prima stima dimostra che, nell'ottica della protezione del terreno, del clima e delle acque, è di fondamentale importanza effettuare ulteriori ricerche nell'ambito delle dinamiche dell'humus nei sistemi agroforestali.

**Summary**

**Increased SOM stocks in a seven-year-old agroforestry system in central Switzerland**

Modern agroforestry systems have the potential to combine productive agriculture with increased environmental benefits. Because these systems have only recently been tested by a few farmers in Switzerland, there is hardly any data available on the environmental impacts of modern agroforestry systems. In this study, we examined the changes in soil organic matter (SOM) stocks in a seven-year old agroforestry system in central Switzerland. Our results show that after just seven years, a substantial accumulation of SOM (+18 %) can be observed in the tree row compared to in the cultivated land. Surprisingly, the accumulation of SOM was not restricted to the topsoil, but was also detected up to a soil depth of 60 cm. An initial estimate of the annual SOM accumulation in the agroforestry plot investigated stands at 0,86 t of carbon per hectare and year and 91 kg nitrogen per hectare and year for a soil depth of 0–60 cm. The magnitude of this initial estimate shows that further research into the SOM dynamics of agroforestry systems is of great importance from the perspective of soil, climate and water protection.

**Key words:** agroforestry, soil organic matter, carbon accumulation, nitrogen.

#### Bibliographie

- Agroscope, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Agroscope, Zürich.
- Bernal B., McKinley D. C., Hungate B. A., White P. M., Mozdzer T. J. & Megonigal J. P., 2016. Limits to soil carbon stability; Deep, ancient soil carbon decomposition stimulated by new labile organic inputs. *Soil Biol. Biochem.* **98**, 85–94.
- BGS, 2010. Klassifikation der Böden der Schweiz. Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz, Geschäftsstelle, Luzern. 86 p.
- Cardinael R., Chevallier T., Cambou A., Béral C., Barthès B. G. *et al.*, 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* **236**, 243–255.
- Jandl R., Rodeghiero M., Martinez C., Cotrufo M. F., Bampa F. *et al.*, 2014. Current status, uncertainty and future needs in soil organic carbon monitoring. *Sci. Total Environ.* **468–469**, 376–383.
- Kaeser A., Palma J., Sereke F. & Herzog F., 2010. Umweltleistungen von Agroforstwirtschaft. Agroscope, Zürich. ART-Bericht 736. 12 p.
- Kuster M., Herzog F., Rehnus M. & Sorg J. P., 2012. Innovative Agroforstsysteme – On farm monitoring von Chancen und Grenzen. *Agrarforsch. Schweiz* **3** (10), 470–477.
- Lee J., Hopmans J. W., Rolston D. E., Baer S. G. & Six J., 2009. Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail. *Agric. Ecosyst. Environ.* **134**, 251–256.
- Lorenz K. & Lal R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **34**, 443–454.
- Nerlich K., Graeff-Höninger S. & Claupein W., 2013. Agroforestry in Europe: a review of the disappearance of traditional systems and development of modern agroforestry practices, with emphasis on experiences in Germany. *Agroforest. Syst.* **87**, 475–492.
- Schrumpf M., Schulze E. D., Kaiser K. & Schumacher J., 2011. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences* **8**, 1193–1212.
- Sereke F., Graves A. R., Dux D., Palma J. H. N. & Herzog F., 2015. Innovative agroecosystem goods and services: key profitability drivers in Swiss agroforestry. *Agron. Sustainable Dev.* **35**, 759–770.
- Upson M. A. & Burgess P. J., 2013. Soil organic carbon and root distribution in a temperate agroforestry system. *Plant Soil* **373**, 43–58.
- Walter T., Klaus G., Altermatt F., Ammann P., Birrer S. *et al.*, 2010. Landwirtschaft. In: Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900: Ist die Talsohle erreicht? (Ed. Lachat T. *et al.*). Bristol-Schriftenreihe 25. Haupt Verlag, Berne, 64–123.