

Comparaison de sols reconstitués et formés naturellement

Matthias Stettler^{1,2}, Christoph Stettler¹ et Beat Huber-Eicher²

¹Institut Géotechnique SA, 3007 Berne

²Haute école suisse d'agriculture HESA, 3052 Zollikofen

Renseignements: Matthias Stettler, e-mail: matthias.stettler@geo-online.com, tél. +41 78 622 12 89



Reconstitution du sol: déversement de la terre superficielle sur le sous-sol préalablement préparé.

Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la supervision pédologique de la construction du nouveau tronçon ferroviaire Mattstetten (BE)-Rothrist (AG). Une grande partie du tronçon, construit entre 1995 et 2004, comprend des tranchées étroites et des tunnels pour satisfaire aux exigences de la protection du paysage et la conservation des sols agricoles. L'utilisation temporaire de surfaces agricoles pour des zones d'installation, d'entreposage,

des pistes d'accès ou des excavations de chantier a exigé des mesures de protection du sol pendant la période de construction (décapage et entreposage du sol), lors de la reconstitution et au moment de la restitution aux exploitants (remise en culture, exploitation consécutive).

Les effets à plus long terme de ces mesures de protection prescrites par l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol (Anonyme 1998) sont encore peu connus (Kaufmann *et al.* 2009). Après les travaux de reconstitution, les sols ne sont que faiblement structurés et peu stables.

Il leur faut plusieurs années pour retrouver une certaine stabilité à travers une restructuration. Avant cela, les sols reconstitués sont très sensibles aux contraintes mécaniques (Schäffer *et al.* 2007; Kaufmann *et al.* 2009).

L'étude présentée ici avait pour but d'établir si les sols reconstitués sous surveillance pédologique présentaient, à la fin de la période de remise en culture, une plus grande résistance à la pénétration que des sols naturels.

Méthode

Sites d'étude

Le long de la ligne CFF, deux sites reconstitués ainsi que les parcelles avoisinantes, non touchées par les travaux de construction, ont été échantillonnés:

- **Wanzwil:** décharge de matériaux excavés, surface reconstituée d'environ 20 ha. Type de sol naturel: sol brun relativement épais, nature du sol: limon sableux. Pierrosité faible dans la couche supérieure (moins de 5 % de pierres), augmentant en profondeur (5–20 % de pierres).
- **Hersiwil:** tranchée couverte, surface reconstituée d'environ 15 ha. Types de sol naturel: sol brun épais et sol brun gleyifié d'épaisseur moyenne, nature du sol: limon. Pierrosité très faible (moins de 5 % de pierres).

Les sites ont été aménagés par des entreprises différentes avec des systèmes de drainage distincts. Les travaux de reconstitution ont été réalisés sur les deux sites selon les directives (Anonyme 2000; Anonyme 2001; Häusler et Salm 2001). Au moyen de tensiomètres¹, on a vérifié que le sol soit suffisamment ressuyé. La procédure de reconstitution était identique dans les deux sites (fig. 1): le matériel d'excavation a été stabilisé par du calcaire et compacté pour obtenir un remblai nivelé portant. Ce remblai a été entaillé à une profondeur de 40 cm avec un bulldozer juste avant de mettre en place le sol. Le sous-sol et la couche supérieure ont ensuite été déposés par bandes avec des excavatrices hydrauliques. Quatre semaines se sont écoulées avant le passage des tracteurs sur les surfaces fraîchement reconstituées pour permettre au sol de se tasser naturellement.

Pour la remise en culture, les CFF ont établi des règles culturales spécifiques en collaboration avec les spécialistes de la protection du sol. Ces règles faisaient partie des contrats avec les exploitants (Anonyme 2002). Pendant les trois premières années, les surfaces fraîchement reconverties ont dû êtreensemencées avec des mélanges à base de luzerne et utilisées comme prairies pour la production de foin ou d'ensilage. Après ce délai, les grandes cultures (sauf les sarclées) et la

Résumé Rail 2000 entre Mattstetten et Rothrist a été l'un des premiers grands chantiers où les directives de protection du sol, établies il y a une dizaine d'années, ont été rigoureusement suivies dans les phases de planification, de réalisation et de remise en culture, sous la surveillance de spécialistes de la protection du sol. Le but de l'étude présentée ici était d'apprécier l'efficacité de ces efforts au moyen de mesures simples couvrant le plus de surface possible. La résistance du sol a été mesurée avec un pénétromètre sur des surfaces reconstituées après la remise en culture ainsi que des surfaces à sol naturel. L'étude a porté sur deux sites (Wanzwil et Hersiwil) et deux types d'utilisation (prairie artificielle et culture de céréales), en tenant compte de l'humidité du sol. Les résultats montrent qu'après sept années de remise en culture, les sols reconstitués ne diffèrent pas des sols naturels avoisinants en ce qui concerne la résistance à la pénétration. Les mesures de protection ont donc empêché une compaction du sol. Les sols reconstitués présentaient même une résistance à la pénétration légèrement plus faible au niveau de la semelle de labour (25 – 35 cm). Cet avantage devrait être maintenu par des techniques culturales sans labour ou l'utilisation d'une charrue on-land.



Figure 1 | Reconstitution des sols agricoles sur la décharge de la sortie de tunnel à Schacht près de Wanzwil: A = sol supérieur; B = sous-sol; C = remblai nivelé avec des rigoles de drainage (flèche).

¹Appareil de mesure de la force de succion du sol.



Figure 2 | Ancienne décharge Schacht près de Wanzwil avec le périmètre de reconstitution encadré en bleu et les quatre parcelles d'étude encadrées en rouge (K-A = sol arable témoin; K-KW = prairie artificielle témoin; R-A = sol arable reconstitué; R-KW = prairie artificielle reconstituée). Au bas de l'image apparaît la nouvelle ligne de train.

pâture ont été à nouveau permises. Les surfaces sont cultivées maintenant depuis huit ans et seront bientôt restituées à leurs propriétaires pour une exploitation normale.

Essai au pénétromètre

Sur chaque site, deux parcelles de cultures arables semblables (céréales d'hiver) ont été choisies, aussi voisines que possible, une sur le sol reconstitué et l'autre sur un sol formé naturellement servant de témoin. Deux par-

celles de prairies artificielles ont été choisies de la même manière. Les observations ont donc porté sur quatre paires de parcelles, soit huit au total (tabl. 1; fig. 2 pour le site de Wanzwil).

La distance moyenne entre les paires de parcelles était d'environ 120 m (mesuré entre les centres des parcelles). Toutes les reconstitutions ont été effectuées en 2002. La distinction entre prairies et champs permet de tenir compte de l'effet du labour, qui réduit la densité apparente du sol dans les couches supérieures. Les prairies artificielles n'avaient pas été labourées depuis au moins un an, tandis que les parcelles cultivées l'avaient été environ six mois avant les mesures.

Deux paramètres du sol ont été mesurés: la résistance à la pénétration (RP) et l'humidité, exprimée par la teneur en eau volumétrique (θ). La résistance à la pénétration peut être interprétée comme une mesure du degré de compaction, et donc de la résistance à l'enracinement. La pointe du pénétromètre peut en effet être assimilée à une racine qui doit frayer son chemin dans le sol. Les mesures ont servi à calculer le cone index (CI), un indice standardisé formé par la moyenne des résistances en Mégapascal (MPa) mesurées à 1, 15, 30 et 45 cm de profondeur.

Les mesures ont été effectuées avec un Penetrologger type 06.15.SA de la firme Eijkelkamp (fig. 3). Cet appareil permet de mesurer jusqu'à 80 cm de profondeur en poussant manuellement la pointe de sondage dans le sol. Il est en outre muni d'une sonde d'humidité du sol (sonde TDR), qui détermine la valeur θ par résistance électrique dans les 10 cm supérieurs du sol. Les résultats enregistrés sont ensuite transférés sur un ordinateur.

Les huit parcelles d'essai étaient subdivisées en huit parties. Pour obtenir des mesures précises, sept pénétrations ont été effectuées par partie (au total $7 \times 8 \times 8 = 448$ mesures), à partir desquelles le CI moyen par parcelle a été calculé.

Tableau 1 | Plan de l'essai avec 8 combinaisons de traitements (2 sites * 2 types de culture * 2 âges de sol) et valeurs moyennes du cone index (CI).

Site	Type de culture	Etat du sol	CI (MPa)
Wanzwil	Céréales	reconstitué	1,29
		témoin	1,35
	Prairie artificielle	reconstitué	1,57
		témoin	1,79
Hersiwil	Céréales	reconstitué	2,29
		témoin	2,58
	Prairie artificielle	reconstitué	2,69
		témoin	2,51

Périodes de mesure et analyse statistique

L'humidité du sol θ influence fortement les mesures de résistance à la pénétration (Dexter *et al.* 2007; Kaufmann *et al.* 2009). Pour assurer des conditions de sol comparables, il était prévu d'effectuer les mesures au printemps 2009 dans un laps de temps aussi court que possible et en sol bien humide (capacité au champ). Ces conditions étaient remplies pour les mesures de Wanzwil, le 6 avril 2009. Par la suite, une période de sécheresse prolongée a empêché d'avoir les mêmes conditions d'humidité pour les mesures d'Hersiwil. Celles-ci ont finalement été effectuées le 13 mai 2009 après quelques précipitations. Même ainsi, la valeur θ était encore bien



Photo: E. Stettler, 2009

Figure 3 | Penetrologger de la firme Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek (NL), avec une sonde d'humidité reliée par câble. La plaque à la surface du sol sert de référence pour la profondeur des mesures.

inférieure à la capacité au champ, mais il était impossible de repousser davantage à cause du développement des cultures. Les mesures de Wanzwil et Hersiwil ne peuvent donc pas être directement comparées.

L'analyse statistique est basée sur les CI moyens de chaque parcelle (tabl. 1). Pour les quatre paires de parcelles (du même site et mode d'exploitation), les CI moyens ont été comparées entre le sol reconstitué et le sol témoin développé naturellement à l'aide du Wilcoxon signed-rank test.

Résultats

Pas de différence entre les sols témoin et reconstitués

L'analyse statistique n'a pas démontré de différence significative entre le CI moyen des sols témoin (CI = 2,06 MPa) et reconstitués (CI = 1,96 MPa; $n = 4$, $W = 3$, $p > 0,05$). La différence considérable entre les sites de Wanzwil et

Hersiwil s'explique par les θ différents: à Hersiwil, les sols plus secs ont davantage résisté à la pénétration (fig. 4). Les types de culture (prairie ou céréales) ne se sont pas non plus significativement différenciés entre eux, contrairement aux prévisions: on pensait que le CI serait plus élevé dans les prairies à cause du travail du sol moins important, de la charge en machines plus élevée lors des récoltes, de l'enracinement plus dense et de l'évaporation plus importante, qui réduisent l'humidité du sol θ .

Qualité physique du sol

La qualification physique du sol, basée sur la comparaison avec des normes et valeurs de référence, n'est possible qu'avec des mesures effectuées en sol humide. Les considérations suivantes ne sont donc valables que pour le site de Wanzwil.

Les CI des sols arables de Wanzwil, avec des valeurs de 1,35 MPa (témoin) et 1,29 MPa (reconstitué), étaient nettement inférieurs au seuil de 1,5 MPa donné par Locher et De Bakker (1990) comme limite supérieure de résistance n'entravant pas l'enracinement. Les prairies artificielles avaient un CI légèrement supérieur, soit 1,79 MPa (témoin) et 1,57 MPa (reconstitué). Cependant, les profils de résistance montrent que les différences entre champs et prairies existent systématiquement dans toutes les couches du sol. Ceci suggère une différence due à des caractères de sol tels que la texture, la pierrosité ou l'humidité.

La résistance à la pénétration (RP) de la couche supérieure du sol de Wanzwil (jusqu'à une profondeur d'environ 30 cm) était inférieure à la valeur de précaution de 2 MPa proposée par Horn *et al.* (2009). Dans le sous-sol (30 à 80 cm de profondeur), la RP était légèrement supérieure (2 à 3 MPa), et les valeurs des parcelles témoin dépassaient systématiquement d'environ 0,5 MPa celles des parcelles reconverties. Cette différence peut s'expliquer par la semelle de labour et la pierrosité. Les parcelles témoin montraient une augmentation prononcée de la RP à une profondeur de 25–40 cm, qui ne s'observait pas dans les parcelles reconverties. Cette différence est un résultat très satisfaisant qui montre l'efficacité des efforts fournis pour une remise en culture soignée. Dans les parcelles témoin, une pierrosité plus élevée en profondeur (dès environ 50 cm) a rendu difficile le maniement du Penetrologger, conduisant à une variabilité accrue des résultats.

Les résultats de Hersiwil montrent la problématique de mesures effectuées au-dessous de la capacité au champ: la RP diminue avec la profondeur dans le sous-sol, probablement à cause d'une augmentation de l'humidité en profondeur. Néanmoins, on note une semelle de labour dans la parcelle témoin des champs labourés. ➤

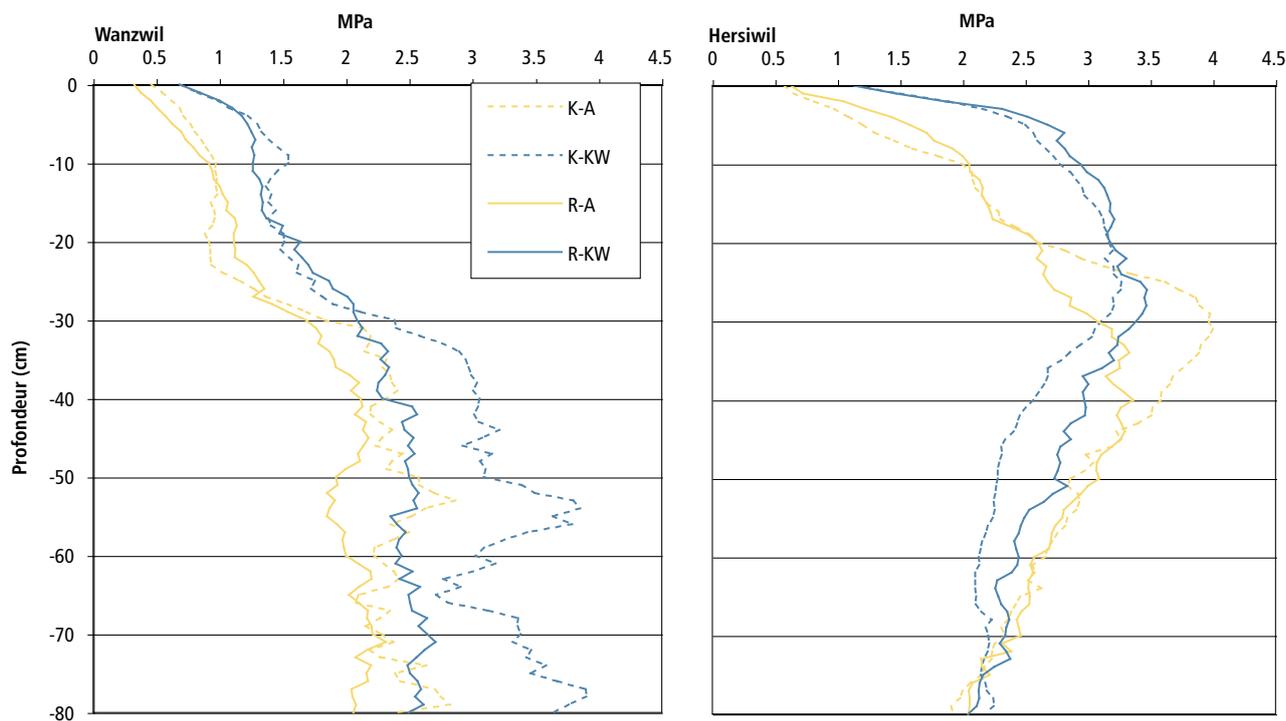


Figure 4 | Résistances moyennes à la pénétration par type de sol et de culture pour les deux sites (K-A = sol arable témoin; K-KW = prairie artificielle témoin; R-A = sol arable reconstitué; R-KW = prairie artificielle reconstituée).

Mesures de protection du sol efficaces

Nos résultats montrent que la densité des sols étudiés n'a pas augmenté de manière indésirable sous l'impact du décapage, de l'entreposage, de la reconstitution et de la remise en culture. Les sols reconstitués tendent à présenter une résistance à la pénétration plus faible au niveau de la semelle de labour (25–35 cm). Cette amélioration de la qualité physique devrait être maintenue par des techniques culturales sans labour ou l'utilisation de charrues on-land.

Les directives pour la protection du sol, introduites il y a 10 ans, ainsi que les règles établies par les CFF pour la remise en culture semblent avoir permis d'éviter une compaction du sol dans ce cas. Des recherches complémentaires permettront d'étudier comment le système de pores se développe dans les sols reconstitués et si la continuité des pores (connections entre les cavités) se rétablira au point d'atteindre le niveau de sols naturels. ■

Bibliographie

- Anonyme, 1998. Ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). Conseil fédéral suisse.
- Anonyme, 2000. Norme suisse SN 640 583: «Terrassement, sol; emprises et terrassements, entreposage, mesures de protection, remise en place et restitution». Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, Zurich.
- Anonyme, 2001. Directives de remise en culture. Association Suisse de l'industrie des Graviers et du Béton ASGB, Berne.
- Anonyme, 2002. Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist, Rekultivierte Landwirtschaftsflächen, Richtlinien für Abnahmen und Folgebewirtschaftung. Schweizerische Bundesbahnen SBB, Bern.
- Dexter A. R., Czyz E. A. & Gate O. P., 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research* **93**, 412-419.
- Häusler S. & Salm Ch., 2001. Construire en préservant les sols. Guide de l'environnement 10, Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne.
- Horn R., Fleige H. & Peth S., 2009. Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde. *Bodenschutz* (3/09), 80-85.
- Kaufmann M., Tobias S. & Schulin R., 2009. Development of the mechanical stability of a restored soil during the first 3 years of recultivation. *Soil and Tillage Research* **103**, 127-136.
- Locher W. P. & De Bakker H., 1990. Bodenkunde van Nederland. Deel 1: Algemene Bodenkunde. Malmberg, Den Bosch (NL), 439 p.
- Schäffer B., Attinger W. & Schulin R., 2007. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery – Soil physical and mechanical aspects. *Soil and Tillage Research* **93**, 28-43.

Riassunto**Confronto tra terreni ricoltivati e terreni a crescita naturale**

La nuova tratta ferroviaria Mattstetten-Rothrist, costruita nell'ambito del progetto Ferrovia 2000, è stato uno dei primi grandi cantieri nel quale le direttive sulla protezione del suolo, stabilite una decina d'anni fa, sono state rigorosamente applicate, durante la fase di pianificazione, realizzazione e assestamento, dagli specialisti della sorveglianza del suolo.

L'obiettivo del presente studio era di esaminare gli effetti a medio lungo termine risultanti da questo notevole sforzo, utilizzando semplici parametri che possano essere applicati su vaste superfici.

Nelle analisi del suolo, tramite penetrometro dinamico, è stata misurata e messa a confronto la resistenza di penetrazione dei suoli rinaturalizzati tramite sistema di ricoltivazione con quelli a crescita naturale. Lo studio è stato eseguito in due località (Wanzwil e Hersiwil), su due tipi di terreni coltivati (prato artificiale e cereali) considerando l'umidità del suolo.

I risultati dimostrano che dopo sette anni, per quel che concerne la resistenza alla penetrazione, i terreni ricoltivati non si differenziano dai suoli a crescita naturale.

Grazie alle misure di protezione si è dunque impedito una compattazione del suolo.

Inoltre si nota che i suoli ricoltivati presentano una resistenza leggermente inferiore alla penetrazione nella profondità di aratura (25–35 cm).

Questo vantaggio qualitativo dovrebbe venir conservato rinunciando alla lavorazione del terreno con aratri oppure tramite l'aratura semiportante.

Summary**Comparison between restored and naturally developed soils**

The new Mattstetten-Rothrist rail line builded in the frame of «Railway 2000» was one of the first large-scale construction projects to strictly implement soil protection regulations introduced about 10 years ago. Supervised by a pedological consultation team, this was realised from the planning of the project to subsequent soil management. The objective of this study was to examine the mid- to long-term effects of these efforts using easy-to-apply parameters, and covering as wide an area as possible. Using a penetrometer, penetration resistance of both restored areas and neighbouring, naturally developed soils were measured and compared in a field study at the end of the subsequent management. Two locations (Wanzwil and Hersiwil) and two types of soil cultivation (ley and field) as well as volumetric soil water content were taken into consideration. The results demonstrate that after seven years of subsequent management, restored soils show no difference from naturally produced ones with regard to penetration resistance. Thus, by applying extensive soil protection measures, it was possible to avoid soil compaction. Particularly noticeable fact was that the restored soils in the plow pan strata (25–35 cm) showed somewhat lower penetration resistance. This qualitative advantage should be maintained through plowless tillage or through the use of On-land-Plow systems.

Key words: soil restoration, soil compaction, penetration resistance, plow pan, plowless tillage.