

## LABORATORYJNY POMIAR PROFILU POWIERZCHNI ZA POMOCĄ LASEROWEGO PROFILOMIERZA

Petr Šařec, Ondřej Šařec, Václav Prošek

*Katedra Użytkowania, Czeski Uniwersytet Rolniczy w Pradze*

**Streszczenie.** Mierzenie profilu gleby w obszarze rolnictwa i ochrony środowiska ma wielostronne wykorzystanie. Chodzi głównie o ilościową ocenę jakości pracy narzędzi do uprawy roli, a także określenie stanu powierzchni gleby przed siewem. Do tego celu autorzy wykonali prototyp laserowego profilomierza, którego głównymi częściami są laserowy sensor Banner LT3 umieszczony razem z urządzeniem sterującym, przetwornik itp. na wózku, napędzanym silnikiem elektrycznym, poruszającym się po aluminiowej drodze. Ten laserowy sensor co 20 mm wykonuje pomiary określające odległość do powierzchni gleby. Celem badań było określenie niektórych właściwości laserowego sensora jakimi są: pomiar liniowy, czułość na barwę powierzchni oraz określenie optymalnej granicy pomiaru laserem sensorowym.

**Słowa kluczowe:** powierzchnia gleby, profil; chropowatość, laserowy sensor; profilomierz

### Wstęp

Ilościowa charakterystyka nierównomierności powierzchni jest ważna przy ocenie uprawy roli i modelowaniu procesów erozyjnych. Elementy wpływające na proces erozji gleby takie jak krople deszczu i cząsteczki gleby mają charakterystyczne wymiary rzędu milimetrów [Huang 1998] i dlatego w ocenie erozji gleby niezbędne są pomiary powierzchni gleby z milimetrową dokładnością. Aktualnie stosowane oceny uprawy gleby tak dokładnych pomiarów nie wymagają. Kluczową zależnością przy opisie nierównomierności powierzchni jest stworzenie modelu, który by charakteryzował zjawiska przypadkowego charakteru nierównomierności powierzchni, a następnie znalezienie urządzeń służących do pomiaru tego modelu [Oelze i in. 2003]. Dla stworzenia modelu powierzchni gleby były stosowane różne urządzenia. Takie modele powierzchni w digitalnej formie (digital elevation models – DEM) są szeroko wykorzystywane do określania wodnej pojemności powierzchni gleby, nierównomierności powierzchni gleby, w pracach studialnych dotyczących bruzd oraz w innych ważnych procesach.

Kuipers [1957] pierwszy wprowadził zmienne, które były wcześniej wykorzystywane przy opisie nierównomierności powierzchni. Kuipers zdefiniował indeks nierównomierności, który był oparty o odchyłkę standardową poszczególnych pomiarów profilu powierzchni gleby. Największym problemem wykorzystania indeksu nierównomierności był brak możliwości przestrzennej oceny składników nierównomierności. Indeks nierównomierności opisywał odchyłki wysokości albo nierównomierność pionową, ale nie opisywał

przestrzennego rozłożenia nierównomierności na powierzchni. Na przykład dwie powierzchnie mogą mieć ten sam indeks nierównomierności, ale na jednej z nich nierównomierności mogą być umieszczone dalej od siebie. Dokładniejsza charakterystyka opisywała by nie tylko pionową ale i poziomą wartość nierównomierności. Rozmieszczenie w rozpatrywanych płaszczyznach zależności nierównomierności było oceniane za pomocą funkcji korelacji parametrów nierównomierności następujących po sobie płaszczyzn poprzecznych. Była określana korelacja odległości dwóch niezależnych płaszczyzn w miejscu, gdzie funkcja korelacji spadała na 0,2 pierwotnej wartości. Mniejsza przestrzenna niezależność występowała na powierzchniach, na których powtarzano zabieg kultywatorowania w porównaniu z powierzchnią, na której tego zabiegu nie wykonano [Römken and Wang, 1987]. Im bardziej intensywnie jest powierzchnia pola kultywatorowana tym występują mniejsze grudki. Nierównomierność przy mniejszej podziałce powinna być nieskorelowana w przypadku krótszych odległości niż nierównomierność przy większej podziałce

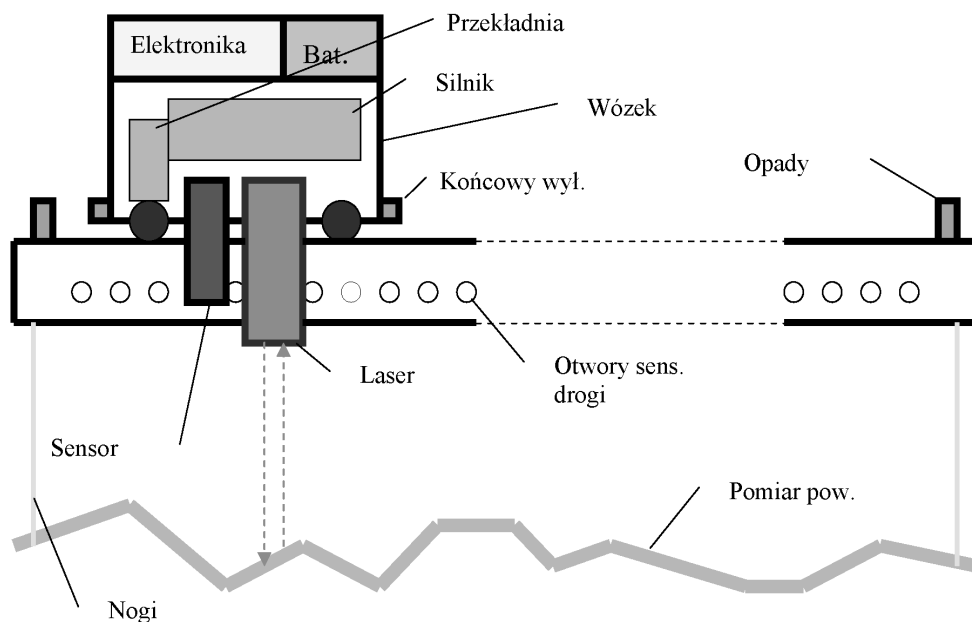
Dawniej wykorzystywano różne przyrządy do określania statystycznej charakterystyki nierównomierności powierzchni. Do pomiaru nierównomierności wykorzystywano przyrządy kontaktowe typu mikroprofilomierz, np. urządzenie do pomiaru powierzchni i koloru papieru czy igłowy profilomierz. Jednak metody kontaktowe są w większości przypadków bardzo czasochłonne i uciążliwe, a podstawową ich wadą jest naruszenie lub uszkodzenie powierzchni gleby. Z drugiej strony do pomiaru powierzchni wykorzystywano metody bezkontaktowe np. metodę fotogrametryczną. Metoda ta wymaga jednak drogiego wyposażenia w urządzenia pomiarowe oraz służące do obróbki danych, a sama interpretacja fotometrycznych danych jest złożona. Dalszym urządzeniem do pomiaru profilu bez naruszania powierzchni gleby jest urządzenie do laserowego pomiaru profilu. Urządzenie to jest drogie, jednak o dużej pojemności, a czas pomiaru, dla poletek pomiarowych o wymiarach 0,6 m na 0,6 m, może osiągnąć nawet kilka godzin. Flanagan i in. [1995] stworzyli automatyczny skaner laserowy, który utrzymuje takie same parametry jak laserowym miernik powierzchni, ale czas pomiaru jest krótszy. Alternatywną metodę bezkontaktowego pomiaru dla oszacowania statystyki nierównomierności powierzchni opracował Oelz i in. [2003]. Metoda ta wykorzystuje technikę akustycznego powrotnego rozproszenia. Celem tego rozwiązania było znalezienie szybkiego, przenośnego i taniego urządzenia do oceny statystyki nierównomierności powierzchni.

Zaproponowana w tym artykule konstrukcja jest prostym laserowym profilomierzem umożliwiającym pomiar tylko w jednym kierunku. Żeby skrócić czas pomiaru w prezentowanej konstrukcji zastosowano pomiar profilu powierzchni co 20 mm. Dokładność pomiaru tego urządzenia zależy od laserowego czujnika, odległości pomiaru, barwy powierzchni i itp.

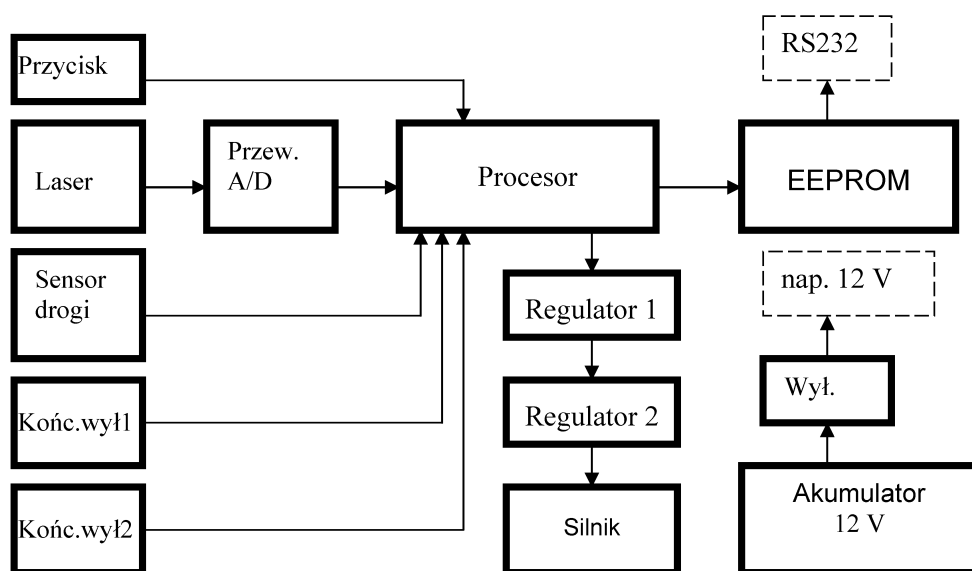
Raper i in. [2002] ocenia dokładność pionową ich przenośnego laserowego profilomierza na 2,3 mm dla gleby o różnym kolorze i na 4,2 mm przy obiektach pomalowanych na czarno lub białą. Bertuzzi i Caussignac (1988) w swoich testach osiągnęli odchyłki standardowe poniżej 2 mm.

## **Materiał i metody**

Schemat konstrukcyjny laserowego profilomierza oraz schemat blokowy jego podłączenia przedstawiono na rys.1 i 2. Kluczowym elementem tej konstrukcji jest laserowy czujnik LT3 wyprodukowany przez Banner Engineering Corp.



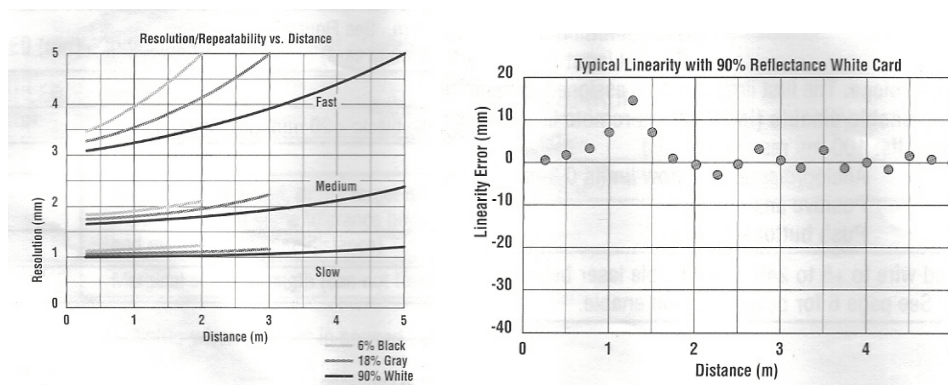
Rys. 1. Schemat konstrukcji laserowego profilomierza  
 Fig. 1. Laser profile measurement gauge structure diagram



Rys. 2. Schemat blokowy połączenia laserowego profilomierza  
 Fig. 2. Block diagram of laser profile measurement gauge connections

Czujnik ten porusza się po jednoosiowej drodze o długości 1,64 m i wykonuje pomiary co 20 mm (przy jednym przejeździe wykonuje 83 pomiary). Droga przejazdu laserowego czujnika umieszczona jest na regulowanych nogach, które umożliwiają ustawienie wysokości pomiaru od 0,3 m do 0,7 m.

Laserowy czujnik był zaprogramowany na negatywne analogowe wyjście z prędkością odpowiedzi (reakcji) ustawioną na powoli (rys. 3). Zakres pomiarowy laserowego czujnika wahał się od 0,3 m do 3 m dla koloru szarego, albo do 5 m dla białego koloru mierzonej powierzchni.



Rys. 3. Charakterystyki laserowego czujnika  
Fig. 3. Laser sensor characteristics

W ramach prowadzonych laboratoryjnych badań przetestowano dwa ustawienia czujnika pomiarowego tj. 130 – 30 cm i 80 – 30 cm. Zakres pomiarowy ustawiono z wykorzystaniem białej barwy badanej powierzchni. Badania były powtarzane pięciokrotnie na prostoliniowych odcinkach o trzech barwach w różnych położeniach. Wstępne wyniki, dla nastawionego zakresu, były przeliczone na jednostkę długości, a następnie przeanalizowane. Oceniane były dwa parametry. Jednym z nich była odchyłka standardowa zmierzonych wysokości powierzchni (tj. RMS – Root Mean Square – wysokość)  $\sigma$ . Dla jednowymiarowego profilu powierzchni  $\sigma$  ustalono wartości dyskretne  $y_i(x_i)$ , w odpowiednich poziomych odstępach  $\Delta x$ . Jeżeli odchyłka wysokości  $\Delta y$  w odpowiednich poziomych odstępach jest dużo mniejsza niż przypadkowa długość fali, odchyłka nie będzie miała wpływu na odbicie od powierzchni  $\Delta x$  (typowy,  $\Delta x \leq 0.1 \lambda$ ). Odchyłka standardowa jest dla rozkładu dyskretnego jednowymiarowego wzorcem.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i)^2 - N(\bar{y})^2} \quad (1)$$

gdzie  $N$  jest liczbą pomiarów, a

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2)$$

## Laboratoryjny pomiar profilu...

---

Dalszym ocenianym parametrem była wartość nierównomierności powierzchni wykorzystywana w ramach metody łańcuchowej. Metoda ta polega na pomiarze odległości poziomych na końcu łańcucha położonego na powierzchni gleby i ocenie jej nierównomierności. Wartość nierównomierności obliczana jest jako (3):

$$C_r = 1 - \frac{L1}{L2} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie L1 jest poziomą odległością końców łańcucha, a L2 rzeczywistą długością łańcucha. Metoda ta była przystosowana, że L1 jest długością odcinka powstałej regresji liniowej pomierzonych wartości, a L2 jest sumą odległości między sąsiednimi mierzonymi punktami.

Trendy regresji liniowej ograniczają dwa powyżej wymienione parametry tzn. wartość odchyłki standardowej profilu równej powierzchni równoległej z drogą profilomierza jest nieistotna w porównaniu z przypadkiem kiedy powierzchnia i droga tworzą kąt. Droga musi wtedy być umieszczona równoległe z mierzoną powierzchnią. Aby zminimalizować ten wpływ, wykorzystano do usunięcia trendu z pomierzonych wartości regresję liniową. Z powodu automatycznego pomiaru wartości stworzono w Visual Basic program dla MS Excel, który umożliwił przeprowadzenie wyżej wymienionych obliczeń.

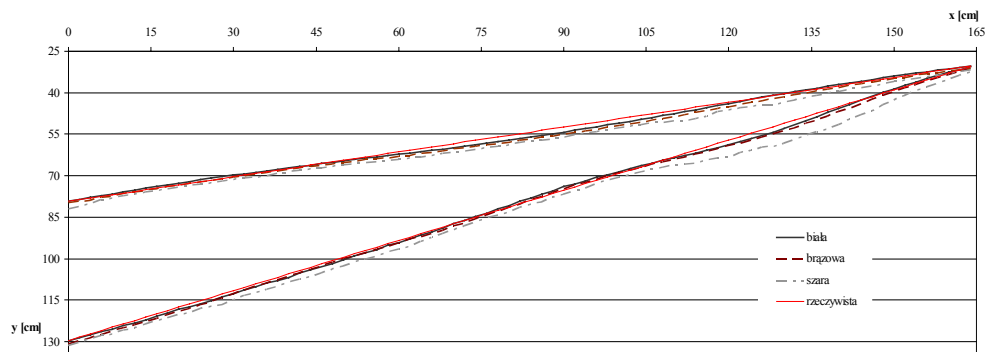
## Wyniki badań i dyskusja

Badania laboratoryjne (rys. 4) polegały na pomiarze równych powierzchni o trzech barwach: białej, brązowej i szarej. Powierzchnie te były umieszczone pod różnymi kątami w stosunku do drogi laserowego profilomierza. Jednocześnie były testowane dwa różne zakresy laserowego czujnika, który był kalibrowany przy wykorzystaniu białej barwy.



Rys. 4. Widok laserowego profilomierza w laboratorium pomiarowym  
Fig. 4. View of laser profile measurement gauge in a measurements laboratory

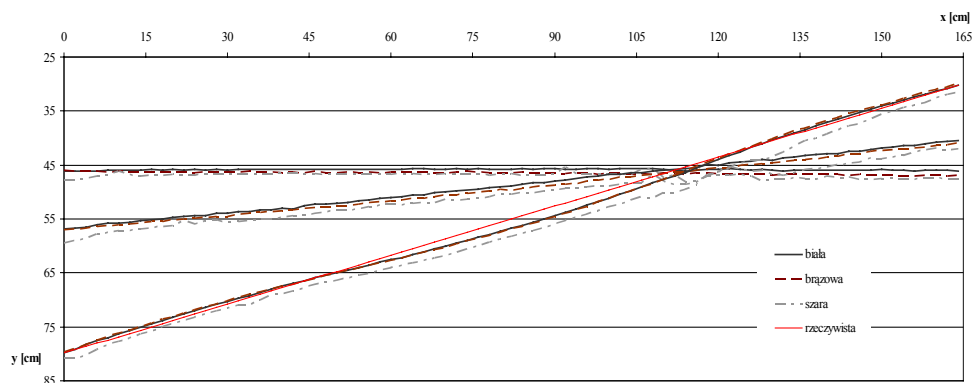
Maksymalna odległość graniczna pierwszego testowanego zakresu wynosiła 130 cm, a minimalna wynosiła 30 cm. Uzyskane profile przedstawiono na rys. 5. Przebieg krzywych rzeczywistych wartości uzyskano na podstawie rozłożenia punktów kalibracyjnych. Profil powierzchni białej barwy był najbardziej zbliżony do wartości rzeczywistych, natomiast barwa szara charakteryzowała się największymi różnicami. Największe różnice pomiędzy wartościami mierzonymi a rzeczywistymi znajdowały się w zakresie 45 cm do 65 cm od laserowego czujnika.



Rys. 5. Wykres zmierzonych profili równych odległości w trzech różnych kolorach umieszczonych w dwóch kątach (zakres laserowego czujnika ustawiony na 130-30 cm)

Fig. 5. Diagram showing measured profiles of equal distances in three different colours placed in two angles (laser sensor range set at 130-30 cm)

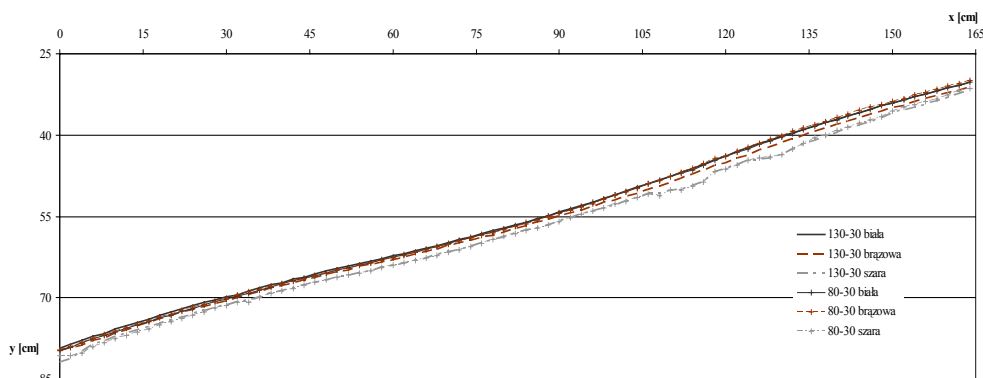
Podobne zależności przedstawiono na rys.6, gdzie maksymalna i minimalna granica zakresu czujnika ustawiona była na 80 cm lub na 30 cm.



Rys. 6. Wykres zmierzonych profili równych długości o trzech różnych kolorach umieszczonych w dwóch kątach (zakres laserowego czujnika ustawiony na 80-30 cm)

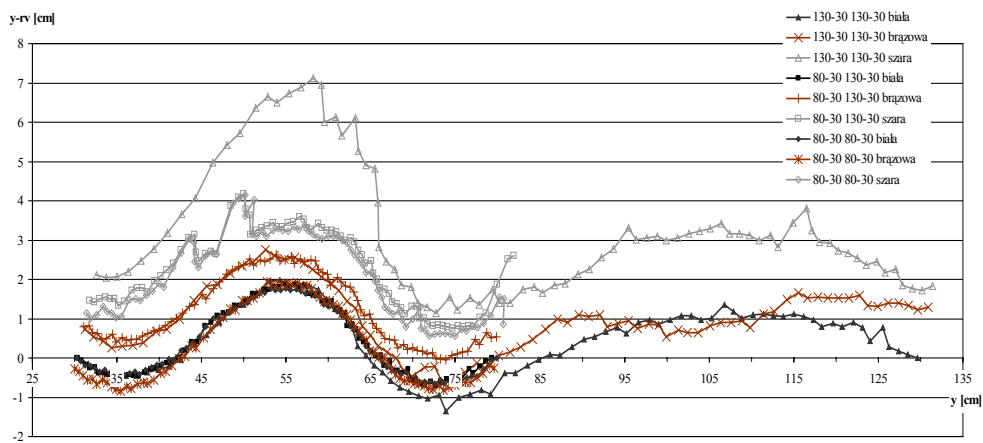
Fig. 6. Diagram showing measured profiles of equal distances in three different colours placed in two angles (laser sensor range set at 80-30 cm)

Rys. 7 porównuje zmierzone profile umieszczone pod danym kątem w zależności od zakresu ustawionego czujnika laserowego. Białe i szare powierzchnie nie wykazują większych różnic pomiędzy dwoma nastawionymi zakresami czujnika. Profil brązowej powierzchni w zakresie od 80 cm do 30 cm łączy się ze zmierzonym profilem białej powierzchni, natomiast w zakresie od 130 cm do 30 cm profil brązowej powierzchni przebiega obok.



Rys. 7. Wykres zmierzonych profili w równych odległościach i trzech kolorach z nastawionym zakresem laserowego czujnika 130 – 30 cm oraz 80 – 30 cm

Fig. 7. Diagram showing measured profiles at equal distances and in three colours with laser sensor preset at 130 – 30 cm and 80 – 30 cm



Rys. 8. Wykres podziału wartości między zmierzonymi punktami (y) i rzeczywistą pozycją (rv) w zależności od pomierzonych odległości (y) (w legendzie z lewej strony zakres odległości, powierzchni, zakres czujnika, kolor powierzchni)

Fig. 5. Diagram showing distribution of values between measured points (y) and real position (rv), depending on measured distances (y) (in the legend: on the left: range of distances, surfaces, sensor range, surface colour)

Dokładne różnice między rzeczywistymi i zmierzonymi wartościami przedstawiono na rys. 8. Dla brązowej powierzchni z ustawionym zakresem od 80 cm do 30 cm i dla wszystkich białych powierzchni różnice te nie przekroczyły 2 cm. Ale i te w wartościach są wysokie i występują głównie w zakresie pomiarowym przy odległości 45 do 65 cm, gdzie głównie w praktyce prowadzi się te pomiary.

Tabela 1 przedstawia wskaźniki nierównomierności powierzchni. Średnia odchyłka profilu ( $\sigma$ ) ma ograniczoną ważność jeżeli ze zmierzonych wartości nie zostaną odrzucone tendencje spowodowane wzajemnym pochyleniem mierzonej powierzchni oraz drogi profilomierza. Wielkość nierównomierności powierzchni ( $Cr$ ) z i bez pochylenia są porównywalne. Wielkość nierównomierności białej i brązowej powierzchni osiągają podobne wartości. Jeżeli idzie natomiast o zakres nastawionego czujnika laserowego to im większy był zakres tym uzyskiwano wyższą wielkość nierównomierności.

Tabela 1. Wskaźniki nierównomierności powierzchni uzyskane przy bezpośrednim pomiarze laserowym profilomierzem

Table 1. Surface irregularity indexes obtained by direct measurement with laser profile measurement gauge

Zakres pomiaru lasera <sup>1)</sup> [cm]	Powierzchnia		Profil z pochyleniem		Regresja liniowa ( $y = a \cdot x + b$ )			Profil bez pochylenia	
	Odległość <sup>2)</sup> [cm]	Barwa	$\sigma^3)$ [cm]	$Cr^4)$	a	b [cm]	Koeficient deter. $R^2$	$\sigma^3)$ [cm]	$Cr^4)$
130-30	130-30	biała	29.139	0.116	-0.608	130.345	0.999	0.809	0.493
		brązowa	28.978	0.390	-0.605	130.636	0.999	0.788	0.454
		szara	28.338	1.401	-0.591	131.697	0.997	1.462	1.505
	80-30	biała	14.253	0.217	-0.297	79.512	0.996	0.861	0.193
		brązowa	14.118	0.267	-0.294	80.082	0.996	0.841	0.213
		szara	14.005	0.918	-0.292	80.969	0.996	0.922	0.670
80-30	45-45	biała	0.122	0.088	0.000	45.846	0.010	0.121	0.088
		brązowa	0.245	0.187	0.005	46.091	0.816	0.105	0.186
		szara	0.498	1.910	0.004	46.586	0.159	0.457	1.913
	55-41	biała	4.777	0.239	-0.100	56.895	0.999	0.123	0.242
		brązowa	4.709	0.137	-0.098	57.314	0.999	0.181	0.143
		szara	4.670	1.815	-0.097	58.381	0.989	0.488	1.748
	80-30	biała	14.398	0.176	-0.300	79.990	0.997	0.822	0.127
		brązowa	14.480	0.172	-0.302	80.034	0.996	0.959	0.168
		szara	14.140	0.877	-0.294	81.226	0.995	0.972	0.845

Uwagi: <sup>1)</sup> wartości dalekie i bliskie w zakresie laserowego czujnika

<sup>2)</sup> zakres wartości odległości między czujnikiem i badaną powierzchnią

<sup>3)</sup> RMS wysokość (odchyłka standardowa mierzonych wysokości powierzchni)

<sup>4)</sup> wartość nierównomierności powierzchni

## Wnioski

1. Liniowość mierzonego laserowego profilomierza była czuła na zakres ustawionego laserowego czujnika tak jak na kolor mierzonej powierzchni. Węższy zakres okazał się dokładniejszy. Różnice pomiarów między brązową, a białą powierzchnią były niewielkie w porównaniu z różnicą między wymienianym wcześniej, a szarą powierzchnią.



2. W celu zwiększenia dokładności pomiaru należy wstępne wyniki badań przeliczyć na jednostkę długości z wykorzystaniem punktów kalibracyjnych umieszczonych w odległościach, w których prawdopodobnie będzie znajdowała się w praktyce mierzona powierzchnia, tzn. między 45 cm a 60 cm.
3. Wyliczone wskaźniki nierównomierności, przede wszystkim średnia odchyłka zmierzonych wysokości powierzchni, są czułe na ewentualne pochylenia między mierzoną powierzchnią, a drogą profilomierza. Dlatego należy uzyskane dane z pomiaru zweryfikować.

## Bibliografia

- Bertuzzi P., Caussignac J. M.** 1988. Measuring In-Situ Soil Surface Roughness Using a Laser Profilometer. In: Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, France, 18-22 January 1988. s. 19-24.
- Flanagan D.C., Huang C., Norton L. D., Parker S.C.** 1995. Laser scanner for erosion plot measurements. Trans. ASAE 38. s. 703-710.
- Huang C., White I., Thwaite E., Bendeli A.** 1988. A Noncontact Laser System for Measuring Soil Surface Topography. Soil Science Society of America Journal 52. s. 350-355.
- Kuipers H.** 1957. A relief meter for soil cultivation studies. Neth. J. Agric. Sci. 5 s. 255-262.
- Oelze M. L., Sabatier J. M., Raspert R.** 2003. Roughness Measurements of Soil Surfaces by Acoustic Backscatter. Soil Science Society of America Journal 67. s. 241-250.
- Raper R. L., Grift T. E., Tekeste M. Z.** 2002. A portable Tillage Profiler for Measuring Subsoiling Effectiveness. ASAE 021138.
- Römkens M.J.M., Wang J.Y.** 1987. Soil roughness changes from rainfall. Trans. ASAE 30. s.101-107.

## LABORATORY SURFACE PROFILE MEASUREMENT WITH LASER PROFILE MEASUREMENT GAUGE

**Abstract.** Soil profile measurements in the fields of agriculture and environment protection have numerous applications. We are mainly talking about quantitative evaluation of work quality of agricultural tools, and determination of soil surface quality condition before sowing. For this purpose, the authors made a prototype laser profile measurement gauge consisting of the following main parts: Banner LT3 laser sensor installed together with a control unit, converter etc. on a cart driven by an electric motor, running on an aluminium track. Every 20 mm this laser sensor performs measurements specifying the distance to soil surface. The purpose of the research was to determine certain properties of the laser sensor, including: linear measurement, sensitivity to surface colour, and optimum boundary of sensor laser measurement.

**Key words:** soil surface, profile; roughness, laser sensor, profile measurement gauge

*Opracowano w ramach programu badawczego MŚMT č MSM 6046070905 i w ramach projektu NAZV QF 3257 i OH 72257.*

**Adres do korespondencji:**

Petr Šařec, Ph.D; e-mail: psarec@tf.czu.cz  
Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta, Katedra využití strojů  
ul. Kamýcká 129  
165 21 Praha 6-Suchbøl