

The background image shows an aerial perspective of a rural or semi-rural landscape. It features several houses with red roofs, some with light-colored walls and others with blue-tinted windows or doors. The land is divided into various agricultural plots, some green and some brown, suggesting different types of crops or fallow land. A few small trees and shrubs are scattered across the terrain. The overall color palette is dominated by earthy tones like browns, tans, and muted greens.

GEOINFORMATIKA

Laserové skenování

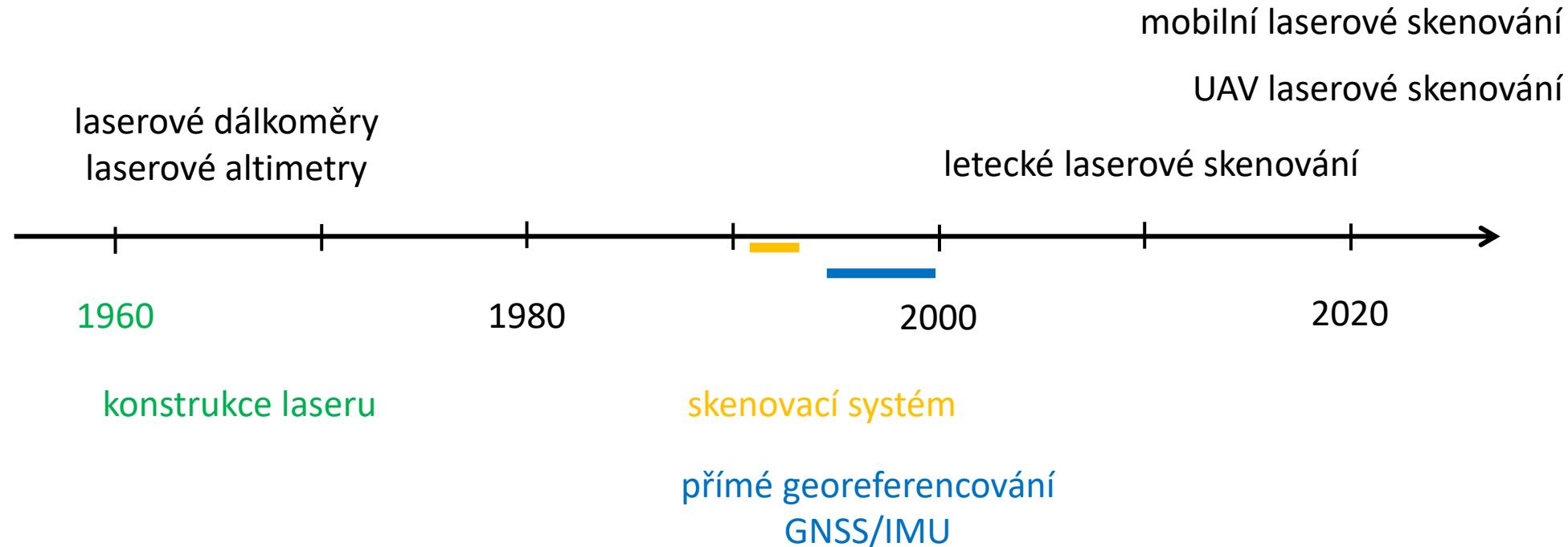
Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, PřF UK

Obsah přednášky

- Laserové skenování
 - Přehled metod
 - Princip měření
- Letecké a UAV laserové skenování
 - Způsob pořizování dat a jejich vlastnosti
 - Full-waveform systémy
 - Stopa paprsku
 - Intenzita
 - Georeferencování a výpočet souřadnic bodů
 - Vyrovnání skenovaných pásů
 - Kontrola kvality
- Nové trendy v LiDARovém snímání
 - Multispektrální systémy
 - Hybridní systémy
 - Geiger a SPL LiDAR
- Doporučená literatura

LiDAR = Light Detection And Ranging

- Laserové skenování (pro topografické mapování)

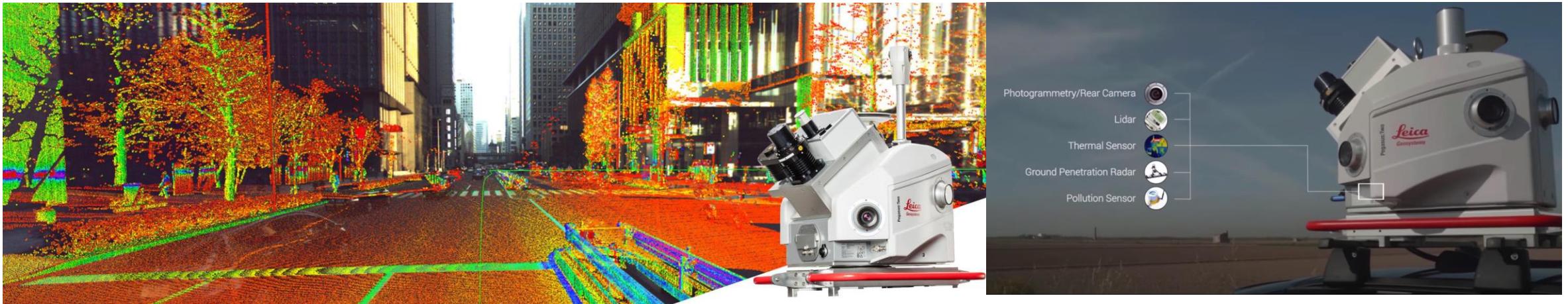


- Statické (pozemní)
- Mobilní - družicové/letecké/UAV/pozemní

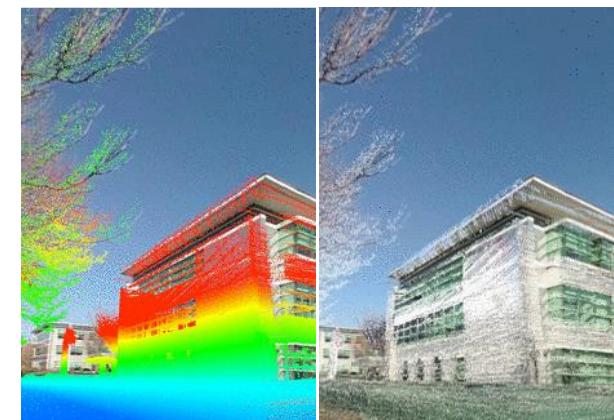
Pozemní skenování (statické)



Mobilní mapování - pozemní



https://leica-geosystems.com/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus_two-ultimate



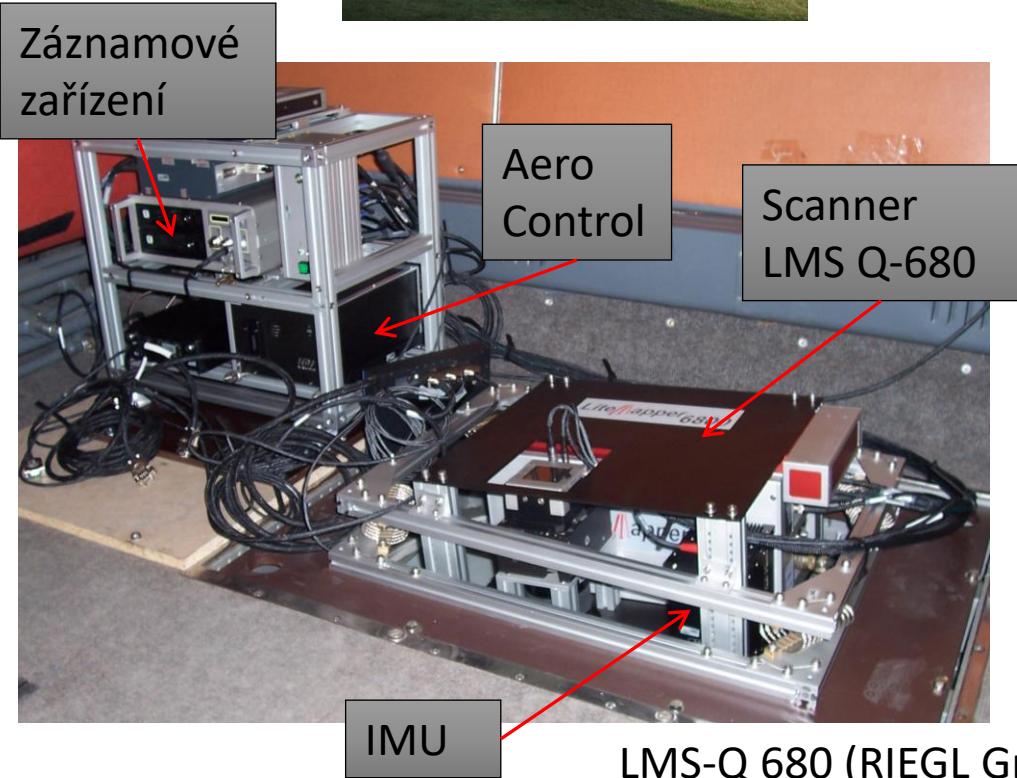
<https://leica-geosystems.com/products/mobile-mapping-systems/capture-platforms/leica-pegasus-backpack>

<https://greenvalleyintl.com/LiBackpackC50H/>

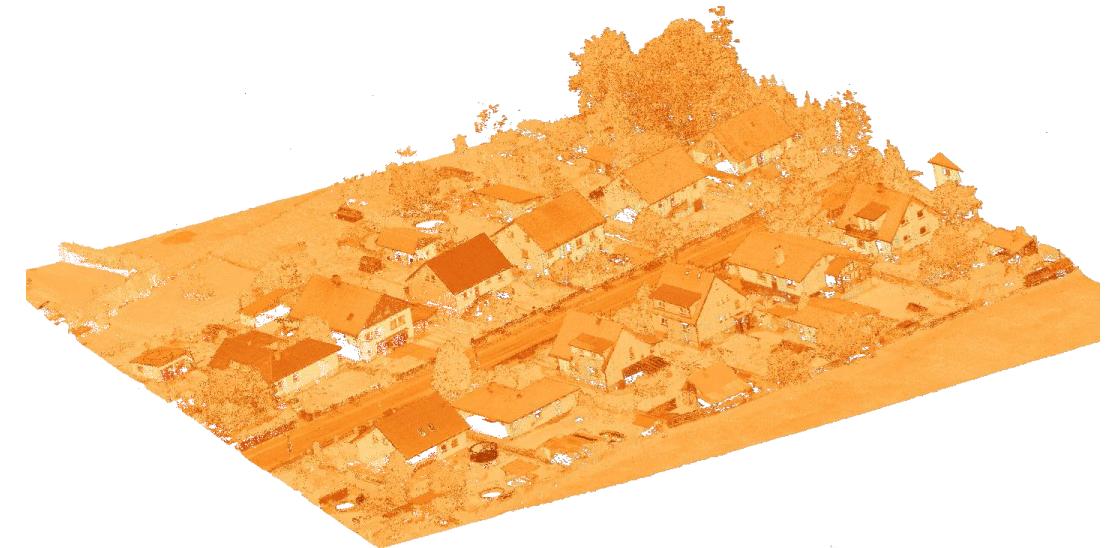
Letecké a UAV laserové skenování (LLS, ULS)



ČÚZK



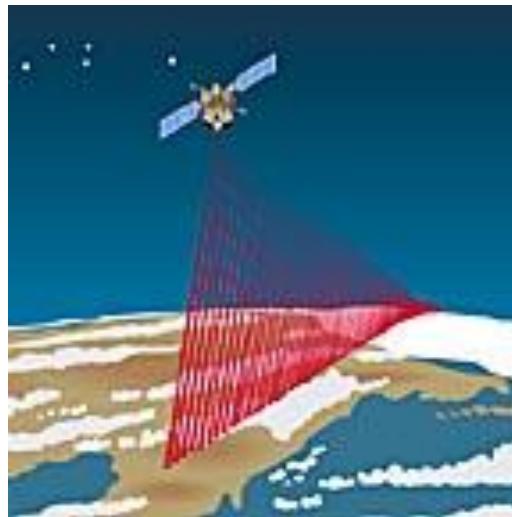
Riegl miniVUX-1UAV





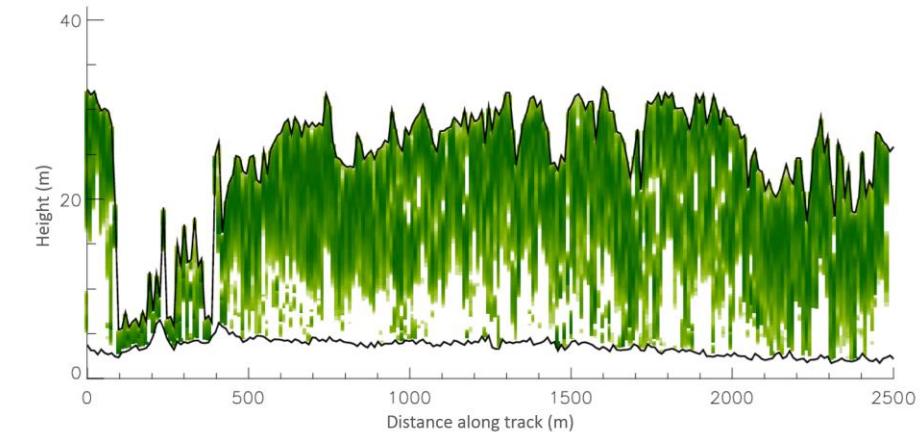
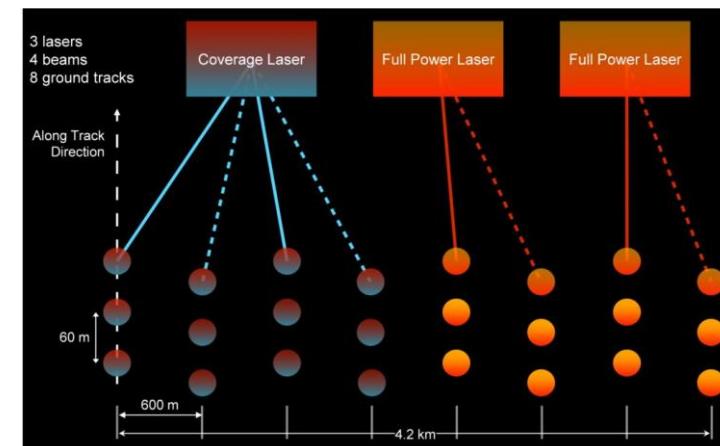
Družicové laserové altimetry a skenery

ICESat: Geoscience Laser
Altimeter System (GLAS)



<https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/glas.php>

Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)



<https://gedi.umd.edu/>

Princip měření

- Laserový dálkoměr

- Využívá se většinou pulzní (time-of-flight) systém (x fázový – continuous wave)
- Měření vzdálenosti R mezi skenerem a zemským povrchem/objektem na zemském povrchu

$$R = v * t/2$$

v ... rychlosť šíření laserového paprsku v atmosféře ($v = c/n$)

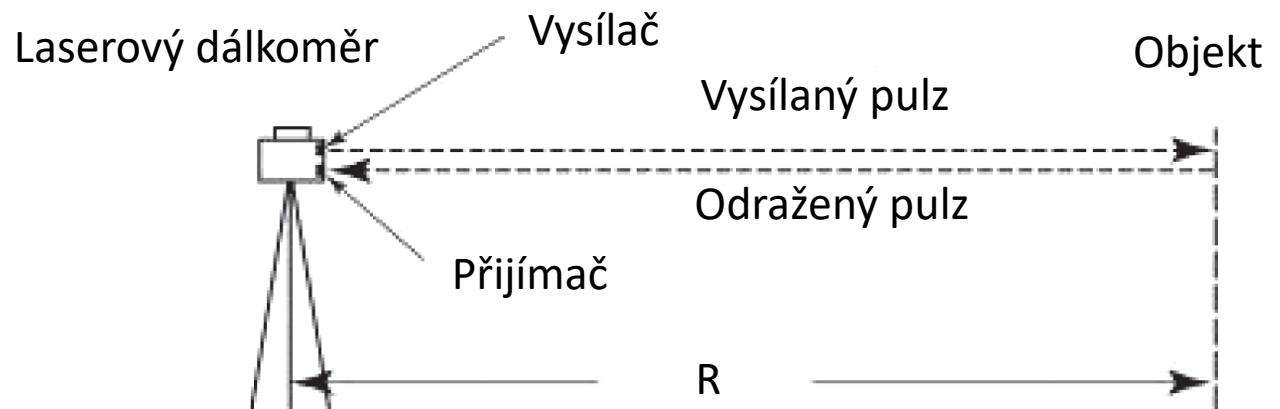
t ... transitní čas

- Statický (pozemní) skener

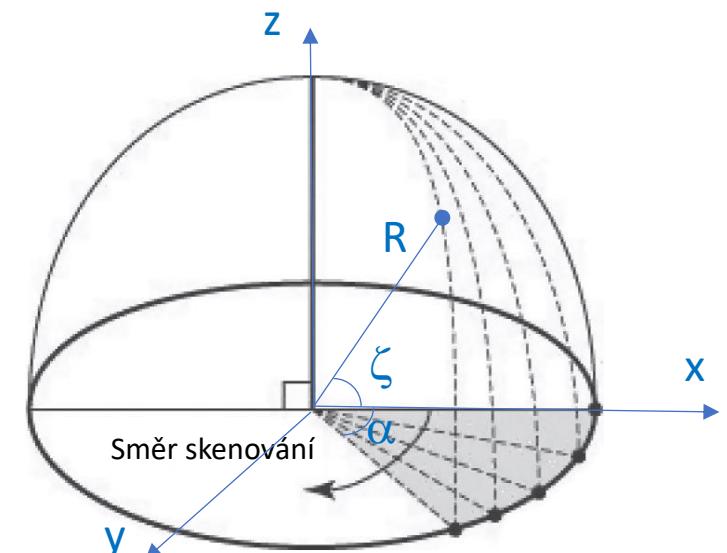
$$x=R \cos(\alpha) \cos (\zeta)$$

$$y=R \sin(\alpha) \cos (\zeta)$$

$$z=R \sin (\zeta)$$

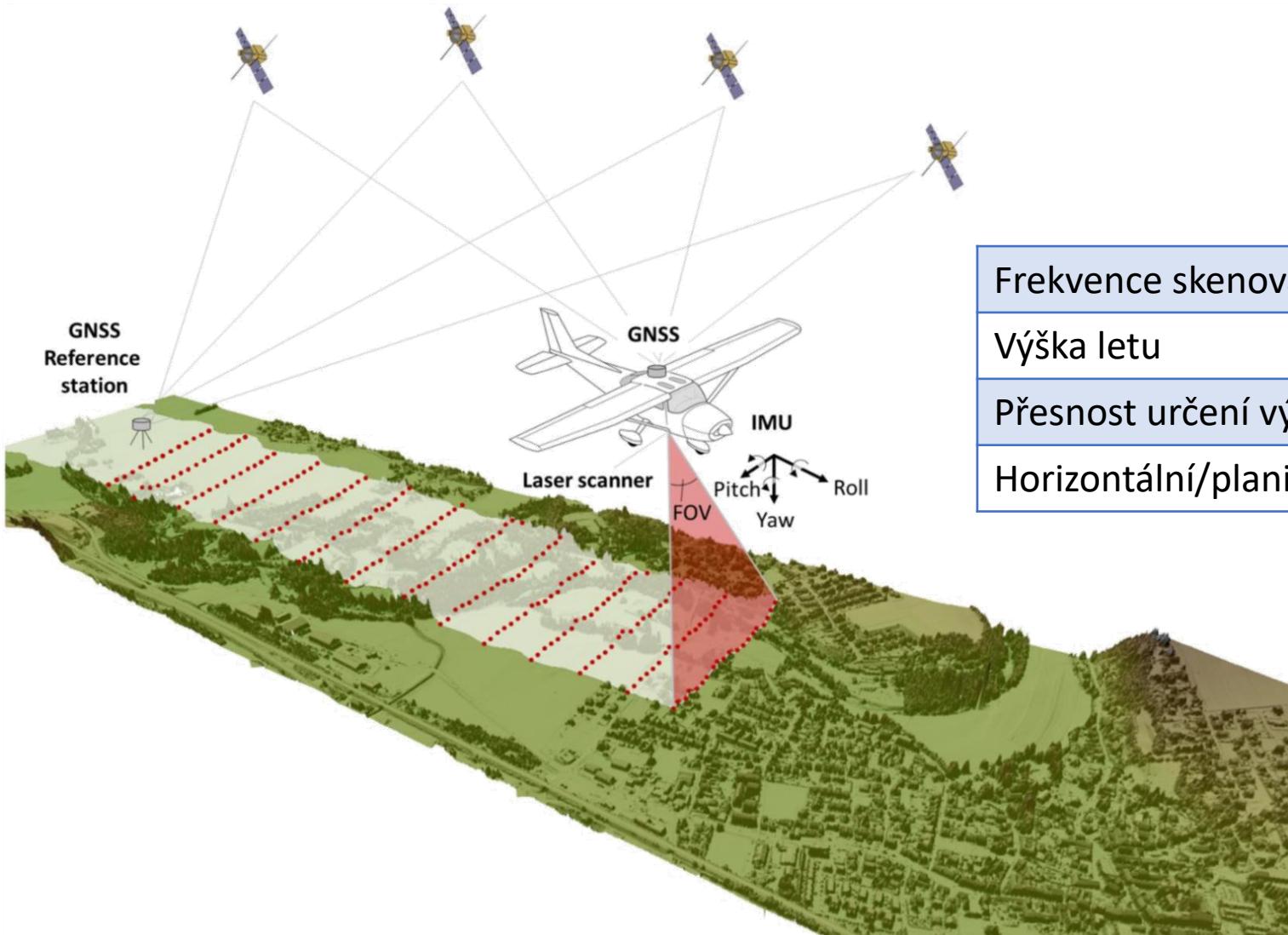


Zdroj: Shan & Toth (2018), upraveno



<https://www.youtube.com/watch?v=aJLMf3SsqbE> (0:30 – 1:15)

Letecké/UAV laserové skenování



Frekvence skenování	100-6000 kHz
Výška letu	500 –4000m
Přesnost určení výšky bodu	~ 1 –10 cm
Horizontální/planimetrická přesnost	< 25 cm

Typická délka pulsu pro LLS:
1 ns až 10 ns → 30 cm až 3 m

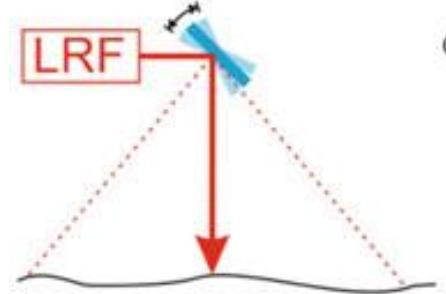
Zdroj: Mandlburger: EduServ 2021, Recent LiDAR technologies

Vlastnosti leteckého/UAV laserového skenování

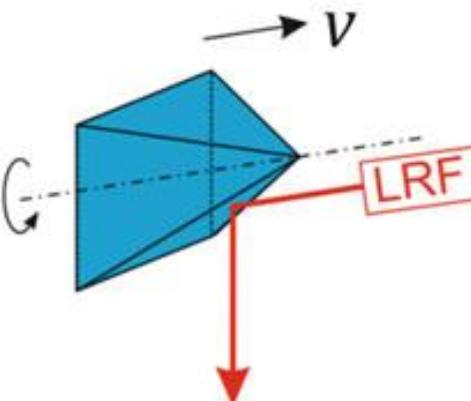
- Kombinace senzorů
 - GNSS přijímač - pozice senzoru
 - Inerciální měřící jednotka (IMU) – orientace (sklon) nosiče
 - Laserový skener – skenování a měření délek
- Aktivní měřící systém
 - Zdrojem elmag. záření je laser – nezávislost na slunečním záření, nevyskytují se stíny v důsledku osvětlení (x fotogrammetrie)
- Měření založeno na „polární“ metodě – délka a úhel
- Prostupnost vegetací (mezery v listoví)
- Schopnost registrovat více odrazů jednoho vyslaného pulsu
- Měří povrch objektů - náhodné, nikoliv specifické body objektu
 - Geometrická rekonstrukce objektů a odvození jejich geometrických parametrů se provádí zpracováním bodového mračna (post-processing)
- Obsahuje radiometrickou informaci (amplituda signálu) – radiometrická korekce
- Laser = monochromatické světlo

Zařízení pro změnu směru laserového paprsku

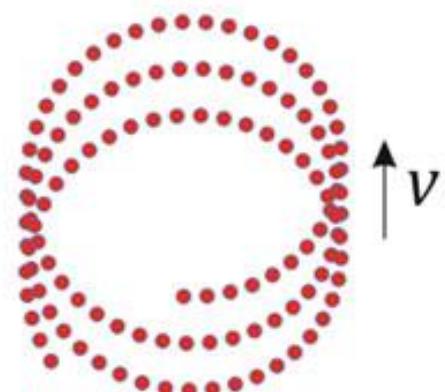
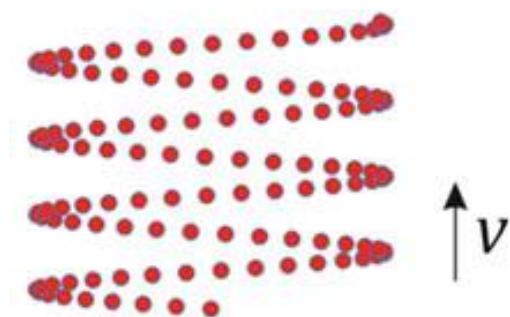
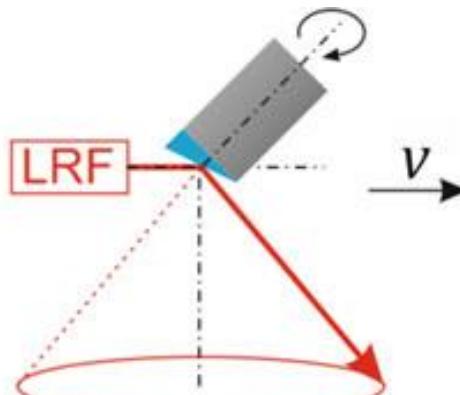
Oscilující zrcadlo



Rotující zrcadlo/hranol



Palmerův skener

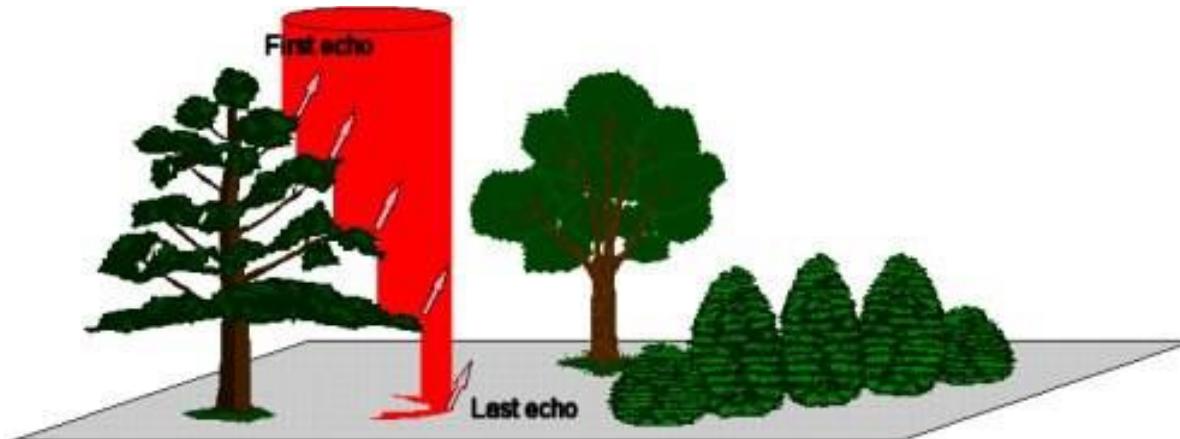


Zdroj: Pfeifer et al, 2016. Laserscanning, in:
Handbuch der Geodäsie, Springer Verlag

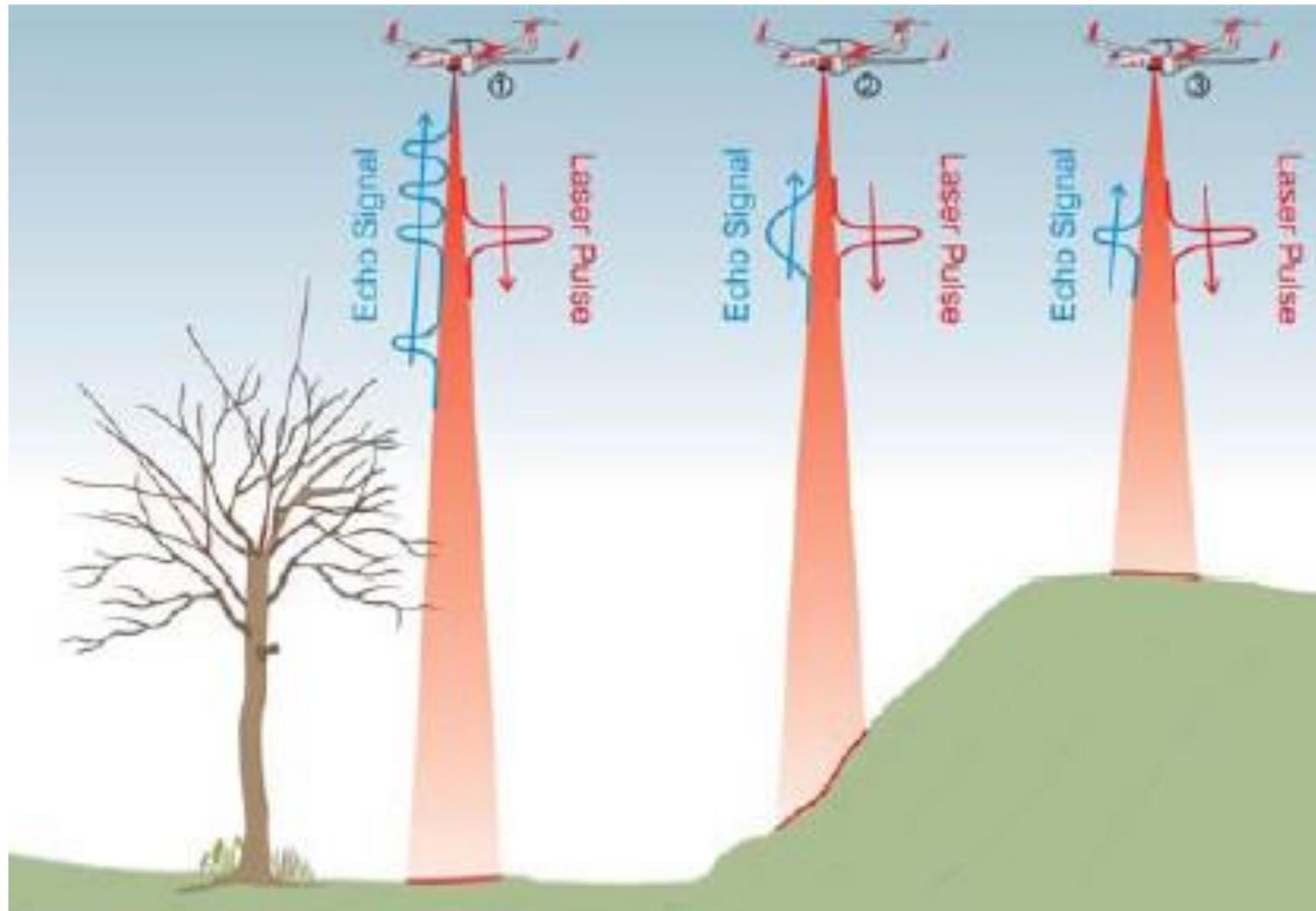
LRF... Laser Range Finder

Záznam odraženého signálu

- První odraz
- Poslední odraz
- $n > 2$ odrazů daného pulsu
- Technologie „full-waveform“
- Výhoda: možnost získání odrazu od vegetace i od vlastního reliéfu

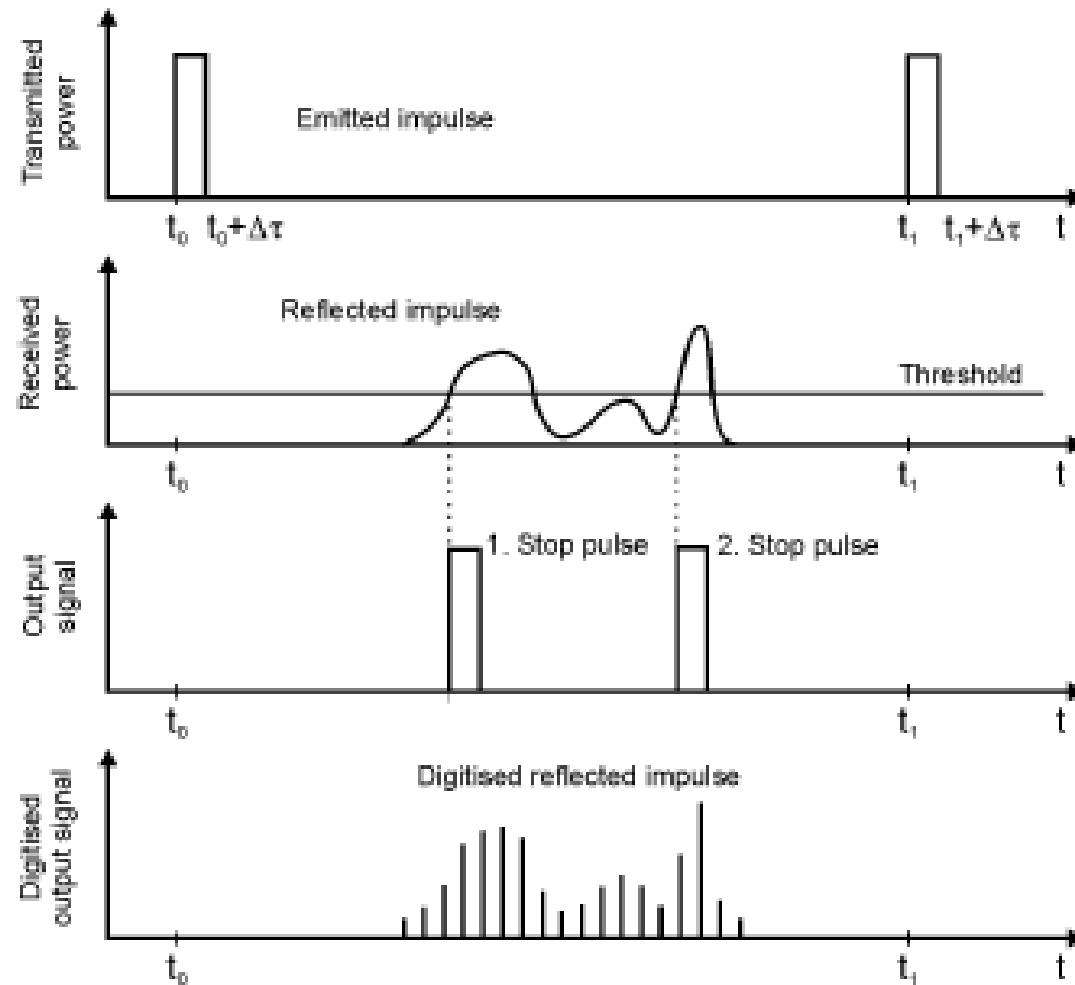


„Full-waveform“ LiDARové systémy



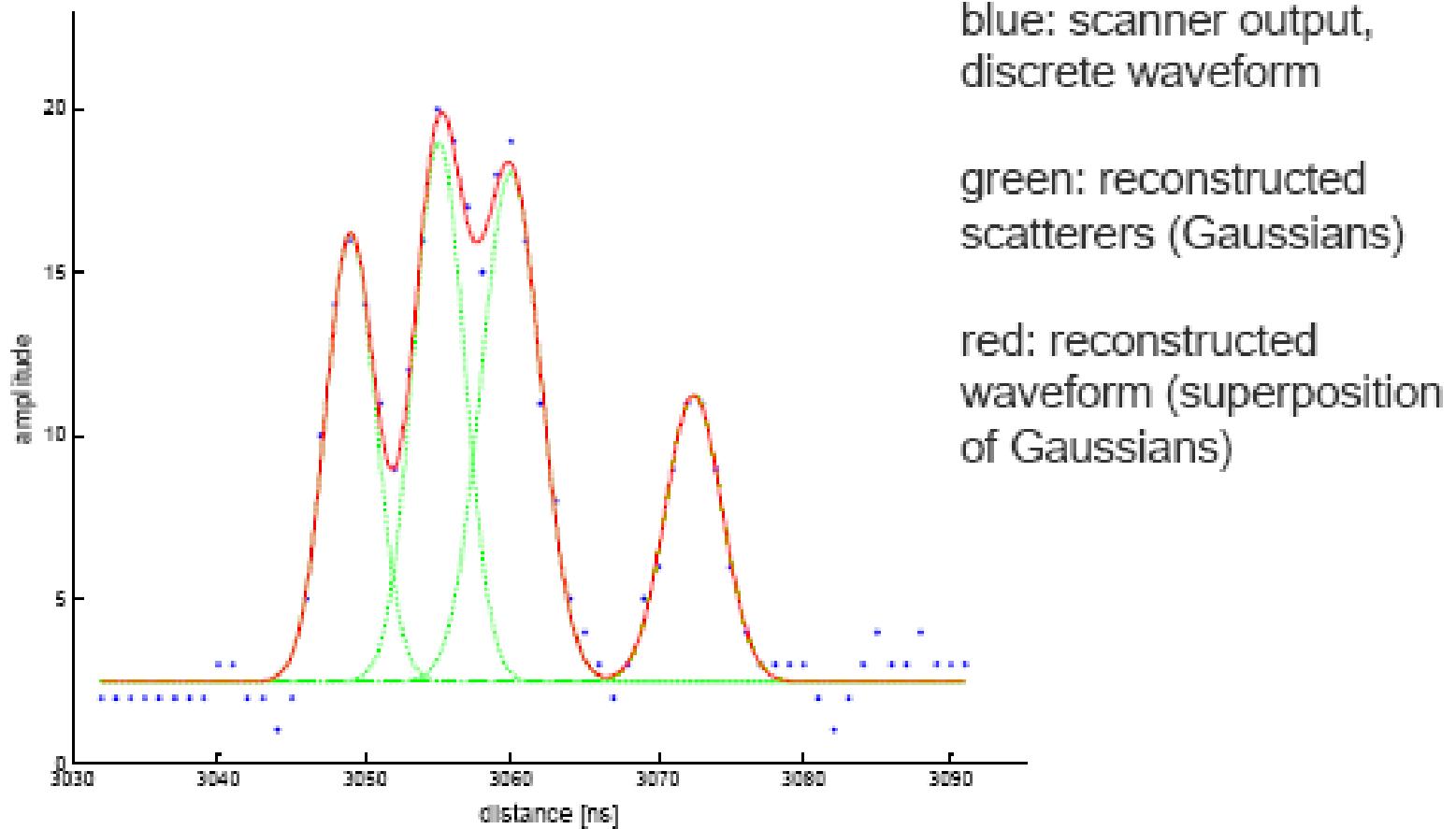
www.riegl.com

„Full-waveform“ LiDARové systémy



Wagner, 2009

„Full-waveform“ LiDARové systémy



Roncat, Melzer, 2009

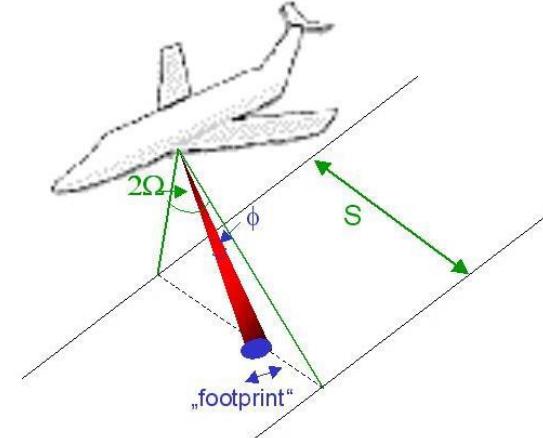
Šířka záběru a stopa paprsku

- Šířka záběru

$$S_w = 2htan\Omega$$

2Ω ... plný úhel skenování ($5^\circ - 75^\circ$, obvykle $20^\circ - 25^\circ$)

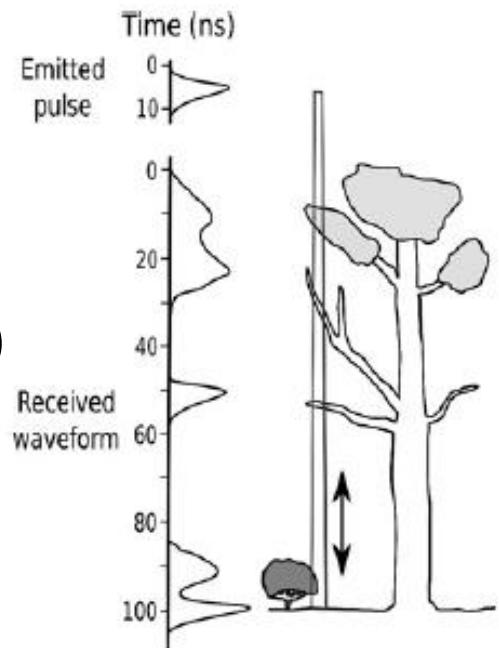
h ... výška letu



- Stopa paprsku („footprint“)

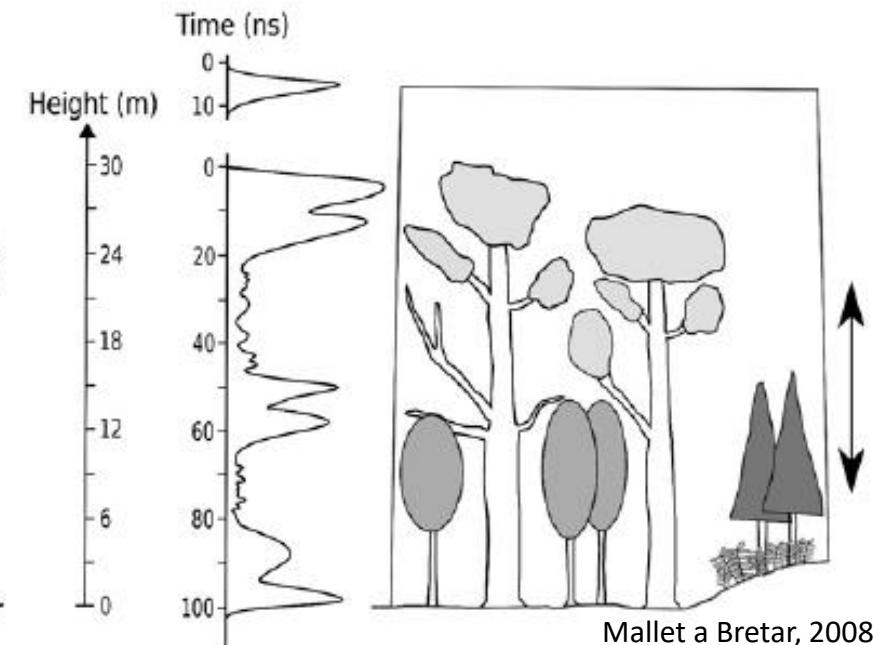
$$D = 2htan\frac{\phi}{2}$$

ϕ ... rozbíhavost paprsku (0.1-1 mrad)



Úzký svazek (0.2m – 3 m)

-závisí na výšce letu a rozbíhavosti paprsku



Široký svazek (průměr 10m – 70m)

Mallet a Bretar, 2008

Frekvence opakování pulsu (PRF)

- Frekvence opakování pulsu (PRF)
 - u současných systémů 300 kHz – 4 MHz

- Střední hustota bodů

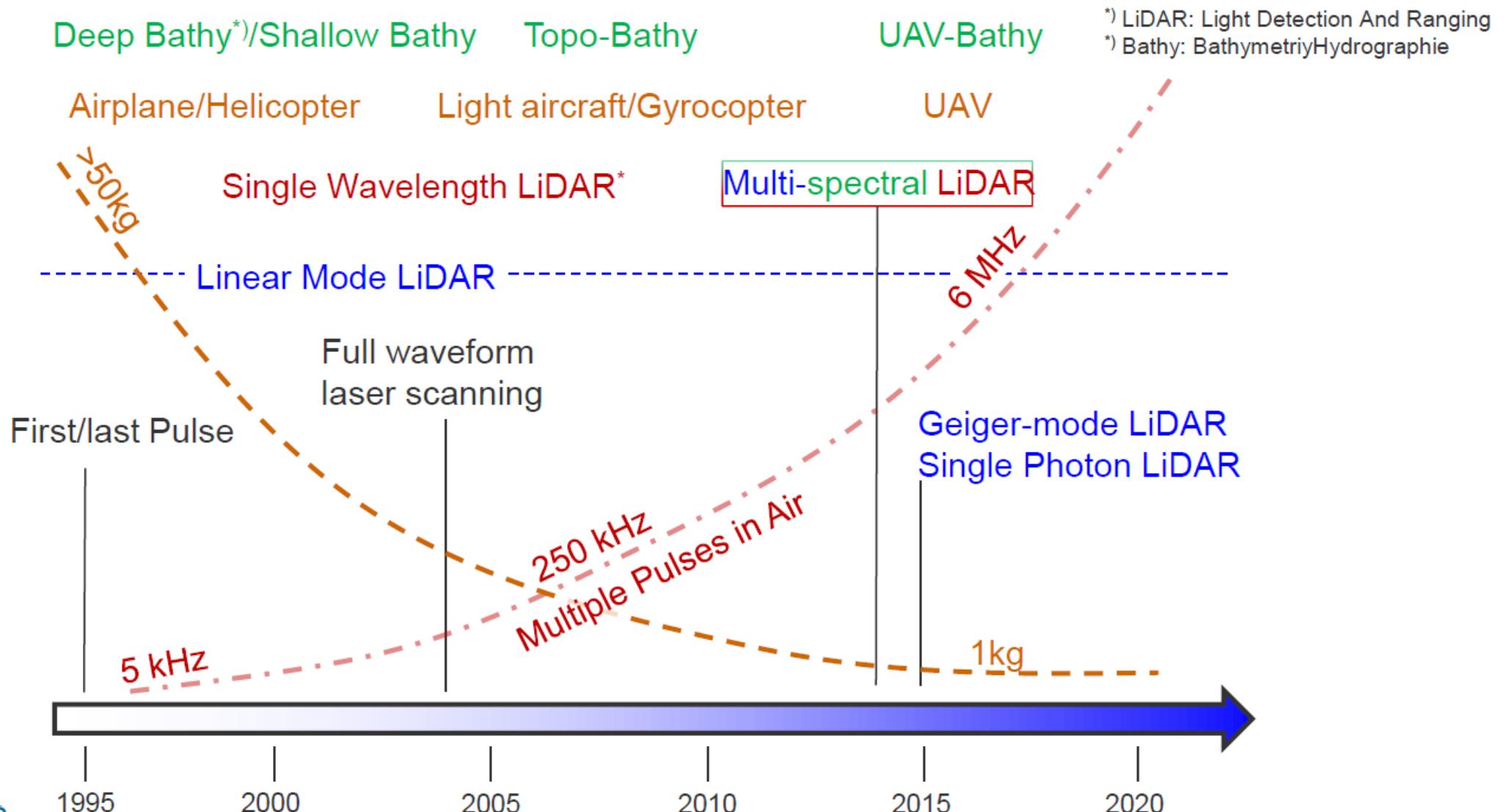
$$P_M = \frac{PRF}{2vhtan\Omega}$$

v ... rychlosť letu

h ... výška letu

2Ω ... plný úhel skenování

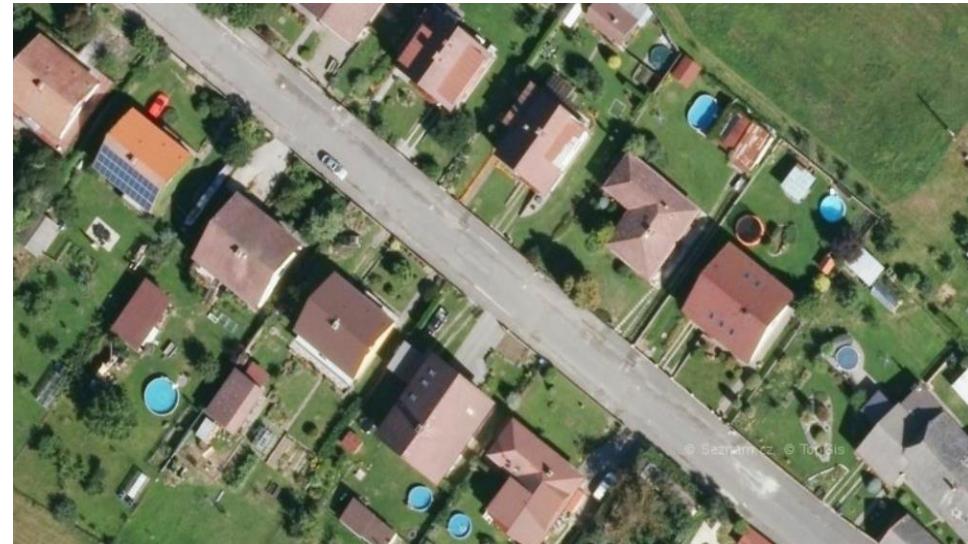
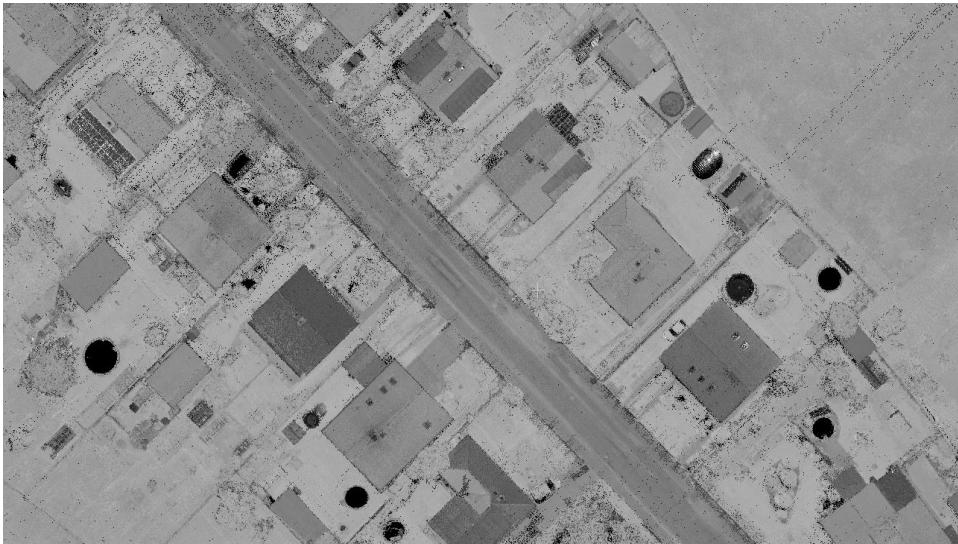
Timeline Airborne LiDAR



Interakce laserového paprsku s povrchem

Materiál	Typická odrazivost v % (pro 900 nm)
Sníh	80-90
Jehličnatý les	60
Listnatý les	30
Písek	50
Beton	24
Asfalt	17

Wehr and Lohr, 1990



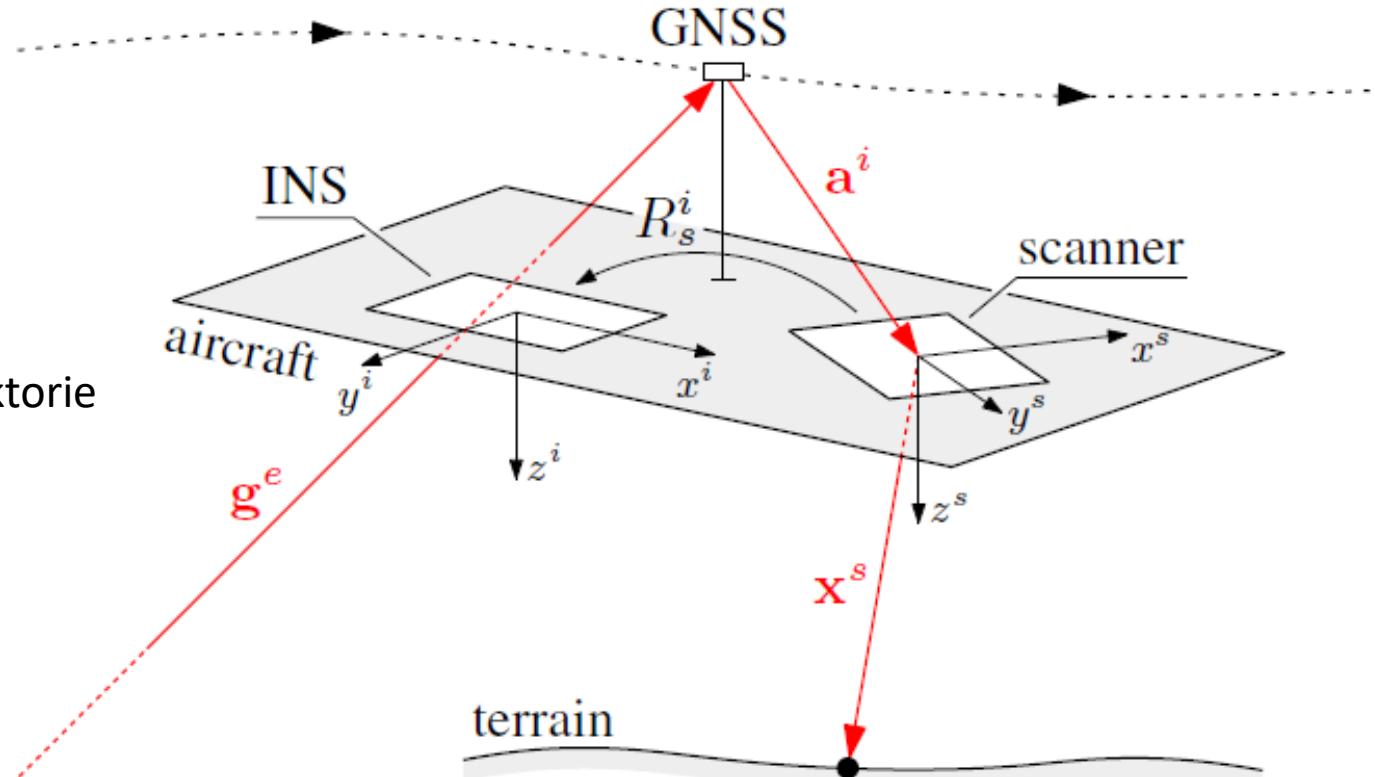
Postup zpracování LiDARových dat

- Plán letu
- Skenování
- Geokódování
 - Trajektorie vypočtené z měření GNSS/IMU
 - Výpočet vzdáleností ze zaznamenaného signálu
 - Výpočet prostorových souřadnic bodů (standardní výstup las/laz)
- Vyrovnání skenovaných pásů
- Odstranění hrubých chyb („nízké“ body = multipath, „vysoké“ body)
- Klasifikace mračna bodů
- (Manuální editace)
- Postprocessing a konverze do požadovaného datového formátu
 - Digitální model povrchu (TIN/MESH, grid)
 - Digitální model reliéfu (TIN/MESH, grid)
 - Modely budov (CityGML, CityJSON, CAD/BIM formáty, ...)

Výpočet souřadnic bodů

- ALS – kombinace 3 senzorů:
 - Skener – vzdálenost, úhel pozorování
 - IMU (INS) – orientace nosiče
 - GNSS – pozice nosiče

} trajektorie



Relativní orientace senzorů:

Odsazení skeneru vůči anténě GNSS

- 3D vektor posunutí \mathbf{a}^i (*lever-arms*)

Stočení skeneru vůči IMU

- 3 rotace → matice rotace R_s^i (*boresight misalignment/angles*)

s - souřadnicový systém skeneru

i - souřadnicový systém IMU (INS)

n - navigační (lokální) souřadnicový systém

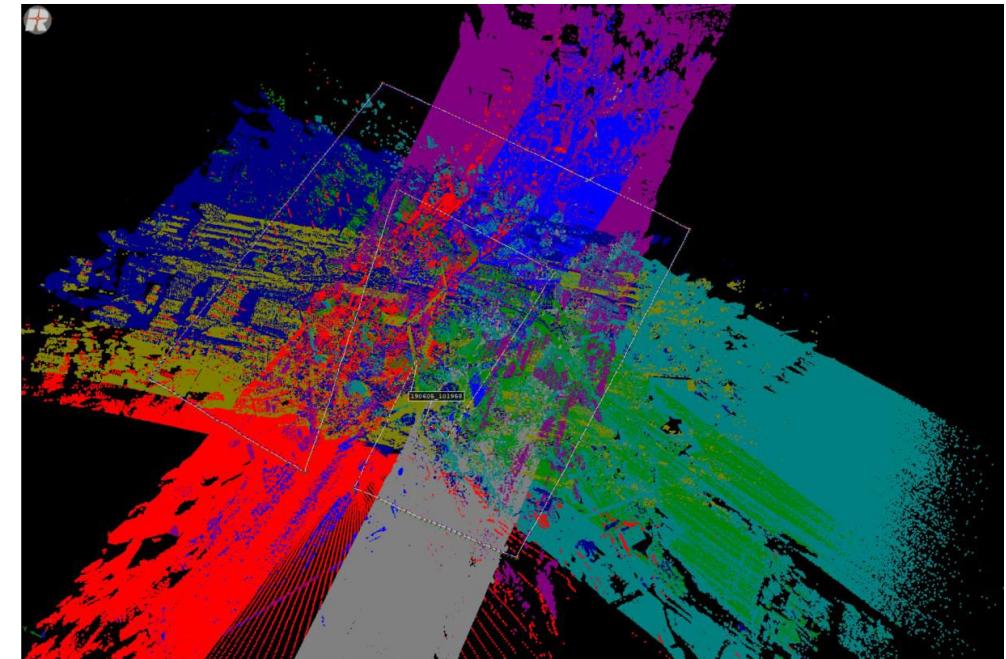
e – geocentrický souřadnicový systém (WGS84)

$$\mathbf{x}^e(t) = \mathbf{g}^e(t) + R_n^e(t) R_i^n(t) (\mathbf{a}^i + R_s^i \mathbf{x}^s(t))$$

P. Glriaet al., 2015: [Rigorous Strip Adjustment Of Airborne Laser scanning Data Based On The ICP Algorithm](#). ISPRS GeospatialWeek2015, La Grande Motte, France

Plán letu

- Vymezení území (+ přesah)
- Termín snímkování (stav vegetace)
- Požadovaná hustota bodů (PRF – dáno skenerem, výška letu)
- Skenování po pásech
- Překryv pásů:
 - Zajištění pokrytí skenované oblasti
 - Zvýšení hustoty bodů
- Příčné pásy
 - Pro ověření/zpřesnění kalibrace (lever-arm, boresight angles)
- Vlícovací/kontrolní body



Dvořák D., 2021

RIPARAMETER

INPUT/OUTPUT

SETTINGS

Scanner Type



miniVUX-1UAV

Project Requirements

Project Type: Wide Area Mapping

Uniform Point Pattern: ON

Point Density: Avg. 150.00 pts/m²

Stripe Overlap: 80.0 %

Terrain

Min. Altitude (AMSL): 1640 ft 500 m

Terrain Variation: 49 ft 15 m

Flight Height Constraints

Min. Height (AGL): 66 ft 20 m

Max. Height (AGL): 0 ft 0 m

Max. Altitude (AMSL): 0 ft 0 m

Laser Safety: Observe ENOHD

Surface / Target / Atmosphere

Min. Reflectance: 20.0 %

Target Type: Topography

Object Diameter: 0.1 m

Visibility: 23km Standard Clear

FOV: 100.00 °

Aircraft

Select Aircraft: RICOPTER

Min. Speed: 5 kn 9 km/h

Max. Speed: 8 kn 15 km/h

Max. Altitude (AMSL): 2631 ft 802 m



Result Qualifier

SUCCESS

Scanner Settings

PRR: 100 kHz

Laser Power: 100 %

Scan Rate: 30.6 ips

FOV: 81.7 °

Angular Step Width: 0.110 °

Flight Parameters

Flying Height AGL: 115 ft 35.0 m

Flying Height AMSL: 1755 ft 535 m

Aircraft Speed: 4.86 kn 9.00 km/h 2.50 m/s

@ Min. Terrain Altitude

Line Distance: 0.0817 m

Min. Avg. Max.

Point Distance: 0.0673 m 0.0816 m 0.118 m

Point Density: 104 pts/m² 150 pts/m² 182 pts/m²

Swath Width: 60.5 m

MTA Details

MTA Zone Width: 1499 m

Min. Max.

MTA Zones Used: 1 1

Productivity

Net Area Rate: 30.0 m²/s

Typ. Data Rate: 1.47 GB/h

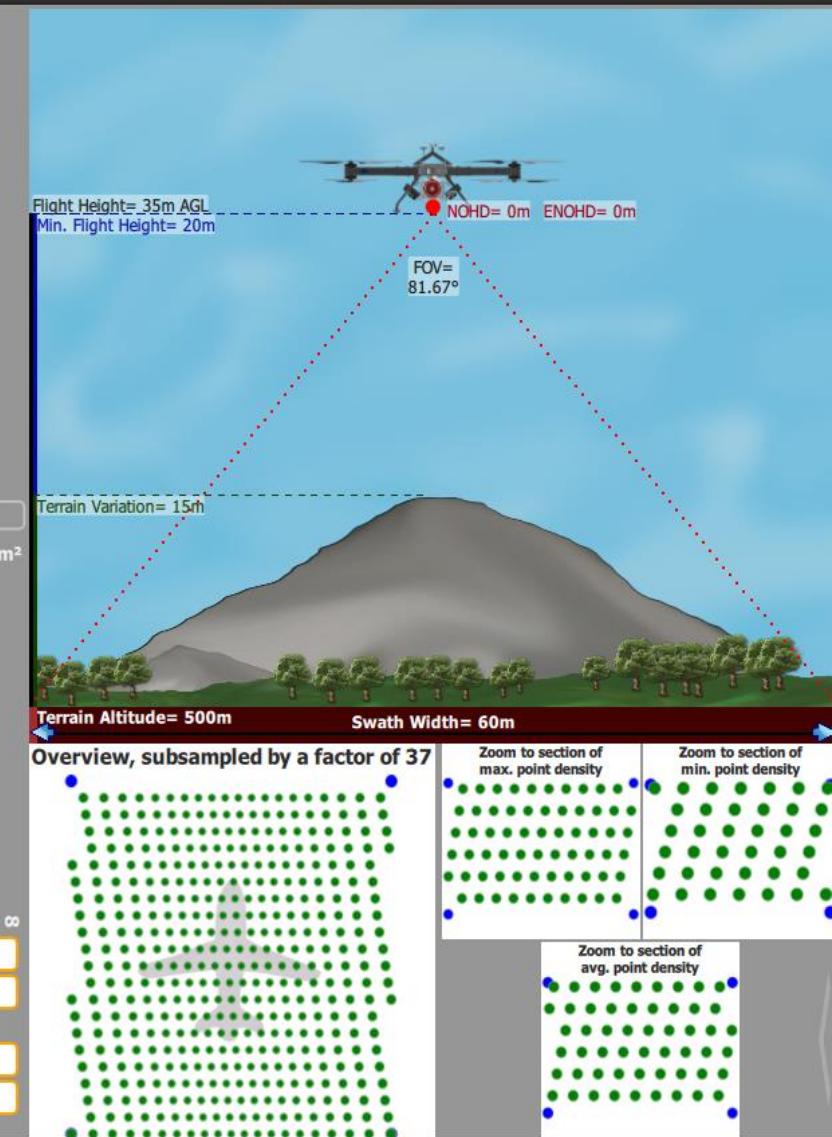
Max. Data Rate: 3.02 GB/h

Laser Safety Information

NOHD: 0 m 0 %

ENOHD: 0 m 0 %

Max. Meas. Range: 50.0 m 33 %

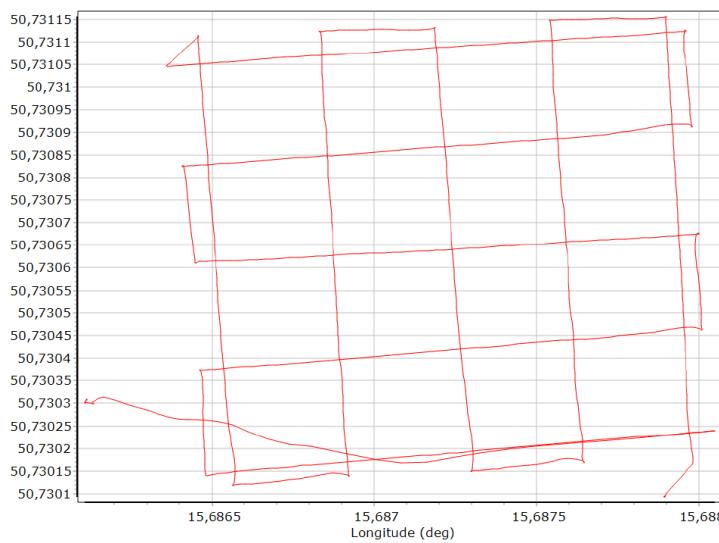
Scan Rate-Range-Prod.: 1538 m²/ps 7 %

Solution Found

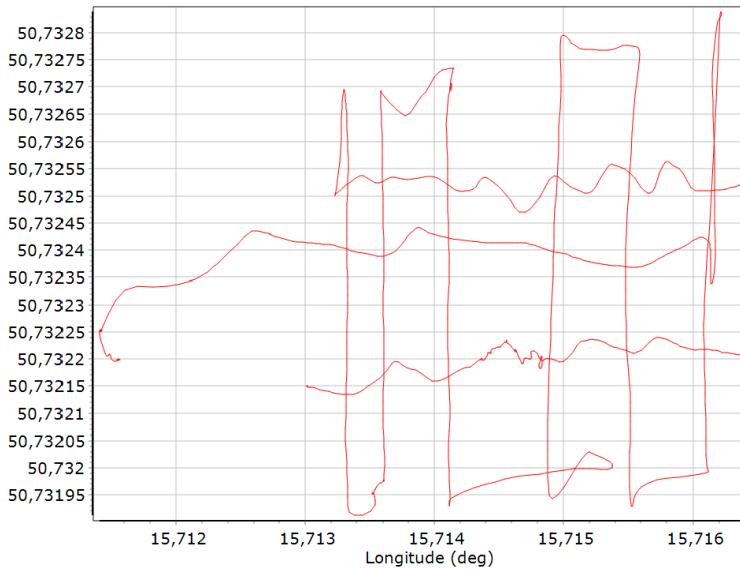
Status:
[0]: STATUS: The required point density can be achieved only by reducing the scanner(s) field of view (FOV). This suboptimal solution is presented.
Reducing the scanner(s) FOV may additionally cause some deviation of point distance and line distance.

Trajektorie letu - zeměpisná délka a šířka [°]

Bílá louka

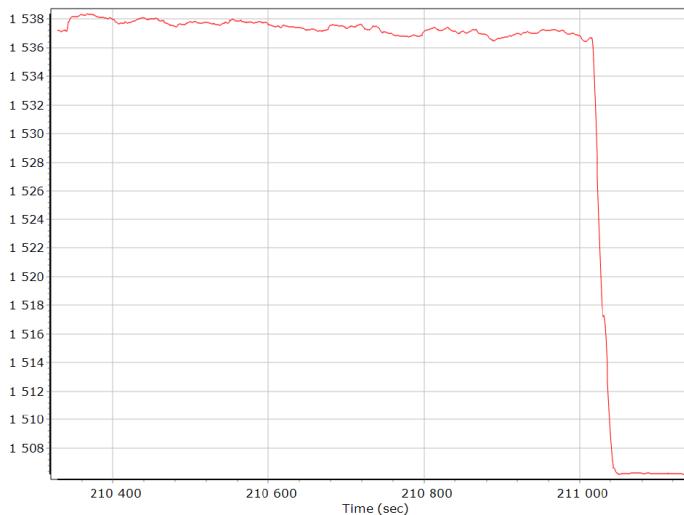


Úpská jáma

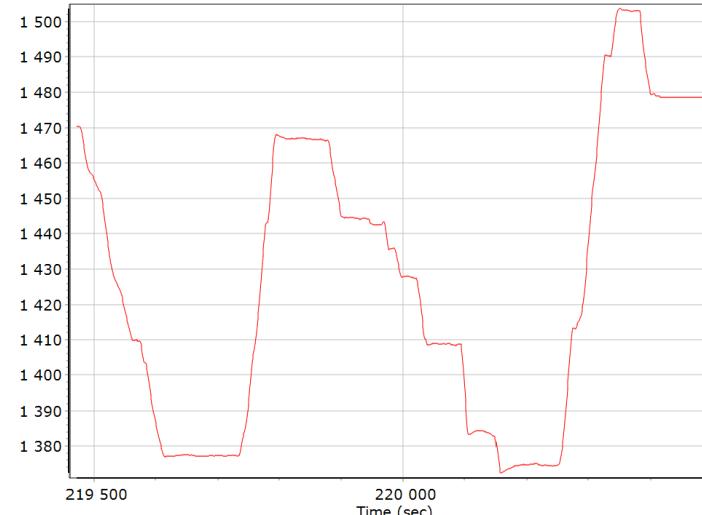


Nadmořská výška letu [m]

Bílá louka

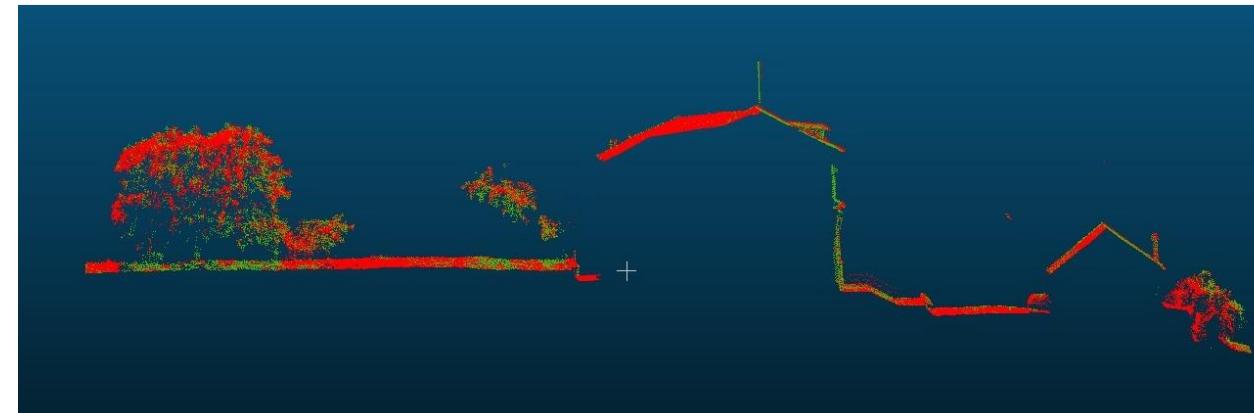
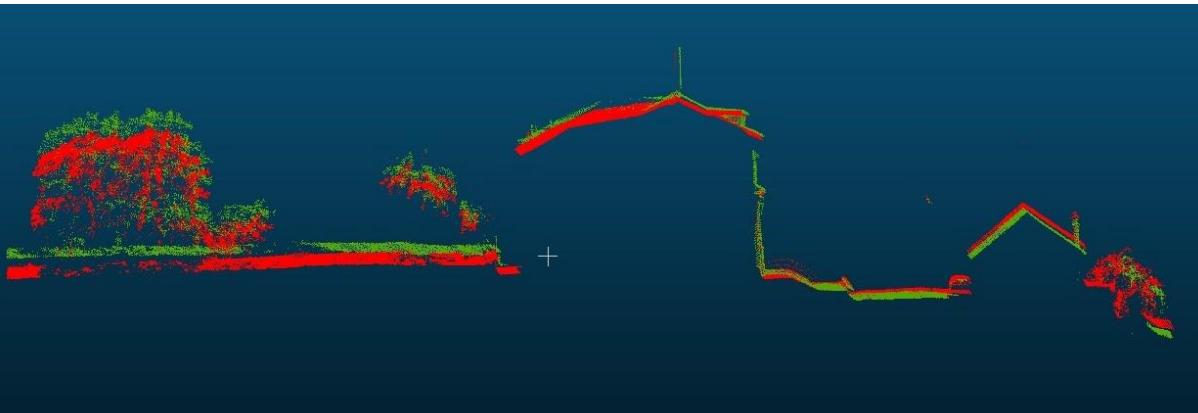


Úpská jáma



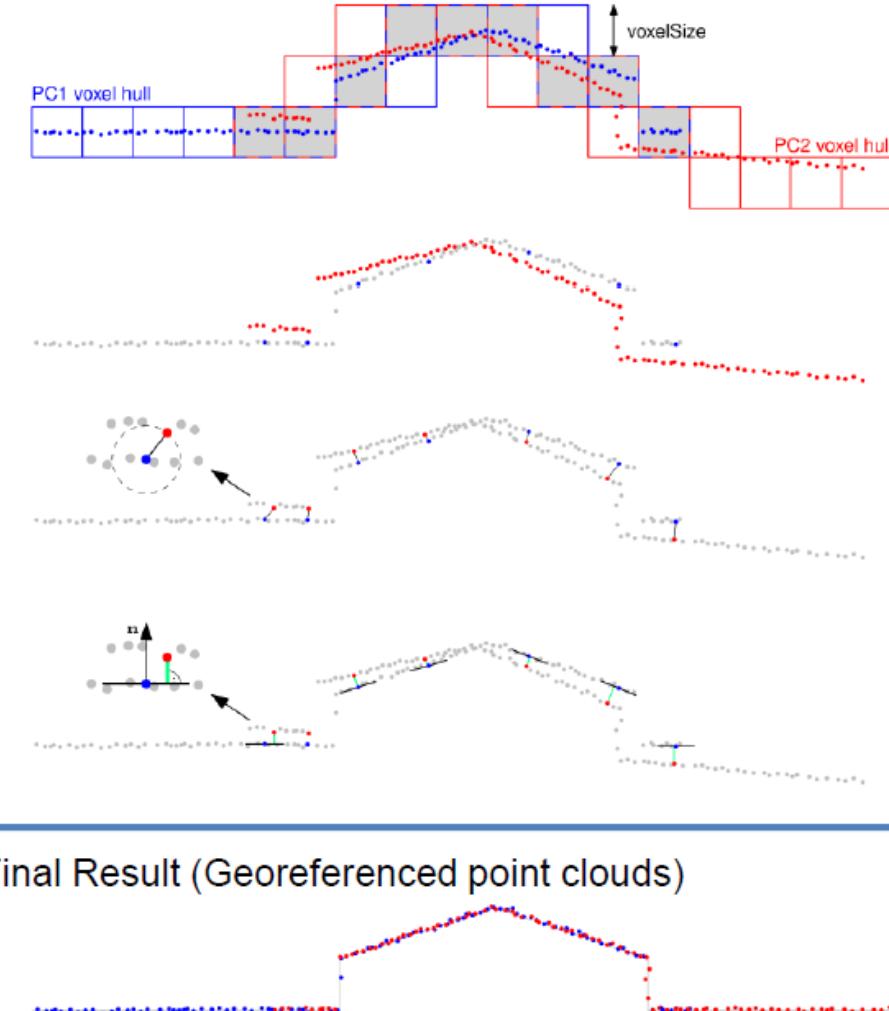
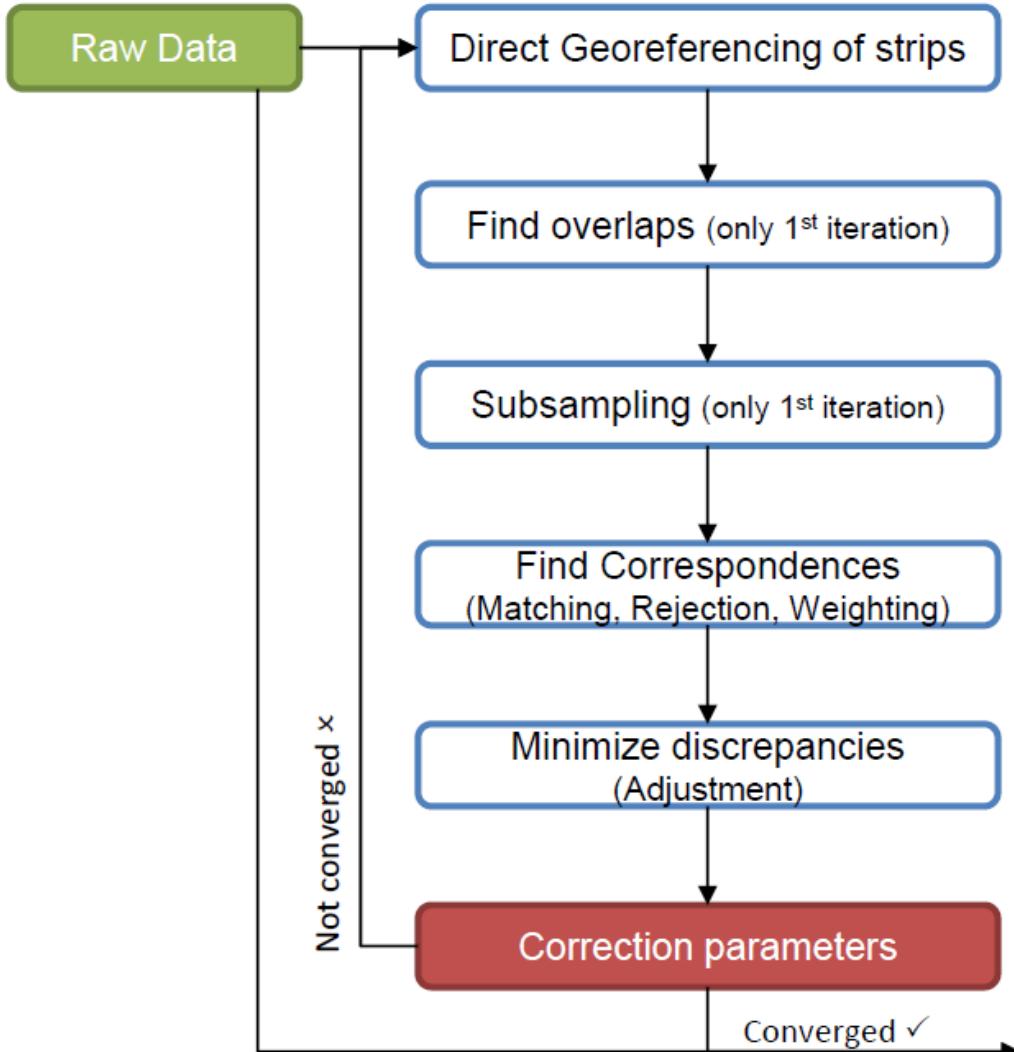
Vyrovnání skenovaných pásů

- Cíl: minimalizovat posuny a stočení mezi překrývajícími se pásy
- Příčiny posunů:
 - Přesnost GNSS (včetně konstelace satelitů, vzdálenost k referenční stanici) a IMU
 - Nahodilé pohyby a vibrace platformy (letadlo, UAV) např. vlivem nárazů větru
 - Vnitřní kalibrace senzoru
- Zjišťování rozdílů
 - Mezi odpovídajícími si plochami/objekty naskenovaných pásů (relativně) – metoda ICP (Iterative closest point)
 - Vůči vlícovacím a kontrolním bodům (absolutně vůči vztažnému souřadnicovému systému)



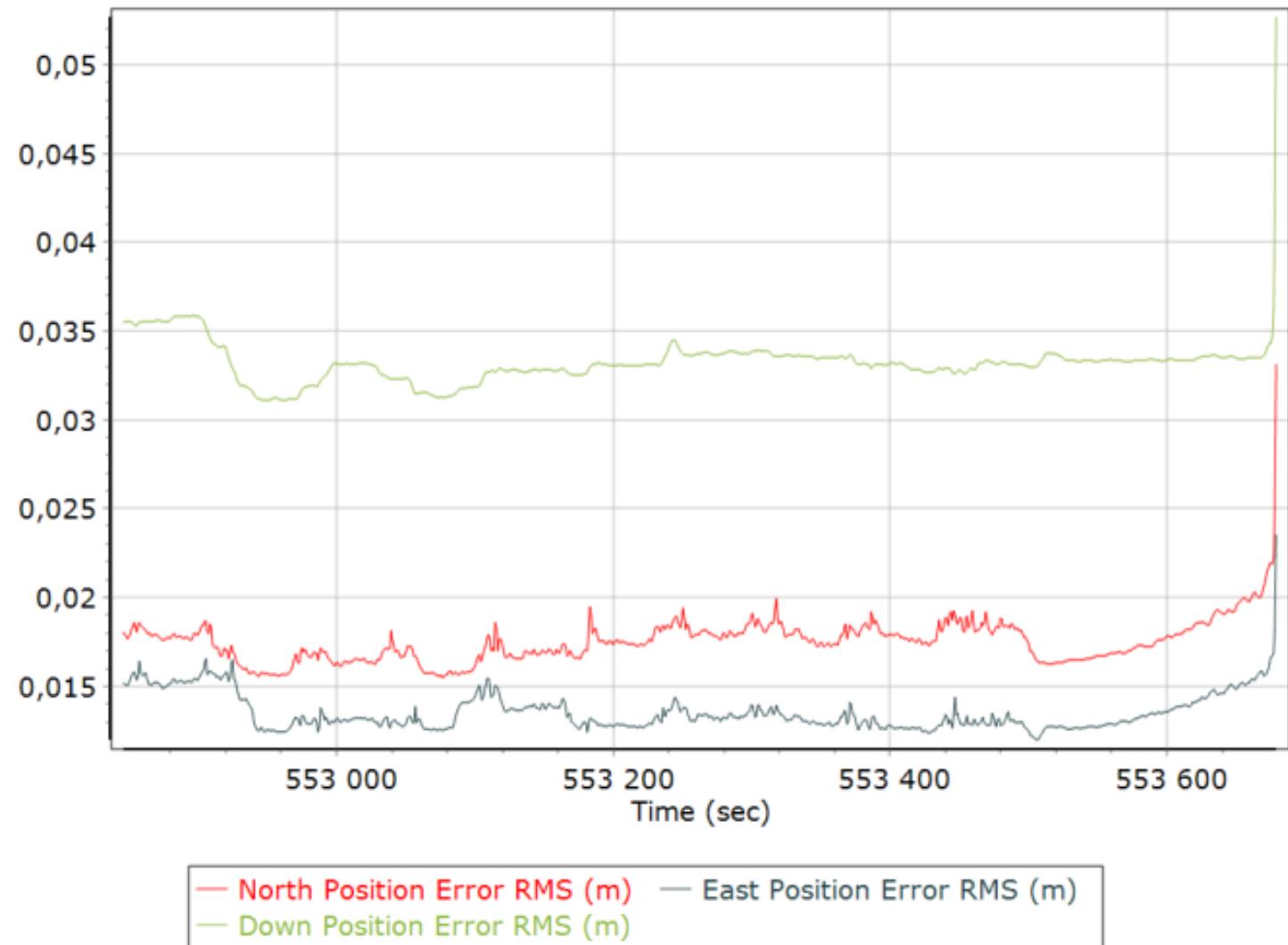
Dvořák D., 2021

Airborne LiDAR strip adjustment



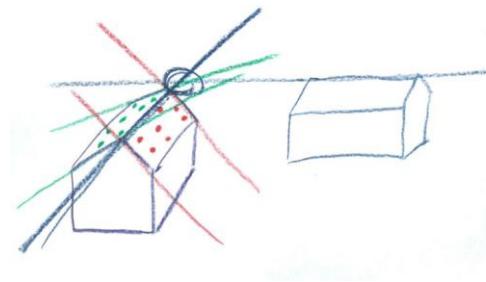
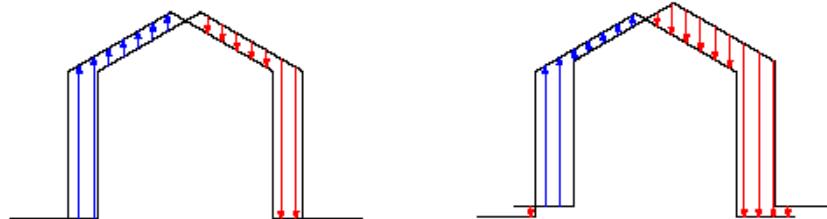
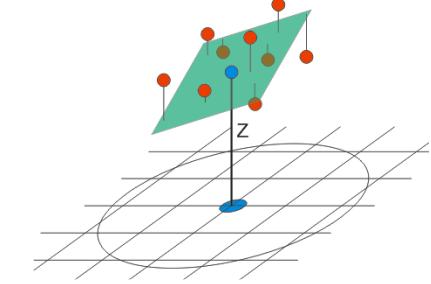
Kontrola kvality dat

- GNSS/IMU měření + výpočet trajektorie (protokol o výpočtu, např. PosPAC)



Kontrola kvality dat

- Relativní přesnost (šum v datech)
 - Směrodatná odchylka bodů jednoho pásu od lokální roviny
 - Metoda: výpočet DSM s využitím „plovoucí roviny“ („moving planes interpolation“) a výpočet směrodatné odchylky bodů od roviny na „hladkých“ plochách
- Absolutní přesnost vůči kontrolním bodům
- Výšková přesnost
 - Kontrolní body na plochých objektech (hřiště, parkoviště)
- Polohová přesnost
 - Kontrolní body identifikovatelné (modelovatelné) v bodovém mračnu, zejména hrany výškově členitých objektů, např. hřebeny střech (průsečnice střešních rovin)

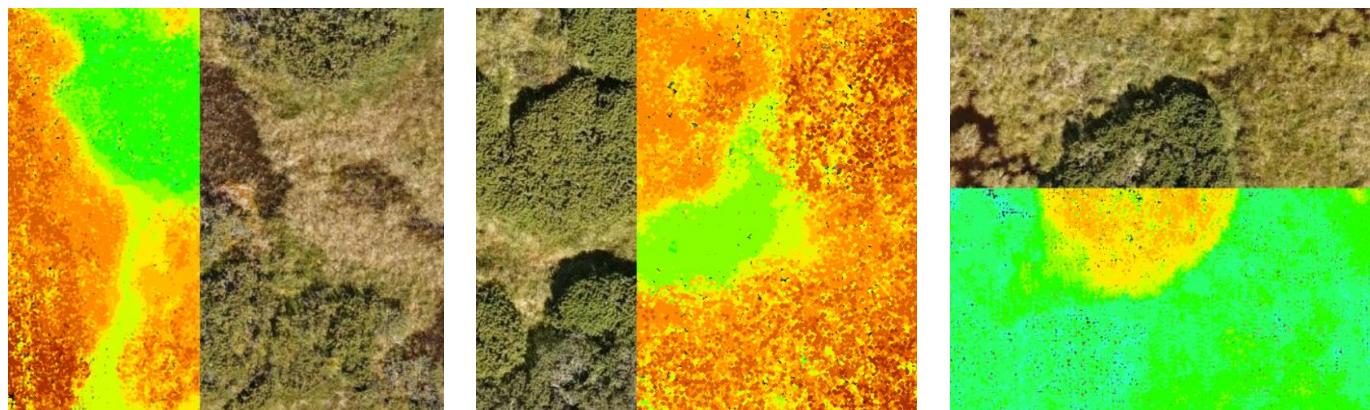


Medián a směrodatná odchylka rozdílů ve výšce kontrolních bodů měřených GNSS a určených z LiDARového snímání

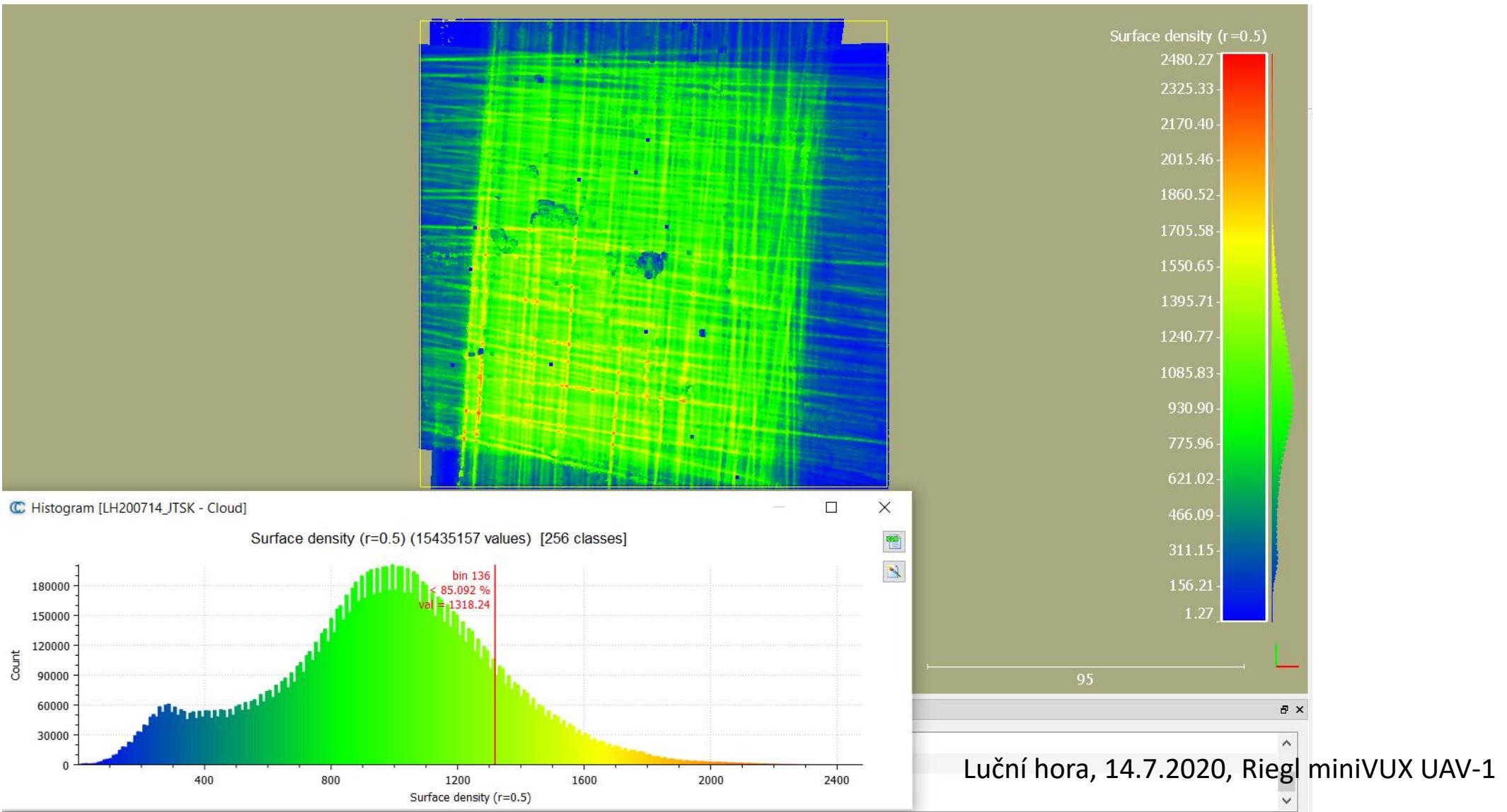
	<u>Termíny snímání v roce 2020</u>			
	Medián výškových rozdílů $dh = h_{GNSS} - h_{LiDAR}$ [m]			
	16.6.	14.7.	13.8.	9.9.
Luční hora	-0,07	-0,07	-0,03	-0,04
Bílá louka	-0,14	-0,11	-0,14	-0,02
Úpské rašeliniště	-0,09	-0,09	0,10	-0,04
kar - Úpská jáma	-	-0,26	-0,14	-0,03
Směrodatná odchylka výškových rozdílů $dh = h_{GNSS} - h_{LiDAR}$ [m]				
Luční hora	0,03	0,05	0,03	0,13
Bílá louka	0,03	0,04	0,03	0,02
Úpské rašeliniště	0,02	0,04	0,03	0,03
kar - Úpská jáma	-	0,16	0,17	0,15



Příklad vizuální kontroly polohového přesnosti bodového mračna nad ortofotem z UAV mapování

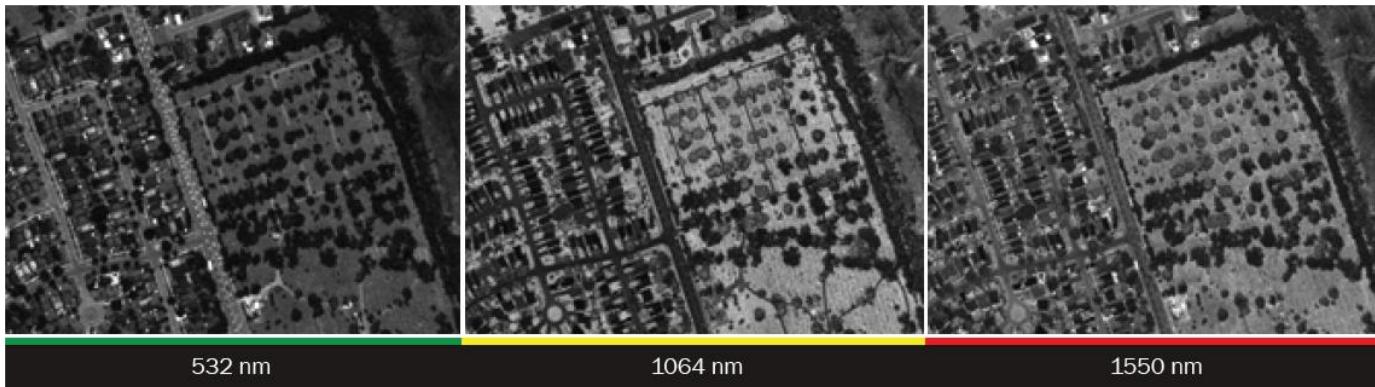
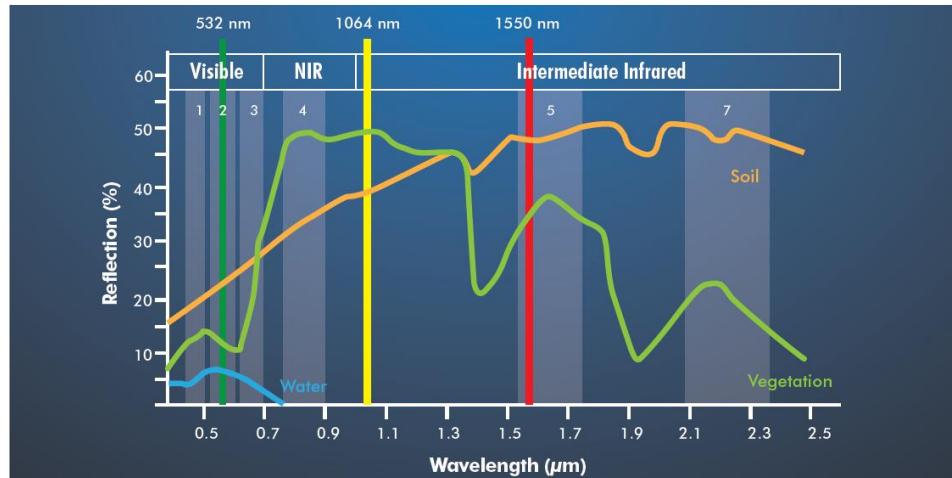


Kontrola kvality dat – hustota bodů



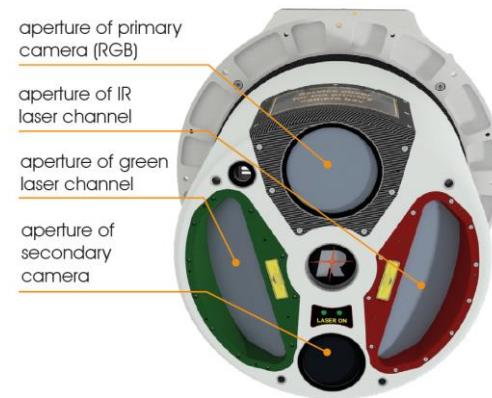
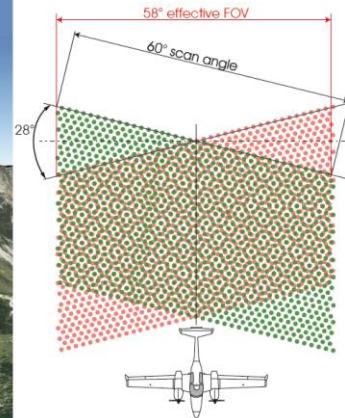
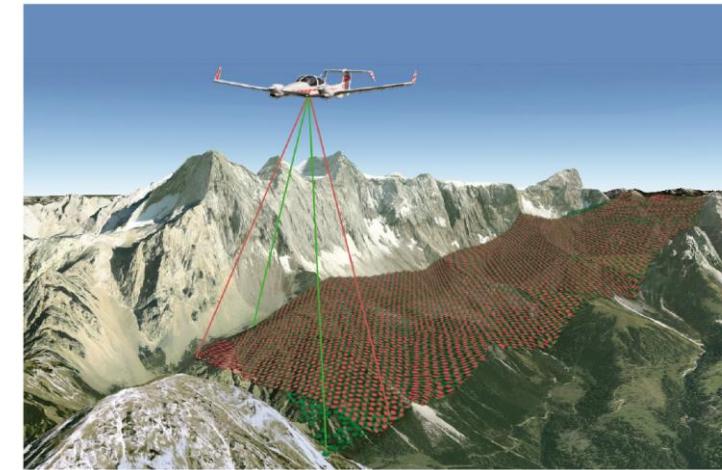
Nové trendy – multispektrální LiDAR

Teledyne Optech : Titan



<https://www.teledyneoptech.com/>

Riegl VQ-1560i-DW, 532 nm & 1064 nm



<http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/55/>

Multispektrální LiDAR – příklady aplikací



Article

Forest Inventory and Diversity Attribute Modelling Using Structural and Intensity Metrics from Multi-Spectral Airborne Laser Scanning Data

Tristan R.H. Goodbody ^{1,*}, Piotr Tomalski ¹, Nicholas C. Coops ¹, Chris Hopkinson ², Paul Treitz ³ and Karin van Ewijk ^{3,4}



Article

Multispectral LiDAR Data for Land Cover Classification of Urban Areas

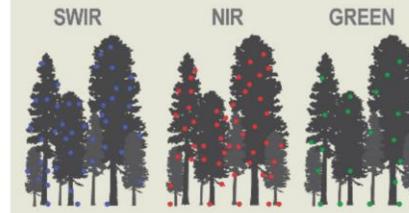
Salem Morsy ^{*}, Ahmed Shaker and Ahmed El-Rabbany



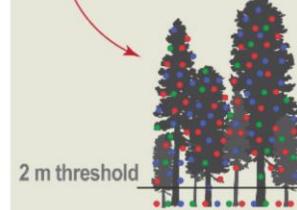
- Unclassified
- Buildings
- Trees
- Roads
- Grass

MULTI-SPECTRAL ALS PROCESSING

Voxelize



Normalize



Spectral metrics

*i*_{total}

*i*_{mean}

*i*_{pcumzq10}

%pts > 2m

Structural metrics

zp90

zmean

ipcumzq10

—

Structure & intensity

%RMSE

Volume

Shannon

Richness

Struc. only

Struc. & intensity

DBH

≥ 9cm

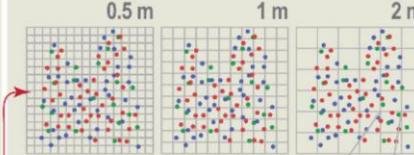
Field measurements

Inventory attributes

Diversity attributes

VOXELIZATION & SPECTRAL ANALYSIS

Voxelize



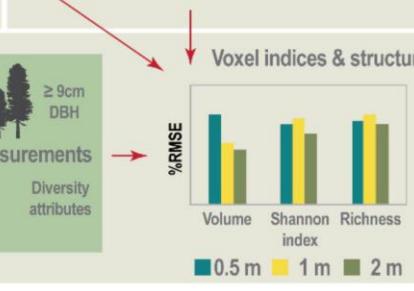
$$\begin{aligned} \text{SWIR}_i &= \bullet_i \\ \text{NIR}_i &= \bullet_i + \bullet_i + \bullet_i + 3 \\ \text{GREEN}_i &= \bullet_i + \bullet_i + 2 \end{aligned}$$

$$\text{CVI}_g = \frac{(\text{SWIR}_i \times \text{NIR}_i)}{(\text{GREEN}_i)}$$

$$\text{NDVI}_{\text{SWIR}} = \frac{(\text{SWIR}_i - \text{NIR}_i)}{(\text{SWIR}_i + \text{NIR}_i)}$$



Plot-level voxel index summary



Nové trendy – hybridní senzory

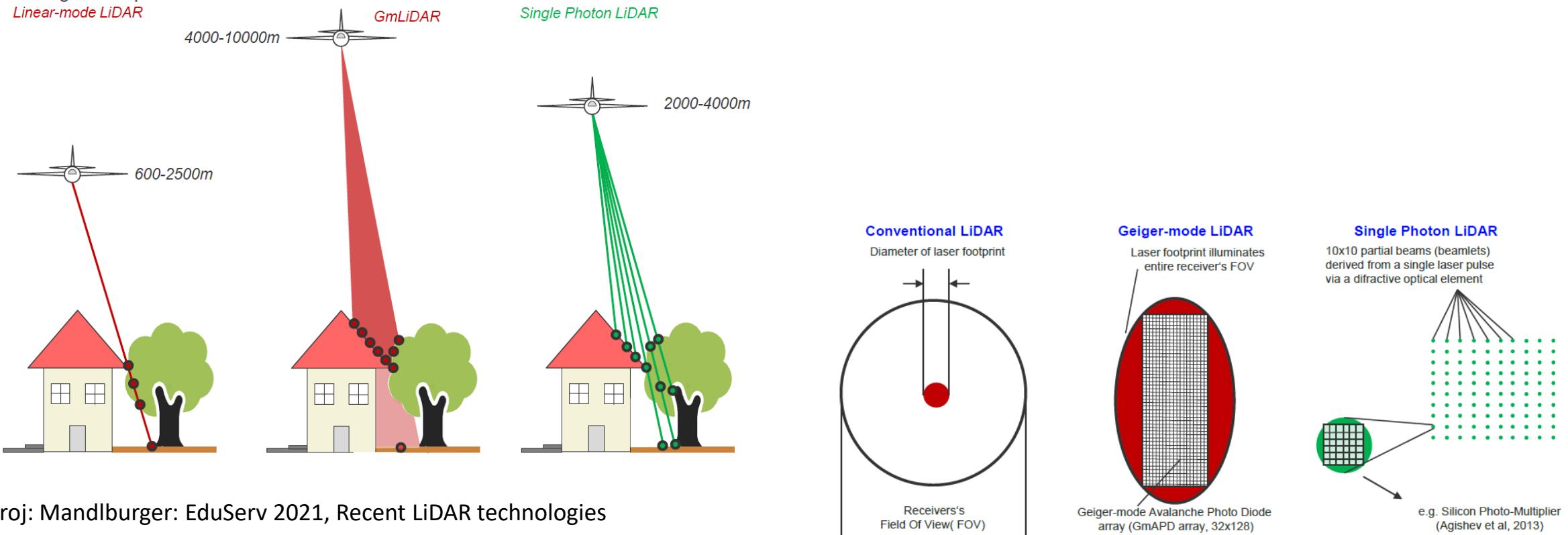
- Kombinace LiDARu a kamery



Produkt	LiDAR λ [nm]	Frekvence skenování [kHz]	Kamera	Rozlišení	Velikost pixelu [μm]
Optech Titan	532/1064/1550	3 x 300	CM-10000	80 MP,RGB	5.2
Optech Galaxy PRIME	1064	2 x 2000	PhaseOne	150 MP,RGB	3.8
Riegl VQ-1560II-S	2 x 1064	2 x 1333	PhaseOne	150 MP, RGB	3.8
Leica TerrainMapper 2	1064	2000	2 x MFC150	150 MP,RGB(I)	3.8
Leica CityMapper 2	1064	2000	6 x MFC150	150 MP,RGB(I)	3.8

Nové trendy – Geiger mode a SPL LiDAR

Comparison: single laser pulse



Zdroj: Mandlburger: EduServ 2021, Recent LiDAR technologies

Figure 1. Principle sketch: Incoming laser radiation from the receiver's perspective

Mandlburger, G., Lehner, H., & Pfeifer, N. (2019). A COMPARISON OF SINGLE PHOTON AND FULL WAVEFORM LIDAR. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.

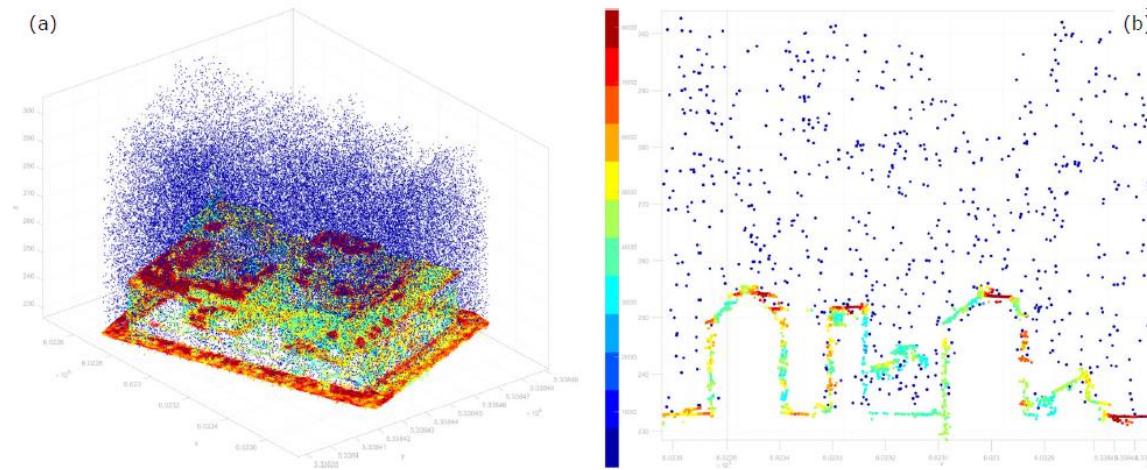


Figure 4. Unfiltered SPL100 3D point cloud of a building block within the city test area colored by intensity [DN]; (a) perspective view of the entire building block, (b) section view of a subarea

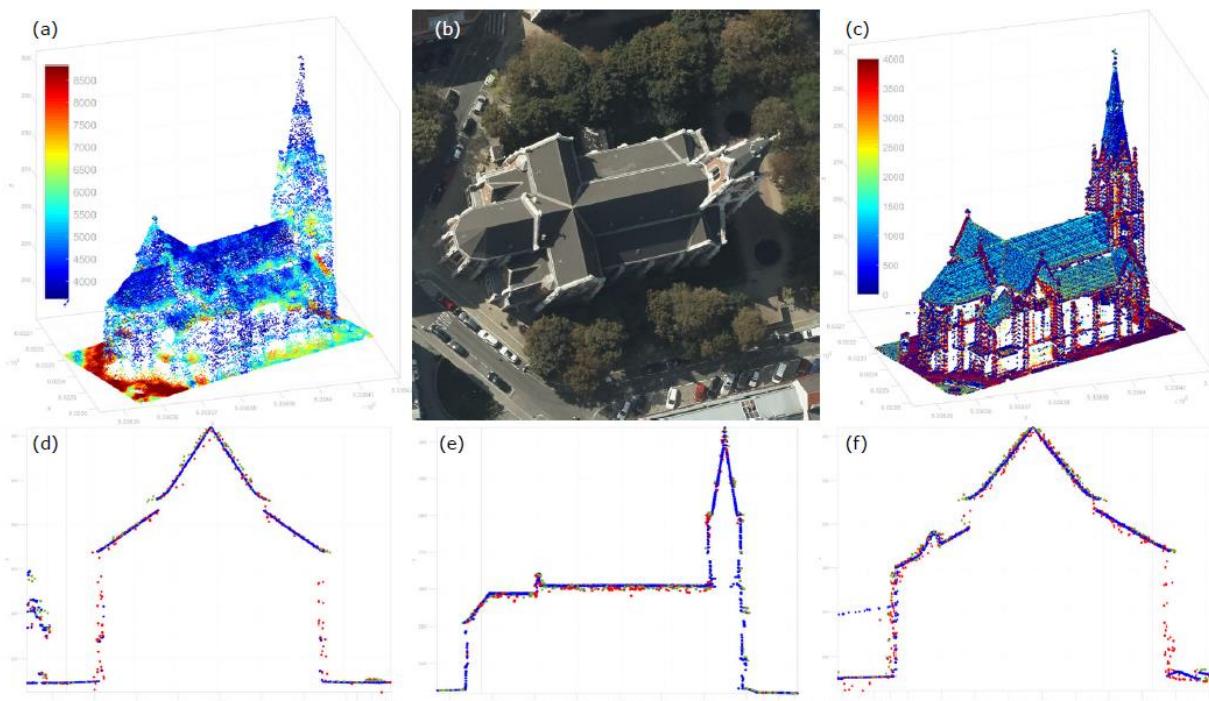


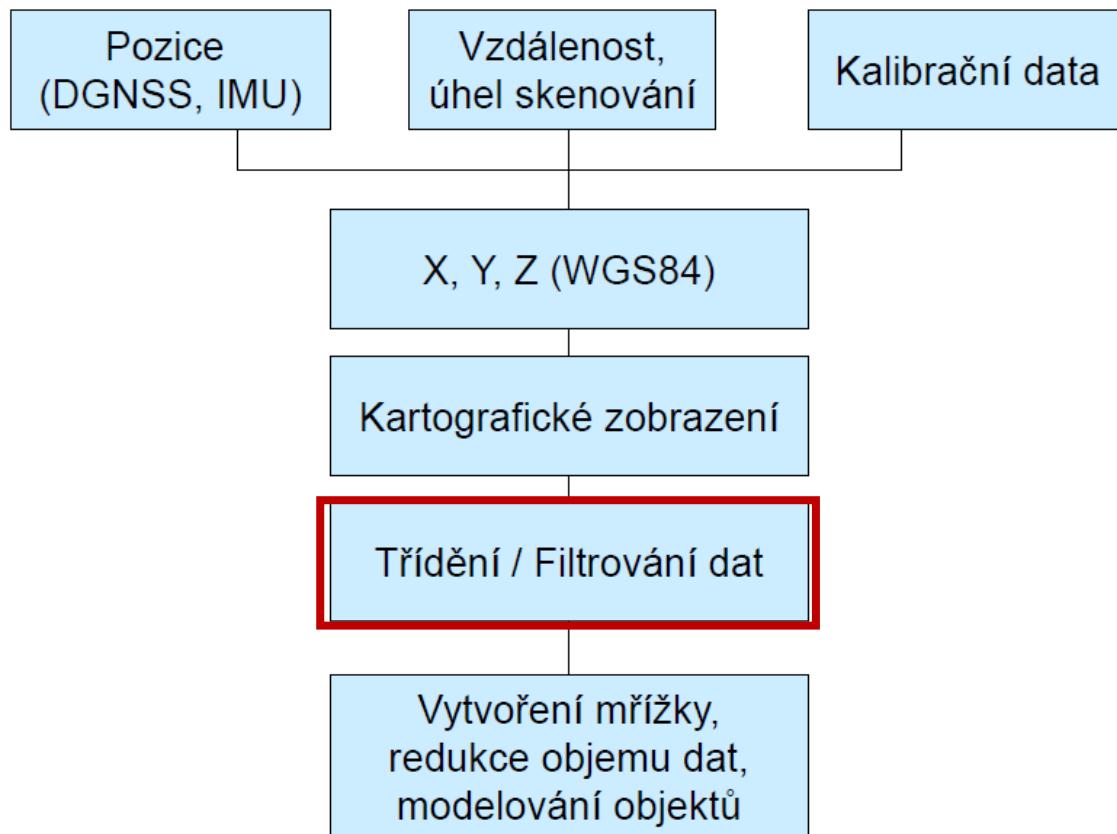
Figure 5. 3D point cloud of the church (city test area) after clutter point removal; (a) perspective view of SPL point cloud colored by intensity [DN], (b) aerial image (PhaseOne, September 2018), (c) perspective view of waveform LiDAR point cloud colored by signal amplitude [DN], (d-f) section views (cross, longitudinal, diagonal): SPL unfiltered/postprocessed (red/green), waveform LiDAR (blue)

Tvorba DMR z dat laserového skenování

Filtrace bodového mračna

Filtrace dat leteckého laserového skenování (LLS)

Zpracování dat LLS

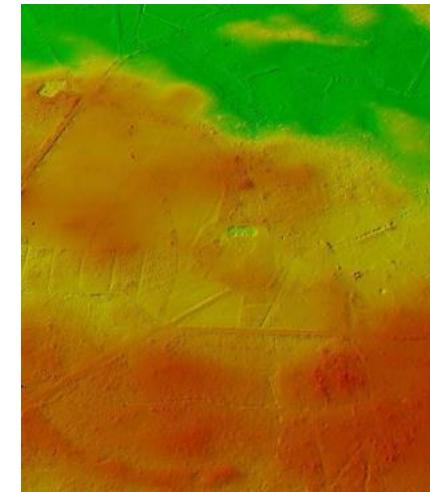
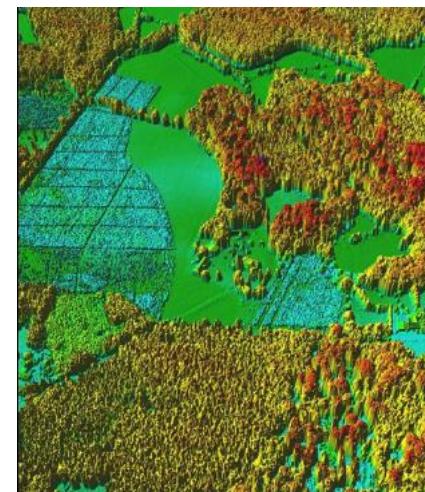


• Cíl filtrace

- oddělení bodů reliéfu od ostatních bodů (budovy, vegetace, ...)
- odstranění hrubých chyb

• Proč DMR?

- tvorba ortofot
- zjišťování výšky porostu ($nDSM = DMP - DMR$)
- první krok pro modelování 3D objektů



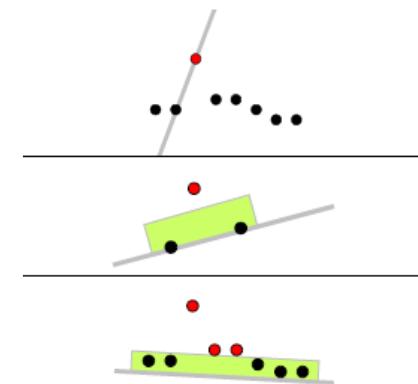
Charakteristiky filtrů

1) Struktura dat (nepravidelná x pravidelná)

2) Počet zpracovávaných bodů

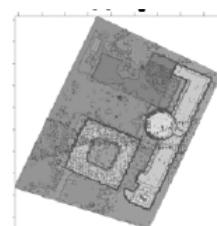
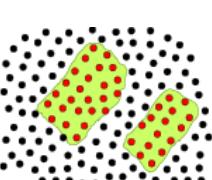
- Vztah

- Bod-bod
- Bod-body
- Body-body



3) Základní koncept filtru

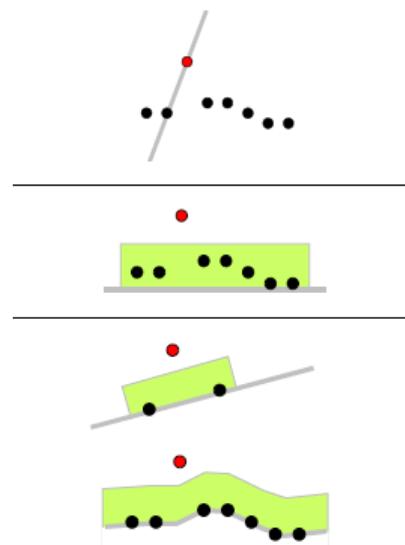
- sklon
- minimální vzdálenost od roviny
- vzdálenost k parametrizovanému povrchu
- segmentace



4) Způsob výpočtu

- v jednom kroku (morphologický filtr)
- iterativní (zhušťování TIN, robustní filtrace)
- využití dalších příznaků – pořadí a počet odrazů, intenzita, šířka pulsu

<https://www.itc.nl/isprs/wgIII-3/filtertest/>



Sithole, Vosselman 2003

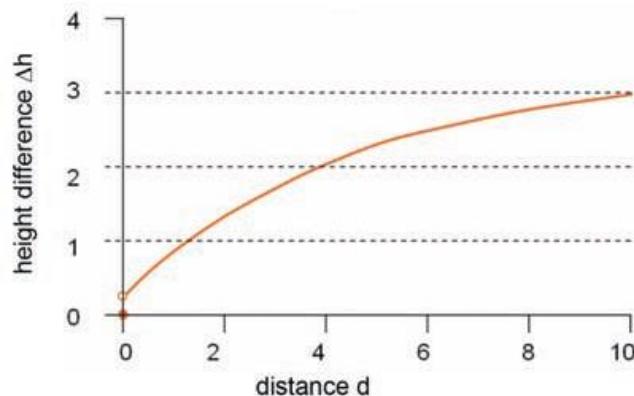
Morfologický filtr

- Porovnává převýšení hodnoceného bodu (střed filtru) a bodů sousedních bodů v závislosti na jejich vzdálenosti
- Jestliže jedno z převýšení je větší než maximálně přípustné, bod je vyloučen z kategorie „reliéf“

$$\mathbf{P}_T = \{p_i \in \mathbf{P} \mid \forall p_k \in \mathbf{P}: z_i - z_k \leq \Delta h_{\max}(d_{ik})\}, \quad d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$$

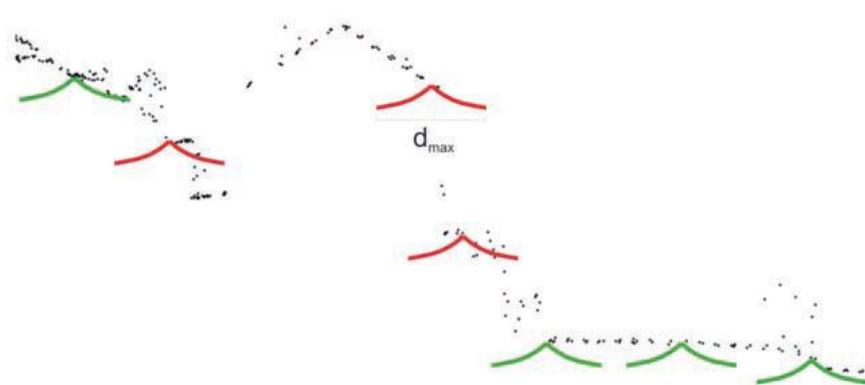
$$\Delta h_{\max}(d) = \sqrt{2}\sigma_z + d \tan(\gamma), \quad d \leq d_{\max}$$

σ_z ... směrodatná odchylka určení výšky bodu
 γ ... maximální přípustný sklon
 d_{\max} ... např. 5 m



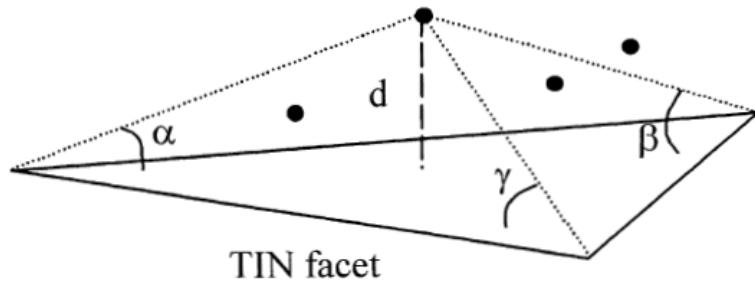
Pfeifer, 2003;

Briese, 2010

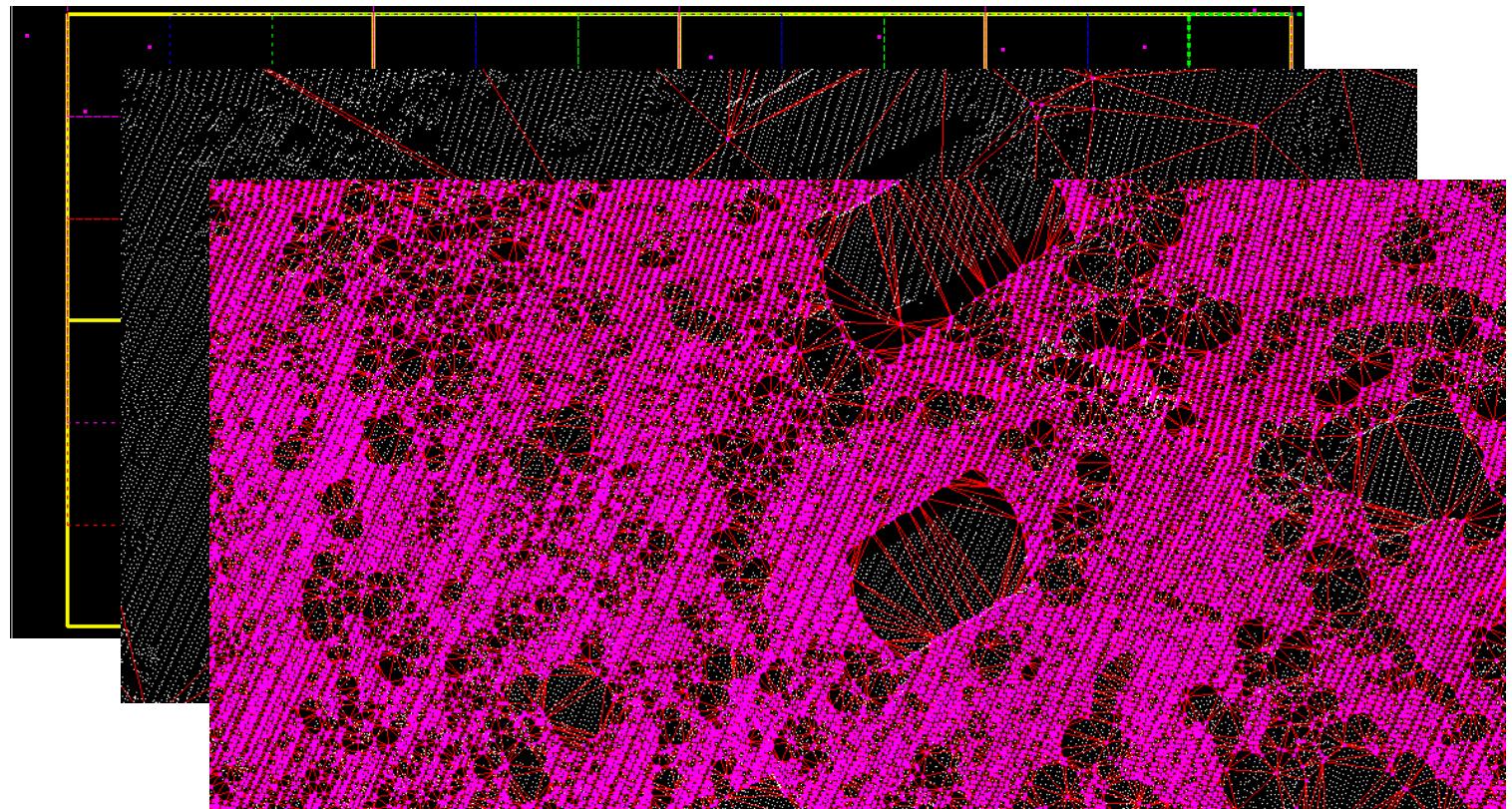


Zhušťování TIN

- Nalezení nejnižších bodů v uživatelem zvolené mřížce (uvážit rozsáhlé budovy)
- Zhušťování sítě dle parametrů vznikajících čtyřstěnů (úhly + výška – volí se v závislosti na typu terénu)
- SW TerraScan, LasTools



Axelsson, 2000

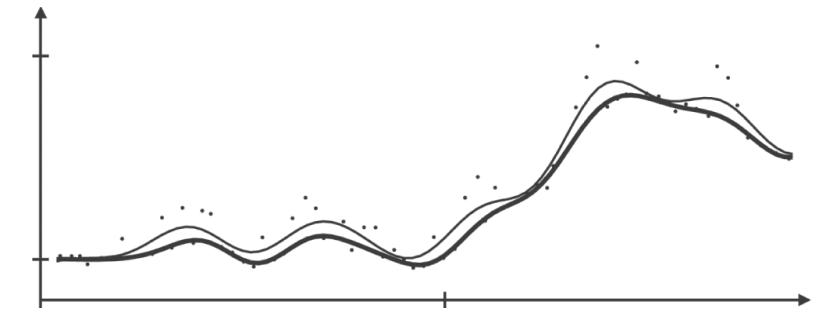
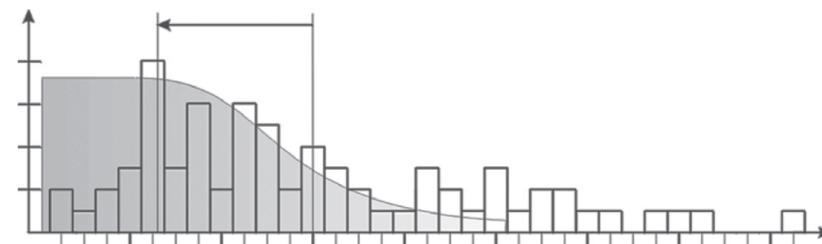
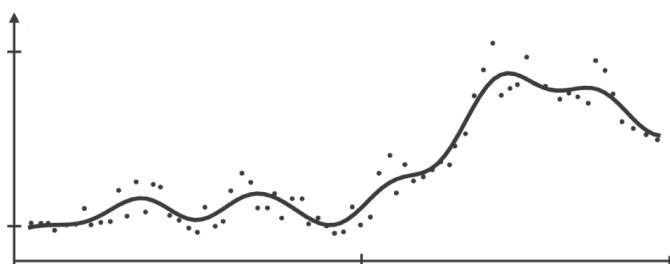
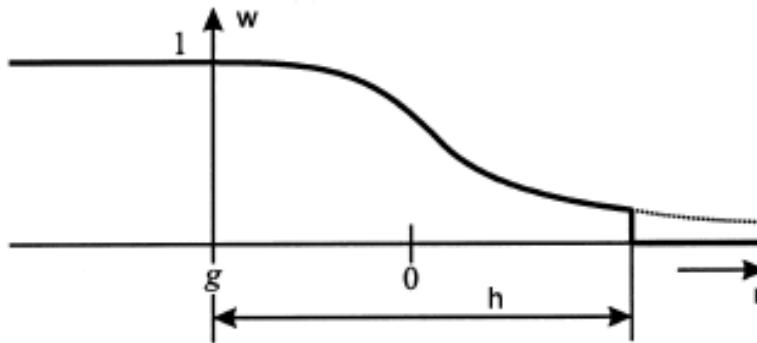


Robustní interpolace

- Inicializace: všechny body náleží reliéfu
- Iterativní postup
 - Obecný model reliéfu s využitím lineární predikce (least squares interpolation, simple kriging)
 - Odstranění bodů mimo reliéf váhovou funkcí

$$w(r) = \begin{cases} r < g \\ g \leq r \leq g + h \\ r > g + h \end{cases}$$

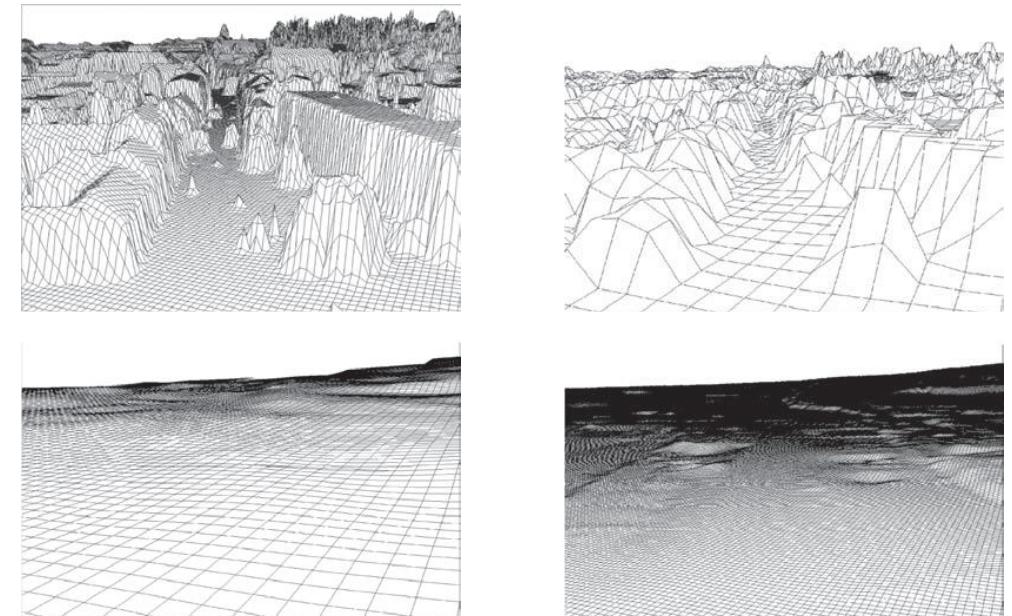
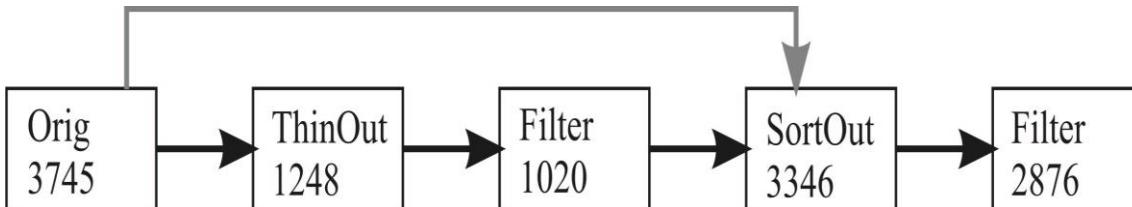
$$\frac{1}{1 + (a(r - g))^b}$$



Kraus, Pfeifer, 1998

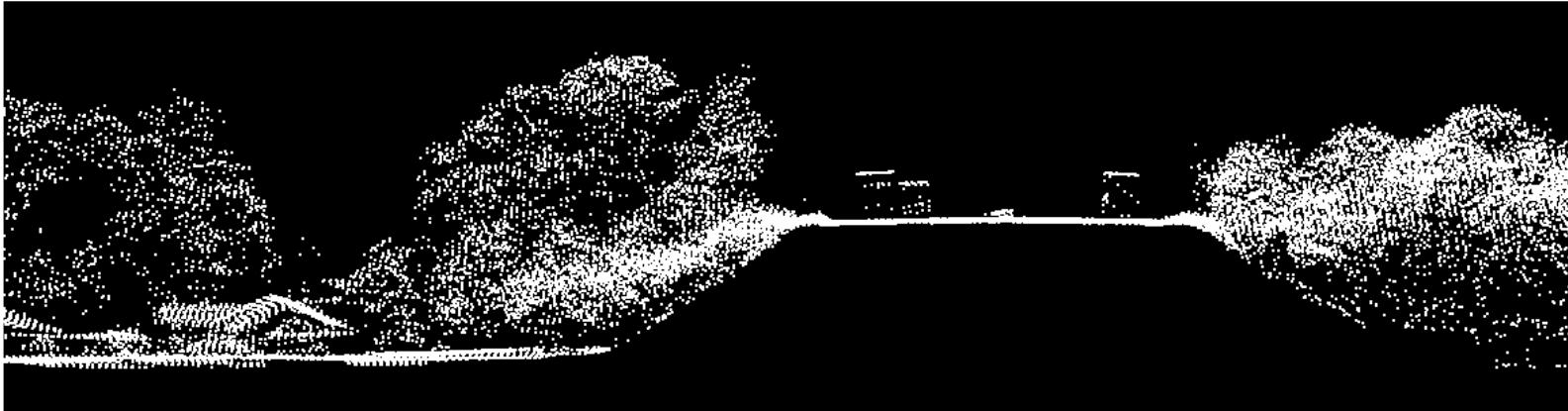
Robustní interpolace

- Metoda funguje dobře pro zalesněné oblasti, i když je míra prostupnosti 50 % nebo nižší. Počet požadovaných iterací bývá tři nebo čtyři. V prvních iteracích jsou eliminovány body vyšších pater vegetace a v dalších iteracích body pod vegetací.
- Metoda selhává, pokud odpovídající se vegetaci vytvářejí shluky bez jediného bodu terénu a pokud je metoda aplikována na městské oblasti, kde body mimo terén vykazují podobnou systematickost (např. n střeše domu).
- Možnost řešení – hierarchický přístup (pyramida bodových mračen s různou hustotou bodů):
 1. robustní interpolace se aplikuje v úrovni s nejnižší hustotou bodů,
 2. výsledek 1 (DMR) se použije v další vrstvě s vyšším rozlišením atd.

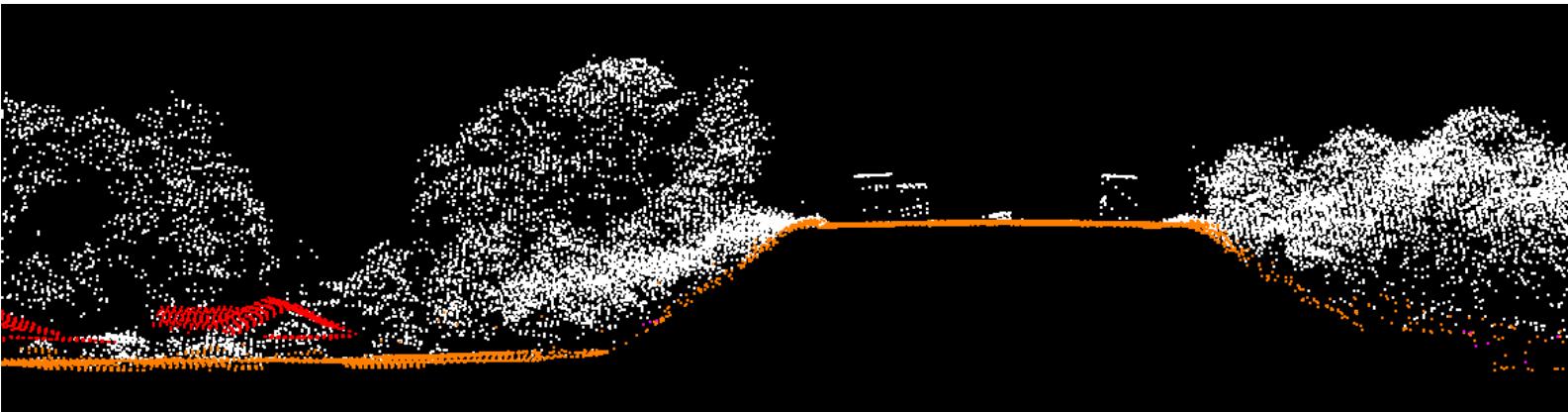


Pfeifer, N., Stadler, P. and Briese, C., 2001. Derivation of digital terrain models in the SCOP++ environment. *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models*, 1–3 March 2001, Stockholm, Sweden

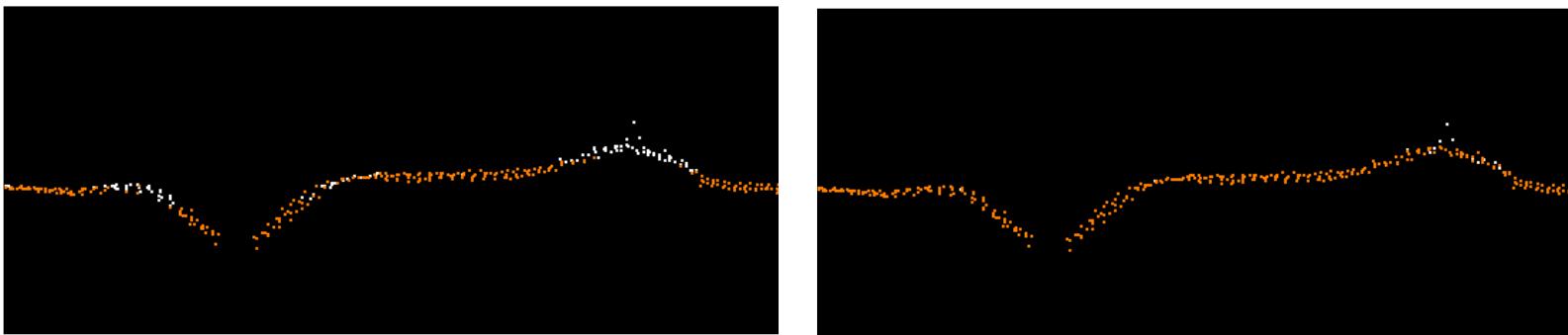
Briese 2010



Původní bodové mračno



Bodové mračno po filtraci (a klasifikaci)



chybně

správně

Nastavení parametrů filtrace

Další metody filtrace ...

- Tóvári, D., & Pfeifer, N. (2005). Segmentation based robust interpolation-a new approach to laser data filtering. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3/19), 79-84.
- Zhang et al. (2016) An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sensing*, 2016, 8, 501; doi:10.3390/rs8060501

Další kroky zpracování

- Extrakce hran
- Ředění bodového mračna
- Interpolace DMR (gridu)

Kvalita (přesnost) výsledného DMR závisí na

- kvalitě původního bodového mračna (přesnost georeferencování – GNSS, IMU; kalibrace; existence překryvu),
- kvalitě filtrace (problematické u nízké husté vegetace),
- kvalitě interpolace DMR.
- Vztah DMR a původního bodového mračna je rozebrán v
- Karel, W., Pfeifer, N., Briese, C. (2006). DTM quality assessment. In *ISPRS Technical Commission II Symposium 2006* (pp. 7-12). International Archives of the ISPRS.
- Kraus, K., Briese, C., Attwenger, M., Pfeifer, N. (2004). Quality measures for digital terrain models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 35.

Dle Karel and Kraus (2006)

$$\sigma_z \text{ [cm]} = \pm \left(\frac{6}{\sqrt{n}} + 30 \tan(\alpha) \right)$$

σ_z ... směrodatná odchylka určení výšky
bodu z LiDARového snímání
 α ... sklon terénu
 n ... počet bodů na m^2

Digitální modely reliéfu a povrchu na území ČR odvozené z dat leteckého laserového skenování

Stručný název (rok dokončení pro celou ČR)	Popis	Přesnost (střední chyba)
DMR 4G (2013)	Digitální model reliéfu ve formě mříže 5 x 5 m	0,3 m v odkrytém terénu 1 m v zalesněném terénu
DMR 5G (2016)	Digitální model reliéfu ve formě nepravidelné sítě bodů (TIN)	0,18 m v odkrytém terénu 0,30 m v zalesněném terénu
DMP 1G (2016)	Digitální model povrchu ve formě nepravidelné sítě bodů (TIN)	0,4 m pro přesně prostorově vymezené objekty (budovy) 0,7 m pro objekty přesně neohraničené

Brázdil, 2010

Doporučená literatura

Učebnice

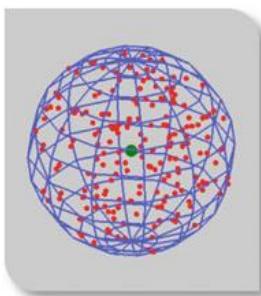
- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
- Vosselman, G., & Maas, H. G. (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC press.

Články

- Glira, P., Pfeifer, N., Briese, C., & Ressl, C. (2015). RIGOROUS STRIP ADJUSTMENT OF AIRBORNE LASERSCANNING DATA BASED ON THE ICP ALGORÍTHM. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2.
- Goodbody, T. R., Tompalski, P., Coops, N. C., Hopkinson, C., Treitz, P., & van Ewijk, K. (2020). Forest inventory and diversity attribute modelling using structural and intensity metrics from multi-spectral airborne laser scanning data. *Remote Sensing*, 12(13), 2109.
- Mandlburger, G., Lehner, H., & Pfeifer, N. (2019). A COMPARISON OF SINGLE PHOTON AND FULL WAVEFORM LIDAR. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
- Morsy, S., Shaker, A., & El-Rabbany, A. (2017). Multispectral LiDAR data for land cover classification of urban areas. *Sensors*, 17(5), 958.
- White, J. C., Woods, M., Krahn, T., Papasodoro, C., Bélanger, D., Onafrychuk, C., & Sinclair, I. (2021). Evaluating the capacity of single photon lidar for terrain characterization under a range of forest conditions. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112169.
- Axelsson, P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(Part B4), 110–117.
- Kraus, K. and Pfeifer, N., 1998. Derivation of digital terrain models in wooded areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(4), 193–203.
- Kraus K. and Pfeifer, N., 2001. Advanced DTM generation from lidar data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(Part 3/W4), 23–30.
- Sithole, G. and Vosselman, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(3-4), 202–224.
- Vosselman, G., 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(Part 3B), 935–942.

Klasifikace bodového mračna

- Definice okolí bodu



k-NN

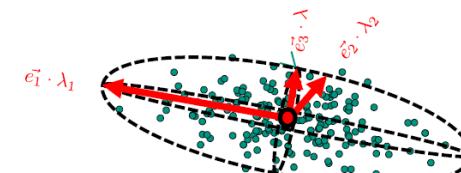
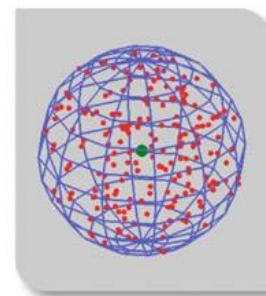
k -fixed vs. k – opt.

$$E_{\text{dim}} = -L_\lambda \ln(L_\lambda) - P_\lambda \ln(P_\lambda) - S_\lambda \ln(S_\lambda)$$

$$k_{\text{opt,dim}} = \arg \min_k E_{\text{dim}}(k)$$

nebo

$$E_\lambda = -\lambda_1 \ln(\lambda_1) - \lambda_2 \ln(\lambda_2) - \lambda_3 \ln(\lambda_3)$$



- Příznaky založené na okolí

- Eigenvalue-based features $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0$

→ Linearity:

$$L_\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1}$$

→ Planarity:

$$P_\lambda = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1}$$

→ Scattering:

$$S_\lambda = \frac{\lambda_3}{\lambda_1}$$

→ Omnivariance:

$$O_\lambda = \sqrt[3]{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}$$

→ Anisotropy:

$$A_\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_3}{\lambda_1}$$

→ Eigenentropy:

$$E_\lambda = - \sum_{i=1}^3 \lambda_i \ln(\lambda_i)$$

→ Sum of eigenvalues: $\Sigma_\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$

→ Change of curvature: $C_\lambda = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}$

Cvičení

S využitím sw CloudCompare nebo LasTools provedte filtraci bodového mračna části archeologické lokality [Klobásná](#) u Veselí nad Lužnicí. Vyfiltrované bodové mračno převedte na rastr a provedte vhodnou vizualizaci, zvýraznění mohyl.

Bonusová úloha:

Vypočtěte příznaky linearita, planarita a „scattering“ ve vhodně zvoleném okolí bodu pro dataset „Dlouhá Ves“. Provedte vizualizaci bodového mračna s využitím těchto příznaků.

Děkuji za pozornost

marketa.potuckova@natur.cuni.cz