

Landesweite Punktwolkenprozessierung mit OPALS am Supercomputer VSC3

Johannes OTEPKA¹, Markus PÖCHTRAGER¹, Markus HOLLAUS¹, Ana-Maria LOGHIN¹, Livia PIERMATTEI¹, Christian BRIESE² und Norbert PFEIFER¹

¹ Department für Geodäsie und Geoinformation, TU Wien · johannes.otepka@geo.tuwien.ac.at

² EODC Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring GmbH, Wien

Zusammenfassung

Um landesweite oder länderübergreifende Punktwolken aktueller Punktdichte in überschaubaren bzw. geforderten Zeiträumen prozessieren zu können, sind effiziente Software-Tools und große Rechenpower notwendig. Die Linux-Version des modularen Software-Pakets OPALS (Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data) der TU Wien bietet eine Basis um verteilte Prozessierungen am Supercomputer VSC3 (Vienna Scientific Cluster 3) durchzuführen. An Hand zweier Projekte wird die technische Umsetzung am VSC3 für Punktwolken aus Image Matching und für LiDAR-Punktwolken aufgezeigt. Zusätzlich werden wirtschaftliche Aspekte dieser Lösung diskutiert.

1 Einführung

Die meisten europäischen Länder werden in regelmäßigen Intervallen photogrammetrisch und mittels LiDAR vermessen. Aufgrund der größeren Kosten erfolgen Laserscanner-Befliegungen üblicherweise in größeren Intervallen als Bildflüge. In Österreich gibt es z.B. einen 3 Jahreszyklus bei der photogrammetrischen Erfassung. Mehrere Bundesländer haben auch schon mehrfach LiDAR-Kampagnen durchführt. Hier scheint sich ein 10 Jahresrhythmus zu etablieren. Da sich Photogrammetrie und Laserscanning in vielen Bereichen ideal ergänzen (z.B. Bild - mehrkanalige radiometrische Information, LiDAR - bessere Geometrie, Durchdringung von Vegetation, gesicherte 3D Information auch in texturarmen Bereichen, etc.; RESSL et. al. 2016), geht die technologische Entwicklung zu integrierten Sensoren, welche Kameras und LiDAR-Sensoren in einem Gehäuse kombinieren. Daher ist anzunehmen, dass in zukünftigen Projekten häufiger Photographie und LiDAR simultan eingesetzt werden (MANDLBURGER et. al. 2017).

Diese Entwicklung verstärkt durch höhere Auflösung der Bilder (inkl. Schrägaufnahmen) sowie die höheren Punktraten von LiDAR-Systemen, stellen zunehmend größere Anforderungen an die Prozessierung der Daten. Die Single-Thread-Performance der Prozessoren ist in den letzten Jahren kaum mehr gestiegen, weshalb (momentan) nur durch Erhöhung der Kern-Anzahl innerhalb einer CPU die Rechenleistung weiter gesteigert werden kann. Um diese modernen Prozessoren auslasten zu können, muss die Prozessierung auf die einzelnen Kerne verteilt und damit parallelisiert werden. Doch für die Abwicklung landesweiter oder länderübergreifender Projekte sind einzelne Hochleistungsworkstation kaum mehr in der Lage, die notwendigen Prozessierungsschritte in überschaubaren bzw. geforderten Zeiträumen durchzuführen. In solchen Fällen ist eine zusätzliche Verteilung der Aufgaben auf „unabhängige“ Computer sinnvoll bzw. notwendig.

Andererseits unterliegen Firmen, welche Photogrammetrie- oder Laserscanning-Projekte kompetitiv erhalten und durchführen, entsprechendem wirtschaftlichen Druck und können Computerressourcen nicht beliebig erwerben bzw. betreiben. Eine interessante Alternative zur eigenen Computer-Infrastruktur bieten verschiedene Cloud Services. Solche Services werden z.B. durch das EODC¹ angeboten. Der Schwerpunkt des EODC liegt in der Bereitstellung einer IT-Infrastruktur zur Prozessierung, Speicherung und Verteilung großer Datenmengen. Über die Infrastruktur des EODCs erhält man z.B. Zugriff auf den VSC3² und ein direkt angebundenes Petabyte-Filesystem und kann so diese große Rechenpower für wissenschaftliche und kommerzielle Projekte nutzen.

Der gegenständliche Beitrag untersucht die Möglichkeit großflächige Projekte am VSC3 zu verarbeiten. Dabei werden praktische, technische und wirtschaftliche Aspekte analysiert und diskutiert. Im Projekt *PleiAlps* geht es um die Möglichkeit der Ableitung von Forstparameter für den gesamten Alpenbogen mittels Pléiades-Satellitenbildern, wobei sich die durchgeführten Analysen auf die Prozessierung der Punktwolken beschränken. Der aufwendige Dense-Image-Matching (DIM) Prozesses ist hier jedoch nicht inkludiert, da kein passendes Softwaretool zur Verfügung stand, welches DIM für Push-Broom-Sensoren parallelisiert auf einem HPC-Cluster (**H**igh **P**erformance **C**omputer) unter Linux ausführen kann³. Bei der zweiten Untersuchung geht es um die Klassifizierung von LiDAR-Daten der aktuellen LiDAR-Befliegung der Stadt Wien (TRAN et. al. 2018). In beiden Analysen wurde die Punktwolkenprozessierungssoftware OPALS des Departments für Geodäsie und Geoinformation der TU Wien verwendet. OPALS (**O**rientation and **P**rocessing of **A**irborne **L**aser **S**canning data) hat den Anspruch eine vollständige Prozesskette für ALS-Daten (**A**irborne **L**aser-**S**canning) von der rohen Messung bis zur Anwendungen in modularer Weise bereit zu stellen (PFEIFER et. al. 2014). Auch wenn ALS der allgemeine Fokus von OPALS ist, können aufgrund der flexiblen Konzepte auch Punktwolken anderer Aufnahmetechniken z.B. Image-Matching, Time-of-Flight-Sensoren, Echolot, etc. verarbeitet werden. Die modulare Struktur, die Skripting-Fähigkeiten bzw. die vorhandene Linux Version von OPALS erlauben es recht einfach Workflows auf HPC-Cluster wie den VSC3 zu übertragen.

Die Prozessierung von topographischen Daten lässt sich im Allgemeinen recht einfach parallelisieren. Durch Aufteilen der Daten z.B. in 2D-Kacheln (mit Überlappung) können die Kacheln unabhängig voneinander und damit auch parallel verarbeitet werden. Nach abgeschlossener Berechnung werden die Resultate (ohne Überlappung) zusammengesetzt/mosaikiert, wobei gegebenenfalls noch ein Angleich/Blending der Daten am Kachelrand erfolgt. Es gibt aber globale Verarbeitungsschritte, welche nur als Gesamtes durchgeführt werden können, wie z.B. Streifen- oder Bündelblockausgleichung, Kachelmosaik erstellen, etc. Sind solche Schritte im Workflow (wie bei *PleiAlps*) vorhanden, muss der Gesamtworkflow in sequenzielle Tasks aufgespalten werden (siehe Abb. 2).

Im Folgenden werden Details zu den beiden Projekten und deren Workflows beschrieben. Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Infrastruktur des VSC und dessen Technik Jobs paralleli-

¹ EODC Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring GmbH, <https://www.eodc.eu/>

² Vienna Scientific Cluster 3, <http://vsc.ac.at/>

³ Wir wissen zumindest von einem Softwarehersteller, welcher an einer entsprechenden Implementierung arbeitet.

siert zu verarbeiten. Die technische Umsetzung der Workflows, Zeitanalysen sowie wirtschaftliche Aspekte werden in den Kapitel 3 und 4 beleuchtet. Ein Ausblick ist in Kapitel 5 zusammengefasst.

1.1 Aufgabenstellung in PleiAlps

Das FFG Projekt *PleiAlps* untersucht die Möglichkeit 3D Forstparameter für den gesamten Alpenbogen (190.959 km²) mittels Pléiades-Stereo-Bilder zu erfassen. Im Speziellen wurde

- der Einfluss der Aufnahmegeometrie auf die erfolgreiche Ableitung der Forstparameter,
- die erzielbare Genauigkeit und die Möglichkeit der Change-Detection aus Pléiades-Bildern und
- die Optimierung der Workflows für die Prozessierung des gesamten Alpenbogens

analysiert. Wie sich im Laufe des Projektes gezeigt hat, ist die Stereo-Akquirierung so großer Flächen mittels Pléiades, abgesehen von Limitierung durch Wolken, Nebel, Schnee, etc., vor allem durch die höhere Priorisierung andere Nutzer (Militär, kommerzielle Nutzer, etc.) schwierig zu realisieren. Für die gegenständliche Umsetzung und Analyse der Workflows am VSC spielt das aber keine Rolle.



Abb. 1:

Darstellung der prozessierten Pléiades-Bilder in Google Earth innerhalb des Gebietes der Alpinkonvention. Rot: neue akquirierte Bilder. Blau: Pléiades-Archiv-Bilder.

Die Basis für die Ableitung der Forstparameter ist das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM). Dieses wird durch Subtraktion des aus den Pléiades-Bildern berechneten Oberflächenmodells (DOM) mit dem Geländemodells (DGM) gewonnen. Als DGM wurden die jeweils aktuellen nationalen Geländemodelle verwendet. Bei länderübergreifenden Projekten sind im Allgemeinen unterschiedliche Koordinatensysteme in Verwendung. Neben Koordinatentransformation müssen oft zusätzliche lokale Anpassung der unterschiedlichen Datensätze gemacht werden, um eine zufriedenstellende homogene Georeferenzierung der Daten zu erhalten. So auch in diesem Fall, wobei stabile Bereiche (d.h. Gebiete mit geringer Rauigkeit, ohne Vegetation und keinen Wolken) im DOM bzw. DGM mittels Least-Square-Matching (LSM) zur Deckung gebracht wurden. Schließlich haben Verkippungs- oder Verschiebungsfehler direkten Einfluss auf das nDOM und damit auf die zu berechnenden Forstparameter (PIERMATTEI et. al. 2018).

Wie in Abb. 2 dargestellt, erfolgt die Berechnung der LSM-Transformationsparameter mit den gesamten mosaikierten Modellen, da einzelne Kacheln gegebenenfalls nicht genug stabile Bereiche enthalten bzw. viele unterschiedliche Transformationsätze Probleme an den Kachelrändern erzeugen würden. D.h. dieser globale Schritt kann daher nicht ohne weiteres auf verschiedene Berechnungsknoten verteilt werden. Alle anderen Berechnungs-

schritte können kachelbasiert und damit gleichzeitig berechnet werden. Wie bereits erwähnt wird der DIM-Prozess mangels geeigneter Software hier nicht untersucht.

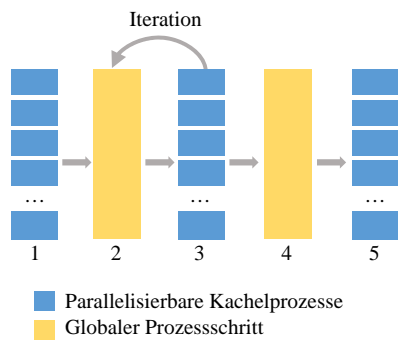


Abb. 2: Workflow in PleiAlps

1. DSM aus DIM-Punktwolken-Kacheln interpolieren und Maske mit stabile Bereiche extrahieren
2. DSM und stabile Bereichsmaske mosaikieren. 3D-Affintransformation zwischen DOM und DGM mittels LSM berechnen
3. DIM-Punktwolken-Kacheln transformieren und erneut DSM-Kacheln interpolieren (Optionale Iteration zu Schritt 2).
4. Finales DSM-Mosaik berechnen
5. nDOM-Kacheln berechnen und Forstparameter extrahieren

Die in Schritt 5 abgeleiteten Forstparameter sind $dHmax$, $dHp95$, $dHstd$, $dHp50$ und $dGaps$. Dabei spiegelt $dHmax$ den höchsten Punkt in einer Rasterzelle mit einer Zellgröße von z.B. $10 \times 10 \text{ m}^2$, $20 \times 20 \text{ m}^2$, etc. wider und beschreibt die maximale Baumhöhe in einer Rasterzelle. Die beiden Höhenquantilwerte $dHp95$ und $dHp50$ beschreiben das 95-ste bzw. 50-ste Höhenquantil und stellen sehr robuste Höhenmaße zur Charakterisierung von Bestandeshöhen dar. Der Wert $dHp95$ wird oftmals zur Beschreibung der dominanten Bestandeshöhe herangezogen. Der Wert $dHstd$ gibt die Standardabweichung aller Höhenwerte innerhalb der gewählten Zellgröße wider und beschreibt die vertikale Verteilung der Kronenoberfläche. Der Parameter $dGaps$ beschreibt den Überschirmungsgrad und errechnet sich als Quotient aus der Anzahl von Pixeln welche mit hoher Vegetation (z.B. $>3 \text{ m}$) bedeckt sind zur Gesamtanzahl der Pixel innerhalb einer Rasterzelle. Schlussendlich dienen all diese Parameter als Eingangsgröße in Regressionsmodelle zur Abschätzung diverser Forstparameter wie z.B. des Holzvorrates, der Biomasse oder der Bestockungsdichte (HOLLAUS 2018).

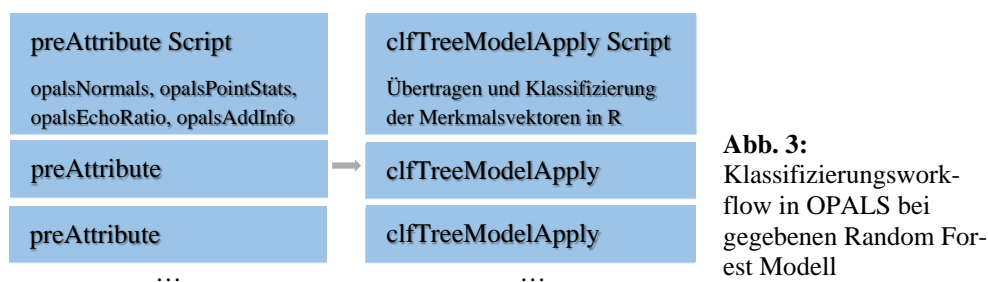
1.2 Klassifizierung von ALS-Daten im Stadtgebiet

Eine klassifizierte Punktwolke stellt für viele Anwendungen die aufbereitete zentrale Datenbasis dar. Sind z.B. eine oder mehrere entsprechenden Bodenklassen vorhanden, ist die Ableitung des DGMs (das ALS-Standardprodukt schlechthin) eine relativ einfache Aufgabe. Selbiges gilt auch für städtische, forstwirtschaftliche, hydraulische oder geomorphologische Anwendungen.

Die automatische Klassifizierung von Punktwolken ist ein Forschungsgebiet, welches durch die technologischen Fortschritte von LiDAR und DIM von vielen Wissenschaftlerinnen aufgegriffen wurde. So wurden in den letzten 3 Dekaden zahlreiche automatische Methoden zur semantischen Klassifizierung von 3D-Punktwolken entwickelt: Bayes-Klassifikation, Maximum Likelihood, Classification and Regression Trees (CARTS), Random Forests, Support Vector Machines (SVM), Markov Random Fields (MRF) oder Graphische Modelle um nur einige zu nennen. Besonders die großen Erfolge von neuronalen Netzen – vor allem der Convolutional Neural Networks (CNN) - im Bereich der Computer Vision haben Forscher inspiriert die Konzepte auf Punktwolken zu übertragen (QI et. al. 2017, WINIWARTER 2018). Je nach Klassifikationsmethode sind teilweise sehr aufwendige

Berechnungen notwendig. D.h. es macht Sinn auch diese Aufgabe entsprechend parallelisiert durchzuführen.

Viele Klassifikatoren arbeiten mit Merkmalsvektoren der Einzelpunkte, welche direkt vom Sensor stammen (RGB, Intensität, Echonummer, Echobreite, etc.) oder aus der lokalen Nachbarschaft extrahiert werden (Normalvektor, Rauigkeitsmaß, Punktdichte, etc.). D.h. auch wenn jeder Punkt unabhängig klassifiziert wird, bringen die extrahierten Merkmale, einen gewissen Kontext der Nachbarschaft mit. Dies gilt auch für die Klassifikation in OPALS, welche auf einer Random Forest Implementierung basiert (WALDHAUSER et. al. 2014). Zuerst wird ein Set an Merkmalen in der lokalen Nachbarschaft (streifenweise und Streifen-übergreifend) bestimmt und anschließend die Punkte einzeln mit dem konkreten Random Forest Modell klassifiziert. Im Allgemeinen muss das verwendete Modell vorab anhand von Trainingsdaten aufgebaut werden, da solche Modelle nur bedingt aus anderen Projekten übernommen werden können. Die Modellerstellung erfordert entsprechende Interaktivität (manuelle oder semi-automatische Annotierung kleinerer Trainingsgebiete) und wurde daher im VSC-Workflow (siehe Abb. 3) nicht abgebildet. Nachdem im Gesamtprozess keine globalen Berechnungsschritte enthalten sind, ist eine Umsetzung am VSC entsprechend einfach zu realisieren.



Beim getesteten Datensatz (ca. 1% des Gesamtgebietes) handelt es sich um die aktuelle LiDAR-Befliegung der Stadt Wien aus dem Jahr 2015. Ein Gebiet von 764 km² wurde mit 474 Streifen und rund 16 Schüssen/m² erfasst. Der gesamte Datensatz hat über 32 Milliarden Punkte.



Abb. 4:

Darstellung des gesamten Projektgebietes inkl. des ausgewählten Teils (dunkelgrau) für die Berechnung am VSC. Entspricht ca. 1% der Gesamtfläche.

2 Infrastruktur des VSC3

Das derzeitige Flaggschiff des Vienna Scientific Cluster, der VSC3, ist ein HPC-System welches seit dem Jahr 2015 operativ im Einsatz ist und aus 2020 Rechenknoten (Nodes) besteht (VSC, 2018). Jeder dieser Rechenknoten ist mit zwei Intel XEON E5-2650v2 Prozessoren (jeweils 8 Kerne, 2.6 GHz) ausgestattet und über zwei Anschlüsse an ein QDR-InfiniBand (QDR-80) Netzwerk angeschlossen. Jeder Rechenknoten verfügt dabei - je nach angeforderter Quality of Service (QOS) - über 64 GB, 128 GB oder 256 GB Arbeitsspeicher. Als Betriebssystem wurde CentOS Linux 7.2 auf allen Rechenknoten installiert. Eine Besonderheit des VSC3 ist das Liquid Submersion Cooling System, bei dem die Rechenknoten vollständig in Mineralöl gelagert sind. Der VSC wird von der TU Wien in Kooperation mit mehreren österreichischen Universitäten betrieben.

Um Programme auf den Rechenknoten verteilt auszuführen wird der Job-Scheduler SLURM (Simple Linux Utility for Resource Management) verwendet. SLURM verwaltet die auszuführenden Jobs von der Erstellung bis zum Abschluss und weist ihnen frei gewordene Rechenknoten zu. Dabei wird versucht, eine möglichst hohe Auslastung des HPC-Systems zu erzielen. Die für die Analyse zu verarbeitenden Daten können auf dem für Hochleistungsrechner entwickelten BeeGFS Dateisystem kurzzeitig (max. 180 Tage) abgelegt werden. Das VSC-Team stellt dafür etwa 0.5 PB Speicherplatz zur Verfügung. Für eine permanente Verwaltung von Satellitendaten oder Punktwolken können die Daten aufgrund der schnellen InfiniBand-Anbindung auch am EODC-Storage abgelegt werden.

2.1 Task und Workload Management am VSC

Die technische Umsetzung, der im Beitrag formulierten Fragestellungen, erfordert einige Anpassungen der üblichen OPALS-Skripts, um den Anforderungen des VSC3 unter Verwendung des SLURM-Scheduler zu entsprechen. So muss in manchen mehrstufigen Workflows, das OPALS-Skript in mehrere voneinander abhängige Skripts aufgeteilt werden. Der Scheduler kümmert sich dann um die Prozessierungsreihenfolge und die Zuweisung zu den Rechenknoten. Eine Reihe von Parametern des Befehls steuern, mit welchen Eigenschaften die Rechenknoten angesprochen werden und wie der Job abgearbeitet wird. Neben der Bezeichnung des Jobs (Parameter *job-name*) und dem Account-Namen, über den die benötigten Projektressourcen abgerechnet werden (*account*), kann genau definiert werden, wie viele (Teil-)Aufgaben eines Jobs auf einem Rechenknoten verarbeitet werden:

- *nodes* Anzahl der Knoten auf denen ein Job gleichzeitig ausgeführt wird
- *ntasks-per-node* Anzahl der Aufgaben pro Knoten (=Anzahl OPALS-Instanzen)
- *array* Anzahl der gesamten Aufgaben eines Jobs. (z.B. *array=0-100*)

Benötigen bestimmten Aufgaben mehrere Konten gleichzeitig, dann wird der entsprechende Wert in *nodes* eingetragen. Nachdem bei OPALS jeder Kachelprozess unabhängig ist, reicht (im schlechtesten Fall) ein Rechenknoten aus um die gesamte Aufgabe zu prozessieren (*nodes=1*). Eine geringere Anzahl von benötigten Knoten, erhöht die Chancen vom Scheduler früher gereicht zu werden.

Basierend auf dem Parameter *array* wird eine eindeutige Task-ID erzeugt, welche für einen eindeutige Zuordnung zwischen Datensatz (=Kachel) und Rechenknoten genutzt werden kann. Mit den Parametern *partition* und *qos* (Quality of Service) kann die benötigte Pro-

zessierungsumgebung (64, 128 oder 256 GB Arbeitsspeicher) definiert werden. Spezielle Development-Knoten können dabei für Anwendungen mit einer Maximallaufzeit von 10 Minuten pro Rechenknoten genutzt werden.

Für jede Aufgaben muss eine maximale Laufzeit am Knoten definiert werden. Zum einen wird dieser Parameter vom Scheduler verwendet, um ein möglichst geeignetes Zeitfenster für die Prozessierung zu finden, aber auch um Jobs beim Erreichen der maximalen Laufzeit abzubrechen.

3 Prozessoptimierung und technische Umsetzung

Jeder Knoten am VSC3 besitzt 32 logische Kerne. Nachdem SLURM am VSC immer gesamte Knoten für einen Benutzer/Task reserviert, versucht man bereitgestellte Knoten möglichst vollständig auszulasten. Alle rechenintensiven OPALS-Module nutzen das Programmierinterface OpenMP um parallelisiert Berechnungen mittels mehrerer Threads durchzuführen. OpenMP ist auf allen gängigen Plattformen vorhanden, ist einfach in der Programmierung, unterstützt aber nur Shared-Memory-Systeme. D.h. alle Kerne müssen Zugriff auf den gemeinsamen Speicher haben, was einem Knoten des VSC entspricht.

Im konkreten Fall kann man 32 logischen Kernen mit einer OPALS-Instanz mit 32 Threads oder 32 Instanzen mit jeweils einem Thread (bzw. alle Varianten dazwischen) auslasten. Welche Instanz-Thread-Variante optimal ist, hängt von zahlreichen Hardware- und Softwarefaktoren ab. Folgende Aspekte sind bei der Optimierung zu klären:

- Wie gut skaliert die Software auf einem bestimmten System? Steigt die Performance linear mit der Anzahl der Threads? Dies ist im Allgemeinen nicht der Fall, da mit der Anzahl der Threads der Synchronisierungs-overhead steigt.
- Hat ein Knoten überhaupt genug Speicher um 32 Instanzen laufen zu lassen? Mehr Instanzen mit weniger Threads benötigen im Allgemeinen mehr Speicher als über Threads parallelisiert Instanzen/Prozesse
- Je weniger Threads desto mehr Kacheln werden gleichzeitig verarbeitet. Wird bei vielen Kacheln das Filesystem bzw. die Netzwerkanbindung des Knotens zum Flaschenhals?

Bei SLURM kann man die Prozessologie (Instanzen pro Knoten und benötigte Knotenanzahl) für abgesetzte Jobs nicht mehr verändern. D.h. eine Optimierung der Topologie muss vorab durch verschiedene Testläufe analysiert werden. In Tabelle 1 sind die Laufzeitergebnisse zweier PleiAlps-Läufe mit jeweils 400 – 1 km² Kacheln in zwei unterschiedlichen OPALS-Konfiguration dargestellt. Die Zeiten sind für jeden Workflow-Schritt in Sekunden pro Kachel bzw. – für globale Prozessschritte (2 und 4) – als Gesamtlaufzeit angegeben.

Die Ergebnisse zeigt eine Auffälligkeit, welche bei Performance-Analysen häufig auftreten, wenn das System nicht der vollen Kontrolle des Users unterliegt: Wiederholungen bestimmter Aufgaben (Schritt 2 und 3) können deutliche Variationen der Laufzeit zeigen. Im konkreten Fall handelt es sich um IO-intensive Prozesse, womit die Performanz direkt von der aktuellen Auslastung des Filesystems abhängt. D.h. bei hoher Last des Filesystems läuft der Prozess deutlich langsamer. Die maximalen Laufzeiten von Schritt 3 unterscheiden sich

um bis zu 40%. Bei Schritt 2 sind es sogar knapp über 50%. Dementsprechend Vorsichtig gilt es Laufzeitunterschiede auf so großen Systemen mit vielen Knoten wie dem VSC zu bewerten. Gesicherte Aussagen können nur über statistische Analysen mit z.B. dem Mittelwert oder Median getroffen werden. Dies ist auch in Tabelle 1 sichtbar: Die Laufzeit pro Kachel von Schritt 3 unterscheiden sich in beiden OPALS-Konfigurationen bei wiederholter Berechnung um weniger als 4%.

Tabelle 1: Laufzeitanalysen des PleiAlps-Workflows mit 400 Kacheln (1x1 km)

OPALS-Konfiguration	1 Instanz pro Knoten 32 Threads per Instanz		8 Instanzen pro Knoten 4 Threads per Instanz	
	Max. Laufzeit [s]	Mittlere LZ pro Kachel [s]	Max. Laufzeit [s]	Mittlere LZ pro Kachel [s]
1 DSM-Berechnung	169 (s/Kachel)	106,6	179 (s/Kachel)	146,3
2 DSM-Mosaik und LSM	4277		4087	
3 Transformation und Neuberechnung DSM	190 (s/Kachel)	163,8	253 (s/Kachel)	207,7
2 <i>Iteration</i> : DSM-Mosaik und LSM	2802		2661	
3 <i>Iteration</i> : Transformation und DSM	274 (s/Kachel)	170,1	254 (s/Kachel)	207,1
4 Finales DSM-Mosaik	1143		1117	
5 Forstparameter berechnen	63 (s/Kachel)	27,2	146 (s/Kachel)	34,3

In Bezug auf die optimale OPALS-Konfiguration zeigt Tabelle 1 einen klaren Trend. Die mittlere Laufzeit einer Kachel mit 4 Threads liegt bei den unterschiedlichen Workflow-Schritten nur 21% bis 37% über den Ergebnissen mit 32 Threads. Würde OPALS perfekt mit der Thread-Anzahl skalieren, müsste die Verarbeitung mit 32 Threads 8-fach schneller sein als mit 4 Threads. Während OPALS unter Windows auch mit großer Thread-Anzahl (≥ 32) gut skaliert, ist eine effiziente Skalierung unter Linux nur mit bis zu 4 Threads gegeben.⁴ Diese Limitierung unter Linux spielt aber für große Projekte eine untergeordnete Rolle, da die Reduktion der Gesamtlaufzeit einfach durch Erhöhung der OPALS-Instanzen an einem Knoten erzielt wird.

Während beim PleiAlps-Workflow in erster Linie Punkt-zu-Raster- und Raster-zu-Raster-Operationen verwendet werden, wird beim Klassifizierungsworkflow lesend und schreibend auf den OPALS-Datamanager (ODM) zugegriffen, um die neue berechneten Punktattribute speichern zu können. Dieser flexible Umgang mit Attributen ist eines der Alleinstellungsmerkmale von OPALS und verdient daher eine gesonderte Betrachtung. Während bei PleiAlps eine sehr homogene Punktdichte und damit keine nennenswerte Variation der Punktzahl pro Kachel gegeben ist (DIM schätzt grundsätzlich für jedes Pixel ein Höhenwert), unterscheiden sich die LiDAR-Kacheln recht stark. Dies hat mit den unterschiedlichen Streifenüberlappungen, mit Mehrfach-Echos bei Vegetation bzw. der erhöhten Anzahl von Wandpunkten bei hohen Gebäuden zu tun. Für die Laufzeitanalyse wurden ein Teilgebiet von 100 Kacheln (200 x 375m + 5m Überlappung) ausgewählt, wobei die Punktzahl

⁴ Es ist noch zu klären, ob dieses Verhalten an der OpenMP-Implementierung unter Linux liegt oder speziell in OPALS begründet ist.

zwischen 1,6 und 5,5 Millionen liegt (siehe auch Tabelle 2). Die Streifenanzahl (4 bis 12) hat neben der Punktzahl aber auch direkten Einfluss auf die Berechnungsgeschwindigkeit, da die lokale Punktdichte bzw. der lokale mittlere Punktabstand für jeden Streifen separat berechnet werden. D.h. sind n-Streifen in einer Kachel vorhanden, dann wird der entsprechende OPALS-Aufruf n-mal mit entsprechender Streifen-Filterung ausgeführt.

Tabelle 2: Statistik der 100 ALS-Kacheln der Wienbefliegung

	Min	Max	Mittelwert	Median	Std. Abweichung
Punktzahl [Mio]	1,6	5,5	3,0	2,5	1,1
Streifenanzahl	4	12	6,8	5	2,5

Dementsprechend stark schwanken auch die Laufzeiten für die einzelnen Kacheln wie in Tabelle 3 ersichtlich. Die statistische Auswertung der Kachellaufzeiten zeigt, dass es einen Zusammenhang zwischen Laufzeit und Punktzahl gibt. Wie aber auch schon beim Plei-Alps-Workflow gibt es immer wieder langsame Ausreißer, welche wahrscheinlich einer hohen Auslastung des Filesystems geschuldet sind.

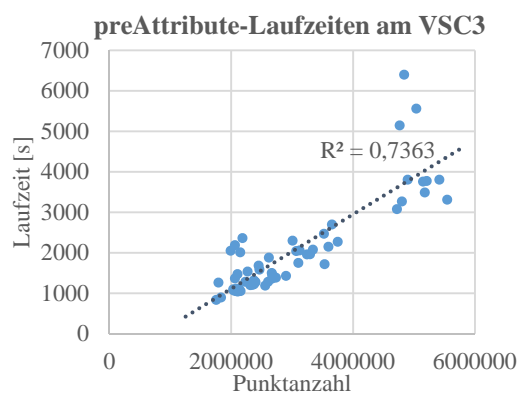


Abb. 5:

Zusammenhang zwischen Punktzahl und der Laufzeit des preAttribute-Scripts am VSC

Im Hinblick auf die Optimierung der Gesamtlaufzeit ist der Zusammenhang zwischen Laufzeit und Punktzahl (zumindest bei diesem Workflow) eine wichtige Erkenntnis. Wenn mehrere OPALS-Instanzen auf einem Knoten laufen, dann sollte die Laufzeit dieser Instanzen möglichst gleich lang sein, um den Knoten optimal auszulasten. Eine einfache Strategie dies zu erreichen ist, die Kachelliste vorab nach der Punktzahl zu sortieren.

Tabelle 3: Laufzeitanalyse des Klassifizierungsworkflow für 100 ALS-Kacheln

OPALS-Konfiguration	8 Instanzen pro Knoten / 4 Threads per Instanz				
Laufzeit pro Kachel [s]	Min	Max	Mittelwert	Median	Std. Abw.
1 preAttribute	839	6.648	2.094	1.697	1.229
2 clfTreeModelApply	188	671	354	305	127
Gesamtlaufzeit	1.045	7.247	2.445	1.956	1.334

4 Projektlaufzeiten und wirtschaftliche Aspekte

Während im vorigen Kapitel die Optimierung der zwei Workflows diskutiert wurde, erfolgt im Folgenden eine Analyse der Gesamtlaufzeiten der Testläufe bzw. eine Hochrechnung auf das gesamte Projektgebiet. Basierend auf den Hochrechnungen wird eine Kosten-Schätzung durchgeführt, welche für nicht-wissenschaftliche Kunden bei Berechnung über das EODC anfallen würden.

Tabelle 4: Laufzeitabschätzungen für die untersuchten Projekte

Workflow		PleiAlps			Klassifizierung		
8 Instanzen pro Knoten		Testgebiet 400 Kacheln	Gesamtgebiet 190.959 Kacheln		Testgebiet 100 Kacheln	Gesamtgebiet 9015 Kacheln	
	Knoten	[hh:mm:ss]	[Tage]	[hh:mm:ss]	[hh:mm:ss]	[Tage]	[hh:mm:ss]
Tatsächliche LZ		10:27:11			03:14:00		
Theoretisch Laufzeit für x Knoten basierend auf der mittleren Laufzeit einer Kachel des Testgebietes	3	04:55:52	72	05:01:13	03:23:43	10	15:19:44
	10	03:06:43	22	05:47:44	01:21:29	3	04:44:04
	50	02:27:02	6	04:34:36	00:40:44	0	15:37:06
	100	02:17:07	4	13:03:13	00:40:44	0	08:08:55
	200	02:17:07	3	17:22:30	00:40:44	0	04:04:27
	500	02:17:07	3	05:28:06	00:40:44	0	02:02:13

Die Gesamtlaufzeit eines Projekts am VSC hängt neben der Laufzeit der Teilprozesse vor allem von der Auslastung des Systems ab. Ist die aktuelle Auslastung hoch und befinden sich viele Jobs in der SLURM-Warteschlange kann es mehrere Stunden bis Tage dauern bevor der Job startet. So dauerte es z.B. beim PleiAlps-Test einen knappen Tag bis der Prozess gestartet wurde, während der Klassifizierungsjob schon nach wenigen Minuten anlief. Für die Gesamtlaufzeit spielt neben der Startwartezeit aber die Anzahl der zugeteilten Knoten die entscheidende Rolle. Die Knotenanzahl hängt ebenfalls von der aktuellen Auslastung ab und wird im Allgemeinen über die Joblaufzeit variieren. D.h. Gesamtlaufzeit können sinnvollerweise nur unter Annahme von zugeteilten Knoten abgeschätzt werden. Eine Hochrechnung des Klassifizierungsworkflows ist trivial, da nur die mittlere Laufzeit pro Kachel und 8 OPALS-Instanzen pro Knoten berücksichtigt werden muss. Für den PleiAlps-Workflow ist Situation kompliziert, da die Kachel-Berechnungsschritt und die globalen Prozessschritte unterschiedlich behandelt werden müssen. Für die globalen LSM-Schritte wurde angenommen, dass nicht ein Transformationssatz für den gesamten Alpenbogen sondern sinnvollerweise mehrere z.B. 15 Trafosätze (3 pro Land) geschätzt werden (entspricht ca. 12.730 Kacheln pro Trafosatz). In der Abschätzung wird jeder dieser globalen Berechnungsschritte aus Speicherplatzgründen jeweils einem eigenen Knoten zugewiesen. Unter diesen Voraussetzungen können die Gesamtlaufzeiten für beide Projekte für verschiedene Knotenanzahlen hochgerechnet werden.

Ausgehend von den abgeschätzten Core-Hours bzw. dem benötigten Speicherplatz können Kosten für die Berechnung beider Projekte angegeben werden. Für Wissenschaftler von VSC-Betreiberuniversitäten ist die Berechnungen kostenlos, wobei intern ein Betrag von 0,01 € pro Core-Hour verrechnet wird. Kommerzielle User nutzen am einfachsten das EODC um Zugriff auf den VSC zu bekommen. Das EODC verfügt auch über entsprechenden Storage-Platz (Festplatten und Tape-Library) um große Projekt effizient abwickeln zu können. Die abgeschätzten Kosten in Tabelle 5 zeigen deutlich, dass der VSC eine äußerst interessant wirtschaftlich Alternative zur eigenen Prozessierungsinfrastruktur darstellt.

Tabelle 5: Geschätzte Core-Hours und Storage-Platz für die Projekte bzw. deren Kosten

Workflow		PleiAlps	Klassifizierung
8 Instanzen pro Knoten		Gesamtgebiet 190.959 Kacheln	Gesamtgebiet 9015 Kacheln
Core-Hours		63.666	12.245
Festplatten-Storage		50 TB	4 TB
Kosten für wissenschaftliche Projekte (0.010 €/pro Core-Hour)		637 €	122 €
Kosten für kommerzielle Nutzer über das EDOC	0,022 €/pro Core-Hour	1.377 €	265 €
	1TB Disk-Storage für 18.47 € [pro Monat]	924 €	74 €

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag untersucht die Möglichkeit Punktwolken von landweiten oder länderübergreifenden Projekten am VSC zu prozessieren. Im Konkreten werden zwei OPALS-Workflows analysiert und optimiert. Im ersten Projekt geht es um die Ableitung von Forstparameter aus hochauflösenden Stereo-Satellitenbilder von Pléiades, wobei sich die Untersuchung auf die Prozessierung der fertig gemachten Punktwolke beschränken. Die Klassifizierung von LiDAR-Punktwolken im städtischen Gebiet ist das zweite Projekt. Beide Projekte umfassen sehr große Datenmengen, sodass die Prozessierung auf einem einzigen Computer Wochen bis Monate dauern würde. Die Rechenpower des VSC3 (2020 Rechenknoten mit jeweils 16 Kernen) bietet die Möglichkeit die Berechnungsdauer auf wenigen Stunden oder Tage zu reduzieren. Die hohe Performance und die geringen Kosten machen den VSC auch wirtschaftlich gesehen, zu einer sehr interessanten Alternative zur eigenen Computer-Infrastruktur. Über das EODC erhalten auch kommerzielle Nutzer Zugriff auf den VSC3.

Für sehr zeitkritische Anwendung, kann die große Nutzeranzahl des VSC3 aber zum Problem werden. Je nach Auslastung des Systems kann es mehrere Stunden dauern, bis der eigene Job vom Scheduler gestartet wird. Aus diesem Grund wird es in Zukunft auch die Möglichkeit geben priorisierte Jobs zu höheren Preisen zu starten.

Dass sich das Konzept des VSC bewährt, zeigt auch die Tatsache, dass 2019 bereits die vierte Ausbaustufe des VSC kommen wird.

Danksagung

Das Projekt *PleiAlps* (Nr. 859774) wurde von der FFG im Programm ASAP gefördert. Die Daten für die Klassifizierung der Punktwolke wurden von der Stadt Wien, Magistratsabteilung 41, zur Verfügung gestellt.

Literatur

- HOLLAUS, M. (2015): 3D Point clouds for forestry applications, *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 103, 2+3; 138 – 150.
- MANDLBURGER, G., WENZEL, K., SPITZER, A., HAALA, N., GLIRA, P., PFEIFER, N. (2017): Improved Topographic Models via Concurrent Airborne LiDAR and Dense Image Matching, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-2/W4, 259 – 266
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J., KAREL, W. (2014): OPALS - A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45, 125 – 136
- PIERMATTEI, L., MARTY, M., KAREL, W., RESSL, C., HOLLAUS, M., GINZLER, C., PFEIFER, N (2018): Impact of the Acquisition Geometry of Very High-Resolution Pléiades Imagery on the Accuracy of Canopy Height Models over Forested Alpine Regions, *Remote Sensing*, 10, 1542-1 – 1542-22.
- QI, C.R., YI, L., SU, H., GUIBAS, L.J. (2017): PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space, *Computing Research Repository (CoRR)*, Volume abs/1706.02413, <https://arxiv.org/abs/1706.02413>
- RESSL, C., BROCKMANN, H., MANDLBURGER, G., PFEIFER, N. (2016): Dense Image Matching vs. Airborne Laser Scanning - Comparison of two methods for deriving terrain models, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2016, 2; 57 - 73
- SLURM (O.J.): sbatch – Submit a batch script to Slurm. <https://slurm.schedmd.com/sbatch.html> (16.11.2018)
- TRAN, T., RESSL, C., PFEIFER, N. (2018): Integrated Change Detection and Classification in Urban Areas Based on Airborne Laser Scanning Point Clouds, *Sensors*, 18, 2; S. 448-1 - 448-21.
- VSC (O.J.): Vienna Scientific Cluster 3. <http://vsc.ac.at/systems/vsc-3/> (16.11.2018)
- WALDHAUSER, C., HOCHREITER, R., OTEPKA, J., PFEIFER, N., GHUFFAR, S., KORZENIOWSKA, K., WAGNER, G. (2014): Automated Classification of Airborne Laser Scanning Point Clouds, *Solving Computationally Expensive Engineering Problems*, Volume 97 of the series Springer Proceedings in Mathematics & Statistics; S. Koziel, L. Leifsson, X. Yang (ed.); Springer, ISBN: 978-3-319-08984-3, 269 - 292.
- WINIWARTER, L., (2018): Classification of 3D Point Clouds using Deep Neural Networks, *Diplomarbeit, Department für Geodäsie und Geoinformation*, 2018