

Qualitätsverbesserung von Laseraltimetrie Höhenmodellen

REGINE BRÜGELMANN, GERT BRAND & SANDER OUDE-ELBERINK, Delft, Niederlande

Keywords: laser altimetry, DEM/DTM, quality, height precision, strip adjustment

Zusammenfassung: In den Niederlanden benötigen die regionalen Wasserbehörden die mittlere Geländehöhe von 100 bis 700 ha großen Gebieten mit Zentimetergenauigkeit, um die erlaubten Wasserpegel in diesen Gebieten genau festlegen zu können. Das neue niederländische digitale Höhenmodell, das mit Laseraltimetrie erfasst wurde, erreicht diese Genauigkeit nicht. In einer früheren Netzwerkanalyse wurde jedoch gezeigt, dass diese Genauigkeit mit zusätzlichen Passpunkten in einer 1D-Streifenausgleichung doch erreicht werden kann. Um diese theoretischen Ergebnisse zu verifizieren, wurde ein praktischer Test durchgeführt. In diesem Artikel werden der Aufbau dieses Tests, die erzielten Ergebnisse und eine Kosten-Nutzen Betrachtung für verschiedene Befliegungsszenarios präsentiert.

Summary: *Improvement of the height precision of laser altimetry elevation models.* In the Netherlands, local water boards need the mean field heights of water management entities of about 100 ha up to 700 ha with cm-precision. This guarantees the precise determination of the permitted water levels, which are related to the mean field heights. The new Dutch digital elevation model, which has been acquired with laser altimetry, does not meet these high precision demands. However, formerly performed block design analysis showed that adding more ground control points and extra cross strips in a 1D strip adjustment can improve the height precision of a laser altimetry elevation model. In order to verify these theoretical results, a practical test was performed. This article is about the configuration and the results of this test. Furthermore, costs and benefits of different flight configurations are treated.

1 Einleitung

Ein großer Teil der Niederlande liegt unterhalb des Meeresspiegels. Viele Gebiete müssen daher mit einem komplexen Kanal- und Pumpsystem (siehe Abb. 1) künstlich entwässert werden, da sie sonst zu feucht sind für eine agrarische Nutzung. Auf der anderen Seite darf der Wasserpegel in vor allem Torfgebieten auch nicht zu niedrig sein, da das Einsinken des Bodens dort sonst noch schneller fortschreiten würde, was nicht erwünscht ist.

Zu den Aufgaben der regionalen Wasserbehörden gehört das Festlegen der Höhe des Wasserpegels per Gebiet. Dies geschieht auf den Zentimeter genau. Die Größe der Gebiete variiert von etwa 100 bis 700 ha.

Der Wasserpegel wird definiert in Bezug auf die mittlere Geländehöhe. Bislang wird diese Höhe mit einem Punkt pro Hektar terrestrisch gemessen (Tachymetrie, DGPS),



Abb. 1: Luftbild eines typischen niederländischen Torfgebiets mit Weiden und zahlreichen Entwässerungskanälen.

was jedoch teuer und zeitraubend ist. Deshalb wurde das neue, digitale Höhenmodell der Niederlanden, das AHN („Actueel Hoogtebestand Nederland“), sehr begrüßt und für die Berechnung von mittleren Geländehöhen eingesetzt. Das AHN besitzt eine mittlere Punktdichte von 1 Punkt per 16 m² und eine Höhengenaugkeit von ungefähr 15 cm (1 σ) pro Punkt. Analysen haben jedoch gezeigt, dass die Genauigkeit der hieraus berechneten mittleren Geländehöhen den strengen Anforderungen in Torfgebieten nicht genügt. Dort sind die Genauigkeitsanforderungen höher, weil schon kleine Variationen des Wasserpegels Einfluss haben auf das Einsinkverhalten des Bodens.

Daher wurde beim Vermessungsamt über Möglichkeiten nachgedacht, um die Höhengenaugkeit des AHN zu verbessern. In einer Netzwerkanalyse wurde der Effekt von zusätzlichen Passpunkten und Querflugstreifen in einer 1D-Streifenausgleichung auf die Genauigkeit theoretisch untersucht. Ausgangspunkt war ein Laserblock mit 50 Flugstreifen von jeweils 30 km Länge und 400 m Breite und 100 m breiten Überlappungsbereichen zwischen den Streifen. In der Ausgleichung wurden drei Parameter pro Streifen geschätzt: eine Translation (Höhenoffset) und zwei Rotationen (Längs- und Querneigung), siehe CROMBAGHS et al. 2000). Die

Netzwerkanalyse zeigte, dass mit mehr Passpunkten deutlich eine bessere Genauigkeit der Höhenoffsets, und damit der mittleren Geländehöhe, erzielt werden kann. Die zusätzlichen Querflugstreifen bewirken vor allem eine Homogenisierung der Genauigkeit der Höhenoffsets über den ganzen Block.

Das Verhältnis zwischen der Streifen- und Passpunktanzahl ist beim regulären AHN ungefähr 2,6. Ein Verhältnis von 1,3 ist erforderlich, um den hohen Genauigkeitsanforderungen in Torfgebieten gerecht zu werden. Mit dieser sogenannten AHN+ Konfiguration müssten die folgenden Genauigkeiten für die mittleren Geländehöhen von 100 und 700 ha großen Gebieten erzielbar sein:

$$\sigma_{100 \text{ ha}} = 1,7 \text{ cm} \quad \text{und} \quad \sigma_{700 \text{ ha}} = 1,0 \text{ cm} .$$

Hierbei sind Saisons-, Tages- und lokale Variationen (siehe Abschnitt 5) bereits mitgerechnet. Der Einfluss von Vegetation auf die Höhenbestimmung der Geländeoberfläche wurde jedoch nicht berücksichtigt.

2 Testgebiet und Testdaten

Um zu überprüfen, ob diese theoretischen Ergebnisse auch in der Realität erzielt werden können, wurde ein praktischer Test durchgeführt. Für diesen Test wurde einer

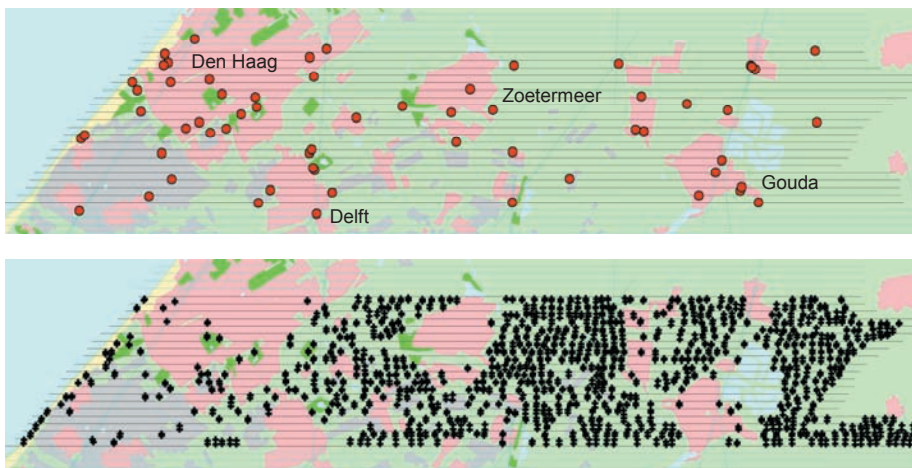


Abb. 2: Testgebiet mit Blockkonfiguration (Flugstreifen) sowie mit Lage der 69 Passpunkte (oben) und 1612 Verbindungspunkte (unten). Legende: rosa = Stadt, grau = Gewächshäuser, gelb = Dünen, dunkelgrün = Wald, hellgrün = agrarische Gebiete, blau = Wasser.

der zuletzt für das AHN geflogenen Blöcke gewählt. Das Testgebiet umfasst ungefähr $10 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ im Westen der Niederlande und erstreckt sich von der Küste bei Den Haag bis Gouda (siehe Abb. 2).

Die Blockkonfiguration entspricht einer regulären AHN Konfiguration, jedoch wurden vier anstelle von nur einem Querstreifen geflogen. Die 21 Flugstreifen mit einer Länge von etwa 50 km verlaufen in west-östlicher Richtung. Die Querstreifen verlaufen in nord-südlicher Richtung. Die Streifen sind 500 m breit, der Überlappungsbereich 80 m .

Um die Resultate der Netzwerkanalyse in der Realität kontrollieren zu können, wurde eine große Anzahl Passpunkte terrestrisch gemessen. Während für einen AHN Block von dieser Größe im Normalfall 8 Passpunkte gemessen werden, standen für den Test insgesamt 69 Passpunkte zur Verfügung. Jeder Streifen enthält mindestens 2 Passpunkte. Ein Passpunkt ist ein etwa 1 ha großes, horizontales und ebenes Gebiet ohne Vegetation, in dem ca. 100 Punkte terrestrisch gemessen werden. Meistens dienen Fußballfelder als Passpunkte.

3 Streifenausgleichung

Der Gesamtfehler bei mit Laseraltimetrie erfassten Höhenmodellen setzt sich aus verschiedenen Fehlerkomponenten zusammen, die unterschiedlich große Amplituden und räumliche Auflösungen besitzen (CROMBAGHS et al. 2002). Im Folgenden werden die verschiedenen Fehlerkomponenten erläutert (siehe auch Abb. 3):

1. *Punktfehler*: Das Rauschen in den einzelnen Laserpunkten durch die Abstandsmessung mit dem Laserscanner.
2. *Fehler pro GPS-Wahrnehmung (Streifenabschnitt)*: Kurzwellige Streifenverformungen aufgrund fehlerhafter Positionsbestimmung des Flugzeugs.
3. *Fehler in den Flugstreifen*: Langwellige Streifenverformungen aufgrund von Fehlern in den GPS/INS Wahrnehmungen.
4. *Fehler des gesamten Blocks*: Fehler im Anschluss an das Landeshöhensystem (NAP) durch Fehler in den Passpunkten.

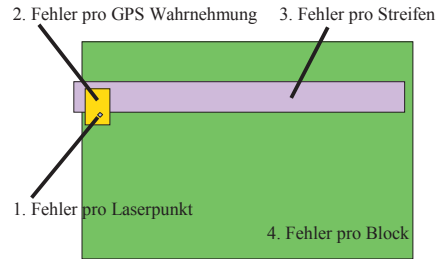


Abb. 3: Fehlerkomponenten bei Laseraltimetrie Höhenmodellen und ihre räumliche Auflösung.

In der ausgeführten 1D-Streifenausgleichung werden einander überlappende Streifen durch sogenannte Verbindungspunkte aneinander gekoppelt. Dies sind manuell selektierte $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ große, ebene Gebiete ohne (oder mit niedriger) Vegetation, die ungefähr 150 Laserpunkte enthalten. Gleichzeitig werden die Streifen mit Passpunkten angeschlossen an das Landeshöhensystem (NAP). Wahrnehmungen sind die Höhenunterschiede in den Verbindungs- und Passpunkten. Die in die Ausgleichung eingehende Qualität der Wahrnehmungen ist eine Funktion der ersten drei Fehlerkomponenten (siehe CROMBAGHS et al. 2002). Die zu schätzenden Parameter sind die Höhenoffsets der Streifen. Es wurde bewusst darauf verzichtet, auch die Längs- und Querneigung der Streifen zu schätzen, um mögliche Blockdeformationen durch parabolische Streifenverformungen quer zur Flugrichtung zu vermeiden.

Die Genauigkeit der Höhenoffsets der Streifen, die vierte Fehlerkomponente (Qualität des Anschlusses an NAP), wird beschrieben in der Kovarianzmatrix der Unbekannten und ist damit ein Resultat der Ausgleichung. Die Kovarianzmatrix ist eine Funktion der Genauigkeit der Wahrnehmungen und der Blockkonfiguration. Die Blockkonfiguration besteht aus der Anzahl und Lage der Längs- und Querstreifen sowie der Verbindungs- und Passpunkte.

4 Ergebnisse

In dem durchgeführten Test sollte untersucht werden, inwieweit die Höhengenaug-

keit der Streifen beim Hinzufügen von extra Passpunkten in der Streifenausgleichung verbessert wird. In Abb. 4 sind die Standardabweichungen der Höhenoffsets pro Streifen für eine normale AHN Konfiguration (8 Passpunkte) und die sogenannte AHN + Konfiguration (16 Passpunkte) angegeben. Verdopplung der Passpunkte bewirkt eine Genauigkeitsverbesserung von ungefähr 0,5 cm für den Höhenoffset jedes Streifens. Mit 16 Passpunkten in 21 Streifen konnte eine Genauigkeit von gemittelt 1,8 cm erreicht werden.

Deutlich ist auch, dass die Reduzierung von Verbindungspunkten einen negativen Effekt hat auf die Höhengenaugkeit der Streifen. Die Streifennummern 21 bis 25 bezeichnen die Querstreifen. In drei davon wurden deutlich geringere Genauigkeiten erzielt, weil dort viel weniger (< 25) ebene Verbindungspunkte gefunden werden konnten als in den anderen Streifen mit 80 bis 180 Verbindungspunkten. Dies liegt daran, dass diese Streifen über Stadtgebieten, ausgedehnten Gewächshausgebieten und Wasserflächen liegen.

In einer weiteren Analyse wurde der Einfluss der Anzahl Passpunkte auf die *mittlere* Standardabweichung aller Höhenoffsets des gesamten Blocks untersucht. Abb. 5 visualisiert die Ergebnisse. Darin geben mehrere Kreuze für dieselbe Anzahl von Passpunkten an, dass verschiedene Passpunktteilmen gen verwendet wurden. Mit zunehmender

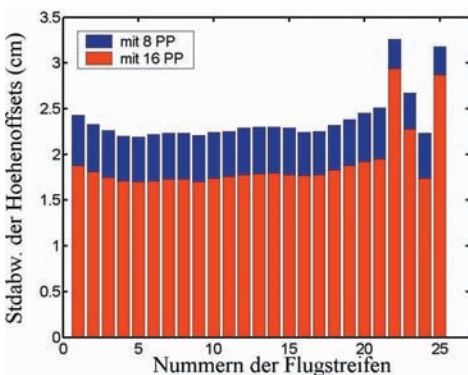


Abb. 4: Standardabweichung der Höhenoffsets pro Streifen nach der Ausgleichung mit 8 (blau) und 16 (rot) Passpunkten (PP).

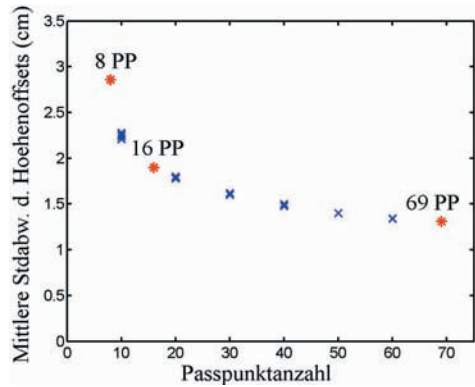


Abb. 5: Mittlere Standardabweichung aller Streifen (außer den Querstreifen) für verschiedene Passpunkt Anzahlen (PP = Passpunkt).

Passpunktanzahl verbessert die NAP-Anschlussgenauigkeit des Blocks. Dieser Effekt wird jedoch geringer mit zunehmender Passpunktanzahl. Von einem bestimmten Grenzwert an, z. B. 30 Passpunkten, verbessert die Blockgenauigkeit kaum noch.

5 Ableitung der Genauigkeit der mittleren Geländehöhe

Um von der Höhengenaugkeit der Streifen zur Genauigkeit der mittleren Geländehöhen zu kommen, muss noch ein weiterer Schritt gesetzt werden. Für die Berechnung der mittleren Geländehöhe werden alle Laserpunkte innerhalb des betroffenen Gebietes gemittelt, wobei Punkte auf Gebäuden, auf Vegetation und in Wassergräben zuvor eliminiert werden. Die Genauigkeit der mittleren Geländehöhe kann bestimmt werden durch Fehlerfortpflanzung von verschiedenen Fehlerkomponenten. Neben den vier Laseraltimetrie Fehlerkomponenten (siehe Paragraph 3) müssen dabei noch andere Fehlerkomponenten berücksichtigt werden:

- A. *Jahreszeitliche Variation:* Hier geht es um An- und Abswellen des Bodens durch jahreszeitlich bedingte Veränderungen des Grundwasserspiegels und der Bodenfeuchtigkeit.
- B. *Tagesvariation:* Dieser Fehler wird verursacht durch unterschiedliche Refraktion in der Atmosphäre wegen täglicher

Temperaturschwankungen. Dieses Problem ist bekannt bei tachymetrischen Messungen und spielt möglicherweise auch eine Rolle bei Laseraltimetrie.

- C. *Lokale Variation*: Diese Fehlerkomponente bezeichnet den Unterschied zwischen der Höhe einer Rasterzelle des DHMs und der mittleren Höhe des tatsächlichen Geländes innerhalb dieser Rasterzelle. Die lokale Variation beschreibt, wie gut ein Messpunkt das Gelände repräsentiert.

Jahreszeitliche und lokale Variationen haben nichts mit der Technik Laseraltimetrie zu tun. Sie dürfen jedoch nicht vernachlässigt werden bei der Berechnung mittlerer Geländehöhen für wasserwirtschaftliche Zwecke.

Die Höhengenaugigkeit eines einzelnen Laserpunkts wird berechnet, indem alle Fehlerkomponenten quadratisch addiert werden:

$$\sigma_{\text{pkt}} = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_t^2 + \sigma_{\text{lo}}^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}$$

Mit:

- σ_s = Jahreszeitliche Variation
- σ_t = Tagesvariation
- σ_{lo} = Lokale Variation
- σ_1 = Punktrauschen (Laserscanner)
- σ_2 = Kurzwellige Streifenfehler (GPS)
- σ_3 = Langwellige Streifenfehler (GPS/INS)
- σ_4 = Anschluss an NAP
(σ der Höhenoffsets)

In einem einzelnen Laserpunkt sind also alle Fehler in vollem Umfang vorhanden. Die Standardabweichung der mittleren Geländehöhe eines Gebiets wird in ähnlicher Weise berechnet, jedoch wird die Amplitude einiger Fehlerarten durch Mittelung reduziert:

$$\sigma_{\text{geb}} = \sqrt{\sigma_j^2 + \sigma_t^2 + \frac{\sigma_{\text{lo}}^2}{n1} + \frac{\sigma_1^2}{n1} + \frac{\sigma_2^2}{n2} + \frac{\sigma_3^2}{n3} + (\alpha \sigma_4)^2}$$

Mit:

- $n1$ = # Laserpunkte
- $n2$ = # Streifenstücke (~ 100 m lang)
- $n3$ = # Streifen
- α = Faktor zwischen 0 und 1

Für die Genauigkeit eines größeren Gebiets, das durch mehrere Flugstreifen bedeckt wird, gilt, dass die Standardabweichung des Höhenoffsets eines einzelnen Streifens (σ_4) reduziert wird mit einem Faktor α , der zwischen 0 und 1 liegt. Dieser Faktor ist abhängig von der Streifenanzahl und der Korrelation zwischen den Streifen. Für einen einzelnen Streifen gilt: $\alpha = 1$. Bei einem großen Gebiet mit vielen Streifen scheint α sich einem bestimmten Minimum zu nähern (siehe Abb. 6). Der exakte Wert von α kann abgeleitet werden von der Kovarianzmatrix der Unbekannten. Für praktische Zwecke ist es jedoch einfacher, eine Faustregel zu benutzen. Mehr hierüber ist zu finden in OUDE ELBERINK et al. (2003).

6 Ergebnisse für die Genauigkeit der mittleren Geländehöhe

In dem Testgebiet wurde für 100 und 700 ha große Gebiete die Standardabweichung der mittleren Geländehöhe berechnet. Die Standardabweichungen der vier Laseraltimetrie Fehlerkomponenten wurden aus den Laserdaten des Testgebiets berechnet. CROMBAGHS et al. (2002) geht näher auf die Methoden zur Berechnung dieser Fehler ein. Die Standardabweichungen der jahreszeitlichen und Tagesvariation wurden aus der Literatur übernommen (SCHOTHORST 1977 und Grondmechanica Delft 1995). Die Standardabweichung der lokalen Variation wur-

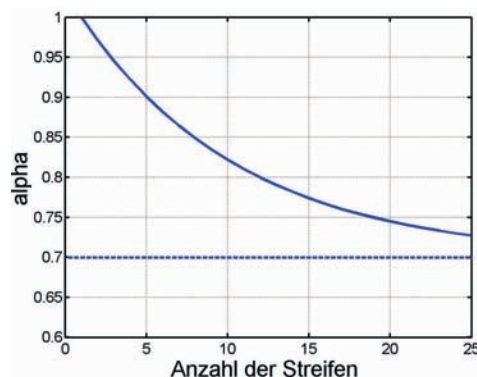


Abb. 6: Reduktionsfaktor α für σ_4 in Abhängigkeit von der Streifenanzahl für den Fall: $2 < (\#PP / \# \text{Querstreifen}) < 5$.

Tab. 1: Varianzen der verschiedenen Fehlerkomponenten (PP = Passpunkte).

Varianz	Fehlerquelle	Amplitude	
σ_1^2	Jahreszeitliche Variation	0.25^2 cm^2	
σ_2^2	Tagesvariation	0.35^2 cm^2	
σ_{10}^2	Lokale Variation	5^2 cm^2	
σ_1^2	Punktrauschen des Laserscanners	7^2 cm^2	
σ_2^2	Kurzweilige Streifenverformungen	4.5^2 cm^2	
σ_3^2	Langweilige Streifenverformungen	3.6^2 cm^2	
σ_4^2	Mittlere Varianz der Streifen-Höhenoffsets	# PP = 69	1.3^2 cm^2
		# PP = 16	2.0^2 cm^2
		# PP = 8	2.6^2 cm^2

de für die Punktdichte von 1 Punkt pro $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ geschätzt auf 5 cm. Tab. 1 gibt eine Übersicht über die Amplituden aller Fehlerkomponenten.

Die Berechnung der Genauigkeit der mittleren Geländehöhe wird an einem Beispiel aus dem Testgebiet erläutert. Ein beliebiges 700 ha großes Gebiet enthält 437 000 Laserpunkte, 182 Streifenstücke und 7 Streifen. Mit 16 Passpunkten gilt für den Reduktionsfaktor $\alpha = 0,895$. Werden diese Werte eingesetzt in die zweite Gleichung von Paragraph 5, so erhält man:

$$\begin{aligned} \sigma_{700 \text{ ha}} &= \left(0.25^2 + 0.35^2 + \frac{5^2}{437\,500} + \frac{7^2}{437\,500} \right. \\ &\quad \left. + \frac{20}{182} + \frac{13}{7} + (0.895 \cdot 2.01)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= 2.3 \text{ cm} . \end{aligned}$$

Die Ergebnisse für verschiedene Passpunktanzahlen wurden den theoretischen Resultaten aus der Netzwerkanalyse gegenübergestellt. Tab. 2 zeigt, dass die vorhergesagten Ergebnisse nicht erreicht werden konnten. Selbst mit allen verfügbaren Passpunkten – für eine operationelle Erfassung eine unrealistisch große Anzahl – konnten die erwar-

Tab. 2: Genauigkeit der mittleren Geländehöhe für verschieden große Gebiete.

	Netzwerk-analyse	praktischer Test		
		# Passpunkte	8	16
$\sigma_{100 \text{ ha}}$ [cm]	1.7	3.4	3.0	2.6
$\sigma_{700 \text{ ha}}$ [cm]	1.0	2.8	2.3	1.8

teten Genauigkeiten, die von den regionalen Wasserbehörden erwünscht sind, nicht erzielt werden.

Der Hauptgrund für diese etwas enttäuschenden Ergebnisse sind vor allem die langweiligen Streifenverformungen. Sie wurden in der Netzwerkanalyse nicht berücksichtigt, weil ihre Existenz zum Zeitpunkt der theoretischen Analysen noch nicht bekannt war.

Mit der verfügbaren Software für die 1D-Streifenausgleichung ist es noch nicht möglich, diese Fehler zu reduzieren oder zu beseitigen. Mit einer vollständigen 3D-Streifenausgleichung, so wie sie z. B. durch BURMAN (2002) und VOSSELMAN & MAAS (2001) vorgestellt wird, kann die Höhengenaugigkeit von Laseraltimetrie Höhenmodellen aufgrund der realistischeren Modellierung der auftretenden Fehler wahrscheinlich noch weiter verbessert werden.

7 Kosten-Nutzen Betrachtung

Die Resultate des ausgeführten Tests zusammen mit dem neuen Fehlerbeschreibungsmodell für Laseraltimetrie (siehe Paragraph 3) ermöglichen es, die Kosten und Nutzen von verschiedenen Flugszenarios relativ einfach zu ermitteln. Auf Fragen wie „Was sind die Kosten für die Qualitätsverbesserung der Laserdaten?“ oder „Welche verschiedenen Flugszenarios gibt es, und was ist jeweils ihr Einfluss auf Kosten, Punktdichte, Genauigkeit und Zuverlässigkeit?“ können nun Antworten gefunden werden. Drei verschiedene Möglichkeiten zur Qualitätsverbesserung werden diskutiert:

- eine höhere Punktdichte,
- mehr Passpunkte und
- ein Gebiet zweimal fliegen.

Zuerst richten wir uns auf eine höhere Punktdichte. Deren größter Vorteil ist eine detailliertere Terrainbeschreibung und eine Verbesserung der Höhengenaugigkeit in kleineren Gebieten aufgrund des Wegmittels des Laserscanner Punktrauschens. Auf der anderen Seite sind für die Erzielung einer höheren Punktdichte durch die niedrigere Flughöhe meist mehr Flugstreifen nötig. Dies erhöht die Kosten beträchtlich. Jedoch ist damit auch eine Genauigkeitsverbesserung für die mittlere Höhe von größeren Gebieten möglich durch das Wegmitteln von Streifenfehlern, die durch GPS/INS-Fehler verursacht werden.

Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile von vier verschiedenen Flugszenarios für die Erfassung eines 700 km² großen Gebietes diskutiert. Tab. 3 fasst die Kosten und Nutzen für die folgenden Szenarios zusammen:

- Fall 1: Erfassung des Gebiets mit einmaligem Flug und niedriger Punktdichte.
- Fall 2: Erfassung des Gebiets mit einmaligem Flug und hoher Punktdichte.
- Fall 3: Erfassung des Gebiets mit einmaligem Flug und hoher Punktdichte sowie einer großen Anzahl von Passpunkten.
- Fall 4: Erfassung des Gebiets mit zweimaligem Flug und niedriger Punktdichte.

Fall 1 entspricht einer normalen AHN Konfiguration. Die anderen drei Fälle verdeutlichen Möglichkeiten zur Qualitätsverbesserung.

Die Anzahl der €-Symbole stellt eine Kostenindikation für jedes Szenario dar.

Im Gegensatz zu einem Punkt pro 16 m² in Fall 1 ist die Punktdichte im Fall 2 ein Punkt pro 4 m². Die Kosten für den Flug steigen hierbei beträchtlich (um 50%), da viel mehr Kilometer geflogen werden müssen wegen der geringeren Flughöhe und dadurch schmälere Streifen. Der Genauigkeitsgewinn ist jedoch sehr klein für kleine Gebiete (5 m × 5 m). Bei größeren Gebieten (100 ha) verschlechtert sich die Höhengenaugigkeit sogar um beinahe 50%. Dies wird vor allem verursacht durch das schlechtere Verhältnis zwischen der Anzahl Streifen und der Anzahl Passpunkte. Erst wenn so wie im Fall 3 auch die Anzahl der Passpunkte angepasst wird an die große Anzahl Flugstreifen, wird die Genauigkeit für größere Gebiete (100 ha) etwas besser als im Fall 1. Die Genauigkeit bei kleineren Gebieten verbessert sich sogar deutlich (ungefähr 30%). Die Messung der Passpunkte ist jedoch sehr teuer: die Preissteigerung in Bezug auf Fall 1 ist 100%.

Eine – vielleicht ungewöhnliche – Alternative ist, das Gebiet in zwei unabhängigen Flügen zu erfassen (Fall 4). Unter der Annahme, dass die meisten Fehler bei zwei unabhängigen Flügen unkorreliert sind und dass für den zweiten Flug andere (neue) Passpunkte gemessen werden, wird in diesem Fall der totale Fehler um Faktor $\sqrt{2}$ reduziert. Die Genauigkeitsverbesserung und die Kosten gleichen ungefähr dem drit-

Tab. 3: Verbesserung der Höhengenaugigkeit in Relation zu den Kosten für ein 700 km² großes Gebiet (PP = Passpunkt).

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
# Flüge	1	1	1	2
Punktdichte	1 Pkt. pro 4m × 4m	1 Pkt. pro 2m × 2m	1 Pkt. pro 2m × 2m	2 Pkt. pro 4m × 4m
# PP	14	14	49	2 × 14 = 28
# Streifen	42	148	148	2 × 42 = 84
Kosten	€€	€€€	€€€€	2 × €€ = €€€€
Zuverlässigkeit	–	–	–	+
$\sigma_{5m \times 5m}$	14 cm	12 cm	9 cm	14/ $\sqrt{2}$ = 10 cm
σ_{100ha}	6.2 cm	9.2 cm	5.4 cm	6.2/ $\sqrt{2}$ = 4 cm

ten Szenario (Fall 3), die Genauigkeit ist für größere Gebiete sogar etwas besser. Der besondere Vorteil vom vierten Szenario ist jedoch die größere Zuverlässigkeit der Messergebnisse durch eine zweite, unabhängige Erfassung. Auf der anderen Seite ist die Punktdichte bei Fall 4 etwas geringer als bei Fall 3. Die Geländebeschreibung ist damit weniger detailliert.

Das obige Beispiel verdeutlicht, dass eine Kosten-Nutzen Analyse für verschiedene Laseraltimetrie Flugszenarios durch sehr viele verschiedene Parameter beeinflusst wird. Eine sorgfältige Abwägung aller Aspekte ist erforderlich. Dabei sollte auch den Wünschen des Endnutzers der Höhendaten Gehör gegeben werden, um ihm ein optimales und maßgeschneidertes Produkt liefern zu können.

8 Schlussfolgerungen

Die Höhengenaugkeit von Laseraltimetrie Höhenmodellen kann verbessert werden, indem mehr Passpunkte in der 1D-Streifenausgleichung benutzt werden. Der Genauigkeitsgewinn fällt jedoch geringer aus, als zuvor ausgeführte Netzwerkanalysen vermuten ließen. Der Hauptgrund dafür sind Streifenverformungen durch Fehler in GPS und INS, die nicht in der Netzwerkanalyse berücksichtigt wurden. Sehr wahrscheinlich kann die Höhengenaugkeit noch weiter verbessert werden durch eine 3D-Streifenausgleichung, in der auch die Streifenverformungen modelliert werden.

Die Ergebnisse des Tests sind allgemeingültiger, auch wenn der Test nur für einen einzigen Laseraltimetrie Block durchgeführt wurde, weil eine große Anzahl Analysen von Laserdaten anderer Scanner und Firmen gezeigt haben, dass die Fehleramplituden der verschiedenen Fehlerkomponenten vergleichbar sind mit den hier gefundenen (siehe auch CROMBAGHS et al. 2002).

Der Nutzen der Testresultate – zusammen mit dem neuem FehlerbeschreibungsmodeLL – besteht vor allem daraus, dass für zukünftige Projekte eine weitgehende Kosten-Nutzen Betrachtung für verschiedene Flugszenarios ermöglicht wird.

Literatur

- BURMAN, H., 2002: Laser strip adjustment for data calibration and verification. – Proceedings of the ISPRS Symposium "Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria. ISPRS Archives, Volume 34, Part 3A: 67–72.
- CROMBAGHS, M.J.E., BRÜGELMANN, R. & DE MIN, E.J., 2000: On the adjustment of overlapping strips of laseraltimeter height data. – Proceedings of the ISPRS Symposium, Amsterdam, The Netherlands. ISPRS archives, Volume 33, Part B3/1: 224–231.
- CROMBAGHS, M.J.E., OUDE ELBERINK, S.J., BRÜGELMANN, R. & DE MIN, E.J., 2002: Assessing height precision of laser altimetry DEM's. – Proceedings of the ISPRS Symposium "Photogrammetric Computer Vision", Graz, Austria. ISPRS Archives, Volume 34, Part 3A: 85–90.
- Grondmechanica Delft, 1995: Meting maaiveldhoogte en -daling. – Bericht SE-56004/20, Delft, Niederlande. [Niederl.]
- OUDE ELBERINK, S., BRAND G. & BRÜGELMANN, R., 2003: Quality improvement of laser altimetry DEM's. – Proceedings of the ISPRS workshop "3-D reconstruction from airborne laser-scanner and InSAR data", Dresden, Germany. ISPRS archives, Volume 34, Part 3/W13: 51–58.
- SCHOTHORST, C.J., 1977: Subsidence of low peat moor soils in the Western Netherlands. – *Geoderma* 17: 265–291.
- VOSSELMAN, G. & MAAS, H.-G., 2001: Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. – Proceedings of the OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Stockholm, Sweden. OEEPE Publication no. 40: 62–72.

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. REGINE BRÜGELMANN
e-mail: r.brugelmann@agi.rws.minvenw.nl
Tel: +31-15-275-7137

M.Sc. GERT BRAND
e-mail: g.b.m.brand@agi.rws.minvenw.nl
Tel: +31-15-275-7112

Ir. SANDER OUDE ELBERINK
e-mail: s.j.oude-elberink@agi.rws.minvenw.nl
Tel: +31-15-275-7115

Ministerium für Verkehr und Wasser Management, Vermessungsamt
Postfach 5023, NL-2600 GA Delft

Manuskript eingereicht: Dezember 2003
Angenommen: Januar 2004