

Genauigkeitsverbesserung freier globaler Höhenmodelle durch ICESat-2

Karsten Jacobsen¹

Zusammenfassung

Die freien Höhenmodelle ASTER-GDEM3 (GDEM), SRTM, ALOS World3D30 (AW3D30) und TanDEM-X EDEM (TDX-EDEM) haben einen Punktabstand von 1 Bogensekunde, was in den Testgebieten etwa 29 m entspricht. Mittels Flugzeug-Laserscanning-Aufnahmen wurden die Höhenmodelle auf systematische Höhenfehler und auch horizontale Verschiebungen untersucht. Dabei zeigten sich systematische Höhenfehler, als Höhenverschiebungen oder Neigungsfehler der Modelle oder auch systematische Fehler höheren Grades. Diese systematischen Höhenfehler ließen sich mittels ICESat-2 ATL08 (Land und Vegetations-Daten) weitgehend bestimmen, womit sich die freien Höhenmodelle verbessern ließen. Nur in steilen Gebirgslagen war das nicht möglich. In den anderen Testgebieten ergaben sich Höhengenaugkeitsverbesserungen durch Berücksichtigung systematischer Fehler der freien Höhenmodelle von 10% bis 45%. Die höchsten Genauigkeiten wurden mit TDX-EDEM und AW3D30 erzielt; ASTER-GDEM und SRTM sollten nicht mehr benutzt werden.

1 Einführung

1.1 Systematische Fehler

Die untersuchten freien, globalen Höhenmodelle weisen gegenüber den Referenzdaten aus Flugzeug-Laserscanning-Daten systematische Fehler auf. Horizontale Verschiebungen deuten sich im Gebirge an, nicht jedoch in den anderen Testgebieten. Anders sieht es mit systematischen Höhenfehlern aus.

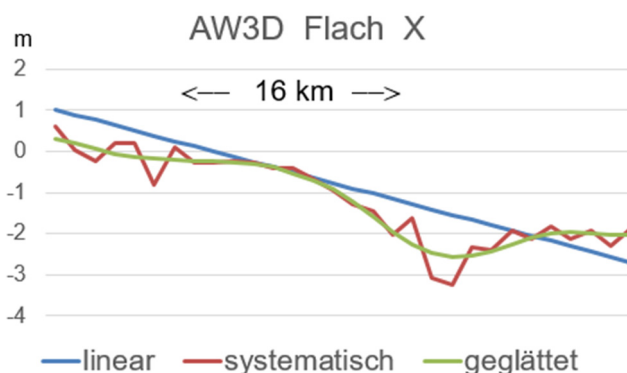


Abbildung 1 Systematische Höhenfehler AW3D30 in X-Richtung, Testgebiet Flach

Abbildungen 1 und 2 zeigen typische Höhenfehler von AW3D30 gegenüber den Referenzdaten im Testgebiet Flach. Typisch ist auch, dass es keine signifikanten

Korrelationen zwischen der X- und der Y-Richtung gibt. In der X-Richtung ist eine deutliche Neigung vorhanden, darüber hinaus sind in beiden Koordinatenkomponenten höhergradige systematische Fehler vorhanden. Die als geglättet bezeichneten Linien sind gleitende, gewogene Mittelwerte der gruppenweisen Mittelwerte der Höhendifferenzen gegenüber den Referenzdaten. Die Glättung ist erforderlich, da verbliebene, nicht entfernte Teilbereiche mit höherer Vegetation und Bebauung zu Ausreißern führen können.

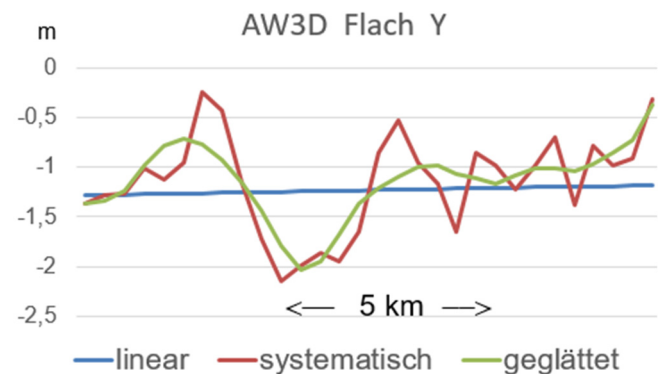


Abbildung 2 Systematische Höhenfehler AW3D30 in Y-Richtung, Testgebiet Flach

1.2 Verwendete freie, globale Höhenmodelle

Die frei verfügbaren, globalen Höhenmodelle TDX-EDEM (TDX-EDEM), AW3D30, SRTM und ASTER-GDEM-3

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover
E-Mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

(ASTER-GDEM) wurden untersucht. Es gibt mehr frei verfügbare, globale Höhenmodelle, sie erreichen aber nicht eine ähnliche Genauigkeit, Homogenität und weitgehend globale Abdeckung. Die verwendeten Höhenmodelle haben einen Punktabstand von einer Bogensekunde, entsprechend 30.86 m in Nord-Südrichtung und bei der mittleren Breite der Testgebiete von 31°, 26.5 m in Ost-Westrichtung, damit im Mittel 28,7 m Punktabstand.

TDX-EDEM ist seit 2024 verfügbar, es basiert auf der interferometrischen, synthetischen Radarsatelliten-Konstellation (InSAR) TanDEM-X (Rizolli et al., 2017; Gonzáles et al., 2020; Gonzales et al., 2024) und ersetzte das Vorläuferhöhenmodell TDM90. Mit der Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) der NASA und des USGS (Gesch et al., 2014) wurde das Höhenmodell SRTM erstellt. ASTER GDEM-3 basiert auf der Bildzuordnung des japanischen Stereosatelliten von TERRA ASTER, der eine Bodenauflösung von 15 m aufwies (ASTER, 2019). Dieses Höhenmodell wurde durch den japanischen ALOS PRISM Dreifachstereosatelliten verbessert, der von 2006 bis 2011 aktiv war und eine Bodenauflösung von 2,5 m hatte (Tadono et al., 2014; Takaku et al., 2014).

Diese Höhenmodelle sind Oberflächenmodelle mit der Höhe sichtbarer Objekte, während das Referenzhöhenmodell ein Geländemodell mit der Höhe des Bodens ist. Für die Untersuchungen sind damit die Teilflächen mit hoher Vegetation, mit Gebäuden und auch Wasserflächen auszuschließen. Hierfür eignet sich die Land Cover Map (LCM), die TDX-EDEM beigefügt ist. Dieses LCM erwies sich für die auszuschließenden Gebiete mit seinen Details als besser geeignet, als die auf der Grundlage von Google Earth erstellten, die für die Genauigkeitsuntersuchungen der gleichen Testgebiete von Jacobsen & Passini (2021) benutzt wurden.

1.3 Testgebiete

Um die Charakteristik verschiedener Gebiete berücksichtigen zu können, wurden vier verschiedene Testgebiete verwendet – Gebirge, Hügelland, Flach und Stadt. Von diesen Gebieten in Texas, USA, liegen Laserscanning-Geländemodelle als Referenz mit einer Höhengengenauigkeit von etwa 20 cm vor.



Abbildung 3 Testgebiet Gebirge (Google Earth)

Das Testgebiet Gebirge (Mittelpunkt 255,2° Länge, 32,0° Breite) weist keinerlei Vegetation und Gebäude auf, weswegen keine Teilflächen auszuschließen sind (siehe Abb. 3). Es hat eine mittlere Geländeneigung von 24,7° und ist auch im Detail sehr rau. Eine bilineare Interpolation der Laserscannerdaten über eine Rasterweite von 30m führt im Quadratmittel zu 5,55 m Abweichung.

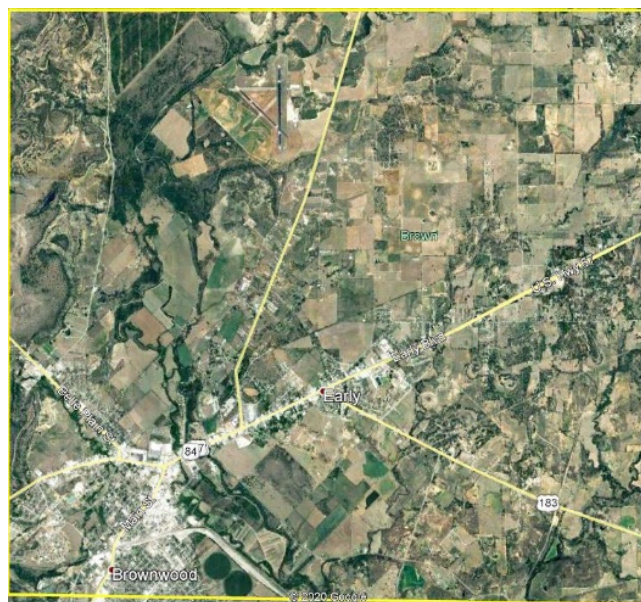


Abbildung 4 Testgebiet Hügelland (Google Earth)

Das Testgebiet Hügelland (Mittelpunkt 261,0° Länge, 31,8° Breite) ist teilweise bebaut und enthält Waldflächen, weswegen Teilflächen von der Untersuchung auszuschließen sind. Die mittlere Geländeneigung beträgt 2,2°. Eine bilineare Interpolation ohne die Ausschlussflächen, mit einer Rasterweite von 30 m, führt mit dem Referenzhöhenmodell im Quadratmittel zu 0,40 m Abweichung.

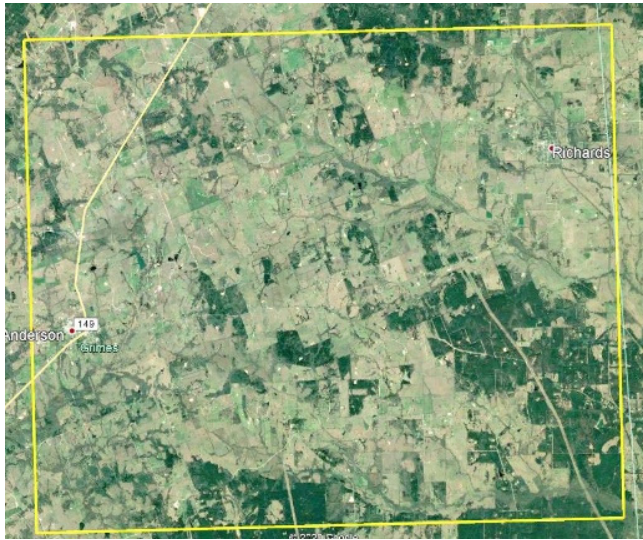


Abbildung 5 Testgebiet Flach (Google Earth)

Das Testgebiet Flach (Mittelpunkt $264,1^\circ$ Länge, $30,5^\circ$ Breite) erfordert auch einen Ausschluss von Teilflächen. Die mittlere Geländeneigung beträgt $2,0^\circ$. Eine bilineare Interpolation mit einer Rasterweite von 30m, ohne die Ausschlussflächen, führt mit dem Referenzhöhenmodell im Quadratmittel zu 0,26 m Abweichung.

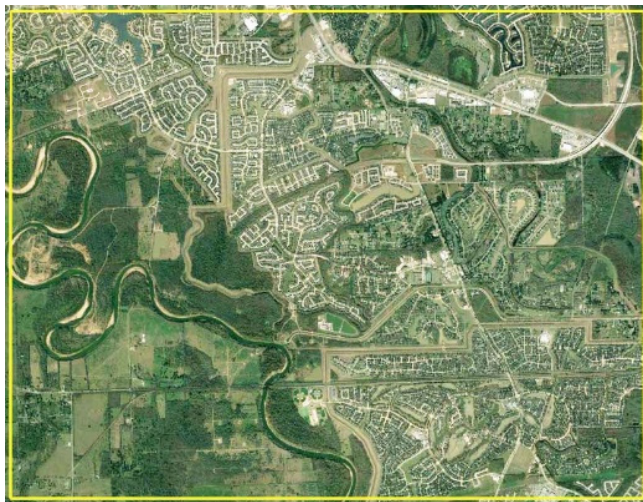


Abbildung 6 Testgebiet Stadt (Google Earth)

Das Testgebiet Stadt, ein Vorstadtgebiet von Houston, (Mittelpunkt $264,5^\circ$ Länge, $29,5^\circ$ Breite) erfordert eine größere Ausschlussfläche. Für das flache Gebiet wurde ohne die Ausschlussflächen eine mittlere Geländeneigung $3,2^\circ$ berechnet. Wird die Ausschlussfläche aufgrund der Land Cover Map um 30 m in die freien Flächen vergrößert, reduziert sich die berechnete Geländeneigung auf realistische $1,4^\circ$. Deswegen wurde diese vergrößerte Ausschlussfläche als LCM2 für alle Untersuchungen des

Testgebiets Stadt verwendet. Die bilineare Interpolation mit einer Rasterweite von 30 m, ohne die Ausschlussflächen LCM, führt mit dem Referenzhöhenmodell im Quadratmittel zu 0,68 m Abweichung, die Vergrößerung der Ausschlussflächen auf LCM2 reduziert dieses auf 0,62 cm. Durch LCM2 wurden 77% der Fläche ausgeschlossen, die verbliebenen Gebiete werden als offene Gebiete bezeichnet.

2 ICESat-2 Daten

ICESat-2 wurde 2018 auf eine 496 km hohe, sonnen-synchrone Umlaufbahn gebracht. Die Umlaufbahn hat eine 91-tägige Wiederholungsrate, womit die Bahnen einen Abstand von mindestens 29 km am Äquator haben. Der maximale Nadirwinkel der Aufnahmen beträgt $1,8^\circ$, somit ist keine flächendeckende Aufnahme möglich (siehe Abb. 7). ICESat-2 hat mit ATLAS einen single photon Laserscanner. Der Laserstrahl wird in 6 Teilstrahlen aufgeteilt, wobei die 3 Kombinationen von je einem starken und einem schwachen Strahl einen Abstand am Boden von 3,3 km quer zur Bahn haben. Die Paare von einem schwachen und einem starken Strahl haben einen Abstand von 90 m quer zur Bahn (<https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/space-lasers>). Es werden 10 000 Laserpulse je Sekunde erzeugt, womit der Bodenabstand 70 cm entspricht. Das ist aber nicht die Auflösung da der beleuchtete Fleck einen Durchmesser von ~ 19 m hat.

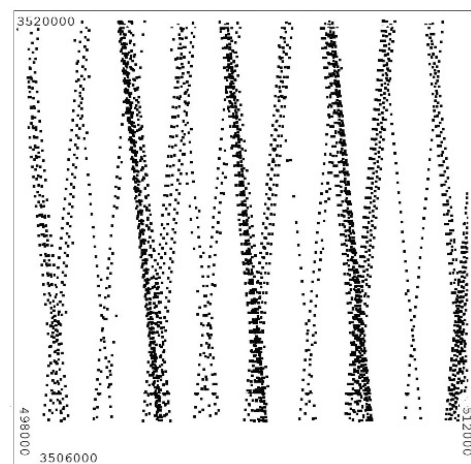


Abbildung 7 ATL08-Punkte im Testgebiet Hügelland

Die Originaldaten von ATLAS sind als ATL03 verfügbar. Diese sind stark verrauscht und müssen gefiltert werden. Mit ATL08 sind gefilterte und auf etwa 100 m in Bahnrichtung gemittelte Objektkoordinaten vorhanden (<https://nsidc.org/data/icesat-2>). Mit dem frei verfügbaren Programm PHOREAL (copyright 2020, University of Texas at Austin) wurden aus den ATL03- und ATL08-Daten,

ATL08-Daten erzeugt, die für die Untersuchungen verwertbar sind.

Neuenschwander et al. (2024) gibt für ebene Gebiete für die ATL08-Daten eine Standardabweichung der Höhe von 0,25 m und eine der Lage von 6,5 m an. Das bedeutet für das Testgebiet Gebirge mit einer mittleren Geländeneigung von 24,7° einen dominierenden Einfluss der Lagegenauigkeit auf die Höhengenaugkeit von 3 m, die für eine Verbesserung der freien Höhenmodelle nicht ausreicht.

Abbildung 7 zeigt die Verteilung der ICESat-2 ATL08 Objektpunkte im Testgebiete Hügelland. Da der Satellit tags und nachts aufnimmt, ergibt sich das Bahnmuster mit dem auf- und dem absteigenden Orbit.

3 Analyse der Höhengenaugkeit

3.1 ICESat-2 gegen Laserscanreferenz

Tabelle 1 Vergleich ICESat-2 ATL08 mit Flugzeug-Laser in offenen Gebieten [m]

Testgebiet	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Gebirge	24,16	6,08	23,38	24,61
Hügelland	0,62	0,24	0,57	0,18
Flach	0,37	0,19	0,31	0,20
Stadt	1,02	0,35	0,96	0,34

Die in Tabelle 1 gezeigten Ergebnisse des Vergleichs von ICESat-2 ATL08 mit den Flugzeug-Laserscanner-Aufnahmen zeigen die Probleme in dem Testgebiet Gebirge. Die Interpolation der Laserscan-Aufnahmen über ein Raster von 30 m ergeben eine Standardabweichung von 5,55 m und die Lagegenauigkeit von ICESat-2 mit 6,5 m entsprechen bei der mittleren Geländeneigung von 24,7° einer Höhengenaugkeit von 3m, hinzukommt die Unsicherheit durch den beleuchteten Fleck von 19 m Durchmesser. Das ergibt zusammen immer noch nicht das Quadratmittel der Abweichungen von 24,16 m, aber es zeigt deutlich, dass mit ICESat-2 keine Verbesserung der freien Höhenmodelle im Gebirge möglich ist.

In den anderen drei Testgebieten sieht es anders aus. Die systematischen Höhenfehler (Bias) liegen im Bereich der Erwartungen. Das Quadratmittel der Höhendifferenzen (RMSZ) und die Standardabweichung (SZ) sind besonders im Stadtbereich noch relativ groß, die NMAD-Werte (Höhle & Höhle 2009) sind mit 0,18 m bis 0,34 m im Bereich der von (Neuenschwander et al., 2024) angegebenen Genauigkeit von 0,25 m und zusammen mit der Streuung der Referenzhöhenmodelle von 0,20 m, was zusammen 0,32 m ergibt. NMAD basiert auf dem Median, während die

Standardabweichung auf Quadraten der Differenzen basiert. Bei normalverteilten Differenzen sind NMAD und SZ identisch. Ein größerer Unterschied zwischen NMAD und SZ zeigt, dass ein größerer Anteil von großen Differenzen, als der Normalverteilung entsprechend, vorhanden ist. Es sind somit nicht alle Gebiete mit hoher Vegetation, Bebauung und Gewässern durch die auszuschließenden Gebiete erfasst.

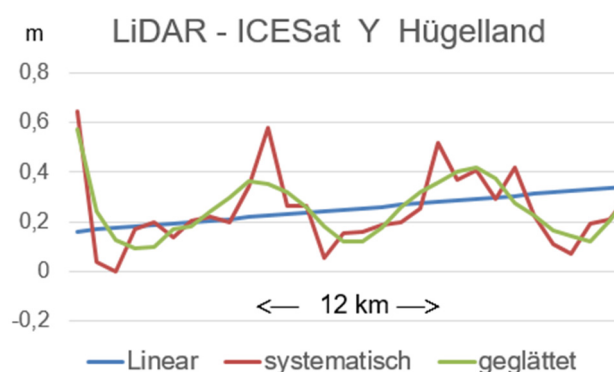


Abbildung 8 Differenzen zwischen ICESat-2 Objektpunkten und den Referenz-Laserscan-Aufnahmen

Wie in Abbildung 8 gezeigt, treten zwischen ICESat-2 Daten und den Laserscan-Aufnahmen, wie auch bei den zu untersuchenden freien, globalen Höhenmodellen, systematische Höhendifferenzen auf. Mit Ausnahme des Gebirges halten sich die Differenzen aber in Grenzen. Die gewogene lineare Ausgleichung (blaue Linie in Abb. 8) zeigt nur eine Neigung von 0,18 m über 12 km auf. Auch die geglätteten Systematiken zeigen mit Ausnahme des nicht so stark besetzten Anfangs nur Beträge von etwa 0,2 m.

3.2 Testgebiet Gebirge

Tabelle 2 Freie Höhenmodelle gegen Laserscan [m]

Höhenmodelle	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
TDX-EDEM	6.38	-1.55	6.18	5.32
AW3D30	4.71	-2.31	4.10	2.80
SRTM	10.67	-1.45	10.57	9.87
ASTER-GDEM	12.72	-5.22	11.60	11.53

Tabelle 3 Freie Höhenmodelle gegen Laserscan $F(\alpha)$

Höhenmodelle	SZ als Funktion der Geländeneigung α
TDX-EDEM	$SZ = 2,85 + 6,07 \cdot \text{Tangens } \alpha$
AW3D30	$SZ = 2,30 + 4,07 \cdot \text{Tangens } \alpha$
SRTM	$SZ = 5,14 + 9,55 \cdot \text{Tangens } \alpha$
ASTER-GDEM	$SZ = 8,09 + 7,44 \cdot \text{Tangens } \alpha$

Eine Verbesserung des Bias im Gebirge ist mit ICESat-2-Daten nicht möglich, deswegen werden die freien Höhenmodelle direkt mit den Laserscan-Daten verglichen. TDX-EDEM hat normalerweise die beste Genauigkeit der freien Höhenmodelle, in dem Testgebiet mit durchschnittlich 24,7° Geländeneigung ist InSAR jedoch durch Überlagerung (layover) und Verkürzung (foreshortening) negativ beeinflusst, weswegen das auf optischen Bildern basierende AW3D30 Vorteile hat (siehe Tabellen 2 und 3). Grundsätzlich schneidet SRTM nicht so gut ab und ASTER-GEDEM3 noch schlechter. Im Gebirge ist, wie üblich, eine starke Abhängigkeit vom Tangens der Geländeneigung vorhanden (siehe Tabelle 3). Dieses zeigt bei den InSAR-Daten TDX-EDEM und SRTM eine stärkere Abhängigkeit als bei den optischen Daten.

3.3 Testgebiet Hügelland

Das Testgebiet Hügelland hat eine mittlere Geländeneigung von 2,2°, damit treten, wie auch Tabelle 1 zeigt, nicht die extremen Differenzen wie im Gebirge auf.

Tabelle 4 TDX-EDEM, Hügelland, ICESat-2 – Referenz [m]

TDX-EDEM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	1.10	-0.33	1.05	0.86
ICESat-2	1.22	-0.57	1.08	0.86
Laserscan, Z-shift verbessert	1.10	0.24	1.07	0.86
Laserscan, Neigung verbess.	1.07	0.11	1.07	0.85

Die gezeigten Genauigkeitsmaße wurden mittels der Ausschlussflächen für die offenen Gebiete, ohne höhere Vegetation, Gebäude und Wasserflächen, erzielt. Die Tabelle 7 zeigt in der obersten Zeile die Genauigkeitsmaße von TDX-EDEM gegen Laserscanner, in der zweiten Zeile die Differenzen TDX-EDEM gegen ICESat-2, in der dritten Zeile die um die Z-Verschiebung mittels der ICESat-2-Daten korrigierten TDX-EDEM-Werte gegenüber den Laserscanner-Daten und in der vierten Zeile die um die Z-Verschiebung und Neigung mittels der ICESat-2-Daten korrigierten Werte gegenüber den Laserscanner-Daten. Eine Angabe der um systematische Fehler höheren Grades mittels der durch ICESat-2 erzielten Werte werden ist nicht aufgeführt, da sie zu keiner weiteren Verbesserung führen.

NMAD ist kleiner als die Standardabweichung, was durch eine höhere Zahl der größeren Fehler gegenüber der Normalverteilung verursacht ist. Die Ausschlussflächen

erfassen damit nicht alle Objekte, die nicht zu den offenen Gebieten zählen.

Tabelle 5 AW3D30, Hügelland, ICESat-2 – Referenz [m]

AW3D30	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	2.02	-1,58	1.26	0.90
ICESat-2	2.24	-1.85	1.27	0.98
Laserscan Z-shift verbessert	1.25	0.27	1.27	0.90

Tabelle 6 SRTM, Hügelland, ICESat-2 – Referenz [m]

SRTM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	2.95	-2.03	2.14	1.94
ICESat-2	3.07	-2.16	2.18	1.71
Laserscan Z-shift verbessert	2.52	-0.58	2.14	1.94
LiDAR, Neigungverbessert	2.20	0.29	2.18	1.97

Tabelle 7 ASTER-GDEM, Hügelland, ICESat-2 – Referenz [m]

ASTER-GDEM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	5.61	-4.65	3.14	2.89
ICESat-2	5.58	-4.51	3.30	2.79
Laserscan Z-shift verbessert	3.05	-0.58	3.14	2.89

Die Tabellen 4 bis 7 zeigen die Genauigkeitsmaße der frei verfügbaren Höhenmodelle gegenüber der Laserscan-referenz, mit Ausnahme der zweiten Zeile, die sich auf die ICESat-2-Daten bezieht. Die dritte und die vierte Zeile beziehen sich auf die freien Höhenmodelle, die durch die mittels ICESat-2-Daten berechneten Verbesserungen um Höhenverschiebungen und ggf. um Modellneigungen verbessert wurden.

Wie auch bei den folgenden Testgebieten schneiden SRTM und ASTER-GDEM deutlich schlechter als TDX-EDEM und AW3D30 ab. Besonders durch die mittels ICESat-2 ermittelten Höhenverschiebungen verbessern sich die freien Höhenmodelle. Bei TDX-EDEM und SRTM gibt es noch geringfügige Verbesserungen durch eine zusätzliche Neigungsverbesserung. TDX-EDEM hat bereits eine gute absolute Orientierung des Höhenmodells, weswegen die Verbesserung durch ICESat-2 klein ist.

3.4 Testgebiet Flach

Tabelle 8 TDX-EDEM, Flach, ICESat-2 – Referenz [m]

TDX-EDEM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	0.72	0.31	0.65	0.48
ICESat-2	0.62	0.16	0.60	0.59
Laserscan Z-shift verbessert	0.67	0.15	0.65	0.48

Tabelle 9 AW3D30, Flach, ICESat-2 – Referenz [m]

AW3D30	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	2.08	-1.42	1.52	1.49
ICESat-2	2.23	-1.90	1.17	1.28
Laserscan Z-shift verbessert	1.59	0.48	1.52	1.49
Laserscan Neigungsverbessert	1.37	-0.13	1.36	1.19
Laserscan systematische Diff. verbessert	1.31	0.21	1.30	1.11

Tabelle 10 SRTM, Flach, ICESat-2 – Referenz [m]

SRTM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	2.80	-1.52	2.35	2.26
ICESat-2	2.43	-1.29	2.06	1.68
Laserscan Z-shift verbessert	2.36	-0.23	2.35	2.26

Tabelle 11 ASTER-GDEM, Flach, ICESat-2 – Referenz [m]

ASTER GDEM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	6.39	4.17	4.84	4.16
ICESat-2	6.54	4.42	4.82	4.86
Laserscan Z-shift verbessert	4.85	-0.23	4.85	4.17
Laserscan Neigungsverbessert	4.19	-0.95	4.08	3.57
Laserscan systematische Diff. verbessert	3.95	0.62	3.90	3.65

Das Testgebiet Flach hat eine mittlere Geländeneigung von 2°, was allerdings auch durch nach Benutzung der Ausschlussflächen verbliebene Objekte, die nicht zum offenen Gebiet gehören, hervorgerufen wird.

Im Testgebiet Flach werden für AW3D30 und ASTER-GDEM die besten Ergebnisse erst durch eine Verbesserung mittels systematischer Fehler höheren Grades, die mit ICESat-2 berechnet wurden, erzielt.

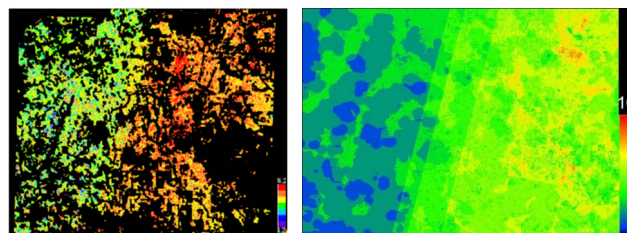


Abbildung 9 links: farbkodierte Höhendifferenzen AW3D30 gegen Laser-Referenz, rechts: Anzahl der „stacks“ die für die Berechnung von AW3D30 benutzt wurden

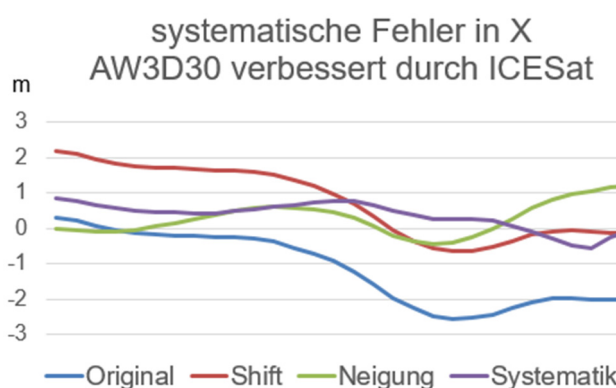


Abbildung 10 Geglättete systematische Fehler von AW3D30 im Testgebiet Flach, verbessert durch ICESat-2 verglichen mit Laser-Referenz [m]

Die Daten der freien, globalen Höhenmodelle nutzen alle verfügbaren, brauchbaren Informationen. Abb. 9 rechts zeigt die für AW3D30 in dem Testgebiet Flach benutzten „stacks“. Auf der rechten Seite sind bis zu der, durch einen Orbit abgedeckten Fläche, deutlich mehr „stacks“ benutzt worden, als auf der linken Seite. Zusammen mit der nicht ganz so guten absoluten Orientierung der Höhenmodellteile von AW3D30 ergeben sich die in Abb. 9 links farbkodiert dargestellten Höhendifferenzen gegenüber der Laserscan-Referenz. Um dieses berücksichtigen zu können, sind die flexiblen Parameter zur Erfassung der systematischen Fehler erforderlich. Abb. 10 zeigt die geglätteten systematischen Fehler der durch ICESat-2 verbesserten Werte. Da es auch zwischen ICESat-2 und der Laser-Referenz Differenzen gibt, haben auch die durch die systematischen Fehler gegenüber ICESat-2 erzielten Differenzen (Systematik) noch Restabweichungen, die aber deutlich kleiner als die

originalen Differenzen sind. Ähnlich sieht es mit dem ASTER-GDEM Höhenmodell aus.

Die Glättung erfolgt durch einen gleitenden Mittelwert über wahlweise 5 oder 11 benachbarte Werte je nach Genauigkeit der Originaldaten.

3.5 Testgebiet Stadt



Abbildung 11 Google Earth Bild vom Testgebiet Stadt

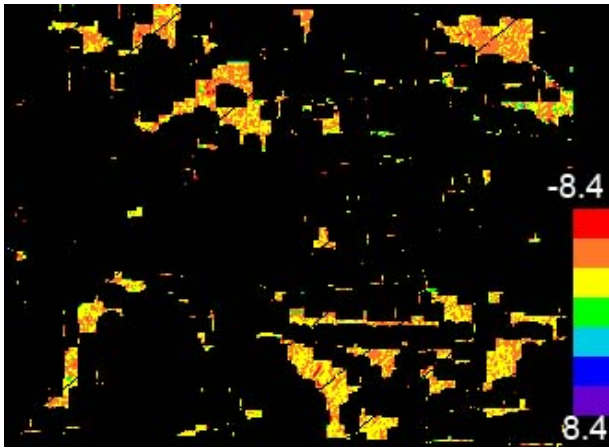


Abbildung 12 Farbkodierte Höhendifferenzen AW3D30, Testgebiet Stadt mit Ausschlussgebiet LCM2 (dieses schwarz)

Das Testgebiet Stadt (siehe Abb. 11) hat nur kleine Flächen ohne Bebauung und Wald. Die mittlere Geländeneigung wurde mit $3,2^\circ$ berechnet, was aber für das flache Gebiet unrealistisch ist und nur durch nicht berücksichtigte Gebäude und hohe Vegetation zu erklären ist. Aus diesem Grund wurde das auf der Land Cover Map von TDX-EDEM basierende Ausschlussgebiet um 30 m in die offenen Gebiete zum LCM2 erweitert. Dadurch reduzierte sich die mittlere Geländeneigung auf realistische $1,4^\circ$. Dieses erweiterte

Ausschlussgebiet wurde für alle Höhenmodelle des Testgebiets Stadt benutzt.

Tabelle 12 TDX-EDEM, Stadt, Referenz [m] –TDX-EDEM

TDX-EDEM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	2.17	-0.92	1.97	1.76
ICESat-2	2.20	-1.34	1.89	2.10
Laserscan Z-shift verbessert	1.76	0.30	1.73	1.77

Tabelle 13 AW3D30, Stadt, Referenz-AW3D30 [m]

AW3D30	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	3.67	-3.49	1.15	0.89
ICESat-2	3.99	-3.61	1.71	1.07
Laserscan Z-shift verbessert	1.43	0.03	1.43	0.95

Tabelle 14 SRTM, Stadt, Referenz-SRTM [m]

SRTM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	4.18	-3.21	2.68	2.46
ICESat-2	4.01	-2.95	2.71	2.49
Laserscan Z-shift verbessert	3.41	-0.56	3.37	2.89

Tabelle 15 ASTER-GDEM, Stadt, Referenz-ASTER [m]

ASTER-GDEM	RMSZ	Bias	SZ	NMAD
Laserscan	6.53	-5.95	2.70	2.76
ICESat-2	6.53	-5.87	2.85	2.58
Laserscan Z-shift verbessert	4.17	-1.93	3.70	3.84

Im Testgebiet Stadt konnten trotz des erweiterten Ausschlussgebietes nicht alle Objekte, die nicht zum offenen Gebiet gehören, entfernt werden. Hinzu kommt, dass Radar Probleme mit Überlagerungen (layover) durch die vertikalen Gebäudefassaden hat. Auch die Zuordnung der optischen Bilder hat mit 2,5 m bzw. 15 m Objektpixelgröße in dem Stadtgebiet Probleme. Deswegen fallen die Ergebnisse im Stadtbereich schlechter aus als im Hügelland und im Testgebiet Flach.

Die nicht durch ICESat-2 verbesserten Ergebnisse sind für TDX EDEM besser als für AW3D30 da die absolute Orientierung der Höhenmodelle von TDX EDEM besser als für die anderen freien Höhenmodelle ist. Anders sieht es mit

den durch ICESat-2 verbesserten Daten aus, mit den Höhenverschiebungen sind die AW3D30 Daten besser als die TDX-EDEM Daten.

4 Diskussion der Ergebnisse

ASTER-GDEM3 und SRTM schneiden deutlich schlechter ab als TDX-EDEM und SRTM. ASTER-GDEM und SRTM sollten deswegen nicht mehr benutzt werden, sie haben keinerlei Vorteile.

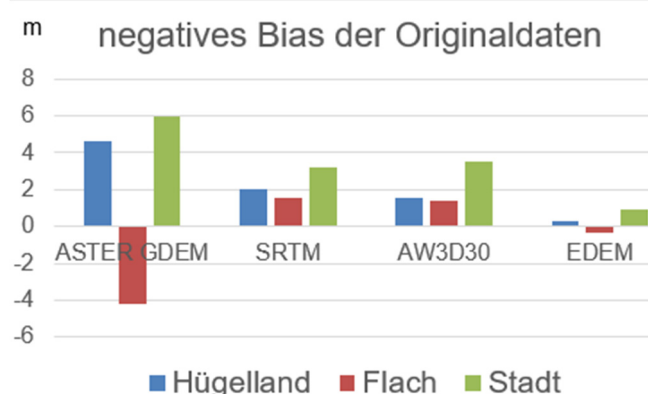


Abbildung 13 Negatives Bias der Originaldaten

Die absolute Genauigkeit der Höhenmodelle zeigt sich im Bias (siehe Abb. 13). TDX-EDEM hat mit Abstand das niedrigste Bias, gefolgt von AW3D30 zusammen mit SRTM. Das Bias von ASTER-GDEM schneidet sehr viel schlechter ab.

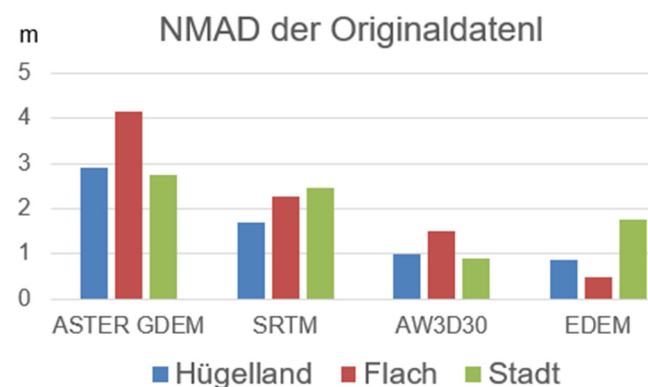


Abbildung 14 NMAD der Originaldaten

Die relative, oder Nachbarschaftsgenauigkeit, zeigt sich mit dem NMAD. NMAD basiert auf dem Medium und ist damit nicht so sehr von Ausreißern beeinflusst wie die auf der Quadratsumme basierende Standardabweichung. Mit Ausnahme vom Stadtgebiet weist TDX-EDEM die niedrigsten Werte auf. SRTM und ASTER-GDEM

schneiden deutlich schlechter ab (siehe Abb. 14). In Stadtgebieten hat InSAR Probleme, so dass im städtischen Bereich AW3D30 Vorteile hat. Ähnlich ist es auch im Gebirge, wo AW3D30 ebenfalls Vorteile vor TDX-EDEM hat (siehe Tab. 2 und 3). NMAD verbessert sich durch die ICESat-Verbesserung nur geringfügig.

Der Einfluss der Höhenmodellverbesserung durch ICESat-2 zeigt sich deutlich in den Abbildungen 15 und 16. Die Verbesserung durch ICESat-2 ist bei TDX-EDEM mit durchschnittlich 10% deutlich kleiner als bei AW3D30 mit 45% (siehe Abb. 16). Bei SRTM beträgt sie 20% und bei ASTER-GDEM 40%. Der große relative Genauigkeitsgewinn bei AW3D30 ist auf die absolute Orientierung zurückzuführen, durch die Bildzuordnung der ALOS-Bilder mit 2,5 m Objektpixelgröße ist eine hohe relative Genauigkeit gegeben.

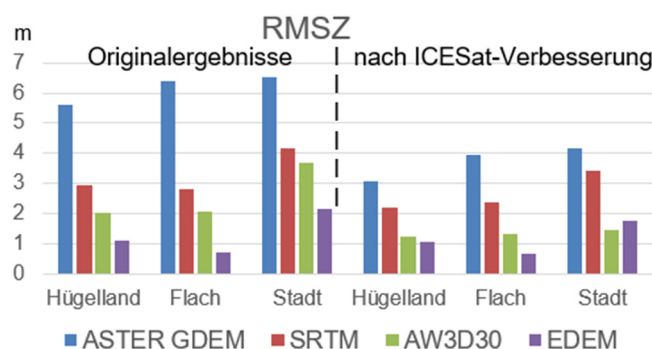


Abbildung 15 RMSZ der Ergebnisse – ursprünglich und nach Verbesserung durch ICESat-2

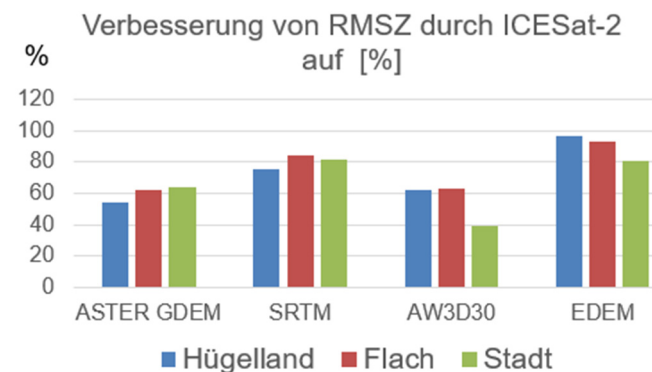


Abbildung 16 Verbesserung der Höhenmodelle durch ICESat-2

Zusammenfassend kann gesagt werden, TDX-EDEM zeigt in der Regel die besten Ergebnisse, die sich durch ICESat-2 nur um etwa 10% verbessern lassen. AW3D30 hat Vorteile im Stadtgebiet und im Gebirge; AW3D30 kann durch ICESat-2 um etwa 45% verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- ASTER (2019). Global Digital Elevation Model – Release of ASTER GDEM Version 3. <https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>
- Gesch, D.B., Oimoen, M.J., & Evans, G.A. (2014). Accuracy assessment of the US Geological Survey National Elevation Dataset, and comparison with other large-area elevation data sets: SRTM and ASTER, <https://pubs.usgs.gov/of/2014/1008/pdf/ofr2014-1008.pdf>, last access October 2025
- González, C., Bachmann, M., Bueso-Bello, J., Rizolli, P., & Zink, M. (2020). A Fully Automatic Algorithm for Editing the TanDEM-X. *Remote Sens.* 2020, 12(23), 3961. <https://doi.org/10.3390/rs12233961>
- Höhle, J., & Höhle, M. (2009). Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398-406.
- Jacobsen, K., & Passini, R. (2021). Analysis and Bias Improvement of Height Models based on Satellite Images. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2021, 23–30, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-23-2021>
- Neuenschwander, A., & Magruder, L. (2016). The Potential Impact of Vertical Sampling Uncertainty on ICESat-2/ATLAS Terrain and Canopy Height Retrievals for Multiple Ecosystems. *Remote Sensing*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/rs8121039>
- Neuenschwander, A., Pitts, K., Jelley, B., Robbins, J., Markel, J., Popescu, S., Nelson, T.R., Harding, D., Pederson, D., Klotz, B., & Sheridan, R. (2024). Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite 2 (ICESat-2) – Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land-Vegetation Along-Track Products (ATL08), 160 p., https://nsidc.org/sites/default/files/documents/technical-reference/icesat2_atl08_atbd_v007.pdf, letzter Zugriff 20. Februar 2026
- Rizzoli, P., Martone, M., Gonzales, C., Wecklich, C., Tridon, D., Bräutigam, B., Bachmann, M., Schulze, D., Fritz, T., Huber, M., Wessel, B., Krieger, G., Zink, M., & Moreira, A. (2017). Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 119-139. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, II-4, 71–76. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>
- Takaku, J., Tadono, T., & Tsutsui, K. (2014). Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-4, 243–248. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014>