



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„Evaluation von GIS- vs. CAD-Systemen hinsichtlich
deren Eignung für 3D Geländeanalysen –
Veranschaulicht am Beispiel einer Windparkplanung“

verfasst von / submitted by

Florian Fassler BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle zunächst bei meinem Betreuer Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl sehr herzlich für seine Unterstützung und eingebrachten Anregungen bei der Betreuung meiner Masterarbeit bedanken. Ein großes Dankeschön gebührt den beiden Gemeinden Gaweinstal und Mistelbach, welche mir die in dieser Arbeit verwendeten Rohdaten kostenlos zur Verfügung gestellt haben.

Ein großer Dank gilt meinen Eltern Heidelinde und Franz Fassler, die mir dieses Studium ermöglicht und mich oft unterstützt und angespornt haben. Außerdem möchte ich meiner Schwester Veronika Fassler danken, welche mir während meines gesamten Studiums bei Fragen und Schwierigkeiten hilfreich zur Seite stand.

Meinen Studienkollegen, Bastian, Gregor, Richard und Vanja, mit denen ich viele Lehrveranstaltungen im Masterstudium besucht habe, möchte ich hiermit ebenfalls meinen Dank ausdrücken.

Ein besonderer Dank gebührt auch meinen Arbeitskollegen Dipl.-Ing. Martin Perschl und Mag. Karl Zeinler MSc, die mich mit neuen Ideen zum Verfassen dieser Masterarbeit motiviert haben und mir diesbezüglich Fragen beantworten konnten.

Abschließend möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meines Studiums und bei der Verfassung dieser Masterarbeit unterstützt und begleitet haben.

Inhalt

Danksagung.....	i
Inhalt.....	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xi
Kurzfassung	xiii
Abstract	xiv
1 Einleitung.....	1
1.1 Theoretischer Hintergrund und praktischer Einsatz.....	2
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Forschungsfrage	4
1.4 Ziel und Methode	4
1.5 Stand der Forschung.....	5
1.6 Relevanz der Arbeit.....	6
2 Grundlagen.....	7
2.1 3D Geoinformation	8
2.1.1 Anforderungen an ein 3D GIS	8
2.1.2 Schwierigkeiten bei der 3D-GIS Umsetzung.....	10
2.1.3 Anwendungsbereiche von 3D-GIS	10
2.2 Softwarekategorien.....	26
2.2.1 Geoinformationssystem (GIS)	26
2.2.2 Computer-Aided Design (CAD).....	27
2.2.3 Modellierungsunterschiede	28
3 3D Datenerfassung	30
3.1 Photogrammetrie	32
3.2 LiDAR.....	35

3.3	RADAR	39
3.4	Kosten und Qualität von Höhendaten für verschiedene Erfassungsmethoden.....	41
4	3D-GIS Datenformate und Modelle	42
4.1	Standards für 3D-Geodaten	42
4.1.1	CityGML	43
4.1.2	X3D	43
4.1.3	WebGL	44
4.2	Digitale Geländemodelle	44
4.2.1	Geländemodellierung und -analyse	47
4.3	3D-Datenformate	48
4.3.1	TIN	48
4.3.2	GRID	51
4.3.3	LiDAR Datenformat	53
4.3.4	3D Shapefiles (MultiPatch)	55
4.3.5	Terrain	56
4.3.6	DXF	57
4.3.7	KML	58
4.3.8	COLLADA	58
5	Evaluierung der Softwarewahl	59
6	Praktische Durchführung der Geländeanalyse.....	64
6.1	Überblick Projektgebiet.....	64
6.2	Datengrundlage	66
6.3	3D-Geländeanalyse	70
6.3.1	GIS.....	70
6.3.2	CAD.....	79
6.4	Vergleich / Gegenüberstellung der Ergebnisse	93
7	Zusammenfassung	100
8	Literatur	103

Anhang.....	114
--------------------	------------

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Erneuerbare Energiequellen (CRISTEA & JOCEA 2016: S. 134).....	1
Abb. 2: Kranstellfläche mit Böschungsflächen (eigene Aufnahme 2020)	3
Abb. 3: 3D-Stadtmodell von Stuttgart (KADA 2019: S. 125).....	12
Abb. 4: Geologisches 3D-Modell (WANG et al. 2016: S. 11)	16
Abb. 5: AM & GIS - Kopplung über Dateischnittstellen (aus BERNARD 2005: S. 343)...	17
Abb. 6: AM & GIS - Erste Stufe der Interoperabilität (aus BERNARD 2005: S. 343).....	18
Abb. 7: AM & GIS - Zweite Stufe der Interoperabilität (aus BERNARD 2005: S. 343)....	18
Abb. 8: Reality-Virtuality Kontinuum (MILGRAM et al. 1994: S. 283)	21
Abb. 9: AR findet auch bei touristischen Attraktionen Anwendung (GUO et al. 2008: S. 2)	23
Abb. 10: GIS- und CAD-Modell (KUHLMANN et al. 2003).....	28
Abb. 11: Passive und aktive Aufnahmesysteme (ALBERTZ 2007: S. 10)	33
Abb. 12: Laserstrahlreflexionen LiDAR (HEINZEL 2011: S. 20).....	36
Abb. 13: Diskrete Echobestimmung vs. Full-Waveform-Digitalisierung (MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 90)	36
Abb. 14: Airborne Laser Scanning (ALS) (GALLAY 2013: S. 3).....	37
Abb. 15: Blockdiagramm eines Laserscanners (WAGNER et al. 2003: S. 225).....	38
Abb. 16: SAR-Abbildungsgeometrie (JUTZI et al. 2017: S. 88).....	39
Abb. 17: Eindringtiefe X-Band, C-Band und L-Band (DLR - INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND RADARSYSTEME 2020)	40
Abb. 18: Kosten und Qualität von Höhendaten für verschiedene Erfassungsmethoden (HAALA 2005: S. 29) – Erweiterung (eigene Bearbeitung)	41
Abb. 19: Prinzip der Erstellung eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells (MAYER 2004)	46
Abb. 20: Modellierung und Analyse eines digitalen Höhenmodells (ZHOU 2017: S. 2) ..	47
Abb. 21: Datenstruktur eines TIN (EL-SHEIMY et al. 2005: S. 14).....	50
Abb. 22: Raster- und TIN-Modell (MALOY & DEAN 2001: S. 1294).....	51
Abb. 23: Rasterdatenstruktur (ZHOU 2017: S. 3)	52

Abb. 24: Struktur des MultiPatch Datenformates und Beispiele der Basistypen (ESRI 2008: S. 2 ff.)	56
Abb. 25: Excel-Fragebogen.....	59
Abb. 26: Auswertung der Anwendungsgebiete der Firmen	60
Abb. 27: Auswertung der verwendeten Programme für die Darstellung von 2D-Daten ..	61
Abb. 28: Auswertung der verwendeten Programme für die Darstellung von 3D-Daten ..	61
Abb. 29: Auswertung der verwendeten Programme für 3D-Geländeanalysen	62
Abb. 30: Auswertung der verwendeten Programme für 3D-Geländemodellieren	63
Abb. 31: Übersicht Projektgebiet (eigene Bearbeitung (2021)).....	64
Abb. 32: Landschaftsstruktur – Katastralgemeinde Schrick (eigene Aufnahme, 2020) ...	65
Abb. 33: Übersicht Windkraftanlagenstandorte (eigene Bearbeitung (2021)).....	65
Abb. 34: Koordinatensystem zuweisen.....	67
Abb. 35: Die einzelnen ASCII-Files	67
Abb. 36: Mosaic-Dataset.....	68
Abb. 37: Erzeugtes Rasterbild (TIF)	68
Abb. 38: Dynamische Bereichsanpassung	69
Abb. 39: Ausdehnung des erzeugten Rasters	69
Abb. 40: Workflow GIS (eigene Bearbeitung)	70
Abb. 41: TIN des Untersuchungsgebietes.....	71
Abb. 42: Feature To 3D By Attribute → 3D-Polyline (Polyline Z).....	72
Abb. 43: Grade From Centerline.....	72
Abb. 44: Mögliche Fehler bei der Geländeverschnidung aufgrund von nicht geschlossenen Linien	73
Abb. 45: Rasterbild der Geländeverschnidung.....	73
Abb. 46: TIN Line → Böschungen in Feature Class aufnehmen.....	74
Abb. 47: "Maske" - Bereiche in welchen die Kubaturberechnung stattfindet.....	74
Abb. 48: Cut Fill	75
Abb. 49: Ergebnis Cut Fill angenommene Geländehöhen - ArcGIS Pro.....	76
Abb. 50: Ergebnis Cut Fill optimierte Geländehöhen - ArcGIS Pro.....	77

Abb. 51: Workflow CAD	79
Abb. 52: DGM aus DEM erstellen	79
Abb. 53: Zeichnungseinstellungen	80
Abb. 54: Elementkanten aus Objekten erstellen	80
Abb. 55: Elementkante erstellen Optionen.....	81
Abb. 56: Höheneditor	82
Abb. 57: Verschneidungsgruppe erstellen	82
Abb. 58: Verschneidungsgruppe - DGM Erstellung	83
Abb. 59: Werkzeug zum Erstellen von Verschneidungen	83
Abb. 60: Verschneidungskriterium erstellen.....	84
Abb. 61: Verschneidung erstellen	84
Abb. 62: Arbeitsschritte Geländeverschneidung.....	85
Abb. 63: Geländeverschneidung Civil 3D	85
Abb. 64: Füllfläche erstellen	86
Abb. 65: Objekt-Viewer mit Triangulierten DGM einer Kranstellfläche	86
Abb. 66: Mengen-Befehls-Navigator - Mengenoberfläche erstellen	87
Abb. 67: Trianguliertes Mengenmodell	87
Abb. 68: Auflistung Auf- und Abtragsvolumen.....	88
Abb. 69: Auf- und Abtragsvolumen der angenommenen Höhen – Civil 3D (Mengen- Befehls-Navigator)	88
Abb. 70: Mengenaktualisierung	89
Abb. 71: Auf- und Abtragsvolumen der optimierten Höhen – Civil 3D (Mengen-Befehls- Navigator).....	89
Abb. 72: Optimierte Kranstellfläche des Anlagenstandorts zwei im Objekt-Viewer	91
Abb. 73: Gegenüberstellung der Workflows (ArcGIS Pro vs. Civil 3D).....	92
Abb. 74: Längsschnitt-Höhenplan (Civil 3D)	96
Abb. 75: Ausschnitt aus dem Grundstücksverzeichnis (ArcGIS Pro).....	96
Abb. 76: Planausgabe mittels "Map Series Pages" (ArcGIS Pro).....	97

Abb. 77: Erzeugte Kranstellfläche mit 3D-Modellen von Windkraftanlagen (ArcGIS Pro Szene)	98
Abb. 78: Excel-Fragebogen.....	114

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Unterschiedliche Dimensionen in der Geoinformation (aus BILL 2016: S. 23).....	7
Tab. 2: Anforderungen an 2D- bzw. 3D-GIS (aus ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 15 f.; nach LOIGGE 2013: S. 10)	8
Tab. 3: Schwierigkeiten bei der Realisierung von 3D-GIS ((ABDUL-RAHMAN et al. 2008: S. 3 f.; STOTER et al. 2015: S. 214 ff.) eigene Bearbeitung).....	10
Tab. 4: Detaillierungsgrad bei 3D-Stadtmodellen (vgl. LOIGGE 2013: S. 15; LORBER & RANZINGER 1995: S. 117)	13
Tab. 5: Übersicht - Level of Detail (LoD) (aus STÄDTETAG NORDRHEIN-WESTFALEN 2004: S. 75 f.)	14
Tab. 6: Geodatentypen in der Aviatik (aus NEBIKER 2005: S. 322 f.)	20
Tab. 7: Optische Effekte zur Maximierung der Realitätstreue (aus NEBIKER 2005: S. 325)	20
Tab. 8: Praktische Anwendungsbereiche von 3D-Geoinformationen in der Luftfahrt (aus NEBIKER 2005: S. 327 ff.)	20
Tab. 9: Erfassungsarten von 3D-Geodaten (aus GÜLCH 2005: S. 5 f.), eigene Bearbeitung	30
Tab. 10: Hauptmerkmale der Erfassungsmethoden (aus NELSON et al. 2008: S. 83 f.), eigene Bearbeitung	32
Tab. 11: Begriffsdefinition.....	45
Tab. 12: Vergleich von DHMs (aus PAMMER 2018: S. 47 f.).....	46
Tab. 13: Gegenüberstellung TIN und GRID	53
Tab. 14: Vergleich LAS-Dataset, Mosaik-Datasets und Punktwolken-Szenenebene (aus ESRI 2020f)	55
Tab. 15: Angenommene Geländehöhen.....	71
Tab. 16: Ergebnisse angenommene Geländehöhen für Kranstellflächen - ArcGIS Pro ...	76
Tab. 17: Optimierte Geländehöhen	77
Tab. 18: Ergebnisse optimierter Geländehöhen für Kranstellflächen - ArcGIS Pro	78
Tab. 19: Visualisierung Kranstellflächen – ArcGIS Pro	78
Tab. 20: Ergebnisse optimierter Geländehöhen für Kranstellflächen – Civil 3D	90
Tab. 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	93

Tab. 22: Vor- und Nachteile ArcGIS Pro und Civil 3D.....	98
Tab. 23: Verwendete Programme zur Darstellung von 2D-Daten	115
Tab. 24: Verwendete Programme zur Darstellung von 3D-Daten	116
Tab. 25: Verwendete Programme für 3D-Geländeanalysen.....	116
Tab. 26: Verwendete Programme für 3D-Geländemodellierungen	117

Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
2,5D	Zweieinhalbdimensional
3D	Dreidimensional
4D	Vierdimensional
ALS	Airborne Laser Scanning
AOI	Area of Interest
AR	Augmented Reality
ARS	Augmented Reality System
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
ASTER GDEM	ASTER Global Digital Elevation Model
AW3D30	ALOS World 3D - 30m
CAD	Computer Aided Design
COLLADA	Collaborative Design Activity
dae	Digital Asset Exchange
DEM	Digital Elevation Model
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DSM	Digital Surface Modell
DTM	Digital Terrain Modell
DXF	Drawing Interchange Format
FOV	Field of View
FWF	Full-Waveform
GIS	Geographisches Informationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
IfSAR	Interferometrisches SAR
IKONOS	Erdbeobachtungssatellit
IMU	Inertial Measurement Unit

ISO	International Organization for Standardization
ITC	International Institute of Aerial Survey and Earth Sciences
KG	Katastralgemeinde
KML	Keyhole Markup Language
LAS	Laser File Format Exchange
LiDAR	Light Detection and Ranging
LOD	Level of Detail
nDOM	Normalisiertes digitales Oberflächenmodell
OGC	Open GIS Consortium
RADAR	Radio Detection and Ranging
RGB	Rot Grün Blau
SAR	Synthetic Aperture Radar
SLS	Spaceborne Laser Scanning
SONAR	Sound Navigation and Ranging
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre (Satellitensystem)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TanDEM-X	Erderkundungssatellit
TC 211	Technical Committee 211
TerraSAR-X	Erdbeobachtungssatellit
TIN	Triangulated Irregular Network
TLS	Terrestrial Laser Scanning
TOCG	TC 211-OGC Coordination Group
TWh	Terrawattstunden
VAT	Value Attribute Table
VRML	Virtual Reality Modeling Language
WKA	Windkraftanlage
XML	Extensible Markup Language
ZLAS	Optimized Laser File Format Exchange

Kurzfassung

Die Projektgebiete für Windparkplanungen werden komplexer, wenn sich Standorte für Windkraftanlagen im unwegsamen Gelände befinden. Daher sind 3D-Geländeanalysen bei der Planung von Kranstellflächen von Windkraftanlagen für Windparkbetreiber von großer Bedeutung. Trotzdem werden Planungen in diesem Anwendungsgebiet größtenteils in 2D durchgeführt, obwohl realistische und optimale Ergebnisse und Darstellungen mittels 3D erzielt werden können.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird die Bedeutung der dritten Dimension und deren Anwendungsmöglichkeiten im 3D-GIS Bereich erläutert. Darauf aufbauend, wurde ein Vergleich zwischen einem ausgewählten GIS- und CAD-System aufgestellt, um herauszufinden, mit welcher Softwarekategorie 3D-Geländeanalysen (Geländemodellierungen) von Kranstellflächen bei Windparkplanungen schneller und effizienter durchgeführt werden können. Das hügelige Projektgebiet, welches für diese Masterarbeit herangezogen wurde, befindet sich in der Katastralgemeinde Schrick im nördlichen Weinviertel. Aus den einzelnen Datengrundlagen wurde ein zusammenhängendes digitales Geländemodell erstellt, welches in den weiteren Analysen als Datengrundlage herangezogen worden ist. Die Befragung einiger Firmen zeigte, dass 3D-Geländemodellierungen vorwiegend mit Autodesk Civil 3D ausgeführt werden. Bei der praktischen Durchführung der Analyse zur Geländeverschneidung mit Esri ArcGIS Pro und Autodesk Civil 3D werden Geländehöhen der Kranstellflächen optimiert. Dabei wurden die verwendeten Tools vorgestellt und der Workflow verschriftlicht. Schließlich konnten positive und negative Aspekte beider Softwareprogramme aufgelistet und deren Weiterverarbeitungs- und Darstellungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Durch aussagekräftige 3D-Geländeanalysen können Kranstellflächen geplant werden, die zu einer Minimierung des Flächen- bzw. Erdvolumenverbrauchs führen und dem Windparkbetreiber enorme Kosten bei der Herstellung dieser Flächen ersparen können.

Abstract

The project areas of wind farm planning are becoming more complex if there are locations of wind turbines in rough terrain. Therefore, 3D terrain analyses have a great importance for clients when planning crane sites for wind turbines. Nevertheless, planning in this area of application is largely carried out in 2D, although realistic and optimal results and representations can be achieved using 3D.

As part of this master's thesis, the importance of the third dimension and its possible applications in the 3D GIS area, is explained. Building on this, a comparison was made between a selected GIS and CAD system in order to find out which software category 3D terrain analyses (terrain modeling) of crane sites in wind farm planning can be carried out faster and more efficiently. The hilly project area, which was used for this master's thesis, is located in cadastral community Schrick in the northern Weinviertel. A coherent digital terrain model was created from the individual data bases, which was used as data base in the further analyses. The survey of some companies showed that 3D terrain modeling is mainly carried out with Civil 3D. During the practical implementation of the analysis of the terrain intersection with ArcGIS Pro and Civil 3D, the terrain heights of the crane sites were optimized. The used tools were presented, and the workflow was written down. Finally, positive and negative aspects of both software programs could be listed, and their further processing and display capabilities were shown. Through meaningful 3D terrain analyses, crane sites can be planned, which lead to a minimization of the land or earth volume consumption and can save the client enormous costs in the production of these areas.

1 Einleitung

„We live in a three dimensional (3D) world. Earth scientists and engineers have long sought graphic expressions of their understanding about 3D spatial aspects of reality in the form of sketches and drawings. (...) 3D descriptions of reality in perspective view change with the viewing position, (...), however they offer a very limited 3D impression. These traditional drawings and maps reduce the spatial description of 3D objects to 2D. Using computing technology, however, knowledge about reality can be directly transferred into a 3D digital model by a process known as 3D modelling.“ (ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 3)

Dieses Zitat zeigt, dass die Welt, in der wir leben, eine dreidimensionale ist und nicht nur aus zwei Dimensionen besteht. Daher sollte sie bei einigen Frage- bzw. Problemstellungen auch als solche modelliert und analysiert werden. Dieses Wissen sollte unter anderem bei der Erstellung von 3D-Geländeverschnitten bei Kranstellflächen in der Windparkplanung genutzt werden.

Im letzten halben Jahrzehnt hat sich innerhalb der Bevölkerung das Umwelt- und Energiebewusstsein gesteigert (vgl. CRISTEA & JOCEA 2016: S. 133), wodurch der Begriff erneuerbare Energie (renewable energy) verbreitet und geprägt wurde. Als erneuerbare Energiequellen zählen Biomasse, Geothermie, Wasserkraft, Solar- und Windenergie (siehe Abb. 1).

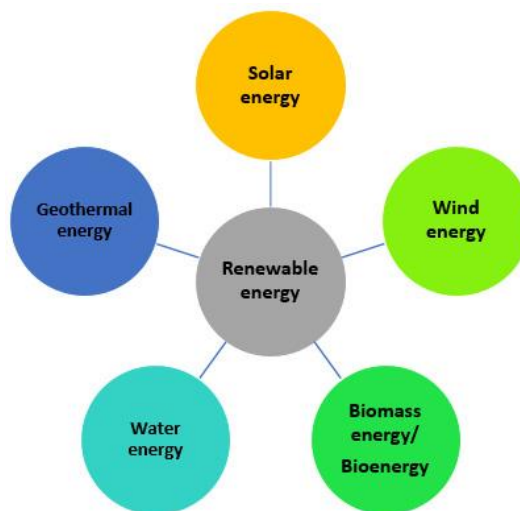


Abb. 1: Erneuerbare Energiequellen (CRISTEA & JOCEA 2016: S. 134)

In Österreich findet die erneuerbare Energie hohe Akzeptanz. Das wird vor allem in einer Studie verdeutlicht, bei der sich bei 1800 Befragten österreichweit nur 4% der Befragten für die Nutzung von Kernkraftwerken zur Energieerzeugung aussprechen. Rund 80% der Befragten befürworteten Solarenergie und zirka 75% die Windenergie. Die Zustimmung für Windkraft ist in jenen Bundesländern überdurchschnittlich hoch, in denen diese Energieform bereits intensiv genutzt wird. (vgl. IG WINDKRAFT 2020b)

1.1 Theoretischer Hintergrund und praktischer Einsatz

In Österreich liegt zurzeit der Jahresverbrauch von Strom bei zirka 63 Terawattstunden (1 TWh = 1 Milliarde Kilowattstunden). Windkraftanlagen erzeugten Ende 2017 7 TWh Strom, dies entspricht 11 Prozent des heimischen Strombedarfs. Die Windenergie soll bis zum Jahr 2022 neunzehn Prozent des Strombedarfs abdecken. (vgl. IG WINDKRAFT 2020a)

Für den Ausbau der Windenergie müssen bei der Planung von Windparks bestimmte raumplanungsrelevante Gesetze bzw. Vorgaben berücksichtigt werden. Im Bereich der Windkraft gibt es zwei Möglichkeiten den Anteil der Stromerzeugung durch Windkraftanlagen zu steigern, zum einen durch Repowering der alten Anlagen (Anlagen werden durch effizientere Anlagentypen ersetzt) und zum anderen durch die Errichtung von Windparks in Gebieten, welche zuvor aufgrund von naturräumlichen Gegebenheiten (z.B. unwegsamen Gelände) bzw. die dadurch anfallenden zusätzlichen Kosten, gemieden wurden. Die leicht zugänglichen und wenig komplexen Standorte im östlichen Teil von Österreich sind bereits überwiegend erschlossen bzw. können sie aufgrund von Vorbehalten der Gemeinden und Anrainer oder naturschutzrechtlichen Einwänden nicht zur Windkraftnutzung herangezogen werden. Dadurch werden die Projektgebiete für Windparkplanungen komplexer, da Windkraftanlagenstandorte im unwegsamen Gelände, unter anderem auf Bergen, geplant werden müssen. Die Standortwahl erfolgt durch Standortanalysen in Geoinformationssystemen (GIS) bzw. ist sie durch bestehende Zonierungsfestlegung der Länder vorgegeben.

Bei Windkraftanlagenstandorten in unwegsamen Gelände sind für Windparkbetreiber die 3D-Planungen der Anlagenstandorte von großem Interesse. Die Kranstellflächen (Flächen zum Aufbau der erforderlichen Großkräne zur Errichtung der Windkraftanlagen) müssen als ebene Flächen mit äußerst geringem Gefälle ausgeführt werden. Um dies zu gewährleisten, kommt es bei komplexen Geländebedingungen zu Einschnitten (Abtragungen) und Aufschüttungen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Böschungsflächen und der damit einhergehende Flächen- bzw. der Erdvolumenverbrauch für den Windparkbetreiber von besonderer Bedeutung.

In nachstehender Abb. 2 ist am Beispiel eines anderen bereits in Bau befindlichen Windparks eine ebene Kranstellfläche mit den Böschungen der Geländeeinschnitte dargestellt. Es wird ersichtlich, dass enorme Materialmengen bei diesem Windkraftanlagenstandort abgetragen werden mussten. Es zeigt eindrucksvoll die Größenordnungen der Geländeingriffe und die zugehörigen Materialmengen und macht deutlich, dass eine Optimierung der Eingriffe durch eine 3D-Geländemodellierung zu empfehlen ist.



Abb. 2: Kranstellfläche mit Böschungsflächen (eigene Aufnahme 2020)

Wenn es beispielsweise aufgrund der Böschungsflächen zu Waldrodungen kommt, sind die gerodeten Flächen vom Windparkbetreiber im dreifachen Ausmaß aufzuforsten. Durch die Balance von Abtragung und Aufschüttung können der Flächenbedarf und die Kosten minimiert werden, da das abgetragene Material oftmals für notwendige Aufschüttungen herangezogen werden kann und nicht viel Erdmaterial zur Kranstellflächenerzeugung angeliefert bzw. angekauft werden muss. Das Volumen der Abtragung und der Aufschüttung kann genau bestimmt werden. Hierbei kann es aber zu großen Differenzen zwischen den abgetragenen und aufgeschütteten Volumen kommen, welche die Kosten beachtlich erhöhen, wenn das abgetragene Volumen nicht am Standort abgelagert oder verwendet werden kann und zur Lagerung in ein anderes Gebiet transportiert werden muss. (vgl. CALINA et al. 2015: S. 419; CHENG & JIANG 2013: S. 1278)

Durch die 3D-Geländeanalysen können Kranstellflächen geplant werden, die zu einer Minimierung des Flächen- bzw. Erdvolumenverbrauchs führen und dem Windparkbetreiber enorme Kosten bei der Herstellung dieser Flächen ersparen können.

1.2 Problemstellung

Aufgrund meiner Tätigkeit bei einem Ziviltechniker, welcher großteils mit Windparkgenehmigungen bzw. -planungen betraut ist, wird ersichtlich, dass die Erstellung von 3D-Planungen der Kranstellflächen von Windkraftanlagenstandorten im unwegsamen Gelände an Bedeutung gewinnt.

Es zeigt sich jedoch, dass Raumplanungen und Landschaftsplanungen vorrangig in 2D durchgeführt werden. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 2; STOTER et al. 2016: S. 100) Es war üblich 2D-Planungen für die Kranstellfläche der Anlagenstandorte zu erstellen, da es aufgrund des flachen Geländes zu keinen großen Abweichungen im Flächen- und Volumenverbrauch (keine Böschungsflächen) bei der Erbauung kam.

Im 3D-GIS-Bereich können mit Hilfe von digitalen Geländemodellen räumliche Analysen in Bezug auf Hangneigung, Ausrichtung, Sichtbarkeiten, sowie Abtragungs- und Aufschüttungsvolumen und 3D-Visualisierungen durchgeführt werden. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 5) Computer Aided Design (CAD) wird verwendet, um bei Bahntrassen die Böschungsflächen und deren Ausmaße im Gelände zu planen. (vgl. GUO et al. 2020: S. 2) Auch an meiner Arbeitsstelle werden bei Planungen GIS- und CAD-Systeme verwendet, daher soll auf diese beiden Kategorien in der Masterarbeit eingegangen werden.

1.3 Forschungsfrage

Aus der Problemstellung ergibt sich folgende **Forschungsfrage**:

Welche der gewählten Softwarekategorien erfüllt die Anforderungen bei der Geländeanalyse von Kranstellflächen bei Windparkplanungen optimal?

Arbeitsfragen

Welche Anforderungen werden hinsichtlich der Kranstellflächenplanung an die Geländeanalyse gestellt?

Mit welcher Softwarekategorie können die Geländeanalysen am effizientesten durchgeführt werden?

Eignen sich sowohl die mittels CAD als auch jene mittels GIS gewonnenen Ergebnisse gleichermaßen gut für eine Weiterverarbeitung (z.B. zur Ermittlung der Grundstücks- bzw. Eigentümerverhältnisse oder der Kubaturen).

1.4 Ziel und Methode

Ziel ist es daher, ein GIS- und ein CAD-System zu vergleichen, um herauszufinden, mit welcher Softwarekategorie 3D-Geländeanalysen (Geländemodellierungen) schneller und effizienter durchgeführt werden können.

Zu Beginn der Arbeit wird daher mithilfe einer Literaturrecherche der Begriff 3D-GIS geklärt, Anwendungsmöglichkeiten und der aktuelle Stand aufgezeigt. Weiters werden die Grundlagen der beiden Softwarekategorien GIS und CAD erläutert. Im Anschluss soll auf Daten, die für die Analysen notwendig sind, eingegangen werden, sowie deren Erfassung und unterschiedliche Datenformate dargestellt werden.

Anschließend erfolgt der angewandte Teil der Arbeit. Anfangs wird ein kurzer Überblick über das Projektgebiet und die Datengrundlagen (verwendetes Geländemodell) geschaffen. Im Weiteren wird die Auswahl für jeweils ein Softwareprogramm pro Kategorie getroffen. Danach folgt die praktische Durchführung der Analysen zur Geländeverschneidung mit dem GIS- bzw. CAD-Programm, wobei die verwendeten Tools vorgestellt und der Workflow skizziert wird. Die Analyseergebnisse werden hinsichtlich ihrer Weiterverarbeitungsmöglichkeiten aufgezeigt. Zuletzt werden die Ergebnisse der beiden Herangehensweisen hinsichtlich Flächen- und Volumenverbrauch gegenübergestellt und positive bzw. negative Aspekte der unterschiedlichen Analyseansätze dargestellt.

Das Ergebnis der Arbeit soll nicht eine der Softwarekategorien hervorheben. Ziel ist es, aufzuzeigen, welche Kategorie für Geländeanalysen/-modellierungen, sowie für Weiterverarbeitungs- und Darstellungsmöglichkeiten besser geeignet ist.

1.5 Stand der Forschung

ABDUL-RAHMAN & PILOUK führen aus, dass das dreidimensionale Anwendungsgebiet in GIS unter anderem vom Bauingenieurwesen über Architektur und Archäologie bis hin zu Landschaftsplanung reicht. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 6 f.) Im Beitrag von AZRI et al. wird erläutert, dass es zu einer zunehmenden Anzahl von 3D-Geodatenanwendungen in Disziplinen wie Stadtplanung, Prävention von natürlichen Risiken, Katastermanagement, physikalischen Modellierung und Navigation gekommen ist. In den kommenden Jahren wird erwartet, dass 3D ein wesentlicher Bestandteil der zentralen Geodateninfrastruktur sein wird. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 73) Besonders der Bereich der 3D-Stadtmodelle mittels CityGML ist ein wichtiger Bereich der 3D-Geoinformation. (vgl. BILJECKI et al. 2015: S. 3)

In der Literatur sind bisher zu 3D-Analysen am Beispiel von Windparks Sichtbarkeitsanalysen vorhanden, größtenteils wurden jedoch Standort- bzw. Potenzialanalysen für Windenergie durchgeführt. (vgl. CRISTEA & JOCEA 2016; HÖLTINGER et al. 2016; MORADI et al. 2020; RAFIEE et al. 2018; SKLENICKA & ZOUHAR 2018)

ABDUL-RAHMAN & PILOUK stellen in ihrem Buch den 3D-Analyst von ESRI vor, ein Tool zur 3D-Geländeerstellung, mit welchem auch Volumenberechnungen durchgeführt werden können. Der 3D-Analyst kann weiters für 3D-Datenmanipulation und Visualisierungsaufgaben verwendet werden. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 18 f.) AZRI et al. erläutern, dass die Verwendung von 3D-Analysen und 3D-Visualisierungen bei Geodatenanwendungen in letzter Zeit eine größere Verbreitung gefunden haben. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 72)

Im CAD-Bereich wird beim Straßenbau auf Civil 3D zurückgegriffen, um Straßenböschungen zu erstellen und Erdvolumen zu berechnen. Hierbei wird aus einem digitalen Geländemodell ein Triangulated Irregular Network (TIN) erstellt und folgend wird das TIN bearbeitet. Anschließend werden das originale TIN und das bearbeitete TIN miteinander verglichen, wodurch das Volumen erfasst werden kann. (vgl. CHENG & JIANG

2013: S. 1278 f.) ABDUL-RAHMAN & PILOUK erläutern, dass TIN am besten geeignet sind, um räumliche 3D-Objekte zu repräsentieren. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 42) Weiters wurde beim Bau von Großprojekten das Erdbewegungsvolumen mittels CAD und der Erstellung eines TINs ermittelt. Aus dem 3D-Modell und einer Ebene mit einer konstanten Höhe können anschließend die positiven und negativen Volumina berechnet werden. (vgl. CALINA et al. 2015: S. 414 f.) In meiner Arbeit wird die ähnliche Anwendung zu den genannten Beispielen genützt, um die 3D-Geländeanalysen durchzuführen. Internet-Foren liefern zusätzlich aktuelle Ideen und Anregungen, die anschließend durch eigenständige, praktische Anwendung überprüft werden.

1.6 Relevanz der Arbeit

Die Arbeit kann als Grundlage dienen, um den Entscheidungsprozess in Hinblick auf Softwarewahl bei Geländeanalysen von Kranstellflächen bei Windparkplanungen, für Planungsbüros zu unterstützen bzw. zu erleichtern. Es soll daher der ideale Workflow bei 3D-Analysen skizziert werden. Folglich werden Kosten innerhalb der Firma gespart, wenn 3D-Geländeanalysen effizienter und schneller durchgeführt werden können. Weiters verringern sich die Erstellungskosten der Kranstellflächen für den Windparkbetreiber, wenn der Flächen- und Erdvolumenverbrauch minimiert wird.

2 Grundlagen

Die Geoinformation hat sich für viele Anwendungen und den täglichen Gebrauch als wichtig erwiesen. (vgl. ZLATANOVA 2002: S. 24) Am Anfang der Geoinformationsverarbeitung bzw. auch großteils heute noch, werden Aufgaben und Fragestellungen zumeist durch zweidimensionale (2D)-Geodaten beantwortet. Mit anderen Worten formuliert ist die Bearbeitung oder Analysierung von räumlichen Informationen mit mehr als zwei Dimensionen äußerst schwierig, da die Resultate ab einer weiteren Dimension oftmals ungenaue bzw. lückenhafte Informationen beinhalten. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 2) Die Welt, in der wir leben, ist jedoch dreidimensional und in vielen Fällen reichen die zwei Dimensionen nicht aus. So können 3D-Objekte, welche in 2D-Projektionen dargestellt werden, einige ihrer Eigenschaften und Beziehungen zu anderen Objekten verlieren und somit Schwierigkeiten beim Verstehen, Analysieren und Bewerten der umliegenden Welt bewirken. (vgl. FOGLIARONI & CLEMENTINI 2015: S. 244; ZLATANOVA 2002: S. 24)

In den vergangenen Jahren strebt der Bereich der Geoinformation immer mehr einen holistischen Ansatz an. Außerdem können infolge der Weiterentwicklung im Bereich der Datenerfassung (Laserscanning-Sensoren) und im Hardware-Bereich (Prozessoren, Speichermedien, Grafikkarten) kontinuierlich mehr räumliche Daten verwertet werden. Dahingehend beschäftigt sich die Geoinformation häufiger mit der Problematik der 3D-Darstellung und im weiteren Verlauf mit Analysen dieser Daten. (vgl. LOIGGE 2013: S. 7) Durch die größere Verbreitung von 3D-Analysen und 3D-Visualisierungen, kommt es zu einer zunehmenden Anzahl von 3D-Geodatenanwendungen. Wodurch in den kommenden Jahren erwartet wird, dass Geodaten zu einem wesentlichen Anteil an 3D-Daten bestehen werden. Dadurch zeigt sich das enorme Potenzial. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 72 f.)

BILL (2016) erklärt in diesem Zusammenhang die unterschiedlichen Dimensionen eines Geoinformationssystems wie folgt:

Zweidimensional (2D)	wenn sich seine Geometriedaten lediglich auf x,y-Koordinaten (Planimetrie) beziehen und keine Höhenangaben vorliegen
Zweieinhalbdimensional (2,5D)	wenn zur Lagegeometrie die Höhe z als Attribut gespeichert ist
Dreidimensional (3D)	wenn die x,y,z-Koordinaten in hinreichender Dichte vollständig für das gesamte Teilgebiet abgespeichert sind

Tab. 1: Unterschiedliche Dimensionen in der Geoinformation (aus BILL 2016: S. 23)

Als weitere Komponente kann zu den zuvor erwähnten x,y,z-Koordinaten zusätzlich die Zeit (t) verwendet werden. Die Zeit bietet die Option einer dynamischen Visualisierung (verschiedene Zustände), wodurch von vierdimensional (4D) gesprochen werden kann. (vgl. BILL 2016: S. 27)

2.1 3D Geoinformation

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird der dritten Dimension immer mehr Bedeutung im Bereich der Geoinformation (zur Modellierung, Speicherung, Visualisierung und Analyse von Daten) zugeschrieben bzw. anerkannt. Viele Anwender aus den unterschiedlichsten Branchen benötigen für ihre Analysen und Bewertungen aussagekräftige und genaue Abbildungen bzw. Modelle der Realität.

ZHOU et al. schreiben, dass ein zunehmender Bedarf an dreidimensionalen (3D) Stadtmodellen für verschiedene Anwendungen, wie Stadtplanung, Mikroklimauntersuchungen, Sendemasten-Platzierung in der Telekommunikations-Branche, Lärmsimulation, Wärme- und Abgasausbreitung-Simulationen, Virtual Reality usw., besteht. (vgl. ZHOU et al. 2004: S. 345) Wie bereits im einleitenden Kapitel erwähnt, scheint die zunehmende Anzahl von 3D-Geodatenanwendungen in Bereichen wie Stadtplanung, Katastrophenmanagement, Modellierungen und Simulationen sowie Navigation auf. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 73; BILJECKI et al. 2015: S. 3)

2.1.1 Anforderungen an ein 3D GIS

Im Idealfall sollte jedes GIS-System in der Lage sein, Informationen über georäumliche Phänomene bereitzustellen. Dies lässt sich mittels fünf Funktionen (siehe Tab. 2), nämlich der Erfassung, Strukturierung, Manipulation, Analyse und Präsentation, gewährleisten. (vgl. ABDUL-RAHMAN et al. 2008: S. 2; ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 15)

Datenerfassung / Capture	<ul style="list-style-type: none"> • Hinzufügen der räumlichen Daten in das System • Unterschiedliche Techniken und Arten der Aufnahme, für Geometrie- als auch Attributdaten • Erfassung: manuell, halbautomatisch und automatisch • Output: Vektor- oder Rasterformat
Strukturierung / Structuring	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidende Phase bei der Erstellung einer Geodatenbank • Bestimmt den Funktionsbereich, der zur Manipulation und Analyse verwendet werden kann • Unterschiedliche Möglichkeiten der Strukturierung <ul style="list-style-type: none"> ◦ einfache oder komplexe Topologie ◦ relational oder objektorientiert
Manipulation / Manipulation	<ul style="list-style-type: none"> • wichtigste Funktionen zur Manipulation sind die Generalisierung und Transformation
Analyse / Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung der Geometrie- und Attributdaten • Generierung von neuer räumlicher Information • Typische Analysefunktionen: Geländeanalyse (z.B. Sichtbarkeit), geometrische Berechnungen (Volumen, Flächen, ...), Überlagerung, Pufferung, Sortierung
Präsentation / Presentation	<ul style="list-style-type: none"> • Letzte Aufgabe eines GIS • Darstellen aller generierten Informationen oder Ergebnisse, in Form von Karten, Grafiken, Tabellen, Berichten

Tab. 2: Anforderungen an 2D- bzw. 3D-GIS (aus ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 15 f.; nach LOIGGE 2013: S. 10)

Ein voll funktionsfähiges 3D-GIS sollte daher ebenfalls fähig sein, dieselben Funktionen wie ein 2D-GIS zu leisten. (vgl. ABDUL-RAHMAN et al. 2008: S. 2; ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 16)

Angemessene 3D-Systeme sind bereits vorhanden, jedoch existieren Problemfelder, die noch weiterer Forschungen bedürfen. Eine der Herausforderungen ist die optimale Verwaltung von 3D-Geodaten mit Optimierungsfunktionen, die verschiedene Faktoren wie Speicherplatzverbrauch, Datenmodell, Datenstruktur und räumliche Zugriffsmethode kombinieren. Diese Faktoren hängen miteinander zusammen, um die Effizienz des Datenmanagements zu erreichen und zu optimieren. 3D-Daten sind daher aufgrund detaillierter geometrischer Merkmale und detaillierter nicht-räumlicher beschreibender Informationen mit einer kostspieligen Speichergröße verbunden. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 71 ff.; BUTWILOWSKI et al. 2015: S. 52) Aufgrund dieser großen Menge detaillierter Informationen bei 3D-Geodaten ist ein effizienter Ansatz für das 3D-Datenmanagement erforderlich. Die Verwaltung von 3D-Geodaten ist wichtig, um sicherzustellen, dass die 3D-Daten effizient verwaltet und die erzeugten Informationen effizient abgerufen werden. Aufgrund dieser Herausforderungen arbeiten Experten immer noch an der Verwaltung von 3D-Geoinformationen für Geodatenanwendungen. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 72 f.; STOTER et al. 2015: S. 224) Datenbankmanagementsysteme (DBMS) unterstützen heutzutage 3D-Geometrien. Dennoch bedarf es der Notwendigkeit verbesserter Speicher- und Wartungsmodelle für 3D-Geodaten. (vgl. STOTER et al. 2015: S. 216)

3D-Geodaten werden in einer 3D-Geodatenbank für eine effiziente Datenkonstellation verwendet. Die Effizienz dieser 3D-Geodatenbank in Bezug auf ein massives 3D-Dataset wird jedoch aufgrund der Datenkomplexität und des Speicherplatzverbrauchs geringfügig beeinträchtigt. In Verbindung mit diesem Problem wird auch die Leistung beim Abrufen von Daten verringert. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 73 f.) Für Echtzeitanwendungen eignen sich räumliche Indexstrukturen für die Datenvisualisierung und Datenaktualisierung am besten. In den meisten Datenbankverwaltungssystemen werden jedoch nur 2D-Indexstrukturen unterstützt, welche eine nicht geeignete Lösung für 3D-Geoinformationen darstellen, da die Datentypen und Beziehungen zwischen Objekten bei 3D anders definiert sind als in 2D. Eine Indexstruktur für räumliche 3D-Informationen ist nach wie vor ein offenes Forschungsproblem. Daher ist eine bestimmte Indexstruktur für 3D-Geoinformationen für eine effiziente Datenanalyse und Datenabfrage von Bedeutung. (vgl. AZRI et al. 2015: S. 74)

Die Autoren zeigen auf, dass infolge des technologischen Fortschritts die dritte Dimension mittlerweile besser zur Veranschaulichung herangezogen werden kann. Für sämtliche Wissenschaften und Nutzer, wie Zivilingenieure, Hydrologen, Geologen, Archäologen, Raumplaner und dergleichen, würden sich durch die Arbeit mit 3D-Geodaten positive Aspekte ergeben. Dadurch können für komplizierte Aufgabenstellungen Lösungen bereitgestellt werden, welche mit 2D und 2,5D Geodaten nicht gelöst werden können. (vgl. ABDUL-RAHMAN et al. 2002: S. 1; AZRI et al. 2015: S. 72; LOIGGE 2013: S. 11; PUNIA & KUNDU 2014: S. 1) Ein wichtiger Vorteil liegt auch in der besseren Visualisierung und Veranschaulichung für den Endnutzer. (vgl. STOTER et al. 2015: S. 208; STOTER & ZLATANOVA 2003: S. 1) Zahlreiche Studien belegen weiters, dass durch die 3D-

Aufbereitung, Planungszusammenhänge besser kommuniziert werden können. (vgl. KHAN et al. 2015: S. 178; TIEDE & BLASCHKE 2005: S. 289)

2.1.2 Schwierigkeiten bei der 3D-GIS Umsetzung

Es gibt auch einige Schwierigkeiten bei der Umsetzung von 3D-GIS. Diese schwer umzusetzenden Aspekte werden in Tab. 3 zusammengefasst.

Datenaufbereitung	Felddaten <ul style="list-style-type: none"> • Verwalten und Dokumentieren der Unsicherheit während der Datenerfassung zur Erstellung der Referenzdaten • Integration verschiedener Produkte (Punktwolken, Luftbilder, 2D-Datenbank, usw.) • Integration von Algorithmen zur Erkennung von Oberflächenänderungen zur Verbesserung des manuellen Aktualisierungsprozesses 3D-Objektrekonstruktion <ul style="list-style-type: none"> • trotz Fortschritt bei der automatischen Objekterkennung und 3D-Rekonstruktion → manuelle Bearbeitung noch immer großer Aufgabenbereich • Modellkonstruktion aus verschiedenen Datenquellen • Modellierung von Brücken, Tunnel, Höhlen, Überhänge • Vertikale Flächen bei TINs (z.B. Bordsteine)
Räumliche Analysen	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Analysemöglichkeiten bei Weitem noch nicht ausgeschöpft → Forschungsbedarf
3D-Standards und Datenmodellierung	<ul style="list-style-type: none"> • Gemeinsame Vereinbarungen zum Inhalt von 3D-Daten fehlen • Keine gemeinsame Übereinstimmung hinsichtlich Begriffe wie 3D, 2.5D, LOD, 3D-Gebäude, 3D-Modell, 3D-Daten und hinsichtlich der Modellierung von 3D-Topologien wie Gebäude, Straßen und Gewässer • Gemeinsames internationales Vokabular für 3D-Konzepte (auf bestehend Standards, wie CityGML) • Festlegung von Standards für 3D-Modelle in Übereinstimmung mit 2D-Datenmodellen • Definition von Spezifikationen für komplexe Strukturen und Objekttypen auf verschiedenen Detailebenen • Definition fortgeschrittener 3D-Geodatenmodelle (Vektor, Voxel, CSG, Tetraeder, gekrümmte Oberflächen, usw.)

Tab. 3: Schwierigkeiten bei der Realisierung von 3D-GIS ((ABDUL-RAHMAN et al. 2008: S. 3 f.; STOTER et al. 2015: S. 214 ff.) eigene Bearbeitung)

2.1.3 Anwendungsbereiche von 3D-GIS

„Damit sich die hohen Investitionen in die Erfassung und Fortführung von virtuellen 3D-Modellen lohnen, muss darauf geachtet werden, dass sie sich nicht ausschließlich zur Visualisierung eignen, sondern vielmehr multifunktional verwendbar sind. Damit sind insbesondere die Nutzung im Kontext von Analysen und die Anbindung von Fachanwendungen gemeint.“ (GRÖGER & KOLBE 2005a: S. 235; aus PETZOLD 2003)

Sowohl für 2D-Geodaten als auch für 3D-Geodaten gibt es Fragestellungen, welche für unterschiedliche Berufsfelder und Anwender von Bedeutung sind. So können diese viele nützliche und aussagekräftige Informationen und Analysen liefern, wenn sie in einem 3D-Raumsystem verarbeitet werden. Folgend werden einige Anwendungsgebiete nach ABDUL-RAHMAN & PILOUK, AZRI et al. und ZLATANOVA et al. aufgelistet:

- Ökologische Studien
- Umweltmonitoring
- Geologische Analysen
- Bauingenieurwesen
- Minenerkundung
- Hydrografische Analysen
- 3D-Stadtmodellierung und -visualisierung
- Landschaftsplanung
- Architektur
- Navigationssysteme
- Archäologie
- Raumplanung
- Luftfahrt
- Immobilienmarkt
- Tourismus (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 6 f.; AZRI et al. 2015: S. 72; ZLATANOVA et al. 2003: S. 71)

Die nicht vollständige Auflistung an unterschiedlichen Anwendungsfeldern soll den Vorteil eines angemessenen funktionsfähigen 3D-GIS aufzeigen. Im nächsten Abschnitt wird auf Anwendungsgebiete, in welchen 3D-GIS schon länger etabliert sind und der Stand der Forschung von 3D-GIS im Zusammenhang mit Windkraft bzw. dem Masterarbeitsthema, Wert gelegt.

2.1.3.1 3D-GIS Stadtmodelle

Für Raumplaner und politische Entscheidungsträger war die Kartierung der Landnutzung und Gebäudefläche jahrhundertlang die Bemessungsgrundlage für Steuern. Mit der Migration in den Zentren der Welt nahm auch die Notwendigkeit von genau kartierten Gebäudeflächen im städtischen Raum zu. Diese Kartierungen waren nur zweidimensional und hatten, wenn überhaupt, nur Angaben zur Anzahl der Stockwerke der Gebäude. Mit der Zunahme der Hochhäuser im angloamerikanischen Raum wurde es für die Raumplaner und für Steuerbeamte immer schwieriger, richtige Daten auf Basis der zweidimensionalen Datengrundlage zu erheben. Das International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (ITC) machte im Jahr 1975 einen ersten Fortschritt des dreidimensionalen „Urban Plannings“, als bei Veränderungen der Landnutzung zusätzlich noch Gebäudehöhen und -stockwerke analysiert und als dreidimensionale Kartierungen umgesetzt (analoge perspektivische Darstellung von Gebäuden mit mehreren Stockwerken) wurden. (vgl. LOIGGE 2013: S. 12 f.; MOORE 2002: S. 258)

Bei der Erstellung der ersten 3D-Stadtmodelle war das Hauptproblem die fehlende Datengrundlage für die z-Koordinate. KADA erläutert, dass es in den letzten 20 Jahren durch die rasante Entwicklung in den Sensor- und Auswertetechnologien, zu einer förmlichen Explosion in der dreidimensionalen Digitalisierung und Modellierung unserer Umwelt und in städtischen Lebensräumen gekommen ist. (vgl. KADA 2019: S. 124)

3D-Stadtmodelle dienen heutzutage als Datengrundlage für eine Vielzahl von Analyse-, Planungs- und (Echtzeit-)Visualisierungsanwendungen, wie Solar-, Schadstoff-, Lärm-, Überschwemmungs-, Energie- und Sichtbarkeitsanalysen, Mobilfunk- und Bauprojektplanung, standortbezogene Dienste, 3D-Karten und virtuelle Globen, sowie Auto- und Fußgängernavigationssysteme. (vgl. KADA 2019: S. 124 f.) Auch bei Planungsanwendungen in Städten können 3D-Stadtmodelle einen erheblichen Beitrag bei der Ausarbeitung einer Entscheidung bewirken, da verschiedene Interessensgemeinschaften aufeinandertreffen können, welchen anhand von Darstellungen ein Zugang in künftige Projekte und Planungen gegeben werden kann. (vgl. KOPPERS 2004: S. 123; LORBER & RANZINGER 1995: S. 118) LORBER & RANZINGER (1995) definieren ein 3D-Stadtmodell wie folgt:

„Ein 3D-Stadtmodell ist eine möglichst naturgetreue Nachbildung aller feststehenden Objekte (Gebäude, Grünräume, Verkehrs- und Wasserwege, etc.) einer Stadt im Computer. Über jedes Objekt sind dabei so viele Informationen gespeichert, dass es in allen drei räumlichen Dimensionen abgebildet ist und betrachtet werden kann.“ (LORBER & RANZINGER 1995: S. 111)



Abb. 3: 3D-Stadtmodell von Stuttgart (KADA 2019: S. 125)

Nach LOIGGE werden bei der Erstellung von 3D-Stadtmodellen je nach Anwendungsbereich verschiedene Ausgangsdaten verwendet, welche teilweise im Stadtmodell vereinfacht oder unbearbeitet dargestellt werden. (vgl. LOIGGE 2013: S. 14)

- „Gebäudegrundrisse (building footprints) – Primärdaten: Airborne Laserscanning (ALS) Daten, Photogrammetrische Aufnahmen, Vermessungen
- Gebäudehöhen (heights) – Primärdaten: ALS Daten, Luftbildphotogrammetrie, Terrestrisches Laserscanning (TLS), unter Umständen Daten zu Stockwerken etc.
- Vereinfachte und detaillierte Dachformen (rooftypes) – Primärdaten: ALS Daten, Luftbildphotogrammetrie (automatisch und semiautomatisch)
- Fassadentexturen (textures) – Stereo-Luftbildpaare, Schrägsichtluftbilder, georeferenzierte terrestrische Aufnahmen vor Ort
- Zusätzlich können Geländemodelle und Attributdaten, wie Benennungen, inhaltliche Informationen zu Gebäuden oder auch Solarpotenziale als Datengrundlage herangezogen werden.“ (LOIGGE 2013: S. 14)

Im Geoinformationsbereich werden 3D-Stadtmodelle je nach Kriterium einerseits durch den Detailierungsgrad (alter Unterteilungsaspekt) und andererseits durch den Level of Detail (neuer Unterteilungsaspekt) unterschieden. Welche Ausführung letztendlich gewählt wird, hängt vom Endbenutzer und in weiterer Folge von den Vorgaben, welche an das 3D-Stadtmodell gestellt werden, ab. (vgl. KADA 2019: S. 125; LOIGGE 2013: S. 15)

LORBER & RANZINGER (1995) erläutern in ihrem Artikel die ältere Unterscheidung. Sie führen in diesem Zusammenhang drei aufeinander aufbauende Modelltypen (Basis, Block und Detail) an, in welchen der Detailreichtum zunimmt. Die wichtigsten Merkmale dieser Modelle sind in Tab. 4 angeführt.

Basismodell	<ul style="list-style-type: none"> • Reale Objekte werden schlicht dargestellt • Gebäude als Klötze/ Blöcke • Keine Dachformen • Häuserfronten sind mit generisch erzeugten Texturen überlagert • Keine Unterscheidung zwischen Straßen- und Grünraum • Überschaubare Datenverwaltung infolge der starken Generalisierung
Blockmodell	Ausgehend von Basismodell: <ul style="list-style-type: none"> • Häuser mit realen Dächern • Unterscheidung der Straßen und des Grünraums (z.B. Gehsteig, Verkehrswege)
Detailmodell	Ausgehend vom Blockmodell: <ul style="list-style-type: none"> • Gebäude mit Fassaden • Fassaden mit fotorealistischen Texturen (Fotoaufnahmen) • Realitätsgetreue geometrische Modellierung • Ergänzung weiterer, typischer Einzelheiten (z.B. Lichtmasten, usw.) • Objekte werden realitätsnahe abgebildet

Tab. 4: Detailierungsgrad bei 3D-Stadtmodellen (vgl. LOIGGE 2013: S. 15; LORBER & RANZINGER 1995: S. 117)

Bei der Visualisierung und Präsentation der Daten muss die Verwendung und der damit verbundene Nutzen von Interesse sein. Aus diesen Blickpunkten heraus, muss die Wahl auf einen Modelltyp fallen. (vgl. KLAUS 1997: S. 4) Im Bereich der Stadtplanung kann davon ausgegangen werden, dass der höchste Detailierungsgrad erforderlich ist, da für diesen Anwendungsbereich präzise Informationen unvermeidlich sind. (vgl. LORBER & RANZINGER 1995: S. 118)

Die Klassifikation nach Detaillierungsgraden ist zwar immer noch in Verwendung, wird aber immer öfter durch die Unterscheidung der LOD (Level of Details) abgelöst. In Tab. 5 ist eine Übersicht über die unterschiedlichen LOD gegeben. (STÄDTETAG NORDRHEIN-WESTFALEN 2004: S. 75 f.)

LOD 0 - Regionalmodell	<ul style="list-style-type: none"> • Digitales Geländemodell (DGM) 2,5D mit Textur/Orthofoto und Flächennutzung • Erfassungsgeneralisierung: maximal • Klassifizierung nach Flächennutzung • Dachform/-struktur: keine • Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): >5m / >5m
LOD 1 – Stadt- / Standortmodell (Klötzchenmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • „Klötzchenmodell“ ohne Dachstruktur • Erfassungsgeneralisierung: Objektblöcke in generalisierter Form (> 6x6m Grundfläche) • Dachform/-struktur: ebene Flächen • Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): 5m / 5m
LOD 2 – Stadt- / Standortmodell (Detailmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • Texturierte Modelle mit differenzierter Dachstruktur und Vegetationsmerkmalen (z.B. Bäume) • Erfassungsgeneralisierung: Objektblöcke in generalisierter Form (> 4x4m Grundfläche) • Dachform/-struktur: Dachtyp und Ausrichtung • Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): 2m / 1m
LOD 3 – Stadt- / Standortmodell (Architekturmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • Geometrisch fein ausdifferenzierte Architekturmodelle mit Vegetation und Straßenmobiliar • Erfassungsgeneralisierung: Objektblöcke in realer Form (> 2x2m Grundfläche) • Dachform/-struktur: reale Form • Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): 0,5m / 0,5m
LOD 4 – Innenraummodell	<ul style="list-style-type: none"> • „Begehbare“ Architekturmodelle • Erfassungsgeneralisierung: reale Form, Abbildung konstruktiver Öffnungen • Dachform/-struktur: reale Form • Punktgenauigkeit (Lage/Höhe): 0,2m / 0,2m

Tab. 5: Übersicht - Level of Detail (LoD) (aus STÄDTETAG NORDRHEIN-WESTFALEN 2004: S. 75 f.)

Die Einsatzmöglichkeiten von 3D-Stadtmodellen sind vielfältig und finden vor allem im Bereich der Raumplanung Anwendung. Als Anwendungsbereiche können hierbei das Einfügen neuer Gebäude in das Stadtbild, die Visualisierung neu geplanter Baugebiete oder die Herstellung von 3D-Stadtplänen aufgezählt werden. Weiters können Sichtbarkeits-, Distanz- oder Schallausbreitungsanalysen mithilfe von 3D-Stadtmodellen durchgeführt werden. (vgl. KOPPERS 2004: S. 111 ff.; LOIGGE 2013: S. 17) In jüngster Zeit finden 3D-Stadtmodelle Einzug in komplexe Simulationsanwendungen. (vgl. ALI et al. 2015: S. 102 f.; KADA 2019: S. 152)

KLAUS (1997) führt an, dass sich aus diesen weit gestreuten Anwendungsbereichen eine weitere Reihe von Vorteilen ergibt. Da die meisten Anwender über Datengrundlagen verfügen, können die 3D-Stadtmodelle relativ günstig erzeugt werden. Durch die dreidimensionale Visualisierung von Geoobjekten können komplexe Strukturen und Zusammenhänge, aufgrund unterschiedlicher perspektivischer Ansichten leichter erkannt und analysiert werden. Es werden auch virtuelle Rundflüge, durch die Interaktivität der

Stadtmodelle, ermöglicht, wobei unterschiedliche Thematiken ein- und ausgeblendet werden können.

2.1.3.2 3D-GIS Modelle in der Geologie und Geomorphologie

Die Wissenschaftsdisziplinen Geologie und Geomorphologie, jedoch auch die Raumplanung, beschäftigen sich mit raumbezogenen dreidimensionalen Daten. Die 3D-Visualisierung von geologischen Daten kann für den Fachmann und Laien die Komplexität des Untergrundes veranschaulichen. (vgl. ELFERS et al. 2004: S. 1) Die Begriffe 3D-Geologie und 3D-Geokörper werden durch ELFERS et al. folgendermaßen definiert:

„3D Geologie ist die Modellierung und Dokumentation des geologischen Wissens über den Untergrund als Geokörper. Dabei werden geologische Kartiereinheiten als Homogenbereiche in Bezug auf Stratigraphie, Lithologie und Genese definiert und aufgenommen (Geologisches Basismodell).“ (ELFERS et al. 2004: S. 3)

„3D Geokörper sind dreidimensionale Abbilder des Untergrundes. Sie entstehen durch die geologische Modellierung, beschreiben begrenzte Körper mit gleichen Eigenschaften und sind durch Flächen (z.B. Top, Basis, Störungen) allseitig begrenzt. Die Gesamtheit der Geokörper bildet das geologische Basismodell.“ (ELFERS et al. 2004: S. 3)

Laut ELFERS et al. stellten für Nutzer im geologischen Bereich bisher großmaßstäbige geologische Karten, mit ihr verbundene Isolinienpläne, Profilschnitte und weitere Spezialkarten die Datengrundlage dar. Diese Darstellungen geben den Untergrund jedoch in zwei Dimensionen wieder, wobei prinzipiell nur ausgewählte Teilaspekte des Raums dargestellt werden. Das digitale geologische 3D-Modell erlaubt hingegen, den Untergrund als Ganzes darzustellen und zu beschreiben. (vgl. ELFERS et al. 2004: S. 3)

„Über Verknüpfungen der Geokörper zu Fachdaten wird es die zentrale und einheitliche Datenbasis für alle Fachdisziplinen der Geologie.“ (ELFERS et al. 2004: S. 4)

Je nach Anwendungsbereich werden bei der Generierung von 3D-Modellen der Geologie verschiedene Datengrundlagen verwendet, welche teilweise vereinfacht oder auch genau im Modell wiedergegeben werden: (vgl. ELFERS et al. 2004: S. 4)

- *„Lithologisch-strukturell definierte Homogenbereiche stehen in der Regel in einer stratigraphischen Abfolge*
- *zwischen den Geokörpern des Modells muss eine Topologie aufgebaut sein (benachbarte Körper müssen sich „kennen“)*
- *Geokörper müssen nach Bedarf veränderbar und untereinander kombinierbar sein*
- *Teilmodelle müssen zu einem Gesamtmodell verknüpfbar sein*
- *Veränderungen müssen nachvollziehbar sein*
- *die 3D-Modelle müssen auswertbar und räumlich visualisierbar sein*

- *modellbestimmende und abgeleitete Eigenschaften müssen recherchierbar und auswertbar sein“ (ELFERS et al. 2004: S. 4)*

Geologische 3D-Modelle haben unterschiedliche Einsatzgebiete, liefern für verschiedene Fragestellungen Lösungen und sind weiters eine wichtige Planungsgrundlage für Entscheidungsträger (z.B. in den Bereichen Trinkwasserversorgung, Rohstoffsicherung, Strömungsrichtungsanalyse). (LFU BAYERN 2020) Aus dem geologischen Basismodell können auch weitere Eigenschaften des Untergrundes abgeleitet werden: (aus ELFERS et al. 2004: S. 5)

- *„Verwitterungsverhalten*
- *Quell/Schrumpfvermögen*
- *Verdichtbarkeit*
- *Porosität*
- *Porenvolumen*
- *Durchlässigkeit“ (ELFERS et al. 2004: S. 5)*

Mithilfe dieser Eigenschaften können aus dem geologischen Basismodell zusätzliche, speziell angepasste Modelle erstellt werden, welche sich auf bestimmte Teilbereiche, wie Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Rohstoffgeologie usw. spezialisieren. In Abb. 4 ist ein Ausschnitt eines dreidimensionalen geologischen Modells dargestellt.

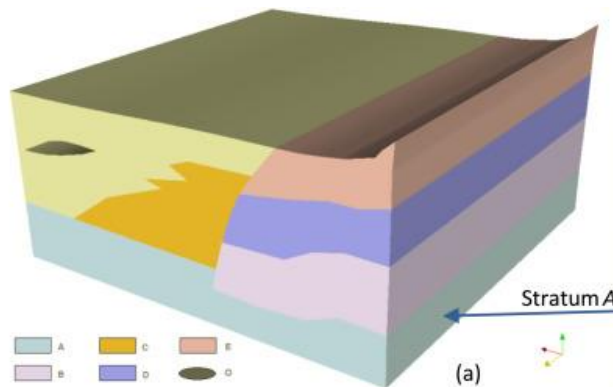


Abb. 4: Geologisches 3D-Modell (WANG et al. 2016: S. 11)

Mobile Geodienste sind als zusätzliche Unterstützung, welche vor allem Anwendung im Feld findet, zu nennen. Diese bieten einerseits Einsicht in die Beschaffenheit des Untergrundes, und geben zusätzlich die Option unter Zuhilfenahme von Verschneidungen, von wesentlichen Grundlagendaten, spezifische Informationen zu erstellen. Nach THOMSEN et al. zählen zu den Diensten, welche ortsspezifisch ausgeführt werden können beispielsweise, Anfragen bezüglich der Lage und Bestimmung von geologischen Objekten und Formationen, sowie der Datenverkehr von Datenobjekten und Operationsdiensten. (vgl. LOIGGE 2013: S. 19; THOMSEN et al. 2005: S. 371)

„Diese kann man unterteilen in einfache Operationsdienste, wie z. B. Berechnung von Eigenschaften der Geoobjekte (Volumen, Flächeninhalt) und komplexere Operationsdienste wie Schnitt mit einer Ebene, Projektion auf eine Ebene und affine Transformation von 3D-Geoobjekten.“ (THOMSEN et al. 2005: S. 371)

THOMSEN et al. führt an, dass ein anwendungsspezifischer Dienst, zum Beispiel aus einer definierten Schnittebene und einer Selektion von komplexen geologischen 3D-Objekten, ein zweidimensionales Profil erzeugen kann. (vgl. THOMSEN et al. 2005: S. 371)

2.1.3.3 3D-GIS Modelle in der Meteorologie und Geodynamik

Ein weiteres Einsatzgebiet von 3D-GIS Modellen zeigen Atmosphärenmodelle im Bereich der Meteorologie und Geodynamik auf. In diesen Disziplinen wirken die Prozesse in alle Richtungen des Raumes, wodurch die Anwendung von 3D-GIS Modellen leicht begründet ist. Der Anwendungsbereich von Atmosphärenmodellen liegt laut BERNARD, zum einen im mikro- und zum anderen im mesoskaligen Bereich der Regional- und Stadtentwicklung. In diesem Kontext nennt er anschließende Fragestellungen, welche anhand vom dreidimensionalen Atmosphärenmodell gelöst werden können: (vgl. BERNARD 2005: S. 336)

- „Wie sind die klimatischen Verhältnisse dichtbesiedelter Gebiete zu bewerten?
- Wo und wann ist Frostgefährdung zu erwarten?
- Wo ist das höchste Windenergiepotenzial für eine geplante Windkraftanlage?
- Wo und wann sind durch eine projektierte Industrie- oder Verkehrsanlage Schadstoffbelastungen oberhalb der gesetzlichen Grenzwerte zu erwarten?
- Welche klimatischen Auswirkungen hat eine geplante Baumaßnahme?“ (BERNARD 2005: S. 336)

Mit der Verbindung von 3D-GIS- und Atmosphärenmodellen können diese Ansätze beantwortet werden und bringen zusätzlich Vorteile für die urbane und regionale Umweltplanung. (vgl. BERNARD 2005: S. 350) Bei der Zusammenführung der beiden Systemkomponenten liegt dabei ein besonderes Augenmerk auf der flexiblen Integration der beiden Komponenten und in der unkomplizierten Erweiterbarkeit durch andere Parameter. (vgl. BERNARD 2005: S. 342) BECKER et al. betrachten die Verknüpfung der beiden Systeme als sinnvoll, da Geoinformationssysteme keine Option bieten, die Zeit entsprechend zu modellieren und das Atmosphärenmodell keine angemessene Funktionalität besitzt, raumbezogene Umweltdaten entsprechend zu verarbeiten. (vgl. BECKER et al. 1999: S. 1 f.) Es lassen sich drei unterschiedliche Konzepte zur Kopplung von Atmosphärenmodellen und GIS unterscheiden: (vgl. BERNARD 2005: S. 342)

a) Kopplung über Dateischnittstellen

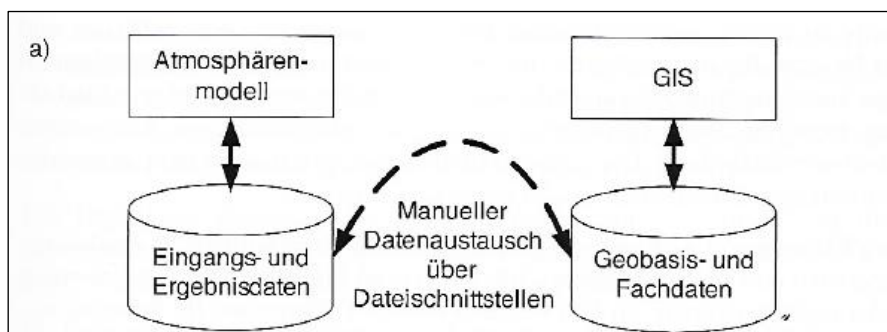


Abb. 5: AM & GIS - Kopplung über Dateischnittstellen (aus BERNARD 2005: S. 343)

b) Gemeinsame Daten- und Methodenzugriffsschicht – Erste Stufe der Interoperabilität

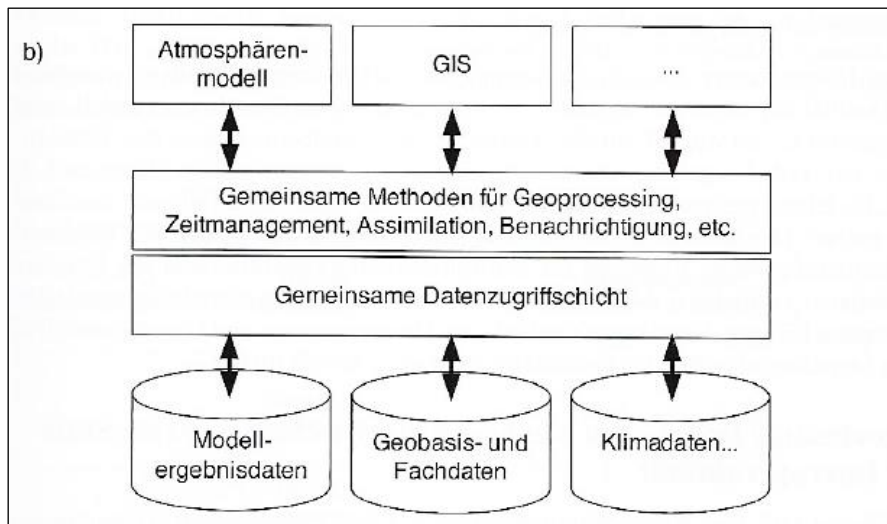


Abb. 6: AM & GIS - Erste Stufe der Interoperabilität (aus BERNARD 2005: S. 343)

c) Infrastruktur zur Kombination von Geoinformations- und Simulationsdiensten – Zweite Stufe der Interoperabilität

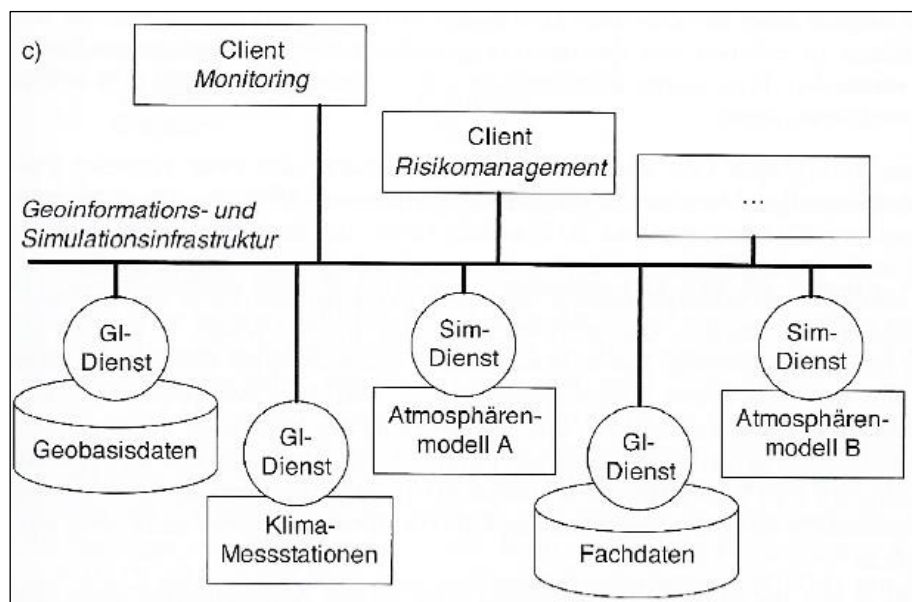


Abb. 7: AM & GIS - Zweite Stufe der Interoperabilität (aus BERNARD 2005: S. 343)

Das Konzept „c“ ist als das zukunftstauglichste zu erkennen, da durch die wechselwirkende Verknüpfung des Geoinformationssystems und des Atmosphärenmodells eine mehrfache Datenhaltung, geringere Einbußen bei der Effizienz und ein Semantikverlust verhindert wird. Aus Sichtweise der Geoinformation muss daher ein objektorientiertes, kompatibles GIS-Umfeld bestehend sein, welches je nach Bedarf um Komponenten erweitert und zu neuen Anwendungen kombiniert werden kann. (vgl. BECKER et al. 1999: S. 2)

Im Geoinformationsbereich werden laut BERNARD im Normalfall in diesen Maßstäben ebene kartesische Koordinatensysteme ausgewählt, jedoch gestaltet sich die Einbindung dieser in Verbindung eines Atmosphärenmodells äußerst schwierig, weshalb orographiefolgende Koordinatensysteme Verwendung finden. (vgl. BERNARD 2005: S. 338)

Die verwendeten Atmosphärenmodelle beschreiben die Prozesse der untersten Troposphäre. Die Grenzschicht schwankt hierbei tagsüber zwischen ein bis zwei Kilometer bei instabiler Schichtung, während es in der Nacht nur einige hundert Meter sind. Land-Seewind- und Berg-Talwindssysteme, aber auch von Städten hervorgerufene thermischen Ausgleichsströmungen, mit ihrer Umgebung, sind typische Beispiele für solche Zirkulationen, die durch diese Atmosphärenmodelle erläutert werden können. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Komponente sind daher tendenziell kurze Zeitspannen von einigen Stunden von Interesse. Die Atmosphärenmodelle basieren auf einem System aus hydro- und thermodynamischen Gleichungen, welche zur Erläuterung atmosphärischer Phänomene herangezogen werden. Diese Gleichungen sind für eine direkte Lösung im Atmosphärenmodell zu komplex, weshalb die Gleichungen durch verschiedene Parametrisierungen und Vereinfachungen in eine berechenbare Form für Simulationen gebracht werden. (vgl. BERNARD 2005: S. 336 ff.; LOIGGE 2013: S. 24) BERNARD führt aus, dass neben den in der Herleitung der atmosphärischen Grundgleichungen vorgenommenen Parametrisierungen, für Simulationsmodelle weitere Parametrisierungen erforderlich sind: (vgl. BERNARD 2005: S. 338)

- Topographische Reibungseinflüsse
- Strahlungsdivergenz
- Feuchte- und Wärme Flüsse im Boden
- Chemische Umsetzungsraten von Schadstoffen

2.1.3.4 3D-GIS Modelle in der Aviatik

„Die moderne Luftfahrt ist ohne digitale Geodaten nicht mehr denkbar. Dreidimensionale Informationen sind dabei ein zwingender Bestandteil, weil die Aviatik wie kaum ein anderer Vorgang im dreidimensionalen Raum stattfindet.“ (NEBIKER 2005: S. 320)

3D-Geodaten spielen bei der Analyse und Kontrolle der Hindernisfreiheit von Flugwegen, aber auch im Bereich der Navigation eine immer wichtigere Rolle. (vgl. BITTER & LEU 2010: S. 3)

Die Auslastung von Flughäfen nimmt stetig zu, bei gleichzeitig zunehmenden Sicherheits- und Lärmrestriktionen. Die Euro-Control (europäische Flugsicherheitsbehörde) hat einerseits die Verbesserung der Sicherheit im Flugverkehr zum Ziel und andererseits die Optimierung des Verkehrsflusses und damit die Minimierung von Verspätungen. 3D-GIS sollen in diesem Zusammenhang mithelfen, die vorgegebenen Einschränkungen und Gesetze zu befolgen und die angestrebten Vorgehensweisen optimal auszuführen. (vgl. NEBIKER 2005: S. 320) Zu den wichtigsten Geoinformationen in der Aviatik zählen zum einen kartographische Flugplatzinformationen (aerodrome mapping information) und zum anderen Gelände- und Luftfahrthindernisdaten (obstacle and terrain data). (vgl. NEBIKER 2005: S. 321) In folgender Tab. 6 sind die wesentlichen vier Geodatentypen angeführt:

2D-Geodaten	<ul style="list-style-type: none"> Beschreibung gelände-gebundener Objekte wie Rollwege, Pistenmarkierungen oder Parkfelder
Höhenmodelle	<ul style="list-style-type: none"> Sowohl als Geländemodelle als auch als Oberflächenmodelle Sehr oft als Raster (Gittermodell)
Geländetexturen	<ul style="list-style-type: none"> Orthofotos In Verbindung mit den Höhendaten → Hoher Informationsgehalt → wichtigste Information in der Luftfahrt
(Dynamische) 3D-Geoobjekte	<ul style="list-style-type: none"> Gebäude und andere Bauten (Windräder, Sendeanlagen, etc.) Hindernisse Pistenachsen oder -schwelen Anflugbefeuerung und Gleitpfad Indikatoren

Tab. 6: Geodatentypen in der Aviatik (aus NEBIKER 2005: S. 322 f.)

Je nach Endprodukt werden bei der Darstellung der Geodaten zum einen symbolisierte und zum anderen realitätsgetreue 3D-Visualisierungen eingesetzt. Die Vorgaben an realitätsgetreue Darstellungen sind sehr hoch. So ragen die Anforderungen im Normalfall sichtlich über jene im normalen GIS Bereich hinaus (z.B. bewegliche Objektteile – Rotorblätter). Speziell für die Schulung von Fluglotsen, ist ein Maximum an Realitätstreue ein wichtiger Faktor, welcher durch eine Reihe optischer Effekte erzeugt wird. (vgl. NEBIKER 2005: S. 325)

Wetter	<ul style="list-style-type: none"> Räumliche Wolkenmodelle, Nebel, Dunst, Niederschlag, Schnee Rauch, Staub
Tages- und Jahreszeiten	<ul style="list-style-type: none"> Sonnenstand und einhergehender Schattenwurf Visualisierung des Nachthimmels mit lagerichtiger Darstellung bedeutender Planeten und Sterne
Künstliche Beleuchtung	<ul style="list-style-type: none"> Anflugbefeuerung, Positionslichter, Pistenbeleuchtung, ...
Spezialeffekte	<ul style="list-style-type: none"> Simulierung des realen Arbeitsumfeldes (z.B. virtueller Feldstecher zur Beobachtung des Flugplatzes)

Tab. 7: Optische Effekte zur Maximierung der Realitätstreue (aus NEBIKER 2005: S. 325)

In folgender Tabelle werden unterschiedliche Anwendungsbereiche zusammengefasst:

3D-Luftfahrtinformationsdatenbank	<ul style="list-style-type: none"> Nicht alle Informationen haben einen Raumbezug Zentrale Drehscheibe für den Austausch kartographischer Daten und Produkte
Kartierung von Luftfahrthindernissen	<ul style="list-style-type: none"> Kartierung von Hindernissen mit beträchtlichen Gefahrenpotenzial (Seilbahnen, Hochspannungsleitungen, Sendeanlagen, ...) Datenerfassung durch Photogrammetrie und Airborne Laserscanning (Kapitel 3)
Luftfahrtinformationsprodukte und -dienste	<ul style="list-style-type: none"> Bereitstellung umfassender Information über Lufträume, Flughäfen in Luftfahrthandbüchern für Piloten – AIP (aeronautical information publication), NOTAM-Meldung (notice to airmen) Regelmäßige Aktualisierung der Datenbanken und des Datenbestands auf mobile Anwendungen
Training und Simulation	<ul style="list-style-type: none"> Austausch von Szenen über definierte Schnittstellen und Formate Einheitliche 3D-Datenbasis welche mehrfach genutzt werden kann

Tab. 8: Praktische Anwendungsbereiche von 3D-Geoinformationen in der Luftfahrt (aus NEBIKER 2005: S. 327 ff.)

Wie bereits anhand der aufgezeigten Einsatzbereiche und verwendeten Geodaten erkennbar ist, ist das Spektrum der Anwendungen von 3D-GIS in der Luftfahrt sehr groß.

2.1.3.5 Augmented Reality

HILBRING versteht unter Augmented Reality (AR – erweiterte Realität) die (meist visuellen) Überlagerungen von virtuellen Informationen mit der Realität in Echtzeit. (vgl. HILBRING 2005: S. 37) Laut EINSPIELER wird bei der Augmented Reality die Wirklichkeit mit der Virtualität verknüpft und soll somit den Nutzer unterstützen, in der Realität besser zu handeln und zu entscheiden. (vgl. EINSPIELER 2012: S. 12) PAELKE definiert Augmented Reality wie folgt:

„Augmented Reality (erweiterte Realität) Schnittstellen kombinieren eine reale physische Umgebung mit virtuellen Elementen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Wahrnehmung der realen Umgebung, die um virtuelle Elemente ergänzt wird.“ (PAELKE 2019: S. 52)

Somit erweitert AR die Realität, ersetzt diese aber nicht. (vgl. EINSPIELER 2012: S. 7) GUO et al. führen aus, dass dem Anwender im Feld ergänzende Informationen, welche ansonsten nicht verfügbar wären, übermittelt werden. Die reale Welt wird dabei mit Information aus dem virtualen Raum erweitert und überblendet. (vgl. GUO et al. 2008: S. 1)

MILGRAM et al. schreiben in ihrem Artikel, dass AR (Augmented Reality – reale Welt, wobei durch simulierte Hinweise das natürliche Feedback verstärkt wird) und VR (Virtual Reality – Beobachter taucht vollständig in eine synthetische Welt ein) miteinander verwandt sind. AR und VR befinden sich jedoch an den entgegengesetzten Enden eines Kontinuums. Dieses Kontinuum wird als Reality-Virtuality (RV)-Kontinuum bezeichnet, wie in Abb. 8 sichtbar wird. (vgl. MILGRAM et al. 1994: S. 283)

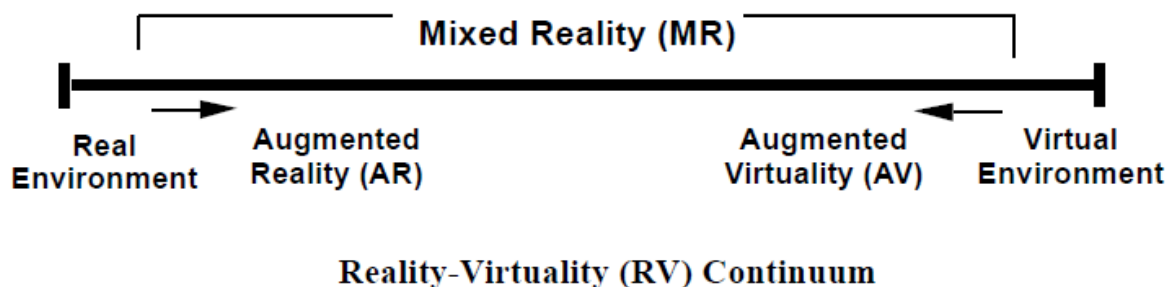


Abb. 8: Reality-Virtuality Kontinuum (MILGRAM et al. 1994: S. 283)

Ausgehend von Abb. 8 wird auf der linken Seite des Kontinuums jene Umgebung definiert, welche ausschließlich aus realen Objekten besteht. Hier kann der Betrachter eine reale Szene direkt beobachten. Auf der rechten Seite des Kontinuums wird jene Umgebung aufgezeigt, welche nur aus virtuellen Objekten besteht, wie zum Beispiel bei einer Computergrafiksimulation. In diesem Umfeld ist es leicht, eine generische Mixed Reality (MR)-Umgebung als eine Umgebung zu bestimmen, in der Objekte der Realität und der Virtualität gemeinsam in einer einzigen Anzeige visualisiert werden. (vgl. MILGRAM et al. 1994: S. 283)

GUO et al. schreiben in ihren Beitrag, dass Augmented Reality Anwendungen seit einiger Zeit große Bedeutung beim Ausbau von dynamischen Softwareprodukten zur

Verwirklichung der virtuellen Informationsübermittlung zukommt. (vgl. GUO et al. 2008: S. 1)

„Augmented reality (AR) is an important branch of virtual reality, and it's a hot spot of study in recent years. AR is that organically, in real-time and dynamically overlaying virtual images created by computers and other information on real environment which the observer sees. And when the observer moves in real environment, virtual information changes according to the movement, just like those virtual information truly exists in real world.“
(GUO et al. 2008: S. 1)

Nach PAELKE hat Augmented Reality durch mobile Endgeräten, wie Smartphones und Tablets und aufgrund deren Ausstattung mit hochauflösenden Kameras und Displays, der GPS-Verfügbarkeit und sonstigen Sensoren, eine gravierende Entwicklung hinter sich. Damit hat sich diese Art von Hardware zur meistverwendeten Plattform entwickelt. (vgl. PAELKE 2019: S. 53)

AR besitzt nach EINSPIELER und PAELKE drei Charakteristiken:

- Kombiniert die reale mit der virtuellen Welt
- Interaktivität in Echtzeit
- Gegenstände sind dreidimensional an einem realen Ort registriert

Daten für virtuelle Objekte im Augmented Reality Bereich werden durch 3D-GIS zur Verfügung gestellt, welche wiederum dem Benutzer ergänzende Informationen bieten. Es können unzählige in einem Geoinformationssystem modellier- und analysierbare Gegenstandsbereiche, wie beispielsweise Hangneigung, Exposition, Grundstücksgrenzen, etc., aber auch Stadtmodelle und Infos dazu, verwendet werden. (vgl. LOIGGE 2013: S. 20) Als ein sehr einfaches Beispiel für AR ist die Einblendung der Abseitslinie oder die Entfernung des Balles zur Torlinie bei einem Freistoß bei Fußballspielen bei Fernsehübertragungen zu sehen. (vgl. EINSPIELER 2012: S. 7)

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der Universität in Karlsruhe, wurde die Verwendung von Augmented Reality für Anwendungen im Bereich der Geowissenschaften untersucht. Ziel war die Darstellung von dreidimensionalen Objekten, wodurch für den Nutzer verschiedene geologische Formen erkennbar und anschließend analysierbar waren. Dadurch konnten tektonische Flächen und Linien visualisiert werden, von welchen dann Gesteinsvolumina mit Hilfe von passenden Sensoren berechnet werden konnten. (vgl. HILBRING 2005: S. 37)

GUO et al. führen als AR Anwendungsbereiche Anatomie-Übungen in der Medizin, die Produktion von Genauigkeitsinstrumenten bei Montage-, Wartungs- und Bohrarbeiten und im Konstruktionsdesign an, um nur einige zu nennen. Vor allem bei architektonischen Fragestellungen, wie Bau, Inspektion und Renovierung stellen AR Anwendungen eine große Hilfestellung bei der Erkenntnisgewinnung dar. (vgl. GUO et al. 2008: S. 2)

Bei AR können einerseits visuelle und andererseits auditive Informationen übertragen werden. Die Informationen können weiters durch Sprache und Klang übermittelt werden. (vgl. GUO et al. 2008: S. 1)



Abb. 9: AR findet auch bei touristischen Attraktionen Anwendung (GUO et al. 2008: S. 2)

Im Katastrophenmanagement liegt ein weiteres Anwendungsgebiet von AR. LEEBMANN et al. stellen in ihrem Artikel ein Augmented Reality System (ARS) vor, welches Planungsinformationen und in weiterer Folge katastrophenrelevante Informationen zur Verfügung stellt, welche anderenfalls unbemerkt blieben. Die virtuellen Informationen werden bei der Anwendung lage- und maßstabsgetreu in die Wirklichkeit eingebunden. Das ARS kann bei der Katastrophenbewältigung in unterschiedlichen zeitlichen Abständen angewendet werden. Nach einer Katastrophe spielen Wiederherstellung und Rekonstruktion eine beträchtliche Rolle. Mit Hilfe von ARS können durch Simulationen, im Anschluss an eine Katastrophe, schwierige Sachverhalte leicht verständlich dargestellt werden, um als vorbeugende Maßnahme, die Auswirkungen eines ähnlichen Ereignisses abzuwenden. Je nach Natur der Katastrophe ergeben sich verschiedene Anwendungsfälle, wie zum Beispiel die Visualisierung von Hochwasser oder Erdbeben. (vgl. LEEBMANN et al. 2005: S. 305 f.)

2.1.3.6 3D-GIS Modelle in der Raumplanung

Aus der Raumplanung sind 3D-GIS Modelle schon seit einiger Zeit nicht mehr wegzudenken. Die 3D-GIS Modelle werden für Analysen betreffend der Standortplanung unterschiedlichster Arten, wie Windkraft, Photovoltaikanlagen, Weinanbau und vieles mehr herangezogen.

In den letzten Jahren ist aufgrund des Booms von erneuerbaren Energien immer wieder der Ausbau der Windenergie in den Medien kursiert. Während die Windkraftgegner als Hauptargument die Zerstörung der Landschaft durch Windkraftanlagen anführen, betonen die Befürworter die positiven Eigenschaften dieser Energieform. Für die Standortwahl der Windkraftanlagen müssen natürlich die Anforderungen der jeweiligen Bundesländer in Österreich erfüllt werden. In Niederösterreich müssen die Fundamente der Windkraftanlagen auf Flächen errichtet werden, die als Grünland-Windkraftanlagen im Flächenwidmungsplan ausgewiesen sind. (vgl. LAND NIEDERÖSTERREICH 2020)

Diese Widmungsflächen „Grünland – Windkraft“ dürfen nur in Zonen gewidmet werden, welche durch die Landesregierung festgelegt wurden.

„Dabei ist insbesondere auf die im Abs. 3a festgelegten Abstandsregelungen, die Interessen des Naturschutzes, der ökologischen Wertigkeit des Gebietes, des Orts- und Landschaftsbildes, des Tourismus, des Schutzes des Alpenraumes, auf die vorhandenen und geplanten Transportkapazitäten der elektrischen Energie (Netzinfrastuktur) und auf Erweiterungsmöglichkeiten bestehender Windkraftanlagen (Windparks) Bedacht zu nehmen. Nach Möglichkeit ist eine regionale Ausgewogenheit anzustreben.“ (LAND NIEDERÖSTERREICH 2020)

Wenn diese Kriterien erfüllt sind, können mithilfe von 3D-GIS einige Analysen (Sichtbarkeitsanalysen) durchgeführt werden, um eine bestmögliche Lösung oder einen Kompromiss zu finden. Näheres dazu befindet sich im folgenden Kapitel, Stand der Forschung.

2.1.3.7 Stand der Forschung

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich von 3D-Geländeanalysen/-visualisierungen im Zusammenhang mit der Windkraft-Thematik aufgezeigt.

TIEDE & BLASCHKE (2005) führen als Anwendungspotenziale von 3D-GIS, die 3D-Visualisierung von geplanten Objekten in der realen Landschaft und die 3D-Darstellung des Ist-Zustandes (Gelände/Gebäudemodell) als Basis für Planer aus, welche durch Einarbeitungen den geplanten Zustand darstellen. (vgl. TIEDE & BLASCHKE 2005: S. 291)

In der Literatur finden sich bisher zu 3D-Analysen am Beispiel von Windparks in der jüngeren Vergangenheit Sichtbarkeitsanalysen, wobei es darum geht die Sichtbeziehungen von verschiedenen Standorten zu den Windkraftanlagen (WKA) aufzuzeigen und darzustellen. In den Sichtbarkeitsanalysen soll gezeigt werden, von welchen Gebieten WKA sichtbar sind und von welchen sie nicht eingesehen werden können. Größtenteils wurden jedoch Standort- bzw. Potenzialanalysen für Windenergie durchgeführt. Bei diesen liegt das Augenmerk vor allem auf der Erstellung eines idealen Windparklayouts bzw. um die Auswertung der windreichsten Standorte unter Berücksichtigung bestimmter Ausschlusskriterien (zu große Hangneigung, schützenswerte Gebiete, etc.). (vgl. CRISTEA & JOCEA 2016; HÖLTINGER et al. 2016; MORADI et al. 2020; RAFIEE et al. 2018; SKLENICKA & ZOUHAR 2018)

Es zeigt sich jedoch, dass Planungen immer noch vorrangig in 2D durchgeführt werden, wenngleich wichtige Informationen durch die Einebnung der 3D-Realität verloren gehen. Bei 2D-Planungen für die Kranstellflächen der Anlagenstandorte kann es nur bei flachem Gelände zu keinen großen Abweichungen im Flächen- und Volumenverbrauch (keine Böschungsflächen) bei der Erbauung kommen. Die 3D-Visualisierung hat bei Windrädern, die einen starken Eingriff in die Landschaft darstellen, nicht nur einen Vorteil in der besseren visuellen Darstellung des Einflusses der Windkraftanlage, sondern würde auch Vorteile bei der Schall- und Schattenberechnung bringen. (vgl. STOTER et al. 2016: S. 100)

Gerade 3D-Analysen könnten schon vor der eigentlichen Erbauung bzw. Umsetzung anschauliche Modellierungen bereitstellen, die den Verantwortlichen eine zukünftige

Situation aufzeigen. Durch die 3D-Darstellung von Standorten, kann bereits die visuelle Auswirkung der Windkraftanlage auf die Umgebung vor der Erbauung abgeklärt und der Öffentlichkeit präsentiert werden, wodurch in weiterer Folge auch die Akzeptanz dafür gesteigert werden kann.

So schreibt auch YIN, dass 3D-Visualisierungen vor allem für Anwendungen zur Beteiligung der Öffentlichkeit an der Planung verwendet werden können, da Informationen besser in 3D als auf 2D-Karten übermittelt werden können. Es kann beispielsweise in einem 3D-Modell durch das Untersuchungsgebiet navigiert werden, um verschiedene Details anzusehen, während 2D nur eine begrenzte Perspektive bietet. (vgl. YIN 2010: S. 421) STOTER et al. und YIN führen weiter aus, dass 3D-GIS mehr Informationen bereitstellen und diese auf eine intuitivere Weise präsentieren kann, als 2D-GIS. (vgl. STOTER et al. 2015: S. 208; YIN 2010: S. 422) YIN zeigt jedoch ebenso auf, dass nur sechs Kurse an Universitäten in den Vereinigten Staaten 3D-Visualisierung zum Thema haben. Bei der 3D-GIS Modellierung ist das Kursangebot mit drei Kursen noch geringer. (vgl. YIN 2010: S. 424) Dies verdeutlicht, dass auch das Bildungsangebot bezüglich 3D-GIS Modellierung noch stark beschränkt ist und Verbesserungspotenzial bietet.

ABDUL-RAHMAN & PILOUK stellen in ihrem Buch den 3D-Analyst von ESRI vor, ein Tool zur 3D-Geländeerstellung, mit welchem auch Volumenberechnungen durchgeführt werden können. Der 3D-Analyst kann weiters für 3D-Datenmanipulation und Visualisierungsaufgaben verwendet werden. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 18 f.)

GUO et al. (2020) berichten in ihrem Artikel, dass CAD dazu verwendet wird, um bei Bahntrassen, die Böschungsflächen und deren Ausmaße im Gelände zu planen. (vgl. GUO et al. 2020: S. 2) Weiters wird im CAD-Bereich beim Straßenbau auf Civil 3D zurückgegriffen, um Straßenböschungen zu erstellen und Erdvolumen zu berechnen. Hierbei wird aus einem digitalen Geländemodell ein TIN erstellt, folgend wird das TIN bearbeitet. Anschließend werden das originale TIN und das bearbeitete TIN miteinander verglichen, wodurch das Volumen erfasst werden kann. (vgl. CHENG & JIANG 2013: S. 1278 f.) ABDUL-RAHMAN & PILOUK erläutern, dass TINs am besten geeignet sind, um räumliche 3D-Objekte zu repräsentieren. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 42) Weiters wurde beim Bau von Großprojekten das Erdbewegungsvolumen mittels CAD und der Erstellung eines TINs ermittelt. Aus dem 3D-Modell und einer Ebene mit einer konstanten Höhe, können anschließend die positiven und negativen Volumina berechnet werden. (vgl. CALINA et al. 2015: S. 414 f.) CALINA et al. und CHENG & JIANG beschreiben, dass die Abtragungs- und Aufschüttungsvolumina keine großen Differenzen aufweisen sollten, da durch Aushubmaterial, welches nicht verwendet werden kann, enorme zusätzliche Kosten verursacht werden. (vgl. CALINA et al. 2015: S. 419; CHENG & JIANG 2013: S. 1278)

PETSCHEK (2012) erläutert, dass GIS und CAD-Systeme in der Landschaftsarchitektur zum Einsatz kommen, wobei mithilfe des digitalen Geländemodells, verschiedene Anwendungsfelder, wie Modellierungen von Ressourcenaushub, Volumenberechnungen,

Generation von Profilen, Modellierungen von Projektgebieten und 3D-Visualisierungen, realisiert werden können. (vgl. PETSCHKE 2012: S. 187)

Wie bereits erwähnt, sind die Anwendungsbereiche von 3D-GIS breitgefächert. In meiner Arbeit wird unter anderem die Anwendung von CHENG & JIANG herangezogen, um die 3D-Geländeanalysen mit Civil 3D durchzuführen.

2.2 Softwarekategorien

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die beiden Softwarekategorien GIS und CAD und deren Modellierungsunterschiede. Die Grundlagen, Funktionen und die Anwendungen werden zusammengefasst dargestellt.

2.2.1 Geoinformationssystem (GIS)

Geo-Informationssysteme (GIS) sind Softwaresysteme, mit welchen raumbezogene Daten schnell und effizient erfasst, verknüpft, verwaltet, analysiert sowie präsentiert und verteilt werden können. (vgl. HAKE et al. 2002: S. 31 f.) Nach HAKE et al. und BILL kann GIS wie folgt erklärt werden:

„Informationssystem für die Erfassung, Verwaltung sowie anwendungsbezogene Verarbeitung und Präsentation von Geodaten.“ (HAKE et al. 2002: S. 552)

„Ein Geo-Informationssystem (GIS) ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software und Daten besteht und mit dem sich raumbezogene Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten modellieren und bearbeiten lassen. Die dafür benötigten raumbezogenen Daten/Informationen können digital erfasst und redigiert, verwaltet und reorganisiert, analysiert sowie alphanumerisch und grafisch präsentiert werden. GIS bezeichnet sowohl eine Technologie, Produkte als auch Vorhaben zur Bereitstellung und Behandlung von Geoinformation.“ (BILL 2016: S. 8)

GIS werden weltweit zunehmend in allen Aufgabengebieten mit Geo-Bezug eingesetzt, folgend eine unvollständige Auflistung aus HAKE et al. und LANGE:

- Raumplanung, Stadtplanung und Regionalplanung
- Umweltschutz, Verkehrsplanung, Logistik, Infrastrukturmanagement, Versorgung und Entsorgung
- Navigation, Routenplanung, Location Based Services
- Geomarketing
- Forschung
- 3D Geovisualisierung, Augmented Reality (AR)
- Web-GIS, mobile GIS (vgl. HAKE et al. 2002: S. 32; LANGE 2020: S. 7)

Das verbindende Element aller zuvor genannten Anwendungen von GIS in den unterschiedlichen Disziplinen ist der Raumbezug. Wenn die drei Hauptkomponenten eines GIS, Hardware, Software und Daten verfügbar sind, können verschiedene Fragestellungen beantwortet werden. (vgl. BILL 2016: S. 11) Dass sich Geoinformationssysteme als unabdingbare Komponente in einem weitgefächerten Spektrum an Anwendungsgebieten und Fachbereichen etablieren konnte, ist dadurch erklärbar, dass zirka 80% der vorhandenen Daten einen Raumbezug besitzen. Es kann behauptet werden, dass ein GIS heute absolut unentbehrlich für ein effektives, problemorientiertes Arbeiten mit raumbezogenen Daten ist. (vgl. RIEDL et al. 2016: S. 5)

ABDUL-RAHMAN & PILOUK sehen die Anwendungsmöglichkeiten eines GIS in folgenden Bereichen:

„Geographical Information Systems (GISs) represent a powerful tool for capturing, storing, manipulating and analysing geographic data. This tool is being used by various geo-related professionals, such as surveyors, cartographers, photogrammetrists, civil engineers, physical planners (urban and rural), rural and urban developers, geologists, etc. They use the tool for analysing, interpreting and representing the real world and understanding the behaviour of the spatial phenomena under their respective jurisdictions.“ (ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 1 f.)

Zusammengefasst handelt es sich bei einem Geoinformationssystem, um ein computergestütztes System, welches aus den Komponenten Hardware, Software und Daten besteht. In diesem Zusammenhang werden raumbezogene Informationen aufgenommen, verwaltet, analysiert und dargestellt, um diverse Fragestellungen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen bearbeiten, simulieren und modellieren zu können. GIS haben eine objektorientierte Ausrichtung und enthalten neben geometrischen Primitiven auch grafische, thematische und administrative Erläuterungen zu diesen räumlichen Daten. Da diese Daten digital verwaltet bzw. bearbeitet werden, kommt es zu einer unbegrenzten Vielfalt an Modellen der Realität. Durch die Fülle an zuvor erwähnten unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten wird verdeutlicht, dass GIS mit einer großen Menge an unterschiedlichen inhaltlichen Informationen umgehen kann. Dieser Gesichtspunkt verweist auf eine grundlegende Differenz zum CAD-System. ArcGIS von der Firma Esri ist das weitverbreitetste Softwareprogramm im GIS-Bereich. (vgl. BILL 2016: S. 8)

2.2.2 Computer-Aided Design (CAD)

CAD (Computer-Aided Design) bedeutet frei übersetzt „rechnergestützter Entwurf“. Ein CAD-System ist ein rechnergestütztes System zum interaktiven, geometrischen Modellieren von verschiedenen Phänomenen in zwei oder/und drei Dimensionen. Die wesentlichen Komponenten von CAD-Systemen sind die Konstruktion und die Visualisierung. Der Begriff CAD deckt alle Bereiche von der einfachen 2D-Zeichnungserstellung bis hin zum 3D-Objektentwurf ab. Die Datenmodellierung erfolgt durch das Bereitstellen einer Vielzahl an geometrischen (vektororientierten) Grundprimitive, wie beispielsweise Linien oder Polygone mit ausschließlich grafischen Eigenschaften. CAD-Systeme finden Einsatz in

Elektronik und Elektrotechnik, im Maschinen- und Anlagenbau, in Planung und Bauausführung, aber auch im Bereich der raumbezogenen Datenverwaltung. (vgl. BILL 2016: S. 41; KREBS 2017: S. 8) Derzeit sind AutoCAD und MicroStation die beiden am häufigsten verwendeten CAD-Plattformen in Unternehmen aus den Bereichen Bauingenieurwesen, Architektur, Vermessung und Konstruktion. (vgl. ESRI 2020g)

CAD-Systeme verwalten in der Regel keine topologischen Beziehungen und damit auch keine Geoobjekte. Sie besitzen keine oder nur (sehr) eingeschränkte Analysefunktionen. Dies unterscheidet sie grundlegend von GIS. (vgl. LANGE 2020: S. 381) Die Stärken von CAD-Systemen liegen in der zwei- und/oder dreidimensionalen Konstruktion und Visualisierung. (vgl. BILL 2016: S. 41)

BILL stellt die Unterschiede zwischen CAD und GIS folgendermaßen dar: CAD beschreibt eher das, was sein soll. GIS hingegen beschreibt das, was in der realen Welt ist. CAD macht im Wesentlichen eine Synthese, GIS macht hingegen eher eine Analyse der realen Welt und bildet diese in einem digitalen Modell ab. (vgl. BILL 2016: S. 41) Auch CURTIS schreibt in seinem Beitrag, dass sich die GIS-Welt auf die Analyse gemessener Informationen, wie Daten, welche beispielsweise durch Vermessung, Satellitenbilder usw. gewonnen wurden, konzentriert, während die CAD-Welt die Entwurfs- und Konstruktionsprozesse betont. (vgl. CURTIS 2008: S. 332)

2.2.3 Modellierungsunterschiede

Unsere Welt beinhaltet unterschiedlichste, komplexe Objekte. Damit diese mit zuvor erläuterten computergestützten Systemen verwertet werden können, müssen diese vereinfacht in einem Modell wiedergegeben werden. (vgl. BILL 2016) In Abb. 10 ist die Unterscheidung von GIS und CAD-Systemen hinsichtlich der Datenmodellierung zu erkennen.

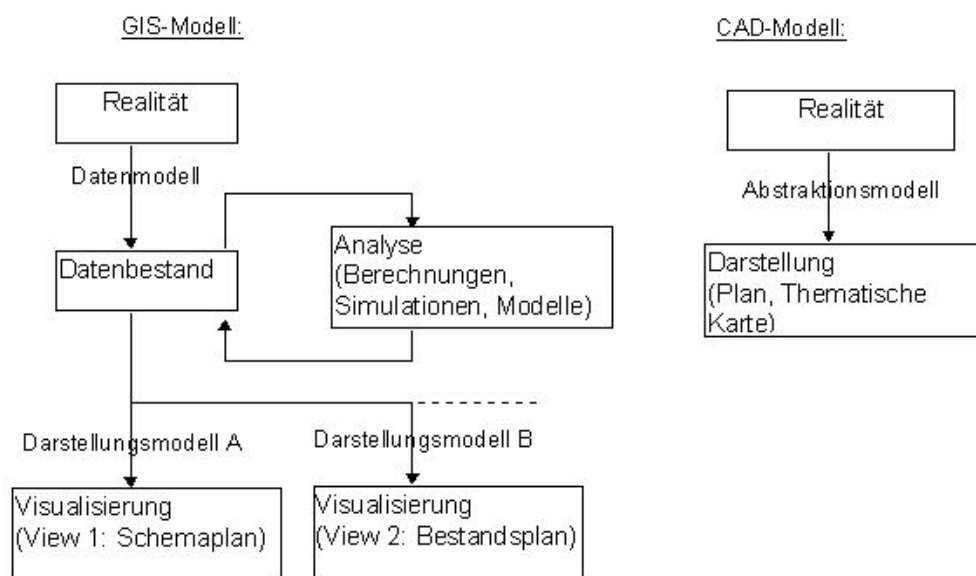


Abb. 10: GIS- und CAD-Modell (KUHLMANN et al. 2003)

Die Wirklichkeit wird bei CAD-Systemen durch ein Abstraktionsmodell beschrieben und direkt in Karten oder Plänen dargestellt, wobei die Visualisierung, das wesentliche Merkmal ist. Die Daten spielen bei Geoinformationssystemen eine zentrale Rolle, wodurch die Realität mittels eines Datenmodells beschrieben, der Datenbestand gespeichert und verwaltet wird. Auf diese Daten können unterschiedliche Analysemethoden angewendet und daraus unterschiedlichste Visualisierungen erstellt werden. GIS verlangen zur Datenhaltung objektorientierte Methoden, während CAD-Systeme keine echten Objekte, sondern Grundprimitive, wie Linien oder Kreise verwenden. (vgl. GRINDGIS 2018; KELLER 2003)

3 3D Datenerfassung

Je nach Anwendungsfall werden unterschiedliche Qualitätsanforderungen an 3D-Geodaten und deren Detaillierungsgrad gestellt. Oft werden in der Praxis nur relativ einfache Blockmodelle benötigt, jedoch gibt es auch Bereiche, welche einen höheren Detaillierungsgrad bis hin zu Fassaden erfordern. Diese Genauigkeitsunterschiede können mit Hilfe verschiedene Erfassungsarten realisiert werden, welche in folgendem Kapitel überblicksmäßig dargelegt und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt werden. Nach GÜLCH (2005) gibt es eine Vielzahl von Erfassungsmethoden und -verfahren für 3D-Geodaten, welche in nachfolgender Tab. 9 aufgelistet werden. In weiterer Folge werden die Erfassungsmethoden, speziell die Methoden der Fernerkundung und die wichtigsten Erfassungsverfahren näher erläutert.

Erfassungsverfahren/-art	Erläuterung
Automatisierte Extraktion von Objekten mittels Photogrammetrie aus digitalen Messbildern oder hochauflösenden Satellitenbildern	<ul style="list-style-type: none"> - Automatische Methoden der digitalen Photogrammetrie (Effizienzsteigerung) - Ein paar wenige kommerzielle Verfahren
Anwendung von terrestrischer Photogrammetrie oder terrestrischer Laserscanverfahren	<ul style="list-style-type: none"> - Nutzung vor allem für einzelne Gebäude im Stadtgebiet - Gute Aufnahmen von Fassaden, Innenhöfen und Innenräumen - Flächendeckend, sehr teuer und schwer anwendbar - Exakte Erfassung
Erzeugung digitaler Oberflächenmodelle mittels Laserscanner in Flugzeugen, Helikoptern und Drohnen	<ul style="list-style-type: none"> - Digitale Geländemodellerfassung vor allem in Waldbereichen - In Stadtgebieten kann ein digitales Oberflächenmodell abgeleitet werden, das Gebäude mitmodelliert - Zur automatischen Vektorisierung der Gebäude werden Grundrissdaten herangezogen
Geodätische Erfassung mit Hilfe von Tachymetern und/oder GPS	<ul style="list-style-type: none"> - Hochpräzise - Hoher Arbeitsaufwand - Für flächendeckende 3D-Objekterfassung nicht effizient - Dachlandschaften können nur schwierig oder gar nicht erfasst werden - Keine Abbildungen
Extraktion von Objekten mittels klassischer Stereophotogrammetrie in analogen oder digitalen Messbildern, aus Flugzeugaufnahmen oder hochauflösenden Satellitenbildern	<ul style="list-style-type: none"> - Auswertung an analogen, analytischen oder digitalen Stereoauswertegeräten - Satellitenbilddaten (z.B. Quickbird2 – Bodenpixelgröße von 60 cm) höhere Flächenabdeckung als bei Luftbildern (höhere Genauigkeit)
Mobile Datenerfassungssysteme auf Fahrzeugen	<ul style="list-style-type: none"> - Mit GPS, digitalen Kameras oder terrestrischen Laserscannern ausgerüstet - Dokumentation von Straßenmobiliar oder Fassaden - Zur Erfassung von Dachlandschaften nicht geeignet

Tab. 9: Erfassungsarten von 3D-Geodaten (aus GÜLCH 2005: S. 5 f.), eigene Bearbeitung

Die Erfassungsmethoden für 3D-Geodaten haben sich in den letzten Jahrzehnten rasch entwickelt – von der traditionellen Vermessung des Geländes, über die passiven Methoden der Fernerkundung, hin zu aktiven Verfahren, wie Light Detection And Ranging (LiDAR) und Radio Detection and Ranging (Radar). (vgl. WILSON 2012: S. 108)

Bis Ende der 1980er Jahre wurden digitale Höhenmodelle (DHM) überwiegend auf Grundlage terrestrischer Vermessungen, sowie photogrammetrischer bzw. interaktiver Auswertungen von Luftbildern erzeugt. Ab den 90er Jahren setzten sich dann aktive Abtastverfahren, insbesondere flugzeug- und satellitengestützte LiDAR- bzw. Radarsysteme durch. (vgl. STOLZ 2013: S. 139)

Erfassungsmethoden lassen sich nach NELSON et al. in drei Gruppen unterteilen: (vgl. NELSON et al. 2008: S. 65)

- Feldmessung (Tachymetrie, Global Navigation Satellite System - GNSS)
- Digitalisierung topographischer Karten (Ableitung von Höhenlinien, Bächen, etc.)
- Methoden der Fernerkundung (flugzeug- und satellitengestützte Photogrammetrie, flugzeuggestützte Lasersysteme und flugzeug- und satellitengestützte Radarsysteme)

Zusammenfassung der Hauptmerkmale dieser Erfassungsmethoden: (NELSON et al. 2008: S. 83 f.)

Erfassungsmethode	Auflösung [m]	Genauigkeit	Ausdehnung [km ²]	Nachbearbeitungsbedarf	Höhe/Oberfläche
Tachymetrie	Variabel, im Normalfall < 5m	vertikal und horizontal sehr hoch	Variabel, im Normalfall klein	niedrig	Höhe
GNSS (GPS)	Variabel, im Normalfall < 5m	vertikal und horizontal - mäßig	Variabel, im Normalfall klein	niedrig	Höhe
Tischdigitalisierung	Abhängig von Kartenmaßstab und Konturintervall	vertikal mäßig und horizontal niedrig	Abhängig von Karten- ausdehnung	mittel	Höhe
Bildschirmdigitalisierung	Abhängig von Kartenmaßstab und Konturintervall	vertikal mäßig und horizontal niedrig	Abhängig von Karten- ausdehnung	mittel	Höhe
Gescannte topographische Karte	Abhängig von Kartenmaßstab und Konturintervall	vertikal mäßig und horizontal niedrig	Abhängig von Karten- ausdehnung	beträchtlich, erheblich, beachtlich, groß, hoch	Höhe
Orthofotografie	< 1m	vertikal und horizontal sehr hoch	-	beträchtlich	Oberfläche
LiDAR	1-3m	0,15-1m vertikal, 1m horizontal	30-50/Stunde	beträchtlich	Oberfläche
InSAR/ IfSAR	2,5-5m	1-2m vertikal, 2,5-10m horizontal	Abhängig von Erhebungsmethode	hoch	Oberfläche

SRTM C Band	90 (30)m	16m vertikal, 20m horizontal	Fast global, 60N bis 58S	möglicherweise hoch	Oberfläche
SRTM X Band	30m	16m vertikal, 6m horizontal	Ähnlich wie bei C- Band, jedoch ist nur jeder zweite Pfad verfügbar	möglicherweise hoch	Oberfläche
ASTER	30m	7-50m vertikal, 7- 50m horizontal	3600	mäßig	Oberfläche
SPOT	30m	10m vertikal, 15m horizontal	72.000 pro Schwad	mäßig	Oberfläche

Tab. 10: Hauptmerkmale der Erfassungsmethoden (aus NELSON et al. 2008: S. 83 f.), eigene Bearbeitung

Im Gegensatz zu den anderen Methoden können mittels der Fernerkundung große Flächen schnell erfasst werden. Die Fernerkundung kann flugzeug- oder satellitengestützt durchgeführt und die resultierenden Bilder können aus drei Arten von Quellen abgeleitet werden: Luftbildaufnahme, LiDAR und RADAR. (vgl. NELSON et al. 2008: S. 71)

Die Methoden der Fernerkundung zur Geländehöhenermittlung (3D-Geodaten Ermittlung) lassen sich in passive Verfahren (photogrammetrische Auswertung von Luft- und Satellitenbildern) und aktive Verfahren (laser- oder radargestützte Abtastung der Erdoberfläche) kategorisieren.

3.1 Photogrammetrie

Unter Photogrammetrie versteht man ein geodätisches Verfahren, mit dem Ziel, Lage, Größe und Form von Objekten im Raum durch geometrische Auswertung von Bildern zu rekonstruieren. (vgl. KRAUS 2012: S. 1; LANGE 2020: S. 438)

Der Begriff Photogrammetrie wird von TORLEGARD folgend definiert:

„Die Kunst, Wissenschaft und Technik zuverlässig geometrische und technische Informationen über die Erde zu erhalten, durch Erfassung, Messung und Interpretation von abbildenden Sensoren“ (GÜLCH 2005: S. 6; aus TORLEGARD 1995)

Bei Photogrammetrie handelt es sich um ein berührungsloses Aufnahmeverfahren, bei welchem die Geoobjekte indirekt durch das Auswerten von Bildmaterial aufgezeichnet werden. (vgl. HEIPKE 2017: S. 3) Sie findet Anwendung, wenn der Nutzer nicht einen kleinen Teil der Oberfläche aufnehmen möchte, sondern gleich größere Landstriche oder große Punktmengen. Die Resultate bei photogrammetrischen Auswertungen können 3D-Koordinaten von Objekten, Karten und Plandarstellungen, geometrische Modelle, wie Höhen- und Gebäudemodelle, sowie Orthofotos (entzerrte Bilder) sein. (vgl. GÜLCH 2005: S. 6 f.) Aus der Sichtweise eines GIS zählt die Photogrammetrie zu einem zentralen Auswerteverfahren bei der Gewinnung von Geo-Daten. (vgl. KRAUS 2012: S. 3)

Bei der Photogrammetrie handelt es sich um ein passives Fernerkundungsverfahren, da sie im Gegensatz zu aktiven Systemen auf eine externe Beleuchtungsquelle (Sonne) angewiesen ist. (vgl. HEIPKE 2017: S. 2) Passive Sensoren (z.B. Kameras) zeichnen, die von den Oberflächen reflektierte Sonnenstrahlung in einem definierten Wellenlängenbereich (mono- bzw. panchromatisch) bzw. in einigen unterschiedlichen Wellenbereichen (RGB, multispektral, hyperspektral) des elektromagnetischen Spektrums, auf. (vgl. BALDENHOFER & MARSCHALL 2021) Aktive Systeme (z.B. LiDAR und RADAR) senden hingegen elektromagnetische Strahlung aus, um spezifische Eigenschaften der beleuchteten Oberflächen abzuleiten. (vgl. JUTZI et al. 2017: S. 66)

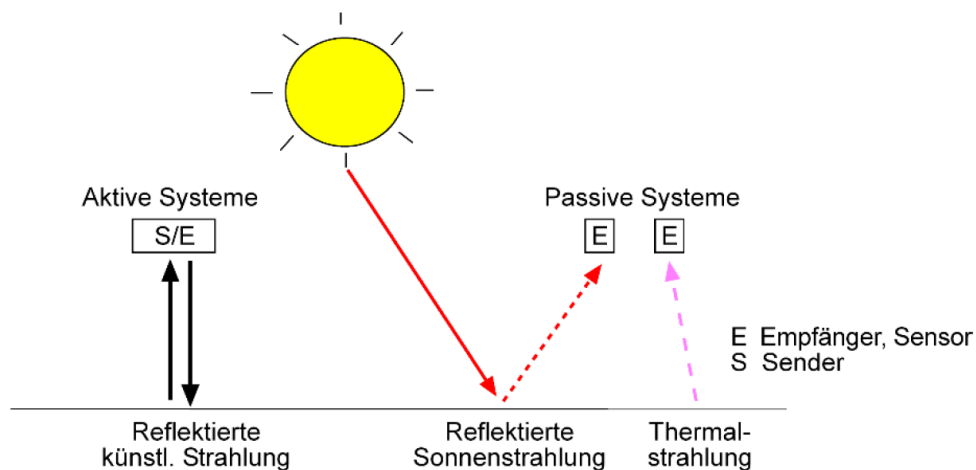


Abb. 11: Passive und aktive Aufnahmesysteme (ALBERTZ 2007: S. 10)

Bei der Photogrammetrie kann in Abhängigkeit zur Kameraposition während der Aufnahme zwischen Aerophotogrammetrie (Luftbildmessung), terrestrischer Photogrammetrie (Erdbildmessung) und der Satellitenphotogrammetrie (Satellitenbildmessung) unterschieden werden. Der Aerophotogrammetrie liegen Luftbilder zugrunde. Bei Bildflügen wird das aufzunehmende Gebiet zumeist in parallelen Flugstreifen beflogen, wobei digitale Aufnahmen mit Überlappung von ca. 60 % in Flugrichtung sowie ca. 20 % in Seitenrichtung erfolgen, damit kontinuierliche Flugbahnen mit Stereoaufnahmen abgedeckt werden können (vgl. PRINZ 2017). Jeder Geländepunkt muss in mindestens zwei Messbildern abgebildet sein, damit er stereoskopisch betrachtet und gemessen werden kann. (vgl. KRAUS 2012: S. 144) Um eine über Ländergrenzen hinweg möglichst einheitliche Qualität zu gewährleisten, sind für Bildflüge bestimmte Standardbedingungen zu beachten, wie z.B. Sonnenschein, Sonnenstand von mindestens 30° über dem Horizont, keine Wolken oder Wolkenschatten in den Bildern, sowie Nebel-, Hochwasser- und Schneefreiheit des Befliegungsgebietes (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 381). Die Luftbildaufnahmen erfolgen mittlerweile mit digitalen Luftbildkameras. Die Einzelbilder des Verbandes werden auf Basis aufgezeichneter GNSS- und Trägheitsmessungen und Verknüpfungspunkten (deren Pixel denselben Objektpunkt in verschiedenen Stereobildern beschreiben) zueinander orientiert (relative Orientierung). Durch die Einführung von terrestrisch bestimmten Passpunkten kann der relativ orientierte Bildverband schließlich in einer Bündelblockausgleichung im Landeskoordinatensystem orientiert werden (absolute Orientierung). Nach durchgeführter Bildorientierung kann die Oberfläche mithilfe

Verfahren der digitalen Bildzuordnung (engl. image matching) abgeleitet werden. Nachdem der Bildverband orientiert ist, können die 3D-Koordinaten der Erdoberfläche mittels eines räumlichen Vorwärtsschnitts bestimmt werden. (vgl. STOLZ 2013: S. 140 f.) Für die Lage- und Höhengenaugkeit stereoskopisch erfasster Koordinaten, ist bei digitalen Luftaufnahmen die Bodenauflösung (engl. ground sample distance [GSD]) ausschlaggebend (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 383). Die Höhengenaugkeit kann mit 0,1 Promille der Flughöhe abgeschätzt werden. (vgl. KOCH 2006: S. 13)

Photogrammetrisch erzeugte Höhenmodelle repräsentieren immer die Oberfläche der Erde (digitales Oberflächenmodell) mitsamt natürlichen und künstlichen Objekten, wie Vegetation und Bebauung. Wenn genügend Bodenpunkte der Erdoberfläche erfasst wurden, kann aus dem digitalen Oberflächenmodell ein digitales Geländemodell generiert werden, indem nicht zur Erdoberfläche gehörende Punkte aus dem Datensatz gefiltert werden. (vgl. JACOBSEN 2017: S. 367) Waldgebiete stellen dabei infolge der oftmals spärlichen Bodenpunkte, eine Herausforderung dar (vgl. JACOBSEN 2017: S. 367), sodass insbesondere in dichten Nadelwaldgebieten auch terrestrische Nachmessungen durchgeführt werden (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 392).

Die Höheninformation ist keine reine 3D-Information. Der Höhenwert in einem digitalen Geländemodell (DGM) ist eine Funktion der Lagekoordinaten, das heißt, es gibt für einen Punkt P (X,Y) nur eine zugehörige Höhe Z (2,5D). (vgl. GÜLCH 2005: S. 11)

Neben den Luftbildern (nationale Ebene) werden für die Erzeugung von digitalen Höhenmodellen auch Satellitenbilddaten (z.B. SPOT, ASTER) eingesetzt, wenn großräumige Gebiete (global) generiert werden sollen. (vgl. HIRT 2014: S. 2) Satellitenbilder spielen heute in der nationalen Landesaufnahme noch eine untergeordnete Rolle, da sie mit hohen Beschaffungskosten, geringerer Interpretationssicherheit und geringerer Genauigkeit gegenüber Luftbildern einhergehen. Weiters lassen die Wetterbedingungen im gewünschten Zeitfenster häufig keine Datengewinnung zu. (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 380 f.)

Seit dem Start von IKONOS im Jahr 1999 steigt die Nutzung hochauflösender, optischer Satellitenaufnahmen für photogrammetrische Bildauswertungen, insbesondere in Ländern mit beschränktem Zugang zu einem Luftbildarchiv oder in Entwicklungsländern, in denen Bildflüge mit Flugzeugen, infolge sehr hoher Bürokratie und fehlender Bildflugkapazitäten, nur mit hohem Aufwand durchführbar sind. Die Auswertungsmöglichkeiten und -genauigkeiten von Luft- und Satellitenbildern sind bei gleicher oder ähnlicher Bodenauflösung (Objektpixelgröße) gleichwertig. (vgl. JACOBSEN 2017: S. 371) Zivile optische Satellitenaufnahmen erreichen heute eine Bodenauflösung von bis zu 0,3 m. (vgl. JACOBSEN 2017: S. 344) Mit dem ASTER GDEM und dem AW3D30 stehen nahezu weltweite digitale Oberflächenmodelle mit einer Rasterweite von einer Bogensekunde (etwa 31m am Äquator) zur freien Verfügung, welche auf der Auswertung von optischen Stereosatelliten beruhen. (vgl. JACOBSEN 2017: S. 366 f.)

3D-Geodaten oder räumliche Daten stellen natürliche und künstliche Objekte in einem festgelegten Koordinatensystem dar. Nach GÜLCH kann hierbei die Objektinformation verschieden ausfallen: (vgl. GÜLCH 2005: S. 10 f.)

- „geometrische Information (räumliche Lage und Form von Objekten)
- physikalische Information (z.B. reflektierte elektromagnetische Strahlung)
- semantische Information (Bedeutungsinhalt)
- temporale Information (zeitliche Veränderungen)“ (GÜLCH 2005: S. 11)

Die räumliche Ausdehnung der erfassbaren Objekte können oft unterschiedlich sein und reichen von Landschaftsmodellen und Regionalmodellen über Stadtgebieten, zu einzelnen Gebäuden, Bäumen, Mauern, Straßenmobiliar, bis hin zu Fassadenelementen und detaillierten Innenräumen. (vgl. GÜLCH 2005: S. 11)

3.2 LiDAR

Bei LiDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) handelt es sich um ein aktives Fernerkundungsverfahren, ähnlich zu RADAR, welches jedoch anstelle von Radiowellen auf Laserstrahlen basiert. Es wird eingesetzt, um geometrische Informationen in Form von 3D-Punktwolken zu gewinnen. Der Vorgang wird auch als Laserscanning bezeichnet, da eine Szene im Blickfeld des Sensors mit einem Laserstrahl abgetastet wird. Die vom Sensor ausgesandten Laserstrahlen werden an einem Objekt reflektiert und die Rückstreuung wird vom Sensor detektiert. Mithilfe der Laufzeitmessung oder des Phasenvergleichs kann die Entfernung zum Objekt berechnet werden. (vgl. PFEIFER et al. 2017: S. 432) Laser kann man nach ihrer Signalform in Puls- und Dauerstrichlaser (CW-Laser, engl. continuous wave laser) unterscheiden. (vgl. JUTZI et al. 2017: S. 73) Pulslaser emittieren Licht in zeitlichen Pulsen. Ein Dauerstrichlaser strahlt hingegen stetig eine Lichtwelle mit konstanter Intensität ab. Die Entfernungsberechnung hängt vom eingesetzten Lasertypen ab. (vgl. JUTZI et al. 2017: S. 76) Beim Dauerstrich-System, welches vor allem für kürzere Entfernungen in der Größenordnung von bis zu 100 m eingesetzt wird, erfolgt die Entfernungsberechnung anhand einer Phasendifferenzmessung, wobei sich die Entfernung zum Objekt als Funktion der Wellenlänge und der detektierten Phasendifferenz berechnet. (vgl. ZEINLER 2019: S. 22 f.) Bei dem bevorzugten gepulsten Verfahren wird die Entfernung R über die Laufzeit t des Pulses vom Sensor zum Objekt und vom Objekt zum Empfänger zurück berechnet. (vgl. JUTZI et al. 2017: S. 81)

$$R = \frac{t \cdot c}{2}$$

R ...Entfernung

t ...Laufzeit

c ...Lichtgeschwindigkeit

Wenn sich einige Objekte im Strahlengang eines Laserstrahls aufhalten, entstehen mehrfache Teilreflexionen, welche der Abfolge nach, den Distanzen bzw. Entfernungen der Objekte zum Sensor entsprechen. Bei einem Waldgebiet wird beispielsweise der erste erfasste Impuls mit der Oberfläche des Waldes (Baumkronen) und der letzte Impuls als Waldboden assoziiert. (vgl. WAGNER et al. 2003: S. 228) In Abb. 12 werden die Teilreflexionen eines Baumes und eines Hauses, in Abhängigkeit von der Zeit, dargestellt.

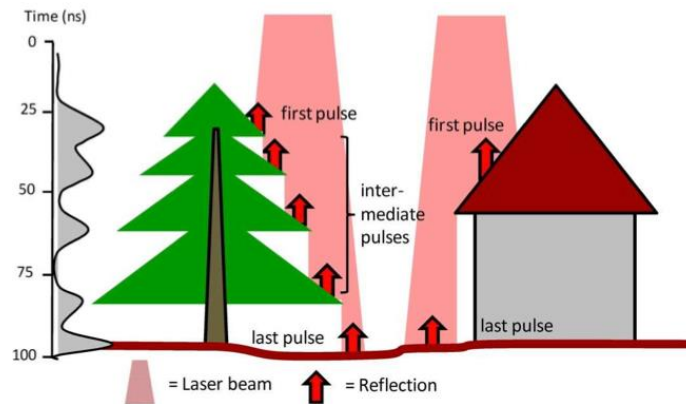


Abb. 12: Laserstrahlreflexionen LiDAR (HEINZEL 2011: S. 20)

Traditionelle Systeme liefern diskrete Echos, wobei meistens das erste und das letzte Echo gespeichert werden. Moderne Sensoren hingegen basieren auf der Full-Waveform-Technologie (FWF) und zeichnen die gesamte Echo-Wellenform auf (siehe Abb. 13). Wodurch in der Nachbereitung (post-processing) für jedes Echo neben den 3D-Punktkoordinaten zusätzliche Attribute, wie Amplitude und Echoweite, abgeleitet werden können. (vgl. GALLAY 2013: S. 5; LANGE 2020: S. 241; MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 91)

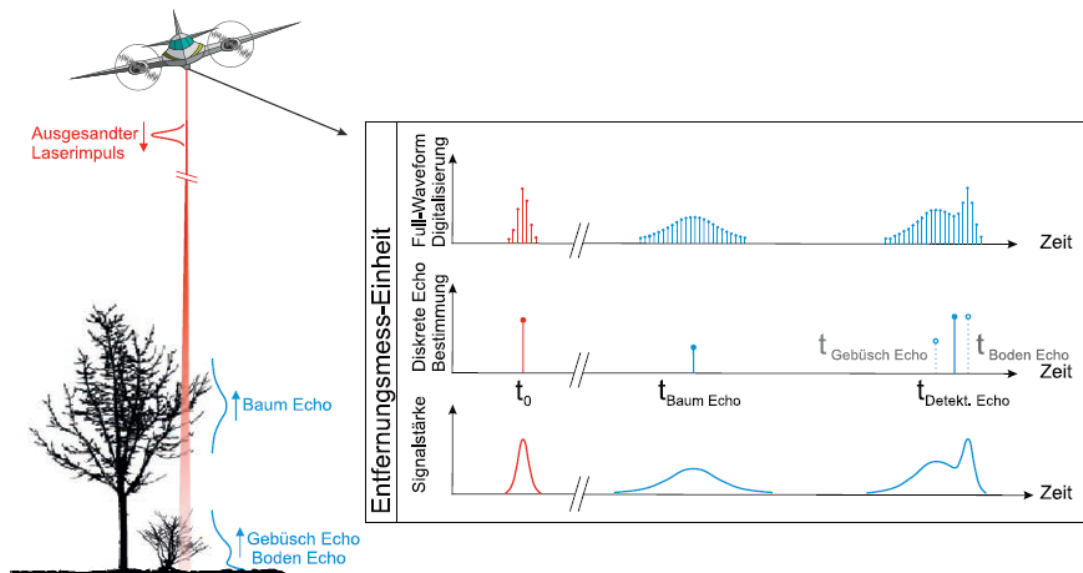


Abb. 13: Diskrete Echobestimmung vs. Full-Waveform-Digitalisierung (MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 90)

Je nach verwendeter Plattform unterscheidet man zwischen terrestrischem bzw. statischem (engl. terrestrial laser scanning – TLS), luftgestütztem (engl. airborne laser scanning – ALS) und satellitengestütztem Laserscanning (engl. spaceborne laser scanning – SLS). (vgl. PFEIFER et al. 2017: S. 432 f.) Obwohl die Distanzmessung mit Laser bereits in den 1960er Jahren entwickelt wurde, wird luftgestütztes Laserscanning erst seit Mitte der 1990er Jahre für die topographische Geländeaufnahme zur Höhenbestimmung eingesetzt. (vgl. GALLAY 2013: S. 1)

Ein luftgestütztes Laserscanning-System umfasst ein Multisensor-System, das sich folgendermaßen zusammensetzt (vgl. MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 90):

- Satelliten-Navigationseinheit (GNSS): erfasst die absolute Position
- Inertialen Messeinheit (IMU – Inertial Measurement Unit): erfasst den Drehwinkel (Raumstellung) des Messsystems (siehe Abb. 14)
- Laserscanner: sendet Lichtsignale und erfasst Reflexionen

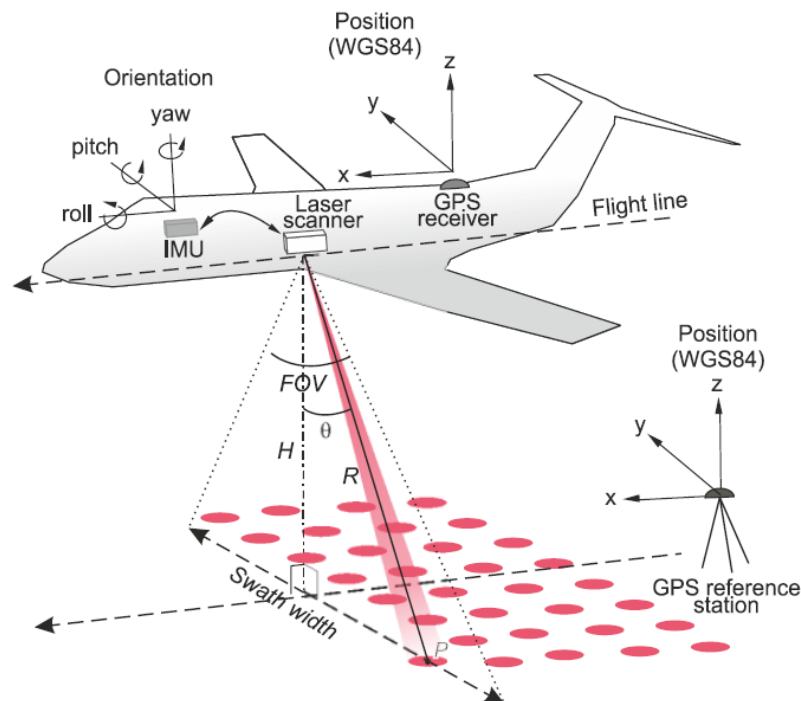


Abb. 14: Airborne Laser Scanning (ALS) (GALLAY 2013: S. 3)

Der Laserscanner besteht grundsätzlich aus einer Steuerungs- und Messeinheit, einem Sender und einem Empfänger. Der Sender (Laser) sendet ein gebündeltes Lichtsignal im nahen Infrarotbereich ($\lambda = 800 \text{ nm} - 1550 \text{ nm}$) aus. (vgl. MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 90) Der Laserstrahl wird mittels einer Ablenkungseinheit (schwingende oder oszillierende Spiegel) am Sender quer zur Flugrichtung abgelenkt, wodurch der in Flugrichtung befindliche Geländestreifen abgetastet wird. An der Objektoberfläche wird das Signal gestreut und anschließend vom Empfänger (Photodiode) detektiert (siehe Abb. 15). (vgl. WAGNER et al. 2003: S. 225)

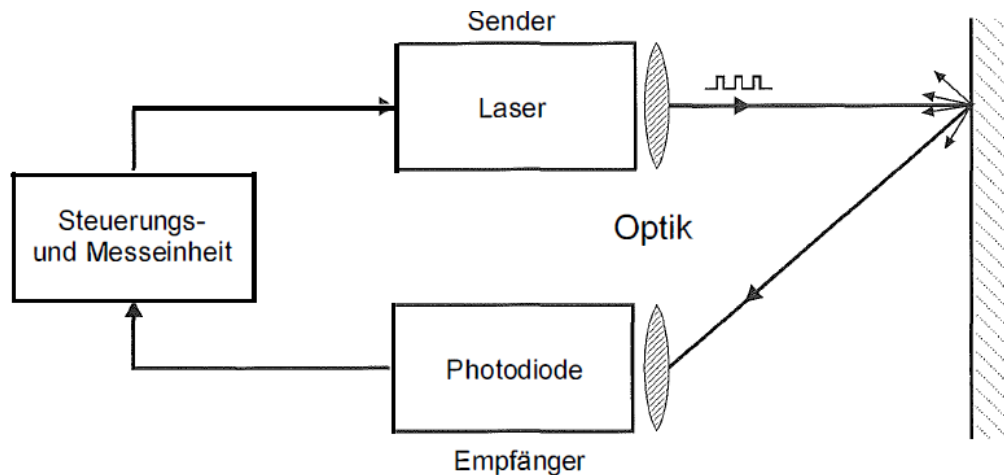


Abb. 15: Blockdiagramm eines Laserscanners (WAGNER et al. 2003: S. 225)

Befliegungen erfolgen üblicherweise streifenweise in einer Flughöhe zwischen 500 m und 5.000 m Flughöhe, wobei die Abweichung zwischen überlappenden Streifen zur Qualitätsdokumentation und auch zur Fein-Georeferenzierung der Flugstreifen verwendet werden. (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 385; MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 90) In Abhängigkeit der Flughöhe, Fluggeschwindigkeit, Bodenauflösung des Pulses (ergibt sich aus der Strahlaufweitung und Flughöhe), des Öffnungswinkels quer zur Flugrichtung (engl. field of view [FOV]), der Pulsrate (Frequenz der ausgesandten Laserpulse) sowie der Anzahl der Echos, die am Empfänger registriert werden können, ist heute eine Messpunktdichte von 10 bis zu 100 Punkten/m² möglich. (vgl. GALLAY 2013: S. 3; JÄGER & HEIPKE 2014: S. 385) Üblicherweise wird bei ALS-Befliegungen eine Punktdichte von 1 bis 20 Punkten/m² erreicht. (vgl. GALLAY 2013: S. 3; MANDLBURGER G. et al. 2009: S. 90)

Die Vorteile bei luftgestützten Laserscanning (ALS) liegen in der raschen Datenerfassung, der hohen Messpunktdichte und der hohen vertikalen und horizontalen Genauigkeit. (vgl. GALLAY 2013: S. 8) Die vertikale Genauigkeit liegt bei zirka 15 cm, während die horizontale Genauigkeit bei 50 bis 100 cm liegt. (vgl. HAALA 2005: S. 28; NELSON et al. 2008: S. 73) Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit Mehrfachechos aufzuzeichnen, wodurch Oberflächen, als auch Bodenpunkte, erfasst werden können. Bewaldete Gebiete stellen dadurch keine Schwierigkeiten bei der Erfassung dar. Anders als bei Bildflügen für die photogrammetrische Auswertung, spielt Tageslicht bei ALS-Befliegungen keine Rolle, wodurch Laserscanning-Aufnahmen, unabhängig von der Tageszeit, aufgenommen werden können. Ebenso sind texturlose Oberflächen, wie zum Beispiel schnee- oder sandbedeckte Oberflächen, für die 3D-Geländerekonstruktion unproblematisch. (vgl. GALLAY 2013: S. 8) Einschränkungen für luftgestütztes Laserscanning bestehen jedoch bei Wolken bzw. Nebel oder Niederschlag. (vgl. WAGNER et al. 2003: S. 225)

Gegenwärtige ALS-Systeme verwenden Infrarotlaser. Dies stellt jedoch eine Einschränkung im Bereich der Gewässererfassung (Bathymetrie) dar. Der Mangel an Informationen zur Tiefe im Flachwasserbereich wurde kürzlich durch die gleichzeitige Verwendung von Infrarot- (1064nm) und Grünlasern (532nm) überwunden. Das Infrarotsignal wird von der Wasseroberfläche reflektiert, während das grüne Licht ins Wasser eindringt und vom Gewässergrund reflektiert wird, solange die Wassertrübung nicht zu stark ist. Die

Wassertiefe kann aus der Laufzeitdifferenz zwischen infrarotem und grünem Puls bestimmt werden. (vgl. GALLAY 2013: S. 8; JÄGER & HEIPKE 2014: S. 384)

3.3 RADAR

Bei RADAR (**R**adio **D**etection and **R**anging) handelt es sich um ein aktives Fernerkundungsverfahren, welches auf Mikrowellen basiert. Schon in den 1950er Jahren wurden bildgebende RADAR-Sensoren zur flugzeuggestützten Erdbeobachtung verwendet. Erst durch die Entwicklung des Synthetischen Aperture RADAR (SAR) wurde die Nutzung von RADAR-Sensoren auch vom Weltraum aus ermöglicht. (vgl. JUTZI et al. 2017: S. 86)

SAR-Systeme nutzen ein aktives Mikrowellenabbildungsverfahren und werden bei luftgestützten oder satellitengetragenen Plattformen eingesetzt. Hierbei senden sie elektromagnetische Strahlung im Mikrowellenbereich senkrecht zur Flugrichtung und schräg zur Nadirrichtung aus und messen die Stärke, Laufzeit und Phasenlage des zurück gestreuten Echos (siehe Abb. 16). Im Gegensatz zu LiDAR-Systemen, welche Strahlung im nahen Infrarot-Bereich ($\lambda = 800 \text{ nm} - 1550 \text{ nm}$) verwenden, arbeiten RADAR-Systeme im Mikrowellenbereich ($\lambda = 1 \text{ cm} - 100 \text{ cm}$). (vgl. BALDENHOFER 2020) Für Wellenlängen ab dem Zentimeterbereich ist der Transmissionsgrad der Erdatmosphäre sehr hoch, sodass Wolken, Nebel und kleine Wassertropfen in der Atmosphäre ungehindert durchdrungen werden können. Dadurch ist dieses Verfahren das einzige wetterunabhängige. Da die Erdoberfläche aktiv beleuchtet wird, können RADAR-Systeme Tageszeit unabhängig verwendet werden. RADAR-Sensoren sind infolge dieser Tatsachen gerade in Regionen mit regelmäßiger Wolkenbedeckung (Tropen) oder längerer Dunkelheit (Polargebiet) gegenüber optischen Sensoren vorteilhaft. (vgl. JUTZI et al. 2017: S. 87) SAR ist oft Mittel der Wahl bei Katastrophenereignissen, wenn widrige Wetterbedingungen die Nutzung anderer Sensoren unmöglich machen. (vgl. SÖRGEL et al. 2017: S. 736)

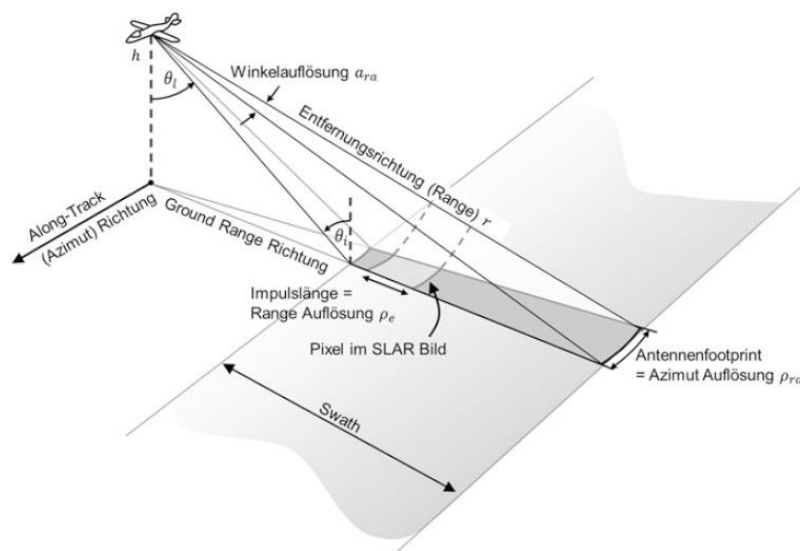


Abb. 16: SAR-Abbildungsgeometrie (JUTZI et al. 2017: S. 88)

Bei der Wahl des eingesetzten Frequenzbandes ist die beabsichtigte Penetrationsfähigkeit der Mikrowellen ausschlaggebend. Prinzipiell gilt: je größer die Wellenlänge, desto höher die Eindringtiefe der Radarwellen. Fernerkundungsradarsysteme arbeiten üblicherweise in drei Wellenlängenbereichen, nämlich X-Band ($\lambda = \text{ca. } 3 \text{ cm}$), C-Band ($\lambda = \text{ca. } 6 \text{ cm}$) oder L-Band ($\lambda = \text{ca. } 24 \text{ cm}$) (vgl. BALDENHOFER 2020). Folgende Abb. 17 vergleicht die Eindringtiefe von X-, C- und L-Band am Beispiel von Vegetation. Radarwellen im X-Band werden an der oberen Baumkrone reflektiert, während das L-Band bis zum Boden vordringen kann. (vgl. DLR - INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND RADARSYSTEME 2020)

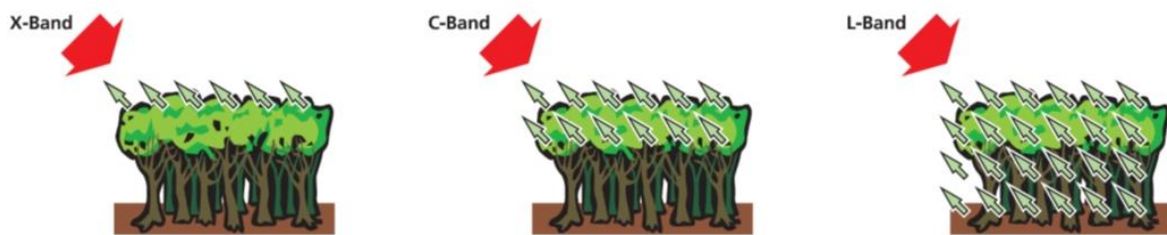


Abb. 17: Eindringtiefe X-Band, C-Band und L-Band (DLR - INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND RADARSYSTEME 2020)

Infolge der wellenlängenabhängigen Eindringtiefen nutzt man zur Erstellung von digitalen Geländemodellen zum Beispiel das L- Band, während zur Erstellung von digitalen Oberflächenmodellen, das X-Band herangezogen wird. Durch die Aufnahme zweier Datensätze mit unterschiedlichem Blickwinkel, können schließlich mittels Stereo-Radargrammetrie (Stereo-SAR) oder SAR-Interferometrie (IfSAR) Höhen abgeleitet und digitale Höhenmodelle generiert werden. (vgl. BALDENHOFER 2020)

Die wichtigste Mission der SAR-Interferometrie war die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), im Zuge derer die Erde im Februar 2000 elf Tage lang umkreist wurde und dabei Daten im X- und im C-Band aufgenommen wurden. Dadurch entstand, mit Ausnahme der Polregionen, ein für die ganze Erde homogenes Höhenmodell, auf welches auch heute noch bei vielen Anwendungen zurückgegriffen wird. (vgl. HEIPKE 2017: S. 14) SRTM-Daten stehen seit 2014 in der Auflösung von einer Bogensekunde mit Ausnahme des Nahen Ostens zur freien Verfügung. (vgl. JACOBSEN 2016: S. 80) Seit 2014 steht auch das kommerzielle WorldDEM, basierend auf den Daten der SAR-Erdbeobachtungssatelliten TanDEM-X und TerraSAR-X mit einer relativen vertikalen Genauigkeit von 2 m und einer Auflösung von 12 m zur Verfügung. (vgl. ZEINLER 2019: S. 26)

Bei flugzeuggestützten bildgebenden Radarsystemen können Auflösungen im Bereich unterhalb von 0,1 m erreicht werden. (vgl. HEIPKE 2017: S. 14) Ein Nachteil der SAR-Technik ist die zwingende Schrägsicht bei Messungen, welche zu Verdeckungen bzw. Abschattungen insbesondere in Städten und hügeligen Gebieten führen können. (vgl. SÖRGEL et al. 2017: S. 736 f.) Aufgrund dieses Faktors lassen sich mit SAR-Daten in dicht bebauten Gebieten keine 3D-Stadtmodelle mit gleicher oder gar besserer Qualität erzeugen, als dies in Nadirsicht mit Luftbildern oder luftgestütztem Laserscanning möglich ist. (vgl. SÖRGEL et al. 2017: S. 755)

3.4 Kosten und Qualität von Höhendaten für verschiedene Erfassungsmethoden

Besonders bei Anwendungen, die flächendeckend eine hochgenaue und dichte Erfassung von Höhendaten (DHM, 3D-Stadtmodelle) benötigen, haben sich das flugzeuggestützte Laserscanning und die automatische Stereozuordnung von Luftbildern, durchgesetzt. (vgl. GÜLCH 2005: S. 11; HAALA 2005: S. 30; JÄGER & HEIPKE 2014: S. 389) Das interferometrische SAR (IfSAR) bietet eine Alternative für die flugzeuggestützte Erfassung von Höhendaten. Die unterschiedlichen Trägersysteme (Flugzeug, Satellit) liefern verschiedene Genauigkeiten und Qualitäten. In Abb. 18 werden die besprochenen Systeme nach Höhengenaugkeit (m) und Kosten (\$/km²) dargestellt. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 64; HAALA 2005: S. 30) Diese Abbildung wurde erweitert, um die Höhendatenerfassung mittels Drohne (engl. UAV [Unmanned Aerial Vehicle]) darzustellen. Drohnen gewährleisten einen kostengünstigen und vielseitigen Flugbetrieb bei kleineren Befliegungsbereichen. Die Befliegung kann in geringeren Höhen durchgeführt werden und kurzfristig stattfinden. Es kann weiters eine vertikale Genauigkeit von wenigen Zentimetern bei der Höhenerfassung erzielt werden. (vgl. BANDINI et al. 2020: S. 1 f.; VILBIG et al. 2020)

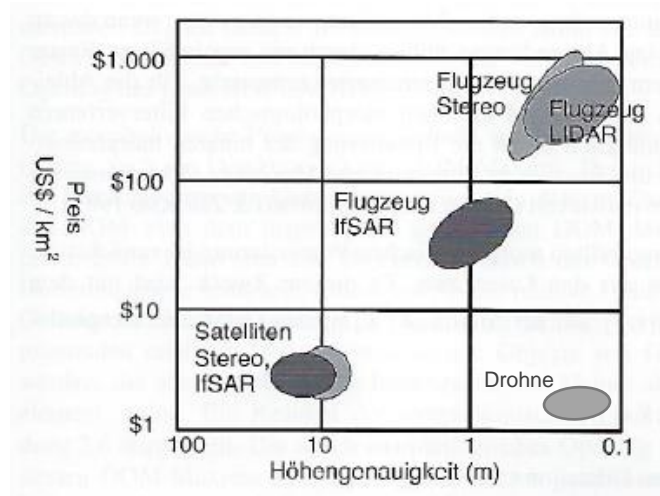


Abb. 18: Kosten und Qualität von Höhendaten für verschiedene Erfassungsmethoden (HAALA 2005: S. 29) – Erweiterung (eigene Bearbeitung)

4 3D-GIS Datenformate und Modelle

Wie schon in den vorherigen Kapiteln dargelegt, ist die Welt, auf der wir leben, keine zweidimensionale, sondern eine dreidimensionale. Aufgrund dessen müssen die erhobenen Daten, für nachfolgende Analysen in festgelegten Datenformaten vorhanden sein bzw. bestimmten Normen entsprechen. (vgl. LOIGGE 2013: S. 43)

„In Abhängigkeit von Einsatzgebiet und Hersteller haben sich dabei verschiedene 3D-Datenformate etabliert. Eine erste grobe Unterscheidung kann nach raster- und vektorbasierten Formaten vorgenommen werden. (...) Die Analyse von Daten spielt bei GIS Anwendungen die zentrale Rolle. Insofern werden die Ansprüche an das Dateiformat in erster Linie von Analysemöglichkeiten und nicht von der Visualisierung bestimmt. Bei der Visualisierung der Analyseergebnisse stellt sich die Frage nach dem Dateiformat jedoch erneut. Hier reicht meist die Entscheidung, ob ein raster- oder vektorbasiertes Format gewählt werden soll.“ (FREIWALD & JANY 2005: S. 142)

Dieser Abschnitt beschreibt deshalb zu Beginn die Normen und Standards von 3D-Geodaten. Anschließend wird das digitale Höhenmodell erläutert und die verschiedenen vektor- und rasterbasierten Datenformate aus der 3D-GIS Welt verschriftlicht.

4.1 Standards für 3D-Geodaten

In den Geowissenschaften sind Geodaten, also raumbezogene Daten, die Träger der Grundlageninformation. Damit gewährleistet werden kann, dass diese Daten von unterschiedlichen Betriebssystemen und Softwareprodukten gelesen und weiterverarbeitet werden können, müssen Geodaten bestimmte Normen und Standards erfüllen. Damit Daten system-, gebiets- und anbieterübergreifend benützt werden können und somit wiederverwendbar sind, müssen die beteiligten Systeme interoperabel sein, erläutern GRÖGER & KOLBE. Geodaten müssen demnach ohne inhaltliche Verluste austauschbar sein und von unterschiedlichen Softwaresystemen und Nutzern auf ein und dieselbe Art verstanden werden. Jedoch sind die vorhandenen 3D-Grafikstandards, wie Virtual Reality Modeling Language (VRML) oder 3D-CAD-Geometriemodelle nicht mehr ausreichend, um in der 3D-GIS Welt einwandfreie Objektbeziehungen, Eigenschaften und Strukturen von Geoobjekten zu bestimmen und infolge Modellierungen vornehmen zu können. (vgl. GRÖGER & KOLBE 2005b: S. 56) In den letzten Jahren ist 3D-Grafik zu einem immer wichtigeren Bestandteil des Multimedia-Erlebnisses geworden, wodurch sich neben Standards wie CityGML auch eine Reihe an Web3D Standards wie X3D und WebGL entwickelt haben. (vgl. EVANS et al. 2014: S. 43; REUMONT 2010: S. 129)

Daher hat man sich entschlossen, Normen und Standards für den interoperablen Datenaustausch einzuführen. Im GIS-Bereich befassen sich zwei Organisationen mit der Spezifikation von Normen, zum einen die ISO (International Organization for Standardization) mit dem TC 211 (Technical Committee 211), welche für Normen zuständig

ist und zum anderen das OGC (Open GIS Consortium), welches sich mit der Entwicklung von Industriestandards befasst. Im Jahr 1998 wurde die TC 211-OGC Coordination Group (TOCG) gegründet, in welcher beide Gremien miteinander mit dem Ziel der Harmonisierung bestehender und künftiger Standards und Normen in der 3D-GIS Welt kooperieren. (vgl. GRÖGER & KOLBE 2005b: S. 56)

Die beschlossenen Normen und Standards von der ISO und dem Open GIS Consortium sind für die Beschreibung, Analyse, Modellierung und Austausch dreidimensionaler Geodaten essenziell und stellen eine unentbehrliche Kompatibilität sicher. Verschiedene 3D-Datenmodelle wie digitale Geländemodelle in Form von Rastern und TINs, dreidimensionale Boundary Representation oder 3D-Tetraedernetze können für Aufgaben im Bereich der Geowissenschaften unmittelbar dargestellt werden. (vgl. GRÖGER & KOLBE 2005b: S. 68)

4.1.1 CityGML

Bei City Geography Markup Language (CityGML) handelt es sich um ein offenes Datenmodell und XML-basiertes Format für die Darstellung, Speicherung und den Austausch von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen. CityGML ist ein Anwendungsschema für die Geography Markup Language Version 3.1.1 (GML3), den erweiterten internationalen Standard für den räumlichen Datenaustausch, welcher vom Open Geospatial Consortium (OGC) und der ISO TC211 im Jahr 2008 herausgegeben wurde. Es definiert die Klassen und Beziehungen für die relevantesten topografischen Objekte (Gelände, Gebäude, Vegetation, Wasser- und Verkehrsflächen, Stadtmöblierung) in Städten und regionalen Modellen hinsichtlich ihrer geometrischen, topologischen (Beziehungen, Nachbarschaft), semantischen (Bedeutung, Thematik) Erscheinungsmerkmale, wobei jedes Objekt in unterschiedlichen Level of Detail (Detailebene) vorkommen kann. Dies ist besonders wichtig im Hinblick auf die kostengünstige nachhaltige Wartung von 3D-Stadtmodellen, die die Wiederverwendung derselben Daten in verschiedenen Anwendungsbereichen ermöglichen. Im Gegensatz zu anderen 3D-Vektorformaten basiert CityGML neben Geometrie- und Grafikinhalten auf einem umfassenden Allzweck-Informationsmodell, mit dem virtuelle 3D-Stadtmodelle für anspruchsvolle Analyseaufgaben in verschiedenen Bereichen verwendet werden können. Anwendungsbereiche sind die Stadt-Landschaftsplanung, Architektur, Tourismusbereich, 3D-Kataster, Umweltsimulation, Katastrophenmanagement und Fahrzeug- und Fußgängernavigation. (vgl. ALI et al. 2015: S. 89; CURTIS 2008: S. 332 f.; OGC 2021; STOTER et al. 2015: S. 215)

4.1.2 X3D

Extensible 3D (X3D) ist eine auf XML beruhende Auszeichnungssprache für 3D-Szenen, -Modelle und -Objekte, welche im Browser, mittels eines Plugins, dargestellt werden können. X3D wird durch das Web3D-Konsortium betreut und weiterentwickelt. Im Jahr 2004 wurde durch dieses Konsortium die Beschreibungssprache X3D als neuer Web-3D-Standard (ISO

/ IEC 19775/19776/19777) erklärt und löste damit VRML ab. X3D ist ein lizenzfreies Dateiformat in Form eines offenen ISO-Standards, welches abwärtskompatibel mit VRML ist, wodurch diese Dateien immer noch interpretiert werden können. Jedoch bietet es erweiterte APIs, zusätzliche Datencodierungsformate, strengere Konformität und eine komponentenbasierte Architektur, welche zu einer gesteigerten Web-Kompatibilität und Interoperabilität führt. (vgl. EVANS et al. 2014: S. 45; REUMONT 2010: S. 66 f.; WEB3D CONSORTIUM 2021a) Des Weiteren hat X3D den Anspruch ein Format zu sein, das es ermöglicht, einmal verfasste 3D-Szenen plattformunabhängig zu rendern. Beim Design wurde auf Performance, Geräteunabhängigkeit, Interaktivität und Internationalität Wert gelegt. (vgl. REUMONT 2010: S. 68; WEB3D CONSORTIUM 2021b)

4.1.3 WebGL

Web Graphics Library (WebGL) ist eine Komponente von Browsern, mit dessen Hilfe hardwarebeschleunigte 3D-Grafiken einfach im Webbrowser, ohne zusätzliche Erweiterungen (Plugins), angezeigt werden können. Die WebGL-Technologie wurde von der Khronos Group seit 2009 als plattformübergreifender, lizenzfreier Standard entwickelt und ist eine 3D-Grafik-Programmierschnittstelle für Webbrowser, auf der Basis von OpenGL ES2.0 im Zusammenspiel mit der Programmiersprache JavaScript. (vgl. REUMONT 2010: S. 129; THE KHRONOS GROUP 2011b)

OpenGL ES („Embedded Systems“) 2.0 ist eine Anpassung der Standard-OpenGL-API, die speziell für Geräte mit eingeschränkter Rechenleistung wie Mobiltelefone oder Tablets entwickelt wurde. WebGL wurde für die Verwendung in Verbindung mit Standard-Webtechnologie entwickelt. Während die 3D-Komponente einer Webseite mit der WebGL-API über JavaScript gezeichnet wird, wird die Seite selbst mit Standard-HTML erstellt. (vgl. EVANS et al. 2014: S. 48) Das heißt, dass Browser, die WebGL unterstützen, 3D-Szenen ohne Plugin anzeigen können. Dadurch nimmt die Notwendigkeit, Plugins für webbasierte 3D-Inhalte zu verwenden, ab. Diese Flexibilität spiegelt sich in der Anzahl der Bibliotheken wider, die die WebGL-Kernspezifikation abstrahieren und Funktionen hinzufügen, deren wichtigster Vertreter Three.js ist. Durch das Entfernen von Plugins wird auch die plattformübergreifende Kompatibilität erheblich verbessert. (vgl. EVANS et al. 2014: S. 58)

4.2 Digitale Geländemodelle

Mittels eines digitalen Geländemodells kann die Erdoberfläche dreidimensional beschrieben werden. Die Datenerfassung geschieht heutzutage mittels Fernerkundungsmethoden, welche im Kapitel 3 beschrieben wurden. Hierbei enthält jeder aufgenommene Punkt einen Höhenwert und in Abhängigkeit von der Dichte der aufgenommenen Punkte, kann das betrachtete Gelände mehr oder weniger präzise beschrieben werden. (vgl. PAMMER 2018: S. 3)

Das erste digitale Geländemodell von MILLER & LAFLAMME 1958 wurde für Zwecke der Straßenplanung entwickelt. (vgl. STANGER 1982: S. 5) Seit der erstmaligen Einführung wurde das digitale Geländemodell durch verschiedene Disziplinen weiterentwickelt. Die Anwendungsgebiete von digitalen Geländemodellen lagen nach DOYLE im Jahr 1978 bei der Ermittlung von Konturlinien, der Geländeprofilerstellung, der Bestimmung von Sichtbarkeitsbeziehungen, der Berechnung für Erdarbeiten (Kubaturberechnung), der Luftfahrt im Bereich der Navigationskontrollsysteme sowie in der Geländesimulation. (vgl. DOYLE 1978: S. 1484) Digitale Geländemodelle finden heutzutage in allen umwelt- und planungsrelevanten Fachdisziplinen Anwendung. (vgl. GÜLCH 2005: S. 9) Aufgrund des großen Forschungsinteresses betreffend der Höhenmodellierung der Erdoberfläche entwickelten sich nicht nur viele Anwendungsgebiete, sondern auch eine Vielzahl von unterschiedlichen Begrifflichkeiten. In verschiedenen Ländern werden unterschiedliche Modelle teilweise synonym oder mit anderen Abkürzungen betitelt. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 1; LI et al. 2005: S. 7)

Um für diese Masterarbeit eine einheitliche Verwendung festzulegen, wird der Begriff digitales Höhenmodell (DHM, engl. Digital Elevation Model [DEM]) als Überbegriff definiert, dessen Spezifizierung, je nach im Kontext repräsentierter Oberfläche, erfolgt. (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 389) ¹

Ein digitales Höhenmodell ist demnach ein digitaler Datensatz, der das Kontinuum einer Oberfläche anhand von dreidimensionalen Raumpunkten beschreibt, wobei die Höhe z als Funktion der Lagekoordinaten x und y beschrieben wird: (vgl. GÜLCH 2005: S. 9; ZEINLER 2019: S. 14)

$$z = f(x, y)$$

Bei einem digitalen Geländemodell (DGM, engl. Digital Terrain Model [DTM]) handelt es sich bei der repräsentierten Oberfläche nur um die natürliche Erdoberfläche (Pedosphäre inklusive Wasseroberflächen). Wird die Erdoberfläche mitsamt allen natürlichen und anthropogenen Objekten, wie Vegetation oder Häuser dargestellt, spricht man von einem digitalen Oberflächenmodell (DOM, engl. Digital Surface Model [DSM]). (vgl. HAALA 2005: S. 30; HIRT 2014: S. 1; JÄGER & HEIPKE 2014: S. 389) In Tab. 11 werden die Begriffsdefinitionen in deutscher und englischer Sprache dargelegt.

Deutsch	Englisch
DHM – Digitales Höhenmodell	DEM – Digital Elevation Model
DGM – Digitales Geländemodell	DTM – Digital Terrain Model
DOM – Digitales Oberflächenmodell	DSM – Digital Surface Model
nDOM – normalisiertes Digitales Oberflächenmodell	nDSM – normalized Digital Surface Model

Tab. 11: Begriffsdefinition

¹ BILL definiert das digitale Geländemodell (DGM) als Gesamtheit, aus dem digitalen Höhenmodell (DHM), welches die Höhenwerte wiedergibt, und dem digitalen Situationsmodell (DSM). Dieses hält Lageinformationen von Straßen, Gebäude, Bewuchs, Gewässer etc. bereit (BILL, 2016: S. 376).

Das nDOM entspricht der Differenz zwischen dem Oberflächenmodell und dem Geländemodell, wodurch es nur noch die Objekte auf der Erdoberfläche enthält (siehe Abb. 19). (vgl. PAMMER 2018: S. 6)

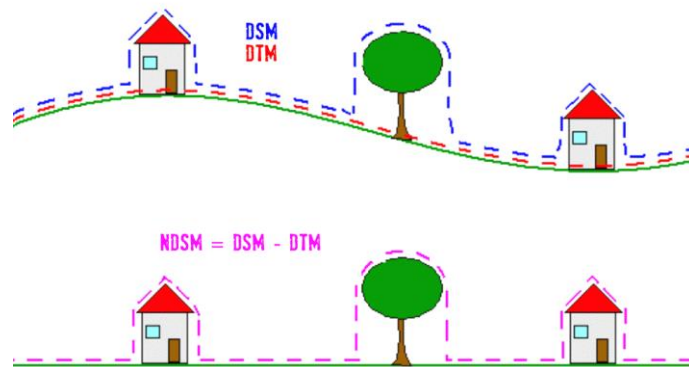


Abb. 19: Prinzip der Erstellung eines normalisierten digitalen Oberflächenmodells (MAYER 2004)

Digitale Geländemodelle sind sehr verbreitet und werden zunehmend durch automatisierte Bildzuordnung aus Luftbildern bzw. durch flugzeuggestütztes Laserscanning erfasst. (vgl. GÜLCH 2005: S. 11) DHM können sowohl aus stereoskopischen Bildern als auch durch Laserscanning gewonnen werden. (vgl. JÄGER & HEIPKE 2014: S. 389) In der folgenden Tab. 12 werden Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Erfassungsmethoden bei digitalen Höhenmodellen gegenübergestellt.

Herkunft	Vorteile	Nachteile
Automatisch aus Luftbild-Stereomodellen	Genau	Schatten problematisch
	Für große Flächen geeignet	Schwierigkeiten bei geringen Kontrastunterschieden
	Hohe Punktdichte erreichbar	Rechenintensiv
	DOM korrespondiert mit Luftbildern	Große Datenmengen
LiDAR	Sehr genaue Höhenermittlung	Kostenintensiv
	Bei hoher Punktdichte sehr gute Abbildung der Morphologie der Oberfläche	Große Datenmenge
	Gelände kann auch in Vegetationsbeständen erfasst werden	
RADAR	Globales homogenes Modell vorhanden	Geringere Auflösung
	Kostenlos	Im alpinen Bereich evtl. unvollständig
	Wetterunabhängig	Technisch anspruchsvoll

Tab. 12: Vergleich von DHMs (aus PAMMER 2018: S. 47 f.)

4.2.1 Geländemodellierung und -analyse

Die Modellierung und Analyse eines digitalen Höhenmodells umfassen die Prozesse, bestehend aus den Aufgaben „Datenerfassung“, „Generierung“, „Manipulation“, „Interpretation“, „Visualisierung“ und „Anwendung“. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 4; HUTCHINSON & GALLANT 1999: S. 106; ZHOU 2017: S. 1) In Abb. 20 wird die Verbindung der einzelnen Arbeitsschritte zueinander dargestellt.

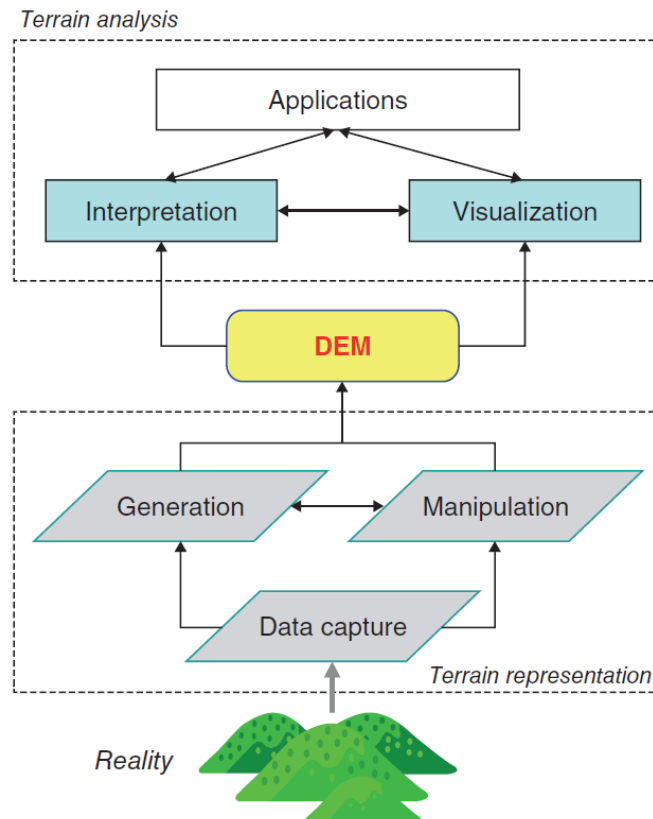


Abb. 20: Modellierung und Analyse eines digitalen Höhenmodells (ZHOU 2017: S. 2)

Datenerfassung: Bei der Datenerfassung werden Höheninformationen, der zu repräsentierenden Oberfläche, mittels einer diskreten Menge von Punkten gesammelt. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 6; LI et al. 2005: S. 9)

Generierung: Um aus den erfassten Daten Informationen über den kontinuierlichen Verlauf der Oberfläche zu generieren, wird mithilfe mathematischer Verfahren (Interpolation, geometrische Modellierung, Triangulierung, Fehleranalyse), sowie unter Verwendung geeigneter Methoden und Werkzeuge der (Geo-) Informatik (Geo-Datenbanken, Computergraphik, Klassifizierung, Mustererkennung), ein digitales Höhenmodell generiert. (vgl. GAJSKI 2004: S. 13)

Manipulation: Der Arbeitsschritt der Manipulation ist erforderlich, um das zugrundeliegende digitale Höhenmodell, bei Erfordernis für geplante Analysen zu modifizieren und zu verfeinern. Die Manipulation beinhaltet das Bearbeiten, das Filtern und

das Zusammenführen von Höhenmodellen, sowie auch das Konvertieren von Datenstrukturen (z.B. TIN zu GRID). (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 7)

Interpretation, Visualisierung und Anwendung: Die Interpretation von Höhenmodellen beinhaltet schließlich die Auswertung bzw. Analyse, der für die jeweilige Anwendung relevanten Geländeparameter (eng. terrain parameters), um Informationen aus den Höhenmodellen zu extrahieren. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 7; HUTCHINSON & GALLANT 1999: S. 107) LI et al. (2005) sowie HENGL et al. (2003) teilen Geländeparameter nach ihrem Analysezweck ein. WILSON & GALLANT (2000) unterscheiden hingegen zwischen primären und sekundären Geländeparametern. Primäre Geländeparameter werden direkt berechnet, während sekundäre Geländeparameter aus der Kombination von zwei oder mehreren primären Parametern hervorgehen. Lange Zeit galten bei der Visualisierung von Höheninformationen, Konturlinien und die Geländeschummerung als einzige Darstellungsmethode. Durch die voranschreitende Entwicklung der Hardware- und Softwaretechnologien im Bereich der 3D-Modellierung, können nun auch schon fotorealistische Szenenwiedergaben und Animationen genutzt werden. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 8)

Anwendung: In den 1990er Jahren haben digitale Höhenmodelle mit der Entwicklung von Geoinformationssystemen (GIS) einen wichtigen Platz bei den Geobasisdaten eingenommen. Sie finden Anwendung bei der:

- Planung und Entwicklung von Bau-, Straßen- und Minenprojekten
- 3D-Animationen für Landschaftsgestaltung und Stadtplanung
- Analyse von Einzugsgebieten und hydraulischen Simulationen
- Sichtbarkeitsanalysen zwischen Objekten auf der Geländeoberfläche
- Geländeanalyse und Volumenberechnung
- Interpretation und Verarbeitung von Fernerkundungsbildern

(vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 8; LI et al. 2005: S. 10 f.)

4.3 3D-Datenformate

In den folgenden Kapiteln werden jene 3D-Datenformate vorgestellt, welche auf Basis der in der Arbeit verwendeten Literatur, am geläufigsten sind. Im Zuge der 3D-Geländeanalyse werden in der Masterarbeit im Kapitel 6 TIN, GRID und COLLADA verwendet.

4.3.1 TIN

Ein TIN (Triangulated Irregular Network) ist ein in den frühen 1970er Jahren durch PEUKER et al. speziell entwickeltes Vektordatenmodell, um Oberflächen mithilfe unregelmäßiger Dreiecksnetzen zu repräsentieren, welche ihrerseits mittels Kanten (engl. Edges) und Knoten (engl. Nodes $[x,y,z]$) abgebildet werden. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 12) Dieser Prozess wird als Triangulierung benannt.

„Triangulierung bedeutet, dass aus den gegebenen Punkten Dreiecke gebildet werden. Ist dies bei wenigen Punkten relativ trivial, so nimmt die Anzahl der möglichen Dreiecke mit der Anzahl der Punkte deutlich zu. Deshalb werden an den Triangulierungsalgorithmus bestimmte Bedingungen gestellt. Elementare Bedingung ist, dass eine maximale Anzahl von Dreiecken, deren Seiten sich nicht schneiden, entsteht.“ (FREIWALD & JANY 2005: S. 155)

Zur Berechnung des Dreiecksnetzes wird häufig die DELAUNAY-Triangulation herangezogen. Solche Dreiecke haben die Eigenschaft, dass innerhalb seines Umkreises kein anderer Knoten des Netzes vorkommt. (vgl. BARTELME 2005: S. 174) So wird auch beim Bauingenieurwesen Programm „Civil 3D“ von Autodesk, mit Hilfe der Delaunay-Triangulation ein TIN erzeugt. Wobei die Punkte so effizient miteinander verbunden werden, dass kein anderer Punkt innerhalb des Kreises aus den drei Punkten oder anderen Dreiecken liegt. (vgl. PETSCHKE 2012: S. 121) Um lange schmale Dreiecke, welche zu numerischen Ungenauigkeiten führen können, zu vermeiden, werden zusätzliche Kriterien, wie Gleichwinkeligkeit, Umfang und Flächeninhalt, zur Berechnung herangezogen. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 155)

Die tatsächliche Triangulation spielt sich in der Ebene ab, wobei Höhenwerte vernachlässigt werden. Dadurch werden auch Punkte mit gleichen Höhenwerten miteinander vermascht. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 155) Es entstehen sogenannte Horizontaldreiecke, die auch als kritische Flächen (Gipfel, Senken, Kuppen, Täler) bezeichnet werden. Probleme entstehen auch in stützpunktarmen Gebieten, wie Ebenen, Plateaus und Seen, die notfalls künstlich verdichtet werden müssen. (vgl. BARTELME 2005: S. 175) In TIN können auch markante Geländekanten und Aussparungsflächen miteinbezogen werden. Durch die Aufnahme von Strukturelementen und der variablen Punktdichte können sich TIN gut an die Beschaffenheit des Reliefs angleichen. Aufgrund der unregelmäßigen Punktanordnung müssen allerdings die topologischen Beziehungen der Punkte und Dreiecke explizit berechnet und gespeichert werden, wodurch Algorithmen für die Verarbeitung von TIN-Modellen komplexer sind, als die entsprechenden Verfahren für Rastermodelle. (vgl. GAJSKI 2004: S. 14; WEIBEL 1990: S. 147)

Die Speicherung eines TIN kann Dreieck für Dreieck geschehen. Bei diesem Sachverhalt beinhaltet der Datensatz eines TIN, die Referenznummer des Dreiecks, die x,y,z-Koordinaten der drei Punkte des Dreiecks und die Referenznummern der benachbarten Dreiecke. (vgl. EL-SHEIMY et al. 2005: S. 13 f.; FREIWALD & JANY 2005: S. 156)

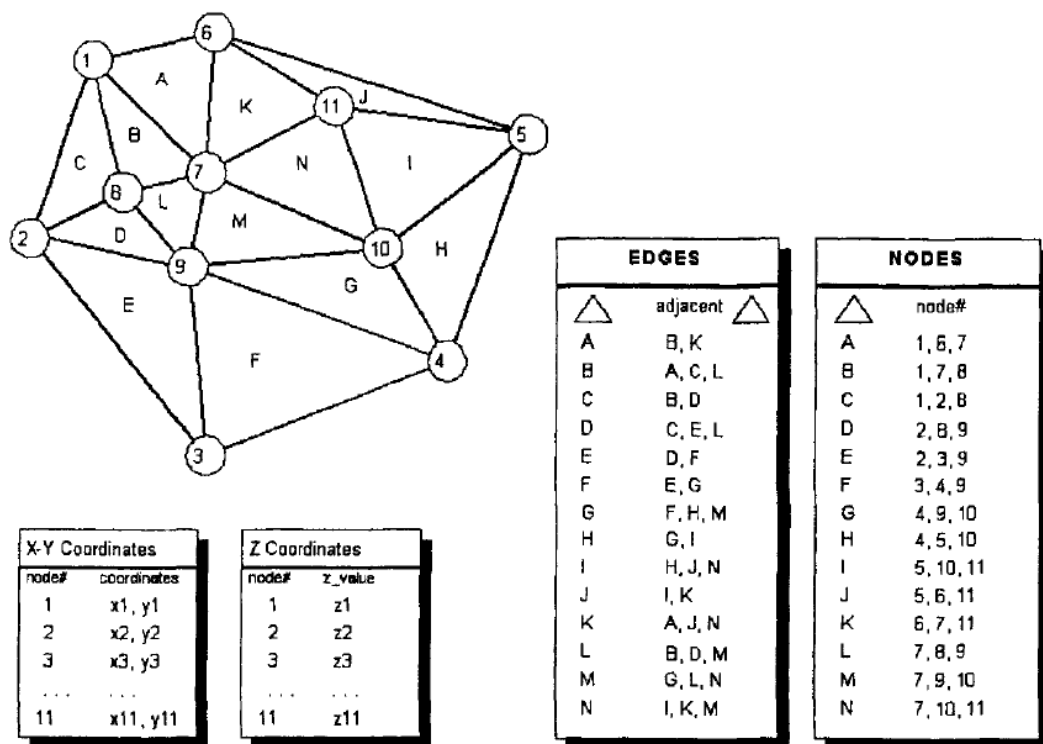


Abb. 21: Datenstruktur eines TIN (EL-SHEIMY et al. 2005: S. 14)

Durch die Verwendung der x,y,z-Koordinaten des Dreiecks, kann der Höhenwert an jedem willkürlichen Punkt einer TIN-Oberfläche interpoliert werden. Deshalb kann für jede einzelne Dreiecksfläche, Neigung, Ausrichtung, Flächeninhalt etc., bestimmt werden. Ob das TIN mit der realen Umgebung übereinstimmt, ist von der Qualität der Ausgangsdaten und dem verwendeten Triangulierungsalgorithmus abhängig. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 156) Letztendlich liegt es aber in der Verantwortung des jeweiligen Anwenders, dass zugrundeliegende Geländemodell hinsichtlich seiner Qualität und schließlich der Eignung für die beabsichtigte Verwendung, zu bewerten. (vgl. WECHSLER & KROLL 2006: S. 1088)

Die Vor- und Nachteile von TIN werden im Folgenden näher erläutert:

Ein wesentlicher Vorteil ist, dass TIN aus Punkt-, Linien-, Flächendaten und ASCII-Dateien erzeugt werden können. Zusätzlich ist der weitgehend automatisierte Ablauf, bei der Generierung eines TIN, zu erwähnen. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass es bei Visualisierungen meist möglich ist, verschiedenen Höhenwerten, verschiedene Farben zuzuweisen (Wasserflächen blau, Täler grün, Gipfel weiß), wodurch ein intuitiv verständliches Bild entsteht. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 156) Die Vorteile von TIN-Modellen gegenüber Rastermodellen bestehen in der niedrigen Anzahl erforderlicher Stützpunkte, insbesondere bei wenig komplexen Geländeoberflächen. Dadurch werden die Datenredundanz und der Speicherplatzbedarf klein gehalten. Zudem können markante Geländekanten in das TIN aufgenommen werden. Als Nachteile von TIN-Modellen gelten die komplexere Datenstruktur (insbesondere durch die Speicherung der topologischen Beziehungen), sowie der erhöhte rechentechnische Aufwand bei der Analyse und

Interpolation von Geländeoberflächen. (vgl. GAJSKI 2004: S. 15) Als weiterer negativer Aspekt zeigt sich, dass für die Triangulierung ausschließlich 2D-Daten entscheidend sind, wodurch die reale Lage der Daten nicht berücksichtigt wird. Daneben kann nicht mit einem LoD (Level of Detail) innerhalb eines TIN gearbeitet werden, da immer die gleiche Triangulierung gewählt wird. Dies bedeutet, dass weit entfernte und nicht sichtbare Gebiete immer vollständig berechnet werden. Das wirkt sich wiederum nachteilig auf die Leistung des Computers aus. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 156) ZHAO et al. (2015) räumt dem TIN-Modell, infolge der rasanten technischen Entwicklungen hinsichtlich hochauflösender Datenerfassungsmethoden (z.B. LiDAR), künftig einen höheren Stellenwert ein. (vgl. ZHAO et al. 2015: S. 224)

4.3.2 GRID

Das rasterbasierte Datenformat GRID wird meist zur Repräsentation von Oberflächen in GIS und zur Darstellung digitaler Geländemodelle eingesetzt. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 26) Bei der Rasterstruktur wird ein Gebiet in ein gleichmäßiges Gitter unterteilt. Jede Raster- bzw. Gitterzelle enthält den Wert eines Attributes. Bei einem digitalen Höhenmodell ist der Attributwert der Höhenwert, der die durchschnittliche Höhe in der Zelle angibt. (vgl. ABDUL-RAHMAN 1994: S. 62; GAJSKI 2004: S. 16; ZHOU 2017: S. 3) Im Rastermodell gibt es nur ein geometrisches Element, nämlich die Rasterzelle, welche in Anlehnung an Anwendungen der Bildverarbeitung als Pixel (2D) bezeichnet wird. (vgl. BARTELME 2005: S. 64)

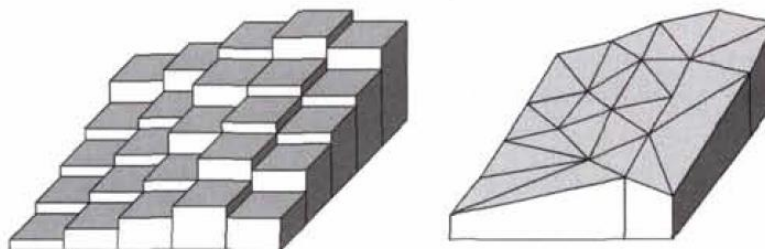


Abb. 22: Raster- und TIN-Modell (MALOY & DEAN 2001: S. 1294)

Höhenmodelle im Rasterformat (Raster-DHM) können auf direktem Wege aus gitterförmig erhobenen Messpunkten, auf indirektem Wege durch Interpolation unregelmäßiger Messpunkte oder durch Verdichtung bzw. Verdünnung („resampling“) bestehender Raster-DHM erzeugt werden. Infolge der regelmäßigen Anordnung der Zellen, kann die Datenstruktur als Matrix abgebildet werden, welche zugleich die topologischen (Nachbarschafts-)Beziehungen zwischen den Punkten enthält. Die Beziehungen müssen daher weder berechnet noch gespeichert werden. Der Nachteil der Rasterstruktur besteht darin, dass sich Raster-DHM nur in hoher Auflösung an die Komplexität des Geländes anpassen können, wodurch eine große Datenmenge und eine Vielzahl von überflüssigen Punkten (Datenredundanzen) erforderlich wird. (vgl. WEIBEL 1990: S. 147) Somit hat die Maschenweite des Rasters einen beachtlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse. Auch lassen sich Hangneigung und Exposition nicht eindeutig berechnen, da keine Ebene

durch vier Punkte im Raum widerspruchsfrei liegen kann. (vgl. GAJSKI 2004: S. 16 f.) Nichtsdestotrotz ist das Rastermodell vor allem wegen seiner guten Verarbeitungssperformance die populärste Datenstruktur für digitale Höhenmodelle. (vgl. ABDUL-RAHMAN & PILOUK 2008: S. 26 f.) Einige wichtige Speicherformate für Gitternetzbilder bzw. GRIDs zur Speicherung von digitalen Höhenmodellen sind das ASCII Grid (.asc), Digital Terrain Elevation Data (.dt0), Datei im Gleitkommaformat (.flt), Tagged Image File Format (.tif) und das Digitale Höhenmodell der United States Geological Survey [USGS] (.dem). Das TIF Format wird für die meisten Anwendungen empfohlen. (vgl. ESRI 2020c)

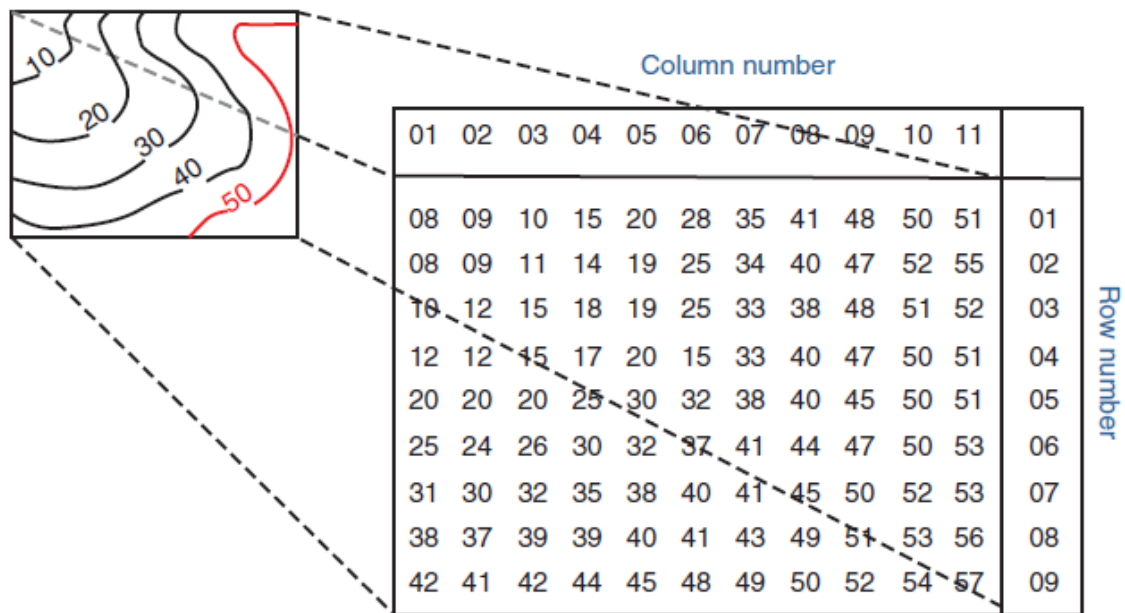


Abb. 23: Rasterdatenstruktur (ZHOU 2017: S. 3)

Das in ArcGIS verfügbare GRID Format (ASCII GRID - .asc) ist ein natives ESRI-Speicherformat für Rasterdaten, welches zwei Arten von GRID unterstützt. (ESRI 2020c)

- Ganzzahlen-GRID (Wertebereich: -2147483648 bis 2147483647)
- Float-GRID (Wertebereich: $-3,4 \times 10^{38}$ bis $3,4 \times 10^{38}$)

Bei einem Ganzzahlen-GRID werden die Attribute in einer Wertattributtabelle (VAT...Value Attribute Table) gesichert. In dieser Tabelle wird der Einzelwert (VALUE) und die Anzahl der Zellen (COUNT) gesichert. Bei Float-GRIDs fehlt die Wertattributtabelle, da die Zellen im GRID jeden beliebigen Wert annehmen können. Dadurch stellt der Zellenwert selbst das Attribut zur Positionsbeschreibung dar. Das Koordinatensystem dieser GRID wird durch die Zellengröße, die Anzahl der Zeilen und Spalten, sowie durch die xy-Koordinaten der oberen linken Ecke definiert. Durch diese Faktoren können die Position und die Fläche, der einzelnen Zellen, leicht ermittelt werden. (vgl. ESRI 2020b)

In nachfolgender Tab. 13 werden die Vor- und Nachteile der Datenformate TIN und GRID zusammengefasst dargestellt, da diese beiden Formate im praktischen Teil (Kapitel 6) der Masterarbeit Verwendung finden.

	Vorteile	Nachteile
TIN (Vektordatenmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • kann aus Punkt-, Linien, Flächendaten und ASCII-Dateien erzeugt werden • automatisierter Ablauf bei Generierung eines TIN • Visualisierung (verschiedene Höhenwerte, verschiedene Farben) → intuitiv • niedrige Anzahl an Stützpunkten erforderlich → Datenredundanz und Speicherplatzbedarf gering • markante Geländekanten können aufgenommen werden • gut an Beschaffenheit des Reliefs anpassbar (variable Punktdichte) • Neigung und Ausrichtung lassen sich eindeutig berechnen 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexe Datenstruktur (Speicherung topologischer Beziehungen) • erhöhter rechentechnischer Aufwand bei der Analyse und Interpolation • bei Triangulierung ausschließlich 2D-Daten entscheidend → reale Lage der Objekte nicht berücksichtigt • kein LoD (Level of Detail) → immer gleiche Triangulierung → negative Auswirkung auf die Leistung des Computers
GRID (Rasterdatenmodell)	<ul style="list-style-type: none"> • kann aus gitterförmig erhobenen Messpunkten oder durch Interpolation unregelmäßiger Messpunkte erzeugt werden • regelmäßige Anordnung der Zellen → Datenstruktur wird als Matrix abgebildet, enthält topologische Beziehungen (keine Speicherung) • gute Verarbeitungperformance 	<ul style="list-style-type: none"> • Raster-DHM nur in hoher Auflösung an Komplexität des Geländes anpassbar → große Datenmenge und Datenredundanz • Hangneigung und Exposition nicht eindeutig berechenbar

Tab. 13: Gegenüberstellung TIN und GRID

4.3.3 LiDAR Datenformat

Unter dem LAS-File Format, welches von der American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) erstellt und verwaltet wird, wird ein öffentliches Datenformat, welches zum Austausch von LiDAR-Daten geeignet ist, verstanden. Es handelt sich hierbei um ein binäres Format, welches als Alternative zum ursprünglichen verwendeten ASCII-Format gesehen werden kann. (vgl. GALLAY 2013: S. 6) Das LAS-Format speichert dreidimensionale Punktwolken und ist für die schnelle Übertragung bzw. den raschen Austausch einsetzbar. Grundsätzlich ist LAS für alle dreidimensionalen Punktinformationen verwendbar, obwohl es vorrangig für die Detektion von LiDAR-Daten konzipiert wurde. Heute ist es üblich LiDAR-Daten im LAS-Format darzustellen. Die Probleme des ASCII-Formats sind einerseits, dass es aufgrund der enormen Dateigröße zu einer langsamen Verarbeitung und zu einem hohen Speicherplatzbedarf beiträgt, somit eine niedrige Performance aufweist und andererseits spezifische Information (Metadaten) zu LiDAR-Daten, wie Datenumfang, Flugdatum, Flugzeit, Anzahl der Punktdatensätze usw., verloren geht. (vgl. ESRI 2020d)

ArcGIS Pro unterstützt LiDAR-Daten, die im LAS- oder Optimized LAS-Format (.ZLAS) vorliegen. Es gibt verschiedene Formate (Datasets), mit denen die LiDAR-Daten, je nach Anforderung, verwaltet und bearbeitet werden können. Dazu gehören das LAS-Dataset, das Mosaik-Dataset und die Punktwolken-Szenenebene (point cloud scene layer). Die einzelnen LAS- und ZLAS-Dateien können mit derselben Unterstützung, wie ein LAS-Dataset in ArcGIS Pro, verwendet werden. (vgl. ESRI 2020f)

In der folgenden Tabelle (Tab. 14) wird die LiDAR-Unterstützung in ArcGIS anhand eines LAS-Datasets oder einer LAS-Datei, eines Mosaik-Datasets und einer Punktwolken-Szenenebene nach ESRI (2020f) verglichen.

	LAS-Dataset oder LAS-Datei	Mosaik-Dataset	Punktwolken-Szenenebene
ArcGIS-Anwendungen	ArcCatalog, ArcScene, ArcMap, ArcGIS Pro	ArcCatalog, ArcGlobe, ArcMap, ArcGIS Pro	ArcGIS Pro
Speicherorte	Dateisystem	Geodatenbank	Szenenebenenpaket (Scene layer package)
Beziehungen zu den LAS-Quelldateien	Verweist auf Quelldateien	Verweist auf Quelldateien	Erstellt einen Cache aus Quelldateien
Größenbeschränkungen	Beschränkt durch Speicherplatz auf Datenträger	Beschränkt durch die von der Geodatenbank zugelassene Größe	Beschränkt durch Speicherplatz auf Datenträger
Oberflächen-einschränkungen	Unterstützt	Nicht direkt unterstützt (unterstützt, wenn in LAS-Dataset oder Terrain-Dataset vorhanden)	Nicht unterstützt
LiDAR-Eingabedateien	LAS-Dateien, ZLAS-Dateien	LAS-Dateien, Terrain-Datasets, LAS-Datasets	LAS-Dataset
LiDAR-Typen	Luftgestützt und terrestrisch	Luftgestützt	Luftgestützt und terrestrisch
Rendern	Punkte, triangulierte Oberflächen in 2D und 3D	Raster	In 3D angezeigte Punkte
Analyse	Werkzeuge, die Punktwolken oder TINs aufnehmen können. Verwendung mit 3D Analyst-Werkzeugen. Verwendung mit LAS-Dataset-Werkzeugen.	Verwendung mit Werkzeugen, die Raster-Daten aufnehmen können. Verwendung mit Spatial Analyst-Werkzeugen und anderen Raster-Dataset-Werkzeugen	Nicht unterstützt
Anzeige	Ausgedünnte Punkte. Anzeigeänderung, indem verschiedene Klassentypen oder Datentypen ausgewählt werden.	Verwendet den Cache für eine schnellere Anzeige. Anzeigeänderung, indem verschiedene Klassentypen oder	Ausgedünnte Punkte. Verwendet den Cache für eine schnellere Anzeige. Anzeige wird durch ändern der

	Anzeige wird durch ändern der Symbologie und/oder Punktfiler geändert.	Datentypen ausgewählt werden. Anzeige wird über das Dialogfeld Ebeneneigenschaften oder das Fenster Bildanalyse geändert.	Symbologie und/oder Punktfiler geändert.
Punktbearbeitung	Kann die Punkte bearbeiten, die sich in den LAS-Dateien befinden	Punkte können nicht bearbeitet werden	Punkte können nicht bearbeitet werden
Kombinieren mit Daten	Unterstützt LAS-Dateien, Feature-Klassen und Shapefiles	Unterstützt LAS-Dateien, LAS-Datasets, Terrain-Datasets und andere Raster-Formate	Unterstützt LAS-Datasets

Tab. 14: Vergleich LAS-Dataset, Mosaik-Datasets und Punktwolken-Szenenebene (aus ESRI 2020f)

Das LAS-Dataset bietet schnellen Zugriff auf große Mengen von LiDAR-Daten, ohne dass Daten konvertiert oder importiert werden müssen. Hierbei kann entschieden werden, ob mit mehreren tausenden LAS-Dateien oder nur mit wenigen gearbeitet werden soll. LAS-Datasets können bearbeitet werden, um Aktualisierungen an der Klassifizierung in der LAS-Quelldatei durchzuführen oder um Fehler zu korrigieren bzw. Verbesserungen vorzunehmen, die zu einem besseren Oberflächenmodell führen. (vgl. ESRI 2020f)

4.3.4 3D Shapefiles (MultiPatch)

Seit 1997 gibt es das MultiPatch Format von ESRI, um 3D-Objekte in ArcGIS repräsentieren zu können. MultiPatch Features bestehen aus dreieckigen Streifen, dreieckigen Fächern, Dreiecken oder Ringen (siehe Abb. 24) und können zur Konstruktion von 3D-Objekten in ArcGIS oder zum Austausch von Daten mit nicht GIS 3D-Softwarepaketen, wie COLLADA und SketchUp, verwendet werden. (vgl. ESRI 2008: S. 1)

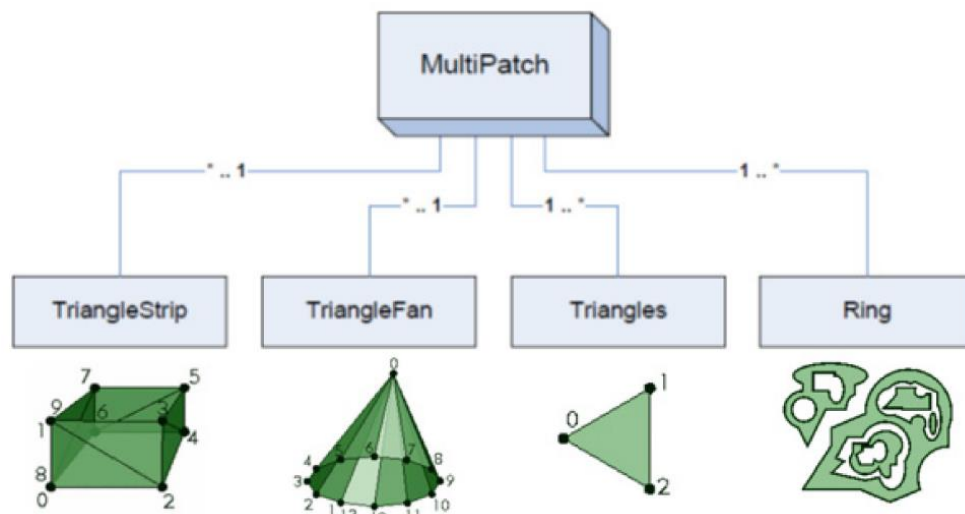


Abb. 24: Struktur des MultiPatch Datenformates und Beispiele der Basistypen (ESRI 2008: S. 2 ff.)

Eine MultiPatch-Datei beinhaltet eine große Anzahl an unterschiedlichen Geometrien, welche als Ganzes ein 3D-Objekt darstellen. Es entstehen unterschiedliche Formen, wenn die vier zuvor erwähnten Basistypen kombiniert werden. Die MultiPatch-Dateien werden zum einen durch die Editierfunktion in ArcGIS oder zum anderen durch Umwandlung aus anderen 3D Formaten erstellt. (vgl. ESRI 2008: S. 1 f.) Die 3D-Shapefiles speichern neben den xy-Koordinaten auch die z-Werte, welche zum Erstellen von Mustern verwendet werden. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 154) Der Basis-z-Wert eines MultiPatches kann durch zu Hilfenahme eines numerischen Feature-Attributes modelliert werden. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass diese Möglichkeit nicht alle Interaktions- und Analyseoptionen unterstützt, welche bei der Anwendung eingebetteter z-Werte auszuwählen sind. Geschlossene MultiPatch Features können ein Volumen korrekt definieren, wodurch sie in zusätzlichen Analysewerkzeugen verwendet werden können (z.B. Union 3D, Intersect 3D). (vgl. ESRI 2008: S. 2 ff.)

4.3.5 Terrain

Nach ESRI (2020e) lässt sich ein Terrain bzw. Terrain-Dataset als eine TIN-basierte Oberfläche erklären, welche mehrere Auflösungen besitzt. Diese ergeben sich aus mehreren Messwerten, welche als Features in einer Geodatenbank gesichert sind. Terrain-Daten werden in der Regel aus LiDAR-, SONAR-, oder photogrammetrischen Daten produziert. (vgl. ESRI 2020e)

Terrains beinhalten Feature-Klassen und Regeln. Häufig verwendete Feature-Klassen, die als Datenquelle für Terrains dienen:

- **Multipoint Feature Klassen**, die aus LiDAR und SONAR Daten erstellt wurden
- **3D-Punkt oder Linien Feature Klassen**, welche durch optische Auswertung photogrammetrischer Aufnahmen erstellt wurden

- **Untersuchungsgebietsgrenzen**, mit welchen die Grenzen des Terrain-Datasets festgelegt sind

Die Richtlinien des Terrain-Datensatzes geben vor, wie eine Oberfläche anhand von Features bestimmt wird. Die Regeln legen beispielsweise fest, dass Features, welche die Linien für die Gehsteigsbegrenzungen an Straßen beinhalten, als harte Bruchkanten integriert werden. Dadurch entstehen die erwünschten linearen Einschnitte in der Oberfläche. Mittels Regeln kann weiters die Integration einer Feature-Class in Abhängigkeit vom entsprechenden Anzeigemaßstab bestimmt werden. Die Darstellung der Gehwegsabgrenzungen ist bei mittlere bis große Maßstäbe notwendig. Anzeigeleistungen können durch Regeln optimiert werden, wenn bei kleineren Maßstäben die Anwendung der Begrenzungen unterbunden wird. Ein Terrain-Dataset in der Geodatenbank greift auf die ursprünglichen Feature-Klassen zurück. Oberflächen werden weder als Raster noch als TIN gesichert. Die Daten werden hingegen so zusammengestellt, dass Informationen rasch abgefragt werden und die TIN-Oberfläche im laufenden Betrieb (on-the-fly) erstellt werden kann. Durch die Erstellung von „Terrainpyramiden“ werden ausschließlich die notwendigen Daten aus der Geodatenbank abgerufen, die bei der Erzeugung der Oberfläche des Gebietes mit einem definierten Detaillierungsgrad notwendig sind. Der Benutzer kann die geeignete Pyramidenebene selbstständig bei den Analysefunktionen auswählen oder sie wird relativ zum momentanen Darstellungsmaßstab eingesetzt, sodass die passende Auflösungsebene angewendet wird und die Genauigkeitsanforderungen eingehalten werden. (vgl. ESRI 2020e)

Das Terrain-Dataset macht, gemeinsam mit den unterschiedlichen Werkzeugen, das Bearbeiten, Abfragen, Aktualisieren, Verwalten und Speichern von vektorbasierten Oberflächendaten möglich. Es können auch Oberflächen aus den gesammelten Messdaten abgeleitet werden. TIN und Raster können basierend auf Interessensbereichen (AOI) und Detaillierungsebenen (LOD-Level of Detail) aus Terrains generiert werden. (vgl. ESRI 2020e)

Ein Terrain-Dataset wird in ArcGIS Pro als 2D-Ebene unterstützt, wobei es zur Symbolisierung von Höhen, Neigungen, Ausrichtung usw. verwendet und in 3D auf eine Oberfläche gelegt werden kann. Es kann hingegen in der 3D-Ansicht von ArcGIS Pro nicht als Oberflächenquelle verwendet werden. Um dies zu umgehen, kann das Terrain in ein Raster-DHM konvertiert und das entstandene GRID als Oberflächenquelle verwendet werden. (vgl. ESRI 2020e)

4.3.6 DXF

Laut FREIWALD & JANY ist das DXF-Format (Drawing Interchange Format) ein weit verbreitetes CAD-Datenformat, welches auf dem Gebiet der Konstruktion als Standardformat für den Austausch von Daten zum Einsatz kommt. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 152) Das Format wurde von der Firma Autodesk im Jahr 1982 entwickelt. (vgl. ESRI 2020h) Dieses Format hat den großen Vorteil, dass die Datenstruktur offengelegt und hervorragend beschrieben ist, wodurch es betriebssystemunabhängige Datenaustausche

ermöglicht. Weiters haben andere CAD Herstellerfirmen die Möglichkeit das DXF-Format zu lesen und zu speichern, wodurch dieses als Industriestandard angesehen werden kann. Die Dokumentation von DXF ist im Unterschied zum AutoCAD-spezifischen DWG-Format frei verfügbar. DXF-Dateien können einerseits ASCII- oder andererseits binärcodiert sein, wobei die ASCII-Codierung häufiger vorkommt. (vgl. FREIWALD & JANY 2005: S. 153) DXF-Dateien haben grundsätzlich folgenden Aufbau:

- Header: Hier sind AutoCAD interne Systemvariablen abgelegt.
- Classes: Definition von Klassen
- Tables: Definition von Linientypen, Layer, Benutzerkoordinatensysteme, Textstile
- Blocks: diverse Informationen über die verwendeten Elemente
- Entities: Beschreibung graphischer Elemente
- Objects: Beschreibung nicht graphischer Bildelemente
- Thumbnailimage: Bildvorschau

4.3.7 KML

Das KML-Format (Keyhole Markup Language) ist ein XML-basiertes Dateiformat zur Darstellung von Information in einem geografischen Kontext. Entwickelt wurde das Format von Google Inc. und ist als Standardformat zum Austausch und zur Anzeige von unterschiedlichen Daten mit Raumbezug für viele erdbasierte Browser, wie Google Earth oder ArcGIS Earth/ ArcGIS Pro. KML, in der Version 2.2, ist ein internationaler Standard, der vom Open Geospatial Consortium (OGC) gepflegt wird. Eine einzelne KML-Datei kann Objekte unterschiedlicher Geometrietypen enthalten und sogar Vektor- und Rasterdaten beinhalten. Neben Punkt-, Linien- und Polygonvektordaten werden auch 3D-Modelle, Bodenüberlagerungen und Netzwerkverbindungen in einem KML gespeichert. (vgl. ESRI 2020i; GOOGLE DEVELOPERS 2020)

4.3.8 COLLADA

Das COLLADA-Format (COLLABorative Design Activity) ist ein XML-basiertes offenes Austauschformat für Daten zwischen verschiedenen 3D-Programmen. Es wird durch die Khronos Group, ein gemeinnützigen Technologiekonsortium, verwaltet und von der ISO als öffentlich zugängliche Spezifikation (ISO / PAS 17506) übernommen. Bei COLLADA geht es nicht nur um den Austausch von Modellen und Texturen, auch die Einstellungen (Effekte, Animationen, Kinematik, Physik) und angewendete Änderungsschritte sollen von einem Programm zu einem anderen verlustfrei übertragen werden können. Programme welche COLLADA-Files unterstützen sind ArcGIS, ArchiCAD, Autodesk InfraWorks, BricsCAD, Google Earth, Microstation, um nur einige zu nennen. Die COLLADA-Dateien tragen die Dateierdung. „dae“ (digital asset exchange) und werden über ein XML Schema strukturiert. (vgl. THE KHRONOS GROUP 2011a)

Anwendungsgebiete ausführen. Es deutet daraufhin, dass einige Firmen hingegen keine internen Informationen über die verwendeten Programme preisgeben wollen.

Die Grundgesamtheit stellen bestimmte Fachbereiche im Ziviltechnikerverzeichnis (vgl. BUNDESKAMMER DER ARCHITEKTEN UND INGENIEURKONSULENTEN 2021) dar und beträgt rund 1500 für Wien und Niederösterreich. Aufgrund der niedrigen Anzahl an Rückmeldungen der 61 Stichproben ist es offensichtlich, dass die Ergebnisse der Umfrageauswertung Schwächen in Hinblick auf die statistische Signifikanz aufweisen.

Die vorhandenen Daten und deren Ergebnisse wurden in Diagrammen wie folgt dargestellt:

In Abb. 26 wird ersichtlich, dass die befragten Firmen vorwiegend Programme verwenden, um 2D-Daten darzustellen. Sechs von den acht Firmen zählen 3D-Geländemodellierungen zu ihren Arbeitsaufgaben. Fünf von acht Firmen nützen die Programme, um 3D-Daten darzustellen und nur die Hälfte der teilnehmenden Unternehmen führt 3D-Geländeanalysen durch.

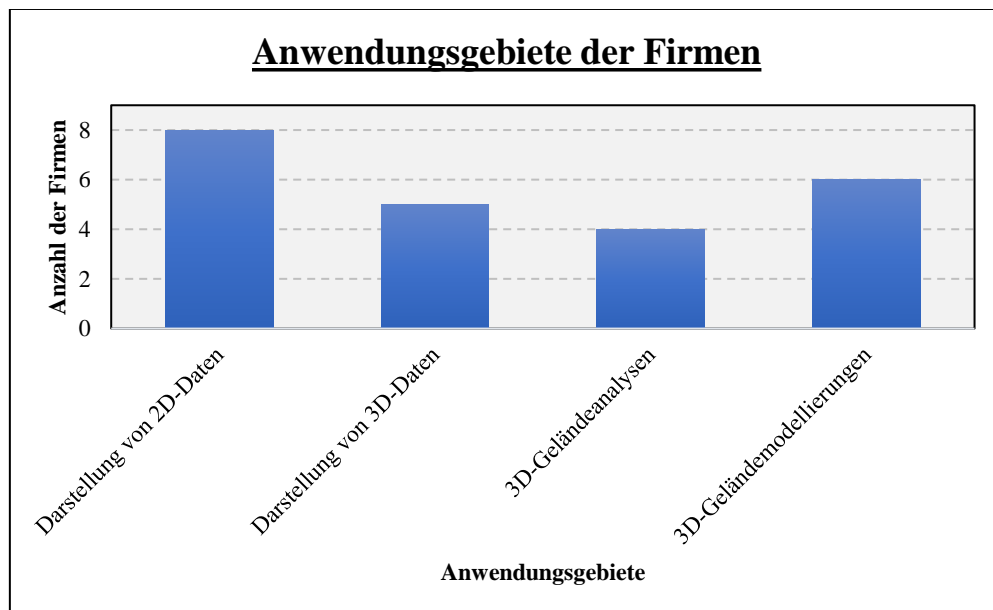


Abb. 26: Auswertung der Anwendungsgebiete der Firmen

Bei der Auswertung der Programme, die bei der Darstellung für 2D-Daten angewendet werden, wird deutlich, dass AutoCAD bei den meisten Firmen Verwendung findet. Weiters werden QGIS und ArcGIS für diese Anwendungsbereiche herangezogen. In Abb. 27 werden auch die zusätzlichen Programme aufgelistet. Die dunkelblau eingefärbten Spalten weisen in folgenden Tabellen darauf hin, dass es sich um eine GIS-Software handelt, die grünen Spalten stellen eine CAD-Software dar und die hellblauen Spalten kennzeichnen ein hybrides System aus beiden Kategorien. Bei der Evaluierung der Excel-Files wurde ersichtlich, dass die verwendeten Programme für die Darstellung von 2D-Daten durchschnittlich täglich bzw. wöchentlich eingesetzt werden. Die Unternehmen sind durchschnittlich „sehr bis eher zufrieden“ mit den zur Anwendung gekommenen Programmen.

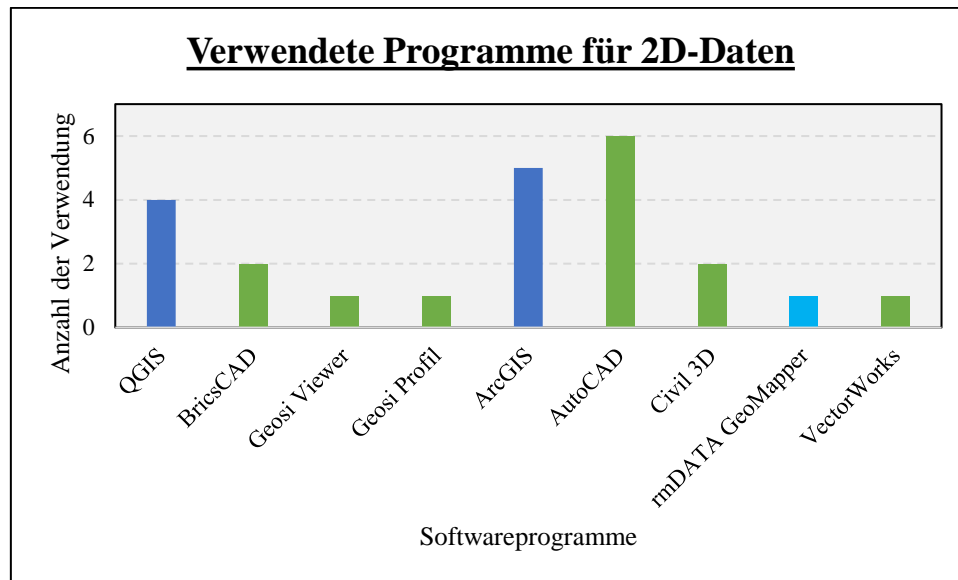


Abb. 27: Auswertung der verwendeten Programme für die Darstellung von 2D-Daten

Bei der Darstellung von 3D-Daten haben nur fünf von den acht Unternehmen angegeben, diesen Arbeitsbereich zu nutzen. Bei der Auswertung der Programme zeigt sich, dass vier von den fünf Firmen bei der Darstellung von 3D-Daten auf Civil 3D zurückgreifen. Auffällig ist, dass fast jede Firma ein zusätzliches Programm für dieses Anwendungsgebiet in Verwendung hat (siehe Abb. 28). Die Auswertung der Excel-Files hat ergeben, dass die verwendeten Programme für die Darstellung von 3D-Daten im Durchschnitt wöchentlich eingesetzt werden. Die Unternehmen sind mit den angewendeten Programmen im Durchschnitt „sehr bis eher zufrieden“.

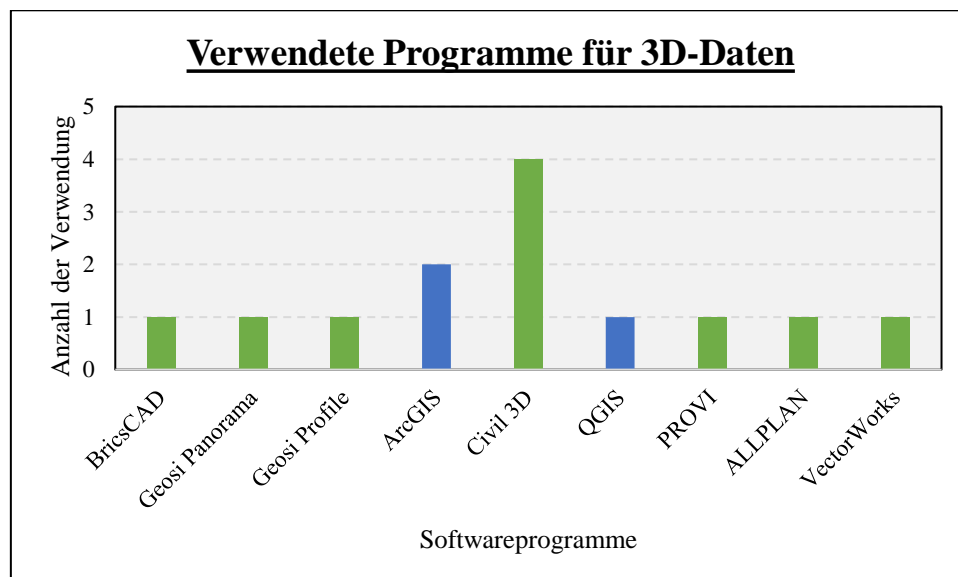


Abb. 28: Auswertung der verwendeten Programme für die Darstellung von 3D-Daten

Nur die Hälfte der befragten Firmen geben an 3D-Geländeanalysen durchzuführen. Hierbei werden ArcGIS und Civil 3D von jeweils zwei bzw. drei der vier Firmen genutzt. Andere Programme werden in Abb. 29 aufgezeigt. Die Auswertung der Excel-Files verdeutlicht,

dass die verwendeten Programme für die 3D-Geländeanalyse im Durchschnitt „monatlich“ zur Anwendung kommen. Die Unternehmen sind durchschnittlich „eher zufrieden“ mit den angewendeten Programmen.

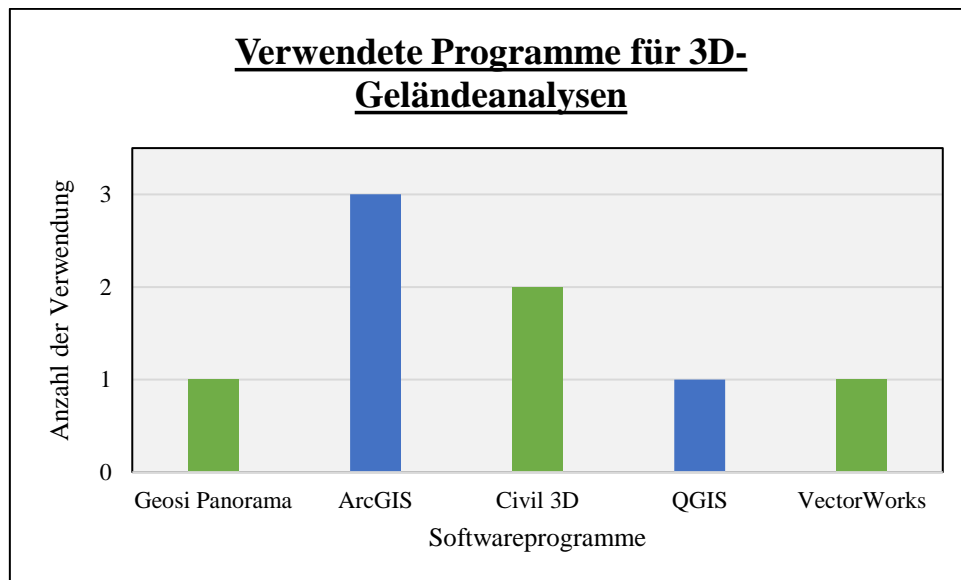


Abb. 29: Auswertung der verwendeten Programme für 3D-Geländeanalysen

Sechs von acht Firmen verwenden Programme, um 3D-Geländemodellierungen zu bearbeiten. Das Softwareprogramm Civil 3D kommt bei vier von den sechs Firmen zur Anwendung. Civil 3D wird daher bei den meisten Firmen für Anwendungsbereiche in 3D verwendet. In Abb. 30 wird ersichtlich, dass einige Firmen auf verschiedene Programme zurückgreifen. Die Auswertung der Excel-Files ergibt in diesem Fall, dass die verwendeten Programme für die 3D-Geländemodellierung im Durchschnitt „monatlich“ angewendet werden. Die Unternehmen sind durchschnittlich „eher zufrieden“ mit den angewendeten Programmen. Bei genauerer Betrachtung des ausgewerteten Excel-Files wird deutlich, dass die Zufriedenheit mit Civil 3D bei drei von vier Firmen mit „sehr zufrieden“ beurteilt wurde.

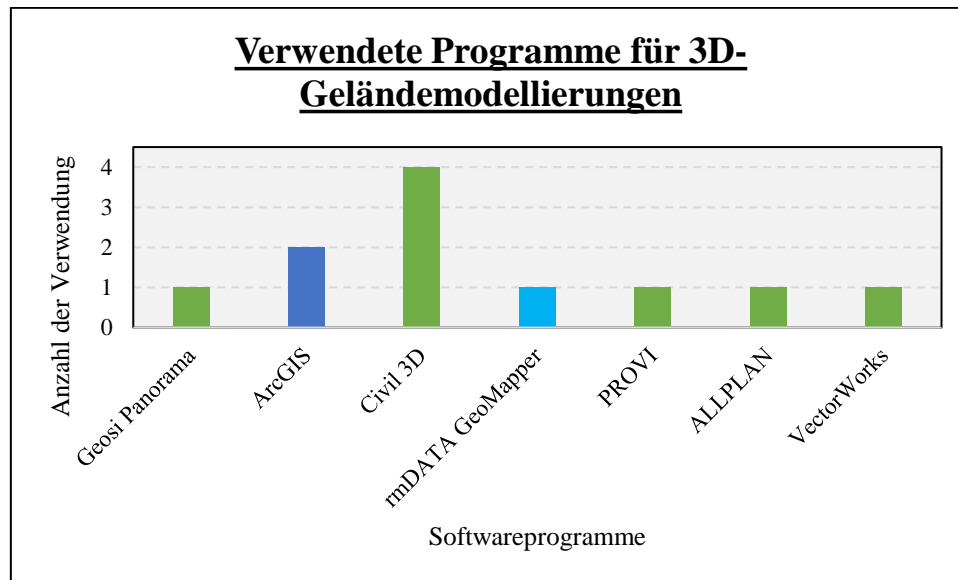


Abb. 30: Auswertung der verwendeten Programme für 3D-Geländemodellieren

Aufgrund der Rückmeldungen der Ziviltechniker, Geometer und Planungsbüros, kommt klar zum Vorschein, dass im 3D-GIS Bereich noch enormes Potenzial vorhanden ist. Bei der Auswertung der Fragebögen zeigt sich, dass einige Firmen noch nicht mit der dritten Dimension arbeiten. Einige Firmen arbeiten bereits im 3D-Bereich, jedoch ist die Häufigkeit der Anwendung sehr gering. Hierbei wird großteils auf kostenpflichtige Programme zurückgegriffen, wobei für Geländeverschnidungen Civil 3D von Autodesk mit Abstand am häufigsten eingesetzt wird und auch die Zufriedenheit mit diesem Programm am größten ist. Das Einsetzen von GIS- und CAD-Programmen für die Darstellung von 2D- und 3D-Daten, 3D-Geländeanalysen und 3D-Geländemodellierungen hat sich in den verschiedenen Berufsfeldern etabliert. Für Geländeverschnidungen werden GIS-Programme hingegen kaum eingesetzt. Auch die Zufriedenheit beim Einsatz von GIS-Programmen ist in diesem Fall gegenüber den CAD-Programmen geringer. Es ist daher spannend, wie die Ergebnisse bei der späteren Durchführung der 3D-Geländeverschnidung zwischen dem GIS- und CAD-Programm korrelieren. Die vollständige Auswertung der Fragebögen befindet sich im Kapitel Anhang in Tab. 23 bis Tab. 26.

Bei der Durchführung der 3D-Geländemodellierung für Kranstellflächen bei der Windparkplanung werde ich daher auf das CAD-Programm Civil 3D zurückgreifen, da dieses bei der Umfrage am häufigsten für diese Art von Analysen herangezogen wurde und die beste Bewertung bei der Zufriedenheit erhielt. Wie bereits im Kapitel 1.5 laut GUO et al. (2020) und CHENG & JIANG (2013) erwähnt, wird Civil 3D im Straßenbau zur Erstellung von Böschungsflächen und zur Berechnung von Erdvolumen verwendet. Ein weiterer Grund ist die Verfügbarkeit der Studentenlizenz von Civil 3D, wodurch dieses Programm kostenlos genutzt werden konnte. Da ArcGIS Pro während des Studiums vorwiegend angewendet wird und meine Arbeitsstelle ebenfalls auf dieses Softwareprogramm zurückgreift, fiel die Entscheidung bei der Wahl des GIS-Programms auf ArcGIS Pro. Die 3D-Geländemodellierung wird daher mit Civil 3D und ArcGIS Pro durchgeführt. Es soll ermittelt werden, mit welchem Programm die Analyse effizienter und schneller durchgeführt werden kann.

6 Praktische Durchführung der Geländeanalyse

In diesem Kapitel wird das Projektgebiet kurz beschrieben und die Datengrundlage vorgestellt. Anschließend folgt die Auswahl der Softwareprodukte für die Analysen, anhand der durchgeführten Befragung von Ziviltechniker, Geometer und Planungsbüros. Daraufhin werden die 3D-Geländeanalysen mit dem GIS- bzw. CAD-Programm durchgeführt und zuletzt die jeweiligen Ergebnisse miteinander verglichen bzw. Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

6.1 Überblick Projektgebiet

Das Projektgebiet liegt im Weinviertler Hügelland, auch bekannt unter der Waschbergzone, zirka 25 km nordöstlich von Wien (siehe Abb. 31). Das Projektgebiet befindet sich in den Katastralgemeinden Schrick und Kettlasbrunn, welche aufgrund des hügeligen bzw. kuptierten Geländes und der Nähe zu meiner Heimatgemeinde ausgewählt wurde. Durch Abb. 32 kann die Landschaftsstruktur im vorliegenden Gebiet gut nachvollzogen werden.

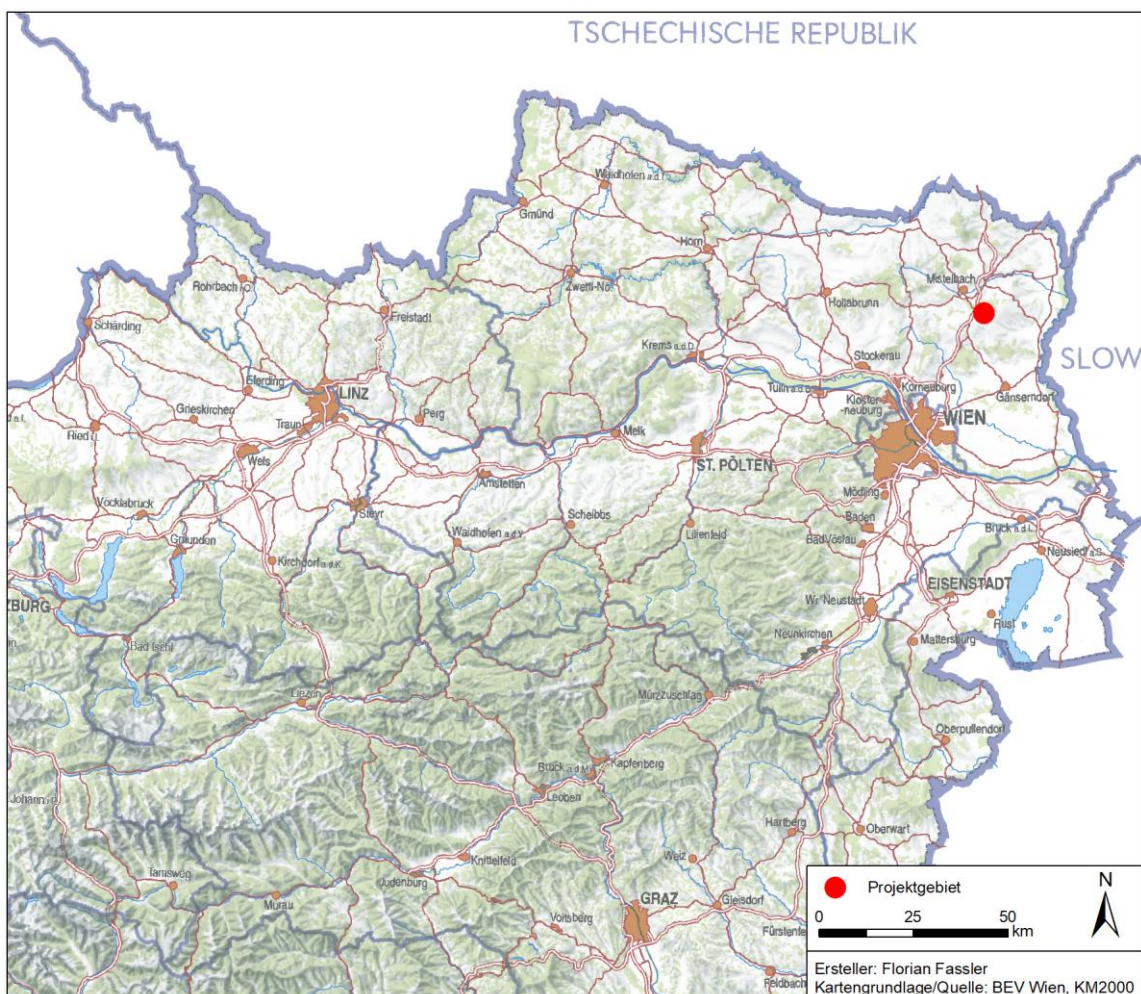


Abb. 31: Übersicht Projektgebiet (eigene Bearbeitung (2021))



Abb. 32: Landschaftsstruktur – Katastralgemeinde Schrick (eigene Aufnahme, 2020)

In diesem Gebiet wurden drei Standorte für Windkraftanlagen, welche den Anforderungen der Raumordnung entsprechen, gewählt, um die Thematik der Geländemodellierung von Kranstellflächen der Windkraftanlagen zu veranschaulichen, siehe nachfolgende Abb. 33.

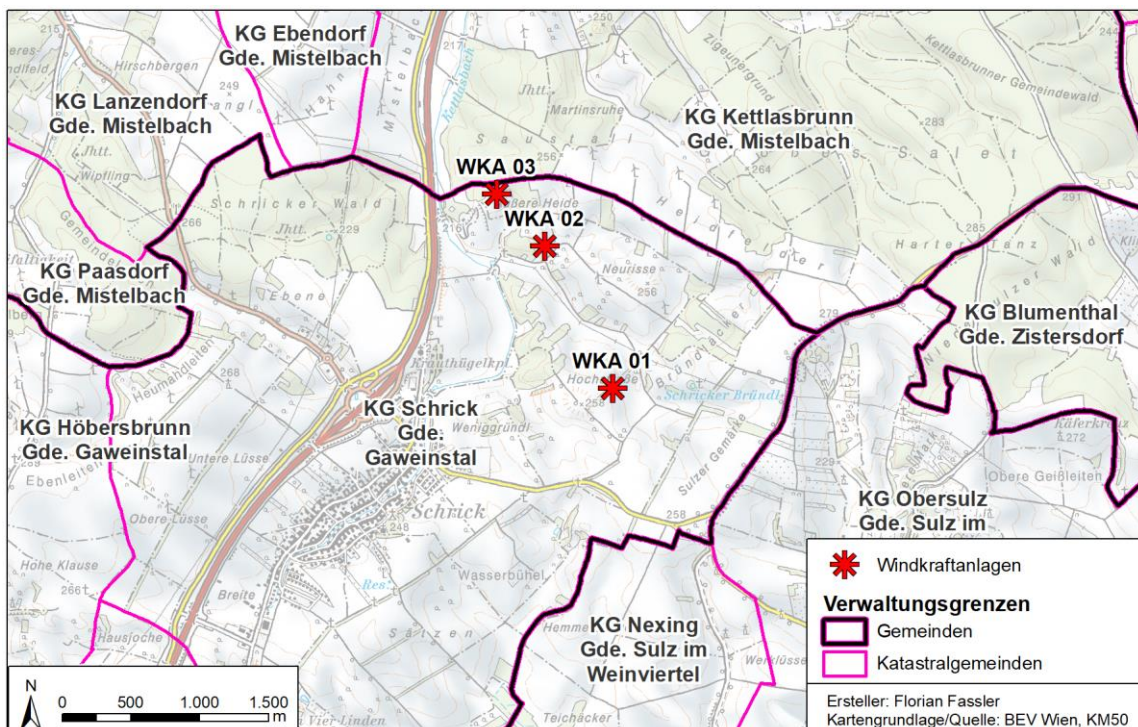


Abb. 33: Übersicht Windkraftanlagenstandorte (eigene Bearbeitung (2021))

Genauer betrachtet handelt es sich beim Projektgebiet im Weinviertler Hügelland um das Gaweinstaler und Ladendorfer Hügelland, welche sich im Übergangsbereich der Molassezone und Wiener Becken befinden. In diesem hügeligen Gebiet wird intensiver Ackerbau betrieben. Die steilen Lagen umfassen kleinteilige Gehölzstreifen, wobei der Brachenteil beträchtlich ist. Die Charakteristika des Ladendorfer Hügellands bestehen aus wechselnden standörtlichen Verhältnissen in Abhängigkeit von der pedologischen Situation bzw. vom geologischen Untergrund (Löß, Tertiärsedimente, Schotter). Beim Gaweinstaler Hügelland wechseln standörtliche Verhältnisse in Abhängigkeit von der pedologischen Situation (Lößbrohböden, Tschernoseme, entkalkte Tschernoseme) sowie der morphologischen Ausprägung mit entsprechend unterschiedlichen Verzahnungen der Nutzung. (vgl. AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG - ABTEILUNG NATURSCHUTZ (RU5) 1998: S. 30-31, 33, 65; THENIUS 1974: S. 52 ff.)

6.2 Datengrundlage

Die Datengrundlage für die Erstellung des Digitalen Geländemodells (DGMs) besteht aus einzelnen Kartenblättern im Rasterformat vom Land Niederösterreich, welche dankenswerterweise von den Gemeinden Gaweinstal und Mistelbach kostenlos für diese Masterarbeit zur Verfügung gestellt wurden. Hierbei handelt es sich um ein Digitales Geländemodell, welches auf Basis von Airborne Laserscandaten (siehe Kapitel 3.2 LiDAR) erstellt und im ESRI ASCII GRID Format (siehe Kapitel 4.3.2 GRID) gespeichert wurde. Die Rasterdaten liegen im räumlichen Bezugssystem MGI_Austria_GK_East (EPSG-Code: 31256) vor. Die Auflösung der Daten beträgt einen Meter. Das österreichweit-kostenlose digitale Geländemodell ist vergleichsweise in einer Auflösung von zehn Meter vorhanden und hätte bei der Verwendung zufolge, dass die Ergebnisse weniger aussagekräftig wären.

Da sich die Windkraftanlagenstandorte in Bereichen von unterschiedlichen Kartenblättern befinden, musste aus den einzelnen ASCII-Files (Elementen), ein zusammenhängendes DGM erstellt werden. Folgende Arbeitsschritte müssen dabei durchgeführt werden:

DGM-Daten aufbereiten

Zuerst muss der Raumbezug den einzelnen ASCII-Files zugewiesen werden. In diesem Fall ist bekannt, dass es sich um Geländemolldaten mit einer Auflösung von einem Meter handelt, welche sich im Gauß-Krüger System (EPSG: 31256) befinden. Daher muss in ArcGIS Pro über den Catalog zu den Rasterdaten navigiert und bei den zu verwendeten ASCII-Files über die Properties bei Spatial Reference (Raumbezug) das gewünschte Koordinatensystem gewählt werden (siehe Abb. 34).

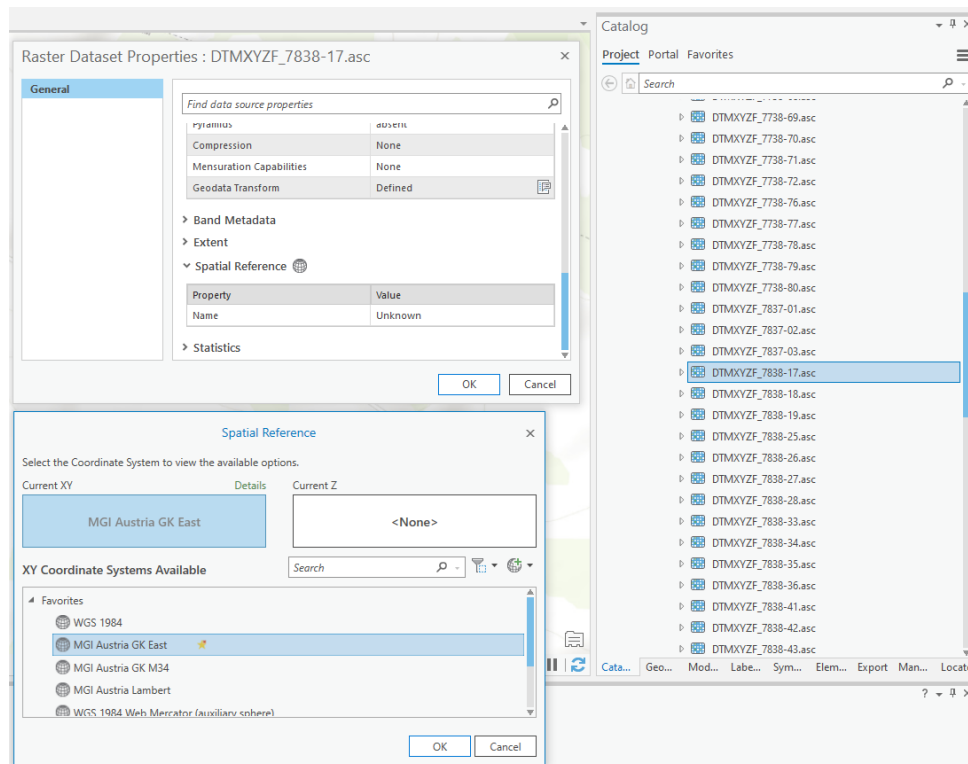


Abb. 34: Koordinatensystem zuweisen

Nachdem der Raumbezug für alle ASCII-Files eingestellt wurde, können diese in ArcGIS Pro mittels drag & drop hinzugefügt werden. Hier kann überprüft werden, ob die Rasterdaten richtig verortet sind (siehe Abb. 35).

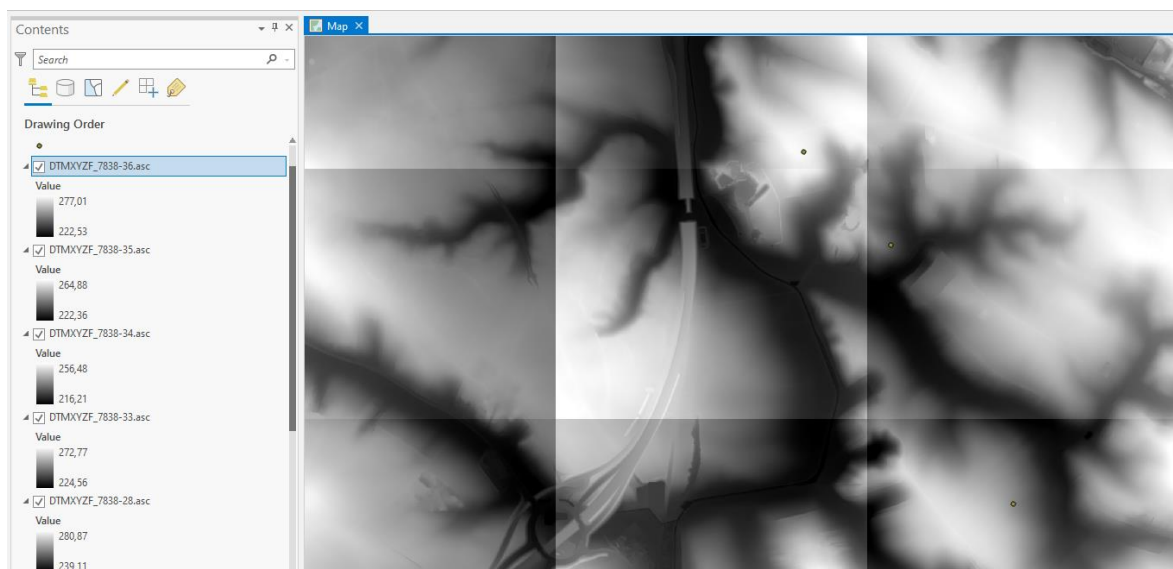


Abb. 35: Die einzelnen ASCII-Files

Anschließend muss ein Mosaic Dataset in einer File Geodatabase erzeugt werden, in welches die ASCII-Files integriert werden. Dies erfolgt, indem das Mosaic Dataset selektiert wird und mittels Add Rasters die ASCII-Files ausgewählt werden (Tool: Add Rasters To Mosaic Dataset). Zu Beginn wird nur eine graue Fläche mit den Footprints der Mosaik- und

Rahmen angezeigt. Über die Symbology Einstellungen des Mosaic Datasets kann auf den Typ „Stretched“ umgestellt werden, wodurch die niedrigsten und die höchsten Höhenwerte des Datasets angezeigt werden und der Farbverlauf an diese angepasst wird (siehe Abb. 36).

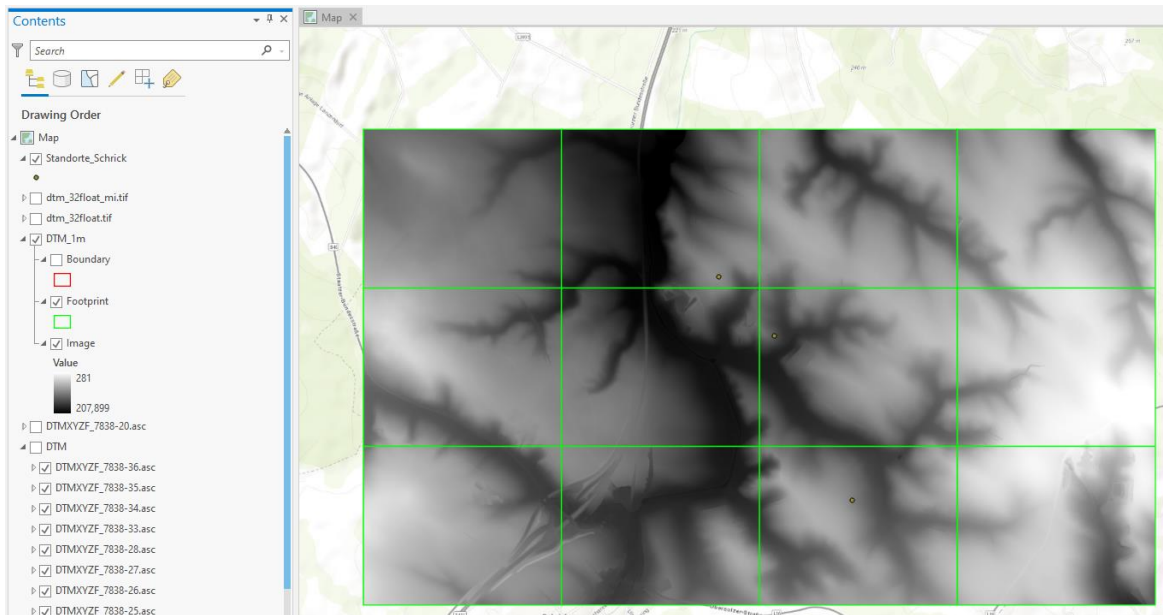


Abb. 36: Mosaic-Dataset

Mit dem Tool „Mosaic To New Raster“ kann aus dem Mosaic Dataset zusätzlich ein zusammenhängendes Rasterbild (TIF) erzeugt werden, welches als Grundlage für die weiteren Analysen herangezogen wird (siehe Abb. 37). Bei diesem Tool ist es wichtig, beim zu erzeugendem Raster, den Dateityp (in diesem Fall: „.tif“) anzugeben, da ansonsten mit einer Fehlermeldung zu rechnen ist.

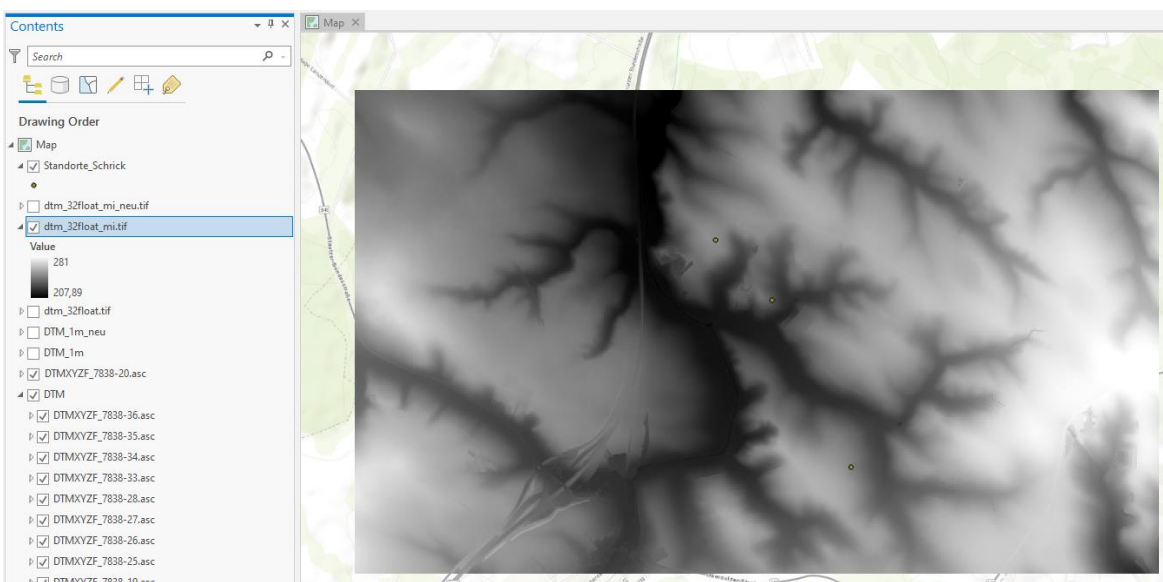


Abb. 37: Erzeugtes Rasterbild (TIF)

Bei diesem TIF kann nun in ArcGIS Pro über die „Symbology“ eingestellt werden, dass vom aktuell angezeigten Ausschnitt Statistiken berechnet werden sollen. Dadurch kommt es

zu einer dynamischen Bereichsanpassung, wobei die Anzeige je nach Zoomstufe optimiert wird (siehe Abb. 38).

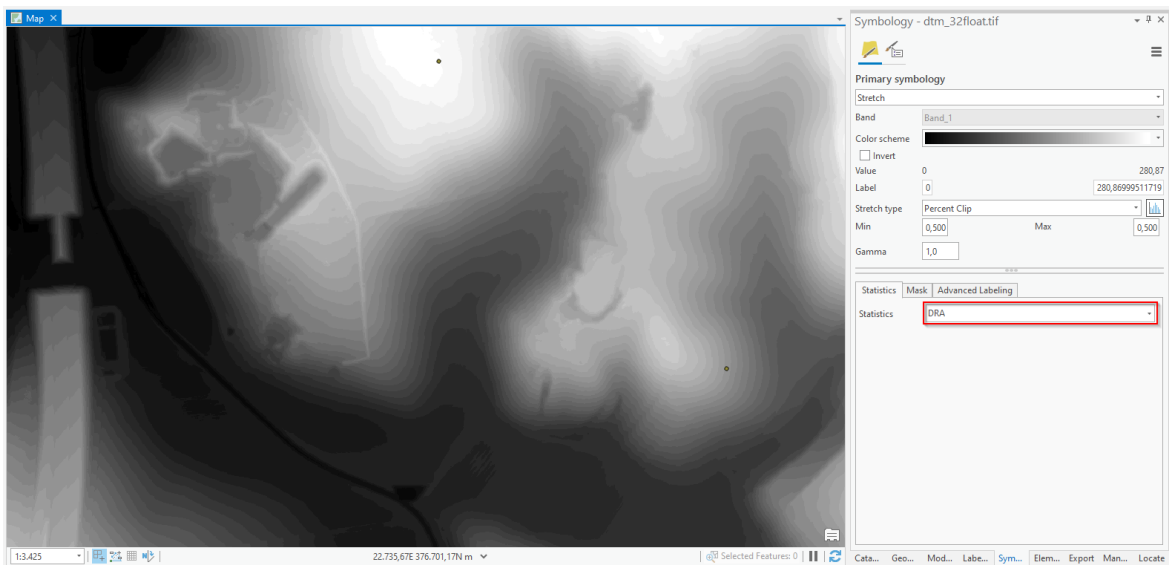


Abb. 38: Dynamische Bereichsanpassung

In folgender Abb. 39 wird die Ausdehnung des erzeugten Rasters mit seiner Lage in der Umgebung dargestellt. Dieses Rasterformat wird in weiterer Folge der Arbeit als Datengrundlage bei der 3D-Geländeanalyse für das GIS- und CAD-Programm dienen.

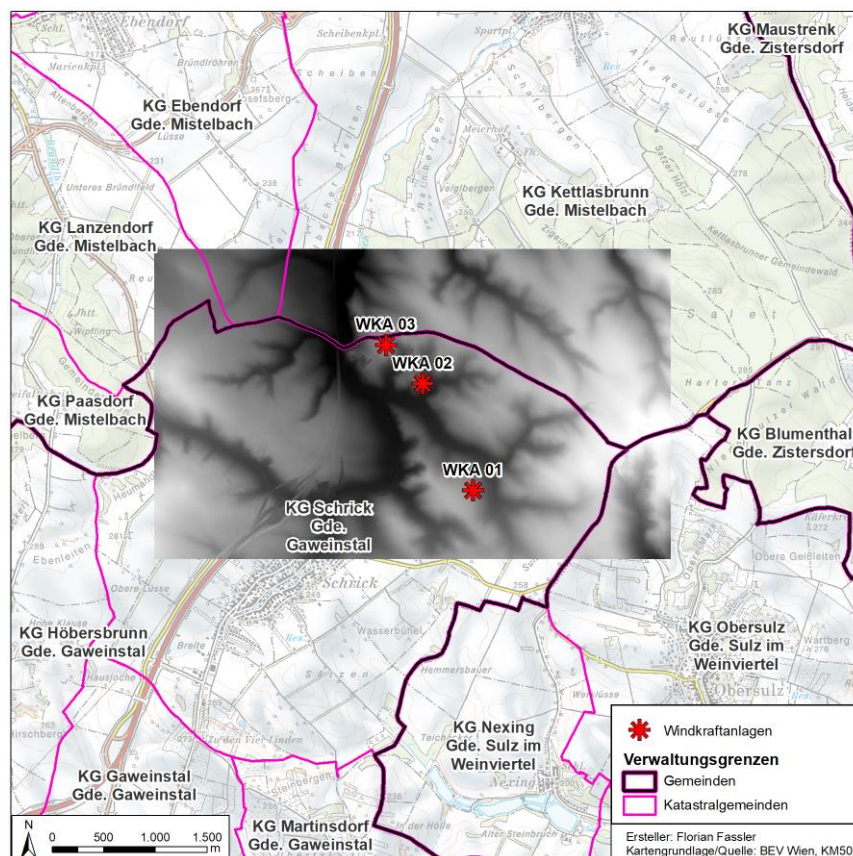


Abb. 39: Ausdehnung des erzeugten Rasters

6.3 3D-Geländeanalyse

Die Kranstellflächen zur Errichtung von Windrädern müssen horizontal sein, dadurch kommt es im unwegsamen Gelände zu Einschnitten (Abtragungen) und Aufschüttungen, um dies zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Böschungsflächen und der damit einhergehende Flächen- bzw. der Erdvolumenverbrauch für den Windparkbetreiber von besonderer Bedeutung. In diesem Unterkapitel werden daher die 3D-Geländeanalysen mit dem GIS-Programm in Form von ArcGIS Pro bzw. dem CAD-Programm in Form von Autodesk Civil 3D durchgeführt. Hierbei wird in der Anleitung schrittweise erklärt, wie eine 3D-Planung einer Kranstellfläche umgesetzt werden kann. Die Analysen wurden mit einer Workstation mit Betriebssystem Windows 10 Pro, mit einem Intel Xeon E5-1630 v4 @ 3.7GHz Quadcore-Prozessor und 16GB Arbeitsspeicher durchgeführt.

6.3.1 GIS

In folgender Abbildung ist der grundlegende Workflow für die Durchführung der 3D-Geländeanalyse mittels GIS skizziert, eine detaillierte Vorstellung der Arbeitsschritte erfolgt auf den folgenden Seiten.

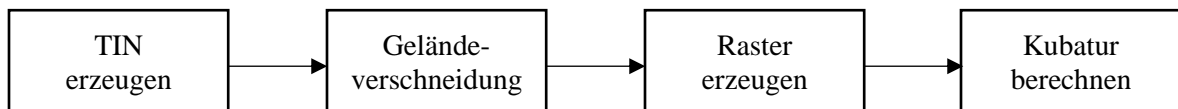


Abb. 40: Workflow GIS (eigene Bearbeitung)

Zuerst muss aus den zuvor erzeugten digitalen Geländemodell, mittels des Tools „**Raster To TIN**“ ein TIN (Triangulated Irregular Network) erzeugt werden, da die 3D-Geländeverschneidung im Rasterformat (.tif) nicht durchführbar ist (siehe Abb. 41). Dieses erzeugte TIN sollte kopiert werden, damit jederzeit wieder ein Original-TIN vom Gelände zur Verfügung steht und nicht immer ein neues TIN aus dem Raster-Geländemodell erzeugt werden muss.

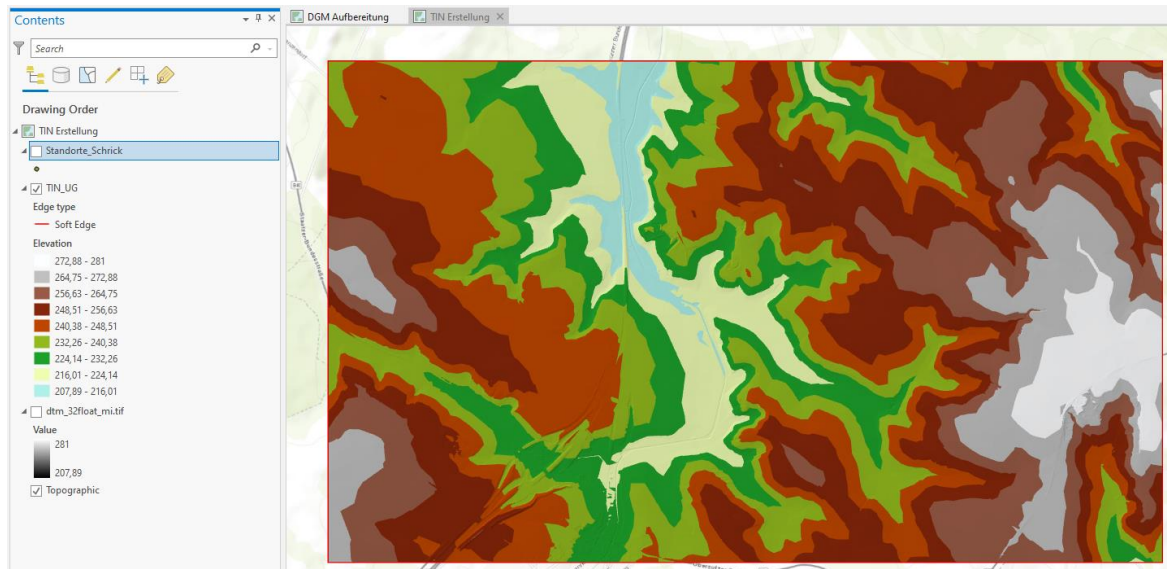


Abb. 41: TIN des Untersuchungsgebietes

Anschließend wird eine **Geländehöhe festgelegt**, auf welcher die Windkraftanlage erbaut werden soll (Fußpunkthöhe). Dies ist in manchen Fällen durch bestimmte Faktoren vorgegeben. Einschränkungen bestehen bezüglich der maximalen Bauhöhe, seitens der Austro Control (Anflugbereiche) oder wenn aufgrund der Vorgabe des Projektwerbers nur eine bestimmte Menge an Erdvolumen abgetragen oder aufgeschüttet werden darf. Als Anfangsannahme werden hier die Geländehöhen der Anlagenmittelpunkte herangezogen. Für meine drei Standorte sind die Geländehöhen in Tab. 15 aufgelistet.

Windkraftanlage	Geländehöhe über Adria
WKA 01	245m
WKA 02	233,5m
WKA 03	248m

Tab. 15: Angenommene Geländehöhen

Im Anschluss müssen aus der Spezifikation des jeweiligen Windkraftanlagen-Herstellers die Abmessungen, für die Kranstellfläche zur Errichtung der Windkraftanlage, herangezogen und eine **2D-Planung** des Bereiches erstellt werden. (vgl. NORDEX ENERGY GMBH 2019: S. 29 ff.)

Danach gibt es zwei Möglichkeiten, um fortzufahren. Am einfachsten ist es, wenn **3D-Polylinien** von einem AutoCAD dwg-File in ArcGIS Pro geladen und diese Linien in eine Feature Class exportiert werden. Bei diesem Vorgang werden die z-Werte (Höhenwerte) der Linien mit übernommen. Alternativ kann in ArcGIS Pro aus einer 2D-Polyline mittels des Tools „**Feature To 3D By Attribut**“ eine 3D-Polyline erzeugt werden. Hier kann jedoch nur eine Bezugshöhe für die gesamte Linie angegeben werden (siehe Abb. 42).

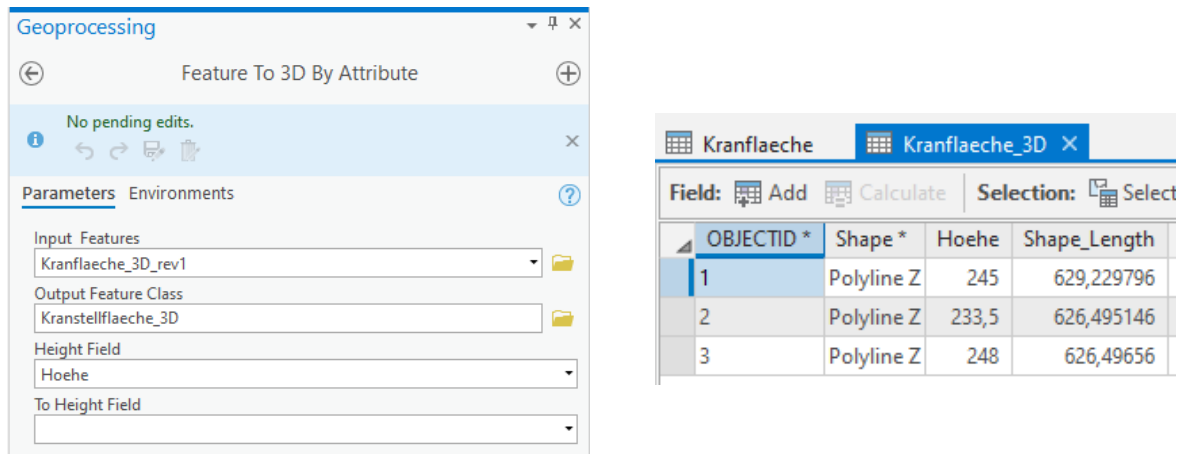


Abb. 42: Feature To 3D By Attribute → 3D-Polyline (Polyline Z)

Nach diesem Vorgang, kann mit der Geländeverschnidung begonnen werden. Hierzu muss zunächst ein Böschungsverhältnis festgelegt werden. In meinem Beispiel wird eines von 2:3 gewählt. Mittels des Tools „**Grade From Centerline**“ können für die ausgewählten Polylines, nun das TIN mit den Böschungsflächen im angegebenen Verhältnis, erzeugt werden (siehe Abb. 43). Damit dieses Tool ordnungsgemäße Ergebnisse liefert, müssen die Polylines geschlossen sein, ansonsten entstehen Fehler bei der Geländeverschnidung. Dies können Fehler bezüglich nicht vollständig erstellter Geländeverschnidungen (siehe Abb. 44) oder völlig abstrakte TINs sein.

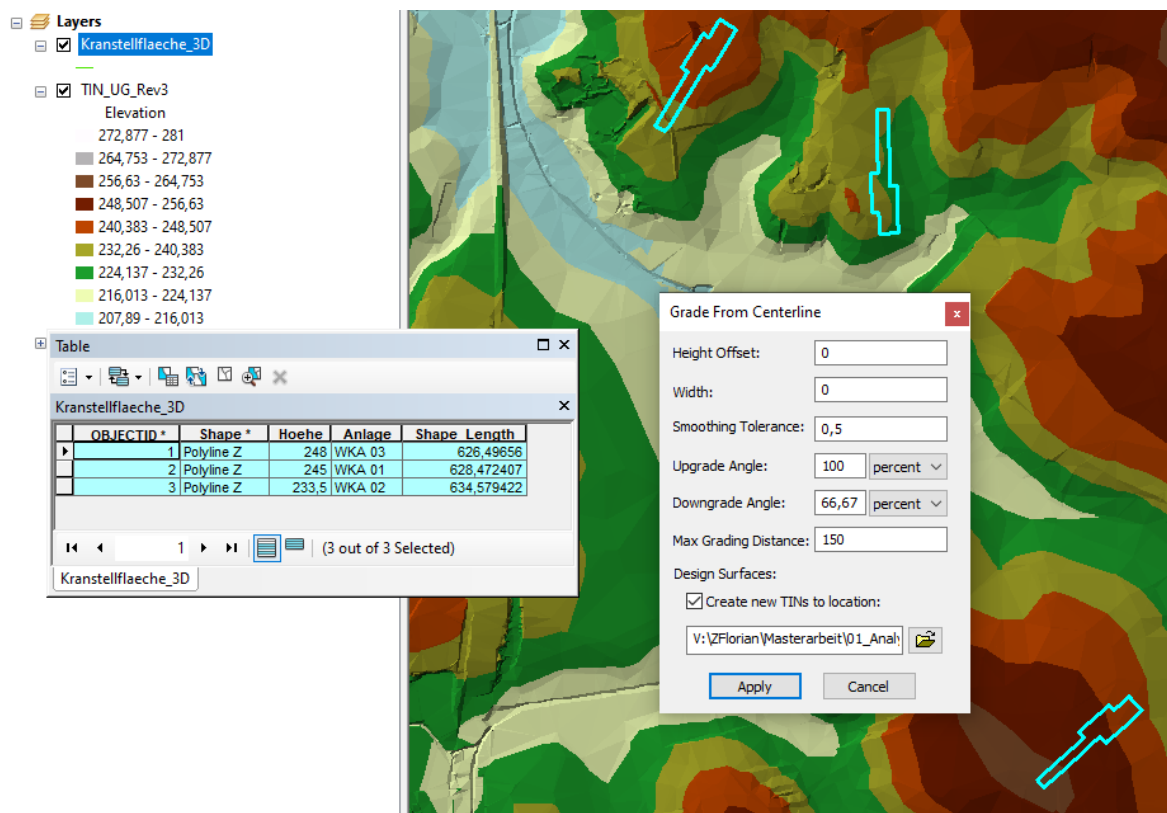


Abb. 43: Grade From Centerline



Abb. 44: Mögliche Fehler bei der Geländeverschnidung aufgrund von nicht geschlossenen Linien

Aus diesem TIN wird in Folge ein Raster erzeugt. Hier wird das Tool „**TIN To Raster**“ angewendet. Dieser Raster enthält bereits das neuerstellte Gelände mit der Kranstell- und Böschungsfläche (siehe Abb. 45).

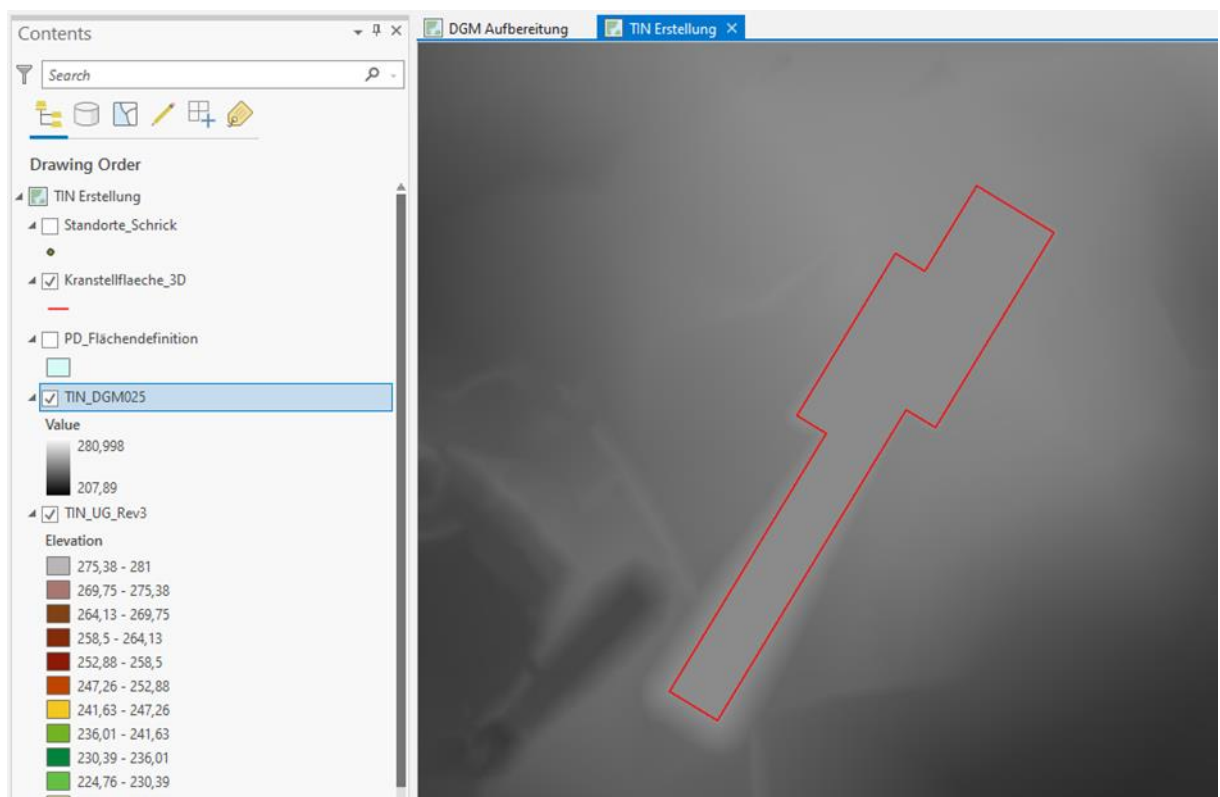


Abb. 45: Rasterbild der Geländeverschnidung

Aus diesem erzeugten Raster können wiederum ein Hillshade, mit dem Tool „Hillshade“, und Höhenlinien, mit dem Tool „Contour – 3D Analyst“, für Darstellungs- und Visualisierungszwecke erstellt werden. Bei der erzeugten Höhenlinien-Feature Class kann eine weitere Spalte angelegt werden, damit die Höhenlinien bei der Visualisierung kategorisiert werden können.

Im nächsten Schritt müssen die Umrandungen der erzeugten TINs, mittels des Tools „**TIN Line**“, extrahiert werden, damit diese in weiterer Folge zur Erstellung der Böschungsflächen Feature Class herangezogen werden können (siehe Abb. 46). Dies muss für alle drei Standorte der Geländeverschneidung durchgeführt werden.

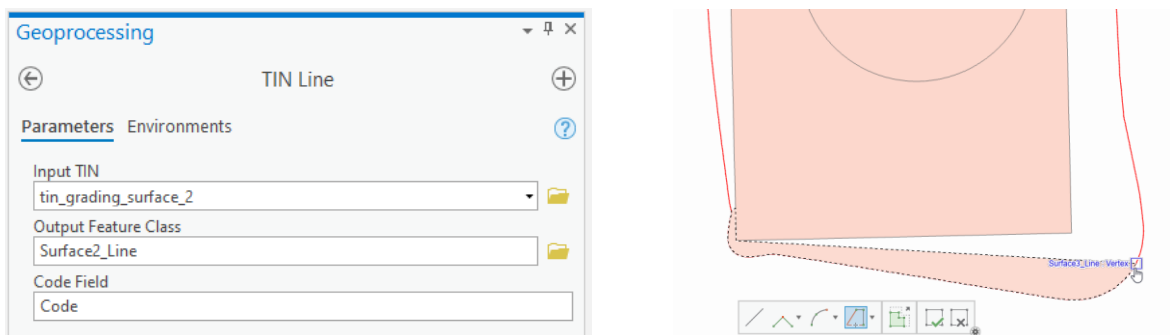


Abb. 46: TIN Line → Böschungen in Feature Class aufnehmen

Anschließend kann in ArcGIS Pro, in der jeweiligen Feature Class, die Böschungsfläche erstellt werden, um diese besser darstellen zu können.

Als Nächstes muss die zuvor erzeugte **Böschungsflächen Feature Class** in eine neue **exportiert** werden, damit eine sogenannte „Maske“ (siehe Abb. 47) entsteht. Diese „Maske“ umhüllt die beanspruchten Flächen. An diesen Flächen wird sichtbar, wie sich die Flächen und Volumen zwischen Aufschüttung und Abtragung aufteilen.

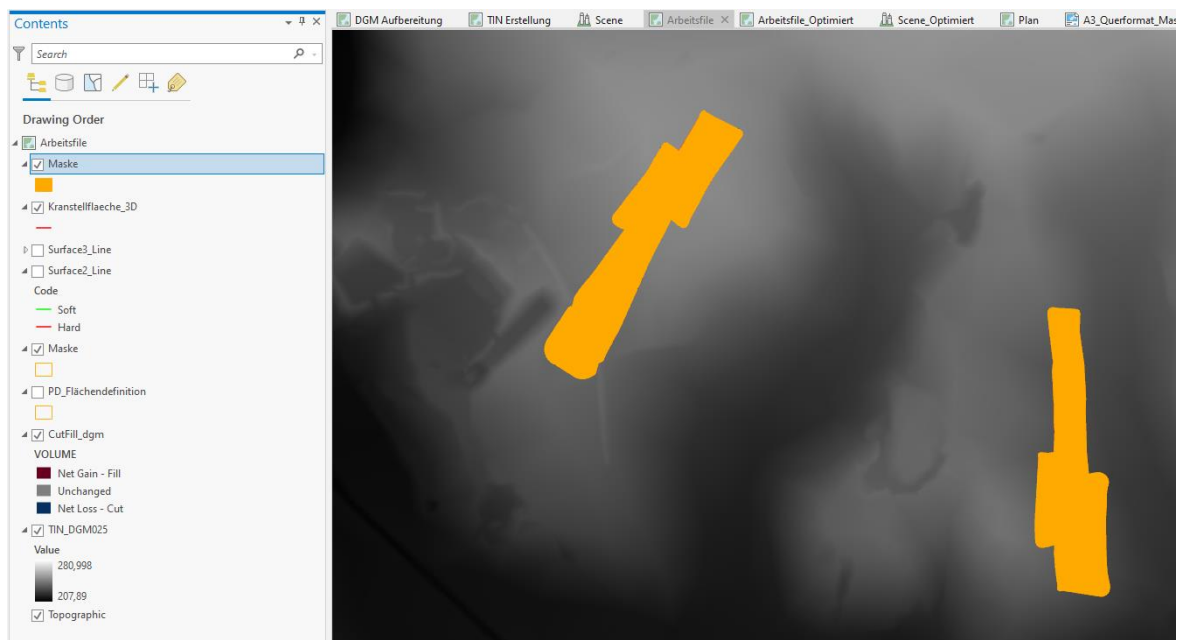


Abb. 47: "Maske" - Bereiche in welchen die Kubaturberechnung stattfindet

Um Kubaturen berechnen zu können, stehen in ArcGIS Pro einige Tools zur Verfügung, mit welchen dies bewerkstelligt werden kann. (vgl. ESRI 2020a)

- Surface Volume: berechnet die Fläche und das Volumen zwischen einem Geländemodell und einer Ebene mit Referenzhöhe
- Polygon Volume: berechnet die Fläche und Volumen zwischen einem Polygon mit einer konstanten Höhe und dem Geländemodell
- Cut Fill: berechnet die Volumenänderung zwischen zwei Geländemodellen (Dieses Tool ist nur verfügbar mit einer Spatial Analyst oder 3D Analyst Lizenz)

In diesem Fall wird das Tool „**Cut Fill**“ ausgewählt, um die Flächen- und Volumenänderungen zwischen zwei Geländemodellen ausgeben zu können. Hierbei ist es wichtig, dass beim Tool über die „Environment“ Einstellungen, eine Maske angibt, für welche Bereiche diese Berechnungen durchgeführt werden sollen. Damit werden unnötige Bereiche nicht mitgerechnet, welche das Ergebnis unter Umständen auch verfälschen könnten (siehe Abb. 48). Durch die Konvertierung vom Raster-Format in das TIN und wieder zurück in das Raster-Format, kommt es zu Abweichungen der Höhen über das gesamte Gebiet, wodurch das Ergebnis enorm verfälscht wäre. Dies kann mithilfe der Maske verhindert werden.

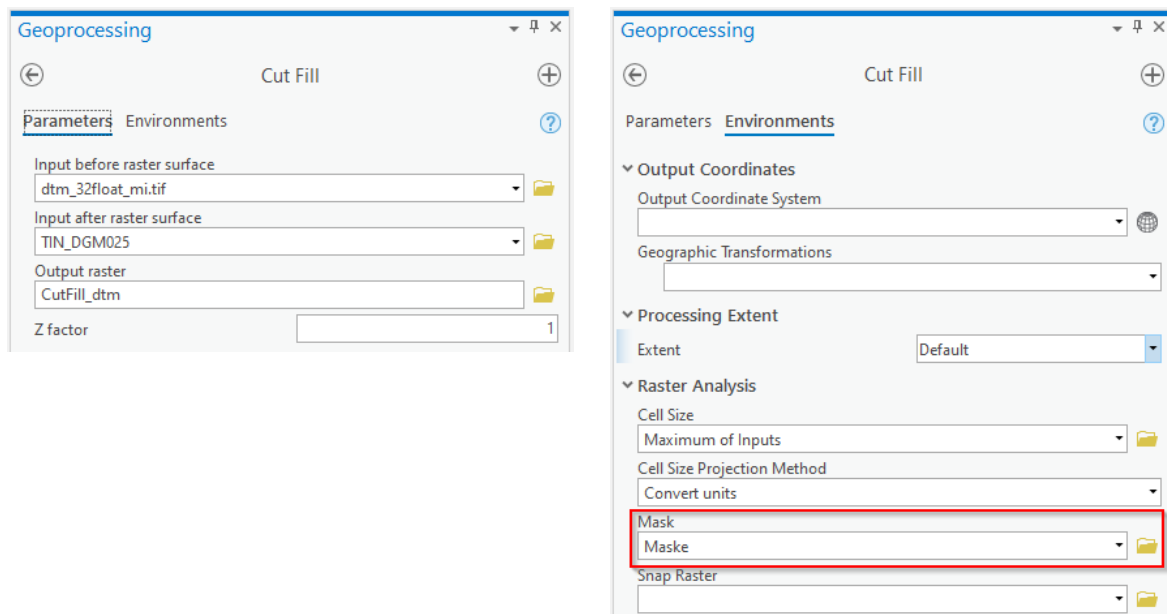


Abb. 48: Cut Fill

Als Ergebnis wird ein Rasterfile ausgegeben, in welchem die Flächen, bei denen Material aufgeschüttet werden muss in Purpur, und Flächen, bei denen Material abgetragen werden muss in Blau, dargestellt werden (siehe Abb. 49).

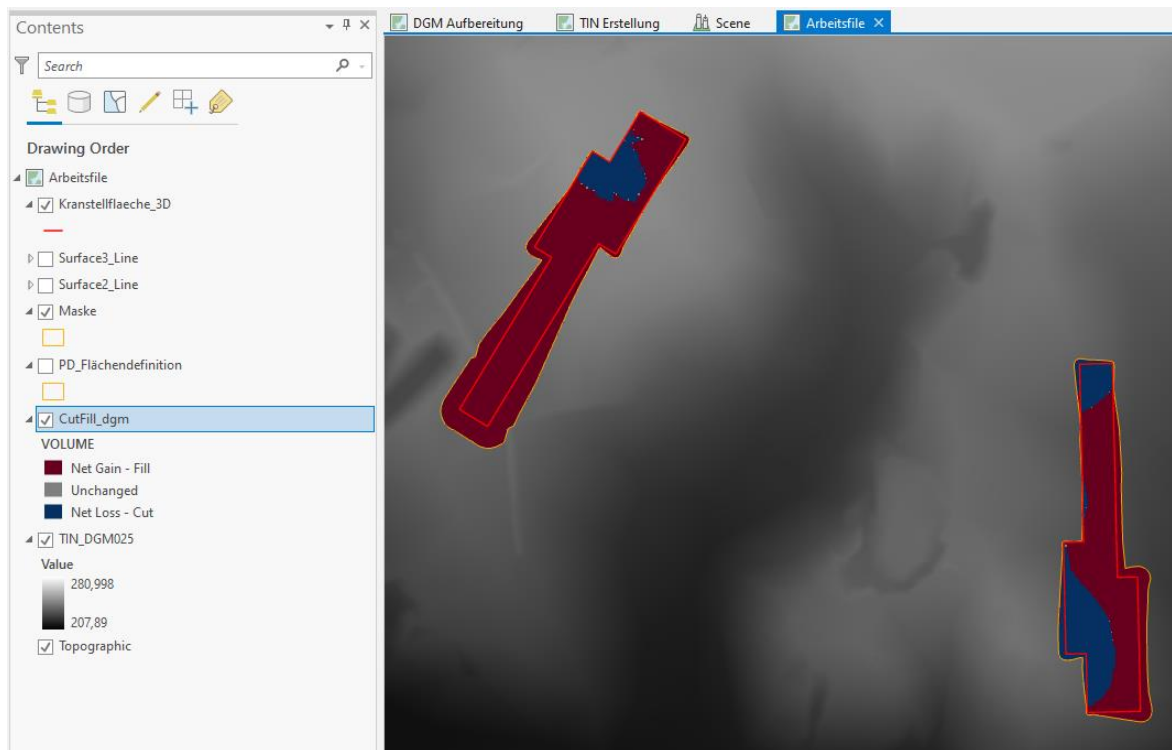


Abb. 49: Ergebnis Cut Fill angenommene Geländehöhen - ArcGIS Pro

Über die Tabelle des Rasterfiles können die Volumina und Flächen für Ab- und Auftrag eingesehen werden. In Tab. 16 sind die Ergebnisse für die drei Standorte aufgelistet.

Anlagenstandort	Volumen Cut	Volumen Fill	Fläche Cut	Fläche Fill
WKA 01	71.735 m ³	1.573 m ³	11.915 m ²	1.395 m ²
WKA 02	5.540 m ³	12.510 m ³	3.634 m ²	7.639 m ²
WKA 03	485 m ³	42.831 m ³	1.541 m ²	11.655 m ²

Tab. 16: Ergebnisse angenommene Geländehöhen für Kranstellflächen - ArcGIS Pro

Es zeigt sich, dass mehr Material (20.846 m³) abgetragen, als aufgeschüttet werden muss. Wenn jedoch die einzelnen Standorte betrachtet werden, sind die Unterschiede noch deutlicher, da es hier vorkommt, dass bei einem Anlagenstandort fast ausschließlich eine Aufschüttung notwendig ist und bei einem anderen hingegen, eine fast vollständige Materialabtragung stattfinden muss.

Nun könnte die Frage gestellt werden, warum die Fläche nicht so gelegt wird, dass kein Material abtransportiert werden muss. Die Antwort lässt sich durch den geringen Spielraum bei der Platzierung der Flächen erklären, da in den meisten Fällen nur bestimmte Grundstücke beansprucht werden dürfen oder durch Vorgaben der Windkraftanlagenhersteller (Anlieferkonzepte) die Flächennutzung eingeschränkt möglich ist.

Dieselbe Analyse wurde nochmals für andere Geländehöhen der Kranstellflächen durchgeführt. Die Abtrag- und Auftragsvolumina wurden hierbei bereits optimiert, um die dafür beanspruchte Zeit zur Durchführung zu messen. In Tab. 17 sind die optimierten Geländehöhen für die drei Kranstellflächen dargestellt. Die optimierte bzw. ideale

Geländehöhe ist jene Höhe für die Kranstellfläche, bei welcher die Kubaturmengen minimiert bzw. die Abtrags- und Auftragsvolumen sich einander annähern bzw. ziemlich ident sind.

Windkraftanlage	Geländehöhe
WKA 01	250,5m
WKA 02	232,75m
WKA 03	245m

Tab. 17: Optimierte Geländehöhen

In ArcGIS Pro nahm die Geländeanalyse insgesamt 49:20 Minuten in Anspruch, wobei zirka 28 Minuten für die Geländeverschneidung, Erstellung von TIN bzw. Raster und Extraktion der Umrandungen benötigt worden sind. Die restliche Zeit wurde zur Erstellung der Böschungsflächen und zur Flächen- und Mengenberechnung verwendet, wobei letztere siebeneinhalb Minuten gedauert hat. Wenn genaue Vorgaben bezüglich der Geländehöhen der Kranstellflächen vorliegen, lassen sich mit ArcGIS Pro relativ schnell Ergebnisse für Geländeanalysen erzeugen.

In nachfolgender Abb. 50 sind die Flächen, bei denen Material aufgetragen (Purpur) und abgetragen (Blau) werden muss, dargestellt. Im Vergleich zur Abb. 49, bei welcher die Geländeverschneidung mit angenommenen Höhen durchgeführt wurde, zeigt sich, dass das Farbverhältnis in nachstehender Abbildung ausgeglichener ausfällt.

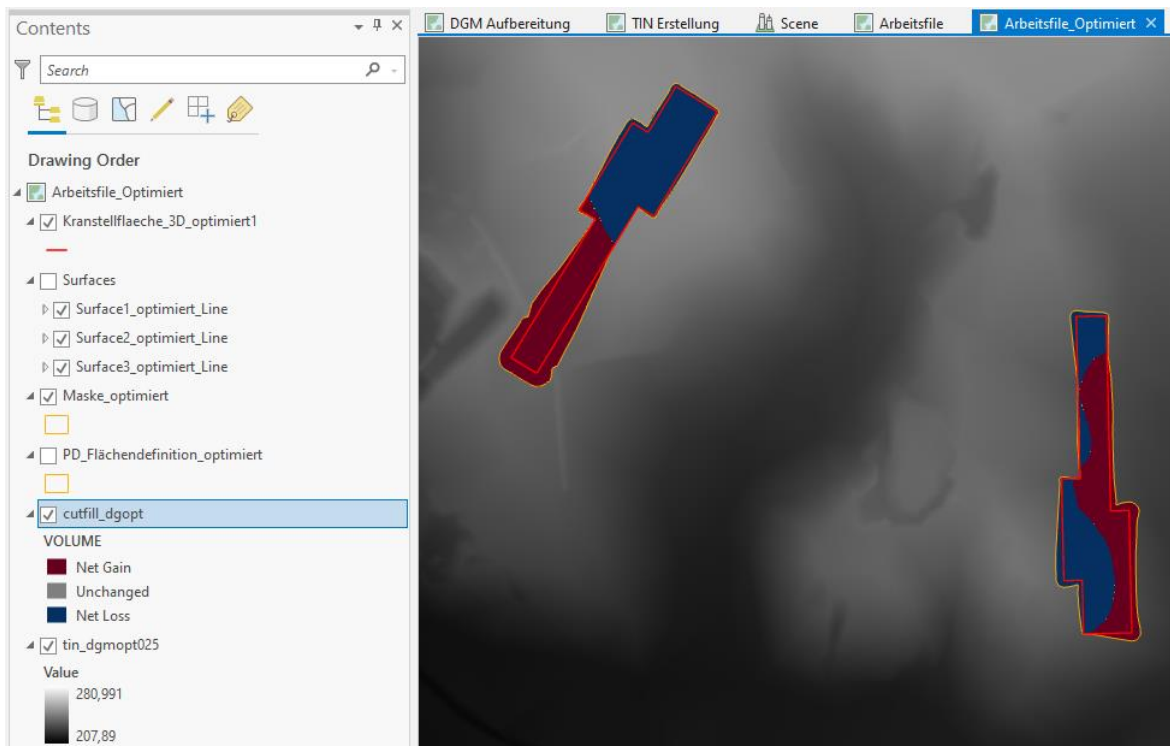


Abb. 50: Ergebnis Cut Fill optimierte Geländehöhen - ArcGIS Pro

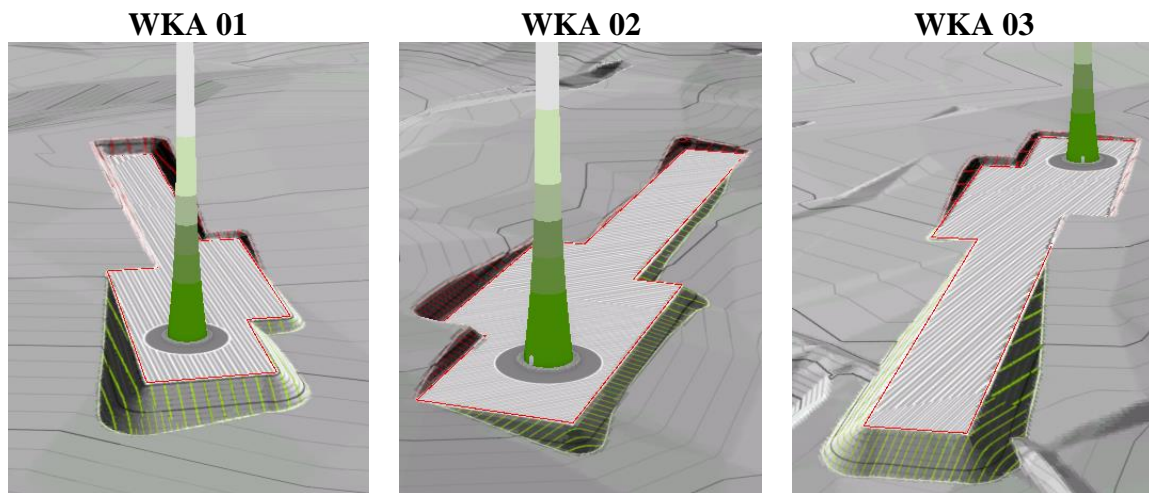
In Tab. 18 sind die Ergebnisse für die Auftrags- und Abtragsvolumina bzw. -flächen bei optimierten Geländehöhen der Kranstellflächen dargestellt.

Anlagenstandort	Volumen Cut	Volumen Fill	Fläche Cut	Fläche Fill
WKA 01	21.886 m ³	21.293 m ³	6.068 m ²	6.244 m ²
WKA 02	9.066 m ³	7.118 m ³	5.318 m ²	5.733 m ²
WKA 03	14.073 m ³	18.957 m ³	6.479 m ²	5.275 m ²

Tab. 18: Ergebnisse optimierter Geländehöhen für Kranstellflächen - ArcGIS Pro

Insgesamt zeigt sich, dass bei Auftrags- und Abtragsvolumina bei optimierten Geländehöhen mehr Material (2.343 m³) aufgetragen werden muss. Bei den Auftrags- und Abtragsvolumina mit angenommenen Höhen hingegen besteht ein Mehrabtrag von 20.846m³. Dadurch wird deutlich, dass durch optimierte Geländehöhen enorme Erdvolumenmengen eingespart werden können.

In nachfolgender Tab. 19 sind die Kranstellflächen mit ihren Böschungen dargestellt, damit ein Überblick über die Geländeänderung ersichtlich und das zukünftige Gelände aufgezeigt werden kann.



Tab. 19: Visualisierung Kranstellflächen – ArcGIS Pro

Der größte Nachteil bei der Bearbeitung von 3D-Geländeverschnitten mit ArcGIS Pro besteht darin, dass die gesamten Arbeitsschritte erneut durchgeführt werden müssen, wenn die Höhe der Kranstellfläche, aus bestimmten Gründen, geändert werden muss. Dies ist ein besonders mühsamer Arbeitsprozess, wenn eine Optimierung zwischen Abtrags- und Auftragsvolumen stattfinden soll und die Analyse einige Male durchgeführt werden muss. Dadurch wird der Zeitaufwand enorm erhöht. Abhilfe kann hier ein definierter Workflow mittels des „Model Builders“ schaffen, welcher die Analyse automatisch von einer einstellbaren Anfangshöhe bis zu einer Endhöhe in einen bestimmten Intervall (z.B. 20 oder 50 cm) durchführt und am Ende die Ergebnisse bezüglich ihrer Kubaturmengen vergleicht. Der Zeitaufwand, der für die Durchführung der Geländeverschnidung benötigt wird, bleibt, jedoch werden die einzelnen Schritte automatisch ausgeführt.

Das Einfügen von 3D-Modellen von Windkraftanlagen ist ein Vorteil beim Arbeiten mit ArcGIS Pro. Dadurch ist eine realistischere Darstellung des zukünftigen Landschaftsbildes, im Vergleich zur ausschließlich modellierten Kranstellfläche, möglich. Die 3D-Modelle von Windkraftanlagen im Collada-Format können im Internet über diverse Websites, wie

beispielsweise in diesem Fall über das 3D WAREHOUSE, heruntergeladen werden. Anschließend können mittels der „Timeline“ Funktion zusätzlich Animationen der Anlagenstandorte und virtuelle Flüge durch den Windpark erstellt werden.

6.3.2 CAD

In folgender Abbildung ist ein grundlegender Workflow für die Durchführung der 3D-Geländeanalyse mittels CAD skizziert. Der detaillierte Arbeitsablauf für die 3D-Geländeverschneidung in Autodesk Civil 3D ist auf den folgenden Seiten beschrieben.

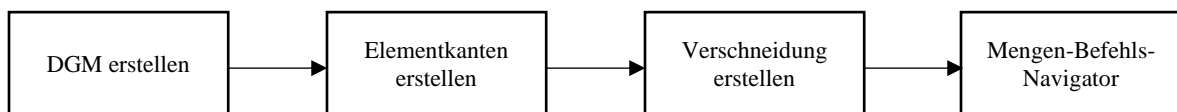


Abb. 51: Workflow CAD

Zu Beginn müssen die zuvor erstellten Kranstellflächen von einer AutoCAD Zeichnung (.dwg) in Civil 3D eingefügt und das zugrunde liegende Geländemodell hinzugefügt werden. Hierfür muss das Digitale Geländemodell (TIF) über „DGMs“ und „**DGM aus DEM erstellen**“ ausgewählt werden (siehe Abb. 52).

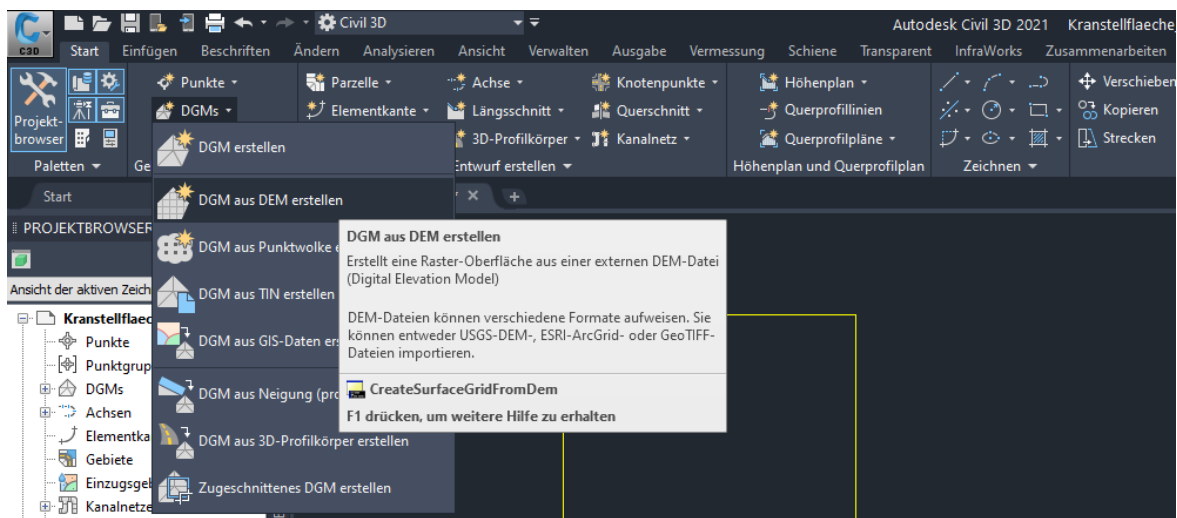


Abb. 52: DGM aus DEM erstellen

In Civil 3D müssen die richtigen Einheiten eingestellt werden, da diese standardmäßig auf US-Einheiten eingestellt sind. Fuß, Zoll, Kubikzoll usw. sollten daher auf das metrische System umgestellt werden, damit die Ergebnisse vergleichbar bleiben. Dazu muss im Projektbrowser auf der Registerkarte „Einstellungen“ mit der rechten Maustaste auf den Namen der Zeichnung geklickt und „Zeichnungseinstellungen bearbeiten“ ausgewählt werden (siehe Abb. 53). (vgl. AUTODESK CIVIL 3D 2018)

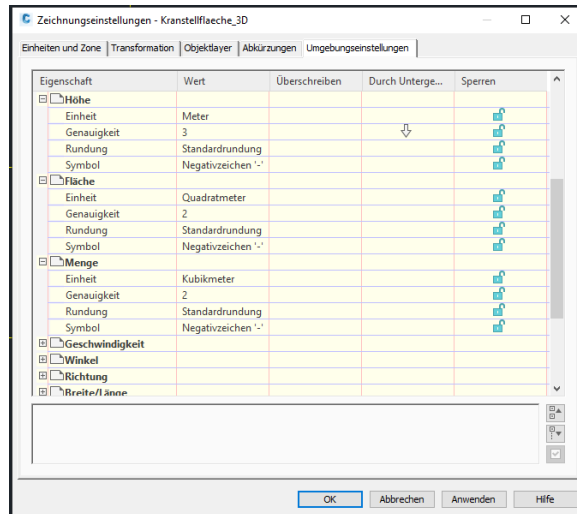


Abb. 53: Zeichnungseinstellungen

Anschließend müssen die **Elementkanten** aus den Objekten (Kranstellflächen) **erstellt** werden (siehe Abb. 54). Dies ist nur möglich, wenn es sich bei der Kranstellfläche, um eine geschlossene Polyline handelt.

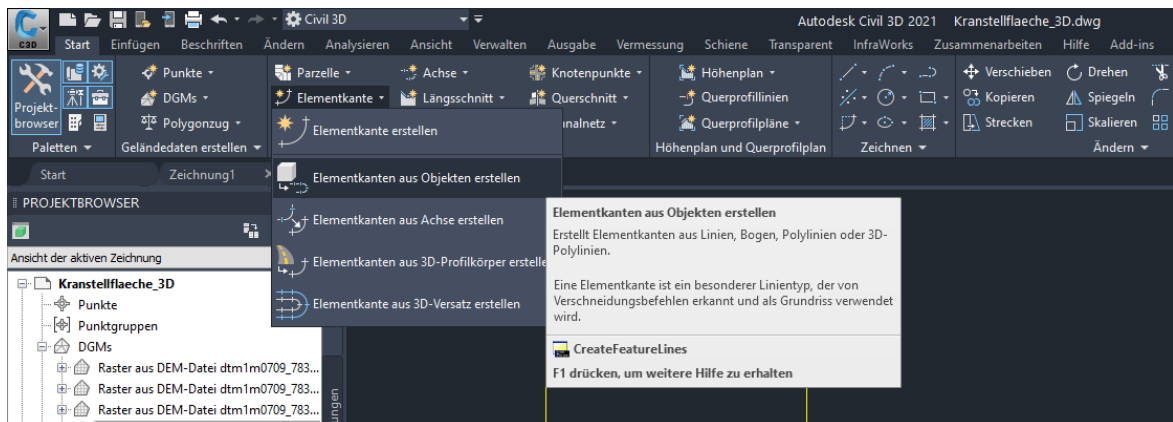


Abb. 54: Elementkanten aus Objekten erstellen

Das gewünschte Objekt bzw. die gewünschte Kranstellfläche muss ausgewählt und mit der Eingabetaste bestätigt werden. Daraufhin öffnet sich ein Fenster, in welchem der Layer der Elementkante und weitere Einstellungen vorgenommen werden können.

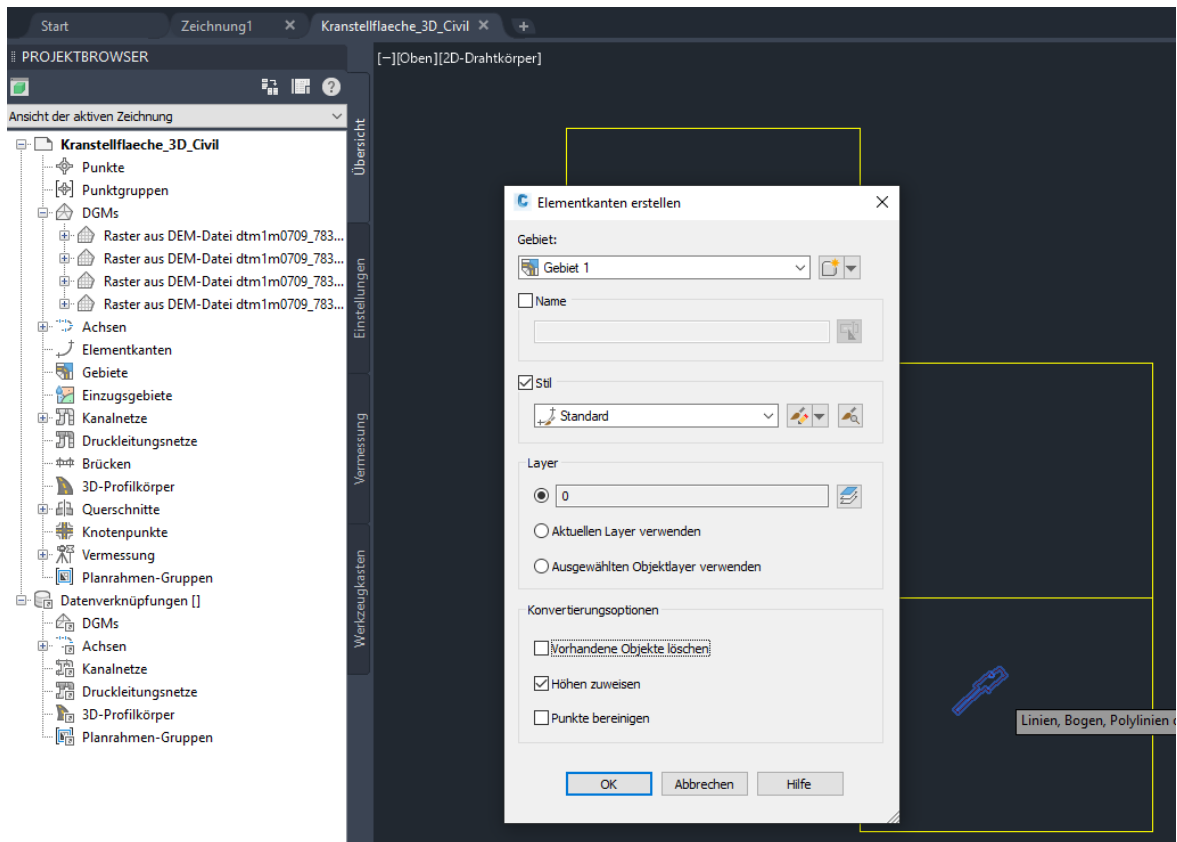


Abb. 55: Elementkante erstellen Optionen

Hier muss die Option „Höhe zuweisen“ (siehe Abb. 55) ausgewählt werden, damit der Kranstellfläche eine Geländehöhe zugewiesen werden kann.

- WKA 01 = 245 m
- WKA 02 = 233,5 m
- WKA 03 = 248 m

Wenn diese Elementkante markiert wird, kann über den Reiter „Elementkante“ und das Tool „**Höheneditor**“ die Geländehöhe der Fläche verändert werden. Hierzu müssen alle Punkte markiert werden. Über „Heben/Senken“ kann anschließend die Höhe für alle Punkte geändert werden (siehe Abb. 56). Dadurch lassen sich in weiterer Folge auch Veränderungen der Verschneidung dynamisch anzeigen. Dies wird am Ende dieses Kapitels näher erläutert.

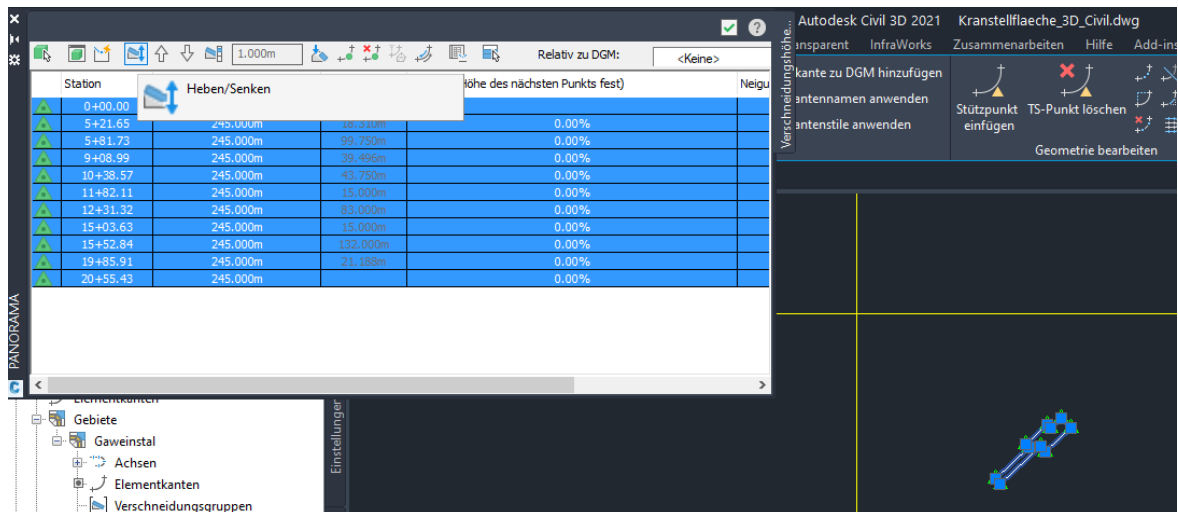


Abb. 56: Höheneditor

Im Anschluss kann mit der eigentlichen Verschneidung des Geländes begonnen werden. Hierbei ist es sinnvoll für jede Kranstellfläche eine Verschneidungsgruppe zu erstellen. Dazu muss im Reiter „Start“, „Verschneidung“ und „**Verschneidungsgruppe erstellen**“ ausgewählt werden (siehe Abb. 57).

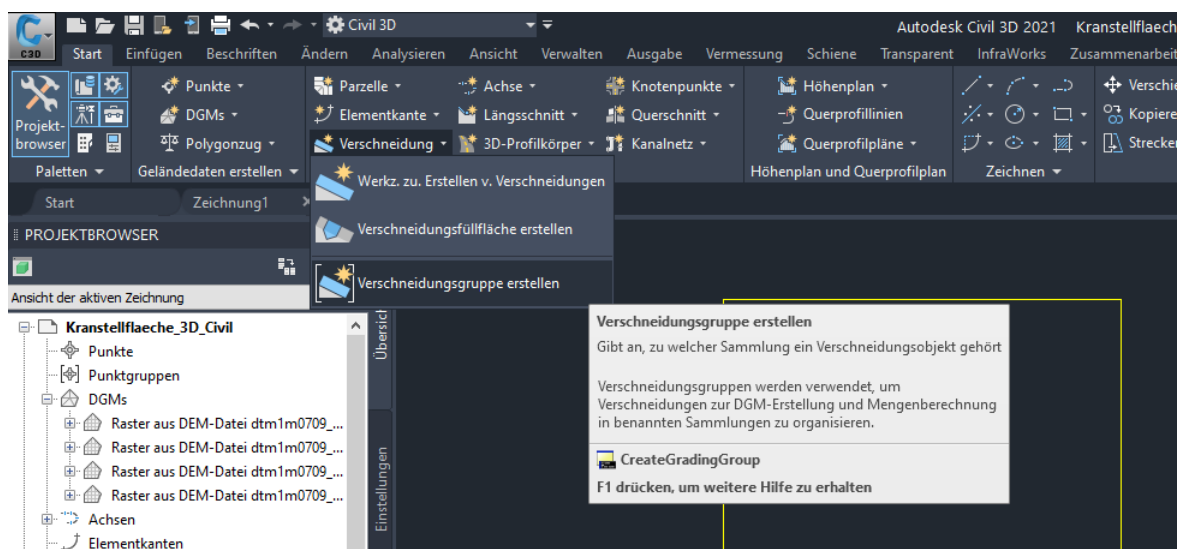


Abb. 57: Verschneidungsgruppe erstellen

Im Anschluss muss die gewünschte Elementkante markiert und mittels der Eingabetaste bestätigt werden. In diesem Schritt wird zugleich noch ein zusätzliches digitales Geländemodell erstellt, welches später für die Mengenberechnung benötigt wird (siehe Abb. 58). Dieser Vorgang muss für alle drei Elementkanten (Kranstellflächen) wiederholt werden. Dass die Geländeverschneidung immer nur für die eine Kranstellfläche vorgenommen wird, welche angepasst werden muss, ist dabei ein Vorteil.

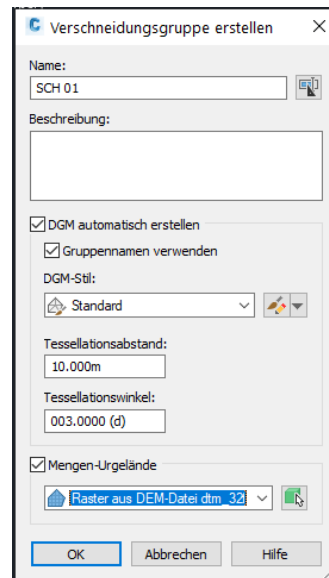


Abb. 58: Verschneidungsgruppe - DGM Erstellung

Zusätzlich muss noch ein neues Verschneidungskriterium, mit den vorgegebenen Böschungsverhältnissen, erstellt werden. Über „Verschneidung“ und „Werkzeug zum Erstellen von Verschneidungen“ öffnet sich das Fenster „Verschneidungswerkzeuge“, über welches ein neues Verschneidungskriterium definiert werden kann (siehe Abb. 59).

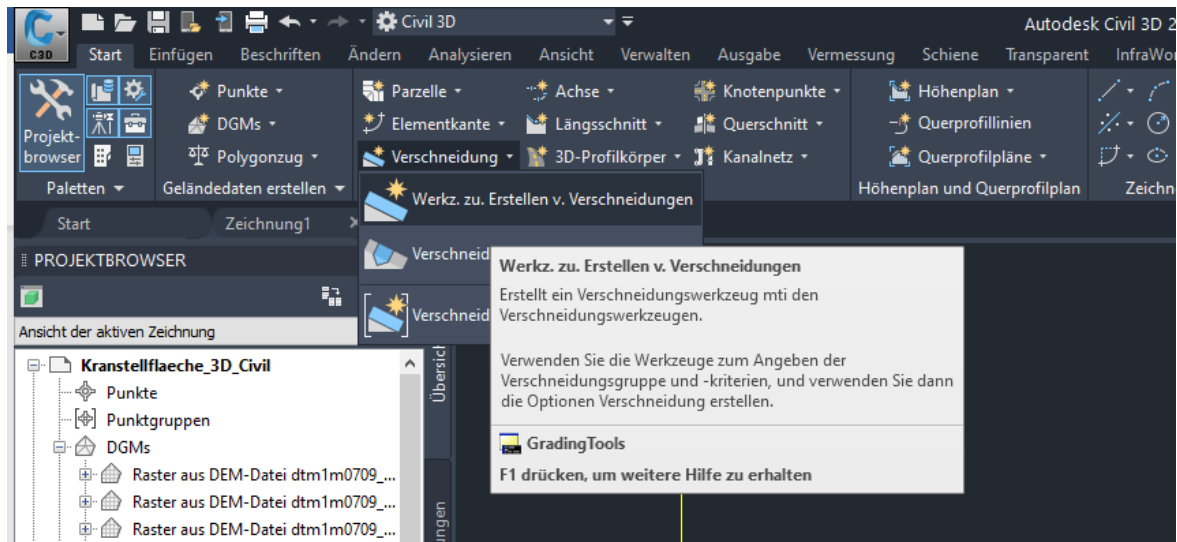


Abb. 59: Werkzeug zum Erstellen von Verschneidungen

Dabei muss die richtige Verschneidungsmethode, die Abtrags-Projektion und Auftrags-Projektion angepasst werden. In diesem Fall wird digitales Geländemodell bei der Verschneidungsmethode gewählt und bei Neigung-Verhältnis 1.50:1 eingetragen, da ein Böschungsverhältnis von 2:3 angenommen wird (siehe Abb. 60).

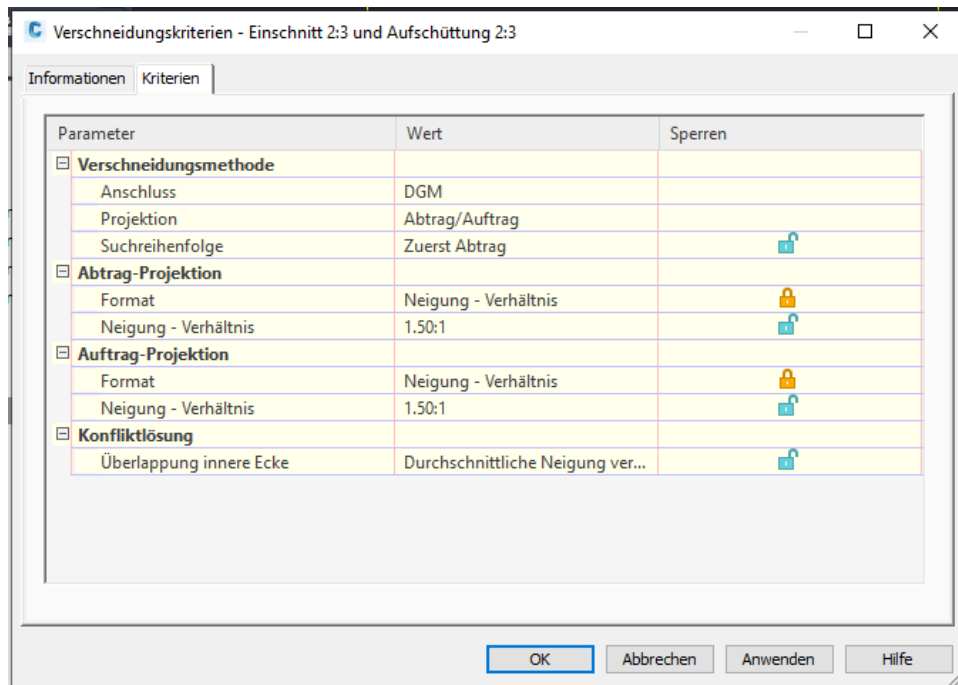


Abb. 60: Verschneidungskriterium erstellen

Um die Verschneidung durchzuführen, müssen im Fenster „Verschneidungswerkzeuge“ die Verschneidungsgruppe und das digitale Geländemodell, sowie das Verschneidungskriterium, welches angewendet werden soll, ausgewählt werden. Anschließend kann über „**Verschneidung erstellen**“ die Analyse durchgeführt werden (siehe Abb. 61).

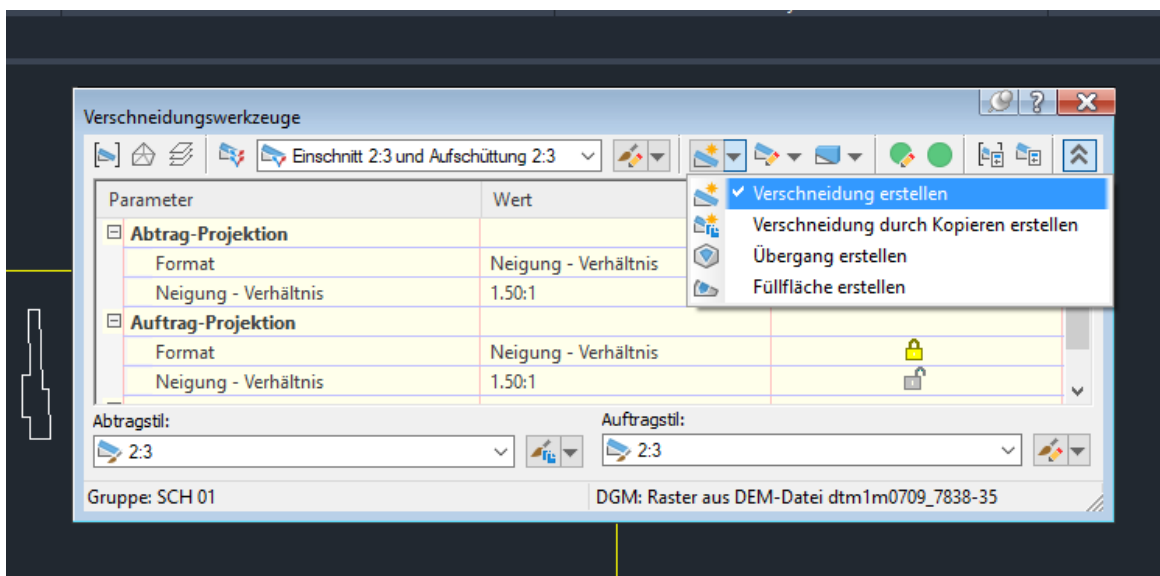


Abb. 61: Verschneidung erstellen

Zuerst muss die Kranstellfläche (Elementkante) ausgewählt werden, welche mit dem Gelände verschnitten werden soll. Danach muss eine Verschneidungsseite angegeben werden. Dies muss außerhalb der Kranstellfläche erfolgen, damit die Böschungsflächen nach außen erstellt werden. Anschließend müssen das Abtrags- und Auftragsverhältnis,

jeweils mit einem Enter-Klick, bestätigt werden, wie in Abb. 62 dargestellt wird. Daraufhin wird die Verschneidung in Civil 3D durchgeführt (siehe Abb. 63).

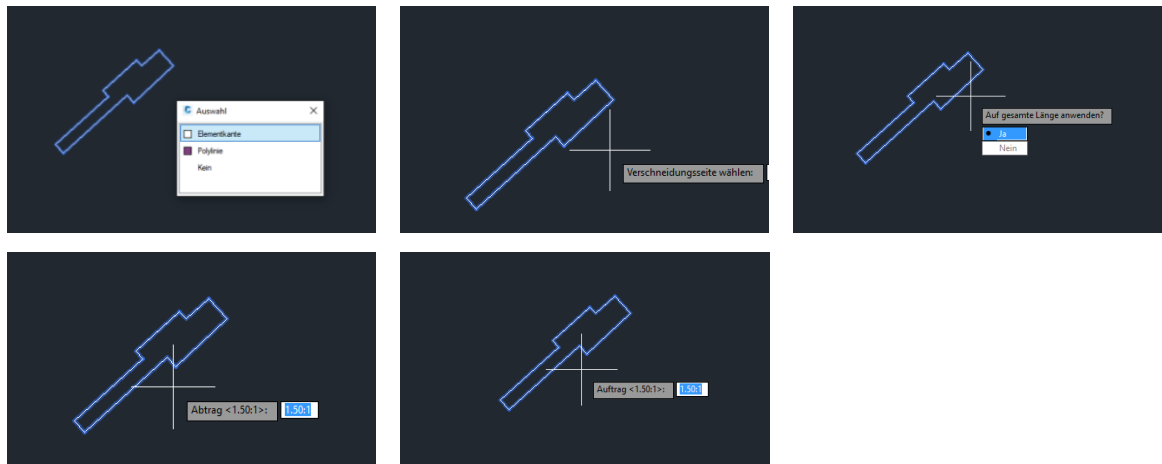


Abb. 62: Arbeitsschritte Geländeverschnidung

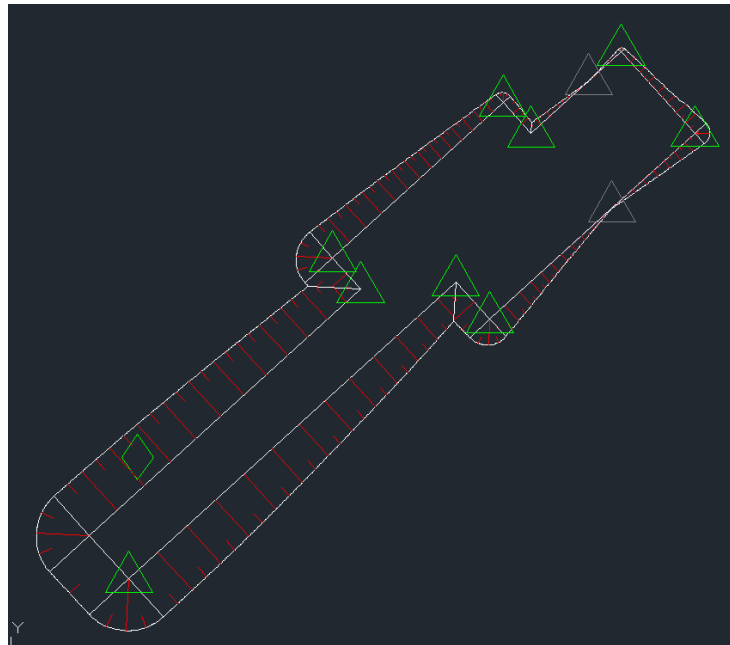


Abb. 63: Geländeverschnidung Civil 3D

Danach muss eine Füllfläche für die Kranstellfläche erstellt werden. Hierzu wird im Verschneidungswerkzeug Tool „**Füllfläche erstellen**“ ausgewählt und die jeweilige ebene Kranstellfläche selektiert (siehe Abb. 64).

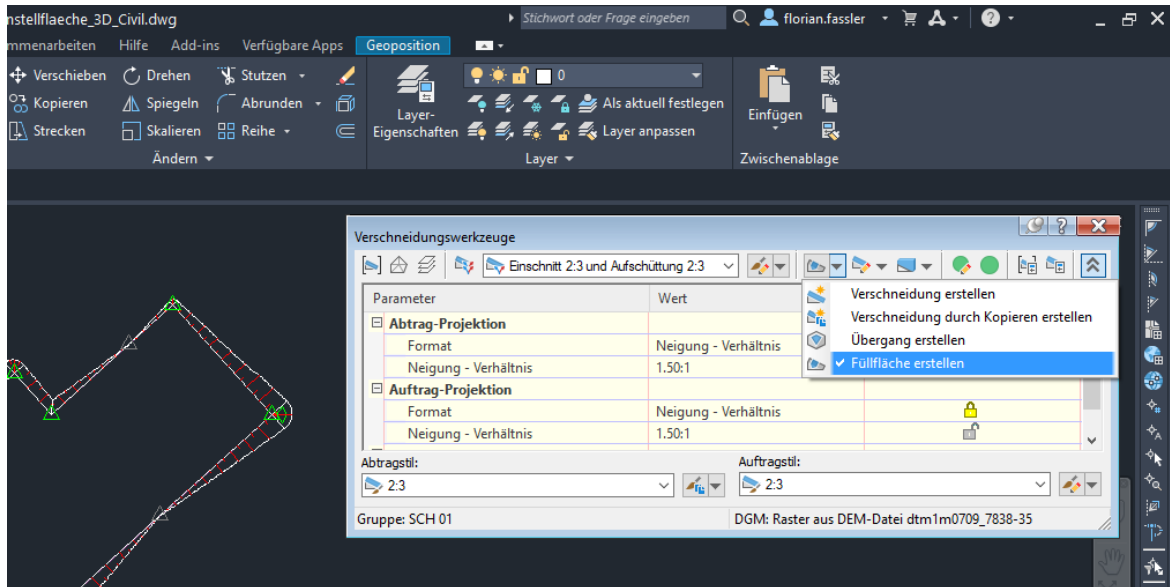


Abb. 64: Füllfläche erstellen

Über den Objekt-Viewer kann betrachtet werden, welche Flächen Auf- bzw. Abtrag darstellen. Hierzu muss die Umrandung (Trianguliertes DGM) markiert und mittels rechts Klick „Objekt-Viewer“ gewählt werden (siehe Abb. 65).

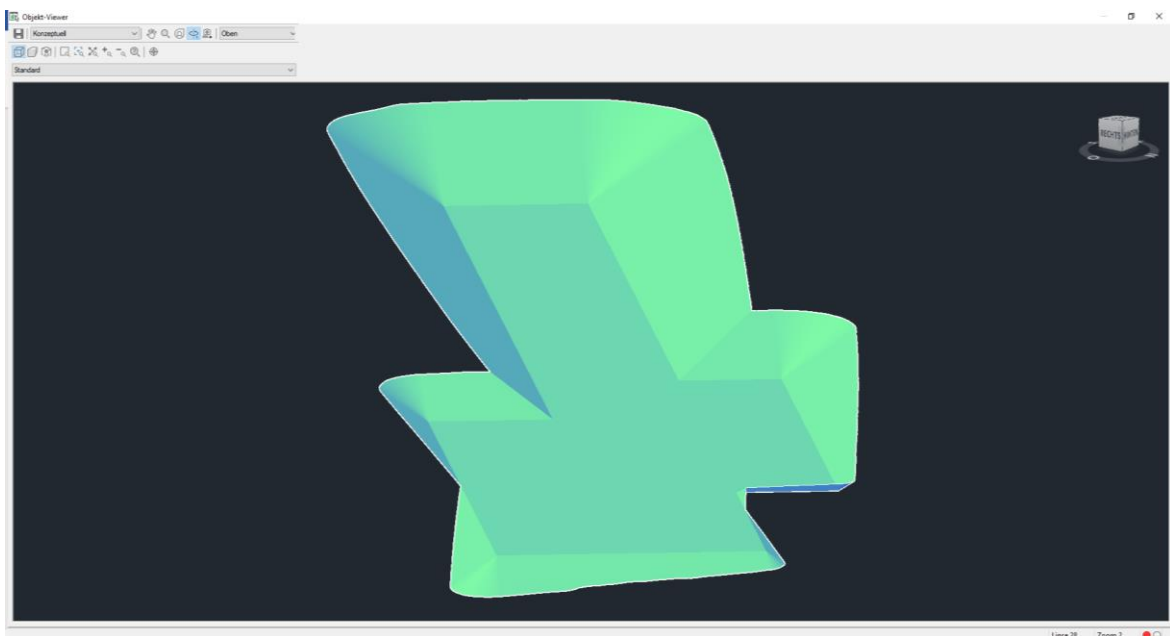


Abb. 65: Objekt-Viewer mit Triangulierten DGM einer Kranstellfläche

Damit die Kubaturmengen von Abtrag und Auftrag angesehen bzw. ausgegeben werden können, kann in AUTODESK CIVIL 3D (2021a) über den Reiter „Analysieren“ das Tool „**Mengen-Befehls-Navigator**“ ausgeführt werden. Im Anschluss muss für jede Kranstellfläche eine Mengenoberfläche im „Mengen-Befehls-Navigator“ erstellt werden (siehe Abb. 66).

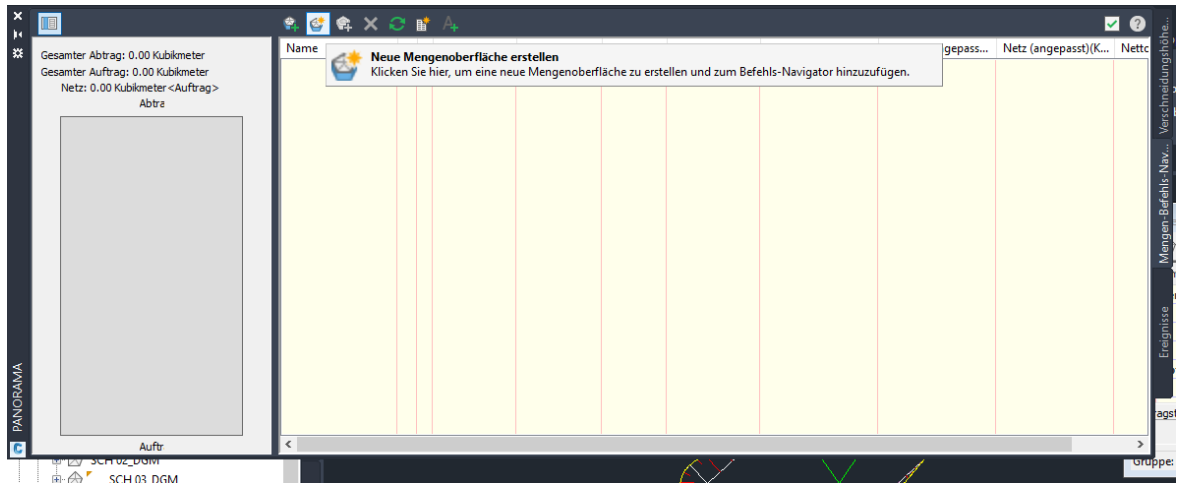
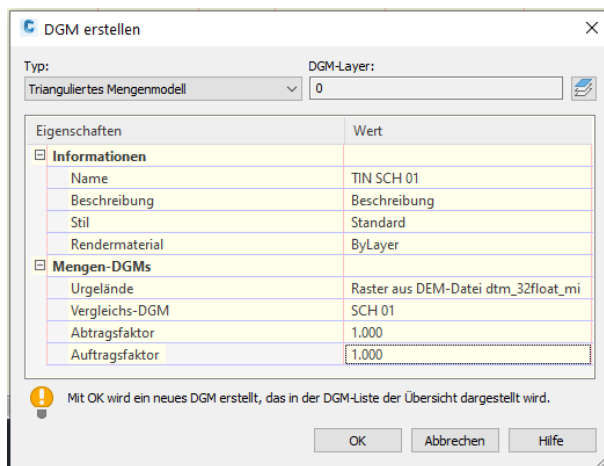
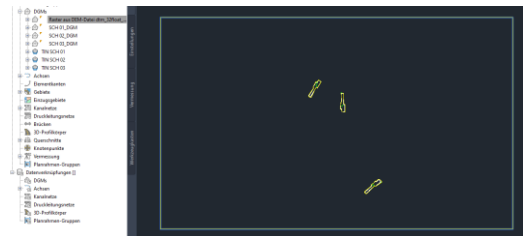


Abb. 66: Mengen-Befehls-Navigator - Mengenoberfläche erstellen

Es müssen daher das Urgelände, in meinem Fall das in ArcGIS Pro erzeugte Rasterbild (TIF), und das zuvor erstellte DGM, von der jeweiligen Kranstellfläche angegeben werden (siehe Abb. 67). Hierbei wird ein Trianguliertes Mengenmodell aus dem ursprünglichen Gelände und aus der zuvor erstellten Geländeverschneidung erstellt (vgl. AUTODESK CIVIL 3D 2021b).



Urgelände



Vergleichs-DGM (Kranstellfläche)

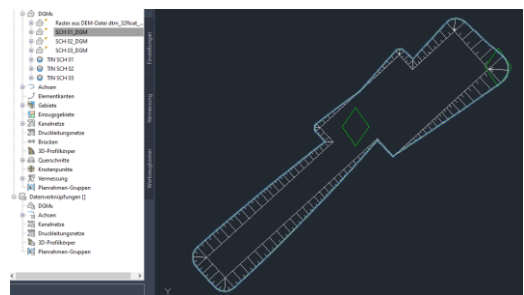


Abb. 67: Trianguliertes Mengenmodell

Dieser Ablauf kann ein wenig Zeit in Anspruch nehmen. Als Ergebnis wird eine detaillierte Auflistung der Auf- und Abtragsvolumen ausgegeben (siehe Abb. 68). In Abb. 69 ist eine Auflistung aller Ergebnisse für die zuvor in ArcGIS Pro angenommenen Höhen zu sehen.

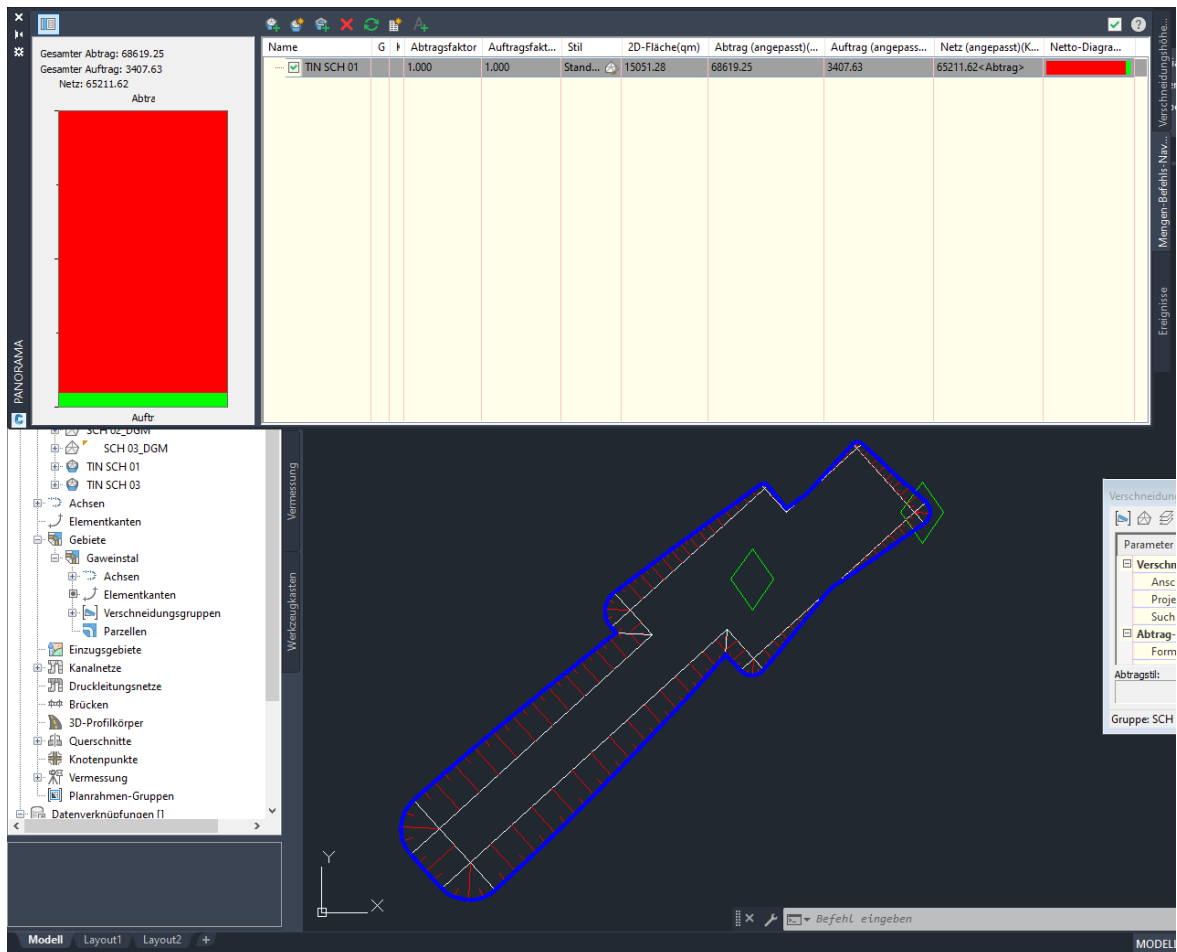


Abb. 68: Auflistung Auf- und Abtragsvolumen

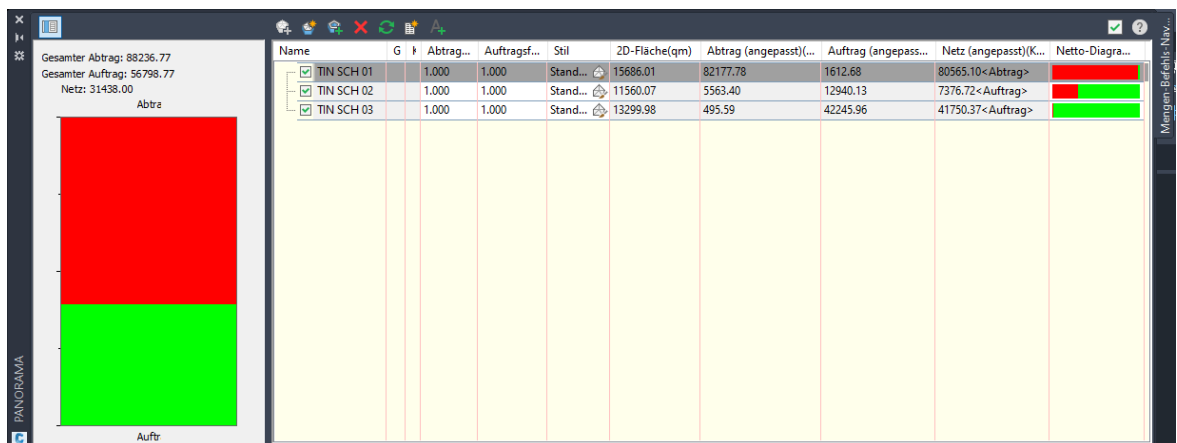


Abb. 69: Auf- und Abtragsvolumen der angenommenen Höhen – Civil 3D (Mengen-Befehls-Navigator)

Dieser Prozess hat 36 Minuten und 30 Sekunden in Anspruch genommen, wobei zirka zehn Minuten nur für Zwischenspeichervorgänge beansprucht worden sind. Die Mengenberechnung für die drei Standorte hat sieben Minuten und 30 Sekunden gedauert. Es zeigt sich, dass relativ schnell ein realistisches Ergebnis erzielt werden kann und dadurch ein guter Überblick über die Gegebenheiten vor Ort entsteht.

Über Panorama bzw. den Höheneditor ist es möglich, sich Veränderungen der Böschungsflächen für unterschiedliche Höhen, dynamisch anzeigen zu lassen. Hierzu muss die Elementkante markiert und der Höheneditor geöffnet werden. Dazu werden alle Punkte markiert, über Heben/Senken wird anschließend die Höhe für alle Punkte geändert. Dadurch können die Veränderungen der Verschneidung dynamisch angezeigt werden. Im Mengen-Befehls-Navigator muss anschließend eine Aktualisierung vorgenommen werden, wodurch die neuen Mengen berechnet werden (siehe Abb. 70). Die Verschneidung ändert sich innerhalb weniger Sekunden (zirka 30 Sekunden), wenn die Höhe an den neuen Wert angepasst wird. Der gesamte Ablauf beim Verändern der Höhen von einer Kranstellfläche wurde mehrmals durchgeführt und dauerte nicht länger als zwei bis drei Minuten.

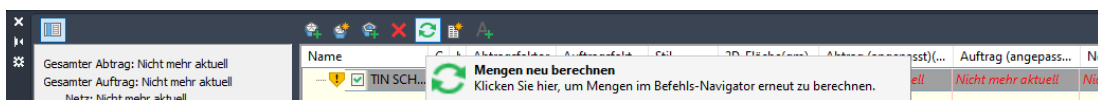


Abb. 70: Mengenaktualisierung

Diese schnelle Optimierungsmöglichkeit steht nur in Civil 3D zur Verfügung, da in ArcGIS Pro nur mittels Probierens das Ergebnis verbessert werden kann und die Veränderung rund 30 Minuten in Anspruch nimmt. In Civil 3D erfolgt die Optimierung zwar auch mittels Probierens, jedoch können Geländeverschneidungen innerhalb weniger Sekunden geändert werden.

Die Höhenoptimierungen bringen folgende Ergebnisse für optimale Auf- und Abtragsvolumen der Kranstellflächen zum Vorschein:

- WKA 01: 250,5m
- WKA 02: 232,75m
- WKA 03: 245m

In Civil 3D werden die Ergebnisse der Volumina in einer Übersicht dargestellt, aus welcher die Volumina für die verschiedenen Kranstellflächen abgelesen werden können (siehe Abb. 71). In der linken Seite der Abbildung können alle Volumina gesamtheitlich betrachtet werden.

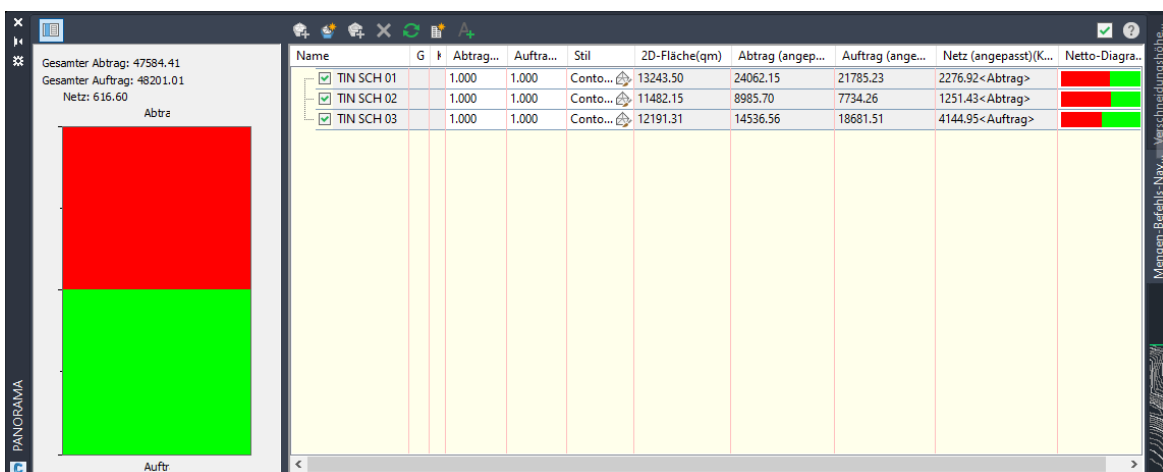
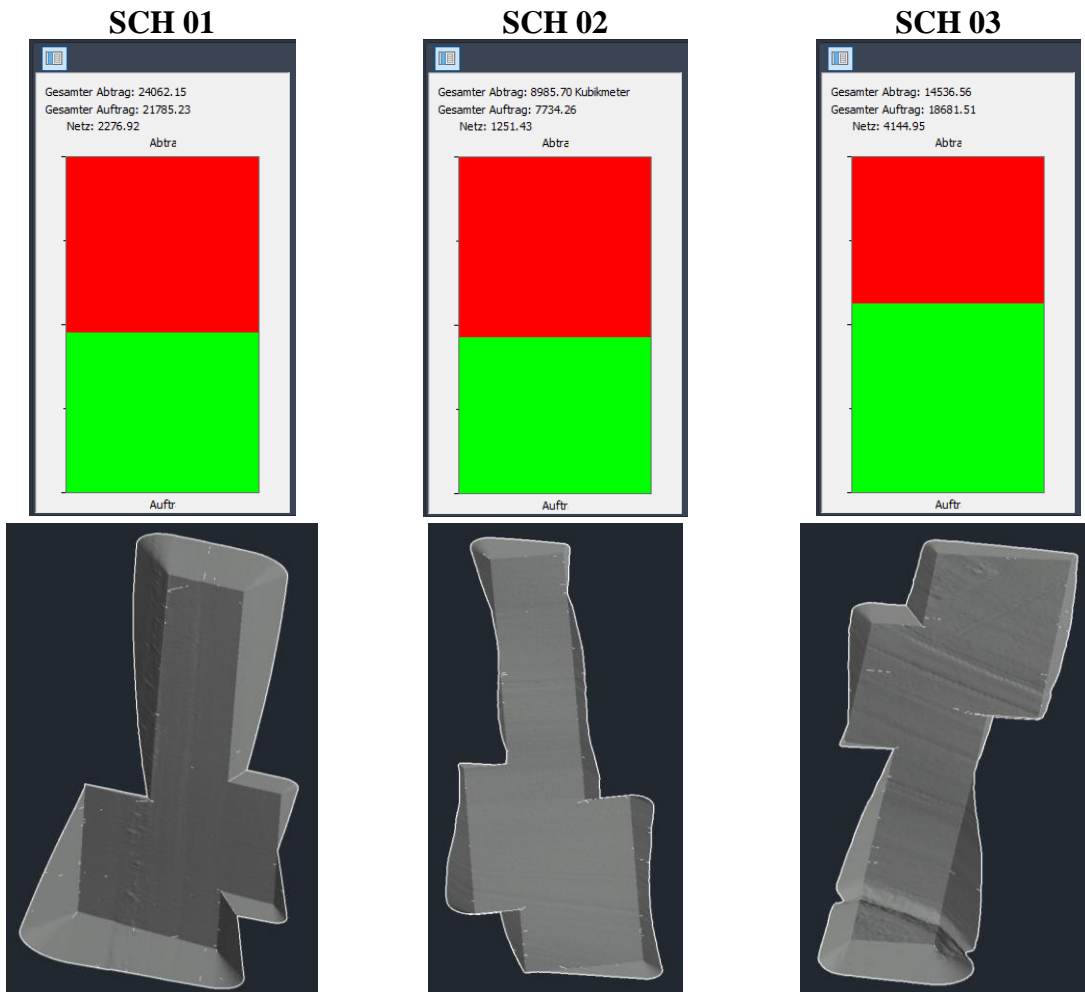


Abb. 71: Auf- und Abtragsvolumen der optimierten Höhen – Civil 3D (Mengen-Befehls-Navigator)

In nachfolgender Tab. 20 können die Abtrags- und Auftragsvolumen, sowie die Differenz der beiden Parameter, in Kubikmeter abgelesen werden. Weiters sind in einem Balkendiagramm die Volumina eingetragen, damit sofort eine visuelle Einschätzung des Verhältnisses von Auftrag und Abtrag vorgenommen werden kann. Zuletzt sind die Kranstellflächen mit ihren Böschungen visualisiert, damit ein kleiner Überblick über das zukünftige Gelände gezeigt werden kann.



Tab. 20: Ergebnisse optimierter Geländehöhen für Kranstellflächen – Civil 3D

Über den „Objekt-Viewer“ können die Ergebnisse der Geländeverschnidung von jeglicher Position im Raum betrachtet werden. In folgender Abb. 72 wird die ermittelte Kranstellfläche von Windkraftanlagenstandort zwei (WKA 2) gezeigt.

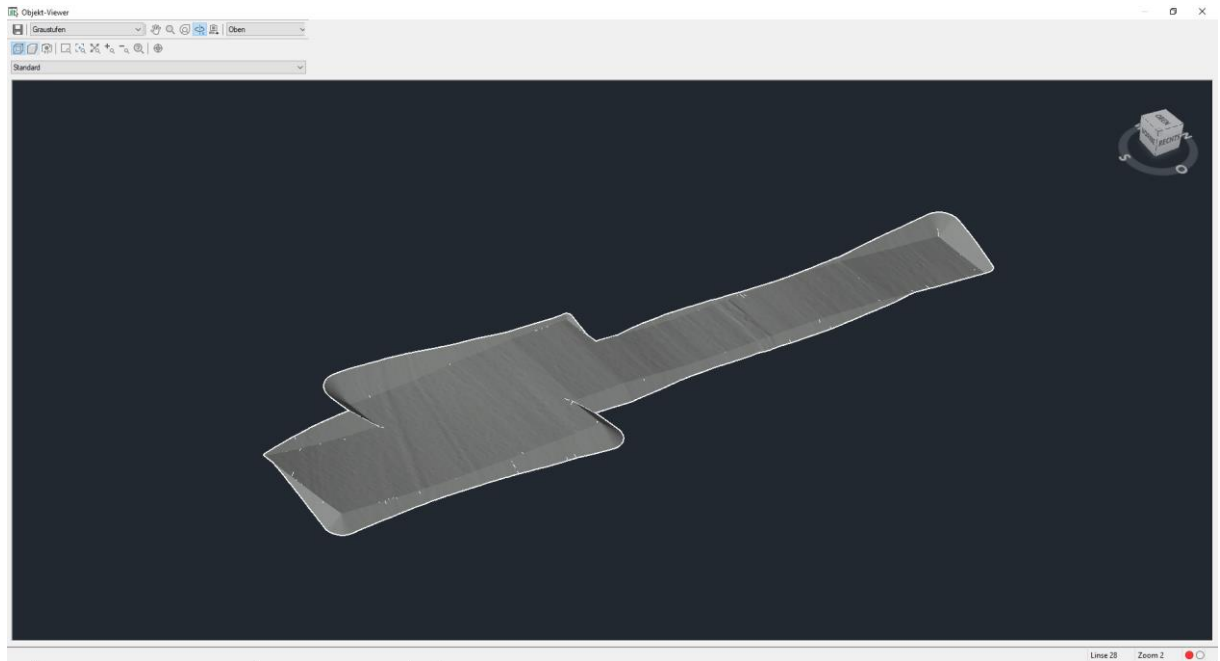
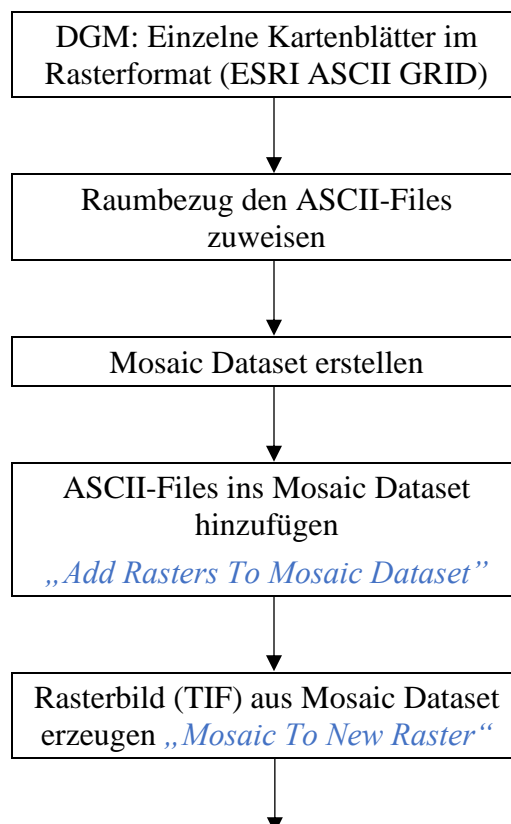


Abb. 72: Optimierte Kranstellfläche des Anlagenstandorts zwei im Objekt-Viewer

Gegenüberstellung der beiden Workflows (ArcGIS Pro vs. Civil 3D):

Datenakquise und -aufbereitung



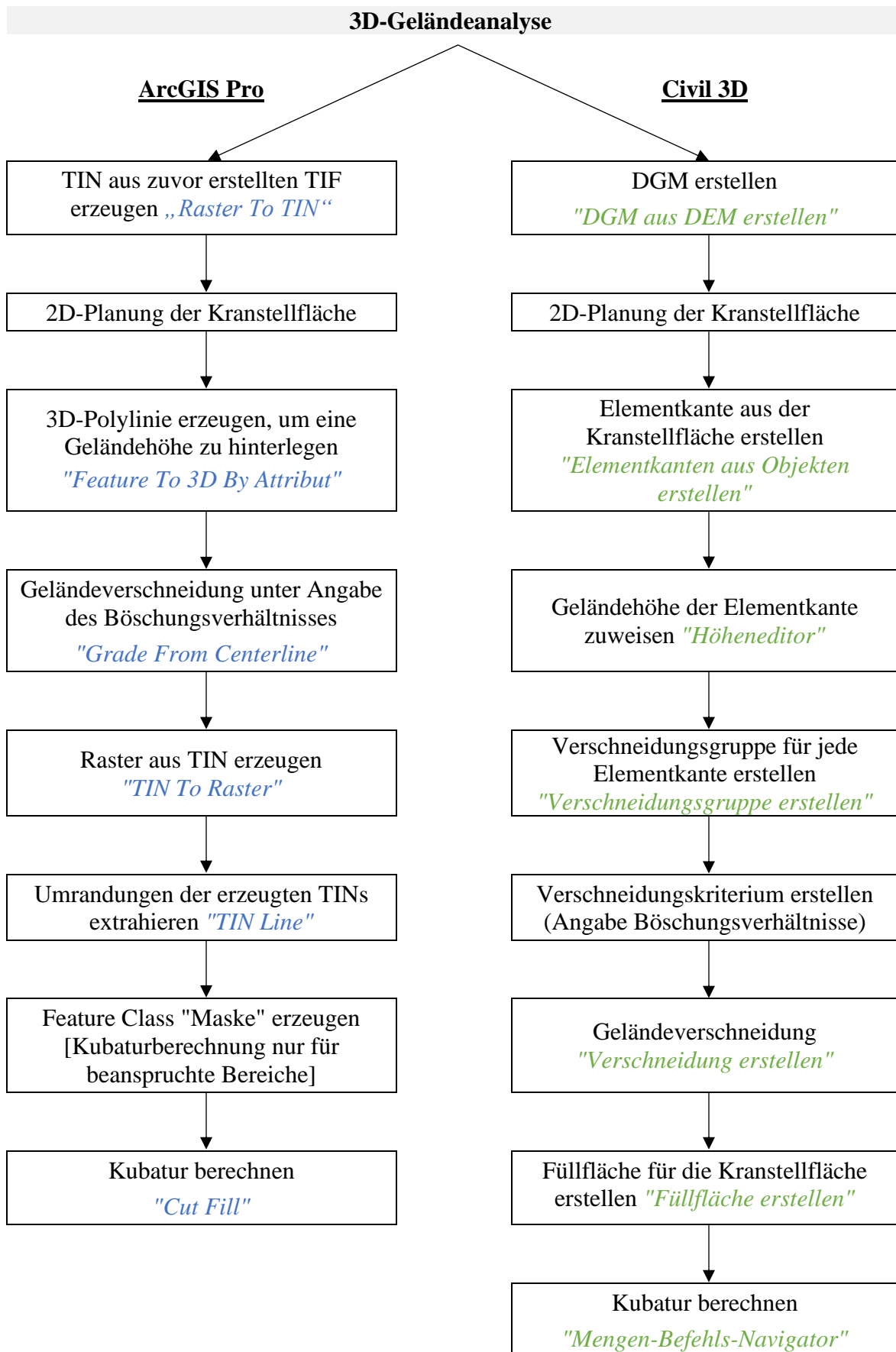


Abb. 73: Gegenüberstellung der Workflows (ArcGIS Pro vs. Civil 3D)

6.4 Vergleich / Gegenüberstellung der Ergebnisse

In folgender Tab. 21 werden die Auftrags- und Abtragsvolumina, sowie die Differenzvolumina und Flächenbeanspruchungen für die angenommenen und optimierten Geländehöhen dargestellt. Weiters folgt jeweils eine Unterscheidung zwischen den Ergebnissen von ArcGIS Pro und Civil 3D.

Angenommene Geländehöhen					
Anlagenstandort	Geländehöhe	Volumen Cut	Volumen Fill	Differenzvolumen	Fläche
ArcGIS Pro					
WKA 01	245m	71.735m ³	1.573m ³	70.162m ³	13.310m ²
WKA 02	233,5m	5.540m ³	12.510m ³	6.970m ³	11.273m ²
WKA 03	248m	4.85m ³	42.831m ³	42.346m ³	13.196m ²
Gesamt		77.760m ³	56.914m ³	20.846m ³	37.779m ²
Civil 3D					
WKA 01	245m	82.178m ³	1.613m ³	80.565m ³	15.686m ²
WKA 02	233,5m	5.563m ³	12.940m ³	7.377m ³	11.560m ²
WKA 03	248m	495m ³	42.246m ³	41.751m ³	13.300m ²
Gesamt		88.236m ³	56.799m ³	31.437m ³	40.546m ²
Optimierte Geländehöhen					
Anlagenstandort	Geländehöhe	Volumen Cut	Volumen Fill	Differenzvolumen	Fläche
ArcGIS Pro					
WKA 01	250,5m	21.886m ³	21.293m ³	593m ³	12.312m ²
WKA 02	232,75m	9.066m ³	7.118m ³	1.948m ³	11.051m ²
WKA 03	245m	14.073m ³	18.957m ³	4.884m ³	11.754m ²
Gesamt		45.025m ³	47.368m ³	2.343m ³	35.117m ²
Civil 3D					
WKA 01	250,5m	24.062m ³	21.785m ³	2.277m ³	13.243m ²
WKA 02	232,75m	8.986m ³	7.734m ³	1.252m ³	11.482m ²
WKA 03	245m	14.537m ³	18.681m ³	4.144m ³	12.191m ²
Gesamt		47.585m ³	48.200m ³	615m ³	36.916m ²

Tab. 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse

Bei den angenommenen Höhen für die Kranstellflächen sind die Volumina, welche mittels ArcGIS Pro ermittelt wurden, prinzipiell etwas geringer als jene, welche mit Civil 3D erzeugt wurden. Bei den Standorten WKA 02 und WKA 03 sind die Volumina- und Flächenunterschiede großteils unter 1.000 m³, wobei manche Volumina sogar nur um einige wenige Kubikmeter abweichen. Bei Standort WKA 01 unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Analysemethoden, mit rund 10.000 m³ Differenz, erheblich. Diese Abweichung kommt fast ausschließlich durch das Volumen, welches abgetragen werden muss, zustande. Weiters kommt es dadurch bei den Flächenangaben zu größeren Differenzen, als bei den anderen beiden Kranstellflächen.

Bei den optimierten Höhen ist das Ergebnis ähnlich, wobei sich die Volumina- und Flächenunterschiede noch weiter annähern. Die Differenzvolumina zwischen den ArcGIS Pro und Civil 3D-Ergebnissen sind bei den Standorten WKA 02 und WKA 03 bei der Kranstellfläche, auf einem geringen Volumenniveau, sehr ähnlich. Bei der ersten Kranstellfläche kommt es zu einer Verringerung der Volumendifferenz von nur noch rund 1.700 m³ zwischen ArcGIS Pro und Civil 3D.

Bei den angenommenen Höhen, wären neben den enormen überschüssigen Abtragsvolumen auch eine enorme Anzahl an internen Verschub-Volumina zu bewältigen. Dies würde keinen Sinn ergeben. Bei der optimierten Variante verringern sich die extremen Volumenmengen auf annehmbare Werte.

Wenn die Ergebnisse der angenommenen und optimierten Höhen für alle drei Kranstellflächen gemeinsam verglichen werden, verringern sich die Abtrag- und Auftragsvolumen enorm. Es verringert sich das Abtragsvolumen um zirka 35.000 m³ bis 40.000 m³ und das Auftragsvolumen um immerhin rund 10.000 m³.

Ein weiterer positiver Aspekt bei den höhenoptimierten Kranstellflächen ist dadurch gegeben, dass die Abtrag- und Auftragsvolumina bei den einzelnen Kranstellflächen annähernd ident sind und dadurch für den jeweils anderen Zweck verwendet bzw. herangezogen werden können. Dadurch müssen die Abtrag- und Auftragsvolumina nicht zwischen den unterschiedlichen Kranstellflächen transportiert werden. Es können daher die Erdabträge für notwendige Aufträge verwendet werden. Wenn hier die einzelnen Kranstellflächen betrachtet werden, kann festgestellt werden, dass bei der Kranstellfläche der Windkraftanlage WKA 01 mehr Erdmaterial abgetragen werden muss, als aufgetragen. Dasselbe gilt für die WKA 02. Bei WKA 03 ist es umgekehrt. Es muss hier so viel Material aufgetragen werden, sodass externes Material zum Standort transportiert werden muss.

Bei den angenommenen Höhen müssten bis zu 20.846 m³ (ArcGIS Pro) bzw. 31.437 m³ (Civil 3D) Differenzvolumen abgetragen werden. Durch die Höhenoptimierung kommt es zu erheblichen Verbesserungen der Differenzvolumen. Es muss daher nur 2.343 m³ (ArcGIS Pro) bzw. 615 m³ (Civil 3D) Material aufgetragen werden. Zusätzlich können beim Flächenverbrauch durch optimierte Höhen rund 2000 m² bis 3000 m² eingespart werden. Die Differenzen bei den Kubaturen, welche mittels ArcGIS Pro und Civil 3D ermittelt werden, lassen sich einerseits auf unterschiedliche Algorithmen bei der Erstellung von TINs zurückführen. Andererseits können die Unterschiede durch die Rückkonvertierung ins Rasterformat beim modellierten TIN mit ArcGIS Pro begründet werden, da die Kubaturberechnung ausschließlich in diesem Format durchführbar ist.

Damit diese Werte besser eingeschätzt werden können, besteht eine Auflistung, wieviel Kubikmeter von unterschiedlichen LKW-Typen transportiert werden können. Ein 3-Achs-Kipper hat ein Ladevolumen von zirka 10 m³, ein 4-Achs-Kipper eines von rund 12 m³ und ein Sattelzug besitzt ein Ladevolumen von etwa 25 m³ (vgl. HASSE TRANSPORT GMBH 2021). Es zeigt sich, dass bei nicht optimierten Höhen für die Kranstellflächen eine enorme Menge an Material abgeführt hätte werden müssen. Wenn als Beispiel ein Sattelzug herangezogen worden wäre, hätte dieser für die Berechnung von Civil 3D, 1258 Fahrten durchführen müssen, um das Material vollständig abzutransportieren. Bei der optimierten Variante hingegen reicht es aus, wenn zu den internen Verschubfahrten, bei 25 Fahrten zusätzliches Material angeliefert wird.

Wenn der zeitliche Aspekt der beiden Analysearten gegenübergestellt wird, wird folgendes Ergebnis erzielt: Die 3D-Geländeanalyse nimmt in ArcGIS Pro rund 15 Minuten mehr Zeit in Anspruch, als wenn diese in Civil 3D durchgeführt wird. Insgesamt dauert die

Geländeverschnaidung für die drei Kranstellflächen in ArcGIS Pro rund 50 Minuten, während sie in Civil 3D nur rund 35 Minuten benötigt. Hier beträgt die Differenz des zeitlichen Aufwands zwischen den beiden Programmen zwar nur rund eine Viertelstunde, jedoch muss beachtet werden, dass die Zeitmessung der 3D-Geländeanalyse mit im Vorhinein optimierten Geländehöhen für die Kranstellflächen, durchgeführt wurden. Daher mussten keine Anpassungen bezüglich der Höhen der Kranstellflächen vorgenommen werden. Dieser Prozess der Optimierung beansprucht in der Praxis zusätzlich Zeit.

In weiterer Folge werden die Vor- und Nachteile der 3D-Geländeanalysen mit ArcGIS Pro bzw. mit Civil 3D aufgezeigt:

ArcGIS Pro kann für einfache Geländeverschnaidungen, bei denen im Idealfall die Höhe der Kranstellfläche vorgegeben ist, ohne Bedenken, herangezogen werden. Bei der einmaligen Durchführung der Analyse besteht zwischen ArcGIS Pro und Civil 3D wenig Differenz bezüglich dem Zeitwaufwand. Der größte Nachteil bei ArcGIS Pro bei der 3D-Geländeverschnaidung lässt sich feststellen, wenn die Höhe der Kranstellfläche geändert bzw. optimiert werden muss. Hierzu müssen die gesamten Arbeits- bzw. Analyseschritte erneut bzw. öfters durchgeführt werden, um ein optimales Ergebnis zu erhalten. Dies nimmt wiederum sehr viel Zeit in Anspruch.

Als großer Vorteil von Civil 3D ist erwähnenswert, dass sich für jede Kranstellfläche eine individuelle Höhenoptimierung durchführen lässt. Es ist möglich, dass Veränderungen der Böschungsflächen und Kubarturmengen für unterschiedliche Höhen dynamisch angezeigt werden, wobei dieser Vorgang maximal drei Minuten beansprucht und optimale Ergebnisse erzielt. Es kann dadurch beim Arbeiten mit Civil 3D bei der Optimierung der Höhen gegenüber von ArcGIS Pro viel Zeit eingespart werden. Infolgedessen macht es Sinn, bei 3D-Geländeanalysen, bei welchen eine Optimierung der Kranstellflächenhöhen erfolgen muss, Civil 3D zu nutzen und nicht auf ArcGIS Pro zurückzugreifen.

Über Civil 3D können Längsschnitte entlang von Achsen erstellt werden, wodurch eine weitere Visualisierungsmöglichkeit der Abtrags- und Auftragsvolumina besteht. Hierzu muss zu Beginn eine Achse, am gewünschten Standort bzw. bei der gewünschten Kranstellfläche, erstellt werden. Im Anschluss kann der Längsschnitt über das Tool „Längsschnitt aus DGM erstellen“ erstellt werden. Hierbei muss die gewünschte Achse, das Urelände und das zuvor erstellte Gelände ausgewählt werden, damit danach ein Höhenplan erzeugt werden kann, welcher die beiden Geländemodelle beinhaltet und darstellt. Die rote Schraffur zeigt an, wo Abtragungen und die grüne, wo Aufschüttungen notwendig sind (siehe Abb. 74).

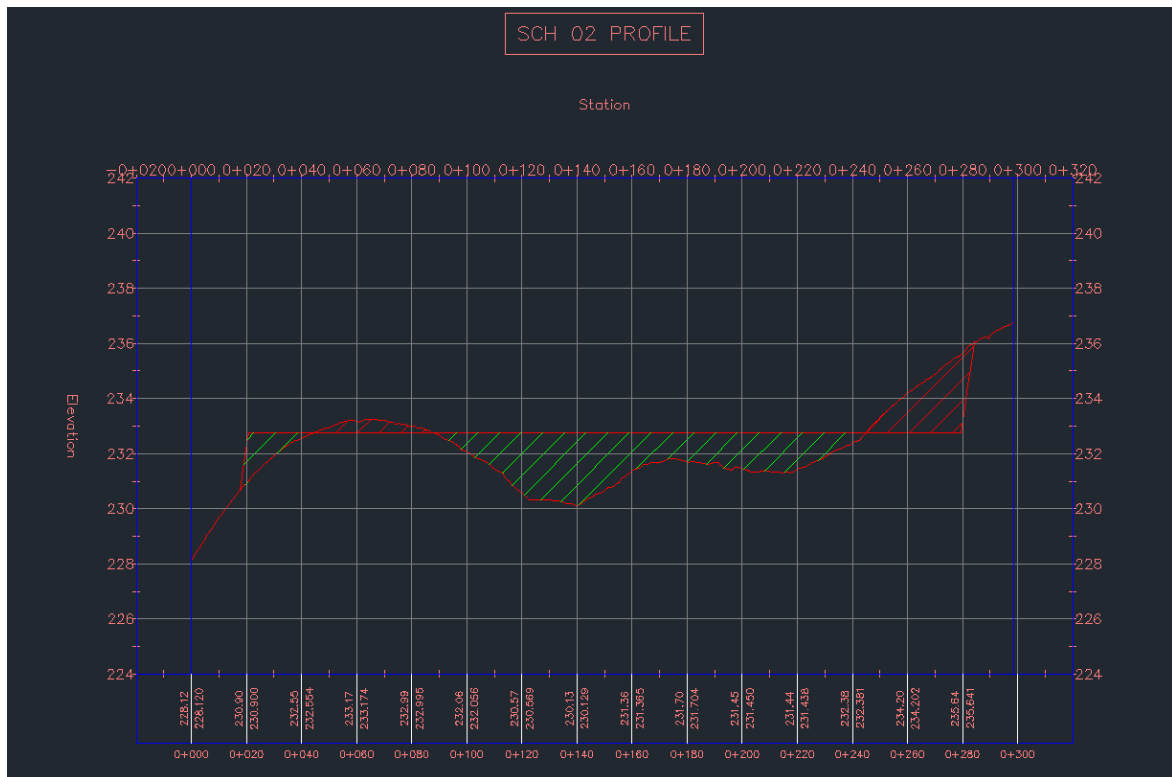


Abb. 74: Längsschnitt-Höhenplan (Civil 3D)

Die Nachteile von Civil 3D liegen in der weiteren Verarbeitung der gewonnenen bzw. modellierten Daten. Aus diesen können nicht automatisch beispielsweise Grundstücksverzeichnisse, mit den für die Kranstellflächen beanspruchten Grundstücken, erstellt werden. In ArcGIS Pro kann die Weiterverarbeitung jedoch mithilfe eines Python-Tools und einer Datenbank einfach realisiert werden (siehe Abb. 75).

Gde. Gaweinstal (Bez. Mistelbach)

KG Schrick (15038, Gde. Gaweinstal)

GST 2865/13; KG Schrick (15038); EZ 102; KG-EZ 15038			
Rotor - Luftraum	permanent	SCH 02	166 m ²
GST 2865/14; KG Schrick (15038); EZ 102; KG-EZ 15038			
Rotor - Luftraum	permanent	SCH 02	59 m ²
GST 2865/18; KG Schrick (15038); EZ 102; KG-EZ 15038			
Böschung (Fill)	permanent	SCH 03	73 m ²
GST 2865/21; KG Schrick (15038); EZ 102; KG-EZ 15038			
Böschung (Cut)	permanent	SCH 02	616 m ²
Böschung (Fill)	permanent	SCH 02	823 m ²
Kranstellfläche	permanent	SCH 02	7.014 m ²
Rotor - Luftraum	permanent	SCH 02	7.738 m ²
GST 2865/3; KG Schrick (15038); EZ 102; KG-EZ 15038			
Böschung (Fill)	permanent	SCH 03	144 m ²
GST 2875/1; KG Schrick (15038); EZ 2196; KG-EZ 15038			
Rotor - Luftraum	permanent	SCH 03	421 m ²

Abb. 75: Ausschnitt aus dem Grundstücksverzeichnis (ArcGIS Pro)

Weiters ist die Planausgabe in Civil 3D aufwändiger, da für jeden Standort ein Plan im Layout erstellt werden muss. In ArcGIS Pro kann hingegen ein Plan für einen Standort vorbereitet werden und über „Map Series Pages“ alle weiteren Pläne für die restlichen Standorte automatisch erzeugt werden (siehe Abb. 76). Es muss lediglich eine Feature Class, auf welche referenziert wird, gewählt und ein Maßstab angegeben werden.

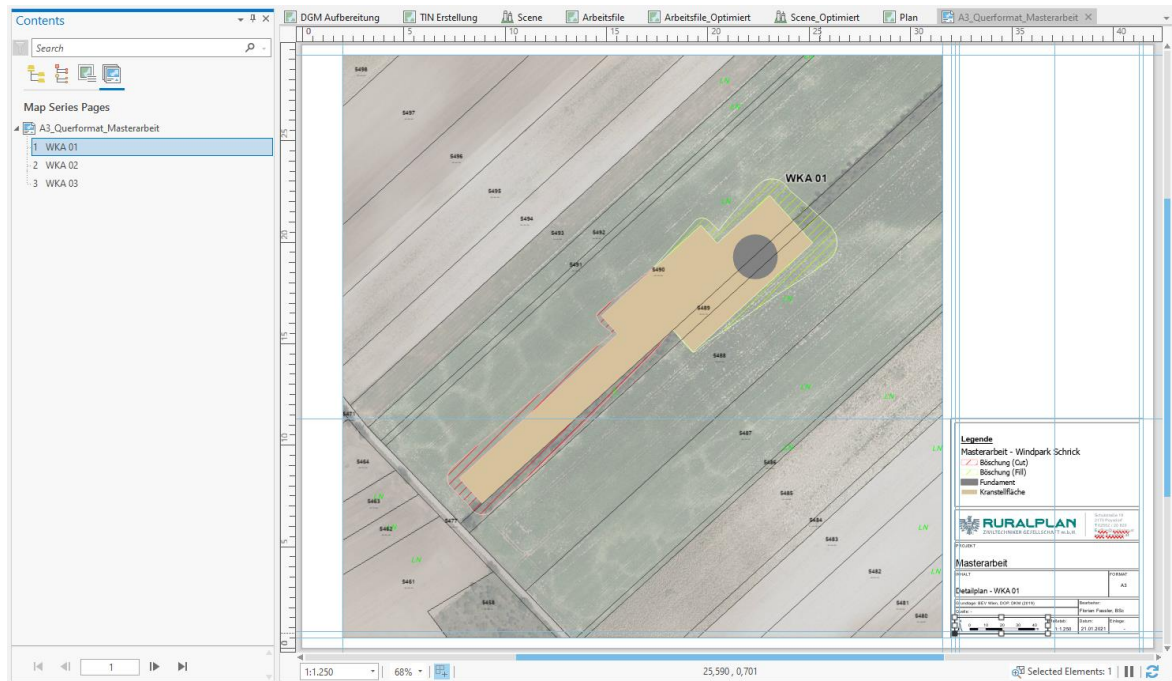


Abb. 76: Planausgabe mittels "Map Series Pages" (ArcGIS Pro)

Ein weiterer Vorteil beim Arbeiten mit ArcGIS Pro ist durch das direkte Einfügen von 3D-Modellen von Windkraftanlagen gegeben. Dadurch wird eine realistischere Darstellung, im Vergleich zur modellierten Kranstellfläche, vom zukünftigen Landschaftsbild ermöglicht (siehe Abb. 77). Die 3D-Modelle von Windkraftanlagen im Collada-Format können im Internet über diverse Seiten heruntergeladen werden, wie beispielsweise in diesem Fall über das Portal 3D WAREHOUSE. Anschließend können mittels der „Timeline“ Funktion, Animationen der Anlagenstandorte und virtuelle Flüge durch den Windpark erstellt werden.

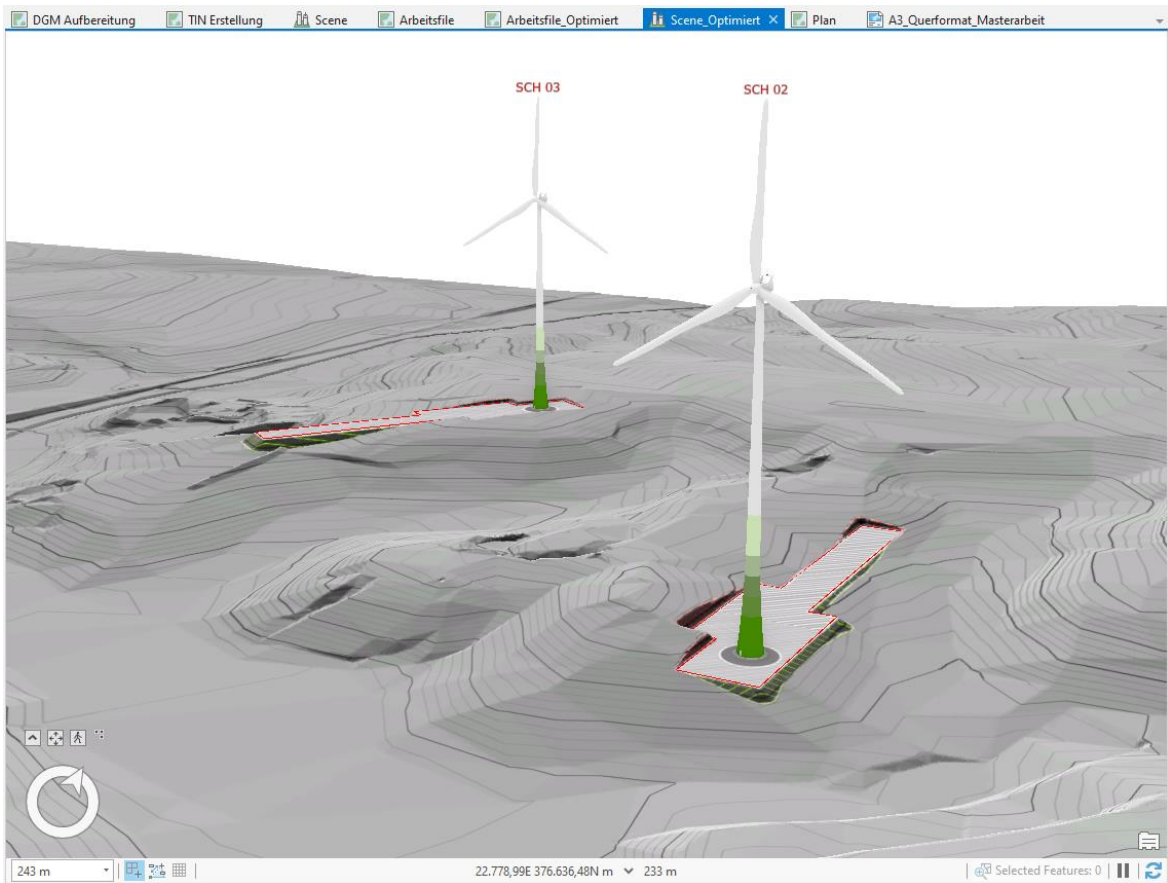


Abb. 77: Erzeugte Kranstellfläche mit 3D-Modellen von Windkraftanlagen (ArcGIS Pro Szene)

In folgender Tab. 22 sind die Vor- und Nachteile der jeweiligen Programme, exemplarisch mit den Farben der Ampel dargestellt, wobei „rot“ für „nicht geeignet“ und „grün“ für „gut geeignet“ steht.

	ArcGIS Pro	Civil 3D
Geländeverschnidung		
Längsschnitte		
Weiterverarbeitungsmöglichkeiten (Verzeichnisse)		
Planausgabe		
3D-Visualisierung		

Tab. 22: Vor- und Nachteile ArcGIS Pro und Civil 3D

Zusammenfassend handelt es sich bei ArcGIS Pro und Civil 3D um grundverschiedene Programme, deren Vorteile bei unterschiedlichen Anwendungen zum Vorschein kommen und daher auf eine differenzierte Nutzung abzielen. In der Praxis bedeutet dies, dass auf Civil 3D zurückgegriffen werden kann, wenn die Kubaturmengen minimiert werden sollen, da dieses Programm eine effiziente und schnelle Durchführung ermöglicht. Müssen die Daten für Eigentümer- oder Grundstücksverzeichnisse weiterverwendet werden, ist es sinnvoll, die Daten in ArcGIS Pro zu integrieren. Dadurch können Verzeichnisse und Pläne

automatisch ausgegeben werden. Das optimale Ergebnis könnte demnach folgend erzielt werden: Zuerst müsste die 3D-Geländeverschnidung in Civil 3D durchgeführt werden. Anschließend sollten die gewonnenen Daten in ArcGIS Pro überführt bzw. „eingespielt“ werden. Mittels ArcGIS Pro könnten Daten visualisiert und Verzeichnisse und Pläne ausgegeben werden.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterarbeit war es, ein GIS- und ein CAD-System zu vergleichen, um herauszufinden, mit welcher Softwarekategorie, 3D-Geländeanalysen (Geländemodellierungen) von Kranstellflächen bei Windparkplanungen schneller und effizienter durchgeführt werden können.

Der dritten Dimension wird immer mehr Bedeutung zugeschrieben. Es besteht zunehmender Bedarf für unterschiedliche Anwendungen. Diese verschiedenen Anwendungen benötigen Analysen und Bewertungen, um aussagekräftige Modelle der Realität zu erstellen.

Dazu wurde zunächst auf die Grundlagen von 3D-Geoinformation eingegangen, wobei die Anforderungen, Schwierigkeiten und Anwendungsmöglichkeiten von 3D-GIS erläutert wurden. Anhand des großen Spektrums an verschiedenen Anwendungsgebieten zeigt sich der große Nutzen eines 3D-GIS. Des Weiteren wurde auch der Stand der Forschung von der 3D-Geländeanalyse bzw. -visualisierung im Zusammenhang mit der Windpark Thematik ausgeführt. Es wurde dadurch ersichtlich, dass in diesem Bereich noch enormes Potenzial herrscht, oftmals werden Sichtbarkeitsanalysen und Standort- bzw. Potenzialanalysen durchgeführt und die Planungen in 2D vollzogen. Auch die Tatsache, dass in den USA in Universitäten das Kursangebot mit 3D-Geländeanalysen sehr gering ist, stützt diese These. Ebenso wurden die Grundlagen der beiden Softwarekategorien GIS und CAD erläutert und auf deren Modellierungsunterschiede eingegangen.

Da die Datengrundlagen für weitere Geländemodellierungen und -analysen durch digital erfasste Daten gebildet wurden, wurden die drei wichtigsten Methoden der Fernerkundung, nämlich die Photogrammetrie, LiDAR und RADAR erläutert. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die Datenformate und Modelle in der 3D-GIS Welt eingegangen, wobei die Standards, Digitale Geländemodelle und 3D-Datenformate verschriftlicht wurden.

Im Anschluss folgte ein Kapitel, in welchem die durchgeführte Umfrage mit Ziviltechnikern, Geometern und Planungsbüros und deren Nutzung von GIS- und CAD-Programmen evaluiert wurde. Es wird dadurch deutlich, dass großteils zweidimensional geplant wird und 3D-Planungen nur vereinzelt und sehr selten durchgeführt werden. Das Ergebnis der Befragung zeigt weiters, dass Firmen, welche 3D-Geländemodellierungen durchführen, vorwiegend Civil 3D (von der Firma Autodesk) verwenden. Da ArcGIS Pro (von der Firma Esri) während des Studiums angewendet wird und meine Arbeitsstelle ebenfalls auf dieses Softwareprogramm zurückgreift, fiel die Wahl zur Durchführung der 3D-Geländemodellierung auf Civil 3D und ArcGIS Pro.

Den empirischen Teil der Masterarbeit bildet die praktische Durchführung der 3D-Geländeanalyse zur Modellierung der Kranstellflächen von Windkraftanlagen. Hierzu wurden zu Beginn das Projektgebiet und die Windkraftanlagenstandorte ausgewählt, welche sich in der Katastralgemeinde Schrick im nördlichen Weinviertel befinden. Durch das vorherrschende hügelige Gelände konnte die Analyse zweckmäßig durchgeführt werden. Anschließend wurde aus den einzelnen Datengrundlagen ein zusammenhängendes digitales

Geländemodell für das gesamte Projektgebiet erstellt, welches in den weiteren Analysen als Datengrundlage herangezogen worden ist. Dieser Prozess wurde „Step by Step“ aufgezeigt.

Es folgte die praktische Durchführung der Analyse zur Geländeverschneldung mit ArcGIS Pro und Civil 3D. In den beiden Programmen wurden jeweils für die drei Kranstellflächen, zwei Geländeverschneldungen durchgeführt. Zum einen wurden Geländehöhen angenommen und zum anderen wurden Geländehöhen optimiert. Dabei wurde die Dauer der Durchführung gemessen, damit eine Aussage über die schnellere Ausführung getroffen werden konnte.

Mit ArcGIS Pro wurde zuerst die 3D-Geländeanalyse bewältigt, wobei alle Analyseschritte und verwendeten Werkzeuge dokumentiert wurden. Anschließend wurde dieselbe Analyse mit Civil 3D durchgeführt, wobei hier auch die verwendeten Tools vorgestellt und der Workflow verschriftlicht wurde. Mit den beiden Programmen ArcGIS Pro und Civil 3D ist es möglich, die Geländehöhe für die horizontalen Kranstellflächen individuell zu bestimmen und das Böschungsverhältnis frei zu wählen. Dadurch konnte gezeigt werden, dass sowohl von Civil 3D als auch von ArcGIS Pro zwei Grundanforderungen, nämlich das freiwählbare Böschungsverhältnis und die Anforderung nach einer ebenen Kranstellfläche, bei der Geländeanalyse von Kranstellflächen erfüllt werden.

Im Anschluss wurden die Ergebnisse von ArcGIS Pro und Civil 3D hinsichtlich Flächen- und Volumenverbrauch miteinander verglichen bzw. gegenübergestellt. Es stellte sich heraus, dass beide Programme ziemlich dieselben Flächen- und Volumenmengen für die beiden unterschiedlichen Kranstellflächenhöhen zum Ergebnis haben. Die Auswertung der 3D-Geländeanalyse zwischen den angenommenen und optimierten Geländehöhen für die Kranstellflächen macht klar, dass eine Optimierung durchaus Sinn macht, da enorme Mengen an Erdvolumen bzw. LKW-Fahrten eingespart werden und somit hohe Kosten für den Windparkbetreiber bei der Herstellung dieser Flächen erspart werden können.

Auch wurden die jeweils positiven und negativen Aspekte der beiden Programme, sowie deren Weiterverarbeitungs- und Darstellungsmöglichkeiten, aufgezeigt. Es stellte sich heraus, dass aufgrund der Schnelligkeit und Effizienz bei der Durchführung auf Civil 3D zurückgegriffen werden sollte, wenn die Kubaturmengen bei der Geländeverschneldung minimiert werden sollen. Die Arbeit zeigt, dass mit Civil 3D die Geländeverschneldungen am effizientesten durchgeführt werden kann. Civil 3D hat zusätzlich den Vorteil, dass Geländeverschneldungen einfacher und individueller im Vergleich zu ArcGIS Pro erstellt werden können. Die Forschungsfrage kann somit wie folgt beantwortet werden: Civil 3D erfüllt die Anforderungen bei der Geländeanalyse von Kranstellflächen bei Windparkplanungen optimal. Müssen hingegen die Daten zu weiteren Analyse- und Darstellungszwecken für Eigentümer- oder Grundstücksverzeichnisse weiterverwendet werden, ist es sinnvoll, über die Daten in ArcGIS Pro zu verfügen, da hier eine automatische Ausgabe von Verzeichnissen und Plänen möglich ist. Es zeigte sich daher, dass sich die gewonnen Ergebnisse im GIS besser für eine Weiterverarbeitung eignen.

Der optimale Workflow wäre daher folgender: Zuerst sollte die 3D-Geländeverschneldung in Civil 3D durchgeführt werden, da hier optimale Ergebnisse sehr effizient erstellt werden

können. Anschließend sollten die gewonnenen Daten in ArcGIS Pro überführt bzw. eingespielt werden und mittels dieses Programms die Visualisierung der Daten und Ausgabe von Verzeichnissen und Plänen vorgenommen werden.

Die Arbeit kann als Grundlage dienen, um den Entscheidungsprozess in Hinblick auf Softwarewahl bei Geländeanalysen für Planungsbüros zu unterstützen bzw. zu erleichtern. Es wurde daher der ideale Workflow bei 3D-Analysen skizziert. Infolgedessen können Kosten innerhalb der Firma gespart werden, wenn 3D-Geländeanalysen effizienter und schneller durchgeführt werden. Weiters verringern sich die Herstellungskosten im Zuge der Bauausführung, wenn der Flächen- und Erdvolumenverbrauch minimiert wird.

Da wir in einer dreidimensionalen Welt leben und die dritte Dimension, bei einigen Frage- bzw. Problemstellungen, immer mehr an Bedeutung gewinnt, wird ersichtlich, dass die Analyse und Modellierung von dreidimensionalen Geodaten ein hochinteressantes und aufstrebendes Teilgebiet der Geoinformation ist, welches auch in Zukunft durch den entstehenden Informationsgehalt, Weiterentwicklungen erfahren wird.

8 Literatur

- 3D WAREHOUSE (2014): Wind Turbine Vestas V126.
<https://3dwarehouse.sketchup.com/model/8db40bf504a9045e14b336185bc4bcb1/wind-turbine-Vestas-V126> (30.12.2020.658Z).
- ABDUL-RAHMAN, A. (1994): Digital Terrain Model Data Structures. In: *Buletin Ukur*, 5(1), pp. 61–72.
- ABDUL-RAHMAN, A. & PILOUK, M. (2008): Spatial data modelling for 3D GIS, Berlin [u.a.].
- ABDUL-RAHMAN, A., PILOUK, M. & ZLATANOVA, S. (2002): 3D GIS: Current status and perspectives. In: *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*.
- ABDUL-RAHMAN, A., ZLATANOVA, S. & PILOUK, M. (2008): The 3D GIS Software Development: global efforts from researchers and vendors. In: *Geoinformation Science Journal*.
- ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern, Darmstadt.
- ALI, I., KHAN, A., QURESHI, S., UMAR, M., HAASE, D. & HIJAZI, I. (2015): A Hybrid Approach Integrating 3D City Models, Remotely Sensed SAR Data and Interval-Valued Fuzzy Soft Set Based Decision Making for Post Disaster Mapping of Urban Areas. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), 3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014. Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Cham, 87–106.
- AMT DER NÖ LANDESREGIERUNG - ABTEILUNG NATURSCHUTZ (RU5) (1998): Naturschutzkonzept Niederösterreich, St. Pölten.
- ASPRS (2020): ASPRS – IMAGING AND GEOSPATIAL SOCIETY.
<https://www.asprs.org/> (07.11.2020.731Z).
- AUTODESK CIVIL 3D (2018): So legen Sie Einheiten- und Zoneneinstellungen fest.
<https://knowledge.autodesk.com/de/support/civil-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/DEU/Civil3D-UserGuide/files/GUID-A2C0D8F7-0BCF-46F6-8A0E-217834AF136B-htm.html> (09.01.2021.164Z).
- AUTODESK CIVIL 3D (2021a): Arbeitsablauf: So analysieren Sie DGM-Mengen mit dem Mengen-Befehls-Navigator.
<https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2021/DEU/?guid=GUID-F06475D1-BCB8-456A-AB29-E6B731DB32A8> (07.01.2021.815Z).
- AUTODESK CIVIL 3D (2021b): Informationen zum Erstellen eines triangulierten Mengenmodells. <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2021/DEU/?guid=GUID-34F74D97-A43A-4710-940B-6A9FE8A78E3E> (07.01.2021.425Z).

- AZRI, S., ANTON, F., UJANG, U., MIOC, D. & ABDUL-RAHMAN, A. (2015): Crisp Clustering Algorithm for 3D Geospatial Vector Data Quantization. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), 3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014. Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Cham, 71–86.
- BALDENHOFER, K. (2020): Lexikon der Fernerkundung. Radarfernerkundung. <https://www.fe-lexikon.info/lexikon-r.htm#radarfernerkundung> (17.10.2020).
- BALDENHOFER, K. & MARSCHALL, N. (2021): Lexikon der Fernerkundung. Plantare Fernerkundung. https://www.fe-lexikon.info/lexikon-p.htm#passiver_sensor (23.04.2021).
- BANDINI, F., SUNDING, T. P., LINDE, J., SMITH, O., JENSEN, I. K., KÖPPL, C. J., BUTTS, M. & BAUER-GOTTWEIN, P. (2020): Unmanned Aerial System (UAS) observations of water surface elevation in a small stream: Comparison of radar altimetry, LIDAR and photogrammetry techniques. In: *Remote Sensing of Environment*, 237.
- BARTELME, N. (2005): Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen, Berlin [u.a.].
- BECKER, L., BERNARD, L., DÖLLNER, J., HAMMELBECK, S., HINRICHS, K., KRÜGER, T., SCHMIDT, B. & STREIT, U. (1999): Integration dynamischer Atmosphärenmodelle mit einem (3+1)-dimensionalen objektorientierten GIS-Kern, Münster.
- BERNARD, L. (2005): 3D-GIS und -Atmosphärenmodelle für die urbane und regionale Umweltplanung. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 336–353.
- BILJECKI, F., LEDOUX, H. & STOTER, J. (2015): Improving the Consistency of Multi-LOD CityGML Datasets by Removing Redundancy. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), 3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014. Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Cham, 1–18.
- BILL, R. (2016): Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Berlin Offenbach.
- BITTER, P. & LEU, E. (2010): 3D-GIS-Anwendungen in der Aviatik: Beispiel Hindernis-Begrenzungsflächen. In: *Vorträge im Rahmen des Schweizer Forum für Geoinformation*, Zürich.
- BUNDESKAMMER DER ARCHITEKTEN UND INGENIEURKONSULENTEN (2021): Ziviltechnikerverzeichnis der Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen. <https://www.ziviltechniker.at/default.aspx> (20.03.2021).
- BUTWILOWSKI, E., THOMSEN, A., BREUNIG, M., KUPER, P. & AL-DOORI, M. (2015): Modeling and Managing Topology for 3-D Track Planning Applications. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), 3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014. Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Cham, 37–54.

- CALINA, A., CALINA, J. & MILUT, M. (2015): Study on Levelling Works Made for Drawing Tridimensional Models of Surface and Calculus of the Volume of Earthwork. In: *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 6, pp. 413–420.
- CHENG, J.-C. & JIANG, L.-J. (2013): Accuracy Comparison of Roadway Earthwork Computation between 3D and 2D Methods. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, pp. 1277–1285.
- CRISTEA, C. & JOCEA, A. F. (2016): GIS Application for Wind Energy. In: *Energy Procedia*, 85, pp. 132–140.
- CURTIS, E. (2008): Serving CityGML via Web Feature Services in the OGC Web Services - Phase 4 Testbed. In: VAN OOSTEROM, P., ZLATANOVA, S., PENNINGA, F. & FENDEL, E. (Hrsg.), *Advances in 3D Geoinformation Systems*. Springer, Berlin [u.a.], 331–340.
- DELAUNAY, B. (1934): Sur la sphere vide. In: *Bulletin der Akademie der Wissenschaften der UdSSR*, pp. 793–800.
- DLR - INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND RADARSYSTEME (2020): Tandem-L Science Home. https://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-8113/14171_read-35852/ (26.10.2020).
- DOYLE, F. J. (1978): Digital Terrain Models: An Overview. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44(12), pp. 1481–1485.
- EINSPIELER, M. (2012): Augmented Reality (AR) - Der Einfluss von AR auf die Geokommunikation. Diplomarbeit. Universität Wien, Wien.
- ELFERS, H., BOMBIEN, H., FRANK, H., SPÖRLEIN, T., KRENTZ, O., RAPPSILBER, I., SIMON, A. & SCHWEIZER, R. (2004): Wege zur 3D-Geologie. Personenkreis 3D der BIS Steuergruppe, Krefeld.
- EL-SHEIMY, N., HABIB, A. & VALEO, C. (2005): Digital terrain modelling. Acquisition, Manipulation and Applications, Boston, Mass.
- ESRI (2008): The Multipatch geometry Type. An Esri White Paper, Redlands.
- ESRI (2020a): An overview of the Area and Volume toolset. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/an-overview-of-the-area-and-volume-toolset.htm> (18.12.2020.034Z).
- ESRI (2020b): Esri-Grid-Format. <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/esri-grid-format.htm> (06.03.2021).
- ESRI (2020c): Raster file formats. ArcGIS Pro. http://othes.univie.ac.at/12744/1/2010-12-07_0848041.pdf (07.11.2020.646Z).
- ESRI (2020d): Storing lidar data. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/las-dataset/storing-lidar-data.htm> (07.11.2020).

- ESRI (2020e): Terrain dataset in ArcGIS Pro. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/terrain-dataset/terrain-dataset-in-arcgis-pro.htm> (08.11.2020).
- ESRI (2020f): Use lidar in ArcGIS Pro. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/las-dataset/use-lidar-in-arcgis-pro.htm> (08.11.2020).
- ESRI (2020g): What is CAD data? <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/cad/what-is-cad-data.htm> (08.10.2020.908Z).
- ESRI (2020h): What is CAD data? ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/cad/what-is-cad-data.htm> (08.11.2020).
- ESRI (2020i): What is KML? ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/kml/what-is-kml-.htm> (09.11.2020).
- EVANS, A., ROMEO, M., BAHREHMANN, A., AGENJO, J. & BLAT, J. (2014): 3D graphics on the web: A survey. In: *Computers & Graphics*, 41, pp. 43–61.
- FOGLIARONI, P. & CLEMENTINI, E. (2015): Modeling Visibility in 3D Space: A Qualitative Frame of Reference. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), *3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014*. Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Cham, 243–258.
- FREIWALD, N. & JANY, R. (2005): Dateiformate für vektorbasierte 3D-Geodaten. In: COORS, V. (Hrsg.), *3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen*. Wichmann, Heidelberg, 142–158.
- GAJSKI, D. (2004): Rasterbasierte Geländeoberflächenanalysen. Dissertation. Technische Universität, Wien.
- GALLAY, M. (2013): Direct Acquisition of Data: Airborne laser scanning. In: CLARKE, L. E. & NIELD, J. M. (Hrsg.), *Geomorphological Techniques* (Online Edition), London.
- GOOGLE DEVELOPERS (2020): Keyhole Markup Language. What is KML? <https://developers.google.com/kml?hl=en> (09.11.2020).
- GRINDGIS (2018): Difference and Similarities between GIS and CAD. In: *Grind GIS-GIS and Remote Sensing Blogs, Articles, Tutorials*.
- GRÖGER, G. & KOLBE, T. H. (2005a): 3D-Stadtmodellierung auf der Basis internationaler GI-Standards. In: COORS, V. (Hrsg.), *3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen*. Wichmann, Heidelberg, 234–249.
- GRÖGER, G. & KOLBE, T. H. (2005b): Normen und Standards für 3D-Geodaten. In: COORS, V. (Hrsg.), *3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen*. Wichmann, Heidelberg, 56–70.

- GÜLCH, E. (2005): Erfassung von 3D-Daten mit Digitaler Photogrammetrie. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 4–25.
- GUO, Y., DU, Q., LUO, Y., ZHANG, W. & XU, L. (2008): Application of augmented reality gis in architecture. In: *ISPRS, XXXVII(Part B5)*.
- GUO, Z., LIU, T., CHEN, Z., LIU, Z., MONZER, A. & SHERIDAN, J. (2020): Study of the flow around railway embankment of different heights with and without trains. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 202.
- HAALA, N. (2005): Laserscanning zur dreidimensionalen Erfassung von Stadtgebieten. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 26–38.
- HAKE, G., GRÜNREICH, D. & MENG, L. (2002): Kartographie. Visualisierung raum-zeitlicher Informationen, Berlin [u.a.].
- HASSE TRANSPORT GMBH (2021): Fuhrpark. <https://www.hasse-transport.de/fuhrpark/#/page/2> (22.01.2021).
- HEINZEL, J. (2011): Combined use of high resolution LiDAR and multispectral data for automated extraction of single trees and tree species. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Freiburg.
- HEIPKE, C. (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung – eine Einführung. In: HEIPKE, C. (Hrsg.), Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freedon und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 1–27.
- HENGL, T., GRUBER, S. & SHRESTHA, D. P. (2003): Digital Terrain Analysis in ILWIS. Lecture Notes and User Guide, Enschede.
- HILBRING, D. (2005): 3D-GIS Visualisierung in der Umweltinformatik. Dissertation. Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe.
- HIRT, C. (2014): Digital Terrain Models. In: *Encyclopedia of Geodesy*. Springer, Cham, 1–6.
- HÖLTINGER, S., SALAK, B., SCHAUPPENLEHNER, T., SCHERHAUFER, P. & SCHMIDT, J. (2016): Austria's wind energy potential – A participatory modeling approach to assess socio-political and market acceptance. In: *Energy Policy*, 98, pp. 49–61.
- HUTCHINSON, M. F. & GALLANT, J. C. (1999): Representation of terrain. In: LONGLEY, P. A., GOODCHILD, M. F., MAGUIRE, D. J. & RHIND, D. W. (Hrsg.), *Geographical information systems. Principles and Technical Issues*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 105–124.
- IG WINDKRAFT (2020a): Windenergie in Österreich. https://www.igwindkraft.at/fakten/?xmlval_ID_KEY%5B0%5D=1234 (08.10.2020.413Z).

- IG WINDKRAFT (2020b): Windkraft im Trend.
https://www.igwindkraft.at/?mdoc_id=1040981 (22.11.2020).
- JACOBSEN, K. (2016): Ersatz des SRTM Oberflächenmodells durch AW3D30? In: KERSTEN, T. P. (Hrsg.), Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG. Lösungen für eine Welt im Wandel, Hamburg, 80–89.
- JACOBSEN, K. (2017): Satellitenphotogrammetrie. In: HEIPKE, C. (Hrsg.), Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 343–372.
- JÄGER, E. & HEIPKE, C. (2014): Geotopographie und Photogrammetrie. In: KUMMER, K., KÖTTER, T. & EICHORN, A. (Hrsg.), Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen. Wichmann, 375–431.
- JUTZI, B., MEYER, F. J. & HINZ, S. (2017): Aktive Fernerkundungssensorik – Technologische Grundlagen und Abbildungsgeometrie. In: HEIPKE, C. (Hrsg.), Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 65–103.
- KADA, M. (2019): 3D-Gebäudemodellierung und -generalisierung. In: SESTER, M. (Hrsg.), Geoinformatik: Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 123–156.
- KELLER, S. (2003): Geo-Informations- oder CAD-System? Forschungsbericht. Hochschule für Technik Rapperswil.
- KHAN, A., YAO, Z. & KOLBE, T. H. (2015): Context Aware Indoor Route Planning Using Sematic 3D Building Models with Cloud Computing. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), 3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014. Lecture notes in geoinformation and cartography. Springer, Cham, 175–192.
- KLAUS, M. (1997): Erstellung von 3D-Stadtmodellen für die virtuelle interaktive Begehung, München.
- KOCH, A. (2006): Semantische Integration von zweidimensionalen GIS-Daten und Digitalen Geländemodellen. Dissertation. Universität Hannover, Hannover.
- KOPPERS, L. (2004): 3D-Stadtmodelle — Techniken, Trends, Visionen. In: *Landesverband Bayern*, (2), pp. 111–127.
- KRAUS, K. (2012): Photogrammetrie. Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, Berlin.
- KREBS, J. (2017): Basics CAD, Basel/Berlin/Boston.
- KUHLMANN, C., MARKUS, F. & THEURER, E. (2003): CAD und GIS in der Stadtplanung. Ein Leitfaden zum effizienten Einsatz, Karlsruhe.

- LAND NIEDERÖSTERREICH (2020): NÖ Raumordnungsgesetz 2014 - Landesrecht konsolidiert Niederösterreich, Fassung vom 15.11.2020.
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrNO&Gesetzesnummer=20001080> (15.11.2020).
- LANGE, N. de (2020): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung, Berlin, Heidelberg.
- LEEBMANN, J., COELHO, A. H., BÄHR, H.-P., STAUB, G. & WIESEL, J. (2005): Augmented Reality im Katastrophenmanagement. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 305–319.
- LFU BAYERN (2020): 3D-Modelle.
https://www.lfu.bayern.de/geologie/3d_modelle/index.htm (14.11.2020).
- LI, Z., ZHU, Q. & GOLD, C. (2005): Digital terrain modeling. Principles and methodology, New York.
- LOIGGE, B. (2013): Analysemöglichkeiten im 3D GIS Bereich. Masterarbeit. Universität Wien, Wien.
- LORBER, G. & RANZINGER, M. (1995): 3D-Stadtmodell Graz – Überlegungen für eine operationelle Umsetzung. In: *VGI - Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 83(3), pp. 111–118.
- MALOY, M. A. & DEAN, D. J. (2001): An Accuracy Assessment of Various GIS-Based Viewshed Delineation Techniques. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(11), pp. 1293–1298.
- MANDLBURGER G., HÖFLE, B., BRIESE, C., RESSL, C., OTEPKA, J., HOLLAUS, M. & PFEIFER, N. (2009): Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 61(7), pp. 89–97.
- MAYER, S. (2004): Automatisierte Objekterkennung zur Interpretation hochauflösender Bilddaten in der Erdfernerkundung. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin.
- MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A. & KISHINO, F. (1994): Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. In: *Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies*, (2351), pp. 282–292.
- MILLER, C. L. & LAFLAMME, R. A. (1958): The Digital Terrain Model - Theory & Application. In: *Photogrammetric Engineering*, 24(3), pp. 433–442.
- MOORE, K. (2002): Visualizing data components of the urban scene. In: *Virtual Reality in Geography*. Taylor & Francis. New York.

- MORADI, S., YOUSEFI, H., NOOROLLAHI, Y. & ROSSO, D. (2020): Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. In: *Energy Strategy Reviews*, 29.
- NEBIKER, S. (2005): Wenn Geodaten fliegen lernen - 3D-Geoinformationssysteme in der Aviatik. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 320–334.
- NELSON, A., REUTER, H. I. & GESSLER, P. (2008): Chapter 3 DEM Production Methods and Sources. In: HENGL, T. (Hrsg.), Geomorphometry. Concepts, software, applications. Elsevier, 65–85.
- NORDEX ENERGY GMBH (2019): Transport, Zuwegung und Krananforderungen. Allgemeine Dokumentation, Hamburg.
- OGC (2020): KML. OGC Standards. <https://www.ogc.org/standards/kml/> (09.11.2020).
- OGC (2021): CityGML. <https://www.ogc.org/standards/citygml> (19.03.2021).
- PAELKE, V. (2019): 3D-Visualisierung und Mixed Reality. In: SESTER, M. (Hrsg.), Geoinformatik: Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 45–67.
- PAMMER, B. (2018): Digitale Höhenmodelle. WS2018. In: *Skript zur Vorlesung Photogrammetrische Datenerfassung. Universität Wien*.
- PETSCHKE, P. (2012): Grading for Landscape Architects and Architects, Basel.
- PETZOLD, B. (2003): 3D City Models - Nice Toy or Basis Information of the City Council? In: *Proceedings of the FIG Working Week 2003*, Paris, France, April 13.-17.
- PEUKER, T. K., FOWLER, R. & LITTLE, J. J. (1976): The Triangulated Irregular Network, Burnaby.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. & GLIRA, P. (2017): Laserscanning. In: HEIPKE, C. (Hrsg.), Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 431–481.
- PRINZ, T. (2017): Digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften. https://ivvgeo.uni-muenster.de/vorlesung/FE_Script/2_3.html (17.10.2020).
- PUNIA, M. & KUNDU, A. (2014): Three dimensional modelling and rural landscape geo-visualization using geo-spatial science and technology. In: *Neo Geographia*, 3(3), pp. 1–19.
- RAFIEE, A., VAN DER MALE, P., DIAS, E. & SCHOLTEN, H. (2018): Interactive 3D geodesign tool for multidisciplinary wind turbine planning. In: *Journal of environmental management*, 205, pp. 107–124.

- REUMONT, F. von (2010): Web3D und dessen Potenzial zur Visualisierung geologischer Daten - gezeigt am Beispiel der Stadt Wien. Masterarbeit. Universität Wien, Wien.
- RIEDL, A., KOTZBEK, G., MITTERMAIER, R. & RIEDL, D. (2016): Einführung in die Kartographie und Geoinformation I + II. Geoinformationsverarbeitung. Studienjahr 2016/17. In: *Skript zur Vorlesung Einführung in die Geoinformation*. Universität Wien.
- SKLENICKA, P. & ZOUHAR, J. (2018): Predicting the visual impact of onshore wind farms via landscape indices: A method for objectivizing planning and decision processes. In: *Applied Energy*, 209, pp. 445–454.
- SÖRGEL, U., WEGNER, J. D. & THIELE, A. (2017): Fusion von optischen und Radardaten. In: HEIPKE, C. (Hrsg.), *Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie*, Herausgegeben Von Willi Freeden und Reiner Rummel, Berlin, Heidelberg, 733–769.
- STÄDTETAG NORDRHEIN-WESTFALEN (2004): 3D-Stadtmodelle. Eine Orientierungshilfe für die Städte in NRW.
- STANGER, W. (1982): Ein digitales Geländemodell und einige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Flurbereinigung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- STOLZ, M. (2013): Digitale Oberflächenmodelle aus Bildkorrelation. In: *DVW Bayern e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement - Mitteilungen*, 65(2), pp. 139–150.
- STOTER, J., LEDOUX, H., ZLATANOVA, S. & BILJECKI, F. (2016): Towards sustainable and clean 3D Geoinformation. In: KOLBE, T. H., BILL, R. & DONAUBAUER, A. (Hrsg.), *Geoinformationssysteme 2016. Beiträge zur 3. Münchner GI-Runde*. VDE Verlag, 100–113.
- STOTER, J., ROENSDORF, C., HOME, R., CAPSTICK, D., STREILEIN, A., KELLENBERGER, T., BAYERS, E., KANE, P., DORSCH, JOSEF, WOZNIAC, PIOTR, LYSSELL, G., LITHEN, T., BUCHER, B., PAPARODITIS, N. & ILVES, R. (2015): 3D Modelling with National Coverage: Bridging the Gap Between Research and Practice. In: BREUNIG, M., AL-DOORI, M., BUTWILOWSKI, E., KUPER, P., BENNER, J. & HAEFELE, K. H. (Hrsg.), *3D Geoinformation Science : The Selected Papers of the 3D GeoInfo 2014. Lecture notes in geoinformation and cartography*. Springer, Cham, 207–226.
- STOTER, J. & ZLATANOVA, S. (2003): 3D GIS, where are we standing? In: *ISPRS Joint Workshop on 'Spatial, Temporal and multi-dimensional data modelling and analysis'*.
- THE KHRONOS GROUP (2011a): COLLADA. 3D Asset Exchange Schema. <https://www.khronos.org/collada/> (30.01.2021).
- THE KHRONOS GROUP (2011b): WebGL. OpenGL ES for the Web. <https://www.khronos.org/webgl/> (09.03.2021).
- THENIUS, E. (1974): Niederösterreich. Geologie der österreichischen Bundesländer in kurzgefassten Einzeldarstellungen, Wien.

- THOMSEN, A., BREUNIG, MARTIN, BÄR, WOLFGANG, CREMERS, A. B. & SIEHL, A. (2005): Datenbankunterstützung für geologische Anwendungen. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 354–375.
- TIEDE, D. & BLASCHKE, T. (2005): Visualisierung und Analyse in 2,5D- und 3D-GIS - von loser Kopplung zu voller Integration? Beispiele anhand kommerzieller Produkte. In: COORS, V. (Hrsg.), 3D-Geoinformationssysteme. Grundlagen und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 280–292.
- TORLEGARD, K. (1995): Vorlesung "Fotogrammetri", KTH Stockholm.
- VILBIG, J. M., SAGAN, V. & BODINE, C. (2020): Archaeological surveying with airborne LiDAR and UAV photogrammetry: A comparative analysis at Cahokia Mounds. In: *Journal of Archaeological Science: Reports*, 33.
- WAGNER, W., ULLRICH, A. & BRIESE, C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. In: *VGI - Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 91(4), pp. 223–235.
- WANG, Z., QU, H., WU, Z., YANG, H. & DU, Q. (2016): Formal representation of 3D structural geological models. In: *Computers & Geosciences*, 90, pp. 10–23.
- WEB3D CONSORTIUM (2021a): Recommended Standards. <https://www.web3d.org/standards> (08.03.2021.615Z).
- WEB3D CONSORTIUM (2021b): Web3D Consortium. Open Standards for Real-Time 3D Communication. <https://www.web3d.org/> (08.03.2021.013Z).
- WECHSLER, S. & KROLL, C. (2006): Quantifying DEM Uncertainty and its Effect on Topographic Parameters. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(9), pp. 1081–1090.
- WEIBEL, R. (1990): Verarbeitung und Anwendung digitaler Geländemodelle im Bereich der Geographie. In: *Geographica Helvetica*, 1990(4), pp. 145–153.
- WILSON, J. P. (2012): Digital terrain modeling. In: *Geomorphology*, 137(1), pp. 107–121.
- WILSON, J. P. & GALLANT, J. C. (2000): Terrain analysis. Principles and applications, New York.
- YIN, L. (2010): Integrating 3D Visualization and GIS in Planning Education. In: *Journal of Geography in Higher Education*, 34(3), pp. 419–438.
- ZEINLER, K. (2019): Fuzzy Viewshed auf Basis des vertikalen Schwinkels zur Bestimmung der visuellen Dominanz von Windkraftanlagen. Master Thesis. Paris Lodron-Universität Salzburg, Salzburg.

- ZHAO, W., ZHAO, J., MA, L., ZHOU, W., TIAN, J. & QIAN, J. (2015): Can Grid and TIN coexist? In: GeoComputation 2015 Conference Proceedings. Proceedings of the 13th International Conference on GeoComputation, Dallas, 223–229.
- ZHOU, G., SONG, C., SIMMERS, J. & CHENG, P. (2004): Urban 3D GIS From LiDAR and digital aerial images. In: *Computers & Geosciences*, 30(4), pp. 345–353.
- ZHOU, Q. (2017): Digital Elevation Model and Digital Surface Model. In: RICHARDSON, D., CASTREE, N., GOODCHILD, M. F., KOBAYASHI, A., LIU, W. & MARSTON, R. A. (Hrsg.), *The international encyclopedia of geography. People, the earth, environment, and technology*. Wiley Blackwell, Malden, MA, Oxford, Chichester, West Sussex, 1–17. 10.1002/9781118786352.wbieg0768.
- ZLATANOVA, S. (2002): Advances in 3D GIS.
- ZLATANOVA, S., RAHMAN, A., RAHMAN & PILOUK, M. (2003): Trends in 3D GIS development. In: *Journal of Geospatial Engineering*, 4, pp. 71–80.

Abb. 78: Excel-Fragebogen

Verwendete Programme zur Darstellung von 2D-Daten

Programme	Häufigkeit						Gesamt	Anzahl	Durchschnitt	Zufriedenheit						Gesamt	Anzahl	Durchschnitt	
QGIS	3	1	2	1			7	4	1,75	2	1	2	2			7	4	1,75	
BricsCAD	1	2					3	2	1,50	1	2					3	2	1,50	
Geosi Viewer	1						1	1	1,00	1						1	1	1,00	
Geosi Profil	3						3	1	3,00	3						3	1	3,00	
ArcGIS	2	1	3	1	1		8	5	1,60	1	1	1	2	2		7	5	1,40	
AutoCAD	3	1	2	1	2	1	10	6	1,67	2	2	2	2	2	1	11	6	1,83	
Civil 3D	2	2					4	2	2,00	2	1					3	2	1,50	
rmDATA	1						1	1	1,00	1						1	1	1,00	
GeoMapper																			
VectorWorks	1						1	1	1,00	1						1	1	1,00	
									<u>1,61</u>										<u>1,55</u>

Tab. 23: Verwendete Programme zur Darstellung von 2D-Daten

Verwendete Programme zur Darstellung von 3D-Daten

Programme	Häufigkeit				Gesamt	Anzahl	Durchschnitt	Zufriedenheit				Gesamt	Anzahl	Durchschnitt
BricsCAD	2				2	1	2,00	1				1	1	1,00
Geosi Panorama	2				2	1	2,00	2				2	1	2,00
Geosi Profile	3				3	1	3,00	3				3	1	3,00
ArcGIS	2	4			6	2	3,00	1	2			3	2	1,50
Civil 3D	3	3	1	3	10	4	2,50	2	3	1	1	7	4	1,75
QGIS	4				4	1	4,00	3				3	1	3,00
PROVI	2				2	1	2,00	1				1	1	1,00
ALLPLAN	2				2	1	2,00	2				2	1	2,00
VectorWorks	3				3	1	3,00	1				1	1	1,00
							<u>2,61</u>							
														<u>1,81</u>

Tab. 24: Verwendete Programme zur Darstellung von 3D-Daten

Verwendete Programme für 3D-Geländeanalysen

Programme	Häufigkeit				Gesamt	Anzahl	Durchschnitt	Zufriedenheit				Gesamt	Anzahl	Durchschnitt
Geosi Panorama	2				2	1	2,00	2				2	1	2,00
ArcGIS	3	3	4		3	1	3,33	1	1	3		1	1	1,67
Civil 3D	4	4			8	2	4,00	2	1			3	2	1,50
QGIS	4				4	1	4,00	2				2	1	2,00
VectorWorks	4				4	1	4,00	1				1	1	1,00
							<u>3,47</u>							
														<u>1,63</u>

Tab. 25: Verwendete Programme für 3D-Geländeanalysen

Verwendete Programme für 3D-Geländemodellierungen

Programme	Häufigkeit				Gesamt	Anzahl	Durchschnitt	Zufriedenheit				Gesamt	Anzahl	Durchschnitt	
Geosi Panorama	4				4	1	4,00	2				2	1	2,00	
ArcGIS	4	4			8	2	4,00	3	3			6	2	3,00	
Civil 3D	4	3	1	4	12	4	3,00	1	3	1	1	6	4	1,50	
rmDATA GeoMapper	3				3	1	3,00	2				2	1	2,00	
PROVI	2				2	1	2,00	2				2	1	2,00	
ALLPLAN	2				2	1	2,00	2				2	1	2,00	
VectorWorks	4				4	1	4,00	2				2	1	2,00	
							3,14						2,07		

Erklärung

Hiermit versichere ich,

- dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien, am 11.05.2021