Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut für Meteorologie und Klimatologie (BOKU-Met)



Universität für Bodenkultur Wien

Masterarbeit

Quantifizierung und Visualisierung der Wasser- und Sedimentvolumina des Neusiedler Sees anhand eines topographischen 3D-Modells

Thomas Reiter, BSc. (Matrikelnummer: 01540027)

Angestrebter akademischer Grad:

Dipl.-Ing.

Masterstudium: Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Erstbetreuer: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Josef Eitzinger

Zweitbetreuer: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Erwin Heine

PD Mag. Dr. Erich Draganits

Wien, 24. 05. 2021

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

VORWORT UND DANKSAGUNG

Die Motivation für die gegenständliche Untersuchung war das persönliche und berufliche Interesse. Einerseits verbringe ich meine Freizeit gerne am Wasser, andererseits bin ich im Rahmen meiner beruflichen Tätigkeit mit Vermessungen beschäftigt. An neuen Vermessungsmethoden bin ich sehr interessiert. Bei der Erkenntnisgewinnung haben viele Personen mitgewirkt. Ein besonderer Dank gilt den Expertinnen und Experten für die Informationsbereitschaft, den Teilnehmerinnen und Teilnehmern an den Erhebungen der Daten und allen, die zum Weiterarbeiten motivierten. Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Josef Eitzinger darf ich als Erstbetreuer und Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Erwin Heine sowie Herrn PD Mag. Dr. Erich Draganits als Zweitbetreuer abschließend für die Förderung dieser Arbeit herzlichst danken.

"Der Boden des Sees ist nach den Berichten der Fischer eine große Ebene, ohne besondere Untiefen oder Sandbänke." (Csaplovics, J. v., 1821, S.60)

KURZFASSUNG

Digitale Geländemodelle, bestehend aus Gewässerbett und Umland, bilden die wesentliche Grundlage für diverse numerische Modelle. Durch die immer weiter fortschreitende Entwicklung im Bereich der Sensortechnik ist eine genaue Erfassung des Seebodens sowie der geologischen Schichten und der Erdoberfläche möglich.

In der gegenständlichen Forschungsarbeit werden die Verteilung sowie die Mächtigkeit der Sedimente des Neusiedler Sees mittels der Daten aus dem Seevermessungsprojekt GeNeSee von 2011 - 2013 visualisiert. Die Arbeit unterstreicht den interdisziplinären Charakter zwischen Geodäsie, Hydrologie und Geologie. Der Schwerpunkt liegt auf einer möglichst präzisen Beschreibung der Topographie des Gewässers und seinem Umland. Letztlich besteht das Ziel darin, eine Datenbasis hinsichtlich Oberflächenmodelle des festen Seebodens und der Schlammoberfläche für weiterführende Anwendungen zu schaffen. Die Kenntnis der exakten Höhenlage des Seebodens, die Verteilung sowie die Mächtigkeit der Schlammschicht sind von zentraler Bedeutung für die nachhaltige Seebewirtschaftung. Die hydrographische Vermessung erfolgt mittels Bathymetrie, vor allem mit Hilfe von Echolotmessungen. Die topographische Gestalt des Seegrundes wird auf Grundlage der vorhandenen Datenbestände von 2011 - 2013 mittels bathymetrischer Karte visualisiert. Anschließend erfolgt die Offenlegung des 3D-Modells für die Öffentlichkeit als Web-GIS Karte.

Schwerpunktmäßig wird der Aufbau eines möglichst genauen Digitalen Geländemodells (DGM) erläutert. Teilaspekte sind dabei die Integration des Airborne Laserscan-DGM vom Land Burgenland, die Modellierung der Gewässersohle und die Ableitung der Wasser-Land-Grenze. Ein besonderer Schwerpunkt wird auf die Generierung des digitalen Geländemodells auf Basis modernster Erfassungsmethoden – Airborne Laserscanning und Echolot für den Seeboden - gelegt. Die Problematik der Datenzusammenführung und des Datenmanagements wird ebenfalls behandelt.

ABSTRACT

Digital terrain models, consisting of the lake bottom, and the surrounding area, form the essential basis for various numerical models. Due to the advancing development in the field of sensor technology, it is possible to precisely record the lakebed as well as the geological layers and the earth's surface.

In this research project, the distribution and thickness of the sediments of Lake Neusiedl are analysed using data from the lake survey project GeNeSee of 2011 - 2013. The work underlines the interdisciplinary character between geodesy, hydrology and geology. The focus is on describing the topography of the water body and its surrounding area as precisely as possible. Ultimately, the aim is to create a database in terms of data volume and data arrangement for further applications. The knowledge of the exact elevation of the lake bottom, the distribution as well as the thickness of the mud layer are of central importance for sustainable lake management. The hydrographic survey was carried out by means of bathymetry, mainly with the help of echo sounder measurements. The topography of the lakebed is visualised by means of a bathymetric map on the basis of the existing data from 2011 - 2013. The 3D model will then be made available to the public as a web GIS map.

The focus is on the construction of a DTM that is as accurate as possible. Partial aspects are the integration of the lasercan-DTM from the province of Burgenland, the modelling of the lakebed and the derivation of the water-land boundary. Special emphasis is placed on the generation of the digital terrain model based on the most modern acquisition methods - airborne laser scanning and echo sounding for the lake bottom. The problem of data merging and data management will also be addressed.

INHALTSVERZEICHNIS

| 1 | | Einl | leitung, Herangehensweise und Forschungsfrage | . 1 |
|---|-----|------|---|-----|
| 2 | | Ter | minologie und Forschungsstand | . 6 |
| | 2.1 | | Klassifizierung des Sees | 6 |
| | 2.2 | | Sedimente und Sedimentgesteine | 6 |
| | 2.3 | | Geologischer Untergrund des Neusiedler Sees | 9 |
| | 2.4 | | Hydromorphologischer Schlammkörper | .16 |
| | 2.5 | | Forschungsstand und ältere Vermessungen | .23 |
| 3 | | Ang | gewandte Methodik | 25 |
| | 3.1 | | Multi-frequente Echolotmessung der Sedimentstrukturen im offenen Seebereich | .25 |
| | 3.2 | | Geodätisch-bodenmechanische Punktmessverfahren mit D-GPS und Bodensonden entlang unregelmäßig verteilter Profile | .27 |
| | 3.3 | | Flugzeuggestütztes Airborne Laser Scanning (ALS) zur exakten Kartierung der Höhenverhältnisse in den Schilf-Festland-Zonen und teilweise inneren Schilfbereichen. | .29 |
| 4 | | Gru | ndlagen für die Erstellung eines 3D-Modells des Neusiedler Sees | 31 |
| | 4.1 | | Geoinformationssysteme | .31 |
| | 4. | 1.1 | Layerkonzept | .32 |
| | 4.1 | 1.2 | Raster GIS | .32 |
| | 4.1 | 1.3 | Vektor GIS | .32 |
| | 4.1 | 1.4 | Hybride Systeme | .33 |
| | 4.2 | | Topographische Modelle | .34 |
| | 4.2 | 2.1 | Definitionen von Geländemodellen | .34 |
| | 4.2 | 2.2 | Verschiedene Modelle | .35 |
| | 4.2 | 2.3 | Anwendungen | .35 |
| | 4.3 | | ArcGIS Pro | .36 |
| | 4.4 | | QGIS | .36 |
| | 4.5 | | Web-GIS | .37 |

| 5 | | Erst | tellung der Bathymetrischen Karte | 39 | |
|----|----------------------|------|---|-----|--|
| | 5.1 | | Räumliche Interpolation | .39 | |
| | 5.1.1 | | Deterministische Interpolationsverfahren | 39 | |
| | 5.1 | 1.2 | Stochastische Interpolationsverfahren | 41 | |
| | 5.2 | | Problemstellung und vorhandene Daten | 42 | |
| | 5.2 | 2.1 | Echolot-Daten | .44 | |
| | 5.2 | 2.2 | ALS-Daten und Orthofotos | .44 | |
| | 5.3 | | Methodik | .45 | |
| | 5.3 | 3.1 | Wasserflächen- und Landflächenpolygon | 46 | |
| | 5.3 | 3.2 | Objekte | 50 | |
| | 5.4 | | Interpolation der Querprofildaten | 51 | |
| | 5.4 | 4.1 | Polynom-Interpolation | 51 | |
| | 5.4 | 4.2 | Interpolation mittels TIN | 53 | |
| | 5.4 | 4.3 | Hybride Interpolation | 57 | |
| | 5.4 | 4.4 | 3D-Darstellung | .62 | |
| | 5.5 | | Hafenhandbuch | .65 | |
| | 5.5. | | Georeferenzierung | 65 | |
| | 5.6 | | Web-GIS Veröffentlichung | .66 | |
| | 5.6 | 6.1 | ArcGIS Online | .67 | |
| | 5.6 | 6.2 | Layer der Web-Map | 67 | |
| 6 | | Bat | hymetrie des Neusiedler Sees | 70 | |
| | 6.1 | | Datenerhebung Wasser- und Schlammvolumina | .70 | |
| | 6.2 | | Vergleich zu früheren Modellen | 75 | |
| 7 | | Zus | ammenfassung & Ausblick | 77 | |
| 8 | Verwendete Literatur | | | 79 | |
| 9 | | Abk | ürzungsverzeichnis | 83 | |
| 10 | Anhänge | | | | |
| | 10.1 | | Seemodell | .84 | |
| | 10.2 | | Szenen Ansichten | .85 | |

| 10.3 | Web-GIS | 87 |
|------|---|----|
| 10.4 | Profilschnitte durch den Neusiedler See | 89 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| Abbildung 1: | Vereinfachte Geologie des Karpaten-Pannonischen Beckensystems | 2 |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 2: | Hydrologisches Einzugsgebiet des Neusiedler Sees | 3 |
| Abbildung 3: | Schematisches geologisches Profil | 9 |
| Abbildung 4: | Geologische Übersichtskarte | 11 |
| Abbildung 5: | Regionales Profil über den Neusiedler See (Querschnitt südlich des Sees) | 12 |
| Abbildung 6: | Neusiedler See und Lage der seismischen Linien | 13 |
| Abbildung 7: | Seismisch stratigraphische Interpretation | 14 |
| Abbildung 8: | Sedimentologischer Aufbau des Seebohrkerns NDS7 im Nordosten des | |
| | Neusiedler Sees | 15 |
| Abbildung 9: | Korngrößen und Verteilungen in Sedimentproben des Neusiedler Sees | 18 |
| Abbildung 10: | Überblick über die drei Messmethoden: Echolot-Messungen (Längs- und | |
| | Querprofilfahrten im Seebereich); Einzelpunktmessungen (Magenta und | |
| | Schwarz); ALS Befliegung Österreich (blaue Flugstreifen) | 25 |
| Abbildung 11: | Echogramm einer sub-bottom-profiler-Messung | 26 |
| Abbildung 12: | Prinzipskizze der hydrographischen Vermessung des Neusiedler Sees | 27 |
| Abbildung 13: | Schema des kombinierten bodenphysikalischen Messsystems CSPS | 28 |
| Abbildung 14: | CSPS-Profile (links) und SBP-Echogramm (rechts) an einem | |
| | Referenzpunkt | 28 |
| Abbildung 15: | Prinzipskizze Airborne Laserscan | 30 |
| Abbildung 16: | Information und Daten im Kontext eines Transfers | 31 |
| Abbildung 17: | Wort GIS in einer Rasterstruktur | 32 |
| Abbildung 18: | Vektormodell und seine geometrischen Bestandteile (Features) | 33 |
| Abbildung 19: | Rasterdaten (Satellitenbilder) und Vektordaten (Verwaltungsgrenzen) | 34 |
| Abbildung 20: | Höhenlinien (links), Reliefschummerung (rechts) | 36 |
| Abbildung 21: | Web-GIS-Anwendung Burgenland | 38 |
| Abbildung 22: | DGM der Schlammoberfläche erzeugt im Rahmen des Projektes 2015 | 43 |
| Abbildung 23: | Echolotaufnahme durch Querprofile (rot) und Fahrten in Ufernähe, Kanälen | |
| | und Häfen (grün) | 44 |
| Abbildung 24: | Pegelstände der Messstellen des Neusiedler Sees (Februar 2019) | 47 |
| Abbildung 25: | Pegelstände der Messstellen des Neusiedler Sees (Juni 2019) | 47 |
| Abbildung 26: | Mittlerer Wasserstand 2019 | 48 |
| Abbildung 27: | Wasseranschlagslinie bei einem Wasserstand von 115,50 m. ü. A. (rote | |
| | Linie) | 49 |
| Abbildung 28: | Wasserflächenpolygon (blau), Landflächenpolygon (grün) | 50 |
| Abbildung 29: | Polynom-Interpolation der Schlammoberflache | 52 |
| Abbildung 30: | Hohendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolot-Messungen) und | |
| | 3D-Modell der Polynominterpolation | 53 |
| Abbildung 31: | (a) Homogenisierung der Datenverteilung durch Trinagulierung zwischen | - 4 |
| | Querprofilen (b) Dreiecksbildung zwischen Punkten desselben Profils | 54 |
| Abbildung 32: | Triangulated Irregular Network Schlammobertlache | 55 |
| Abbildung 33: | DGM der Schlammoberflache; erzeugt aus der TIN-Interpolation | 56 |
| Abbildung 34: | Honendimerenzen zwischen Ausgangswerten (Echolot-Messungen) und | F 7 |
| | אט-ואוטמפוו מפר דווא-וחנפראסומנוסא | ว/ |
| Abbildung 35: | Zwischenpunkte aus der Polynom-interpolation (rot), Echolotmessdaten | E0 |
| | (UIQU) | 00 |

| Abbildung 36: DGM der Schlammoberfläche; erzeugt aus der hybriden Interpolation | 59 |
|--|-----------|
| Abbildung 37: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotmessungen) und 3D | - |
| Modell der Hybrid-Interpolation | 60 |
| Abbildung 38: Hohendifferenzen zwischen Ausgangswerten | |
| (Echolotquerprofilmessungen) und 3D-Modell der Hybrid-Interpolation | 61 |
| Abbildung 39: Honendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotmessungen) und | C1 |
| Abbildung 40: Höbendifferenzen zwiegenen Ausgengewerten (Esheletmessungen) und | |
| 2D Modell aug dom, Jahr 2015 | 60 |
| Abbildung 41: 2D Szononanciabt dog nördlighan Taile dog Neusiadlar Soog | 02 |
| Abbildung 41: 3D-Szenenansicht des nördlichen Teils des Neusiedler Sees | 64 |
| Abbildung 42: 3D-Szenenansicht Gehäude (blau) und Stege (grün) | 65 |
| Abbildung 44: Georeferenzierung einer Bilddatei: Buster Bucht | 66 |
| Abbildung 45: Mittlerer Wasserstand Neusiedler See (1976-2021) | 70 |
| Abbildung 46: DGM Fester Seeboden | 71 |
| Abbildung 47: DGM Schlammoberfläche | 72 |
| Abbildung 48: Polygon zur Analyse der Schlammächtigkeiten | 73 |
| Abbildung 49: Übersicht über die Schlammächtigkeiten | 74 |
| Abbildung 50: DGM der Schlammoberfläche verbunden mit dem Geländemodell des | |
| Umlandes | 84 |
| Abbildung 51: 3D-Szenenansicht der Joiser Bucht | 85 |
| Abbildung 52: 3D-Szenenansicht von einem Bootshaus in der Nähe von Breitenbrunn | 85 |
| Abbildung 53: 3D-Szenenansicht der Ruster Bucht | 86 |
| Abbildung 54: 3D-Szenenansicht der Ruster Bucht | 86 |
| Abbildung 55: ArcGIS Online, verfügbare Raster-Laver | 87 |
| Abbildung 56: ArcGIS Online, verfügbare Web-Karten | 87 |
| Abbildung 57: ArcGIS Online, Map-Viewer | 88 |
| Abbildung 58: Profilschnitte durch den Neusiedler See | 89 |
| Abbildung 59: Querprofil 1 | 90 |
| Abbildung 60: Querprofil 2 | 91 |
| Abbildung 61: Querprofil 3 | 91 |
| Abbildung 62: Querprofil 4 | 92 |
| Abbildung 63: Querprofil 5 | 92 |
| Abbildung 64: Querprofil 6 | 93 |
| Abbildung 65: Querprofil 7 | 93 |
| Abbildung 66: Querprofil 8 | 94 |
| Abbildung 67: Querprofil 9 | 94 |
| Abbildung 68: Querprofil 10 | 95 |
| Abbildung 69: Querprofil 11 | 95 |
| Abbildung 70: Querprofil 12 | 96 |
| Abbildung 71: Querprofil 13 | 96 |
| Abbildung 72: Querprofil 14 | 97 |
| Abbildung 73: Querprofil 15 | 97 |
| Abbildung 74: Querprofil 16 | 98 |
| Abbildung 75: Querprofil 17 | 98 |
| Abbildung 76: Querprofil 18 | 99 |
| Abbildung 77: Längsprofil 19 | 99 |

TABELLENVERZEICHNIS

| Begriffe für Korngrößenklassifikation und siliklastische Gesteinstypen (nach | |
|--|---|
| J.A. Udden und C.K Wentworth) | 8 |
| Feste Bestandteile der Neusiedler See Sedimente | .19 |
| Sedimentschichten des Neusiedler Sees | .21 |
| Überblick der Vermessungen und Kartierungen | 24 |
| ALS- und Orthofoto-Metadaten | .45 |
| statistische Kennwerte der Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten | |
| (Echolotmessungen) und den 3D-Modellen | .60 |
| Enthaltene Layer im fertigen Modell | .68 |
| berechnete Parameter des Neusiedler Sees | .75 |
| berechnete Parameter des Neusiedler Sees (1997) | .75 |
| | Begriffe für Korngrößenklassifikation und siliklastische Gesteinstypen (nach J.A. Udden und C.K Wentworth) Feste Bestandteile der Neusiedler See Sedimente Sedimentschichten des Neusiedler Sees Überblick der Vermessungen und Kartierungen ALS- und Orthofoto-Metadaten statistische Kennwerte der Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotmessungen) und den 3D-Modellen Enthaltene Layer im fertigen Modell berechnete Parameter des Neusiedler Sees (1997) |

1 Einleitung, Herangehensweise und Forschungsfragen

Die Kenntnis der Verteilung sowie die Mächtigkeit der Sedimente und der Schlammschicht des Neusiedler Sees hat für die nachhaltige Seebewirtschaftung eine zentrale Bedeutung. Die visuelle Darstellung der Oberfläche ist für die Öffentlichkeit insbesondere für die Verwaltung, für Wissenschaftler aber auch für Geologen und Freizeitsportler relevant. Mit dieser Forschungsarbeit wird ein grafisches Modell entwickelt und über eine Web-GIS Applikation veröffentlicht.

Der größte See Österreichs, der extrem flache Neusiedler See (ungarisch "Fertő-tó") mit einer Durchschnittstiefe von 1,50 Metern, liegt im nördlichen Burgenland (47°50´N 16°45'E) an der österreichisch-ungarischen Grenze. Der Grund des Sees bildet mit einer Seehöhe von 113 Meter über Adria (m. ü. A.) den tiefsten Punkt des Landes. (vgl. BMWF,1987, S.13)

Das Neusiedler See-Becken entstand im Spätglazial durch tektonische Absenkung und ist etwa 13.000 Jahre alt. (vgl. Herzig, A., 2014, S.113)

Wie in Abbildung 1 ersichtlich, liegt es zwischen dem Leithagebirge im Nordwesten und der kleinen ungarischen Tiefebene (Donaubecken), im Südosten an der Grenzzone der Ostalpen, des Wiener Beckens, der Karpaten und des Pannonischen Beckens. Das Gebiet des Neusiedler Sees wird von Sedimenten des Miozäns bis Quartärs des Pannonischen Beckensystems bedeckt. Der Untergrund des Sees besteht aus Feldspat-, quarz- und vor allem dolomithaltigen neogenen und quartären Sedimenten sehr geringer Korngröße. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.78)



Abbildung 1: Vereinfachte Geologie des Karpaten-Pannonischen Beckensystems Quelle: Loisl, J., et al., 2018, S.78

Der See ist maximal 36 km lang und zwischen 7 und 15 km breit. Die Gesamtfläche beträgt 320 km², davon liegen vier Fünftel der Fläche in Österreich und der Rest in Ungarn. Die offene Wasserfläche umfasst 140 km². Die Fläche des bis zu fünf Kilometer breiten Schilfgürtels, der das Gewässer umgibt (mit Ausnahme des Ostufers), beträgt 180 km². (vgl. Heine, E., et al., 2016, S.9)

Das heutige Einzugsgebiet des Neusiedler Sees, welches in Abbildung 2 zu sehen ist, mit einer Gesamtfläche von 1116 km² wird durch die Gebirgslandschaft der östlichen Ausläufer des Leitha-Gebirges, der Hügellandschaft des Nordens und Nordostens sowie vom Flachland des östlichen Gebiets geprägt. Das Verhältnis zwischen See und dem hydrologischen Einzugsgebiet außerhalb des Sees wird folglich mit 1:2,6 beziffert. (vgl. Wolfram, G., Déri, L. & Zech, S. 2014, S.8)



Abbildung 2: Hydrologisches Einzugsgebiet des Neusiedler Sees Quelle: Wolfram, G., Déri, L. & Zech, S., 2014

Das Neusiedler See Gebiet zählt mit rund 600 mm Jahresniederschlag (Mittelwert 1960-1998: 639 +/- 96 mm) und einer Temperatur von 10 Grad Celsius im Jahresmittel zu den trockensten und wärmsten Gebieten in Österreich. Das Gebiet ist stark windexponiert. Nordwest-und Südostwinde wehen im Frühling am stärksten. Vor allem die ständig wehenden Winde, die hohen Temperaturen, die geringe relative Luftfeuchtigkeit und die wenigen Niederschläge bewirken eine starke Verdunstung. Zu 76 % (Mittelwert 1965-2012) erhält der Neusiedler See sein Wasser aus Niederschlägen. (vgl. Herzig, A., 2014, S.107)

Wasserstandsschwankungen bewirken einen Hochstand im April und einen Tiefstand im Oktober. Die Schwankungen können sowohl Pegelhochstände (Mitte der 1870er Jahre war der See fast drei Meter tief) als auch eine völlige Austrocknung des Sees bewirken. Draganits, E., et al. (2006) beschreiben ausgeprägte Seespiegelschwankungen. Der See war im späten 19. Jahrhundert komplett ausgetrocknet, was auch in historischen topographischen Karten sichtbar ist. In den Phasen der Austrocknung wurde der am Bodengrund angesammelte Schlamm durch den Wind verblasen. Das könnte eine Erklärung dafür sein, warum die seichte Seewanne bis jetzt nicht verlandet ist. Äolische Erosionserscheinungen sind im angrenzenden Gebiet häufig. (vgl. Draganits, E., et al., 2008)

Im Jahr 1909 erfolgte die Fertigstellung des Einserkanals, ein künstlicher Abfluss, zur Entwässerung des Neusiedler Sees. Dieser Kanal war notwendig, da der natürliche Ausfluss ab 1780 sukzessive abgeschnitten wurde. Dadurch können hohe Seewasserstände reguliert

werden. Eine Bevorratung für niederschlagsarme Perioden ist nicht möglich. Durch sein geringes Gefälle verschlammt der Kanal leicht. Die Hauptzuflüsse sind die Wulka und in sehr geringem Umfang der Angerbach. (vgl. Wolfram, G., Déri, L. & Zech, S., 2014, S.10 ff.)

Charakteristisch für den Neusiedler See sind eine Schlammschicht (kein Kies) aus siltigsandigen Tonen und eine ausgeprägte Sedimentationsdynamik (vgl. Kogelbauer, I., 2015). Durch Wind und geringe Wassertiefe erfolgt eine intensive Durchmischung und es kommt zu einer starken Trübung des Wassers. Durch gelöste Salze, welche zum größten Teil aus Soda (Natriumcarbonat) und zu geringeren Teilen aus Glaubersalz (Natriumsulfat) bestehen, wird die graue Trübung aufrechterhalten. Die bisher gewonnenen Daten skizzieren geologische, geomorphologische und klimatische Einflüsse bei der Entstehung der Sodifikationsprozesse im Neusiedler See.

Inhalt dieser Forschungsarbeit ist die Darstellung der Verteilung sowie der Mächtigkeit der Seesedimente des Neusiedler Sees aus den Projektergebnissen aus GeNeSee von 2014.

Die drei Hauptforschungsfragen mit Subfragen lauten:

- Mit welcher Methode lässt sich das 3D-Modell vom Neusiedler See bestmöglich erzeugen und visualisieren?
 - Wie kann aus den Vermessungsdaten ein möglichst detailgetreues digitales Geländemodell erstellt werden?
 - Wie kann das Oberflächenrelief anhand der Seemodell-Daten für die verschiedenen Anwendungsbereiche bestmöglich dargestellt und veranschaulicht werden?
 - Wie kann die Seeboden- und Schlammoberfläche des Neusiedler Sees quantifiziert werden?
- Wie groß sind die Sedimentmächtigkeiten und Sedimentvolumina im Neusiedler See?
 - Wie kann die Sedimentmächtigkeit auf Grundlage der digitalen Geländemodelle ermittelt werden?
 - Mit welchen Methoden können die Mächtigkeit und die Verteilung des Schlammkörpers des Neusiedler Sees bestimmt werden?
- Wie kann die Visualisierung des 3D-Modells für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden?
 - Welches Zielpublikum hat die Veröffentlichung der Visualisierung?
 - Welche Systeme eignen sich am besten, um die Ergebnisse öffentlich zugänglich zu machen?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird folgende Herangehensweise gewählt:

Zunächst werden grenzüberschreitende Daten des Neusiedler Sees und seines Umlandes, die einheitlich mittels hydrographischer Vermessung des Multi-frequenten Echolot-Verfahrens, Airborne Laserscanning (ALS) und der Messmethode des geodätisch-bodenmechanischen Punktmessverfahren (D-GPS und Bodensonden) erfasst wurden und die Ausgangslage mit den Datenbeständen des Projektes GeNeSee von 2014 analysiert. Mittels Literaturrecherche werden bereits vorhandene Studien bezüglich des Forschungsstandes, insbesondere in der Erfassung des Seebodens hinsichtlich Verteilung und Mächtigkeit der Seesedimente und der Mächtigkeit der Schlammschicht, als Grundlage für die Erhebungen herangezogen. Die Fortentwicklung der Modellierung erfolgt mit angewandten Methoden der Programme ArcGIS Pro und QGIS. Die Ableitung des Volumens des Seeschlamms und das Seewasservolumen geschehen durch Differenzberechnungen im Geoinformationssystem (GIS). Aus diesen Daten der topographischen Gestalt des Seegrundes erfolgt die Darstellung einer bathymetrischen Karte mit Tiefenzahlen, Tiefenlinien und farbigen Tiefenschichten, die im Web-GIS der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

2 Terminologie und Forschungsstand

Für das Verstehen des Erkenntnisobjektes werden in diesem Kapitel zentrale Begriffe der Forschungsarbeit und der Status quo identifiziert. Es erfolgt eine Beschreibung bzw. Erläuterung von Schlüsselbegriffen wie Sedimentbildung, -transport, -verlagerung und Hydrologie, Hydromorphologie, als Grundlage für den weiteren Verlauf der Arbeit. Die Erklärung lediglich punktuell bedeutsamer Definitionen findet an der jeweils relevanten Stelle statt.

2.1 Klassifizierung des Sees

Die Bewirtschaftung von ober- und unterirdischen Gewässern ist Teil der Wasserwirtschaft, der Bewirtschaftung des Wassers durch den Menschen. Nach der Klassifikation der Gewässer handelt es sich beim Neusiedler See im heutigen Zustand um ein Binnengewässer und als natürlicher See ist er ein Stillgewässer mit dem Zufluss eines Fließgewässers, der Wulka sowie dem Rákos Bach und einem künstlichen Abfluss. Die Binnengewässerkunde (Limnologie) ist ein Teil der Hydrologie, der Lehre von den oberirdischen Gewässern. Im Sinne der limnologischen Definition ist ein See wesentlich tiefer als ein Teich mit der Ausbildung einer stabilen Temperaturschichtung. Die Einteilung der Seen erfolgt nach der Frequenz der Durchmischung. So gilt in dieser Definition der flache Steppensee nicht als echter See. Die Mindestgröße eines Sees beträgt ein Hektar (vgl. Mauersberger, R., 2006, S.51 ff.).

Meist bestehen Seen aus "Süßwasser", was auch das umgangssprachliche Kriterium der Zuordnung darstellt. Als "Sodasee" (vgl. Herzig, A., 2014, S.107 und Boros, E. et al., 2013, S.38) mit einem pH-Wert zwischen 7,5 und 10 trifft jedoch nicht die Kategorie Süßwasser, sondern das Kriterium der Salinität bei der Zuordnung des Neusiedler Sees zu. In diesem Sinne ist die genaue Abgrenzung als See ebenso unscharf. Es handelt sich beim Neusiedler See nicht um einen künstlich angelegten See, sondern um einen tektonischen See, der auf natürliche Weise entstandenen ist.

2.2 Sedimente und Sedimentgesteine

In der Literatur wird der Begriff Sediment (von lat. *sedimentum* "Bodensatz") für unverfestigtes Lockergestein und der Terminus Sedimentgestein nach der Verfestigung (Diagenese) benutzt. Die Entstehung der Sedimente wird wie folgt definiert:

"Sedimente, auch sedimentäre Gesteine genannt, entstehen überwiegend durch Ablagerungen transportierten Materials auf dem Festland (kontinental), in Flussniederungen (fluviatil) oder in Meeresbecken (marin). Das Material entstammt der Verwitterung und Abtragung existierender Gesteine und kann in fester oder gelöster Form transportiert werden. Die Ablagerung geschieht dann mechanisch bzw. durch Ausfällung der gelösten Fracht." (Maresch, W., Schertl, H. P., & Medenbach, O., 2016, S.7)

"Once deposited, sediments are subjected to the processes of diagenesis, that is, physical, chemical and biological processes which bring about compaction, cementation, recrystallization and other modifications to the original sediment, and form rocks." (Tucker, M., 2001, S.14)

Die Bildung der Sedimente und Sedimentgesteine umfasst dementsprechend folgende Prozesse. (1) meist mechanische und/oder chemische Verwitterung, (2) Transport beispielsweise durch Schwerkraft, Wasser, Wind und Eis, (3) Ablagerung bzw. Ausscheidung (Sediment-Lockergestein), (4) einmal abgelagert, unterliegen Sedimente den Prozessen der Diagenese, d.h. physikalische, chemische und biologische Prozesse, die eine Verdichtung, Zementierung, Rekristallisation und andere Veränderungen des ursprünglichen Sediments bewirken. Es kommt zur Formung von Sedimentgesteinen.

Auf der Grundlage der vorherrschenden Prozesse lassen sich die gängigen Sedimentlithologien in vier große Kategorien einteilen. (1) Die siliziklastischen Sedimente (auch als terrigene oder epiklastische Ablagerungen bezeichnet) sind Bruchstücke (Klasten) von vorherigen Gesteinen, die durch physikalische Prozesse transportiert und abgelagert wurden. (2) Durch physikalische Prozesse entstehen Konglomerate, Brekzien, Sandsteine und Schlammgesteine. (3) Sedimente weitgehend biogenen, biochemischen und organischen Ursprungs sind die Kalksteine, die zu Dolomit umgewandelt sein können, sowie Phosphatlagerstätten, Kohle und Ölschiefer und Hornsteine. Sedimentäre Gesteine weitgehend chemischen Ursprungs sind die Evaporite und Eisensteine. (4) Vulkanisch-klastische Ablagerungen bilden eine vierte Kategorie und bestehen aus Lava und Gesteinsfragmenten, die aus zeitgleicher vulkanischer Aktivität stammen. (vgl. Tucker, M., 2001, S.14)

Terrigene klastische Sedimente sind Sedimentgesteine, die durch mechanische Zerstörung, Verwitterung und Erosion von anderen Ausgangsgesteinen entstanden sind. Nach und nach werden die weniger widerstandsfähigen Gesteine in die Bestandteile Quarz, Tonminerale und Eisenoxide zerlegt. Die Einteilung und Benennung der klastischen Bestandteile der Lockersedimente sind in Tabelle 1 ersichtlich. (vgl. Tucker, M., 2011, S.99)



Tabelle 1: Begriffe für Korngrößenklassifikation und siliklastische Gesteinstypen (nach J.A. Udden und

Körner im Tonbereich bestehen überwiegend aus Tonmineralen, die sich von Al-reichen gesteinsbildenden Mineralien, wie Feldspäten und Glimmer, neu gebildet haben. Somit ist Ton eine Korngröße und auch eine mineralogische Gruppe. Als materialunabhängigere Begriffe wird die Bezeichnung Pelit (griechisch pelos "Ton, Schlamm") für kleinste Korngrößen, Psammit für mittlere und Psephit für Gesteine mit großen Korngrößen verwendet. (vgl. Füchtbauer, H., 1988, S.130)

Aus den Korngrößenbezeichnungen der Lockergesteine werden die verfestigten Sedimentgesteine Tonstein, Siltstein (Silt) und Sandstein (Sand) nach der Mehrheit der darin enthaltenen Sedimentpartikel benannt. Chemische Sedimente werden durch chemische Prozesse aus wässrigen Lösungen durch Fällung ausgeschieden, wie beispielsweise Karbonate. Biogene Sedimente sind Ablagerungen von Organismen oder aus Organismenresten (z.B. Korallenriffe).

Eine weitere Einteilungsmöglichkeit neben der Unterteilung nach der Entstehung der geologischen Sedimente ist der Ablagerungsort: Hier lassen sich fluviatile, limnische, marine, aeolische, glaziale und pyroklastische Sedimente unterteilen. Nach dem Ablagerungsmilieu bzw. –mechanismus sind im Neusiedler See fluviatile und limnische Sedimente in Form von Ton, Schluff, Sand oder Schotter (in geringem Ausmaß) abgelagert. (vgl. Vinx, R., 2015)

Bei der Sedimentation werden die Schwebstoffe durch Erosionsprozesse, vor allem durch fluviatilen Transport nach Verwitterung des Ausgangsgesteins, herangeführt. Die Korngrößenverteilung, der im Wasser mitgeführten Partikel, weist Unterschiede auf. Die Korngröße der Partikel nimmt mit der Entfernung und einer absinkenden Strömungsgeschwindigkeit ab, weil die größten Partikel (Geschiebe) zuerst sedimentieren.

2.3 Geologischer Untergrund des Neusiedler Sees

In Abbildung 3 ist ein schematisches geologisches Profil vom Untergrund des Neusiedler Sees ersichtlich. In der Paratethys wurden seit dem Miozän Sedimente abgelagert, die im östlichen Seewinkel Mächtigkeiten bis 2.000 Meter erreichen. (vgl. Amt der Burgenländischen Landesregierung, 2007, S.10). Eine der jüngsten Zusammenfassungen über Geologie und Tektonik des Neusiedlerseegebietes verfassten Loisl et al., (2018) und Zámolyi et al., (2017).



Abbildung 3: Schematisches geologisches Profil Quelle: Fuchs, R. & Schreiber, O., 1985

Loisl, J., et al., (2018, S.77 ff.) konnten hochauflösende seismische Reflexionsdaten erstmals vom tieferen Untergrund des Sees bis in etwa 600 m hinunter zum präkänozoischen Grundgebirge gewinnen. Die Ergebnisse zeigen eine konsistente südöstliche Neigung von erosiv abgeschnittenen spätmiozänen (pannonen) Sedimenten unter einer sehr dünnen holozänen Schlammschicht (10-50 cm).

Der Neusiedler See liegt in der Übergangszone zwischen Ostalpen und Pannonischem Becken, einem Gebiet mit der Kombination von regionaler Hebung, lokaler tektonischer Senkung und Ablagerungsumgebungen. Zámolyi et al., (2017, S.1701 ff.) konnten seismische Daten aus dem Flachsee gewinnen, die zeigen, dass die erosionsbedingt abgeschnittenen pannonen Sedimente nach Südosten, in Richtung der kleinen ungarischen Tiefebene einfallen und sich verdicken. Die darüber liegenden quartären fluvialen Sedimente zeigen einen sehr ähnlichen Verdickungstrend, mit Ausnahme des Gebietes auf dem Plateau nördlich des Sees, was auf eine anhaltende Absenkung in großen Teilen des Beckens hinweist. Bedeutend ist das Fehlen einer signifikanten quartären fluvialen Schotterschicht über den gekippten pannonen Sedimenten unter dem Neusiedler See. Die Neigung der pannonen Schichten ist im Allgemeinen sanft und endet mit einer eckigen Diskordanz zum Seegrund hin. Im nordwestlichen Teil des Sees, wo subhorizontale, wellige Oberflächen vorherrschen, kann keine durchgängige Kippung der pannonischen Schichten beobachtet werden. Paläontologische Analysen ergaben keine altersindikativen Fossilien. Kleinräumige Verwerfungen können identifiziert werden. Der tiefste Teil des Sees bildet eine NNO-SSWorientierte Senke, die nahe der südlichsten Spitze der Ruster Hügeln endet. Die Hanság-Senke ist ein tiefliegendes, extrem flaches Gebiet, das im Norden an die Seewinkel-Ebene und im Westen an den Neusiedler See grenzt. Dieses Gebiet war vor der anthropogenen Entwässerung Teil des Sees und bildete einen durchgehenden L-förmigen Wasserkörper mit dem modernen Neusiedler See. (vgl. Draganits, E., et al. 2006)

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, ist der größte Teil des Neusiedler See Gebietes von quartären Sedimenten bedeckt mit Ausnahme des östlichen Endes der Ostalpen und des Leithagebirges sowie den Ruster Hügeln. Die kristallinen Gesteine, die im Leithagebirge zutage treten, entsprechen einer großen Nordost-Südwest-streichenden Abschiebung entlang des Nordwestrandes des Neusiedler Sees. Diese beiden großen Störungsblöcke sind teilweise von mittelmiozänen (Karpatian bis Sarmatian), klastischen Sedimenten und neritischen Kalksteinen bedeckt. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.79)



Abbildung 4: Geologische Übersichtskarte Quelle: Zámolyi, A. et al., 2017, S.1700

Der Untergrund zeigt ein komplexes Strukturmuster mit eng beieinander liegenden, hauptsächlich nach Nordwesten abfallenden normalen Verwerfungen, die von der Dehnungsdeformation des Pannonischen Beckensystems stammen. Einige dieser Verwerfungen sind möglicherweise kinematisch mit der großen Hauptverwerfung an der Ostseite des Leithagebirges verbunden. Die Sedimentabfolge unterhalb des Sees über dem kristallinen Grundgebirge ist pannonischen bis badenischen Alters (siehe Abbildung 5). Klinoform-Sets innerhalb von mindestens drei intrapannonischen Sedimentpaketen deuten auf ein Flachwasser (40-80 m) Deltasystem hin, welches sich in südöstlicher Richtung ausbreitet. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.93)



Abbildung 5: Regionales Profil über den Neusiedler See (Querschnitt südlich des Sees) Quelle: Loisl, J., et al., 2018, S.81

Die durchschnittliche Neigung der Verwerfungen beträgt 65 Grad nach Nordwesten und Südosten und hat leicht konkav-aufwärts gerichteten Charakter. Der südwestliche Teil ist gekennzeichnet durch synthetische, nach Nordwesten abfallende Verwerfungen. Der nordöstliche Teil zeigt synthetische nordwestlich und anthitetische, nach Südosten abfallende Normalverwerfungen. Das Grundgebirge des Pannonischen Beckens ist von relativ dünnen (50-100 m) mittel- bis obermiozänen (badener und sarmatischer) Ablagerungen im Leithagebirge bedeckt. Die Sedimentabfolge östlich und südöstlich des Sees deutet darauf hin, dass nach Südosten kippende Schichten des Grundgebirges überwiegend pannonischen Alters sind und nur lokale Ablagerungen sarmatischen und badischen Alters sind. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.88)

Die Abbildung 6 zeigt ein detailliertes Bild der Struktur und Stratigraphie der Sedimente unter dem Neusiedler See (1) präkänozoisches Grundgebirge, (2) allgemein nach Südosten abfallende Obermiozän bis Pliozän (pannonische) Sedimente, (3) große Verwerfungen, die über viele seismische Linien verfolgt werden können, (4) mindestens eine große intrapannonische Klinoform und (5) intrapannonische Erosionsflächen. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.82)



Abbildung 6: Neusiedler See und Lage der seismischen Linien Quelle: Loisl, J., et al., 2018, S.80

In Abbildung 7 erfolgt eine Darstellung der seismisch stratigraphischen Interpretation des seismischen Mehrkanaldatensatzes und der nahegelegenen Bohrung Podersdorf-1 aus dem Jahr 1936 und dem OMV Vintage Datensatz. Es deutet auf eine südöstliche Progradation der Sedimente hin, was als Deltasystem interpretiert wird und Klinoformen zeigt. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.89)



Abbildung 7: Seismisch stratigraphische Interpretation Quelle: Loisl, J., et al., 2018, S.89

Hinweise auf biogenes Gas unter dem Neusiedler See sind natürliche Gasaustritte auf dem Seeboden des Neusiedler Sees. Diese sind lokal auch als Kochbrunnen bekannt. Es handelt sich um reines Methan biogenen Ursprungs. Wahrscheinlich sind Abbauprozesse der Braunkohleschichten in den pannonischen Sedimenten für die Gasaustritte verantwortlich. (vgl. Loisl, J., et al., 2018, S.92)

Die Sedimente unter dem Seegrund haben ein spätpannonisches Alter. Die obersten Zentimeter bis Dezimeter stellen holozäne Seesedimente dar. Wie in Abbildung 8 ersichtlich, zeigt die Mineralogie beispielsweise in einem Bohrkern im Nordosten des Sees bis 92 cm Tiefe folgende Zusammensetzung: Die obersten 20 cm bestehen aus dunkelgrauem, schluffigem Ton, gefolgt von hellgrauem bis grünlichem, tonigem Schluff und Schichten aus fein- bis mittelkörnigem Sand. Hauptsächlich sind Muskovit, Chlorit, Quarz, Feldspat (Albit und Mikroklin), Calcit und Dolomit im Profil vorhanden. Die obersten beiden Proben zeigen einen ausgeprägten Magnesium-Kalzit-Spitzenwert zwischen sehr breiten Kalzit- und Dolomit-Werten. Der hohe Magnesium-Kalzit-Wert verschwindet in einer Tiefe von 60 cm. In den oberen Schichten ist weniger Feldspat enthalten. Illit und Chlorit sind die dominierenden Tonminerale bis zu einer Tiefe von 20 cm. Die tieferen Bereiche enthalten zusätzlich Smektit und Kaolinit. (vgl. Zámolyi, A., et al., 2017, S.1709)



Abbildung 8: Sedimentologischer Aufbau des Seebohrkerns NDS7 im Nordosten des Neusiedler Sees Quelle: Zámolyi, A., et al., 2017, S.1708

Die Sedimente unterhalb der obersten 20 cm zeigen einige cm bis maximal 1,3 m mächtige Schichten aus Ton bis grobkörnigen Sand, darunter vereinzelte cm große Schotter Klasten. Die Farben reichen von grau bis grünlich-grau, unregelmäßige orange Oxidationsflecken sind häufig. Relativ große detritale Weißglimmerflocken und geringe Kalzitgehalte sind charakteristisch für die Sedimente unterhalb von 20 cm. Häufige Schwermineralien in den oberpannonischen Schichten sowie in den quartären fluvialen Sedimenten sind Granat, Apatit, Staurolith, Epidot, Zirkon, Turmalin, Zoisit/Clinozoisit, Kyanit und transparenter Amphibol. Das bedeutet, dass die Schwermineralien aus einem niedrig- bis hochgradig metamorphen Herkunftsgebiet dominieren. Die Rolle der fluvialen Erosion beim Neusiedler See ist gering. Es fehlen fluviale, grobkörnige Sedimente aus dem Quartär. Es gab kein Flusssystem, das in der Lage war, den geraden südlichen Steilhang des Parndorfer Plateaus oder die Gebiete herum zu durchbrechen. Die seismischen Schnitte des Sees zeigen Hinweise auf eine viel ältere, spätpannonische fluviale Aktivität. Es sind nur sehr dünne Schichten rezenter Seesedimente, die von stark verdichteten oberpannonischen Tonen bis Sanden unterlagert sind. Das Fehlen von quartären fluvialen grobkörnigen Sedimenten über den oberpannonischen marinen bis brackige Schichten ist ein wichtiger Faktor für die Seebildung. Es deutet auf eine relativ junge Absenkung des Gebietes hin. Das sedimentarme Becken des Neusiedler Sees entstand in einem Wechselspiel zwischen tektonischer Absenkung, die eine Flussrinnenwanderung nach Osten bewirkte, und lokalen Normalverwerfungen des Parndorfer Hochplateaus, das die Flüsse (z.B. Donau, Leitha) hinderte, in dieses Gebiet zu fließen. Das ehemalige Überschwemmungsgebiet der Donau dürfte nicht groß genug gewesen sein, das Gebiet des heutigen Sees zu bedecken. Innerhalb des Sees sind Rinnenmerkmale in den oberpannonischen Schichten sichtbar. (vgl. Zámolyi, A., et al., 2017, S.1709 - 1714)

Auch bei Boros, E., et al. (2013, S.33) wird die Bildung des Sees (ca. 30 % größer als heute) am Ende der Eiszeit beschrieben.

2.4 Hydromorphologischer Schlammkörper

Die Hydromorphologie beschreibt die tatsächlich vorhandene Gewässerstruktur. Nach Csaplovics et al. (2014, S.25) ist die hydromorphologische Charakteristik des Neusiedler Sees "durch ein signifikantes Auftreten von ausgeprägten Sedimentlagen in raum-zeitlich variierendem Ausmaß gekennzeichnet." Der Seeboden besteht aus Schlamm (siltig-sandige Tone).

Die Sedimente im Neusiedler See sind weder physikalisch noch mineralogisch homogen. Preisinger, A., (1979) S.131 berichtet von auffälligen Farbvariationen, stark unterschiedlichen Wassergehalten und vor allem quantitativ aber auch qualitativ unterschiedlichen Feststoffanteilen mit Korngrößen von Sand (2 mm-0,063 mm), von Schluff (0,063 mm - 2 μ m) bis zu Ton (kleiner 2 μ m). Quarzkiesel im Größenbereich von feinem bis groben Schotter sind sporadisch in den Sedimenten vorhanden.

Die Weichschlammschicht des freien Sees übersteigt nach Löffler (1969) 10 cm fast nie, fehlt beim Ostufer völlig und nimmt gegen den Schilfgürtel bis 40 cm Mächtigkeit an. Im südlichen Abschnitt entlang der ungarischen Grenze und westlich der Seemitte Station sind auch Weichschlammauflagen von über 20 cm zu finden.

"Der zuoberst lagernde dunkelgraue, schwarzgraue oder dunkelbraune Seeschlamm ist reich an organischer Substanz und nimmt im freien See von Norden nach Süden an Mächtigkeit zu (12-34 cm)." (Löffler, H. 1969)

Mineralogisch besteht der Schlamm aus magnesiumhältigen Kalzit (20 % MgCO3), Chlorit und einer geringeren Fraktion von gröberem Glimmer. Dazu sind noch kalzitische Ostracodenschalen und Diatomeen sowie Chydoridenschalen enthalten. Darunter schließt

eine bis zu 18 cm mächtige Sandschicht, die hauptsächlich aus Quarz besteht. Danach folgen hellfarbige, plastische, bei Trocknung nur wenig schrumpfende, oft bläuliche Tonmergel, die reich an Glimmer sind. (vgl. Löffler, H., 1969)

Schroll und Krachsberger (1977, S.45) beschreiben den Schlamm in der Seemitte in einer Tiefe bis 30 cm als dunkelgrau, weich, schlammig plastisch, in einer Tiefe zwischen 30-45 cm als hellgrau, steif, fein sandig, zwischen 45-75 cm als braungrau, fest, feinsandig, zwischen 75-120 cm mittelgrau bis braun, steif, feinsandig und in einer Tiefe zwischen 120-150 cm mittelgrau, weich grobsandig. Die wasser- und karbonatreichen Schlammpartien der oberen Schlammschichten enthalten Magnesiumkalzite. Auch Strontium wird von den Autoren erwähnt. In der Tiefe nimmt der Magnesiumgehalt ab. In etwa 60 cm Schlammtiefe konnte von ihnen nur mehr kristallisierter Dolomit und Kalzit nachgewiesen werden. In den unteren karbonatärmeren Schlammschichten sind silikatischer Detritus, wie beispielsweise Quarz, Muskovit und Feldspate vorherrschend.

Preisinger (1979, S.131) unterteilt die festen Bestandteile der Sedimentproben in zwei Hauptgruppen: (1) die allochthonen (oder detritischen) Komponenten, die außerhalb des Sees entstanden sind und durch äolischen oder fluvialen Transport in den See gelangten und die (2) autochthonen Komponenten, die sich im See selbst entweder durch die Flora oder Fauna oder durch den kombinierten Effekt von Photosynthese und Übersättigung des Sees mit Salzen, die durch den Prozess der Verdunstung entstehen. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften, der Korngrößenverteilung und der unterschiedlichen Zusammensetzung der Feststoffkomponenten werden folgende Sedimentschichten unterschieden: (1) weicher Schlamm, (2) Schlamm, (3) kompakter Schlamm und (4) kompakte Sedimente, die manchmal durch dünne Sandschichten unterbrochen werden. Die Abfolge dieser Schichten ist im Allgemeinen chronologisch, wobei die Jüngste oben ist. Die Verteilung in den Sedimentproben des Neusiedler Sees zeigt folgende Korngrößen und Zusammensetzungen: a: ein gut sortierter Sand mit einem Maximum in den mittleren Korngrößen von 0,1-0,2 mm, b: zwei Maxima, eines im Bereich des mittleren Sandes und das andere im Tonbereich: der Bereich reicht von schluffig-lehmigem Sand bis zu sandig-lehmigem Schluff, c: tonig-schluffiges Sediment mit einem Maximum im Bereich des mittleren bis groben Schluff und ein zweites im Tonbereich, d: schluffiger Ton mit einem Maximum im Tonbereich (siehe Abbildung 9).



Abbildung 9: Korngrößen und Verteilungen in Sedimentproben des Neusiedler Sees Quelle: Preisinger, A., 1979, S.132

Tabelle 2 gibt die allochthonen und autochthonen Bestandteile der Neusiedler See Sedimente an.

| Allochth | onous compon | ents | Autochthonous components | | | |
|--------------------------------------|---------------------|--|--------------------------|--|-------|--|
| Grain Amount size in %wt Minerals | | Amount in %wt Substances | | Particle size | | |
| sand & | 15-40 5-30 >5 | dolomite calcite quartz | variable | bacteria algae plant materials zoobenthos shells (calcite) diatoms (opal) | | |
| silt | >5 | mica, 14 Å- chlorite, oligo clase, K-feld- spar, garnet | <1 | pyrite | >2 µm | |
| clay | 30-40 | illite, 14 Å- chlorite, montmoril- lonite | ~60 1-8 | Mg-calcite, ^a protodolomite ^b organic sub- stances | <2 µm | |
| | ~100 | calcite, mont- morillonite, illite, 14Å- chlorite | | | | |

Tabelle 2: Feste Bestandteile der Neusiedler See Sedimente Quelle: Preisinger, A., 1979, S. 133

Nach der Herkunft der Sedimentschichten setzt sich der Seeboden des Neusiedler Sees nach Preisinger (1979) aus drei chronologisch unterscheidbaren Schichtgruppen zusammen. (1) Schichten, die vor der Entstehung des rezenten Neusiedler Sees entstanden sind, vor der Absenkung des heutigen Seegrundgebietes. Hier fehlen authochthon gebildete Mineralien wie Mg-Kalzit und Proto-Dolomit, (2) Schichten, die nach der Bildung des Seegrundes vor 1865 entstanden sind. Sie enthalten die charakteristischen autochthon gebildeten Mineralien wie Mg - Kalzit und den daraus diagenetisch gebildeten Proto-Dolomit. Ihre Zusammensetzung entspricht der des kompakten Schlamms. Der Wassergehalt dieser Schichten ist gering aufgrund ihrer Austrocknung in den fünf Jahren von 1865 bis 1870. (3) Schichten, die nach 1870 entstanden sind und sich durch das Vorhandensein von autochthon gebildeten Mineralien Mineralien wie Mg-Kalziten und Proto-Dolomiten auszeichnen. Sie entsprechen dem weichen Schlamm und anderen Schlammschichten (siehe Tabelle 3).

Neuhuber et al., (2015) berichten, dass eine Identifikation der Reaktionswege, die zur Karbonatausfällung (Proto-Dolomit und Mg-Kalzit) noch nicht möglich ist. Der Gehalt an

radiogenen Kohlenstoff-Isotope in autochthonen Karbonaten deutet auf eine sehr langsame Wachstumsrate oder ein episodisches Wachstum autochthoner Karbonatphasen hin.

Zámolyi et al., (2017) konnten durch die Analyse von Bohrkernen einen ausgeprägten Magnesiumcalcit-Peak zwischen sehr breiten Calcit- und Dolomit-Peaks identifizieren. Ab einer Tiefe von 60 cm verschwindet der Magnesiumcalcit-Peak. (Zámolyi, A., et al., 2017, S.1708)

| Time | Layer | Colour | Water content (%) | Grain size | Minerals | Thickness (cm) |
|--|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|
| | soft mud | olive- black | >60 | silt clay, type d | Mg-calcite, protodolomite, calcite, dolomite, mica, quartz, illite, 14Å-chlorite, oligoclase, pyrite, mont- morillonite | open lake: 0–20 reed area: 40–100 |
| After 1870 | mud | light olive- grey | 30-60 | clay silt, type c | dolomite, calcite, quartz, mica, Mg-calcite, proto- dolomite, 14Å-chlorite, illite, oligoclase, K-feldspar, pyrite | 0–40 |
| | | olive- grey | 30–60 | silt clay, sandy silt clay, type d, type b | dolomite, quartz, calcite, mica, Mg-calcite, proto- dolomite, 14Å-chlorite, illite, oligoclase, K-feldspar, pyrite | 0-25 |
| Prior to 1865 but after bed form- ation | com- pact mud | light olive- grey | <25 | clay silt, type c | calcite, dolomite, quartz, mica, protodolomite, 14Å- chlorite, illite, oligoclase, K-feldspar, Mg-calcite, pyrite | 0-40 |
| | | | <25 | sandy clay silt, type b | dolomite, quartz, calcite, mica, protodolomite, oligoclase, 14Å-chlorite, illite, montmorillonite, K-feldspar, Mg-calcite, pyrite | 0-100 in the southern part of the lake |
| After bed form- ation | sand | white- grey | <15 | sand, type <i>a</i> | quartz, dolomite, calcite, oligoclase, mica | 0.2–5 |
| Prior to bed form- ation | com- pact sedi- ment | green- ish grey | <25 | sandy clay silt, and quartz pebbles | dolomite, calcite, quartz, oligoclase, mica, K-feldspar, 14Å-chlorite, montmoril- lonite, illite | 100–700 |

Tabelle 3: Sedimentschichten des Neusiedler Sees Quelle: Preisinger, A., 1979, S.134

Die allochthonen Bestandteile dieser Schichten des Neusiedler Sees spiegeln die mineralogische Zusammensetzung des Leithagebirges, des Wulka-Beckens und des Ruster-Hügellandes wider. Das charakteristische Merkmal der rezenten Neusiedler See Sedimente ist das Vorhandensein von autochthon gebildeten Mineralien. Die Mg-Kalzit und Proto-Dolomit-Kristalle sind rhomboedrisch mit einer Kantenlänge von etwa 0,5 µm. Die chemische Zusammensetzung des Mg-Kalzits variiert mit dem Mg/Ca-Verhältnis im Seewasser. Je größer das Mg/Ca-Verhältnis, desto größer der Mg-Gehalt im Mg-Kalzit. Nach Knie (1959) hat das Verhältnis sein Minimum im Frühjahr und sein Maximum im Herbst. Somit hat der Mg-Kalzit, der im Zusammenhang mit der Pflanzenassimilation (Makro- und Mikrophyten) gebildet wird, im Frühjahr einen geringeren Mg-Gehalt als im Herbst. Die starke saisonale Abhängigkeit der Photosynthese wird auch in der Menge des Mg-Kalzits skizziert. Die Kristallkeimbildung findet auf den Oberflächen von submersen Makrophyten statt, die im offenen See vor den Schilfgebieten vorkommen und auf der Oberfläche der Mikrophyten. Wenn die chemische Zusammensetzung der Kristallkerne in den Instabilitätsbereich von Mg-Kalzit fällt (mehr als 25 mol-% MgC0₃), werden die wachsenden Mg-Kalzit-Kristallite innerhalb kürzester Zeit innen Proto-Dolomit und außen Mg-Kalzit sein. Das Proto-Dolomit-Wachstum ist ein sehr langsamer Prozess mit einer Wachstumsrate von einigen hundert Ångström pro 1000 Jahre. (vgl. Neuhuber, S., et al., 2017)

Aufgrund ihrer extrem geringen Größe und der fast immerwährenden Bewegung des eisfreien Seewassers bleiben die Kristalle lange Zeit im Wasser und sind für den größten Teil der Trübung verantwortlich. Die Proto-Dolomit-Komponente der Seewassertrübung stammt aus dem Inneren der Mg-Kalzite sowie aus den Proto-Dolomit-Kristalliten der älteren Sedimente, die durch die Bewegung des Wassers aufgewirbelt werden. Neben dem erwähnten Mg-Kalzit und Proto-Dolomit stammt auch etwas Kalzit aus Ostrakodenschalen (=Muschelkrebs). Auch Pyrit, der überwiegend im Schlamm durch bakterielle Einwirkung gebildet wird, ist vorhanden.

Die regionale Verteilung der Sedimentschichten "weicher Schlamm" (Wassergehalt mehr als 60 Gewichtsprozent) und "Schlamm" (Wassergehalt 30-60 Prozent) in den obersten Sedimentschichten (der ersten Zentimeter) ist nicht gleichmäßig. Nach Preisinger, A. (1979) für die regionalen werden folgende Ursachen Unterschiede identifiziert: (1) Wasserstandsänderungen durch Veränderungen in den Zuflüssen und Abflüssen des Sees, wie beispielsweise Regulierung Rabnitz die der oder der Bau des Oberflächenentwässerungskanals (Einserkanal) mit einem extremen Schilfbewuchs in Folge. Jährliche Schwankungen des Wasserstandes im Bereich des flachen Seebodens führen zu Uferverschiebungen und zu Inseln bei niedrigen Wasserständen. Dadurch kommt es zu einer Korntrennung nach Größe an deren Uferzonen und bei hohen Wasserständen zu Sedimentablagerungen, insbesondere im südlichen bis südöstlichen Teil des Sees. (2)

Windeinflüsse mit der vorherrschenden NW-Windrichtung (seltener SO-Windrichtung) bewirken einen äolischen Transport von Mineralien sowie einen Sedimenttransport, möglicherweise durch rechtsdrehende Strömungen im nördlichen Teil des Sees und durch die südwärts gerichtete Scherung des Wassers. (3) Biologische Veränderungen durch die schnelle Ausdehnung der Schilfzone über die Hälfte der Seefläche nach 1910 führte zur Akkumulation der Feinsedimente ("soft mud"), besonders im nördlichen und nordwestlichen Teil des Sees, und einem verringerten Zufluss der groben Schlammfraktion aus den Zuflüssen des Sees. (vgl. Preisinger, A., 1979, S.131 ff.)

Auch Eitzinger, J., et al., (2009) zeigen die große Sensitivität der Wasserbilanz des Neusiedler Sees zum Jahresniederschlag auf. Unter den derzeitigen Klimaverhältnissen haben bereits geringfügige Abweichungen von 5-10% merkbare Auswirkungen auf die Auftrittswahrscheinlichkeit von Niedrigwasserständen. (vgl. Eitzinger, J., et al., 2009, S.72)

2.5 Forschungsstand und ältere Vermessungen

Die anfängliche systematische Erfassung der Bathymetrie des Seebeckens und die Verteilung und Mächtigkeit der Sedimentlagen im Seebecken war durch Bestrebungen zur Entwässerung geprägt, um die Flächen des Neusiedler Sees agro-industriell zu nutzen.

Die Zeittafel in Tabelle 4 gibt einen Überblick der Vermessungen und Kartierungen in den letzten zweihundert Jahren.

Es gab schon im 19. Jahrhundert Seeprofile und lineare Sedimentmächtigkeiten. Ing. Carl Godinger ermittelte 1835 ein Längsprofil und zwei Querprofile des Sees. Es wurde auch die Mächtigkeit der Schlammschichten erfasst. Das Nivellement des Neusiedler Sees und des See-Kanals von 1869 besteht aus zwei Längs- und drei Querprofilen. 1901 erfolgte eine flächendeckende Aufnahme des Seebodens durch Lotung. 1963 wurde der Seeboden in 23 Querprofilen nivelliert um Höhenlinienkarten des festen Untergrundes sowie der Schlammoberfläche des österreichischen Anteils am Neusiedler See zu ermitteln. 1985-1988 wurde das Konzept zur Aufnahme des österreichischen Anteils am Neusiedler See mit elektrooptischer Distanzmessung durch Csaplovics umgesetzt. In den Jahren 1994-1995 erfolgte die Datenerfassung des ungarischen See-Anteils. (vgl. Bácsatyai, L., et al. 1997)

Dadurch war in ungarisch-österreichischer Kooperation eine Aufnahme des Seebeckens flächendeckend gegeben. Das erste Mal konnte ein grenzüberschreitender homogener Datenbestand erhoben werden. Danach konnten digitale Oberflächenmodelle für Sedimentoberkante und Sedimentunterkante für das Seebecken tiefer als 116.50 m berechnet werden.

Das von 2011 bis 2014 laufende Projekt GeNeSee (Geodätische Neuerfassung des Seebodens des Neusiedler Sees) baute auf den Vorgängerprojekten auf, allerdings wurden hochaktuelle Mess- und Auswertemethoden verwendet. Die grenzüberschreitende Aufnahme der Daten erfolgte in einem Zug. Im offenen Seebereich wurde in dichten Profilen mit multi-frequenten Echolot-Verfahren gemessen. Im schwer zugänglichen Schilfbereich erfolgten Messungen entlang unregelmäßig verteilter Profile mittels geodätisch-bodenmechanischer Punktmessverfahren (D-GPS und Bodensonden). Flugzeuggestützte Laserscanner Daten (airborne laser scanning, ALS) ermöglichten eine exakte Kartierung der Höhenverhältnisse in den Schilf-Festland-Zonen. (vgl. Heine, E. et al., 2016)

| Zeitraum | Österreich | Ungarn | | |
|-----------------|--|--|--|--|
| 1784 | | Erste Landesaufnahme (Josephinische Landesaufnahme) | | |
| 1833 | Systematische Erfassung des Seebodens; Ziel: Entwässerung des Seebeckens und Hanság, Keczkes Vermessung | | | |
| 1835 | Godinger Vermessung | | | |
| 1844-1854 | | Zweite Landesaufnahme | | |
| 1869 | Bathymetrische Vermessung | | | |
| 1865-1870 | Austrocknung des Sees | | | |
| 1872/73 | | Dritte Landesaufnahme | | |
| 1873-1893 | Pläne zur Trockenlegung des Sees gescheitert | | | |
| 1895 | Beginn mit dem Bau des Einser-Kanals | | | |
| 1901 | Seebodenvermessung der Fertő Kommission | Bewertung der Bodenqualität des Sees | | |
| 1950er Jahre | Naturschutzbezogene Interessen | | | |
| 1963 | durch Nivellementprofile getätigte Vermessung des Seebodens | | | |
| 1960er Jahre | | Messungen auch im ungarischen Seebecken | | |
| 1985-1987 | Geodätische Vermessung auf österreichischer Seite | | | |
| 1994-1995 | | Geodätische Vermessung auf ungarischer Seite | | |
| 2011-2014 | Ungarisch – österreichische Kooperation, Vermessung mit Echolot, flugzeuggestütztes Laserscanning und Punktmessverfahren | | | |

| Tabelle 4: Überblick der Vermessungen und Kartierunger |
|--|
| Quelle: eigene Darstellung |

Um die Änderungen des festen Seebodens und der Schlammmächtigkeit vergleichen und quantifizieren zu können, werden Profile an denselben Positionen, wie die Profile von Csaplovics (1997), erstellt. (siehe Anhang, Kapitel 10.4)
3 Angewandte Methodik

Im Projekt GeNeSee wurden grenzüberschreitende Daten des Neusiedler Sees in einem Zug mittels hydrographischer Vermessung unter Einsatz multi-frequenter Echolot-Verfahren, Airborne Laser scanning (ALS) und der Messmethode des geodätisch-bodenmechanischen Punktmessverfahrens (D-GPS und Bodensonden) erfasst. Abbildung 10 gibt eine Übersicht aller vorhandenen Messdaten.



Abbildung 10: Überblick über die drei Messmethoden: Echolot-Messungen (Längs- und Querprofilfahrten im Seebereich); Einzelpunktmessungen (Magenta und Schwarz); ALS Befliegung Österreich (blaue Flugstreifen) Quelle: Heine, E., et al., 2016

3.1 Multi-frequente Echolotmessung der Sedimentstrukturen im offenen Seebereich

Die Querprofile der Hauptmesslinien im Abstand von 100 m quer zur Mittelachse des Sees und die Längsprofile mit 500 m Abstand ergaben insgesamt eine rasterförmige Vermessung mit einer Gesamtlänge von über 2000 km.

Zur Aufnahme des Seebodens wurden hydroakustische Verfahren (Echolot) eingesetzt. Das Echolot dient zur Berechnung der Wassertiefe aus der Laufzeit der Schallwelle, welche aus einer Sendeeinheit auf dem Messschiff ausgesendet wird, und der Ankunft, der an der Gewässersohle reflektierten Schallwelle. Das Messschiff ist zusätzlich mit einem GNSS-Empfänger zur Positionsbestimmung ausgestattet. Ohne diesen Empfänger ist es nicht möglich dreidimensionale Koordinaten zu bestimmen und das Messschiff zu navigieren. (vgl. Mandlburger G., 2006, S.13)

Während mit dem Einzelstrahl-Echolot (single beam echo sounder, SBES) die Informationsgewinnung über die oberste Bodenschicht erfolgte, konnte mit einem in die Sedimentschichten eindringenden parametrischen Sedimentecholot (sub bottom profiler, SBP) vom Typ Innomar SES 2000 der Schichtaufbau und die Lage des Seebodens gemessen werden (siehe Abbildung 11). Die Eindringtiefe in den Seegrund beträgt mehr als drei Meter. Ein zweischichtiger Seebodenaufbau wird durch die Reflexionen der Schallwellen (rot, gelb, blau = stark, mittel, schwach) aufgezeigt. Unter der eigentlichen Schlammschicht ist noch eine Schicht von teilkonsolidiertem Schlamm vorhanden. (Heine, E., et al., 2016, S.14)



Abbildung 11: Echogramm einer sub-bottom-profiler-Messung; Reflexion der Schallwellen: rot, gelb, blau = stark, mittel, schwach; Eindringtiefe: über 3,00 Meter Quelle: Heine, E., et al., 2016

Die Morphologie des Seebodens zwischen den Längs- und Querprofilen wurde mittels Seitensicht-Sonaraufnahmen (side scan sonar, SSS) in einem Streifen von jeweils 30 Metern links und rechts der Messprofile abgebildet. Abbildung 12 zeigt das Prinzip der hydrographischen Vermessung des Neusiedler Sees, wodurch es möglich war, einen vollständigen Datensatz höchstmöglicher Auflösung zur Generierung digitaler Geländemodelle (DGM) der Schlammoberfläche und des Seebodens zu erhalten.



Abbildung 12: Prinzipskizze der hydrographischen Vermessung des Neusiedler Sees Quelle: Heine, E., et al., 2016

3.2 Geodätisch-bodenmechanische Punktmessverfahren mit D-GPS und Bodensonden entlang unregelmäßig verteilter Profile

Die klassische Art der Geländeerfassung stellt die tachymetrische Punktbestimmung dar. Einzelpunkte werden durch Messung von Richtungswinkel, Zenitdistanz und schräger Strecke von einem Instrumentenstandpunkt aus, erfasst. Im offenen Gelände können als Alternative auch Global Navigation Satellite Systeme (GNSS) eingesetzt werden. Die Einzelpunkte können mittels terrestrischer Erfassung zwar sehr genau ermittelt werden, allerdings ist dies bei einer flächenhaften Aufnahme nicht wirtschaftlich und nur mit großem Zeitaufwand durchführbar. (vgl. Mandlburger G., 2006, S.11)

Der Profilaufbau des Bodens wurde für die Schlammdickenbestimmung im Uferbereich und im Bereich des Schilfgürtels mit 61 kombinierten bodenphysikalischen Einzelpunktmessungen (CSPS: Combination of Soil Physical Sensors) bestimmt. Die vier Komponenten des CSPS sind, wie in Abbildung 13 ersichtlich, ein Sensor (Hydra Probe), ein Penetrometer, eine GNSS-RTK Positionierung und ein Datenlogger. Die Hydra-Probe (Stevens Water Monitoring System) basiert auf "Frequency Domain Reflectometry" (FDR, 50 MHz). Der volumetrische Wassergehalt wird über die dielektrische Permeabilität indirekt angezeigt. Das Penetrometer misst den Eindringwiderstand in den Boden PR (MPa). (vgl. Heine, E., et al., 2016, S.16 ff.)



Abbildung 13: Schema des kombinierten bodenphysikalischen Messsystems CSPS Quelle: Heine, E., et al., 2016

Die Einzelpunktmessungen dienten auch als Referenz für die hydroakustische Schlammdetektierung. In Abbildung 14 ist der Referenzpunkt P47 des CSPS-Profiles dem SBP-Echogramm gegenübergestellt.



Abbildung 14: CSPS-Profile (links) und SBP-Echogramm (rechts) an einem Referenzpunkt Quelle: Heine, E., et al., 2016

In der folgenden Arbeit werden zwei verschiedene "Schichten" betrachtet. Der feste Seeboden und die Schlammoberfläche. Die Unterscheidung zwischen den beiden erfolgte während der Auswertung aufgrund der vorliegenden Messdaten.

In Abbildung 14 fällt der Wert rapide auf einen volumetrischen Wassergehalt von < 0.80 beim Übergang von Wasser auf Schlamm. An dieser Stelle befindet sich die in dieser Arbeit behandelte Schlammoberfläche. Dieser Übergang, auch Lutocline genannt, bezeichnet einen hohen Dichtegradienten an der Grenzfläche zwischen dem Wasser oberhalb und dem Schlamm unterhalb. Vor allem unter einem hohen Anteil an Feinsedimenten tritt die Lutocline auf. Darunter befindet sich ein Schlammkörper mit annähernd konstantem volumetrischem Wassergehalt. Minimale Schwankungen weisen auf eine Schichtung im Schlammkörper hin. Der Wassergehalt sinkt beim weiteren Eindringen in der Schlammschicht stark ab, bis ein weiteres Eindringen der Hydra Probe nicht mehr möglich ist. Der Widerstand entsteht durch den hohen Verdichtungsgrad der Sedimente. Der gemessene volumetrische Wassergehalt variiert abhängig vom vorherrschenden Verhältnis der Feinsedimente Sand-Schluff-Ton (mittlerer Wassergehalt ~0.57). Ab einem Sandgehalt von mehr als 6% sinkt der Wassergehalt auf einen durchschnittlichen Wert von 0.54 ab. Das Penetrometer beginnt zu messen. Es liefert hier erste signifikante Signale aufgrund des Eindringwiderstandes. Der bereits messbare Eindringwiderstand deutet auf einen schwach konsolidierten Bereich hin. Im Schlamm darüber ist im Gegensatz zum Seeboden kein messbarer Eindringwiderstand vorhanden. Der Widerstand steigt bis zum ersten Peak konstant an. Diese Spitze ist als Seeboden definiert. Es stellt die obere Grenzfläche einer bereits konsolidierten Sedimentschicht dar. (vgl. Heine, E., et al., 2016, S.18ff.)

3.3 Flugzeuggestütztes Airborne Laser Scanning (ALS) zur exakten Kartierung der Höhenverhältnisse in den Schilf-Festland-Zonen und teilweise inneren Schilfbereichen

Mittels ALS-Systeme lassen sich präzise und hochauflösende Geländemodelle erstellen. Die Scaneinheit ist auf einem Flugzeug angebracht, welche einen Laser mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen verwendet (siehe Abbildung 15). Die Laufzeit des Laserimpulses wird gemessen. Die Laufzeit bezeichnet die Zeit zwischen ausgesandtem, am Objekt reflektierten und im Sensor empfangenen Signal. Die Erdoberfläche, sowie Vegetation und Gebäude reflektieren das ausgesandte Lasersignal. Zur Bestimmung der Position wird auch hier ein GNSS-Empfänger sowie ein Inertiales Navigationssystem (INS) verwendet. Das Untersuchungsgebiet wird in einzelnen, einander überlappenden Flugstreifen beflogen. Die Höhenmessgenauigkeit beträgt 10-20 cm. (vgl. Mandlburger, G., 2006, S.14) ALS Messungen vom österreichischen Seebereich waren von der Befliegung im Jahr 2019 des Landes Burgenland vorhanden. Zusätzlich wurden im Projekt GeNeSee ALS-Messungen der ungarischen Seite aus dem Jahr 2011 einbezogen.



Abbildung 15: Prinzipskizze Airborne Laserscan Quelle: Stadt Wien, 2021

4 Grundlagen für die Erstellung eines 3D-Modells des Neusiedler Sees

Die Fortentwicklung der Modellierung des 3D-Modells erfolgt mit angewandten Methoden der Programme ArcGIS Pro und QGIS.

4.1 Geoinformationssysteme

Der Begriff Geoinformation (lateinisch: informare - eine Gestalt geben, formen) beschreibt alle Arten von Informationen, welche einen direkten Bezug zu Raum und Zeit haben. Nach dieser (GI) und Definition beeinflusst das Anwendungsgebiet der Geoinformatik der Geoinformationssysteme (GIS) alle Bereiche, in welchen die räumlich-zeitlichen Ort und fallen. Zusammenhänge, der die Lage, ins Gewicht Durch diese Informationstechnologie ist es möglich den gesamten Lebensraum sehr großräumig, aber auch bis ins kleinste Detail, wie zum Beispiel Gebäude, Grundstücke oder Wasserleitungen, darzustellen. (vgl. Meinel, G., Bill, R., 2016)

Das Einsatzgebiet der Geoinformation reicht von der Erfassung, Verwaltung und Abfragen von Informationen über das Internet bis zur Analyse komplexer Modelle. Auch als Instrument zur Planung können Geoinformationssysteme eingesetzt werden. Durch die große Auswahl an unterschiedlichen Parametern werden Simulationsstudien und Gegenüberstellungen von Alternativen ermöglicht. Der Ablauf der Informationsübertragung ist in Abbildung 16 vereinfacht dargestellt. Es handelt sich praktisch bei allen Vorgängen um Kommunikationsprozesse zwischen Elementen. Der Mensch ist der Nutzer. Weitere Elemente sind Anwendungsmodule sowie Hard- und Softwarekomponenten. (vgl. Bartelme, N., 2005, S.1 ff.)



Abbildung 16: Information und Daten im Kontext eines Transfers Quelle: Bartelme, N., 2005, S.14

"Ein Geoinformationssystem dient der Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Darstellung aller Daten, die einen Teil der Erdoberfläche und die darauf befindlichen technischen und administrativen Einrichtungen sowie geowissenschaftliche, ökonomische und ökologische Gegebenheiten beschreiben." (Bartelme, N. 1989, S.5)

4.1.1 Layerkonzept

Dieses Konzept geht davon aus, dass ein abgegrenzter örtlicher Bereich in einzelne unterschiedliche Layer (Themen, Schichten) aufgeteilt werden kann. In jeder Schicht muss es eine gleichartige Information geben. So kann eine Stadt aus der Sicht einer Tourismusagentur, des Planungsamtes oder des Katasteramtes dargestellt werden. Je nach gewünschter Anwendung liegen unterschiedliche Layer übereinander. (vgl. Bartelme, N., 2005, S.29 ff.)

"Dem Layerkonzept liegt die Annahme zugrunde, dass an jeder Stelle des betrachteten räumlichen Ausschnittes ein definierter Zustand herrscht." (Bartelme, N., 2005, S.29)

4.1.2 Raster GIS

Ein Raster ist eine Matrixstruktur aus Rasterelementen. Die Rasterzellen sind quadratisch oder rechteckig (meist aber quadratisch) und werden auch als Pixel oder Grid-Element bezeichnet. Jedem Pixel wird ein Wert zugeordnet. In Abbildung 17 ist das beispielsweise für alle blauen Elemente der Wert "1" und für alle weißen Elemente der Wert "0". Im Fall eines digitalen Höhenmodells wäre der zugehörige Wert die Seehöhe in Meter. Das Layerkonzept verträgt sich sehr gut mit Rastermodellen. Solange die Größe, Position und Ausrichtung der Zellen in allen Layern gleich sind, gibt es keine Probleme bei der Überlagerung. (vgl. Meinel, G., Bill, R., 2016)



Abbildung 17: Wort GIS in einer Rasterstruktur Quelle: eigene Darstellung

4.1.3 Vektor GIS

Das Vektor GIS-Modell baut auf drei Grundeinheiten auf, den Punkten, Linien (Polygone) und Flächen. Der Punkt stellt den Raumbezug her und ist Träger der geometrischen Information. Dadurch lassen sich Aussagen wie Entfernungen, Höhen und Flächeninhalte ableiten. Eine

Linie ist die Verbindung zwischen zwei Punkten. Es entsteht ein Vektor, welchem, genauso wie Punkten, eine Thematik zugeordnet werden kann. Normalerweise sind Vektoren geradlinige Verbindungen, in diesem Fall können sie auch eine mathematisch definierte Kurve sein. Die Flächen bestehen aus geschlossenen Linien oder werden durch mehrere Einzelpolygone abgegrenzt. Wenn eine Fläche aus mehreren Polygonen zusammengesetzt wird, liegt der Vorteil darin, dass jeder Linie eine andere Thematik zugeordnet werden kann. Diesen geometrischen Elementen (Features) werden sogenannte Attribute zugeordnet. Es müssen explizite Verweise zwischen den Features und den thematischen Attributen vorhanden sein. Durch den Zusammenbau von elementaren Teilen zu höherwertigen Strukturen entstehen die in Abbildung 18 dargestellten Netz- und Komplex-Features. (vgl. Bartelme, N., 2005, S.65 f.)



Quelle: Bartelme, N., 2005, S.65

4.1.4 Hybride Systeme

In modernen GIS-Softwaren werden die beiden Datenstrukturen gemeinsam verwendet, da beide Vor- und Nachteile haben. Diese Systeme werden "hybride Systeme" genannt. Klassische Rasterdaten sind Satellitenbilder oder Luftbildaufnahmen. Hier werden den Rasterelementen Farben zugeordnet. Abbildung 19 zeigt einen Ausschnitt aus einer Österreich-Karte, welche aus Raster- und Vektordaten besteht. Den Hintergrund bildet ein Satellitenfoto, während im Vordergrund die Verwaltungsgrenzen dargestellt sind.



Abbildung 19: Rasterdaten (Satellitenbilder) und Vektordaten (Verwaltungsgrenzen) Quelle: eigene Darstellung

4.2 Topographische Modelle

Ein Topographisches Modell (griechisch: *topos* – der Ort, *grafein* – zeichnen, beschreiben) beziehungsweise ein Digitales Geländemodell (DGM) bezeichnet die Beschreibung des Geländes in mathematischer Form. Bereits 1958 wurde das DGM von C. L. Miller und R. A. Laflamme eingeführt. DGM sind inzwischen zu einem wichtigen Bestandteil in Vermessung, Kartographie und Geoinformationsswesen geworden. Außerdem werden sie als Eingangsgrößen für Modelle anderer technischer Fachgebiete herangezogen. (vgl. Mandlburger, G., 2006, S.5)

4.2.1 Definitionen von Geländemodellen

Es existiert keine einheitliche Definition für den Begriff Digitales Geländemodell (DGM). Je nach Literatur wird er unterschiedlich ausgelegt. Eine allgemeine Definition lautet wie folgt:

"Ein digitales Geländemodell ist eine mathematische Beschreibung der Erdoberfläche in digitaler Form." (Mandlburger, G., 2006, S.5)

Ein DGM ist eine kontinuierliche Darstellung der Erdoberfläche, bei der es sich um eine diskrete Funktion handelt. Es ist sekundär, ob die Fläche durch Stützpunkte, Flächen-Patches oder andere Parameter beschrieben wird. Die Modell-Objekte haben die grundlegende Funktion die Geländehöhen, -krümmungen und -neigungen an jeder beliebigen Position zu interpolieren. Es gibt 2,5D- und 3D-Geländemodelle, wobei sich aufgrund der einfachen und effizienten Datenstruktur, bei gleichzeitig guter Beschreibung der Topographie, die 2,5D-

Modelle durchgesetzt haben. Die 3D-Modelle sind vor allem für mehrdimensionale numerische Modelle relevant. Allerdings wird oft mit 2,5D-Approximationen das Auskommen erlangt, damit der Mehraufwand einer 3D-Datenstruktur vermieden werden kann. (vgl. Mandlburger, G., 2006, S.5 f.)

4.2.2 Verschiedene Modelle

Digitales Geländemodell (DGM)

Das DGM beschreibt, wie bereits erwähnt, die Erdoberfläche. Vegetation und Gebäude sind kein Bestandteil des Modells, da es nur die Topographie ohne natürlichen oder künstlichen Bestand darstellt. Straßen und Dämme werden allerdings zum DGM gerechnet, weil diese sich nicht über die Oberfläche erheben. Ein Spielraum besteht bei Objekten, die sich aus der Oberfläche heraus oder in diese hinein entwickeln (z.B. Kellerabgänge, Brücken). Über den Inhalt der Abbildung im DGM wird je nach Anwendung unterschiedlich entschieden. Geländekanten sowie markante Höhenpunkte sollten in einem qualitativ hochwertigen Geländemodell nicht fehlen. (vgl. Stadt Wien, 2021)

Digitales Höhenmodell (DHM)

Obwohl der Begriff nur eine Verallgemeinerung auf eine beliebige Fläche darstellt, wird er oft als Synonym zum DGM verwendet. Vor allem Geländemodelle ohne Strukturlinien-Informationen (Geländekante, Geländelinien) werden häufig als DHM bezeichnet. Hier steht die mathematische Beschreibung einer nicht näher definierten Oberfläche im Vordergrund. (vgl. Mandlburger, G., 2006, S.7)

Digitales Oberflächenmodell (DOM)

Im Gegensatz zu den anderen beiden Modellen sind im DOM auch alle Objekte zu sehen, die sich über die Erdoberfläche erheben. Die dargestellte Oberfläche ist jene, welche ein Messinstrument beziehungsweise ein Beobachter aus der Vogelperspektive hätte (Baumkronen, Hausdächer). DGM und DOM stimmen im offenen Gelände überein, in bewachsenem oder bebautem Gebiet liegt das DOM höher als das DGM. (vgl. Mandlburger, G., 2006, S.7)

"Das DOM kann als Oberfläche eines elastischen Schirms, welcher über das Gelände ausgebreitet ist, verstanden werden." (Mandlburger, G. 2006, S.7)

4.2.3 Anwendungen

Auf Basis des DGM können für viele unterschiedliche Anwendungsgebiete Folgeprodukte erzeugt werden. In folgender Liste sind typische Produkte und deren Anwendungsgebiete angeführt (siehe Abbildung 20).

- Längs- und Querprofile (Straßenbau, Hydraulik)
- Neigungskarten (Landwirtschaft, Lawinenverbauung)
- Höhenlinien (Kartographie, Meteorologie)
- Expositionskarten (Landwirtschaft)
- Reliefschummerung (Kartographie)
- Differenzmodelle (Dokumentation von Massenbewegungen, Gefahrenzonenpläne)



Abbildung 20: Höhenlinien (links), Reliefschummerung (rechts) Quelle: Mandlburger, G. 2006, S.10

4.3 ArcGIS Pro

ArcGIS Pro spiegelt die aktuelle professionelle Desktop-GIS-Anwendung von ESRI wider und wird auf lange Sicht die Anwendungen ArcMap, ArcScene und ArcCatalog ersetzen. Mit dieser Software ist es möglich Daten zu erkunden, zu visualisieren und zu analysieren, 2D-Karten und 3D-Szenen zu erstellen. ArcGIS Pro ist eng mit der ArcGIS Plattform verbunden, auf der die Datenfreigabe in ArcGIS Online und ArcGIS Enterprise über Web GIS unterstützt wird. Die Möglichkeit, räumliche Analysen mit einer dreidimensionalen Darstellung zu kombinieren, macht die Erarbeitung des Modells erst möglich. (vgl. ESRI-ArcGIS Pro, 2021)

4.4 QGIS

Die professionelle GIS-Anwendung QGIS, wurde auf der Grundlage von Freier- und Open-Source-Software (FOSS) entwickelt. Die Software eignet sich zum Betrachten, Bearbeiten, Erfassen und Analysieren von räumlichen Daten. Das Programm ist sehr benutzerfreundlich und steht unter der GNU General-Public-Licence. QGIS ist offizielles Mitglied der Open-Source-Geospatial-Foundation (OSGeo) und unterstützt Vektor-, Raster- und Datenbankformate und -funktionen. Es gibt keine direkt verbundene Online-Plattform zur Veröffentlichung der Daten. (vgl. QGIS, 2021)

4.5 Web-GIS

Web-GIS-Anwendungen werden häufig dafür verwendet, um Services für andere Personen innerhalb oder außerhalb einer Organisation zur Verfügung zu stellen. Ein Web-GIS besteht aus mindestens einem Server und einem Client. Der Server ist ein GIS-Server und der Client ein Web-Browser, eine mobile Anwendung oder eine Desktop-Anwendung. In der einfachsten Form kommuniziert ein GIS zwischen einem Server und einer Client-Webtechnologie. (vgl. ESRI-ArcGIS Enterprise, 2021)

Folgende Schlüsselelemente besitzt ein Web-GIS-System:

- Clients können den Server mittels URL im Internet finden
- Der Client nutzt http-Spezifikationen, um mit dem Server zu kommunizieren
- Die angeforderten GIS-Vorgänge werden vom Server ausgeführt und anschließend über http-Antworten an den User gesendet
- Die Antworten können zahlreiche unterschiedliche Formate aufweisen, zum Beispiel HTML, XML (Extensible Markup Language), binäres Bild oder JSON (JavaScript-Objekt Notation)

Da das Internet für den Informationszugriff verwendet wird, ist die Distanz zwischen Server und Client irrelevant. Laut ESRI-ArcGIS Enterprise (2021) gibt es durch diese Eigenschaft erstmals eindeutige Vorteile gegenüber dem Desktop-GIS:

- Globale Reichweite: Mit ArcGIS-Online können weltweit Web-GIS-Anwendungen präsentiert werden. Benutzern ist es möglich von ihren Computern oder mobilen Geräten auf die Anwendungen zuzugreifen.
- Große Anzahl an Benutzern: Ein Desktop-GIS wird in der Regel von nur einem Benutzer verwendet, während ein Web-GIS von hunderten Benutzern gleichzeitig verwendet werden kann.
- Einfach in der Anwendung: Desktop-GIS ist für professionelle Benutzer bestimmt, die sich über mehrere Monate mit dem Programm befassen und Erfahrungen sammeln. Web-GIS ist für eine breit gefächerte Zielgruppe bestimmt, so können auch öffentliche Benutzer, die keine Vorkenntnisse über GIS haben, die Anwendungen benutzen. Online-GIS-Systeme werden im Allgemeinen mit dem Ziel der Einfachheit, Benutzerfreundlichkeit und Intuition erstellt. Sie sind daher einfacher als Desktop-GIS zu benutzen.
- Einheitliche Aktualisierung: Ein Desktop-GIS muss auf jedem Computer einzeln aktualisiert werden. Bei Web-GIS funktioniert eine Aktualisierung für alle User.

Aufgrund der sehr bequemen Wartung ist Web-GIS die ideale Plattform für das Bereitstellen von Echtzeitinformationen.

 Niedrige Kosten: Internetinhalte, genau wie Web-GIS Inhalte, sind für Endnutzer in der Regel kostenfrei verfügbar. User müssen weder die Software kaufen noch für die Verwendung bezahlen. Organisationen können ebenfalls ihre Kosten minimieren, da sie nicht mehr für jeden Computer eine Desktop-GIS-Lizenz kaufen müssen, sondern ein Web-GIS-System für alle Benutzer gemeinsam einrichten können. Auf dieses System haben alle in der Organisation – egal ob von zu Hause, im Büro oder im Außendienst – gleichzeitig Zugriff.

Die oben genannten Eigenschaften bringen einige Herausforderungen bezüglich der Verwendung von Web-GIS mit sich. Die benutzerfreundliche Art von Web-GIS regt die öffentliche Teilnahme an und zeigt auf, dass Internetbenutzer ohne GIS-Hintergrund zu berücksichtigen sind. (vgl. ESRI-ArcGIS Enterprise, 2021)

In Österreich besitzt jedes Bundesland ein eigenes Web-GIS-System. Je nach Bedarf können Inhalte ein- und ausgeblendet werden. In Abbildung 21 ist die Anwendung vom Land Burgenland zu sehen. Einblendbare Inhalte sind beispielsweise das Wasserbuch, Hochwasserzonen, Flächenwidmungspläne oder die digitale Katastermappe.



Abbildung 21: Web-GIS-Anwendung Burgenland Quelle: Geodaten Burgenland

5 Erstellung der Bathymetrischen Karte

Als Bathymetrie (von griech. *bathýs* "tief" und *métron* "Maß") wird die Vermessung der topographischen Gestalt der Gewässerbetten, Meeresböden und Seegründe bezeichnet. Sie dient der Erzeugung von Karten und Geländemodellen, aus welchen die Tiefenprofile der Ozeane ersichtlich werden. Die Meeresoberfläche kann im Gegensatz zur Landoberfläche nicht bzw. nur bis zu einer gewissen Tiefe aus der Luft erfasst werden. Die beste Methode zur Erfassung des Meeresbodens/Seebodens ist die Echolot-Messung. Bis heute gibt es nur für circa 10% des gesamten Meeresbodens hochauflösende Bathymetrie-Daten. (vgl. AWI, 2021)

5.1 Räumliche Interpolation

Unter räumlicher Interpolation wird die Berechnung von Werten, auf Grundlage punktuell gemessener Datenpunkte, an nicht beprobten Orten verstanden. Die Hauptaufgabe eines Interpolationsverfahren ist, ein gutes Bild der räumlichen Variation thematischer Oberflächen aus wenigen Einzelpunkten zu erhalten. Die räumliche Ähnlichkeit zwischen den einzelnen benachbarten Werten gilt als Voraussetzung dafür. Bei naheliegenden Punkten ist eine größere Ähnlichkeit als bei weit voneinander entfernten Punkten anzunehmen. Sowohl eine regelmäßige als auch eine unregelmäßige Anordnung der Einzelwerte kann als Grundlage für eine Interpolation dienen. Interpolationsmethoden können in zwei Gruppen unterteilt werden, nämlich den deterministischen und den stochastischen Verfahren. (vgl. Riha, A., 2011, S.35 f.)

"Die Qualität der interpolierten Ergebnisse hängt von der Genauigkeit, der Anzahl und von der Verteilung der in die Berechnung eingehenden Messpunkte ab." (Riha, A., 2011, S.35)

5.1.1 Deterministische Interpolationsverfahren

Diese Verfahren gewichten die Messpunkte entsprechend ihrer räumlichen Nähe. Außerdem berechnen deterministische Verfahren die Ähnlichkeit benachbarter Punkte nur mithilfe mathematischer Funktionen. Sie werden nach zwei Kriterien differenziert: global – lokal oder exakt – approximativ. Globale Methoden berücksichtigen alle Daten im Zuge der Interpolation, lokale Methoden hingegen beziehen nur ein Teilgebiet in die Berechnung ein. Es können jedoch nicht alle Verfahren als global oder lokal bezeichnet werden. Bei exakten Verfahren verläuft die Interpolationsfläche exakt durch die vorliegenden Messpunkte. Als approximativ werden Verfahren bezeichnet, wenn die Oberfläche nicht durch die Messpunkte verläuft. Sind die Ausgangsdaten ungenau oder variiert die Qualität zwischen den Messungen, ist es sinnvoll die Oberfläche nicht exakt zu erstellen, sondern sich den Messwerten nur anzunähern. (vgl. Riha, A., 2011, S.36 ff.)

Triangulated Irregular Network (TIN)

Ein unregelmäßiges Dreiecksnetz ist eine Struktur aus Vektordaten, welche vorhandene Datenpunkte als Eckpunkte von Dreiecken verwendet. Innerhalb jedes Dreiecks werden, mittels bivariater Funktionen, die Werte der unbekannten Gitterzelle berechnet. Die Interpolation kann linear oder nichtlinear durchgeführt werden. Lineare Verfahren passen ebene Flächen an die Lage der Dreiecksflächen im Raum an. Nichtlineare Verfahren verwenden ineinander übergehende Funktionen, welche durch die Verwendung der Stetigkeit der Ableitungen 1. und 2. Ordnung, glatte und differenzierbare Oberflächen erzeugen. Ein großer Vorteil des TIN ist die strukturelle Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Punktdichten. Außerdem wird eine sequenzielle Verarbeitung der Elemente dadurch möglich, dass die Geländeoberfläche in einzelne Dreiecke aufgeteilt wird. Die spezielle Datenstruktur bringt den Vorteil, große Datenmengen leicht zu verarbeiten, da die Geländeoberfläche geteilt werden kann. (vgl. Bullinger, A., 2000, S.14 f.)

Das Delauny-Kriterium hat sich für viele Fälle als optimal herausgestellt. Die Delauny-Triangulation (DT) weist die geometrische Eigenschaft auf, dass sich innerhalb des Umkreises eines Dreiecks kein weiterer Punkt befindet. Außerdem werden Dreiecke mit den größten minimalen Innenwinkeln (Min-Max-Kriterium) gebildet. Die Constrained Delauny Triangulation (CDT) berücksichtigt Geländekanten bei der Triangulation als Zwangskanten. Die Dreiecksvermaschung stellt eine Interpolation ohne Filterung dar. Daher gehen zufällige Messfehler direkt in die Flächenbeschreibung ein. Die Daten müssen vor der Interpolation bereinigt werden. (vgl. Mandlburger, G., 2006, S.20 f.)

Polynom-Methode

Wenn erste Untersuchungen auf wenig räumliche Unterschiede deuten oder sich ein klarer Trend für das Untersuchungsgebiet abzeichnet, empfehlen sich polynomische Verfahren (Regressionsverfahren). Bei dieser Methode wird eine glatte Oberfläche, welche durch eine Polynomfunktion festgelegt ist, an die Ausgangspunkte angepasst. Die Berechnung wird nach der Methode der kleinsten Quadrate (Minimierung der Abweichungsquadrate) durchgeführt. Es handelt sich um multiple regressionsanalytische Verfahren. Auch hier kann zwischen globalen und lokalen Interpolationen unterschieden werden. Während bei der lokalen Methode nur Teilbereiche einbezogen werden, berücksichtigt die globale Methode alle vorhandenen Datenpunkte. Unvorteilhaft liegende Ausgangspunkte und Ausreißer können zu Ungenauigkeiten im Ergebnis führen. In diesem Fall ist ein Wechsel des Interpolationsverfahrens, etwa zum Spline-Verfahren, ratsam. In den meisten Fällen dient die Polynom-Methode als Vorbereitungsschritt für andere Interpolationen durch das Abschätzen und Entfernen von räumlichen Trends. (vgl. Riha, A., 2011, S.39 f.)

Zusätzlich kann eine Kernel-Funktion ausgewählt werden. Die ursprünglichen Punkte werden dann je nach Distanz unterschiedlich stark gewichtet. Folgende Funktionen können ausgewählt werden:

- Exponential: Die Funktion wächst oder fällt proportional
- Gaussian: Glockenförmige Funktion, die schnell gegen plus oder minus unendlich abfällt
- Quartic: Polynomfunktion vierter Ordnung
- Epanechnikov: Eine diskontinuierliche Parabelfunktion
- Polynomial-5: Polynomfunktion fünfter Ordnung
- Constant: Eine Indikatorfuntkion

Inverse Distance Weighted (IDW)

Dieser Interpolationsansatz wurde aus dem Gravitationsmodell, bekannt aus der Physik, abgeleitet. Um den Höhenwert einer beliebigen Stelle zu ermitteln, werden die gemessenen Werte, gemäß ihrer Distanz zum berechneten Höhenwert, invers gewichtet. Naheliegende Punkte haben einen größeren Einfluss, als jene die weiter entfernt liegen. Die Auswahl der zu verwendenden Punkte erfolgt mittels Reichweite (Suchradius) oder über eine vorgesehene Anzahl an Datenpunkten (standardmäßig zwischen 10 und 30). Mit dieser Methode lässt sich sehr einfach eine stetig differenzierbare Oberfläche erzeugen. Es handelt sich um eine exakte Interpolationsmethode. Ein großer Nachteil ist der steigende Zeitbedarf bei der Berechnung mit vielen Datenpunkten, vor allem wenn die Punkte aus Vektorhöhenlinien erzeugt wurden. Da nur die Distanz und nicht die Richtung der umliegenden Ausgangspunkte einbezogen wird, geht die Information der relativen Richtung verloren. Das Interpolationsverfahren basiert auf einer Mittelung der vorliegenden Daten, daher können Extremwerte nur wiedergegeben werden, wenn diese auch in den Datenpunkten erfasst wurden. Senken und Rücken können daher nur korrekt dargestellt werden, wenn ihre Extrempunkte in den Daten vorhanden sind. Dieses Verfahren eignet sich vor allem für nicht-gehäufte Ausgangsdaten. (vgl. Bullinger, A., 2000, S.13 f.)

5.1.2 Stochastische Interpolationsverfahren

Kriging-Verfahren

"Die Anzahl der zur Interpolation verwendeten Datenpunkte, ihre Verteilung und ihre Variation stellen wichtige Informationen für die Interpolation einer Geländeoberfläche dar." (Bullinger, A., 2000, S.16) Von Matheron wurde die Theorie der Regionalisierten Variablen und von Krige das zugehörige Interpolationsverfahren Kriging entwickelt, um die räumlichen Abhängigkeiten zu integrieren. Drei Komponenten beschreiben die Variation der Variablen:

- Strukturelle Komponente mit Mittelwert oder Trend
- Zufällige, räumlich korrelierte Komponente
- Zufälliges Rauschen (Messfehler, kleinräumige Varianz)

Ein stochastischer Ansatz wird für die Modellierung einer Geländeoberfläche verwendet. Eine Trendfläche eliminiert die strukturelle Komponente, sodass in den weiteren Schritten nur mehr die Werte der Residuen berücksichtigt werden. Dadurch können Fehlinterpretationen in der Berechnung unterdrückt werden. Wenn kein vorhandener Trend verwendet wird, ist die Differenz der Varianz der Höhenwerte an den Datenpunkten nur durch die Distanz begründet. Ein Vorteil der Kriging-Methode ist, dass sich die Qualität der Interpolation direkt aus der gespeicherten Varianz ableiten lässt. Kaum verhindern lässt sich die lokale Ausglättung der Oberfläche. Im schlimmsten Fall kommt es zu Oberflächen, welche die Realität nicht gut genug wiedergeben. Um das zu verhindern, werden die Inputdaten systematisch analysiert und bereinigt. (vgl. Bullinger, A., 2000, S.16 ff.)

Spline-Verfahren

Bei dieser Methode wird angenommen, dass die Interpolationsfunktion durch die Datenpunkte oder sehr dicht an diesen verläuft. Der Begriff Spline stammt aus der numerischen Mathematik und wird für glatte, harmonisch zusammengesetzte Kurven dritten Grades verwendet. Ein Spline wird stückweise aus Polynomen gebildet. Eine besondere Eigenschaft der Kurve ist, dass die Gesamtkrümmung minimal wird. Der Kurvenverlauf wird beim Übergang der Teilintervalle beibehalten und sie sind relativ einfach und glatt. Dadurch entstehen weniger Unsicherheiten in der Interpolation als beim Polynom-Verfahren. Außerdem ist, im Gegensatz zum IDW, eine Überschreitung der lokalen Maxima und lokalen Minima erlaubt, wodurch ein geglätteter Verlauf zwischen den Ausgangspunkten entsteht. (vgl. Riha, A., 2011, S. 43 f.)

5.2 Problemstellung und vorhandene Daten

Eine unveröffentlichte bathymetrische Karte des Neusiedler Sees aus dem Jahr 2015 ist bereits vorhanden. Diese wurde ebenfalls mit den Daten des Projekt GeNeSee erzeugt, allerdings ist diese nicht optimal. Obwohl die Interpolation korrekt durchgeführt wurde, zeigt der in Abbildung 22 dargestellte Abschnitt auch ohne größeren Zoomfaktor Streifen. Diese Strukturen entstehen einerseits durch lineare Interpolation zwischen den Profilen und anderseits durch die vorhandenen Abweichungen in den Messdaten. Die Ursache für die Unstimmigkeiten ist ein fehlerhaftes Bewegungskompensationssystem auf dem Messboot. Die starken Bootsbewegungen ergeben sich aufgrund des Wellenganges, durch den Wind oder durch Fahrlinienkorrektur- bzw. Ausweichmanöver des Messbootes.

Folgende Ausführungen werden sowohl für die Schlammoberfläche als auch für den festen Seeboden durchgeführt. Die Unterscheidung der beiden Begriffe wurde bereits in Kapitel 3.2 erläutert.



Abbildung 22: DGM der Schlammoberfläche erzeugt im Rahmen des Projektes 2015; DGM-Raster: 1x1 Meter; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Datenquelle: Projekt GeNeSee; Visualisierung durch den Autor

Die Echolotmessungen enden im Allgemeinen einige Meter vor der Wasseranschlagslinie (WAL). Die WAL ist aus den Orthofotos definiert. Sie ist die Grenze zwischen Wasser und Land bzw. Bewuchs. Bei der Seebeckenmodellierung wird dann von diesem letzten Wasserpunkt (Echolotmessung) bis zum Landpunkt (Uferlinienhöhenwert aus dem ALS-DGM) linear interpoliert. Bei der Wasservolumsberechnung wird nur die freie Oberfläche (ohne Schilf) herangezogen. Steganlagen und ähnliche Kunstbauten sind aus den Daten zu extrahieren und die WAL wird entlang des natürlichen Ufers fortgeführt. Vor allem bei flachen Buchten enden die Messpunkte sehr weit weg vom Ufer, da die Steganlagen sehr weit in den See ragen. Das Seebecken endet hier mit einem konstant ansteigenden Seeufer.

5.2.1 Echolot-Daten

Abbildung 23 zeigt die durchgeführte Vermessung mittels Querprofilen im Norden des Neusiedler Sees. Die vorliegenden Daten wurden aus den Echolotmessdaten extrahiert und bereinigt. Die Profile haben Punktabstände von 1-2 Meter in Profilrichtung, aber einen Profilabstand von 100 Meter. Das Verhältnis zwischen Punkt- zu Profilabstand lautet daher 1:100, beziehungsweise 2:100. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Querprofilen wurden Messungen entlang des Ufers, von Inseln und in den angrenzenden Kanälen und Häfen durchgeführt. Diese Aufnahmen sind notwendig um die Inseln, Buchten und Häfen korrekt zu modellieren.



Abbildung 23: Echolotaufnahme durch Querprofile (rot) und Fahrten in Ufernähe, Kanälen und Häfen (grün); Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Datenquelle: Projekt GeNeSee; Visualisierung durch den Autor

5.2.2 ALS-Daten und Orthofotos

Für den österreichischen Teil wird in dieser Arbeit ein aktueller ALS-Datensatz aus dem Jahr 2019 verwendet. Das aus den aktuellen ALS-Daten erstellte DGM-Modell des österreichischen Seebereiches besitzt eine Auflösung von 0,50 Meter und ist genauso wie die Orthofotos, kostenlos vom Land Burgenland erhältlich. Die Orthofotos besitzen eine Auflösung von 0,20 Meter. Die Daten sind für jede Gemeinde des Bundeslandes getrennt downloadbar und müssen danach mittels einem GIS-System verbunden werden. Die Metadaten sind in Tabelle

5 ersichtlich. Die Orthofotos, sowie einige andere Karten, stehen auch auf einem ArcGIS-Server zur Verfügung. Der große Vorteil der Server-Daten ist, dass man den Speicherplatz auf dem eigenen Rechner minimieren kann, da man keine zusätzlichen Dateien speichern muss.

| | DGM und DOM | Orthofotos |
|--------------------------|---|--|
| Befliegungsdaten | 16.02 - 28.02.2019 | 26.06.2019 |
| Rasterzellengröße | 50 cm | 20 cm |
| Absolute Lagegenauigkeit | ± 15 cm | / |
| Absolute Höhengenaugkeit | ± 7,5 cm | / |
| Koordinatensystem | MGI_Austria_GK_East EPSG-Code: 31256 | MGI_Austria_GK_M34 EPSG-Code: 31259 |

Tabelle 5: ALS- und Orthofoto-Metadaten Quelle: Land Burgenland

Auch vom ungarischen Teil des Sees gibt es ALS-Daten, allerdings besitzen diese eine geringere Auflösung und stammen aus dem Jahr 2011. Weiters liegen diese Daten nicht im gleichen Koordinatensystem vor und haben einen anderen Höhenbezug. Da im GeNeSee-Seebeckenmodell aus dem Jahr 2015 die ungarischen ALS-Daten bereits transformiert und bereinigt worden sind, werden diese ohne weitere Bearbeitung übernommen und in das neue Modell integriert.

Es gibt einige Unsicherheiten bei der Erstellung des Geländemodells aus den ALS-Messungen. Bei natürlichen Ufern, wie zum Beispiel Wiesen oder Stränden sind die Messungen sehr gut und das DGM-Rastermodell lässt sich korrekt aus der ALS-Punktwolke erstellen. Bei Ufermauern ist zu überprüfen, ob die Höhe der Mauerkante eine Mischung aus Wasserspiegelhöhe und Landhöhe ist oder eine korrekte Höhe berechnet wurde. In den Bereichen mit schilfbewachsenem Ufer können Blätter und der Bewuchs selbst zu einigen Dezimeter Differenz zur tatsächlichen Bodenoberfläche führen. Diese Ufer müssen ebenfalls mit einem Attribut versehen werden, um die Höhen zu kontrollieren und mit dem maximalen Wasserspiegel zu vergleichen. Nach Überprüfung, ob das aus den ALS-Daten erstellte DGM-Modell fehlerfrei ist, wird daraus die Wasseranschlagslinie mit Höheninformation erstellt.

5.3 Methodik

Vor der Erstellung des eigentlichen Modells, wird ein Testperimeter im Bereich der Gemeinde Neusiedl am See festgelegt. Durch die Verringerung des Datenvolumens kann eine effiziente und wenig rechenintensive Erarbeitung des Grundmodells sichergestellt werden. Die folgenden Schritte werden zuerst in der 2D-Ansicht durchgeführt und anschließend auf die 3D-Szenenansicht übertragen. Alle nicht in Vektor oder Rastergeometrie vorliegenden Objekte müssen erst digitalisiert werden. Dies betrifft die Wasseranschlagslinie und all jene Gebäude und Stege, welche über der freien Wasserfläche liegen.

5.3.1 Wasserflächen- und Landflächenpolygon

Die Wasseranschlagslinie (WAL) wird mit Hilfe der Orthofotos erstellt. Auf der österreichischen Seite des Sees kann die WAL aufgrund der sehr guten Auflösung der Daten mit einer hohen Genauigkeit erstellt werden. Als Voraussetzung muss die Wasserspiegelhöhe zum Zeitpunkt der Aufnahmen der Orthofotos und der ALS-Daten nahezu gleich sein. Die Airborne-Laserscan-Messungen wurden zwischen 16.02.2019 und 18.02.2019 durchgeführt. Die Orthofotos wurden am 26.06.2019 aufgenommen. Der Wasserstand betrug laut Wasserportal Burgenland zu beiden Zeitpunkten 115,52 m.ü.A. (siehe Abbildung 26). Das ALS-DGM wird mittels Profilschnitten durch ausgewählte Uferzonen überprüft. Bei Ufermauern muss ein deutlicher Sprung vom Wasserspiegel auf die Maueroberkante zu erkennen sein. Das gleiche gilt für stark bewachsene Uferzonen, da die Blätter und Pflanzenteile zu Differenzen führen können. Auch hier muss ein deutlicher Höhenunterschied erkennbar sein. Da nach der Überprüfung keine Unsicherheiten erkennbar sind, kann die WAL händisch anhand der Orthofotos digitalisiert werden. Da es sich bei der oben genannten Höhe um einen Mittelwert über den gesamten See handelt, wird für das erzeugte Feature eine Höhe von 115,50 m.ü.A. als Z-Koordinate festgelegt. Der Mittelwert kann in diesem Fall herangezogen werden, da die vorhandenen Messstellen einen konstanten Pegelstand in den Zeiträumen der Aufnahme anzeigen. Die Überprüfung ist notwendig, da ein starker Wind zu über einem Meter Unterschied zwischen den einzelnen Messstellen führen kann. Die Pegeldaten wurden vom Wasserportal Burgenland zur Verfügung gestellt und sind in Abbildung 24 und Abbildung 25 ersichtlich.



Abbildung 24: Pegelstände der Messstellen des Neusiedler Sees (Februar 2019) Datenquelle: Wasserportal Burgenland; Visualisierung durch den Autor



Abbildung 25: Pegelstände der Messstellen des Neusiedler Sees (Juni 2019) Datenquelle: Wasserportal Burgenland; Visualisierung durch den Autor



Auf der ungarischen Seite des Neusiedler Sees stehen zwar aktuelle Bilddaten aus dem Zeitraum September 2016 bis April 2019 zur Verfügung, allerdings mit einer geringeren Auflösung (0,50 m). Die Bilddaten können direkt vom ArcGIS Map Service bezogen und in ArcGIS Pro als Basemap eingeblendet werden. Aufgrund der schlechteren Auflösung kann es zu leichten Abweichungen zur realen Wasseranschlagslinie kommen. Die endgültige, den gesamten See umfassende Wasseranschlagslinie für den Pegel 115,50 m. ü. A. ist in Abbildung 27 dargestellt.



Abbildung 27: Wasseranschlagslinie bei einem Wasserstand von 115,50 m. ü. A. (rote Linie) Hintergrund: Basemap (Quelle: ArcGIS Map Service); Quelle: eigene Darstellung

Aus der fertig erstellten WAL lässt sich sehr einfach mittels des Tools "Feature to Polygon" ein Wasserflächenpolygon und ein Landflächenpolygon erzeugen. Dieses Werkzeug nimmt die Linien als Eingangsparameter und bildet aus allen geschlossenen Abschnitten einzelne Flächen. Die beiden Polygone begrenzen die TIN-Interpolation und sind notwendig, um Teile aus einzelnen Layern (z.B. ALS-DGM, Polynome-Raster, Orthofotos) zu schneiden. So können zum Beispiel im ALS-DGM die freie Wasserfläche und die Landflächen getrennt betrachtet und analysiert werden. Das Wasserflächenpolygon bedeckt die freie Wasserfläche. Das Landflächenpolygon umfasst die Inselflächen sowie das Umland des Sees. (siehe Abbildung 28)



Abbildung 28: Wasserflächenpolygon (blau), Landflächenpolygon (grün) Quelle: eigene Darstellung

5.3.2 Objekte

Alle über der freien Wasseroberfläche auf Pfeiler stehende oder auskragende Objekte, wie Stege und Gebäude, werden in die endgültige Karte integriert. Objekte auf dem Festland, wie Häuser, Bäume oder Stege sind nicht im DGM-Modell vom Land Burgenland integriert. Sie können in den Orthofotos identifiziert werden. Die Stege und Gebäude werden jeweils in einem extra Layer digitalisiert. Die Erzeugung des Grundrisses der einzelnen Objekte erfolgt mittels rechtwinkeliger Polylinie. Anschließend können diese mit dem Tool "Feature to Polygon" in Polygone umgewandelt werden. Für die 3D-Darstelung werden die Objekte (Stege und Gebäude) mit einer, für den jeweiligen Objekttyp einheitliche Objekthöhe versehen. Für Stege beträgt diese 0,75 Meter und für Gebäude 4,50 Meter. Diese Objekthöhen werden den erzeugten Polygonen als Attribut hinzugefügt. In der 3D-Szenen-Ansicht erfolgt die Darstellung mithilfe der festgelegten Höhen. Dabei werden die Objekte ausgehend vom jeweiligen Polygon auf die festgelegte Objekthöhe extrudiert. Die Höhenkoordinate der Objektbasis entspricht dabei jene der Wasseranschlagslinie von 115,50 m. ü. A..

5.4 Interpolation der Querprofildaten

Zur Verdichtung der Messpunkte können unterschiedliche Interpolationsansätze verwendet werden. Nach der Literaturrecherche scheinen vor allem die TIN-Interpolation und die Polynom-Interpolation gut anwendbar.

5.4.1 Polynom-Interpolation

Nach Mandlburger (2006) eignet sich diese Methode sehr gut, um Punkte zwischen den Profilen einzurechnen. Die korrespondierenden Punkte bilden zunächst mit den Ausgangspunkten als Stützpunkte 3D-Polygonzüge. Diese Züge können als Feldlinien über die Gewässerbreite interpretiert werden.

Mit dem Tool "Local polynomial Interpolation" kann diese Methode durchgeführt werden. Hier handelt es sich um eine kreisförmige Berechnungsmethode. Der Radius kann selbst gewählt werden. In diesem Fall ist er mit 550 Metern festgelegt. Es werden vom Ausgangsprofil aus, in beide Richtungen jeweils fünf Profile berücksichtigt. Um eine verzerrte Berechnung zu verhindern, wird eine exponentielle Kernal-Funktion verwendet. Das heißt die Gewichtung der Messpunkte erfolgt nach der Distanz zum Ursprung des Kreises. Die durchgeführte Kalkulation ist in Abbildung 29 ersichtlich. Die Darstellung zeigt, dass die Berechnung nicht abgegrenzt werden kann. Die ermittelten Werte gehen deutlich über die Wasseranschlagslinie hinaus.



Abbildung 29: Polynom-Interpolation der Schlammoberfläche Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Quelle: eigene Darstellung

Im Gegensatz zur TIN-Interpolation können das Wasserflächenpolygon bzw. das Landflächenpolygon nicht direkt in der Berechnung berücksichtigt werden. Die interpolierten Daten sind in einem Raster von 1x1 Meter angeordnet. Hier gibt es die Möglichkeit den erzeugten Raster-Datensatz in einem weiteren Schritt mittels des Werkzeugs "Extract by Mask" auf den Bereich der Wasserfläche mit dem Wasserflächenpolygon zuzuschneiden. Aus dem ausgeschnittenen Raster wird mit Hilfe des Tools "Raster to Point" ein Punkt-Layer erzeugt. Pro 1x1 Meter Kachel wird ein Punkt erzeugt, welcher die Höhe des Kachels als Attribut beigefügt hat. Diese Punkte umfassen nun freie Wasserfläche sowie Buchten und Häfen. Durch diese Methode erfolgt die Lösung des Interpolationsproblems des großen Verhältnisses zwischen Profilpunktabstand und Profilabstand.

Differenzen zwischen Originalmessdaten und Modellhöhen

Um eine Aussage über die "Qualität" der angewandten Interpolationsmethode für die Erzeugung des Schlammoberflächenmodells zu erhalten, erfolgt eine Berechnung der Differenzen zu den ursprünglichen Daten. Mit dem Werkzeug "Extract Multi Values to Point" können aus einem Raster-Feature die Höhenwerte der Pixel extrahiert und in einem Punkt-Feature als Attribut hinzugefügt werden. Die Abweichung zu den Ausgangswerten sind in

Abbildung 30 dargestellt. Die größten Unterschiede entstehen vor allem in den Buchten, den Häfen, den engen Bereichen und nahe am Ufer. Die größeren Differenzen lassen sich durch die Verteilung der Ausgangsdaten erklären. In die Berechnung fließen sowohl die Querprofile als auch die Uferfahrten ein. Allerdings sind die Parameter der Interpolation in erster Linie an die Querprofildaten angepasst und funktioniert daher in den Uferbereichen nur bedingt. Aufgrund dessen eignet sich diese Methode nur teilweise für die Modellbildung des gesamten Gebiets in einem Schritt. Jedoch ist die Polynom-Interpolation ein geeignetes Mittel, um die Punktdichte zu erhöhen.



Abbildung 30: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolot-Messungen) und 3D-Modell der Polynominterpolation; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Quelle: eigene Darstellung

5.4.2 Interpolation mittels TIN

Laut Heitzinger und Krager (1998) eignet sich die TIN-Methode sehr gut, um ein Gewässerbett aus Querprofilen zu modellieren. Die Dreiecksvermaschung bietet prinzipielle Vorteile bei einer heterogenen Datenverteilung. Außerdem können Aufweitungen, Buchten und Verengungen mithilfe des Wasserflächenpolygons berücksichtigt werden. Das Landflächenpolygon liefert die Wasserspiegelhöhe entlang der Wasseranschlagslinie und das Wasserflächenpolygon begrenzt den Interpolationsbereich auf die freie Wasserfläche. Dadurch passen sich die entstehenden Dreiecke automatisch an die Gewässerbreite an. Trotz Verwendung der Constrained Delaunay Triangulation (CDT) bilden sich Dreiecke aus Punkten desselben Querprofils (siehe Abbildung 31 b). Aufgrund des sehr konstanten Seebodens und der geringen Wasserspiegelhöhe kann die Vermaschung trotzdem als sehr genau eingestuft werden.



Abbildung 31: (a) Homogenisierung der Datenverteilung durch Trinagulierung zwischen Querprofilen (b) Dreiecksbildung zwischen Punkten desselben Profils Quelle: eigene Darstellung

Die Triangulation erfolgt mit dem Tool "Create TIN" und bietet den Vorteil, dass das bereits erwähnte Wasserflächenpolygon direkt in die Interpolation eingerechnet werden kann. Weiters können Linien-Features, Punkt-Features und Polygon-Features gemeinsam in die Interpolation einfließen. Es ist also im Gegensatz zur Polynom-Interpolation möglich mehr als einen Layer einzubinden. Die Berechnung erfolgt einmal für den Seeboden und ein weiteres Mal für die Schlammoberfläche. In beiden Fällen wird vom letzten Punkt der Echolotquerprofilmessungen bzw. der ufernahen Echolotmessungen linear zum Landflächenpolygon interpoliert. Für die Kalkulation sind die Echolotdaten, das Wasserflächenpolygon und das Landflächenpolygon heranzuziehen. Die Echolotguerprofilmessungen, die ufernahen Echolotmessungen, das Wasserflächenpolygon und das Landflächenpolygon werden als Eingangsdaten für die Interpolation verwendet. Das Wasserflächenpolygon dient zur Eingrenzung des Interpolationsbereiches. Das berechnete Triangulated Irregular Network ist in Abbildung 32 ersichtlich. Im Gegensatz zur Polynom-Interpolation ist es möglich die Buchten, Häfen und die freie Wasserfläche gemeinsam zu berechnen. Das ist ein entscheidender Vorteil, da die Einbeziehung der Höhe des Umlandes im gleichen Schritt wie die Interpolation der Daten erfolgt. Der erstellte Datensatz muss nicht mehr bearbeitet werden und ist im Uferbereich bereits korrekt modelliert.



Abbildung 32: Triangulated Irregular Network Schlammoberfläche Hintergrund: Orthofoto (Geodaten Burgenland); Quelle: eigene Darstellung

Das TIN-Modul kann nur eine Oberfläche bilden, wenn in diesem Bereich auch Messdaten vorhanden sind. In Gebieten ohne Messdaten wird von der WAL ausgehend über diese Regionen hin bis zu den nächsten Messdaten interpoliert. Besonders in engen Hafenbereichen kann es vorkommen, dass die WAL einen Bereich begrenzt, in dem überhaupt keine Messdaten vorhanden sind (etwa in Ecken und Hafenbecken). Aufgrund der fehlenden Punkte und der den Bereich begrenzenden Wasseranschlagslinie als einzige Bezugshöhe ergibt sich dort für den Seeboden eine konstante Höhe von 115,50 m. ü. A., also jene der Wasseroberfläche. Diese fehlerhaften Zonen sind manuell durch Einfügen von Schlammoberflächenpunkten zu bearbeiten, wobei der Höhen aus den nächstgelegenen Messdaten extrapoliert werden.

Anschließend wird das Tool "TIN to Raster" angewendet, um aus der berechneten Vermaschung ein Raster mit einer Auflösung von 1x1 Meter zu erzeugen. Die Werte der einzelnen Pixel werden mittels linearer Interpolation angenähert. Die Abbildung 33 zeigt deutlich, dass durch eine reine Triangulation keine glatte Oberfläche erstellt werden kann. Die bereits erwähnten wellenartigen Strukturen sind eindeutig weiterhin vorhanden. Aus diesem Grund ist eine reine TIN-Interpolation nicht ideal und eine hybride Interpolation, bestehend aus der Polynom- und der TIN-Methode, anzuwenden.



Abbildung 33: DGM der Schlammoberfläche; erzeugt aus der TIN-Interpolation; DGM-Raster: 1x1 Meter Datenquelle: Projekt GeNeSee; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Visualisierung durch den Autor

In Abbildung 34 sind die Differenzen zu den Ursprungswerten abgebildet. Die Abweichungen sind etwas geringer als bei der Polynom-Interpolation. Zu erwähnen ist, dass vor allem in den Profilpunkten nur sehr geringe Unterschiede, kleiner 5 cm, entstehen, da diese direkt als Stützpunkte in die Triangulierung eingehen. Zum Zeitpunkt der Echolotmessungen (2011 und 2013) betrug der mittlere Wasserstand 115,72 m.ü.A. und zum Zeitpunkt der Orthofotos bzw. der ALS-Daten 115,52 m.ü.A.. Wegen dieses Unterschiedes vom Wasserstand (20 cm), hat sich die Wasseranschlagslinie verschoben und einige der ufernahen Echolotdaten liegen damit außerhalb des neu erstellten 2019er Wasserflächenpolygons. Diese Punkte wurden in der TIN-Interpolation nicht berücksichtigt, da mittels dem Wasserflächenpolygon die Grenze der Kalkulation, mit dem Attribut "Hard Clip", festgelegt ist. Die größeren Abweichungen in den Ufer- und Buchtbereichen entstehen durch die Höheninformation des Landflächenpolygons. Dort wird von den Echolotpunkte sehr nah am Ufer (=WAL) oder in sehr engen Zuflüssen liegen, liefert die Interpolation eine sehr steile Uferböschung. In diesem Fall kann die Höhe des Echolotmesspunktes nicht mehr eingehalten werden, was zu Differenzen führt.



Abbildung 34: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolot-Messungen) und 3D-Modell der TIN-Interpolation; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Quelle: eigene Darstellung

5.4.3 Hybride Interpolation

Aufgrund der jeweiligen Vor- und Nachteile der beiden beschriebenen Methoden wird die endgültige Berechnung als Hybrid durchgeführt. Zuerst erfolgt eine Homogenisierung der Daten mittels Polynom-Interpolation. Anschließend werden die neu errechneten Rasterpunkte als zusätzliche Eingangsparameter in der TIN-Interpolation berücksichtigt.

Die Polynom-Interpolation erfolgt mit den Echolotquerprofilmessungen und den ufernahen Echolotmessungen als Eingangsdaten. Durch das Werkzeug "Extract by Mask" lässt sich der berechnete Raster-Datensatz auf den Bereich der Wasserfläche zuschneiden. Danach kommt das Tool "Raster to Point" zum Einsatz. Mit diesem Werkzeug können Punkte, welche die Höhenwerte der einzelnen Pixel des Modells aus der Polynominterpolation als Attribut beinhalten, erstellt werden. In Abbildung 35 sind die erzeugten Punkte ersichtlich. Die Datenverdichtung erfolgt mittels einem 5x5 Meter Raster. Das Verhältnis zwischen Profilpunktabstand und Querprofilabstand verringert sich daher von 1:100 auf 1:5. Das ist essenziell um eine glatte Oberfläche ohne wellenartige Strukturen erzeugen zu können.



Abbildung 35: Zwischenpunkte aus der Polynom-Interpolation (rot), Echolotmessdaten (blau) Quelle: eigene Darstellung

Das Triangulated Irregular Network wird nun aus den neuen Punkten der Polynom-Interpolation, den Echolotquerprofilmessungen, den ufernahen Echolotmessungen und der Wasseranschlagslinie gebildet. Wie in Abbildung 36 eindeutig erkennbar ist, sind die erwähnten wellenartigen Strukturen geglättet und nicht mehr vorhanden.



Abbildung 36: DGM der Schlammoberfläche; erzeugt aus der hybriden Interpolation DGM-Raster: 1x1 Meter; Datenquelle: Projekt GeNeSee Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Visualisierung durch den Autor

Da in der TIN-Modellierung die Echolotmessungen direkt als Stützpunkte erhalten bleiben, liegen die Differenzen zwischen Echolotmessdaten und berechneter Oberfläche zu 97% in einem Abweichungsbereich von 15 cm. Da bereits bei den Echolotmessdaten mit Fehlern bis zu 10 cm ausgegangen werden kann (siehe auch Kapitel 5.2), ist die Interpolation als ausreichend gut einzuschätzen. Zwischen -0,11 cm und 0,11 cm befinden sich 96 % der Punkte. In Abbildung 37, Abbildung 38, Abbildung 39 sind die Verteilung der Differenzen zu den Ausgangswerten dargestellt. Das Modell aus dem Jahr 2015 zeigt einen ähnlichen Genauigkeitsbereich (siehe Abbildung 40). Abbildung 37 stellt die bereits erwähnte Problematik mit den ufernahen Echolotmessdaten dar. Die Differenzen sind dort im Gegensatz zu den Echolotquerprofilmessungen deutlich größer. Das neue Modell ist notwendig, da die bereits beschriebenen wellenartigen Strukturen im Modell aus dem Jahr 2015 vorhanden sind. Tabelle 6 zeigt, dass die neue Interpolation ein wenig ungenauer ist, allerdings konnte dadurch ein glattes Oberflächenmodell ohne wellenartige Strukturen erzeugt werden.

Tabelle 6: statistische Kennwerte der Höhendifferenzen zwischenAusgangswerten (Echolotmessungen) und den 3D-Modellen

| | delta_2015 | delta_hybrid |
|--------------------|------------|--------------|
| MAX [m] | 1,49 | 1,51 |
| MIN [m] | -0,78 | -0,92 |
| Mittelwert [m] | 0,00 | 0,01 |
| Standardabweichung | 0,02 | 0,10 |

Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 37: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotmessungen) und 3D-Modell der Hybrid-Interpolation; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Quelle: eigene Darstellung


Abbildung 38: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotquerprofilmessungen) und 3D-Modell der Hybrid-Interpolation; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland) Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 39: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotmessungen) und 3D-Modell der Hybrid-Interpolation

Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 40: Höhendifferenzen zwischen Ausgangswerten (Echolotmessungen) und 3D-Modell aus dem Jahr 2015 Quelle: eigene Darstellung

5.4.4 3D-Darstellung

Für die 3D-Darstellung erfolgen die Berechnungen und Erstellungen aller Datensätze in erster Linie in der 2D-Ansicht der Programme ArcGIS Pro und QGIS. Die Bearbeitung ist um einiges einfacher und schneller und es wird weniger Rechenleistung benötigt als bei der Bearbeitung direkt in der 3D-Scenenansicht. Die Z-Koordinate der Features kann dabei entweder direkt in der Geometrie des Layers verankert oder als Attribut beigefügt sein. Auf der österreichischen Seite werden die neu erzeugten digitalen Geländemodelle vom festen Seeboden und von der Schlammoberfläche mit dem ALS-DGM verbunden. Der entstehende Raster-Datensatz wird anschließend die 3D-Szenenansicht transformiert. in Aufgrund der geringen Höhenunterschiede in diesem Gebiet muss zumindest eine 10-fache Überhöhung eingestellt werden, um eine gute Darstellung des Reliefs zu erhalten. Das verbundene DGM wird sowohl als "Surface" wie auch als Layer hinzugefügt. Ein "Surface", also eine Höhenoberfläche, ist notwendig, um den Höhenbezug herstellen zu können. Alle anderen Datensätze und Layer werden dann in Bezug mit dem Geländemodell dargestellt. In Abbildung 41 ist die Höhenoberfläche ersichtlich. Das umliegende Gelände ist teilweise sehr gut erkennbar. Es gibt allerdings auch Bereiche, welche aufgrund der geringen Höhenunterschiede, eine noch größere Überhöhung benötigen. Das gilt auch für die Geländemodelle des festen Seebodens und der Schlammoberfläche.



Abbildung 41: 3D-Szenenansicht des nördlichen Teils des Neusiedler Sees Quelle: eigene Darstellung

Anschließend werden die verfügbaren Orthofotos des Neusiedler Sees und der Landflächen hinzugefügt und direkt auf die Oberfläche aufgebracht. Zusätzlich gibt es noch weltweite Bilddaten vom ArcGIS-Server. Durch diese können auch für den ungarischen Teil Fotos angezeigt werden. Die Verzerrungen der Bilddaten ergeben sich aufgrund der 10-fachen Überhöhung und aus dem Umstand, dass Gebäude nicht im DGM integriert sind. Die digitalisierten Gebäude und Stege haben im Attributfeld "Höhe" die Objekthöhe beigefügt. Mit Hilfe des Attributfeldes können die Objekte in 3D als Volumskörper angezeigt werden. In Abbildung 42 ist das Orthofoto bereits beigefügt und wird für die Landflächen angezeigt. In diesem Fall ist die freie Wasserfläche nicht mittels Bilddaten dargestellt, sondern als digitales Geländemodell der Schlammoberfläche. Im Hintergrund sticht das Leitha Gebirge hervor. Durch die große Auswahl an unterschiedlichen Kombinationen, lassen sich die Ansichten je nach Bedarf verändern. Mithilfe der Orthofotos ist das Relief besser als in Abbildung 41 erkennbar.



Abbildung 42: 3D-Szenenansicht des nördlichen Teils des Neusiedler Sees; Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland); DGM der Schlammoberfläche; DGM-Raster: 1x1 Meter Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 43 macht deutlich, warum die 10-fache Überhöhung notwendig ist. Die kleinen Inseln neben den Gebäuden (blau) und den Stegen (grün) ragen so gut wie gar nicht aus dem Wasser. Ohne Überhöhung würde hier kaum ein Höhenunterschied erkennbar sein. In diesem Fall ist das Orthofoto für die freie Wasserfläche auf eine Höhe von 115,50 m.ü.A. eingeblendet. Die Objekte sind direkt auf dem Wasserspiegel aufgebracht und werden mit einer festgelegten Höhe angezeigt.



Abbildung 43: 3D-Szenenansicht, Gebäude (blau) und Stege (grün); Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland); Wasserspiegel: 115,50 m. ü. A. (hellblau) Quelle: eigene Darstellung

5.5 Hafenhandbuch

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Layern sind auch Bilder der einzelnen Häfen in der Karte enthalten. Diese Abbildungen stammen aus dem Hafenhandbuch Neusiedler See aus dem Jahr 2019. Das Buch enthält ein Verzeichnis aller Hafen-Gemeinden mit Angaben zu Clubs, Vereinen und Infrastrukturen sowie Ansteuerungshinweise und Übersichtskarten. Da die Darstellungen nicht als georeferenzierte Raster-Datensätze verfügbar sind, müssen sie zuerst georeferenziert werden. (vgl. Hafenhandbuch Neusiedler See, 2019)

5.5.1 Georeferenzierung

Raster-Daten sind aus vielen unterschiedlichen Quellen abrufbar. Dazu zählen Satellitenbilder, Luftbildkameras oder gescannte Karten. Die Abbildungen des Hafenhandbuchs sind handgezeichnet und anschließend digitalisiert und daher zu den gescannten Karten zu zählen. Gescannte Dateien enthalten normalerweise keine Raumbezugsinformationen. In diesem Fall sind genaue Positionsdaten notwendig, um die Raster-Daten auf ein Koordinatensystem auszurichten. Dieser Vorgang wird mit Hilfe von Identpunkten durchgeführt. Diese Punkte sollten eindeutig und nicht veränderbar sein, zum Beispiel Gebäudeecken, Stege oder Straßenkanten. In Abbildung 44 ist der Vorgang dargestellt. Die roten Punkte stellen die gewählten Punkte in der Zeichnung und die grünen die gewählten Punkte auf den Orthofotos dar. Eine leichte Abweichung ist gegeben, weil das Bild nicht zu hundert Prozent maßstabsgetreu gezeichnet wurde. Für Darstellungs- und Informationszwecke reicht die Genauigkeit allerdings aus. Die Georeferenzierung ermöglicht es Daten zusammen mit anderen geographischen Daten anzuzeigen, abzufragen und zu analysieren. (vgl. ESRI-ArcGIS Pro, 2021)



Abbildung 44: Georeferenzierung einer Bilddatei; Ruster Bucht Datenquelle: Hafenhandbuch Neusiedler See Hintergrund: Orthofoto (Quelle: Geodaten Burgenland); Visualisierung durch den Autor

5.6 Web-GIS Veröffentlichung

Es gibt zwei Möglichkeiten die Karte auf einer Web-GIS-Plattform (ArcGIS Online) zu veröffentlichen. Entweder kann jeder Layer einzeln freigegeben werden, oder es wird das gesamte ArcGIS Pro-Projekt hochgeladen. Die erste Methode hat den Vorteil, dass die Darstellung und der Inhalt der Karte individuell veränderbar sind. Negativ zu betrachten ist der Umstand, dass die Anwender ein gewisses Maß an Vorwissen mitbringen müssen, um die Karte korrekt aufzubauen. Die zweite Methode bietet die Möglichkeit das gesamte Projekt

herunterzuladen und offline zu bearbeiten oder im Web-Browser zu betrachten. Allerdings braucht der Nutzer im Falle des Downloads eine aktuelle GIS-Software.

5.6.1 ArcGIS Online

Die cloudbasierte Software ArcGIS Online kann überall und zu jeder Zeit verwendet werden. Über diese Software können interaktive Karten, welche die Daten erläutern, erstellt und anschließend freigegeben werden. Außerdem ist die Untersuchung und Analyse von Daten durch intuitive Analysewerkzeuge integriert. (vgl. ESRI-ArcGIS Online, 2021)

Folgende Funktionen sind mittels dieser Software verfügbar:

- interaktive Karten anhand eigener Daten erstellen
- Karten für bestimmte Gruppen oder für alle Benutzer freigeben
- effektiv in der gesamten Organisation zusammenarbeiten, um Karten zu erstellen und zu verwenden
- intuitive Analysewerkzeuge im ortsbezogenen Zusammenhang anwenden
- Daten in ein leistungsstarkes System einbinden, das Geofunktionen aktiviert, hostet und skaliert

Mit ArcGIS Online als Teil der Esri Geospatial Cloud können Menschen, Orte und Daten über interaktive Karten verbunden werden. Arbeiten mit intelligenten, datenabhängigen Styles und intuitiven Analysewerkzeugen, die Location Intelligence bieten. Erkenntnisse werden für alle Benutzer oder nur für bestimmte Gruppen freigegeben. (vgl. ESRI-ArcGIS Online, 2021)

Das Modell des Neusiedler Sees wird über die Plattform ArcGIS Online veröffentlicht. Die Universität für Bodenkultur Wien verwaltet dort eine eigene Seite (Organisation), welche unter <u>https://boku.maps.arcgis.com</u> erreichbar ist. Ein weiterer Zugang wird über die Hydrographie-Website (<u>https://hydrography.boku.ac.at</u>) vorhanden sein.

5.6.2 Layer der Web-Map

Feature-Layer, also Punkte, Linien und Polygone, lassen sich direkt aus dem Desktop-GIS als Web-Layer hochladen und ohne Probleme anzeigen. Raster-Datensätze können auf dem gleichen Weg zur Web-Map hinzugefügt werden, allerdings werden diese als von ArcGIS Online gehostete "Kachel-Layer" veröffentlicht. Sie sind sehr nützlich, wenn kein eigener ArcGIS Server vorhanden ist, aber eine Karte oder Daten im Web zur Visualisierung bereitgestellt werden. (vgl. ESRI-ArcGIS Online, 2021)

Die Höhenschichtlinien stellen einen besonderen Fall dar. Auf der einen Seite gibt es extra Linien für das Umland, für den festen Seeboden und für die Schlammoberfläche. Auf der anderen Seite werden je nach Zoomfaktor bzw. Maßstab unterschiedliche Layer angezeigt. Dieser Umstand ist vor allem für die Höhenschichtlinien von Vorteil, da es mehrere Stufen (10; 5; 2,5 und 1,25 Meter) gibt. Die Linien mit zehn Meter Abstand lassen sich bis zu einem Maßstab von 1:75000 sehr gut darstellen. Bis zu einem Maßstab von 1:25000 sind die Schichten mit fünf Meter Intervall am besten. Ab 1:25000 sind die Linien mit dem Abstand von 2,5 Meter zu sehen und ab 1:5000 jene mit 1,25 Meter Abstand. Außerdem erfolgt eine Bereinigung und Glättung der Schichtlinien vor dem Veröffentlichen. Alle Elemente, welche keine korrekte Abgrenzung einer Höhenschicht darstellen, werden entfernt. Das gilt auch für sehr kurze Stücke ohne Zusammenhang zum Rest, zum Beispiel Linien, mit einer Länge unter fünf Meter. Die Glättung wird mit dem Tool "Smooth Line" durchgeführt.

Die restlichen Layer haben keine besonderen Anzeigeeinstellungen und können bei jedem Maßstab eingeblendet werden. Das Hafenhandbuch aktualisiert sich nicht mit dem Zoomfaktor. Es hat eine bestimmte Größe und Qualität und lässt sich deshalb nicht an den Maßstab anpassen.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Layer, welche in der Karte integriert sind. Alle sind einzeln ein- und ausschaltbar und können nach Bedarf unterschiedlich kombiniert werden. Das Wasserflächen-Polygon ist notwendig, um Analysen durchzuführen. Mit Hilfe des Feature-Layers werden die Modelle des Seebodens und der Schlammoberfläche extrahiert und getrennt betrachtet.

| Layername | Koordinatensystem | Auflösung | Inhalt |
|---|---------------------|-----------|--|
| DGM_Schlamm- oberfläche_ALS_gesamt | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | Verbundenes DGM Schlammoberfläche und ALS-DGM Landflächen |
| DGM_Seeboden_ALS_gesamt | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | Verbundenes DGM fester Seeboden und ALS-DGM Landflächen |
| Querprofile der Echolotmessungen | MGI_Austria_GK_East | / | Ursprüngliche Echolotmessdaten Querprofile |
| Ufernahe Echolotmessungen | MGI_Austria_GK_East | / | Ursprüngliche Echolotmessdaten Uferfahrten |
| Wasserflächenpolygon | MGI_Austria_GK_East | / | Freie Wasseroberfläche; erzeugt aus der Wasseranschlagslinie |
| Tiefenlinien_ Schlammoberfläche_0010 | MGI_Austria_GK_East | 12,5 cm | Höhenschichtlinien der Schlammoberfläche, Intervall: 0,125 Meter |
| Gebäude_Polygon | MGI_Austria_GK_East | / | alle Gebäude über der freien Wasserfläche |
| Stege_Polygon | MGI_Austria_GK_East | / | alle Stege über der freien Wasserfläche |

Tabelle 7: Enthaltene Layer im fertigen Modell Quelle: eigene Darstellung

| Höhenschichtlinien_ ALS_DGM_15 | MGI_Austria_GK_East | 15 m | Höhenschichtlinien des Umlandes, Intervall: 15 Meter |
|--|---------------------|-----------|--|
| Höhenschichtlinien_ ALS_DGM_10 | MGI_Austria_GK_East | 10 m | Höhenschichtlinien des Umlandes, Intervall: 10 Meter |
| Höhenschichtlinien_ ALS_DGM_05 | MGI_Austria_GK_East | 5 m | Höhenschichtlinien des Umlandes, Intervall: 5 Meter |
| Höhenschichtlinien_ ALS_DGM_025 | MGI_Austria_GK_East | 2,5 m | Höhenschichtlinien des Umlandes, Intervall: 2,5 Meter |
| Höhenschichtlinien_ ALS_DGM_0125 | MGI_Austria_GK_East | 1,25 m | Höhenschichtlinien des Umlandes, Intervall: 1,25 Meter |
| Wasserspiegel_1x1 | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | Wasserspiegel, Höhe: 115,50 m.ü.A. |
| Wasserspiegel_Polygon | MGI_Austria_GK_East | / | Entspricht genau der Fläche des DGM_Schlammoberfläche |
| Hafenhandbuch | MGI_Austria_GK_East | / | Bilder des Hafenhandbuch Neusiedler See 2019 |
| DGM_TIN_ Schlammoberfläche_1x1 | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | DGM Schlammoberfläche; erzeugt durch TIN- INterpolation |
| DGM_TIN_Seeboden_1x1 | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | DGM fester Seeboden; erzeugt durch TIN- Interpolation |
| DGM_Polynome_ Schlammoberfläche_1x1 | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | DGM Schlammoberfläche; erzeugt durch Polynome- Interpolation |
| DGM_Polynome_ Seeboden_1x1 | MGI_Austria_GK_East | 1x1 Meter | DGM fester Seeboden; erzeugt durch Polynome- Interpolation |

6 Bathymetrie des Neusiedler Sees

Die folgenden Berechnungen beziehen sich auf den bei der Erstellung des 3D-Modells verwendeten Wasserspiegel von 115,50 m.ü.A. (siehe Kapitel 5.3.1). Der durchschnittliche Pegelstand betrug im Jahr 2014 1,72 Meter. In Abbildung 45 ist der langjährige Durchschnitt zwischen 1976 und 2021 ersichtlich.



Abbildung 45: Mittlerer Wasserstand Neusiedler See (1976-2021); Datenquelle: Wasserportal Burgenland Visualisierung durch den Autor

6.1 Datenerhebung Wasser- und Schlammvolumina

Die absoluten Höhen des festen Seebodens sind in Abbildung 46 mit Hilfe von Rasterdaten dargestellt. Der Raster hat eine Auflösung von 1x1 Meter. Die durchschnittliche Höhe liegt bei 113,70 m.ü.A., das bedeutet, dass der Abstand zwischen dem Referenzwasserspiegel und dem festen Seeboden im Mittel 1,80 Meter ist. Auffällig ist, dass die Tiefe in Richtung Süden zuerst zunimmt und anschließend sehr schnell abnimmt.



Abbildung 46: DGM Fester Seeboden; DGM-Raster: 1x1 Meter Hintergrund: Orthofoto (Quelle: ArcGIS Map Service) Quelle: eigene Darrstellung

Die durchschnittliche Höhe der Schlammoberfläche liegt bei 114,10 m. ü. A.. Die Schlammverteilung kann nur bis einige Zehner-Meter vor der Wasseranschlagslinie als korrekt modelliert betrachtet werden, da die Messungen des festen Seebodens mit dem Sedimentecholot eine Mindestwassertiefe von einem Meter erfordern, und diese bei den Flachuferbereichen oft sehr weit von der WAL entfernt lag. Die absoluten Höhen der Schlammoberfläche sind in Abbildung 47 ersichtlich.



Abbildung 47: DGM Schlammoberfläche; DGM Raster: 1x1 Meter Hintergrund: Orthofoto (Quelle: ArcGIS Map Service) Quelle: eigene Darrstellung

ArcGIS Pro ermöglicht die Berechnung von Flächen und Volumina durch Verschneidung. Mit dem Tool "Polygone Volume" lassen sich Rasterdaten mit Vektordaten verschneiden. Alle Ergebnisse beziehen sich nur auf die freie Wasserfläche des Sees. Der Schilfbereich wird in diesem Modell gänzlich weggelassen, da im Zuge des Projektes GeNeSee nur wenige Daten im Schilfgürtel erhoben wurden.

Um verlässliche Aussagen über die Sedimentverteilung treffen zu können, müssen Echolotmessdaten sowohl vom festen Seeboden als auch von der Schlammoberfläche vorhanden sein. Da dies nicht überall der Fall ist, wird das zu untersuchende Gebiet verkleinert. Die Echolotmessdaten des festen Seebodens sind weniger dicht und an einigen Stellen weiter von der Wasseranschlagslinie entfernt. Der neue Untersuchungsbereich entsteht durch ein Polygon, welches durch Verbinden der Messpunkte der Querprofilenden bzw. ufernahen Fahrten der festen Seebodenpunkte entsteht. Das Polygon ist in Abbildung 48 dargestellt.



Abbildung 48: Polygon zur Analyse der Schlammmächtigkeiten Hintergrund: Orthofoto (Quelle: ArcGIS Map Service) Quelle: eigene Darstellung

Aus dem DGM des festen Seebodens und dem DGM der Schlammoberfläche wird mittels "Surface Difference" ein neuer Raster-Datensatz erzeugt, welcher die Schlammmächtigkeiten abbildet. Das Geländemodell des festen Seebodens dient als Referenz-Oberfläche, auf welche das DGM der Schlammoberfläche bezogen wird. Der erzeugte Raster ist in Abbildung 49 ersichtlich.



Abbildung 49: Übersicht über die Schlammmächtigkeiten; DGM Raster: 1x1 Meter Hintergrund: Orthofoto (Quelle: ArcGIS Map Service) Quelle: eigene Darstellung

Mit dem Tool "Polygon Volume" kann das Volumen zwischen einem Polygon mit fester Höhe und einer Oberfläche, zum Beispiel ein TIN-Datensatz, berechnet werden. Das Werkzeug "Surface Volume" berechnet das Volumen zwischen einer Oberfläche (Raster-Datensatz, TIN) und einer festgelegten Höhe (115,50 m. ü. A.). Es ist somit nicht möglich das Schlammvolumen direkt zu kalkulieren. Dieses muss aus der Differenz zwischen dem Seewasservolumen und dem Volumen zwischen dem festen Seeboden und dem Wasserflächenpolygon gebildet werden. Die Berechnungen beziehen sich auf die Wasserspiegelhöhe 115,50 m.ü.A.. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse ersichtlich.

| Ū | 0 |
|-------------------------|-------------------------|
| Ø Wassertiefe | 1,42 m |
| max. Wassertiefe | 1,95 m |
| Ø Schlammmächtigkeit | 0,39 m |
| max. Schlammmächtigkeit | 1,56 m |
| Freie Wasserfläche | 140 Mio. m ² |
| Bezugs-Polygon | 132 Mio. m ² |
| Schlammvolumen | 50 Mio. m ³ |
| Wasservolumen | 186 Mio. m ³ |

Tabelle 8: berechnete Parameter des Neusiedler Sees (Pegelstand: 115,50 m.ü.A.) Quelle: eigene Darstellung

Die berechnete Fläche stimmt mit den Angaben von Heine et al., (2016) überein. Da die Wassertiefe mit der Höhe von 115,50 m.ü.A. errechnet wird und der langjährige Durchschnitt des Wasserspiegels bei 115,53 m.ü.A. liegt, kann man davon ausgehen, dass dieser Wert ebenfalls zutrifft. In der Literatur wird der Wert 1,50 Meter als Seetiefe erwähnt. (vgl. BMWF,1987, S.13)

6.2 Vergleich zu früheren Modellen

Eine vergleichbare Modellierung ist nur von Csaplovics aus dem Jahr 1997 vorhanden. Der große Unterschied ist, dass in diesem Modell der gesamte Schilfbereich ebenfalls modelliert wurde. Aufgrund dieser Tatsache ist ein Vergleich nur bedingt möglich. In Tabelle 9 sind einige Ergebnisse des Modells von 1997 ersichtlich.

| Ø Schlammmächtigkeit | 0,64 m |
|-----------------------------|------------------------|
| Schlammvolumen | 207 Mio m ³ |
| Wasservolumen | 214 Mio m ³ |
| Freie Wasserfläche | 143 Mio m ² |
| Fläche des Schilfgürtels | 178 Mio m ² |
| von Schlamm bedeckte Fläche | 317 Mio m ² |

 Tabelle 9: berechnete Parameter des Neusiedler Sees (1997) (Pegelstand: 115,50 m.ü.A.)

 Quelle: Csaplovics, E., 1997

Im neuen Modell ergibt sich ein Verhältnis von Schlammvolumen zu Wasservolumen im Bereich der freien Wasserfläche von 1:3,7. Bei Csaplovics ergibt sich das Verhältnis 1:1,03. Ein Vergleich der beiden lässt darauf schließen, dass der meiste Schlamm im Schilfgürtel vorhanden ist. Dadurch kann die große Differenz der Schlammvolumina erklärt werden. Wenn die durchschnittliche Schlammmächtigkeit mit der freien Wasserfläche multipliziert wird, ergibt sich ein Schlammvolumen von 90 Mio. m³. In Bezug auf das Wasservolumen ist nur eine geringe Differenz der beiden Modelle vorhanden. Das liegt daran, dass sich im Schilfgürtel nur ein sehr geringer Teil des Wassers befindet.

7 Zusammenfassung & Ausblick

Anlass der vorliegenden Arbeit war die Fortentwicklung der topografischen Darstellung und Veranschaulichung des 3D-Modells vom Neusiedler See aus dem Jahr 2015 mit dem Ziel des Zugänglichmachens der Visualisierung im Web-GIS für die Öffentlichkeit. Das verbesserte Modell, wurde mit den Orthofotos und dem DGM-Modell aus den Laserscan Daten des Landes Burgenland, verbunden. Anschließend wird das fertige 3D-Modell über ArcGIS Online der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Ausgegangen wird von den grenzüberschreitenden Messdaten aus dem Projekt GeNeSee von 2014. Die Erfassung der Daten erfolgte mittels hydrografischer Vermessung des Multifrequenten Echolot-Verfahrens, Airborne Laser scanning (ALS) und der Messmethode des geodätisch-bodenmechanischen Punktmessverfahren (D-GPS und Bodensonden).

Der Neusiedler See liegt in der Übergangszone zwischen Ostalpen und Pannonischem Becken. Im See befindet sich sowohl weicher Schlamm (Wassergehalt mehr als 60 Gewichtsprozent) als auch Schlamm (Wassergehalt 30-60 Prozent).

Zur Erstellung eines 3D-Modells werden die beiden Programme ArcGIS Pro und QGIS verwendet. Die Interpolation und Erzeugung der Modelle erfolgten in diesem Programm. QGIS ist ein lizensiertes Open-Source Programm und kostenfrei. Es ist vor allem für die Bearbeitung von einzelnen Feature-Daten gut anwendbar. Die ursprünglichen Daten liegen als Querprofile mit einem Profilabstand von 100 Metern und einem Punktabstand im Profil von einem Meter vor. Zusätzlich gibt es noch Ufermessungen, welche rund um Inseln und entlang der Ufer in unterschiedlichen Abständen vorhanden sind. Basierend auf der Literaturrecherche waren Triangulated Irregular Network (Dreiecksvermaschung) und Polynom Interpolation am vielversprechendsten. Da jede Methode ihre Vor- und Nachteile hat, erfolgt für die Modellerstellung für die Web-GIS-Kartendarstellung eine hybride Interpolation aus beiden Methoden. Mittels Polynom Interpolation werden die Ausgangsdaten verdichtet.

Aus den Orthofotos wurde händisch ein Wasserflächenpolygon mit der Höhe von 115,50 m.ü.A. erstellt. Die Höhe ist der Wasserspiegelstand zum Zeitpunkt der Aufnahmen der Fotos und des Laserscans. Die verdichteten Daten wurden mit den ufernahen Echolotmessungen, den Punkten aus der Polynom-Interpolation, den Echolotquerprofilmessungen, der Wasseranschlagslinie zu einem TIN interpoliert.

Sowohl die Schlammschichtdicke als auch das Volumen können direkt aus den Modellen berechnet werden. Die Schlammschicht beträgt durchschnittlich 0,39 m. Der Maximalwert der Schlammdicke beträgt 1,56 m. Die Maximaltiefe beträgt 1,95 m und die durchschnittliche Wassertiefe 1,42 m. Die freie Wasserfläche umfasst 140 Mio m². Der See ist maximal 36 km

lang und zwischen 7 und 15 km breit. Bei einem festgelegten Wasserstand von 115,50 m.ü.A. beträgt das Wasservolumen 186 Mio. m³ und das Schlammvolumen 50 Mio. m³.

Für die Weiterentwicklung wurde folgender Handlungsbedarf identifiziert. Die Speicherung der gesamten Karte erfolgt auf einem BOKU-Server und die Veröffentlichung auf ArcGIS Online. Dort wird sie dann frei zugänglich für die Öffentlichkeit sein. Außerdem wird zurzeit eine Hydrographie-Website von Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Erwin Heine aufgebaut mit einem Verweis zur erstellten Karte. Bezüglich Oberfläche des ArcGIS Online Systems, kann die Karte entweder direkt im Web-Browser geöffnet werden wie bei jedem Landes GIS oder auf dem PC installierten ESRI-GIS System.

Diese Masterarbeit erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr kann diese Arbeit weitere Forschungsarbeiten anregen. Mit der Ermittlung der regelmäßigen Schlammbewegungen könnte eine Forschungslücke geschlossen werden. Ein eigenes Forschungsthema wäre die Schlammmächtigkeit im Schilfbereich.

Die vorliegende Forschungsarbeit zeigt erstmals die topografische Darstellung des 3D-Modells in einer optimalen Qualität. Wenn die Veröffentlichungen im Web GIS zur zusätzlichen Orientierung für die Öffentlichkeit beitragen, haben sie ihren Zweck erfüllt.

8 Verwendete Literatur

Amt der Burgenländischen Landesregierung (2007). Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland, Band 121. Begleitband zur Sonderaustellung im Landesmuseum Burgenland.

Bácsatyai, L., Csaplovics, E., Márkus, I., Sindhuber, A. (1997). Digitale Geländemodelle des Neu-siedler Seebeckens. Burgenländisches Landesmuseum. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland, Band 97. Eisenstadt 1997.

Bartelme, N. (2005). Geoinformatik Modelle, Strukturen, Funktionen, 4. Auflage. Springer Verlag: Berlin.

Bartelme N. (1989) GIS-Technologie. Geoinformationssysteme, Landinformationssysteme und ihre Grundlagen. Springer Verlag: Berlin.

BMWF (1987). Forschungsbericht 1985/86. Arbeitsgemeinschaft Gesamtkonzept Neusiedler See. Sonderband 77 der Wissenschaftlichen Arbeiten aus dem Burgenland.

Boros, E., Ecsedi, Z., Oláh, J. (eds) (2013). Ecology and Management of Soda Pans in the Carpathian Basin Hortobágy Environmental Association, Balmazújváros, p. 551.

Bullinger, A. (2000). Vergleich von Interpolationsverfahren und digitalen Geländemodellen für Wattgebiete–GIS-gestützte Untersuchungen am Beispiel der morphologischen Modellierung von Tidebecken in Schleswig-Holstein. Geographisches Institut, Christian-Albrechts-Universität.

Csaplovics, E., et al. (2014). Hydromorphologie. In: Strategiestudie Neusiedler See.

Csaplovics, J.v., (1821). Topographisch-Statistisches Archiv des Königreiches Ungarn. 2 Bde, Doll, Wien.

Draganits, E., Zámolyi, A., Hodits, B., Gier, S., Grasemann, B., Janda, C., Schiel, B., Rohatsch A., Popp, F. (2006). Neusiedlersee/Fertő Tó area (Austria/Hungary): landscape change through time constrained by geomorphology, lithostratigraphic sections, archaeology and historical maps. Geophysical Research Abstracts, 8–09995.

Draganits, E., Zámolyi, A., Székely, B., Timár, G., Molnár, G. (2008). Reconstruction of the Neusiedlersee (Austria/Hungary) based on historical topographic maps from 1507 to present. European Geosciences Union General Assembly 2008, Vienna, 13-18 April, Geophys Res Abstr 10: A-08644.

Eitzinger, J., et al. (2009). Auswirkungen einer Klimaäderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees. Endbericht im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung.

Fuchs, R. & Schreiber, O.S. (1985). Das Pannonien im östlichen Burgenland (Seewinkel). In:Papp, A. (ed.), M6 Pannonien (Slavonien und Serbien). Chronostratigraphie undNeostratotypen, Miozän der Zentralen Paratethys 7. Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 68-72.

Füchtbauer, H. (1988). Sedimente und Sedimentgesteine Schweizerbart`sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1988.

Hafenhandbuch Neusiedler See (2019). Herausgeber: Atelier Marcus Geiger.

Heine, E. et al. (2016). Hydrographische Vermessung des Neusiedler Sees.

Heitzinger, D., & Kager, H. (1998). High quality DTMs from contourlines by knowledge-based classification of problem regions. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 32, 230-237.

Herzig, A., (2014). Der Neusiedler See – Limnologie eines Steppensees. In: Wöss, E., (ed) Süßwasserwelten. Limnologische Forschung in Österreich, Denisia 33, Kataloge des Oberösterreichischen Landesmuseums - Neue Serie, 163:101–114.

Knie, K., (1959). Über den Chemismus der Wässer im Seewinkel und des Neusiedler Sees. Wiss. Arb. Bgld. 23: 65-68.

Kogelbauer, I., (2015). Combination of Soil Physical Sensors in a Measuring System for the Delineation and Characterization of Mud and Lakebed Sediments in Lake Neusiedler See.

Löffler, H., (1969). Beitrag zur Kenntnis der Neusiedler See-Sedimente. Sitz. Ber. Öst. Akad. Wiss., math.-nat. Kl, 179 (8-10), 313-318.

Loisl, J., Tari, G., Draganits, E., Zámolyi, A., & Gjerazi, I. (2018). High-resolution seismic reflection data acquisition and interpretation, Lake Neusiedl, Austria, northwest Pannonian Basin. Interpretation, 6 (1), SB77-SB97.

Mandlburger, G. (2006). Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie (Doctoral dissertation).

Maresch, W., Schertl, H. P., & Medenbach, O. (2016). Gesteine.

Mauersberger, R., (2006). Klassifikation der Seen für die Naturraumerkundung des nordostdeutschen Tieflandes. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung, 45 (3/4), 51-89.

Meinel, G., Bill, R. (2016): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.

Preisinger, A., (1979). Sediments. In: Löffler, H. Neusiedlersee - The Limnology of a Shallow Lake in Central Europe. Monographae Biologicae, 37, Dr W. Junk Publishers, The Hague, Boston, London 543p.

Riha, A., (2011). Ein Vergleich räumlicher Interpolationsmethoden für Grundstückspreise im Bauland.

Schroll, E. und Krachsberger, H., (1977). Beitrag zur Kenntnis des Chemismus der Porenwässer des Neusiedlerschlammes. In BFB-Bericht 24, Biologisches Forschungsinstitut für Burgenland, Illmitz.

Tucker, M., (2001). Sedimentary Petrology. An introduction to Origin of Sedimentary Rocks, Blackwell Science, Oxford.

Tucker, M., (2011). Sedimentary Rocks in the Field: A Practical Guide, 4th Edition, Wiley-Blackwell.

Vinx, R., (2014). Gesteinsbestimmung im Gelände. Springer-Verlag.

Wolfram, G., Déri, L. & Zech, S., (2014). Strategiestudie Neusiedler See – Phase 1. Studie im Auftrag der Österreichisch-Ungarischen Gewässerkommission. Wien – Szombathely, 246 pp.

Zámolyi, A., Salcher, B., Draganits, E., Exner, U., Wagreich, M., Harzhauser, M., Gier, S., Fiebig, M., Lomax, J., Surányi, G., Diehl, M., Zámolyi, F. (2017). Latest Pannonian and Quaternary evolution at the transition between Eastern Alps and Pannonian Basin: new insights from geophysical, sedimentological and geochronological da-ta. International Journal of Earth Sciences, 106, 1695-1721.

Internetquellen:

AWI:<u>https://www.awi.de/forschung/geowissenschaften/geophysik/methoden-und-</u> werkzeuge/bathymetrie.html (abgerufen am 12.01.2021)

ESRI-ArcGIS Enterprise: <u>https://enterprise.arcgis.com/de/server/latest/create-web-apps/</u> windows/about-web-gis.htm (abgerufen am 11.02.2021)

ESRI-ArcGIS Online: <u>https://www.esri.com/de-de/arcgis/products/arcgis-online/overview</u> (abgerufen am 27.03.2021)

ESRI-ArcGIS Pro: <u>https://pro.arcgis.com/de/pro-app/help/main/welcome-to-the-arcgis-pro-app-help.htm</u> (abgerufen am 11.01.2021)

Land Burgenland: <u>https://geodaten.bgld.gv.at/de/downloads.html</u> (abgerufen am 21.02.2021)

Nationalpark Neusiedler See: <u>http://www.nationalpark-neusiedlersee-seewinkel.at/</u> <u>Schilfgürtel.html</u> (abgerufen am 21.09.2020)

QGIS: <u>https://www.qgis.org/de/site/about/index.html</u> (abgerufen am 11.01.2021)

Stadt Wien: <u>https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten</u> (abgerufen am 12.01.2021)

9 Abkürzungsverzeichnis

- ALS Airborne Laser scanning
- CDT Constrained Delaunay Triangulation
- DGM digitales Geländemodell
- DHM digitales Höhenmodell
- DOM digitales Oberflächenmodell
- GeNeSee geodätische Neuerfassung des Seebodens Neusiedler Sees
- GI Geoinformation
- GIS Geoinformationssystem
- GNSS Global Navigation Satellite System
- GPS Global Positioning System
- IDW Inverse Distance Weighted
- m. ü. A. Meter über Adria
- TIN Triangulated Irregular Network
- WAL Wasseranschlagslinie

10 Anhänge

10.1 Seemodell



Abbildung 50: DGM der Schlammoberfläche verbunden mit dem Geländemodell des Umlandes DGM-Raster: 1x1 Meter; Hintergrund: Orthofoto (Quelle: ArcGIS Map Service) Quelle: eigene Darstellung

10.2 Szenen Ansichten



Abbildung 51: 3D-Szenenansicht der Joiser Bucht Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 52: 3D-Szenenansicht von einem Bootshaus in der Nähe von Breitenbrunn Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 53: 3D-Szenenansicht der Ruster Bucht Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 54: 3D-Szenenansicht der Ruster Bucht Quelle: eigene Darstellung

10.3 Web-GIS

| Startseite Galerie Karte Sze | ene Gruppen Inhalt | Organisation | Q <u>Å</u> :: | Thomas Reiter b5e498456d363eedabf | |
|--|---|---|---|---|--|
| Inhalt | | Eigene Inhalte Eigene Favoriter | n Eigene Gruppen Eigen | e Organisation Living Atlas | |
| ₹ Element hinzufügen € Erstellen | Q b5e498456d363eedabf4917 | 7ca988aaa2_BOKU durchsuchen | E Ra | ster 🗏 Änderungsdatum 🚻 Filter | |
| Ordner 🖆 | 1-4, gesamt: 4 in b5e498456d363eedab | f4917ca988aaa2_BOKU Filter Typ: Ka | achel-Layer $	imes$ Filter löschen | | |
| Q. Ordner filtern | | | | - All | |
| b5e498456d363eedabf4917 ca988aaa2_BOKU | Le mile and | 20 sile and | Le sile and | 100 | |
| 🛱 Raster_Layer | C. Martine (| | | | |
| Filter | Neusiedler_See_GeNeSee_WTL3 von b5e498456d363eedabf49 Erstellt: 05.04.2021 | Neusiedler_See_GeNeSee_WTL2 Bu von b5e498456d363eedabf49 Erstellt: 05.04.2021 | Neusiedler_See_GeNeSee_WTL1 | Orthofoto Image: Control of the second | |
| V Elementtyp Löschen | Aktualisiert: 05.04.2021 Anzahl der Aufrufe: 0 | Aktualisiert: 05.04.2021 Anzahl der Aufrufe: 0 | Aktualisiert: 05.04.2021 Anzahl der Aufrufe: 0 | Aktualisiert: 05.04.2021 Anzahl der Aufrufe: 0 | |
| Karten • Layer | ů ☆ … | ů ☆ ··· | ů ☆ … | ê ☆ … | |
| Feature-Layer Kachel-Layer Kartenbild-Layer Bilddaten-Layer Szenen-Layer Tabellen Layer-Dateien Szenen Apps Werkzeuge Dateien Notebooks | | | | | |

Abbildung 55: ArcGIS Online, verfügbare Raster-Layer Quelle: eigene Darstellung

| Startseite | Galerie | Karte | Szene | Gruppen | Inhalt | Organisation | | Q | ф III | Thomas Reb b5e4984566 | iter d363eedabf |
|---|---|-------------|--------------|--|--------------|---------------------|-------------------------|------------------|----------|--------------------------|---------------------------|
| Inhalt | | | | | | Eigene Inhalte | Eigene Favoriten | Eigene Gruppen | Eigene O | rganisation | Living Atlas |
| T Element hi | nzufügen | 🕂 Ersteller | n Q | , b5e498456d3 | 863eedabf491 | 7ca988aaa2_BOKU | durchsuchen | | 🔡 Raster | 🗏 Änderungsda | itum Filter |
| Ordner Cordner filte Alle meine I b5e498456 ca988aa2_ Raster_Laye Filter | rn nhalte d363eedabf49 BOKU r | 란 17 | 1-1, c | esamt: 1 in b5e49 | 8456d363eeda | bf4917ca988aaa2_BOI | KU Filter Typ: Karten) | X Filter löschen | | | |
| ElementtypKarten | | Löschen | Aktu Anza | alisiert: 05.04.2021 ahl der Aufrufe: 0 | 8 | | | | | | |
| Webkarte Kartendat Layer Szenen Apps Werkzeuge Dateien Notebooks > Position > Änderungs > Erstellungse > Tags | n eien datum datum | | | | 0 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |





Abbildung 57: ArcGIS Online, Map-Viewer Quelle: eigene Darstellung



10.4 Profilschnitte durch den Neusiedler See

Abbildung 58: Profilschnitte durch den Neusiedler See Quelle: eigene Darstellung

Diese Elemente sind in den folgenden Profilen enthalten:

- Horizontale Achse: Länge des Profils in Meter
- Vertikale Achse: Höhe des Profils in Meter über Adria
- Blau: Wasserspiegel (Pegel: 115,50 m.ü.A.)
- Braun: Schlammoberfläche
- Schwarz: fester Seeboden + DGM Umland



Abbildung 59: Querprofil 1 Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 60: Querprofil 2 Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 61: Querprofil 3 Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 62: Querprofil 4 Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 65: Querprofil 7 Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung


Abbildung 72: Querprofil 14 Quelle: eigene Darstellung



Quelle: eigene Darstellung



Abbildung 75: Querprofil 17 Quelle: eigene Darstellung

86



Quelle: eigene Darstellung

