

Bachelor-Thesis

Im Studiengang Geomatik

an der HafenCity Universität Hamburg

Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe bei Lüneburg

- Vergleich historischer Elbprofile mit aktuellen Elbprofilen -

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Clemens Kiepke

vorgelegt von:

Henning Reinstorf

Im Sande 5

21394 Kirchzellensen

Matrikelnummer: 6029381

Abgabedatum: 19.01.2018

Kirchzellensen, 14. Januar 2018

Kurzfassung

Die Zielsetzung der vorliegenden Ausarbeitung ist die Aufdeckung von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe bei Lüneburg in den letzten 100 Jahren. Hierfür wird ein Verfahren entworfen, das den Vergleich historischer Elbquerprofile mit aktuellen Elbquerprofilmessungen ermöglicht. Die Grundlage des Verfahrens bildet die Transformation der historischen Elbquerprofildaten in das aktuelle Koordinatensystem ETRS89/UTM, indem die vorliegenden alten Lagepläne über geeignete Passpunkte georeferenziert werden. Im Anschluss an die Georeferenzierung werden die Elbquerprofile inklusive der Höhen- und Stationsinformationen digitalisiert. Ausgehend von der bekannten Lage der Querprofilachsen kann mit der Erfassung bzw. Auswertung der aktuellen Elbquerprofilmessungen zur Erstellung aktueller Elbquerprofile begonnen werden. Während die für die Landbereiche angewandte GNSS-Vermessung erst nach Bestimmung der Lage der Querprofilachsen durchgeführt wird, liegt das Ergebnis der für das Gewässerbett verwendeten Peilungsvermessung bereits als Punktwolke für den analysierten Elbbereich vor. Das Ergebnis des Epochenvergleichs zeigt, dass die Summe der Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe bei Lüneburg insgesamt nur gering ausfällt. Aufgrund der gegenseitigen Aufhebung von Auf- und Abtragsflächen können einige Profile dennoch erhebliche Veränderungen aufweisen, die sich jedoch in der berechneten Querschnittsflächendifferenz nicht widerspiegeln. Zudem ist die Nachweisbarkeit der festgestellten Veränderungen infolge beträchtlicher Unsicherheiten der digitalisierten historischen Elbquerprofile eingeschränkt. Auch die nach dem Vergleich vorgenommene Optimierung des Verfahrens kann die begrenzte Genauigkeit des Ergebnisses nur bestätigen und empfiehlt zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit die Verwendung von Airborne-Laserscanningdaten für die Erstellung der aktuellen Elbquerprofile anstelle der aufwendig zu erfassenden GNSS-Daten.

Abstract

The aim of the present thesis is the detection of changes in the flow cross section of the Elbe near Lüneburg in the last 100 years. For this purpose, a method is designed that enables the comparison of historical transverse profiles with current transverse profile measurements. The basis of the method is the transformation of the historical data into the current coordinate system ETRS89/UTM by georeferencing the old site maps via suitable control points. Subsequent to the georeferencing, the transverse profiles including the height and station information are digitized. Based on the known position of the transverse profile axes, the acquisition or rather evaluation of the current transverse profile measurements can be started to produce current transverse profiles. While the GNSS survey applied to the land areas is only able to execute after determining the position of the transverse profile axes, the result of the bearing survey used for the river bed is already available as a point cloud for the analyzed area. The result of the epoch comparison shows that the amount of changes in the flow cross section of the Elbe near Lüneburg is on the whole insignificant. Due to the mutual cancellation of increased and decreased surfaces, some profiles may still undergo significant changes, which are not reflected in the computed cross-sectional calculation. In addition, the detectability of the identified changes is also limited because of considerable uncertainties of the digitized historical transverse profiles. The subsequent process optimization confirms the limited accuracy of the result and recommends to increase the economic efficiency by using airborne-laserscanning data for the creation of current transverse profiles instead of GNSS data.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
2 Historische Elbquerprofilmessungen	3
2.1 Beschreibung der Lagepläne und Elbquerprofile	3
2.1.1 Lagepläne	3
2.1.2 Elbquerprofile	5
2.2 Georeferenzierung der Lagepläne.....	6
2.2.1 Datenformatierung und Kacheln der Lagepläne	7
2.2.2 Passpunktauswahl	8
2.2.3 Durchführung der Transformation.....	10
2.2.4 Ergebnis der Transformation	11
2.3 Digitalisierung der Elbquerprofile.....	14
2.3.1 Grundlegende Methoden der Digitalisierung.....	14
2.3.2 Methodik zur Digitalisierung der Elbquerprofile	15
3 Aktuelle Elbquerprofilmessungen.....	17
3.1 GNSS-Messung	18
3.1.1 Grundlagen der GNSS-Vermessung	18
3.1.2 GNSS-Messungen mittels Real-Time-Kinematic.....	20
3.1.3 Satellitenpositionierungsdienst SAPOS.....	21
3.1.4 Durchführung der GNSS-Messung.....	22
3.1.5 Auswertung der GNSS-Messung.....	26
3.2 Gewässerpeilung.....	30

3.2.1 Grundprinzip der Gewässerpeilung	30
3.2.2 Beschreibung der verwendeten Peildaten	31
3.3 Erstellung der aktuellen Elbquerprofile.....	33
4 Vergleich zwischen historischen und aktuellen Elbquerprofilmessungen	34
4.1 Auswirkung unterschiedlicher Höhenbezugssysteme	34
4.2 Gegenüberstellung der beiden Querprofilepochen.....	36
4.3 Veränderungen im Strömungsquerschnitt	39
5 Verfahrensoptimierung.....	41
5.1 Digitalisierung historischer Elbquerprofile	42
5.2 Verwendung von Airborne-Laserscanningdaten	43
5.3 Kombination von Airborne-Laserscanningdaten und Peildaten.....	46
5.4 Genauigkeitsbetrachtung	47
5.5 Wirtschaftlichkeit	48
6 Fazit und Ausblick	49
Literaturverzeichnis.....	VIII
Anhang I: Lagepläne des Regulierungsprojektes (Daten-CD).....	XI
Anhang II: Querprofile des Regulierungsprojektes (Daten-CD)	XII
Anhang III: Passpunkte der Georeferenzierung	XIII
Anhang IV: Geograf-Protokoll der Georeferenzierung.....	XVII
Anhang V: Feldbücher der GNSS-Messung	XXXII
Anhang VI: GNSS-Messprotokoll (Daten-CD)	XLI
Anhang VII: Metadaten der Peildaten (Daten-CD).....	XLII
Anhang VIII: Profilpläne des Epochenvergleichs.....	XLIII
Anhang IX: Höhenfestpunktinformationen.....	LIII
Anhang X: aktuelle Querprofilpläne unterschiedlicher Messverfahren.....	LV
Anhang XI: Metadaten der Laserscandaten (Daten-CD)	LIX
Eidesstattliche Erklärung.....	LX

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
CAD	Computer-Aided Design
DGM	digitales Geländemodell
DHHN92	Deutsches Haupthöhennetz 1992
DHHN2016	Deutsches Haupthöhennetz 2016
DOP	Dilution of Precision
dpi	dots per inch
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
FKP	Flächenkorrekturparameter
GCG	German Combined QuasiGeoid
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (russisches Satellitennavigationssystem)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Satellitennavigationssysteme im Allgemeinen)
GPS	Global Positioning System (amerikanisches Satellitennavigationssystem)
GRS80	Geodätisches Referenzsystem 1980
HEPS	Hochpräziser Echtzeit-Positionierungsservice von SAPOS
INS	Inertial Navigation System
MAC	Master-Auxiliary Concept
NHN	Normalhöhenull
NN	Normalnull
PC	Personal Computer

PDF	Portable Document Format
PDOP	Position Dilution of Precision
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Service
RTK	Real-Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
TIFF	Tag Image File Format
UTM	Universale Transversale Mercatorabbildung
VRS	virtuelle Referenzstation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versatz zwischen Blattschnitten (eigene Abbildung)	7
Abbildung 2: Übereinstimmung der Hauptverkehrsachsen (eigene Abbildung)	9
Abbildung 3: Übereinstimmung der Landesgrenze (eigene Abbildung)	9
Abbildung 4: GNSS-Empfänger auf Deichkilometrierungsmarke (eigene Abbildung)	22
Abbildung 5: amtlicher Höhenfestpunkt (eigene Abbildung)	24
Abbildung 6: Deicherfassungspunkt (eigene Abbildung)	24
Abbildung 7: Bewuchs im Elbvorland (eigene Abbildung)	25
Abbildung 8: Altarm der Elbe im Elbvorland (eigene Abbildung)	25
Abbildung 9: Häuserflucht in der Lauenburger Altstadt (eigene Abbildung)	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Soll- und Istwerte der GNSS-Kontrollpunkte im Vergleich	28
Tabelle 2: Differenzen der Höhenstatus am HFP 2728 00010 in Lüneburg	35
Tabelle 3: Differenzen der Höhenstatus am HFP 2833 00005 in Quickborn	35
Tabelle 4: Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe bei Lüneburg	40

1 Einleitung

Ausgehend von der Schwere der Hochwasserereignisse im August 2002, im April 2006, im Januar 2011 und im Juni 2013 ergibt sich die Notwendigkeit verbesserter Hochwasserschutzmaßnahmen an der Elbe. Um zielführende Schutzmaßnahmen umzusetzen, sind zunächst die Ursachen für die tendenziell steigenden Scheitelwasserstände und Abflüsse zu analysieren. Als eine der Hauptursachen ist das unzureichende Abflussprofil im Verlauf der Unteren Mittelelbe zu nennen. Infolgedessen kann das eintreffende Hochwasser nicht ohne Verzögerung abgeleitet werden. Verantwortlich für die Behinderung des Abflusses sind die Einengung des Abflussprofils infolge von Deichbaumaßnahmen zum Schutz vorhandener Bebauung und der landwirtschaftlichen Nutzflächen, der zunehmende Bewuchs im Überschwemmungsgebiet und die abgelagerten Sedimente im Deichvorland. (vgl. NLWKN, 2017: 5)

Zur Einschätzung der Auswirkungen von Deichbaumaßnahmen und Sedimentation werden im Rahmen dieser Ausarbeitung die Veränderungen im Strömungsquerschnitt des Elbbereichs von Bleckede bis Hohnstorf in den letzten 100 Jahren anhand eines entworfenen Verfahrens untersucht. Das zur Aufdeckung von Veränderungen bereitgestellte Verfahren basiert auf dem Vergleich historischer Elbquerprofile mit aktuellen Elbquerprofilmessungen. Da die Untersuchung aller im Bereich von Bleckede bis Hohnstorf vorliegenden historischen Elbquerprofile über den Umfang dieser Arbeit hinausgehen würde, bezieht sich die Ausarbeitung auf acht beispielhafte Querprofile. Diese verlaufen entweder durch für den Abfluss besonders interessante Engstellen oder enthalten ein ausgedehntes Elbvorland, in dem Veränderungen infolge der Ablagerung von Sedimenten erwartet werden. Die dem Verfahren zugrunde gelegten aktuellen Elbquerprofilmessungen setzen sich zusammen aus selbstständig durchgeführten GNSS-Vermessungen an Land und aus vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Lauenburg erhobener Peilungsdaten im Gewässerbett der Elbe. Zusätzlich zum entworfenen Verfahren zur Aufdeckung von Veränderungen des Strömungsquerschnittes der Elbe wird ausgehend von den Ergebnissen geprüft, ob eine Optimierung des Verfahrens hinsichtlich der Aspekte Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit möglich ist. Insbesondere ist zu untersuchen, inwieweit Airborne-Laserscanningdaten für die Erstellung aktueller Elbquerprofile verwendet werden können.

Als erster Arbeitsschritt zur Aufdeckung von Veränderungen des Strömungsquerschnittes werden die Lagepläne des Regulierungsprojektes von 1902, die die historischen Elbquerprofile enthalten, über geeignete Passpunkte georeferenziert und somit in das Koordinatensystem ETRS89/UTM überführt. Im Anschluss an die Einpassung der alten Karten werden die benötigten Querprofilachsen aus diesen digitalisiert und mit den Höhen- und Stationsinformationen

der gesondert vorliegenden Querprofilpläne ergänzt. Nachdem die Lage der historischen Elbquerprofile infolge der Digitalisierung im Koordinatensystem ETRS89/UTM bekannt ist, können basierend auf den digitalisierten Querprofilachsen die GNSS-Vermessungen in der Örtlichkeit durchgeführt werden. Ebenfalls über die digitalisierten Querprofilachsen können die benötigten Profilmesspunkte der vorliegenden Peilungsdaten abgeleitet werden, sodass beide Datensätze der aktuellen Elbquerprofilmessungen miteinander verknüpft werden können, um aktuelle Elbquerprofile zu erzeugen. Zur Beurteilung der Veränderung des Strömungsquerschnittes in den letzten 100 Jahren hinsichtlich der genannten Einflüsse Deichneubau und Sedimentablagerung werden nun die angefertigten aktuellen Elbquerprofile den digitalisierten historischen Elbquerprofilen gegenübergestellt. Zusätzlich zur Beschreibung der Veränderungen des Strömungsquerschnittes werden die Querschnittsflächendifferenzen zwischen den Elbquerprofilepochen berechnet, damit die Auswirkungen von Deichneubau und Sedimentablagerung zudem anhand konkreter Zahlenwerte analysiert werden können. Neben den Erläuterungen der, bis auf die GNSS-Messung, mit dem CAD-Programm GEOgraf durchgeführten Arbeitsschritte des bereitgestellten Verfahrens werden in der Ausarbeitung auch Genauigkeitsabschätzungen der Teil- und Gesamtergebnisse vorgenommen. Die an das Ergebnis des Profilepochenvergleichs anschließende Diskussion einer Verfahrensoptimierung orientiert sich maßgeblich an den aus den Genauigkeitsabschätzungen getroffenen Schlussfolgerungen.

Entsprechend der geschilderten Vorgehensweise gliedert sich die Ausarbeitung in die Kapitel historische Elbquerprofilmessungen, aktuelle Elbquerprofilmessungen, den Vergleich der beiden Elbquerprofilepochen und die Verfahrensoptimierung. Im Kapitel historische Elbquerprofilmessungen werden zunächst die verwendeten alten Kartengrundlagen beschrieben, bevor näher auf den Georeferenzierungs- und Digitalisierungsvorgang eingegangen wird. Das Kapitel aktuelle Elbquerprofilmessungen wiederum unterteilt sich in die Abschnitte GNSS-Messung, Gewässerpeilung und die Erstellung aktueller Elbquerprofile aus den Datensätzen der genannten Messverfahren. Wie bereits aus dem Kapitelnamen hervorgeht, beinhaltet das Kapitel Vergleich zwischen aktuellen und historischen Elbquerprofilprofilmessungen die Gegenüberstellung der beiden Querprofilepochen und daraus folgernd das Ergebnis für die Veränderungen des Strömungsquerschnittes. Ebenfalls dem Kapitelnamen entspricht der Inhalt des Kapitels Verfahrensoptimierung, das sich mit Verbesserungsmöglichkeiten des angewandten Verfahrens beschäftigt. Außer den bereits erwähnten Erläuterungen der Arbeitsschritte und der Genauigkeitsabschätzung der Teil- und Gesamtergebnisse enthält die Ausarbeitung eine Erörterung der theoretischen Grundlagen gemäß der verfügbaren Fachliteratur.

2 Historische Elbquerprofilmessungen

Die zur Aufdeckung von Veränderungen des Strömungsquerschnittes der Elbe benötigten historischen Querprofildaten entstammen dem generellen Regulierungsprojekt des Hochwasserbettes der Elbe vom 24. November 1902, welches wiederum auf den Planungen der Elbstrombauverwaltung Magdeburg für den Elbbereich von der sächsisch-preußischen Grenze bis zur Seevemündung basiert. Zusätzlich zu den Querprofilen sind auch die Lagepläne des genannten Projektes von Bedeutung, da die Lagepläne die Querprofile im Zusammenhang mit der Örtlichkeit darstellen. Als weitere Bestandteile des Regulierungsprojektes sind ein Erläuterungsbericht, hydrometrische Berechnungen, Massenberechnungen, überschlägige Kostenberechnungen und Längsprofile zu nennen. Für die Beurteilung von Veränderungen des Strömungsquerschnittes sind diese jedoch nicht von Interesse und werden deshalb im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. (vgl. NLWKN, 2017: 9 f.)

2.1 Beschreibung der Lagepläne und Elbquerprofile

2.1.1 Lagepläne

Bei den verwendeten Lageplänen handelt es sich um die Kartenblätter 52 bis 55 des Kartenwerks der Lagepläne des Regulierungsprojektes von 1902. Auf diesen ist der Elbverlauf von Alt Garge bis Hohnstorf auf westlicher bzw. südlicher Seite und von Stiepelse bis Lauenburg (Elbe) auf östlicher bzw. nördlicher Seite dargestellt (s. Anhang I).

Das Kartenfeld der Lagepläne besteht hauptsächlich aus mehreren zugeschnittenen und zusammengefügt Blattschnitten, die die Elbe und große Teile des Elbvorlandes topographisch abbilden. An einigen Stellen sind Elemente wie Straßen, Ortschaften, Deiche und vor den Deichen gelagerte Gewässer auch außerhalb der Blattschnitte fortgeführt bzw. eingetragen. Ergänzend zur Topographie enthalten die Lagepläne die thematischen Darstellungen. (s. Anhang I) Basierend auf der Verknüpfung von topographischem Kartengrund mit eingetragenen thematischen Darstellungen sowie der zugehörigen Beschriftung sind die Lagepläne als thematische Karten einzustufen (vgl. Hake et al., 2002: 146). Zu den thematischen Inhalten gehören die rot eingezeichneten Querprofile, der grün gestrichelt dargestellte Bewuchs im Elbvorland, die rot markierten geplanten Abtragsflächen, die in Rot dargestellten geplanten Deiche sowie eine rot gestrichelte Linie. Einige dieser thematischen Darstellungen sind zudem mit Beschriftungen versehen. (s. Anhang I) Aus dem Rahmenplan des Landes Niedersachsen für abflussverbessernde Maßnahmen an der unteren Mittel-elbe ist zu entnehmen, dass es sich bei der rot gestrichelten

Linie um den Abflusskorridor für ein aus hydrometrischen Berechnungen festgelegtes Sommerhochwasser handelt (vgl. NLWKN, 2017: 10).

Die Verwendung topographischer Karteninhalte in thematischen Karten dient der lagerichtigen Zuordnung und der Interpretation der enthaltenen Thematik. Im Bereich der Situationsdarstellung enthalten topographische Karten daher Siedlungen, Verkehrswege, Gewässer und Vegetation. (vgl. Kohlstock, 2014: 83 u. 128) Auch in den Blattschnitten der Lagepläne sind die soeben angeführten Elemente abgebildet. Da der Maßstab der Blattschnitte für die Situation 1:10.000 beträgt (s. Anhang I), handelt es sich um eine Karte großen Maßstabs, weshalb grundsätzlich von einer grundrisstreuen Darstellung auszugehen ist. Eingeschränkt wird diese lediglich durch die festgelegten graphischen Mindestgrößen. Die Mindestgröße für Linien beträgt 0,05 mm und für Flächen $0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$. (vgl. Hake et al., 2002: 110 u. 174) Folglich können beim Maßstab von 1:10.000 alle Linien bis zu einer Minimalbreite von 0,5 m und alle Flächen mit einer Ausdehnung von $3 \times 3 \text{ m}^2$ geometrisch exakt wiedergegeben werden. Hieraus ergibt sich, dass nahezu alle Verkehrswege unverändert übernommen werden können, während bei den Grundrissen der Gebäude bereits eine Vereinfachung vorzunehmen ist. Eine Vereinfachung oder auch Generalisierung ist immer dann notwendig, wenn Objekte die graphischen Mindestgrößen unterschreiten. Als Möglichkeiten der Generalisierung können die betroffenen Objekte entweder außer Acht gelassen, geometrisch verändert oder aber als Signaturen in die Karte übertragen werden. Eine Auslassung eignet sich i.d.R. nur bei unwesentlichen Inhalten. (vgl. Kohlstock, 2014: 80–86) Bei der Betrachtung der auf den Blattschnitten vorhandenen Gebäude ist offensichtlich, dass zumeist nur eine Auswahl der Gebäude der jeweiligen Ortschaft dargestellt ist. Das restliche Gebiet der Ortschaft ist mit einer gestrichelten Signatur angedeutet oder wird über eine entsprechende Beschriftung ausgewiesen. Eine generelle Aussage zur prozentualen Anzahl der Gebäude und die Art der Andeutung weiterer Gebäude ist allerdings nicht möglich, da sich die Blattschnitte diesbezüglich teilweise stark voneinander unterscheiden. Wie die Ortschaften wird auch die Vegetation über verschiedene Signaturen auf der Karte veranschaulicht. Grundsätzlich kann von einer detaillierten topographischen Darstellung sowie umfangreicher Beschriftung bzw. Benennung der einzelnen topographischen Elemente innerhalb des von den Deichen beidseitig der Elbe eingeschlossenen Bereiches gesprochen werden. Besonders auffällig ist die ausführliche Beschriftung der Buhnen, weshalb davon auszugehen ist, dass die Blattschnitte aus einer topographischen Aufnahme der Buhnen stammen. Zusätzlich zu den Buhnen sind auch die Elbkilometrierung sowie die Fließrichtung der Elbe angezeigt. (s. Anhang I)

Durch das Zuschneiden der einzelnen Blattschnitte sind neben einigen Beschriftungen auch wichtige Kartenelemente wie Maßstabszahl und Maßstabsleiste nicht immer vollständig abgebildet. Aufgrund der fortlaufenden Nummerierung der Blattschnitte ist jedoch davon auszugehen (s. Anhang I), dass sie einem Kartenwerk entstammen und somit auch über einen einheitlichen Maßstab verfügen (vgl. Hake et al., 2002: 29). Als weiteres klassisches Kartenelement enthalten die nicht nach Norden ausgerichteten Blattschnitte einen Nordpfeil (s. Anhang I). Obwohl es sich bei einer Legende zur Zeichenerklärung der Karte ebenfalls um ein grundlegendes Kartenelement handelt, fehlt die Legende den Blattschnitten gänzlich. Weiterhin sind auch die üblichen Angaben über Koordinatensystem und Kartennetzentwurf nicht auf den Blattschnitten zu finden. (vgl. Bill, 2016: 606)

Die Unvollständigkeit der ansonst gängigen Karteninformationen und das Zuschneiden der Blattschnitte spricht dafür, dass es bei der Erstellung der Kartenblätter ausschließlich um die Darstellung des thematischen Sachverhaltes ging und weiterführende Angaben, die nicht der groben Orientierung innerhalb des Elbbereiches dienen, unerwünscht waren. Hierzu passt auch, dass keine Angaben bezüglich der Datenerfassung bekannt sind. Aufgrund der Entstehungszeit der Lagepläne ist davon auszugehen, dass die topographischen Inhalte über die sogenannte Messtischtachymetrie aufgenommen wurden. Charakteristisch für die Messtischtachymetrie ist die direkte Erzeugung einer Kartierung im Felde aus den per Kippregel bestimmten Messwerten auf einem Messtisch. (vgl. Kohlstock, 2014: 43 u. 54 f.)

2.1.2 Elbquerprofile

Die verwendeten Elbquerprofile sind alle in den zuvor beschriebenen Lageplänen enthalten und können anhand der Elbkilometrierung zugeordnet werden. Ausgehend von dieser Elbkilometrierung erstrecken sich die Elbquerprofile als Normalen des Elbverlaufs üblicherweise bis zu den beidseitig verlaufenden Deichen. Ist kein Deich vorhanden oder zu weit entfernt, enden die Profile an nicht näher definierbaren Stellen. (s. Anhang I u. II)

Kennzeichnend für Profile ist die Abbildung des Vertikalschnittes durch die Erdoberfläche entlang der durch das Profil definierten Linie. Die Profilkordinaten der gemessenen Punkte bestehen aus der Höhe und der als Station bezeichneten Lagekoordinate innerhalb des Profilverlaufs, beginnend bei einem festgelegten Nullpunkt. (vgl. Möser et al., 2002: 25) Der Nullpunkt für die Stationierung der Elbquerprofile befindet sich in etwa an der westlichen bzw. südlichen Uferlinie der Elbe. Die Stationsangaben sind in Metern eingetragen und der Längenmaßstab beträgt 1:2000. Die dargestellten NN-Höhen sind in einem Maßstab von 1:100 angegeben und

beziehen sich auf einen Bezugshorizont von 0,00 m ü. NN oder aber -5,00 m ü. NN. (s. Anhang II)

Um zu gewährleisten, dass sich die Verbindungsgerade zwischen zwei aufgenommen Punkten möglichst genau an die Erdoberfläche anschmiegt (vgl. Möser et al., 2002: 25), variiert der Stationsabstand zwischen zwei Profilverpunkten je nach Gefälle des Geländes. Bei ebenen Geländestrukturen liegt der Punktabstand bei 20 m, während er bei abfallendem oder ansteigendem Gelände nur noch wenige Meter beträgt. Eine Ausnahme hierzu bildet das Gewässerbett mit Punktabständen von teilweise über 100 m. (s. Anhang II) Ursächlich sind vermutlich die erschwerten Messbedingungen bei der Profilaufnahme.

Außer der Geländeoberfläche enthält der Profilquerschnitt Informationen über den Weidenbewuchs sowie zu geplanten Ab- oder Auftragsflächen, welche als gestrichelte Linien eingezeichnet sind. Darüber hinaus beinhalten die Profile diverse eingetragene Wasserspiegel. Zu diesen gehören zwei dargestellte Hochwasserstände, die jeweils in Bezug zum nächstgelegenen Pegel gesetzt sind. Ebenso mit Bezug zum nächstgelegenen Pegel abgebildet, ist der mittlere Wasserstand. Neben den realen Wasserständen zeigen die Profilquerschnitte zusätzlich ein bis zwei projektive Wasserspiegel. (s. Anhang II)

2.2 Georeferenzierung der Lagepläne

Um die in Kapitel 2.3 beschriebene Digitalisierung der Elbquerprofile zu ermöglichen, sind die den Ortsbezug der Profile enthaltenden Lagepläne (s. Anhang I) zunächst zu georeferenzieren. Als Georeferenzierung wird die Einpassung der zu digitalisierenden Vorlagen in ein definiertes Zielkoordinatensystem unter Verwendung sogenannter Passpunkte bezeichnet. Im Regelfall werden mindestens zwei Passpunkte benötigt, wobei sich eine darüberhinausgehende Anzahl an Passpunkten empfiehlt, um die Genauigkeit zu erhöhen und diese anhand der Überbestimmung der Transformationsparameter beurteilen zu können. (vgl. Bill, 2016: 308) Nähere Ausführungen zum angewandten Transformationstyp und zur Bestimmung der Transformationsparameter sind in Kapitel 2.2.3 zu finden.

Die Georeferenzierung der Lagepläne wird mit dem Programm GEOgraf der Firma HHK Datentechnik GmbH durchgeführt. Als Zielkoordinatensystem wird ETRS89/UTM in der Zone 32 gewählt. Ausschlaggebend für die Verwendung von ETRS89/UTM ist dessen Status als aktuelles Lagebezugssystem der Landesvermessung (vgl. Asbeck et al., 2016: 40).

2.2.1 Datenformatierung und Kacheln der Lagepläne

Das Programm GEOgraf bietet die Georeferenzierung von Dokumenten für verschiedene Dateiformate an. Die Möglichkeiten zur Visualisierung der eingepassten Dokumente unterscheidet sich allerdings je nach Dokumententyp. Während sich Rasterdaten für eine nachträgliche Digitalisierung am Bildschirm eignen, ist die Visualisierung und somit ebenso die weitere Bearbeitung von PDF-Dokumenten eingeschränkt. (vgl. HHK Datentechnik GmbH, 2016: 680 u. 688)

Um eine optimale Digitalisierung der Elbquerprofile zu gewährleisten, sind daher die als PDF-Datei vorliegenden gescannten Lagepläne in ein Rasterdatenformat zu überführen. Diese Konvertierung wird mit dem Programm PDF24 Creator der Firma geek Software GmbH realisiert. Als Rasterdatenformat wird das TIFF ausgewählt. Beim TIFF handelt es sich um eines der gängigsten Datenformate für Rasterdaten. Vorteile sind die verlustfreie Komprimierung und die Abspeicherung von Informationen zur Georeferenzierung. (vgl. Asbeck et al., 2016: 429)

Bei der Konvertierung sind als Einstellungen die Auflösung in dots per inch (dpi) anzugeben und die Anzahl der darstellbaren Farben auszuwählen. Da die Lagepläne bereits mit einer Auflösung von 300 dpi gescannt worden sind, wird die Auflösung ebenfalls mit 300 dpi angegeben.



Abbildung 1: Versatz zwischen Blattschnitten

Neben der Konvertierung der Lagepläne ist, als weitere Vorbereitung für eine genaue Georeferenzierung sowie der darauffolgenden Digitalisierung, eine Unterteilung der Lagepläne in ihre einzelnen Blattschnitte vorzunehmen. Das Kacheln der Lagepläne ist notwendig, da die Blattschnitte nicht nahtlos ineinander übergehen (s. Abbildung 1). Ursächlich für diesen Versatz können das ungenaue Zusammenfügen oder aber Abbildungsverzerrungen zwischen den Blattschnitten in Folge der Erfassung über die Messtischtachymetrie sein. Auftretende Abbildungsverzerrungen innerhalb der Blattschnitte sind auszuschließen, da diese bei großen Maßstäben unterhalb der Zeichengenauigkeit liegen (vgl. Kohlstock, 2014: 127). Das digitale Ausschneiden wird mit der Open-Source-Bildbearbeitungssoftware GIMP durchgeführt, wobei jedoch ausschließlich Blattschnitte gekachelt werden, die die im Rahmen dieser Ausarbeitung

relevanten Elbquerprofile enthalten. Ob die einzelnen Kacheln tatsächlich bei der Georeferenzierung verwendet werden, ist von der Anzahl der verfügbaren Passpunkte und deren Verteilung abhängig (s. Kapitel 2.2.2).

2.2.2 Passpunktauswahl

Als Passpunkte für die Georeferenzierung eignen sich die vier Blattecken einer Karte sowie gut zu identifizierende Einzelpunkte innerhalb des Kartenbildes (vgl. Kappas, 2001: 95). Da die zu georeferenzierenden Lagepläne keine koordinierten Blattecken mit angegebenem Bezugssystem enthalten (s. Anhang I), sind für die Einpassung markante Passpunkte des Karteninhalts zu verwenden. Bei den Verkehrswegen, Gewässern und Deichen kann eine nach der Erfassung stattgefundenen Veränderung der Ausdehnung bzw. des Verlaufs nicht ausgeschlossen werden, weshalb diese nicht in Frage kommen. Auch bei der durchaus markanten Elbkilometrierung ist von einer Verwendung abzusehen, da es sich hierbei um keine real existierenden Punkte handelt und somit eine unveränderte Position nicht nachweisbar ist. Lediglich bei den Gebäudepunkten ist von einer andauernden Lagestabilität und der damit verbundenen Eignung als Passpunkt auszugehen, insofern die Gebäude nicht abgerissen oder verändert worden sind. Bedingt durch eine fehlende Überlappung der Kartenblätter (s. Anhang I), können Kartenblätter, auf denen keine oder nur unzureichend viele unveränderte Gebäude vorhanden sind, nicht georeferenziert werden. Bei den verwendeten Kartenblättern besteht diese Problematik nicht. Nur einzelne Blattsnitte enthalten nicht ausreichend viele Passpunkte für eine zuverlässige Georeferenzierung, weshalb für diese die Einpassung der gesamten Kartenblätter vorzunehmen ist und die geringe Genauigkeit infolge des Blattschnittversatzes akzeptiert werden muss.

Als Datenquelle für die Einpassung der Lagepläne werden die ALKIS-Gebäudedaten verwendet, welche im Zielkoordinatensystem ETRS89/UTM bereitgestellt werden und daher direkt in den erzeugten GEOgraf-Auftrag importiert werden können. Nur die Gebäudedaten aus Mecklenburg-Vorpommern sind vor dem Import von ETRS89/UTM-Koordinaten der Zone 33 in ETRS89/UTM-Koordinaten der Zone 32 zu überführen.

Zur Identifizierung geeigneter Passpunkte werden die ALKIS-Gebäudedaten mit den auf den Lageplänen enthaltenen Gebäuden abgeglichen. Aufgrund des Alters der Lagepläne des Regulierungsprojektes entstehen jedoch Probleme bei der Zuordnung. Um diese Problematik zu lösen, werden zunächst Punkte auffälliger Gebäude wie z.B. Kirchen, Schlösser oder beschriftete Gebäude ausgewählt. Bereits mit diesen wenigen Passpunkten wird eine grobe Einpassung gerechnet. Basierend auf dieser Annäherung werden weitere identische Gebäude ausfindig gemacht. Bestehen dennoch Zweifel, ob es sich bei diesen um die gleichen Gebäude wie zur Zeit

des Regulierungsprojektes handelt, wird ein Ortsvergleich durchgeführt. Neben einem Ortsvergleich wird als weitere Plausibilitätskontrolle die Übereinstimmung zwischen Lageplan bzw. Blattschnitt und den ebenfalls im Liegenschaftskataster vorhandenen Hauptverkehrsachsen und der Landesgrenze zwischen Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern überprüft (s. Abbildung 2 u. 3). Hierfür wird angenommen, dass sich diese ebenfalls nicht entscheidend verändert haben. Je nach Anzahl der identischen Gebäude auf dem Kartenblatt bzw. dem Blattschnitt werden pro Gebäude ein bis zwei Passpunkte für die Georeferenzierung ausgewählt (s. Anhang III). Sollten die jeweiligen Gebäudepunkte infolge des Alters der Gebäude nicht als koordinierte Punkte im Kataster vorliegen, werden diese aus den Gebäudeliniem konstruiert (s. Anhang IV). Bei Passpunkten, die trotz bestehender Identität der Gebäude in beiden Datengrundlagen das Transformationsergebnis erheblich verschlechtern, wird auf eine Verwendung verzichtet, falls dennoch ausreichend viele Passpunkte verfügbar sind.

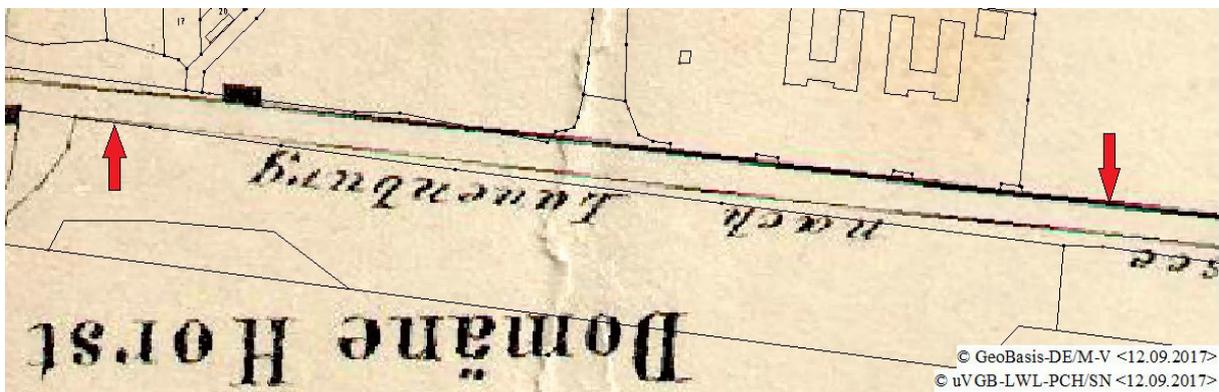


Abbildung 2: Übereinstimmung der Hauptverkehrsachsen

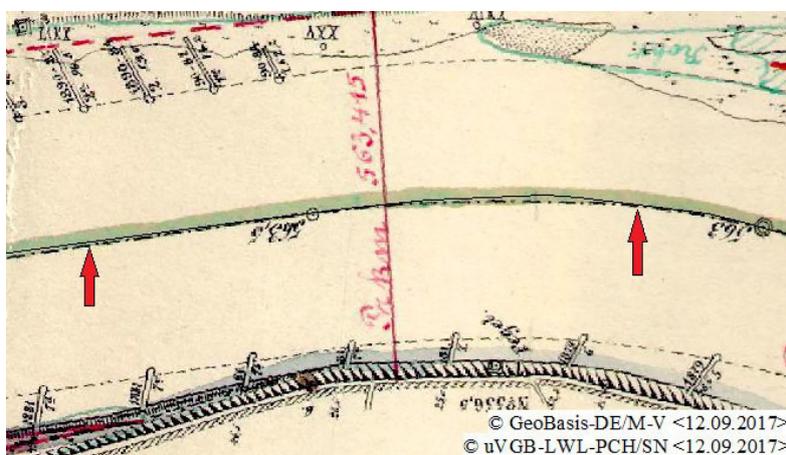


Abbildung 3: Übereinstimmung der Landesgrenze

Die Anzahl der letztendlich für die Transformation verwendbaren Passpunkte schwankt zwischen vier Passpunkten für das Kartenblatt 54 und neun Passpunkten für den Blattschnitt 119 (s. Anhang III). Mit Ausnahme des Kartenblattes 54 werden die gekachelten Blattschnitte für die Georeferenzierung verwendet, um Ungenauigkeiten durch den Versatz zwischen den

Blattschnitten zu vermeiden (s. Abbildung 1). Beim Blatt 55 bzw. Blattschnitt 119 besteht die Besonderheit, dass es nicht entscheidend ist, ob das Kartenblatt 55 oder der Blattschnitt 119 verwendet wird, da alle Passpunkte im Bereich des Blattschnittes 119 liegen. Nur im Falle einer Analyse der Elbquerprofile des Blattschnittes 118 ist zwangsläufig das Kartenblatt 55 einzupassen, damit trotz fehlender Passpunkte eine Georeferenzierung des Blattschnittes 118 mit niedriger Genauigkeit möglich ist. Für das Kartenblatt 54 sind die zu erwartenden Ungenauigkeiten infolge des Blattschnittversatzes zu akzeptieren, da nur für das Gesamtkartenblatt eine zuverlässige Bestimmung der Transformationsparameter mit einer akzeptablen Verteilung der Passpunkte erreicht wird (s. Anhang III). Nach Möglichkeit sollen die Passpunkte einer Transformation das zu georeferenzierende Gebiet umschließen und gleichmäßig verteilt sein, um eine genaue Einpassung zu gewährleisten (vgl. Witte & Sparla, 2011: 193). Obwohl die Lage der Passpunkte hauptsächlich von der Verteilung der Ortschaften entlang der Elbe abhängt und daher kaum zu beeinflussen ist, sind die Forderungen für eine gute Verteilung der Passpunkte weitestgehend erfüllt. Nur für den Blattschnitt 115 gilt dies nicht uneingeschränkt, da die Passpunkte alle auf einer Elbseite liegen. Auf dieser sind sie jedoch ausreichend verteilt, sodass trotzdem von einer akzeptablen Einpassungsgenauigkeit ausgegangen werden kann. (s. Anhang III) Weiterhin ist beim Blattschnitt 115 zu beachten, dass zusätzlich der flussaufwärts im Blatt 53 angrenzende Blattschnitt mit den Passpunkten des Blattschnittes 115 georeferenziert wird. Eine eigenständige Einpassung dieses Blattschnittes ist angesichts fehlender Passpunkte nicht realisierbar, weshalb die zu erwartenden Ungenauigkeiten zu akzeptieren sind.

2.2.3 Durchführung der Transformation

Für die Einpassung der Kartenblätter bzw. Blattschnitte anhand der definierten Passpunkte wird eine 2D-Ähnlichkeitstransformation mit vier Transformationsparametern verwendet. Bei dieser handelt es sich um den Regelfall, der bei der Einpassung von Kartenblättern für eine spätere Digitalisierung genutzt wird. Die vier Transformationsparameter, bestehend aus zwei Verschiebungen, einer Rotation und einem Maßstab reichen nämlich aus, um die Quellkoordinaten des Kartenblattes in das Zielkoordinatensystem zu überführen. Eine Verwendung zweier Maßstäbe ist nur zu empfehlen, wenn das Kartenblatt unterschiedliche Ausdehnungen in Längs- und Querrichtung aufweist, was im Falle der Lagepläne nicht anzunehmen ist. (vgl. Bill, 2016: 189)

Zur eindeutigen Bestimmung der vier Transformationsparameter werden zwei Passpunkte im Quell- und Zielsystem benötigt (vgl. Kahmen, 2006: 223). Durch die Verwendung von mehr als zwei Passpunkten in den Lageplänen bzw. Blattschnitten (s. Kapitel 2.2.2) liegt jedoch eine Überbestimmung vor, weshalb die Transformationsparameter über eine vermittelnde

Ausgleichung bestimmt werden (vgl. Witte & Sparla, 2011: 192 f.). Aufgrund der ausgleichenden Berechnung ist auch eine Beurteilung der Genauigkeit der Transformation (s. Kapitel 2.2.4) möglich (vgl. Bill, 2016: 308).

Direkt im Anschluss an die durchgeführte Transformation erzeugt GEOgraf automatisch eine World-Datei (vgl. HHK Datentechnik GmbH, 2016: 680). In der World-Datei werden die Daten zur Georeferenzierung des Bildes abgespeichert, damit über diese jederzeit der Raumbezug des Bildes hergestellt werden kann. Der Name der Datei ist analog zum Dateinamen des Bildes und die Dateierweiterung ergibt sich aus dem Rasterdatenformat des Bildes. Für das verwendete TIFF lautet die Endung „.tif“. (vgl. Bill, 2016: 639) Zu den gespeicherten Daten in der World-Datei zählen die Pixelgröße in x- und y-Richtung, die Drehung um x- und y-Achse sowie die Koordinaten des linken oberen Pixels (vgl. USNA, 2016).

2.2.4 Ergebnis der Transformation

Das Ergebnis der Transformation wird in das Protokoll des GEOgraf-Auftrags geschrieben. Neben den Standardabweichungen der Transformation sind ebenfalls die verwendeten Passpunkte einschließlich ihrer Restklaffen und der Redundanz aufgeführt. Auch der gewählte Transformationstyp sowie die bestimmten Transformationsparameter werden vermerkt. (s. Anhang IV) Von den genannten Angaben ist für die Genauigkeitsbeurteilung vor allem die Standardabweichung für einen Einzelpunkt von Interesse, da diese die geschätzte Abweichung gemessener Punkte vom wahren Wert angibt (vgl. Kahmen, 2006: 18 f.). Im Folgenden wird deshalb näher darauf eingegangen.

Zunächst werden jedoch die erreichten Genauigkeiten der Transformationen der Kartenblätter mit denen der Blattschnitte verglichen, um anhand zweier Beispiele die Auswirkungen des festgestellten Versatzes zwischen den Blattschnitten aufzuzeigen. Der erreichten Standardabweichung von $\pm 1,971$ m für den Blattschnitt 115 steht eine Standardabweichung von $\pm 10,436$ m für das Kartenblatt 53 gegenüber. Folglich ist die Georeferenzierung des Kartenblattes in etwa um den Faktor fünf schlechter, als die des Blattschnittes. Auch beim zweiten Beispiel ist die Auswirkung des Blattschnittversatzes deutlich festzustellen. So beträgt die Standardabweichung für den Blattschnitt 114 $\pm 2,276$ m, während sich die Standardabweichung für das Kartenblatt 52 auf $\pm 6,976$ m beläuft. (s. Anhang IV) Das Ergebnis des Vergleichs verdeutlicht, dass nach Möglichkeit eine Georeferenzierung der einzelnen Blattschnitte zu favorisieren ist, um die Genauigkeit der Einpassung zu erhöhen.

Für die Beurteilung der Genauigkeit der Georeferenzierung ist die Standardabweichung für einen Punkt der erreichbaren Genauigkeit gegenüberzustellen. Im Gegensatz zur Standard-

abweichung für einen Punkt kann die erreichbare Genauigkeit nicht dem Protokoll des GEOgraf-Auftrags entnommen werden, sondern ist aus den Genauigkeiten der Messunsicherheiten zu berechnen. Im Sinne des Fehlerfortpflanzungsgesetzes ergibt sich die geschätzte Gesamtstandardabweichung aus den Schätzwerten bzw. Standardabweichungen der einfließenden Parameter (vgl. Kahmen, 2006: 19 f.). Die Formel für die Berechnung eines Schätzwertes der Standardabweichung aus der Summe x zweier Einflussgrößen lautet:

$$s(x)^2 = s_1^2 + s_2^2 \text{ (vgl. Kahmen, 2006: 20).} \quad (2.1)$$

Im Falle der Georeferenzierung zählen zu den Parametern die Zeichengenauigkeit der Kartenblätter bzw. Blattsnitte (s_Z), die Digitalisierengenauigkeit der Passpunkte (s_D) und die Genauigkeit von ALKIS als Datengrundlage der Gebäudedaten (s_G). Die erreichbare Genauigkeit der Einpassung (s_{Ges}) berechnet sich folglich über:

$$s_{Ges} = \sqrt{s_Z^2 + s_D^2 + s_G^2}. \quad (2.2)$$

Während die Zeichengenauigkeit für analoge Karten laut Hacke et al. (2002: 387) 0,15 mm beträgt, gibt Kohlstock (2014: 127) diese mit 0,2 mm an. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte werden für die Genauigkeitsabschätzung beide Angaben verwendet. In Abhängigkeit vom Maßstab 1:10.000 der Lagepläne bzw. Blattsnitte ist für die Zeichengenauigkeit daher ein Wert zwischen 1,5 m und 2,0 m anzunehmen. Ebenfalls abhängig vom Maßstab der Kartenvorlage ist die Digitalisierengenauigkeit der Passpunkte, welche aus der Pixelgröße als kleinste regelmäßige Einheit der gescannten Lagepläne bestimmt wird (vgl. Bill, 2016: 61 f.). Angesichts der beliebigen Vergrößerung der gescannten Vorlage (vgl. Behr, 2014: 272) können weitere Genauigkeitsbeschränkungen in der On-Screen-Digitalisierung ausgeschlossen werden. Wegen der begrenzten Zuordnung eines Grauwertes pro Pixel ist allerdings auch nicht mit einer über die Pixelgröße hinausgehenden Genauigkeit zu rechnen (vgl. Bill, 2016: 31 f.). Bei einer Auflösung von 300 dpi ergibt sich eine Pixelgröße von 0,085 x 0,085 mm². Infolge des Maßstabs von 1:10.000 entspricht die aus der Kantenlänge von 0,085 mm abgeleitete Digitalisierengenauigkeit 0,85 m. Als letzter Parameter ist die Genauigkeit von ALKIS anzugeben, welche über vier Genauigkeitsstufen definiert ist. Für die erste Genauigkeitsstufe, die aus im Felde durchgeführter Vermessungen resultiert, wird eine Genauigkeit von 0,04 m angegeben. Da jedoch davon auszugehen ist, dass viele der alten Gebäudedaten aus der Digitalisierung der Rahmenkarten abgeleitet sind und somit in der dritten Genauigkeitsstufe vorliegen, ist eher eine Genauigkeit von 0,50 m anzunehmen. (vgl. Bertram & Siepert, 2009: 4)

Entsprechend (2.2) ergibt sich aus den bereits dargelegten Größenordnungen der Einflussfaktoren eine zu erreichende Genauigkeit der Georeferenzierung zwischen $\pm 1,725$ m und

$\pm 2,230$ m. Um die erreichbare Genauigkeit nun mit der erreichten Genauigkeit zu vergleichen, ist die Standardabweichung für einen Punkt aus dem GEOgraf-Protokoll zu entnehmen. Diese schwankt bei den für die Digitalisierung der Elbquerprofile (s. Kapitel 2.3) verwendeten georeferenzierten Kartenblättern bzw. Blattsnitten zwischen $\pm 1,971$ m und $\pm 3,400$ m. Im Mittel beträgt die Standardabweichung $\pm 2,578$ m. Der Vergleich, basierend auf der mittleren Standardabweichung, zeigt, dass die tatsächlich erreichte Genauigkeit um $\pm 0,348$ m vom zu erwartenden Genauigkeitsbereich abweicht. Hauptursache hierfür ist die Georeferenzierung des Kartenblattes 54 mit einer Standardabweichung für einen Punkt von $\pm 3,400$ m. (s. Anhang IV) Vermutlich ist der Blattschnittversatz für diesen Ausreißer verantwortlich. Aufgrund fehlender Passpunkte ist allerdings keine genauere Georeferenzierung realisierbar (s. Anhang III). Die eingepassten Blattsnitte 114 und 115 liegen hingegen mit einer Standardabweichung von $\pm 1,971$ m und $\pm 2,276$ m entweder innerhalb oder nur knapp außerhalb des geschätzten Genauigkeitsbereiches (s. Anhang IV).

Außer den in (2.2) aufgeführten Fehlereinflüssen existieren weitere mögliche Fehlerquellen, die das Ergebnis der Georeferenzierung beeinflussen können. Da die Auswirkungen dieser Fehlerquellen jedoch nicht bekannt sind, werden sie bei der Berechnung der erreichbaren Genauigkeit nicht berücksichtigt, sondern werden lediglich zur Begründung von Abweichungen zwischen der erreichbaren und der erreichten Genauigkeit aufgezeigt. Als weiterer Fehlereinfluss ist die Inhomogenität der Kartenblätter zu nennen. Ausgelöst wird der sogenannte Papierverzug durch Feuchtigkeitsschwankungen während der Lagerung oder aber einer unsachgemäßen Beanspruchung der Karte. (vgl. Behr, 2014: 269) Neben dem Papierverzug können auch Generalisierungen des Karteninhalts das Transformationsergebnis verschlechtern (vgl. Hake et al., 2002: 387). Um diesen Fehlereinfluss zu vermeiden, werden bei der Wahl der Passpunkte nur Gebäude verwendet, bei denen eine Generalisierung ausgeschlossen werden kann (s. Anhang III). Eine weitere anzunehmende Ungenauigkeit resultiert aus der Erfassung des Karteninhalts (vgl. Bill, 2016: 348). Da bezüglich der Erfassungsmethode keine Angaben vorliegen (s. Kapitel 2.1.1), würde die einfließende Messunsicherheit aus Mutmaßungen resultieren, weshalb von einer Einschätzung der Größenordnung des Fehlereinflusses Abstand genommen wird. Ebenfalls nicht in (2.2) enthalten, ist der Fehlereinfluss der Netzspannungen zwischen den Bundesländern. Neben der nicht bekannten Größenordnung dieses Fehlers wird aufgrund der Schaffung eines homogenen, einheitlichen Raumbezugspunktfeldes innerhalb der Bundesrepublik Deutschland, basierend auf dem Bezugssystem ETRS89, davon abgesehen (vgl. Möser et al., 2012: 93). Wegen des einheitlichen Bezugssystems ist zu vermuten, dass die Netzspannungen relativ gering ausfallen und somit das Ergebnis der Einpassung nicht maßgeblich verschlechtern.

2.3 Digitalisierung der Elbquerprofile

Nachdem die Lagepläne bzw. Blattsnitte georeferenziert sind, kann mit der Digitalisierung der darin eingezeichneten Elbquerprofile begonnen werden. Hinter der Bezeichnung Digitalisierung verbirgt sich die Umwandlung analoger Darstellungen in digitale Daten, wobei diese entweder als Vektor- oder Rasterdaten erfasst werden (vgl. Hake et al., 2002: 233). Zur Generierung von Vektordaten wurden ursprünglich Digitalisierertische bestehend aus einem Tisch, einer Messeinrichtung für Koordinaten und einer Verbindung mit einem Arbeitsplatzrechner verwendet. Inzwischen gewinnt die Digitalisierung am Bildschirm jedoch zunehmend an Bedeutung und verdrängt den herkömmlichen Digitalisierertisch. (vgl. Bill, 2016: 61 f.) Während der Vorteil von Vektordaten in der Erfassung von Einzelobjekten liegt, zeichnen sich Rasterdaten durch eine wesentlich kürzere Erfassungsdauer aus. Diese resultiert aus der automatischen Erfassung über einen Scanner oder Abtaster. (vgl. Hake et al., 2002: 234 u. 237)

2.3.1 Grundlegende Methoden der Digitalisierung

Um aus den Kartenvorlagen digitalisierte Vektordaten zu gewinnen, können mehrere gängige Verfahren eingesetzt werden. Eine der Methoden ist die manuelle Digitalisierung. Hierbei werden die zu erfassenden Elemente der georeferenzierten Kartenvorlage per Messmarke bzw. Cursor eingestellt und über die Auslösung eines Knopfes bzw. der PC-Maus werden die Koordinaten im definierten Koordinatensystem abgespeichert. Neben der Digitalisierung von Einzelpunkten bietet die manuelle Digitalisierung auch die Möglichkeit zur Linienverfolgung. Inzwischen wird zur manuellen Digitalisierung häufig die On-Screen-Digitalisierung am Bildschirm verwendet. Gegenüber dem klassischen Digitizer zeichnet sich die Digitalisierung am Bildschirm durch eine höhere geometrische Genauigkeit, eine schnellere Erfassung und einer einfacheren Kontrolle auf Vollständigkeit aus. (vgl. Hake et al., 2002: 235 f.)

Als Weiterentwicklung der manuellen Digitalisierung kann die halbautomatische Digitalisierung bezeichnet werden, die die manuelle Linienverfolgung durch eine automatische Linienerfassung ersetzt. Dies bedeutet, dass der Bearbeiter den Anfangspunkt des Linienverlaufs vorgibt und die restliche Digitalisierung automatisch abläuft. Lediglich bei Kreuzungspunkten mehrerer Linienzüge muss der Bearbeiter entscheiden, wie der Linienverlauf fortgesetzt werden soll. Resultierend aus der programmgesteuerten Linienverfolgung weist die halbautomatische Digitalisierung vor allem bei der Erfassung umfangreicher Liniendarstellungen eine schnellere Bearbeitung gegenüber der manuellen Digitalisierung auf. (vgl. Bill, 2016: 312)

Ebenfalls zu den vektorbasierten Digitalisierungsmethoden zählt die konstruktive Datenerfassung. Ausgehend von koordinatenmäßig bekannten Punkten werden neue digitale Daten über verschiedenste Konstruktionsfunktionen erzeugt. Als Beispiel sei hier die Kleinpunktberechnung genannt. Vorteil der konstruktiven Datenerfassung ist die hohe Genauigkeit der digitalisierten Daten, die lediglich durch die Genauigkeit der Bezugselemente eingeschränkt wird. Der Nachteil dieser Erfassungsmethode liegt in der manuellen Dateneingabe und der somit bestehenden Gefahr von Tippfehlern. Um diese auszuschließen, ist eine Kontrolle über eine redundante Datenerfassung denkbar. Zudem ist auch der hohe Erfassungsaufwand als nachteilig zu bewerten. (vgl. Behr, 2014: 269–271)

Speziell bei einfachen Kartentypen bietet sich die Verwendung der automatischen Digitalisierung an, bei der die Kartenvorlage automatisch gescannt wird und das Kartenbild in eine Matrix einzelner Rasterpunkte überführt wird (vgl. Bill, 2016: 312 f.). Folglich werden bei der automatischen Digitalisierung Rasterdaten erhoben. Zur Abtastung der Vorlagen werden hauptsächlich Trommelscanner oder Flachbrettscanner eingesetzt. Während Trommelscanner die Vorlage streifenweise erfassen, erfolgt die Digitalisierung bei Flachbrettscannern über eine Zeilenabtastung der Vorlage. Obwohl die automatische Digitalisierung wesentlich schneller ist als die objektstrukturierte Erfassung von Vektordaten, ist zu bedenken, dass die Nachbearbeitung von Rasterdaten um einiges aufwendiger ist. (vgl. Hake et al., 2002: 238 f.)

2.3.2 Methodik zur Digitalisierung der Elbquerprofile

Für die Digitalisierung der Elbquerprofile werden unterschiedliche Datenquellen eingesetzt. Neben den historischen Elbquerprofilen sind auch die georeferenzierten Lagepläne zu verwenden, um den Profilen einen übergeordneten Raumbezug zuordnen zu können. Ohne den Raumbezug würden die Elbquerprofile nur in ihrem jeweiligen lokalen Stationskoordinatensystem vorliegen (s. Anhang II). Eine Beurteilung von Veränderungen im Strömungsquerschnitt, basierend auf dem Vergleich der historischen Querprofile mit aktuellen Querprofilen, wäre nicht möglich, da keine Lageidentität gegeben und somit auch ein Vergleich der Höhen ausgeschlossen wäre.

Zur Herstellung des Raumbezuges im Koordinatensystem ETRS89/UTM werden von den relevanten Elbquerprofilen jeweils mindestens zwei Punkte der eingezeichneten Profillinien in den eingepassten Lageplänen bzw. Blattsnitten digitalisiert. Hierfür werden die Punkte gemäß der manuellen On-Screen-Digitalisierung in der gewünschten Zoomstufe mit dem Fadekreuz angesteuert und per Mausklick im Koordinatensystem ETRS89/UTM abgespeichert (vgl. Behr, 2014: 271 f.). Die Anzahl der digitalisierten Punkte in den georeferenzierten Vorlagen

hängt von der Geradlinigkeit der Profile ab. Verlaufen die Profillinien geradlinig von einer Elbseite zur anderen Elbseite, wird jeweils ein Punkt pro Elbseite digitalisiert. Um die digitalisierten Punkte der eingepassten Lagepläne bzw. Blattsschnitte in den historischen Elbquerprofilen eindeutig zuordnen zu können, wird mindestens einer der digitalisierten Profillinienpunkte so gewählt, dass dieser entweder der vorderen oder hinteren Deichoberkante entspricht. Ist nur auf einer der beiden Elbseiten ein Deich im Profil enthalten, dann entspricht der zweite digitalisierte Punkt dem Ende der Profillinie auf der gegenüberliegenden Elbseite. Verlaufen die Profillinien nicht geradlinig, werden zusätzlich zu den beiden beschriebenen Punkten die Knickpunkte des Profils digitalisiert. Bei den im Rahmen dieser Ausarbeitung verwendeten Profilen ist die Digitalisierung weiterer Knickpunkte nur bei dem Profil km 551,632 vorzunehmen, da dieses dem Verlauf eines sogenannten Flügeldeiches folgt (s. Anhang I).

Ausgehend von einem der digitalisierten Deichpunkte werden die Profilkpunkte der historischen Elbquerprofile im Sinne der konstruktiven Datenerfassung über die Kleinpunktberechnung digital erfasst. Die aus den Lageplänen bzw. Blattsschnitten digitalisierten Punkte definieren hierbei die Abszissenachse und für die Koordinierung werden die Stationsangaben der historischen Elbquerprofile genutzt. Damit auch die Geländehöhen digital vorliegen, werden diese im Anschluss an die lagemäßige Koordinierung der Profilkpunkte im Bezugssystem ETRS89/UTM in Form einer manuellen Dateneingabe ergänzt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Genauigkeit bei der konstruktiven Datenerfassung einzig von der Genauigkeit der Bezugselemente abhängt (vgl. Behr, 2014: 271) und unter der Annahme, dass Tippfehler infolge einer konzentrierten Dateneingabe weitestgehend ausgeschlossen werden können, ist zur Abschätzung der Genauigkeit lediglich die manuelle Digitalisierung der Profillinienpunkte aus den Lageplänen bzw. Blattsschnitten zu berücksichtigen. Zu den Fehlereinflüssen der manuellen Digitalisierung gehören die Einpassung der Vorlage, der Zustand sowie deren Erfassungsstandard. Darüber hinaus beeinflusst auch die Ungenauigkeit der Digitalisiergeräte die Genauigkeit der digitalisierten Punkte. (vgl. Behr, 2014: 269) Wie bei der Genauigkeitsabschätzung der Georeferenzierung sind die Größenordnungen der Fehlereinflüsse durch Papierverzug und Kartenerfassung nicht bekannt. Infolgedessen werden diese bei der berechneten Unsicherheit der digitalisierten Punkte nicht berücksichtigt, da auch eine grobe Abschätzung wegen fehlender Erfahrungswerte nicht vorgenommen werden kann. Für die verbleibenden Fehlereinflüsse als Parameter der geschätzten Standardabweichung der digitalisierten Profilkpunkte kann der Ansatz aus (2.1) übernommen werden. Außer der begrenzten Digitalisiergenauigkeit (s_{Di}) und der Ungenauigkeit der Einpassung (s_{Geo}) ist ebenso die

Zeichengenauigkeit der Lagepläne (s_{Zg}) zu berücksichtigen, da die Profile in diesen kartiert sind. Entsprechend ergibt sich die Genauigkeit der digitalisierten Profilmessungen (s_p) aus:

$$s_p = \sqrt{s_{Di}^2 + s_{Geo}^2 + s_{Zg}^2} . \quad (2.3)$$

Als Eingangsgröße für die Ungenauigkeit der Einpassung wird die mittlere Standardabweichung der georeferenzierten Lagepläne bzw. Blattsschnitte in Höhe von $\pm 2,578$ m verwendet (s. Kapitel 2.2.4). Bedingt durch den Maßstab der Lagepläne bzw. Blattsschnitte von 1:10.000 beträgt die Zeichengenauigkeit zwischen 1,5 m und 2,0 m (vgl. Hake et al., 2002: 387 u. Kohlstock, 2014: 127) und die Digitalisierengenauigkeit ist wiederum angesichts der Kantenlänge eines Pixels von 0,085 mm mit 0,85 m anzunehmen (s. Kapitel 2.2.4). Die mit diesen Eingangsgrößen berechnete Standardabweichung der Lage der digitalisierten Punkte beträgt zwischen $\pm 3,101$ m und $\pm 3,372$ m. Auch wenn die Standardabweichung nur für die Lage gilt, lässt sich hieraus auch eine Beeinflussung der für den Strömungsquerschnitt wichtigen Geländehöhe ableiten. Wegen der Unsicherheiten in der Lage von mehr als ± 3 m können die auf Basis der Digitalisierungsergebnisse bestimmten aktuellen Elbquerprofile (s. Kapitel 3) nur als bedingt lageidentisch mit den historischen Elbquerprofilen angesehen werden. Folglich werden auch die Geländehöhen nicht in der identischen Flucht gemessen und weichen daher je nach Geländetyp voneinander ab. Während die Auswirkungen bei stark ansteigenden oder abfallenden Geländestrukturen schwer einzuschätzen sind, kann bei gleichbleibendem Gelände vermutlich dennoch eine Höhengengenauigkeit von ± 20 cm in Folge der Lageunsicherheiten der digitalisierten Punkte angenommen werden.

3 Aktuelle Elbquerprofilmessungen

Um Veränderungen im Strömungsquerschnitt aufzeigen zu können, werden neben den historischen Elbquerprofilen Vergleichswerte benötigt, welche aus aktuellen Elbquerprofilmessungen generiert werden. Die aktuellen Elbquerprofilmessungen setzen sich zusammen aus der für das Gewässerbett jährlich erfolgten Peilung seitens des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Lauenburg und aus selbstständig durchgeführten GNSS-Vermessungen im Elbvorland. Über die Kombination der beiden Datensätze werden letztendlich die aktuellen Elbquerprofile erzeugt. Zum besseren Verständnis der zur Profilerstellung verwendeten Daten werden im Folgenden nicht nur die Datensätze selbst beschrieben, sondern auch die Grundprinzipien der jeweiligen Vermessungsmethode erläutert.

3.1 GNSS-Messung

3.1.1 Grundlagen der GNSS-Vermessung

Bei der Bestimmung der Position eines GNSS-Empfängers wird ein räumlicher Bogenschnitt gerechnet. Die hierfür benötigten Strecken zwischen Empfänger und den als Festpunkte angenommenen Satelliten werden über die Laufzeit der Satellitensignale ermittelt. Damit die Satelliten als Festpunkte in die Berechnung des räumlichen Bogenschnittes einfließen können, enthalten die Signale neben der Zeitinformation ebenfalls die Satellitenkoordinaten zum Zeitpunkt der Signalausbreitung. Obwohl für ein eindeutiges Ergebnis des räumlichen Bogenschnittes nur drei Strecken bekannt sein müssen, basiert die GNSS-Positionierung auf dem Empfang von mindestens vier unterschiedlichen Satellitensignalen. Die Notwendigkeit einer zusätzlichen Streckenbestimmung ergibt sich durch den Empfängeruhrenfehler, der aus der Ungenauigkeit der Empfängeruhr resultiert. Somit sind nicht nur die drei Koordinatenunbekannten des Empfängers, sondern auch die Unbekannte des Uhrenoffsets zu bestimmen und infolgedessen auch vier Strecken zu messen. Aufgrund der Abweichung der gemessenen Strecken von der tatsächlichen Entfernung zwischen Satellit und Empfänger werden die gemessenen Strecken als Pseudostrecken bezeichnet. (vgl. Bauer, 2011: 52 f.)

Zur Berechnung der Pseudostrecke aus der Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Empfang des Satellitensignals im Empfänger kann der aufmodulierte Code der Trägerfrequenz des Satellitensignals verwendet werden. Bei der Codemessung wird die Impulsfolge des Satelliten-codes mit der im Empfänger erzeugten Nachbildung der Impulsfolge zur Deckung gebracht. Aus dem Abgleich der beiden Codes resultiert eine Zeitverschiebung, die der gesuchten Zeitdifferenz entspricht. Folglich ergibt sich die gesuchte Pseudostrecke vereinfacht ausgedrückt aus dem Produkt der ermittelten Zeitverschiebung und der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Zu beachten ist, dass der Uhrenfehler noch in den berechneten Strecken enthalten ist. (vgl. Mansfeld, 2010: 152) Die maximal erreichbare Genauigkeit der Streckenbestimmung aus der Codemessung bei bestimmtem Uhrenfehler liegt im Bereich von mehreren Dezimetern. Um eine höhere Genauigkeit der Entfernungsbestimmung im Zentimeter- oder Millimeterbereich zu erzielen, ist das Verfahren der Trägerphasenmessung anzuwenden. Hierbei wird anstatt eines aufmodulierten Codes direkt die Trägerphase des Satellitensignals mit der Trägerphase der erzeugten Referenzfrequenz des Empfängers verglichen. Die somit ermittelte Trägerphasendifferenz liegt mit einer hohen Genauigkeit vor, wobei die Auswirkung des Empfängeruhrenfehlers zu berücksichtigen ist. Da die aus der Trägerphasendifferenz berechnete Entfernung allerdings nur innerhalb einer Wellenlänge exakt bestimmt werden kann, bleibt die Anzahl der ganzen

Wellenlängen zwischen Satellit und Empfänger unbekannt. (vgl. Bauer, 2011: 173–175) Zur Lösung der auch als Mehrdeutigkeiten bezeichneten ganzen Vielfachen der Wellenlänge werden diese über einen iterativen Prozess mehrerer Beobachtungen angenähert und schließlich durch eine Ausgleichung bestimmt. (vgl. Mansfeld, 2010: 163 f.) Insofern die Mehrdeutigkeiten bekannt sind, zeichnet sich die Trägerphasenmessung durch ein für die Vermessung geeignetes Genauigkeitspotenzial aus. Die Codemessung hingegen erfüllt die Genauigkeitsansprüche nicht und wird daher vor allem im Bereich der Navigation eingesetzt. Eine Verwendung der Trägerphasenmessung in der Navigation kommt aufgrund des höheren technischen Aufwands und der längeren Messzeit nicht in Frage. (vgl. Mansfeld, 2010: 152 u. 193)

Außer dem zu bestimmenden Empfängeruhrenfehler, der die berechnete Pseudostrecke maßgeblich verschlechtert, gibt es weitere Fehlereinflüsse, die die Entfernungsgenauigkeit beeinträchtigen. Für diese Fehlerquellen bietet sich eine Einteilung in die Kategorien satellitenbedingte Fehler, Fehler durch die Empfangsanlage und Fehlereinflüsse im Ausbreitungsweg an. Zu den satellitenbedingten Fehlern zählen eine fehlerhafte Satellitenposition aus der Navigationsmitteilung der Bahndaten sowie der Satellitenuhrenfehler, der jedoch wesentlich geringer ausfällt als der Empfängeruhrenfehler und im Bereich von 100 ns liegt. Auch die Größenordnung der ungenauen Satellitenposition beträgt weniger als 1 m. Bei den durch die Empfangsanlage ausgelösten Fehlern sind das Messrauschen, unterschiedliche Signallaufzeiten bei mehreren Empfangskanälen und Schwankungen des Phasenzentrums der Empfangsantenne, in Abhängigkeit von der Richtung des Einfallswinkels des Signals, zu nennen. Die Auswirkung all dieser Fehlerquellen entspricht für die im Vermessungswesen relevante Trägerphasenmessung wenige Millimeter. Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Fehlereinflüssen verursachen die atmosphärischen Refraktionen in Ionosphäre und Troposphäre erheblich größere Streckenmessfehler im Bereich von 3 m bis 15 m bzw. von 3 m bis 10 m. (vgl. Mansfeld, 2010: 170–175) Ursächlich für die Beeinflussung des Ausbreitungsweges in der Ionosphäre sind freie Elektronen und Ionen. In der Troposphäre hingegen erfolgt eine Beeinträchtigung des Signals durch Gasmoleküle, deren Dichte mit zunehmender Höhe abnimmt. Während die Streckenfehler der ionosphärischen Refraktion über eine Zweifrequenzmessung oder aber geophysikalische Modelle korrigiert werden können, ist bei der troposphärischen Refraktion nur eine Annäherung der Einflüsse über Korrekturmodelle möglich. (vgl. Bauer, 2011: 100–113) Um einen Großteil der bisher genannten systembedingten und die Ausbreitung des Signals beeinträchtigenden Fehlereinflüsse zu eliminieren, sind differenzielle Positionierungstechniken (s. Kapitel 3.1.2) anzuwenden (vgl. Mansfeld, 2010: 283). Ebenfalls als Fehler im Ausbreitungsweg gelten die Mehrwegeausbreitung und die Signalbeugung, welche nicht über Korrekturdaten eliminiert werden können und deshalb zu vermeiden sind. Bei der Mehrwegeausbreitung resultiert ein

auftretender Streckenfehler aus dem Empfang reflektierter Signale. Diese werden von Gebäuden oder dem Boden zurückgeworfen und entsprechen folglich nicht dem direkten Weg zwischen Empfänger und Satellit. Aufgrund des Effektes der Mehrwegeausbreitung kann die Position des Empfängers unter Umständen nicht berechnet werden. Besonders anfällig hierfür sind Stadtgebiete, bebautes Gelände und Gebirge. (vgl. Mansfeld, 2010: 57 f.) Der Empfang gebeugter Signale tritt in ähnlichen Gebieten auf, wenn keine direkte Sichtverbindung zum Satelliten besteht und somit nur an Gebäuden gebrochene Signale empfangen werden können. Aufgrund der verminderten Signalstärke gebeugter Signale können diese allerdings ggf. von der Positionsauswertung ausgeschlossen werden. (vgl. Bauer, 2011: 116 f.) Neben den Mehrwegeeffekten und der Signalbeugung können auch hochfrequente Signale, wie z.B. im Bereich von Sendern von Funkdiensten, Störungen des Satellitensignals verursachen (vgl. Mansfeld, 2010: 176). Nicht zu den Fehlereinflüssen der Pseudostrecken zählend, aber dennoch wichtig für die Genauigkeit der bestimmten Position, sind die DOP-Werte. Diese erlauben eine Einschätzung der Verteilung der empfangbaren Satelliten am Firmament und entsprechen daher der Maßeinheit für die Satellitengeometrie. Je kleiner die DOP-Werte sind, desto genauer lässt sich die Pseudostrecke bestimmen. Angestrebt werden sollten DOP-Werte unterhalb von drei. (vgl. Bauer, 2011: 222 f.)

3.1.2 GNSS-Messungen mittels Real-Time-Kinematic

Zur Steigerung der Genauigkeit der GNSS-Positionierung eignen sich differenzielle Messverfahren, die viele der in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Fehlereinflüsse eliminieren oder deren Auswirkungen erheblich verringern (vgl. Mansfeld, 2010: 283). Kennzeichnend für den Einsatz differenzieller Techniken ist die Verwendung von mindestens zwei Empfängern. Während einer der Empfänger (Rover) die Neupunkte aufnimmt, fungiert der andere Empfänger als Referenzstation. Dies bedeutet, dass er Korrekturdaten ermittelt, indem er auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt stationiert wird und dauerhaft die Abweichungen zwischen seiner Sollkoordinate und der bestimmten GNSS-Koordinate berechnet. Aufgrund der Annahme identischer Fehlereinflüsse in der Nachbarschaft werden die Korrekturdaten an den Rover übertragen und für die Berechnung einer weitestgehend fehlerbereinigten GNSS-Position verwendet. (vgl. Bauer, 2011: 53 f.)

Eines der Verfahren der relativen Positionierung ist das Real-Time-Kinematic (RTK). Dieses ermöglicht eine kinematische Echtzeitpositionierung unter Verwendung der Korrekturdaten der Trägerphasenbeobachtungen der Referenzstation. Zudem erlaubt die Verarbeitung von Zweifrequenz-Phasendaten eine schnelle Lösung der Mehrdeutigkeiten. Um die hohe

Genauigkeit des Verfahrens auszuschöpfen, ist zu beachten, dass die Entfernung zwischen Empfänger und Referenzstation nicht größer als ein paar Kilometer sein sollte. (vgl. Bauer, 2011: 209) Die Genauigkeit der über RTK ermittelten Position bei exakter Bestimmung der Mehrdeutigkeiten liegt im Bereich von 1 cm bis 2 cm in der Lage (vgl. Mansfeld, 2010: 294).

3.1.3 Satellitenpositionierungsdienst SAPOS

Um die Flexibilität der relativen Positionierung zu steigern, ist der eigenständig zu betreibenden Referenzstation die Benutzung eines Referenzstationsdienstes vorzuziehen. Basierend auf einem flächendeckenden Netz permanenter Referenzstationen stellt dieser auf Abruf die zur differentiellen Positionierung benötigten Korrekturdaten der umliegenden Referenzstationen bereit. (vgl. Bauer, 2011: 210)

Als einer der gängigsten Satellitenpositionierungsdienste ist der Dienst SAPOS, betrieben von der deutschen Landesvermessung, zu nennen. Analog zur mittels Real-Time-Kinematic erzielbaren Genauigkeit im Bereich von 1 cm bis 2 cm in der Lage bietet SAPOS neben weiteren Services den hochpräzisen Echtzeit-Positionierungsservice (HEPS) an, der die Korrekturdaten aus der Trägerphasenmessung generiert. (vgl. Mansfeld, 2010: 295 f.) Für die Bereitstellung der Korrekturdaten innerhalb des Referenznetzes verwendet SAPOS die drei unterschiedlichen Vernetzungsnachrichten Flächenkorrekturparameter (FKP), virtuelle Referenzstation (VRS) sowie Master-Auxiliary Concept (MAC) und stellt sie den Nutzern zur Verfügung (vgl. Bauer, 2011: 433). Beim FKP-Konzept werden die zu erwartenden Fehlereinflüsse zwischen den Referenzstationen interpoliert und Korrekturebenen gebildet. Anhand der vom Nutzer übermittelten Näherungsposition sendet die nächstgelegene Referenzstation die entsprechenden Korrekturmodelle an den Nutzer, sodass dieser seine Messwerte korrigieren kann. Wie der Name des VRS-Konzeptes bereits vermuten lässt, wird aus den Korrekturmodellen des Referenznetzes eine virtuelle Referenzstation in der Nähe des Empfängers inklusive der anzunehmenden Beobachtungen erzeugt. Die Positionsbestimmung erfolgt anschließend über die Vektorbasislinie zwischen Empfänger und virtueller Referenzstation sowie den Näherungskoodinaten. Zur Ermittlung der Position per Master-Auxiliary Concept überträgt einerseits die aus den Näherungskoodinaten bestimmte nächstgelegene Referenzstation ihre gemessenen Rohdaten an den Empfänger und andererseits senden die umliegenden Stationen ihre Koordinaten- sowie Korrekturdifferenzen an den Empfänger, damit dieser aus den Daten seine Position berechnen kann. (vgl. Bauer, 2011: 213 f.) Die Übermittlung der Korrekturdaten erfolgt im RTCM-Format, wobei zwischen den Übertragungsmöglichkeiten Mobilfunk und mobiles Internet gewählt werden kann. (vgl. Bauer, 2011: 433) Die aus den SAPOS-Korrekturdaten berechneten Koordinaten

liegen im Bezugssystem ETRS89/UTM vor und die ellipsoidischen Höhen beziehen sich auf das GRS80 (vgl. Asbeck et al., 2016: 144).

3.1.4 Durchführung der GNSS-Messung

Die GNSS-Vermessungen im Elbvorland werden mit dem Zweifrequenzempfänger HiPer + der Firma Topcon durchgeführt (s. Abbildung 4), der sowohl die Satellitensignale des amerikanischen GPS als auch des russischen GLONASS empfangen und auswerten kann (vgl. Topcon, 2006). Ergänzend zum GNSS-Empfänger wird ein Feldrechner eingesetzt, auf dem die Vermessungssoftware GART der Firma ALLSAT GmbH installiert ist. Nachdem die Verbindung zwischen Empfänger und Feldrechner hergestellt ist, werden der Empfänger sowie jegliche die GNSS-Messung betreffenden Einstellungen über den Feldrechner gesteuert. Zudem besteht auf dem Feldrechner die Möglichkeit zur Führung eines digitalen Feldbuches.



Abbildung 4: GNSS-Empfänger auf Deichkilometrierungsmarke

Damit keine eigene Referenzstation zur Übertragung von Korrekturdaten benötigt wird, wird der Satellitenpositionierungsdienst SAPOS für die GNSS-Messung verwendet. Genauer gesagt wird der hochpräzise Echtzeit-Positionierungsservice von SAPOS benutzt, mit dem eine Genauigkeit der gemessenen Koordinaten von 1 cm bis 2 cm in der Lage und 2 cm bis 3 cm in der Höhe erreicht werden kann (vgl. AdV, 2017b: 7). Als Bereitstellungsformat der Korrekturdaten wird das RTCM-3.x mit der Vernetzungsnachricht VRS gewählt, wobei die Datenübertragung über das mobile Internet abgewickelt wird.

Außer den spezifischen SAPOS-Einstellungen und der Auswahl von zwei Trägerfrequenzen beider verfügbarer Satellitensysteme zur Positionsbestimmung werden auch der Antennentyp des Empfängers und der minimale Erhebungswinkel für empfangbare Signale definiert. Der minimale Erhebungswinkel wird auf 10° eingestellt, um das Risiko auftretender Laufzeitverzögerungen und Mehrwegeausbreitungen zu verringern (vgl. Mansfeld, 2010: 194). Durch die Einstellung des Antennentyps kann der Empfänger für die Signalauswertung auf das vom Hersteller ermittelte Antennenoffset, also der Differenz zwischen elektrischem Antennenphasenzentrum und dem mechanischen Referenzpunkt, zurückgreifen. Der Bezug zur Geländeoberfläche wird bei der Messung der Geländepunkte über die gemessene Höhe des mechanischen Referenzpunktes über Grund hergestellt. (vgl. Kahmen, 2006: 334–336)

Weiterhin ist im Vorwege der GNSS-Vermessung zu bedenken, dass ellipsoidische Höhen gemessen werden, die nicht mit den physikalischen Gebrauchshöhen übereinstimmen. Beziehen sich die gewünschten Gebrauchshöhen jedoch auf ein Quasigeoid als Höhenbezugsfläche mit dem Höhentyp Normalhöhe kann eine Umrechnung der ellipsoidischen Höhen in Gebrauchshöhen vorgenommen werden. Die Voraussetzung hierfür ist, dass die als Quasigeoidundulation bezeichnete Abweichung zwischen Quasigeoid und Bezugsellipsoid der GNSS-Messung bekannt ist. Die Genauigkeit der umgewandelten Gebrauchshöhen ergibt sich aus der Genauigkeit der Höhenbezugsfläche und der Genauigkeit der bestimmten ellipsoidischen Höhen. (vgl. Bauer, 2011: 75–77) Für das bei der GNSS-Messung im Elbvorland verwendete Quasigeoidmodell GCG 2016 beträgt die Genauigkeit der Höhenbezugsfläche im Flachland 0,5 cm bis 1 cm. Zudem ist das GCG 2016 kompatibel mit dem Bezugssystem ETRS89 von SAPOS, sodass eine direkte Umrechnung in Gebrauchshöhen, die im Höhenbezugssystem DHHN2016 vorliegen, möglich ist. (vgl. BKG, 2017: 4 f.) Die hohe Genauigkeit des Quasigeoidmodells GCG 2016 und die optimale Umrechnung in Gebrauchshöhen resultiert aus der Kombination von satellitengestützten und per Nivellement durchgeführten Höhenmessungen zur Festlegung des Höhenbezugssystems DHHN2016 (vgl. Feldmann-Westendorff, 2013: 135).

Nachdem alle Parameter für die GNSS-Messung eingestellt sind, wird mit der Aufnahme der Elbquerprofile im Elbvorland begonnen. Zur Ermittlung von Abweichungen zu den Sollkoordinaten werden außer den Geländepunkten koordinatenmäßig bekannte Kontrollpunkte vor, während und nach der Geländeaufnahme satellitengestützt bestimmt (vgl. Witte & Sparla, 2011: 439). Mit der Bestimmung von Kontrollpunkten können eventuelle Fehler der Transformation der GNSS-Messung ins Gebrauchssystem nachgewiesen werden. Obwohl die Messung auf demselben Bezugssystem wie GNSS basiert, ist das Gebrauchssystem nicht gänzlich frei von Netzspannungen, weshalb die Transformation fehlerbehaftet sein könnte. (vgl. Bauer,

2011: 359 f.) Aufgrund der begrenzten Anzahl an Kontrollpunkten im Elbvorland und der Durchführung der GNSS-Messung an insgesamt drei Tagen werden einige Kontrollpunkte mehrfach bestimmt (s. Tabelle 1). Ausschlaggebend für die Häufigkeit der Aufnahme der Kontrollpunkte ist, neben den bereits genannten Kriterien, auch die Zeitdifferenz zwischen Aufnahme des Kontrollpunktes und der Fertigstellung des zu messenden Elbquerprofils. Als Kontrollpunkte werden amtliche Höhenfestpunkte im Elbvorland (s. Abbildung 5), amtliche Lagefestpunkte in Deichnähe sowie zur Deicherfassung mit GPS bestimmte Lage- und Höhenfestpunkte (s. Abbildung 6) verwendet. Mehrere für die Kontrollmessungen der Höhe vorgesehene amtliche Höhefestpunkte können allerdings wegen der schlechten Festpunktbeschreibung und einer ungenauen Lagekoordinate nicht aufgefunden werden. Auch einige der Deicherfassungspunkte können nicht verwendet werden, da sie infolge von Deicherhöhungen und dem Neubau der Deichverteidigungswege nicht mehr existieren. Um dennoch in der Nähe jedes gemessenen Profils die GNSS-Messung zu kontrollieren, werden zur Verdichtung der Kontrollpunkte einige Deichkilometrierungsmarken (s. Abbildung 4) mehrfach bestimmt. Über die mindestens doppelte, unabhängige Aufnahme der Deichmarken gelten die Messungen als richtig und zuverlässig, sodass ebenfalls von kontrollierten Punkten gesprochen werden kann (vgl. Bauer, 2011: 340). Welche Kontrollpunkte in der Nähe des jeweiligen Profils liegen, wird in den zusätzlich zum digitalen Feldbuch geführten analogen Feldbüchern vermerkt (s. Anhang V).



Abbildung 5: amtlicher Höhenfestpunkt

Abbildung 6: Deicherfassungspunkt

Bei der Messung der Geländepunkte der Elbquerprofile wird als Bezugsachse die Flucht der historischen Digitalisierungspunkte der Lagepläne (s. Kapitel 2.3.2) verwendet. Bezogen auf diese Achse werden die Geländepunkte so gewählt, dass sie das Gelände bis zur Uferlinie der Elbe annähern (vgl. Möser et al., 2002: 25). Mit Ausnahme markanter Geländestrukturen, wie Deichen oder Gräben, werden je nach Gelände alle 25 m bis 50 m Geländepunkte erfasst, wobei darauf geachtet wird, dass die Abweichung von der Definitionssachse des Profils nicht größer als 5 cm ist. Aufgrund von teilweise starkem Bewuchs im Elbvorland (s. Abbildung 7), der eine

GNSS-Messung ausschließt, können einige der Profile nicht lückenlos erfasst werden. Ebenso im Profil verlaufende Altarme der Elbe und sogenannte „Kuhlen“ (s. Abbildung 8) verhindern eine GNSS-Messung mit einfachem Lotstab, sodass Datenlücken entstehen. Als weitere Ursache für eine unvollständige GNSS-Aufnahme ist die dichte Bebauung in der Altstadt von Lauenburg (s. Abbildung 9) zu nennen. Damit die Ursache der Datenlücken bei der späteren Erstellung der Elbquerprofile aus den gemessenen Geländepunkten angegeben werden kann, werden sie im analogen Feldbuch vermerkt. Des Weiteren werden die Uferlinie, gemessene Punkte mit schlechtem DOP-Wert, nachträglich zu berechnende streng vertikale Höhenunterschiede und zusätzlich zum Profilverlauf gemessene Punkte im Feldbuch vermerkt. (s. Anhang V).



Abbildung 7: Bewuchs im Elbvorland



Abbildung 8: Altarm der Elbe im Elbvorland

Obwohl ein zwingend benötigter Geländepunkt mit einem PDOP-Wert von größer als drei bestimmt ist, wird generell bei der Speicherung von Punktkoordinaten darauf geachtet, dass der PDOP-Wert unter drei liegt. Am häufigsten treten PDOP-Werte unterhalb von zwei auf, weshalb von einer guten Verteilung der Satelliten am Firmament ausgegangen werden kann (s. Anhang VI). Begünstigt werden die guten PDOP-Werte durch den weitestgehend störungsfreien Satellitenempfang. Infolgedessen können auch Mehrwegeeffekte und Signalbeugungen als Fehlerquellen grundsätzlich ausgeschlossen werden. Lediglich in der Nähe von Wasseroberflächen und bei dichtem Bewuchs sind geringe Auswirkungen durch Mehrwegeausbreitungen zu erwarten. (vgl. Bauer, 2011: 337) Neben geringen PDOP-Werten ist bei der GNSS-Messung zu berücksichtigen, dass vor der Messung der Geländepunkte die Initialisierung, also die Lösung der Mehrdeutigkeiten, abgeschlossen ist (vgl. Witte & Sparla, 2011: 439).



Abbildung 9: Häuserflucht in der Lauenburger Altstadt

3.1.5 Auswertung der GNSS-Messung

Dadurch, dass die erfassten Geländepunkte bereits im Koordinatensystem ETRS89/UTM und im Höhenbezugssystem DHHN2016 vorliegen (s. Anhang VI), beschränkt sich die Auswertung der GNSS-Messung im Wesentlichen auf die Beurteilung der auftretenden Abweichungen zu den Sollkoordinaten der Kontrollpunkte und der Einschätzung der Genauigkeit der GNSS-Messung. Einzige Ausnahme bildet die manuelle Berechnung der im Außendienst mittels Maßband gemessenen streng vertikalen Höhenunterschiede, wie beispielsweise einer Mauer. Hierfür werden die Lagekoordinaten des hochgelegenen Punktes übernommen und von der Höhe wird die gemessene Höhendifferenz subtrahiert.

Wie aus dem GNSS-Messprotokoll (s. Anhang VI) ersichtlich wird, liegt die berechnete Genauigkeit der gemessenen Geländepunkte sowohl für die Lage als auch für die Höhe fast immer in der für den Service HEPS angegebenen Genauigkeitsspanne (vgl. AdV, 2017b: 7). Um neben der vom Empfänger berechneten Genauigkeit der bestimmten Position einen Vergleichswert zu erhalten, werden die Abweichungen zwischen Soll- und Istwert für die aufgenommenen Kontrollpunkte berechnet (s. Tabelle 1). Anhand der gemessenen Abweichungen der Kontrollpunkte ist außerdem eine Beurteilung eventuell auftretender Ungenauigkeiten der Transformation ins Gebrauchssystem infolge von Netzspannungen möglich (vgl. Bauer, 2011: 359 f.). Die Abweichungen betragen für die Lagekoordinaten im Maximum 1,1 cm und bestätigen somit die hohe Lagegenauigkeit der gemessenen Punkte. Auch die Abweichungen vom Mittelwert der bestimmten Deichmarken überschreiten die angegebene Lagegenauigkeit von 2 cm des HEPS nicht, sondern liegen sogar deutlich darunter. (s. Tabelle 1) Für die Beurteilung der Abweichungen der gemessenen Höhen von den Sollhöhen sind, außer der reinen HEPS Genauigkeit (s_{HEPS}) zwischen 2 cm und 3 cm, die Genauigkeit der zur Umformung in Gebrauchshöhen verwendeten Höhenbezugsfläche GCG 2016 (s_{GCG}) (vgl. Bauer, 2011: 77) und die Genauigkeit der gemessenen Höhe des mechanischen Referenzpunktes des Empfängers über Grund (s_{REF}) zu berücksichtigen. Darüber hinaus kann auch die Genauigkeit der Antennenkalibrierung die

Höhe um einige Millimeter verfälschen (vgl. Bauer, 2011: 333). Da die Genauigkeit der Antennenkalibrierung nicht bekannt ist, wird die Genauigkeit des bestimmten mechanischen Referenzpunktes als etwas schlechter geschätzt, um eventuelle Ungenauigkeiten der Antennenkalibrierung zu berücksichtigen. Die Genauigkeit der Höhe des mechanischen Referenzpunktes wird mit 0,5 cm geschätzt und das Quasigeoid GCG 2016 ist im Flachland mit einer Genauigkeit von 0,5 cm bis 1 cm bestimmt (vgl. BKG, 2017: 5). Über die bisherigen Einflussgrößen hinausgehend ist auch zu bedenken, dass bis auf den Höhenpunkt 2629-68 alle anderen Höhen im Höhenbezugssystem DHHN92 vorliegen. Die Abweichungen zwischen DHHN2016 und DHHN92 (s_{DHHN}) können bis zu $\pm 2,8$ cm betragen (LGLN, 2017b). Entsprechend dem Ansatz von (2.1) können die zu erwartenden Gesamtabweichungen der gemessenen Höhen von den Sollhöhen (s_{Hges}) berechnet werden über:

$$s_{Hges} = \sqrt{s_{HEPS}^2 + s_{GCG}^2 + s_{REF}^2 + s_{DHHN}^2} . \quad (3.1)$$

Unter Einsetzen der angegebenen Größen in (3.1) ergibt sich eine maximale Abweichung von $\pm 3,202$ cm, wenn die Sollhöhen bereits in DHHN2016 vorliegen und eine maximale Abweichung von $\pm 4,253$ cm, wenn sich die Sollhöhen auf das DHHN92 beziehen. Der Vergleich der geschätzten Abweichung mit der tatsächlichen Abweichung zeigt, dass, bis auf den Punkt 2629-68, alle gemessenen Höhen der Kontrollpunkte die Genauigkeitserwartungen erfüllen. Obwohl die Abweichungen der GNSS-Messungen von den Sollhöhen den berechneten Erwartungsbereich nicht überschreiten, fällt auf, dass die auf einigen Kontrollpunkten mehrfach durchgeführten GNSS-Beobachtungen Schwankungen von teilweise 2 cm bis 3 cm offenbaren. (s. Tabelle 1) Zu begründen sind diese Schwankungen mit der Genauigkeit des HEPS von ebenfalls 2 cm bis 3 cm in der Höhe (vgl. AdV, 2017b: 7). Die über die berechnete Spanne hinausgehende Abweichung des Punktes 2629-68 ist unerwartet, da dieser Punkt bereits eine aktuelle Höhe im DHHN2016 besitzt und daher eine viel geringere Abweichung aufweisen müsste. Wegen der guten Übereinstimmung der mehrfach gemessenen Deichmarken und der anderen Kontrollpunkte ist eine fehlerbehaftete Transformation in Gebrauchssystem allerdings auszuschließen (s. Tabelle 1). Vielmehr ist von einer Bewegung des Höhenpunktes 2629-68 auszugehen. Weiterhin ist die GNSS-Messung, auf Grundlage der überwiegend geringen Abweichungen der gemessenen Kontrollpunkte von deren Sollkoordinaten, als kontrolliert und zuverlässig anzusehen.

Tabelle 1: Soll- und Istwerte der GNSS-Kontrollpunkte im Vergleich

Soll- und Istwerte der GNSS-Kontrollpunkte im Vergleich							
	= Soll- bzw. Mittelwert			= Ist- bzw. Messwert			
Punktnummer	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Differenz Lage [m]	Höhe [m]	Differenz Höhe [m]	Datum	Uhrzeit
G96-06002 (Lage u. Höhe)	32609222,207	5914501,392	-	8,302	-	-	-
	32609222,210	5914501,391	0,003	8,306	-0,004	28.10.2017	11:39
	32609222,209	5914501,388	0,004	8,305	-0,003	28.10.2017	16:32
G36-81001 (Lage u. Höhe)	32603461,150	5914233,396	-	10,579	-	-	-
	32603461,152	5914233,393	0,004	10,542	0,037	28.10.2017	12:43
2629-68 (Höhe)	-	-	-	16,412	-	-	-
	-	-	-	16,459	-0,047	28.10.2017	12:34
2630-301 (Höhe)	-	-	-	8,347	-	-	-
	-	-	-	8,345	0,002	30.10.2017	15:19
356-00450 (Lage)	32615014,035	5906714,897	-	-	-	-	-
	32615014,027	5906714,898	0,008	-	-	27.10.2017	08:27
G58-81001 (Lage u. Höhe)	32615053,232	5906812,768	-	12,656	-	-	-
	32615053,233	5906812,768	0,001	12,681	-0,025	27.10.2017	08:39
	32615053,237	5906812,771	0,006	12,679	-0,023	30.10.2017	08:09
	32615053,232	5906812,761	0,007	12,686	-0,030	30.10.2017	14:50
2630-314 (Höhe)	-	-	-	8,460	-	-	-
	-	-	-	8,424	0,036	28.10.2017	07:22
351-00230 (Lage)	32615426,544	5911843,006	-	-	-	-	-
	32615426,548	5911843,001	0,006	-	-	28.10.2017	07:06
G53-81006 (Lage u. Höhe)	32615535,720	5911738,069	-	12,352	-	-	-
	32615535,717	5911738,068	0,003	12,374	-0,022	28.10.2017	09:52
	32615535,718	5911738,074	0,005	12,376	-0,024	30.10.2017	07:26
	32615535,729	5911738,065	0,010	12,346	0,006	30.10.2017	16:05
G52-81004 (Lage u. Höhe)	32614980,494	5910758,115	-	12,557	-	-	-
	32614980,489	5910758,109	0,008	12,593	-0,036	28.10.2017	07:52
	32614980,486	5910758,108	0,011	12,592	-0,035	30.10.2017	07:33
	32614980,493	5910758,111	0,004	12,556	0,001	30.10.2017	15:58
2630-612 (Höhe)	-	-	-	9,352	-	-	-
	-	-	-	9,349	0,003	30.10.2017	10:54
340-01100 (Deichmarke)	32614501,314	5910042,133	-	8,737	-	-	-
	32614501,316	5910042,130	0,004	8,709	0,028	27.10.2017	13:51
	32614501,314	5910042,133	0,000	8,748	-0,011	27.10.2017	15:21
	32614501,316	5910042,128	0,005	8,742	-0,005	30.10.2017	07:49
	32614501,313	5910042,139	0,006	8,725	0,012	30.10.2017	15:48
348-01039 (Deichmarke)	32614797,483	5908883,487	-	9,144	-	-	-
	32614797,483	5908883,488	0,001	9,140	0,004	27.10.2017	13:58
	32614797,483	5908883,491	0,004	9,162	-0,018	27.10.2017	15:13
	32614797,482	5908883,484	0,003	9,137	0,007	30.10.2017	07:58
	32614797,484	5908883,483	0,004	9,127	0,017	30.10.2017	15:40

Neben der Beurteilung der Richtigkeit und der Zuverlässigkeit der GNSS-Messung ist anhand ähnlicher Parameter eine Einschätzung der Genauigkeit der aufgenommenen Geländepunkte vorzunehmen. Gemäß dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zur Schätzung der erreichbaren Genauigkeit (vgl. Kahmen, 2006: 19 f.) kann wiederum der Ansatz von (2.1) verwendet werden. Für die Lagegenauigkeit (s_L) zählen zu den Eingangsparametern die Genauigkeit des HEPS (s_{HL}) und auftretende Zentrierfehler (s_{ZL}), die aus der stativfreien Zentrierung resultieren. Einflüsse der Ungenauigkeit der Antennenkalibrierung sind für die Lagekomponenten zu vernachlässigen (vgl. Bauer, 2011: 333). Folglich berechnet sich die Lagegenauigkeit aus:

$$s_L = \sqrt{s_{HL}^2 + s_{ZL}^2}. \quad (3.2)$$

Der möglicherweise auftretende Zentrierfehler wird auf 1 cm geschätzt und laut AdV (2017: 7) beträgt die Lagegenauigkeit des HEPS zwischen 1 cm und 2 cm. Entsprechend (3.2) liegen die gemessenen Geländepunkte mit einer Lagegenauigkeit zwischen $\pm 1,414$ cm und $\pm 2,236$ cm vor. Im Gegensatz zur Lagegenauigkeit setzt sich die Höhengenaugigkeit aus mehr als zwei Parametern zusammen. Wie bereits bei der Abschätzung der zu erwartenden Abweichungen der gemessenen Kontrollpunktkoordinaten von den Sollkoordinaten gehören zu den die Höhengenaugigkeit der Geländepunkte beeinflussenden Parametern die HEPS Höhengenaugigkeit (s_{HEPS}), die Genauigkeit der Höhenbezugsfläche GCG 2016 (s_{GCG}) und die Genauigkeit der Höhenbestimmung des mechanischen Referenzpunktes (s_{REF}). Ebenfalls zu berücksichtigen wäre die Genauigkeit der Antennenkalibrierung (vgl. Bauer, 2011: 333), die jedoch nicht bekannt ist, weshalb die Höhenbestimmung des mechanischen Referenzpunktes verschlechtert wird, um eventuelle Einflüsse abzufangen. Die Größenordnungen von (3.1) werden für die Genauigkeitsabschätzung der Höhe der Geländepunkte übernommen. Zusätzlich zu den bisher genannten Faktoren ist auch für die Höhe eine Zentrierungsgenauigkeit (s_{ZL}) von 1 cm infolge des fehlenden Statives anzunehmen. Insgesamt ergibt sich die Höhengenaugigkeit der Geländepunkte (s_H) somit aus:

$$s_H = \sqrt{s_{HEPS}^2 + s_{GCG}^2 + s_{REF}^2 + s_{ZL}^2}. \quad (3.3)$$

Die aus (3.3) berechnete geschätzte Genauigkeit der Höhen der Geländepunkte beträgt zwischen $\pm 2,345$ cm und $\pm 3,354$ cm. Somit entspricht die erreichte Höhengenaugigkeit in etwa dem 1,5-fachen der Lagegenauigkeit.

3.2 Gewässerpeilung

3.2.1 Grundprinzip der Gewässerpeilung

In der Gewässervermessung werden Verfahren zur Positionsbestimmung des Schiffes und Methoden zur Messung von Tiefenwerten miteinander kombiniert, um Aussagen über die Beschaffenheit des Gewässerbodens treffen zu können (vgl. Ehlers & Schiewe, 2012: 31 f.).

Zur Bestimmung der Wassertiefe werden Echolote eingesetzt, deren Schwinger Schallwellen aussenden und aus der Laufzeit der reflektierten Signale die Tiefe ermitteln. Da für die Tiefenberechnung stets das zuerst reflektierte Signal verwendet wird, ist die Bodenabdeckung der Signale so zu wählen, dass auch bei geböschtem oder unregelmäßigem Gewässerboden eine den Genauigkeitsvorgaben entsprechende Aufnahme des Gewässerbodens gewährleistet ist. Gesteuert wird die Bodenabdeckung über den Öffnungswinkel des ausgestrahlten Signals. Der Öffnungswinkel wiederum steht im Zusammenhang mit der Frequenz des Schallwellensignals und der Größe des Schwingers. Folglich gelten neben dem Öffnungswinkel auch die Frequenz des Signals und die Größe des Schwingers als wichtige Parameter der Echolotvermessung. Grundsätzlich können Echolote in Einstrahlecholote und Fächerecholote unterteilt werden. Während Einstrahlecholote nur ein Signal aussenden, verbreitet der Schwinger eines Fächerecholotes eine Vielzahl einzelner Signale mit unterschiedlichen Austrittswinkeln gleichzeitig. Aufgrund dessen wird mit einem Fächerecholot in derselben Zeitspanne eine größere Fläche des Gewässerbodens erfasst. Zu bedenken ist jedoch, dass die Genauigkeit der gemessenen Tiefe mit zunehmendem Austrittswinkel abnimmt. (vgl. de Jong et al., 2002: 319–327)

Infolge der nicht konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle im Wasser sind die per Echolot bestimmten Tiefenwerte mit den Werten eines sogenannten Schallgeschwindigkeitsprofils zu korrigieren. Dieses wird mit einem Sound Velocity Profiler gemessen und enthält die tiefenabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in der Wassersäule. Beeinflusst wird die Schallgeschwindigkeit durch Temperatur, Salzgehalt, Druck und Dichte des Wassers. (vgl. IHB, 2011: 126–128) Die Genauigkeit der Tiefenmessung unter Berücksichtigung der Ausbreitungsgeschwindigkeit beträgt im Flachwasser zwischen 0,05 m bis 0,2 m. Bei größeren Tiefen ist eine Genauigkeit von 0,8 ‰ der Tiefe anzunehmen. (vgl. Hake et al., 2002: 313)

Im Bereich der Positionsbestimmung werden inzwischen vielfach GNSS basierte Lösungen verwendet (vgl. de Jong et al., 2002: 330). Vor allem die Anwendung differentieller Techniken ermöglicht eine enorme Genauigkeitssteigerung der Positionierung (vgl. IHB, 2011: 8). Aufgrund einer ausführlichen Beschreibung der Positionsbestimmung mit GNSS in Kapitel 3.1

wird hier auf eine Erläuterung der Methodik verzichtet. Neben GNSS eignen sich auch optische Systeme und Lasersysteme zur genauen Positionierung. Bei diesen Systemen werden an den Schiffen angebrachte Reflektoren vom Land aus dauerhaft verfolgt, um aus den Beobachtungen die Position des Schiffes zu berechnen. Wegen der Notwendigkeit uneingeschränkter Sichten sind diese Systeme jedoch auf eine Reichweite von 10 km begrenzt und können daher nur bei kleinflächigen Aufgaben eingesetzt werden. (vgl. de Jong et al., 2002: 255)

Die gemessenen Tiefenwerte beziehen sich vorerst auf den momentanen Wasserspiegel. Da allerdings im Regelfall ein Bezug zu einem definierten Höhensystem gewünscht ist, sind die gemessenen Tiefen auf die entsprechende Bezugshöhe zu reduzieren. (vgl. de Jong et al., 2002: 252) Dieser Vorgang wird als Beschickung bezeichnet und ist in die direkte und indirekte Beschickung zu unterteilen. Die indirekte Beschickung beruht auf der Annahme, dass die Höhe des Wasserspiegels am Messschiff identisch ist mit der Höhe des Wasserspiegels am nächstgelegenen Pegel. Deshalb wird der Höhenbezug bei diesem Verfahren über die Differenz zwischen Wasserstand und Pegelnullpunkt hergestellt. Bei der direkten Beschickung hingegen wird die Höhe direkt auf das Messschiff durch die dreidimensionale Positionsbestimmung der GNSS-Antenne übertragen. Auch wenn die gemessenen Höhen ellipsoidische Höhen sind, können sie mittels der bekannten Quasigeoidundulation in physikalische Quasigeoidhöhen umgerechnet werden. Die Transformation der gemessenen Tiefenwerte ins Bezugssystem wird anschließend über das Schiffskoordinatensystem realisiert, in dem alle Sensoren dreidimensional bestimmt sind. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen sind bei der Reduzierung der gemessenen Tiefen ins Bezugssystem zusätzlich die Lagewinkel des Schiffes zu berücksichtigen, aus denen eine Rotationsmatrix gebildet wird, die in die Transformation einfließt. (vgl. Böder, 2002: 12–15) Zu den Lagewinkeln gehören die Einflüsse aus roll, pitch sowie heave, welche durch einen Bewegungssensor, auch inertielle Messeinheit genannt, bestimmt werden. Darüber hinaus ist auch der als heading bezeichnete Kurs des Schiffes mittels eines Kreiselkompasses zu ermitteln. (vgl. IHB, 2011: 133 f.)

3.2.2 Beschreibung der verwendeten Peildaten

Das zur Vermessung des Gewässerbettes eingesetzte Messschiff „Kugelbake“ verfügt über zwei GNSS-Antennen, eine inertielle Messeinheit mit eingebundenem Kreiselkompass und ein Fächerecholot zur Datenerfassung. Darüber hinaus wird vor und nach jedem Messvorgang die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle in der Wassersäule mit einem Sound Velocity Profiler gemessen. Für jede Messung mit dem Sound Velocity Profiler werden automatisch

zwei Dateien angelegt, wobei ein Geschwindigkeitsprofil den Absinkvorgang und das andere Geschwindigkeitsprofil den Auftauchvorgang beschreibt (s. Anhang VII).

Bei dem eingesetzten Fächerecholot handelt es sich um das ATLAS Fansweep 20-200, welches die Wassertiefe mit einer Genauigkeit von $0,05 \text{ m} \pm 0,02 \%$ der Wassertiefe bestimmt. Das mit einer Frequenz von 200 kHz messende Fächerecholot ist in der Lage Wassertiefen zwischen 0,5 m und 300 m zu erfassen, wobei die erreichbare Bodenabdeckung maximal dem zwölffachen der Wassertiefe entspricht. (vgl. ATLAS, 2009) Für die Bestimmung der Schiffslagewinkel wird ein Octans III der Firma IXSEA verwendet. Das Octans besteht neben einer inertialen Messeinheit aus einem Glasfaser Kreiselkompass, wodurch eine Erfassung aller Einflüsse von roll, pitch, heave und heading gegeben ist (vgl. IXSEA, 2004: 11). Die zur dreidimensionalen Positionsbestimmung eingesetzten GNSS-Antennen empfangen neben GPS-Satellitensignalen auch GLONASS-Satellitensignale und ermitteln ihre Position unter Verwendung der von SAPOS bereitgestellten Korrekturdaten. Um eine hohe Genauigkeit zu erreichen, wird der HEPS von SAPOS genutzt, der eine Genauigkeit von 1 cm bis 2 cm in der Lage und 2 cm bis 3 cm in der Höhe ermöglicht (vgl. AdV, 2017b: 7). Da eine korrekte Transformation ins Gebrauchssystem nachzuweisen ist, werden vor oder nach der Gewässervermessung an Land befindliche, koordinierte Kontrollpunkte aufgesucht und die Abweichung zwischen GNSS-Koordinate und Sollkoordinate bestimmt (vgl. Bauer, 2011: 359 f.).

Damit die separaten Messwerte der Datenerfassungsgeräte bei der Auswertung miteinander in Beziehung gesetzt werden können, sind die Instrumente in einem lokalen Schiffskoordinatensystem eingemessen. Die Festlegung des Schiffskoordinatensystems der „Kugelbake“ ist über vier an Bord befindliche Netzpunkte realisiert. Bis auf die GNSS-Antenne können die lokalen Koordinaten der eingesetzten Geräte dem Auswerteprotokoll entnommen werden (s. Anhang VII). Ausgehend von den Koordinatendifferenzen im lokalen Schiffskoordinatensystem können die gemessenen Tiefenwerte unter Verwendung der dreidimensionalen Position der GNSS-Antennen und der bestimmten Lagewinkel ins Lage- und Höhenbezugsystem transformiert werden (vgl. Böder, 2002: 15). Die ermittelten Lagekoordinaten liegen als Gauß-Krüger-Koordinaten vor und der Höhenbezug wird zum Höhenbezugsystem DHHN2016 hergestellt. Zusätzlich zur Koordinatenberechnung und direkten Beschickung werden die Tiefenwerte mit den Geschwindigkeitsprofilen der Sound Velocity Profiler korrigiert, wobei die Interpolation über die Zeit erfolgt. (s. Anhang VII)

Bereits beim Import der Koordinaten in die Auswertesoftware werden die Daten gefiltert. Der Filter ist so definiert, dass nur Punkte übernommen werden, die eine Differenz zum vorherigen Punkt von mehr als 0,2 m in der Lage und 0,05 m in der Höhe aufweisen. Bezüglich der

Genauigkeit der aus der Gewässervermessung hervorgegangenen Einzelmessungen wird eine durchschnittliche Standardabweichung im Bereich von ± 5 cm bis ± 6 cm angegeben. Bevor aus den verbleibenden Punkten ein Grid mit einer Gitterweite von 1 m berechnet wird, sind die Daten zu sichten und einer Plausibilitätskontrolle zu unterziehen. Für die anschließende Gridberechnung wird der Modellansatz eines Hyperboloids gewählt, dessen berechnete Standardabweichung für die verwendeten Peildaten zwischen $\pm 4,6$ cm und $\pm 5,2$ cm liegt. (s. Anhang VII)

Zu beachten ist, dass die jährlich vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt durchgeführte Gewässerpeilung der Elbe lediglich von Bühnenkopf zu Bühnenkopf abgewickelt wird. Daher liegen auch die erzeugten Punktwolken nur für den vermessenen Bereich der Elbe vor und es entstehen Datenlücken, die bis zur Uferlinie reichen. Die Größe der Datenlücken ist davon abhängig, wie weit die Bühnen in die Elbe hineinragen und ist demnach von Profil zu Profil unterschiedlich. In den erstellten Profilen werden die Datenlücken, die aus fehlenden Peildaten resultieren, gekennzeichnet und entsprechend beschriftet (s. Anhang VIII).

3.3 Erstellung der aktuellen Elbquerprofile

Zur Erstellung einheitlicher aktueller Elbquerprofile sind die getrennt voneinander vorliegenden Datensätze der Peilungsvermessung und der GNSS-Messung zu verknüpfen. Während es sich bei den mittels GNSS bestimmten Geländepunkten bereits um konkrete Profilmomente handelt, liegen die Peildaten bisher als regelmäßige Punktwolken in einem 1 m Raster vor. Darüber hinaus sind die Peildaten nicht im Koordinatensystem ETRS89/UTM erfasst, sondern im Gauß-Krüger-Koordinatensystem. (s. Anhang VII) Folglich ist vor der Zusammenführung der Datensätze eine Bearbeitung der Peildaten vorzunehmen.

Zunächst werden die Punktwolken der Peildaten vom vierten Streifen des Gauß-Krüger-Koordinatensystems in die Zone 32 des ETRS89/UTM-Koordinatensystems transformiert, damit die Koordinaten der aktuellen Profildaten in einem einheitlichen Bezugssystem vorliegen. Bei der Höhe ist keine Anpassung erforderlich, da beide Datensätze im Höhenbezugssystem DHHN2016 definiert sind. Im Anschluss an die Transformation wird die Datenmenge der Peildaten, ausgehend von der Lage der digitalisierten historischen Elbquerprofile, reduziert, um das Datenhandling der Punktwolken zu vereinfachen und Rechenprozesse zu beschleunigen. Aus den verbleibenden Rasterpunkten der regelmäßigen Punktwolken wird für jedes Profil ein digitales Geländemodell per Dreiecksvermaschung erzeugt. Kennzeichen der Dreiecksvermaschung ist, dass die einzeln vorliegenden Rasterpunkte durch Dreiecksseiten miteinander verbunden werden (vgl. Bill, 2016: 378). Ferner bildet die Dreiecksvermaschung die Grundlage für den Übergang von punktförmigen Daten hin zu linienhaften oder flächenhaften Strukturen

(vgl. Kappas, 2001: 86). Auch bei den Peildaten entsteht ein flächenhaftes Geländemodell infolge der Dreiecksvermaschung, sodass über den Schnitt zwischen Dreiecksseite und dem vorgegebenen Profilverlauf konkrete Profilpunkte konstruiert werden können.

Nachdem nun sowohl die GNSS-Messungen als auch die Peildaten über konkrete Profilpunkte festgelegt sind, kann mit der Profilerstellung begonnen werden. Hierfür werden die über die digitalisierten historischen Profilpunkte erzeugten Achsen verwendet, damit eine rechnerische Lageidentität der beiden Profilepochen für den späteren Vergleich (s. Kapitel 4.2) gewährleistet ist. Ein weiterer Vorteil des Gebrauchs derselben Definitionssachse für beide Epochen ist, dass die Stationierung der historischen Elbquerprofile ebenfalls für die aktuellen Elbquerprofile übernommen werden kann. Folglich ist die Punktlage der beiden Epochen über einen identischen Nullpunkt bestimmt und vergleichbar. Aufgrund der in Kapitel 2.3.2 dargelegten Lagegenauigkeit der digitalisierten Profilpunkte ist allerdings eine in der Örtlichkeit bestehende Lageidentität der Profilepochen mit einer höheren Genauigkeit als die der Digitalisierung auszuschließen. Bezüglich der Darstellungsmaßstäbe der aktuellen Elbquerprofile werden analog zu den historischen Elbquerprofilen ein Längenmaßstab von 1:2000 und einen Höhenmaßstab von 1:100 gewählt. Weiterhin werden bei der Visualisierung der aktuellen Elbquerprofile die Datenlücken, die sowohl bei der GNSS-Messung als auch bei der Gewässerpeilung vorliegen, gekennzeichnet und beschriftet. (s. Anhang VIII)

4 Vergleich zwischen historischen und aktuellen Elbquerprofilmessungen

4.1 Auswirkung unterschiedlicher Höhenbezugssysteme

Bevor die beiden Profilepochen hinsichtlich der Veränderungen im Geländequerschnitt untersucht werden können, ist darauf hinzuweisen, dass sich die Geländehöhen der historischen und der aktuellen Elbquerprofile auf unterschiedliche Höhenbezugssysteme beziehen. Während die historischen Elbquerprofile bedingt durch den Erfassungszeitraum um 1900 als NN-Höhen im „alten“ System des Urnivellements vorliegen (s. Anhang II), handelt es sich bei den aktuellen Elbquerprofilen um NHN-Höhen im Höhenbezugssystem DHHN2016 (s. Anhang VI u. VII). Zur Festlegung der Geoidbezugsfläche der NN-Höhen im „alten“ System wurde ausgehend vom Amsterdamer Pegelnullpunkt ein Nivellement zur Berliner Sternwarte durchgeführt. Die Berechnungsgrundlage für das erste Höhensystem Deutschlands waren die rohen Nivellementsdaten der Höhenmessungen. (vgl. Torge, 2003: 292) Im Gegensatz dazu wird die Höhenbezugsfläche der NHN-Höhen des DHHN2016 über das unter Berücksichtigung von Schweremessungen berechnete Quasigeoid GCG 2016 festgelegt, wobei die Datumsfestlegung des DHHN92 beibehalten wird (vgl. AdV, 2017a). Folglich bezieht sich das vertikale Datum des

DHHN2016 auf die geopotenzielle Kote des Knotenpunktes Wallenhorst und somit auf den mittleren Meeresspiegel in Amsterdam (vgl. Torge, 2003: 293).

Da Höhen im Regelfall nur miteinander verglichen werden können, wenn sie in identischen Bezugssystemen vorliegen (vgl. Kahmen, 2006: 395), ist eine Analyse der zu erwartenden Differenzen zwischen beiden Höhenbezugssystemen vorzunehmen. Erschwert wird die Analyse allerdings dadurch, dass nur noch wenige Höhenpunkte existieren, die sowohl über eine Höhenangabe im „alten“ System als auch im DHHN2016 verfügen (vgl. Jahn et al., 2011: 3). Um dennoch die Auswirkungen der unterschiedlichen Höhenbezugssysteme einzuschätzen, wird eine Annäherung der Abweichungen zwischen den Höhenbezugssystemen über die Höhenfestpunkte erster Ordnung an der Kirche in Quickborn im Wendland und an der Johanniskirche in Lüneburg vorgenommen. Obwohl der Höhenfestpunkt in Lüneburg über keine Höhe im „alten“ System verfügt, sondern lediglich in mehreren Höhenstatus seit 1950 bestimmt wurde, wird angesichts der Entfernung von ca. 25 km zum untersuchten Elbabschnitt angenommen, dass die Größenordnung der Differenzen zwischen den Höhenstatus im Sinne der Nachbarschaft auf die Elbquerprofile übertragen werden kann. Der Vergleich einiger Differenzen zwischen den Höhenstatus der beiden Höhenfestpunkte soll zeigen, ob diese ähnlich sind, sodass die Höhenänderungen des in etwa 50 km entfernten Höhenpunktes in Quickborn ebenfalls für die Elbquerprofile übernommen werden können. (s. Anhang IX)

Tabelle 2: Differenzen der Höhenstatus am HFP 2728 00010 in Lüneburg

Differenzen der Höhenstatus am HFP 2728 00010 in Lüneburg			
Höhenstatus	DHHN2016_NH	DHHN92_NH	DHHN12_NI120
DHHN2016_NH		-0,019	-0,019
DHHN92_NH	0,019		0,000
DHHN12_NI120	0,019	0,000	
Abweichungen in [m]			

Tabelle 3: Differenzen der Höhenstatus am HFP 2833 00005 in Quickborn

Differenzen der Höhenstatus am HFP 2833 00005 in Quickborn			
Höhenstatus	DHHN2016_NH	DHHN92_NH	DHHN12_NI120
DHHN2016_NH		-0,021	-0,020
DHHN92_NH	0,021		0,001
DHHN12_NI120	0,020	-0,001	
Abweichungen in [m]			

Aus den Tabellen 2 und 3 ist ersichtlich, dass sich die Differenzen zwischen den Höhenstatus der beiden Höhenfestpunkte um maximal 2 mm voneinander unterscheiden. Deshalb wird die Abweichung in Höhe von 1 cm zwischen „altem“ System und DHHN2016 für den Höhenfestpunkt in Quickborn (s. Anhang IX) als geschätzte Abweichung zwischen den Höhen der beiden Bezugssysteme für die Elbquerprofile übernommen.

4.2 Gegenüberstellung der beiden Querprofilepochen

Um Veränderungen im Geländequerschnitt der Elbe aufzuzeigen, werden die beiden Profilepochen der untersuchten Elbquerprofile in gemeinsamen Profilplänen dargestellt. Zur deutlichen Abgrenzung der beiden Epochen voneinander werden die aktuellen Querprofile in Rot und die historischen Elbquerprofile in Blau eingefärbt. Als Maßstäbe für die Stationierung und für die Höhe werden die Maßstäbe der historischen Elbquerprofile von 1:2000 bzw. 1:100 übernommen. Zu beachten ist, dass nicht alle konkreten Profilpunkte mit der zugehörigen Stationierung und Höhe beschriftet sind, damit die Übersichtlichkeit der Profilpläne nicht mehr als nötig beeinträchtigt wird. Der Bezugshorizont der Pläne wird zumeist einheitlich mit 0,00 m ü. NN/NHN definiert, insofern keine negativen Höhen vorliegen. Ist dies der Fall, dann beziehen sich die dargestellten Profilverläufe auf einen Bezugshorizont von – 5,00 m ü. NN/NHN. Zur Kennzeichnung der bestehenden Datenlücken in den aktuellen Elbquerprofilen wird der Profilverlauf unterbrochen und mit der jeweiligen Ursache beschriftet. (s. Anhang VIII)

Für die Beurteilung der Veränderungen im Geländequerschnitt ist die Standardabweichung bzw. Genauigkeit der Profile zu bedenken. Infolge der Streuung der möglichen Fehler innerhalb des durch die Standardabweichung festgelegten Bereiches, können lediglich Veränderungen des Geländequerschnittes nachgewiesen werden, die größer sind als die Standardabweichung selbst. Zur Berechnung der geschätzten Standardabweichung ist der Ansatz (2.1) zu verwenden, über den die Standardabweichung der Summe der einzelnen Einflussgrößen gebildet wird. (vgl. Kahmen, 2006: 17–20) Bezüglich der Geländehöhen gehören zu den Einflussfaktoren die Höhengenaugigkeit der GNSS-Messung (s_H) bzw. die Standardabweichung der Peilungsvermessung (s_{Peil}), die Abweichung zwischen den Höhenbezugssystemen (s_{AH}) und die geschätzten Höhenfehler der historischen Elbquerprofile (s_{HDi}), bedingt durch die Lageungenaugigkeit der Digitalisierung. Entsprechend ergeben sich die Standardabweichungen zum Nachweis von Veränderungen an Land (s_{VHL}) und für das Gewässerbett (s_{VHG}) über:

$$s_{VHL} = \sqrt{s_H^2 + s_{AH}^2 + s_{HDi}^2} \quad \text{und} \quad (4.1)$$

$$s_{VHG} = \sqrt{s_{Peil}^2 + s_{AH}^2 + s_{HDi}^2} \quad (4.2)$$

Wird die Genauigkeit der genannten Einflussfaktoren über einen Genauigkeitsbereich definiert, wird jeweils die Obergrenze für die Berechnung genutzt. Als Eingangsgrößen werden für s_H die berechnete Standardabweichung von $\pm 3,354$ cm (s. Kapitel 3.1.5), für s_{Peil} die im Protokoll angegebene Genauigkeit der Einzelmessungen von ± 6 cm (s. Anhang VII), für s_{AH} die Abweichung von 1 cm (s. Kapitel 4.1) und für s_{HDi} der geschätzte Höhenfehler von ± 20 cm (s. Kapitel 2.3.2) verwendet. Aus diesen Eingangsgrößen ergibt sich eine geschätzte Standardabweichung von $\pm 20,304$ cm an Land und $\pm 20,905$ cm für das Gewässerbett. Folglich kann nur bei Veränderungen, die diese berechneten Standardabweichungen überschreiten nachweislich von Höhenveränderungen zwischen historischen und aktuellen Elbquerprofilmessungen ausgegangen werden. Bei allen anderen Abweichungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich lediglich um Ungenauigkeiten infolge der genannten Fehlereinflussfaktoren handelt. Gleichzeitig ist jedoch zu bedenken, dass die berechneten Werte maßgeblich vom geschätzten Einfluss s_{HDi} abhängen. Sollte der Höhenfehler, der aus der Lagegenauigkeit der Digitalisierung resultiert, nicht ± 20 cm, sondern lediglich ± 15 cm betragen, ergeben sich Standardabweichungen von $\pm 15,403$ cm an Land und $\pm 16,186$ cm für das Gewässerbett. Da keine Erfahrungswerte für s_{HDi} vorliegen, ist die angegebene Grenze zur Nachweisbarkeit von Veränderungen dementsprechend nur als Empfehlung zu betrachten. Ebenfalls schwer zu berechnen, ist die Größenordnung eines Versatzes der Stationierung zwischen historischen und aktuellen Elbquerprofilen infolge der Lageungenauigkeit der Profilpunkte. Obwohl die Hauptursache für den bestehenden Versatz der Stationierung eindeutig die geringe Lagegenauigkeit der digitalisierten Elbquerprofilpunkte in Höhe von $\pm 3,101$ m bis zu $\pm 3,372$ m (s. Kapitel 2.3.2) ist und die Lagegenauigkeit der aktuellen Profilmessungen in Höhe von $\pm 1,414$ cm bis zu $\pm 2,236$ cm an Land (s. Kapitel 3.1.5) bzw. von ± 5 cm bis zu ± 6 cm im Wasser (s. Anhang VII) vernachlässigt werden kann, ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Lagegenauigkeit der digitalisierten Elbquerprofilpunkte um eine geschätzte Standardabweichung handelt (vgl. Kahmen, 2006: 20). Aufgrund der nicht uneingeschränkt erfüllten Forderung nach einer regelmäßigen Passpunktverteilung auf den Kartenblättern, ist davon auszugehen, dass die berechnete Einpassungsgenauigkeit der Kartenblätter nicht einheitlich für die gesamte Vorlage gilt. In Gebieten mit wenigen oder sogar keinen Passpunkten ist eine weitaus schlechtere Genauigkeit zu vermuten. (vgl. Witte & Sparla, 2011: 193) Weiterhin wird für die Berechnung der Genauigkeit der Digitalisierung der Mittelwert der Einpassungsgenauigkeiten der Kartenblätter bzw. Blattschnitte verwendet (s. Kapitel 2.3.2), weshalb von einer Abweichung der tatsächlichen Einpassungsgenauigkeit der einzelnen Vorlagen ausgegangen werden kann (s. Kapitel 2.2.4). Darüber hinaus ist bei der Beurteilung

des Versatzes der Stationierung zu bedenken, dass die Geländestrukturen weder rechtwinklig noch gleichmäßig zu den Elbquerprofilen verlaufen. Infolgedessen ist ein über die geschätzte Lagegenauigkeit der Digitalisierung hinausgehender, ungleichmäßiger Versatz der Stationierung sehr wahrscheinlich. Um eine konkrete Einschätzung des Versatzes der Stationierung zu formulieren, werden identische markante Geländestrukturen in beiden Profilepochen miteinander verglichen. Der hieraus ermittelte Versatz beträgt beim Großteil der Querprofile in etwa 10 m. Lediglich bei dem Profil km 551,632 ist ein Stationsversatz von ca. 20 m zu vermuten. (s. Anhang VIII) Die Begründung für den hohen Versatz ergibt sich aus den fehlenden Passpunkten in diesem Gebiet. Auch der Versatz der Stationierung von 10 m in den anderen Profilen erscheint infolge der genannten Ursachen plausibel.

Unter Berücksichtigung des definierten Versatzes der Stationierung wird das Geländeprofil der aktuellen Elbquerprofile mit dem Geländeprofil der historischen Elbquerprofile verglichen. Es zeigt sich, dass mehrere in den historischen Elbquerprofilen und Lageplänen geplante Maßnahmen (s. Anhang I u. II) umgesetzt wurden. Zu diesen zählen neugebaute Deiche sowie Auf- und Abtragsflächen. Viele der offensichtlich nicht natürlichen Änderungen im Elbvorland gehen jedoch über die Planungen des Regulierungsprojektes von 1902 hinaus. So weisen viele Geländeprofile eine Verlegung der Deiche auf. Zudem entsprechen die erkennbaren großflächigen Auf- und Abtragsflächen oftmals nicht den in den historischen Elbquerprofilen geplanten Maßnahmen. Beispielhaft sei hier der deutliche Auftrag am Deichfuß auf der westlichen Elbseite im Elbprofil km 561,936 genannt. Neben den augenscheinlich menschlichen Eingriffen gibt es vor allem in Ufernähe Bereiche mit einer deutlich wahrnehmbaren Höhenänderung. (s. Anhang VIII) Verantwortlich für die ufernahen Erhöhungen ist vermutlich die Sedimentation, die vor allem in derartigen Bereichen auftritt und dort sogar uferparallele Sedimentrücken entstehen lassen kann (vgl. NLWKN, 2017: 20). Weitere erhebliche Höhenänderungen finden sich überwiegend in unregelmäßigem Gelände. Angesichts der bereits in Kapitel 2.3.2 angeführten hohen Lageungenauigkeit, die den Nachweis von Höhenänderungen erschwert, ist der sich aus der Lageungenauigkeit ergebende Höhenfehler besonders in unregelmäßigem Gelände schwer abzuschätzen. Dementsprechend kann es sich anstelle von Sedimentablagerungen auch nur um Höhenungenauigkeiten handeln, die aus der geringen Lagegenauigkeit der Digitalisierung resultieren. Ebenfalls am Rande der Nachweisbarkeit sind die Erhöhungen im ebenen Gelände mit einer Größenordnung von ca. 10 cm bis 20 cm einzusortieren. (s. Anhang VIII) Aufgrund einer unabhängigen, flussaufwärts durchgeführten Untersuchung, die eine durchschnittliche Sedimentation von 19 cm in den letzten 100 Jahren im Elbvorland feststellt, ist allerdings eine Sedimentation als wahrscheinliche Ursache für die Erhöhung des ebenen Elbvorlandes anzunehmen (vgl. NLWKN, 2017: 20). Dennoch ist nicht gänzlich auszuschließen, dass lediglich

Ungenauigkeiten für die Höhenveränderung verantwortlich sind. Angesichts der ohnehin nur mäßigen eventuellen Erhöhung des ebenen Elbvorlandes ist zu hinterfragen, ob die Auswirkungen für die Veränderungen des Strömungsquerschnittes nicht eher unwesentlich sind und daher keine Notwendigkeit der Nachweisbarkeit besteht. Im Gegensatz zu den an Land eher geringen natürlichen Veränderungen, bei denen ein Nachweis nur schwer möglich ist, finden sich im Gewässerbett eindeutige Änderungen. Die Abweichungen zwischen aktuellen und historischen Profilmessungen liegen im Wasser größtenteils im positiven sowie negativen Meterbereich, wobei das Gewässerbett tendenziell eher tiefer wird. Bei einigen Profilen sind die Tiefenänderungen sogar im Bereich von 1,50 m bis 2,00 m einzustufen. Inwieweit die Tiefenänderungen auch für die Uferbereiche und die Altarme sowie „Kuhlen“ zutreffen, ist infolge der Datenlücken in diesen Bereichen nicht abzuschätzen. Generell ist festzuhalten, dass die Datenlücken die Auswertung des Epochenvergleichs erschweren. (s. Anhang VIII)

Als Besonderheit des Epochenvergleichs ist der zusätzlich per GNSS aufgenommene Flügeldeich, der sich im historischen Elbquerprofil km 551,632 wiederfindet, zu nennen. Aufgrund der nur geringen Höhenabweichung der aktuellen Messung von 20 cm bis 30 cm im Vergleich zur historischen Messung, ist trotz der nicht bestehenden rechnerischen Lageidentität mit der definierten Profilachse anzunehmen, dass es sich um den identischen Flügeldeich handelt. Verantwortlich für die leichte Erhöhung des Flügeldeiches können entweder künstliche Eingriffe oder natürliche Sedimentablagerungen sein. Die Abweichung zwischen berechneter Lage und der Örtlichkeit beträgt an der Station -474,73 m in etwa 20 m und verringert sich mit Annäherung an die Elbe zunehmend. Ab der Station -264,26 m ist eine Differenz nicht mehr nachweisbar. Infolgedessen bestätigt der Flügeldeich die vermutete Lageabweichung zwischen digitalisierter Querprofilachse und der Örtlichkeit. Gleichzeitig ist anzumerken, dass die Lageabweichung innerhalb eines Profilverlaufs variieren kann. Obwohl für die nicht bestehende Lageidentität des Flügeldeiches in beiden Profilepochen die Lageungenauigkeit der Digitalisierung als wahrscheinliche Ursache vermutet wird, kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass sich die Lage des Flügeldeiches infolge natürlicher oder künstlicher Einwirkungen verändert hat. (s. Anhang VIII)

4.3 Veränderungen im Strömungsquerschnitt

Zur Beurteilung der absoluten Veränderungen im Strömungsquerschnitt der untersuchten Elbquerprofile werden jeweils die von den Profilverläufen und einem definierten virtuellen Bezugshorizont eingeschlossenen Flächen berechnet. Damit alle Profilmessungen unterhalb des virtuellen Bezugshorizonts liegen, wird dieser mit 13,50 m ü. NN/NHN festgelegt. Weiterhin

werden nur für den Stationierungsbereich Querschnittsflächen ermittelt, den beide Profilepochen enthalten. Ansonsten wäre die Vergleichbarkeit der berechneten Querschnittsflächen angesichts der unterschiedlichen Ausdehnung nicht gegeben. Als Ausnahme sind die in den aktuellen Elbquerprofilen bestehenden Datenlücken zu nennen. Die Datenlücken fließen trotzdem in die Berechnung der Querschnittsfläche ein, da für die Datenlücken eine Interpolation zwischen den angrenzenden Profilverläufen gerechnet werden kann. Infolge der nicht bekannten tatsächlichen Geländestruktur sind mögliche Fehlereinflüsse bei der Analyse zu berücksichtigen. Ein weiterer Fehlereinfluss der Beurteilung der gebildeten Querschnittsflächendifferenz ist die nur bedingt bestehende Lageidentität der verglichenen Querschnittsflächen in der Örtlichkeit. Der zwischen den beiden Querprofilepochen vorhandene Stationierungsversatz verfälscht das Ergebnis vermutlich nur geringfügig, da sich der Versatz bis auf die Randbereiche der verglichenen Profilverläufe trotz der Verschiebung bei der Berechnung egalisiert.

Tabelle 4: Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe bei Lüneburg

Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe bei Lüneburg			
Elbquerprofil	Querschnittsfläche (alt) [m ²]	Querschnittsfläche (neu) [m ²]	Differenz [m ²]
km 549,962	6353	6106	247
km 551,632	7261	7301	-40
Flügeldeich			
km 551,632	826	805	21
km 552,662	9799	9322	477
km 553,978	11503	11381	121
km 554,875	8045	7880	165
km 561,936	7071	6930	140
km 563,415	3873	3894	-21
km 569,602	3055	2857	197

In Tabelle 4 ist das Ergebnis der durchgeführten Querschnittsflächenberechnungen und der Differenzbildung dargestellt. Wie zu erkennen ist, fallen die Differenzen der beiden Profilepochen im Verhältnis zur Länge der Profile gering aus und liegen bis auf wenige Ausnahmen unter 200 m². Auch bei der etwas größeren Differenz des Profils km 552,662 von 477 m² ist zu bedenken, dass diese hauptsächlich aus der ungenauen Interpolation der im Elbvorland befindlichen Altarme bzw. „Kuhlen“ resultiert. Ohne den Interpolationsfehler ist davon auszugehen, dass die Querschnittsdifferenz in etwa in der Größenordnung der anderen Querprofile vorliegen würde. Obwohl die geringfügigen Differenzen den in Kapitel 4.2 genannten eventuellen Sedimentauftrag von 10 cm bis 20 cm im ebenen Gelände bestätigen, ist zu berücksichtigen, dass die minimalen Differenzen ebenso durch die annähernd gegenseitige Aufhebung von Auf- und Abtragsflächen verursacht werden können. Denn trotz der erheblichen Höhenänderungen im

Profil km 561,936 beträgt die Querschnittsflächendifferenz lediglich 140 m^2 . Weiterhin weist das Gewässerbett der Elbe eine Vertiefung auf, während an Land größtenteils Aufträge zu verzeichnen sind. Infolge der im Vergleich zum Auftrag an Land im ebenen Gelände wesentlich deutlicher ausfallenden Vertiefung des Gewässerbettes, müsste die berechnete Querschnittsflächendifferenz negativ sein. Da die Differenz allerdings bis auf zwei Ausnahmen positiv ist, ist davon auszugehen, dass die berechnete Querschnittsflächendifferenz maßgeblich von den Einflüssen Deichneubau und/oder großflächigen Auf- oder Abtragsflächen abhängt. Die durchschnittliche Sedimentablagerung an Land spiegelt sich eher weniger in der berechneten Differenz wider. Gleichwohl ist jedoch festzustellen, dass die Aufträge zumeist überwiegen, weshalb grundsätzlich eine Erhöhung des Geländes erkennbar ist. Bei der Beurteilung der Differenzen sind ferner die bereits erwähnten Fehlereinflüsse der Interpolation der Datenlücken zu berücksichtigen, die das Ergebnis angesichts der unbekanntenen tatsächlichen Geländestruktur verfälschen können. Darüber hinaus ist die nur bedingt gegebene Lageidentität der Profilepochen als Fehlereinfluss zu bedenken. (s. Tabelle 4 u. Anhang VIII)

Aufgrund der schwierigen Deutung des Ergebnisses der Querschnittsflächendifferenz eignen sich für eine ausführlichere Analyse der Veränderungen des Strömungsquerschnittes vielmehr die erstellten Profilpläne, da hier die einzelnen Einflüsse erkennbar sind und voneinander getrennt werden können. Zu berücksichtigen sind bei einer Analyse anhand der Profilpläne lediglich die möglicherweise enthaltenen Ungenauigkeiten in der Darstellung. Als Schlussfolgerung der Querschnittsflächendifferenz ist festzuhalten, dass insgesamt eine geringe Anhebung der Geländeprofile verzeichnet und eine minimale Verengung des Abflussquerschnittes festgestellt werden kann. Weiterhin können die einzelnen Profile trotz der unwesentlichen absoluten Flächendifferenzen beträchtliche Veränderungen aufweisen, die sich infolge der gegenseitigen Aufhebung von Auf- und Abtragsflächen nicht in der berechneten Querschnittsflächendifferenz widerspiegeln. (s. Tabelle 4 u. Anhang VIII)

5 Verfahrensoptimierung

Ausgehend von der geschilderten Vorgehensweise zur Aufdeckung von Veränderungen im Strömungsquerschnitt ist zu prüfen, ob einige Arbeitsschritte hinsichtlich der Aspekte Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit optimiert werden können. Besonders von Interesse ist die Anwendung eines alternativen Messverfahrens für die Aufnahme des Elbvorlandes, um die zeitintensive und lückenhafte GNSS-Vermessung zu ersetzen. Daher wird im Folgenden die Verwendung von Airborne-Laserscanningdaten diskutiert. Auch bezüglich der Peilungsvermessung ist zu untersuchen, welche Möglichkeiten für eine flächendeckende Aufnahme des

gesamten Gewässerbettes bis zur Uferlinie zur Verfügung stehen. Weiterhin ist abzuwägen, inwiefern eine Steigerung der Genauigkeit der Digitalisierung erreicht werden kann, damit gleichzeitig die Nachweisbarkeit von Veränderungen im Strömungsquerschnitt verbessert und die zu erwartenden Ungenauigkeiten, welche insbesondere von der Genauigkeit der Digitalisierung abhängen, reduziert werden können.

5.1 Digitalisierung historischer Elbquerprofile

Wie bereits in Kapitel 4.2 dargelegt, beeinträchtigen vor allem die geringe Genauigkeit der Digitalisierung und die der Digitalisierung zugrundeliegende Genauigkeit der Georeferenzierung die Nachweisbarkeit von Veränderungen im Strömungsquerschnitt. Folglich kann eine verbesserte Bestätigung von Höhenveränderungen beim Vergleich der beiden Epochen nur über eine erhöhte Genauigkeit des gesamten Digitalisiervorganges erreicht werden.

Sowohl die Digitalisiergenauigkeit als auch die Einpassungsgenauigkeit hängen entscheidend von der Zeichengenauigkeit und der Digitalisiergenauigkeit ab, die sich wiederum aus dem Maßstab von 1:10.000 der Lagepläne bzw. Blattschnitte ergeben (s. Kapitel 2.2.4 u. 2.3.2). Während die Zeichengenauigkeit der Lagepläne des Regulierungsprojektes von 1902 nicht nachträglich verbessert werden kann, ist eine Verringerung der Unsicherheit der Digitalisierung über eine erhöhte Auflösung beim Einscannen der Lagepläne realisierbar (vgl. Bill, 2016: 61–64). Wegen der weiterhin bestehenden Zeichengenauigkeit von 1,5 m bis 2,0 m ist allerdings abzuwägen, ob geringere Fehlereinflüsse der Digitalisierung die Genauigkeit des gesamten Digitalisiervorganges dermaßen verbessern würden, dass der erhöhte Zeitaufwand beim Einscannen der Lagepläne mit einer höheren Auflösung gerechtfertigt ist. Beispielhaft wird deshalb der in Kapitel 2.3.2 berechnete Genauigkeitsbereich von $\pm 3,101$ m bis $\pm 3,372$ m dem aus der Verwendung von Lageplänen mit einer Auflösung von 1000 dpi, also einer Kantenlänge der Pixel von 0,025 mm, geschätzten Genauigkeitsbereich gegenübergestellt. Die weiteren Einflussgrößen von Ansatz (2.3) bleiben unverändert. Die mit der einfließenden Digitalisiergenauigkeit von 0,25 m aus der hochauflösenden Vorlage berechnete Genauigkeit liegt zwischen $\pm 2,993$ m und $\pm 3,272$ m. Folglich wirkt sich eine verbesserte Digitalisiergenauigkeit nur geringfügig auf die geschätzte Genauigkeit des gesamten Digitalisiervorganges aus, weshalb vom Einscannen der Lagepläne mit einer erhöhten Auflösung abzusehen ist. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass das Transformationsergebnis der Georeferenzierung von der Anzahl und der Verteilung der Passpunkte abhängt (vgl. Witte & Sparla, 2011: 192 f.) und somit bedingt durch die beschränkte Verfügbarkeit der Passpunkte in den Lageplänen ebenfalls kaum beeinflusst

werden kann (s. Kapitel 2.2.2). Vielmehr ist in Gebieten mit sehr wenigen Passpunkten mit einer weitaus schlechteren Genauigkeit zu rechnen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Genauigkeit der Digitalisierung höchstwahrscheinlich nicht verbessert werden kann. Infolgedessen ist die begrenzte Nachweisbarkeit von Höhenveränderungen wegen der nicht bestehenden Lageidentität der Profilepochen in der Örtlichkeit zu akzeptieren, wenn eine Beurteilung von Veränderungen des Strömungsquerschnittes, basierend auf den Lageplänen des Regulierungsprojektes von 1902, erfolgen soll.

Außer der geringen Genauigkeit der Digitalisierung der historischen Elbquerprofile weisen einige der zum Regulierungsprojekt von 1902 zugehörigen historischen Elbquerprofile Datenlücken auf. Obwohl bei allen verwendeten historischen Elbquerprofilen Daten für den gesamten Profilverlauf vorliegen, fehlt bei mehreren historischen Elbquerprofilen die Aufnahme des Gewässerbettes der Elbe. (s. Anhang II) Dementsprechend ist vor der Auswahl der zu untersuchenden Elbquerprofile zu entscheiden, ob diese Querprofile für eine Analyse für Veränderungen im Strömungsquerschnitt ausreichend geeignet sind. Wird die Verwendung dieser Elbquerprofile nicht als optimal eingestuft, sind eventuell Alternativprofile in der Nähe des betreffenden Profils auszuwählen.

5.2 Verwendung von Airborne-Laserscanningdaten

Bei der Geländeaufnahme mit einem Airborne-Laserscanner wird die Oberfläche mit einem Laserstrahl zeilen- oder rasterartig erfasst, um aus den gemessenen Entfernungen über die bekannte Ausrichtung und Position des Scanners die Koordinaten der Bodenpunkte zu ermitteln. Die eingesetzten Scannersysteme gliedern sich in Impulsmess- und Phasenlaufzeitverfahren. Während beim Impulsmessverfahren die Laufzeit der einzelnen Laserimpulse gemessen wird, erfolgt die Entfernungsbestimmung beim Phasenlaufzeitverfahren über die Ermittlung der Phasenlage aufmodulierter Wellen und ist infolge einer besseren Auflösung der Laufzeit genauer. Neben dem Laserscanner werden als weitere Systembestandteile GNSS und inertielle Messsysteme zur Bestimmung der Position und Ausrichtung des Scanners verwendet. Das Ergebnis der Geländeerfassung ist aufgrund der großen Anzahl der Laserstrahlen eine unstrukturierte Punktwolke mit einer hohen Punktdichte. (vgl. Ehlers & Schiewe, 2012: 22 f.) Die Höhengenaugigkeit der einzelnen gemessenen Bodenpunkte liegt im Bereich von 5 cm bis 20 cm und die Größe des Bodenspots der Laserstrahlen beträgt zwischen 20 cm und 40 cm. Hauptsächlich wird die erreichbare Genauigkeit durch die Sensorpositionierung und -orientierung mittels GNSS und inertialer Messeinheit begrenzt. Begünstigt durch die hohe Punktdichte kann aus der unstrukturierten Punktwolke ein repräsentativer Wert für eine definierte Rasterzelle eines aus der

Messung abgeleiteten Geländemodells generiert werden. (vgl. Bill, 2016: 80 f.) Für die Umwandlung der unqualifizierten Geländeaufnahme in ein Rastergeländemodell sind eine Vorprozessierung der GNSS- und INS-Daten inklusive Synchronisation und Kalibrierung, die Datumstransformation ins Landeskoordinatensystem und eine Filterung der Messungen vorzunehmen (vgl. Bill, 2016: 298 f.).

Ob aus Airborne-Laserscanningmessungen erzeugte Geländemodelle für die Analyse von Veränderungen des Strömungsquerschnittes geeignet sind, wird im Folgenden anhand von drei beispielhaften Elbquerprofilen überprüft. Der Anlass zur Untersuchung der Verwendbarkeit der Airborne-Laserscanningdaten resultiert aus der analog zur klassischen Gewässervermessung geringen räumlichen Auflösung der GNSS-Vermessung und der damit verbundenen kosten- und zeitintensiven Datenerfassung (vgl. Dobler et al., 2013: 16). Infolgedessen werden aus dem Geländemodell basierend auf den Airborne-Laserscanningdaten ebenfalls Elbquerprofile erzeugt und mit den aus der Kombination von GNSS- und Peilungsvermessung entstandenen Elbquerprofilen verglichen (s. Anhang X).

Bevor näher auf den Vergleich der unterschiedlichen Datensätze eingegangen wird, werden zunächst die genutzten Geländemodelldaten beschrieben. Die verwendeten Geländemodelle mit der Rasterweite von 1 m des Landes Niedersachsen basieren auf Laserscandaten, die im Jahr 2015 erfasst wurden. Die Daten liegen im Lagebezugssystem ETRS89/UTM Zone 32 vor und beziehen sich auf das Höhenbezugssystem DHHN92. Die Genauigkeit der Höhen des digitalen Geländemodells wird mit ± 30 cm angegeben. (s. Anhang XI) Folglich ist die Höhengenaugkeit des Geländemodells wesentlich geringer als die mit der GNSS- oder Peilungsvermessung erreichte Genauigkeit (s. Kapitel 3.1.5 u. 3.2.2). Deshalb bleibt abzuwarten, ob die auf der Airborne-Laserscanningmessung basierenden Geländemodelle eine Alternative zu den aus GNSS- und Gewässervermessung erzeugten Datensätzen darstellen. Auch das aus aktuelleren Laserscandaten berechnete digitale Geländemodell des Landes Niedersachsen mit der Rasterweite von 1 m, welches ab 2018 flächendeckend verfügbar sein soll, weicht mit einer Höhengenaugkeit von ± 20 cm noch erheblich von der Genauigkeit der GNSS- und Peilungsvermessung ab (LGLN, 2017a).

Für den Vergleich der Laserscandatenprofile mit den kombinierten GNSS- und Peilungsprofilen, wird zunächst aus den regelmäßigen Punktwolken ein flächenhaftes Geländemodell gerechnet, sodass über den Schnitt der Querprofilachse mit dem Geländemodell konkrete Profilmomente für die Laserscandaten vorliegen. Anders als bei der Reduzierung der Peilungsdaten werden die Laserscandaten nicht über die Lageabweichung zur benötigten Querprofilachse zugeschnitten, sondern über die angegebene Höhengenaugkeit von ± 30 cm gefiltert.

Entsprechend werden benachbarte Punkte nur beibehalten, wenn sie um mehr als 30 cm voneinander abweichen. Das flächenhafte Geländemodell wird im Anschluss an die Filterung mit den verbleibenden Punkten gerechnet. Als Bezugsachse für die Generierung der Elbquerprofile aus dem flächenhaften Geländemodell der Laserscandaten wird abermals die Querprofilachse aus den digitalisierten historischen Elbquerprofilen verwendet, damit die Lageidentität für den Vergleich gegeben ist. Zusätzlich zur angeführten Höhengenaugigkeit der jeweiligen Datensätze ist beim Vergleich auch die Höhenabweichung, die aus dem von der GNSS- und Peilungsmessung abweichendem Höhenbezugssystem der Laserscandaten resultiert, zu bedenken. Die zu erwartenden Abweichungen zwischen den Systemen DHHN92 und DHHN2016 betragen bis zu $\pm 2,8$ cm (LGLN, 2017b).

Der Vergleich der aus Laserscandaten erzeugten Elbquerprofile mit den aus GNSS- und Peilungsdaten erstellten Querprofilen zeigt, dass die Unterschiede trotz der angegebenen Höhengenaugigkeit der Laserscandaten von ± 30 cm an Land wesentlich geringer ausfallen. Die Abweichungen liegen meistens im Bereich von ± 10 cm bis ± 20 cm. Einzig an bewachsenen Stellen verlaufen die Laserscanprofile unregelmäßig und weichen von den GNSS-Profilen ab. Trotz der leichten Schwankungen der Laserscanprofile bei Bewuchs ist den aus Laserscandaten erzeugten Querprofilen zugute zu halten, dass sie keine Datenlücken in bewachsenen Gebieten aufweisen. Obwohl die Laserscanprofile ebenfalls keine Datenlücken bei Gewässern aufweisen, handelt es sich bei der aufgenommenen Höhe um die Gewässeroberfläche und nicht um den Gewässerboden. Ersichtlich wird dies aus der einheitlichen Höhe im Bereich des Gewässerbettes der Elbe. Auf diesen Erkenntnissen basierend können die verwendeten Laserscandaten lediglich für die Profilbereiche an Land als Alternative zu den GNSS-Messungen betrachtet werden. Aber auch hierfür ist zu beachten, dass die Laserscandaten nicht bei Hochwasser erfasst werden, da ansonsten nur für die freiliegenden Bereiche eine Messung von Bodenpunkten möglich ist. Besonders beim Querprofil km 553,978 sind die Auswirkungen eines erhöhten Wasserspiegels deutlich zu erkennen. Aufgrund der Anbindung des Altarms an die Elbe ist das an den Altarm angrenzende Elbvorland ebenfalls großflächig überschwemmt und es können keine Bodenpunkte generiert werden. Entsprechend ist bei der Verwendung von Laserscandaten für die Beurteilung von Veränderungen des Strömungsquerschnittes zu bedenken, dass die Befliegung zur Datengewinnung bei geringen Wasserständen erfolgt, um die Ausbeute der erfassten Bodenpunkte zu maximieren. (s. Anhang X)

Obwohl die zur Erstellung des digitalen Geländemodells des Landes Niedersachsen eingesetzten Laserscannersysteme offensichtlich nicht in der Lage sind die Gewässersohle zu erfassen, besteht durch den Einsatz bathymetrischer Laserscanner die Möglichkeit zur Aufnahme der

Gewässersohle bis zu einer gewissen Wassertiefe (vgl. Ehlers & Schiewe, 2012: 24). Wie bei den Schallwellen, ist auch die Ausbreitung des Laserstrahls in der Wassersäule abhängig von den Faktoren Temperatur, Salzgehalt und Druck. Darüber hinaus beeinflussen Schwebstoffe die Ausbreitung des Lasersignals, indem sie es absorbieren und dadurch abschwächen. Folglich ist die Eindringtiefe von Lasersignalen in Wasser abhängig von der Schwebstoffdichte. (vgl. de Jong et al., 2002: 340) Aufgrund der variierenden Schwebstoffdichte in verschiedenen Gewässern erfolgt die Angabe der erreichbaren Eindringtiefe seitens der Hersteller der bathymetrischen Laserscanner über ein Vielfaches der Sichttiefe oder auch Secchitiefe (vgl. Weiß, 2015: 46). Unter Verwendung von bathymetrischen Flachwassersystemen kann die Gewässersohle bei klaren Wasserverhältnissen bis zu 8 m Wassertiefe mit einer Punktdichte von 10 bis 20 Punkten/m² erfasst werden (vgl. Dobler et al., 2013: 18 f.). Gemäß der Untersuchung von Weiß (2015: 44-53) sind bathymetrische Laserscanner jedoch angesichts der Trübung des Wassers und der schlechten Reflektionseigenschaften des Gewässerbodens nicht zur Erfassung des Gewässerbettes der Elbe geeignet. Demzufolge bleibt der in Betracht zu ziehende Einsatz von Airborne-Laserscannern zur Analyse von Veränderungen des Strömungsquerschnittes der Elbe auf die Landbereiche begrenzt.

5.3 Kombination von Airborne-Laserscanningdaten und Peildaten

Nachdem festgestellt ist, dass bathymetrische Airborne-Laserscanningdaten nicht zur Erfassung des Gewässerbettes der Elbe genutzt werden können (s. Kapitel 5.2), ist zu prüfen, ob die Laserscandaten den erfassten GNSS-Daten vorzuziehen sind. Für die Verwendung der Laserscandaten anstelle der GNSS-Daten spricht die schnellere und flächendeckendere Aufnahme (vgl. Dobler et al., 2013: 16). Werden die auf Laserscandaten basierenden digitalen Geländemodelle der jeweiligen Bundesländer genutzt, kann sogar vollständig auf eine eigene Datenerfassung verzichtet werden. Darüber hinaus ist zu betonen, dass die Laserscandaten mit Ausnahme der Gewässer keine Datenlücken enthalten (s. Anhang X). Obwohl die bisher genannten Argumente eine Verwendung der Laserscandaten befürworten, ist abzuwägen, inwiefern die wesentlich geringere Genauigkeit der Laserscandaten akzeptiert werden kann. Angesichts des in Kapitel 5.2 durchgeführten Vergleichs der aktuellen Elbquerprofile beider Erfassungsmethoden unterscheiden sich die Profile trotz der angegebenen Genauigkeit, der aus Laserscandaten hervorgehenden Raster-DGM's, von ± 30 cm nur um ± 10 cm bis ± 20 cm (s. Anhang X). Demnach sind die Laserscandaten den GNSS-Daten besser angenähert als gemäß der Genauigkeitsangabe zu erwarten ist. Weiterhin besteht wegen der hohen Lageungenauigkeit der digitalisierten Elbquerprofile die Problematik, dass die Nachweisbarkeit geringer Höhenänderungen nicht gegeben ist (s. Kapitel 4.2). Entsprechend reicht die Höhengenaugigkeit der

Laserscandaten aus, um über ± 20 cm hinausgehende Höhenänderungen nachzuweisen. Welche Auswirkung der Gebrauch der Laserscandaten konkret für den Nachweis von Höhenänderungen hat, wird in Kapitel 5.4 näher erläutert. Zunächst bleibt festzuhalten, dass die Laserscandaten, aufgrund einer Kosten- und Zeitersparnis sowie der ohnehin nicht bestehenden Möglichkeit zum Nachweis geringer Höhenänderungen, für die Analyse von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe im Zusammenhang mit den historischen Elbquerprofilen ausreichen.

Auch wenn die Anzahl der Datenlücken durch die Verwendung der Laserscandaten reduziert wird, bleibt der Verlauf der Gewässersohle der Altarme und „Kuhlen“ sowie das Gewässerbett der Elbe in den Bühnenfeldern unbekannt. Bezüglich des Gewässerbettes der Elbe kann eine vollkommene Bodentüberdeckung über den Einsatz eines Flachwasserecholotes erreicht werden. Durch die Vergrößerung des Fächers ist allerdings mit einer geringeren Genauigkeit der Peildaten in Ufernähe zu rechnen. (vgl. de Jong et al., 2002: 327 f.) Laut Herstellerangaben ist das zur Erfassung der Peildaten eingesetzte Fächerecholot ATLAS Fansweep 20-200 in der Lage mit einem Gesamtöffnungswinkel von 180° zu messen, sodass die fehlenden Uferbereiche mit den entsprechenden Einstellungen erfasst und die Datenlücken geschlossen werden können (ATLAS, 2009). Fraglich bleibt nur die Aufnahme der Gewässersohle der Altarme und „Kuhlen“, da diese zum Großteil nicht schiffbar sind. Sollte auf deren Erfassung dennoch nicht verzichtet werden können, ist ggf. der zeit- und kostenintensive Einsatz der klassischen Stangenpeilung zu überdenken.

Zusammenfassend ist für die Erstellung aktueller Elbquerprofile ein kombiniertes Verfahren aus Airborne-Laserscanning und Gewässerpeilung zur Beurteilung von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe zu empfehlen.

5.4 Genauigkeitsbetrachtung

Wie bereits in Kapitel 5.1 festgestellt, ist der hohe Fehlereinfluss der Digitalisierung der historischen Elbquerprofile nicht reduzierbar, weshalb davon auszugehen ist, dass eine erhebliche Abnahme der Nachweisbarkeit von Höhenänderungen infolge der Verwendung von Laserscandaten nicht zu erwarten ist. Dennoch wird eine Schätzung der signifikanten Höhenänderungen anhand der Formel (4.1) vorgenommen, wobei der Einfluss der Höhengenaugigkeit der GNSS-Messung (s_H) durch die Höhengenaugigkeit der Laserscandaten (s_{Laser}) ersetzt wird. Die anderen Einflussgrößen bleiben zur Berechnung unverändert. In Anbetracht der bald verfügbaren aktuelleren digitalen Geländemodelle des Landes Niedersachsen mit einer Genauigkeit von ± 20 cm für das DGM1 (LGLN, 2017a), wird zur Genauigkeitsabschätzung bereits dieser Wert

für s_{Laser} angenommen. Somit ergibt sich eine geschätzte Nachweisbarkeit von Höhenveränderungen ab $\pm 28,302$ cm an Land. Im Gegensatz hierzu liegt die berechnete Nachweisbarkeitsgrenze aus GNSS-Daten bei $\pm 20,304$ cm, sodass bei der Verwendung von Laserscandaten zur Analyse der Veränderungen des Strömungsquerschnittes an Land erst ca. 8 cm größere Höhenabweichungen als signifikante Höhenänderungen bezeichnet werden können. Trotz der rechnerisch schlechteren Nachweisbarkeit von Höhenänderungen ist zu bedenken, dass der aus der Digitalisierungsungenauigkeit resultierende Höhenfehler (s_{HDi}) nur geschätzt wird. Inwieweit diese Annahme dem tatsächlichen Fehlereinfluss angenähert ist, bleibt fraglich. Genauso gut könnte der Höhenfehler s_{HDi} anstatt der vermuteten ± 20 cm in ebenem Gelände auch ± 30 cm ausmachen. Folglich ist nicht zwingend von einer tatsächlich geringeren Nachweisbarkeit von Höhenveränderungen durch die Verwendung von Laserscandaten auszugehen. Zudem stimmen die aus GNSS-Daten und die aus Laserscandaten erzeugten Querprofile besser überein, als die angegebene Genauigkeit des aus Laserscandaten erstellten digitalen Geländemodells vermuten lässt (s. Anhang X u. XI).

Dadurch, dass für die aktuelle Profilerstellung im Gewässerbett der Elbe die Peilungsdaten verwendet werden, entspricht die geschätzte Nachweisbarkeitsgrenze von Höhenänderungen im Wasser weiterhin $\pm 20,905$ cm (s. Kapitel 4.2). Leichte Abweichungen von diesem Wert sind, außer dem aus der geringen Digitalisiergenauigkeit gefolgerten Höhenfehler, lediglich aufgrund des größeren Gesamtöffnungswinkels des Fächerecholotes zur Aufnahme der ufernahen Gewässerbereiche nicht auszuschließen.

Ausgehend von der geringen Digitalisiergenauigkeit der historischen Elbquerprofile ist auch bei der Verwendung von Laserscandaten keine Lageidentität der beiden Profilepochen in der Örtlichkeit vorhanden. Der Einfluss der aus Laserscandaten abstammenden ± 20 cm genauen Raster-DGM's (LGLN, 2017a) ist gegenüber der in etwa ± 3 m betragenden Lagegenauigkeit der historischen Elbquerprofilpunkte (s. Kapitel 2.3.2) zu vernachlässigen. Die zum Profilvergleich benötigte Lageidentität ist nur rechnerisch gegeben.

5.5 Wirtschaftlichkeit

Durch die Verwendung von Laserscandaten, anstelle der GNSS-Daten, zur Erstellung der aktuellen Elbquerprofile wird die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zur Analyse von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe erhöht. Ausschlaggebend für die gesteigerte Wirtschaftlichkeit ist die Zeitersparnis in der Datenerfassung. Während die GNSS-Daten durch zeitintensive Einzelpunktaufnahmen (s. Anhang VI) in oftmals unwegsamem Gelände entstehen, werden die Laserscandaten im Rahmen einer Befliegung massenhaft generiert. Aus der

Punktwolke mit einer hohen Punktdichte werden anschließend die Raster-DGM's abgeleitet (vgl. Bill, 2016: 80 f.). Unter Verwendung der von den Bundesländern angebotenen regelmäßigen Punktwolke mit der Rasterweite von 1 m kann sogar vollständig auf eine eigene Datenerfassung des Elbvorlandes sowie die Aufbereitung der Laserscandaten verzichtet werden. Die Kosten für die Datenerfassung der Landbereiche beschränken sich somit auf die von den Vermessungsverwaltungen der Länder erhobenen Gebühren für die Datenbereitstellung und -abgabe.

Wegen der begrenzten Erfassung des Gewässerbettes der Elbe im Rahmen der jährlichen Elbpeilung seitens der Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter, sind für die vollständige Erfassung des Gewässerbettes eigene Peilungsvermessungen durchzuführen bzw. in Auftrag zu geben. Eine Senkung der Kosten wäre nur denkbar, wenn sich die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes auf eine Kooperation zur einmaligen Gesamtaufnahme des Gewässerbettes im Rahmen der Jahrespeilungen einlässt.

Trotz der möglichen Kosteneinsparungen durch optimierte Verfahren zur Erfassung der Datengrundlagen der aktuellen Elbquerprofile bleibt fraglich, ob die festgestellten geringfügigen Querschnittsflächendifferenzen den hohen Gesamtaufwand des dargelegten Verfahrens rechtfertigen. Ebenso die eingeschränkte Nachweisbarkeit der Höhenänderungen infolge der beträchtlichen Ungenauigkeit der digitalisierten historischen Elbquerprofile lässt eher vermuten, dass die anfallenden Kosten in keinem ausgeglichenen Verhältnis zum Nutzen des Ergebnisses stehen. Folglich ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens anzuzweifeln. Gleichzeitig ist allerdings zu bedenken, dass zur Analyse von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe unter Verwendung der Elbquerprofile des Regulierungsprojektes von 1902 keine wirtschaftlichere Alternative besteht.

6 Fazit und Ausblick

Abschließend ist anzuführen, dass das zur Analyse von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbstrecke Bleckede bis Hohnstorf angewandte Verfahren nur eingeschränkt brauchbare Ergebnisse liefert. Aufgrund der geringen Genauigkeit der digitalisierten historischen Elbquerprofile ist die Nachweisbarkeit leichter Veränderungen nicht gegeben. Infolgedessen lassen sich zwar in den letzten 100 Jahren erfolgte Deichbaumaßnahmen eindeutig identifizieren, die Feststellbarkeit von Sedimentablagerungen ist jedoch begrenzt. Während bei den deutlicheren Höhenänderungen in Ufernähe durchaus von einer Sedimentation als Ursache auszugehen ist, liegt die Größenordnung der Erhöhung des restlichen Elbvorlandes infolge eventueller Sedimentablagerungen unterhalb der ermittelten Nachweisbarkeitsgrenze. Deshalb ist nicht

auszuschließen, dass es sich lediglich um Ungenauigkeiten des Verfahrens handelt. Gleichzeitig bleibt fraglich, ob überhaupt die Notwendigkeit zum Nachweis geringfügiger Sedimentablagerungen besteht, da diese für die Veränderung des Strömungsquerschnittes eher belanglos erscheinen. Neben den zu untersuchenden Auswirkungen von Deichbaumaßnahmen und Sedimentablagerungen können, trotz der mäßigen Genauigkeit des angewandten Verfahrens, offensichtlich nicht natürliche Auf- und Abtragsflächen, die das Abflussprofil der Elbe ebenfalls beeinflussen, nachgewiesen werden. Für das Gewässerbett der Elbe sind überwiegend Vertiefungen im Meterbereich zu verzeichnen, die deutlich über der ermittelten Nachweisbarkeitsgrenze liegen. Deshalb ist auszuschließen, dass es sich bei den Veränderungen im Gewässerbett um Ungenauigkeiten des Verfahrens handelt. Aus der zur Gesamtbeurteilung der Veränderungseinflüsse berechneten Querschnittsflächendifferenz ergibt sich eine insgesamt nur unwesentliche Verringerung des Abflussprofils der begutachteten Elbquerprofile. Zwar ist tendenziell eine Anhebung des Geländes festzustellen, im Verhältnis zur Ausdehnung der Profile fällt diese dagegen gering aus. Zu bedenken ist andererseits, dass trotz der rechnerisch minimalen Querschnittsflächendifferenz einige Profile erhebliche Veränderungen aufweisen, die sich aber wegen der gegenseitigen Aufhebung von Auf- und Abtragsflächen nicht im Ergebnis widerspiegeln. Weiterhin ist das Ergebnis der bestimmten Flächendifferenz angesichts der Datenlücken in den aktuellen Elbquerprofilen fehlerbehaftet. Obwohl nicht durchweg veränderte Ergebnisse angenommen werden, verfälschen die Datenlücken die berechnete Veränderung des Strömungsquerschnittes dennoch.

Um die Anzahl der Datenlücken zu minimieren, hat die Verfahrensoptimierung ergeben, dass die für Bewuchs anfällige GNSS-Vermessung zur Erstellung aktueller Elbquerprofile durch auf Laserscandaten basierende DGM's ersetzt wird. Die Peilungsvermessung hingegen wird, angesichts der Möglichkeit einer um die Randbereiche des Gewässerbettes ergänzten Aufnahme, beibehalten. Außer der Reduzierung der Profilunterbrechungen steigert die Umstellung auf eine Kombination aus Airborne-Lasercanning und Gewässerpeilung als aktuelle Elbquerprofilmessungen die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Zugleich wird allerdings die Genauigkeit der aktuellen Elbquerprofile verschlechtert. Da die genannten Vorteile die Genauigkeitseinbußen überwiegen, wird die verminderte Genauigkeit jedoch akzeptiert. Weiterhin wirkt sich die verringerte Genauigkeit der aktuellen Elbquerprofile infolge der ohnehin beträchtlichen Unsicherheit der historischen Elbquerprofile kaum auf die Gesamtgenauigkeit des Verfahrens aus. Verantwortlich für die beträchtliche Unsicherheit der historischen Elbquerprofile sind die Ungenauigkeiten der Georeferenzierung und Digitalisierung. Auch in der Verfahrensoptimierung konnte kein Ansatz zur Verringerung der Fehlereinflüsse von Georeferenzierung und Digitalisierung entwickelt werden. Demzufolge ist die begrenzte Nachweisbarkeit von Veränderungen

im Strömungsquerschnitt der Elbe unter Verwendung der Elbquerprofile des Regulierungsprojektes von 1902 zu akzeptieren.

Besteht die Notwendigkeit auch geringfügige Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe im Zentimeterbereich nachzuweisen, sind die verwendeten historischen Elbquerprofile ungeeignet. Für derartige Anforderungen sind Datensätze zu verwenden, die entweder mit einer höheren Genauigkeit digitalisiert werden können oder aber bereits als Koordinaten vorliegen. Trotz der abweichenden Ausgangsunterlagen könnte das im Rahmen der Ausarbeitung bereitgestellte Verfahren dennoch angewandt werden. Je nach erreichbarer Genauigkeit der alten Querprofile wäre allerdings erneut abzuwägen, welche Kombination der Messverfahren für die Erstellung aktueller Elbquerprofile genutzt werden sollte. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen wäre vermutlich die GNSS-Vermessung, trotz der Datenlücken, dem ungenaueren Airborne-Laserscanning vorzuziehen. Auch wenn die aus dem entwickelten Verfahren unter Verwendung der Elbquerprofile des Regulierungsprojektes von 1902 erreichbare Genauigkeit ausreicht, bleibt zu überdenken, ob die Erkenntnisse des Epochenvergleichs den Aufwand und die Kosten des Verfahrens rechtfertigen. Die Wirtschaftlichkeit der entworfenen Verfahrensabläufe zur Aufdeckung von Veränderungen im Strömungsquerschnitt der Elbe ist zumindest anzuzweifeln. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass eine Alternative bei gleichbleibenden Ausgangsvoraussetzungen nach derzeitigem Forschungsstand nicht besteht.

Literaturverzeichnis

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (2017a): *DHHN2016.*, [online] <http://www.adv-online.de/Geodaetische-Grundlagen/DHHN2016/> (21.12.2017).

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) (2017b): *SAPOS Brochüre.*, [online] <http://www.sapos.de/files/SAPOS-Broschuere-2017-deutsch.pdf> (30.11.2017).

Asbeck, M., Drüppel, S., Gärtner, M., Skindelies, K. & Stein, M. (2016): *Vermessung und Geoinformation.* 13. Auflage, Selbstverlag Michael Gärtner: Solingen, 478 S.

ATLAS Hydrographic GmbH (2009): *Brochüre ATLAS Fansweep 20.*, [online] http://www.geotechsystem.com/PD_IMG/1275959748_ATLAS_FANSWEEP_20.pdf (14.12.2017).

Bauer, M. (2011): *Vermessung und Ortung mit Satelliten.* 6. Auflage, Wichmann: Berlin, 479 S.

Behr, F.-J. (2014): *Strategisches GIS-Management.* 3. Auflage, Wichmann: Berlin, 320 S.

Bertram, K.-H. & Siefert, H. (2009): *Geometrische Qualitätsverbesserung der Automatisierten Liegenschaftskarte in Niedersachsen.* In: Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, Jg. 59, Nr. 1 & 2, S. 3–11.

Bill, R. (2016): *Grundlagen der Geo-Informationssysteme.* 6. Auflage, Wichmann: Berlin, 855 S.

Böder, V. (2002): *Zur hochpräzisen GPS-Positions- und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen.* Dissertation Leibniz Universität Hannover, 139 S.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2017): *Quasigeoid der Bundesrepublik Deutschland.*, [online] https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/BKG/DE/Downloads-DE-Flyer/BKG-Quasigeoid-DE.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (30.11.2017).

de Jong, C. D., Lachapelle, G., Skone, S. & Elema, I. A. (2002): *Hydrography.* 1. Auflage, University Press: Delft, 353 S.

Dobler, W., Baran, R., Steinbacher, F., Ritter, M., Niederweiser, M., Benger, W. & Aufleger, M. (2013): *Die Verbindung moderner und klassischer Gewässervermessung.* In: Hydrographische Nachrichten, Jg. 30, Nr. 95, S. 16–22.

- Ehlers, M. & Schiewe, J. (2012): *Geoinformatik.*, WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft): Darmstadt, 122 S.
- Feldmann-Westendorff, U. (2013): *Ergebnisse der GNSS-Kampagne 2008 als Grundlage für eine genauere und effizientere satellitengestützte Höhenbestimmung.* In: DVW e.V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (Hrsg.): *GNSS 2013 – Schneller. Genauer. Effizienter.*, S. 135–148, Wißner: Augsburg.
- Hake, G., Grünreich, D. & Meng, L. (2002): *Kartographie.* 8. Auflage, Walter de Gruyter: Berlin, 604 S.
- HHK Datentechnik GmbH (2016): *Benutzerhandbuch des Programmsystems GEOgraf.*, 1712 S.
- International Hydrographic Bureau (IHB) (2011): *Manual on Hydrography.*, [online] https://www.iho.int/iho_pubs/CB/C13_Index.htm (30.11.2017).
- IXSEA (2004): *Handbuch Octans Subsea.*, [online] http://www.oceanscan.net/gallery/PDFs/Octans_Subsea_user_guide__mar04.pdf (14.12.2017).
- Jahn, C.-H., Feldmann-Westendorff, U., Grüner, D., Kulle, U. & Lembrecht, P. (2011): *Die Erneuerung des Deutschen Haupthöhennetzes in Niedersachsen.* In: Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung, Jg. 61, Nr. 4, S. 3–26.
- Kahmen, H. (2006): *Angewandte Geodäsie.* 20. Auflage, de Gruyter: Berlin, 679 S.
- Kappas, M. (2001): *Geographische Informationssysteme.*, Westermann: Braunschweig, 317 S.
- Kohlstock, P. (2014): *Kartographie.* 3. Auflage, Schöningh: Paderborn, 237 S.
- Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung (LGLN) (2017a): *Digitale Geländemodelle - Produktinformation.*, [online] https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/online-dienste_services/service/produktinformationen/produktinformationen-143616.html (29.12.2017).
- Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung (LGLN) (2017b): *Höhenfestpunkte - Produktinformation.*, [online] https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/online-dienste_services/service/produktinformationen/produktinformationen-143616.html (30.11.2017).
- Mansfeld, W. (2010): *Satellitenortung und Navigation.* 3. Auflage, Vieweg + Teubner: Wiesbaden, 380 S.

Möser, M., Müller, G. & Schlemmer, H. (Hrsg.) (2012): *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Grundlagen*. 4. Auflage, Wichmann: Berlin, 628 S.

Möser, M., Müller, G., Schlemmer, H. & Werner, H. (Hrsg.) (2002): *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Straßenbau*. 2. Auflage, Wichmann: Heidelberg, 292 S.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2017): *Abflussverbessernde Maßnahmen an der Unteren Mittellelbe - Rahmenplan - Teil Niedersachsen.*, 60 S.

Topcon Positioning Systems Inc. (2006): *HiPer + Operators Manual*.

Torge, W. (2003): *Geodäsie*. 2. Auflage, de Gruyter: Berlin, 369 S.

United States Naval Academy (USNA) (2016): *World Files.*, [online]
https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/tbme6h0z.htm (07.12.2017).

Weiß, R. (2015): *Erprobung der Laserbathymetrie an der Bundeswasserstraße Elbe*. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): *Wasserstraßenbezogene geodätische Anwendungen und Produkte der Fernerkundung.*, S. 44–53, [online] http://doi.bafg.de/BfG/2015/Veranst2_2015.pdf (30.12.2017).

Witte, B. & Sparla, P. (2011): *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 7. Auflage, Wichmann: Berlin, 695 S.

Anhang I: Lagepläne des Regulierungsprojektes (Daten-CD)

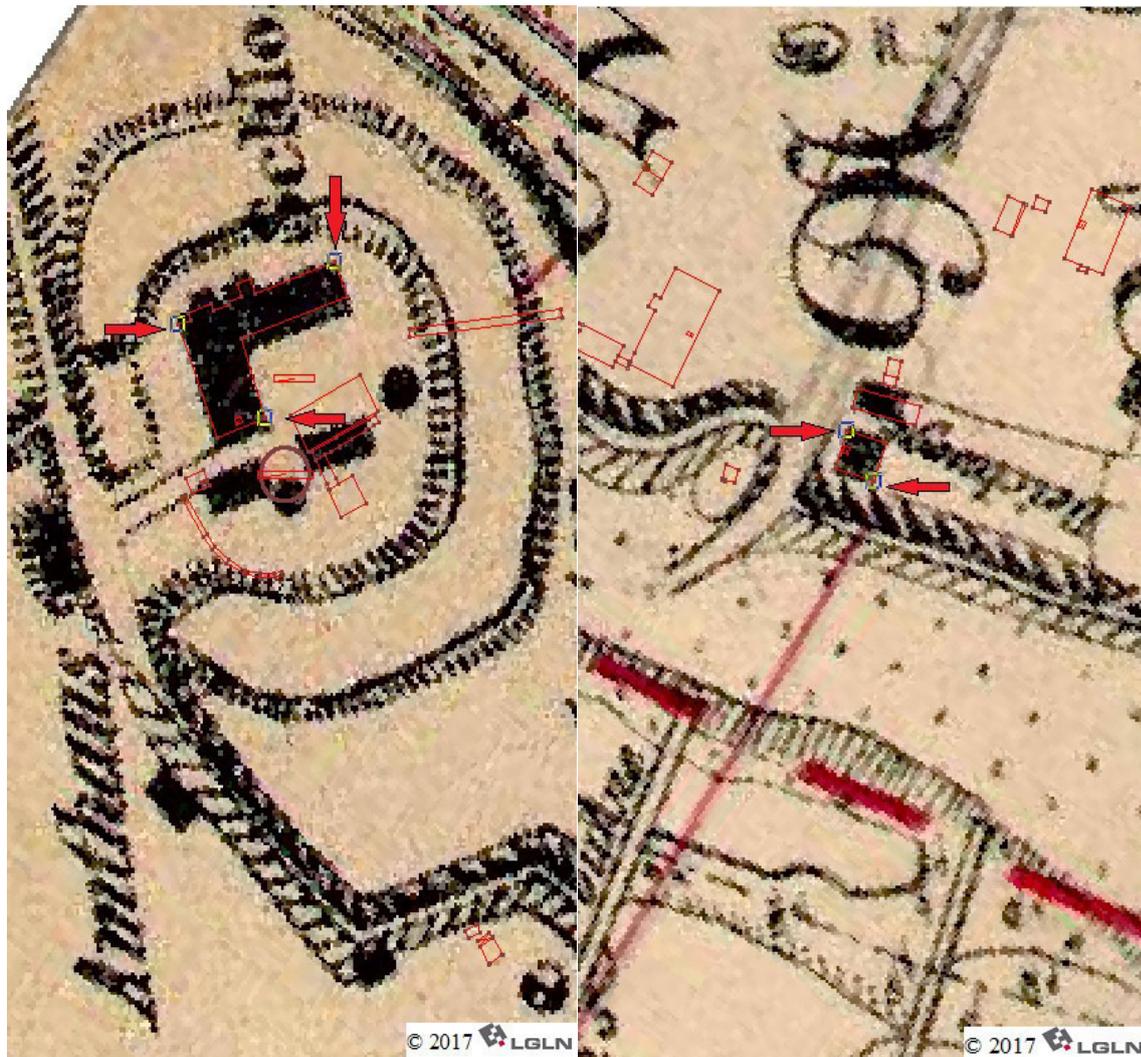
Die verwendeten Lagepläne des generellen Regulierungsprojektes des Hochwasserbettes der Elbe von 1902 befinden sich, bedingt durch technische Probleme bei der Bindung der Ausarbeitung, auf der beiliegenden Daten-CD bzw. dem Datenordner. Bei den Lageplänen handelt es sich um die Kartenblätter 52, 53, 54 und 55.

Anhang II: Querprofile des Regulierungsprojektes (Daten-CD)

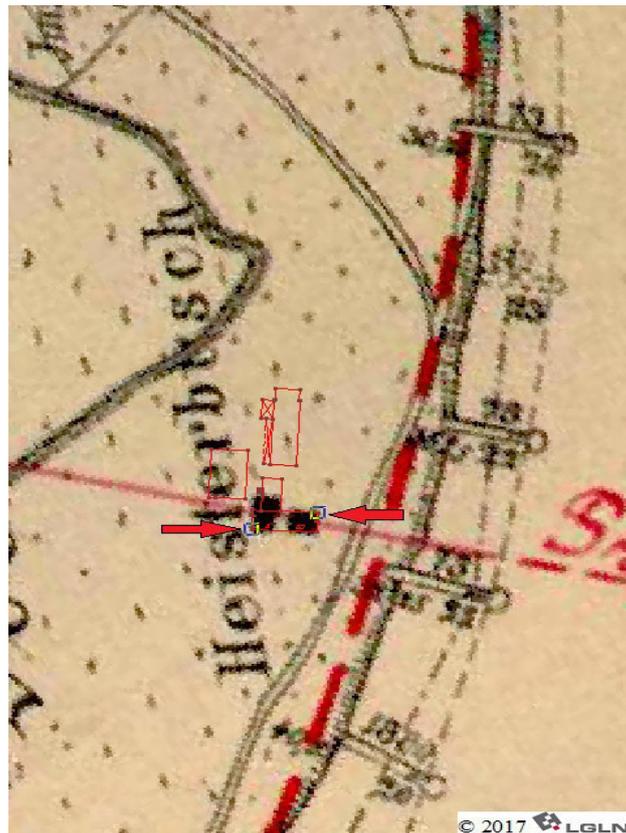
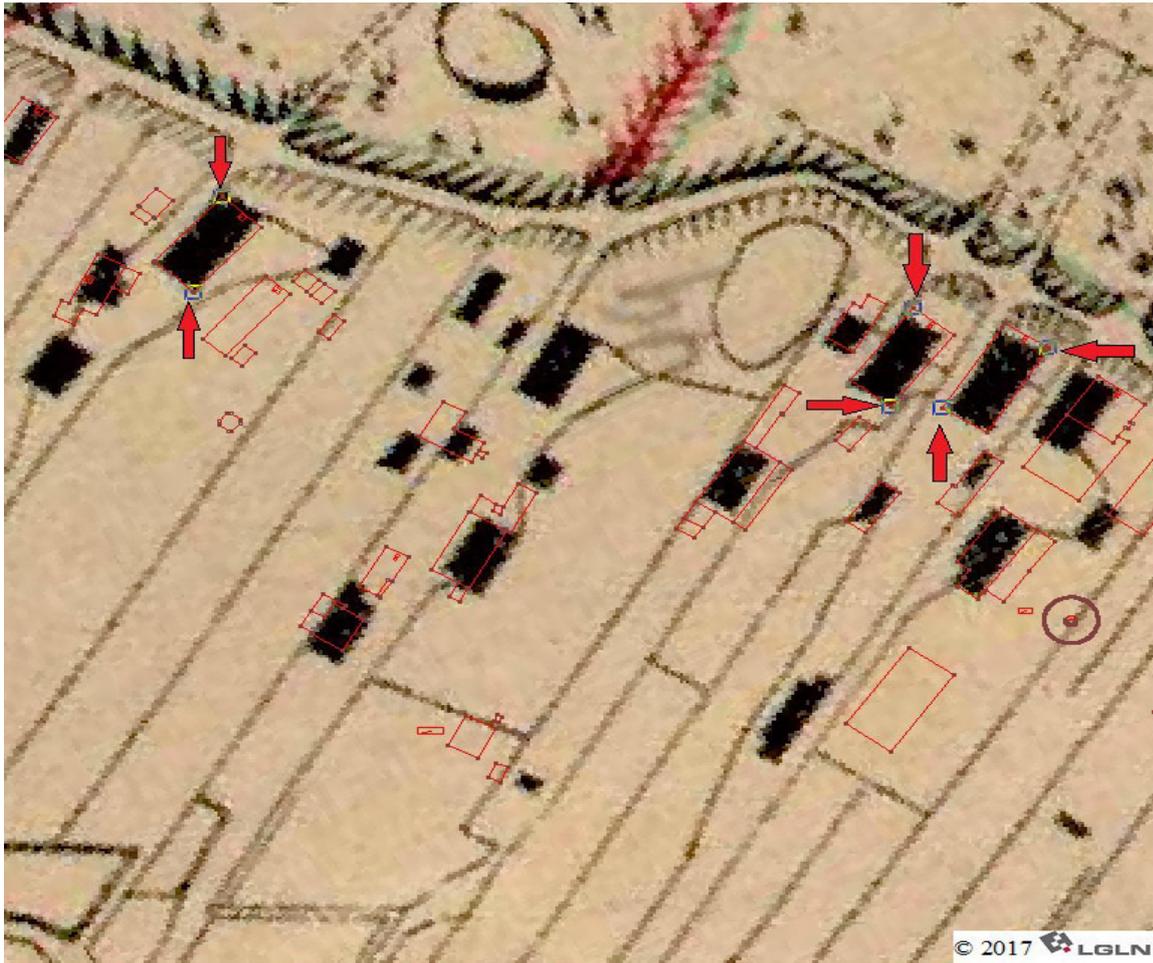
Die verwendeten Elbquerprofile des Regulierungsprojektes von 1902 befinden sich, bedingt durch technische Probleme bei der Bindung der Ausarbeitung, auf der beiliegenden Daten-CD bzw. dem Datenordner. Auf den einzelnen historischen Profilplänen sind jeweils zwei Querprofile dargestellt. Im Folgenden werden jedoch nur die Querprofile genannt, die für die Auswertung genutzt wurden. Auf der Daten-CD sind die Profile km 549,962; km 551,632; km 552,662; km 553,978; km 554,875; km 561,936; km 563,415 und km 569,602 enthalten.

Anhang III: Passpunkte der Georeferenzierung

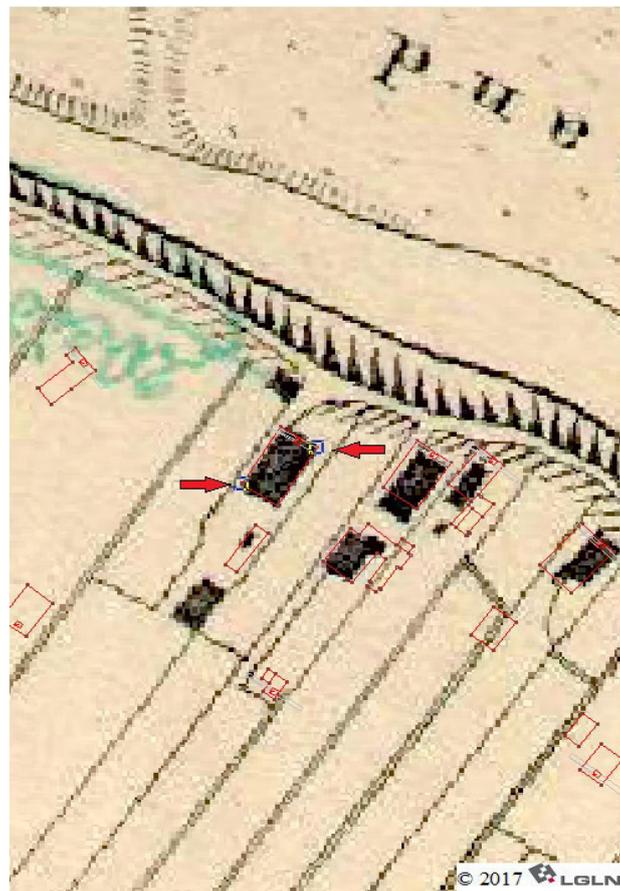
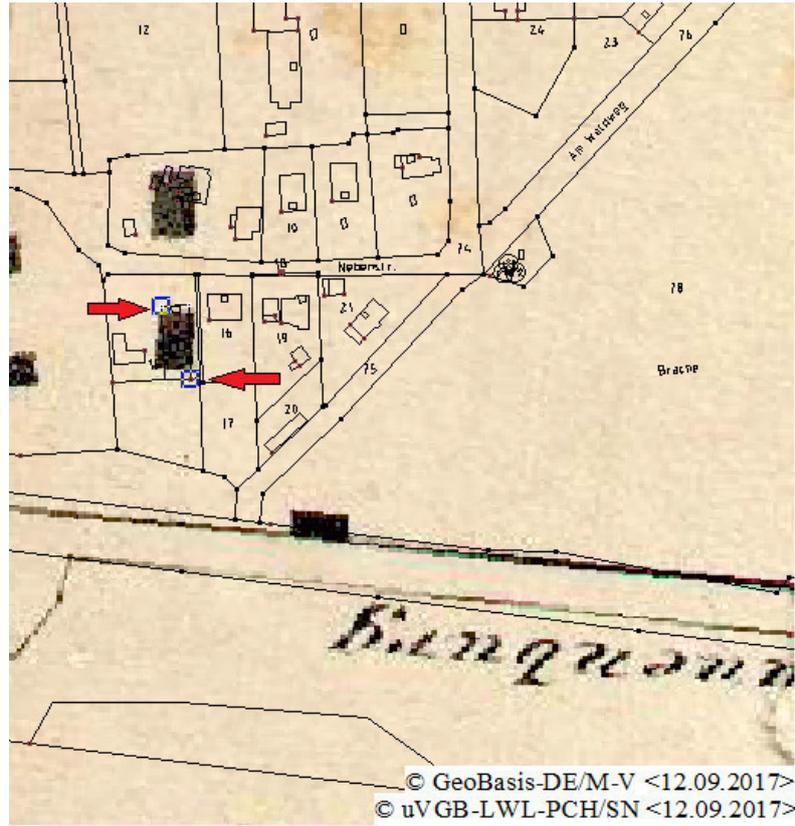
Ausgewählte Passpunkte Blattschnitt 114:



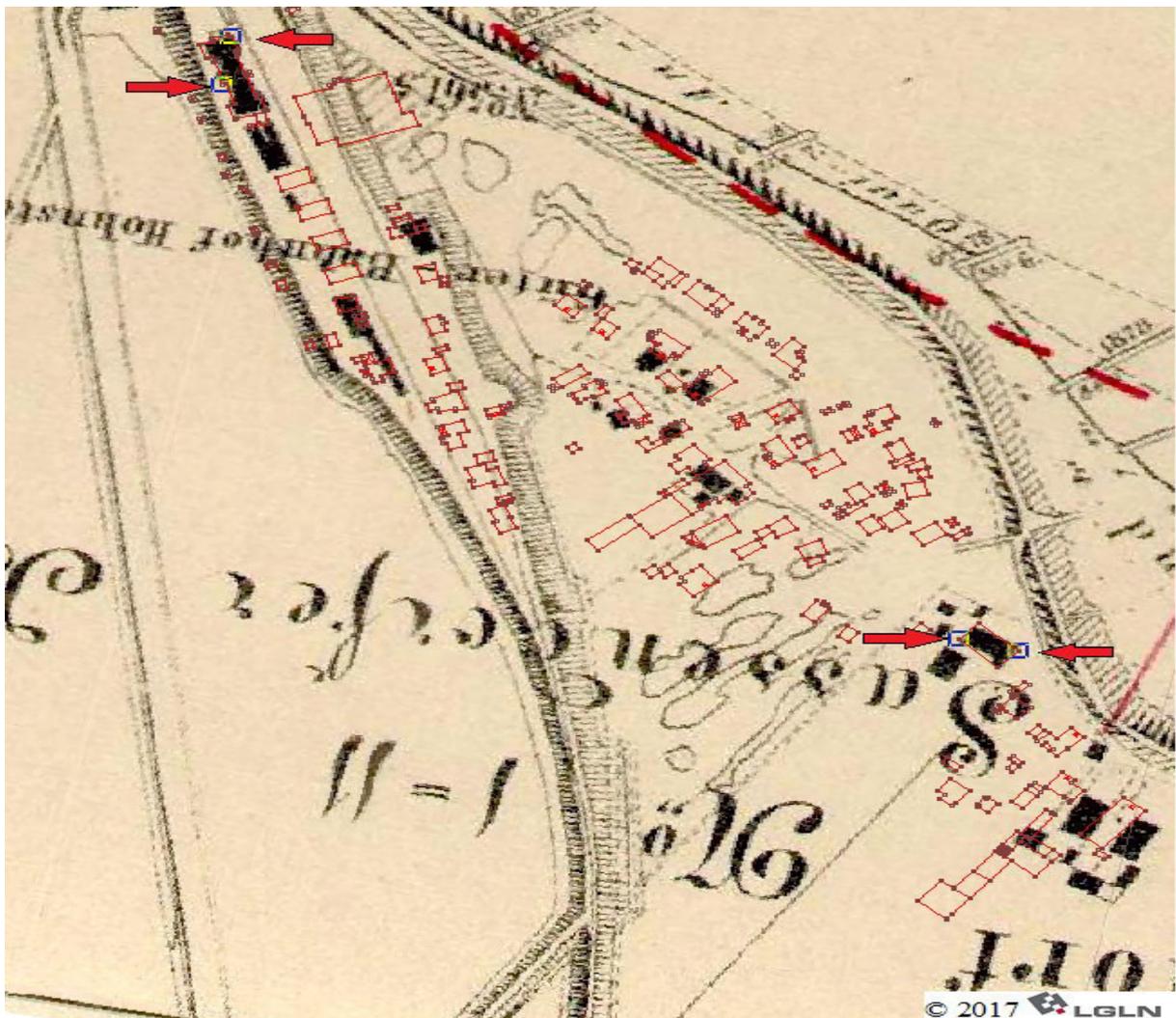
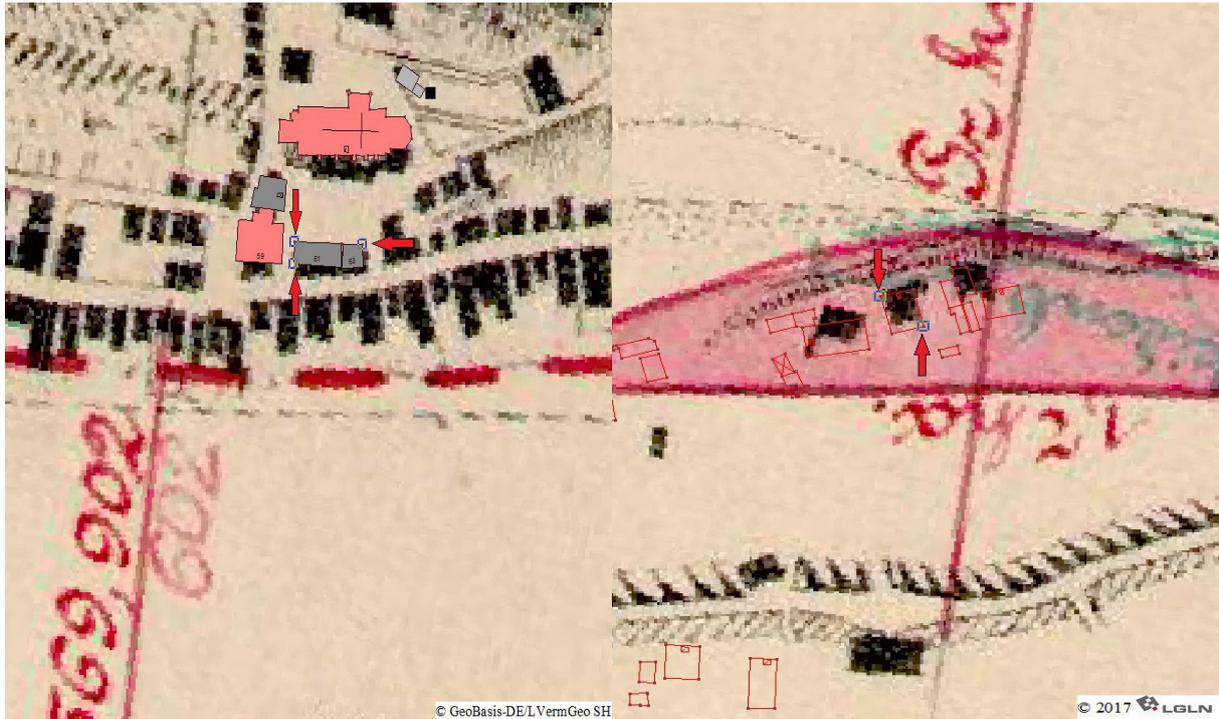
Ausgewählte Passpunkte Blattschnitt 115:



Ausgewählte Passpunkte Kartenblatt 54:



Ausgewählte Passpunkte Blattschnitt 119:



Anhang IV: Geograf-Protokoll der Georeferenzierung

--- Daten importieren ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Gebäuedaten NDS\viewer070678-20170926142910_R14.dxf
Format: DXF/DWG
Lagebezug Datei: NI:ETRS89_UTM32
Lagebezug Auftrag: NI:ETRS89_UTM32
Trafo: Ohne

--- Daten importieren ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Gebäuedaten SH\DP_66477_2017_1.dxf
Format: DXF/DWG
Lagebezug Datei: NI:ETRS89_UTM32
Lagebezug Auftrag: NI:ETRS89_UTM32
Trafo: Ohne

--- Daten importieren ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Gebäuedaten SH\DP_66477_2017_2.dxf
Format: DXF/DWG
Lagebezug Datei: NI:ETRS89_UTM32
Lagebezug Auftrag: NI:ETRS89_UTM32
Trafo: Ohne

--- Daten importieren ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Gebäuedaten MV\AAA2DXF_Gothmann_2017_09_12_10_19_46\TRAFO_Gothmann_TRAFO.dxf
Format: DXF/DWG
Lagebezug Datei: NI:ETRS89_UTM32
Lagebezug Auftrag: NI:ETRS89_UTM32
Trafo: Ohne

--- Daten importieren ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Gebäuedaten MV\AAA2DXF_Horst_2017_09_12_10_12_21\TRAFO_Horst_TRAFO.dxf
Format: DXF/DWG

Lagebezug Datei: NI:ETRS89_UTM32
 Lagebezug Auftrag: NI:ETRS89_UTM32
 Trafo: Ohne

--- Daten importieren ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Gebäuedaten
 MV\AAA2DXF_Vier_2017_09_12_10_17_25\TRAFO_Vier_TRAFO.dxf
 Format: DXF/DWG
 Lagebezug Datei: NI:ETRS89_UTM32
 Lagebezug Auftrag: NI:ETRS89_UTM32
 Trafo: Ohne

--- konstruierte Schnitte ---

	R	H	HÖHE	PUNKTNUMMER	ART	LH	ANSATZ
1. Gerade							
PA:	32603329.688	5914606.435	0.000	ID=10027D3	0 RR	1002	
PE:	32603329.394	5914599.654	0.000	ID=10024F5	5 RR	1002	
2. Gerade							
PA:	32603329.394	5914599.654	0.000	ID=10024F5	5 RR	1002	
PE:	32603346.213	5914598.445	0.000	ID=1002697	0 RR	1002	
SCHNITTPUNKT							
NEU	32603329.394	5914599.654		3559920705612	3070 RU	1191	

--- Linien umwandeln in Punkte ---

	R	H	HÖHE	PUNKTNUMMER	ART	LH	ANSATZ
NEU	32608199.185	5915349.214	0.000	3559920705609	3070 RR	1131	
NEU	32608189.664	5915348.859	0.000	3559920705610	3070 RR	1131	
NEU	32608190.612	5915321.871	0.000	3559920705611	3070 RR	1131	

--- Koordinatentransformation ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Regulierungsprojekt 1902\Blatt 55.tiff

System: 1 Ansatz: 1261

R	H	HÖHE	PUNKTNUMMER	ART	LH	ANSATZ
DR	DH	DS	R	DR/R	DH/R	

Auftrag: 32604374.250 5913247.626 0.000 ID=10019B5 0 RR 1001

Datei: 4227.843 -2192.221

Trafo: 32604375.588 5913250.080

Klaffe: -1.338 -2.454 2.795 0.627 2.135 3.916

Auftrag: 32604355.202 5913265.859 0.000 ID=10019B6 0 RR 1001

Datei: 4255.501 -2201.690

Trafo: 32604354.422 5913262.475

Klaffe: 0.780 3.384 3.472 0.639 1.221 5.295

Auftrag: 32603212.608 5914292.160 0.000 ID=1001F44 0 RR 1001

Datei: 5831.988 -3136.318

Trafo: 32603213.781 5914293.760

Klaffe: -1.173 -1.600 1.984 0.836 1.403 1.913

Auftrag: 32603226.830 5914280.871 0.000 ID=1001F46 0 RR 1001

Datei: 5815.951 -3127.612

Trafo: 32603225.518 5914283.929

Klaffe: 1.312 -3.058 3.327 0.840 1.562 3.640

Auftrag: 32603987.018 5913618.613 0.000 ID=10021E9 0 RR 1001

Datei: 4768.728 -2531.496

Trafo: 32603987.340 5913619.211

Klaffe: -0.322 -0.598 0.679 0.820 0.393 0.729

Auftrag: 32603991.191 5913650.153 0.000 ID=10021FB 0 RR 1001

Datei: 4769.284 -2570.597

Trafo: 32603993.400 5913651.457 **

Klaffe: -2.209 -1.304 2.565 0.825 2.677 1.581

Auftrag: 32603353.808 5914605.525 0.000 ID=1002794 0 RR 1002
 Datei: 5740.997 -3533.273
 Trafo: 32603354.756 5914605.025
 Klaffe: -0.948 0.500 1.072 0.806 1.176 0.621

Auftrag: 32603329.688 5914606.435 0.000 ID=10027D3 0 RR 1002
 Datei: 5771.251 -3526.367
 Trafo: 32603328.726 5914604.387
 Klaffe: 0.962 2.048 2.263 0.803 1.199 2.551

Auftrag: 32603329.394 5914599.654 3559920705612 3070 RU 1191
 Datei: 5769.777 -3518.748
 Trafo: 32603328.668 5914597.876
 Klaffe: 0.726 1.778 1.920 0.804 0.902 2.211

Parameter: 4

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32603646.100 m Hoch: 5914064.593 m
 Schwerpunkt Datei Rechts: 5272.755 m Hoch: -2970.966 m
 Verschiebung Rechts: 32598373.345 m Hoch: 5917035.558 m
 Maßstabsfaktor: 0.839044 Drehwinkel: 212.7287 gon
 Standardabweichung Koordinate: 1.943 m Punkt: 2.748 m

**) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

--- Koordinatentransformation ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Regulierungsprojekt 1902\Blatt 54.tiff

System: 4 Ansatz: 1262

R	H	HÖHE	PUNKTNUMMER	ART	LH	ANSATZ
DR	DH	DS	R	DR/R	DH/R	

Auftrag: 32613014.610 5913489.052 0.000 ID=1001909 0 RR 1001
 Datei: 2339.714 -2289.954
 Trafo: 32613014.658 5913488.369
 Klaffe: -0.048 0.683 0.685 0.502 0.096 1.361

Auftrag: 32613039.816 5913501.868 0.000 ID=100190D 0 RR 1001
 Datei: 2311.905 -2308.975
 Trafo: 32613039.771 5913502.534
 Klaffe: 0.045 -0.666 0.668 0.498 0.091 1.337

Auftrag: 32608200.128 5915322.282 0.000 ID=1003BF6 0 RR 1071
 Datei: 8128.926 -3943.672
 Trafo: 32608201.028 5915325.498
 Klaffe: -0.900 -3.216 3.340 0.502 1.793 6.408

Auftrag: 32608189.664 5915348.859 0.000 3559920705610 3070 RR 1131
 Datei: 8145.239 -3965.909
 Trafo: 32608188.761 5915345.660
 Klaffe: 0.903 3.199 3.324 0.498 1.813 6.423

Parameter: 4

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32610611.055 m Hoch: 5914415.515 m
 Schwerpunkt Datei Rechts: 5231.446 m Hoch: -3127.128 m
 Verschiebung Rechts: 32605379.608 m Hoch: 5917542.643 m
 Maßstabsfaktor: 0.855751 Drehwinkel: 205.4968 gon
 Standardabweichung Koordinate: 2.404 m Punkt: 3.400 m

**) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

--- Koordinatentransformation ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Regulierungsprojekt 1902\Blatt 53.tiff

System: 2 Ansatz: 1264

R	H	HÖHE	PUNKTNUMMER	ART	LH	ANSATZ
DR	DH	DS	R	DR/R	DH/R	

Auftrag: 32615673.546 5909946.506 0.000 ID=100101A 0 RR 1001
 Datei: 3188.155 -3064.847
 Trafo: 32615674.126 5909941.898
 Klaffe: -0.580 4.608 4.645 0.723 0.802 6.374

Auftrag: 32615698.728 5909954.168 0.000 ID=100101C 0 RR 1001
 Datei: 3183.379 -3094.847
 Trafo: 32615698.256 5909950.580
 Klaffe: 0.472 3.588 3.619 0.722 0.654 4.967

Auftrag: 32614823.899 5912170.088 0.000 ID=1001177 0 RR 1001
 Datei: 5996.949 -3462.996
 Trafo: 32614825.000 5912181.103
 Klaffe: -1.101 -11.015 11.070 0.946 1.164 11.649

Auftrag: 32614849.886 5912188.840 0.000 ID=1001179 0 RR 1001
 Datei: 6000.888 -3499.042
 Trafo: 32614850.052 5912198.692
 Klaffe: -0.166 -9.852 9.853 0.945 0.176 10.424

Auftrag: 32615117.588 5911890.916 0.000 ID=100123F 0 RR 1001
 Datei: 5524.409 -3598.840
 Trafo: 32615117.844 5911886.967
 Klaffe: -0.256 3.949 3.958 0.935 0.274 4.225

Auftrag: 32615125.602 5911921.870 0.000 ID=1001243 0 RR 1001
 Datei: 5552.284 -3624.040
 Trafo: 32615125.130 5911917.840
 Klaffe: 0.472 4.030 4.058 0.935 0.504 4.310

Auftrag: 32615324.076 5911853.466 0.000 ID=10012C2 0 RR 1001
 Datei: 5365.889 -3792.426
 Trafo: 32615325.540 5911848.556
 Klaffe: -1.464 4.910 5.123 0.925 1.584 5.311

Auftrag: 32615353.508 5911873.103 0.000 ID=10012C4 0 RR 1001
 Datei: 5369.372 -3828.570
 Trafo: 32615350.851 5911865.848
 Klaffe: 2.657 7.255 7.727 0.923 2.878 7.857

Auftrag: 32615309.862 5911854.079 0.000 ID=100134F 0 RR 1001
 Datei: 5376.656 -3776.079
 Trafo: 32615309.068 5911849.863
 Klaffe: 0.794 4.216 4.290 0.925 0.858 4.556

Auftrag: 32615316.047 5911885.717 0.000 ID=1001355 0 RR 1001
 Datei: 5403.145 -3796.791
 Trafo: 32615313.599 5911877.884
 Klaffe: 2.448 7.833 8.206 0.926 2.644 8.462

Auftrag: 32614043.680 5912703.339 0.000 ID=10013EC 0 RR 1001
 Datei: 6997.216 -2958.643
 Trafo: 32614044.787 5912715.461
 Klaffe: -1.107 -12.122 12.173 0.925 1.196 13.102

Auftrag: 32614580.145 5912318.869 0.000 ID=10015FA 0 RR 1001
 Datei: 6300.434 -3296.438
 Trafo: 32614578.270 5912337.719
 Klaffe: 1.875 -18.850 18.943 0.946 1.980 19.916

Auftrag: 32614586.160 5912355.008 0.000 ID=1001606 0 RR 1001
 Datei: 6331.230 -3321.101
 Trafo: 32614583.971 5912370.534
 Klaffe: 2.189 -15.526 15.680 0.946 2.314 16.411

Auftrag: 32613884.035 5912956.334 0.000 ID=1001689 0 RR 1001
 Datei: 7343.749 -2929.206
 Trafo: 32613881.932 5912959.738
 Klaffe: 2.103 -3.404 4.001 0.905 2.323 3.760

Auftrag: 32613834.025 5912885.915 0.000 ID=10016BA 0 RR 1001
 Datei: 7299.227 -2842.894
 Trafo: 32613836.231 5912891.674
 Klaffe: -2.206 -5.759 6.167 0.907 2.434 6.353

Auftrag: 32613862.689 5912962.862 0.000 ID=10017ED 0 RR 1001
 Datei: 7363.230 -2911.917
 Trafo: 32613861.216 5912967.106
 Klaffe: 1.473 -4.244 4.492 0.904 1.630 4.695

Auftrag: 32613317.711 5913173.979 0.000 ID=1001848 0 RR 1001
 Datei: 7873.954 -2461.153
 Trafo: 32613319.942 5913161.264
 Klaffe: -2.231 12.715 12.909 0.849 2.628 14.975

Auftrag: 32613347.602 5913197.447 0.000 ID=100184A 0 RR 1001
 Datei: 7879.213 -2504.249
 Trafo: 32613349.671 5913182.699
 Klaffe: -2.069 14.748 14.892 0.850 2.434 17.348

Auftrag: 32613404.467 5913095.930 0.000 ID=100193F 0 RR 1001
 Datei: 7742.569 -2507.584
 Trafo: 32613407.769 5913083.008
 Klaffe: -3.302 12.922 13.337 0.863 3.828 14.980

Parameter: 4

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32614602.803 m Hoch: 5912167.812 m
 Schwerpunkt Datei Rechts: 6110.103 m Hoch: -3224.824 m
 Verschiebung Rechts: 32608492.700 m Hoch: 5915392.637 m
 Maßstabsfaktor: 0.844168 Drehwinkel: 267.9609 gon
 Standardabweichung Koordinate: 7.379 m Punkt: 10.436 m

***) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

--- Koordinatentransformation ---

Datei: F:\Bachelorarbeit\Regulierungsprojekt 1902\Blatt 52.tiff

System: 3 Ansatz: 1266

R H HÖHE PUNKTNUMMER ART LH ANSATZ
 DR DH DS R DR/R DH/R

Auftrag: 32620345.956 5905582.492 0.000 ID=100076A 0 RR 1001
 Datei: 2472.413 -4816.794

Trafo: 32620346.821 5905577.161
 Klaffe: -0.865 5.331 5.400 0.797 1.084 6.686

Auftrag: 32620329.683 5905550.650 0.000 ID=100077C 0 RR 1001
 Datei: 2471.175 -4773.836
 Trafo: 32620326.440 5905546.760
 Klaffe: 3.243 3.890 5.064 0.798 4.062 4.874

Auftrag: 32616996.628 5905573.723 0.000 ID=10009E4 0 RR 1001
 Datei: 5673.608 -2538.529
 Trafo: 32617000.571 5905579.976
 Klaffe: -3.943 -6.253 7.393 0.910 4.334 6.873

Auftrag: 32616971.927 5905561.729 0.000 ID=1000A09 0 RR 1001
 Datei: 5687.195 -2509.778
 Trafo: 32616976.935 5905566.756
 Klaffe: -5.008 -5.027 7.096 0.909 5.510 5.530

Auftrag: 32616966.792 5905588.469 0.000 ID=1000A0D 0 RR 1001
 Datei: 5710.962 -2529.985
 Trafo: 32616970.445 5905592.519
 Klaffe: -3.653 -4.050 5.454 0.909 4.017 4.454

Auftrag: 32616308.916 5907059.709 0.000 ID=1000B99 0 RR 1001
 Datei: 7349.007 -3488.761
 Trafo: 32616308.562 5907067.236
 Klaffe: 0.354 -7.527 7.535 0.877 0.403 8.581

Auftrag: 32616300.450 5907074.522 0.000 ID=1000B9B 0 RR 1001
 Datei: 7366.290 -3500.411
 Trafo: 32616302.337 5907083.859
 Klaffe: -1.887 -9.337 9.526 0.876 2.154 10.655

Auftrag: 32615137.904 5906622.884 0.000 ID=1000D4B 0 RR 1001
 Datei: 8165.194 -2258.153

Trafo: 32615134.161 5906617.395

Klaffe: 3.743 5.489 6.643 0.810 4.620 6.775

Auftrag: 32615163.432 5906597.948 0.000 ID=1000D4D 0 RR 1001

Datei: 8118.884 -2249.608

Trafo: 32615162.051 5906588.574

Klaffe: 1.381 9.374 9.475 0.813 1.700 11.534

Auftrag: 32615184.095 5906639.597 0.000 ID=1000D50 0 RR 1001

Datei: 8131.380 -2304.757

Trafo: 32615180.651 5906632.995

Klaffe: 3.444 6.602 7.446 0.814 4.232 8.112

Auftrag: 32620140.397 5905862.478 0.000 ID=1000ED9 0 RR 1001

Datei: 2863.069 -4947.022

Trafo: 32620140.305 5905860.609

Klaffe: 0.092 1.869 1.871 0.819 0.112 2.281

Auftrag: 32619968.526 5906047.653 0.000 ID=1000FE4 0 RR 1001

Datei: 3155.871 -5007.986

Trafo: 32619967.402 5906047.647

Klaffe: 1.124 0.006 1.124 0.834 1.348 0.007

Auftrag: 32619987.755 5906080.589 0.000 ID=1000FE6 0 RR 1001

Datei: 3161.005 -5052.358

Trafo: 32619985.779 5906080.955

Klaffe: 1.976 -0.366 2.009 0.833 2.372 0.439

Parameter: 4

System: 3 Ansatz: 1266

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32617677.112 m Hoch: 5906141.726 m

Schwerpunkt Datei Rechts: 5409.696 m Hoch: -3536.768 m

Verschiebung Rechts: 32612267.416 m Hoch: 5909678.494 m

Maßstabsfaktor: 0.851650 Drehwinkel: 239.4304 gon

Standardabweichung Koordinate: 4.932 m Punkt: 6.976 m

***) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

--- Koordinatentransformation ---

Datei: G:\BA_Thesis\Karten\Blatt 55_119.tiff

System: 7 Ansatz: 1267

R H HÖHE PUNKTNUMMER ART LH ANSATZ

DR DH DS R DR/R DH/R

Auftrag: 32604344.966 5913254.878 0.000 ID=10019B3 0 RR 1001

Datei: 827.171 -391.628

Trafo: 32604346.465 5913251.325

Klaffe: -1.499 3.553 3.856 0.664 2.257 5.349

Auftrag: 32604374.250 5913247.626 0.000 ID=10019B5 0 RR 1001

Datei: 794.235 -395.260

Trafo: 32604374.142 5913248.818

Klaffe: 0.108 -1.192 1.196 0.653 0.165 1.825

Auftrag: 32603212.608 5914292.160 0.000 ID=1001F44 0 RR 1001

Datei: 2397.734 -1341.973

Trafo: 32603214.093 5914294.406

Klaffe: -1.485 -2.246 2.692 0.823 1.803 2.728

Auftrag: 32603226.830 5914280.871 0.000 ID=1001F46 0 RR 1001

Datei: 2381.480 -1331.806

Trafo: 32603225.757 5914283.338

Klaffe: 1.073 -2.467 2.691 0.828 1.297 2.981

Auftrag: 32603987.018 5913618.613 0.000 ID=10021E9 0 RR 1001

Datei: 1336.683 -737.317

Trafo: 32603985.344 5913620.442

Klaffe: 1.674 -1.829 2.480 0.834 2.008 2.195

Auftrag: 32603991.191 5913650.153 0.000 ID=10021FB 0 RR 1001

Datei: 1336.076 -774.558

Trafo: 32603992.054 5913650.951
 Klaffe: -0.863 -0.798 1.175 0.838 1.030 0.952

Auftrag: 32603353.808 5914605.525 0.000 ID=1002794 0 RR 1002
 Datei: 2307.484 -1738.030
 Trafo: 32603354.333 5914604.882
 Klaffe: -0.525 0.643 0.830 0.789 0.666 0.815

Auftrag: 32603329.688 5914606.435 0.000 ID=10027D3 0 RR 1002
 Datei: 2337.005 -1731.648
 Trafo: 32603329.005 5914604.561
 Klaffe: 0.683 1.874 1.995 0.785 0.871 2.388

Auftrag: 32603329.394 5914599.654 3559920705612 3070 RU 1191
 Datei: 2335.777 -1722.931
 Trafo: 32603328.560 5914597.191
 Klaffe: 0.834 2.463 2.600 0.787 1.060 3.131

Parameter: 4

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32603683.306 m Hoch: 5914017.324 m
 Schwerpunkt Datei Rechts: 1783.738 m Hoch: -1129.461 m
 Verschiebung Rechts: 32601899.568 m Hoch: 5915146.785 m
 Maßstabsfaktor: 0.838681 Drehwinkel: 212.7462 gon
 Standardabweichung Koordinate: 1.885 m Punkt: 2.666 m

**) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

--- Koordinatentransformation ---

Datei: G:\BA_Thesis\Karten\Blatt 53_Blatt115.tiff

System: 5 Ansatz: 1271

R	H	HÖHE	PUNKTNUMMER	ART	LH	ANSATZ
DR	DH	DS	R	DR/R	DH/R	

Auftrag: 32615673.546 5909946.506 0.000 ID=100101A 0 RR 1001
 Datei: 3133.896 -2647.932
 Trafo: 32615673.725 5909945.689
 Klaffe: -0.179 0.817 0.837 0.503 0.355 1.624

Auftrag: 32615698.728 5909954.168 0.000 ID=100101C 0 RR 1001

Datei: 3129.125 -2679.314

Trafo: 32615698.884 5909954.931

Klaffe: -0.156 -0.763 0.779 0.504 0.309 1.514

Auftrag: 32615117.588 5911890.916 0.000 ID=100123F 0 RR 1001

Datei: 5470.673 -3183.449

Trafo: 32615118.819 5911892.397

Klaffe: -1.231 -1.481 1.926 0.824 1.494 1.799

Auftrag: 32615125.602 5911921.870 0.000 ID=1001243 0 RR 1001

Datei: 5498.982 -3208.624

Trafo: 32615125.921 5911923.587

Klaffe: -0.319 -1.717 1.746 0.819 0.389 2.096

Auftrag: 32615324.076 5911853.466 0.000 ID=10012C2 0 RR 1001

Datei: 5312.123 -3376.190

Trafo: 32615325.939 5911853.549

Klaffe: -1.863 -0.083 1.865 0.840 2.219 0.099

Auftrag: 32615353.508 5911873.103 0.000 ID=10012C4 0 RR 1001

Datei: 5316.465 -3414.076

Trafo: 32615352.201 5911872.180

Klaffe: 1.307 0.923 1.600 0.837 1.562 1.103

Auftrag: 32615309.862 5911854.079 0.000 ID=100134F 0 RR 1001

Datei: 5322.207 -3359.223

Trafo: 32615309.283 5911854.102

Klaffe: 0.579 -0.023 0.580 0.839 0.690 0.028

Auftrag: 32615316.047 5911885.717 0.000 ID=1001355 0 RR 1001

Datei: 5349.797 -3381.030

Trafo: 32615314.186 5911883.390

Klaffe: 1.861 2.327 2.980 0.834 2.230 2.790

Parameter: 4

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32615364.870 m Hoch: 5911397.478 m

Schwerpunkt Datei Rechts: 4816.658 m Hoch: -3156.230 m

Verschiebung Rechts: 32610548.211 m Hoch: 5914553.708 m

Maßstabsfaktor: 0.844369 Drehwinkel: 267.9804 gon

Standardabweichung Koordinate: 1.394 m Punkt: 1.971 m

**) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

--- Koordinatentransformation ---

Datei: G:\BA_Thesis\Karten\Blatt 52_114.tiff

System: 6 Ansatz: 1272

R H HÖHE PUNKTNUMMER ART LH ANSATZ

DR DH DS R DR/R DH/R

Auftrag: 32616308.916 5907059.709 0.000 ID=1000B99 0 RR 1001

Datei: 1502.814 -1922.842

Trafo: 32616307.725 5907058.674

Klaffe: 1.191 1.035 1.577 0.499 2.385 2.072

Auftrag: 32616300.450 5907074.522 0.000 ID=1000B9B 0 RR 1001

Datei: 1520.485 -1934.675

Trafo: 32616301.552 5907075.545

Klaffe: -1.102 -1.023 1.504 0.501 2.198 2.042

Auftrag: 32615137.904 5906622.884 0.000 ID=1000D4B 0 RR 1001

Datei: 2320.228 -691.017

Trafo: 32615136.779 5906624.631

Klaffe: 1.125 -1.747 2.078 0.655 1.718 2.668

Auftrag: 32615163.432 5906597.948 0.000 ID=1000D4D 0 RR 1001

Datei: 2273.354 -682.996

Trafo: 32615164.782 5906595.830

Klaffe: -1.350 2.118 2.512 0.663 2.037 3.195

Auftrag: 32615184.095 5906639.597 0.000 ID=1000D50 0 RR 1001

Datei: 2285.799 -738.602

Trafo: 32615183.959 5906639.979

Klaffe: 0.136 -0.382 0.405 0.681 0.200 0.560

Parameter: 4

Schwerpunkt Auftrag Rechts: 32615618.959 m Hoch: 5906798.932 m

Schwerpunkt Datei Rechts: 1980.536 m Hoch: -1194.027 m

Verschiebung Rechts: 32613638.423 m Hoch: 5907992.959 m

Maßstabsfaktor: 0.844720 Drehwinkel: 240.1044 gon

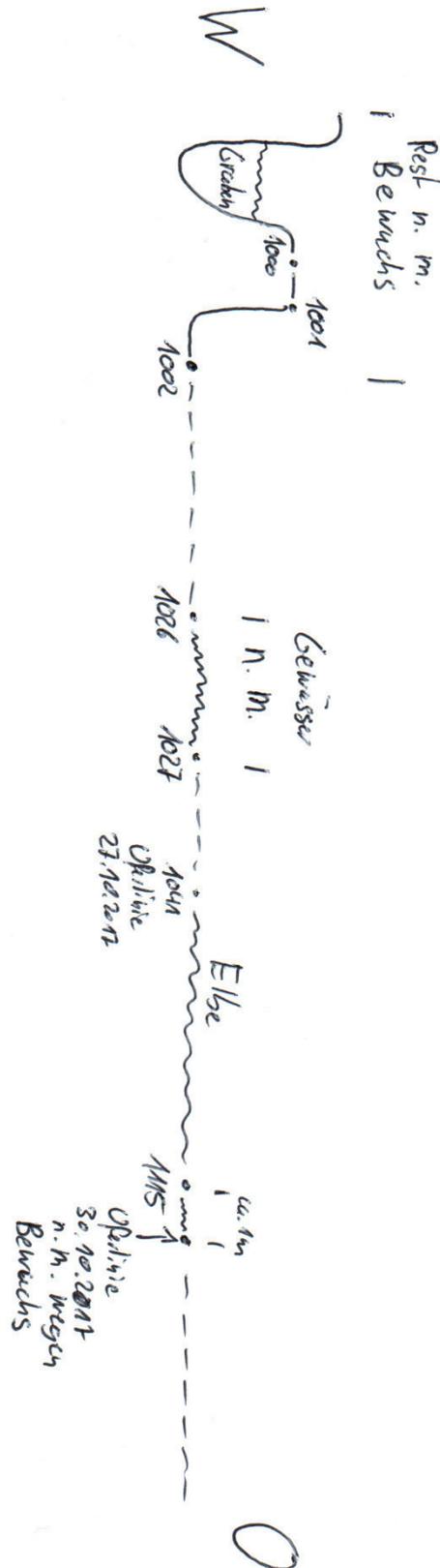
Standardabweichung Koordinate: 1.610 m Punkt: 2.276 m

**) Punkt wurde nicht für die Transformationsberechnung verwendet

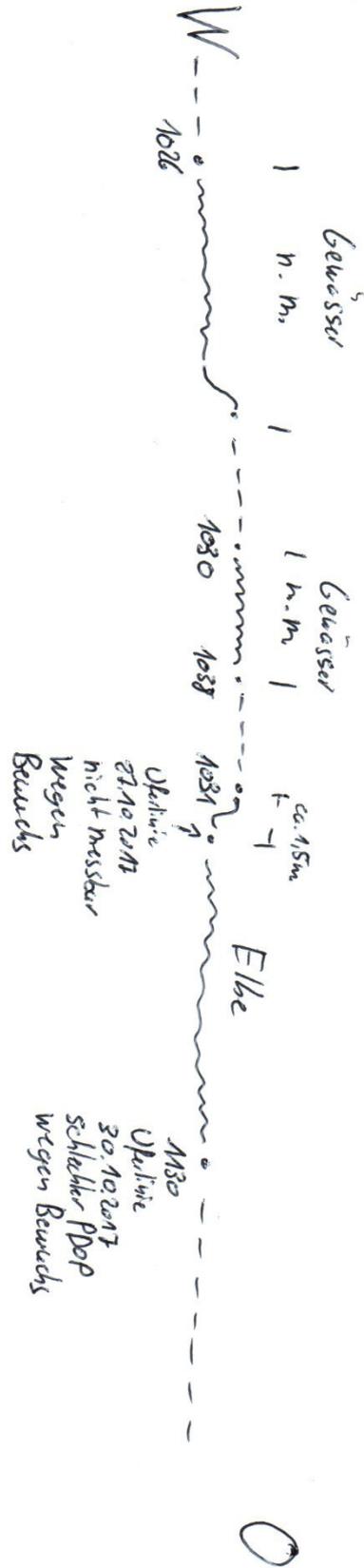
Anhang V: Feldbücher der GNSS-Messung

Feldbuch Elbquerprofil km 549,962	XXXIII
Feldbuch Elbquerprofil km 551,632	XXXIV
Feldbuch Elbquerprofil km 552,662	XXXV
Feldbuch Elbquerprofil km 553,978	XXXVI
Feldbuch Elbquerprofil km 554,875	XXXVII
Feldbuch Elbquerprofil km 561,936	XXXVIII
Feldbuch Elbquerprofil km 563,415	XXXIX
Feldbuch Elbquerprofil km 569,602	XL

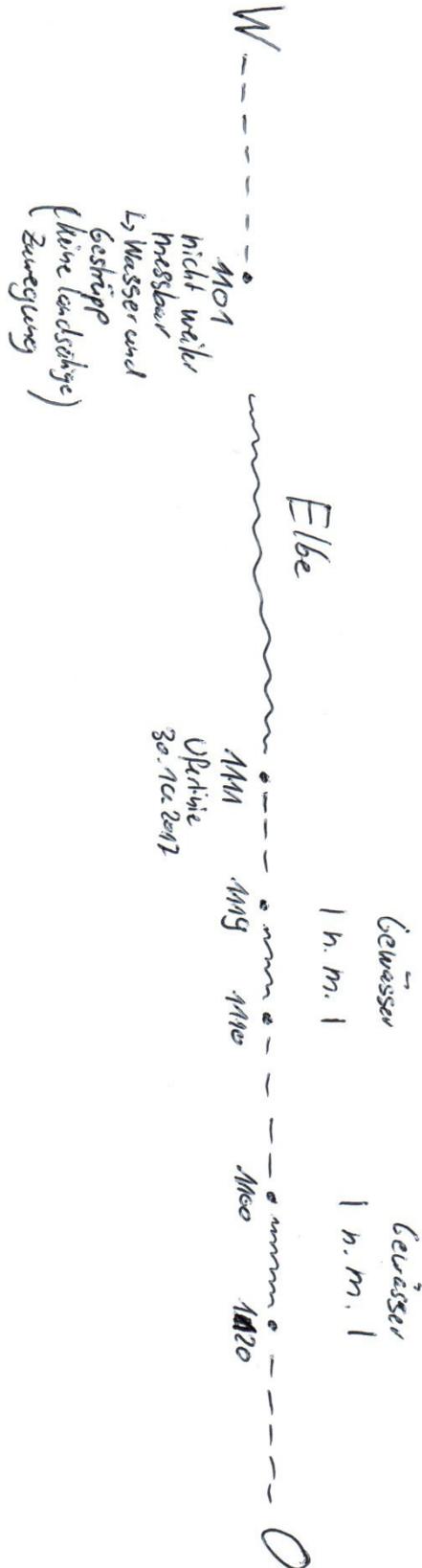
Feldbuch Elbprofile
Profil: km 549,962
Datum: 27.10.2017 und 30.10.2017
Bemerkung: - Referenzpunkte: 301 (Höhe), 356-450 (Lage), 658-81001 (Lage und Höhe)



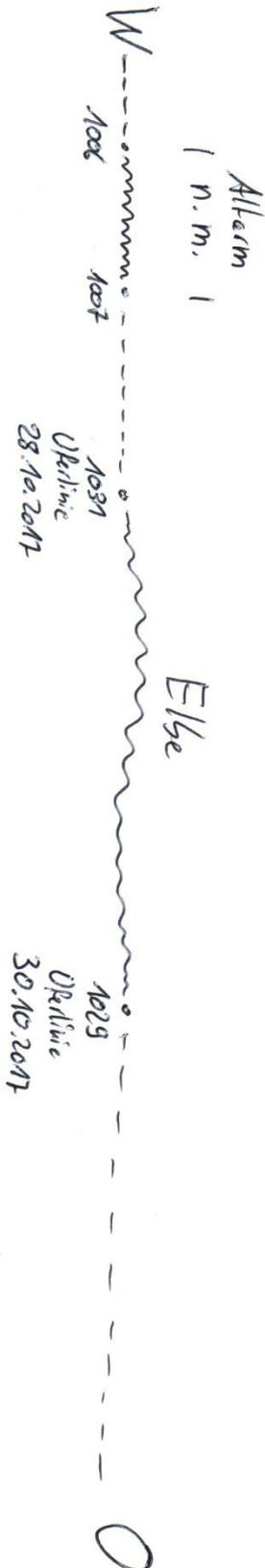
Feldbuch Elbprofile	
Profil:	km 551,632
Datum:	27.10.2017 und 30.10.2017
Bemerkung:	- Referenzpkt. (zusätzlich) nicht vorhanden - Deichmarke km 7,2 Pkt. 1039 - zum georeferenzierten Profil verlaufender Flügeldeich mitgemessen



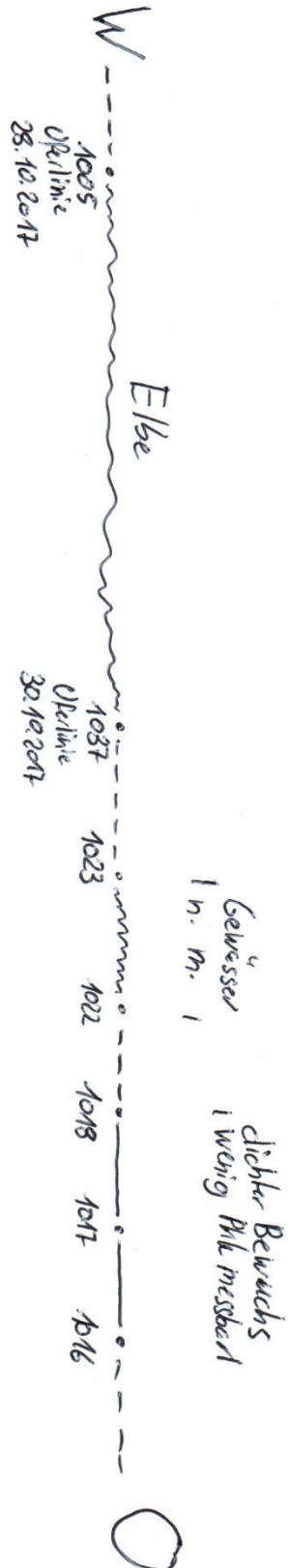
Feldbuch Elbprofile	
Profil:	km 552,662
Datum:	27.10.2017 und 30.10.2017
Bemerkung:	Referenzpkte (ausdrücklich) nicht vorhanden - Deichmarke km 8,7 Pkt.nr. 1100 - Referenzpht: 6.12 (Höhe)



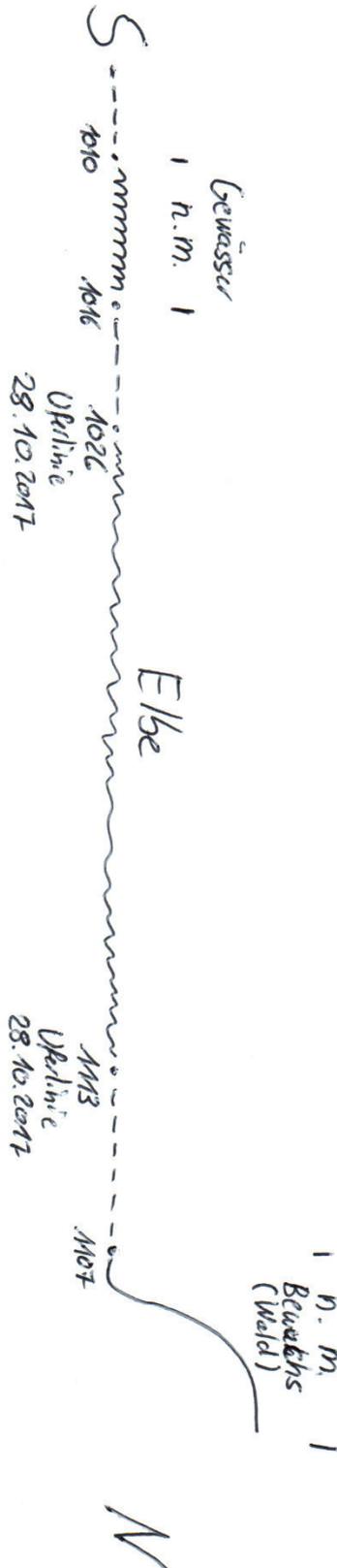
Feldbuch Elbprofile	
Profil:	Km 553,978
Datum:	28.10.2017 und 30.10.2017
Bemerkung:	Referenzpkte.: 652-81004 (Lage + Höhe)



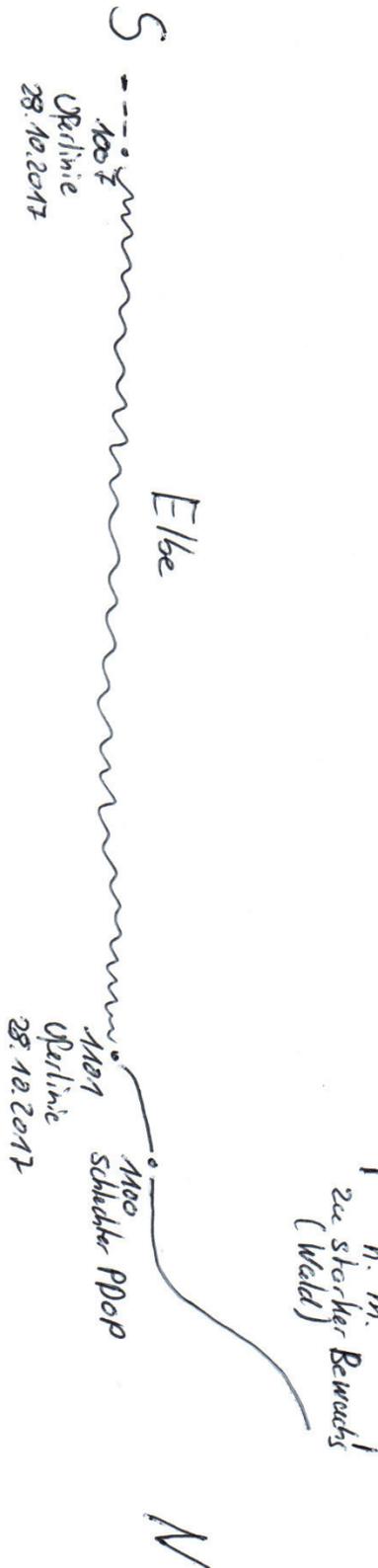
Feldbuch Elbprofile	
Profil:	Km 554,875
Datum:	28.10.2017 u. 30.10.2017
Bemerkung:	- Referenzpkte.: 314 (Höhe), 351-230 (Lage), 653-81006 (Lage + Höhe)



Feldbuch Elbprofile	
Profil:	km 561,936
Datum:	28.10.2017
Bemerkung:	Referenzpkte.: 686-6002 (Lage + Höhe) restliche nicht vorhanden



Feldbuch Elbprofile
Profil: km 563,415
Datum: 28.10.2017
Bemerkung: - Referenzpkt.: G96-6002 (Lage + Höhe) restliche nicht vorhanden



Feldbuch Elbprofile	
Profil:	km 569,602
Datum:	28.10.2017
Bemerkung:	- Referenzpkte.: G36-81001 (Lager+Höhe), 68 (Höhe) - Pkt. 1004 (Südseite) 1,20m hohe Mauer



Anhang VI: GNSS-Messprotokoll (Daten-CD)

Das GNSS-Messprotokoll der durchgeführten GNSS-Messung im Elbvorland befindet sich auf der beiliegenden Daten-CD bzw. dem Datenordner.

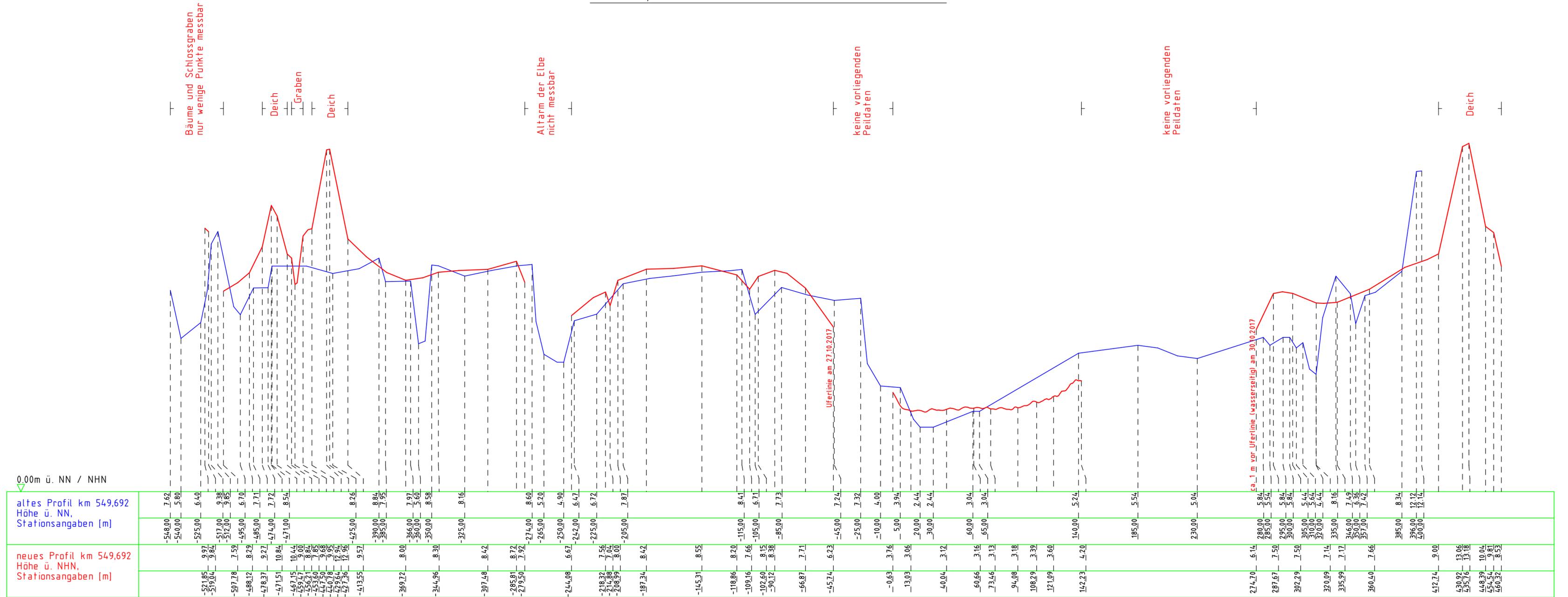
Anhang VII: Metadaten der Peildaten (Daten-CD)

Die Metadaten der zur Erstellung aktueller Elbquerprofile verwendeten Punktwolken, die aus Peildaten erzeugt wurden, befinden sich auf der beiliegenden Daten-CD bzw. Datenordner.

Anhang VIII: Profilpläne des Epochenvergleichs

Elbquerprofil km 549,962	XLIV
Elbquerprofil km 551,632	XLV
Elbquerprofil km 552,662	XLVI
Elbquerprofil km 553,978	XLVII
Elbquerprofil km 554,875	XLVIII
Elbquerprofil km 561,936	XLIX
Elbquerprofil km 563,415	L
Elbquerprofil km 569,602	LI
Flügeldeich Elbquerprofil km 551,632	LII

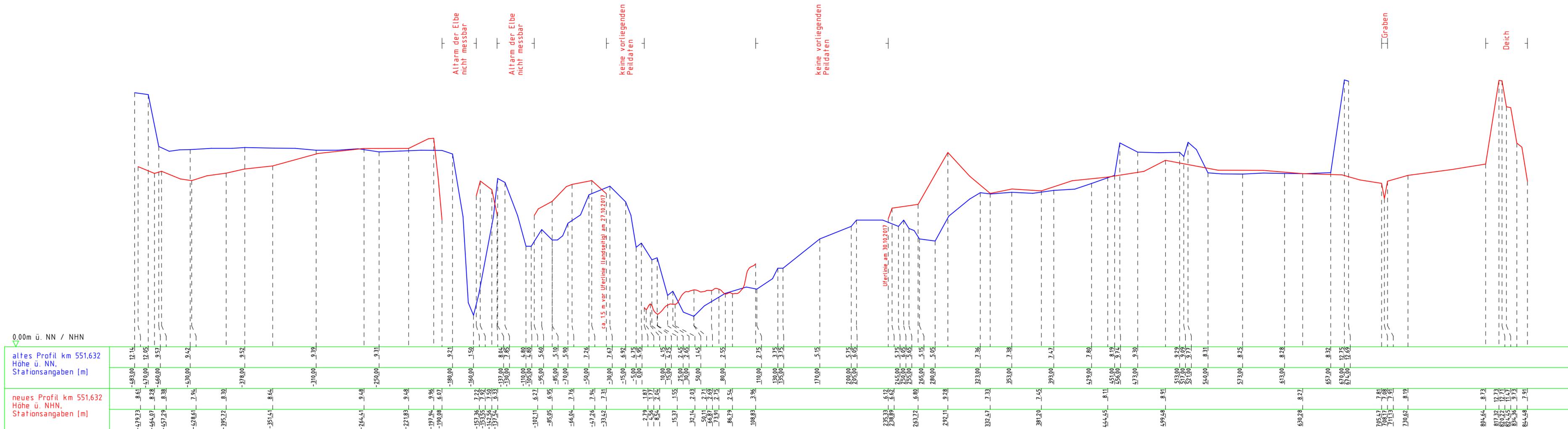
Elbprofil km 549,692



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

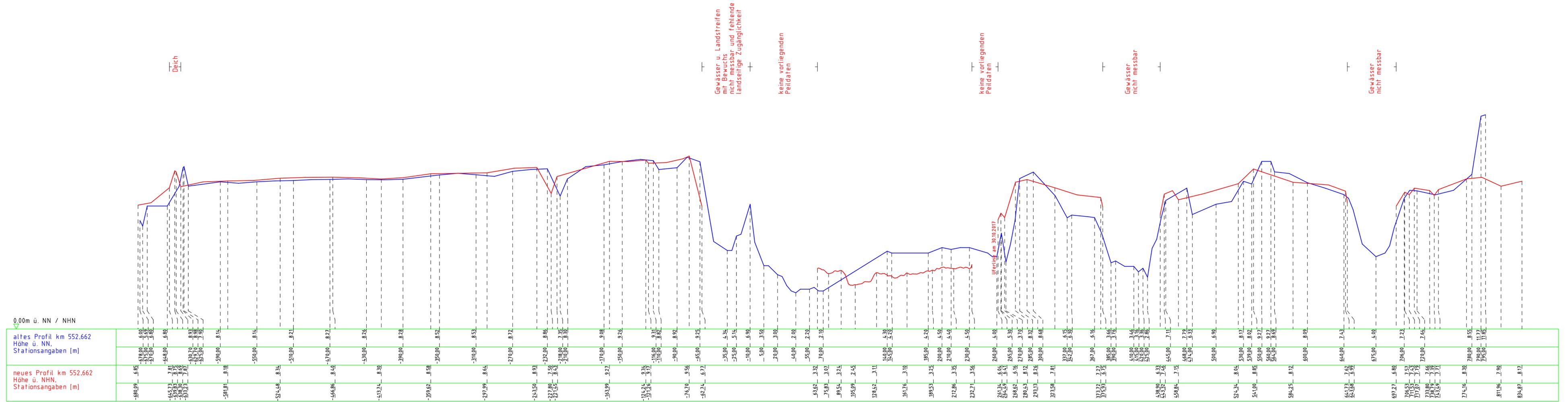
Elbprofil km 551,632



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

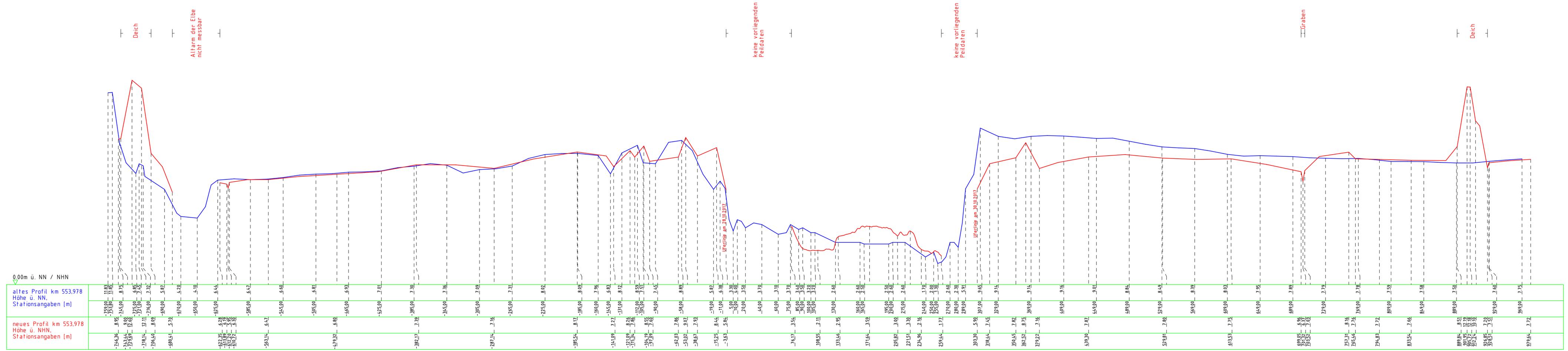
Elbprofil km 552,662



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab: 1:100

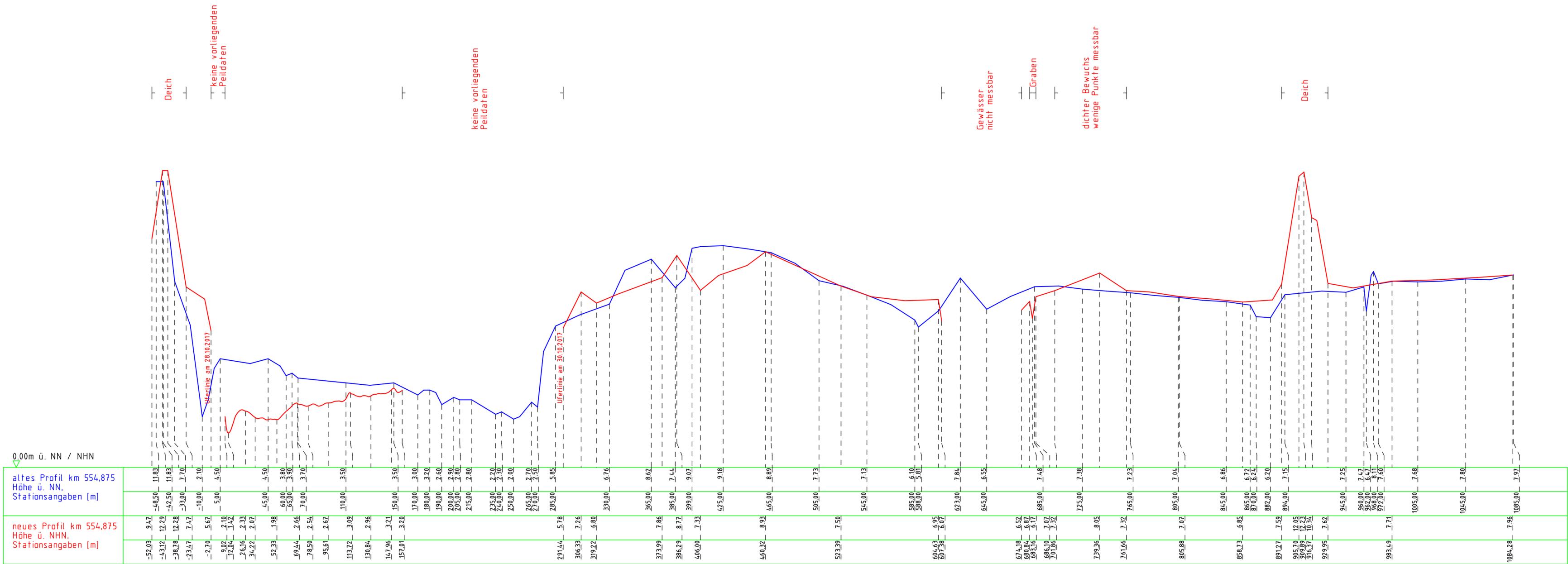
Elbprofil km 553,978



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

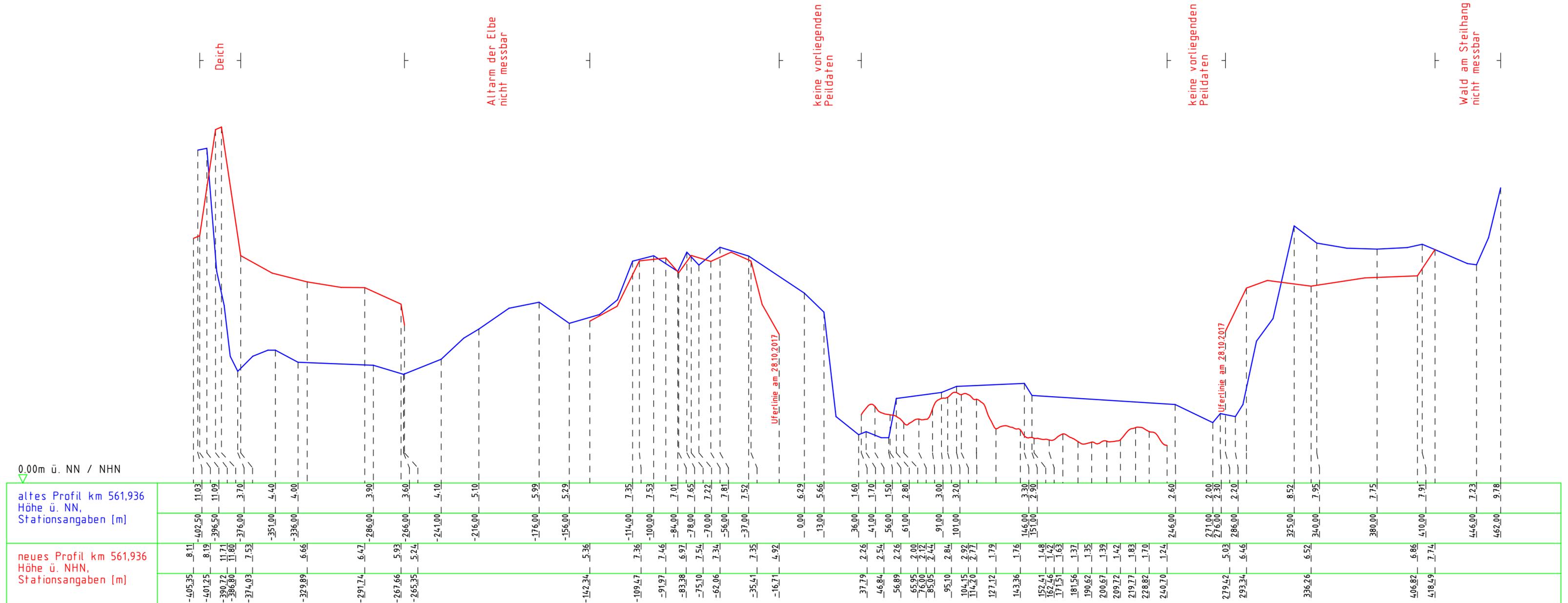
Elbprofil km 554,875



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

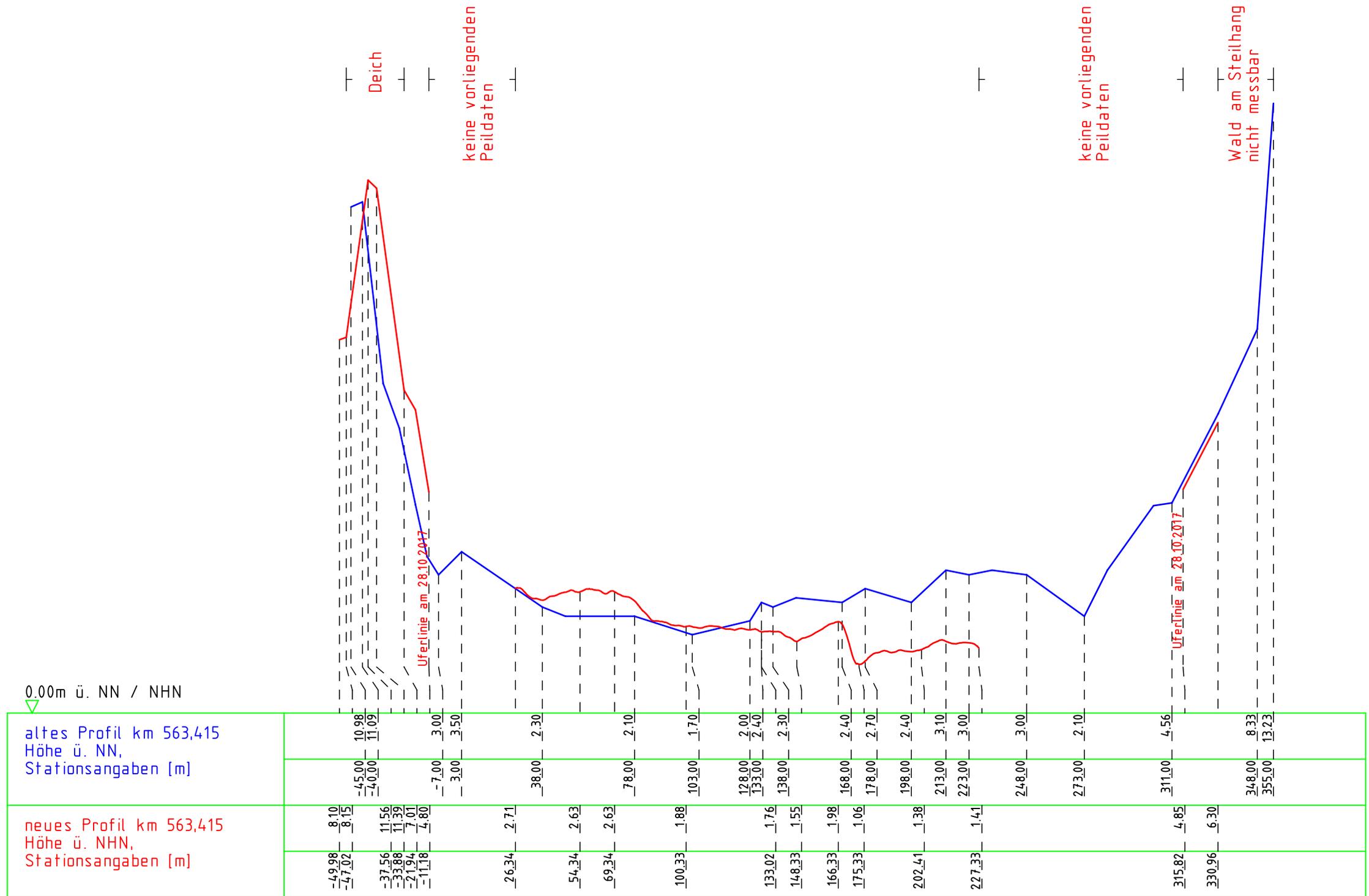
Elbprofil km 561,936



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

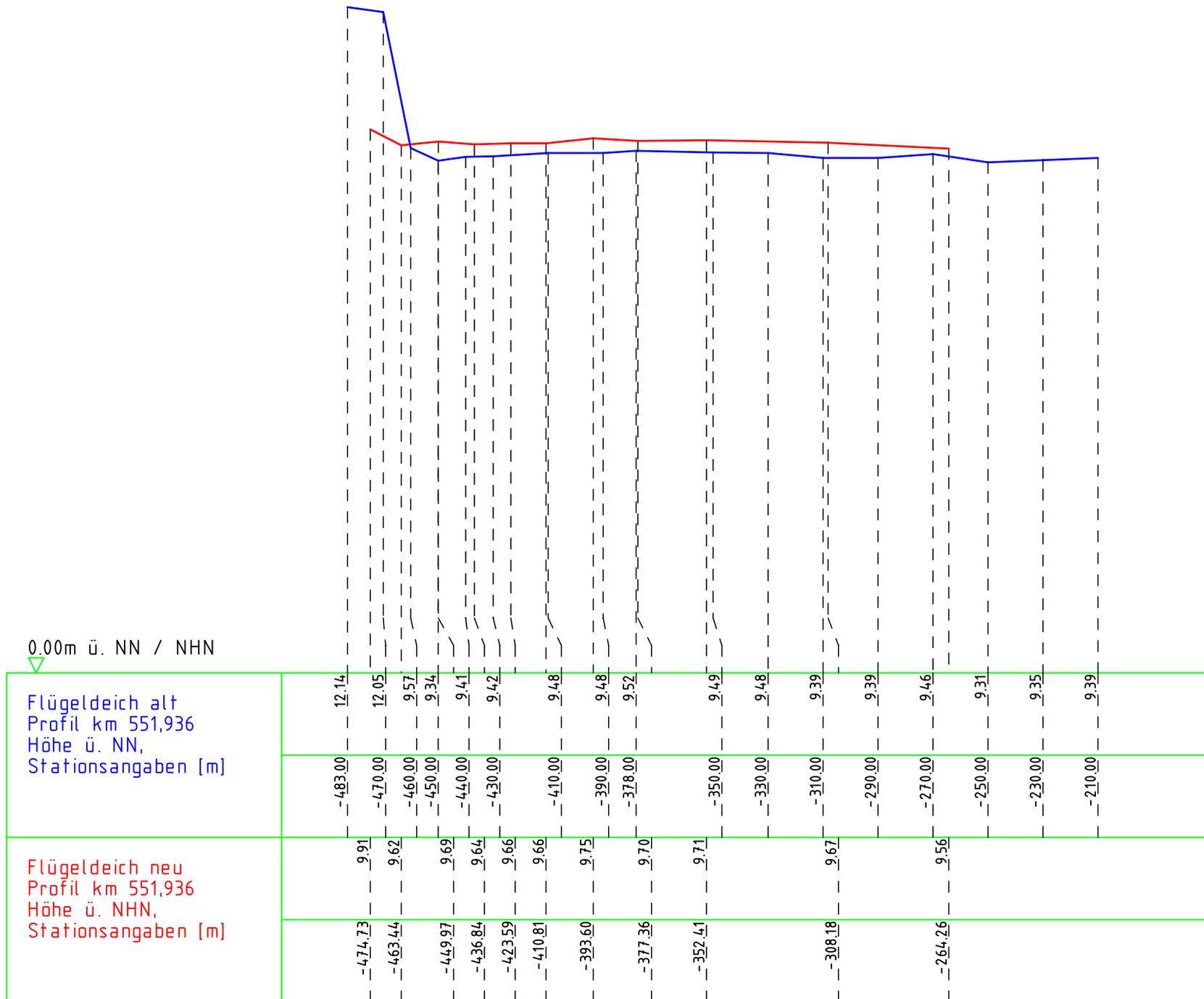
Elbprofil km 563,415



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

Vergleich Flügeldeich Elbprofil km 551,936



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

Anhang IX: Höhenfestpunktinformationen

 <p>Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) Landesvermessung und Geobasisinformation Podbielskistraße 331 30659 Hannover (0511)64609-0</p>		<p>Auszug aus dem amtlichen Festpunktinformationssystem</p> <p>Erstellt am: 29.11.2017</p>	<p>Gesamtauszug Höhenfestpunkt</p> <p>2833 00005</p>																																																																																																																																				
<p>Name, Lagebeschreibung: Quickborn, Dorfstraße, Kirche</p>																																																																																																																																							
<p>Angaben zum Festpunkt:</p> <p>Land: 03 Niedersachsen Gemeinde: 03354008 Gusbörn Katasteramt: 030086 LGLN Regionaldirektion Lüneburg – Katasteramt Lüchow -</p> <p>Punktvermarkung: 283300005 3230 Höhenmarke (des RFL)</p> <p>Relative Höhe [m]: 0,980 Darstellungshinweis: ja Bemerkung (intern): Erstvermarkung: 01.01.1893</p>																																																																																																																																							
<p>Klassifikation:</p> <p>Ordnung: 1000 HFP 1. Ordnung</p> <p>Qualitätsangaben:</p> <p>Überwachungsdatum: 21.06.2016</p> <p>Vermutete Höhenstabilität: 2000 Gut Güte des Vermarkungsträgers: 3000 Mäßige Topographie und Umwelteinflüsse: 3000 Befriedigend Güte des Baugrundes: 3000 Befriedigend Geologische Stabilität: 3000 Befriedigend Grundwasserstand: 3000 Befriedigend Grundwasserschwankung: 3000 Befriedigend Höhenstabilität aus Messungen: 3000 Befriedigend</p>																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>KST</th> <th>Lagesystem</th> <th>Ostwert</th> <th>Nordwert</th> <th>Methode</th> <th>Messdatum</th> <th>Prüfdatum</th> <th>Qualität GST</th> <th>Qualität GW</th> <th>Qualität VWL</th> <th>Jahr</th> <th>Aktenhinweis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1000</td> <td>ETRS89_UTM32</td> <td>32646957.000</td> <td>5886441.000</td> <td>4220</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="2">KST</th> <th colspan="2">Höhe</th> <th colspan="2">Methode</th> <th colspan="2">Messdatum</th> <th colspan="2">Prüfdatum</th> <th colspan="2">Qualität</th> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>DE_DHHN2016_NH</td> <td>20.707</td> <td>5110</td> <td>20.10.2009</td> <td>09.08.2011</td> <td>S <= 5 mm</td> <td>0.0045</td> <td>Ausgleichung</td> <td>2014</td> <td>51</td> <td>NI</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN92_NH</td> <td>20.728</td> <td>5110</td> <td>01.09.1991</td> <td>09.08.2011</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2000</td> <td>05</td> <td>HTRANS</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN85_NOH</td> <td>20.728</td> <td>5110</td> <td>01.09.1991</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1992</td> <td>07</td> <td>MV</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_NIV60_NOH_NII30</td> <td>20.713</td> <td></td> <td>01.01.1960</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>7803</td> <td></td> <td>B1</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN12_NII20</td> <td>20.727</td> <td>5110</td> <td>01.01.1960</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>60</td> <td></td> <td>B1</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN12_NOH</td> <td>20.724</td> <td>5110</td> <td>01.01.1913</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>3049</td> <td></td> <td>RFL</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_ALT_NN</td> <td>20.717</td> <td>5110</td> <td>01.01.1893</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1898</td> <td></td> <td>KPRLA</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>ETRS89_h</td> <td>59.804</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Berechnung</td> <td>2011</td> <td>UTM-TRANS</td> </tr> </tbody> </table>				KST	Lagesystem	Ostwert	Nordwert	Methode	Messdatum	Prüfdatum	Qualität GST	Qualität GW	Qualität VWL	Jahr	Aktenhinweis	1000	ETRS89_UTM32	32646957.000	5886441.000	4220								KST		Höhe		Methode		Messdatum		Prüfdatum		Qualität		1000	DE_DHHN2016_NH	20.707	5110	20.10.2009	09.08.2011	S <= 5 mm	0.0045	Ausgleichung	2014	51	NI	5000	DE_DHHN92_NH	20.728	5110	01.09.1991	09.08.2011				2000	05	HTRANS	5000	DE_DHHN85_NOH	20.728	5110	01.09.1991					1992	07	MV	5000	DE_NIV60_NOH_NII30	20.713		01.01.1960					7803		B1	5000	DE_DHHN12_NII20	20.727	5110	01.01.1960					60		B1	5000	DE_DHHN12_NOH	20.724	5110	01.01.1913					3049		RFL	5000	DE_ALT_NN	20.717	5110	01.01.1893					1898		KPRLA	2000	ETRS89_h	59.804							Berechnung	2011	UTM-TRANS
KST	Lagesystem	Ostwert	Nordwert	Methode	Messdatum	Prüfdatum	Qualität GST	Qualität GW	Qualität VWL	Jahr	Aktenhinweis																																																																																																																												
1000	ETRS89_UTM32	32646957.000	5886441.000	4220																																																																																																																																			
KST		Höhe		Methode		Messdatum		Prüfdatum		Qualität																																																																																																																													
1000	DE_DHHN2016_NH	20.707	5110	20.10.2009	09.08.2011	S <= 5 mm	0.0045	Ausgleichung	2014	51	NI																																																																																																																												
5000	DE_DHHN92_NH	20.728	5110	01.09.1991	09.08.2011				2000	05	HTRANS																																																																																																																												
5000	DE_DHHN85_NOH	20.728	5110	01.09.1991					1992	07	MV																																																																																																																												
5000	DE_NIV60_NOH_NII30	20.713		01.01.1960					7803		B1																																																																																																																												
5000	DE_DHHN12_NII20	20.727	5110	01.01.1960					60		B1																																																																																																																												
5000	DE_DHHN12_NOH	20.724	5110	01.01.1913					3049		RFL																																																																																																																												
5000	DE_ALT_NN	20.717	5110	01.01.1893					1898		KPRLA																																																																																																																												
2000	ETRS89_h	59.804							Berechnung	2011	UTM-TRANS																																																																																																																												
<p>Dieser Ausdruck ist gesetzlich geschützt. Vervielfältigung nur mit Genehmigung des Herausgebers. Als Vervielfältigung gelten z.B. Ausdruck, Fotokopie, Mikroverfilmung, Digitalisierung und Speicherung auf Datenträger.</p>																																																																																																																																							

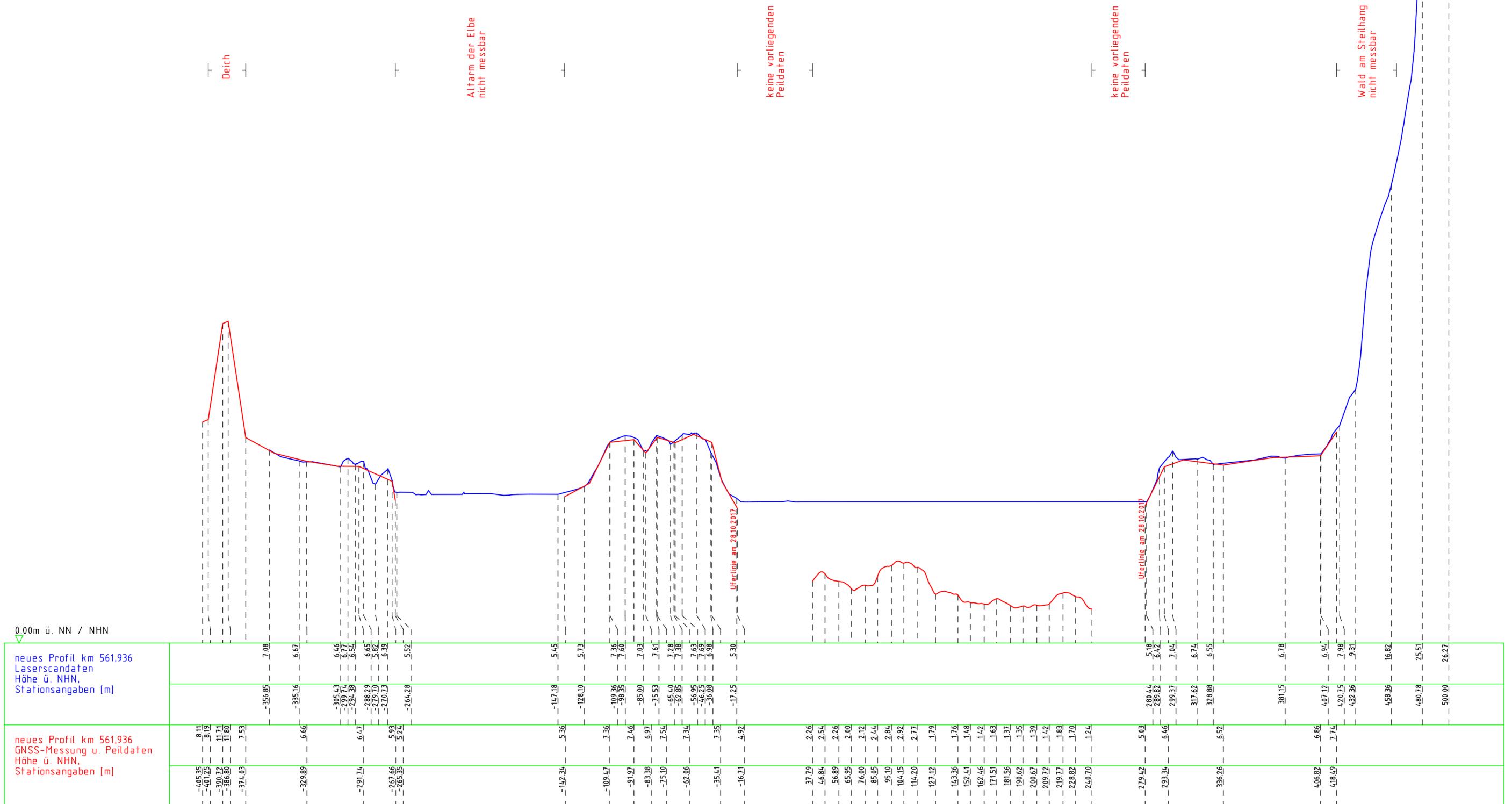
 <p>Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) Landesvermessung und Geobasisinformation Podbielskistraße 331 30659 Hannover (0511)64609-0</p>	<p>Auszug aus dem amtlichen Festpunktinformationssystem</p> <p>Erstellt am: 29.11.2017</p>	<p>Gesamtauszug Höhenfestpunkt</p> <p>2728 00010</p>																																																																																																														
<p>Name, Lagebeschreibung: Lüneburg, Johanniskirche, Süd</p>																																																																																																																
<p>Angaben zum Festpunkt:</p> <p>Land 03 Niedersachsen Gemeinde 03355022 Lüneburg, Hansestadt Katasteramt 030087 LGLN Regionaldirektion Lüneburg - Katasteramt Lüneburg - Punktkennung 272800010 Punktvermarkung 3210 Mauerbolzen, horizontal eingebracht (mit Inschrift) Darstellungshinweis ja Bemerkung Bauliche Veränderung Bemerkung KV 90001/2009 Bemerkung (intern) Erstvermarkung: 01.01.1950</p>																																																																																																																
<p>Klassifikation:</p> <p>Ordnung 1000 HFP 1. Ordnung</p> <p>Qualitätsangaben:</p> <p>Überwachungsdatum 01.07.2009</p> <p>Vermutete Höhenstabilität Güte des Vermarkungsträgers Topographie und Umwelteinflüsse Güte des Baugrundes Geologische Stabilität Grundwasserstand Grundwasserschwankung Höhenstabilität aus Messungen</p>																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>KST</th> <th>Lagesystem</th> <th>Ostwert</th> <th>Nordwert</th> <th>Methode</th> <th>Messdatum</th> <th>Prüfdatum</th> <th>Qualität GSI</th> <th>Qualität GW</th> <th>Qualität VWL</th> <th>Jahr Aktenhinweis</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1000</td> <td>ETRS89_UTM32</td> <td>32594243.638</td> <td>5900747.457</td> <td>7000</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2016</td> </tr> <tr> <th colspan="2">KST Höhensystem</th> <th colspan="2">Höhe</th> <th>Methode</th> <th>Messdatum</th> <th>Prüfdatum</th> <th>Qualität GSI</th> <th>Qualität GW</th> <th>Qualität VWL</th> <th>Jahr Aktenhinweis</th> </tr> <tr> <td>1000</td> <td>DE_DHHN2016_NH</td> <td>13.752</td> <td>13.752</td> <td>5110</td> <td>14.07.2009</td> <td>14.07.2009</td> <td>S <= 5 mm</td> <td>0.0045</td> <td>Ausgleichung</td> <td>2014 51 NI</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN92_NH</td> <td>13.771</td> <td>13.771</td> <td>5110</td> <td>14.07.2009</td> <td>14.07.2009</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2010 03 LGN</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_NIV60_NOH_NI130</td> <td>13.753</td> <td>13.753</td> <td></td> <td>01.01.1969</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>7803 DB</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN12_NI120</td> <td>13.771</td> <td>13.771</td> <td></td> <td>01.01.1969</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>DB</td> </tr> <tr> <td>5000</td> <td>DE_DHHN12_NI120</td> <td>13.771</td> <td>13.771</td> <td>5110</td> <td>01.01.1950</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>50207B B1</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>ETRS89_h</td> <td>54.417</td> <td>54.417</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S <= 500 cm</td> <td></td> <td>Berechnung</td> <td>2011 UTM-TRANS</td> </tr> <tr> <td>2000</td> <td>DE_NIV60_NOH</td> <td>13.753</td> <td>13.753</td> <td>5110</td> <td>01.01.1950</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1975 ADV NIV60</td> </tr> </tbody> </table>			KST	Lagesystem	Ostwert	Nordwert	Methode	Messdatum	Prüfdatum	Qualität GSI	Qualität GW	Qualität VWL	Jahr Aktenhinweis	1000	ETRS89_UTM32	32594243.638	5900747.457	7000						2016	KST Höhensystem		Höhe		Methode	Messdatum	Prüfdatum	Qualität GSI	Qualität GW	Qualität VWL	Jahr Aktenhinweis	1000	DE_DHHN2016_NH	13.752	13.752	5110	14.07.2009	14.07.2009	S <= 5 mm	0.0045	Ausgleichung	2014 51 NI	5000	DE_DHHN92_NH	13.771	13.771	5110	14.07.2009	14.07.2009				2010 03 LGN	5000	DE_NIV60_NOH_NI130	13.753	13.753		01.01.1969					7803 DB	5000	DE_DHHN12_NI120	13.771	13.771		01.01.1969					DB	5000	DE_DHHN12_NI120	13.771	13.771	5110	01.01.1950					50207B B1	2000	ETRS89_h	54.417	54.417				S <= 500 cm		Berechnung	2011 UTM-TRANS	2000	DE_NIV60_NOH	13.753	13.753	5110	01.01.1950					1975 ADV NIV60
KST	Lagesystem	Ostwert	Nordwert	Methode	Messdatum	Prüfdatum	Qualität GSI	Qualität GW	Qualität VWL	Jahr Aktenhinweis																																																																																																						
1000	ETRS89_UTM32	32594243.638	5900747.457	7000						2016																																																																																																						
KST Höhensystem		Höhe		Methode	Messdatum	Prüfdatum	Qualität GSI	Qualität GW	Qualität VWL	Jahr Aktenhinweis																																																																																																						
1000	DE_DHHN2016_NH	13.752	13.752	5110	14.07.2009	14.07.2009	S <= 5 mm	0.0045	Ausgleichung	2014 51 NI																																																																																																						
5000	DE_DHHN92_NH	13.771	13.771	5110	14.07.2009	14.07.2009				2010 03 LGN																																																																																																						
5000	DE_NIV60_NOH_NI130	13.753	13.753		01.01.1969					7803 DB																																																																																																						
5000	DE_DHHN12_NI120	13.771	13.771		01.01.1969					DB																																																																																																						
5000	DE_DHHN12_NI120	13.771	13.771	5110	01.01.1950					50207B B1																																																																																																						
2000	ETRS89_h	54.417	54.417				S <= 500 cm		Berechnung	2011 UTM-TRANS																																																																																																						
2000	DE_NIV60_NOH	13.753	13.753	5110	01.01.1950					1975 ADV NIV60																																																																																																						
<p>Dieser Ausdruck ist gesetzlich geschützt. Vervielfältigung nur mit Genehmigung des Herausgebers. Als Vervielfältigung gelten z.B. Ausdruck, Fotokopie, Mikroverfilmung, Digitalisierung und Speicherung auf Datenträger.</p>																																																																																																																

Anhang X: aktuelle Querprofilpläne unterschiedlicher Messverfahren

Elbquerprofil km 553,978LVI
Elbquerprofil km 561,936LVII
Elbquerprofil km 569,602LVIII

Elbprofil km 561,936

Vergleich GNSS-Messung u. Peildaten mit Laser-scandaten

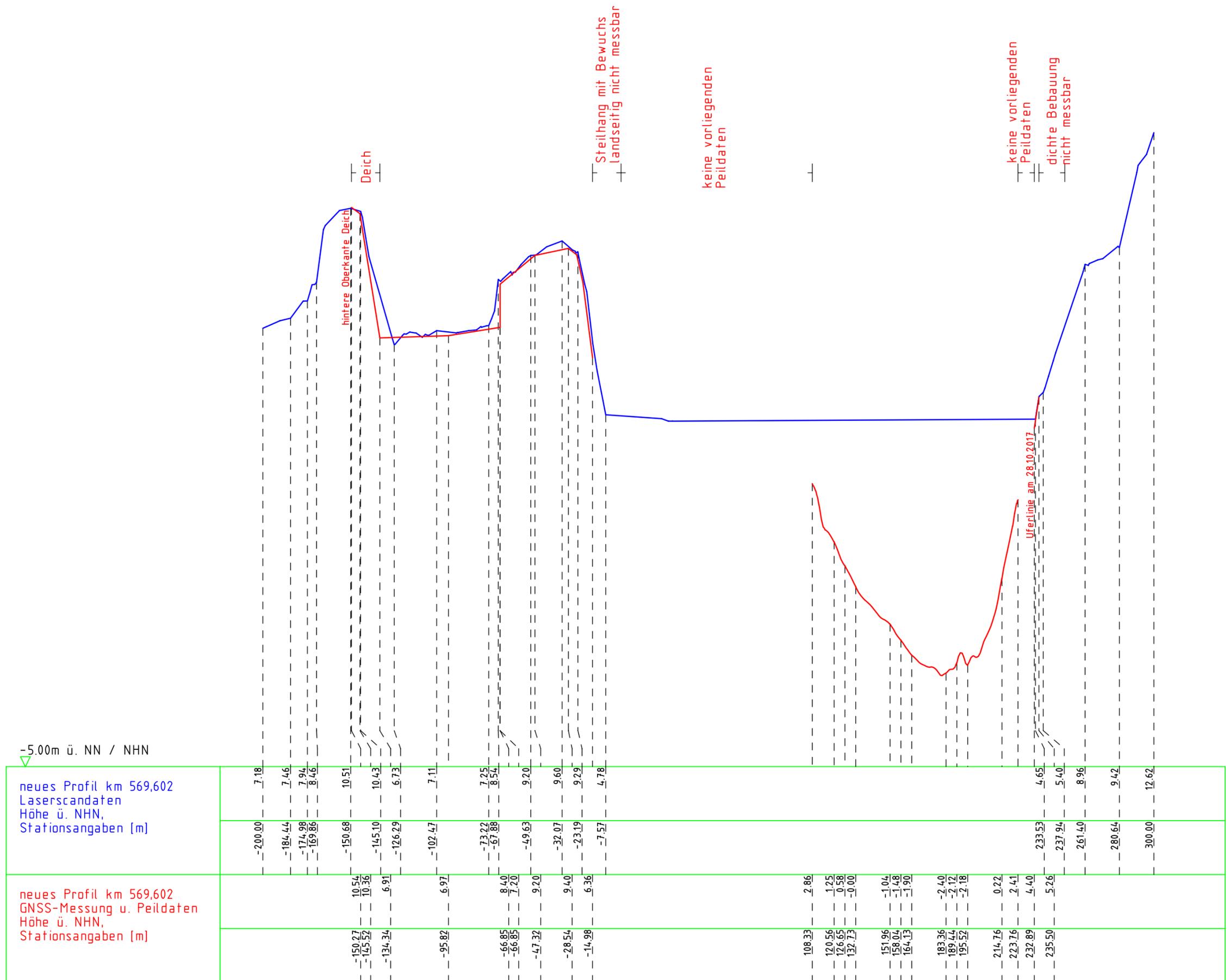


Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

Elbprofil km 569,602

Vergleich GNSS-Messung u. Peildaten mit Laserscandaten



Maßstab Länge: 1:2000

Maßstab Höhe: 1:100

Anhang XI: Metadaten der Laserscandaten (Daten-CD)

Die Metadaten der zum Vergleich mit GNSS- und Peildaten verwendeten Punktwolken, die aus Laserscandaten erzeugt wurden, befinden sich auf der beiliegenden Daten-CD bzw. dem Datenordner.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**Diese Erklärung ist der Thesis beizufügen!**

Name: Reinstorf
Vorname: Henning
Matrikelnummer: 6029381
Studiengang: Geomatik, Bachelor

Ich versichere, dass ich die vorliegende Thesis mit dem Titel

Veränderungen im Strömungsquerschnitt der
Elbe bei Lüneburg

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe.

Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Im Falle einer Gruppenarbeit bezieht sich die Erklärung auf den von mir erarbeiteten Teil der Thesis.

Kirchgelksen, 13.01.2018
Ort und Datum

H. Reinstorf
Unterschrift der/des Studierenden

VOM PRÜFUNGSAMT AUSZUFÜLLEN

Die o.g. Thesis wurde abgegeben am

Eingangsstempel Infothek
Studierendenverwaltung | Prüfungsamt