



Master Thesis

im Rahmen des

Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Erarbeitung einer Methodik zur Korrektur von hochaufgelösten DTM im Gewässerbereich von Flüssen aufgrund von Querprofilvermessungen“

vorgelegt von

MSc Ursin Caduff
103622, UNIGIS MSc Jahrgang 2014

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gerlafingen, 16.12.2016

Danksagung

Zum Gelingen der Arbeit haben verschiedene Personen beigetragen. Namentlich möchte ich mich bedanken bei:

Dem UNIGIS-Team für die Top-Betreuung dieses Fernstudiums und die speditive Abwicklung von administrativen Angelegenheiten während des Studiums.

Dem Bundesamt für Landestopografie swisstopo, insbesondere meiner Kontaktperson Roberto Artuso für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung der benötigten Daten.

Dem Bundesamt für Umwelt BAFU insbesondere meinen Kontaktpersonen Gian Reto Bezzola sowie Andreas Inderwildi für die Diskussion zum Start der Masterarbeit und die Bereitstellung der Querprofilaten sowie der Daten der bathymetrischen Vermessung

Dem Amt für Raum des Kantons Bern für das Recht auf die Verwendung des DTM des Kantons Bern. Weiter den Kantonen Solothurn und Zürich für die kostenlose Bereitstellung ihrer Geodaten im Internet.

Der Firma geo7, insbesondere Peter Gsteiger und Peter Mani, für die fachliche Begleitung und Unterstützung

Meinen Eltern und Schwiegereltern für die Unterstützung bei der Kinderbetreuung. Ohne eure Unterstützung wäre es nicht gegangen.

Meinem Vater für die Korrekturlesung.

Meiner Frau und meinen beiden Kindern. Während dieser Weiterbildung mussten wir auf einige Zeiten miteinander verzichten. Dies hat nun mit Abgabe der Masterarbeit ein Ende. Lasst uns die neuen Freiheiten geniessen!

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

„Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäss übernommen wurden sind entsprechend gekennzeichnet.“

Ursin Caduff, Gerlafingen, 16.12.2016

Kurzfassung

Digitale Terrain Modelle (DTM) sind in der Geoinformatik eine wichtige Grundlage und ein wichtiger Datensatz, welche bei verschiedensten Fragestellungen beigezogen werden. Bei hydrologischen Fragestellungen ist das DTM eine wichtige Grundlage, da bei der Modellierung von hydrologischen Prozessen vielfach die Morphologie und Beschaffenheit der Erdoberfläche einen entscheidenden Einfluss auf das Modellierungsergebnis hat. Im Gerinnebereich bildet das DTM vielfach eine sehr schlechte Repräsentation der Realität wider. Wasserspiegel weisen keine glatten Oberflächen auf, sondern physikalisch unmögliche Neigungen.

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, Wege zu suchen, um den Gerinnebereich durch eine Neumodellierung des DTM zu korrigieren. Aus der Korrektur soll einerseits eine gute Repräsentation des Wasserspiegels resultieren, andererseits ein gutes, realistisch implementiertes Gerinne.

Zur Korrektur des Wasserspiegels wurde eine Methode zur Wasserspiegelmodellierung entwickelt. Als Grundlagendaten für die Neumodellierung wurde einmal das zu korrigierende DTM für die Höhe des Wasserspiegels sowie ein Orthofoto für die räumliche Abgrenzung des Wasserspiegels verwendet. Für eine Vergleichsmodellierung wurden als Grundlagendaten lediglich 3D-Vektordaten des Gewässers verwendet (swissTLM3D), welche schweizweit verfügbar sind.

Die Integration des Gerinnes erfolgte auf Basis von vermessenen Querprofilen, aus welchen mit der Methode Merwade sowie mit einer eigens entwickelten Methodik das Gerinne modelliert wird.

Die Güte der Modellierungsergebnisse wurde für vier definierte Untersuchungsgebiete ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Wasserspiegelmethodik den Wasserspiegel im DTM verbessert. Der Wasserspiegel wird durch die Modellierung glatt, störende Artefakte, welche ansonsten im Bereich des Wasserspiegels auftreten (z.B. TIN-Facetten) werden eliminiert. Die Resultate bei Verwendung von DTM und Orthofoto als Datengrundlage waren überzeugender als die Modellierungen mittels 3D-Vektordaten, dies vor allem bei Betrachtung des Längsschnittes des Wasserspiegels sowie bei der Ausdehnung der Wasserfläche.

Die Resultate der Gerinneimplementation liefern interessante Erkenntnisse. Hauptunterschied der Gerinneimplementation nach Methode Caduff bzw. Merwade ist der Perimeter, in welchem die Höhen des DTM durch Interpolation der vermessenen Querprofile angepasst werden. Während die Methode Caduff diesen Perimeter auf die wasserbedeckte Fläche reduziert, modelliert Merwade den gesamten Gerinnebereich inkl. Sandbänken, Uferböschungen und Dämmen. Neben der Tatsache, dass die Methode Caduff auch im Bereich der wasserbedeckten Fläche leicht bessere Modellierungsergebnisse erzielt, zeigen die Resultate, dass die absoluten Höhen im Uferbereich durch die Verwendung der Höhendaten des Grundlagen-DTM deutlich besser repräsentiert werden. Obwohl der Unterschied bei Betrachtung der hydraulischen Parameter nicht so gross ist, führen die Erkenntnisse der Arbeit zur berechtigten Frage, ob zukünftige Gerinneimplementierungen nicht auf einem enger definierten Perimeter erfolgen sollten.

Abstract

Digital elevation models (DEM) are an important basis in geoinformatics and an important dataset used in a wide range of geoinformatic questions. Especially for hydrological questions, the DEM is an important basis, since in the modelling of hydrological processes, the morphology of the earth's surface often has a decisive influence on the modelling result. In the river channel area, height models often have a very bad representation of reality. Water levels do not have smooth surfaces, they have physically impossible inclinations.

The aim of this master thesis is to find ways to correct the river channel area over a large area by re-modelling the DEM. The remodelling shall result in a good representation of the water level, as well as a good, realistically implemented river channel.

A method for water level modelling has been developed in this work to correct the water level. The input datasets for the modelling are the DEM (for the height of the water level) as well as an Orthofoto (for the spatial delineation of the water level). For a second model run, 3D-vector data have been used as modelling input data (swissTLM3D). The 3D-vector dataset is available all over Switzerland and therefore an alternative input dataset.

The integration of the river channel bases on river cross section. With the method of Merwade and a second method developed in this master thesis (method Caduff), the river cross sections are interpolated to model the river channel.

The quality of the modelling results are evaluated for four defined examination areas. It is shown that the modelling of water level improves the water level represented in the DEM. In the modelling results, the water level is smooth, disturbing artefacts (e.g. TIN facets), which otherwise occur in this area, are eliminated. The results by using the DEM and Orthofoto as input data were more convincing than the model results with the 3D vector data, especially when viewing the longitudinal section of the water level or the expansion of the water complex.

The results of the river channel implementation provide interesting insights. The main difference between the two methods of river channel implementation is the perimeter in which the heights of the DEM are adjusted by interpolation of the river cross sections. The method Caduff reduces the modelling perimeter to the water surface. The method Merwade models the entire river channel area including sandbanks, embankments and dams. The results show, that the method Caduff achieves slightly better modelling results in the water-covered area. In the river bank area, the results show that the absolute heights are clearly better represented by the use of the height out of the DEM. Although the difference in the hydraulic parameters is not so huge, the results of this work lead to the question, if future river channel implementations should not be implemented in a narrowly defined perimeter.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 1.1 | Das Digitale Terrainmodell | 1 |
| 1.2 | Qualität der Modellierung des Gewässerbereiches verschiedener DTM | 1 |
| 1.3 | Methoden aus der Literatur zur Modellierung der Wasseroberfläche | 5 |
| 1.3.1 | Methode Worstell (Worstell 2014) | 5 |
| 1.3.2 | Methode Korzeniowska (Korzeniowska 2012) | 6 |
| 1.4 | Methoden aus der Literatur zur Integration eines Gerinnes in ein DTM | 6 |
| 1.4.1 | Methode Merwade | 6 |
| 1.4.2 | Methode Schäppi | 7 |
| 1.4.3 | Methode Caviedes-Voullième | 7 |
| 1.4.4 | Methode geo7 | 8 |
| 1.5 | Ziel der Masterarbeit..... | 9 |
| 2 | Methodisches Konzept | 10 |
| 2.1 | Methoden für die Modellierung der Wasseroberfläche | 10 |
| 2.1.1 | Identifikation der Wasserfläche | 11 |
| 2.1.2 | Bestimmung der Gewässerhöhe | 11 |
| 2.1.3 | Korrektur der Gewässerhöhe | 12 |
| 2.1.4 | Extrapolation der korrigierten Gewässerhöhen auf modellierte Wasserfläche | 14 |
| 2.2 | Methodik zur Modellierung des Gerinnes..... | 14 |
| 2.2.1 | Gerinneimplementation mittels Methode Merwade | 16 |
| 2.2.2 | Gerinneimplementation mittels Methode Caduff | 18 |
| 2.3 | Methoden zur Bestimmung der Güte der Modellierungsergebnisse | 24 |
| 2.3.1 | Qualitative Bestimmung der Güte..... | 24 |
| 2.3.2 | Absolute Differenz der Pixel..... | 24 |
| 2.3.3 | Differenz zu hydraulischen Parametern..... | 25 |
| 3 | Das Untersuchungsgebiet | 27 |
| 3.1 | Aare Münsingen – Bern..... | 27 |
| 3.2 | Aare Bern – Worblaufen..... | 28 |
| 3.3 | Aare Altreu – Solothurn..... | 29 |
| 3.4 | Emme Gerlafingen – Luterbach..... | 30 |
| 4 | Resultate..... | 31 |
| 4.1 | Resultate Wasseroberflächenmodellierung..... | 31 |
| 4.1.1 | Abschnitt Aare, Münsingen – Bern und Bern – Worblaufen..... | 31 |
| 4.1.2 | Abschnitt Aare, Altreu – Solothurn | 39 |
| 4.1.3 | Abschnitt Emme, Gerlafingen – Luterbach..... | 44 |

| | | |
|--|--|-----|
| 4.2 | Resultate Modellierung Gerinne | 48 |
| 4.2.1 | Qualitative Bewertung Gerinnemodellierung anhand einiger Beispiele | 48 |
| 4.2.2 | Bewertung Integrationsgüte: Differenz zu Querprofilpunkten | 52 |
| 4.2.3 | Bewertung Integrationsgüte: Differenz der hydraulischen Kennwerte | 59 |
| 4.2.4 | Bewertung Interpolationsgüte: Differenz zu Querprofilpunkten..... | 61 |
| 4.2.5 | Bewertung Interpolationsgüte: Differenz der hydraulischen Kennwerte..... | 68 |
| 5 | Diskussion der Resultate | 70 |
| 5.1 | Diskussion Modellierungsergebnisse Wasseroberfläche..... | 70 |
| 5.1.1 | Verbesserungspotenzial bei der Wasserspiegelmodellierung | 70 |
| 5.1.2 | Direkter Vergleich der beiden Wasserspiegelmodellierungen | 72 |
| 5.2 | Diskussion Modellierung Gerinne (Gewässeruntergrund)..... | 73 |
| 5.2.1 | Beurteilung der Resultate der beiden Gerinnemodellierungsmethoden | 73 |
| 5.2.2 | Direkter Vergleich der beiden Methoden | 75 |
| 6 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 78 |
| Anhang A Verwendete Querprofilbereiche..... | | 82 |
| Anhang A1 Aare Münsingen – Bern | | 82 |
| Anhang A2 Aare Bern – Worblaufen | | 83 |
| Anhang A3 Aare Altreu – Solothurn | | 83 |
| Anhang A4 Emme Gerlafingen – Luterbach | | 84 |
| Anhang B Grafiken Querprofile | | 86 |
| Anhang B1 – Profilgrafiken Aare Münsingen – Bern..... | | 86 |
| Anhang B2 – Profilgrafiken Aare Bern – Worblaufen..... | | 99 |
| Anhang B3 – Profilgrafiken Aare Altreu – Solothurn..... | | 105 |
| Anhang B4 – Profilgrafiken Emme Gerlafingen – Luterbach..... | | 118 |
| Anhang C – Benetzter Fliessquerschnitt pro Profil..... | | 128 |
| Anhang C1 – Benetzter Fliessquerschnitt Integration..... | | 128 |
| Anhang C2 – Hydraulische Kennwerte Interpolation..... | | 134 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1 | DTM mit ungenügender Gerinnemodellierung. Ausschnitt Werdinsel, Kt. Zürich..... | 2 |
| Abbildung 2 | Grundlagen des DTM swissALTI3D. | 3 |
| Abbildung 3 | Gewässerbereich mit vielen LiDAR-Punkten. | 3 |
| Abbildung 4 | Gewässerbereich mit wenig LiDAR-Punkten. | 4 |
| Abbildung 5 | Hillshade mit TIN-Facetten und LiDAR-Punkte, welche die Entstehung der Facetten erklären..... | 4 |
| Abbildung 6 | Flachwasserbereiche mit TIN-Facetten. | 5 |
| Abbildung 7 | Gerinneintegration mittels Methode Merwade..... | 7 |
| Abbildung 8 | Gerinneimplementation mittels Methode Caviedes-Voullième. | 8 |
| Abbildung 9 | Gerinneimplementation mittels Methode geo7. | 8 |
| Abbildung 10 | Manuelle Digitalisierung des Gewässerrands..... | 11 |
| Abbildung 11 | Zonenminimum des Wasserspiegels für die generierten Punkte im Bereich der Mittellinie des Gewässers..... | 12 |
| Abbildung 12 | Gegensteigungen im Längsprofil (grau) werden korrigiert (blau). | 13 |
| Abbildung 13 | Korrigiertes und geglättetes Längsprofil. | 13 |
| Abbildung 14 | User-Interface des ArcMap-Tools der Methode Merwade. | 16 |
| Abbildung 15 | Methode Merwade mit Avg Channel Width 55 m, No Profile Lines 100 zwei unterschiedlichen Cross Section Spacing: links 200 m, rechts 10 m. | 18 |
| Abbildung 16 | Gerinnekrümmungen resultieren in der Methodik Schächli in Fehlerflächen..... | 19 |
| Abbildung 17 | Interpolationstechnik der Methode Schächli..... | 19 |
| Abbildung 18 | Grundlage der Interpolationshöhen der Methode Caduff. | 20 |
| Abbildung 19 | Hilfsdarstellung zur Veranschaulichung der Interpolationspfade der Methode Caduff. | 21 |
| Abbildung 20 | Die Uferlinien sowie Breaklines werden auf Basis des Orthofotos digitalisiert. | 22 |
| Abbildung 21 | Beispiel der Breaklinesetzung im Bereich von Inseln. | 23 |
| Abbildung 22 | Beispiel der Quantilmatrix. | 25 |
| Abbildung 23 | Lage der verschiedenen Untersuchungsgebiete. | 27 |
| Abbildung 24 | Aare zwischen Münsingen und Bern. Im Bild links sind Bühnen erkennbar. | 28 |
| Abbildung 25 | Wehr bei Felsenau, welches bei der Modellierung berücksichtigt wird. | 29 |
| Abbildung 26 | Das Inseli bei km 6.000 teilt den Gewässerlauf der Aare für einen kurzen Abschnitt in zwei Teile. | 30 |
| Abbildung 27 | Höhenkorrektur von swissALTI3D bei der Wasserspiegelmodellierung TLM (oben) sowie DTM/Orthofoto (unten). | 31 |
| Abbildung 28 | Längsprofil Aare Münsingen – Bern – Worblaufen Teil 1..... | 32 |
| Abbildung 29 | Längsprofil Aare Münsingen – Bern – Worblaufen Teil 2..... | 32 |
| Abbildung 30 | Längsprofil Aare Münsingen – Bern – Worblaufen Teil 3..... | 32 |
| Abbildung 31 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Bern, Tiefenau. | 34 |
| Abbildung 32 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Bern, Wehr Felsenau..... | 35 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 33 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Belp oberhalb Gürbemündung..... | 36 |
| Abbildung 34 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Muri im Bereich der Badi..... | 37 |
| Abbildung 35 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Münsingen im Bereich Hunzigenbrügg..... | 39 |
| Abbildung 36 | Höhenkorrektur von swissALTI3D bei der Wasserspiegelmodellierung TLM (oben) sowie rein DTM (unten)..... | 39 |
| Abbildung 37 | Längsprofil Aare im Abschnitt Altreu – Solothurn. | 40 |
| Abbildung 38 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare, Stadt Solothurn. | 41 |
| Abbildung 39 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare im Bereich des Campingplatzes Lido, Solothurn. | 42 |
| Abbildung 40 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare, Inseli. | 44 |
| Abbildung 41 | Höhenkorrektur von swissALTI3D bei der Wasserspiegelmodellierung TLM (oben) sowie rein DTM (unten)..... | 44 |
| Abbildung 42 | Längsprofil Emme Abschnitt Gerlafingen – Luterbach (Teil 1). | 45 |
| Abbildung 43 | Längsprofil Emme Abschnitt Gerlafingen – Luterbach (Teil 2). | 45 |
| Abbildung 44 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Emme kurz oberhalb Emmenmündung in die Aare. | 46 |
| Abbildung 45 | Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Emme Wehr Biberist. | 47 |
| Abbildung 46 | Beispielausschnitt Aare Münsingen – Bern: oben das Orthofoto und die existierenden Querprofile, unten die beiden Gerinnemodellierungsergebnisse im Hillshade..... | 48 |
| Abbildung 47 | Vergleich Gerinnemodellierung Aare Münsingen – Bern bei Münsingen..... | 49 |
| Abbildung 48 | Vergleich Gerinnemodellierung Aare Altreu –Solothurn im Bereich von Altreu. | 50 |
| Abbildung 49 | Vergleich der Höhen der Modellierungen mit den Höhen aus bathymetrischer Vermessung. | 50 |
| Abbildung 50 | Beispiel Gerinneintegration mit der Methode Caduff beim Wehrs Felsenau..... | 51 |
| Abbildung 51 | Beispiel Gerinneintegration mit der Methode Caduff beim Wehr Biberist. | 51 |
| Abbildung 52 | Gerinne aus bathymetrischer Vermessung (links), gegenübergestellt dem Gerinne modelliert mit der Methode Caduff (rechts)..... | 74 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|---|----|
| Tabelle 1 | Unterschied der beiden Gerinnemodellierungen..... | 10 |
| Tabelle 2 | Evaluation der bereits existierenden Gerinnemodellierungsmethoden..... | 15 |
| Tabelle 3 | Verwendete Parameter bei der Modellierung der Gerinneabschnitte mit Merwade. | 18 |
| Tabelle 4 | Differenzen (Integrationsgüte) der vermessenen Profilpunkte mit dem modellierten DTM. | 53 |
| Tabelle 5 | Absoluter Betrag der Differenzen der Integrationsgüte, dargestellt mit der Differenzmatrix..... | 57 |
| Tabelle 6 | Güte der Integration der Querprofile anhand der Differenz der hydraulischen Parameter..... | 60 |
| Tabelle 7 | Differenzen (Interpolationsgüte) der vermessenen Profilpunkte mit dem modellierten DTM. | 62 |
| Tabelle 8 | Absoluter Betrag der Differenzen der Interpolationsgüte, dargestellt mit der Differenzmatrix..... | 66 |
| Tabelle 9 | Güte der Interpolation der Querprofile anhand der Differenz der hydraulischen Parameter..... | 69 |
| Tabelle 10 | Entscheidungsmatrix für die Wahl der Modellierungsmethode Caduff oder Merwade | 76 |

Abkürzungen

| | |
|---------|--------------------------------|
| DTM | Digital Terrain Model |
| LiDAR | Light Detection and Ranging |
| TIN | Triangulated Irregular Network |
| GP-Tool | Geoprocessing Tool |

Geodatenverzeichnis

Digitale Terrain Modelle

swissALTI3D. Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.

Digitales Terrainmodell Kanton Zürich (DTM ZH) 2014. Amt für Raumentwicklung Kanton Zürich.

Digitales Terrainmodell (DTM) 2014. Amt für Geoinformation des Kantons Solothurn.

Digitales Terrainmodell LIDAR 50cm 2014. Amt für Wald des Kantons Bern.

LiDAR-Daten

LIDAR Laserscanning-Geodaten Kanton Zürich 2014. Amt für Raumentwicklung des Kantons Zürich.

Orthofoto

Orthofoto SWISSIMAGE 2014. Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.

Orthofoto 2014 RGB. Auflösung 12.5 cm. Amt für Geoinformation des Kantons Solothurn.

Vektordaten

swissTLM3D. Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.

Vermessene Querprofile

Aare Bielersee – Solothurn 2010, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

Aare Thun – Bern Matteschwelle 2011, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

Aare Felsenau – Schwellenmatte 2011, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

Emme Aare – Gerlafingen 2013, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

Emme Aufweitung Gerlafingen 2013, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

Bathymetrische Vermessung

Unterwasserhoehenlinien BielSolothurn 2010, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.

1 Einleitung

1.1 Das Digitale Terrainmodell

Digitale Terrainmodelle (DTM) sind heutzutage in verschiedenen Bereichen im Einsatz. Vielfach werden sie verwendet, um einen Ort, einen Raum oder ein Untersuchungsgebiet topographisch zu charakterisieren. In verschiedensten Fachrichtungen dienen Digitale Terrainmodelle als Grundlage für Modelle und Simulationen. Die Möglichkeiten sind extrem vielfältig, sei dies für Sichtbarkeitsanalysen von geplanten Bauprojekten (Hedeler 2015), für Lawinenmodelle, bei denen die Neigung und Exposition die Zentralen Parameter sind (Aschwanden 2012, Utelli und Eisenhut 2012) oder zur Unterstützung bei Lebensraumabgrenzungen in biologischen Fragestellungen (Rüdisser 2002). Dies ist nur ein kleiner Teil der Einsatzbereiche von digitalen Terrainmodellen.

Das Ziel digitaler Terrainmodelle besteht darin, die Erdoberfläche möglichst realitätsgetreu mit Hilfe eines Rasterdatensatzes zu repräsentieren. Je feiner die Auflösung des Rasterdatensatzes gewählt wird, desto genauer wird die Repräsentation, jedoch steigt durch die feinere Auflösung des Datensatzes auch seine Grösse. Limitiert wird die Auflösung zudem durch die dem DTM zu Grunde liegende Punktdichte der LiDAR-Daten (Light Detection and Ranging, vgl. auch Kap. 1.2). Ein höher aufgelöstes DTM benötigt eine höhere LiDAR-Punktdichte in den Grundlagendaten. In der Praxis haben sich heutzutage in Westeuropa Auflösungen zwischen 0.5 m und 2 m für regionale DTM und 30 m - 100 m bei globalen DTM etabliert.

Für viele hydrologische Fragestellungen ist das DTM ein zentraler Grundlagendatensatz. Aus dem DTM lassen sich die oberflächlichen Fliesswege des Wassers bestimmen, ebenso können mittels DTM Einzugsgebiete und Einzugsgebietsgrössen bestimmt werden (Kipfer 2012). Bei Niederschlags-Abfluss Modellen hilft das DTM bei der Frage, ob der Niederschlag als Schnee oder Regen ins Modell einfliesst, sofern die Schneefallgrenze bekannt ist, oder es hilft in Überflutungsmodellierungen bei der Frage, welche Gebiete aufgrund hoher Seepiegel oder brechenden Dämmen überflutungsgefährdet sind (Beffa 2000). Gerade bei hydrologischen Berechnungen mit dem DTM fällt auf, dass die Modellierung des Gerinnes in vielen DTM nicht sehr gut gelungen ist. Zudem wäre aus hydrologischer Sicht ein DTM, welches das Gerinne repräsentieren würde (quasi ohne Wasser), in vielen Fällen von höherem Nutzen als ein DTM, welches die Wasseroberfläche repräsentiert. So muss z.B. vorbereitend für hydraulische Berechnungen an Fliessgewässern das Gerinne ins DTM integriert werden.

1.2 Qualität der Modellierung des Gewässerbereiches verschiedener DTM

Eine Analyse verschiedenster in der Schweiz verfügbarer fein auflösender DTM zeigt, dass die Qualität im Gewässerbereich bei allen betrachteten DTM verbesserungswürdig ist (vgl. Abbildung 1). Folgende DTM wurden bei der Analyse betrachtet:

- swissALTI3D (2m Raster)
- Digitales Terrainmodell Kanton Zürich (50 cm Raster)
- Digitales Terrainmodell Kanton Solothurn (50 cm Raster)

- Digitales Terrainmodell LIDAR Kanton Bern (50 cm Raster)

Obwohl in allen digitalen Terrainmodellen Verbesserungspotential vorliegt, muss festgehalten werden, dass die feiner auflösenden und neueren DTM der Kantone den Gerinnebereich um einiges besser repräsentieren als das nationale DTM swissALTI3D. Das Bundesamt für Landestopografie swisstopo weist im Datenbeschrieb von swissALTI3D auf die Problematiken der Modellierung in Gewässernähe hin:

Wegen den ständig wechselnden Bedingungen ist die präzise Modellierung von Fliessgewässern sowohl mit Lasermessungen wie auch basierend auf fotogrammetrischen Methoden nicht immer möglich. Laufend verändernde Wasserläufe und Wasserstände, teilweise vegetationsbedeckte Bäche und Flüsse sowie die winkelabhängige Durchlässigkeit von Laserstrahlen in Gewässern führen bei der Erzeugung des DTM gelegentlich zu ungenauen Ergebnissen.

(swisstopo 2014)

Die Ursache der Qualitätsmängel im Gewässerbereich findet sich in den Datengrundlagen des DTM. Als Datengrundlagen dienen dem DTM grundsätzlich LiDAR-Daten, welche mittels ALS (Airborne Laser Scanning) generiert werden (Wehr und Lohr 1999). Auch beim DTM swissALTI3D sind unterhalb von 2000 m.ü.M diese mittels ALS-Technologie gewonnenen LiDAR-Daten die dem DTM zugrunde liegende, flächendeckende Höheninformation (Flugjahre 2000 – 2008). Ergänzt werden die LiDAR-Daten in swissALTI3D durch grösstenteils manuell erfasste Linien und Punkte, welche aus bildbasierten 3D-Stereomessungen abgeleitet werden (swisstopo 2016). Der Workflow ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

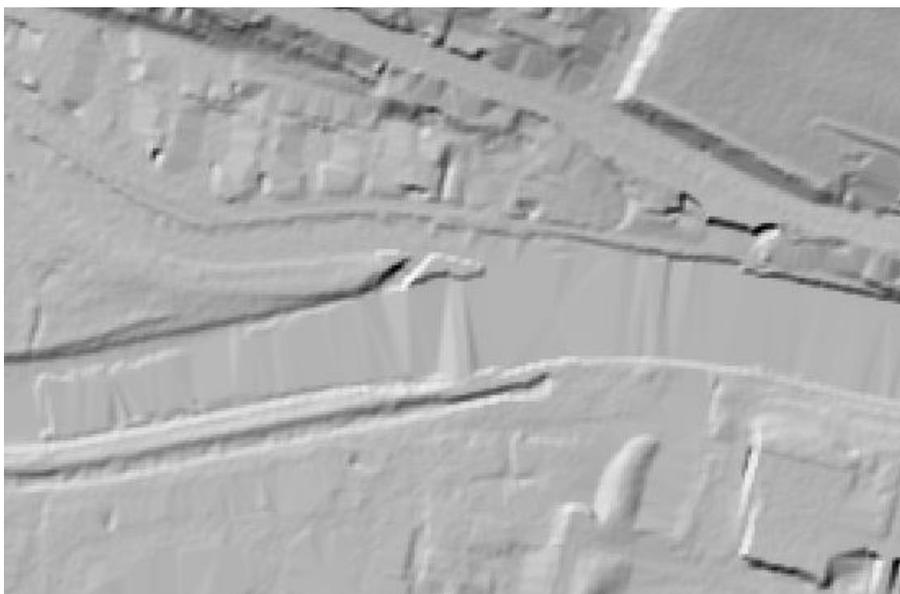


Abbildung 1 DTM mit ungenügender Gerinnemodellierung. Ausschnitt Werdinsel, Kt. Zürich.

Hoch aufgelöste DTM leiden unter der starken Direktionalität der Reflexionen der Laserimpulse an flachen Wasseroberfläche. Die Direktionalität führt dazu, dass je nach Position des Flugzeugs Wasseroberflächen unterschiedliche LiDAR-Punktdichten aufweisen. Befindet sich das Flugzeug im Nadir, dh. oberhalb der Wasserfläche, ist die Punktdichte sowie die Intensität der reflektierten Laserstrahlen sehr hoch, jedoch schon bei einem Winkel von über 9° werden fast keine Echos mehr aufgezeichnet. (Höfle et al. 2009)

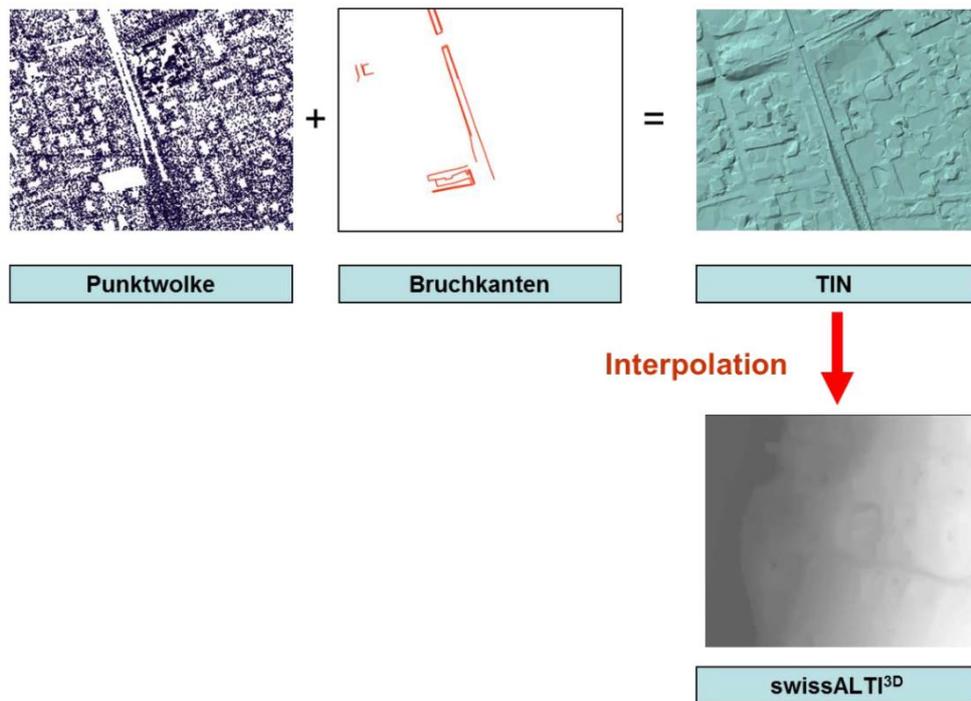


Abbildung 2 Grundlagen des DTM swissALTI3D. Quelle Abbildung: swisstopo 2016.



Abbildung 3 Gewässerbereich mit vielen LiDAR-Punkten. Mittels schwarzem Rechteck ist der Ausschnitt gekennzeichnet, welcher rechts dreidimensional abgebildet ist.

In der Praxis gibt es Gewässerabschnitte, welche relativ viele LiDAR-Höheninformationen im Gewässerbereich aufweisen. Es sind dies vor allem Gewässerbereiche mit einer unruhigen Wasseroberfläche oder Gewässerbereiche mit ruhiger Wasserfläche, bei welchen sich das Flugzeug bei der Befliegung im Bereich des Nadirs befunden hat. Abbildung 3 zeigt einen 3D-Querschnitt durch ein

unruhiges Gewässer (Wasserfläche unterhalb Wehr). Viele LiDAR-Höheninformationen werden infolge des unruhigen Wasserspiegels zum Flugzeug zurückreflektiert, was sich in vielen Punkten mit Höheninformation im Gewässerbereich widerspiegelt. Oberhalb des Wehrs existieren im Gegensatz dazu Gewässerbereiche mit sehr wenigen LiDAR-Höheninformationen. Es handelt sich um ruhige und stehende Wasserflächen. Der 3D-Querschnitt in Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Verteilung der LiDAR-Punkte bei Gewässerabschnitten mit wenigen LiDAR-Punkten.



Abbildung 4 Gewässerbereich mit wenig LiDAR-Punkten. Mittels schwarzem Rechteck ist der Ausschnitt gekennzeichnet (im Bild links), welcher rechts Dreidimensional abgebildet ist.

Die Ursache für die ungenügende Qualität der Modellierung im Gewässerbereich von DTM ist die ungenügende Dichte der LiDAR-Punkte. Diese ungenügende Dichte der Grundlagendaten generiert bei der TIN-Erstellung längere sichtbare TIN-Bruchkanten, sogenannte Facetten. Die Dichte der LiDAR-Punkte hat direkte Auswirkungen auf die Grösse der TIN-Facetten. Je geringer die Punktdichte der LiDAR-Messungen, desto grösser werden die TIN-Facetten, welche anschliessend als Kanten (Artefakte) der Gewässerfläche im Hillshade (Schattenbild) des DTM ein unnatürliches Aussehen verleihen. Die Problematik der TIN-Facetten wird verstärkt, wenn sich Uferpunkte mit Punkten im Gerinne vermaschen können. Der zusätzliche Höhenunterschied vom Ufer zum Wasserspiegel verstärkt die Ausprägung der Facetten. In Abbildung 5 ist im Hintergrund das Hillshade dargestellt, darüber sind die dem DTM zu Grunde liegenden LiDAR-Punkte gelegt, welche die Entstehung der zu sehenden TIN-Facetten erklären.

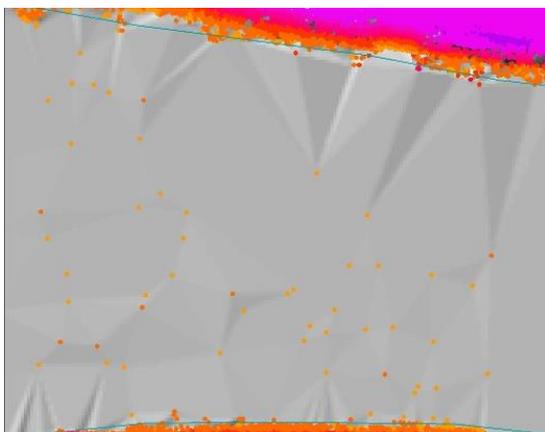


Abbildung 5 Hillshade mit TIN-Facetten und LiDAR-Punkte, welche die Entstehung der Facetten erklären.

TIN-Facetten führen zu einer schlechten Repräsentation des Gerinnebereiches, was beispielhaft in Abbildung 6 zu sehen ist. SwissALTI3D weist im dargestellten Bereich TIN-Facetten auf, welche über das gesamte Gewässer reichen. Wo dies der Fall ist, wurden über den gesamten Gewässerbereich hinweg die LiDAR-Höheninformationen des Uferbereiches als Grundlage für das DTM im Gewässerbereich verwendet. In der Abbildung ist das DTM links nach Höhenklassen eingefärbt, rechts ist eine klassierte Gefälldarstellung des DTM zu sehen.

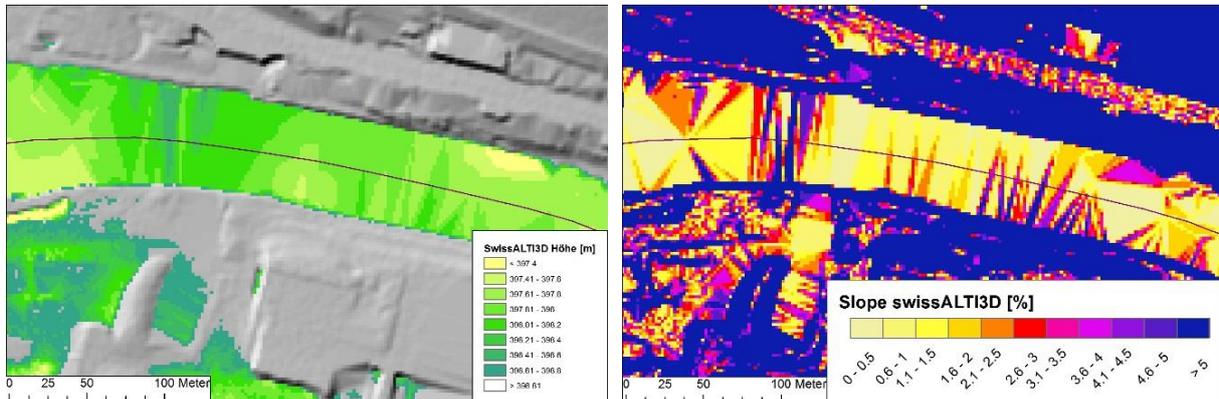


Abbildung 6 Flachwasserbereiche mit TIN-Facetten. Die TIN-Facetten sind sowohl bei Darstellung der absoluten Höhe (links) sowie auch in der aus dem DTM berechneten Gefälldarstellung sichtbar.

1.3 Methoden aus der Literatur zur Modellierung der Wasseroberfläche

Es existieren Methoden, um die Wasseroberfläche zu modellieren. Sowohl die Methoden von Korzeniowska (Korzeniowska 2012) wie auch die Methode von Worstell (Worstell 2014) basieren auf der Detektion von Wasserflächen in LiDAR-Punktwolken und der Korrektur dieser. In den folgenden Unterkapiteln (1.3.1 und 1.3.2) werden die beiden Methoden genauer vorgestellt.

1.3.1 Methode Worstell (Worstell 2014)

Worstell detektiert Wasserflächen aufgrund der Dichte der LiDAR-Punkte. Da Laserstrahlen an Wasserflächen absorbiert werden, resultieren dadurch weniger bis gar keine „Returns“ bei Wasserflächen. Worstell unterscheidet für die Korrektur der Wasserflächen zwei Fälle: Seen (kompakte Polygone) und Fliessgewässer (lange Polygone). Bei Seen werden die Höhen der LiDAR-Punkte, welche sich im Bereich der detektierten Wasserfläche befinden, analysiert. Die modellierte Wasserflächenhöhe des Sees resultiert aus dem Mittelwert minus der Standardabweichung der analysierten Höhenwerte. Laut Worstell haben weder der Minimumwert noch der Mittelwert bessere Ergebnisse erzielt. Bei Fliessgewässern wird ein anderes Verfahren gewählt. Zuerst werden die detektierten Gewässerpolygone in Abschnitte unterteilt, wobei für jeden LiDAR-Punkt in einem Abschnitt die Höhen sowie die Distanz bezüglich dem unteren Ende des Abschnittes berechnet werden. Mittels linearer Regressionsanalyse wird anschliessend aus Höhendifferenz und Distanz zum unteren Ende des Abschnittes die Neigung der Wasserfläche pro Zone bestimmt, welche anschliessend gleichmässig auf den gesamten Abschnitt verteilt wird.

1.3.2 Methode Korzeniowska (Korzeniowska 2012)

Korzeniowska detektiert die Wasserflächen wie Worstell aufgrund der Dichte der LiDAR-Punkte. In der Methodik von Korzeniowska ist jedoch eine explizite Korrektur der automatisch detektierten Wasserflächen mittels Orthofoto vorgesehen. Seen und Flüsse werden wie bei der Methode Worstell mit unterschiedlichen Methoden korrigiert: Zur Korrektur von Seen werden die Höhenwerte der LiDAR-Punkte im Bereich des Sees analysiert. Das 15%-Perzentil wird als Seespiegel gesetzt, da dieses Perzentil die besten Ergebnisse liefert. Bei Fließgewässern wird der Wasserspiegel bei Korzeniowska mit der IDW-Interpolationsmethode geglättet; dies geschieht mit einem 100 m Radius, Power 2 und 100 berücksichtigten Punkten.

1.4 Methoden aus der Literatur zur Integration eines Gerinnes in ein DTM

Wie bereits in der Einleitung erwähnt (vgl. Kapitel 1.1) wird für viele hydrologische Fragestellungen das digitale Terrainmodell mit integriertem Gerinne verwendet. Auch für die Integration des Gerinnes ins DTM existieren verschiedenste Implementationsmethoden. Die in der Literatur gefundenen Methoden lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Datenerhebung in Trockenperiode (bei nicht ganzjährlich wasserführenden Gewässern)
- Bathymetrische Sonar Techniken (Flener 2015)
- Bathymetrische LiDAR-Systeme (Hilldale und Raff 2008)
- Analyse von Multispektralen Satelliten- und Luftbildern (Winterbottom und Gilvear 1997)
- Interpolation von Querprofilaten (Merwade 2009, Caviedes-Voullième 2013, geo7 2013, Schächli et al. 2010)

Wenn man nicht über die Mittel für eine eigene Datenerhebung verfügt, hängt die Wahl der gewählten Methodik für die Gerinneimplementation von den vorhandenen Grundlagendaten ab. Da Schweizweit keine Sonar- oder LiDAR-Daten für den Gewässeruntergrund vorliegen und die Gewässer ganzjährlich wasserführend sind, werden die ersten drei Methodengruppen nicht weiterverfolgt. Durch das Vorhandensein von Querprofilen ist eine sehr gute Datenbasis für die Implementation des Gerinnes mittels Interpolation von Querprofilaten vorhanden. Daher wird das Orthofoto, welches ebenfalls in hoher Auflösung Schweizweit verfügbar ist, unterstützend Verwendung finden, etwa zur Klassifikation bezüglich Land/Wasser oder für die Verbesserung der Längsinterpolation.

Es existieren einige publizierte Methoden, um aus Querprofilen ein Gerinne zu interpolieren, welches ins DTM integriert werden kann. Eine Auswahl verschiedener Methoden wird untenstehend vorgestellt.

1.4.1 Methode Merwade

Bei der Methode von Merwade (Merwade et al. 2008) handelt es sich um eine simple lineare Interpolation, welche neben den vermessenen Profilen mit Hilfsprofilen arbeitet, die in regelmässigen Abständen generiert werden. Die Abstände der Zwischenprofile sollen laut Merwade ein bisschen mehr als die Gewässerbreite betragen, um zu verhindern, dass sich die Profile schneiden. Zur

Erzeugung der Bruchkanten in Längsrichtung, welche für die Interpolation verwendet werden, wird auf jedem Profil (und Zwischenprofil) dieselbe Anzahl Punkte in regelmässigen Abständen generiert. Der Abstand zwischen den Punkten hängt dabei von der Länge des Querprofils ab. Die Anzahl Punkte bzw. die Abstände sollten laut Merwade so fein gewählt werden, dass im Schnitt für jeden Messpunkt im Profil mindestens ein Punkt existiert. Dieselben Punkte der Haupt- und Nebenprofile werden miteinander verbunden, was die Bruchkanten in Längsrichtung erzeugt. Die Höhen werden entlang dieser Kanten von Hauptprofil zu Hauptprofil linear interpoliert. Bei Gewässern mit Inseln und Sandbänken wird die Methodik zusätzlich erweitert, um diese adäquat zu implementieren. Abbildung 7 zeigt die Implementation des Gerinnes mittels Methode Merwade beispielhaft.



Abbildung 7 Gerinneintegration mittels Methode Merwade. (Abbildung aus Merwade 2009)

1.4.2 Methode Schächpi

Die Methode von Schächpi (Schächpi et al. 2010) wurde für eine grossmasstäbliche Gerinneintegration entwickelt. Das Verhältnis zwischen Pixelgrösse und Querprofilabstand liegt bei ihren Untersuchungen zwischen 1 : 5 bei schwierigeren topographischen Verhältnissen und 1 : 25 bei geringerer Komplexität des Gerinnes. Die Methode unterscheidet sich von der Methode Merwade dahingehend, dass die Höhen nicht entlang von Linien von einem zum nächsten Profil interpoliert werden, sondern dass für jedes Pixel zwischen zwei Profilen ein individueller Höhenwert interpoliert wird. Letztlich handelt es sich auch um lineare, distanzgewichtete Interpolation, welche jedoch auf Zwischenprofile verzichtet und für jedes Gewässerpixel des modellierten DTM einen individuellen Höhenwert berechnet. Mittels Bruchkanten unterteilt Schächpi heterogene Gerinne (Sandbänke, ...) in unterschiedliche Teile, um so die Interpolation beeinflussen zu können.

1.4.3 Methode Caviedes-Voullième

Die Methode von Caviedes-Voullième (Caviedes-Voullième 2013) lehnt sich stark an die Methode von Merwade an, unterscheidet sich jedoch in drei Punkten wesentlich:

- Die Interpolation in Längsrichtung geschieht entlang von Splines (vgl. Abbildung 8). Dadurch werden keine Zwischenprofile benötigt, um den Gewässerverlauf auch bei mittlerer bis geringer Profildichte zu repräsentieren.

- In der Methode von Caviedes-Voullième wird der Talweg (tiefster Punkt im Profil) berücksichtigt. Es ist daher notwendig, die gleiche Anzahl Punkte auf beiden Seiten (links und rechts) des Talwegs auf den Querprofilen zu generieren.

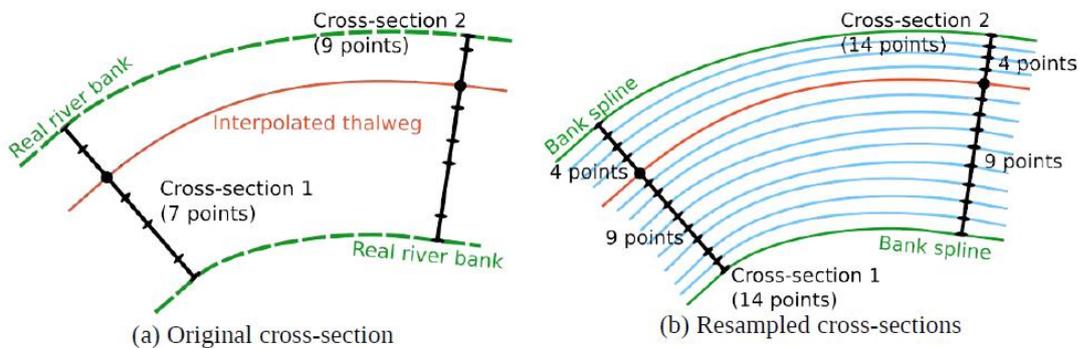


Abbildung 8 Gerinneimplementation mittels Methode Caviedes-Voullième. (Abbildung aus Caviedes-Voullième 2013)

1.4.4 Methode geo7

Bei der Methode von geo7 (geo7 2013) wird das Querprofil in vier Bereiche unterteilt: Ufer links, linke Flusshälfte bis Talweg, rechte Flusshälfte bis Talweg, Ufer rechts. Die zwei Teile im Fluss (rechts und links des Talwegs) werden in Drittel unterteilt, was je zwei Punkte zwischen dem Talweg und den Gerinnerandpunkten erzeugt. Zusätzliche Punkte bilden die zwei Dammhochpunkte sowie die beiden Aussenpunkte des Profils. Gemeinsam bilden so 11 repräsentative Punkte das Profil ab (vgl. Abbildung 9). Diese werden von Profil zu Profil miteinander verbunden, wobei je nach Bedarf mittels Krümmungsanalyse des Gerinnes Zwischenprofile erstellt werden, welche bei gebogenen Gerinnen die Ergebnisse der linearen Interpolation wesentlich verbessern.

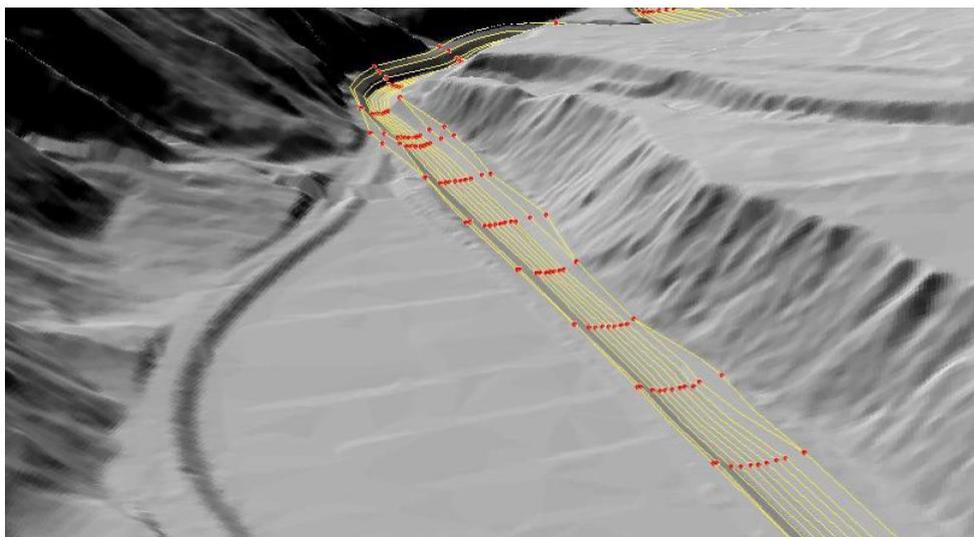


Abbildung 9 Gerinneimplementation mittels Methode geo7. (Abbildung aus geo7 2014)

1.5 Ziel der Masterarbeit

Das Ziel der Masterarbeit ist, eine Methodik zu entwickeln oder aus der Literatur zu übernehmen und an vier Pilotgebieten zu testen, sodass der Gewässerbereich in Zukunft adäquater im DTM implementiert werden kann. Einerseits soll eine Neumodellierung der Wasseroberfläche diese verbessern, andererseits soll ein Gerinne ins DTM integriert werden, welches für hydrologischen Fragestellungen als Grundlage dienen könnte.

Um die Resultate vergleichen und einordnen zu können, werden für die Wasseroberflächenmodellierung als auch für die Gewässeruntergrundmodellierung jeweils zwei Verfahren zur Anwendung kommen. Durch die Verwendung verschiedener Methoden lassen sich Unterschiede/Eigenheiten der einzelnen Methoden aufzeigen.

2 Methodisches Konzept

Ausgehend von der Zielsetzung, sowohl die Wasseroberfläche als auch das Gerinne mit verschiedenen Methoden zu modellieren, gliedert sich das Methodenkapitel in einen Teil mit Methoden für die Modellierung der Wasseroberfläche (Kap. 2.1), einen Teil für die Modellierung des Gerinnes (Kap. 2.2) sowie einen Teil mit verschiedenen Methoden zur Beurteilung der Güte der einzelnen Modellierungsergebnisse (Kap. 2.3).

2.1 Methoden für die Modellierung der Wasseroberfläche

Beide in Kapitel 1.3 vorgestellten Methoden zur Detektion und Korrektur der Höhen im Gewässerbereich sind zur Beantwortung meiner Forschungsfrage nicht direkt einsetzbar, da beide Methoden auf LiDAR-Daten basieren, welche mir nicht zur Verfügung stehen. Jedoch dienen beide Arbeiten als Grundlage für eine von mir konzipierte Methode welche den Wasserspiegel auf Basis eines bereits vorhandenen DTM neu modelliert.

Die Neumodellierung der Gewässerhöhe kann generell in untenstehende vier Teilschritte unterteilt werden. Je nach eingesetzter Methode werden einige Teilschritte zusammengefasst, so erledigt z.B. Korzeniowska mit einer IDW-Interpolation der Höhen im Gewässerbereich die Teilschritte zwei bis vier mit einem einzigen Geoprocessingwerkzeug (vgl. Kap. 1.3.2). Die vier Teilschritte sind die Folgenden:

- Identifikation der Wasserfläche
- Bestimmung der Gewässerhöhe
- Korrektur der Gewässerhöhe
- Extrapolation der korrigierten Gewässerhöhen auf modellierte Wasserfläche

Die in dieser Arbeit konzipierte Methode zur Modellierung des Wasserspiegels kann auf verschiedenen Grundlagendaten zur Identifikation des Gewässerbereichs bzw. zur Analyse der Gewässerhöhe basieren. Konkret werden in dieser Arbeit verschiedene Grundlagendaten verwendet (vgl. Tabelle 1). Verschiedene Grundlagendaten verlangen kleinere Anpassungen an der Methodik. Bei beiden in dieser Arbeit durchgeführten Wasserspiegelmodellierungen wurde aber im Grundsatz die gleiche Methodik angewendet.

Tabelle 1 Unterschied der beiden Gerinnemodellierungen.

| | Modellierung TLM | Modellierung DTM/Orthofoto |
|--|-------------------------|-----------------------------------|
| Grundlage Identifikation Wasserfläche | TLM-Daten | Orthofoto |
| Grundlage Gewässerhöhe | TLM-Daten | DTM |

2.1.1 Identifikation der Wasserfläche

Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist, basieren die beiden Wasserspiegelmodellierungen in dieser Arbeit auf verschiedenen Grundlagendaten zur Identifikation der Wasserfläche. Bei Verwendung der swissTLM3D-Daten als Grundlage ist das Gewässer als 3D-Polygonfeatureclass in den Grundlagendaten vorhanden. Es gilt lediglich mittels Selektion diejenigen Gewässerpolygone auszuwählen, welche modelliert werden.

Bei Verwendung des Orthofoto als Datengrundlage für die Identifikation des Gewässerbereichs wird der Gewässerbereich manuell digitalisiert (siehe Abbildung 10). Der Wasserspiegel wird in der nachfolgenden Bearbeitung (vgl. Kap. 2.1.3) korrigiert und geglättet. Sollen Steilstufen konserviert werden (z.B. bei Wehren oder grösseren Überfällen), wird das Gewässerpolygon bereits bei der Digitalisierung an diesen Stellen unterteilt.



Abbildung 10 Manuelle Digitalisierung des Gewässerrands. Hintergrund: SWISSIMAGE50, swisstopo.

2.1.2 Bestimmung der Gewässerhöhe

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die Gewässerhöhe in einem Längsprofil dargestellt zu haben. Um die Gewässerhöhen für eine Fläche zu bestimmen, werden in der Literatur verschiedene Methoden verwendet:

- Mittelwert minus der Standardabweichung der Gewässerhöhen
- 15% Perzentil der Höhenwerte

Die Verwendung des Mittelwerts minus der Standardabweichung wurde in Betracht gezogen, jedoch zeigte sich bei ersten Tests, dass es dadurch möglich ist, dass die daraus resultierenden Gewässerhöhen bei schlechter DTM-Qualität und daraus resultierender hoher Standardabweichungen tiefer zu liegen kommen als das Minimum. Aufgrund dieser Beobachtungen und der Tatsache, dass die Berechnung eines 15%-Perzentiles mittels vorhandener GP-Tools nicht möglich ist, wird das Zonenminimum als Höhenwert für den Gewässerspiegel verwendet, dies im Wissen, den wahren Wasserspiegel eher zu unterschätzen. Der Radius des Zonenminimums ist ein Parameter der sich den

Gegebenheiten des Gewässers anpassen sollte, im Rahmen dieser Arbeit wird für die Aare ein Radius von 60 m gewählt, für die Emme ein Radius von 30 m.

Die Bestimmung der Gewässerhöhen sowie die Korrektur dieser geschehen auf der Gewässermittellinie. Diese wird mit den beiden GP-Tools „Collapse Dual Lines To Centerline“ und „Smooth Line“ (Parameters: Algorithm PAEK, 100 m smoothdistance) aus den Gewässerrändern erstellt. Die Mittellinie wird als Route abgespeichert so vereinfacht bzw. verdichtet, dass sich alle 2 m ein Vertex befindet. Danach werden die Vertices der Linie zu Punkten konvertiert, welchen die Metrierung der Route als Attribut mitgegeben wird. Mittels Geprocessingtool „Extract Values to Points“ wird das oben beschriebene Zonenminimum der Gewässerhöhen rund um die Punkte, den Punkten als Attribut mitgegeben. Eine Darstellung der so generierten Punkte zeigt Abbildung 11.

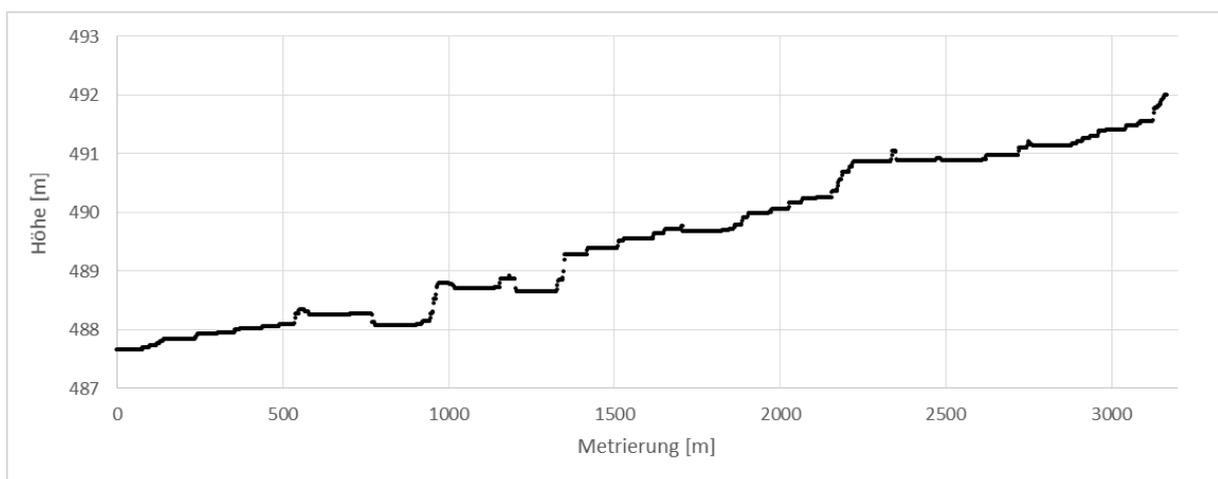


Abbildung 11 Zonenminimum des Wasserspiegels für die generierten Punkte im Bereich der Mittellinie des Gewässers.

Bei Verwendung der TLM-Daten als Grundlage für die Wasserspiegelhöhe wird aus dem dreidimensionalen TLM-Gewässerpolygon ein TIN berechnet, danach wird dieses in ein Raster konvertiert. Analog zum oben beschriebenen Vorgehen wird aus diesem Raster das 60 m bzw. 30 m Zonenminimum generiert.

2.1.3 Korrektur der Gewässerhöhe

Unabhängig davon, welche Datengrundlage für die Bestimmung der Wasserspiegelhöhe verwendet wird, entsteht eine Punktfeatureclass mit Punkten, welche eine Metrierung aufweisen (Lage auf der Mittellinie) sowie einen Höhenwert haben. Diese Punkte bilden gemeinsam den Längsschnitt des analysierten Gewässerabschnitts. Da vermieden werden soll, dass der Längsschnitt Gegensteigungen oder abrupte Richtungsänderungen enthält, wird die Gewässerhöhe im Längsschnitt korrigiert.

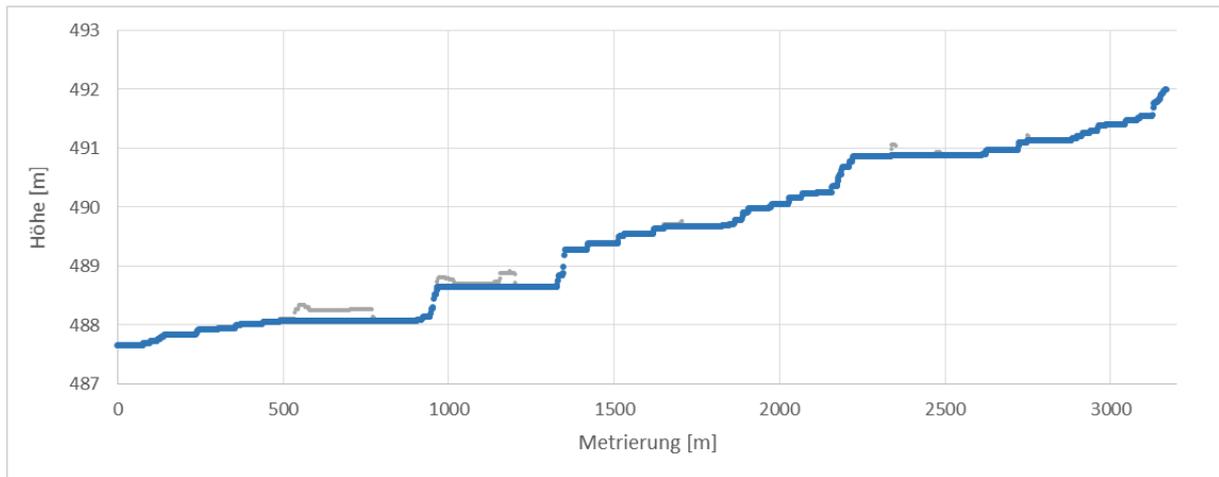


Abbildung 12 Gegensteigungen im Längsprofil (grau) werden korrigiert (blau).

Zuerst wird sichergestellt, dass von oben her kommend die Höhen immer abnehmen oder gleichbleiben. Zwischensteigungen werden so aus dem Längsschnitt entfernt (siehe Abbildung 12). Die Korrektur erfolgt in Python, wo das Längsprofil Punkt für Punkt auf Gegensteigungen hin untersucht wird. Falls eine Gegensteigung vorhanden ist werden die Höhenwerte korrigiert. Um abrupte Gefällwechsel zu vermeiden, wird das Längsprofil in einem zweiten Bearbeitungsschritt mit der Methode „Polynomial Approximation with Exponential Kernel“ geglättet (Bodansky 2002), dies mit einer Glättungsdistanz von 50 m. Das geglättete Längsprofil ist in Abbildung 13 dargestellt. Nach der Glättung werden die Vertices wieder verdichtet, dass alle zwei Meter ein Vertex existiert. Die Vertices werden danach in Punkte konvertiert (GP-Tool „Vertices to Point“).

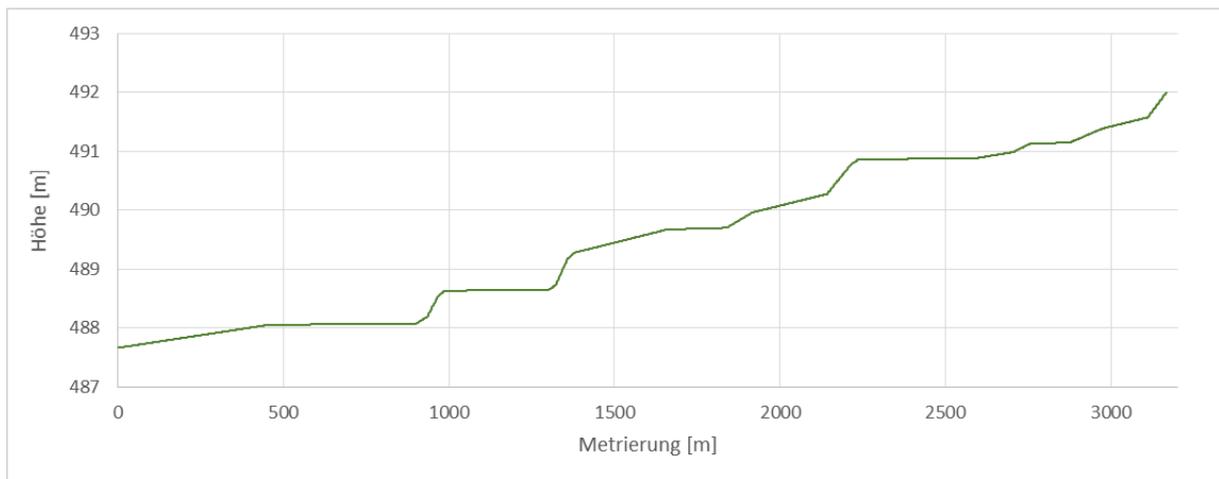


Abbildung 13 Korrigiertes und geglättetes Längsprofil.

Über die Metrierung können die neuen geglätteten Höhen auf die zu Beginn des Prozesses erstellte Gewässermittellinie übertragen werden (GP-Tool „Make Route Event Layer“).

2.1.4 Extrapolation der korrigierten Gewässerhöhen auf modellierte Wasserfläche

Letztendlich muss der korrigierte und geglättete Wasserspiegel des Längsschnittes auf die gesamte Wasserfläche extrapoliert werden. Um die Wasserspiegelhöhen auf die Gewässerränder zu extrapolieren, werden die Vertices der Gewässerränder verdichtet, damit mindestens alle zwei Meter ein Vertex existiert. Ebenfalls wird der Gewässerrand in eine Route konvertiert (GP-Tool „Create Route“) und die Vertices des Gewässerrandes in Punkte konvertiert (GP-Tool „Feature Vertices To Points“). Über die Distanz (GP-Tool „Near“) wird eine Beziehung zwischen den korrigierten, geglätteten Punkten in der Flussmitte und den neu erstellten Gewässerrandpunkten hergestellt. Über diese Beziehung werden mittels GP-Tool „Join Field“ die neu berechneten Höhen auf die Gewässerrandpunkte transferiert. Mittels GP-Tool „FeatureTo3DByAttribute“ werden aus den 2D-Gewässerrandpunkten, welche die Höhe im Attribut gespeichert haben, dreidimensionale Gewässerrandpunkte, welche danach mit dem GP-Tool „Points To Line“ 3D-Gewässerrandlinien zusammengesetzt werden. Aus diesen Gewässerrandlinien wird ein TIN generiert (GP-Tool „Create TIN“ mit den Einstellungen „hardline“, „DELAUNAY“). Das TIN wird mittels „TIN To Raster“ in ein Raster mit Zellgrösse des Grundlagen-DTM konvertiert. Schlussendlich wird das erhaltene Raster mit „Extract By Mask“ auf den Wasserspiegelbereich zugeschnitten.

Wird das Gerinne infolge von Wehren oder gewollten Steilstufen unterteilt, resultiert aus jedem Wasserflächenpolygon ein modelliertes Wasserspiegelraster. Alle Wasserspiegelraster werden mit „Mosaic To New Raster“ zu einem modellierten Wasserspiegelraster zusammengesetzt.

Um sicherzustellen, dass knapp ausserhalb der Wasserfläche keine Bereiche existieren, welche tiefer als der Wasserspiegel liegen (dies wäre der Fall, falls die Wasserfläche zu eng digitalisiert wurde und bei der Wasserspiegelmodellierung der Wasserspiegel erhöht würde, wird das berechnete Wasserspiegelraster über die Ränder hin ausgedehnt (GP-Tool „Focal Statistics“ mit Parametern MEAN und Radius 10 m.) In diesem zehn Meter breiten Bereich am Rand des Wasserspiegels wird nicht automatisch das Ursprungs-DTM im Resultat verwendet, sondern ein Maximum von Ursprungs-DTM und dem ausgedehnten Wasserspiegelraster.

2.2 Methodik zur Modellierung des Gerinnes

Bevor die Methoden für die Modellierung des Gerinnes vorgestellt werden (Kap. 2.2.1 und 2.2.2), werden die in der Literatur gefundenen und in Kap 1.4 vorgestellten Methoden für einen Einsatz evaluiert. In Tabelle 2 sind die Resultate der Evaluation zusammengefasst. Die Bewertung versteht sich jeweils im Blick auf die in Kap. 1.5 formulierten Ziele.

Die grössten Unterschiede der Methoden sind einerseits, dass bei zwei Methoden der Talweg bei der Interpolation berücksichtigt wird, bei den anderen zwei nicht, andererseits unterscheiden sich die Methoden bei der Interpolation: Während die Methode Caviedes-Voullième entlang von Splines (gebogenen Linien) interpoliert, verwenden die Methoden Merwade und geo7 Zwischenprofile, um in komplexen Abschnitten den Gerinneverlauf abzubilden. Bei der Methode Schäppi wird jedes Pixel entlang gerader Linien interpoliert (ohne Zwischenprofile), die Lösung für komplexe Gerinneverläufe

sieht die Methodik in einer dichteren Vermessung von Querprofilen. Da die Grundlagendaten (Profildichte) nicht veränderbar sind, ist ein Einsatz der Methodik Schächli nicht möglich.

Tabelle 2 Evaluation der bereits existierenden Gerinnemodellierungsmethoden.

| | |
|-----------------------------------|---|
| Methode Merwade | <ul style="list-style-type: none"> + für kleinmassstäbliche Gerinneimplementation bestens geeignet + effiziente, einfache Interpolationsmethode + ArcGIS-PlugIN erleichtert Anwendbarkeit - Talweg wird nicht berücksichtigt |
| Methode Schächli | <ul style="list-style-type: none"> + Interessanter Ansatz, einzige Methodik welche nicht entlang von Linien interpoliert, sondern jedes Pixel individuell berechnet - Methodik für grossmassstäbliche, genaue Gerinnemodellierung konzipiert - Hohe Querprofildichte für akzeptable Resultate zwingend - Talweg wird nicht berücksichtigt - relativ ineffizient (grosser Berechnungsaufwand) |
| Methode Caviedes-Voullième | <ul style="list-style-type: none"> + für kleinmassstäbliche Gerinneimplementation geeignet + Interpolation entlang gebogener Linien + Talweg wird berücksichtigt - im Labor getestet, Umsetzbarkeit mit realen Daten (vom linken zum rechten Ufer springender Talweg) führt zu unschönen Resultaten |
| Methode geo7 | <ul style="list-style-type: none"> + für kleinmassstäbliche Gerinneimplementation geeignet + effiziente, einfache Interpolationsmethode + Talweg wird berücksichtigt - starke Vereinfachung der Querprofilinformationen aufgrund Berücksichtigung Talweg |

Die Berücksichtigung des Talwegs bei der Interpolation ist bei den Methoden Caviedes-Voullième sowie geo7 mit grösseren Nachteilen verbunden. Die Methode Caviedes-Voullième interpoliert die Höhen zwischen zwei Querprofilen entlang der Splines sowie entlang des Talwegs. Es existiert immer die gleiche Anzahl Splines rechts und links des Talwegs. Da in Schweizer Gewässern der Talweg nicht selten vom linken ans rechte Gewässerufer springt und umgekehrt, wird diese Methode zu nicht optimalen Modellierungsergebnissen führen. Die Methodik wurde im Labor an sinusförmigen Gewässern entwickelt, bei denen sich der Talweg ruhiger verhielt als in Realität. Bei der Methode geo7 hat die Berücksichtigung des Talwegs zur Folge, dass das Querprofil im Bereich der Gewässerfläche auf sieben Hauptpunkte (Talweg, je zwei Punkte links und rechts des Talwegs und je ein Punkte an beiden Ufern) vereinfacht wird. Um den Talweg berücksichtigen zu können, wird das hochdetaillierte Profil mit um die hundert Vermessungspunkte im Bereich des Gerinnes auf fünf Punkte reduziert. Neben dem Verlust von Information bringt die Reduktion der Profilhöheninformationen vielfach gut sichtbare TIN-Facetten im Modellierungsergebnis mit sich.

Da die Nachteile recht gross sind, welche aus Berücksichtigung des Talwegs resultieren, wird für die Modellierung des Gerinnes die Methode von Merwade eingesetzt (vgl. Kapitel 2.2.1), welche für grossflächige Gerinnemodellierungen geeignet ist und auch dem Detaillierungsgrad der Querprofile Rechnung trägt. Auch findet sich ein GIS-Tool für ArcMap, welches im Internet frei verfügbar ist und die Gerinnemodellierung unterstützt (Merwade 2015).

Als zweite Methode für die Gerinnemodellierung wird ein eigenes Modellierungsverfahren entwickelt (vgl. Kapitel 2.2.2), welches Methode Caduff genannt wird. Das selbst entwickelte Modellierungsverfahren ist eine Weiterentwicklung der Methode Schächpi. Im Unterschied zur Methode Schächpi ist die Methode Caduff bei geringen Profildichten ohne weiteres einsetzbar. Die Interpolationsmethode ist wie bei der Methode Schächpi nicht sehr effizient, liefert jedoch ein schönes Resultat. Der grosse Vorteil des Interpolationsverfahrens liegt jedoch darin, dass es erlaubt, den Modellierungsperimeter exakt auf die Wasserfläche des Gerinnes zu setzen.

2.2.1 Gerinneimplementation mittels Methode Merwade

Die Methodik basiert wie in Kapitel 1.4.1 bereits beschrieben aus einer linearen Interpolation entlang von 3D-Bruchkanten, wobei für das Beibehalten des Gewässerlaufes zusätzlich Hilfsprofile eingesetzt werden. Merwade selbst spricht nicht von Hilfsprofilen, er bezeichnet die Hilfsprofile sowie die Längslinien, entlang derer die Höhen interpoliert werden, als gerinneeigenes Koordinatensystem.

Wie oben beschrieben kann die Modellierung mit einem GIS-Tool für ArcMap vollzogen werden. Wie Abbildung 14 zeigt, benötigt das ArcMap-Tool zur Modellierung des Gerinnes drei Eingabedatensätze (Querprofile, Mittellinie und einen Modellierungsperimeter), einen Ausgabedatensatz sowie drei Parameter.

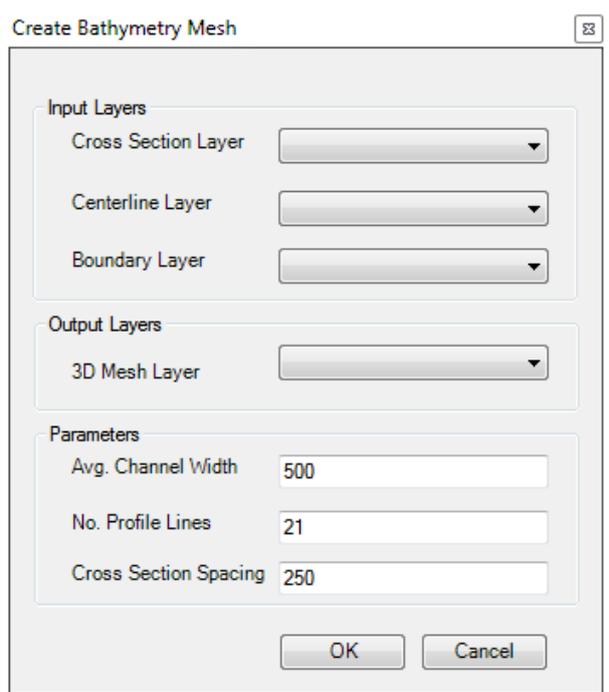


Abbildung 14 User-Interface des ArcMap-Tools der Methode Merwade.

Die Modellierungsergebnisse der Methode Merwade hängen stark von der Wahl der drei Parameter ab. In schwierigen Situationen werden verschiedene Parameterkombinationen getestet, bis das daraus resultierende Ergebnis jeweils überzeugt. Die drei zu setzenden Parameter werden untenstehend vorgestellt.

„Avg. Channel Width“

Die Variable für die mittlere Gewässerbreite gibt dem Berechnungsprogramm ein ungefähres Gefühl für die zu erwartenden Längen der einzelnen Querprofile. Aufgrund der mittleren Gewässerbreiten limitiert das Programm die maximale Länge der Zwischenprofile auf das Vierfache der mittleren Gewässerbreite. Grundsätzlich hat diese Variable einen sehr geringen Einfluss auf das Modellierungsergebnis, denn normalerweise will man nicht, dass das Programm die Zwischenprofile auf eine Maximallänge limitiert. In sehr komplexen Modellierungssituationen wie im Aareknie bei Altreu (vgl. Abbildung 15) kann die Variable jedoch sehr nützlich sein, um Zwischenprofile in ihrer Länge zu begrenzen.

„No. Profile Lines“

Diese Variable definiert, wieviel 3D-Bruchkanten in Längsrichtung generiert werden. Merwade empfiehlt, dass die Distanz zwischen den 3D-Bruchkanten kleiner sein sollte als die kleinste Distanz zwischen zwei Messpunkten am Profil selber, um die gesamte Auflösung des Querprofiles zu behalten. Bei den Modellierungen wird mit einem hohen „No. Profile Lines“-Wert gearbeitet, jedoch wird im Hinblick auf die Zielstruktur (2m-Raster) der Parameter auf maximal 100 Profillinien begrenzt.

„Cross Section Spacing“

Die dritte Variable definiert den Abstand zwischen den Hilfsprofilen. In der Methode von Merwade werden die Hilfsprofile unabhängig von den vermessenen Querprofilen (Hauptprofile) gesetzt. Laut Merwade soll die Variable „Cross Section Spacing“ so gesetzt werden, dass die Hilfsprofile sich nicht selber schneiden. In normalen Situationen ist es kein Problem, dies einzuhalten. In Spezialfällen führt diese Regel jedoch zu einem grossen Dilemma (vgl. Abbildung 15). Im linken Teil der Abbildung ist die Empfehlung von Merwade umgesetzt worden. Damit die Zwischenprofile sich nicht schneiden, ist eine Cross-Section-Spacing-Distanz von ≥ 200 m notwendig. Im rechten Teil der Abbildung wurde die Variable Cross Section Spacing auf 10 m gesetzt. Sich schneidende Hilfsprofile produzieren nicht gewünschte Artefakte im Innenbereich der Aarebiegung. Dagegen wird im Aussenbereich der Biegung die Gewässerform viel besser abgebildet. In dieser Arbeit werden in solchen extremen Situationen sich schneidende Hilfsprofile und daraus resultierende Artefakte in Kauf genommen, da diese Fehler das kleinere Übel darzustellen scheinen.

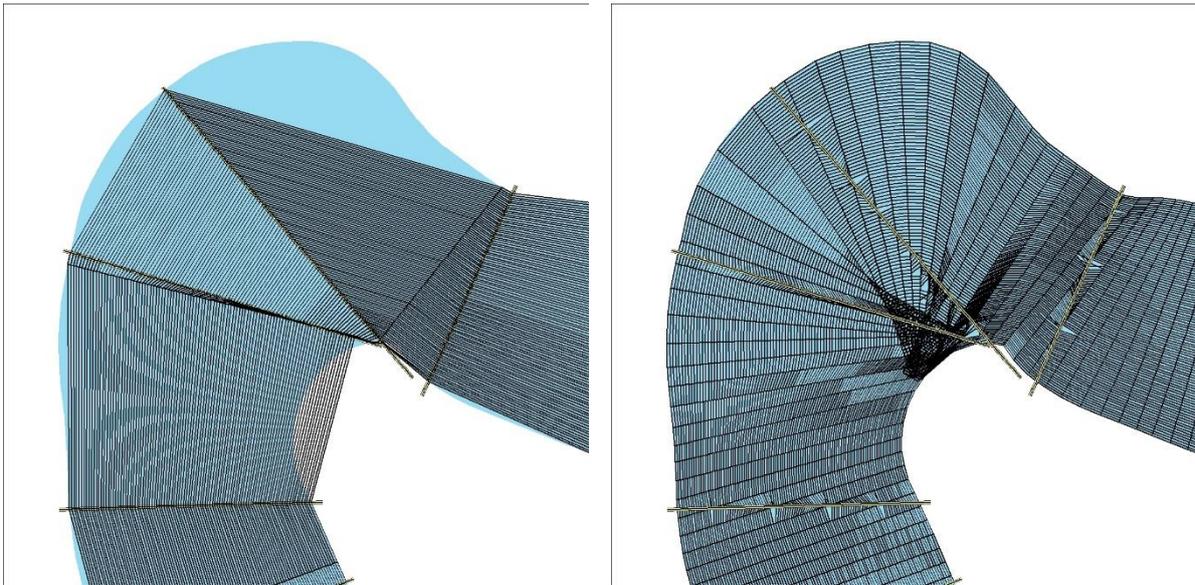


Abbildung 15 Methode Merwade mit Avg Channel Width 55 m, No Profile Lines 100 zwei unterschiedlichen Cross Section Spacing: links 200 m, rechts 10 m.

Die bei den verschiedenen Modellierungen gewählten Parameterkombinationen sind untenstehend abgebildet (vgl. Tabelle 3). Um die Resultate der Methode Merwade zusätzlich zu verbessern, müssen viele Profile gekürzt werden, dies als Folge von z.T. sehr heterogenen Profillängen. Die Heterogenität von benachbarten Querprofilen führt im Modellierungsergebnis zu unerwünschten Artefakten. Um die Nachvollziehbarkeit der Modellierung zu gewährleisten, sind Start- und Endpunkt jedes für die Modellierung verwendeten Querprofiles tabellarisch in Anhang A vermerkt.

Tabelle 3 Verwendete Parameter bei der Modellierung der Gerinneabschnitte mit Merwade.

| Abschnitt | Avg. Channel Width | No. Profile Lines | Cross Section Spacing |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|
| Aare, Münsingen - Bern | 100 | 100 | 20 |
| Aare, Bern – Worblaufen | 100 | 100 | 20 |
| Aare, Altreu – Solothurn * | 150 | 100 | 20 |
| Emme, Gerlafingen - Luterbach | 50 | 50 | 20 |

* Biegung Altreu wird mit Avg. Channel Width 55, No. Profile Lines 100 und Cross Section Spacing 10 interpoliert

2.2.2 Gerinneimplementation mittels Methode Caduff

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Modellierung von Gerinnen basiert inhaltlich auf der Methode von Schächli (Schächli et al. 2010). Kapitel 1.4.2 fasst die Methode kurz zusammen. Sie wird als elegant befunden, ist aber nicht einsetzbar wegen den grossen Querprofilabständen von über 100 m. Die Methodik berücksichtigt Krümmungen im Gerinne nicht. In Abbildung 16, welche von Schächli übernommen wurde, wird gezeigt, dass infolge der Krümmung zwischen Querprofil 1 und Querprofil 2 die reale Gewässerfläche A nicht optimal modelliert wird, es resultieren Fehlerflächen (S_1 bzw. S_2). Um die Grösse der Fehlerflächen zu limitieren werden für die Anwendung der Methode Schächli sehr viele Querprofile benötigt, die Rede ist von einem Verhältnis von Pixelgrösse und

Querprofilabstand von 1 : 5 in komplexen Situationen und 1 : 25 in weniger komplexen. Dies würde bei einer Zellgröße von 2 m Querprofilabstände zwischen 10 und 50 m bedeuten.

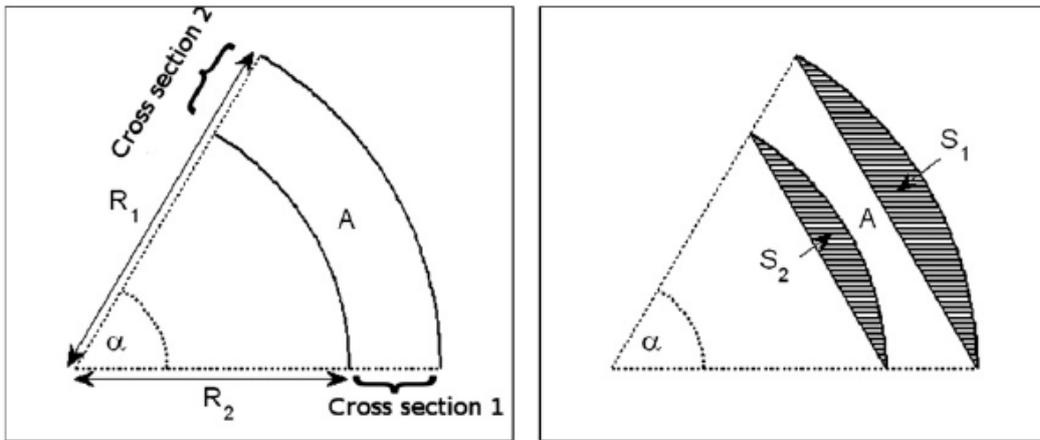


Abbildung 16 Gerinnekrümmungen resultieren in der Methodik Schächpi in Fehlerflächen. Grafik aus Schächpi et al. (2010).

Die lediglich geraden Gerinneränder zwischen zwei Querprofilen resultieren in der Methode Schächpi aus der Interpolationslogik. Die Interpolationslogik der Methode Schächpi wird kurz vorgestellt. Der Gerinnerand (oder Bruchkanten, welche entlang von z.B. Sandbänken digitalisiert werden), teilen die Gewässerfläche zwischen zwei Querprofilen in verschiedene Polygone (vgl. Abbildung 17 rechts): Area j,1 – Area j,4. Durch die Verlängerung der Randkanten dieser Flächen entsteht irgendwo ein Schnittpunkt der beiden Randkanten, es sei denn, diese sind genau parallel. Für jedes Pixel in der Fläche kann nun eine Linie vom Schnittpunkt durch das Pixel gezogen werden. Abbildung 17 links zeigt dies exemplarisch für das Pixel G. Die Schnittpunkte der so gezogenen Linie mit den Querprofilen (P_{i^*j} bzw. P_{i^*j+1}) bilden für Pixel G die zu interpolierenden Ausgangshöhen.

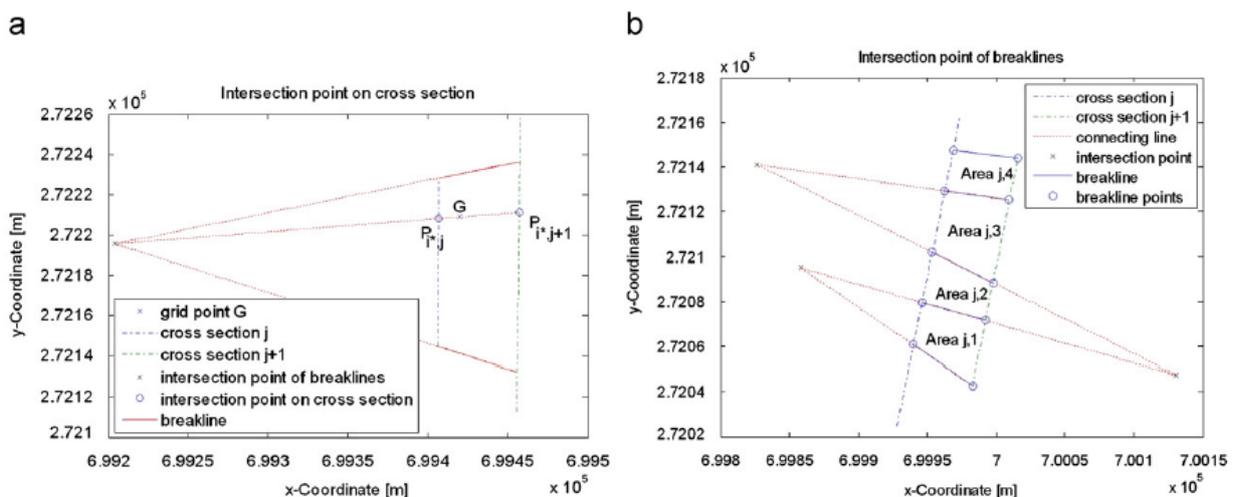


Abbildung 17 Interpolationstechnik der Methode Schächpi. Grafik aus Schächpi et al. (2010).

Um Krümmungen modellieren zu können, werden bei der Methode Caduff die für das Pixel G wichtigen Punkte der benachbarten Querprofile (Punkt P_j bzw. Punkt P_{j+1}) anders definiert als bei der Methode Schächpi (vgl. Abbildung 18). Die Distanzen des zu interpolierenden Pixels G zu beiden Ufern bzw.

Bruchkanten werden bestimmt (d_{G1} und d_{G2}). Mit untenstehender Formel wird das Verhältnis v_{G1} der Distanz d_{G1} zur Summe der beiden gebildet:

$$v_{G1} = \frac{d_{G1}}{(d_{G1} + d_{G2})}$$

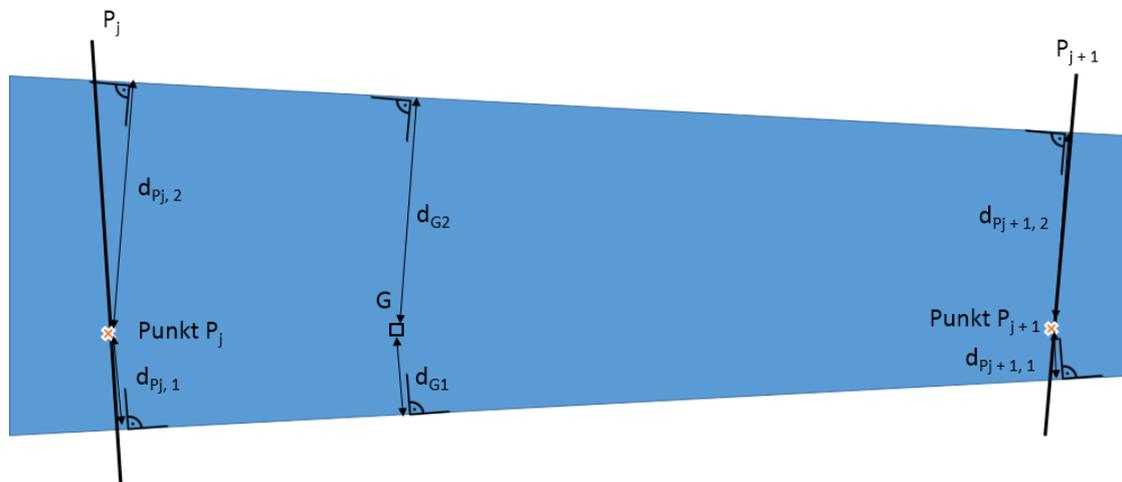


Abbildung 18 Grundlage der Interpolationshöhen der Methode Caduff.

Die beiden gesuchten Punkte (Punkt P_j bzw. Punkt P_{j+1}) sind auf den zum Punkt G benachbarten Querprofilen dort verortet, wo das Verhältnis ($v_{Pj,1}$ bzw. $v_{Pj+1,1}$) dem Verhältnis bei Punkt G entspricht. Bei geraden Gerinneabschnitten sind sich die Methode Caduff und Schächpi sehr ähnlich. Bei Kurven oder unregelmässigen Ufern (z.B. Buhnen) oder Biegungen unterscheiden sich die Modellierungsergebnisse enorm, da die Methode Caduff die realen Gewässerränder beibehält.

Technisch wird so vorgegangen, dass die Vertices der Querprofile so verdichtet werden, dass mindestens 1000 Vertices pro Querprofil vorhanden sind. Dies bedeutet, dass bei Querprofilen unter 10 m die Vertices verdichtet werden, sodass für jeden Millimeter ein Vertex generiert wird. Bei Querprofilen zwischen 10 und 100 m wird pro Zentimeter ein Vertex generiert und für Querprofile über 100 m ein Vertex pro Dezimeter. Für die über 1000 Vertices werden die Distanzen zu den Ufern bzw. Bruchkanten berechnet. Daraus wird für jeden Vertex im Querprofil das Verhältnis $v_{Pj,1}$ berechnet. Das Verhältnis wird danach auf drei Stellen nach dem Komma gerundet. Daraus resultiert ein ganzzahliger Promillewert für jeden verdichteten Vertex des Querprofiles. Pro Querprofil werden die Höhen der Promillewerte in einem Dictionary gespeichert. Weisen mehrere Vertices eines Querprofiles denselben Promillewert auf, entspricht der abgelegte Höhenwert im Dictionary dem Mittelwert dieser Vertices.

Für jedes Pixel im zu berechnenden Polygon (Interpolationszone) wird das Verhältnis zu den Ufern bzw. Bruchkanten (v_{G1}) bestimmt. Dieses Verhältnis wird auf den ganzzahligen Promillewert gerundet. Mit dem berechneten Promillewert und der angelegten Dictionary können nun für jedes einzelne Pixel sehr effizient die beiden Punkte $v_{Pj,1}$ bzw. $v_{Pj+1,1}$ bestimmt werden. Abbildung 19 zeigt einen Gerinneabschnitt mit berechnetem Verhältnis v_{G1} . Zur besseren Visualisierung ist dasselbe Ergebnis

achtmal dargestellt, jedoch mit unterschiedlich vielen Klassen. Die in der Abbildung zu sehenden Klassengrenzen zeigen beispielhaft, auf welchen „Pfad“ die Höhen in diesem Beispielausschnitt interpoliert würden.

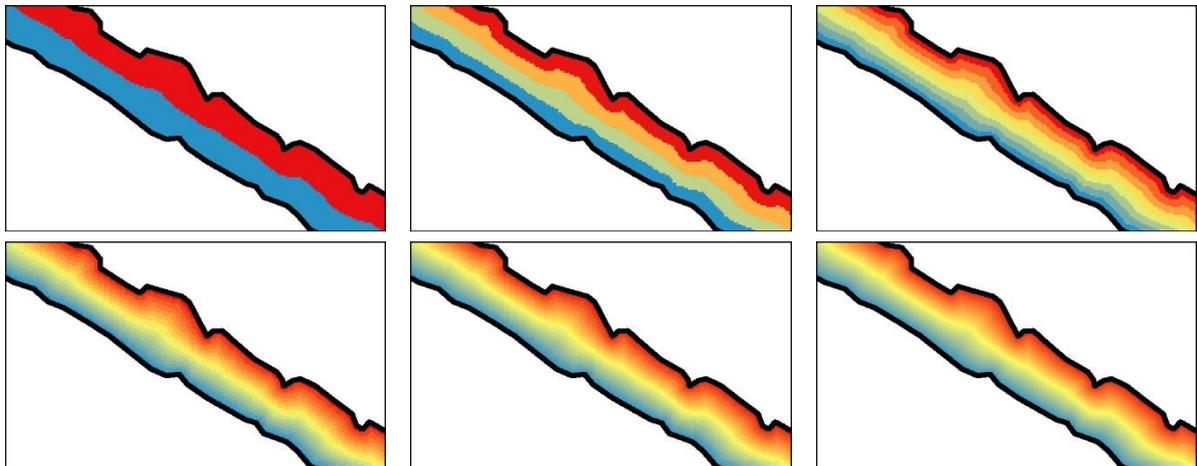


Abbildung 19 Hilfsdarstellung zur Veranschaulichung der Interpolationspfade der Methode Caduff. Für jedes Pixel wird der Promillewert als Mass für die Lage im Querschnitt berechnet. Die Abbildungen zeigen einen Gerinneabschnitt mit verschieden klassierten Promillewerte (oben links 2 Klassen, dann 4 Klassen, 8 Klassen, ...)

Die Bestimmung der effektiven Pixelhöhe für jedes Pixel erfolgt ausgehend von der Höhe der bestimmten Punkten P_j bzw. Punkt P_{j+1} analog zur Methode Schächli nach unten stehender Formel:

$$zG = \frac{DP_j}{(DP_j + DP_{j+1})} * zP_{j+1} + \frac{DP_{j+1}}{(DP_j + DP_{j+1})} * zP_j$$

wobei

| | |
|------------|---|
| zG | Höhe Punkt G |
| DP_j | Distanz zwischen Punkt G und Querprofil P_j |
| DP_{j+1} | Distanz zwischen Punkt G und Querprofil P_{j+1} |
| zP_j | Höhe am Punkt P_j |
| zP_{j+1} | Höhe am Punkt P_{j+1} |

Neben den vermessenen Querprofilen sind für die Modellierung des Gerinnes mit der Methode Caduff die Uferlinien notwendig. Da das Modellierungsergebnis sehr sensitiv auf die Setzung der Uferlinien reagiert, werden die Uferlinien nicht aus einem bestehenden Datensatz verwendet, sondern auf Basis eines hochaufgelösten Orthofotos digitalisiert. Grundsätzlich wird als Datengrundlage für die Digitalisierung das Orthofoto SWISSIMAGE50 mit einer Zellgrösse von 50 cm verwendet. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt der Emme zwischen Gerlafingen und Luterbach, wo das frei verfügbare Orthofoto des Kt. Solothurn mit einer Zellgrösse von 12.5 cm als Grundlage für die Digitalisierung der Uferlinien verwendet wird.

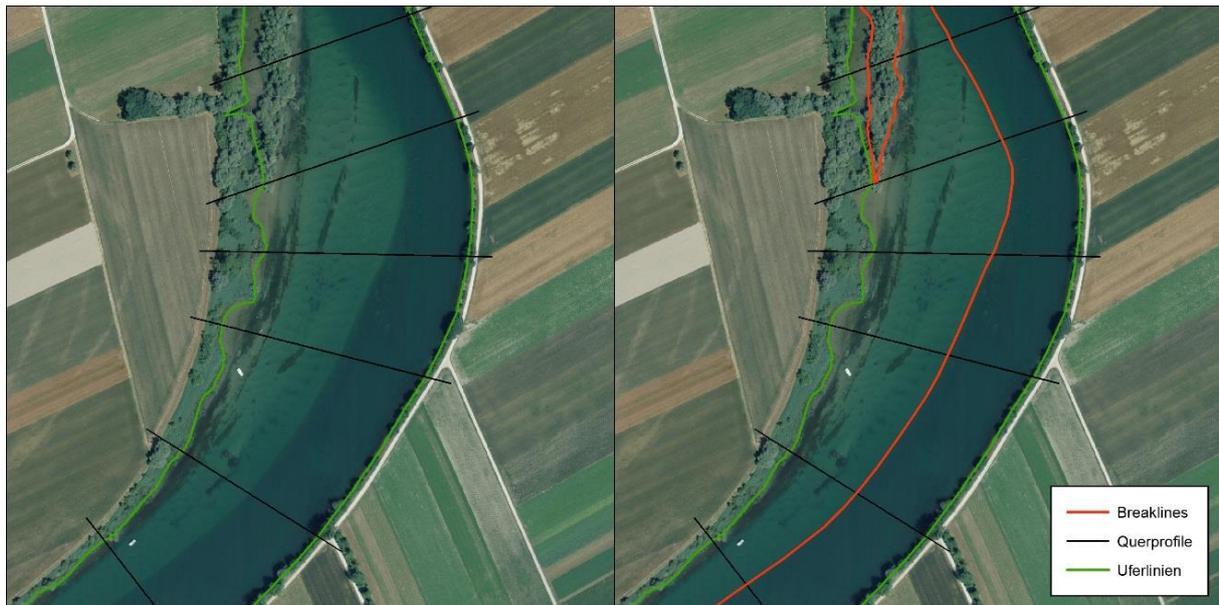


Abbildung 20 Die Uferlinien sowie Breaklines werden auf Basis des Orthofotos digitalisiert. Hintergrund: SWISSIMAGE50, swisstopo.

Neben den Uferlinien können optional Breaklines digitalisiert werden, um die Interpolationsgüte weiter zu steigern. Anfang und Ende von Breaklines müssen bei einem Querprofil liegen. Aus Abbildung 20 wird der Nutzen von Breaklines sehr deutlich; im Orthofoto sind tiefere und weniger tiefe Bereiche des Gewässers zu erkennen. Durch die Verwendung einer Breakline zwischen den unterschiedlich tiefen Bereichen lässt sich die Interpolation zwischen den Querprofilen so steuern, dass die verschiedenen Bereiche des Gewässers getrennt voneinander interpoliert werden und somit die Kante zwischen dem Flachwasserteil und der tiefen Wasserzone erhalten bleibt, auch wenn sie nicht exakt parallel zu den Uferlinien verläuft. Breaklines dienen generell zum Erhalt von Strukturen im Gewässerbereich und helfen, verschiedenartige Bereiche des Gerinnes bei der Interpolation zu berücksichtigen.

Die gesetzten Breaklines bilden in Kombination mit den Ufer- und Querprofilen Polygone, so genannte Interpolationszonen. Für jede einzelne Interpolationszone wird die oben beschriebene Modellierungsmethodik unabhängig voneinander nacheinander angewendet. Die Resultate der verschiedenen Interpolationszonen werden mit dem GP-Tool „Mosaic To New Raster“ zu einem Raster zusammengezogen.

Die Untersuchungsgebiete (vgl. Kap. 3) sind bewusst so gewählt, dass Spezialfälle wie Inseln, Gewässerverzweigungen und Wehre Bestandteile des Untersuchungsgebietes sind. Der Umgang mit diesen drei Spezialfällen wird im Folgenden kurz erläutert.

Umgang mit Inseln

Inseln werden mittels Breaklines vom restlichen Gerinne abgetrennt. Eine Interpolation zwischen Gewässeruntergrund und Gebieten, die über dem Wasserspiegel liegen, wird so verhindert. Im Bereich der Inseln (Festland) werden die Höhenwerte nicht neu modelliert, das DTM bleibt in diesem Bereich unverändert. Wie in Abbildung 21 dargestellt ist, kann das Ufer der Insel als Breakline erfasst werden

und diese zum nächsten Querprofil weitergezogen werden. Technisch handelt es bei der in der Abbildung zu sehenden Breakline um eine Multipart-Breakline. Die Interpolation der Höhen geschieht mit dieser Abgrenzung im Gerinne wie gewünscht.



Abbildung 21 Beispiel der Breaklinesetzung im Bereich von Inseln.

Umgang bei Gewässerverzweigungen

Bei Gewässerverzweigungen werden die zusammenfliessenden Gewässer einzeln modelliert. Aus den beiden Gerinnemodellierungen resultieren zwei Raster, welche danach mittels GP-Tool „Mosaic to new Raster“ (Minimum) zusammengerechnet werden. Bei grösseren Inseln kann es durchaus Sinn machen, beide Gewässerteile einzeln zu modellieren und am oberen und unteren Ende der Inseln die Gewässerverzweigungsmethodik einzusetzen.

Umgang mit Wehren

Wehre sind abrupte Knicke im Längsprofil, welche erhalten bleiben sollen. Eine Interpolation vom letzten vermessenen Querprofil oberhalb des Wehres zum Querprofil unterhalb des Wehres ist nicht sinnvoll, da sie den Charakter des Wehres zerstören wird. Bei Wehren wird das letzte Profil oberhalb des Wehres verdoppelt, damit die Höhen des Gerinnes oberhalb des Wehres bis an das Wehr gezogen werden können. Unterhalb des Wehres wird mit gleicher Methodik verfahren, um die Höhen des ersten Profils unterhalb des Wehres bis zum Wehr hin zu ziehen. Der Bereich des Wehres wird nicht modelliert, das DTM bleibt im Bereich des Wehres unverändert. Es ist jedoch möglich, das Wehr mittels Angaben der Kraftwerksbetreiber (Sohlschwelle, Anzahl Wehrfelder, Breite Wehrfelder) manuell zu modellieren.

2.3 Methoden zur Bestimmung der Güte der Modellierungsergebnisse

2.3.1 Qualitative Bestimmung der Güte

Für eine möglichst gute qualitative Bewertung der Modellierungsergebnisse wird das Modellierungsergebnis in verschiedenen Derivaten beurteilt. Bestens für eine qualitative Beurteilung des DTM eignet sich das Hillshade. Das Hillshade vermittelt einen Gesamteindruck des Modellierungsergebnisses weil damit Form und Aussehen des Gerinnes beurteilt werden können. Unerwünschte Artefakte oder Sprünge und Kanten werden im Hillshade ebenfalls sehr schnell erkannt. Das Hillshade ist für die qualitative Beurteilung der Güte sehr gut geeignet, da es einen Gesamteindruck des modellierten DTM vermittelt. Die qualitative Bewertung der Güte eines Modellierungsergebnisses durch das Hillshade wird erleichtert, indem verschiedene Hillshades nebeneinander gestellt werden und somit eine komparative Aussage möglich wird.

Weiter kann vom modellierten Gewässer der Längsschnitt berechnet werden, welcher qualitativ bewertet werden kann. Vor allem bei den Resultaten der Wasserspiegelmodellierung sagt das Aussehen des Längsschnittes einiges über die Güte der Modellierung aus.

Ebenfalls lässt sich durch die Differenzbildung mit dem Ursprungs-DTM aufzeigen, wie stark die Modellierung das DTM verändert.

2.3.2 Absolute Differenz der Pixel

Die Resultate der Gerinnemodellierung können auf die Differenz zu den vermessenen Querprofilpunkten hin quantitativ untersucht werden. Wird das Querprofil, mit welchem die Güte bestimmt wird, für die Modellierung verwendet, wird in dieser Arbeit von Integrationsgüte gesprochen. Die Integrationsgüte bezeichnet nichts anderes als die Repräsentation der jeweiligen Originalprofile im späteren Modellierungsergebnis.

Da nicht nur entscheidend ist, wie gut die Querprofile bei der Modellierung selber integriert werden, sondern auch, wie gut die Bereiche zwischen den Querprofilen interpoliert werden, wird neben der Integrationsgüte die Interpolationsgüte berechnet. Die Berechnung der Interpolationsgüte geschieht mit dem Verfahren der Kreuzvalidierung. Bei der Modellierung des Gerinnes wird ein Teil der Querprofile nicht verwendet, welche danach für die Beurteilung der Interpolationsgüte zur Verfügung stehen.

Vorstellung Quantilmatrix zur Darstellung der absoluten Differenzen

Da ein Querprofil gewöhnlich aus über hundert Messpunkten besteht, resultieren sowohl bei der Integrationsgüte wie auch bei der Interpolationsgüte pro Profil mehr als hundert Differenzen zwischen vermessenem Querprofilpunkt und modelliertem Gerinne. Für jedes Profil werden für die ermittelten Differenzen (Absolutbetrag) verschiedenen Quantile (10%, 25%, 50%, 75%, 90%, Maximum) berechnet, dies sowohl für den Gewässer- als auch für den Uferbereich. Unter dem Gesichtspunkt, dass zum Beispiel ein Abschnitt der Aare zwischen Bern und Münsingen 80 Profile aufweist, musste ein Weg gefunden werden, die verschiedenen Quantile der verschiedenen Profile auf einen Blick

darzustellen. Zur Lösung wurde eine Matrix entwickelt. Da die Matrix sehr informativ, jedoch auch sehr komplex ist, wird sie untenstehend an einem Beispiel kurz erklärt.

Die für jedes Profil ermittelten Quantile im Gewässer- sowie Uferbereich werden untereinander aufgelistet. So resultiert aus dem Abschnitt der Aare zwischen Bern und Münsingen eine Tabelle mit 160 Zeilen. Da die Tabelle mit 160 Zeilen sehr gross und unübersichtlich ist, werden die 160 Zeilen zu den nun in der Matrix vorhandenen 6 Zeilen zusammengefasst (vgl. Abbildung 22), indem von jeder Spalte wiederum die Quantile berechnet werden.

| Mervade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | |
|-------------|---------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|
| | 10%-Quantil | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum |
| 10%-Quantil | 0.02 | 0.08 | 0.16 | 0.38 | 0.66 | 1.22 |
| 25%-Quantil | 0.03 | 0.10 | 0.23 | 0.45 | 0.82 | 1.48 |
| Median | 0.06 | 0.14 | 0.33 | 0.68 | 1.12 | 1.81 |
| 75%-Quantil | 0.10 | 0.21 | 0.43 | 0.88 | 1.45 | 2.29 |
| 90%-Quantil | 0.15 | 0.29 | 0.59 | 1.22 | 1.72 | 2.85 |
| Maximum | 0.28 | 0.50 | 2.23 | 2.63 | 2.92 | 4.25 |

Abbildung 22 Beispiel der Quantilmatrix. Die eingekreisten Ziffern dienen zur Kennzeichnung von konkreten Beispielen.

Zusätzlich unterstützt eine Farbgebung die Aussage der Matrix: Werte bis 50 cm werden grün eingefärbt, Werte von 50 cm bis einem Meter gelb, grössere Werte rot. Jeweils drei Werte in der Matrix (unten rechts) sind grau: diese Werte sind Extremwerte bezogen auf wenige Beobachtungen und haben bezüglich der allgemeinen Implementationsgüte eher weniger Aussagekraft. Sie sind zwar berechnet, werden jedoch farblich nicht hervorgehoben.

Zur Beispielmatrix (vgl. Abbildung 22) drei konkrete Beispiele als Erklärung:

- 1: In der Spalte Median werden die Mediane aller Profile betrachtet. 90% der Profile weisen eine Mediandifferenz von weniger als 0.59 m auf, bei 10% der Querprofile ist die Mediandifferenz grösser als 0.59 m.
- 2: In der Spalte 90%-Quantil stehen die 90%-Quantile der Differenzen pro Querprofil. Über alle Profile gesehen beträgt die Mediandifferenz der 90%-Quantile 1.12 m.
- 3: Beim dritten Beispiel es sich hier wiederum um die 90%-Quantile der Differenzen pro Profil. Das Maximum dieser (das heisst, das Profil mit dem grössten 90%-Quantil) hat die Differenz 2.92 m.

2.3.3 Differenz zu hydraulischen Parametern

Neben der absoluten Differenz der Pixel spielt die hydraulische Kapazität eines Gerinnes eine wichtige Rolle. Dies im Hinblick darauf, dass der Gerinnebereich eines DTM vielfach als Grundlage für hydrologische Überflutungsmodellierungen verwendet wird. Ähnlich wie bei der Auswertung der absoluten Differenz (vgl. Kap. 2.3.2) kann auch die Berechnung der hydraulischen Kapazität die Integrationsgüte sowie die Interpolationsgüte berechnet werden. Während die Integrationsgüte die

Güte der Integration eines Profils beschreibt und alle Profile für die Modellierung des Gerinnes verwendet, wird bei der Interpolationsgüte mit dem Verfahren der Kreuzvalidierung jeweils das Profil, welches auf die Güte hin getestet wird, bei der Modellierung nicht verwendet.

Die drei ausgewerteten hydraulischen Parameter sind der Fließquerschnitt, der benetzte Umfang sowie der hydraulische Radius. Letzterer berechnet sich aus Fließquerschnitt und benetztem Umfang nach untenstehender Formel:

$$r_h = \frac{A}{P}$$

wobei

| | |
|-------|-----------------------------|
| r_h | <i>Hydraulischer Radius</i> |
| A | <i>Fließquerschnitt</i> |
| P | <i>Benetzter Umfang</i> |

3 Das Untersuchungsgebiet

Die in Kapitel 4 vorgestellten Resultate stammen von vier verschiedenen Untersuchungsgebieten. Abbildung 23 zeigt die Lage der einzelnen Untersuchungsgebiete. Alle vier Untersuchungsgebiete liegen im Schweizer Mittelland in der Nähe von Bern und Solothurn. Trotz geografischer Nähe unterscheiden sich die einzelnen Gebiete. Die Charakterisierungen jedes einzelnen Gebietes finden sich in den Unterkapiteln 3.1 – 3.4.

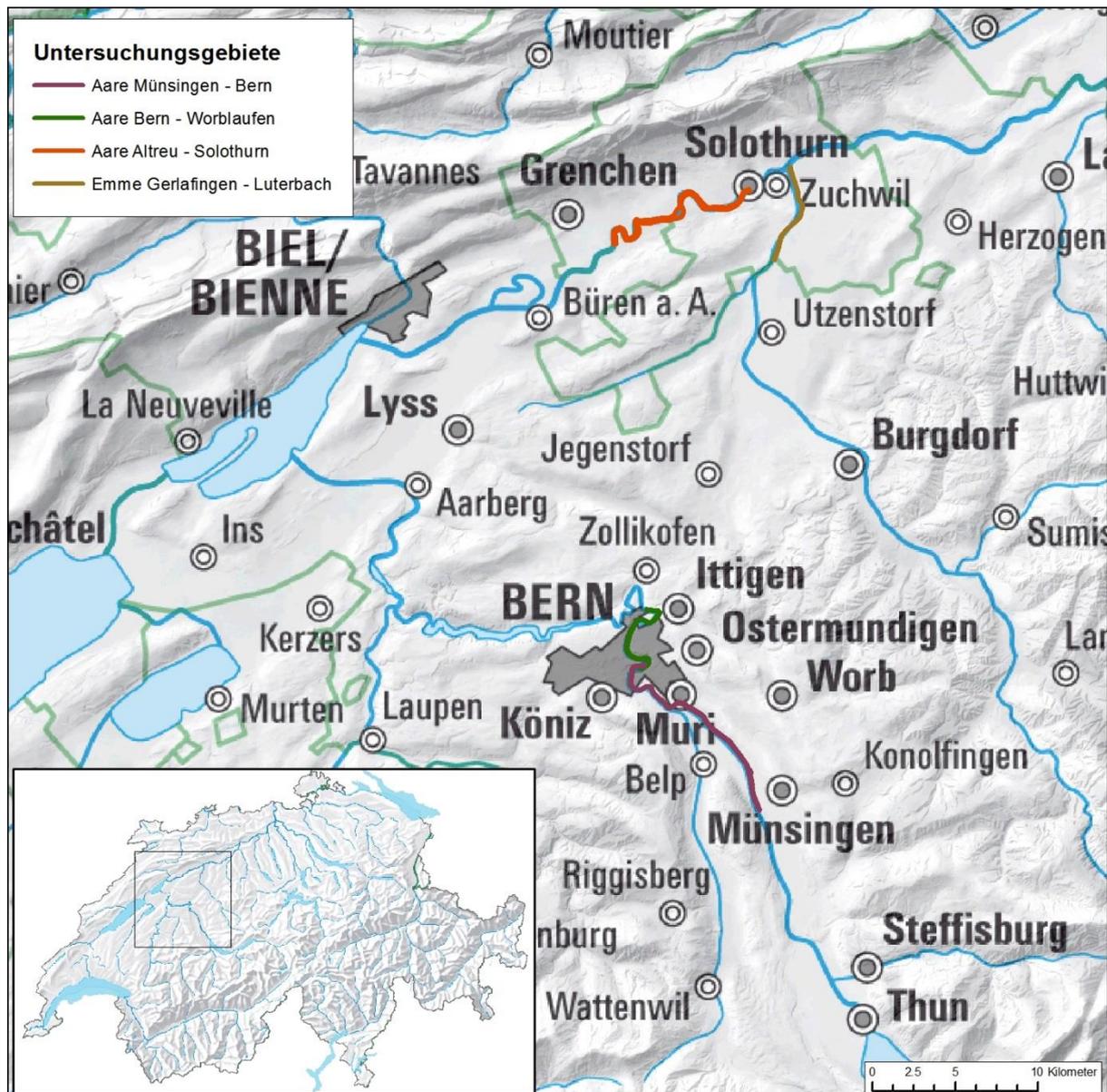


Abbildung 23 Lage der verschiedenen Untersuchungsgebiete. Hintergrund: Hillshade swissATLI3D und LK1MIO, swisstopo

3.1 Aare Münsingen – Bern

Die Aare zwischen Münsingen und Bern ist ein Fluss mit einem Jahresmittel von $122 \text{ m}^3/\text{s}$ (BAFU 2016). Hochwasserspitzen erreichen im Bereich der Stadt Bern gut $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Der Abfluss ist geprägt vom

Brienzer- bzw. Thunersee, welche sich einige Kilometer oberhalb des Untersuchungsgebietes befinden. Die beiden Seen gleichen grössere Abflussschwankungen aus, Hochwasserspitzen sind gedämpft. Der einzige nennenswerter Zufluss im Bereich des Untersuchungsgebietes ist die Gürbe, ein kleiner Fluss mit einem Jahresmittel von 2.22 m³/s (BAFU 2016). Bei Hochwasser kann der Zufluss bis zum Zwanzigfachen seines Jahresmittels betragen, dies ist im Verhältnis zur Aare trotzdem nicht sehr viel.



Abbildung 24 Aare zwischen Münsingen und Bern. Im Bild links sind Buhnen erkennbar.
Quelle: <https://joeschwab.files.wordpress.com/2011/08/aare-bern.jpg>

Die Länge des gesamten Abschnittes zwischen Münsingen und Bern beträgt 14.1 km, auf welchem 80 Querprofile vermessen sind. Dies ergibt einen durchschnittlichen Querprofilabstand von 166 m. Die Gewässerbreite beträgt in diesem Abschnitt zwischen 50 m und 70 m. Der Gewässerlauf der Aare zwischen Münsingen und Bern ist begradigt und die Ufer sind verbaut. Auffallend sind die Buhnen, welche beidseitig in regelmässigen Abständen einige Kilometer des Gewässers zieren (km 12.400 – 20.500, vgl. Abbildung 24). Die Aare zwischen Münsingen und Bern enthält keine Wehre oder Schwellen. Dies ist mitunter ein Grund dafür, dass dieser Abschnitt im Sommer von vielen Schlauchbootfahrern befahren wird. Das Gefälle ist über den gesamten Abschnitt sehr konstant, das durchschnittliche Sohlengefälle beträgt 1.5‰.

3.2 Aare Bern – Worblaufen

Hydrologisch ist der Aareabschnitt zwischen Bern und Worblaufen mit dem Abschnitt von Münsingen bis Bern vergleichbar, denn der Gewässerabschnitt folgt im Anschluss an diesen. So sind die zu erwartenden Hochwasserspitzen oder die hydrologische Prägung durch den Thunersee identisch. Im Abschnitt zwischen Bern und Worblaufen befindet sich das Wehr Felsenau (vgl. Abbildung 25) bei km 3.160. Da für die Gerinnekapazität die Wassermenge im Falle eines Hochwassers entscheidend ist,

und bei Hochwasser dem Gerinne kein Wasser entzogen wird (Kraftwerksbetrieb muss im Hochwasserfall generell eingestellt werden), wird die Gerinnekapazität durch die Wasserentnahme nicht beeinträchtigt. Die Wasserentnahme äussert sich darin, dass im gross dimensionierten Gerinne gewöhnlich relativ wenig Wasser fliesst und somit Kies- und Sandbänke feste Bestandteile des Gerinnes bilden.



Abbildung 25 Wehr bei Felsenau, welches bei der Modellierung berücksichtigt wird.

Quelle: <https://myjourneywest.files.wordpress.com/2011/05/felsenau-wehr.jpg>

Der Abschnitt der Aare zwischen Bern und Worblaufen ist 6.2 km lang. Im Abschnitt sind 35 Profile vermessen, was einen mittleren Profilabstand von 182 m ergibt. Die Breite des Gerinnes beträgt 45 m bis 70 m, das Sohlgefälle zwischen Bern und dem Wehr Felsenau 0.32‰ und vom Wehr bis Worblaufen 1.25‰.

3.3 Aare Altreu – Solothurn

Bei der Aare zwischen Altreu und Solothurn handelt es sich um einen Fluss mit einem mittleren Abfluss von $243 \text{ m}^3/\text{s}$ und einem sehr flachen Gefälle 0.13 ‰ (Läuppi 2015). Die Länge des modellierten Abschnitts beträgt 12.3 km, im Abschnitt existieren 75 vermessene Querprofile, der mittlere Querprofilabstand beträgt 166 m. Die Gewässerbreite beträgt zwischen 90 m und 190 m. Hochwasserspitzen können in diesem Aareabschnitt über $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (BAFU 2016) erreichen, sind jedoch aufgrund der oberhalb liegenden Seen (Bieler- bzw. Neuenburgersee) gedämpft. Der Abfluss wird gesteuert vom Wehr in Port und ist über das gesamte Jahr gesehen relativ konstant. Der Abschnitt ist schiffbar, es verkehren Linienschiffe der Bielersee Schifffahrt BSG. Zahlreiche Flussschlingen charakterisieren den Abschnitt sowie eine ganzjährig bewohnte Insel, das „Inseli“ (km 6.000), welche sich mitten im Fluss befindet und den Gerinneschlauch in zwei Teile teilt.



Abbildung 26 Das Inseli bei km 6.000 teilt den Gewässerlauf der Aare für einen kurzen Abschnitt in zwei Teile.
Quelle: <http://www.bilanz.ch/luxus/die-schweiz-ein-inselparadies-den-alpen-402124>

3.4 Emme Gerlafingen – Luterbach

Die Emme zwischen Gerlafingen und Luterbach (Emmenmündung in die Aare) ist ein Fluss mit einem durchschnittlichen Abfluss von $19.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (BAFU 2016). Im Hochwasserfall kann sich die Abflussmenge jedoch massiv erhöhen und Hochwasserspitzen bis $662 \text{ m}^3/\text{s}$ erreichen (BAFU 2016). Das Gefälle der Emme beträgt im untersuchten Bereich 3.8% . Die Länge des modellierten Gewässerabschnitts beträgt 6.0 km , bei 60 vermessenen Querprofilen ergibt dies ein mittlerer Querprofilabstand von 102 m . Die Breite des Gerinnes beträgt 25 m bis 60 m . Das Gerinne ist begradigt und geprägt durch harte Uferverbauungen und grosse seitliche Dämme. Seit einigen Jahren laufen Projekte mit dem Ziel, den Hochwasserschutz zu erhöhen sowie das Gerinne ökologisch aufzuwerten (Dürrenmatt 2015). Im Perimeter befindet sich, neben diversen Schwellen und Rampen, auch das Wehr Biberist ($\text{km } 4.750$). Das Wehr fasst das Wasser für den Emmenkanal, an welchem vier Kleinwasserkraftwerke betrieben werden. Unterhalb des Wehres beträgt die Dotiermenge $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ von April bis September sowie $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ von Mai bis August (Meister 2012). Aufgrund der saisonal schwankenden Abflussmengen hat es im Gerinne während Trockenperioden viele Sand- und Kiesbänke, welche jedoch nach Niederschlagstagen oder nach heftigen Gewittern überflutet werden.

4 Resultate

4.1 Resultate Wasseroberflächenmodellierung

In den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.3 sind die Resultate der Wasseroberflächenmodellierung präsentiert, dies nach Untersuchungsgebiet getrennt.

4.1.1 Abschnitt Aare, Münsingen – Bern und Bern – Worblaufen

Eine Übersicht über die Dimensionen der Korrekturen der beiden Methoden (Methode TLM sowie Methode DTM/Orthofoto) zeigt Abbildung 27. Betrachtet man die Dimensionen der bei der Modellierung vollzogenen Korrekturen zeigt sich, dass im hier betrachteten Abschnitt der Aare die Modellierungsmethode mittels DTM/Orthofoto ein homogeneres Bild liefert: Um den Wasserspiegel zu modellieren wird das Ursprungs-DTM leicht abgesenkt (meistens lediglich um einige Dezimeter). Die Korrekturwerte bei der Wasserspiegelmodellierung mittels TLM-Daten sind im Vergleich dazu sehr heterogen: Während im Bereich der Hunzigenbrügg (km 18.000) die DTM-Pixel im Gewässer um z.T. mehr als zwei Meter abgesenkt werden, werden im Bereich der Einmündung der Gürbe (km 11.500) die DTM-Pixel um z.T. mehr als zwei Meter angehoben.

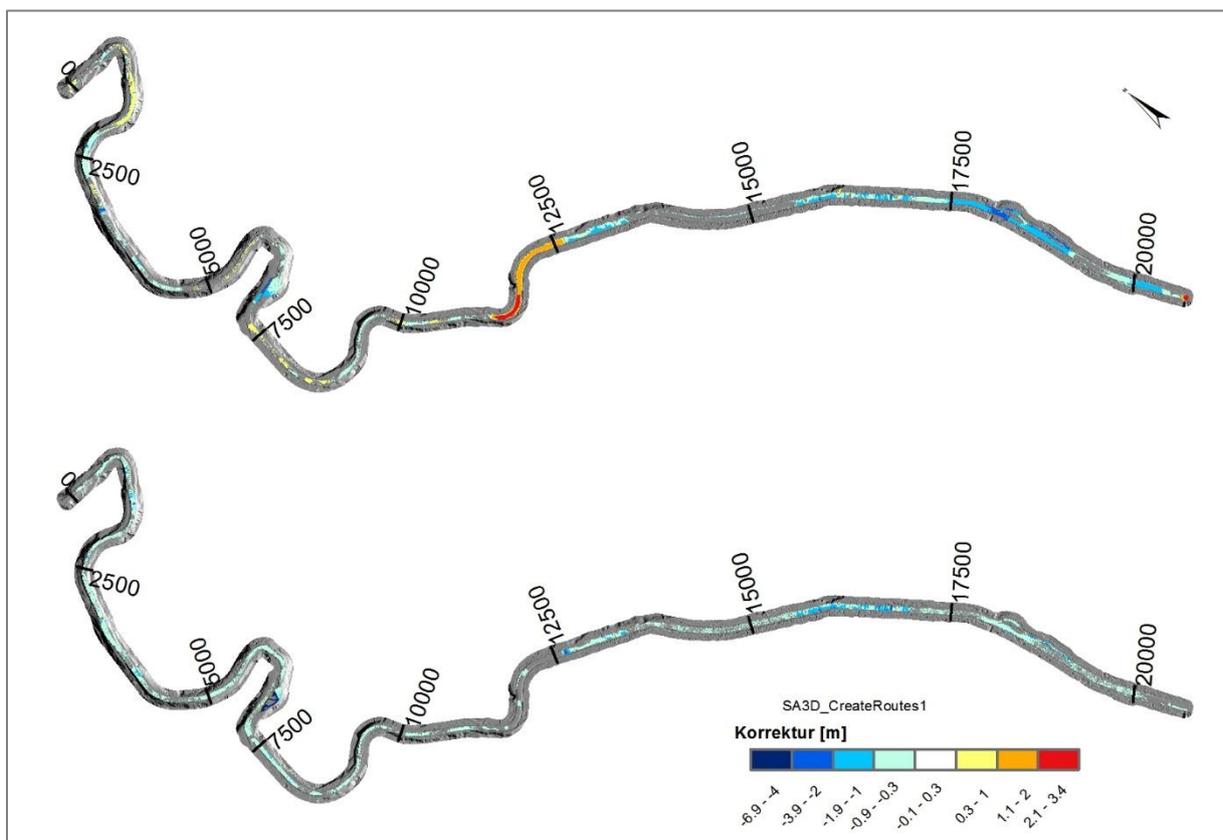


Abbildung 27 Höhenkorrektur von swissALTI3D bei der Wasserspiegelmodellierung TLM (oben) sowie DTM/Orthofoto (unten).

Die oben erwähnten unterschiedlichen Wasserspiegelkorrekturwerte sind ebenfalls in den Längsschnitten erkennbar (vgl. Abbildung 28 bis Abbildung 30). In den Längsschnitten fallen folgende Sachverhalte vor allem auf:

- Zwischen km 11.000 und 13.500 weisen die modellierten Wasserspiegel Differenzen von über zwei Metern auf.
- Der Wasserspiegel der Wasserspiegelmodellierung mittels TLM neigt zu einem Treppenartigen Längsprofil (km 18.000 – 20.500), und dies in Abschnitten, in denen keine Schwellen oder Überfälle anzutreffen sind.

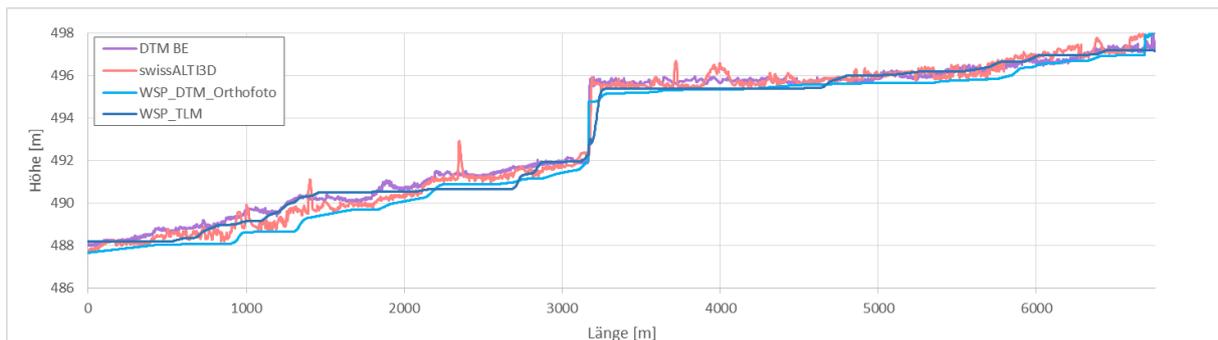


Abbildung 28 Längsprofil Aare Münsingen – Bern – Worblaufen Teil 1.

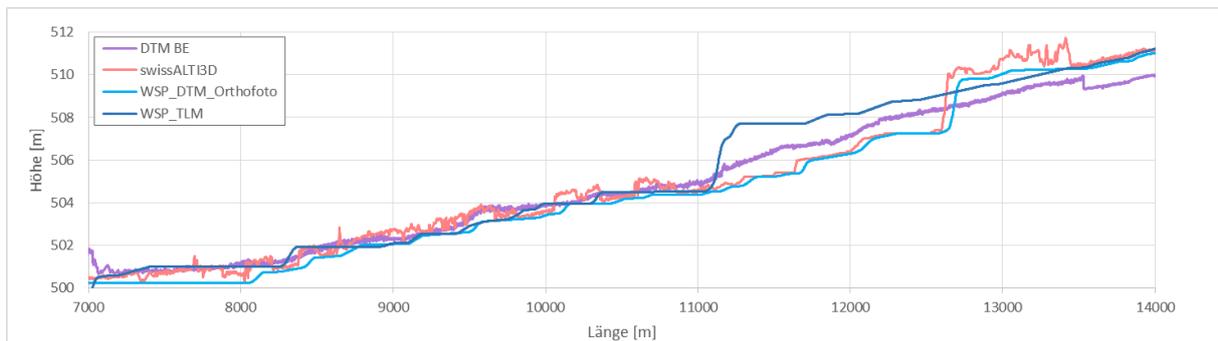


Abbildung 29 Längsprofil Aare Münsingen – Bern – Worblaufen Teil 2.

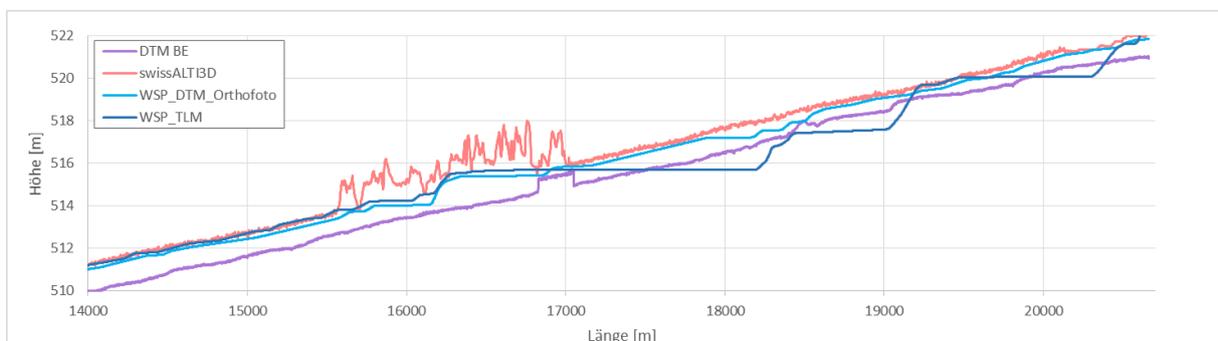


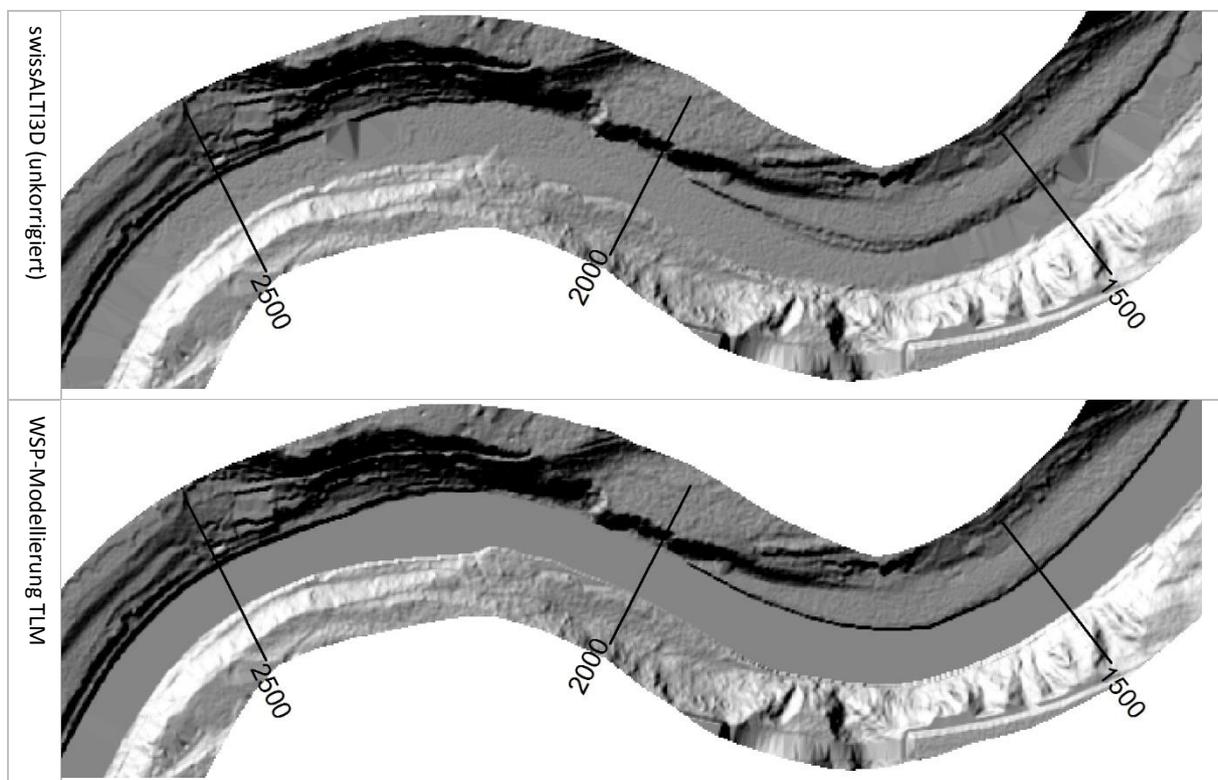
Abbildung 30 Längsprofil Aare Münsingen – Bern – Worblaufen Teil 3.

Anhand der fünf folgenden Beispielausschnitten wird die Qualität des Wasserspiegels der beiden Wasserspiegelmodellierungen in diesem Abschnitt miteinander verglichen:

- Aare Bern Tiefenau (km 1.300 – 2.700)
- Wehr Felsenau (km 2.800 – 3.700)
- Aare Belp oberhalb Gürbemündung (km 11.200 – 12.300)
- Aare Muri im Bereich der Badi (km 12.400 – 13.700)
- Aare Münsingen im Bereich Hunzigenbrügg (km 17.800 – 19.100)

Beispielausschnitt Aare Bern Tiefenau (km 1.300 – 2.700)

In Abbildung 31 ist das Resultat der Wasserspiegelmodellierungen im Bereich von Tiefenau (unterhalb des Wehres Felsenau) zu erkennen. Im Hillshade sind die Unterschiede zwischen dem unkorrigierten DTM swissALTI3D und den zwei modellierten Wasserspiegeln klar zu erkennen. Im Hillshade des unkorrigierten DTM sind im Bereich des Wasserspiegels TIN-Facetten erkennbar (km 1.500 oder km 2.300). Durch die Dreiecksvermaschung werden in diesen Bereichen Uferhöhen ins Gerinne interpoliert. So entstehen ungewollte Strukturen im Bereich des Wasserspiegels. Beide Wasserspiegelmodellierungen bilden im Hillshade eine glatte und ebene Wasserfläche ab. Die Modellierungen unterscheiden sich darin, dass die Wasserfläche bei der Modellierung TLM breiter ist. Ebenfalls sind die Übergänge zwischen Wasserfläche und Ufer bei Verwendung der TLM-Daten relativ hart. Die Modellierung DTM/Orthofoto generiert weichere Land-Wasser-Übergänge, die Breite des Wasserspiegels dieser Modellierung ist mit der im Orthofoto vergleichbar.



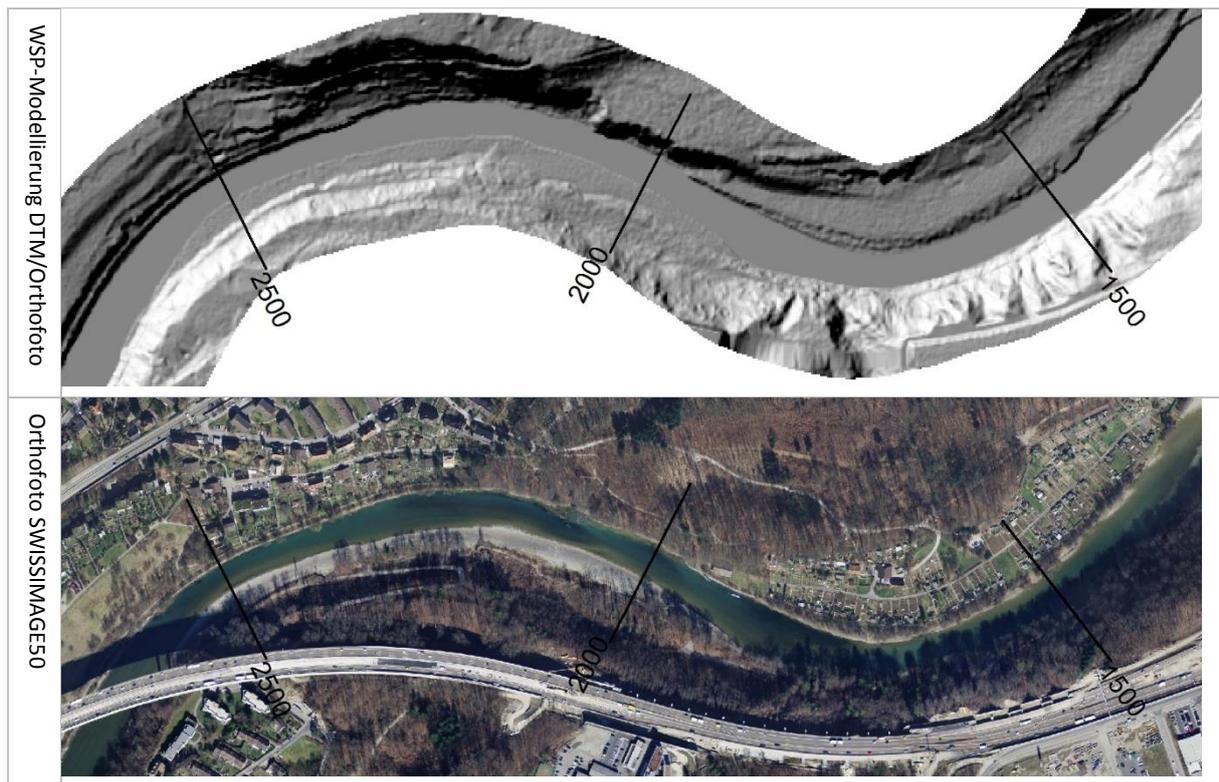
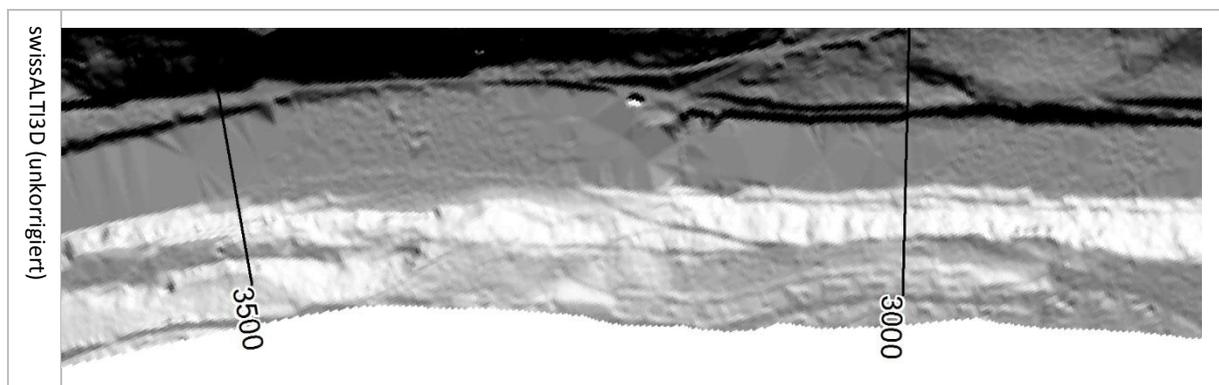


Abbildung 31 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Bern, Tiefenau.

Beispielausschnitt Wehr Felsenau (km 2.800 – 3.700)

Im Bereich des Wehrs Felsenau ist die Wasseroberfläche im unkorrigierten DTM in Abbildung 32 nicht sehr glatt. Es existieren Bereiche, in denen TIN-Facetten erkennbar sind (km 3.200 im Bereich des Wehrs oder km 3.500 – km 3.600). Auch in den restlichen Bereichen ist die Wasserfläche relativ unruhig (vgl. Abbildung 32). Beide Wasserspiegelmodellierungen bilden den Wasserspiegel glatt und homogen ab. Auch von der Ausdehnung der Wasserfläche gleicht in beiden Modellierungen die Ausdehnung der Wasserfläche dem Orthofoto. Der Wasserspiegel der Modellierung TLM beginnt sich bereits einige Meter oberhalb des Wehres zu senken. Die eigentliche Senkung ist jedoch durch die Glättung der Modellierungsmethodik kaschiert.



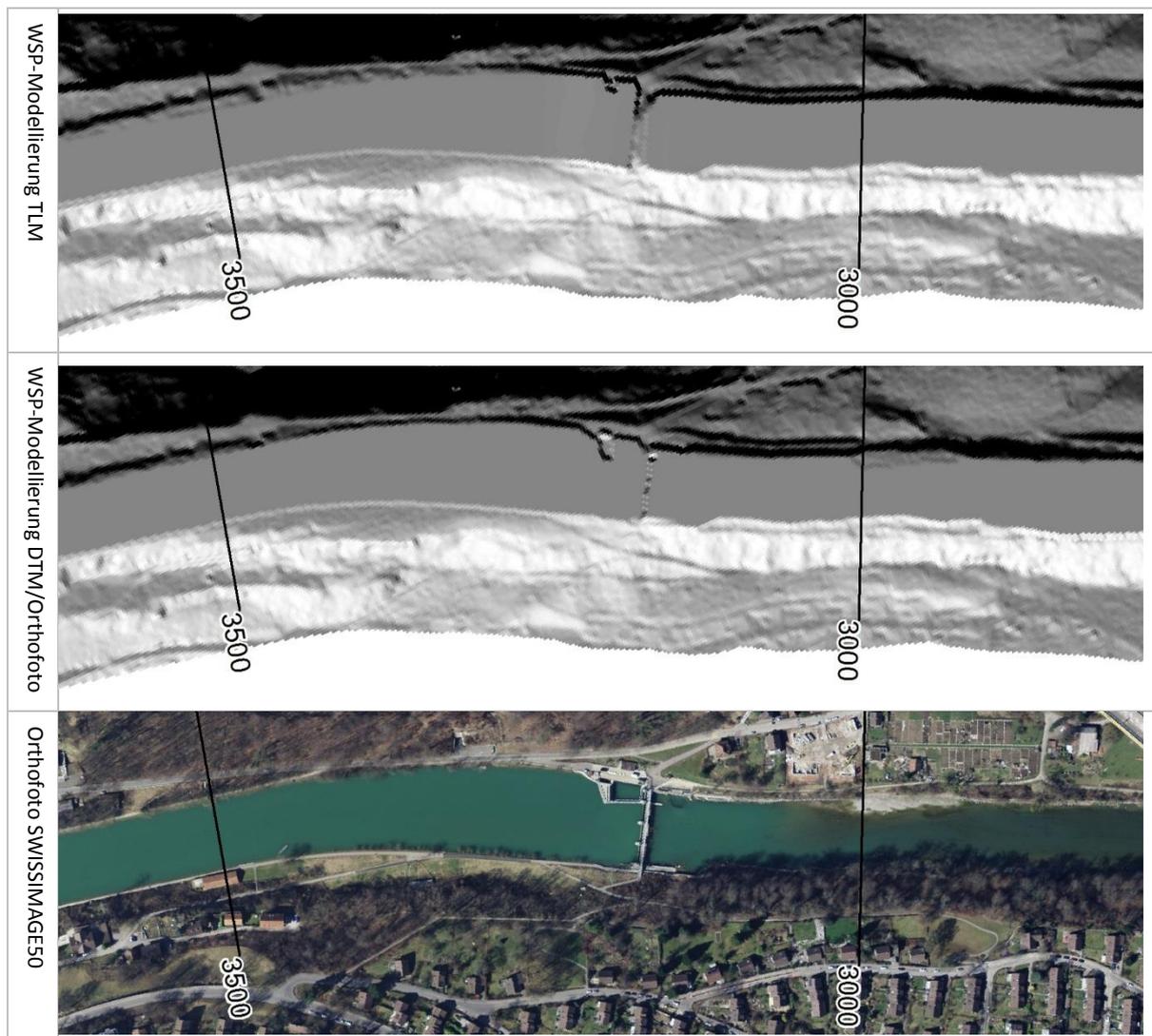


Abbildung 32 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Bern, Wehr Felsenau.

Beispielausschnitt Aare Belp oberhalb Gürbemündung (km 11.200 – 12.300)

Im Bereich oberhalb der Gürbemündung weist das unkorrigierte DTM einen sehr guten und realistischen Wasserspiegel auf (vgl. Abbildung 33). Der Wasserspiegel erscheint im Hillshade homogen und glatt, lediglich bei sehr genauer Betrachtung fallen leichte TIN-Facetten im Hillshade auf. Die Wasserspiegelmodellierung mittels TLM-Methode produziert einen Wasserspiegel, der sehr breit ist und fast bis an die Dammkronen reicht. Die Ränder sind grösstenteils weich und realistisch, mit Ausnahme des orographisch linken Randes bei km 11.300, wo der Wasserspiegel nicht bis zum Damm reicht und sich so ein kleines Loch zwischen Wasserspiegel und Damm bildet. Die Längsstruktur (Mauer) rund um km 12.000 geht durch die Wasserspiegelmodellierung TLM verloren.

Die Wasserspiegelmodellierung mittels DTM/Orthofoto liefert einen schönen Wasserspiegel, welcher von der Ausdehnung her dem Orthofoto und dem unkorrigierten DTM ähnelt. Im Unterschied zum unkorrigierten DTM, wo im Hillshade einige Kanten von TIN-Facetten ganz leicht erkennbar sind, ist der Wasserspiegel bei der Modellierung DTM/Orthofoto ganz glatt. Die Mauer rund um km 12.000 geht durch die Wasserspiegelmodellierung DTM/Orthofoto nicht verloren.

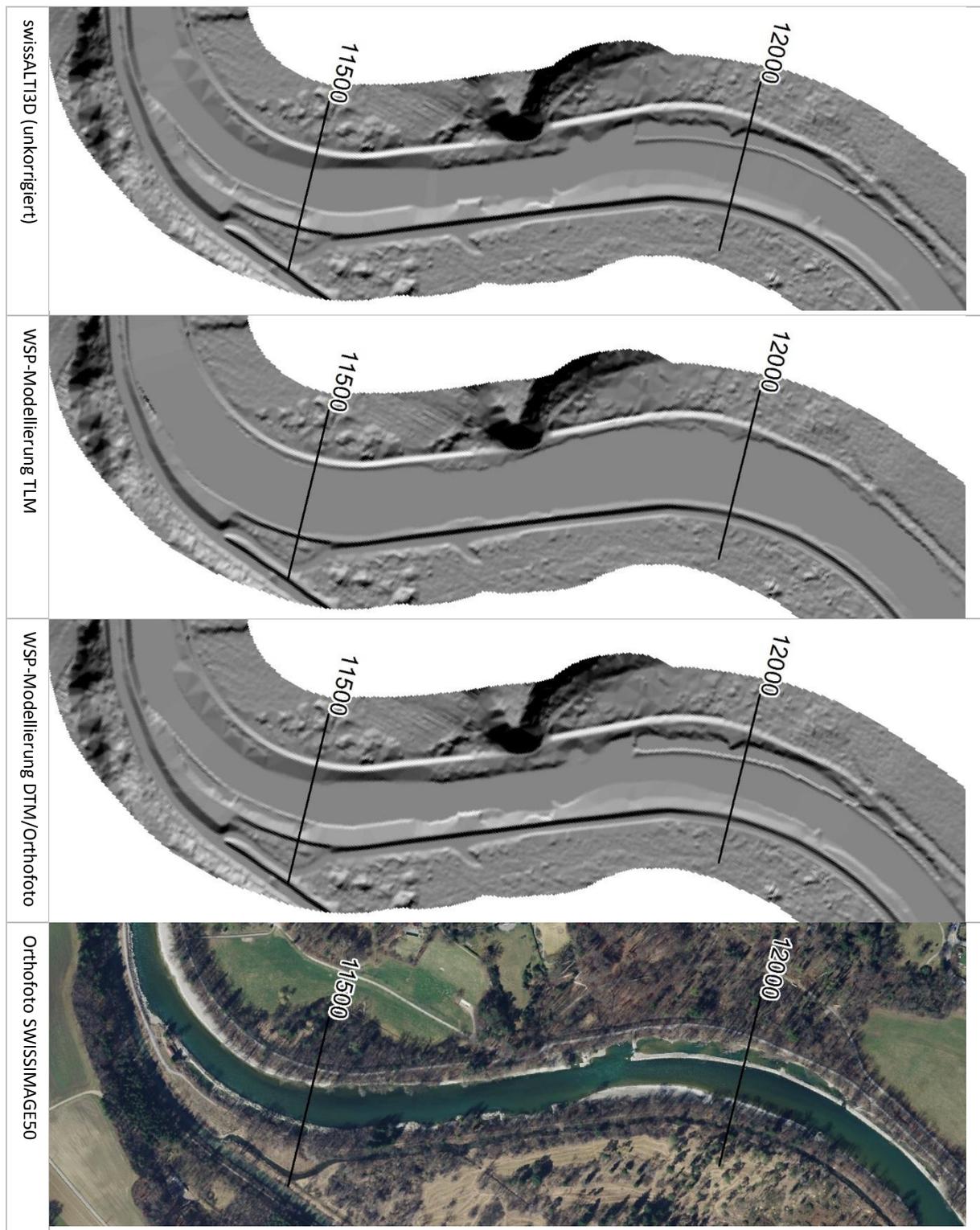


Abbildung 33 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Belp oberhalb Gürbemündung.

Beispielausschnitt Aare Muri im Bereich der Badi (km 12.400 – 13.700)

Zwischen km 12.600 und km 13.450 ist im Hillshade des unkorrigierten DTM zu erkennen, dass die Dreiecksvermaschung die Höhen der Dämme über das Gerinne hinweg vermascht. In diesem Bereich des Gerinnes scheinen keine LiDAR-Höhendaten in die DTM-Erstellung eingeflossen zu sein (vgl.

Abbildung 34). Da die Höhen der Dämme im Gerinnebereich verwendet werden, führt dies zu einer Erhöhung des Wasserspiegels um ca. 2 m (vgl. dazu den Längsschnitt in Abbildung 29).

Beide Wasserspiegelmodellierungen liefern im Gegensatz zum unkorrigierten DTM eine homogene und glatte Wasserfläche. Bei der Modellierung TLM ist die Wasserfläche breiter modelliert als im Orthofoto. Bei der Modellierung mittels DTM/Orthofoto ist die Breite des Wasserspiegels in etwa gleich wie im Orthofoto. Jedoch ist bei km 12.700 ist zu erkennen, dass sich der Wasserspiegel innerhalb von ca. 100 m von einem höheren auf ein tieferes Niveau senkt. Dieser geglättete Gefällsknick ist im Längsprofil ebenfalls erkennbar (vgl. Abbildung 29).

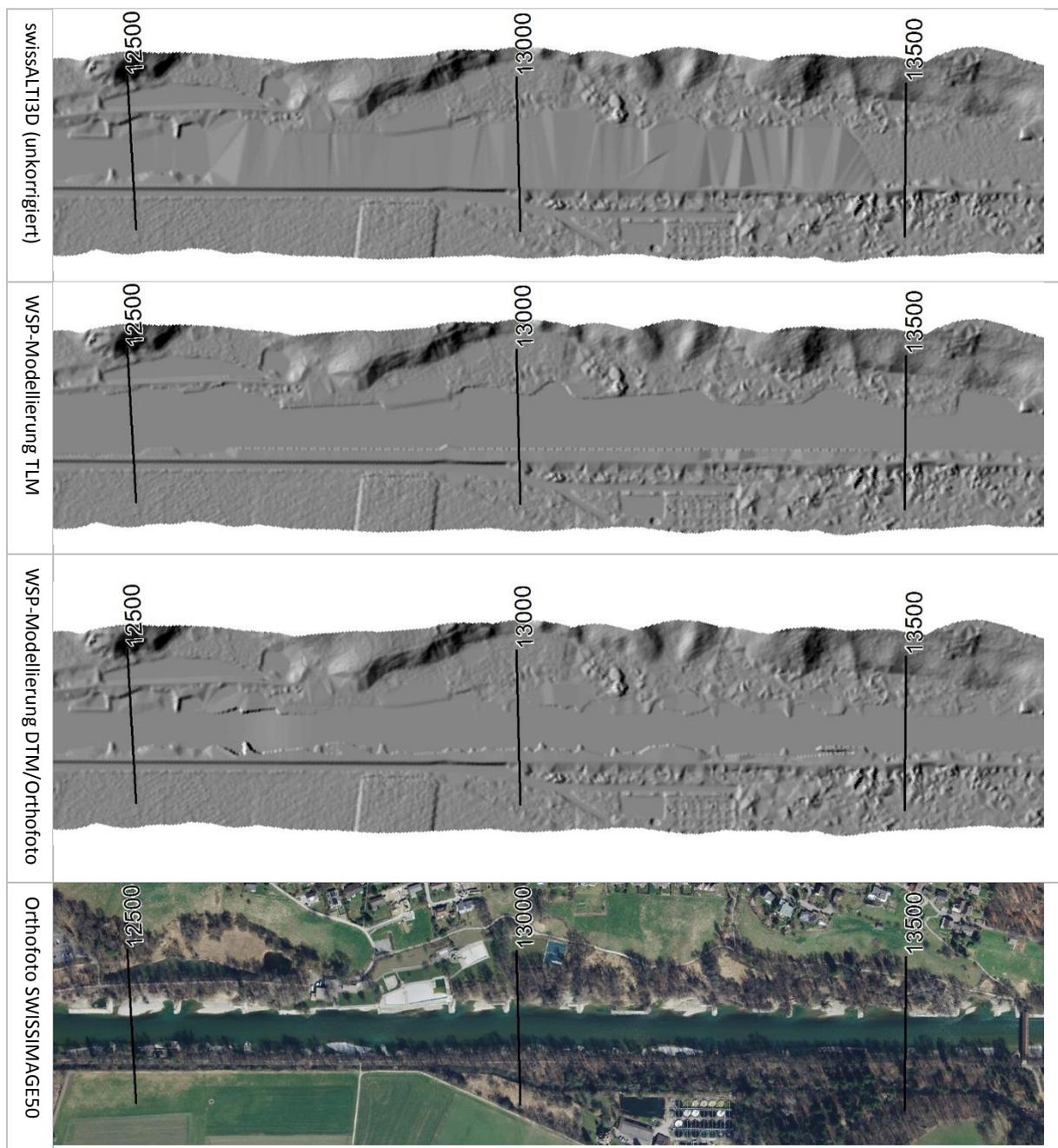


Abbildung 34 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Muri im Bereich der Badi.

Beispielausschnitt Aare Münsingen im Bereich Hunzigenbrügg (km 17.800 – 19.100)

Im Bereich der Hunzigenbrügg (vgl. Abbildung 35) unterscheiden sich die Wasserspiegel der beiden Modellierungen um bis zu zwei Meter (vgl. Längsschnitt in Abbildung 30). Eine weitere Besonderheit dieses Beispielausschnitts ist die Tatsache, dass im Zuge der Renaturierung der Hunzigenau im Jahre 2008 die Aare beträchtlich aufgeweitet wurde und der Flusslauf zwei neue Auwaldinseln erhielt (Bruderer und Bauen 2006). Im unkorrigierten DTM swissALT13D, bei welchem die Befliegung vor dieser Terrainneugestaltung gemacht wurde, ist diese Aufweitung des Flusses mit den zwei neuen Inseln noch nicht vorhanden. Der Wasserspiegel ist jedoch recht homogen, wenn auch ein wenig unruhig im DTM implementiert. Die mittels TLM-Daten modellierte Wasseroberfläche kommt homogen und glatt daher, die Ufer sind jedoch sehr hart, was auf eine Stufe zwischen dem Ufer und der Wasserfläche hinweist. Die Modellierung mittels DTM/Orthofoto liefert ebenfalls einen homogenen und glatten Wasserspiegel, die Übergänge zum Festland sind sehr fließend und natürlich.

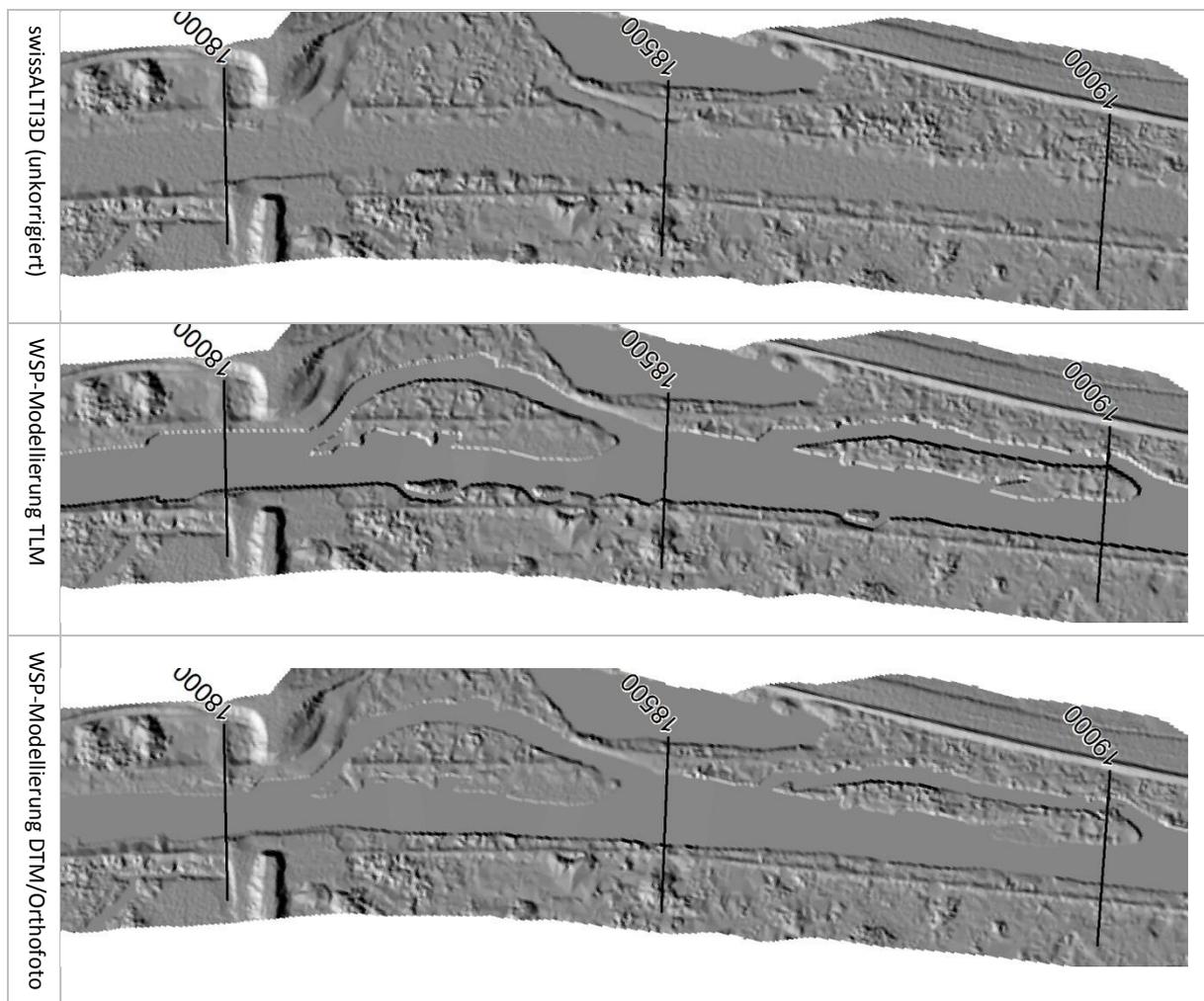




Abbildung 35 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare Münsingen im Bereich Hunzigenbrügg.

4.1.2 Abschnitt Aare, Altreu – Solothurn

Eine Übersicht über die Korrekturen im gesamten Abschnitt der Aare zwischen Altreu und Solothurn findet sich in Abbildung 36. Bei der Wasserspiegelmodellierung mittels TLM werden die Höhen im Gerinne um ca. 0.5 m abgesenkt. Ausnahmen existieren bei km 0.100, wo einige Bereiche stärker abgesenkt werden sowie in den Bereichen zwischen km 2.000 und 2.400, wo einige Bereiche nicht abgesenkt oder sogar leicht angehoben wurden. Die Betrachtung des Längsprofils (Abbildung 37) zeigt, dass die Modellierung TLM über den gesamten Abschnitt einen konstanten und homogenen Wasserspiegel modelliert hat, was aus dem unkorrigierten Grundlagen-DTM so erwartet wird.

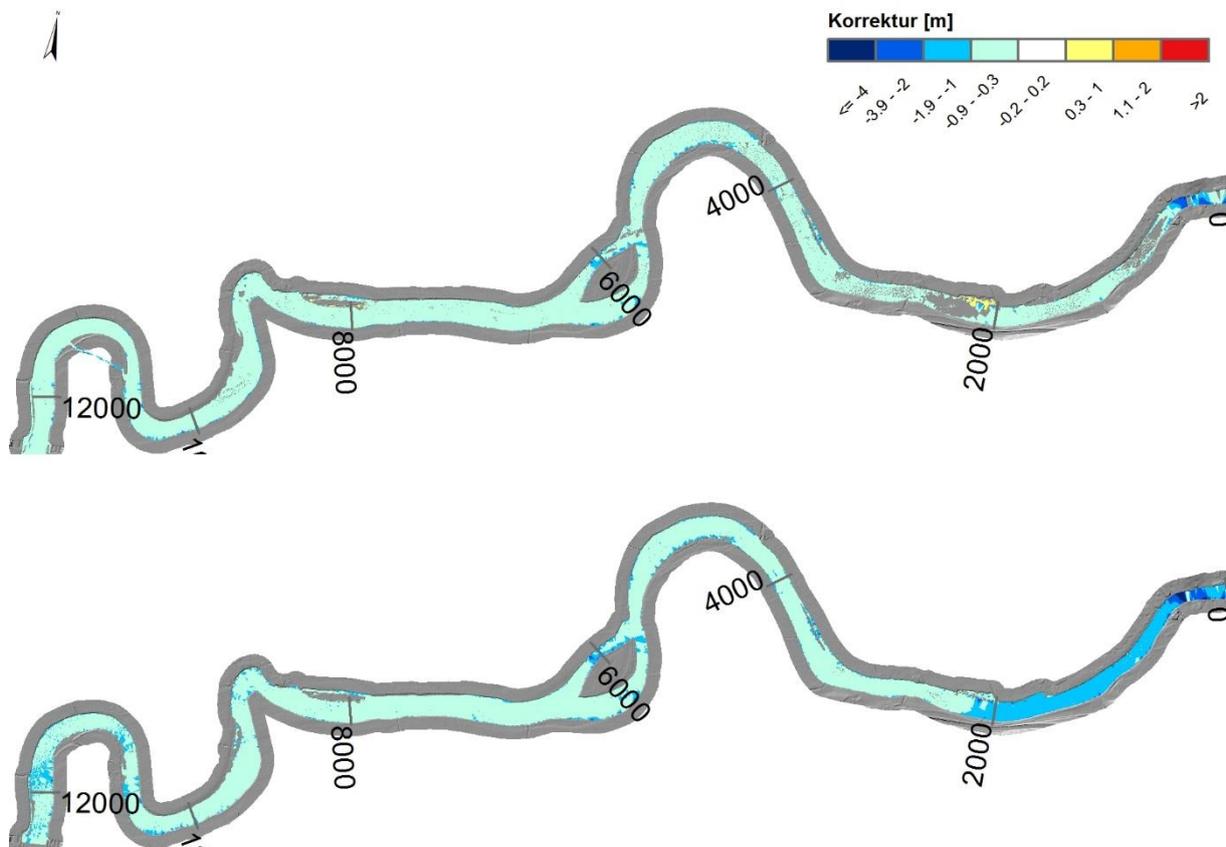


Abbildung 36 Höhenkorrektur von swissALTI3D bei der Wasserspiegelmodellierung TLM (oben) sowie rein DTM (unten).

Die Wasserspiegelmodellierung mittels DTM/Orthofoto liefert im Bereich zwischen km 2.200 und 12.500 ebenfalls eine leichte Absenkung des Wasserspiegels, der Wasserspiegel ist ca. 30 cm tiefer als bei der Modellierung TLM. Im Bereich von km 2.200 existiert ein geglätteter Gefällsknick, welcher dazu führt, dass im Bereich zwischen km 0.000 und 2.200 der Wasserspiegel um einen weiteren Meter tiefer liegt.

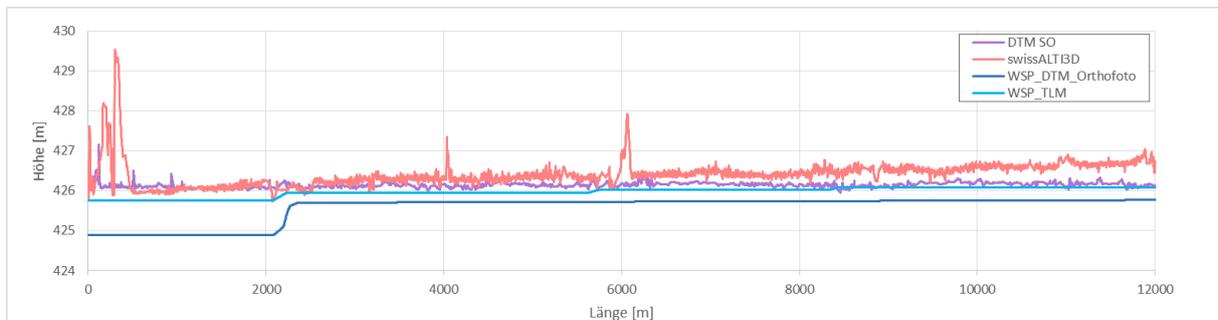


Abbildung 37 Längsprofil Aare im Abschnitt Altreu – Solothurn.

Für den Aareabschnitt Altreu – Solothurn wird die qualitative Güte der Modellierung an drei Beispielausschnitte geprüft:

- Aare, Stadt Solothurn (km 0.000 – 1.000)
- Aare im Bereich des Campingplatzes Lido Solothurn (km 2.000 – 2.500)
- Aare, Inseli (km 5.500 – 7.000)

Beispielausschnitt Aare, Stadt Solothurn (km 0.000 – 1.000)

Im Bereich der Stadt Solothurn sind im Hillshade des unkorrigierten DTM im Bereich der Wasserfläche viele TIN-Facetten zu sehen (vgl. Abbildung 38), dies zwischen km 0.000 und 0.500. Von km 0.500 flussaufwärts ist der Wasserspiegel homogener abgebildet. Jedoch auch in diesem Bereich sind im Bereich des Ufers TIN-Facetten erkennbar, welche die Uferrepräsentation beeinflussen.

Die Resultate der Wasserspiegelmodellierung sehen im Hillshade beinahe identisch aus. Die Wasserfläche ist glatt und homogen, die Ufer sind hart, was in diesem Abschnitt jedoch aufgrund von Ufermauern der Realität entspricht. Im Längsschnitt (Abbildung 37) ist ersichtlich, dass der Wasserspiegel der beiden Modellierungen sich um mehr als einen Meter unterscheidet. Dies ist in den Hillshades jedoch nicht ersichtlich.

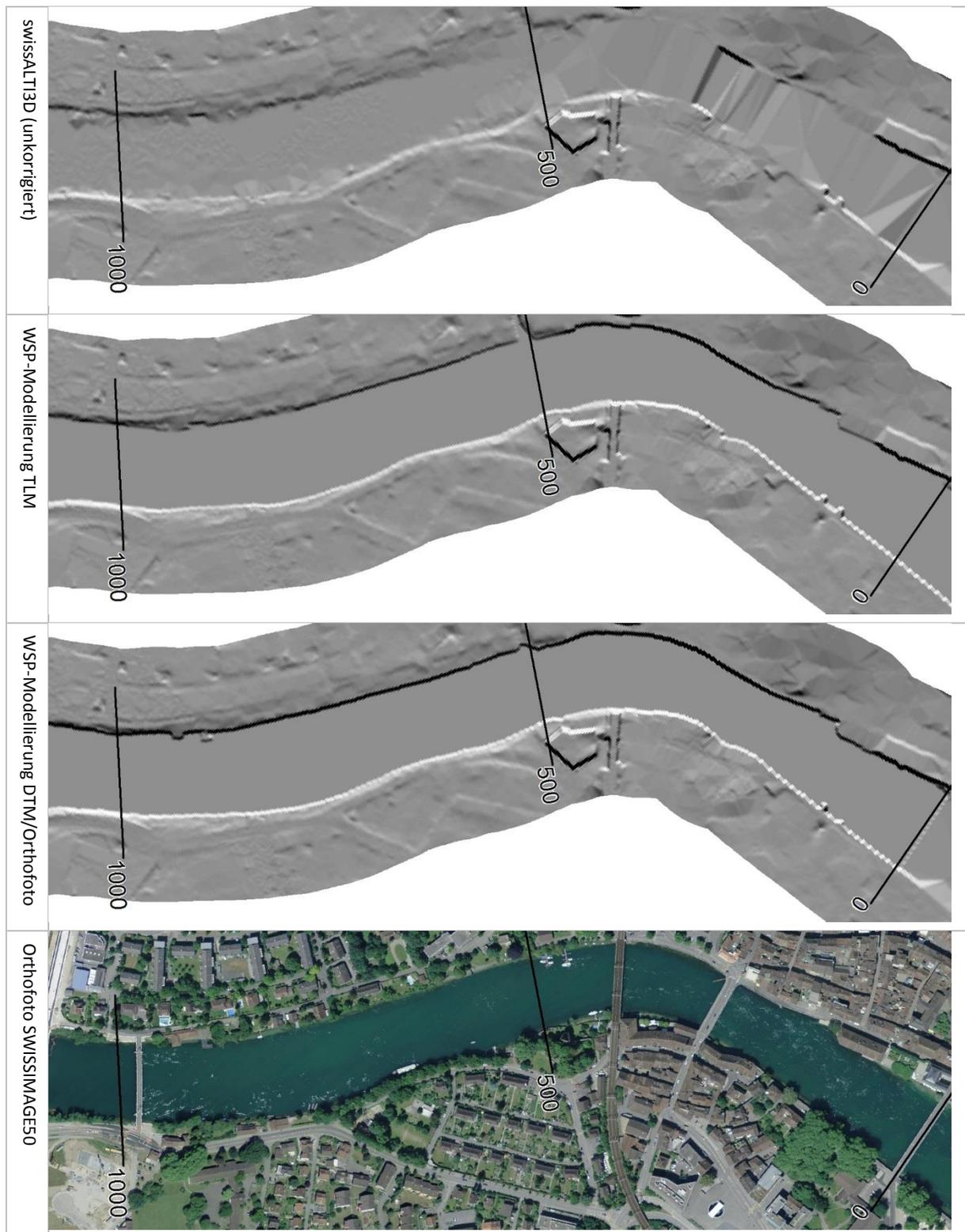


Abbildung 38 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare, Stadt Solothurn.

Beispielausschnitt Aare im Bereich des Campingplatzes Lido Solothurn (km 2.000 – 2.500)

Im Bereich des Campingplatzes Lido Solothurn existieren im unkorrigierten DTM TIN-Facetten, welche sich vom Ufer in das Gewässer hineinziehen (vgl. Abbildung 39). Ebenfalls ist im unkorrigierten DTM zwischen km 2.000 und 2.100 eine kleine Senke, welche auf der Abbildung in der oberen Flussseite leicht erkennbar ist. Beide Wasserspiegelmodellierungen weisen im Hillshade eine saubere glatte

Wasserfläche auf. Im Vergleich zur Modellierung TLM weist die Modellierung DTM/Orthofoto ein wenig härtere Ränder im Uferbereich auf, dies vor allem auf der rechten Bildseite des Beispielausschnittes. Aus dem Längsprofil (vgl. Abbildung 37) geht hervor, dass sich bei der Modellierung DTM/Orthofoto in diesem Bereich der Wasserspiegel um einen Meter senkt. Auch im Wissen um diesen Gefällsknick erkennt man ihn im Hillshade nicht.

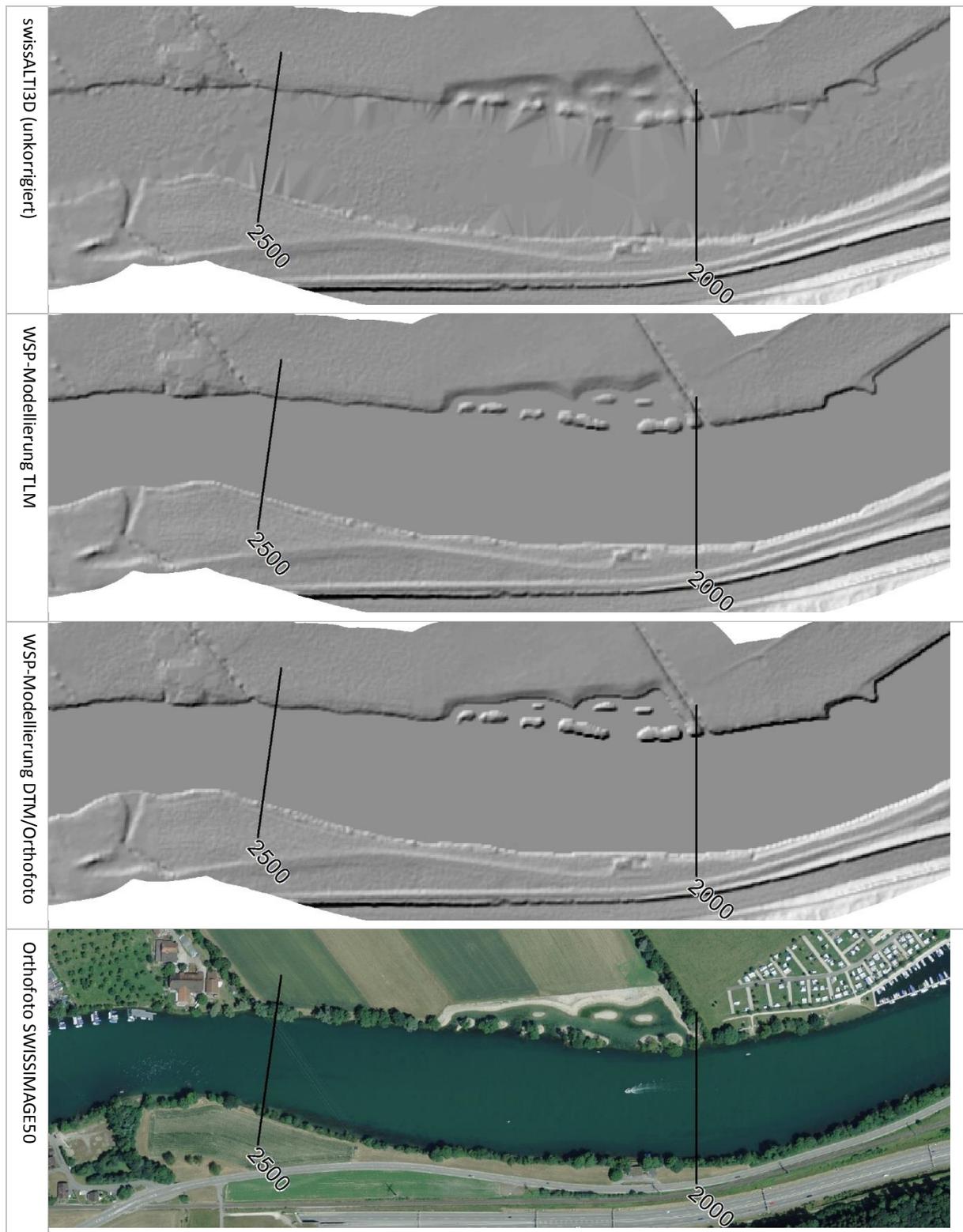
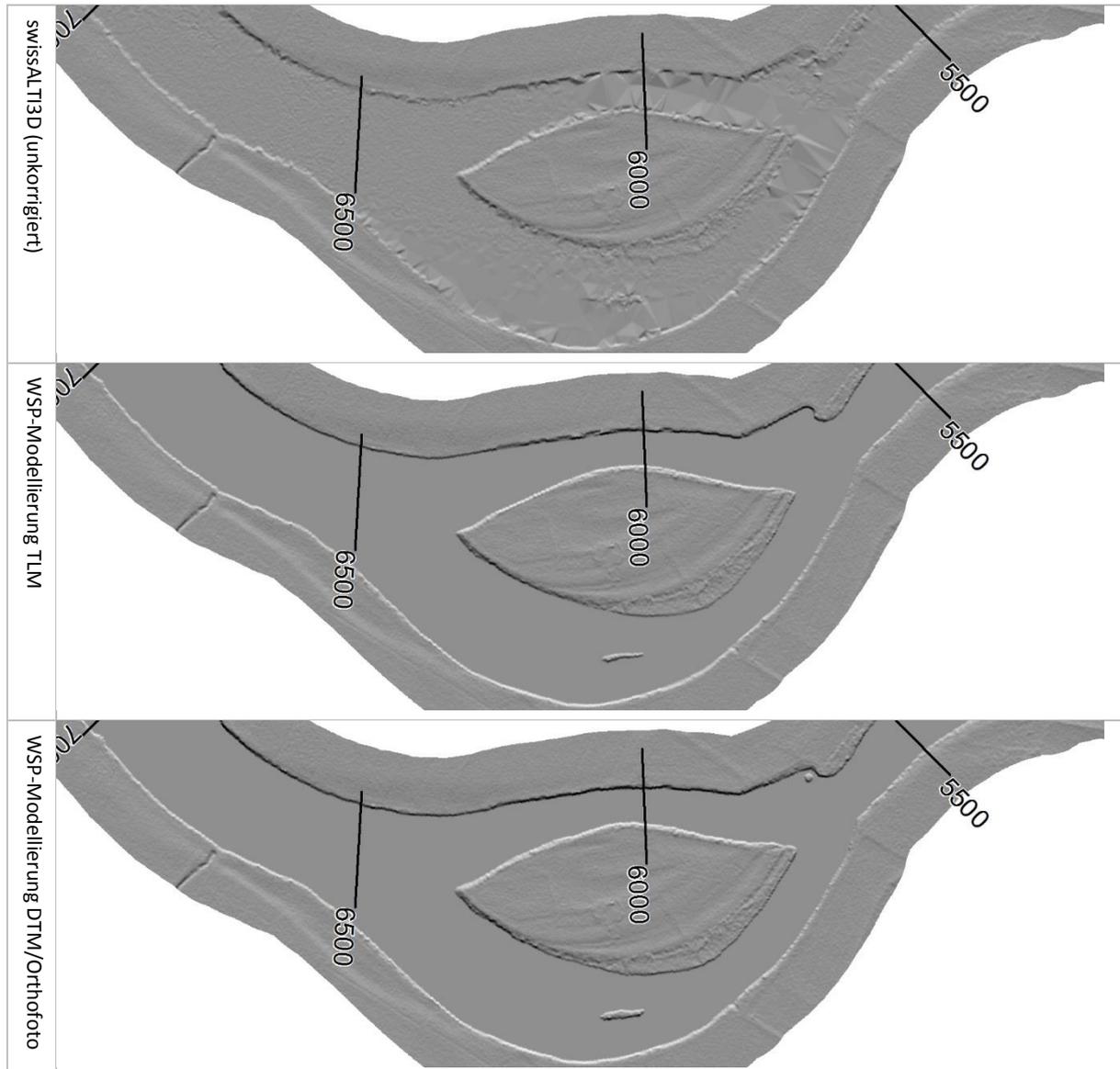


Abbildung 39 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare im Bereich des Campingplatzes Lido, Solothurn.

Beispielausschnitt Aare, Inseli (km 5.500 – 7.000)

Im Bereich des „Inseli“ (vgl. Abbildung 40) erkennt man im Hillshade des unkorrigierten DTM homogenere Abschnitte, bei welchen dem DTM viele LiDAR-Punkte zur Verfügung standen (z.B. km 6.400 – 7.000) sowie Bereiche, in welchen der Wasserspiegel aufgrund von TIN-Facetten grössere Artefakte aufweist (z.B. km 6.000). Beide Wasserspiegelmodellierungen liefern fast identische Ergebnisse, eine sehr schön modellierte, glatte, realistische Wasserfläche, an dener nichts auszu-
setzen ist.



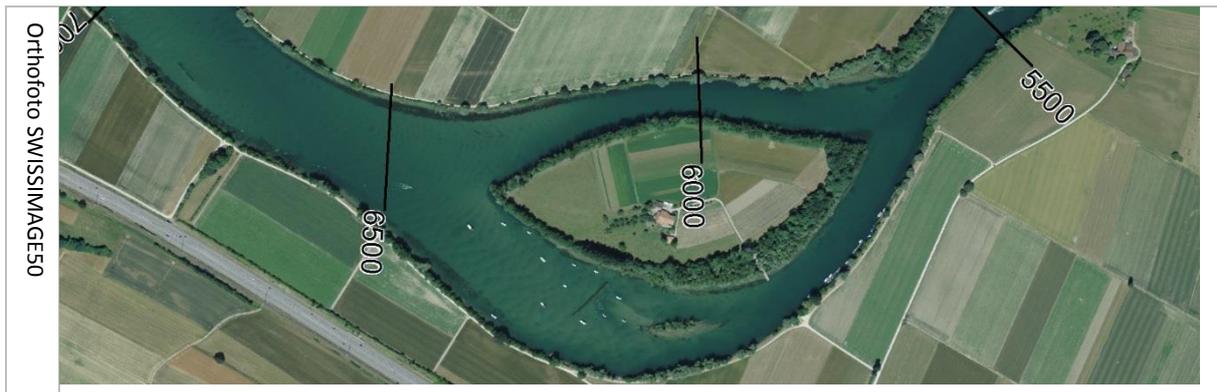


Abbildung 40 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Aare, Inseli.

4.1.3 Abschnitt Emme, Gerlafingen – Luterbach

Eine Übersicht über die Korrekturen bei der Wasserspiegelmodellierung im gesamten Perimeter der Emme zwischen Gerlafingen und Luterbach zeigt Abbildung 41. Auffallend sind die relativ geringen Höhenkorrekturen bei beiden Wasserspiegelmodellierungen. Bei der Modellierung DTM/Orthofoto finden sich keine Bereiche, wo das DTM bei der Wasserspiegelmodellierung angehoben wird. Im Gegensatz dazu finden sich mit der Modellierung TLM Bereiche, welche erhöht werden sowie Bereiche, welche abgesenkt werden. Grössere Korrekturwerte finden sich lediglich im Bereich des Wehrs Biberist (km 4.800), wo die Modellierungsmethode TLM das DTM um mehr als 2 m korrigiert.

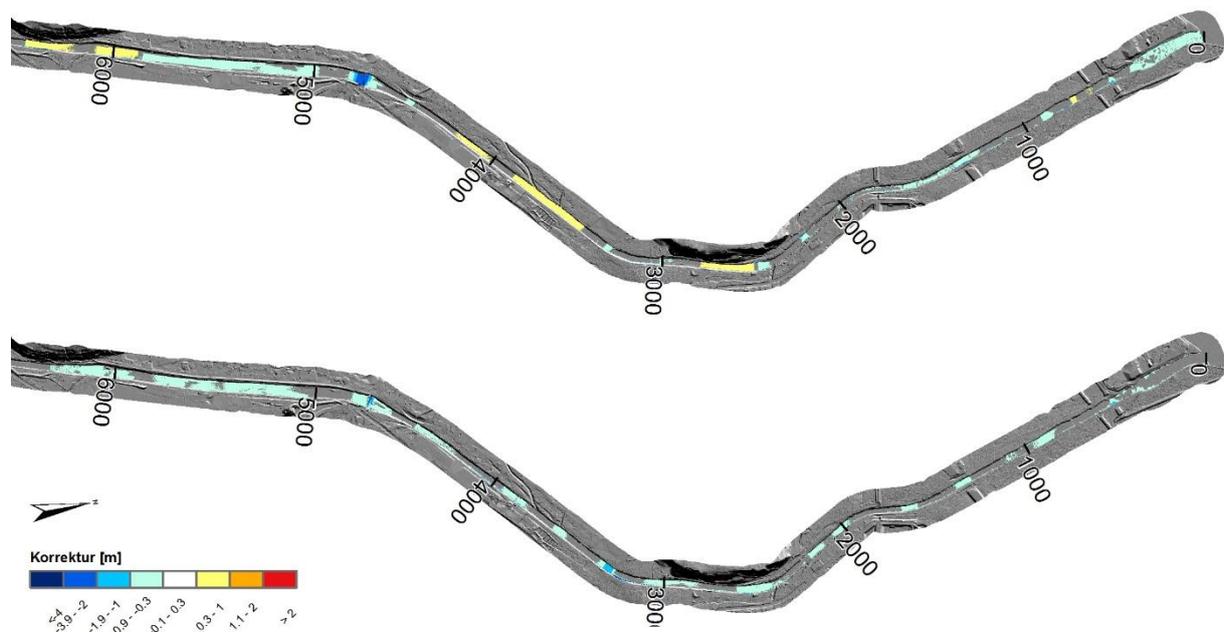


Abbildung 41 Höhenkorrektur von swissALTI3D bei der Wasserspiegelmodellierung TLM (oben) sowie rein DTM (unten).

In den Längsprofilen (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 43) ist zu erkennen, dass der Wasserspiegel der Modellierungsmethodik DTM/Orthofoto sich tendenziell näher beim DTM befindet als der Wasserspiegel der Methodik TLM. Im Längsprofil des unkorrigierten DTM (DTMSO_2m) fallen die Stufen verursacht durch Schwellen und Überfälle auf. Wurden diese in der Modellierung berücksichtigt, findet sich auch im Längsschnitt der abrupte Knick, welcher durch diese entsteht (vgl. Längsschnitt Methodik DTM/Orthofoto km 0.750, km 2.200, km 4.500, km 4.700). Die nicht berücksichtigten Überfälle der Methode DTM/Orthofoto sowie jegliche Gefällsknicke der TLM-Daten werden bei der Wasserspiegelmodellierung geglättet.

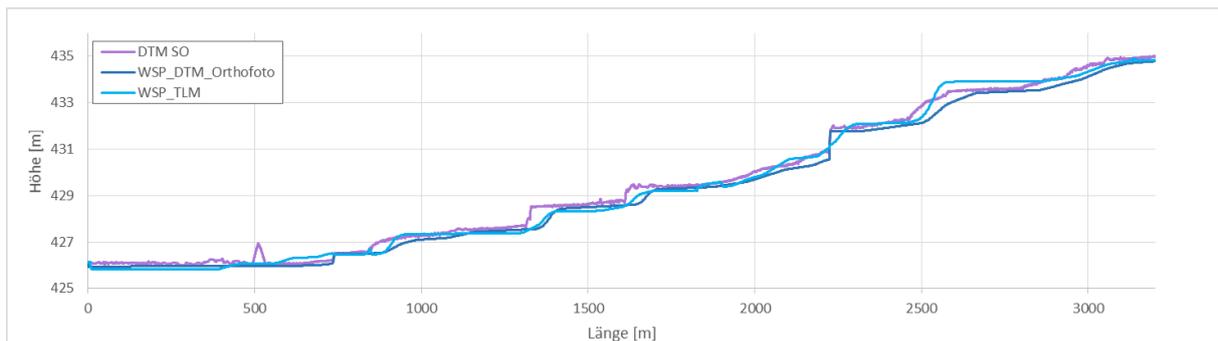


Abbildung 42 Längsprofil Emme Abschnitt Gerlafingen – Luterbach (Teil 1).

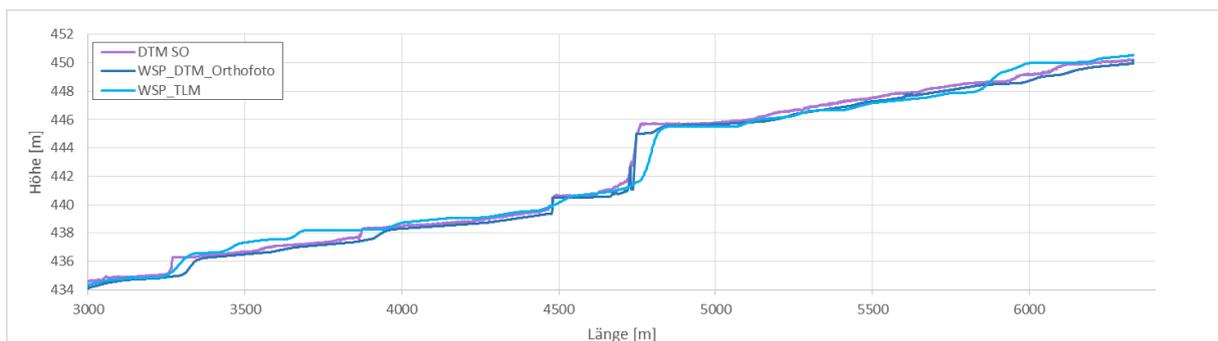


Abbildung 43 Längsprofil Emme Abschnitt Gerlafingen – Luterbach (Teil 2).

Als Beispielausschnitte zur qualitativen Beurteilung der Modellierungsgüte des Wasserspiegels werden folgende zwei Bereiche gewählt:

- Emme kurz oberhalb Emmenmündung in Aare (km 0.000 – 0.800)
- Emme Wehr Biberist (km 4.250 – 5.250)

Beispielausschnitt Emme kurz oberhalb Emmenmündung in Aare (km 0.000 – 0.800)

Im unkorrigierten DTM ist die Wasserfläche recht homogen und glatt abgebildet, jedoch sind kleinere TIN-Facetten im Uferbereich (km 0.200 – 0.600), sowie auch eine grosse TIN-Facette im Bereich der Autobrücke bei km 0.500 vorhanden (vgl. Abbildung 44). Beide Wasserspiegelmodellierungen liefern einen sauberen Wasserspiegel, welcher von der Breite dem Orthofoto gleicht. Die Mauern, welche bei km 0.200 von beiden Seiten ins Gerinne hineinragen und im Orthofoto erkennbar sind, werden bei der Modellierung DTM/Orthofoto angedeutet. Bei der Modellierung TLM sind diese nicht zu sehen.

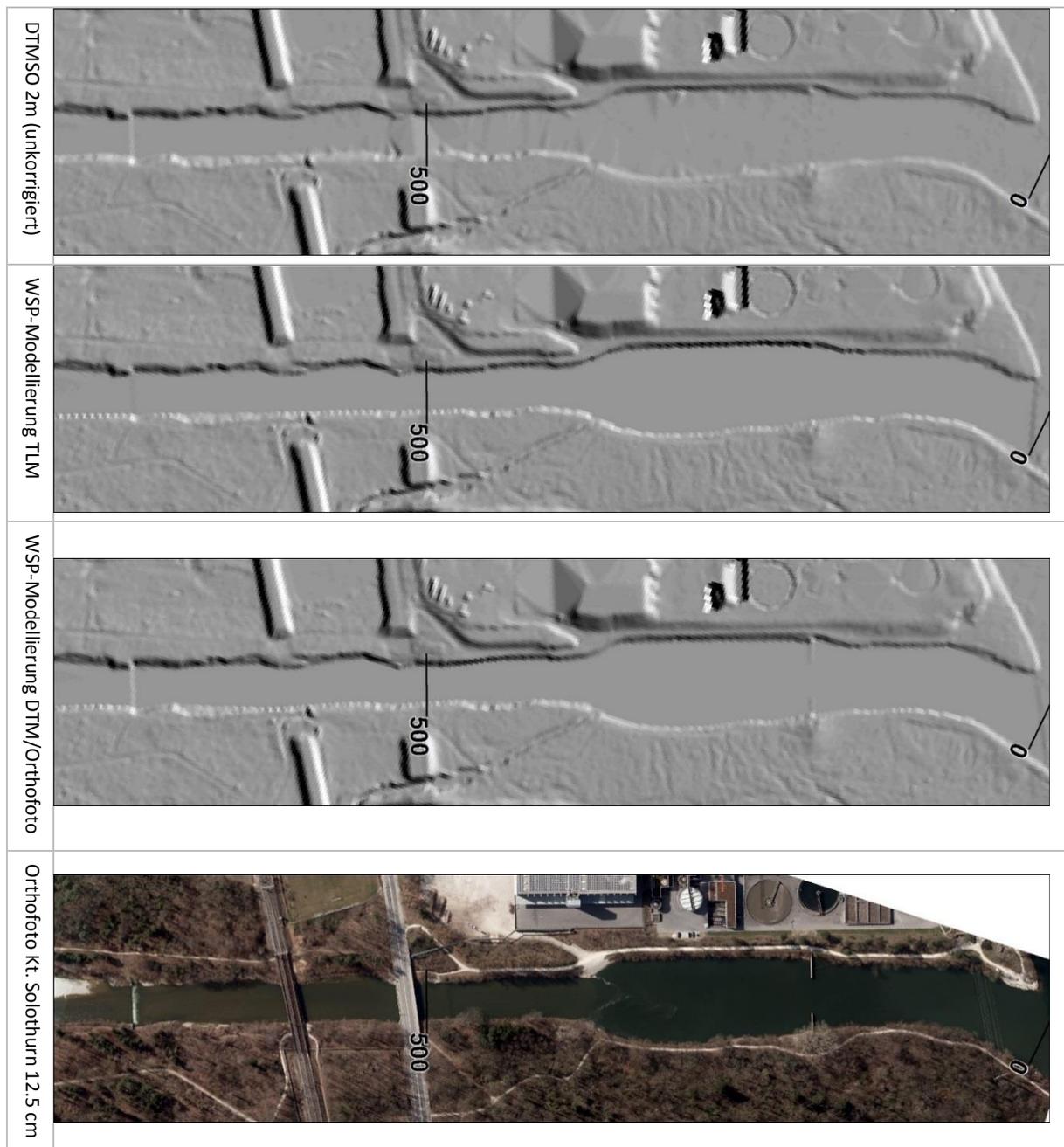


Abbildung 44 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Emme kurz oberhalb Emmenmündung in die Aare.

Beispielausschnitt Emme Wehr Biberist (km 4.250 – 5.250)

Im Bereich des Wehrs von Biberist bietet bereits das DTM ohne Wasserspiegelmodellierung eine gute Repräsentation des Gewässerbereichs (vgl. Abbildung 45). Bei der Wasserspiegelmodellierung mittels TLM-Daten wird der Wasserspiegel ebenfalls gut modelliert, jedoch wird hier anders als beim Wehr Felsenau auf eine explizite Modellierung des Wehrs in der Modellierung TLM verzichtet. Anstatt einer Stufe findet sich im Bereich des Wehrs ein geglätteter Übergang. Die Wasserspiegelmodellierung mittels DTM/Orthofoto verbessert die bereits gute Repräsentation des Gerinnes noch im Bereich der Brücke beim Wehr Biberist (km 4.800), wo im unkorrigierten DTM noch Artefakte der Brücke sichtbar sind. Auch das Wehr ist gut implementiert.

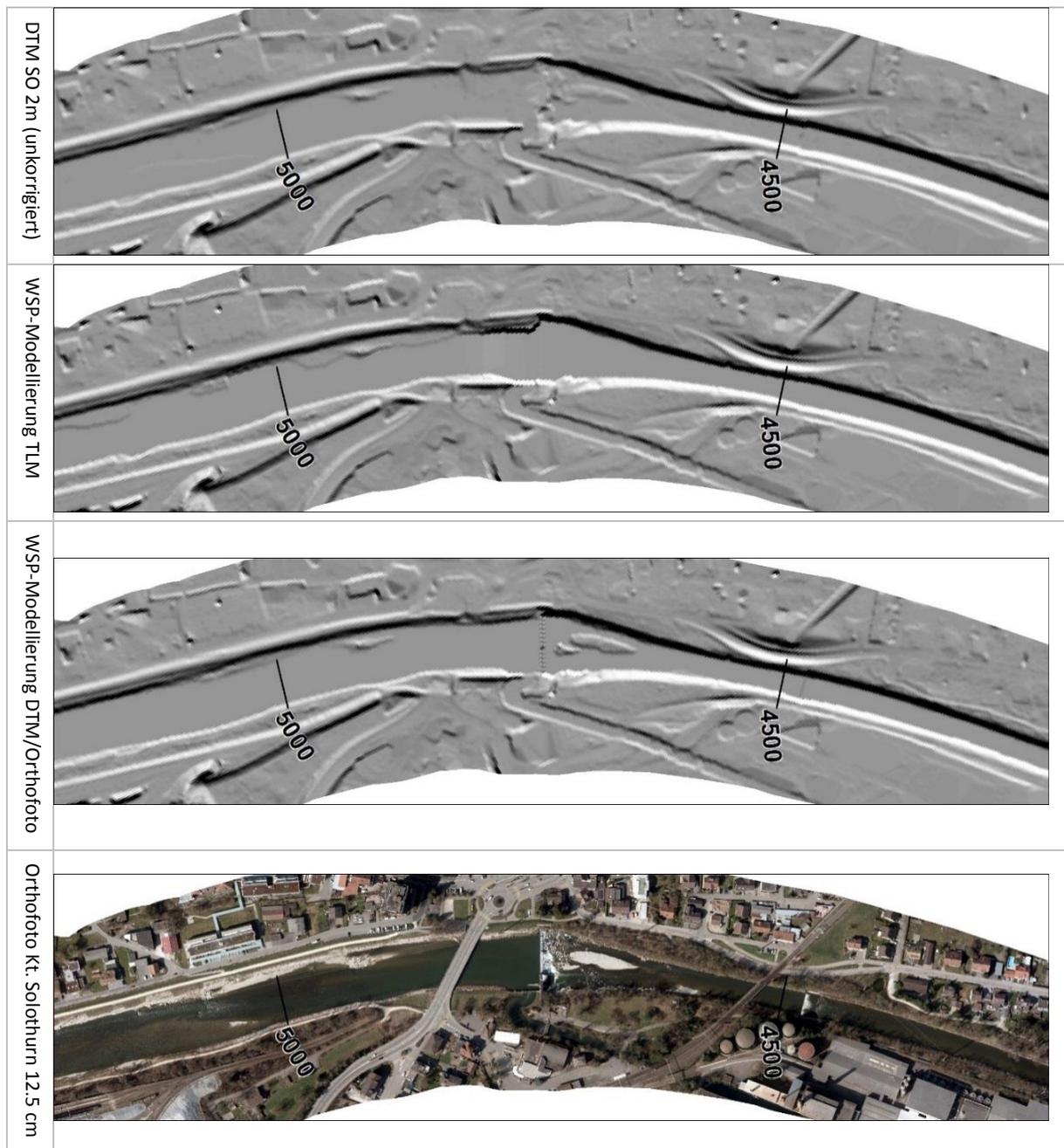


Abbildung 45 Güte der Wasseroberflächenmodellierung: Beispielausschnitt Emme Wehr Biberist.

4.2 Resultate Modellierung Gerinne

Die Resultate der Gerinnemodellierung mit der Methode Merwade sowie der Methode Caduff werden in folgende fünf Unterkapitel unterteilt:

- Qualitative Bewertung der Gerinnemodellierung anhand einiger Beispiele (Kap. 4.2.1)
- Quantitative Bewertung der Integrationsgüte: Differenz zu Querprofilpunkten (Kap. 4.2.2) sowie Differenz der hydraulischen Kennwerte (Kap. 4.2.3)
- Quantitative Bewertung der Interpolationsgüte: Differenz zu Querprofilpunkten (Kap. 4.2.4) sowie Differenz der hydraulischen Kennwerte (Kap. 4.2.5)

4.2.1 Qualitative Bewertung Gerinnemodellierung anhand einiger Beispiele

Die qualitative Bewertung der Gerinnemodellierung basiert auf einigen Beispielausschnitten, welche so gewählt werden, um die Charakteristiken der einzelnen Methoden am Modellierungsergebnis zu zeigen. Bei der Aare zwischen Münsingen und Bern teilt im Bereich von Muri eine Betonmauer das Gerinne in einen Flachwasserteil und ein Hauptgerinne (vgl. Abbildung 46). Ein Vergleich der Hillshades der beiden Gerinnemodellierungen zeigt, dass bei der Modellierung Caduff Strukturen im Uferbereich, Sandbänke, die Mauer und generell die Charakteristik des Flachwasserteils erhalten bleiben. Im Gegensatz dazu gehen bei der Methode Merwade die Strukturen im Bereich des Gerinnes und am Ufer komplett verloren oder, wenn sie sich im Bereich der Querprofile befinden, werden sie durch die Interpolation zu linearen Strukturen im Gerinne extrapoliert. Die Mauer im Gerinne ist im Modellierungsergebnis der Methode Merwade nicht nur eine lineare Struktur, es existieren deren zwei, welche sich in der Mitte jedoch nicht treffen.

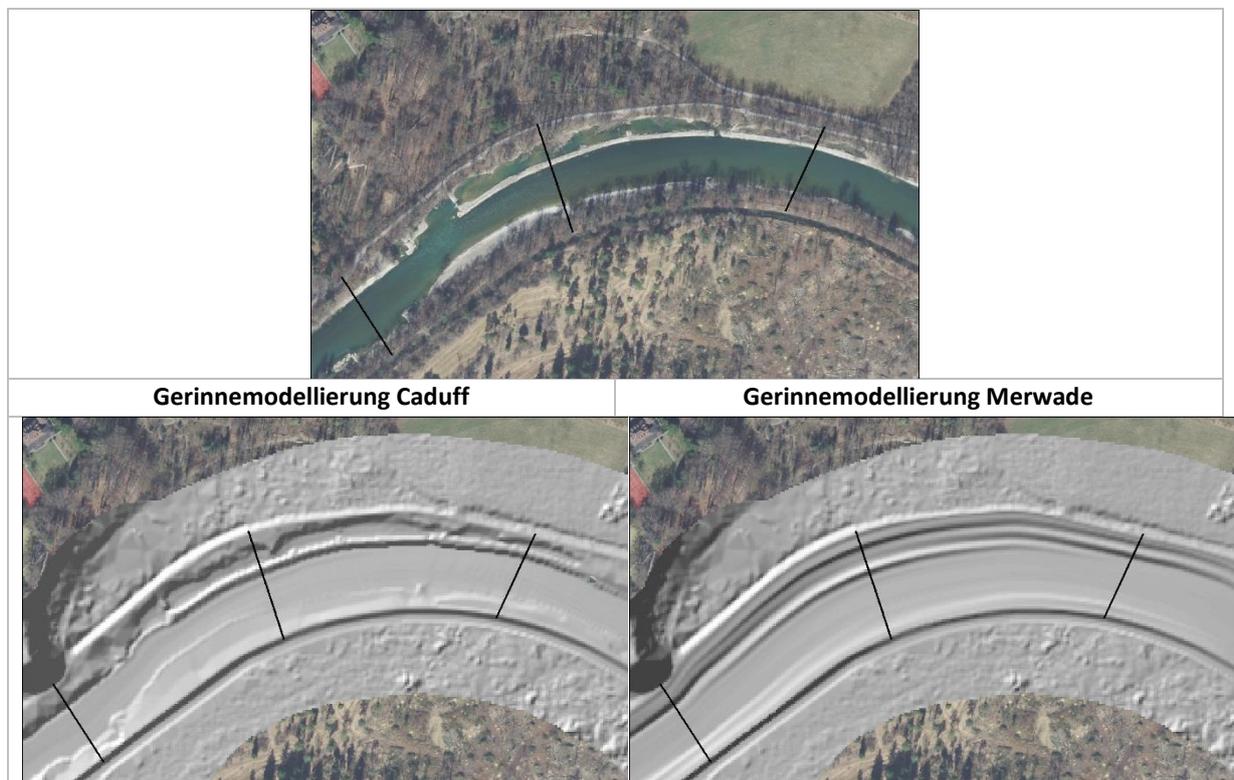


Abbildung 46 Beispielausschnitt Aare Münsingen – Bern: oben das Orthofoto und die existierenden Querprofile, unten die beiden Gerinnemodellierungsergebnisse im Hillshade.

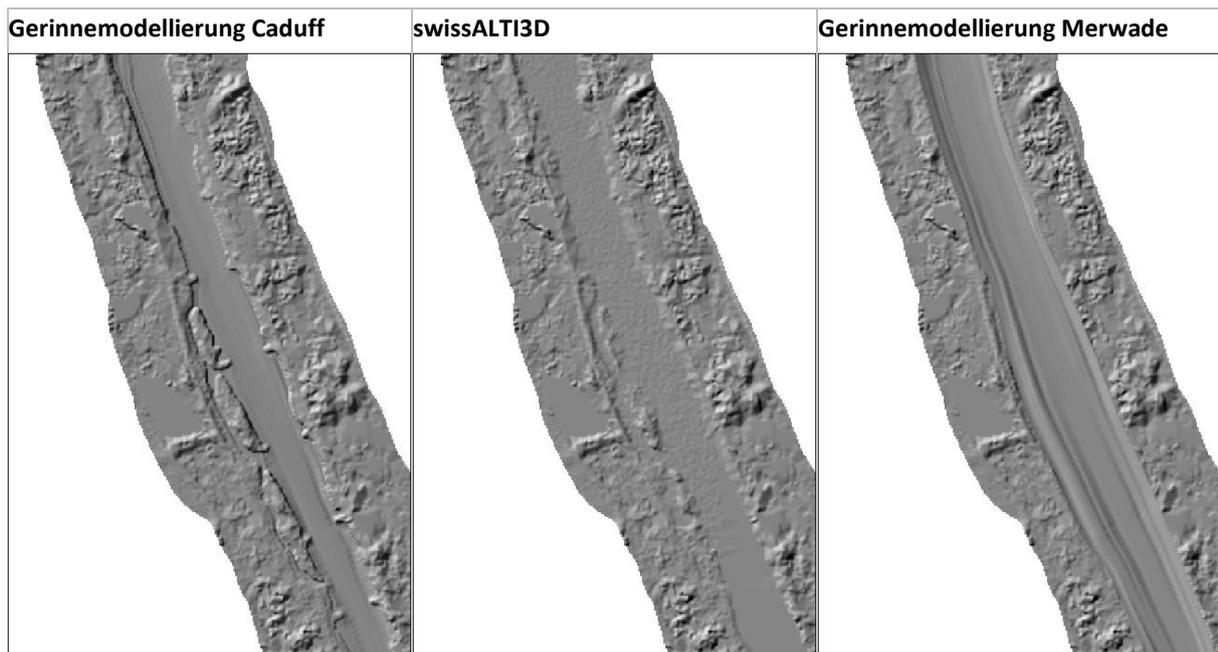


Abbildung 47 Vergleich Gerinnemodellierung Aare Münsingen – Bern bei Münsingen.

Im Bereich der Aare bei Münsingen fällt auf, dass bei der Gerinnemodellierung mit der Methode Caduff die Buhnen, welche für den Gerinneabschnitt charakteristisch sind, modelliert werden (vgl. Abbildung 47). Die Buhnen sind im Ursprungs-DTM nicht vorhanden, sie werden erst bei der Modellierung sichtbar und entstammen dem Orthofoto, welches die Grundlage für die Digitalisierung des Gewässerbereichs bildet. Weiter sind in der Bildmitte kleine Inseln am Gewässerrand zu beobachten, dies sowohl im Ursprungs-DTM als auch in stärker ausgeprägter Form im mit Methode Caduff modellierten Gerinne. Die Methode Merwade fasst den modellierten Gerinnebereich generell weiter als die Methode Caduff, kleinräumige Strukturen im Uferbereich sucht man im Modellierungsergebnis vergebens, vielmehr prägen langgezogene Längsstrukturen den Gerinne- bzw. Uferbereich.

In Abbildung 48 sind die Resultate der Gerinnemodellierung im Ausschnitt der Aare bei Altreu dargestellt. Die Komplexität der Gerinnemodellierung in diesem Bereich wurde im Methodenkapitel thematisiert (vgl. Kap. 2.2.1). Die Modellierungsergebnisse mittels Methode Merwade weisen im Bereich von Altreu einige Artefakte auf. So ist im Hillshade aufgrund von Artefakten ersichtlich, an welchen Standorten sich die für die Interpolation verwendeten Querprofile befunden haben. Andererseits sind an der Innenseite (Gleithang) der Flussbiegung weitere Artefakte entstanden, dies aufgrund der sich schneidenden Hilfsprofile. Die Modellierungsergebnisse der Methode Caduff weisen keine Artefakte auf.

Da im Aareabschnitt Altreu – Solothurn Daten einer bathymetrischen Vermessung existieren (es liegen keine Punktdaten, sondern nur Höhenlinien mit einer Äquidistanz von 50 cm vor), können die effektiv modellierten Höhenwerte der Gerinnemodellierungen mit den Resultaten der bathymetrischen Vermessung verglichen werden (vgl. Abbildung 49). Die Höhenwerte der verschiedenen DTM sind in der Abbildung zu 50 cm-Klassen zusammengefasst.

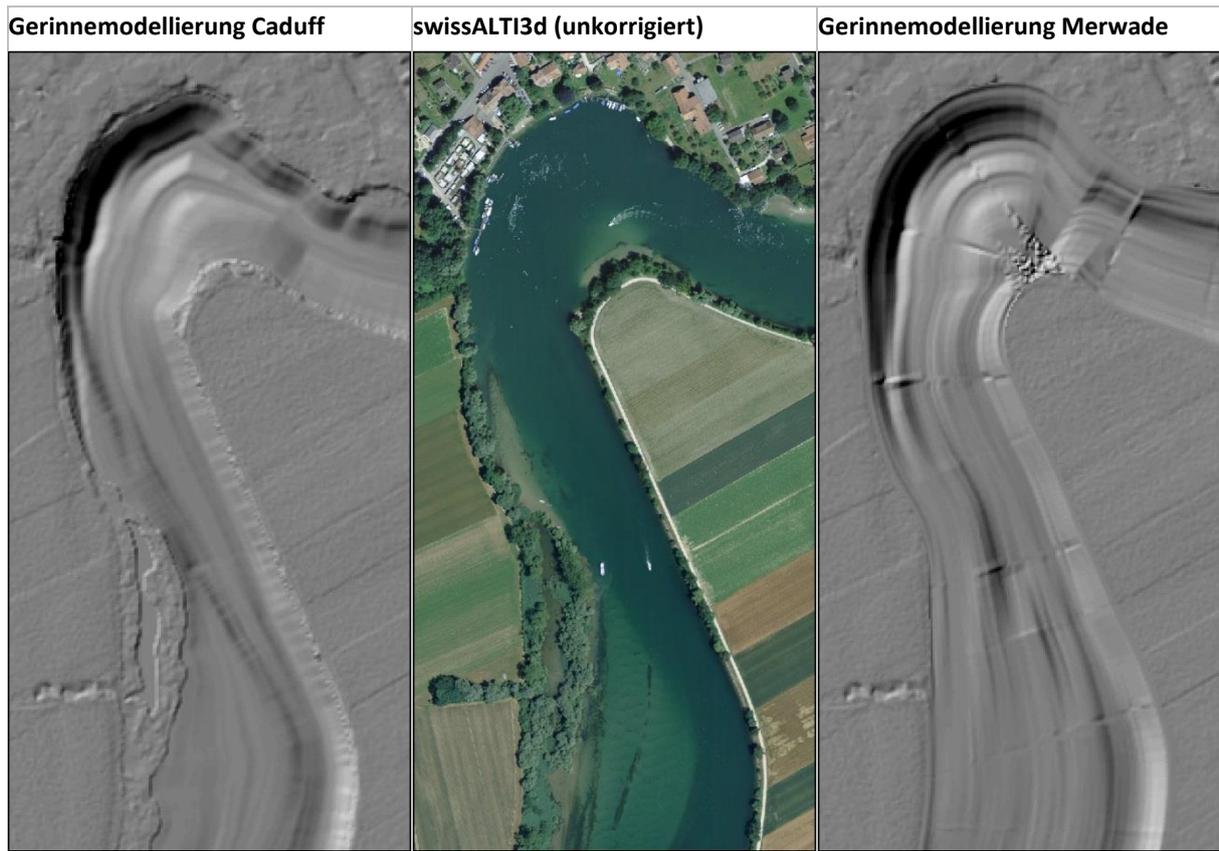


Abbildung 48 Vergleich Gerinnemodellierung Aare Altreu –Solothurn im Bereich von Altreu.

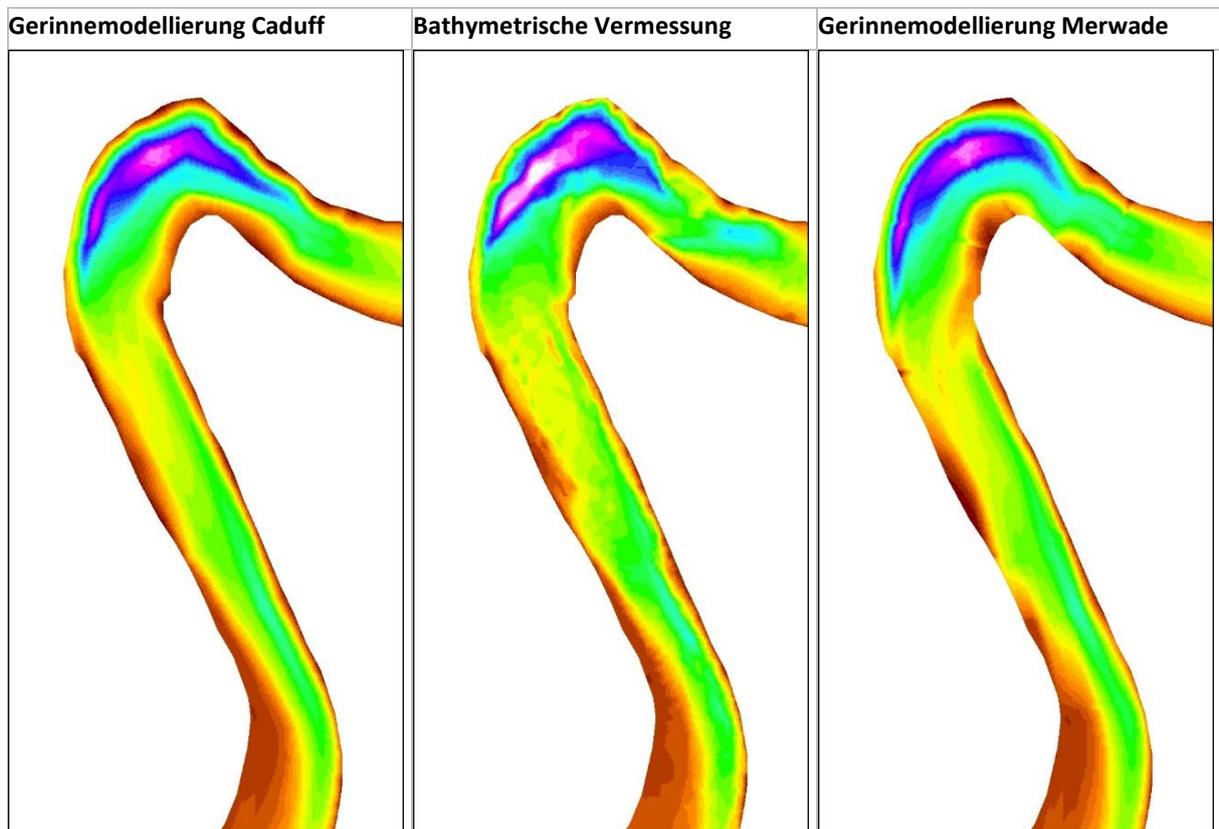


Abbildung 49 Vergleich der Höhen der Modellierungen mit den Höhen aus bathymetrischer Vermessung.

Der qualitative Vergleich der beiden Gerinnemodellierungsergebnisse mit den bathymetrisch vermessenen Daten zeigt, dass keine der beiden Modellierungen lokale Kleinstrukturen im Gerinne wiedergeben kann, wie sie bei den Resultaten der bathymetrischen Vermessungen teilweise zum Vorschein kommen. Jedoch widerspiegeln beide Modellierungen die Gesamtsituation im Gerinnebereich recht gut.

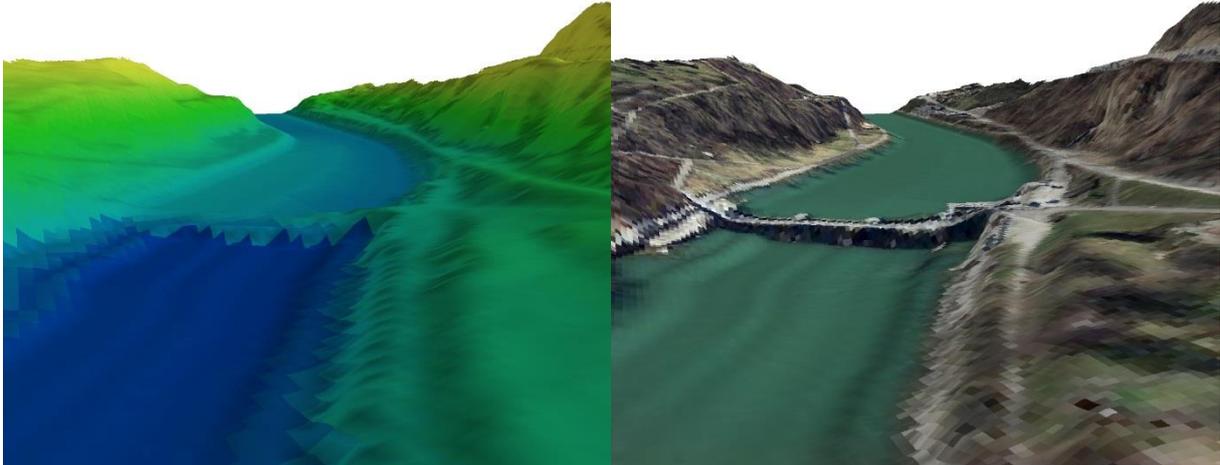


Abbildung 50 Beispiel Gerinneintegration mit der Methode Caduff beim Wehrs Felsenau.

Die Integration der Wehrs Felsenau mit der Methode Caduff ist in Abbildung 50, diejenige des Wehrs Biberist in Abbildung 51 dargestellt. Da die Höhen im Bereich des Wehrs aus dem DTM stammen, ist die Abbildung des Wehrs abhängig von der Qualität des DTM in diesem Bereich. Beide Abbildungen zeigen, dass die Wehrimplementierung recht gut gelungen ist, die Steilstufe, welche durch das Wehr existiert, ist im modellierten Gerinne gut zu erkennen.

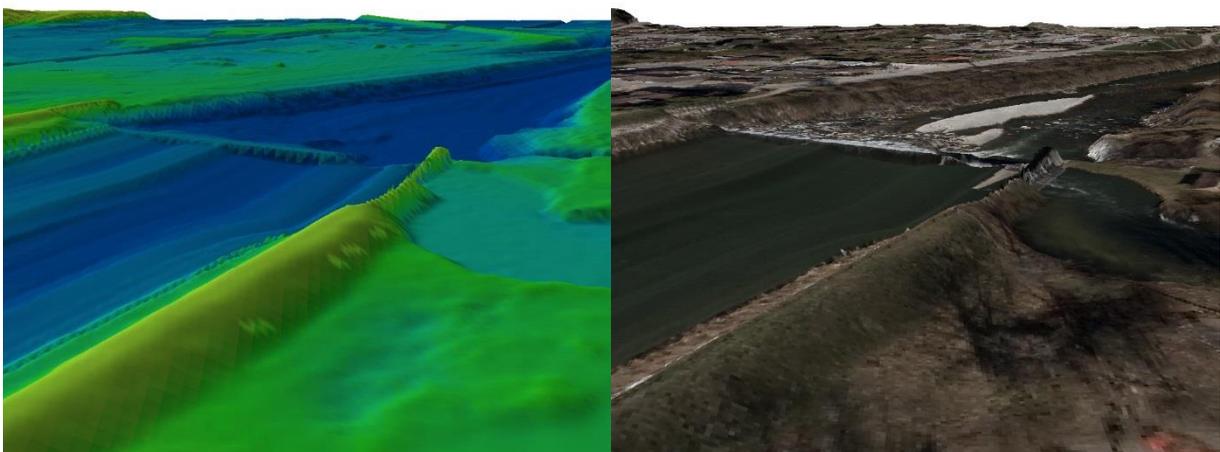


Abbildung 51 Beispiel Gerinneintegration mit der Methode Caduff beim Wehr Biberist.

4.2.2 Bewertung Integrationsgüte: Differenz zu Querprofilpunkten

Grundlage der Integrationsgüte der Differenzen sind die Differenzen der vermessenen Querprofilpunkte mit dem modellierten DTM. Wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, bezeichnet die Integrationsgüte die Differenz zwischen dem bei der Modellierung verwendeten Querprofil und dem Modellierungsergebnis.

In den Boxplot-Diagrammen in Tabelle 4 findet sich die Integrationsgüte für alle Untersuchungsgebiete und Modellierungsmethoden. Im Wissen darum, dass das DTM swissALTI3D nicht alle Gerinneabschnitte optimal repräsentiert, wird dem Resultat von swissALTI3D ein Modellierungsergebnis mit dem jeweiligen kantonalen DTM gegenübergestellt. Obwohl die kantonalen DTM eine bessere Auflösung aufweisen als swissALTI3D, wurden die 50cm-Pixel zur Vergleichbarkeit der Resultate auf 2m-Pixel aggregiert.

Im Gewässer schneidet bei der Interpolationsgüte die Methode Caduff leicht besser ab als die Methode Merwade. Der Unterschied zeigt sich vor allem bei den Ausreissern. Im Uferbereich modelliert die Methode Caduff keine neuen Höhen, sondern verwendet das unkorrigierte DTM. Im Gegensatz dazu modelliert die Methode Merwade den Uferbereich, wobei auch bei der Methode Merwade einige Profile gekürzt werden müssen, um die Güte der Gesamtmodellierung zu verbessern (vgl. Anhang A). Bei den Differenzen im Uferbereich fällt auf, dass die Differenzen bei der Methode Caduff in Kombination mit swissALTI3D deutlich grösser sind als bei der Methode Merwade, welche eine viel bessere Integration der Querprofile ins modellierte DTM erreicht. Durch Verwendung eines besseren Grundlagen-DTM (kantonale DTM) verbessern sich die Resultate der Integrationsgüte der Methode Caduff jedoch in den meisten Abschnitten erheblich.

Die Differenzen im Gewässer sind generell so klein, dass die Box der Boxplots als Strich erscheint. Es handelt sich um Differenzen im einstelligen Zentimeterbereich. Daneben existieren unabhängig von gewählter Methodik oder Grundlagen-DTM Ausreisser von zum Teil mehr als einem Meter. Die Anzahl der Ausreisser von über einem Meter ist bei Verwendung der Methode Merwade um einiges höher als bei Verwendung der Methode Caduff. Im Uferbereich sind die Differenzen der Box, welche 50% der Werte enthält, generell leicht grösser als im Gerinne, die Anzahl der Ausreisser mit Differenzen von über einem Meter sind im Uferbereich bei allen Methoden ähnlich. Bei Verwendung der Methode Caduff in Kombination mit dem DTM swissALTI3D sind die resultierenden Differenzen im Uferbereich generell grösser als bei den anderen Modellierungen.

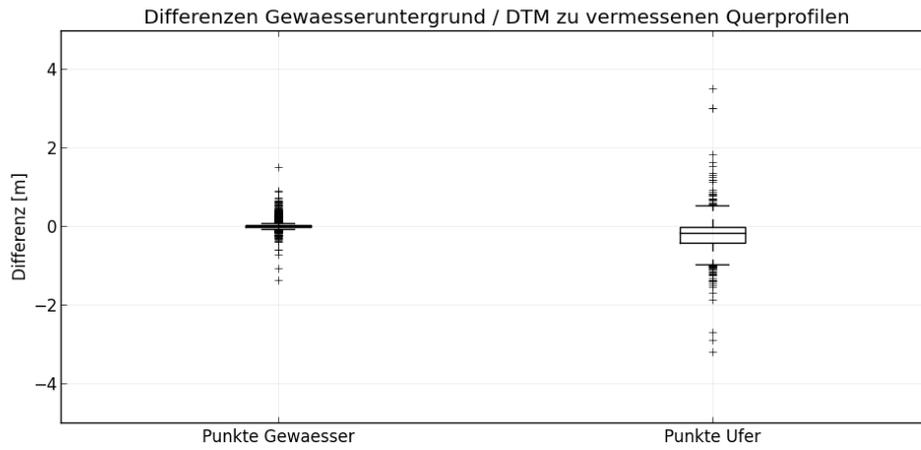
Die Box-Plot-Grafiken liefern ein erstes Bild über die bei der Integration entstehenden Differenzen. Zentimetergenaue Werte sind aus der Quantilmatrix, welche die Werte Integrationsgüte der verschiedenen Gerinnemodellierungsmethoden dargestellt, herauszulesen. Die Matrix wird im Methodenkapitel (Kap. 2.3.2) vorgestellt.

Tabelle 4 Differenzen (Integrationsgüte) der vermessenen Profilpunkte mit dem modellierten DTM.

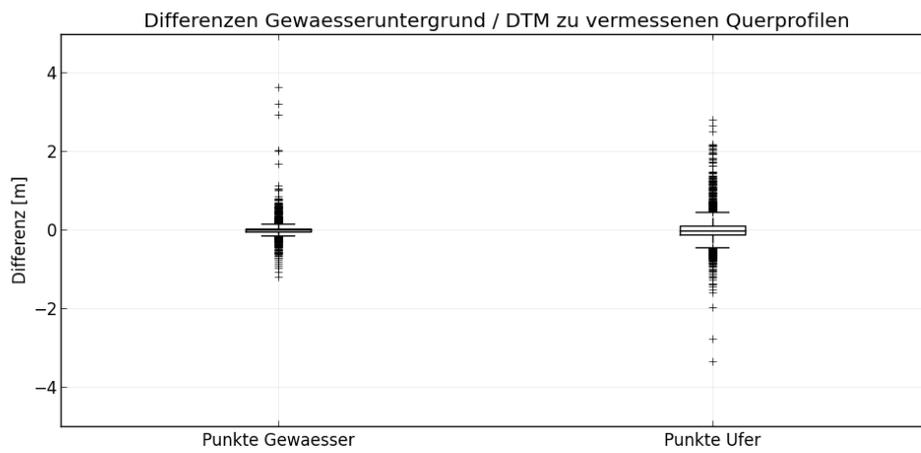
| | | |
|------------------------|---------------------|--|
| Aare, Münsingen – Bern | Caduff, swissAlti3D | <p style="text-align: center;">Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |
| | Merwade | <p style="text-align: center;">Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |
| | Caduff, DTMBE_2m | <p style="text-align: center;">Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |

Aare, Bern – Worblaufen

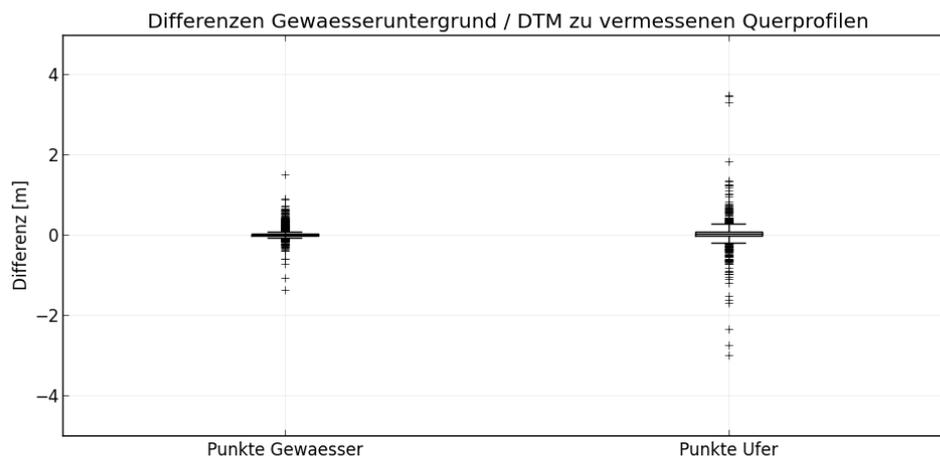
Caduff, swissAlti3D



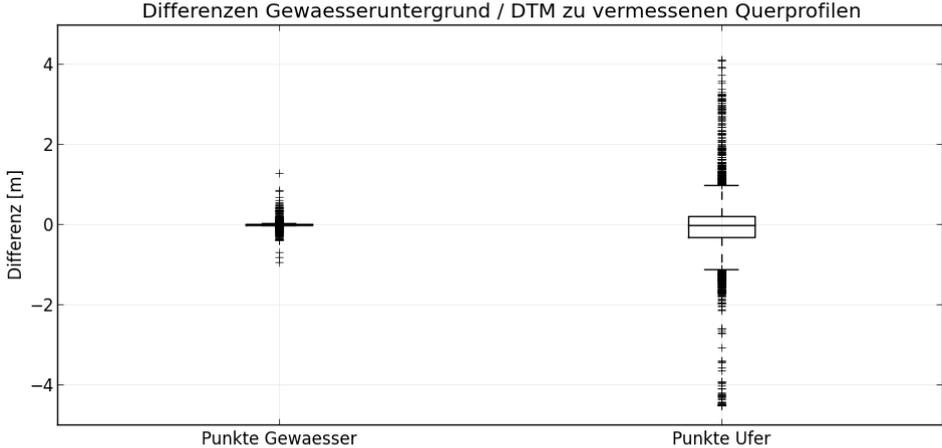
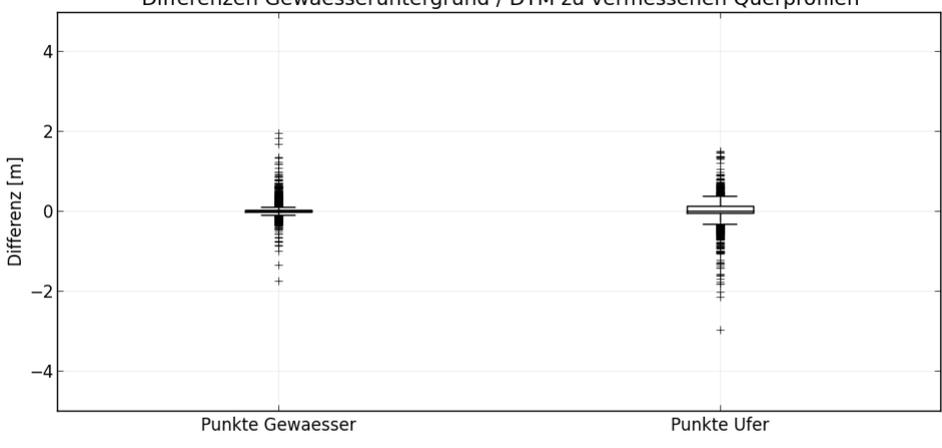
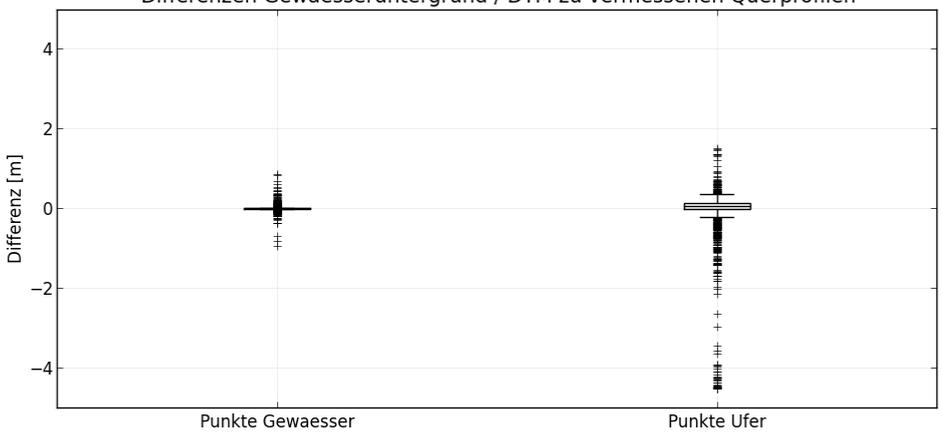
Merwade



Caduff, DTMBE_2m



| | | |
|----------------------------------|----------------------------|--|
| <p>Aare, Altrenu – Solothurn</p> | <p>Caduff, swissAlti3D</p> | <p>Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |
| | <p>Mervade</p> | <p>Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |
| | <p>Caduff, DTMSO_2m</p> | <p>Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |

| | |
|-------------------------------|--|
| Emme, Gerlafingen – Luterbach | <p data-bbox="264 203 288 394">Caduff, swissALTI3D</p>  |
| Merwade | <p data-bbox="264 721 288 822">Merwade</p>  |
| Caduff, DTMSO_2m | <p data-bbox="264 1243 288 1433">Caduff, DTMSO_2m</p>  |

Aus den Matrizen wird ersichtlich, dass die Methode Merwade sowie die Methode Caduff mit dem besseren kantonalen DTM sehr gute Integrationsresultate liefern, bei denen die detektierten Differenzen der meisten Punkte im Bereich bis 15 cm liegen. So ist der Median der 75%-Quantile wie auch das 75%-Quantil der Mediane ≤ 14 cm. Das 90%-Quantil aller 90%-Quantile der Integrationsdifferenzen liegt maximal bei 63 cm. Bei Verwendung der Methode Caduff mit swissALTI3D

sind die Differenzen grösser: der Median der 75-Quantile wie auch das 75%-Quantil der Mediane ist ≤ 27 cm, das 90%-Quantil der 90%-Quantile der Integrationsdifferenzen liegt bei maximal 153 cm.

Tabelle 5 Absoluter Betrag der Differenzen der Integrationsgüte, dargestellt mit der Differenzmatrix. Für eine Erklärung zur Matrix siehe Kap. 2.3.2.

| | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|------|
| Aare, Münsingen – Bern | Caduff, swissAlt13D | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Quantil | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.20 |
| | | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.40 |
| | | Median | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.14 | 0.28 | 0.79 |
| | | 75%-Quantil | 0.04 | 0.09 | 0.25 | 0.56 | 0.93 | 1.56 |
| | | 90%-Quantil | 0.08 | 0.16 | 0.36 | 0.91 | 1.53 | 2.50 |
| | Maximum | 0.22 | 0.37 | 1.03 | 1.97 | 3.06 | 4.11 | |
| Merwade | Merwade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.13 | 0.42 |
| | | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.17 | 0.51 |
| | | Median | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.08 | 0.20 | 0.72 |
| | | 75%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.10 | 0.25 | 1.10 |
| | | 90%-Quantil | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.15 | 0.37 | 1.66 |
| | Maximum | 0.25 | 0.51 | 0.93 | 1.70 | 2.08 | 2.78 | |
| Caduff, DTMBE_2m | Caduff, DTMBE_2m | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.19 |
| | | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.35 |
| | | Median | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.19 | 0.57 |
| | | 75%-Quantil | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.17 | 0.31 | 0.91 |
| | | 90%-Quantil | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.29 | 0.55 | 1.23 |
| | Maximum | 0.11 | 0.20 | 0.43 | 0.84 | 3.28 | 3.62 | |
| Aare, Bern - Worblaufen | Caduff, swissAlt13D | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.29 |
| | | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.16 | 0.49 |
| | | Median | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.29 | 0.69 |
| | | 75%-Quantil | 0.06 | 0.10 | 0.18 | 0.40 | 0.60 | 1.01 |
| | | 90%-Quantil | 0.08 | 0.17 | 0.32 | 0.55 | 0.80 | 1.53 |
| | Maximum | 0.13 | 0.35 | 0.53 | 1.07 | 3.01 | 7.96 | |
| Merwade | Merwade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.47 |
| | | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.22 | 0.61 |
| | | Median | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.12 | 0.35 | 0.90 |
| | | 75%-Quantil | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.20 | 0.54 | 1.17 |
| | | 90%-Quantil | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.29 | 0.63 | 1.72 |
| | Maximum | 0.02 | 0.05 | 0.13 | 0.33 | 0.88 | 5.78 | |

| | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|------|
| Caduff, DTMBE_2m | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.23 |
| | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.12 | 0.35 |
| | Median | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.20 | 0.59 |
| | 75%-Quantil | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.30 | 0.91 |
| | 90%-Quantil | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.24 | 0.53 | 1.36 |
| Maximum | 0.20 | 0.21 | 0.36 | 0.68 | 3.37 | 7.96 | |
| Aare, Altreu – Solothurn | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.10 | 0.41 |
| | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.16 | 0.57 |
| | Median | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.13 | 0.26 | 0.74 |
| | 75%-Quantil | 0.02 | 0.04 | 0.10 | 0.20 | 0.42 | 1.18 |
| | 90%-Quantil | 0.04 | 0.08 | 0.15 | 0.35 | 0.78 | 2.94 |
| Maximum | 0.16 | 0.31 | 0.37 | 1.02 | 2.69 | 6.05 | |
| Merwade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 0.29 |
| | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.33 |
| | Median | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.11 | 0.46 |
| | 75%-Quantil | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.17 | 0.94 |
| | 90%-Quantil | 0.01 | 0.03 | 0.08 | 0.20 | 0.61 | 2.91 |
| Maximum | 0.04 | 0.10 | 0.24 | 0.67 | 1.69 | 5.83 | |
| Caduff, DTMSO_2m | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.10 | 0.29 |
| | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.13 | 0.40 |
| | Median | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.19 | 0.59 |
| | 75%-Quantil | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 0.14 | 0.31 | 0.89 |
| | 90%-Quantil | 0.04 | 0.07 | 0.12 | 0.24 | 0.51 | 2.93 |
| Maximum | 0.10 | 0.14 | 0.23 | 1.19 | 3.23 | 6.07 | |
| Emme, Gerlafingen – Luterbach | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | 10%-Quantil | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.49 |
| | 25%-Quantil | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.74 |
| | Median | 0.01 | 0.02 | 0.10 | 0.20 | 0.40 | 1.17 |
| | 75%-Quantil | 0.04 | 0.11 | 0.27 | 0.58 | 1.01 | 1.69 |
| | 90%-Quantil | 0.08 | 0.20 | 0.49 | 1.00 | 1.46 | 2.26 |
| Maximum | 0.64 | 1.94 | 3.57 | 4.33 | 4.50 | 4.52 | |
| Merwade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | 10%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.16 | 0.18 |
| | 25%-Quantil | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.10 | 0.20 | 0.29 |
| | Median | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.14 | 0.27 | 0.54 |
| | 75%-Quantil | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.19 | 0.40 | 0.97 |
| | 90%-Quantil | 0.05 | 0.09 | 0.15 | 0.23 | 0.60 | 1.66 |
| Maximum | 0.20 | 0.21 | 0.33 | 0.68 | 1.38 | 2.96 | |

| Caduff, DTMSO_2m | absolute Differenzen pro Profil | | | | | |
|------------------|---------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|
| | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum |
| 10%-Quantil | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.29 |
| 25%-Quantil | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.06 | 0.41 |
| Median | 0.00 | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.15 | 0.68 |
| 75%-Quantil | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.16 | 0.23 | 1.26 |
| 90%-Quantil | 0.05 | 0.09 | 0.14 | 0.20 | 0.37 | 1.62 |
| Maximum | 0.09 | 0.13 | 3.57 | 4.34 | 4.50 | 4.52 |

4.2.3 Bewertung Integrationsgüte: Differenz der hydraulischen Kennwerte

Die zusammengefassten Resultate der Differenzen (Integrationsgüte) der hydraulischen Kennwerte finden sich in Tabelle 6. In Anhang C1 finden sich ausserdem die benetzten Fließquerschnitte aller Querprofile einzeln aufgelistet.

Die Methode Merwade schafft es beinahe, die Profile so ins DTM zu integrieren, dass für jeden Abschnitt über 90% der Profile eine Abweichung des Fließquerschnittes aufweisen, welche kleiner als 2% ist. Bei der Methode Caduff sind die Abweichungen des Fließquerschnitts unter Verwendung der kantonalen DTM bei 90% der Querprofile im Bereich von 3.6%. Bei der Modellierung Caduff mit dem DTM swissALT13D sind die Differenzen der Fließquerschnitte von Modellierung und vermessenem Querprofil grösser, dies vor allem beim Abschnitt der Aare zwischen Münsingen und Bern sowie bei der Emme und reichen bis 9.4%.

Der benetzte Umfang ist in der Modellierung tendenziell ein wenig kleiner als im Originalprofil. Die Güte des benetzten Umfanges zeigt ein ähnliches Bild wie die Resultate des Fließquerschnittes, jedoch ist die Güte des benetzten Umfanges tendenziell leicht schlechter. Bei der Aare zwischen Altreu und Solothurn sind die benetzten Umfänge im modellierten DTM mit -15% bzw. -19% unabhängig von Methode und DTM bei einigen Profilen deutlich kürzer als im Originalprofil. Bei der Aare zwischen Münsingen und Bern sowie bei der Emme finden sich ebenfalls Differenzen im zweistelligen Prozentbereich.

Der hydraulische Radius wird aus Fließquerschnitt und benetztem Umfang berechnet (vgl. Formel in Kap. 2.3.3), daher sind die Abweichungen des hydraulischen Radius in ähnlichen Grössenordnungen wie die Abweichungen des Fließquerschnitts und des benetzten Umfangs.

Tabelle 6 Güte der Integration der Querprofile anhand der Differenz der hydraulischen Parameter.

| | FlieBsquerschnitt | | | Benetzter Umfang | | | Hydraulischer Radius | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|---------|------------------|---------------------|---------|------------------|----------------------|---------|------------------|--------|-------|-------|
| | Caduff, swissAlti3D | Merwade | Caduff, DTMBE_2m | Caduff, swissAlti3D | Merwade | Caduff, DTMBE_2m | Caduff, swissAlti3D | Merwade | Caduff, DTMBE_2m | | | |
| Aare, Münsingen – Bern | 5% | -5.6% | -0.8% | -1.3% | 5% | -2.0% | -2.3% | -2.3% | 5% | -4.4% | -0.7% | -0.6% |
| | 10% | -1.8% | -0.5% | -0.8% | 10% | -1.4% | -1.5% | -1.3% | 10% | -1.6% | -0.4% | -0.5% |
| | 25% | -0.6% | -0.4% | -0.4% | 25% | -0.9% | -0.8% | -0.8% | 25% | -0.3% | -0.1% | 0.0% |
| | med | -0.2% | -0.3% | -0.2% | med | -0.4% | -0.3% | -0.4% | med | 0.2% | 0.1% | 0.3% |
| | 75% | 0.1% | -0.2% | 0.1% | 75% | -0.1% | -0.1% | -0.1% | 75% | 0.8% | 0.5% | 0.9% |
| | 90% | 0.4% | -0.1% | 0.5% | 90% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 90% | 1.3% | 1.2% | 1.4% |
| | 95% | 0.7% | 0.0% | 0.8% | 95% | 1.7% | 0.1% | 0.1% | 95% | 1.7% | 1.8% | 1.7% |
| Aare, Bern - Worblaufen | 5% | -2.0% | -1.9% | -2.5% | 5% | -3.5% | -5.3% | -4.8% | 5% | -2.5% | -2.0% | -1.3% |
| | 10% | -0.7% | -1.0% | -1.8% | 10% | -3.1% | -3.9% | -4.3% | 10% | -2.0% | -1.8% | -1.1% |
| | 25% | -0.1% | -0.5% | -1.2% | 25% | -1.3% | -2.7% | -3.4% | 25% | -0.5% | -0.3% | -0.1% |
| | med | 1.2% | -0.1% | -0.6% | med | 0.3% | -0.7% | -1.3% | med | 1.7% | 0.7% | 1.2% |
| | 75% | 3.2% | 0.0% | 0.2% | 75% | 1.6% | 0.3% | -0.6% | 75% | 3.6% | 2.2% | 2.5% |
| | 90% | 8.1% | 0.1% | 0.6% | 90% | 3.5% | 1.4% | -0.2% | 90% | 5.7% | 4.1% | 4.4% |
| | 95% | 9.4% | 0.4% | 0.8% | 95% | 5.0% | 1.9% | 0.2% | 95% | 7.1% | 4.5% | 5.4% |
| Aare, Altreu – Solothurn | 5% | -2.1% | -0.4% | -1.6% | 5% | -9.1% | -8.3% | -9.9% | 5% | -2.2% | -0.2% | -0.8% |
| | 10% | -1.7% | -0.2% | -1.5% | 10% | -6.8% | -5.3% | -7.5% | 10% | -1.6% | 0.0% | -0.7% |
| | 25% | -1.3% | -0.1% | -1.1% | 25% | -2.2% | -2.2% | -3.6% | 25% | -1.0% | 0.3% | -0.1% |
| | med | -0.5% | 0.0% | -0.6% | med | -0.6% | -0.6% | -1.3% | med | 0.0% | 0.6% | 0.7% |
| | 75% | -0.1% | 0.2% | 0.0% | 75% | 0.2% | -0.3% | -0.4% | 75% | 1.2% | 2.6% | 2.6% |
| | 90% | 0.4% | 0.6% | 0.3% | 90% | 0.9% | -0.1% | -0.1% | 90% | 6.2% | 4.9% | 6.6% |
| | 95% | 0.6% | 1.1% | 0.4% | 95% | 1.4% | 0.3% | 0.2% | 95% | 9.2% | 9.7% | 10.4% |
| Emme, Gerlafingen – Luterbach | 5% | -9.4% | -1.6% | -2.7% | 5% | -4.2% | -4.2% | -3.6% | 5% | -20.7% | -3.2% | -4.9% |
| | 10% | -6.7% | -1.1% | -2.0% | 10% | -2.9% | -2.7% | -2.0% | 10% | -12.9% | -1.9% | -4.1% |
| | 25% | -1.5% | -0.8% | -0.9% | 25% | -0.7% | -2.1% | -1.1% | 25% | -4.5% | -0.4% | -1.5% |
| | med | 1.2% | -0.4% | -0.3% | med | 1.2% | -1.5% | 0.1% | med | -0.5% | 0.9% | -0.5% |
| | 75% | 2.4% | -0.2% | 0.2% | 75% | 3.0% | -0.6% | 1.3% | 75% | 2.6% | 1.8% | 1.0% |
| | 90% | 5.6% | 0.0% | 1.3% | 90% | 7.3% | 1.9% | 2.3% | 90% | 7.1% | 2.4% | 2.4% |
| | 95% | 6.8% | 0.4% | 3.6% | 95% | 23.1% | 3.0% | 5.0% | 95% | 9.1% | 3.8% | 4.3% |

4.2.4 Bewertung Interpolationsgüte: Differenz zu Querprofilpunkten

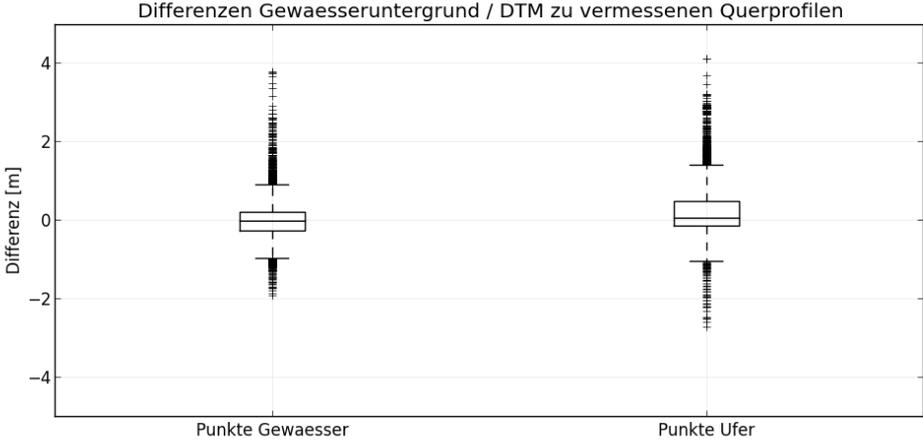
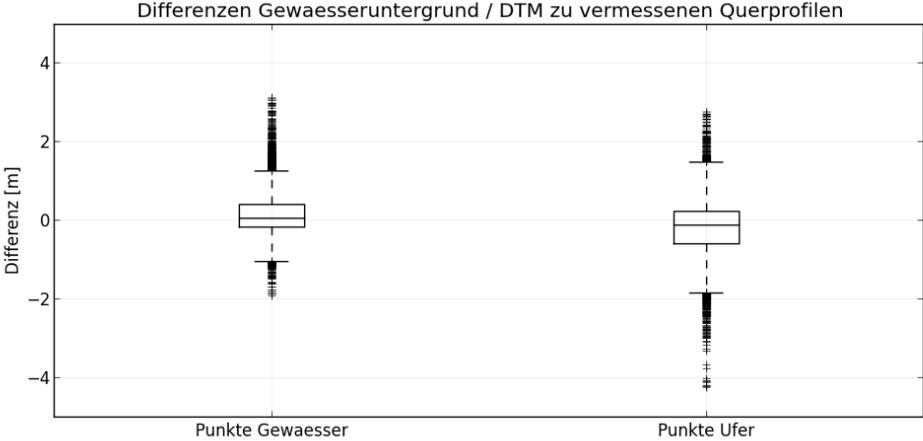
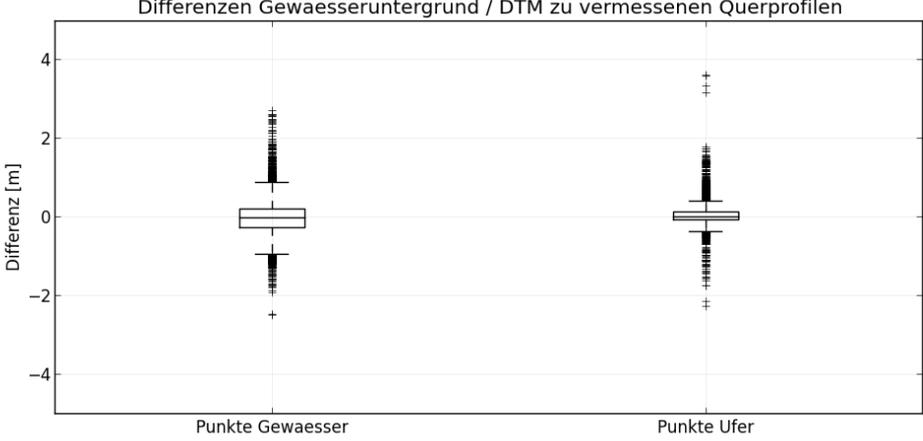
Die Boxplot-Diagramme in Tabelle 7 zeigen die Differenzen der Interpolationsgüte (Erklärung zu Interpolationsgüte vgl. Kap. 2.3.2) aufgeteilt auf die verschiedenen Untersuchungsgebiete. Bei der Aare zwischen Münsingen und Solothurn schneidet die Methode Caduff im Gerinnebereich ganz leicht besser ab als die Methode Merwade, der Unterschied ist jedoch gering. Im Uferbereich sind die aus der Methode Caduff (swissALTI3D) resultierenden Differenzen leicht kleiner als die Differenzen der Interpolation mittels Methode Merwade. Die Verwendung des qualitativ besseren kantonalen DTM steigert die Qualität der Uferdarstellung noch einmal enorm.

Beim Abschnitt der Aare zwischen Bern und Worblaufen zeigt sich ein ähnliches Bild: Im Gerinnebereich sind die Differenzen der Interpolationsgüte vergleichbar, obwohl in diesem Abschnitt die Methode Merwade viel grössere Ausreisser aufweist. Im Uferbereich ist der Qualitätsunterschied sehr gross: während bei der Methode Merwade 50% der Werte im Bereich von ca. +/- 80 cm liegen, liegen die 50% bei der Methode Caduff swissALTI3D bei ca. +/- 30 cm, mit dem kantonalen DTM senkt sich dieser Wert auf ca. +/- 10 cm.

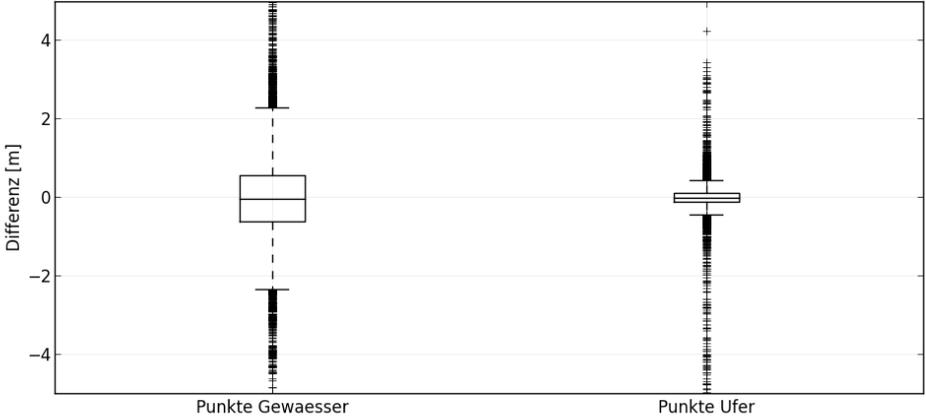
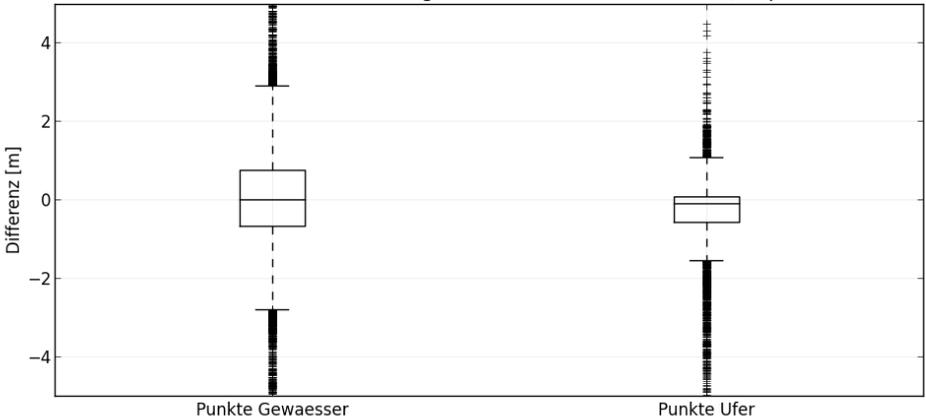
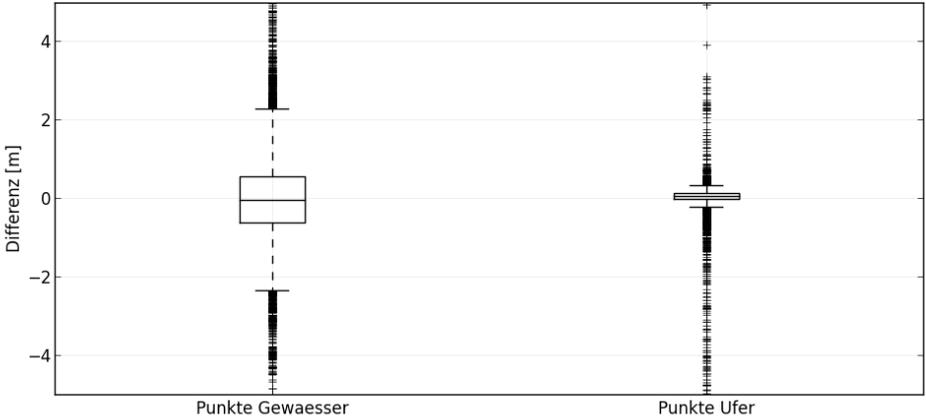
Im Bereich der Aare Altreu – Solothurn weist die Interpolationsgüte im Gerinnebereich bei allen Methoden relativ grosse Differenzen auf, im Uferbereich zeigt sich, dass die Interpolation mittels Merwade generell viel grössere Differenzen generiert als die Methode Caduff, wobei einige Ausreisser auch bei der Methode Caduff über 4 m betragen.

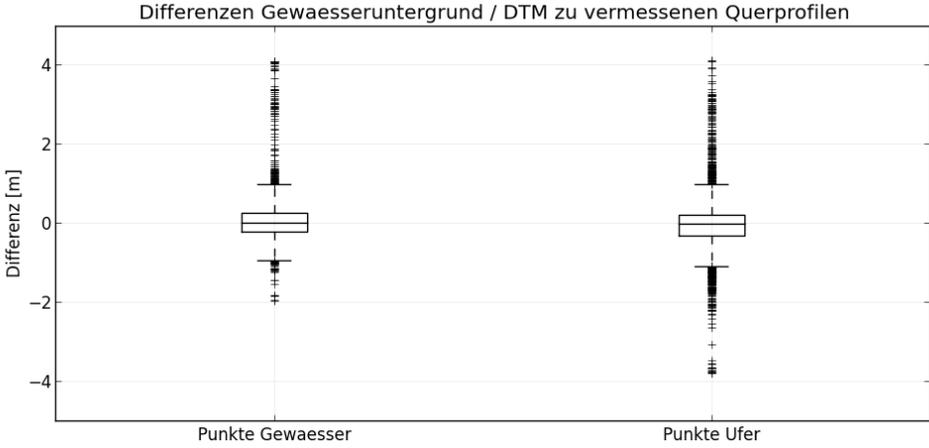
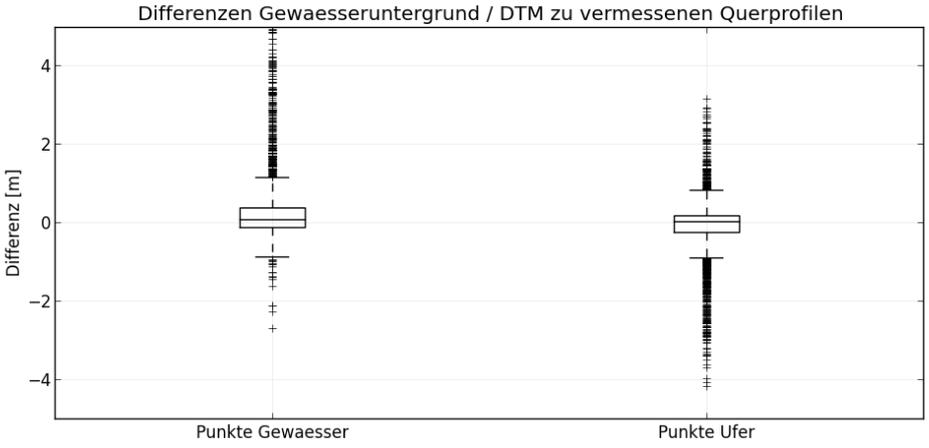
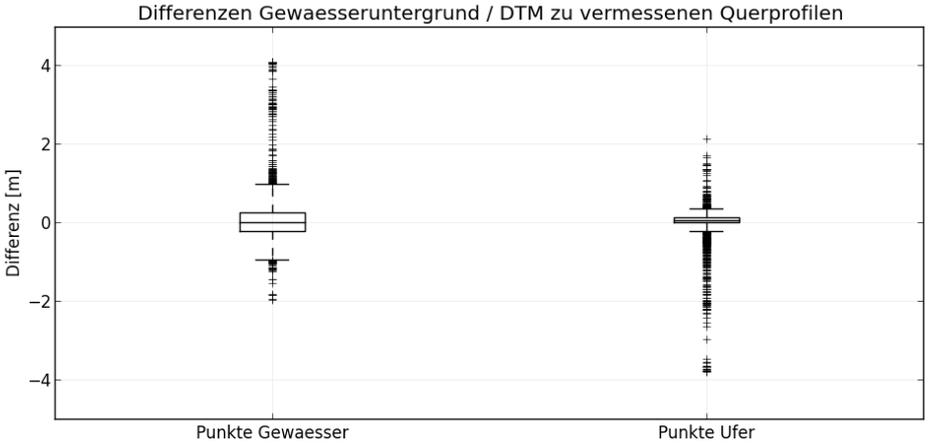
Bei der Emme zwischen Gerlafingen und Luterbach sind die Interpolationsdifferenzen beider Methode im Gerinnebereich gleich gut und auf gutem Niveau: Ein Grossteil der Differenzen liegt unter einem Meter. In einer ähnlichen Grössenordnung sind die Differenzen im Uferbereich der Methode Merwade sowie der Methode Caduff mit swissALTI3D. Die Methode Caduff mit kantonalem DTM schneidet im Uferbereich mit Abstand am besten ab.

Tabelle 7 Differenzen (Interpolationsgüte) der vermessenen Profilpunkte mit dem modellierten DTM.

| | |
|-------------------------------|--|
| <p>Aare, Münsingen – Bern</p> | <p>Caduff, swissAlti3D</p>  |
| <p>Merwade</p> | <p>Caduff, swissAlti3D</p>  |
| <p>Caduff, DTMBE_2m</p> | <p>Caduff, DTMBE_2m</p>  |

| | | |
|--------------------------------|----------------------------|--|
| <p>Aare, Bern - Worblaufen</p> | <p>Caduff, swissAlti3D</p> | <p>Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |
| | <p>Merwade</p> | <p>Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |
| | <p>Caduff, DTMBE_2m</p> | <p>Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p> |

| | |
|---------------------------|--|
| Aare, Altrenu - Solothurn | <p data-bbox="464 226 1174 248">Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p>  |
| Merwade | <p data-bbox="464 748 1174 770">Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p>  |
| Caduff, DTMSO_2m | <p data-bbox="464 1270 1174 1292">Differenzen Gewaesseruntergrund / DTM zu vermessenen Querprofilen</p>  |

| | | |
|-------------------------------|--------------------|--|
| Emme, Gerlafingen – Luterbach | Caduff, swissAlt3D |  |
| | Merwade |  |
| | Caduff, DTMSO_2m |  |

In Tabelle 8 ist die Interpolationsgüte mittels Quantilgrafik (vgl. Erklärung dazu in Kap. 2.3.2) gezeigt. Die Grafiken bestätigen das Bild der Interpolationsgüte, welches die Boxplot-Diagramme zeigen. Über alle Grafiken hinweg schneidet die Methode Merwade am wenigsten gut ab, bei Merwade sind 52% der Felder der Quantilgrafiken grün (Differenz unter 50 cm), 14% gelb (Differenz zwischen 50 cm und 100 cm) und 34% der Felder weisen Differenzen über 100 cm auf. Bei der Methode Caduff

(swissALTI3D) sind 59% der Felder grün, 19% der Felder gelb und 22% der Felder rot. Bei Verwendung der kantonalen DTM 69% grün und 14% gelb und 17% der Felder rot. Es zeigt sich, dass bei der Methode Merwade vor allem die Spalten Maximum, 90%-Quantil und 75%-Quantil viele grössere Differenzen enthalten. Das bedeutet, dass die grössten Differenzen pro Profil bei Verwendung der Methode Merwade generell höher sind als bei Verwendung der Methode Caduff.

Die Unterschiede zeigen sich auch bei den Feldern 75%-Quantil/50%-Quantil bzw. 50%-Quantil/75%-Quantil: während die Differenzen der Methode Caduff (swissALTI3D) zwischen 34 cm und 60 cm liegen, mit dem kantonalen DTM zwischen 23 cm und 60 cm, liegen sie bei Verwendung der Methode Merwade zwischen 25 cm und 126 cm. Die Differenzen im Feld 90%-Quantil/90%-Quantil liegen bei Verwendung der Methode Caduff (swissALTI3D) zwischen 1.32 m und 2.41 m, bei Verwendung des kantonalen DTM sinken diese in den Bereich zwischen 0.99 m und 2.34 m, die Modellierung Merwade weist für dieses Feld Differenzen von 1.72 m bis 3.37 m auf.

Tabelle 8 Absoluter Betrag der Differenzen der Interpolationsgüte, dargestellt mit der Differenzmatrix. Für eine Erklärung zur Matrix siehe Kap. 2.3.2.

| | | | | | | | | |
|------------------------|---------------------|---------------------------------|--------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|
| Aare, Münsingen – Bern | Caduff, swissALTI3D | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum |
| | | 10%-Quantil | 0.02 | 0.05 | 0.12 | 0.20 | 0.34 | 0.61 |
| | | 25%-Quantil | 0.03 | 0.07 | 0.17 | 0.32 | 0.48 | 0.78 |
| | | Median | 0.04 | 0.10 | 0.24 | 0.50 | 0.81 | 1.17 |
| | | 75%-Quantil | 0.08 | 0.16 | 0.34 | 0.69 | 1.09 | 1.68 |
| | | 90%-Quantil | 0.14 | 0.25 | 0.47 | 0.97 | 1.59 | 2.60 |
| | Maximum | 0.31 | 0.40 | 1.03 | 1.97 | 3.06 | 4.11 | |
| | Merwade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum |
| | | 10%-Quantil | 0.02 | 0.08 | 0.16 | 0.38 | 0.66 | 1.22 |
| | | 25%-Quantil | 0.03 | 0.10 | 0.23 | 0.45 | 0.82 | 1.48 |
| | | Median | 0.06 | 0.14 | 0.33 | 0.68 | 1.12 | 1.81 |
| | | 75%-Quantil | 0.10 | 0.21 | 0.43 | 0.88 | 1.45 | 2.29 |
| | | 90%-Quantil | 0.15 | 0.29 | 0.59 | 1.22 | 1.72 | 2.85 |
| | Maximum | 0.28 | 0.50 | 2.23 | 2.63 | 2.92 | 4.25 | |
| | Caduff, DTMBE_2m | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.21 | 0.46 |
| 25%-Quantil | | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.17 | 0.28 | 0.62 | |
| Median | | 0.03 | 0.07 | 0.14 | 0.26 | 0.43 | 0.86 | |
| 75%-Quantil | | 0.05 | 0.11 | 0.24 | 0.48 | 0.76 | 1.19 | |
| 90%-Quantil | | 0.11 | 0.21 | 0.38 | 0.66 | 1.07 | 1.54 | |
| Maximum | 0.31 | 0.40 | 0.80 | 1.79 | 3.28 | 3.62 | | |

| | | | | | | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|------|
| Aare, Bern – Wortlaufen | Caduff, swissAlti3D | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.05 | 0.12 | 0.22 | 0.33 | 0.50 |
| | | 25%-Quantil | 0.03 | 0.07 | 0.16 | 0.30 | 0.51 | 0.71 |
| | | Median | 0.06 | 0.14 | 0.26 | 0.44 | 0.66 | 0.94 |
| | | 75%-Quantil | 0.10 | 0.21 | 0.36 | 0.61 | 0.87 | 1.37 |
| | | 90%-Quantil | 0.13 | 0.28 | 0.77 | 1.07 | 1.32 | 2.15 |
| | Maximum | 0.36 | 0.75 | 1.05 | 1.51 | 2.74 | 8.38 | |
| Mervade | | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.19 | 0.30 | 0.38 |
| | | 25%-Quantil | 0.03 | 0.06 | 0.16 | 0.33 | 0.56 | 0.76 |
| | | Median | 0.06 | 0.14 | 0.31 | 0.62 | 1.07 | 1.82 |
| | | 75%-Quantil | 0.13 | 0.28 | 0.55 | 1.00 | 2.07 | 3.03 |
| | | 90%-Quantil | 0.21 | 0.48 | 0.87 | 1.57 | 2.81 | 3.73 |
| | Maximum | 0.91 | 1.03 | 1.94 | 2.41 | 5.15 | 6.89 | |
| Caduff, DTMBE_2m | | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.16 | 0.24 |
| | | 25%-Quantil | 0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.13 | 0.22 | 0.42 |
| | | Median | 0.04 | 0.07 | 0.14 | 0.26 | 0.53 | 0.84 |
| | | 75%-Quantil | 0.09 | 0.19 | 0.35 | 0.56 | 0.81 | 1.28 |
| | | 90%-Quantil | 0.13 | 0.27 | 0.77 | 0.97 | 1.32 | 2.15 |
| | Maximum | 0.36 | 0.75 | 1.05 | 1.51 | 2.37 | 8.38 | |
| Aare, Altren – Solothurn | Caduff, swissAlti3D | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.03 | 0.07 | 0.13 | 0.24 | 0.59 |
| | | 25%-Quantil | 0.02 | 0.05 | 0.10 | 0.19 | 0.39 | 0.85 |
| | | Median | 0.06 | 0.15 | 0.30 | 0.51 | 0.98 | 1.61 |
| | | 75%-Quantil | 0.14 | 0.30 | 0.60 | 1.01 | 1.68 | 2.68 |
| | | 90%-Quantil | 0.19 | 0.50 | 1.00 | 1.61 | 2.41 | 3.55 |
| | Maximum | 0.66 | 1.41 | 2.88 | 4.13 | 5.63 | 7.34 | |
| Mervade | | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.05 | 0.14 | 0.35 | 0.65 | 1.02 | 1.67 |
| | | 25%-Quantil | 0.06 | 0.16 | 0.44 | 0.87 | 1.35 | 2.27 |
| | | Median | 0.08 | 0.24 | 0.63 | 1.26 | 2.08 | 3.19 |
| | | 75%-Quantil | 0.12 | 0.39 | 1.04 | 1.72 | 2.72 | 4.40 |
| | | 90%-Quantil | 0.19 | 0.66 | 1.51 | 2.34 | 3.37 | 6.06 |
| | Maximum | 0.40 | 1.02 | 2.08 | 4.01 | 5.51 | 8.60 | |
| Caduff, DTMSO_2m | | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 0.13 | 0.30 |
| | | 25%-Quantil | 0.02 | 0.04 | 0.07 | 0.12 | 0.21 | 0.45 |
| | | Median | 0.06 | 0.11 | 0.21 | 0.48 | 0.97 | 1.57 |
| | | 75%-Quantil | 0.13 | 0.29 | 0.60 | 1.01 | 1.72 | 2.64 |
| | | 90%-Quantil | 0.19 | 0.50 | 1.00 | 1.61 | 2.34 | 3.55 |
| | Maximum | 0.66 | 1.41 | 2.88 | 4.13 | 5.63 | 7.34 | |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------|--------|-------------|-------------|---------|------|
| Emme, Gerlafingen – Luterbach | Caduff, swissAltI3D | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.23 | 0.34 | 0.69 |
| | | 25%-Quantil | 0.03 | 0.08 | 0.17 | 0.31 | 0.47 | 0.91 |
| | | Median | 0.05 | 0.12 | 0.27 | 0.47 | 0.76 | 1.35 |
| | | 75%-Quantil | 0.08 | 0.18 | 0.41 | 0.70 | 1.16 | 1.91 |
| | | 90%-Quantil | 0.19 | 0.32 | 0.54 | 1.01 | 1.51 | 2.38 |
| | Maximum | 1.40 | 2.03 | 2.88 | 3.50 | 4.05 | 4.11 | |
| | Merwade | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.02 | 0.06 | 0.11 | 0.16 | 0.17 |
| | | 25%-Quantil | 0.02 | 0.04 | 0.09 | 0.15 | 0.22 | 0.29 |
| | | Median | 0.04 | 0.08 | 0.16 | 0.25 | 0.47 | 0.95 |
| | | 75%-Quantil | 0.08 | 0.15 | 0.29 | 0.61 | 1.16 | 1.89 |
| | | 90%-Quantil | 0.14 | 0.32 | 0.64 | 1.21 | 2.15 | 2.92 |
| | Maximum | 1.44 | 2.83 | 3.92 | 5.38 | 6.71 | 7.93 | |
| | Caduff, DTMSO_2m | absolute Differenzen pro Profil | | | | | | |
| | | 10%-Q. | 25%-Quantil | Median | 75%-Quantil | 90%-Quantil | Maximum | |
| | | 10%-Quantil | 0.01 | 0.02 | 0.05 | 0.11 | 0.16 | 0.30 |
| 25%-Quantil | | 0.01 | 0.04 | 0.08 | 0.15 | 0.21 | 0.49 | |
| Median | | 0.04 | 0.08 | 0.14 | 0.23 | 0.34 | 0.92 | |
| 75%-Quantil | | 0.07 | 0.13 | 0.26 | 0.43 | 0.67 | 1.55 | |
| 90%-Quantil | | 0.19 | 0.29 | 0.48 | 0.67 | 0.99 | 2.00 | |
| Maximum | 1.40 | 2.03 | 2.88 | 3.50 | 4.05 | 4.10 | | |

4.2.5 Bewertung Interpolationsgüte: Differenz der hydraulischen Kennwerte

Bei der Interpolationsgüte wird jeweils das Profil, mit welchem die Differenzen zum Modellierungsergebnis berechnet werden, nicht bei der Modellierung verwendet (vgl. Kap. 2.3.3). Bei Betrachtung der Differenzen der 10%- bzw. 90%-Quantile, welche 80% der modellierten Fließquerschnitte berücksichtigen, betragen die Differenzen bei der Methode Merwade bis 16%, bei Verwendung der Methode Caduff und dem DTM swissALT3D bis 17% bzw. 14% bei Verwendung der kantonalen DTM. Wird die Methode Caduff mit den kantonalen DTM verwendet, weisen 90% der Querprofile eine Differenz beim Fließquerschnitt von +/- 13% bei breiten Gewässern auf, bei der Emme ist dieser Wert mit bis zu 17% leicht höher. Bei der Methode Merwade sowie der Methode Caduff mit swissALT3D weisen 90% der Querprofile Differenzen im Fließquerschnitt von bis zu 21% bzw. 23% auf. Bei den Differenzen des benetzten Umfangs schneidet die Methode Caduff besser ab als die Methode Merwade. Aus diesem Grund sind auch die Differenzen des hydraulischen Radius der Methode Caduff kleiner als die der Methode Merwade.

Tabelle 9 Güte der Interpolation der Querprofile anhand der Differenz der hydraulischen Parameter.

| | Fließquerschnitt | | | Benetzter Umfang | | | Hydraulischer Radius | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|---------|------------------|---------------------|---------|------------------|----------------------|---------|------------------|--------|--------|--------|
| | Caduff, swissAlti3D | Merwade | Caduff, DTMBE_2m | Caduff, swissAlti3D | Merwade | Caduff, DTMBE_2m | Caduff, swissAlti3D | Merwade | Caduff, DTMBE_2m | | | |
| Aare, Münsingen – Bern | 5% | -22.5% | -13.9% | -11.3% | 5% | -15.6% | -8.8% | -7.3% | 5% | -14.3% | -13.8% | -10.8% |
| | 10% | -17.0% | -9.9% | -8.7% | 10% | -9.2% | -6.7% | -6.1% | 10% | -12.7% | -8.9% | -7.0% |
| | 25% | -10.0% | -4.0% | -4.6% | 25% | -3.9% | -4.0% | -2.2% | 25% | -8.9% | -4.0% | -4.1% |
| | med | -3.4% | 0.4% | -1.6% | med | -1.2% | -1.3% | -0.9% | med | -2.5% | 2.0% | -0.1% |
| | 75% | 1.4% | 6.4% | 3.4% | 75% | 0.6% | 0.8% | 0.0% | 75% | 3.7% | 8.0% | 6.4% |
| | 90% | 6.3% | 9.8% | 7.5% | 90% | 2.4% | 2.7% | 1.1% | 90% | 11.9% | 12.7% | 9.6% |
| | 95% | 7.6% | 11.7% | 12.3% | 95% | 3.1% | 3.7% | 1.4% | 95% | 16.5% | 16.4% | 13.6% |
| Aare, Bern - Worblaufen | 5% | -6.9% | -18.6% | -10.9% | 5% | -4.2% | -12.2% | -5.5% | 5% | -8.7% | -13.8% | -10.3% |
| | 10% | -5.4% | -15.7% | -8.5% | 10% | -3.6% | -9.9% | -4.6% | 10% | -6.8% | -10.2% | -7.6% |
| | 25% | -3.0% | -7.8% | -4.5% | 25% | -0.7% | -6.5% | -3.3% | 25% | -3.7% | -4.3% | -3.7% |
| | med | 0.5% | -0.6% | -1.5% | med | 0.8% | -2.1% | -1.1% | med | 1.0% | 2.9% | 0.2% |
| | 75% | 6.4% | 5.0% | 4.1% | 75% | 2.3% | 0.7% | 0.0% | 75% | 4.5% | 5.8% | 6.0% |
| | 90% | 11.1% | 10.8% | 8.7% | 90% | 4.0% | 4.7% | 0.6% | 90% | 11.1% | 12.2% | 12.1% |
| | 95% | 17.7% | 15.8% | 13.5% | 95% | 4.8% | 8.4% | 1.8% | 95% | 17.6% | 14.9% | 14.1% |
| Aare, Altreu – Solothurn | 5% | -11.7% | -12.9% | -10.8% | 5% | -9.6% | -10.4% | -9.9% | 5% | -9.5% | -10.2% | -7.7% |
| | 10% | -7.8% | -9.0% | -7.5% | 10% | -5.9% | -9.8% | -6.3% | 10% | -7.5% | -6.3% | -6.7% |
| | 25% | -4.4% | -3.9% | -4.8% | 25% | -2.6% | -6.0% | -3.5% | 25% | -3.2% | -0.4% | -2.0% |
| | med | -0.7% | 1.3% | -0.6% | med | -0.9% | -1.4% | -1.4% | med | 1.2% | 4.4% | 2.4% |
| | 75% | 5.8% | 6.6% | 5.5% | 75% | 0.1% | 0.3% | -0.6% | 75% | 6.9% | 9.8% | 7.9% |
| | 90% | 9.4% | 10.2% | 9.8% | 90% | 1.1% | 2.9% | -0.1% | 90% | 12.0% | 13.8% | 11.9% |
| | 95% | 11.5% | 13.5% | 11.5% | 95% | 1.4% | 5.0% | 0.4% | 95% | 15.0% | 18.1% | 15.9% |
| Emme, Gerlafingen – Luterbach | 5% | -12.6% | -20.8% | -11.9% | 5% | -9.7% | -26.8% | -13.2% | 5% | -17.5% | -19.7% | -8.6% |
| | 10% | -11.0% | -16.5% | -8.6% | 10% | -7.5% | -13.0% | -11.3% | 10% | -14.5% | -12.7% | -5.6% |
| | 25% | -5.0% | -6.4% | -4.4% | 25% | -2.2% | -7.6% | -5.9% | 25% | -7.4% | -2.6% | -2.3% |
| | med | -0.5% | -0.4% | -0.7% | med | 1.6% | -2.7% | -1.7% | med | -1.9% | 2.3% | 2.4% |
| | 75% | 5.0% | 5.8% | 2.3% | 75% | 6.0% | -0.6% | -0.1% | 75% | 5.4% | 12.7% | 8.7% |
| | 90% | 12.4% | 16.4% | 13.9% | 90% | 7.8% | 3.0% | 0.8% | 90% | 13.0% | 19.4% | 16.7% |
| | 95% | 21.4% | 19.2% | 17.3% | 95% | 11.8% | 10.8% | 2.9% | 95% | 17.5% | 22.0% | 27.8% |

5 Diskussion der Resultate

5.1 Diskussion Modellierungsergebnisse Wasseroberfläche

Die Diskussion der Modellierungsergebnisse der Wasseroberfläche gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil thematisiert die bei der Wasserspiegelmodellierung aufgetretenen Schwächen, auf Grund derer versucht wird, Verbesserungspotenzial bei der Wasserspiegelmodellierung zu finden (vgl. Kap. 5.1.1). In einem zweiten Unterkapitel wird dann ganz konkret die Frage diskutiert, mit welchen Grundlagendaten denn nun die Wasserspiegelmodellierung durchgeführt werden soll, dies auf Basis der im Resultatkapitel vorgestellten Resultate (vgl. Kap. 5.1.2).

5.1.1 Verbesserungspotenzial bei der Wasserspiegelmodellierung

Die Wasserspiegelmodellierung funktioniert unabhängig der gewählten Datengrundlagen (DTM/Orthofoto bzw. swissTLM3D-Daten) effizient und korrigiert den Wasserspiegel im Gerinne so, dass im Hillshade eine homogene, glatte Wasserfläche entsteht. Die Korrektur beseitigt TIN-Facetten, welche optisch störend wirken.

Bezüglich der Höhen der modellierten Wasserspiegel zeigen die Resultate, dass die Modellierung trotz ihrer optisch überzeugenden Art in einigen Punkten Verbesserungspotenzial aufweist und die modellierten Wasserspiegelhöhen nicht überall ganz überzeugen. Die Faktoren, welche dazu führen, dass der Wasserspiegel nicht immer optimal implementiert ist, sind folgende:

- Datenqualität Grundlagendaten
- Gerinnemodellierungsmethodik bei flachen Gerinnen
- Ungenügende Detektion von Schwellen und Überfällen

Datenqualität Grundlagendaten

Die Qualität der Gewässermodellierung hängt sehr stark von den Grundlagendaten ab. Als Datengrundlage wurden bei den durchgeführten Wasserspiegelmodellierungen einerseits DTM und Orthofoto, andererseits swissTLM3D-Daten verwendet.

Um die Ausdehnung der Wasserfläche zu bestimmen, wird entweder das Orthofoto verwendet oder mit bereits digitalisierten Vektordaten gearbeitet (z.B. TLM-Daten). Der Vorteil bei Verwendung des Orthofotos ist, dass die Datenqualität durch die selber durchgeführte Digitalisierung den Anforderungen gerecht wird und daher optimal ist. Bei Verwendung von bereits digitalisierten Vektordaten hängt das Resultat sehr stark von der Güte dieser ab. Da die Ausdehnung der Wasserfläche ein sehr wichtiger Bestandteil der Wasserspiegelmodellierung ist, ist die Güte der Grundlagendaten in diesem Bereich sehr wichtig. Die Resultate der Testgebiete zeigen denn auch, dass die Wasserspiegelmodellierung auf Grundlage der TLM-Daten in zwei Beispielausschnitten zu breit modelliert (vgl. 4.1.1).

Zur Bestimmung der Höhe des Wasserspiegels wird entweder das Grundlagen-DTM verwendet oder aber die Höheninformation der 3D-Vektordaten. Ein Vorteil bei Verwendung des Grundlagen-DTM als

Datengrundlage für die Höhenbestimmung des Wasserspiegels besteht darin, dass das zu korrigierende DTM zugleich Datengrundlage für die Korrektur ist. Dies birgt den Vorteil, dass im Gerinnebereich auf jeden Fall eine Verbesserung der Daten garantiert werden kann. Sind die Grundlagendaten (hier das DTM) suboptimal, wird die Wasserspiegelmodellierung das suboptimale DTM extrem verbessern. Aufgrund der schlechten Datengrundlage könnte es sein, dass die Höhe des Wasserspiegels nicht ganz korrekt implementiert ist. Die Modellierung wird jedoch trotzdem als Verbesserung angesehen, da das suboptimale Grundlagen-DTM enorm verbessert wurde (vgl. Abbildung 34). Ist hingegen der Wasserspiegel bereits optimal im DTM integriert, wird die Wasserspiegelmodellierung aufgrund der ausgezeichneten Grundlagendaten keinen Schaden anrichten: auch nach der Modellierung wird der Wasserspiegel optimal und korrekt integriert sein.

Die Verwendung der TLM-Daten als Basis für die Höhe des Wasserspiegels liefert Modellierungsergebnisse, welche unabhängig von der Güte des Grundlagen-DTM sind. Die Güte der Wasserspiegelmodellierung TLM basiert lediglich auf der Güte der TLM-Daten. Dies kann in seltenen Situationen, bei denen der Gerinnebereich suboptimal im DTM integriert ist, ein Vorteil sein und zu besseren Resultaten führen. Jedoch besteht die Gefahr, ein bereits im unkorrigierten DTM gut integrierter Wasserspiegel durch die Wasserspiegelmodellierung zu verschlechtern, wie dies bei den Resultaten der Aare zwischen Münsingen und Bern beobachtet wurde (vgl. Kap. 4.1.1). Im gleichen Modellierungsabschnitt wird beobachtet, dass der mittels TLM-Grundlagendaten modellierte Wasserspiegel einen treppenartigen Längsschnitt aufweist, dies in einem Bereich mit einem sehr homogenen Gefälle. Dieser treppenartige Längsschnitt ist ganz klar eine Folge der suboptimalen Datenqualität der TLM-Daten in diesem Bereich.

Gerinnemodellierungsmethodik bei flachen Gerinnen

Die Wasserspiegelmodellierung basiert auf zonalen Minima und verhindert per Definition Gegensteigungen in Fließrichtung. Der Grund für die so entwickelte Methode ist, dass Teilabschnitte existieren, bei denen das DTM im Gerinnebereich zu hoch ist, da in einigen Bereichen durch das Fehlen von LiDAR-Punkten im Gewässer Uferpunkte über das gesamte Gewässer hinüber interpoliert werden (vgl. Kap. 1.2). Ein Verhindern von Gegensteigungen führt dazu, dass unerwünschte, grosse TIN-Facetten durchbohrt werden und so die Qualität des Wasserspiegels verbessert wird. Weist das DTM im Gerinne Pixel auf, welche zu tief liegen, führt dies lokal zu einem zu tiefen Wasserspiegel. Dies ist in der Regel nicht so schlimm, da sich der Fehler aufgrund des Gefälles nicht sehr weit auswirkt und durch die in der Modellierungsmethodik vorkommende Glättung abgemindert wird. Bei ganz flachen Gerinnen tritt nun das Phänomen auf, dass ein zu tiefer Wasserspiegel sich kilometerweit weiterziehen kann, da ein Ansteigen des Wasserspiegels auf den korrekten Wasserspiegel durch die Methodik verunmöglicht wird. Bei den Resultaten der Wasserspiegelmodellierung im Abschnitt Aare Solothurn (vgl. Kap. 4.1.2) wird dieses Phänomen beobachtet.

Das oben beschriebene Phänomen in flachen Gerinneabschnitten ist eine Schwäche der Modellierungsmethodik und muss verbessert werden, damit die Methodik auch in flachen Gerinneabschnitten verwendet werden kann. Ein eleganter Weg für die Lösung des Problems wäre, das unkorrigierte Längsprofil erst einmal zu glätten, bevor man im Längsprofil die Gegensteigungen

korrigiert. Zu tiefe Wasserspiegel sind lokale Phänomene, eine Glättung des unkorrigierten Längsprofils würde das Phänomen von zu tiefen Wasserspiegeln in ganz flachen Gerinnen extrem abschwächen. Es wird daher empfohlen, die im Methodenkapitel beschriebene Methodik (vgl. Kap. 2.1.3) um diesen Glättungsvorgang zu erweitern.

Akribischere Detektion von Schwellen und Überfällen

Die Modellierungsmethodik ist so gestaltet, dass abrupte Änderungen im Bereich des Längsschnittes möglich sind, um Wehre und Überfälle sauber modellieren zu können. Technisch geschieht dies, indem der Modellierungssperimeter bei jeder abrupten Änderung unterteilt wird und so die durch die Unterteilung entstandenen Teilperimeter unabhängig voneinander modelliert werden (vgl. Kap. 2.1.1).

Wehre sowie grössere Schwellen und Überfälle welche bei der Erstellung der Grundlagendaten berücksichtigt werden, sind im Modellierungsergebnis sehr gut modelliert. Bei den Modellierungen mittels DTM-Orthofoto wurde die Auswahl dieser berücksichtigten Gefällsknicke auf die grossen Gefällsknicke (> 1.5 m) beschränkt. Bei den Modellierungen mittels TLM-Grundlagendaten beschränkt sich die Berücksichtigung auf das Wehr Felsenau. Natürlich hätten auch bei der Modellierung mit TLM-Daten mehr Gefällsknicke berücksichtigt werden können. Die Segmentierung der 3D-Polygone ist jedoch nicht ganz einfach und zur Detektion der Wehre und Überfälle müsste neben den TLM-Daten weitere Grundlagendaten hinzugezogen werden (DTM oder Orthofoto). Die Folge von nicht berücksichtigten Wehren, Schwellen oder Überfällen sind geglättete Steilstufen, die den abrupten Charakter der Steilstufe nicht mehr widerspiegeln. Ein Beispiel für die Auswirkung eines nicht detektierten Wehrs zeigt das Modellierungsergebnis TLM des Wehrs Biberist (vgl. Abbildung 45).

Durch die Berücksichtigung aller Gefällsknicke würde die Modellierungsgüte erhöht werden, dies vor allem in Gewässern mit vielen Schwellen und Überfällen. Eine lückenlose Detektion aller Gefällsknicke könnte in einer Voranalyse mit Hilfe des Längsprofils geschehen.

5.1.2 Direkter Vergleich der beiden Wasserspiegelmodellierungen

Bleibt die Frage, welche Grundlagendaten für eine Modellierung des Gerinnes eingesetzt werden sollten. In den Untersuchungsgebieten ist die Modellierung mittels DTM/Orthofoto generell besser gelungen als die Modellierung auf Basis der TLM-Daten. Einzige Ausnahme bildet die Aare im Bereich von Solothurn, wo die Wasserspiegelmodellierung mittels DTM/Orthofoto im Längsschnitt nicht überzeugte. Wie oben beschrieben kann die Modellierungsmethodik erweitert werden, so dass die Modellierung mittels DTM/Orthofoto auch in flachen Gerinneabschnitten zu einem guten Modellierungsergebnis führen wird. Aufgrund der in den Untersuchungsgebieten gemachten Resultate ist in der Schweiz die Modellierung mittels DTM/Orthofoto-Grundlagendaten der Verwendung von swissTLM3D-Daten vorzuziehen.

Da die Güte der Wasserspiegelmodellierung von der Güte der Eingangsdaten abhängt, kann natürlich nicht generell darauf geschlossen werden, dass die Wahl von 3D-Featuredaten für die Modellierung eines Wasserspiegels ungeeignet wären. Schlussendlich bestimmt die Güte der einzelnen Datensätze, welches die für die Modellierung geeignetsten Grundlagendaten sind.

5.2 Diskussion Modellierung Gerinne (Gewässeruntergrund)

5.2.1 Beurteilung der Resultate der beiden Gerinnemodellierungsmethoden

Bei der qualitativen Bewertung der Gerinnemodellierungsergebnisse zeigt sich, dass die Modellierung mittels Methode Caduff schönere Resultate hervorbringt als die Methode Merwade. Durch die Beschränkung der Methode Caduff auf die Korrektur der wasserbedeckten Flächen bleiben Strukturen im Uferbereich erhalten, sie werden z.T. noch verstärkt, indem die Höhenwerte von Bühnen oder Inseln unkorrigiert bleiben und die Wasserfläche rundherum durch die Modellierung des Gerinnes abgesenkt wird. Im Gegensatz dazu verwischt die Methode Merwade jegliche Strukturen im Uferbereich. Das mit der Methode Merwade modellierte relativ breite Gerinne erweckt im DTM einen künstlichen Anschein.

Im Gerinne weisen die beiden Modellierungen kleinere Unterschiede auf. So treten bei der Methode Merwade in schwierig modellierbaren Gerinneabschnitten (z.B. starken Biegungen) unerwünschte Artefakte auf. Es existieren auch Bereiche in denen im Modellierungsergebnis (Hillshade) die Lage der für die Modellierung verwendeten Querprofile zu erkennen ist. Die Resultate der Methode Caduff sind frei von Artefakten.

Neben der Ästhetik, welche für die Akzeptanz einer Modellierung sehr wichtig ist, ist die Güte der Modellierung die zentrale Eigenschaft einer guten Modellierung. Durch die breitere Modellierung mit der Methode Merwade wird erwartet, dass die Güte der Integration der Profile besser sein sollte als bei der Methode Caduff. Im Uferbereich ist die Integrationsgüte der Methode Merwade, welche vielfach den Bereich des gesamten Querprofiles modelliert, besser als die Methode Caduff, welche im Uferbereich die Höhen der Querprofile nicht berücksichtigt und stattdessen das DTM verwendet. Bei den Resultaten kommt ganz klar zum Ausdruck, dass die Modellierungsgüte der Methode Caduff im Uferbereich sehr DTM-abhängig ist. Mit einem qualitativ guten DTM erreicht die Integrationsgüte der Methode Caduff beinahe dieselbe Güte wie die Methode Merwade, in einem Abschnitt (Aare Bern – Worblaufen) übertrifft sie diese sogar, was darauf zurückzuführen ist, dass auch bei Verwendung der Methode Merwade die Profile auf einen vernünftigen Gerinnebereich gekürzt werden (vgl. Anhang A) und in den gekürzten Bereichen die Höhen von swissALTI3D verwendet werden.. Würde bei der Methode Merwade ebenfalls die besseren kantonalen DTM verwendet, wäre die Integrationsgüte im Uferbereich stets besser als bei der Methode Caduff.

Wichtig für die Einordnung der Resultate der Güteberechnungen im Uferbereich ist das Wissen, dass swissALTI3D in zwei Abschnitten Defizite aufweist: Im Abschnitt der Aare zwischen Münsingen und Bern ist der Uferbereich bei der Badi Muri auf einer Länge von ca. 800 m nicht sehr gut im DTM implementiert (vgl. Abbildung 34 in Kap. 4.1.1). Grund für die suboptimale Modellierung des Uferbereichs ist höchstwahrscheinlich, dass im Bereich des Gerinnes die LiDAR-Punkte gelöscht wurden. Im Abschnitt der Emme zwischen Gerlafingen und Luterbach ist das DTM swissALTI3D veraltet, was ebenfalls zu einem Defizit führt. Das Gerinne wurde in den letzten Jahren baulich verändert mit dem Ziel, den Hochwasserschutz zu erhöhen sowie das Gerinne ökologisch aufzuwerten (Dürrenmatt 2015). Aufgrund dieser Defizite sind die grösseren Differenzen bei Verwendung des DTM swissALTI3D in diesen zwei Untersuchungsgebieten erklärbar.

Im Gewässerbereich ist die Integrationsgüte der Methode Caduff leicht besser als die der Methode Merwade. Dies vor allem, da bei der Methode Merwade mehr und grössere Differenzen bei den Ausreissern beobachtet werden. Auch die Box der Boxplots ist bei der Methode Merwade tendenziell ganz leicht grösser.

Bei Betrachtung der der Quantilmatrizen der Integrationsgüten (vgl. Kap. 4.2.2) zeigt sich, dass die Integrationsgüte sowohl bei Verwendung der Methode Merwade als auch bei Verwendung der Methode Caduff (mit kantonalem DTM) sehr gut ist. Die oben beschriebenen DTM-Defizite des DTM swissALTI3D führen in den Abschnitten der Aare Münsingen – Bern sowie bei der Emme zu grösseren Differenzen.

Das Bild einer guten Integrationsgüte wird durch die Betrachtung der hydraulischen Parameter verstärkt. Unter Nichtberücksichtigung der Resultate der beiden Abschnitte mit Defiziten in swissALTI3D existieren lediglich zwei Quantile, bei denen Differenz des Fliessquerschnitts mehr als 4% beträgt.

Bei der Interpolationsgüte ist zu erwähnen, dass methodenbedingt zur Bestimmung der Güte nur jedes zweite Profil für die Modellierung verwendet werden kann, was die Abstände der Querprofile verdoppelt. Dass die Güte der Modellierung sinkt, wenn lediglich jedes zweite Profil für die Modellierung verwendet wird, liegt auf der Hand. Unter dem Gesichtspunkt, dass die wahre Interpolationsgüte bei Verwendung aller Profile ein wenig besser sein wird, ergibt die Betrachtung der Interpolationsgüte dennoch ein akzentuiertes Bild, wie stark sich die einzelnen Pixel sowie die hydraulischen Parameter durch die Interpolation von der Realität entfernen.

Im Gewässerbereich, den beide Methoden von den Querprofilen her interpolieren, sind Abweichungen von über einem Meter überhaupt keine Seltenheit. Vor allem im Bereich der Aare zwischen Altreu und Solothurn treten überaus grosse Interpolationsdifferenzen auf. Obwohl der Wasserspiegel dieses Gerinneabschnitts beinahe kein Gefälle aufweist, ist die Topografie des Untergrundes gespickt mit Senken und Erhebungen, welche bei der Interpolation nicht modelliert werden können und so die Interpolationsgüte negativ beeinflussen (vgl. Abbildung 52).

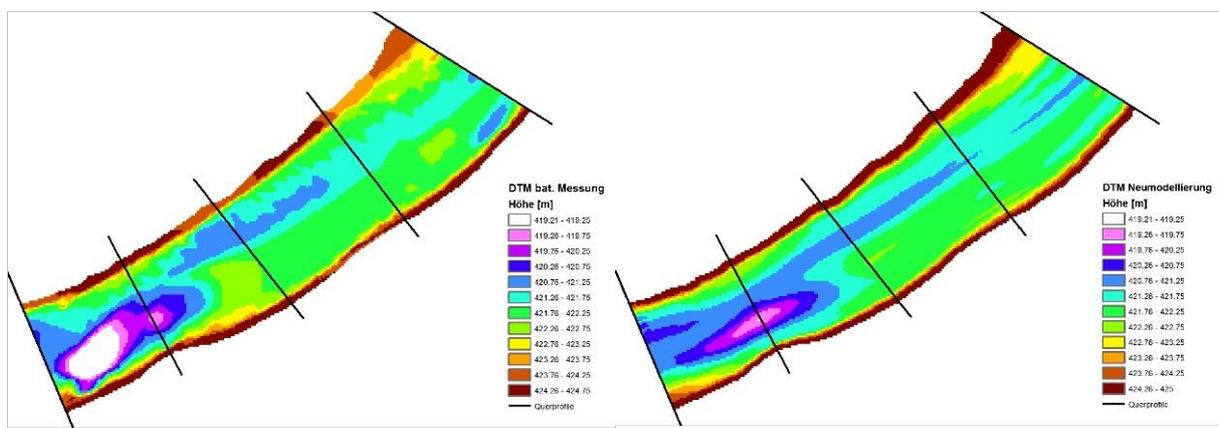


Abbildung 52 Gerinne aus bathymetrischer Vermessung (links), gegenübergestellt dem Gerinne modelliert mit der Methode Caduff (rechts).

Im Uferbereich sind die Höhengenaugkeiten der Methode Caduff viel besser als die interpolierten Höhen der Methode Merwade. Dies liegt daran, dass die Höhen im Uferbereich bei Verwendung der Methode Caduff nicht auf Basis der vermessenen Querprofile interpoliert werden, sondern die Höhen des Grundlagen-DTM im Uferbereich verwendet werden. Die Box der Boxplots, welche den Bereich bezeichnet, wo sich 50% der Differenzen befinden, ist mit Ausnahme der beiden Abschnitte, welche in swissALTI3D Gütedefizite aufweisen, im Uferbereich bei der Methode Merwade jeweils um ein mehrfaches grösser als bei der Methode Caduff. Auch die Differenzmatrizen der Interpolationsgüte zeigen, dass die Interpolationsgüte der Methode Caduff deutlich besser ist als die Interpolationsgüte der Methode Merwade (Tabelle 8).

Die in den absoluten Differenzen existierenden deutlichen Unterschiede der Interpolationsgüte ist bei Betrachtung der hydraulischen Parameter lediglich in abgeschwächter Form erkennbar. Obwohl die Methode Caduff eindeutig bessere Interpolationsgüte zeigt, ist der Unterschied zur Interpolationsgüte der Methode Merwade recht klein. Ursache für diesen Effekt könnte die Tatsache sein, dass bei der Methode Merwade zwei Profile miteinander interpoliert werden, welche beide gute hydraulische Kennwerte aufweisen. Durch die Interpolation dieser beiden Profile ergibt sich zwar nicht ein korrektes Bild des Gerinnes, was zu grossen Differenzen der einzelnen Höhenwerte führt. Die hydraulischen Parameter bleiben jedoch durch die Interpolation relativ konstant.

Zur qualitativen Beurteilung der Interpolationsgüte sind in Anhang B die Interpolationen sämtlicher Querprofile abgebildet. Die Durchsicht der interpolierten Querprofile bestätigt, dass die Methode Caduff eine deutlich bessere Interpolationsgüte aufweist als die Methode Merwade.

Was aus den Resultaten nicht direkt ersichtlich ist, ist die Tatsache, dass die Methode Merwade viel effizienter modelliert. Während bei der Methode Merwade die effektive Berechnungszeit der Modellierung einige Minuten beträgt, benötigt die Methode Caduff viel mehr Rechenkapazität, sodass die Modellierung einzelner Untersuchungsgebiete je nach Abschnittlänge und Gerinnebreite zwischen zwei und zehn Stunden benötigt. Bei grossflächigen Modellierungen ist die längere Modellierungsdauer sicherlich zu berücksichtigen, jedoch relativiert sich der grössere Rechenaufwand durch die Tatsache, dass die Bereitstellung sauberer Grundlagendaten für die Modellierung deutlich arbeitsintensiver ist als die eigentliche Modellierung.

5.2.2 Direkter Vergleich der beiden Methoden

Der grösste Unterschied der beiden Gerinnemodellierungsmethoden liegt in der Tatsache, dass die Methode Merwade das Gerinne viel weiter modelliert als die Methode Caduff, welche sich auf die Modellierung der wasserbedeckten Fläche beschränkt. Aufgrund dieses Unterschieds sind die Integrations- bzw. Interpolationsgüte der beiden Methoden unterschiedlich.

Während die Methode Merwade bei den Resultaten der Integrationsgüte die besten Resultate aufweist, zeigt die Methode Caduff, dass sie zwar bei der Integrationsgüte nicht ganz mit der Methode Merwade mithalten kann, bei der Interpolationsgüte jedoch viel bessere Werte erzielt, dies vor allem bei Betrachtung der absoluten z-Differenzen. Die Wahl der Modellierungsmethode sowie des

Modellierungsperimeters hängt letztendlich von der Verwendung des modellierten DTM sowie von der Güte des Grundlage-DTM ab.

Die Resultate zeigen eindeutig, dass bei einer guten Qualität des Grundlagen-DTM die Qualität des modellierten Gerinnes besser ist, falls die Gerinnemodellierung sich lediglich auf die Wasserfläche beschränkt. Methodenbedingt ist eine derart enge Modellierung nur mit der Methode Caduff möglich. Dient die Modellierung als Input für eine Überflutungsmodellierung, wo nicht unbedingt eine gute Uferrepräsentation, sondern korrekte hydraulische Kennwerte entscheidend sind, ist der Unterschied zwischen den beiden Modellierungsmethoden eher gering.

Eine Empfehlung bezüglich Wahl der Modellierungsmethodik sowie der Abgrenzung des Modellierungsperimeters gibt die Entscheidungsmatrix in Tabelle 10. Als sehr gute DTM-Qualität und Auflösung werden digitale Terrainmodelle wie die kantonalen DTM angesehen, welche die Umgebung sehr gut modellieren und tendenziell eine Auflösung von weniger als zwei Meter aufweisen. In die mittlere Kategorie fallen DTM mit Auflösungen um zwei Meter wie z.B. das DTM swissALTI3D. Ungenügende DTM-Qualitäten sind DTM, welche im Uferbereich grössere Differenzen zwischen den DTM-Höhen und den Höhen der vermessenen Querprofilpunkte aufweisen oder DTM mit einer Auflösung von mehr als fünf Metern.

Tabelle 10 Entscheidungsmatrix für die Wahl der Modellierungsmethode Caduff oder Merwade

| | Diverse Verwendungen | Hydraulische Modellierungen |
|--|---|---|
| DTM-Qualität und Auflösung sehr gut | Verwendung Methode Caduff mit einem Modellierungsperimeter, welcher sich auf die Wasserfläche beschränkt empfohlen. | Verwendung Methode Caduff mit schmalen Modellierungsperimeter, der sich auf die Wasserfläche beschränkt empfohlen, mit zusätzlicher Modellierung der Dammoberkante. |
| DTM-Qualität und Auflösung ok | Verwendung Methode Caduff mit einem Modellierungsperimeter, welcher sich auf die Wasserfläche beschränkt empfohlen. | Verwendung beider Modellierungsmethoden ist vorstellbar, dies auf breitem oder schmalen Modellierungsperimeter. Bei Beschränkung des Perimeters auf die Wasserfläche ist eine zusätzliche Modellierung der Dammoberkante empfohlen. |
| DTM-Qualität und Auflösung ungenügend | Verwendung beider Modellierungsmethoden ist vorstellbar. Aufgrund der ungenügenden DTM-Auflösung wird ein breiter Modellierungsperimeter empfohlen. | Verwendung beider Modellierungsmethoden ist vorstellbar. Aufgrund der ungenügenden DTM-Auflösung wird ein breiter Modellierungsperimeter empfohlen. |

Wird das DTM für hydraulische Modellierungen verwendet, ist die Güte der Dammoberkante sehr entscheidend. Da bei einem engen Modellierungsperimeter die Höhe der Dämme nicht separat modelliert wird, wird empfohlen, die Gerinnemodellierung zusätzlich durch die Modellierung der Dammoberkante zu ergänzen. Aus den hochauflösenden Grundlagen-DTM lassen sich die Lage und der Verlauf der Dammoberkante bestimmen und digitalisieren. Diesem Verlauf nach können die vermessenen Dammhöhen von Querprofil zu Querprofil interpoliert werden, was zu einer sauberen Dammoberkante führt.

Bei schlechter Qualität des DTM führt die Verwendung des DTM im Uferbereich eher zu einer Verschlechterung als zu einer Verbesserung dieses. In solchen Fällen ist eine breite Modellierung, welche nicht nur das Gewässer, sondern auch Sandbänke und Dämme beinhaltet, ganz klar zu bevorzugen. Theoretisch könnte eine breite Modellierung mit beiden Methoden (Merwade und Caduff) geschehen, mit grundsätzlich sehr ähnlichen Resultaten. Aufgrund der Modellierungseffizienz würde in solchen Fällen die Methode Merwade der Methode Caduff eher vorgezogen. Eine Ausnahme bilden sehr heterogene Gerinne mit Flachwasserzonen und Inseln. Bei diesen wäre die Methode Caduff, bei welcher das Modellierungsergebnis mit dem Einsatz von Breaklines wesentlich verbessert werden kann, der Methode Merwade vorzuziehen.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Modellierung des Wasserspiegels und des Gerinnes ist es möglich, den Gerinnebereich, welcher nicht optimal im DTM modelliert ist, zu korrigieren. Mit der Modellierungsmethodik zur Korrektur des Wasserspiegels wie auch mit der Modellierungsmethodik zur Implementation des Gerinnes wurden zwei Möglichkeiten entwickelt, um das Gerinne auf überzeugende Weise in ein DTM zu implementieren oder den Wasserspiegel zu korrigieren.

Stellt man die gewonnen Erkenntnisse der Wasserspiegelmodellierung in einen grösseren Kontext fällt auf, dass zur Modellierung des Wasserspiegels in digitalen Terrainmodellen sehr wenig publiziert ist. Ausnahmen bilden die beiden in Kap. 1.3 vorgestellten Methoden, bei denen es um die Fragestellung der Modellierung des Gewässerbereichs ausgehend von LiDAR-Daten handelt. Ein Grund für die geringe Beschäftigung der Wissenschaft mit der Problematik der Wasserspiegelmodellierung könnte die Tatsache sein, dass die Modellierung des Wasserspiegels keine extrem komplexe Fragestellung ist. Die Forschungsfrage der hier vorliegenden Arbeit berücksichtigte in seiner ursprünglichen Version den Aspekt der Wasserspiegelkorrektur auch nicht. Auf Wunsch von swisstopo wurde die Forschungsfrage um diesen Teil erweitert. Das Interesse von swisstopo zeigt, dass Lösungen für eine gute Repräsentation des Wasserspiegels ein reales Bedürfnis darstellt.

Die in dieser Masterarbeit entwickelte Methodik zur Korrektur des Wasserspiegels ist in der Lage, die Qualität der Gewässerflächen bestehender DTM zu erhöhen, indem störende TIN-Facetten eliminiert werden und einer homogenen, glatten Wasserfläche weichen müssen.

Im Gegensatz zur Wasserspiegelmodellierung wird die Implementation eines Gerinnes in ein DTM in wissenschaftlichen Publikationen viel häufiger thematisiert. Es existieren diverse Techniken zur Gerinneimplementation (vgl. Einleitung zu Kap. 1.4). Auch bei Verwendung einer Technik wie der Interpolation des Gerinnes aufgrund von vermessenen Querprofilen existieren wiederum verschiedene Methoden, um aus den Querprofilen ein Gerinne zu modellieren. Die Evaluation von vier existierenden Methoden in Kap. 2.2 hat gezeigt, dass jede Implementationsmethodik andere Eigenheiten besitzt. Je nach Anforderung bezüglich der Grundlagendaten, der angestrebten Implementationsgenauigkeit oder anderer spezieller Modellierungsanforderungen (z.B. Berücksichtigung des Talwegs, Beschränkung der Modellierung auf die Wasserfläche, ...) reduziert sich die Anwendbarkeit der existierenden Methoden enorm. Dies ist Ursache und Legitimation für die Entwicklung von unterschiedlichen Methoden zu dieser Thematik.

Über die Breite des Modellierungsperimeters herrscht in wissenschaftlichen Publikationen keine Diskussion. Grösstenteils wird der Modellierungsperimeter gar nicht explizit erwähnt. Grund dafür ist meines Erachtens die Tatsache, dass bis vor wenigen Jahren die Güte und Auflösung der DTM qualitativ zu gering war, um als Datengrundlage im Uferbereich berücksichtigt zu werden. Eine weitere Tatsache ist, dass die Gerinneimplementation vielfach in Kombination mit hydraulischen Modellierungen geschieht. Da bei hydraulischen Modellierungen die Güte und exakte Höhe der Dämme extrem entscheidend ist, wurden die Dämme bis anhin als Teil des Modellierungsperimeters betrachtet. Dies muss nicht so sein. Bei einer engen Implementation des Gerinnes, welche sich auf die Wasserfläche beschränkt, kann zusätzlich zur Gerinnemodellierung die Dammoberkante modelliert werden. Ein

Vorschlag für eine Dammoberkantenmodellierung ist in Kap. 5.2.2 beschrieben. Die Kombination einer engen Gerinnemodellierung mit der Modellierung der Dammoberkante wird die hydraulische Güte der engen Gerinneimplementation weiter steigern.

Die Resultate der Untersuchungsgebiete belegen, dass es bereits bei digitalen Terrainmodellen mit zwei Metern Zellgröße zu Verbesserungen der Gerinnemodellierungsgüte kommt, wenn der Modellierungsperimeter auf die wasserbedeckte Fläche beschränkt und auf eine Modellierung im Uferbereich verzichtet wird. Bei Verwendung der heute existierenden noch genaueren 50cm-DTM wird die Datenqualität im Uferbereich nochmals verbessert, was die Güteunterschiede der DTM-Höhen gegenüber den aus der Interpolation resultierenden Höhen weiter verbessern wird. Die Resultate führen denn auch zum Schluss, dass eine Diskussion über die Breite des Modellierungsperimeters geführt werden muss, um die in den letzten Jahren enorm verbesserten Grundlagendaten bei der Gerinnemodellierung zu nutzen. Keine der in Kap. 1.4 vorgestellten, bereits publizierten Methoden zur Gerinnemodellierung ist in der Lage, den Modellierungsperimeter der Gerinnemodellierung genau auf die Wasserfläche zu beschränken. Dies ist eine Eigenheit der Methode Caduff, welche mit diesem Fokus konzipiert wurde.

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Masterarbeit erwarte ich, dass in Zukunft, aufgrund der stetig steigenden Qualität der DTM, Korrekturen in diesen viel enger und spezifischer ausgeführt werden. Das Gerinne sowie die Dammoberkante können und sollen separat voneinander modelliert werden. Die Methode Caduff liefert in Anbetracht dieser Entwicklung ein mögliches Werkzeug für eine sich auf die Wasserfläche beschränkte Gerinneimplementation.

Literaturverzeichnis

Aschwanden, M.J. (2012): A statistical fractal-diffusive avalanche model of a slowly-driven self-organized criticality system. *A&A*.

BAFU (Hsg.) (2016): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2015. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Bärtschi, Hanspeter (2014): 72 Millionen werden in Überschwemmungs-Schutz der Emme gesteckt. *Oltener Tagblatt*, 22.08.2014.

Beffa, C. (2000): Modellunterstützte Beurteilung von Hochwassergefahren. Tagungsbeitrag *Interpraevent* (Band 1), S. 99–110.

Bodansky, E. et al. (2002): Smoothing and Compression of Lines Obtained by Raster-to-Vector Conversion. In: Gerhard Goos: *Graphics Recognition Algorithms and Applications*, Bd. 2390, Springer Berlin Heidelberg, S. 256–265.

Bruderer, S.; Bauen, A. (2006): Renaturierung der Aare zwischen Thun und Bern. *Münsinger Info* 2/2006, S. 18–19.

Caviedes-Voullième D. et al. (2013): 2D river flood simulation using interpolated river bed geometry. Conference Paper, *Proceedings of 2013 IAHR World Congress*.

Dürrenmatt, R. (2015): Emme, Wehr Biberist bis Aare. Hochwasserschutz- und Revitalisierungsprojekt. Amt für Umwelt Kanton Solothurn (Nr. 5), Solothurn.

Flener, C. (2015): Remote sensing for three-dimensional modelling of hydromorphology. Department of Geography and Geology, *Annales Universitatis Turkuensis*.

geo7 (2013): Gefahrenhinweiskarte Überflutung des Kantons Bern. *Wasser Energie Luft* (3/2013), S. 221–224.

geo7 (2014): Gefahrenhinweiskarte Überflutung: Pilotgebiet Prättigau und Landschaft Davos. Amt für Wald und Naturgefahren Kt. Graubünden, Chur.

Hedeler, B. (2015): Windenergie und Landschaftsästhetik. Möglichkeiten der Konfliktminimierung, GRIN Verlag, München.

Hilldale, R. C.; Raff, D. (2008): Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. *Earth Surf. Process. Landforms* 33 (5), S. 773–783.

Höfle, B. et al. (2009): Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surf. Process. Landforms* 34 (12), S. 1635–1649.

Kipfer, A. (2012): Ein neuer Ansatz zur Modellierung von Oberflächenabfluss. Tagungsbeitrag *Interpraevent*.

Korzeniowska, K. (2012): Modelling of water surface topography on the Digital Elevation Models using LiDAR data. AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science, Avignon.

Läuppi, Ph. (2015): Geschichte des Freibades an der Aare. Stadt Solothurn 2015. <http://www.freibad-solothurn.ch/geschichte/> (Zugriff 10.10.2016)

Meister, P.-G. (2012): Aus der Emme darf nicht mehr soviel Wasser entnommen werden. soaktuell.ch - Internet-Zeitung Aargau-Solothurn. http://www.soaktuell.ch/index.php?page=/news/aus-der-emme-darf-nicht-mehr-soviel-wasser-entnommen-werden_2517, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Merwade, V. (2009): Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. *Journal of Hydrology* 371 (1-4), S. 169–181.

Merwade, V. (2015): Creating river bathymetry mesh from cross - sections. School of Civil Engineering, Purdue University.

Merwade, V., Cook, A.; Coonrod, J. (2008): GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modelling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software* 23 (10-11), S. 1300–1311.

Rüdissler, J. (2002): Beurteilung Westösterreichs als potentieller Lebensraum für den Luchs. „Reviewed paper“ AGIT 2002.

Schäppi, B.; Perona, P.; Schneider, P.; Burlando, P. (2010): Integrating river cross section measurements with digital terrain models for improved flow modelling applications. *Computers & Geosciences* 36, S. 707–716.

swisstopo (2014): swissALTI3D. Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

swisstopo (2016): swissALTI3D Ausgabebericht 2016. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

Utelli, H.-H., Eisenhut, A. (2012): GIS-Analyse Skitourenrouten nach Risikostufe. bfu – Beratungsstelle für Unfallverhütung, Bern.

Wehr, A., Lohr, U. (1999): Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2-3), S. 68–82.

Winterbottom, S.; Gilvear, D. (1997): Quantification of channel bed morphology in gravel-bed rivers using airborne multispectral imagery and aerial photography. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 13 (6), S. 489–499.

Worstell, B. (2014): Lidar Point Density Analysis—Implications for Identifying Water Bodies. Scientific Investigations Report 2014–5191, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Anhang A Verwendete Querprofilbereiche

Anhang A1 Aare Münsingen – Bern

| Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 184435_2011 | 600632.75 | 199418.00 | 189013_2011 | 603025.88 | 197070.36 | 194334_2011 | 606979.56 | 193948.78 |
| 184435_2011 | 600672.63 | 199347.89 | 189013_2011 | 603072.38 | 196998.03 | 194334_2011 | 607063.88 | 194004.63 |
| 184557_2011 | 600530.13 | 199322.02 | 189225_2011 | 603205.56 | 197212.23 | 194536_2011 | 607102.56 | 193786.66 |
| 184557_2011 | 600593.88 | 199289.50 | 189225_2011 | 603238.56 | 197111.38 | 194536_2011 | 607182.44 | 193846.88 |
| 184592_2011 | 600511.06 | 199291.53 | 189453_2011 | 603470.13 | 197209.59 | 194739_2011 | 607219.94 | 193622.88 |
| 184592_2011 | 600580.81 | 199256.56 | 189453_2011 | 603434.06 | 197131.44 | 194739_2011 | 607305.63 | 193684.44 |
| 184736_2011 | 600493.31 | 199137.00 | 189664_2011 | 603667.31 | 197128.52 | 194942_2011 | 607339.19 | 193460.88 |
| 184736_2011 | 600562.00 | 199125.03 | 189664_2011 | 603616.44 | 197047.17 | 194942_2011 | 607427.75 | 193519.39 |
| 184937_2011 | 600462.75 | 198938.94 | 189866_2011 | 603848.13 | 197033.61 | 195154_2011 | 607418.50 | 193279.94 |
| 184937_2011 | 600532.06 | 198925.83 | 189866_2011 | 603790.13 | 196943.45 | 195154_2011 | 607522.31 | 193314.16 |
| 185112_2011 | 600436.88 | 198764.91 | 190066_2011 | 604004.44 | 196911.67 | 195258_2011 | 607464.69 | 193183.33 |
| 185112_2011 | 600517.50 | 198751.00 | 190066_2011 | 603963.31 | 196838.00 | 195258_2011 | 607547.31 | 193215.56 |
| 185307_2011 | 600403.31 | 198572.88 | 190270_2011 | 604192.44 | 196825.05 | 195306_2011 | 607456.00 | 193140.14 |
| 185307_2011 | 600474.56 | 198561.45 | 190270_2011 | 604135.88 | 196733.09 | 195306_2011 | 607580.69 | 193171.50 |
| 185493_2011 | 600410.88 | 198374.30 | 190473_2011 | 604363.44 | 196724.73 | 195363_2011 | 607503.50 | 193083.67 |
| 185493_2011 | 600478.31 | 198389.34 | 190473_2011 | 604309.00 | 196623.50 | 195363_2011 | 607610.69 | 193117.28 |
| 185673_2011 | 600473.50 | 198194.72 | 190678_2011 | 604543.88 | 196625.98 | 195467_2011 | 607504.56 | 192984.06 |
| 185673_2011 | 600533.00 | 198230.09 | 190678_2011 | 604480.56 | 196519.03 | 195467_2011 | 607684.50 | 193032.78 |
| 185762_2011 | 600530.94 | 198117.53 | 190876_2011 | 604702.81 | 196500.73 | 195568_2011 | 607530.44 | 192887.08 |
| 185762_2011 | 600580.50 | 198164.88 | 190876_2011 | 604651.69 | 196416.67 | 195568_2011 | 607710.69 | 192933.88 |
| 185809_2011 | 600564.13 | 198084.17 | 190907_2011 | 604725.00 | 196476.22 | 195670_2011 | 607555.75 | 192792.36 |
| 185809_2011 | 600610.00 | 198129.73 | 190907_2011 | 604676.75 | 196399.28 | 195670_2011 | 607688.06 | 192819.23 |
| 186010_2011 | 600770.94 | 198045.98 | 191090_2011 | 604788.94 | 196294.14 | 195772_2011 | 607580.63 | 192691.81 |
| 186010_2011 | 600753.31 | 197982.09 | 191090_2011 | 604884.69 | 196343.94 | 195772_2011 | 607695.13 | 192716.02 |
| 186217_2011 | 600967.00 | 198014.28 | 191287_2011 | 604881.00 | 196125.47 | 195874_2011 | 607595.13 | 192592.64 |
| 186217_2011 | 600963.94 | 197949.38 | 191287_2011 | 604982.13 | 196169.73 | 195874_2011 | 607724.88 | 192615.92 |
| 186283_2011 | 601026.56 | 198015.61 | 191500_2011 | 605001.88 | 195926.95 | 195976_2011 | 607608.88 | 192493.89 |
| 186283_2011 | 601037.44 | 197956.44 | 191500_2011 | 605078.56 | 195995.80 | 195976_2011 | 607750.69 | 192514.22 |
| 186409_2011 | 601131.06 | 198062.70 | 191697_2011 | 605185.94 | 195835.83 | 196078_2011 | 607622.00 | 192392.36 |
| 186409_2011 | 601161.94 | 198008.88 | 191697_2011 | 605121.44 | 195768.13 | 196078_2011 | 607773.00 | 192416.63 |
| 186608_2011 | 601299.56 | 198166.69 | 191896_2011 | 605324.06 | 195698.41 | 196180_2011 | 607640.38 | 192292.13 |
| 186608_2011 | 601343.25 | 198097.13 | 191896_2011 | 605256.50 | 195619.83 | 196180_2011 | 607781.06 | 192315.09 |
| 186819_2011 | 601516.69 | 198223.64 | 192092_2011 | 605465.31 | 195568.00 | 196282_2011 | 607656.94 | 192191.78 |
| 186819_2011 | 601506.19 | 198146.34 | 192092_2011 | 605406.25 | 195485.36 | 196282_2011 | 607792.00 | 192213.39 |
| 187030_2011 | 601655.69 | 198067.86 | 192293_2011 | 605635.56 | 195466.19 | 196389_2011 | 607671.25 | 192090.72 |
| 187030_2011 | 601704.63 | 198095.02 | 192293_2011 | 605568.50 | 195362.44 | 196389_2011 | 607799.50 | 192110.36 |
| 187217_2011 | 601716.00 | 197898.05 | 192492_2011 | 605779.44 | 195329.48 | 196485_2011 | 607688.88 | 191990.73 |
| 187217_2011 | 601791.81 | 197921.23 | 192492_2011 | 605731.56 | 195243.14 | 196485_2011 | 607808.50 | 192010.98 |
| 187409_2011 | 601816.81 | 197718.08 | 192703_2011 | 605966.06 | 195221.94 | 196585_2011 | 607703.44 | 191890.69 |
| 187409_2011 | 601880.31 | 197779.48 | 192703_2011 | 605896.38 | 195118.94 | 196585_2011 | 607800.00 | 191908.28 |
| 187611_2011 | 601960.13 | 197574.89 | 192904_2011 | 606134.81 | 195101.72 | 196685_2011 | 607719.13 | 191788.91 |
| 187611_2011 | 602017.25 | 197630.20 | 192904_2011 | 606053.75 | 195000.64 | 196685_2011 | 607826.13 | 191815.72 |
| 187814_2011 | 602164.63 | 197498.39 | 193110_2011 | 606317.75 | 194988.89 | 196783_2011 | 607737.19 | 191690.02 |
| 187814_2011 | 602115.56 | 197437.83 | 193110_2011 | 606214.56 | 194881.13 | 196783_2011 | 607834.56 | 191717.42 |
| 188018_2011 | 602318.31 | 197360.52 | 193318_2011 | 606372.13 | 194756.78 | 196986_2011 | 607797.56 | 191496.67 |
| 188018_2011 | 602266.13 | 197302.53 | 193318_2011 | 606465.94 | 194826.41 | 196986_2011 | 607894.50 | 191523.41 |
| 188207_2011 | 602386.56 | 197159.98 | 193523_2011 | 606493.81 | 194594.45 | 197177_2011 | 607850.56 | 191303.86 |
| 188207_2011 | 602450.81 | 197222.13 | 193523_2011 | 606573.38 | 194653.55 | 197177_2011 | 607965.69 | 191353.94 |

| | | | | | | | | |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 188414_2011 | 602498.69 | 196999.28 | 193724_2011 | 606619.50 | 194436.22 | 197383_2011 | 607933.75 | 191119.42 |
| 188414_2011 | 602577.44 | 197051.09 | 193724_2011 | 606694.50 | 194494.22 | 197383_2011 | 608047.69 | 191161.69 |
| 188643_2011 | 602732.81 | 196934.92 | 193926_2011 | 606740.88 | 194274.03 | 197578_2011 | 608035.69 | 190944.30 |
| 188643_2011 | 602712.94 | 196844.48 | 193926_2011 | 606815.88 | 194332.03 | 197578_2011 | 608120.06 | 190985.08 |
| 188808_2011 | 602854.88 | 196950.23 | 194129_2011 | 606863.81 | 194114.05 | | | |
| 188808_2011 | 602911.25 | 196875.67 | 194129_2011 | 606937.38 | 194168.95 | | | |

Anhang A2 Aare Bern – Worblaufen

| Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 177342_2011 | 601520.19 | 202802.84 | 179152_2011 | 601376.44 | 202177.3 | 181751_2011 | 600234.44 | 200278.98 |
| 177342_2011 | 601526.13 | 202912.16 | 179152_2011 | 601331.38 | 202073.77 | 181751_2011 | 600305.75 | 200333.59 |
| 177533_2011 | 601706.19 | 202789.72 | 179297_2011 | 601244.5 | 202237.06 | 181942_2011 | 600355.56 | 200124.66 |
| 177533_2011 | 601718.31 | 202883.72 | 179297_2011 | 601212.13 | 202124.2 | 181942_2011 | 600409.63 | 200177.77 |
| 177588_2011 | 601756.44 | 202771.11 | 179359_2011 | 601182.75 | 202270.17 | 182148_2011 | 600510.63 | 199979.19 |
| 177588_2011 | 601773.63 | 202853.31 | 179359_2011 | 601158.44 | 202160.8 | 182148_2011 | 600552.5 | 200038.7 |
| 177734_2011 | 601902.88 | 202748.23 | 179556_2011 | 600969.63 | 202265.53 | 182346_2011 | 600693.63 | 199882.8 |
| 177734_2011 | 601913.44 | 202833.73 | 179556_2011 | 600992.38 | 202167.92 | 182346_2011 | 600720.19 | 199948.13 |
| 177942_2011 | 602093.13 | 202737.34 | 179757_2011 | 600771.63 | 202173.47 | 182396_2011 | 600738.19 | 199857.53 |
| 177942_2011 | 602130.75 | 202809.7 | 179757_2011 | 600828.56 | 202104.73 | 182396_2011 | 600768.31 | 199933.77 |
| 178154_2011 | 602098.63 | 202615.83 | 179959_2011 | 600637.44 | 202000.48 | 182539_2011 | 600886.75 | 199818.45 |
| 178154_2011 | 602191.44 | 202552.02 | 179959_2011 | 600712.94 | 201962.44 | 182539_2011 | 600895.88 | 199892.13 |
| 178341_2011 | 601969.75 | 202471.83 | 180158_2011 | 600546.06 | 201825.36 | 182741_2011 | 601096.44 | 199844.27 |
| 178341_2011 | 602030.31 | 202420.67 | 180158_2011 | 600622.25 | 201784.25 | 182741_2011 | 601086.19 | 199899.55 |
| 178480_2011 | 601876.63 | 202366.75 | 180752_2011 | 600300.06 | 201274.44 | 182947_2011 | 601295.81 | 199873.28 |
| 178480_2011 | 601968.56 | 202308.23 | 180752_2011 | 600376.69 | 201258.03 | 182947_2011 | 601292.44 | 199939.17 |
| 178544_2011 | 601848.19 | 202319.5 | 180951_2011 | 600267.69 | 201079.53 | 183200_2011 | 601475.44 | 199810.31 |
| 178544_2011 | 601922 | 202253.02 | 180951_2011 | 600335.06 | 201063.08 | 183200_2011 | 601545.56 | 199825.52 |
| 178747_2011 | 601719.06 | 202182.25 | 181149_2011 | 600214 | 200888.56 | 183316_2011 | 601482.94 | 199706 |
| 178747_2011 | 601756.63 | 202117.34 | 181149_2011 | 600277.94 | 200872.92 | 183316_2011 | 601537.38 | 199700.11 |
| 178949_2011 | 601552.44 | 202130.78 | 181349_2011 | 600164.56 | 200694 | 183529_2011 | 601445.88 | 199523.98 |
| 178949_2011 | 601551.19 | 202046.41 | 181349_2011 | 600274.38 | 200667.31 | 183529_2011 | 601506.69 | 199467.13 |
| 179110_2011 | 601414.69 | 202179.92 | 181549_2011 | 600148.31 | 200481.34 | | | |
| 179110_2011 | 601379.06 | 202059.56 | 181549_2011 | 600239.06 | 200496.72 | | | |

Anhang A3 Aare Altreu – Solothurn

| Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. |
|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 95021_2010 | 607504.40 | 228390.56 | 98916_2010 | 604504.94 | 227959.08 | 104245_2010 | 600664.15 | 226324.75 |
| 95021_2010 | 607539.76 | 228297.27 | 98916_2010 | 604359.02 | 227859.43 | 104245_2010 | 600833.61 | 226329.38 |
| 95045_2010 | 607483.94 | 228380.44 | 99196_2010 | 604273.83 | 228166.32 | 104328_2010 | 600696.84 | 226209.85 |
| 95045_2010 | 607514.19 | 228289.14 | 99196_2010 | 604173.81 | 228019.45 | 104328_2010 | 600853.02 | 226280.07 |
| 95138_2010 | 607385.59 | 228356.46 | 99490_2010 | 603975.44 | 228306.72 | 104443_2010 | 600726.88 | 226116.08 |
| 95138_2010 | 607427.36 | 228284.61 | 99490_2010 | 603960.10 | 228095.71 | 104443_2010 | 600904.12 | 226166.10 |
| 95176_2010 | 607357.73 | 228346.99 | 99732_2010 | 603692.98 | 228249.63 | 104513_2010 | 600726.49 | 226033.89 |
| 95176_2010 | 607386.08 | 228262.75 | 99732_2010 | 603801.71 | 228036.83 | 104513_2010 | 600930.85 | 226106.79 |
| 95183_2010 | 607343.77 | 228359.02 | 99974_2010 | 603460.87 | 228076.89 | 104622_2010 | 600723.18 | 225923.74 |
| 95183_2010 | 607382.56 | 228257.15 | 99974_2010 | 603659.33 | 227922.89 | 104622_2010 | 600974.65 | 226009.90 |
| 95201_2010 | 607326.34 | 228341.25 | 100254_2010 | 603347.04 | 227781.36 | 104723_2010 | 600717.21 | 225880.14 |

| | | | | | | | | |
|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| 95201_2010 | 607366.77 | 228262.74 | 100254_2010 | 603526.55 | 227728.88 | 104723_2010 | 600986.60 | 225874.63 |
| 95255_2010 | 607267.27 | 228318.79 | 100426_2010 | 603356.33 | 227577.97 | 104823_2010 | 600708.64 | 225818.93 |
| 95255_2010 | 607330.53 | 228228.80 | 100426_2010 | 603502.96 | 227589.23 | 104823_2010 | 600948.99 | 225757.13 |
| 95301_2010 | 607229.11 | 228279.05 | 100594_2010 | 603342.10 | 227392.36 | 104976_2010 | 600668.35 | 225715.00 |
| 95301_2010 | 607301.66 | 228207.41 | 100594_2010 | 603520.59 | 227434.42 | 104976_2010 | 600847.74 | 225601.46 |
| 95373_2010 | 607170.78 | 228215.24 | 101008_2010 | 603237.50 | 227230.54 | 105112_2010 | 600613.46 | 225632.48 |
| 95373_2010 | 607284.12 | 228150.24 | 101008_2010 | 603317.86 | 227145.92 | 105112_2010 | 600719.96 | 225493.85 |
| 95494_2010 | 607115.39 | 228101.51 | 101207_2010 | 603142.91 | 227107.49 | 105248_2010 | 600505.47 | 225549.48 |
| 95494_2010 | 607238.65 | 228044.74 | 101207_2010 | 603234.46 | 227049.45 | 105248_2010 | 600610.61 | 225415.52 |
| 95788_2010 | 606998.32 | 227844.53 | 101336_2010 | 603096.24 | 227028.30 | 105363_2010 | 600423.93 | 225494.68 |
| 95788_2010 | 607110.43 | 227774.76 | 101336_2010 | 603200.12 | 226959.96 | 105363_2010 | 600494.60 | 225361.51 |
| 95895_2010 | 606944.68 | 227762.66 | 101774_2010 | 602946.18 | 226830.27 | 105473_2010 | 600327.99 | 225460.37 |
| 95895_2010 | 607050.80 | 227673.58 | 101774_2010 | 603028.53 | 226609.72 | 105473_2010 | 600393.29 | 225304.85 |
| 96014_2010 | 606858.65 | 227680.65 | 101972_2010 | 602783.88 | 226737.65 | 105602_2010 | 600275.26 | 225465.94 |
| 96014_2010 | 606974.78 | 227582.61 | 101972_2010 | 602831.07 | 226533.46 | 105602_2010 | 600210.62 | 225279.71 |
| 96193_2010 | 606730.40 | 227571.65 | 102231_2010 | 602549.22 | 226720.90 | 105758_2010 | 600194.73 | 225514.22 |
| 96193_2010 | 606852.77 | 227435.52 | 102231_2010 | 602555.56 | 226492.08 | 105758_2010 | 600059.26 | 225418.09 |
| 96450_2010 | 606538.88 | 227436.00 | 102450_2010 | 602323.20 | 226700.23 | 105904_2010 | 600161.59 | 225627.81 |
| 96450_2010 | 606602.87 | 227301.67 | 102450_2010 | 602345.05 | 226490.83 | 105904_2010 | 599991.22 | 225579.41 |
| 96642_2010 | 606351.89 | 227390.89 | 102702_2010 | 602064.80 | 226670.76 | 106052_2010 | 600124.46 | 225770.40 |
| 96642_2010 | 606422.08 | 227225.94 | 102702_2010 | 602103.65 | 226465.87 | 106052_2010 | 599961.43 | 225725.80 |
| 96803_2010 | 606210.96 | 227336.08 | 102938_2010 | 601824.45 | 226617.95 | 106158_2010 | 600105.38 | 225873.15 |
| 96803_2010 | 606263.37 | 227164.18 | 102938_2010 | 601883.55 | 226409.74 | 106158_2010 | 599938.02 | 225831.34 |
| 97021_2010 | 606028.07 | 227369.89 | 103116_2010 | 601650.64 | 226594.88 | 106276_2010 | 600046.70 | 226007.30 |
| 97021_2010 | 606013.54 | 227124.25 | 103116_2010 | 601708.62 | 226365.94 | 106276_2010 | 599899.20 | 225902.86 |
| 97284_2010 | 605778.55 | 227344.22 | 103294_2010 | 601493.83 | 226586.48 | 106388_2010 | 599936.80 | 226097.11 |
| 97284_2010 | 605734.68 | 227151.17 | 103294_2010 | 601523.51 | 226313.00 | 106388_2010 | 599838.43 | 225945.58 |
| 97507_2010 | 605542.85 | 227351.91 | 103471_2010 | 601322.47 | 226561.78 | 106539_2010 | 599719.64 | 226121.44 |
| 97507_2010 | 605535.58 | 227208.81 | 103471_2010 | 601345.84 | 226299.54 | 106539_2010 | 599755.35 | 225945.07 |
| 97735_2010 | 605308.60 | 227336.49 | 103653_2010 | 601159.18 | 226543.70 | 106664_2010 | 599573.60 | 226072.54 |
| 97735_2010 | 605321.77 | 227187.42 | 103653_2010 | 601156.56 | 226314.79 | 106664_2010 | 599673.48 | 225904.78 |
| 97946_2010 | 605107.23 | 227356.46 | 103795_2010 | 601031.80 | 226522.57 | 106809_2010 | 599442.01 | 225976.21 |
| 97946_2010 | 605099.74 | 227181.06 | 103795_2010 | 601006.14 | 226354.66 | 106809_2010 | 599603.05 | 225808.42 |
| 98171_2010 | 604959.71 | 227426.31 | 103892_2010 | 600957.26 | 226534.24 | 106990_2010 | 599343.04 | 225801.10 |
| 98171_2010 | 604819.19 | 227227.60 | 103892_2010 | 600896.91 | 226398.23 | 106990_2010 | 599505.65 | 225703.28 |
| 98384_2010 | 604835.84 | 227549.20 | 104034_2010 | 600730.73 | 226597.28 | 107169_2010 | 599320.76 | 225570.89 |
| 98384_2010 | 604666.17 | 227420.10 | 104034_2010 | 600891.13 | 226409.56 | 107169_2010 | 599531.19 | 225580.90 |
| 98717_2010 | 604627.44 | 227806.56 | 104103_2010 | 600667.05 | 226492.16 | 107307_2010 | 599337.66 | 225397.53 |
| 98717_2010 | 604481.74 | 227699.67 | 104103_2010 | 600870.87 | 226430.38 | 107307_2010 | 599548.87 | 225474.19 |

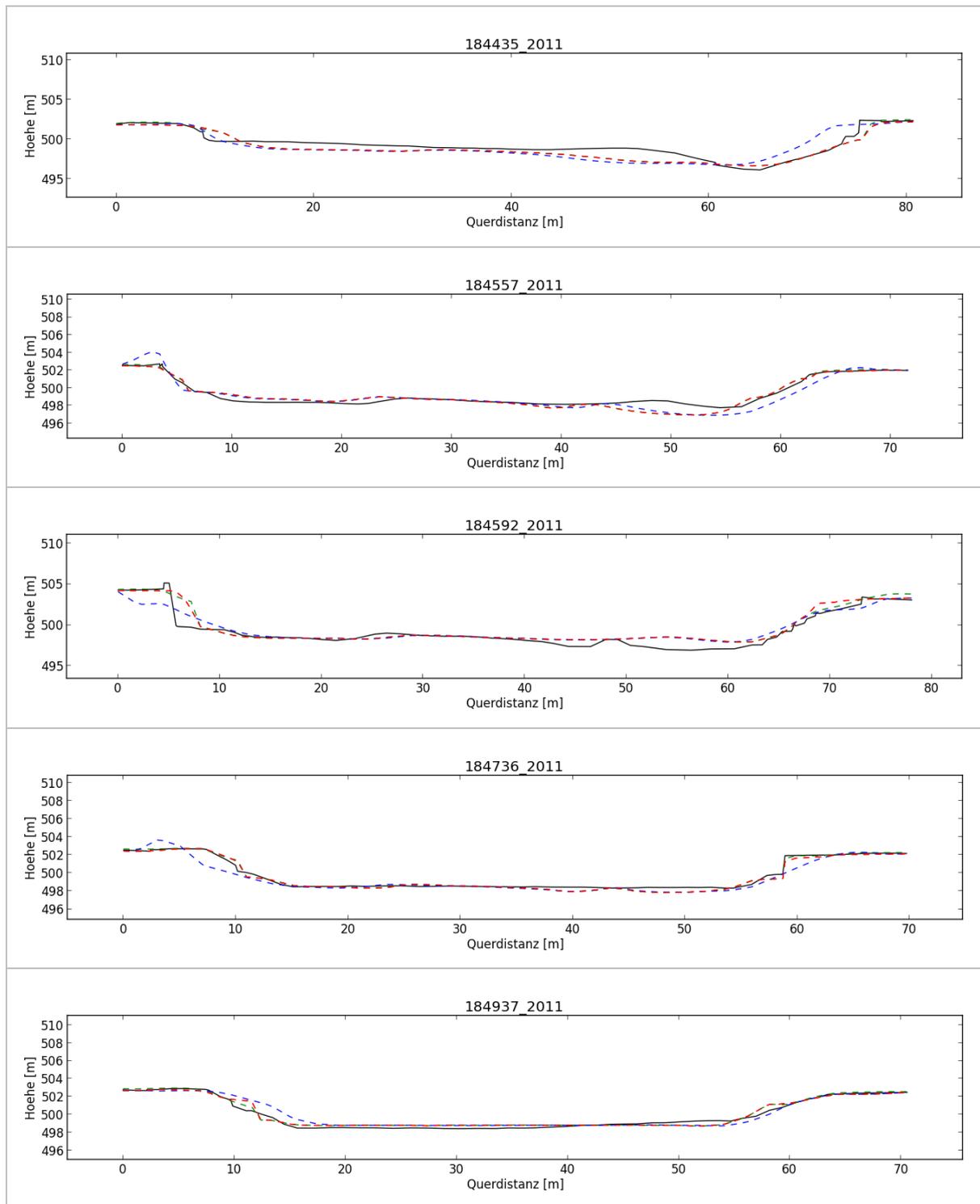
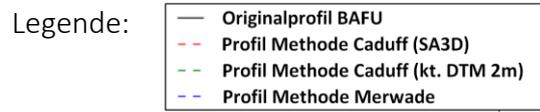
Anhang A4 Emme Gerlafingen – Luterbach

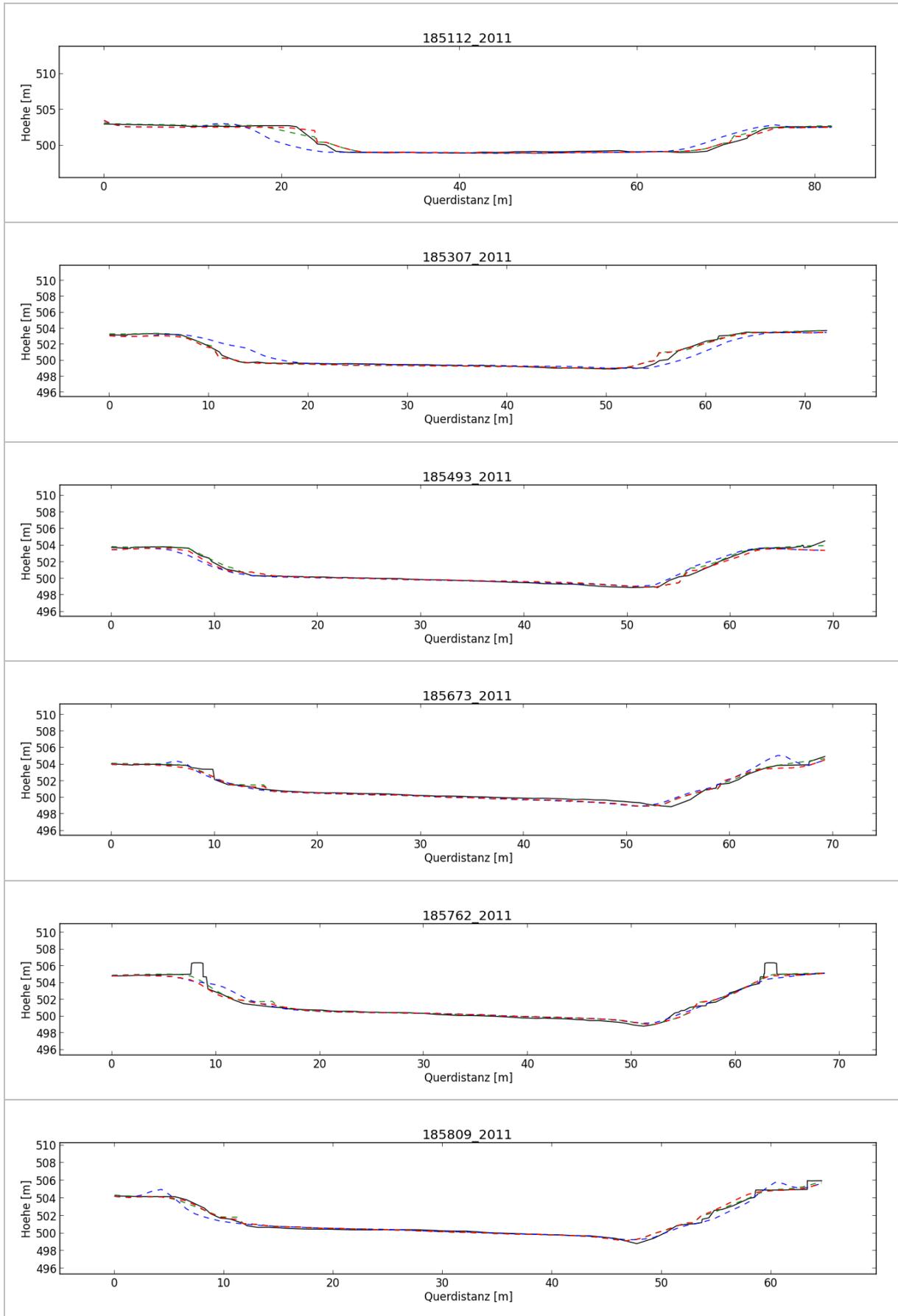
| Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. | Profil | x-Koord. | y-Koord. |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 217_2013 | 610109.19 | 229612.25 | 2794_2013 | 610805.56 | 227165.28 | 5188_2013 | 609472.75 | 225263.73 |
| 217_2013 | 610042.75 | 229581.45 | 2794_2013 | 610746.06 | 227180.33 | 5188_2013 | 609388.44 | 225285.17 |
| 249_2013 | 610127.69 | 229580.53 | 2996_2013 | 610739.81 | 226976.19 | 5261_2013 | 609459.63 | 225186.84 |
| 249_2013 | 610051.75 | 229554.92 | 2996_2013 | 610678.38 | 226988.27 | 5261_2013 | 609371.44 | 225213.16 |
| 404_2013 | 610175.88 | 229427.44 | 3196_2013 | 610692.38 | 226777.66 | 5321_2013 | 609442.25 | 225132.84 |
| 404_2013 | 610090.00 | 229410.72 | 3196_2013 | 610615.19 | 226804.92 | 5321_2013 | 609359.06 | 225162.03 |
| 567_2013 | 610239.69 | 229289.31 | 3330_2013 | 610629.69 | 226639.09 | 5394_2013 | 609425.38 | 225060.98 |

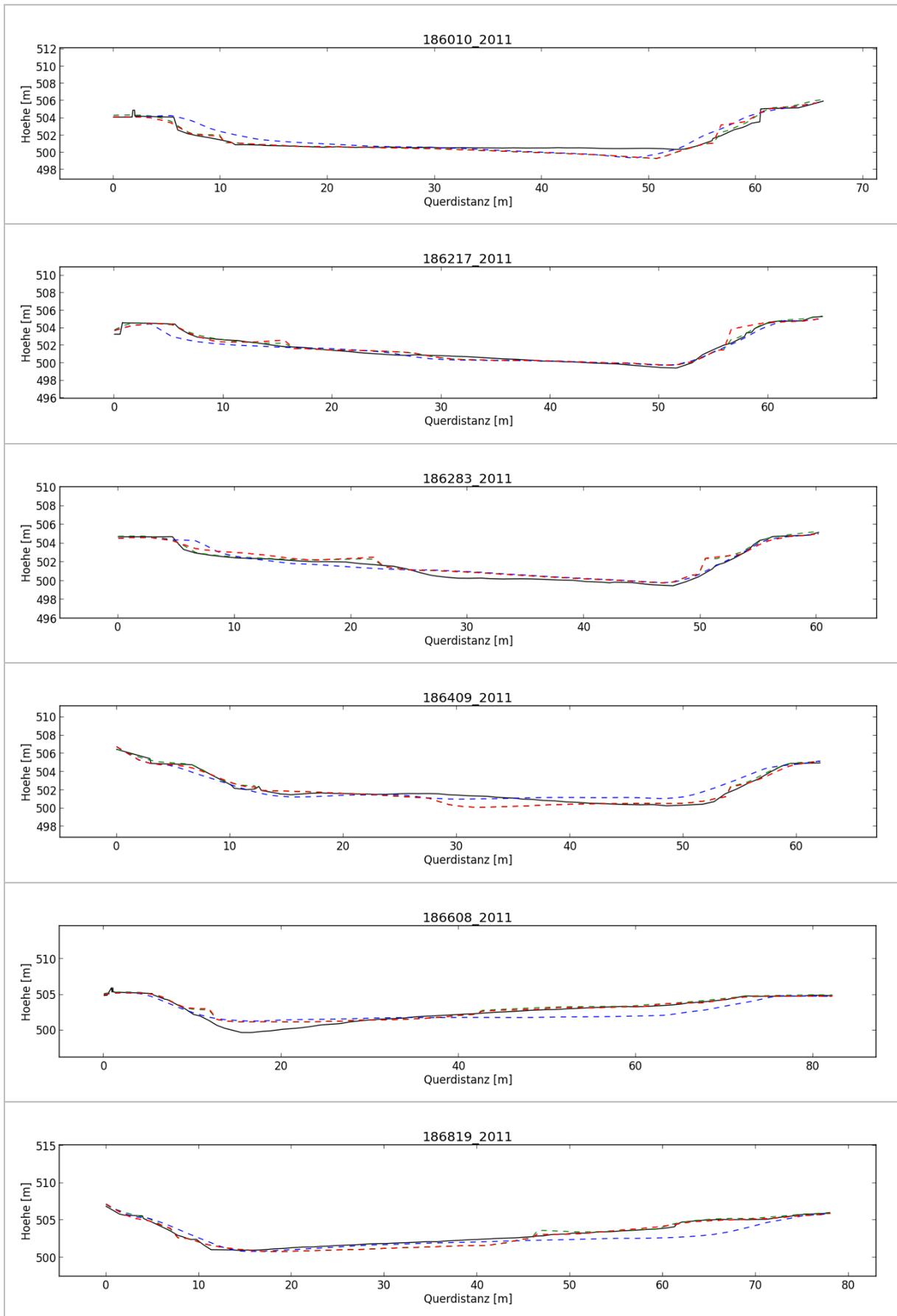
| | | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 567_2013 | 610146.88 | 229244.86 | 3330_2013 | 610564.00 | 226702.50 | 5394_2013 | 609339.88 | 225083.91 |
| 607_2013 | 610224.56 | 229237.11 | 3385_2013 | 610576.88 | 226609.81 | 5464_2013 | 609406.50 | 224995.44 |
| 607_2013 | 610160.31 | 229217.52 | 3385_2013 | 610524.75 | 226667.08 | 5464_2013 | 609323.19 | 225014.02 |
| 671_2013 | 610262.19 | 229188.70 | 3585_2013 | 610460.94 | 226449.16 | 5497_2013 | 609403.56 | 224959.30 |
| 671_2013 | 610185.69 | 229144.89 | 3585_2013 | 610382.13 | 226522.61 | 5497_2013 | 609316.06 | 224984.06 |
| 806_2013 | 610285.88 | 229045.92 | 3786_2013 | 610294.44 | 226327.88 | 5544_2013 | 609382.25 | 224917.94 |
| 806_2013 | 610235.38 | 229028.34 | 3786_2013 | 610235.13 | 226388.50 | 5544_2013 | 609304.94 | 224938.66 |
| 1006_2013 | 610371.31 | 228865.80 | 3934_2013 | 610169.31 | 226243.73 | 5597_2013 | 609377.00 | 224862.95 |
| 1006_2013 | 610306.50 | 228840.97 | 3934_2013 | 610094.88 | 226319.08 | 5597_2013 | 609295.19 | 224884.67 |
| 1205_2013 | 610423.44 | 228671.31 | 3987_2013 | 610131.31 | 226208.75 | 5691_2013 | 609354.38 | 224769.33 |
| 1205_2013 | 610363.75 | 228651.72 | 3987_2013 | 610082.06 | 226254.97 | 5691_2013 | 609271.94 | 224800.63 |
| 1402_2013 | 610507.31 | 228499.97 | 4187_2013 | 609983.56 | 226072.84 | 5795_2013 | 609319.06 | 224673.52 |
| 1402_2013 | 610408.81 | 228449.28 | 4187_2013 | 609947.19 | 226108.25 | 5795_2013 | 609237.88 | 224696.08 |
| 1592_2013 | 610546.00 | 228300.80 | 4386_2013 | 609838.19 | 225937.22 | 5872_2013 | 609291.69 | 224600.92 |
| 1592_2013 | 610479.38 | 228288.94 | 4386_2013 | 609791.00 | 225984.25 | 5872_2013 | 609217.56 | 224626.50 |
| 1674_2013 | 610561.63 | 228218.53 | 4542_2013 | 609730.63 | 225825.23 | 5965_2013 | 609268.69 | 224513.53 |
| 1674_2013 | 610511.38 | 228212.33 | 4542_2013 | 609693.81 | 225859.09 | 5965_2013 | 609186.75 | 224537.05 |
| 1800_2013 | 610564.25 | 228087.14 | 4562_2013 | 609718.19 | 225810.41 | 5976_2013 | 609258.50 | 224503.27 |
| 1800_2013 | 610500.69 | 228091.92 | 4562_2013 | 609683.13 | 225842.48 | 5976_2013 | 609179.13 | 224526.83 |
| 1866_2013 | 610580.69 | 228011.56 | 4591_2013 | 609692.63 | 225744.94 | 5981_2013 | 609256.56 | 224498.03 |
| 1866_2013 | 610480.38 | 228032.27 | 4591_2013 | 609670.31 | 225824.33 | 5981_2013 | 609181.06 | 224521.06 |
| 2018_2013 | 610579.50 | 227893.20 | 4738_2013 | 609622.88 | 225669.39 | 5987_2013 | 609254.56 | 224491.61 |
| 2018_2013 | 610533.25 | 227865.83 | 4738_2013 | 609562.13 | 225709.16 | 5987_2013 | 609179.00 | 224516.39 |
| 2220_2013 | 610686.94 | 227722.25 | 4860_2013 | 609560.00 | 225567.47 | 6016_2013 | 609252.56 | 224460.67 |
| 2220_2013 | 610633.50 | 227688.97 | 4860_2013 | 609492.94 | 225611.30 | 6016_2013 | 609168.00 | 224484.48 |
| 2285_2013 | 610713.75 | 227661.94 | 4907_2013 | 609537.88 | 225511.06 | 6078_2013 | 609232.50 | 224403.98 |
| 2285_2013 | 610667.00 | 227633.89 | 4907_2013 | 609484.19 | 225586.47 | 6078_2013 | 609147.81 | 224430.56 |
| 2329_2013 | 610754.13 | 227624.47 | 4929_2013 | 609537.13 | 225507.84 | 6148_2013 | 609211.25 | 224339.02 |
| 2329_2013 | 610669.00 | 227594.45 | 4929_2013 | 609464.19 | 225543.34 | 6148_2013 | 609121.63 | 224360.73 |
| 2409_2013 | 610784.75 | 227565.64 | 4998_2013 | 609511.50 | 225443.33 | 6251_2013 | 609182.81 | 224238.80 |
| 2409_2013 | 610736.50 | 227524.88 | 4998_2013 | 609433.19 | 225466.97 | 6251_2013 | 609109.50 | 224262.16 |
| 2598_2013 | 610830.44 | 227366.23 | 5057_2013 | 609501.75 | 225388.80 | | | |
| 2598_2013 | 610771.25 | 227363.69 | 5057_2013 | 609419.06 | 225412.23 | | | |
| 2695_2013 | 610830.38 | 227262.64 | 5121_2013 | 609500.63 | 225323.33 | | | |
| 2695_2013 | 610766.56 | 227275.30 | 5121_2013 | 609404.31 | 225351.34 | | | |

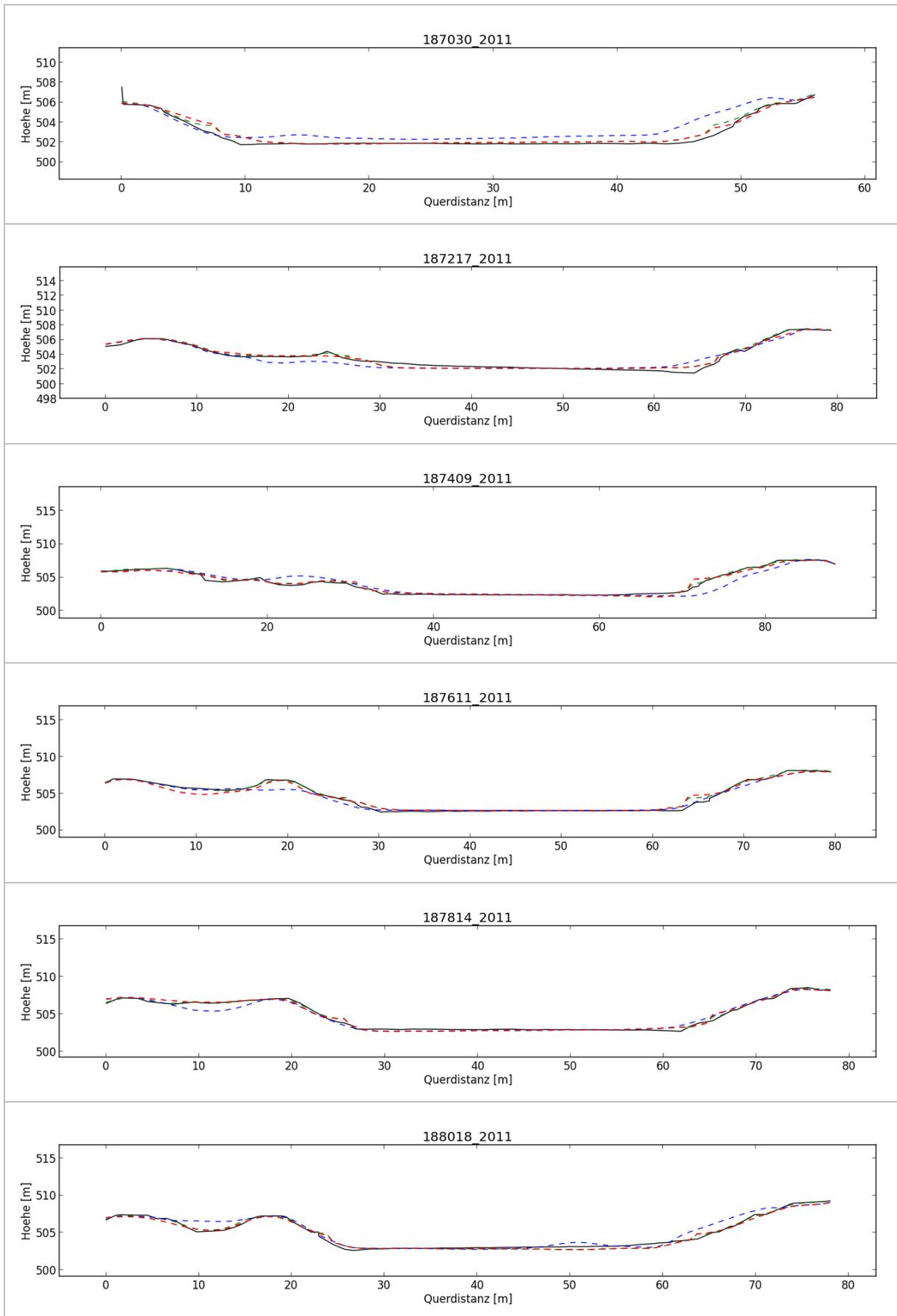
Anhang B Grafiken Querprofile

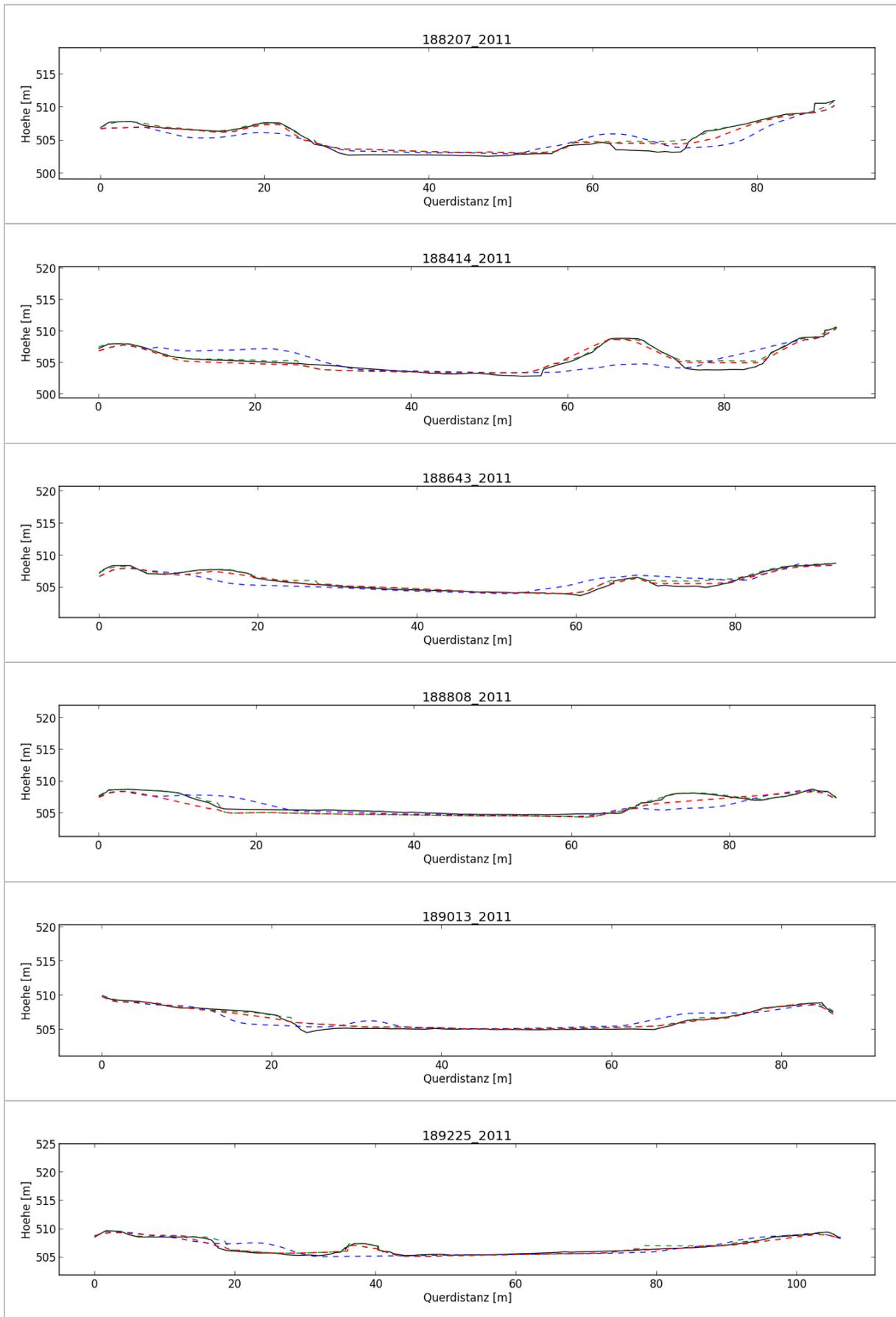
Anhang B1 – Profilgrafiken Aare Münsingen – Bern

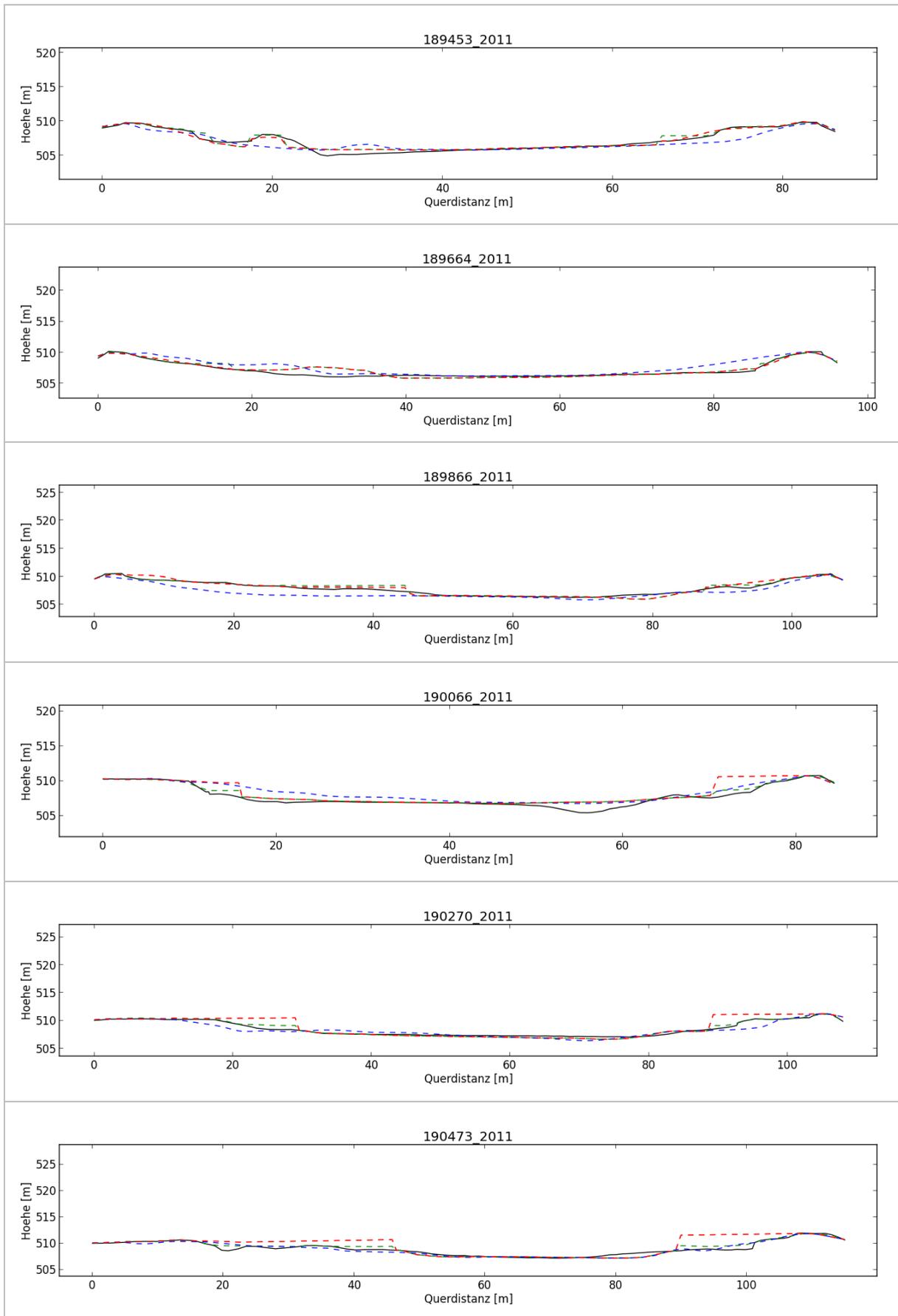


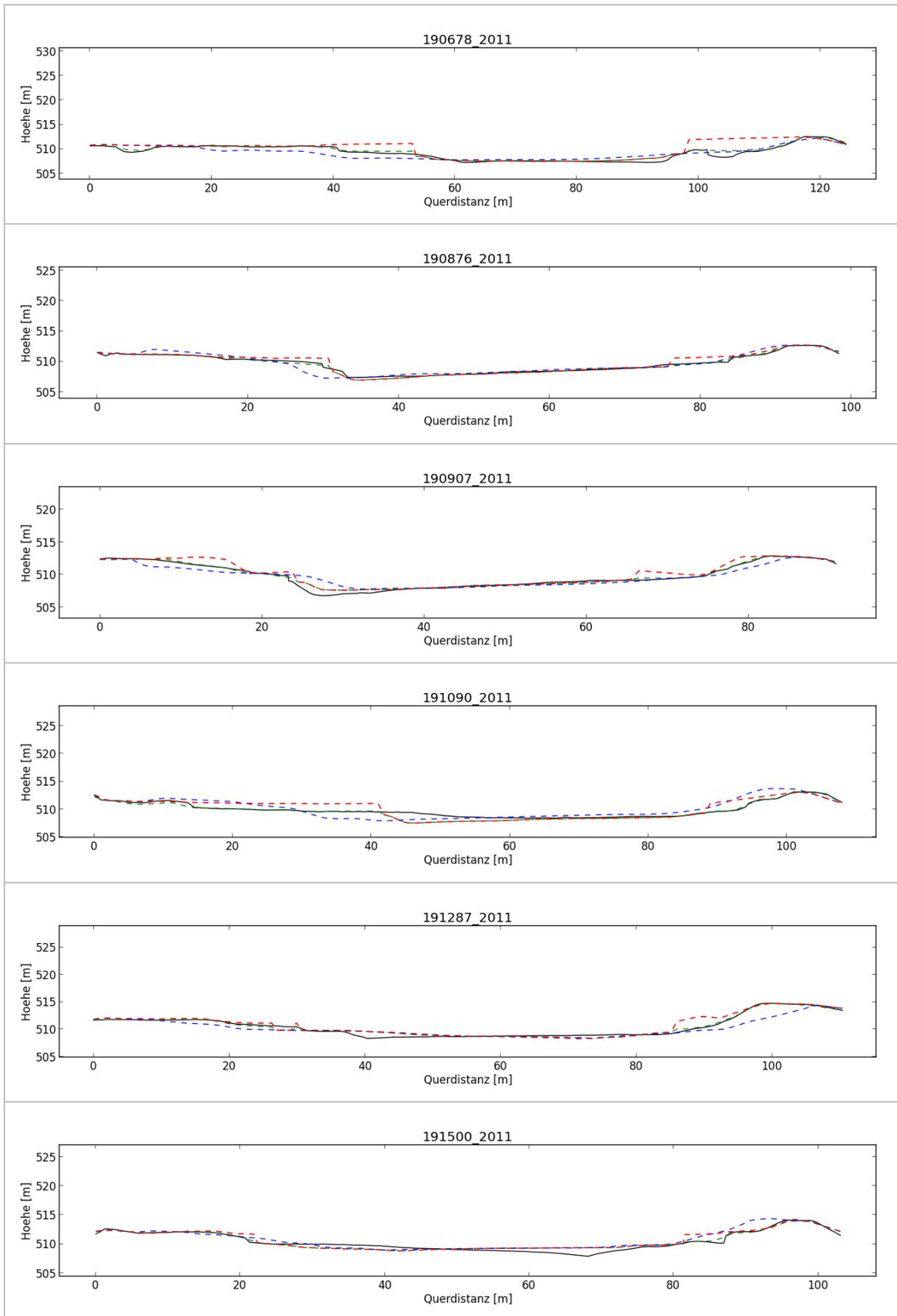


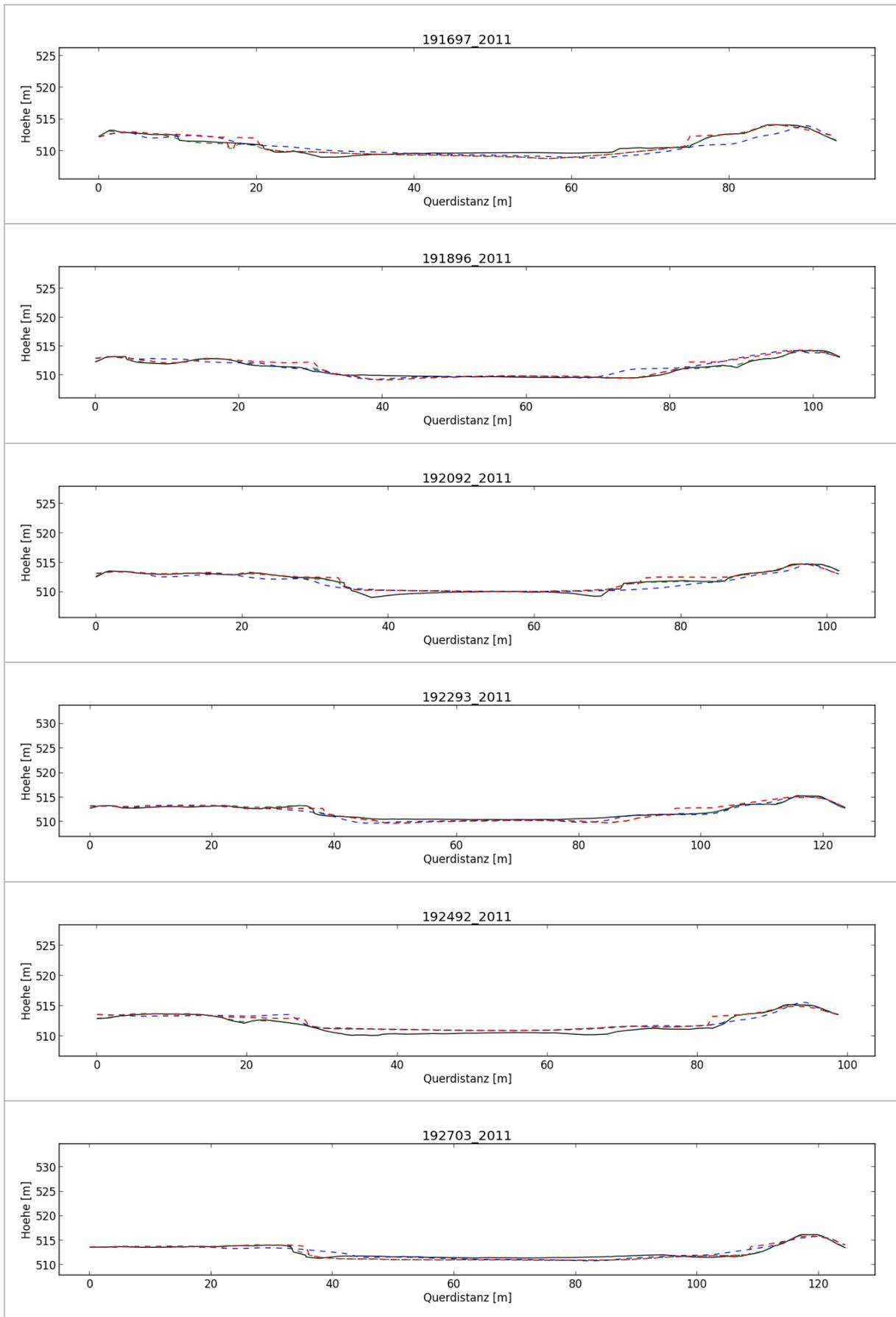


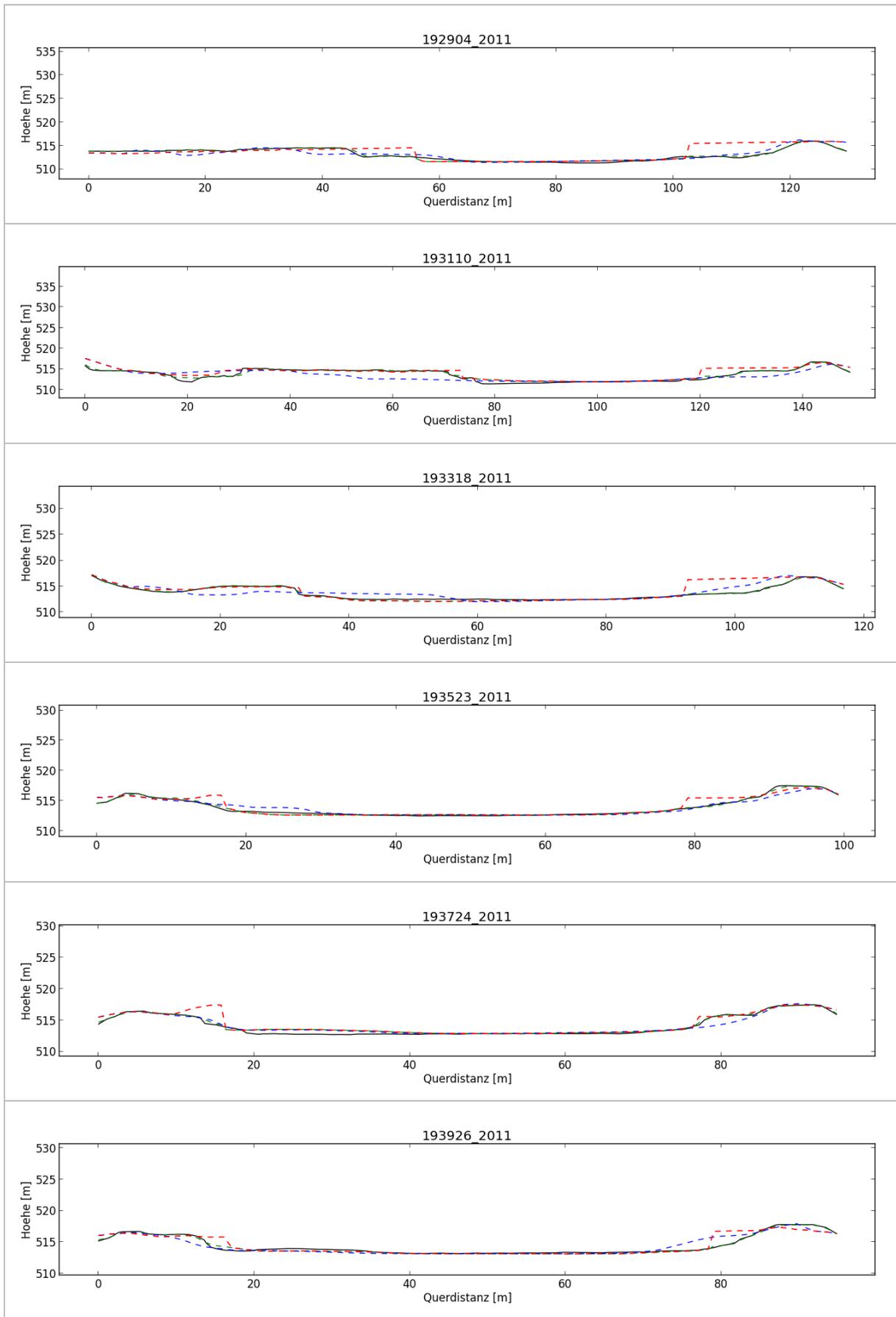


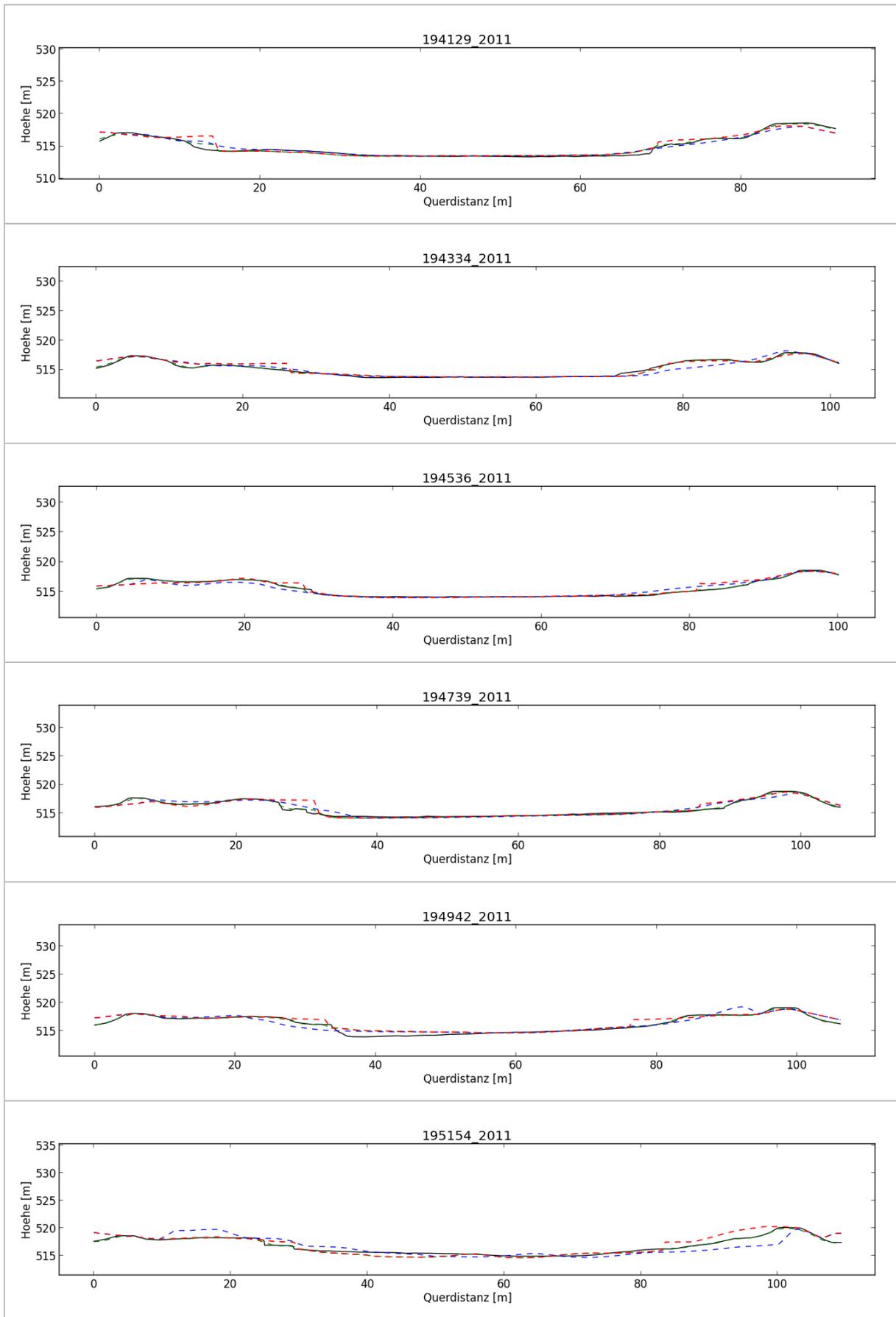


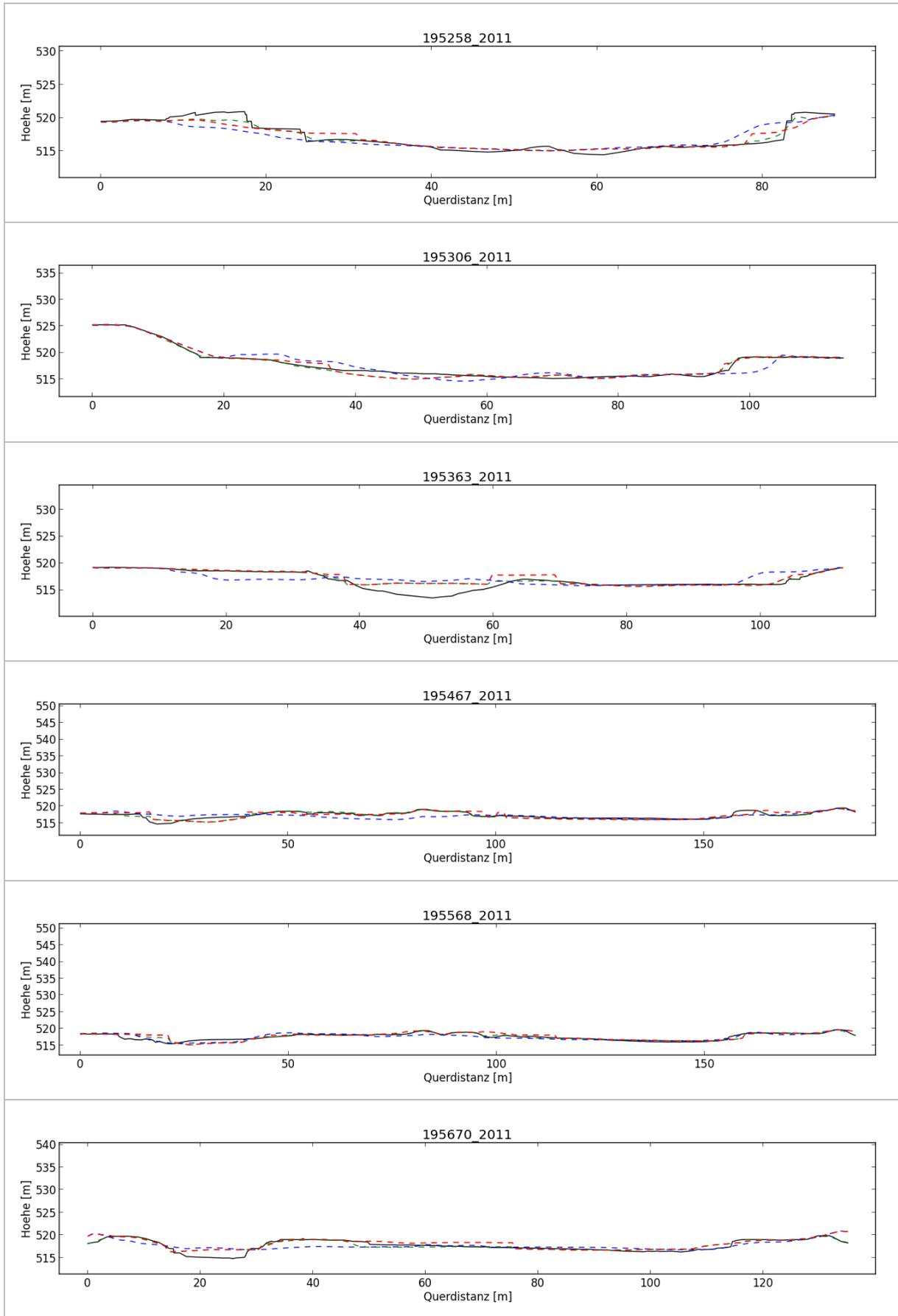


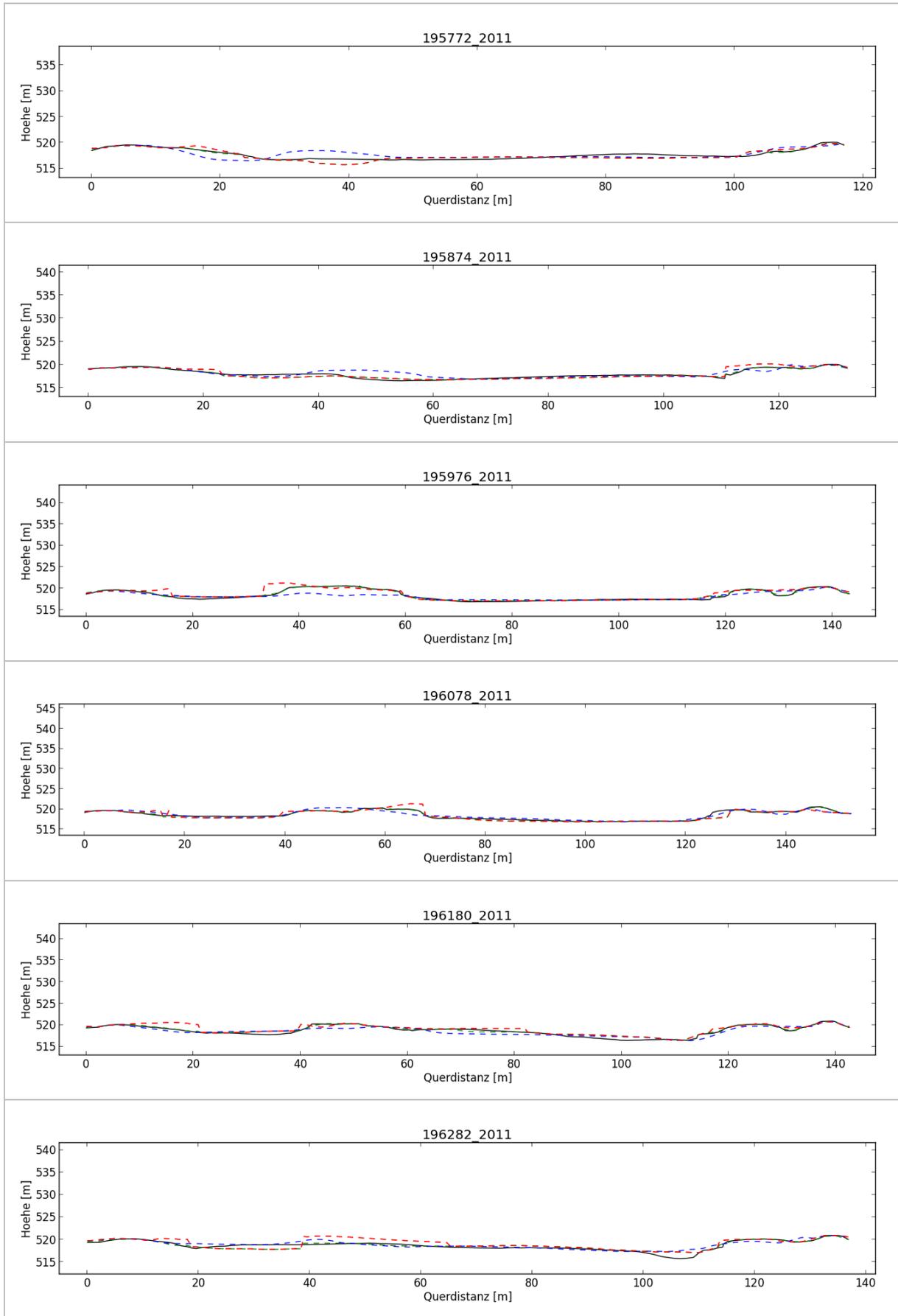


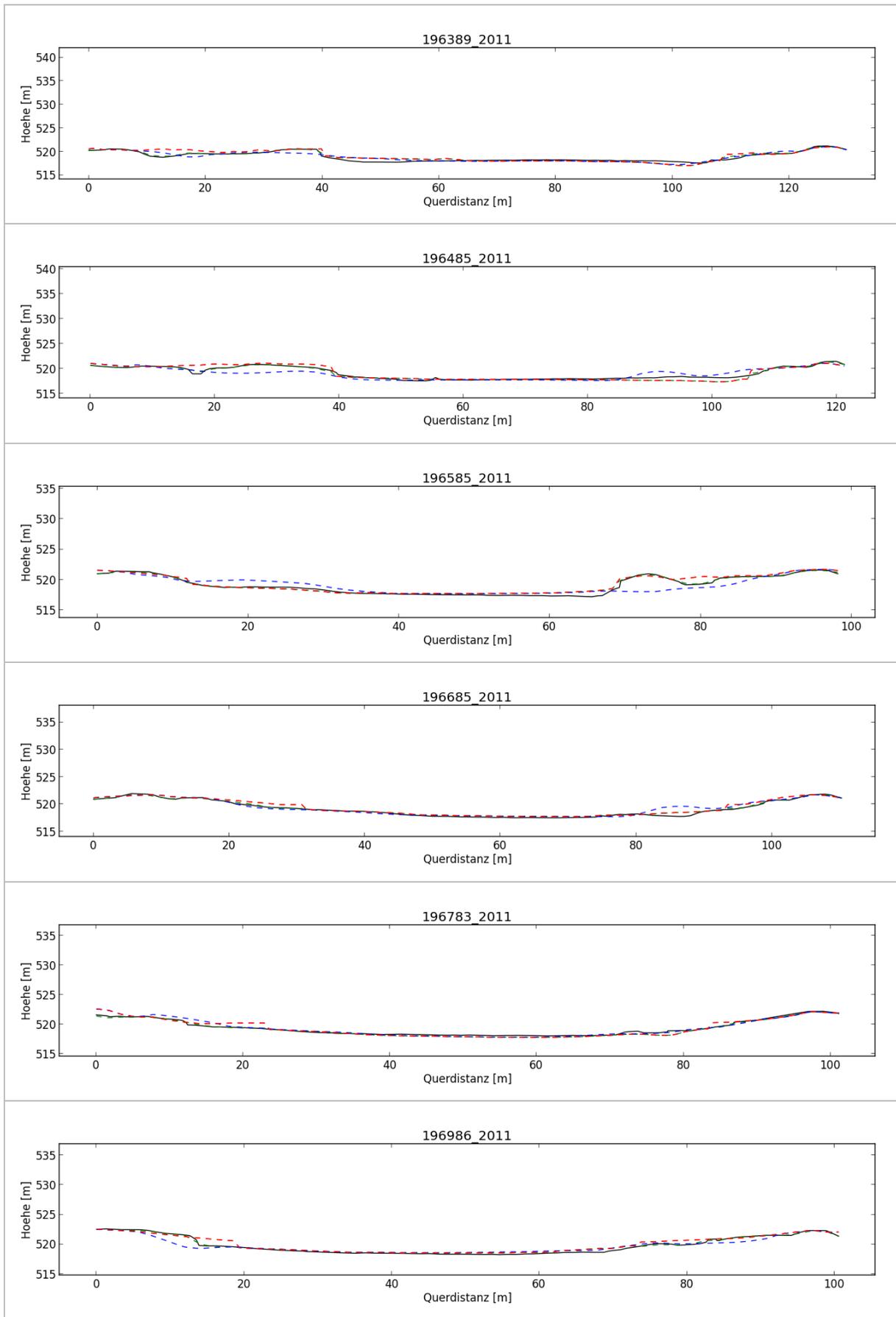


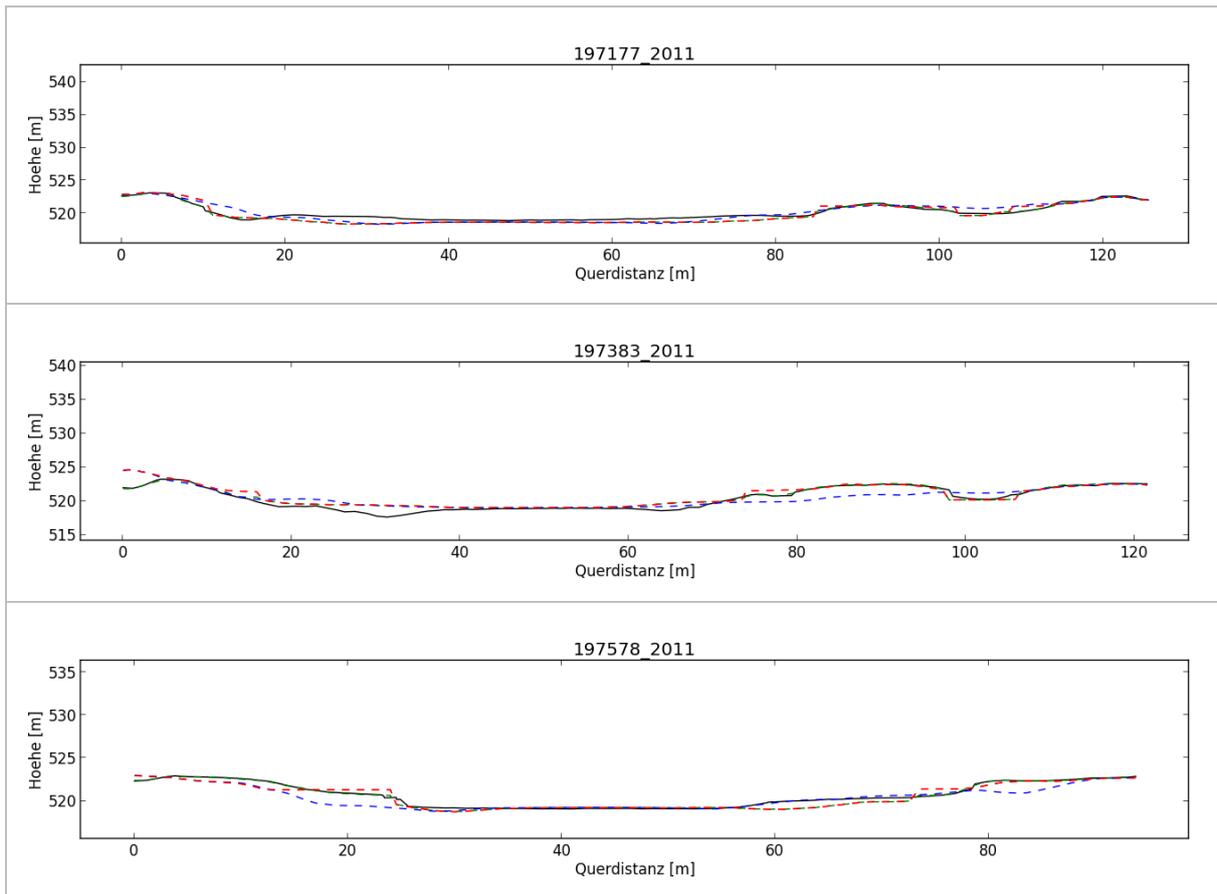




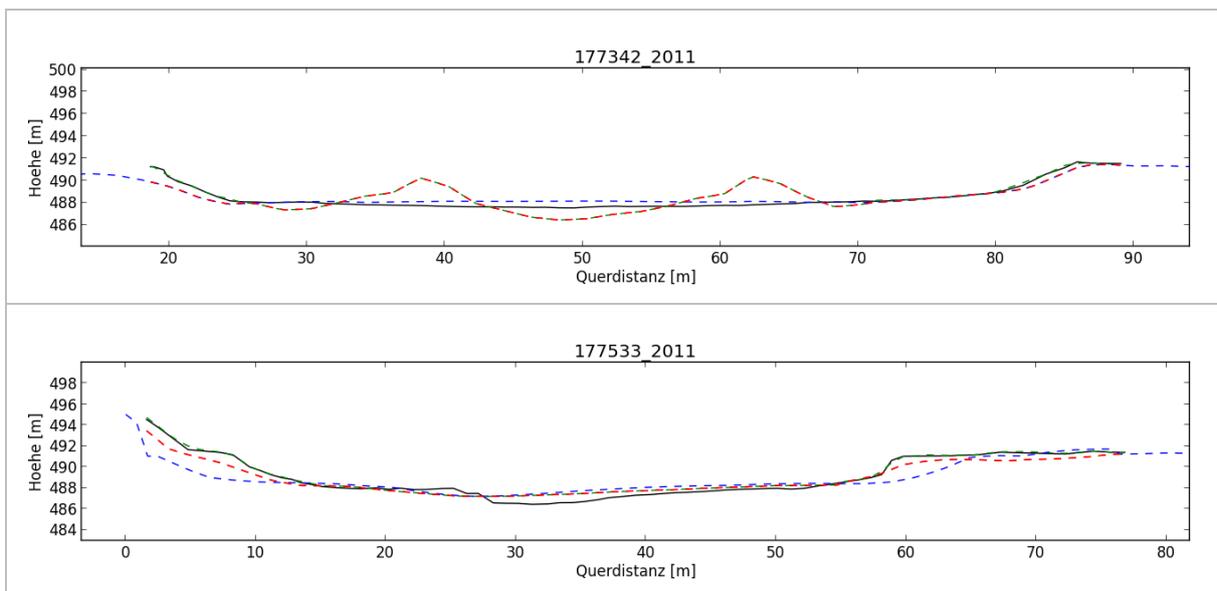


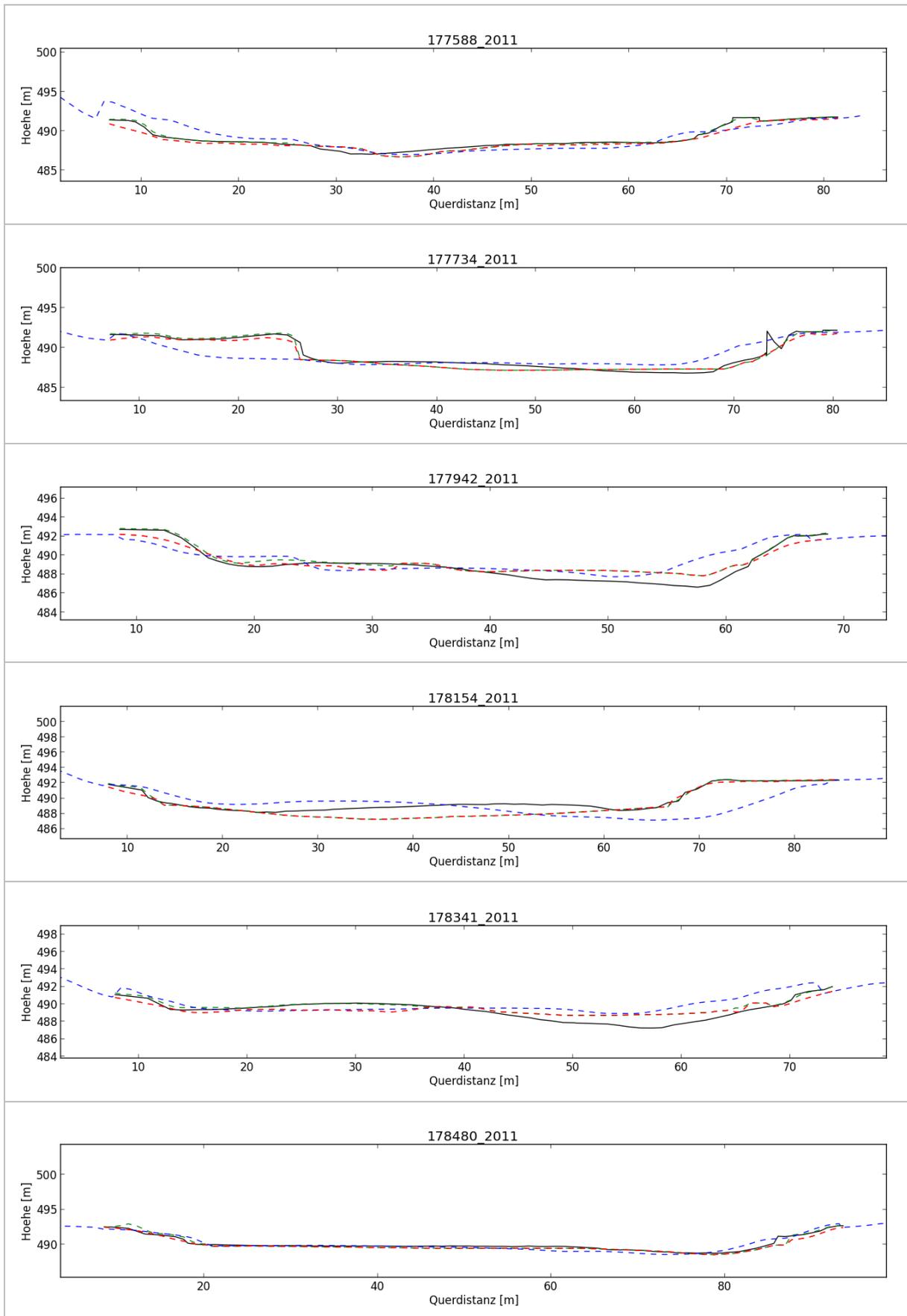


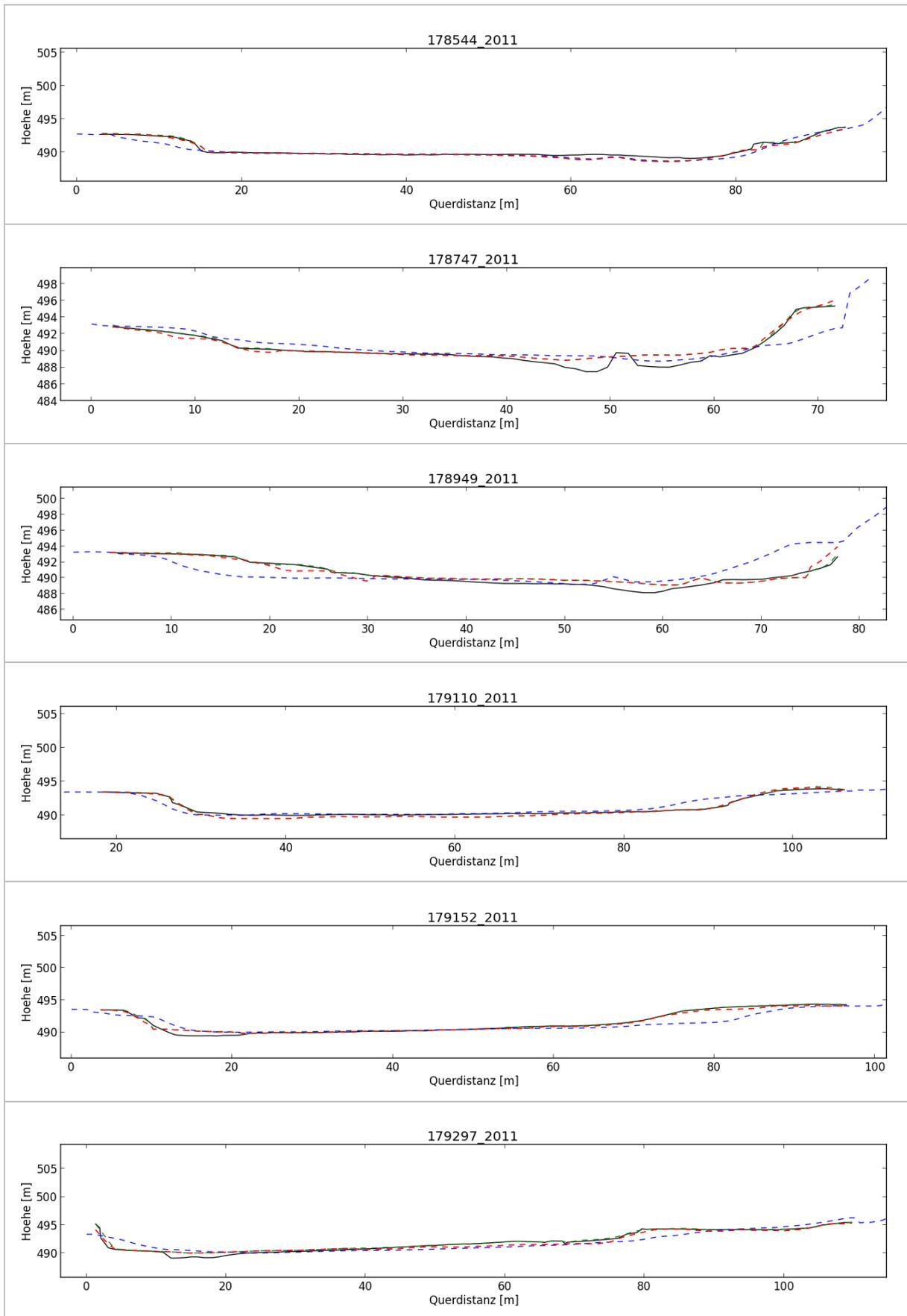


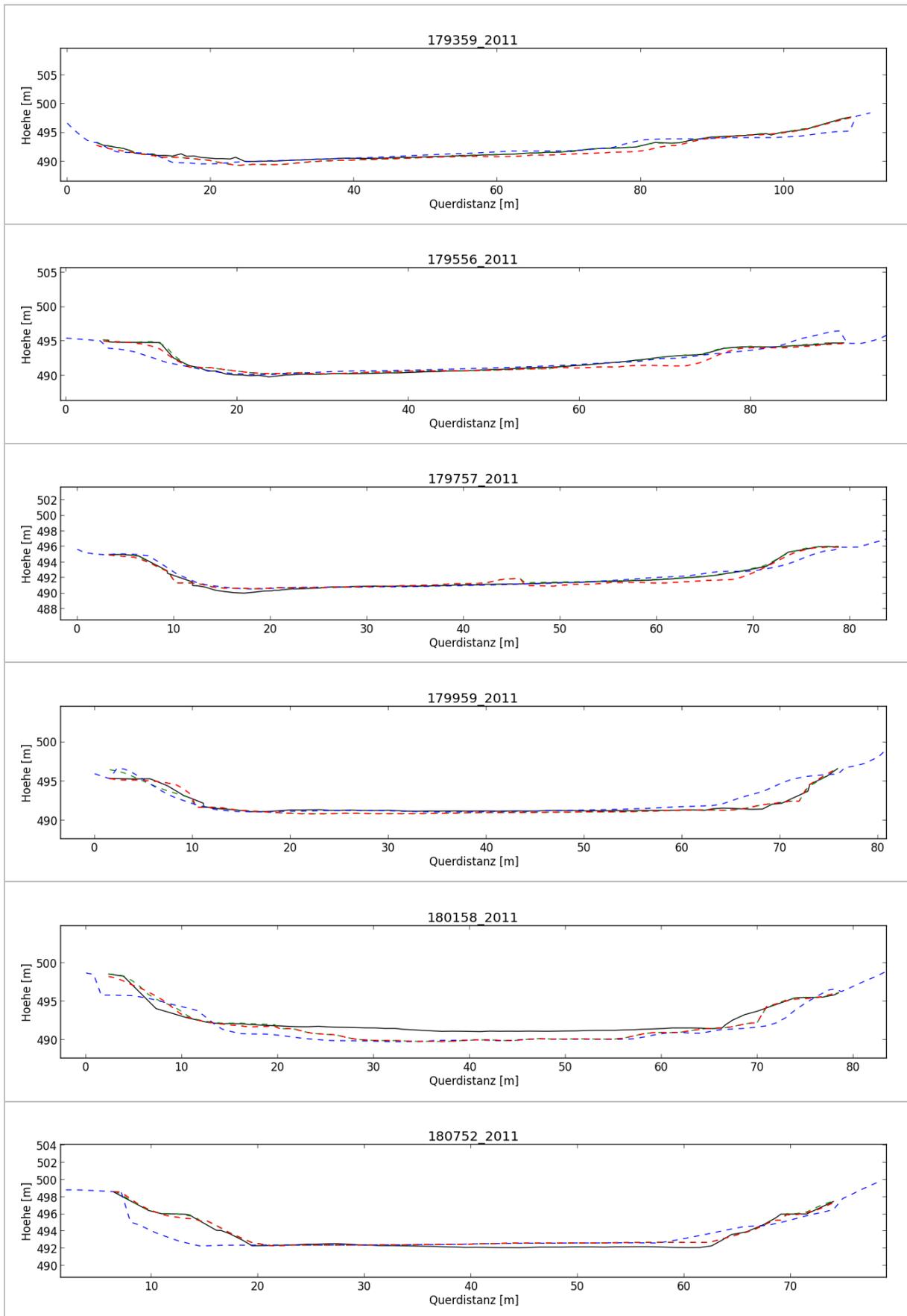


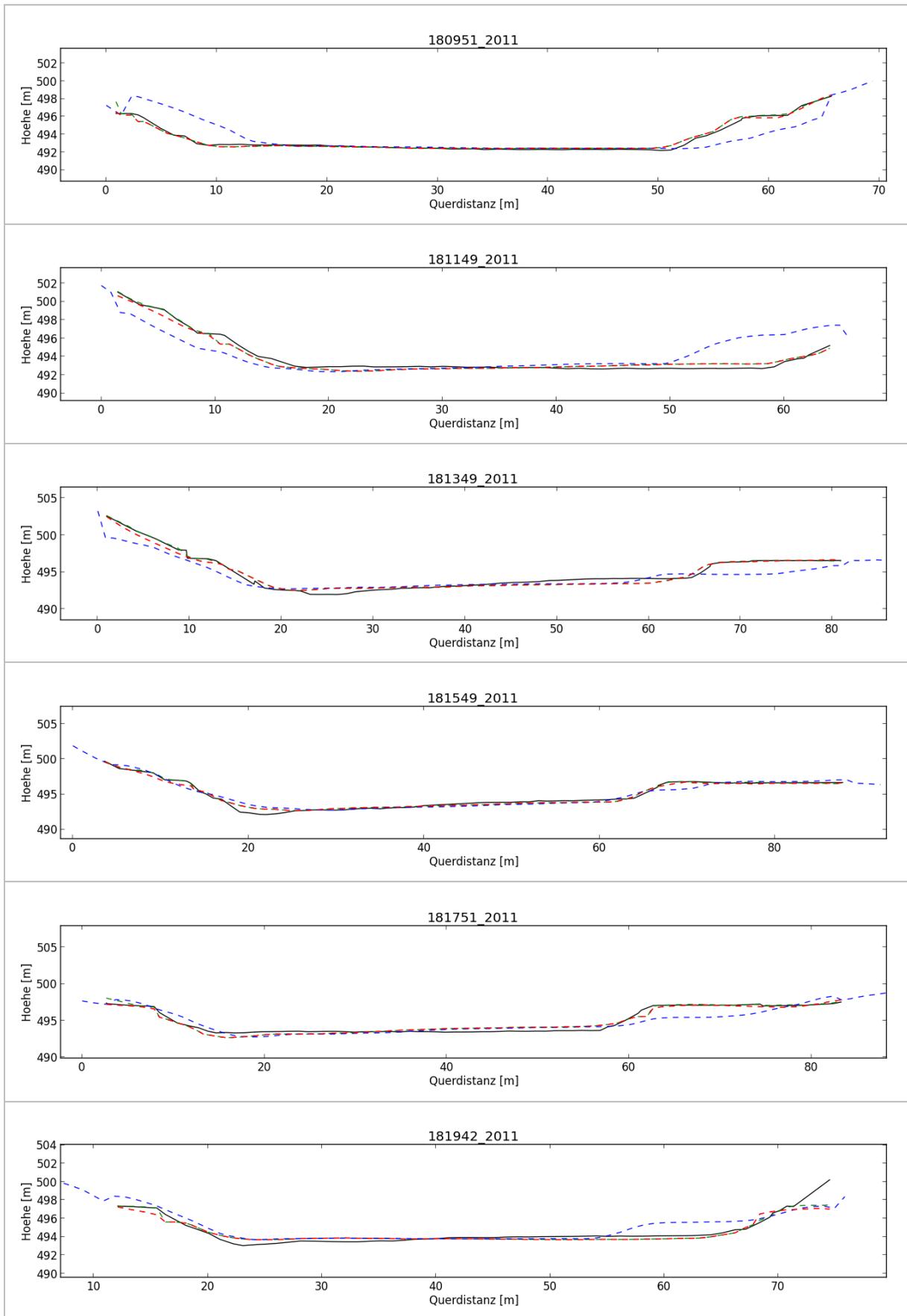
Anhang B2 – Profilgrafiken Aare Bern – Worblaufen

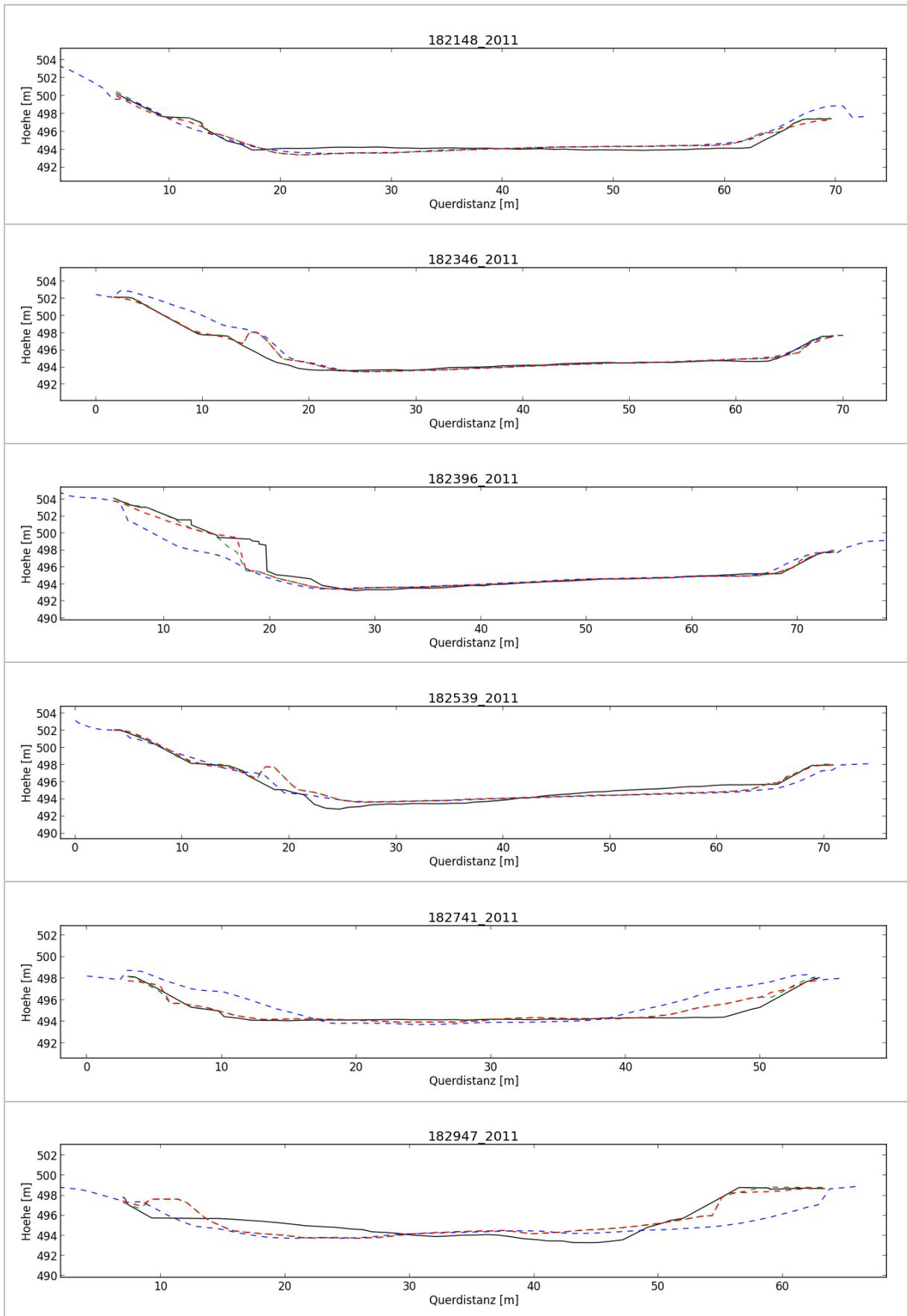


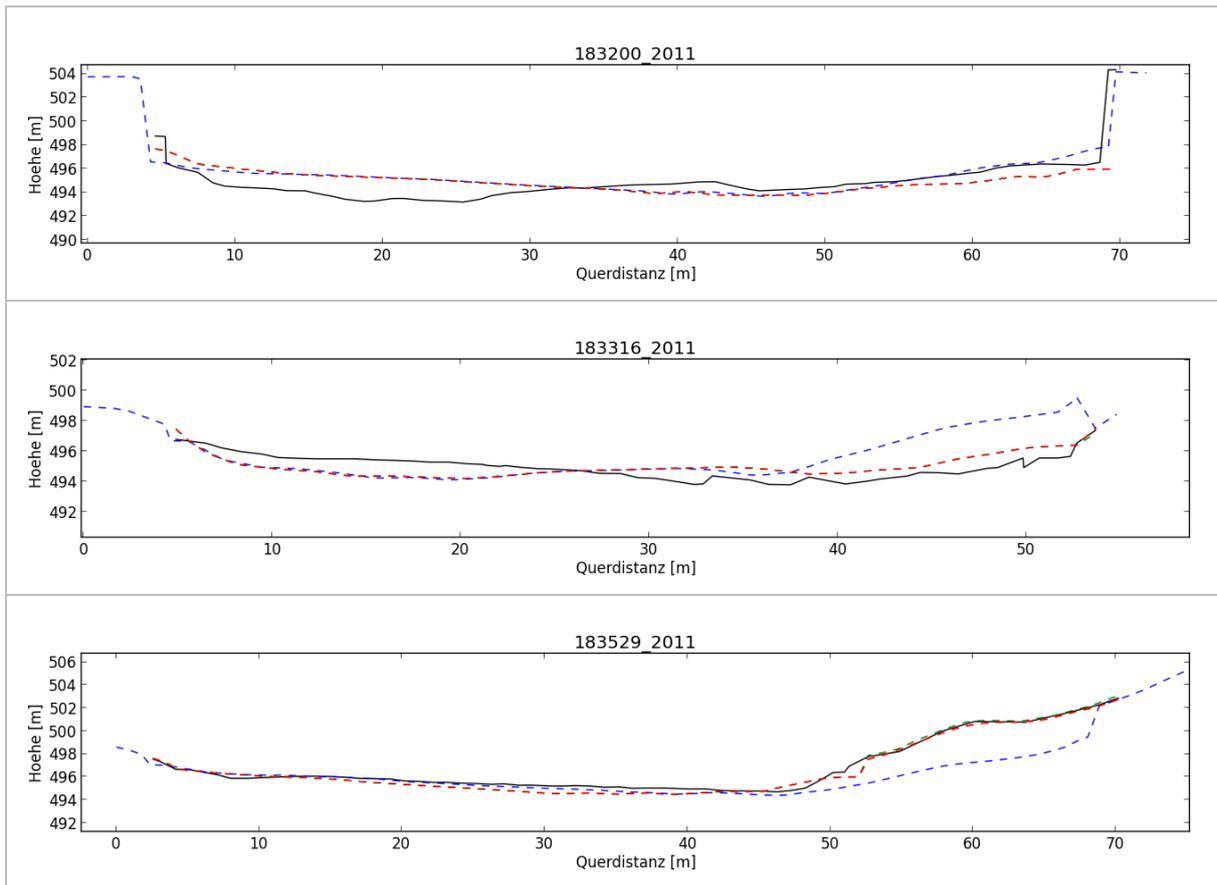




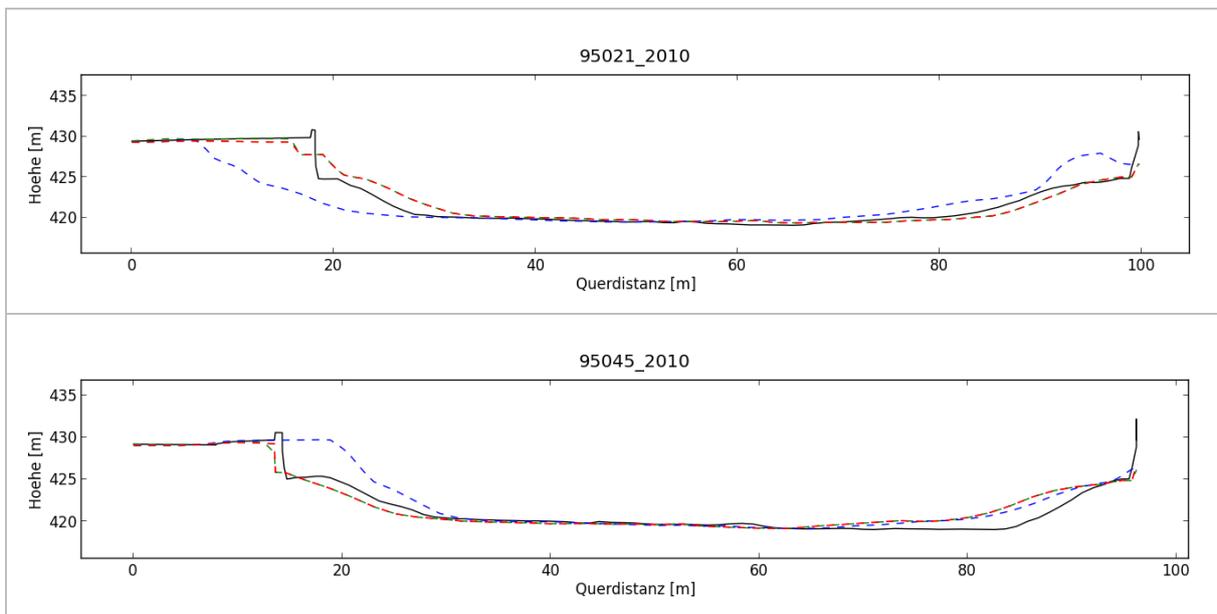


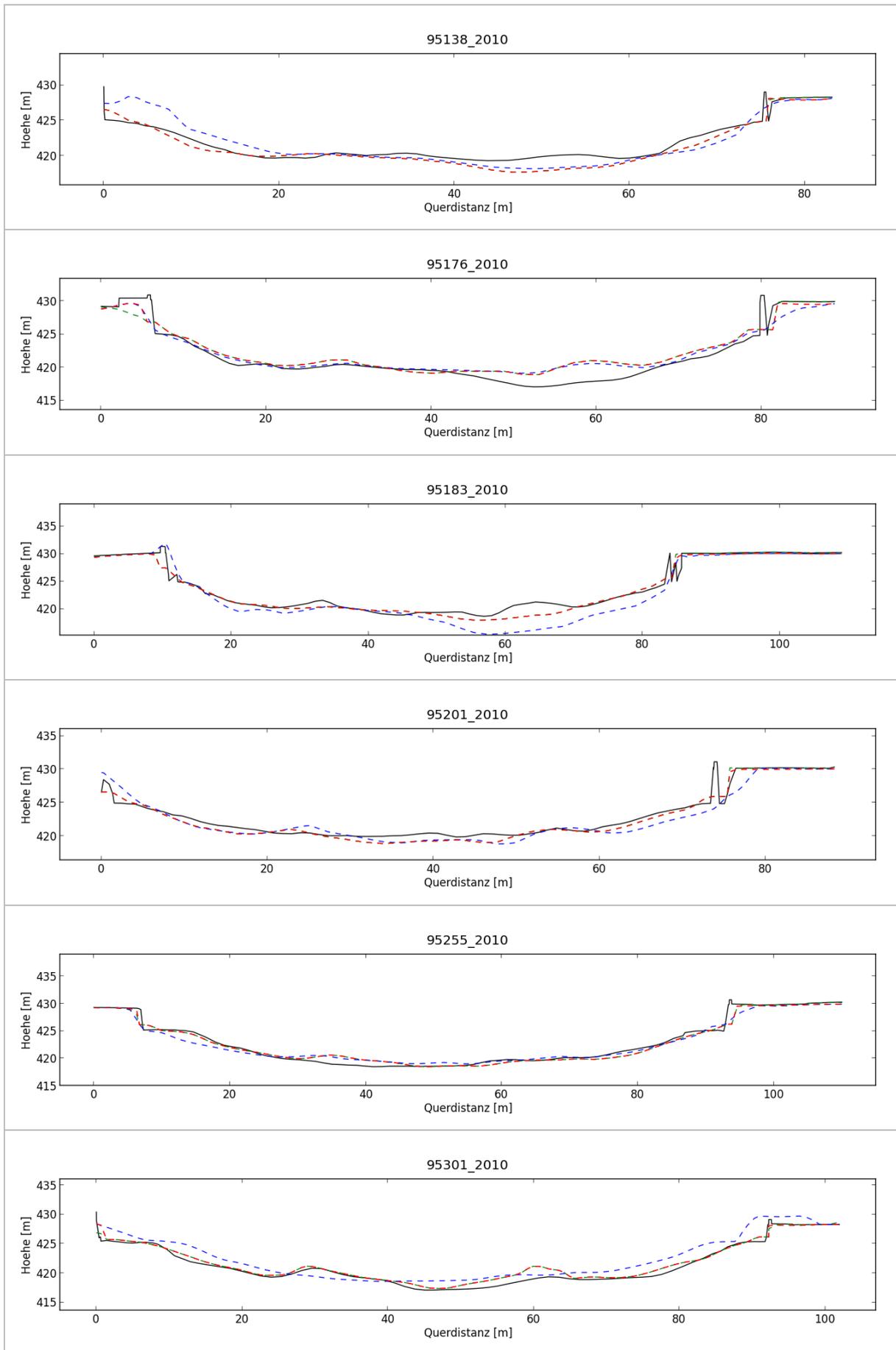


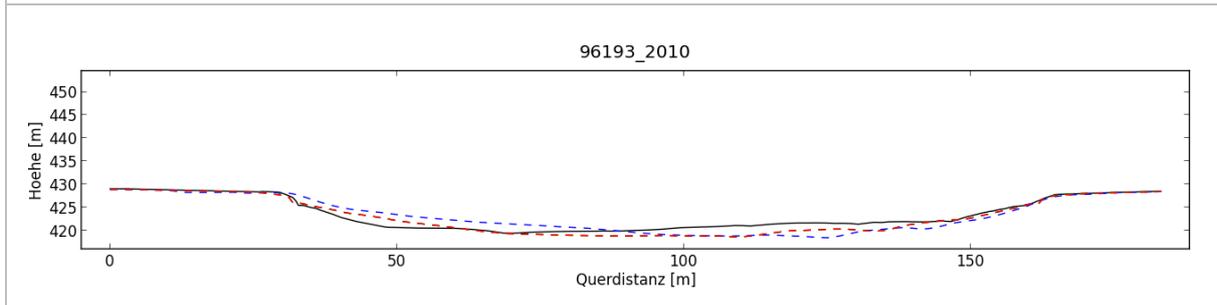
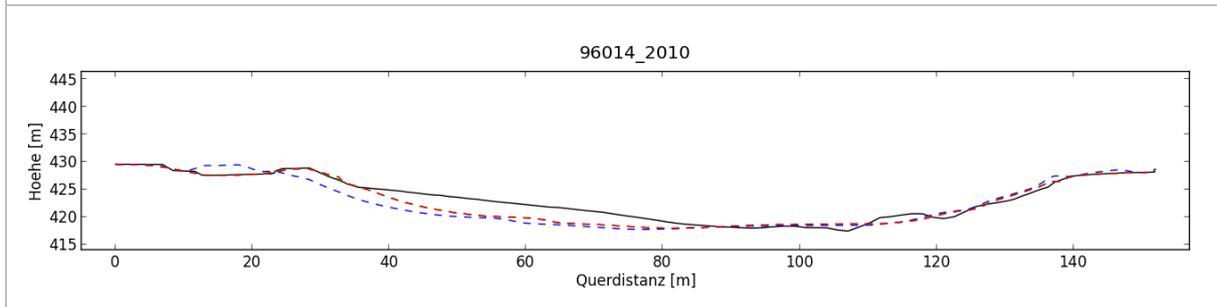
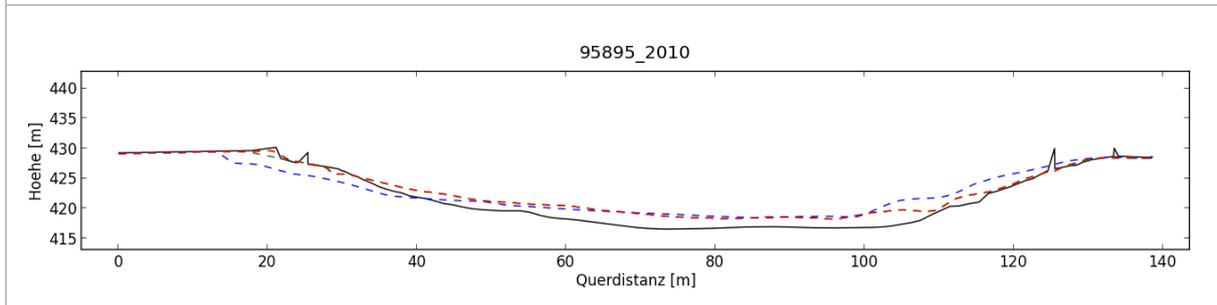
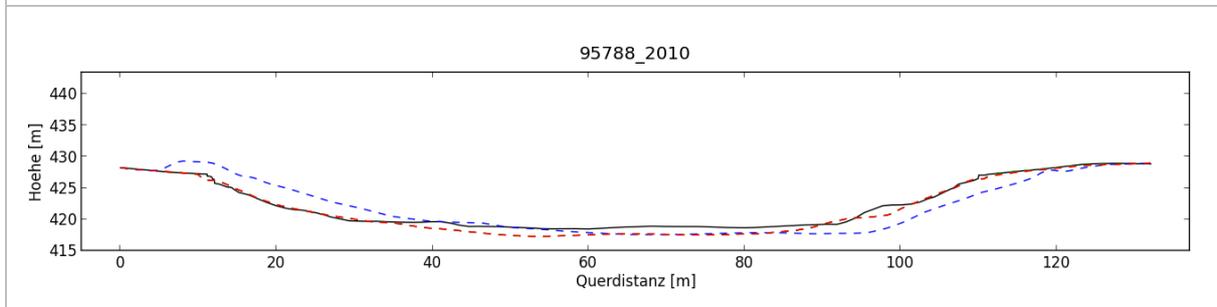
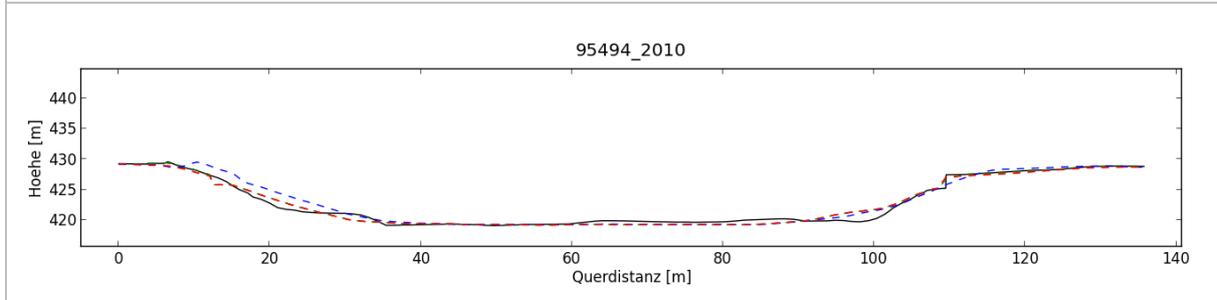
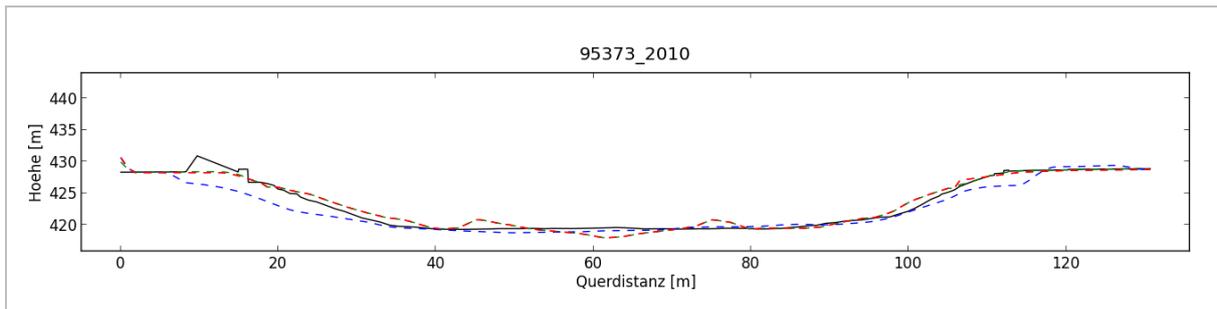


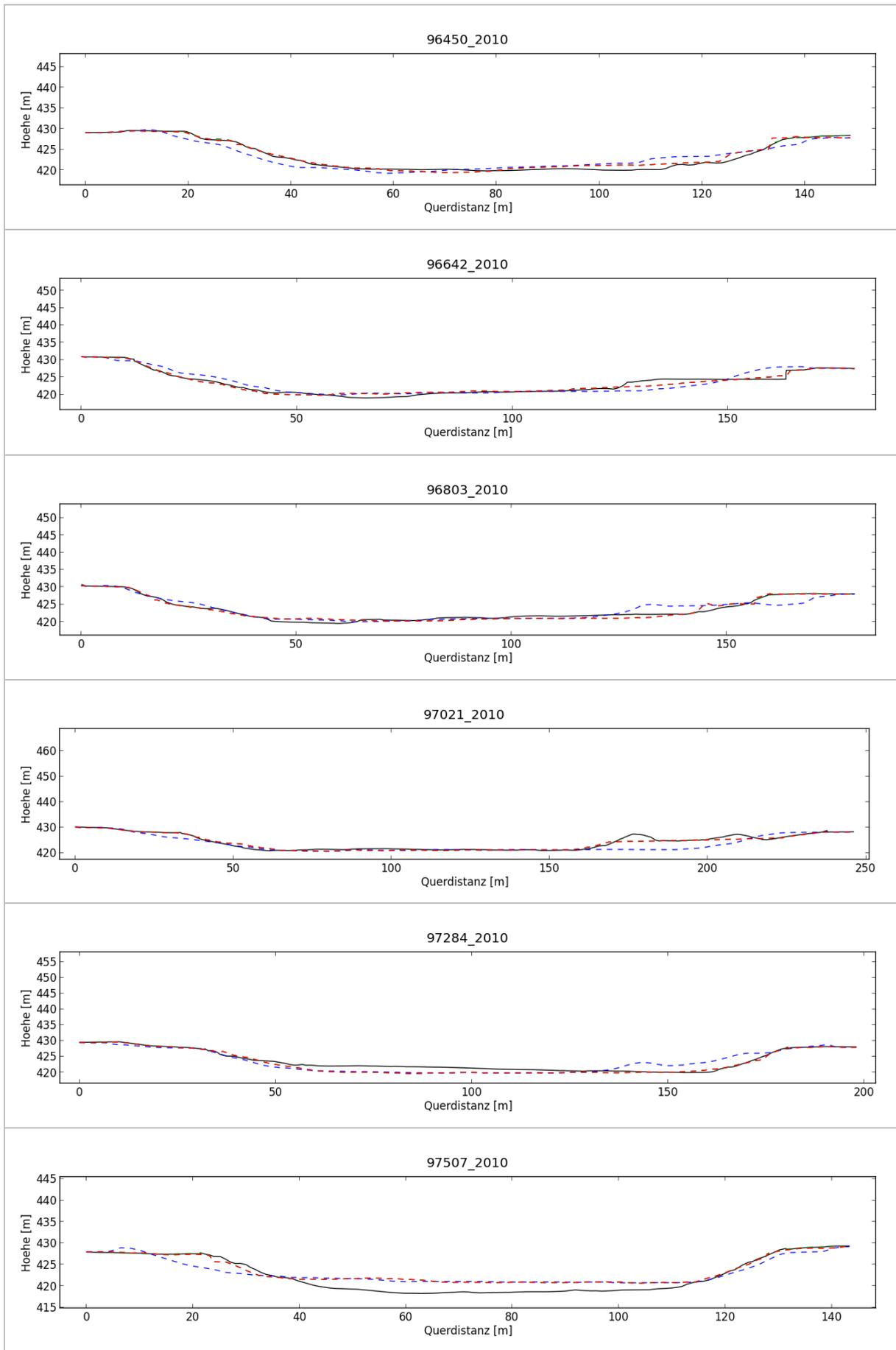


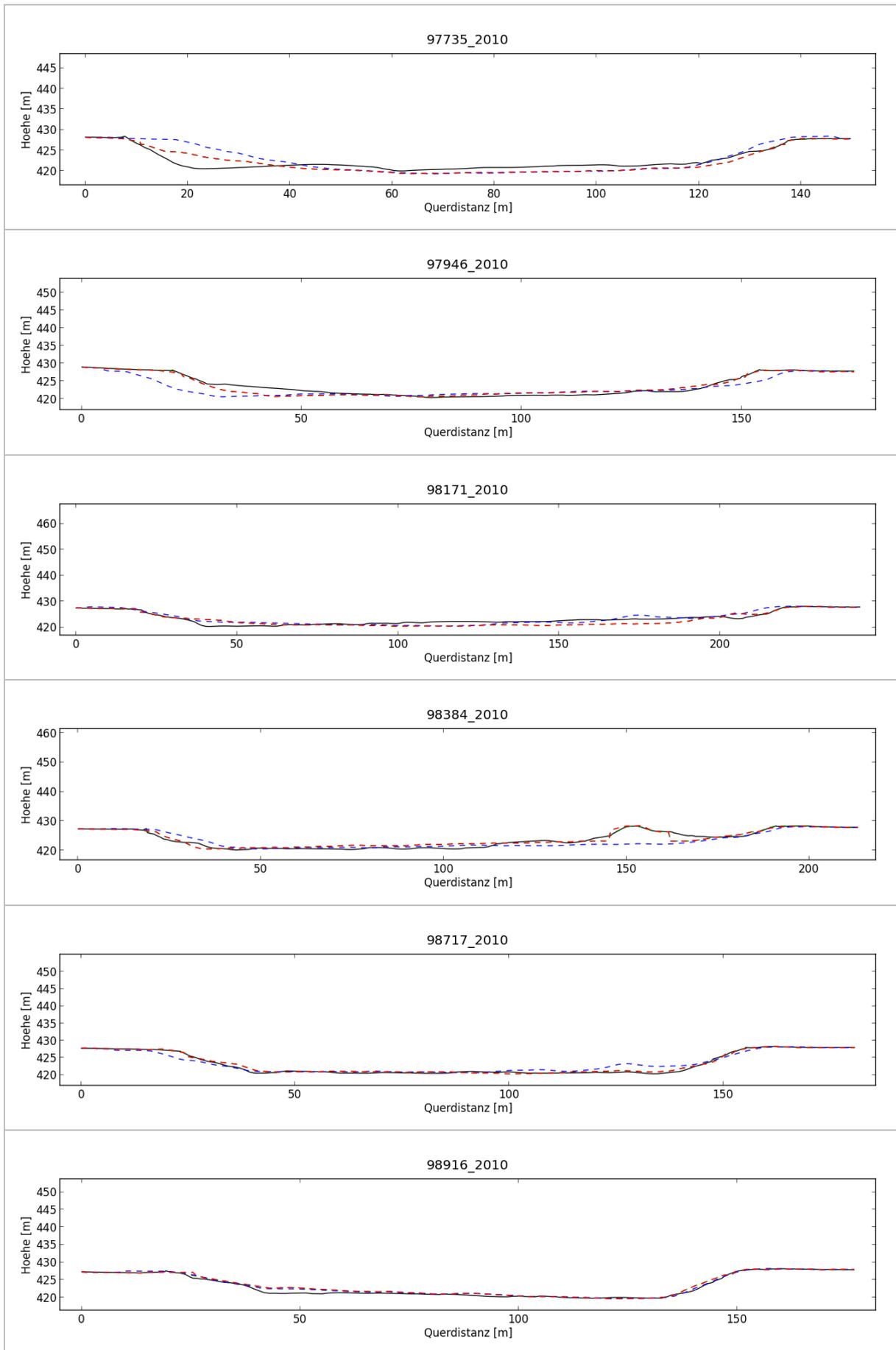
Anhang B3 – Profilgrafiken Aare Altreu – Solothurn

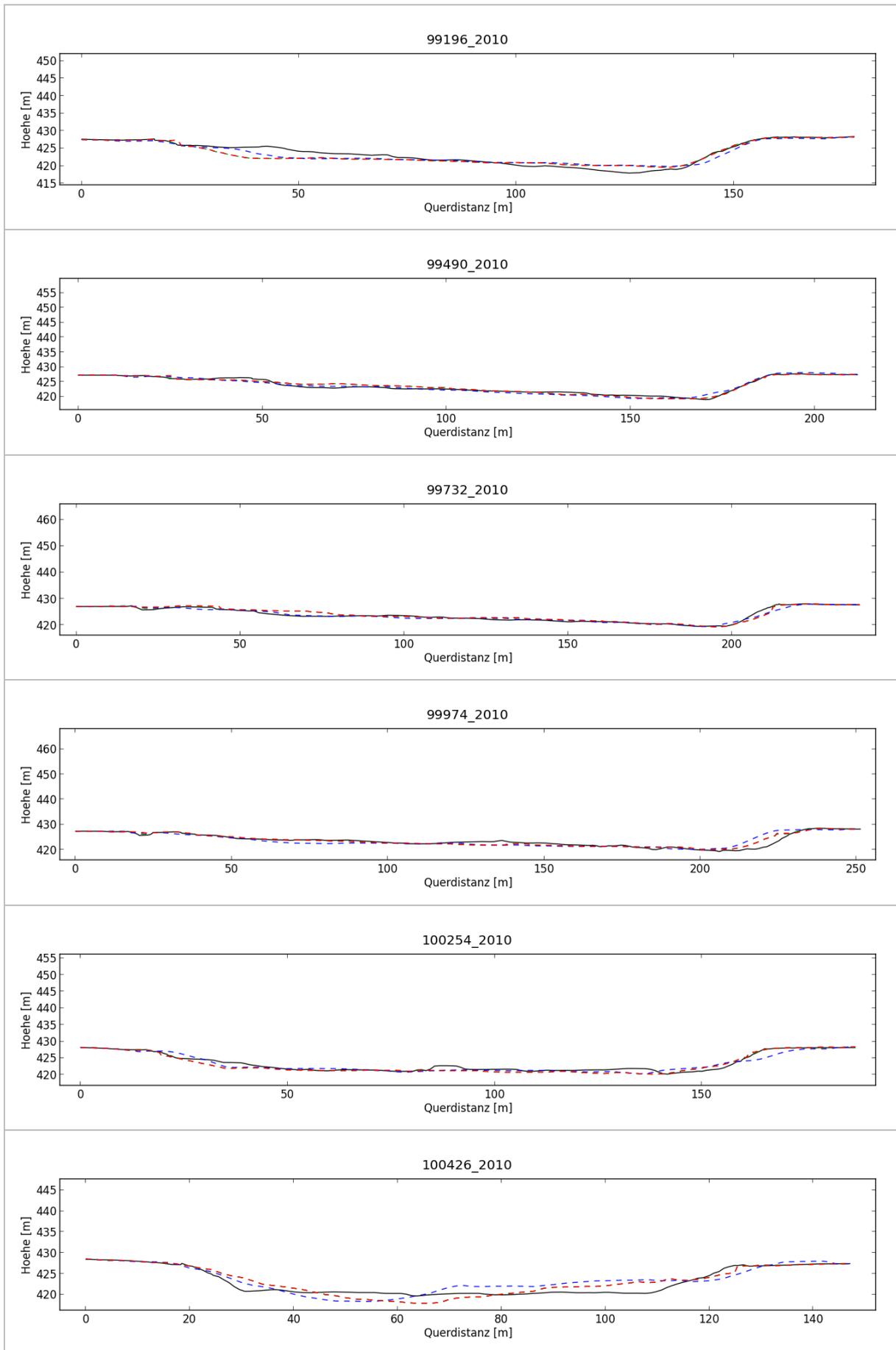


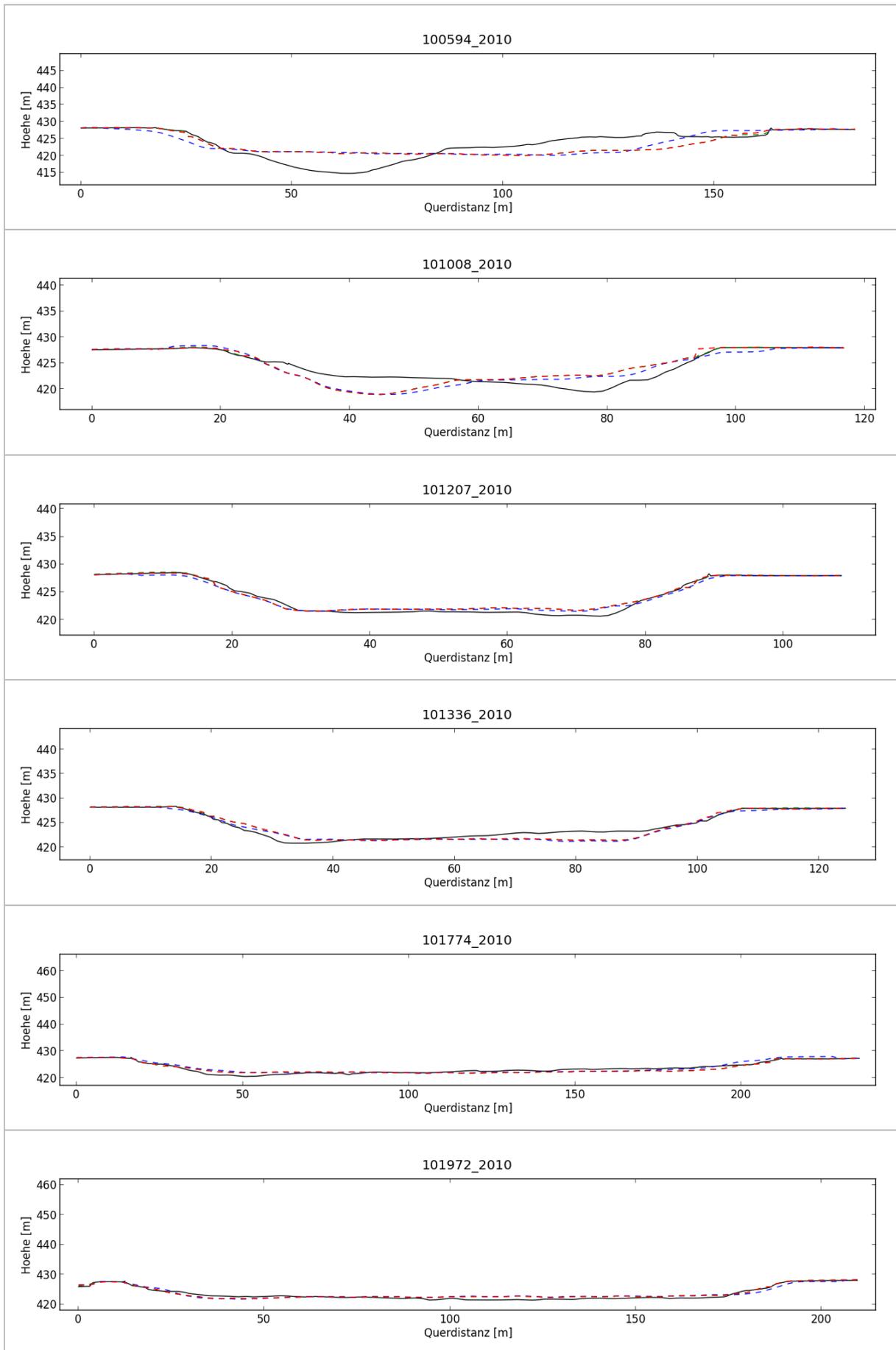


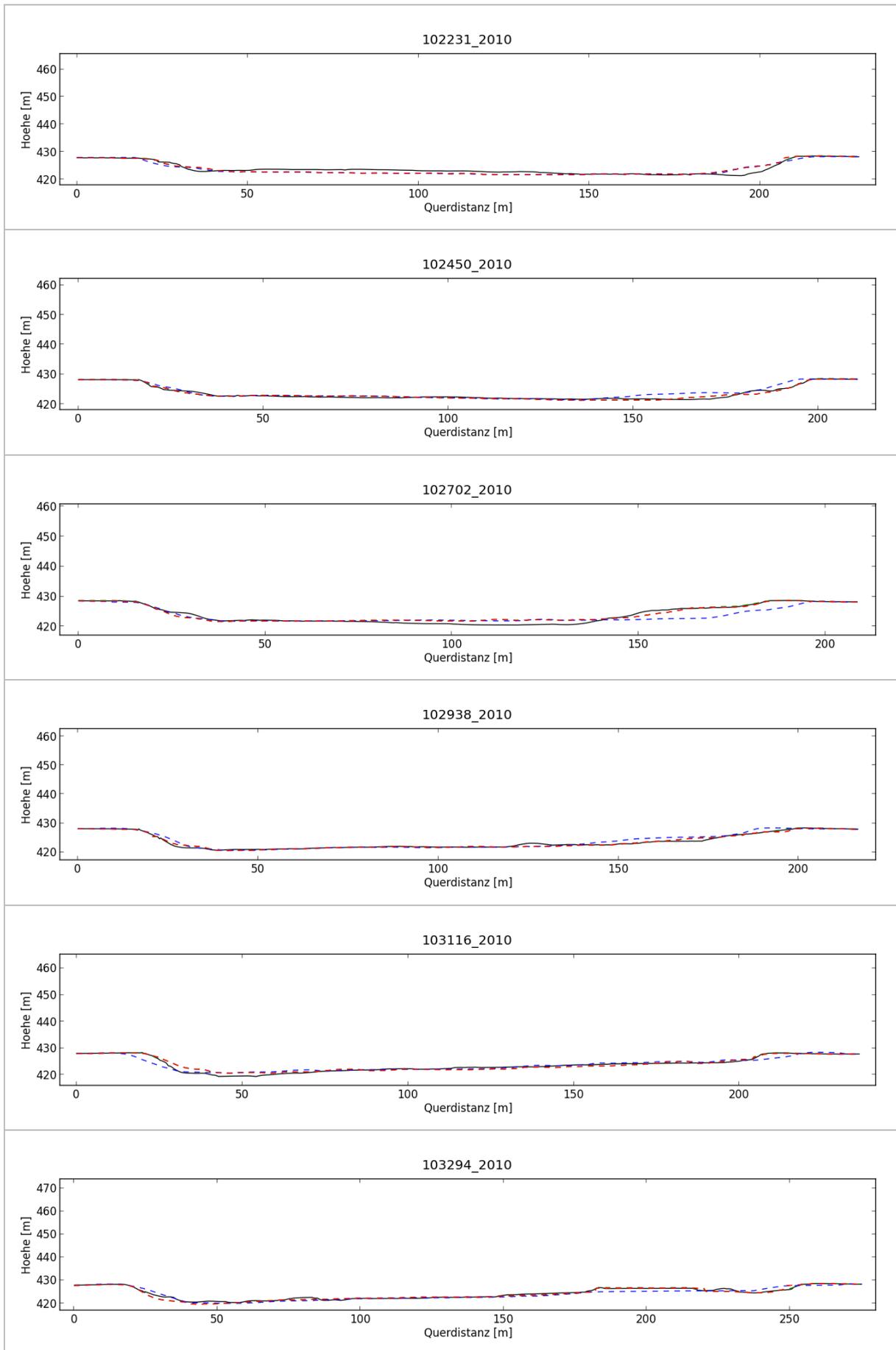


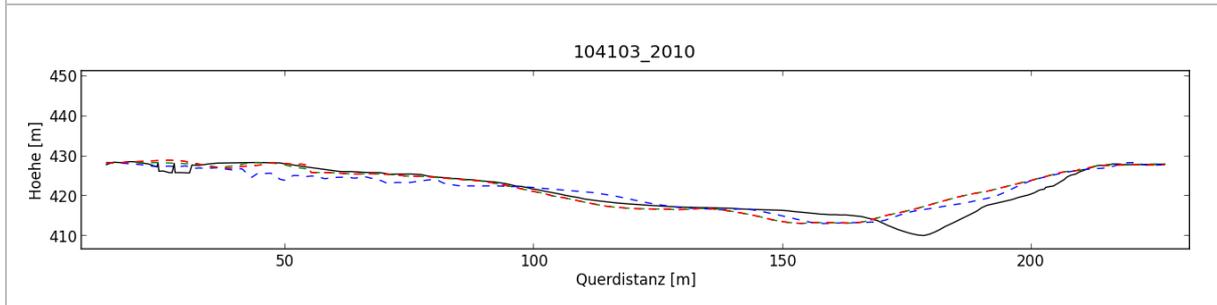
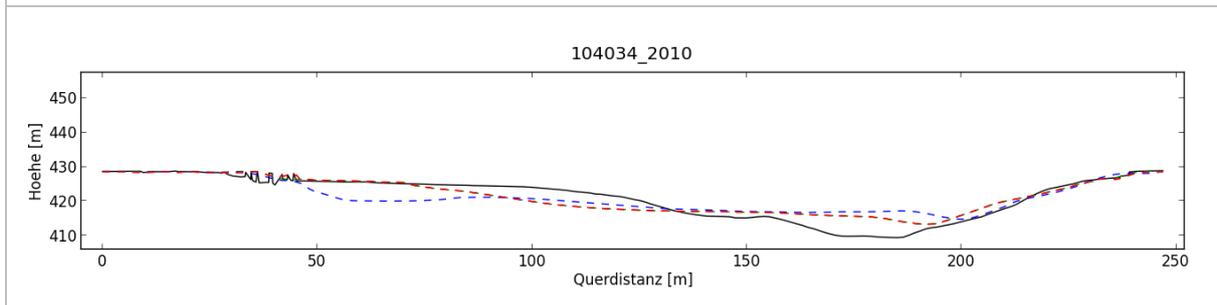
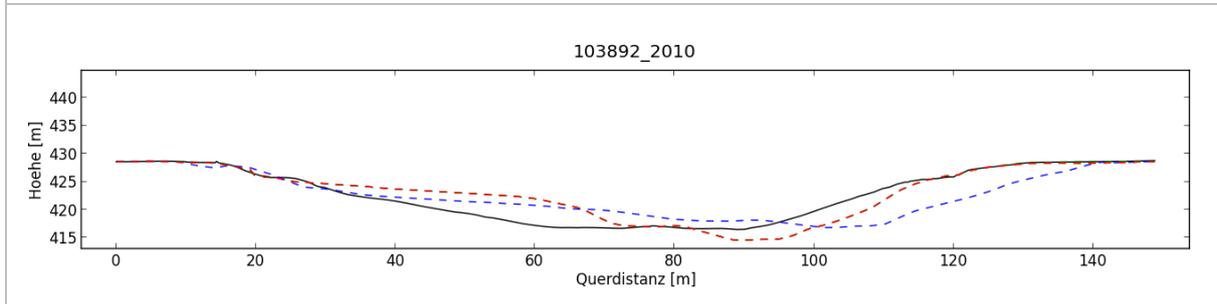
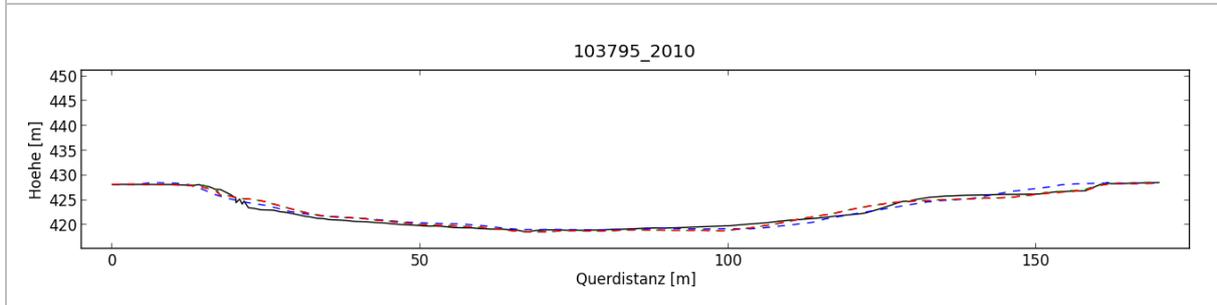
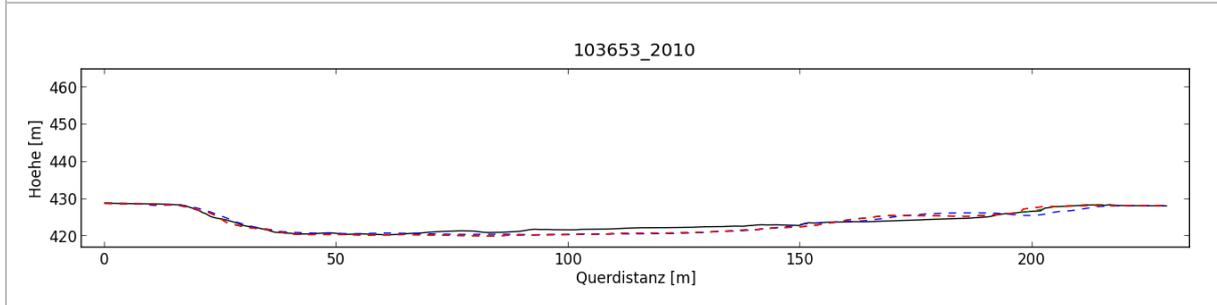
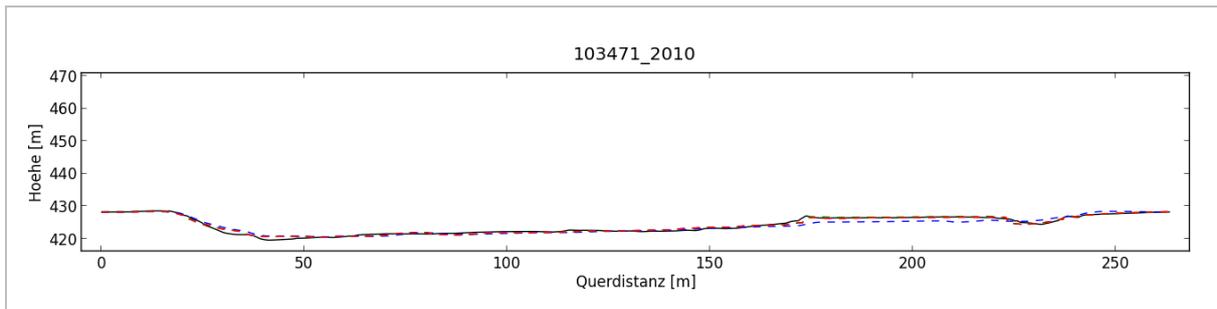


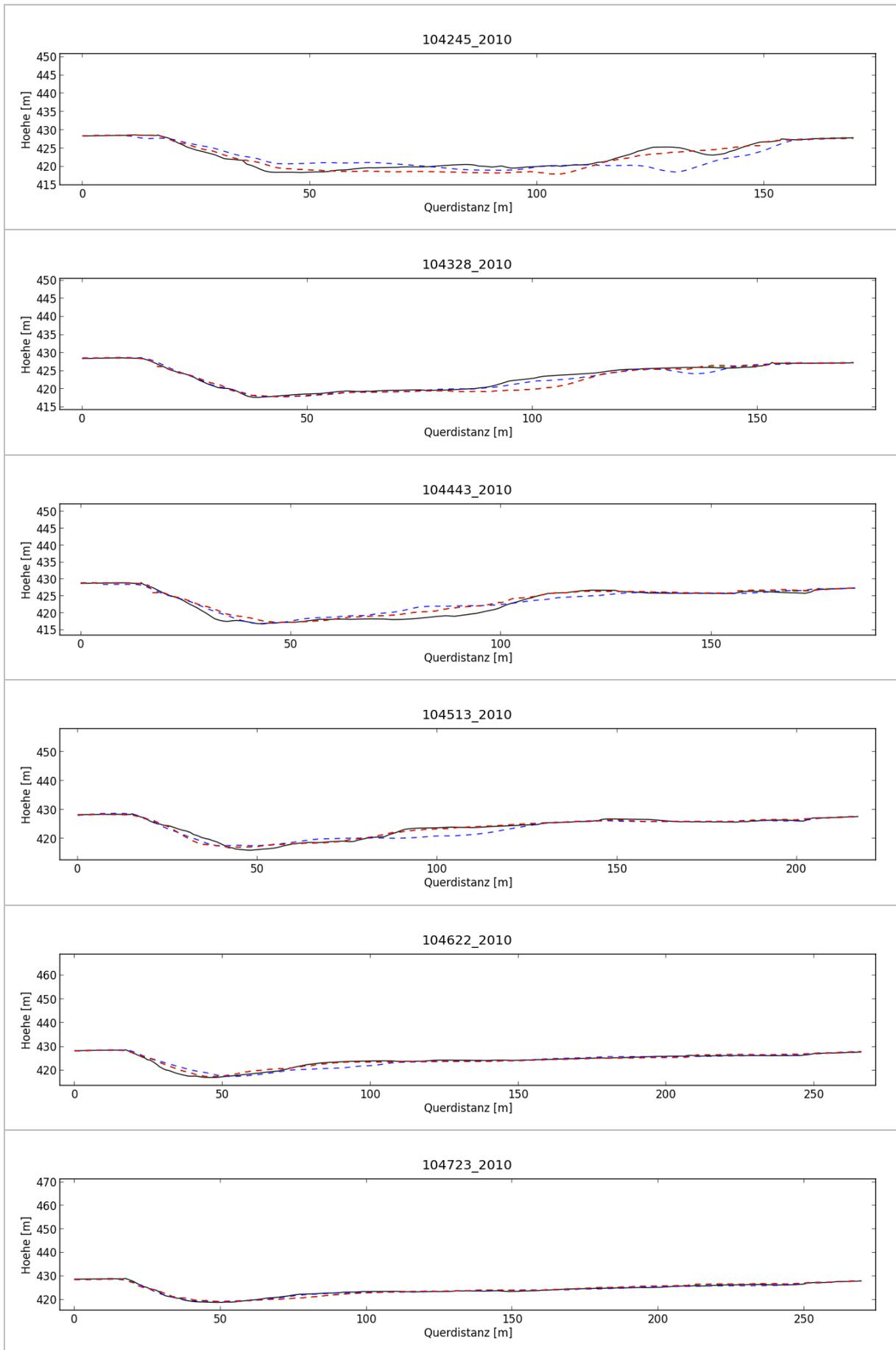


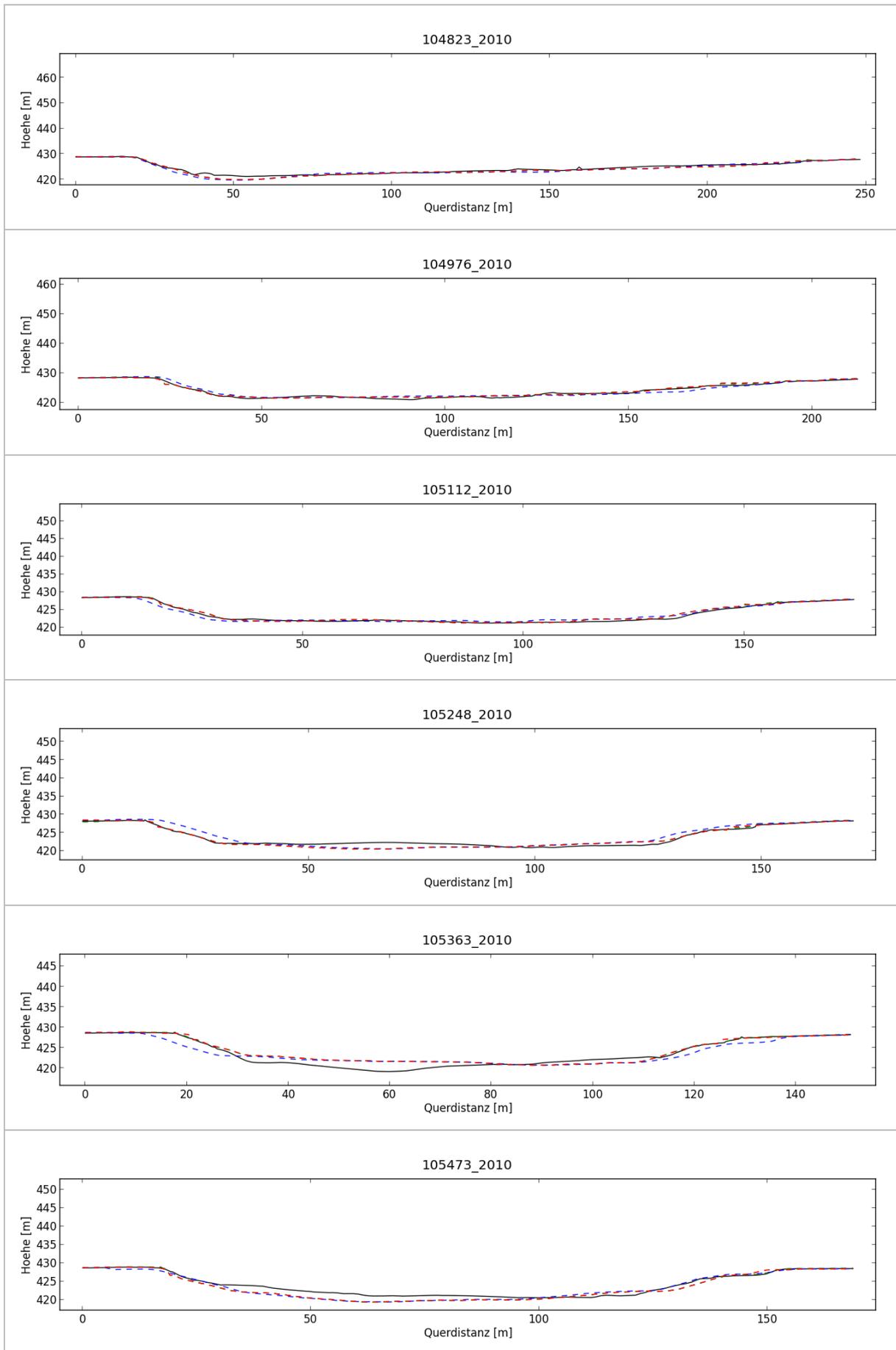


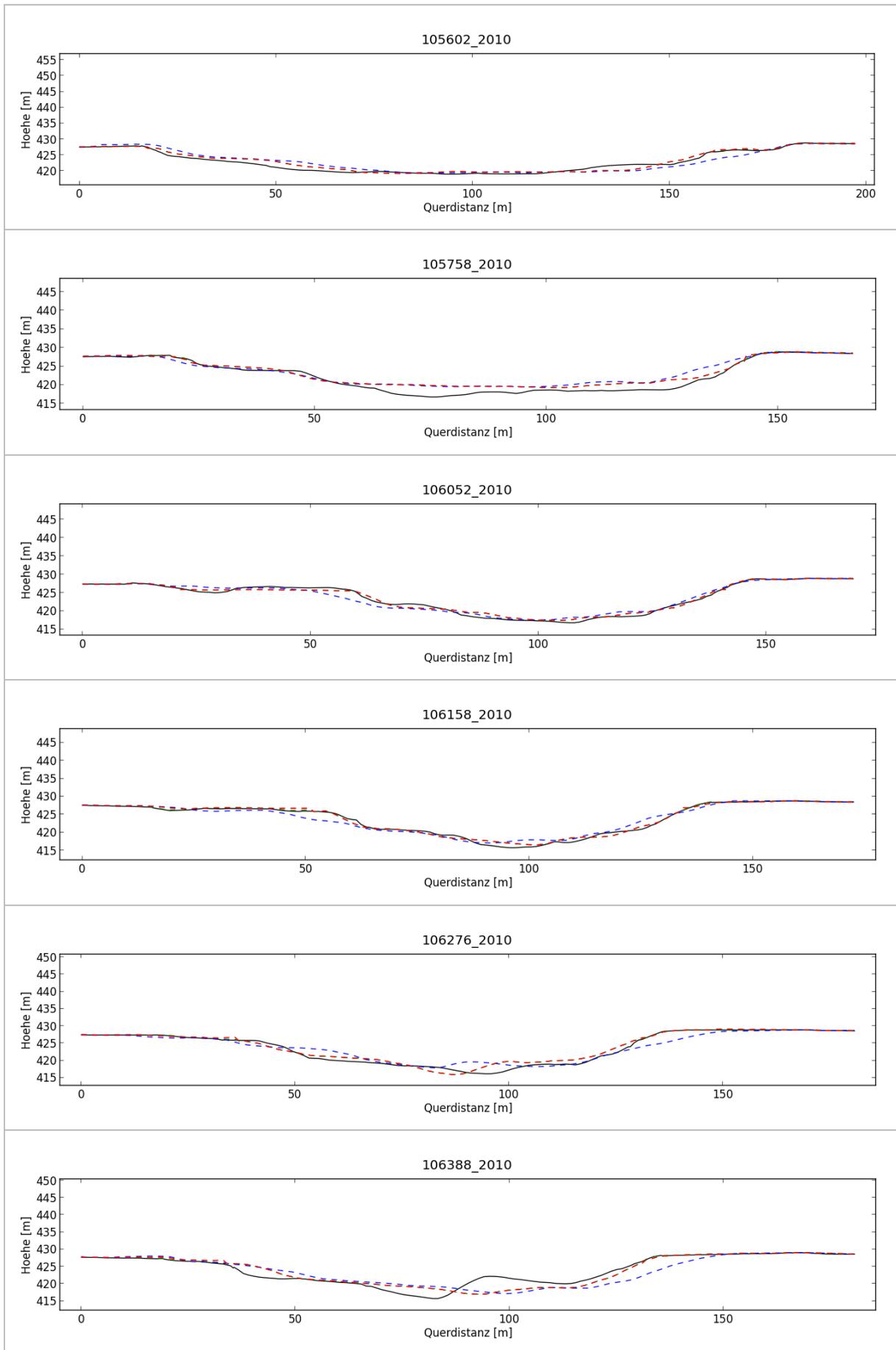


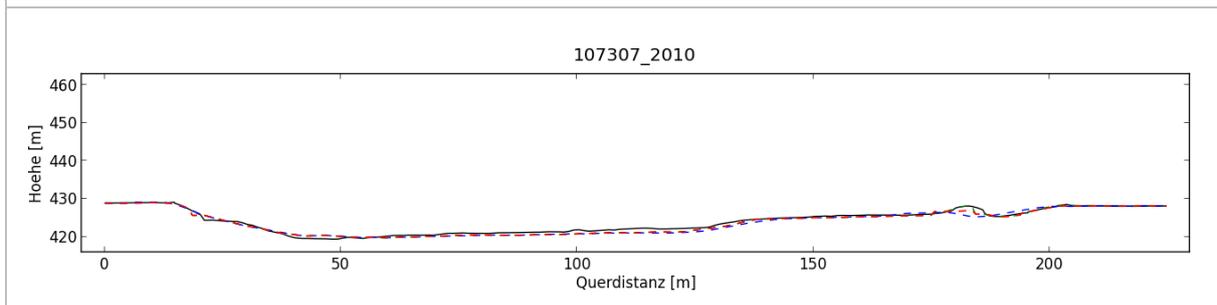
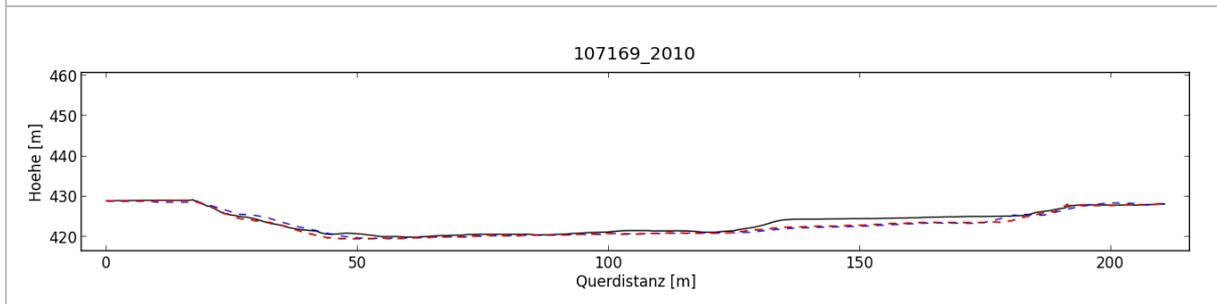
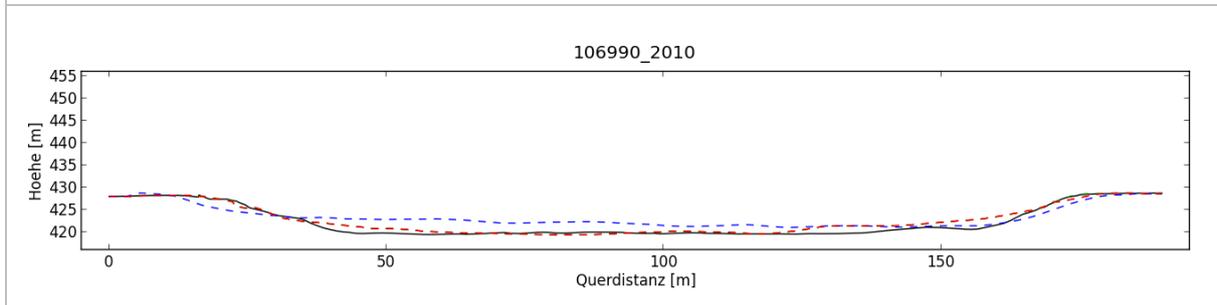
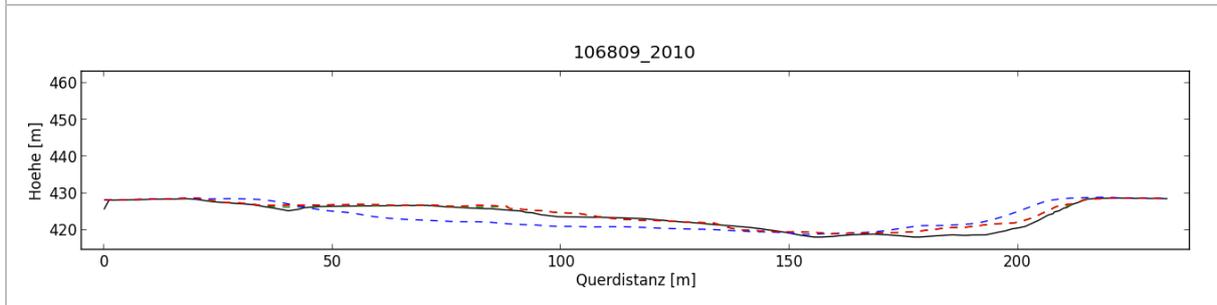
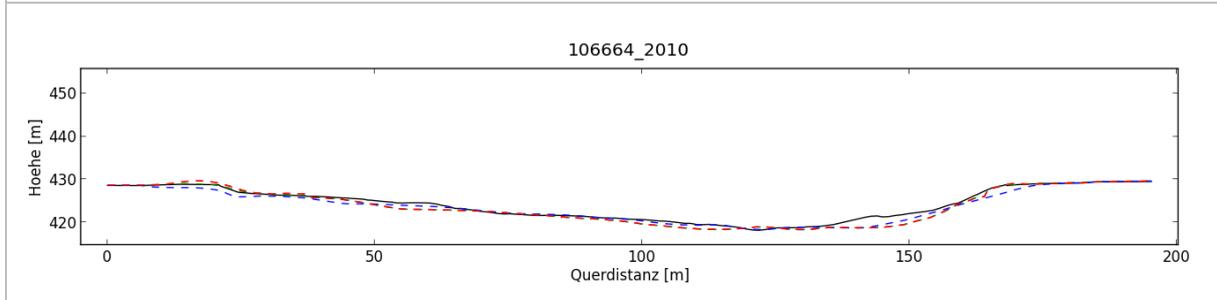
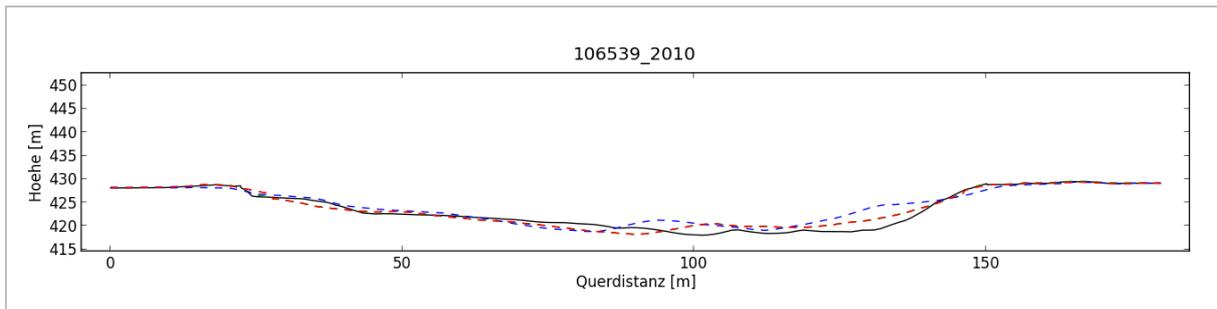




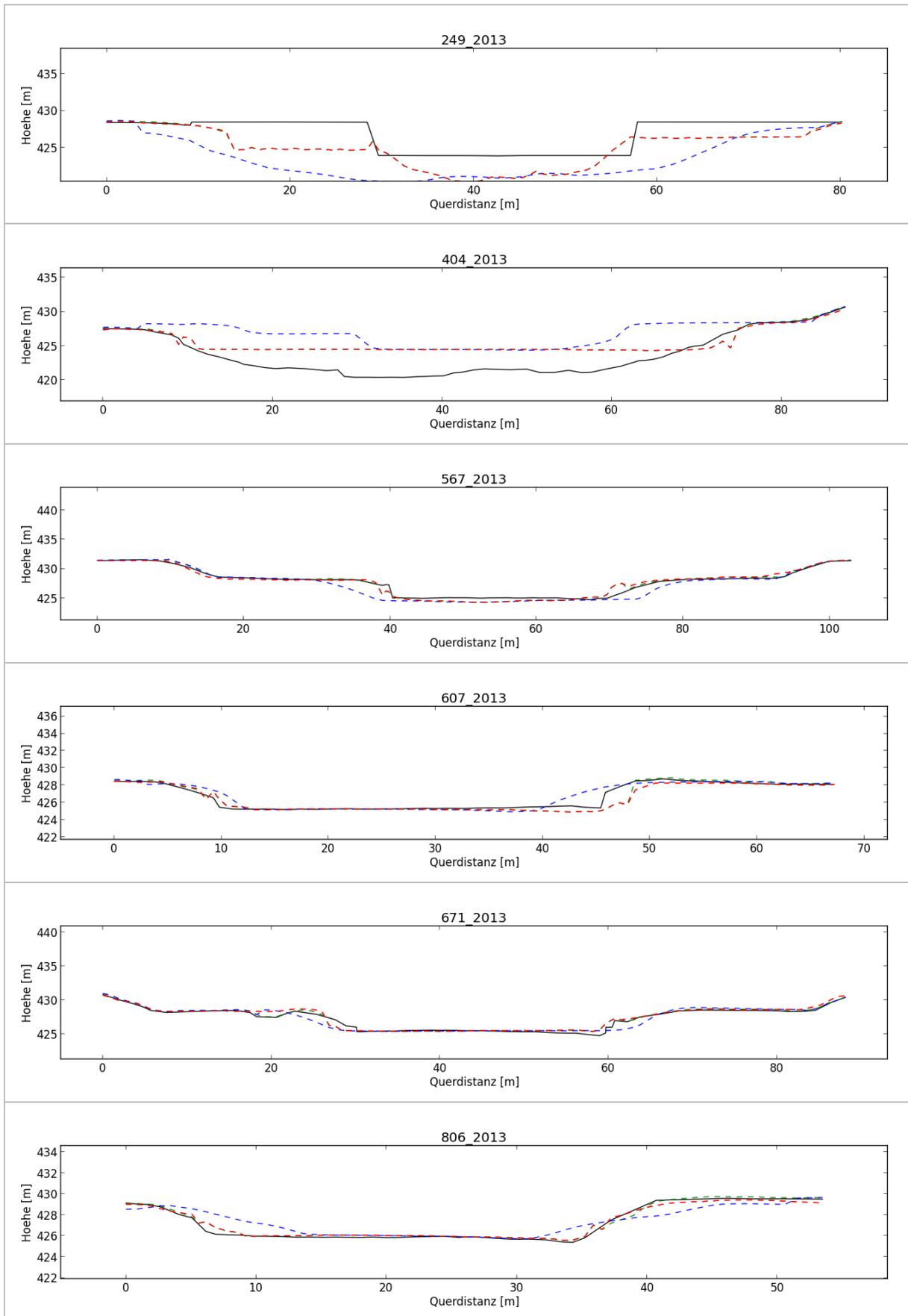


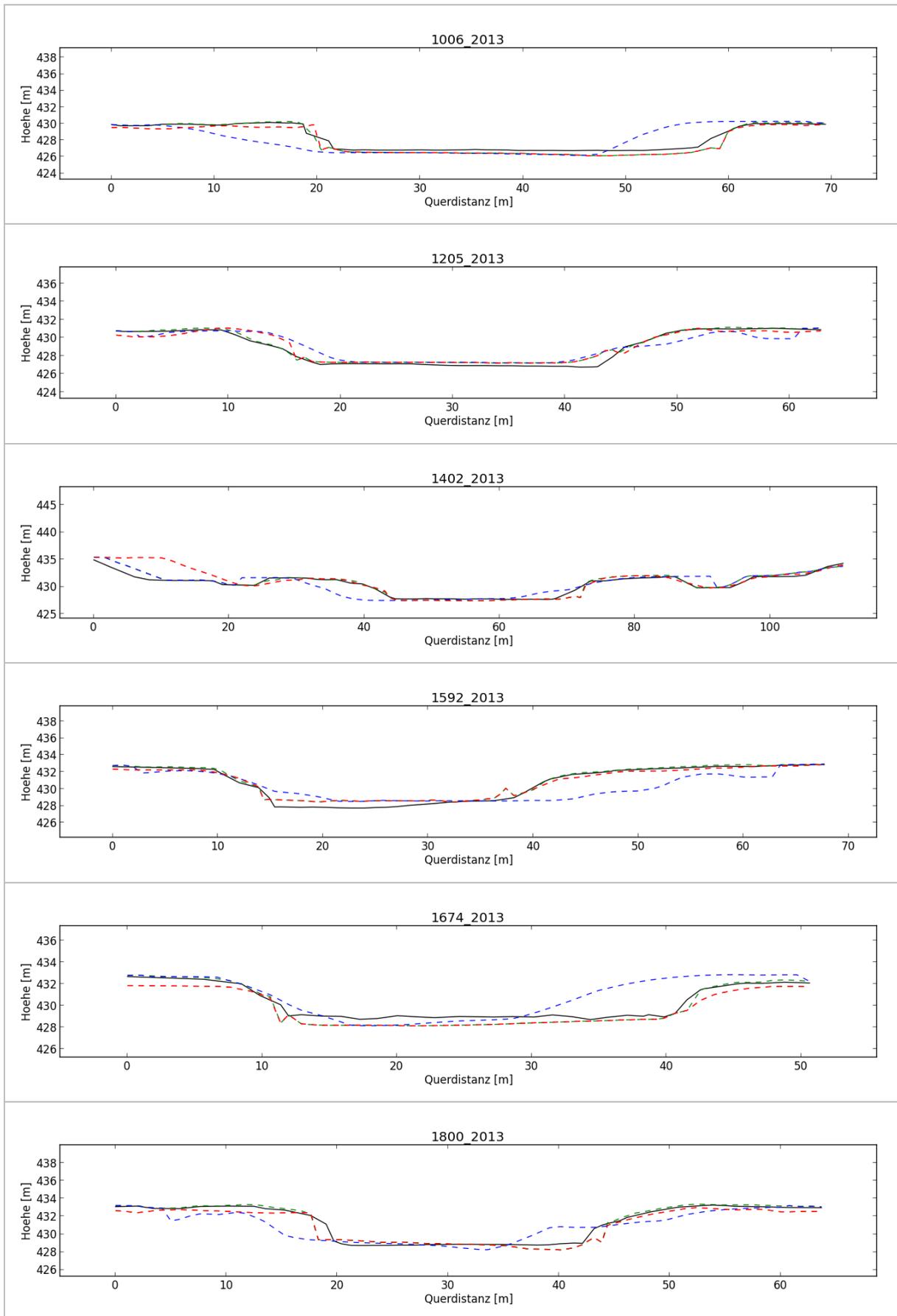


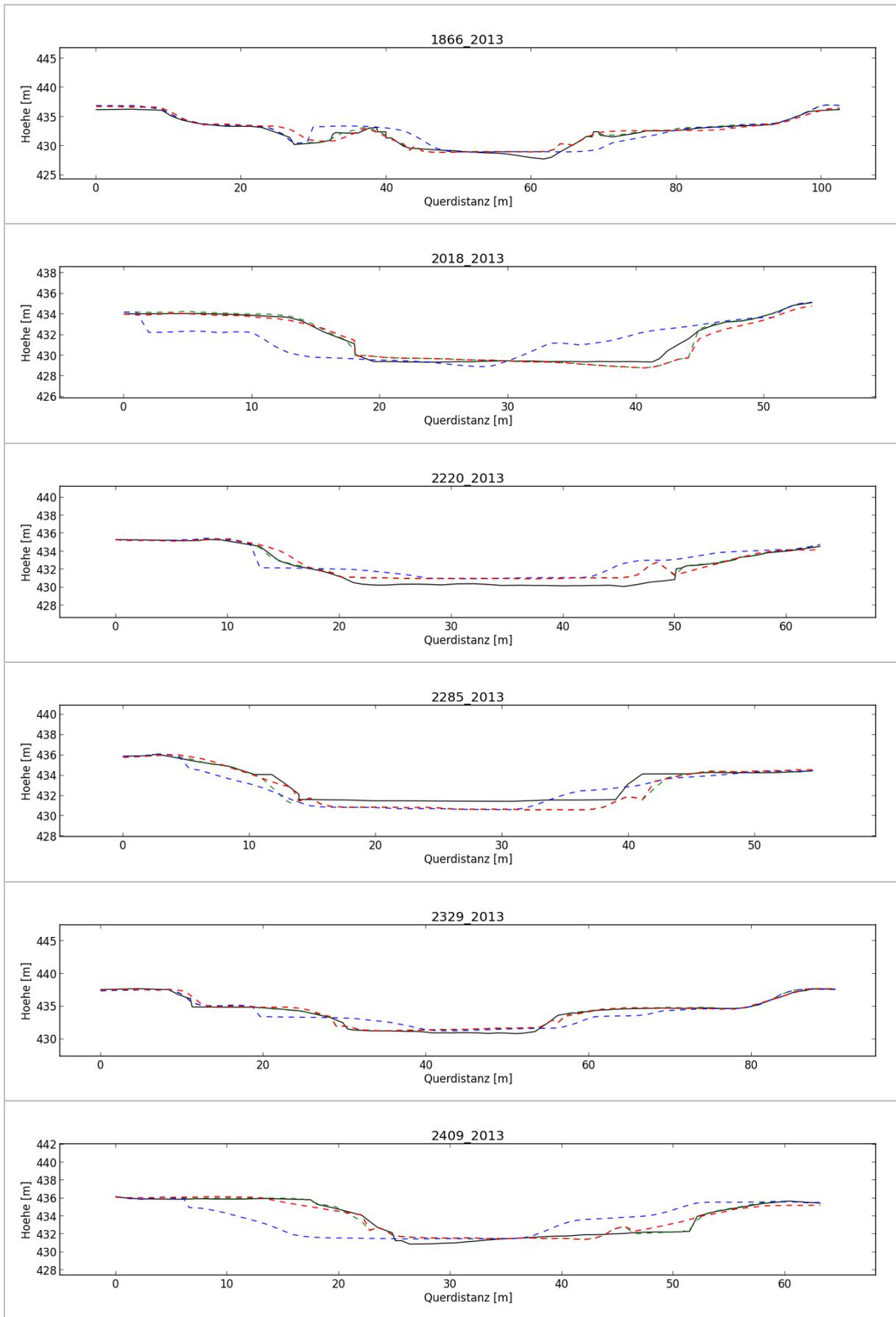


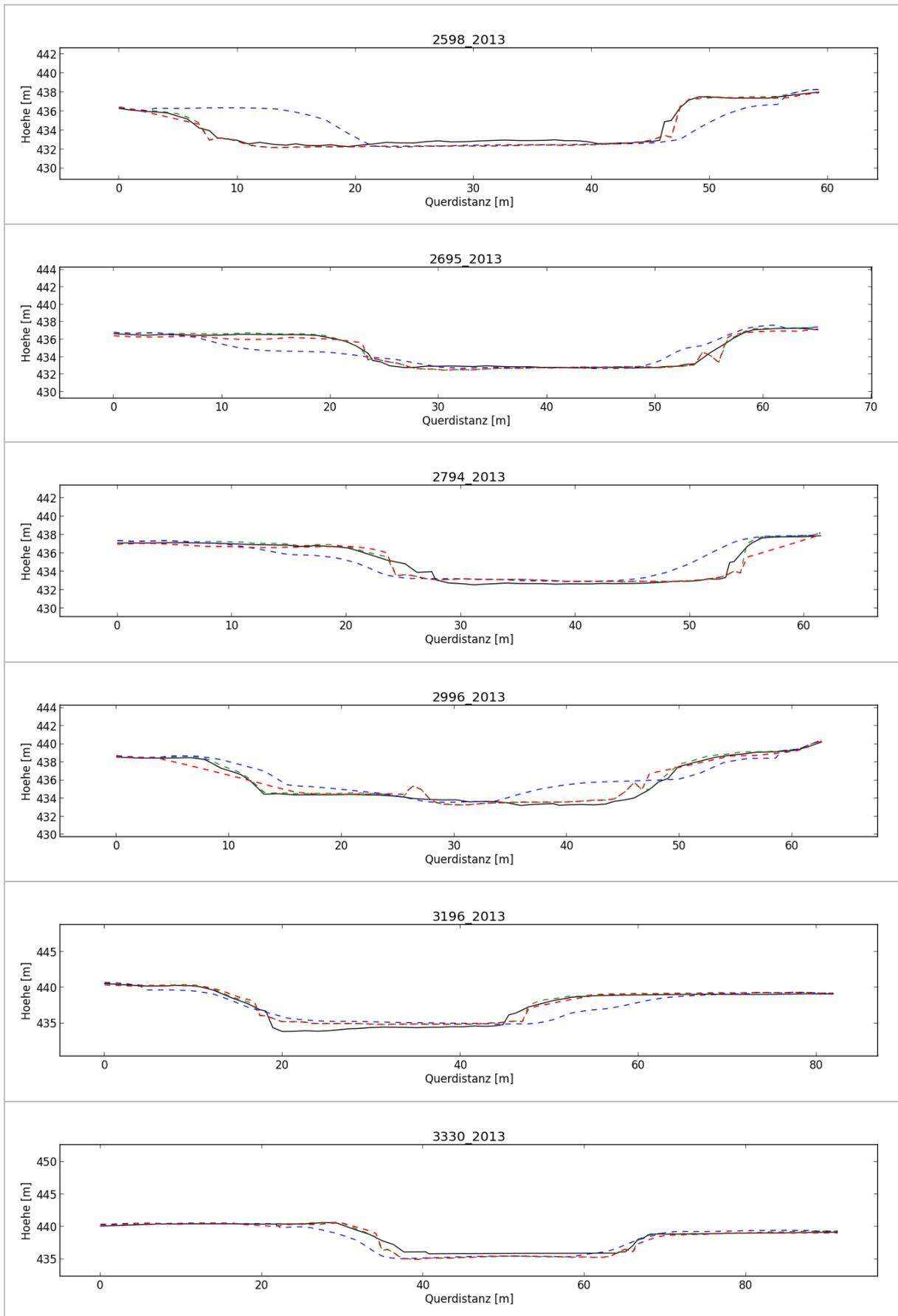


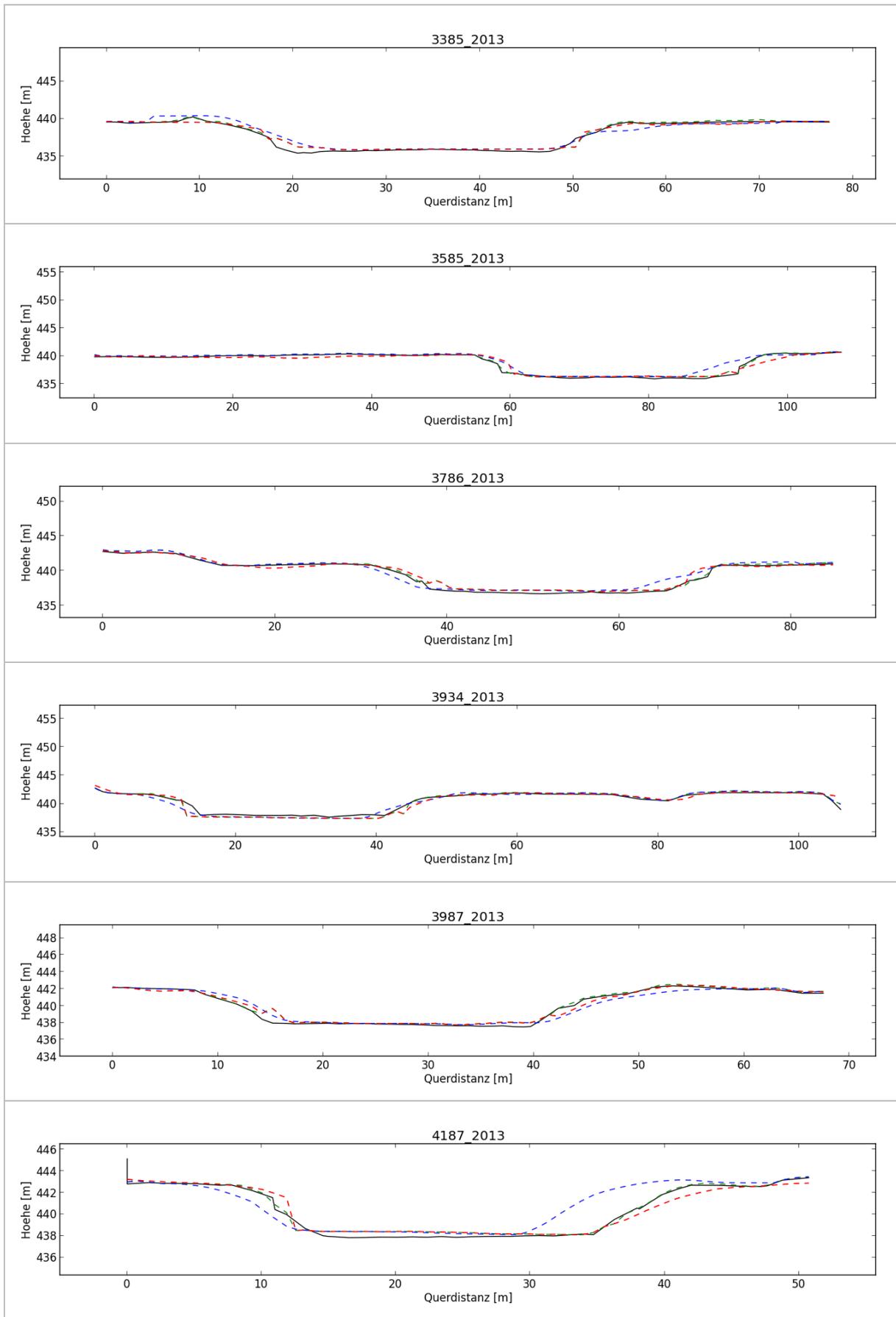
Anhang B4 – Profilgrafiken Emme Gerlafingen – Luterbach

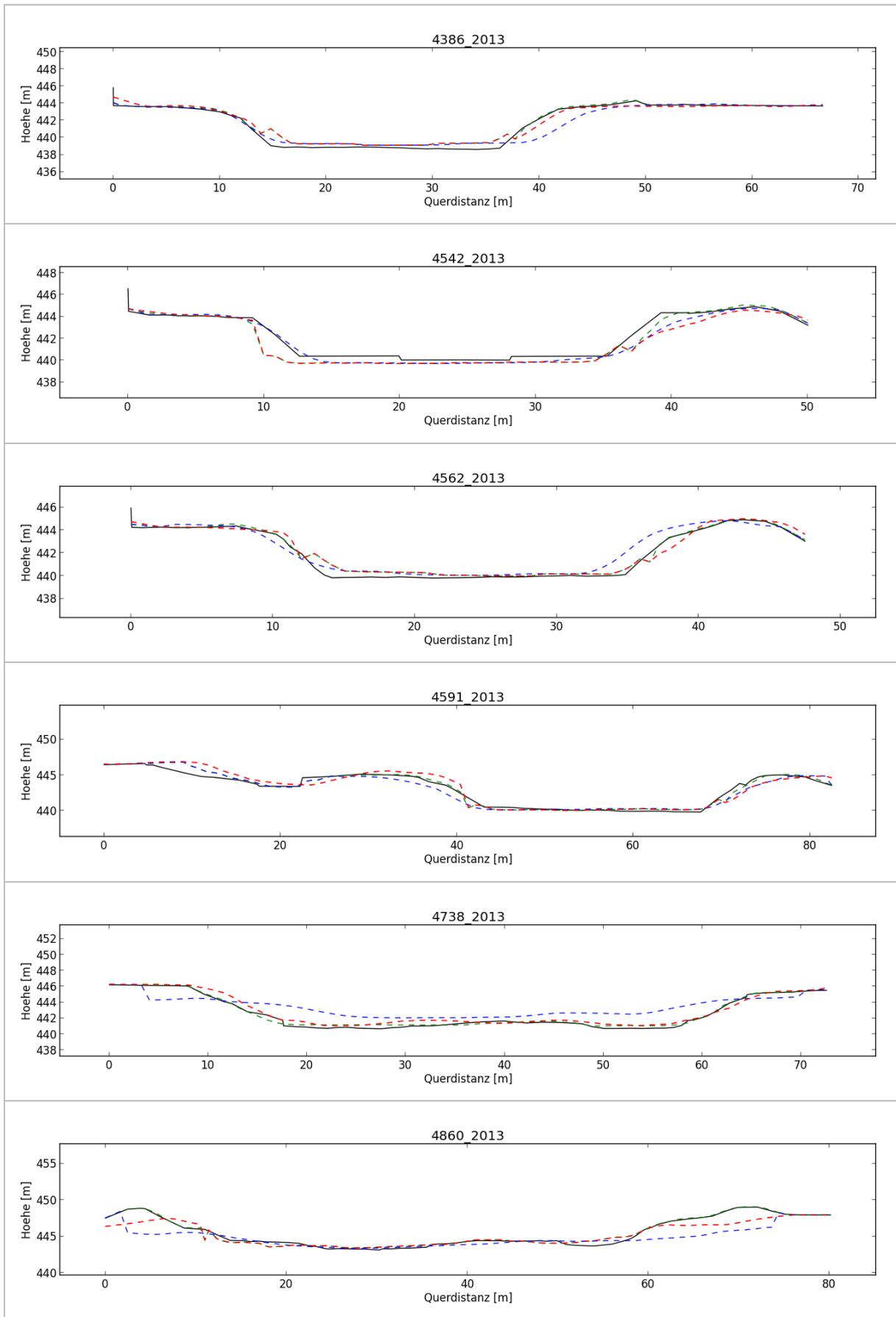


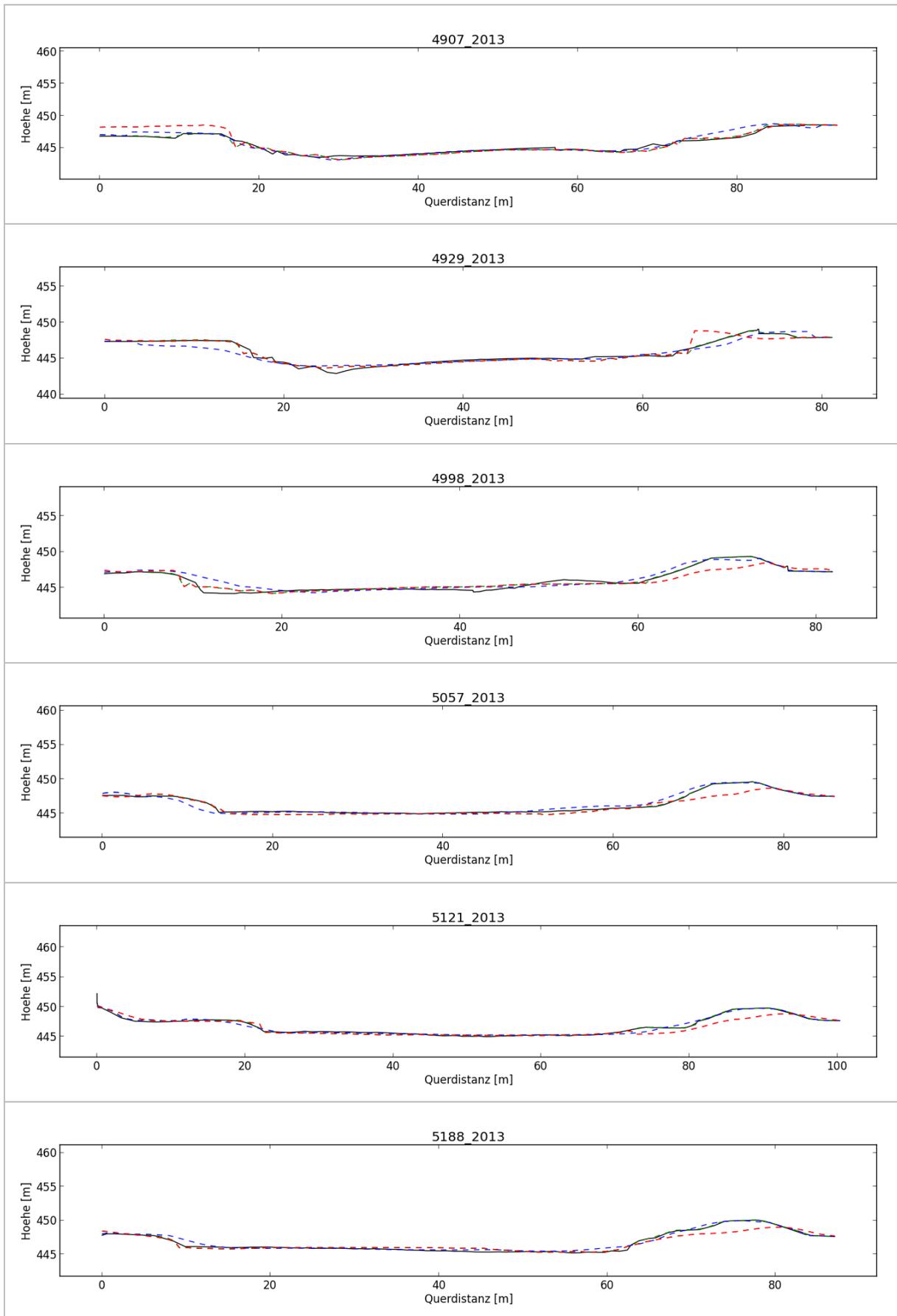


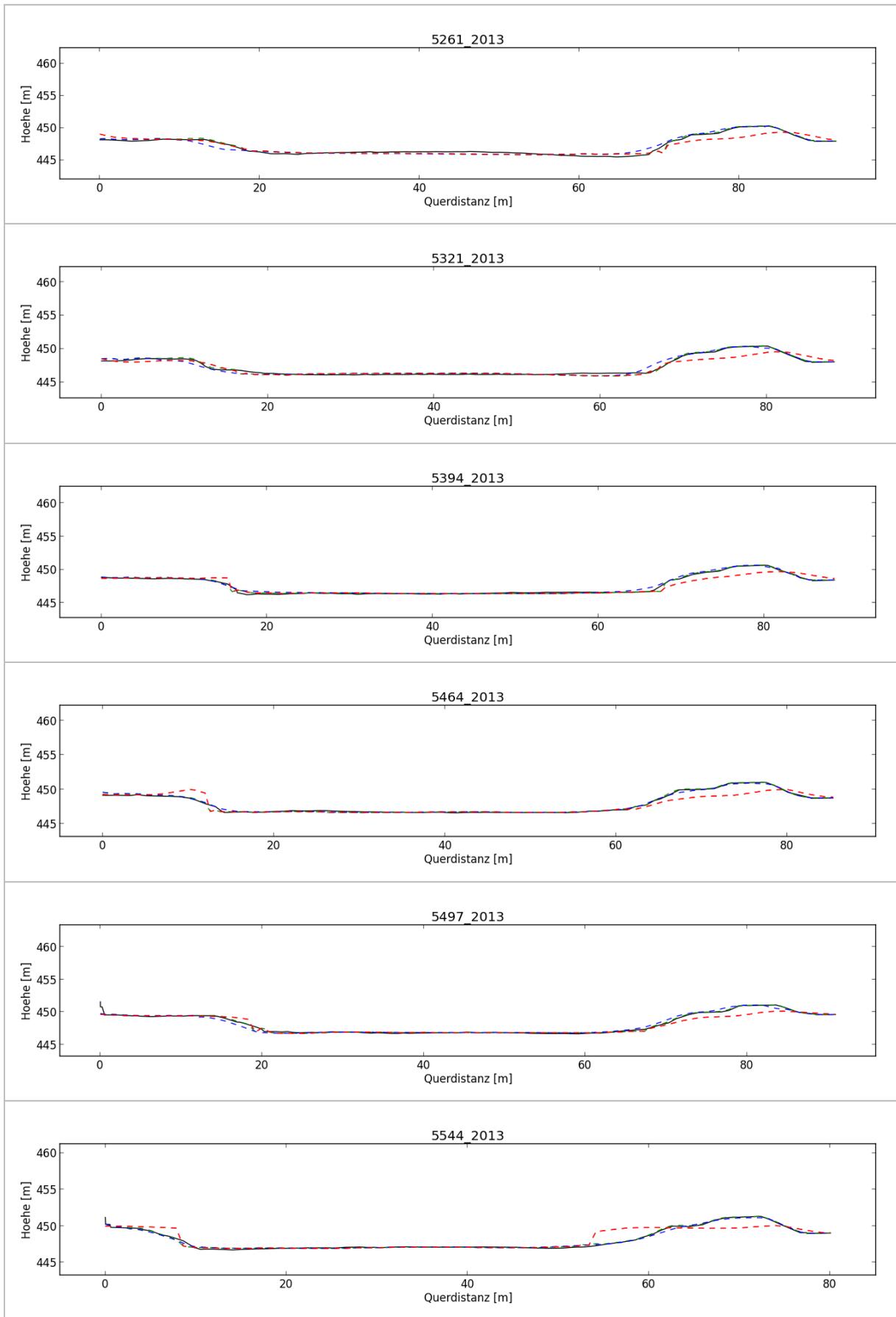


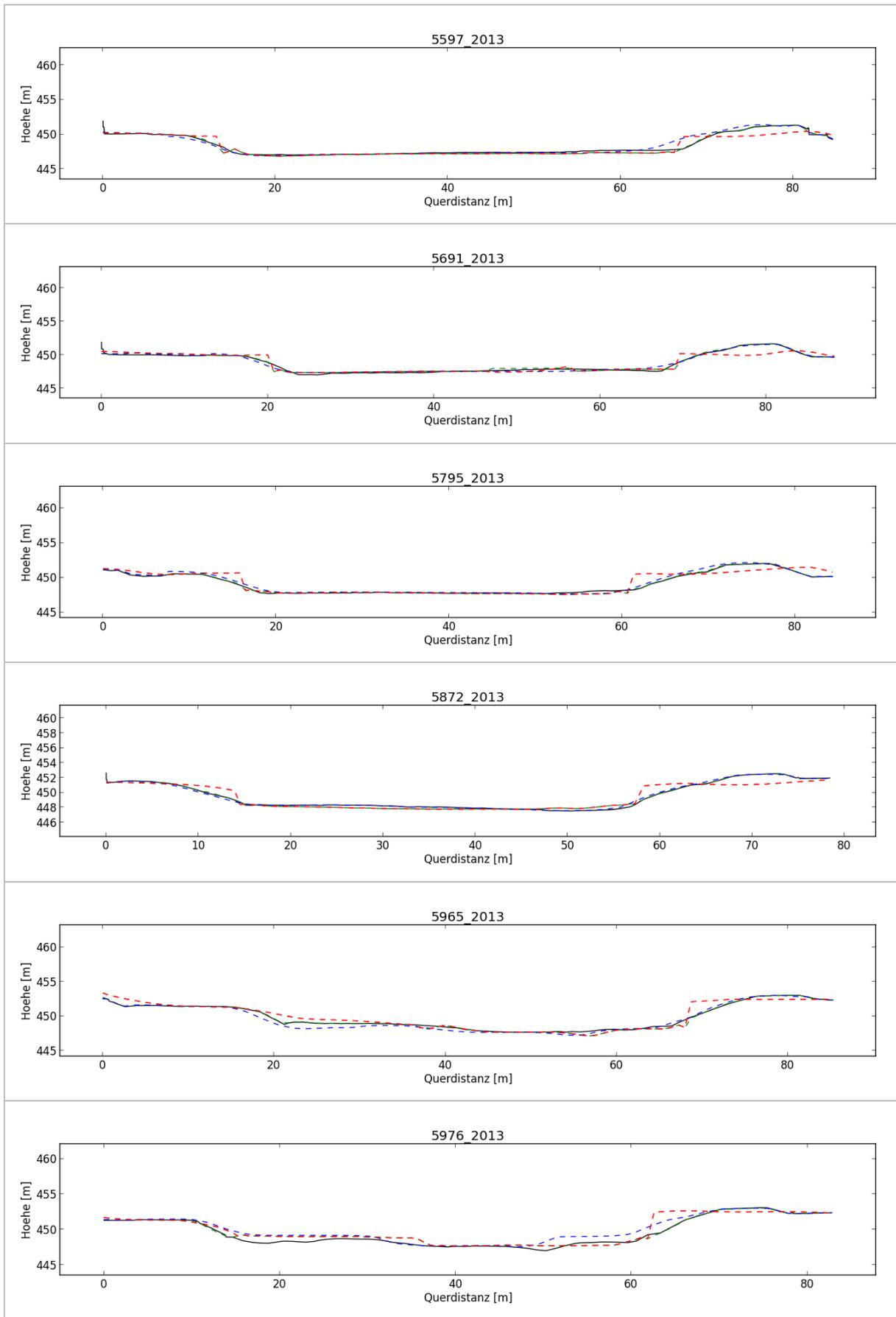


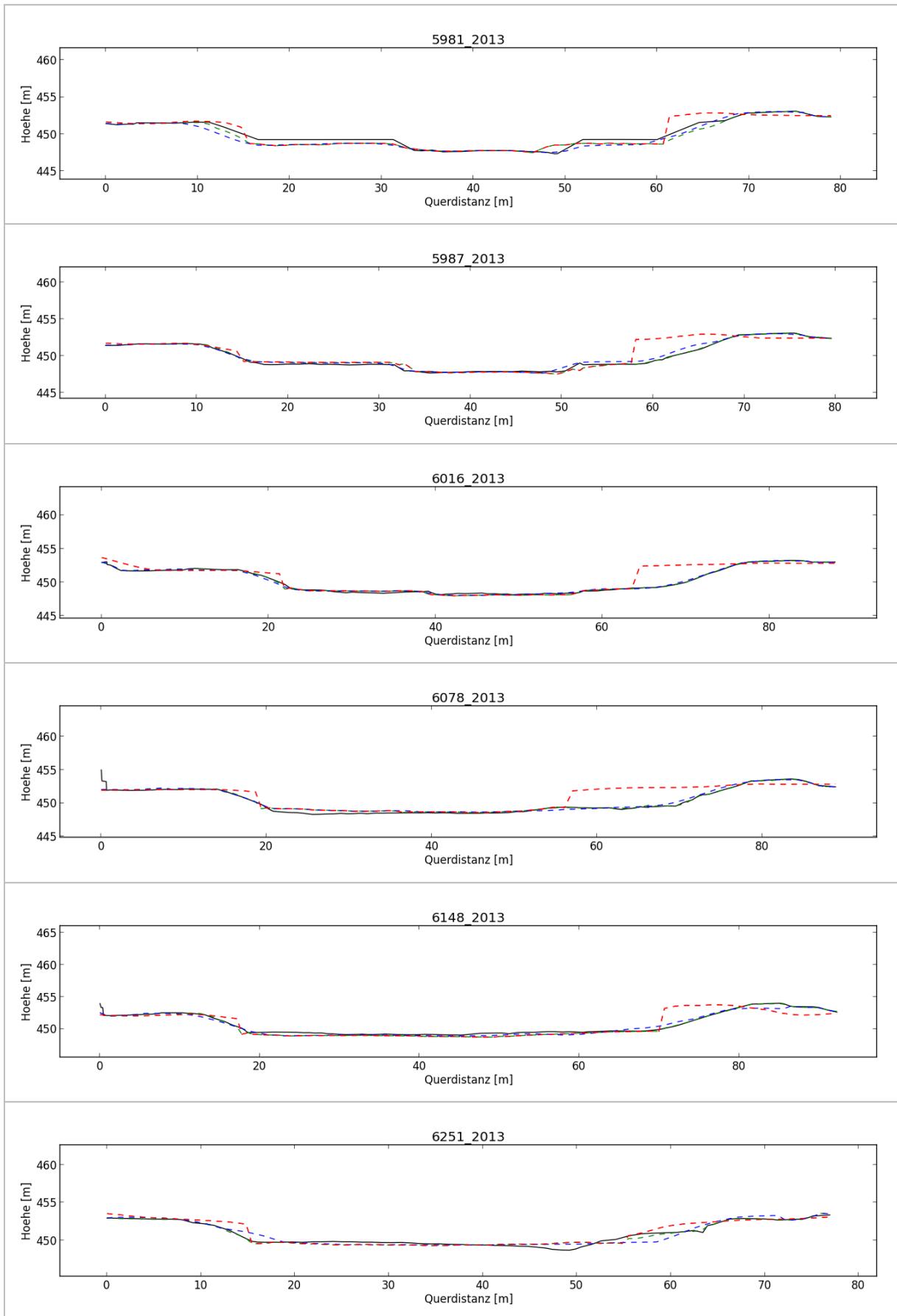












Anhang C – Benetzter Fliessquerschnitt pro Profil

Anhang C1 – Benetzter Fliessquerschnitt Integration

| Aare, Münsingen – Bern | Profil | WSP | Benetzter Fliessquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMBE_50cm |
|------------------------|-------------|--------|-----------------------------|---------------------|---------|--------------------|
| | 184435_2011 | 500.23 | 101.0 | -0.8% | -0.6% | -0.8% |
| 184557_2011 | 500.23 | 96.5 | -0.1% | -0.9% | -0.1% | |
| 184592_2011 | 500.23 | 122.2 | -1.0% | -1.5% | -1.0% | |
| 184736_2011 | 500.23 | 78.0 | 0.4% | -0.5% | 0.4% | |
| 184937_2011 | 500.23 | 64.9 | 1.3% | -0.7% | 1.2% | |
| 185112_2011 | 500.23 | 50.3 | 0.9% | -0.5% | 0.9% | |
| 185307_2011 | 500.23 | 36.3 | -1.5% | -1.3% | -1.5% | |
| 185493_2011 | 500.74 | 43.4 | 0.4% | -0.5% | 0.7% | |
| 185673_2011 | 500.95 | 37.8 | -0.1% | -1.1% | -0.1% | |
| 185762_2011 | 501.41 | 54.0 | -0.8% | -0.9% | -0.8% | |
| 185809_2011 | 501.43 | 52.8 | -1.6% | -1.0% | -1.6% | |
| 186010_2011 | 501.82 | 55.2 | 0.3% | -0.4% | 0.2% | |
| 186217_2011 | 502.04 | 57.9 | -4.1% | -0.5% | -4.2% | |
| 186283_2011 | 502.05 | 52.5 | -5.0% | -0.5% | -5.0% | |
| 186409_2011 | 502.24 | 47.1 | -0.8% | -1.1% | -0.7% | |
| 186608_2011 | 502.53 | 46.5 | 1.6% | -1.2% | 1.5% | |
| 186819_2011 | 502.96 | 42.7 | -4.2% | -0.9% | -4.1% | |
| 187030_2011 | 503.19 | 52.3 | 0.4% | -1.1% | 0.4% | |
| 187217_2011 | 503.29 | 41.1 | 0.2% | -1.6% | 0.2% | |
| 187409_2011 | 503.87 | 55.4 | -3.3% | -0.9% | -3.5% | |
| 187611_2011 | 503.96 | 48.6 | -0.4% | -0.8% | -0.5% | |
| 187814_2011 | 504.19 | 47.8 | -1.7% | -0.9% | -1.7% | |
| 188018_2011 | 504.37 | 49.1 | -2.8% | -1.9% | -2.7% | |
| 188207_2011 | 504.37 | 52.8 | -16.8% | -2.3% | -16.7% | |
| 188414_2011 | 504.54 | 33.2 | -18.6% | -3.9% | -18.6% | |
| 188643_2011 | 505.19 | 25.7 | 2.7% | -2.6% | 2.9% | |
| 188808_2011 | 505.26 | 11.5 | -4.4% | -5.0% | -4.4% | |
| 189013_2011 | 506.00 | 40.5 | -0.5% | -2.3% | -0.5% | |
| 189225_2011 | 506.26 | 29.6 | 0.8% | -4.0% | 0.8% | |
| 189453_2011 | 507.09 | 51.3 | 0.4% | -1.6% | 0.6% | |
| 189664_2011 | 507.25 | 57.7 | -0.2% | -0.9% | -0.2% | |
| 189866_2011 | 507.32 | 27.3 | -2.8% | -1.3% | -2.8% | |
| 190066_2011 | 509.82 | 182.4 | -8.5% | -0.4% | -2.3% | |
| 190270_2011 | 510.09 | 175.8 | -10.9% | -0.7% | -4.2% | |
| 190473_2011 | 510.24 | 156.1 | -30.7% | -0.4% | -11.8% | |
| 190678_2011 | 510.28 | 148.3 | -20.5% | -0.8% | -8.1% | |
| 190876_2011 | 510.39 | 107.1 | -7.7% | -0.5% | 3.1% | |
| 190907_2011 | 510.44 | 108.9 | -8.1% | -0.7% | -0.3% | |
| 191090_2011 | 510.65 | 117.2 | -23.2% | -1.3% | -0.9% | |

| | | | | | |
|-------------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 191287_2011 | 511.05 | 127.9 | -3.9% | -0.5% | 2.1% |
| 191500_2011 | 511.43 | 136.8 | -6.2% | -0.1% | -1.7% |
| 191697_2011 | 511.69 | 108.5 | -2.5% | -0.7% | 2.0% |
| 191896_2011 | 512.05 | 122.1 | -9.0% | -1.0% | -0.9% |
| 192092_2011 | 512.27 | 100.0 | -6.1% | -0.2% | 0.5% |
| 192293_2011 | 512.48 | 105.6 | -7.5% | -0.5% | -1.8% |
| 192492_2011 | 512.83 | 124.2 | -6.0% | -0.5% | -1.2% |
| 192703_2011 | 513.19 | 117.1 | -4.5% | -1.9% | -2.4% |
| 192904_2011 | 513.71 | 114.3 | -16.7% | 0.9% | -1.8% |
| 193110_2011 | 514.02 | 122.0 | -15.8% | -0.9% | -3.4% |
| 193318_2011 | 514.03 | 89.8 | -6.3% | -2.2% | -1.5% |
| 193523_2011 | 515.20 | 159.8 | -7.9% | -0.9% | -1.0% |
| 193724_2011 | 515.40 | 155.4 | -3.5% | -1.2% | -1.3% |
| 193926_2011 | 515.41 | 126.9 | -5.5% | -0.6% | -1.1% |
| 194129_2011 | 515.50 | 101.2 | -4.6% | -1.2% | -3.9% |
| 194334_2011 | 515.86 | 101.1 | -8.0% | -1.2% | -1.8% |
| 194536_2011 | 516.10 | 100.7 | -5.4% | -0.9% | -0.6% |
| 194739_2011 | 516.47 | 107.9 | -7.1% | -1.3% | -2.2% |
| 194942_2011 | 516.84 | 103.1 | -9.8% | -2.5% | -1.0% |
| 195154_2011 | 517.19 | 101.6 | -5.8% | -0.7% | -0.1% |
| 195258_2011 | 517.19 | 89.6 | -8.6% | -1.2% | -3.1% |
| 195306_2011 | 517.20 | 87.8 | -1.3% | -1.3% | -0.3% |
| 195363_2011 | 517.20 | 104.2 | -8.6% | -1.9% | -3.3% |
| 195467_2011 | 517.42 | 88.0 | -9.7% | -3.6% | -4.5% |
| 195568_2011 | 517.55 | 79.8 | -17.2% | -3.4% | -13.0% |
| 195670_2011 | 517.88 | 87.6 | -6.6% | -1.4% | 7.3% |
| 195772_2011 | 518.06 | 76.9 | -0.7% | -1.8% | 0.1% |
| 195874_2011 | 518.52 | 100.7 | -2.0% | -0.5% | -0.7% |
| 195976_2011 | 518.66 | 99.0 | -5.2% | -2.5% | -2.4% |
| 196078_2011 | 518.79 | 100.2 | -2.8% | -1.5% | -2.4% |
| 196180_2011 | 518.98 | 92.5 | -9.1% | -3.8% | 1.7% |
| 196282_2011 | 519.09 | 93.9 | -7.9% | -2.4% | 1.8% |
| 196389_2011 | 519.19 | 82.3 | -5.4% | -1.5% | -4.1% |
| 196485_2011 | 519.39 | 88.9 | -1.6% | -1.5% | -1.5% |
| 196585_2011 | 519.48 | 88.4 | -0.6% | -0.5% | -0.3% |
| 196685_2011 | 519.68 | 105.1 | -3.0% | 0.0% | 0.3% |
| 196783_2011 | 519.92 | 98.1 | -5.9% | -0.7% | -0.9% |
| 196986_2011 | 520.21 | 89.7 | -4.9% | -1.1% | 0.7% |
| 197177_2011 | 520.65 | 106.2 | -2.7% | -1.2% | -1.6% |
| 197383_2011 | 521.08 | 135.0 | -2.8% | -1.6% | -1.0% |
| 197578_2011 | 521.33 | 96.5 | -6.6% | -0.3% | -0.3% |

| | | | | | | |
|--------------------------|---------------|------------|--|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Aare, Bern – Worblaufen | Profil | WSP | Benetzter FlieBsquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMSO_50cm |
| | 177342_2011 | 491.24 | 201.9 | 3.34% | -1.58% | -0.60% |
| | 177533_2011 | 491.51 | 189.7 | 8.29% | -5.21% | -0.23% |
| | 177588_2011 | 491.39 | 184.1 | 8% | 0% | -1% |
| | 177734_2011 | 491.75 | 189.6 | 2.00% | -0.54% | 0.77% |
| | 177942_2011 | 492.22 | 194.3 | 4% | 0% | -2% |
| | 178154_2011 | 491.83 | 170.5 | 0.28% | -0.50% | -1.09% |
| | 178341_2011 | 491.07 | 120.6 | 11.22% | 0.04% | -3.29% |
| | 178480_2011 | 492.53 | 214.1 | 1.81% | -0.06% | -1.45% |
| | 178544_2011 | 492.70 | 217.9 | 1% | 0% | 0% |
| | 178747_2011 | 492.87 | 196.8 | 1.10% | -0.25% | -0.67% |
| | 178949_2011 | 492.68 | 167.4 | 2.97% | -0.65% | 0.62% |
| | 179110_2011 | 493.44 | 208.1 | -0.23% | 0.06% | -0.43% |
| | 179152_2011 | 493.51 | 201.7 | 2.54% | 0.29% | 0.25% |
| | 179297_2011 | 495.18 | 348.9 | 5% | 0% | -2% |
| | 179359_2011 | 493.31 | 167.5 | 11.80% | 0.59% | -0.06% |
| | 179556_2011 | 494.77 | 241.3 | 8.47% | 0.02% | -0.76% |
| | 179757_2011 | 495 | 235.3 | 4.98% | -0.22% | -0.67% |
| | 179959_2011 | 495.37 | 255.5 | 0.00% | -0.10% | 1.50% |
| | 180158_2011 | 496.16 | 288.8 | -2.18% | 0.03% | -3.04% |
| | 180752_2011 | 497.48 | 279.6 | -3.21% | -0.01% | -1.52% |
| | 180951_2011 | 496.36 | 192.5 | 1.28% | -0.24% | 0.64% |
| | 181149_2011 | 495.21 | 114.1 | 0.28% | -0.04% | 0.28% |
| | 181349_2011 | 496.57 | 169.3 | -0.37% | 0.10% | -0.74% |
| | 181549_2011 | 496.81 | 171.5 | 1.34% | -0.10% | 0.30% |
| | 181751_2011 | 497.39 | 202.9 | 1.35% | 0.07% | -0.66% |
| | 181942_2011 | 497.36 | 179. | -0.13% | -0.24% | -1.27% |
| | 182148_2011 | 497.43 | 168.7 | -0.25% | -0.03% | -1.25% |
| | 182346_2011 | 497.63 | 172.6 | 0.04% | 0.00% | -0.45% |
| | 182396_2011 | 497.78 | 173.5 | -0.52% | -0.95% | -0.45% |
| | 182539_2011 | 497.98 | 179.1 | -0.75% | 0.05% | -1.08% |
| | 182741_2011 | 498.06 | 169.1 | -2.51% | -0.07% | -2.25% |
| | 182947_2011 | 497.81 | 145.7 | 0.67% | -1.02% | 0.97% |
| 183200_2011 | 498.75 | 262.5 | -1.88% | -2.37% | -1.88% | |
| 183316_2011 | 496.77 | 89.8 | 0.09% | 1.39% | 0.00% | |
| 183529_2011 | 497.55 | 97.7 | 0.53% | -0.72% | 0.60% | |
| Aare, Altreu – Solothurn | Profil | WSP | Benetzter FlieBsquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMSO_50cm |
| | 95021_2010 | 429.85 | 736 | -0.05% | -0.22% | -0.05% |
| | 95045_2010 | 430.5 | 808 | -0.22% | 0.11% | -0.21% |
| | 95138_2010 | 428.31 | 549 | -0.29% | -1.88% | -0.61% |
| | 95176_2010 | 429.95 | 724 | -0.17% | 0.08% | -0.20% |
| | 95183_2010 | 430.2 | 681 | -0.26% | 0.46% | -0.71% |
| | 95201_2010 | 426.56 | 369 | -2.57% | 3.46% | -2.57% |
| 95255_2010 | 429.32 | 716 | 0.03% | -0.04% | 0.12% | |

| | | | | | |
|-------------|--------|------|--------|--------|--------|
| 95301_2010 | 429.13 | 792 | -1.33% | -1.92% | -1.14% |
| 95373_2010 | 428.87 | 741 | 0.05% | 1.12% | -0.33% |
| 95494_2010 | 428.84 | 820 | 0.14% | -0.07% | -0.46% |
| 95788_2010 | 428.25 | 795 | -0.47% | -0.01% | -0.67% |
| 95895_2010 | 430.04 | 1066 | -0.70% | -0.56% | -0.56% |
| 96014_2010 | 428.63 | 815 | -0.02% | 0.52% | 0.05% |
| 96193_2010 | 428.52 | 929 | 0.48% | 0.12% | 0.11% |
| 96450_2010 | 428.37 | 769 | -0.07% | 0.27% | -0.26% |
| 96642_2010 | 427.68 | 836 | 0.29% | 0.06% | 0.33% |
| 96803_2010 | 428.16 | 890 | -0.24% | -0.05% | -0.10% |
| 97021_2010 | 428.74 | 1134 | -0.21% | 0.23% | -0.37% |
| 97284_2010 | 428.16 | 930 | -0.60% | -0.09% | -0.75% |
| 97507_2010 | 427.91 | 797 | 0.75% | -0.30% | 0.73% |
| 97735_2010 | 427.88 | 793 | 0.26% | -0.21% | 0.39% |
| 97946_2010 | 428.23 | 790 | 0.39% | 0.17% | 0.17% |
| 98171_2010 | 427.45 | 998 | -0.53% | 0.32% | -0.50% |
| 98384_2010 | 427.49 | 809 | -1.26% | -0.22% | -1.07% |
| 98717_2010 | 427.80 | 840 | 0.06% | -0.16% | 0.13% |
| 98916_2010 | 427.60 | 777 | -0.68% | -0.10% | -0.36% |
| 99196_2010 | 427.69 | 731 | -1.56% | -0.08% | -1.27% |
| 99490_2010 | 427.23 | 748 | 0.13% | -0.16% | 0.55% |
| 99732_2010 | 427.3 | 838 | -1.78% | 0.02% | -0.70% |
| 99974_2010 | 427.35 | 937 | -1.37% | 0.00% | -1.18% |
| 100254_2010 | 428.15 | 885 | -0.30% | -0.03% | -0.40% |
| 100426_2010 | 427.41 | 652 | -1.39% | 0.17% | -1.52% |
| 100594_2010 | 428.13 | 848 | -0.79% | -1.45% | -0.54% |
| 101008_2010 | 427.97 | 413 | -0.81% | 0.16% | 0.09% |
| 101207_2010 | 428.31 | 425 | -0.87% | -0.08% | -0.81% |
| 101336_2010 | 427.99 | 446 | -1.29% | 0.13% | -1.09% |
| 101774_2010 | 427.33 | 864 | -0.14% | -0.01% | -0.37% |
| 101972_2010 | 427.80 | 903 | -0.60% | -0.12% | -0.61% |
| 102231_2010 | 427.80 | 905 | -0.32% | -0.18% | -0.25% |
| 102450_2010 | 428.21 | 993 | -0.25% | 0.00% | -0.23% |
| 102702_2010 | 428.61 | 974 | -0.33% | -0.05% | -0.97% |
| 102938_2010 | 428.11 | 966 | 0.76% | -0.10% | 0.18% |
| 103116_2010 | 428.17 | 1024 | 0.02% | -0.05% | -0.02% |
| 103294_2010 | 428.23 | 1091 | -1.00% | 0.18% | -0.98% |
| 103471_2010 | 428.26 | 1066 | -0.13% | -0.06% | -1.15% |
| 103653_2010 | 428.53 | 1065 | -0.56% | -0.08% | -0.41% |
| 103795_2010 | 428.22 | 904 | 0.66% | -0.05% | 0.24% |
| 103892_2010 | 428.64 | 870 | -0.30% | 1.03% | -0.89% |
| 104034_2010 | 428.78 | 1814 | -1.35% | 4.23% | -1.45% |
| 104103_2010 | 428.10 | 1372 | -0.54% | 0.66% | -0.58% |
| 104245_2010 | 427.9 | 843 | -0.62% | 2.66% | -0.92% |
| 104328_2010 | 427.35 | 698 | -1.25% | -0.12% | -0.93% |

| | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|------------|--------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| | 104443_2010 | 427.38 | 796 | -1.44% | 0.65% | -1.13% |
| | 104513_2010 | 427.69 | 824 | -1.24% | 0.09% | -1.57% |
| | 104622_2010 | 427.73 | 949 | -2.90% | -0.29% | -2.29% |
| | 104723_2010 | 427.89 | 993 | -1.80% | 0.54% | -1.62% |
| | 104823_2010 | 427.80 | 881 | -1.30% | 0.93% | -1.10% |
| | 104976_2010 | 427.89 | 825 | -1.66% | 0.11% | -1.55% |
| | 105112_2010 | 427.85 | 742 | -0.55% | -0.11% | -0.87% |
| | 105248_2010 | 428.23 | 768 | -1.14% | -0.01% | -1.28% |
| | 105363_2010 | 428.23 | 689 | -0.78% | 0.01% | -0.83% |
| | 105473_2010 | 428.49 | 766 | -0.18% | 0.21% | 0.11% |
| | 105602_2010 | 427.90 | 997 | -1.15% | -0.18% | -1.02% |
| | 105758_2010 | 427.93 | 927 | -0.56% | -0.14% | -0.52% |
| | 105904_2010 | 427.99 | 776 | -0.51% | 0.01% | -0.04% |
| | 106052_2010 | 427.68 | 697 | 0.40% | 0.03% | 0.38% |
| | 106158_2010 | 427.58 | 671 | -3.27% | 0.48% | -2.39% |
| | 106276_2010 | 427.41 | 716 | -1.85% | -0.12% | -1.54% |
| | 106388_2010 | 427.71 | 710 | -1.92% | 0.26% | -1.12% |
| | 106539_2010 | 428.77 | 916 | 0.51% | -0.02% | 0.74% |
| | 106664_2010 | 428.84 | 919 | -1.34% | 0.28% | -0.79% |
| | 106809_2010 | 428.50 | 1062 | -2.75% | -0.07% | -1.53% |
| | 106990_2010 | 428.30 | 1139 | 0.76% | 0.00% | 0.44% |
| | 107169_2010 | 428.17 | 932 | -0.38% | 0.33% | -0.20% |
| | 107307_2010 | 428.49 | 989 | 0.57% | -0.07% | 0.33% |
| Emme, Gerlafingen - Luterbach | Profil | WSP | Fliessquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMBE_50cm |
| | 249_2013 | 428.47 | 129.0 | 108.81% | -0.47% | 49.84% |
| | 404_2013 | 427.52 | 354.4 | -0.02% | -0.27% | -0.14% |
| | 567_2013 | 431.41 | 370.8 | -1.07% | -0.90% | -1.95% |
| | 607_2013 | 428.46 | 120.5 | 1.32% | -0.31% | 0.03% |
| | 671_2013 | 430.42 | 274.2 | -3.59% | -1.00% | -1.98% |
| | 806_2013 | 429.14 | 107.7 | 0.96% | -0.52% | 1.32% |
| | 1006_2013 | 430.02 | 124.6 | 1.97% | -0.16% | 1.34% |
| | 1205_2013 | 430.88 | 125.9 | -2.15% | -0.03% | 0.59% |
| | 1402_2013 | 434.26 | 423.6 | -9.29% | -3.35% | -4.74% |
| | 1592_2013 | 432.64 | 133.3 | 5.85% | 0.09% | -1.23% |
| | 1674_2013 | 432.16 | 100.9 | 7.37% | -0.32% | -0.39% |
| | 1800_2013 | 433.14 | 117.0 | 9.55% | -0.08% | 0.34% |
| | 1866_2013 | 436.26 | 402.9 | -1.77% | -1.90% | -1.87% |
| | 2018_2013 | 434.07 | 133.4 | 3.31% | -0.86% | -0.86% |
| | 2220_2013 | 434.56 | 157.0 | -0.96% | -0.31% | -0.32% |
| | 2285_2013 | 434.46 | 82.7 | 3.50% | 0.78% | 7.21% |
| | 2329_2013 | 437.68 | 317.8 | -1.49% | -0.66% | -1.05% |
| | 2409_2013 | 435.69 | 126.7 | 0.57% | -0.35% | 0.99% |
| | 2598_2013 | 436.3 | 143.9 | 1.28% | -0.77% | -0.11% |
| 2695_2013 | 436.66 | 126.9 | 5.61% | -0.88% | -0.34% | |

| | | | | | |
|-----------|--------|-------|---------|--------|--------|
| 2794_2013 | 437.17 | 133.0 | 4.05% | -0.85% | -1.41% |
| 2996_2013 | 438.55 | 177.3 | -0.53% | -0.77% | -2.39% |
| 3196_2013 | 439.11 | 149.5 | -0.91% | -0.38% | -2.95% |
| 3330_2013 | 439.17 | 104.7 | 3.12% | 0.09% | -0.56% |
| 3385_2013 | 439.62 | 138.7 | 1.96% | -0.23% | -0.76% |
| 3585_2013 | 440.35 | 153.0 | 2.56% | -0.65% | -0.94% |
| 3786_2013 | 440.99 | 143.0 | -1.74% | -0.90% | -2.67% |
| 3934_2013 | 441.94 | 150.3 | 1.57% | -2.75% | -3.25% |
| 3987_2013 | 442.16 | 143.7 | 2.43% | -0.30% | -0.55% |
| 4187_2013 | 443.36 | 157.2 | 2.09% | -0.29% | -0.73% |
| 4386_2013 | 444.29 | 160.1 | 1.81% | -0.24% | -0.02% |
| 4542_2013 | 444.91 | 134.6 | 6.71% | -0.69% | 2.67% |
| 4562_2013 | 444.9 | 136.8 | 1.06% | -0.56% | 0.14% |
| 4591_2013 | 445.01 | 167.7 | 1.14% | -0.07% | 0.23% |
| 4738_2013 | 447.48 | 177.5 | -0.52% | 0.52% | 0.40% |
| 4860_2013 | 447.85 | 180.7 | -0.67% | -0.12% | -0.73% |
| 4907_2013 | 447.21 | 160.8 | -0.91% | 0.53% | -0.16% |
| 4929_2013 | 447.48 | 143.2 | 0.28% | 0.39% | 1.02% |
| 4998_2013 | 447.21 | 119.1 | 3.30% | -0.61% | 0.54% |
| 5057_2013 | 447.6 | 129.3 | 0.60% | -0.58% | -0.43% |
| 5121_2013 | 449.77 | 296.1 | 5.65% | -1.55% | -1.29% |
| 5188_2013 | 448.02 | 131.6 | 2.29% | -0.20% | -0.31% |
| 5261_2013 | 448.23 | 119.4 | 2.42% | -0.44% | -0.25% |
| 5321_2013 | 448.53 | 125.1 | 1.23% | -0.08% | -0.66% |
| 5394_2013 | 448.85 | 127.6 | 1.16% | -1.53% | 0.16% |
| 5464_2013 | 449.23 | 130.2 | 1.51% | -0.58% | -0.24% |
| 5497_2013 | 451.1 | 261.2 | 4.48% | -0.57% | -0.52% |
| 5544_2013 | 451.17 | 234.5 | -3.04% | -0.41% | -0.51% |
| 5597_2013 | 451.3 | 244.9 | 1.57% | -0.61% | -0.26% |
| 5691_2013 | 451.68 | 246.2 | 1.48% | -1.06% | -1.18% |
| 5795_2013 | 451.26 | 182.7 | -6.36% | -0.99% | -0.70% |
| 5872_2013 | 452.53 | 241.5 | -0.47% | -0.23% | -0.14% |
| 5965_2013 | 452.52 | 232.9 | -7.92% | -1.13% | -0.27% |
| 5976_2013 | 451.4 | 170.1 | -3.74% | -0.23% | 0.37% |
| 5981_2013 | 451.61 | 143.4 | 0.27% | -0.03% | 8.69% |
| 5987_2013 | 451.68 | 158.6 | -9.82% | 0.48% | -0.20% |
| 6016_2013 | 453.06 | 254.3 | -11.69% | -0.59% | -0.06% |
| 6078_2013 | 453.64 | 298.1 | -15.27% | -0.41% | 0.24% |
| 6148_2013 | 453.95 | 296.9 | -5.01% | -0.17% | 0.29% |
| 6251_2013 | 452.93 | 164.1 | -7.19% | -0.13% | 1.37% |

Anhang C2 – Hydraulische Kennwerte Interpolation

| Aare, Münsingen – Bern | Profil | WSP | Fliessquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMBE_50cm |
|------------------------|-------------|--------|-------------------|------------------------|---------|-----------------------|
| | 184435_2011 | 502.13 | 228.8 | 13.85% | 9.91% | 13.29% |
| 184557_2011 | 502 | 198.7 | 2.30% | 7.15% | 2.05% | |
| 184592_2011 | 503.43 | 330.7 | -9.20% | -8.15% | -8.63% | |
| 184736_2011 | 502.21 | 177.4 | 4.22% | 10.55% | 3.39% | |
| 184937_2011 | 502.48 | 180.1 | -3.63% | -5.60% | -3.78% | |
| 185112_2011 | 502.62 | 169.5 | -0.85% | 5.63% | -0.42% | |
| 185307_2011 | 503.37 | 190.8 | 1.27% | -1.55% | 0.43% | |
| 185493_2011 | 503.83 | 198.9 | 1.16% | 0.44% | -2.38% | |
| 185673_2011 | 504.06 | 197.6 | 2.73% | 1.09% | 1.08% | |
| 185762_2011 | 506.4 | 310.2 | -0.50% | -1.61% | -1.08% | |
| 185809_2011 | 504.24 | 187.3 | -1.99% | 2.60% | -1.41% | |
| 186010_2011 | 504.93 | 223.1 | 4.91% | -3.78% | 5.17% | |
| 186217_2011 | 504.63 | 187.7 | -2.22% | 5.05% | -1.17% | |
| 186283_2011 | 504.72 | 177.9 | -9.98% | -5.22% | -8.39% | |
| 186409_2011 | 504.98 | 180.7 | 5.42% | -4.52% | 3.95% | |
| 186608_2011 | 504.92 | 177.3 | -10.31% | 10.56% | -12.99% | |
| 186819_2011 | 505.95 | 214.2 | 7.49% | 15.84% | 4.97% | |
| 187030_2011 | 506.75 | 224.4 | -4.30% | -16.26% | -4.81% | |
| 187217_2011 | 506.16 | 203.8 | -1.10% | 4.18% | -1.95% | |
| 187409_2011 | 506.37 | 205.3 | -1.15% | 0.31% | -1.82% | |
| 187611_2011 | 506.98 | 200.9 | 0.41% | 3.89% | -2.96% | |
| 187814_2011 | 507.17 | 192.8 | -0.49% | 4.33% | 0.44% | |
| 188018_2011 | 507.43 | 207.7 | 3.55% | -8.26% | 1.83% | |
| 188207_2011 | 507.85 | 243.7 | -5.79% | 3.32% | -12.54% | |
| 188414_2011 | 508.04 | 255.5 | -1.40% | -6.17% | -6.95% | |
| 188643_2011 | 508.42 | 230.9 | -1.37% | -1.44% | -7.70% | |
| 188808_2011 | 508.76 | 227.9 | 15.86% | 7.94% | 6.88% | |
| 189013_2011 | 508.95 | 216.6 | -3.14% | -5.45% | -5.63% | |
| 189225_2011 | 509.45 | 277.8 | 2.88% | 1.12% | -2.88% | |
| 189453_2011 | 509.8 | 222.5 | -1.48% | 8.12% | -4.25% | |
| 189664_2011 | 510.12 | 285.0 | -3.81% | -17.45% | -4.77% | |
| 189866_2011 | 510.51 | 274.2 | -3.12% | 25.04% | -2.71% | |
| 190066_2011 | 510.3 | 216.4 | -17.91% | -22.72% | -10.45% | |
| 190270_2011 | 510.34 | 196.3 | -8.05% | 9.78% | 0.42% | |
| 190473_2011 | 510.66 | 191.5 | -26.20% | 2.34% | -4.63% | |
| 190678_2011 | 510.69 | 177.4 | -26.53% | 6.36% | -10.27% | |
| 190876_2011 | 511.49 | 190.5 | -6.41% | -0.62% | 3.60% | |
| 190907_2011 | 512.54 | 249.3 | -11.93% | 2.14% | -3.60% | |
| 191090_2011 | 512.53 | 287.4 | -8.09% | -7.22% | 9.42% | |
| 191287_2011 | 511.8 | 184.0 | -10.22% | 9.49% | -1.93% | |
| 191500_2011 | 512.62 | 231.0 | -8.44% | -11.00% | -3.33% | |
| 191697_2011 | 513.26 | 221.7 | 1.36% | 7.49% | 7.58% | |

| | | | | | |
|-------------|--------|-------|---------|---------|---------|
| 191896_2011 | 513.25 | 221.7 | -8.79% | -9.79% | -0.12% |
| 192092_2011 | 513.57 | 191.5 | -12.69% | 6.65% | -6.51% |
| 192293_2011 | 513.34 | 164.4 | 7.42% | 15.14% | 13.61% |
| 192492_2011 | 513.71 | 185.8 | -23.53% | -21.06% | -18.12% |
| 192703_2011 | 514.04 | 184.2 | 10.17% | 0.26% | 14.36% |
| 192904_2011 | 514.56 | 177.1 | -24.32% | -3.83% | -1.64% |
| 193110_2011 | 515.8 | 326.4 | -16.85% | 11.60% | -4.64% |
| 193318_2011 | 516.85 | 366.9 | -8.96% | -4.73% | 2.85% |
| 193523_2011 | 516.23 | 242.4 | -5.51% | -2.65% | 0.16% |
| 193724_2011 | 516.45 | 231.2 | -10.71% | -3.38% | -7.16% |
| 193926_2011 | 516.7 | 221.8 | -2.25% | 0.33% | 3.40% |
| 194129_2011 | 517.08 | 212.2 | -5.83% | -3.34% | -1.47% |
| 194334_2011 | 517.39 | 218.8 | -4.12% | 1.90% | 0.05% |
| 194536_2011 | 517.23 | 180.2 | -4.11% | 0.55% | -0.27% |
| 194739_2011 | 517.67 | 197.7 | -2.90% | -3.25% | 1.64% |
| 194942_2011 | 518.11 | 190.0 | -13.72% | -2.60% | -7.31% |
| 195154_2011 | 518.6 | 208.2 | -1.14% | 6.70% | 6.68% |
| 195258_2011 | 520.85 | 319.8 | -3.89% | -2.75% | -1.64% |
| 195306_2011 | 519.18 | 226.5 | 1.40% | -1.03% | 4.86% |
| 195363_2011 | 519.16 | 265.2 | -18.94% | -13.65% | -12.71% |
| 195467_2011 | 517.77 | 127.1 | 6.64% | 8.87% | 14.69% |
| 195568_2011 | 518.46 | 179.4 | -13.12% | 7.29% | -4.39% |
| 195670_2011 | 519.78 | 277.1 | -14.80% | 1.80% | -4.62% |
| 195772_2011 | 519.56 | 221.5 | 3.73% | -6.31% | 6.80% |
| 195874_2011 | 519.6 | 212.3 | 1.64% | -11.81% | 7.48% |
| 195976_2011 | 519.64 | 190.6 | -11.97% | 8.66% | -3.41% |
| 196078_2011 | 519.67 | 187.1 | 6.30% | -3.31% | 9.86% |
| 196180_2011 | 520.09 | 203.6 | -22.46% | 8.09% | -9.55% |
| 196282_2011 | 520.09 | 200.4 | -21.23% | -11.89% | -3.09% |
| 196389_2011 | 520.57 | 220.2 | -10.71% | 0.48% | -2.78% |
| 196485_2011 | 520.89 | 202.1 | 3.82% | 2.81% | 7.06% |
| 196585_2011 | 521.4 | 228.6 | -7.04% | -0.09% | -4.04% |
| 196685_2011 | 521.84 | 288.9 | -8.15% | -5.98% | -3.48% |
| 196783_2011 | 521.57 | 231.3 | 0.93% | -0.67% | 5.40% |
| 196986_2011 | 522.32 | 252.8 | -8.65% | 0.81% | -4.04% |
| 197177_2011 | 522.68 | 319.8 | 9.81% | 1.74% | 12.21% |
| 197383_2011 | 522.61 | 267.5 | -13.30% | -1.86% | -11.18% |
| 197578_2011 | 522.87 | 203.5 | 6.53% | 14.40% | 5.55% |

| | | | | | | |
|-------------------------|---------------|------------|--------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| Aare, Bern – Worblaufen | Profil | WSP | Fliessquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMBE_50cm |
| | 177342_2011 | 491.24 | 201.9 | -3.46% | -3.28% | -7.23% |
| | 177533_2011 | 491.51 | 189.8 | 2.98% | 5.80% | -5.53% |
| | 177588_2011 | 491.39 | 184.1 | 8.82% | -2.31% | 0.60% |
| | 177734_2011 | 491.75 | 189.6 | 6.53% | -9.48% | 5.30% |
| | 177942_2011 | 492.22 | 194.4 | -6.92% | -13.92% | -13.01% |
| | 178154_2011 | 491.83 | 170.6 | 25.83% | 10.10% | 24.46% |
| | 178341_2011 | 491.07 | 120.7 | -5.75% | -28.78% | -20.69% |
| | 178480_2011 | 492.53 | 214.1 | 7.56% | 1.52% | 4.30% |
| | 178544_2011 | 492.70 | 217.9 | 6.51% | 9.51% | 4.91% |
| | 178747_2011 | 492.87 | 196.8 | -8.27% | -11.95% | -10.03% |
| | 178949_2011 | 492.68 | 167.5 | -6.92% | -6.13% | -9.27% |
| | 179110_2011 | 493.44 | 208.2 | 8.17% | -4.39% | 7.98% |
| | 179152_2011 | 493.51 | 201.8 | -1.00% | 8.54% | -3.30% |
| | 179297_2011 | 495.18 | 349.0 | 2.01% | 3.72% | -5.08% |
| | 179359_2011 | 493.31 | 167.5 | 21.10% | 0.20% | 9.24% |
| | 179556_2011 | 494.77 | 241.3 | 6.31% | 2.30% | -2.92% |
| | 179757_2011 | 495 | 235.4 | 2.29% | -2.33% | -3.36% |
| | 179959_2011 | 495.37 | 255.5 | 3.89% | -5.80% | 5.38% |
| | 180158_2011 | 496.16 | 288.9 | 16.26% | 24.77% | 15.51% |
| | 180752_2011 | 497.48 | 279.7 | -4.41% | 4.19% | -5.07% |
| | 180951_2011 | 496.36 | 192.5 | -0.72% | -1.74% | -1.36% |
| | 181149_2011 | 495.21 | 114.2 | -0.49% | -16.93% | -0.49% |
| | 181349_2011 | 496.57 | 169.3 | 1.41% | 13.60% | 1.04% |
| | 181549_2011 | 496.81 | 171.5 | -0.07% | 2.00% | -1.11% |
| | 181751_2011 | 497.39 | 202.9 | 0.50% | 8.24% | -1.51% |
| | 181942_2011 | 497.36 | 179.1 | 1.32% | -12.16% | 0.17% |
| | 182148_2011 | 497.43 | 168.8 | -0.01% | -0.58% | -1.02% |
| | 182346_2011 | 497.63 | 172.7 | -3.01% | -5.52% | -3.50% |
| | 182396_2011 | 497.78 | 173.6 | 4.06% | 3.55% | 3.88% |
| | 182539_2011 | 497.98 | 179.2 | -3.04% | 4.03% | -3.38% |
| | 182741_2011 | 498.06 | 169.2 | -4.80% | -19.73% | -4.53% |
| | 182947_2011 | 497.81 | 145.7 | -2.93% | 11.22% | -2.63% |
| | 183200_2011 | 498.75 | 262.5 | -4.56% | -10.59% | -4.56% |
| | 183316_2011 | 496.77 | 89.9 | -1.63% | -18.18% | -1.67% |
| 183529_2011 | 497.55 | 97.8 | 12.56% | 20.76% | 12.64% | |
| Aare, Atrou – Solothurn | Profil | WSP | Fliessquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMSO_2m |
| | 95021_2010 | 429.86 | 736.0 | -1.68% | -1.86% | -1.68% |
| | 95045_2010 | 430.58 | 808.4 | -1.76% | -8.35% | -1.74% |
| | 95138_2010 | 428.32 | 548.8 | 8.79% | -0.17% | 8.47% |
| | 95176_2010 | 429.95 | 724.0 | -8.91% | -6.59% | -8.95% |
| | 95183_2010 | 430.23 | 681.4 | 4.36% | 17.58% | 3.90% |
| | 95201_2010 | 426.56 | 368.7 | 7.92% | 9.82% | 7.92% |
| 95255_2010 | 429.32 | 716.0 | 0.63% | 0.83% | 0.72% | |

| | | | | | |
|-------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 95301_2010 | 429.14 | 792.3 | -5.37% | -13.80% | -5.18% |
| 95373_2010 | 428.87 | 741.4 | -2.02% | 11.16% | -2.40% |
| 95494_2010 | 428.84 | 820.4 | 0.65% | -3.53% | 0.05% |
| 95788_2010 | 428.25 | 795.4 | 7.68% | 4.24% | 7.48% |
| 95895_2010 | 430.04 | 1065.6 | -12.85% | -12.73% | -12.71% |
| 96014_2010 | 428.64 | 815.3 | 11.11% | 16.12% | 11.18% |
| 96193_2010 | 428.52 | 929.3 | 8.53% | 2.58% | 8.16% |
| 96450_2010 | 428.38 | 769.0 | -4.23% | -0.82% | -4.43% |
| 96642_2010 | 427.68 | 835.9 | 0.15% | -4.05% | 0.19% |
| 96803_2010 | 428.16 | 889.6 | 2.00% | -5.28% | 2.14% |
| 97021_2010 | 428.74 | 1133.8 | 3.43% | 16.59% | 3.27% |
| 97284_2010 | 428.16 | 929.6 | 12.53% | 3.15% | 12.37% |
| 97507_2010 | 427.91 | 797.1 | -18.83% | -13.26% | -18.86% |
| 97735_2010 | 427.88 | 792.5 | 6.14% | -5.07% | 6.27% |
| 97946_2010 | 428.23 | 790.2 | 2.08% | 13.02% | 1.86% |
| 98171_2010 | 427.46 | 997.8 | 10.60% | -3.16% | 10.63% |
| 98384_2010 | 427.49 | 809.4 | -5.64% | 10.06% | -5.45% |
| 98717_2010 | 427.80 | 840.3 | -2.78% | -4.73% | -2.72% |
| 98916_2010 | 427.60 | 776.6 | -7.57% | -5.18% | -7.25% |
| 99196_2010 | 427.70 | 731.4 | 6.26% | 4.25% | 6.55% |
| 99490_2010 | 427.23 | 748.3 | -1.69% | 3.37% | -1.26% |
| 99732_2010 | 427.30 | 837.9 | -6.57% | 1.25% | -5.49% |
| 99974_2010 | 427.36 | 936.9 | -0.74% | 1.46% | -0.55% |
| 100254_2010 | 428.16 | 884.7 | 6.99% | 4.08% | 6.88% |
| 100426_2010 | 427.42 | 652.3 | -4.19% | -9.42% | -4.32% |
| 100594_2010 | 428.13 | 847.5 | 3.76% | 1.80% | 4.02% |
| 101008_2010 | 427.98 | 412.6 | -1.46% | 5.57% | -0.56% |
| 101207_2010 | 428.31 | 425.4 | -6.34% | -3.23% | -6.29% |
| 101336_2010 | 427.99 | 445.6 | 4.98% | 8.26% | 5.19% |
| 101774_2010 | 427.34 | 863.7 | 3.86% | -3.11% | 3.64% |
| 101972_2010 | 427.81 | 903.0 | -5.19% | -4.40% | -5.20% |
| 102231_2010 | 427.80 | 904.6 | 5.52% | 7.68% | 5.59% |
| 102450_2010 | 428.22 | 992.7 | 0.48% | -8.10% | 0.51% |
| 102702_2010 | 428.61 | 973.8 | -4.64% | 5.80% | -5.28% |
| 102938_2010 | 428.11 | 965.6 | 0.56% | -5.46% | -0.02% |
| 103116_2010 | 428.18 | 1024.4 | -2.49% | -1.82% | -2.53% |
| 103294_2010 | 428.24 | 1090.7 | 3.73% | 6.68% | 3.75% |
| 103471_2010 | 428.27 | 1065.5 | -0.81% | 4.08% | -1.82% |
| 103653_2010 | 428.54 | 1064.6 | 7.00% | 5.95% | 7.15% |
| 103795_2010 | 428.22 | 903.8 | -0.25% | -0.82% | -0.67% |
| 103892_2010 | 428.65 | 870.3 | -6.13% | 5.77% | -6.71% |
| 104034_2010 | 428.79 | 1813.6 | -3.44% | 1.75% | -3.55% |
| 104103_2010 | 428.11 | 1372.4 | -5.48% | -1.09% | -5.52% |
| 104245_2010 | 427.90 | 842.6 | 7.84% | 7.29% | 7.54% |
| 104328_2010 | 427.35 | 698.1 | 10.83% | 6.36% | 11.15% |

| | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|------------|--------------------------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|
| | 104443_2010 | 427.38 | 795.9 | -13.49% | -9.96% | -13.18% |
| | 104513_2010 | 427.70 | 824.5 | 0.98% | 9.97% | 0.68% |
| | 104622_2010 | 427.74 | 949.1 | -2.83% | 3.25% | -2.22% |
| | 104723_2010 | 427.89 | 992.7 | -1.71% | 1.33% | -1.53% |
| | 104823_2010 | 427.81 | 880.9 | 8.68% | 10.27% | 8.88% |
| | 104976_2010 | 427.90 | 824.6 | -3.23% | -0.94% | -3.13% |
| | 105112_2010 | 427.85 | 742.4 | -3.38% | -1.63% | -3.70% |
| | 105248_2010 | 428.24 | 768.3 | 3.94% | -3.73% | 3.80% |
| | 105363_2010 | 428.24 | 688.7 | -9.70% | -0.72% | -9.75% |
| | 105473_2010 | 428.50 | 766.0 | 13.47% | 10.10% | 13.75% |
| | 105602_2010 | 427.91 | 997.4 | -5.75% | -3.61% | -5.62% |
| | 105758_2010 | 427.94 | 926.7 | -15.20% | -17.90% | -15.16% |
| | 105904_2010 | 428.00 | 775.6 | 16.27% | 14.76% | 16.74% |
| | 106052_2010 | 427.68 | 697.4 | -1.74% | -0.71% | -1.76% |
| | 106158_2010 | 427.53 | 670.9 | -3.80% | 0.20% | -2.92% |
| | 106276_2010 | 427.42 | 716.4 | -7.97% | -4.71% | -7.66% |
| | 106388_2010 | 427.72 | 709.6 | 1.33% | 7.66% | 2.13% |
| | 106539_2010 | 428.77 | 915.6 | -3.31% | -11.18% | -3.08% |
| | 106664_2010 | 428.84 | 918.9 | 9.89% | 9.83% | 10.44% |
| | 106809_2010 | 428.51 | 1062.2 | -11.26% | 7.68% | -10.04% |
| | 106990_2010 | 428.31 | 1138.9 | -6.73% | -17.80% | -7.05% |
| | 107169_2010 | 428.18 | 931.5 | 13.86% | 11.91% | 14.03% |
| | 107307_2010 | 428.50 | 988.5 | 6.09% | 6.59% | 5.50% |
| Emme, Gerlafingen - Luterbach | Profil | WSP | Fliessquerschnitt | Caduff, swissALTI3D | Merwade | Caduff, DTMBE_50cm |
| | 249_2013 | 428.47 | 129.0 | 113.19% | 190.47% | 113.19% |
| | 404_2013 | 427.52 | 354.4 | -44.33% | -72.81% | -44.45% |
| | 567_2013 | 431.41 | 370.8 | 1.07% | 10.99% | 0.19% |
| | 607_2013 | 428.46 | 120.5 | 8.66% | -7.17% | 7.38% |
| | 671_2013 | 430.42 | 274.2 | -4.87% | -0.37% | -3.26% |
| | 806_2013 | 429.14 | 107.7 | -4.48% | -11.19% | -4.12% |
| | 1006_2013 | 430.02 | 124.6 | 15.92% | 0.84% | 15.29% |
| | 1205_2013 | 430.88 | 125.9 | -10.98% | -10.28% | -8.24% |
| | 1402_2013 | 434.26 | 423.6 | -7.46% | -1.88% | -2.92% |
| | 1592_2013 | 432.64 | 133.3 | -4.72% | 23.03% | -11.80% |
| | 1674_2013 | 432.16 | 100.9 | 25.72% | -23.24% | 17.96% |
| | 1800_2013 | 433.14 | 117.0 | 10.88% | 18.64% | 1.68% |
| | 1866_2013 | 436.26 | 402.9 | -3.76% | -4.88% | -3.87% |
| | 2018_2013 | 434.07 | 133.4 | 6.02% | 2.30% | 1.85% |
| | 2220_2013 | 434.56 | 157.0 | -16.67% | -26.22% | -16.03% |
| | 2285_2013 | 434.46 | 82.7 | 28.25% | 24.70% | 31.95% |
| | 2329_2013 | 437.68 | 317.8 | -4.43% | 1.13% | -3.99% |
| | 2409_2013 | 435.69 | 126.7 | -2.43% | 7.16% | -2.00% |
| | 2598_2013 | 436.3 | 143.9 | 9.89% | -16.31% | 8.50% |
| | 2695_2013 | 436.66 | 126.9 | 6.70% | 9.07% | 0.74% |

| | | | | | |
|-----------|--------|-------|---------|---------|---------|
| 2794_2013 | 437.17 | 133.0 | 2.38% | -3.64% | -3.07% |
| 2996_2013 | 438.55 | 177.3 | -3.91% | -18.68% | -5.77% |
| 3196_2013 | 439.11 | 149.5 | -10.68% | 6.73% | -12.73% |
| 3330_2013 | 439.17 | 104.7 | 20.87% | 18.82% | 17.18% |
| 3385_2013 | 439.62 | 138.7 | -5.04% | -5.52% | -7.76% |
| 3585_2013 | 440.35 | 153.0 | -1.18% | -16.69% | -4.67% |
| 3786_2013 | 440.99 | 143.0 | -9.40% | -10.60% | -10.34% |
| 3934_2013 | 441.94 | 150.3 | 11.55% | 6.82% | 6.73% |
| 3987_2013 | 442.16 | 143.7 | -3.05% | -1.07% | -6.03% |
| 4187_2013 | 443.36 | 157.2 | -2.32% | -16.51% | -5.14% |
| 4386_2013 | 444.29 | 160.1 | -8.02% | 2.40% | -9.85% |
| 4542_2013 | 444.91 | 134.6 | 17.93% | 10.59% | 13.88% |
| 4562_2013 | 444.9 | 136.8 | -5.55% | -10.81% | -6.47% |
| 4591_2013 | 445.01 | 167.7 | 0.32% | 8.72% | 0.39% |
| 4738_2013 | 447.48 | 177.5 | 2.22% | 1.59% | 2.43% |
| 4860_2013 | 447.85 | 180.7 | 1.83% | 4.05% | -0.64% |
| 4907_2013 | 447.21 | 160.8 | 4.32% | 0.18% | 5.06% |
| 4929_2013 | 447.48 | 143.2 | 1.65% | 5.39% | 2.40% |
| 4998_2013 | 447.21 | 119.1 | -0.79% | -10.00% | -3.15% |
| 5057_2013 | 447.6 | 129.3 | 8.70% | 0.22% | 7.67% |
| 5121_2013 | 449.77 | 296.1 | 6.92% | 0.01% | -0.02% |
| 5188_2013 | 448.02 | 131.6 | -2.65% | -6.61% | -5.25% |
| 5261_2013 | 448.23 | 119.4 | 3.52% | 3.29% | 0.85% |
| 5321_2013 | 448.53 | 125.1 | 1.76% | -0.47% | -0.13% |
| 5394_2013 | 448.85 | 127.6 | 0.30% | -4.59% | -0.70% |
| 5464_2013 | 449.23 | 130.2 | 2.22% | -1.20% | 0.48% |
| 5497_2013 | 451.1 | 261.2 | 4.22% | -0.83% | -0.78% |
| 5544_2013 | 451.17 | 234.5 | -3.49% | -0.02% | -0.97% |
| 5597_2013 | 451.3 | 244.9 | 4.46% | -1.98% | 2.63% |
| 5691_2013 | 451.68 | 246.2 | 0.38% | -0.60% | -2.28% |
| 5795_2013 | 451.26 | 182.7 | -4.80% | -5.03% | 0.86% |
| 5872_2013 | 452.53 | 241.5 | -0.47% | -0.27% | 0.28% |
| 5965_2013 | 452.52 | 232.9 | -5.64% | 6.13% | 2.00% |
| 5976_2013 | 451.4 | 170.1 | -12.15% | -20.51% | -8.03% |
| 5981_2013 | 451.61 | 143.4 | 5.46% | 17.83% | 13.88% |
| 5987_2013 | 451.68 | 158.6 | -11.49% | -6.23% | -1.87% |
| 6016_2013 | 453.06 | 254.3 | -11.28% | 0.06% | 0.35% |
| 6078_2013 | 453.64 | 298.1 | -18.60% | -4.29% | -3.09% |
| 6148_2013 | 453.95 | 296.9 | 0.33% | 4.07% | 5.62% |
| 6251_2013 | 452.93 | 164.1 | -6.46% | 0.28% | 2.11% |