

Prozessierung bundesweiter Geodaten für hydraulische Modellierung

MICHAEL H. WIMMER¹, MARKUS HOLLAUS¹, GOTTFRIED MANDLBURGER¹, ANDREAS BUTTINGER-KREUZHUBER^{1,2}, JÜRGEN WASER², JÜRGEN KOMMA¹ & NORBERT PFEIFER¹

Zusammenfassung: Hochauflösende räumliche Daten und davon abgeleitete Informationen sind ein bedeutender Input für hydraulische Simulationen, müssen aber vorab für die entsprechenden semantischen und algorithmischen Erfordernisse adaptiert werden. In dieser Arbeit wurden Höhenmodelle und Vektordaten des gesamten österreichischen Bundesgebiets für die hydraulische Simulation vorbereitet bzw. davon ausgehend weitere Datensätze abgeleitet (z.B. Wasser-Land-Grenzen). Angesichts der Menge und Heterogenität der Daten lag dabei besonderer Fokus auf der Automatisierung und der Anpassung der vorhandenen Datensätze untereinander. Im Sinne höchster Zuverlässigkeit der Ergebnisse verlangen die meisten Arbeitsschritte zumindest ein geringes Maß manueller Kontrolle, wobei der Aufwand durch Qualitätsindikatoren eingegrenzt werden kann.

1 Motivation und Einleitung

Das Projekt HORA 3.0 hat eine österreichweit konsistente Hochwasserrisikoanalyse durch hydraulische Simulation zum Ziel. Konsistenz erfordert eine möglichst homogene Datengrundlage, andererseits aber auch eine einheitliche Methodik, sodass die Ergebnisse bundesweit vergleichbar sind. Im Gegensatz zu lokalen Detailuntersuchungen ergibt sich somit der Vorteil einer großen Gebietsabdeckung bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung im Vergleich zu anderen überregionalen Modellen.

Die hydraulische Simulation benötigt neben der Hydrologie (Abflusswerte, ...) vor allem topographische oder andere raumbezogene Daten als Input. Konkret stehen ein Digitales Geländemodell (DGM, Auflösung 1 m), ein Digitales Oberflächenmodell (DOM, 1 m), das Flussachsen-Netzwerk (Abb. 1), gemessene bzw. berechnete Gewässerprofile, eine Digitale Katastralmappe (DKM) sowie weitere Vektor-Datensätze für Seen, Kraftwerke etc. zur Verfügung. DGM und DOM stammen von zahlreichen separaten Airborne Laser Scanning (ALS) Kampagnen, die in den entsprechenden Bundesländern durchgeführt und ausgewertet wurden. Die Flussachsen sind Teil des österreichischen Berichtsgewässernetzes (BGN) und liegen als Vektordatensatz vor. Das BGN ist der österreichische Referenzdatensatz für die Darstellung gewässerbezogener Daten gemäß EU Wasserrahmenrichtlinie (EU 2000) und EU Hochwasserrichtlinie (EU 2007). Andere Datensätze wie Gewässer-Profile oder Seen stammen von Gewässerbezirken, Ingenieurbüros oder Kraftwerksbetreibern und sind folglich in sich relativ heterogen.

¹ Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, A-1040 Wien, Österreich
E-Mail: [Michael.Wimmer, Markus.Hollaus, Norbert.Pfeifer, Gottfried.Mandlburger]@geo.tuwien.ac.at, andreas.buttinger-kreuzhuber@tuwien.ac.at, komma@hydro.tuwien.ac.at

² VRVis Zentrum für Virtual Reality und Visualisierung, Donau-City-Str. 11, A-1220 Wien, Österreich,
E-Mail: jwaser@vrvis.at

Aber auch die bundesweiten Daten sind weder bezüglich des Urhebers, noch hinsichtlich der Methodik und des Zeitpunktes der Erhebung vollständig konsistent. Um entsprechend dem Projektziel eine einheitliche Prozessierung und – sofern möglich – vergleichbare Datenqualität gewährleisten zu können, müssen sie vorab zusammengeführt und harmonisiert werden.

Davon ausgehend können die Daten für die Weiterverwendung in der Hydraulik und Visualisierung vorbereitet werden. Das umfasst einerseits die Anpassung bestehender Daten an die Erfordernisse der hydraulischen Simulation, aber andererseits auch basierend darauf die Erzeugung neuer Datensätze, die in der weiteren Verarbeitung benötigt werden.

Die Verwendung ALS-basierter topographischer Daten und deren Aufbereitung und Bedeutung für Hydrologie und Hydraulik wird in der Literatur umfangreich thematisiert (z.B. MANDLBURGER 2006; MANDLBURGER & BRIESE 2007; HOLLAUS et al. 2005; CASAS et al. 2006; MARKS & BATES 2000; PETROSELLI 2013). Der hauptsächliche Unterschied zu dieser Arbeit liegt darin, dass der Fokus meist auf einzelnen oder mehreren vergleichsweise kleinen Testgebieten liegt, in denen mit homogener Datengrundlage zu rechnen ist. Damit kommt Flexibilität und Automatisierungsgrad der verwendeten Methoden teilweise etwas geringere Bedeutung zu.

Zudem variieren die konkreten Anforderungen an Aufbau und Inhalt der weiterzuverarbeitenden räumlichen Datensätze. Am besten vergleichbar ist die Aufgabenstellung bei der Wasser-Land-Grenze, die als Übergang von der Wasseroberfläche zu trockener Topographie recht klar definiert ist. Die veröffentlichten Methoden basieren häufig auf (semi-)automatischer Auswertung von Luftbildern (GÜNERALP et al. 2013; ALI et al. 2015) oder auf ALS-Daten und davon abgeleiteten Modellen (MANDLBURGER 2006; PÉNARD & MOREL 2012; HÖFLE et al. 2009).

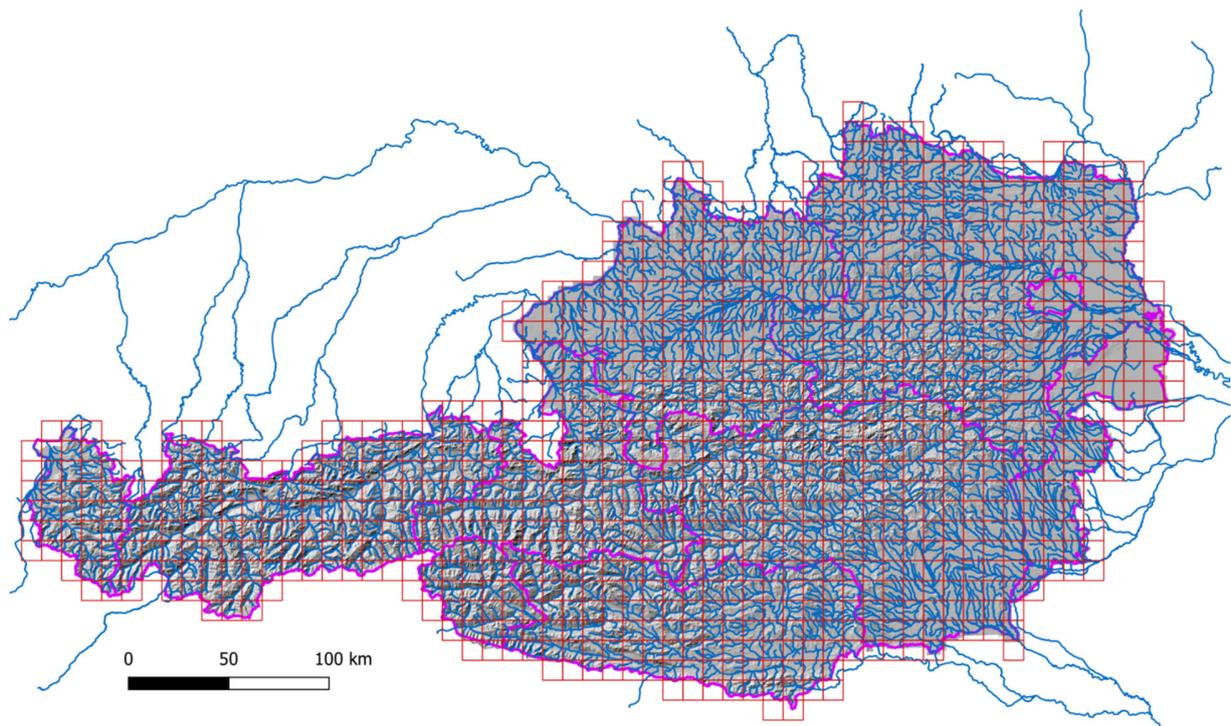


Abb. 1: Das Projektgebiet. Überblick über das verwendete Flussnetzwerk (blau) sowie das österreichweit vorliegende DGM das in Kacheln zu je 10 km Seitenlänge organisiert wird (Kachelgrenzen: rot)

2 Methoden

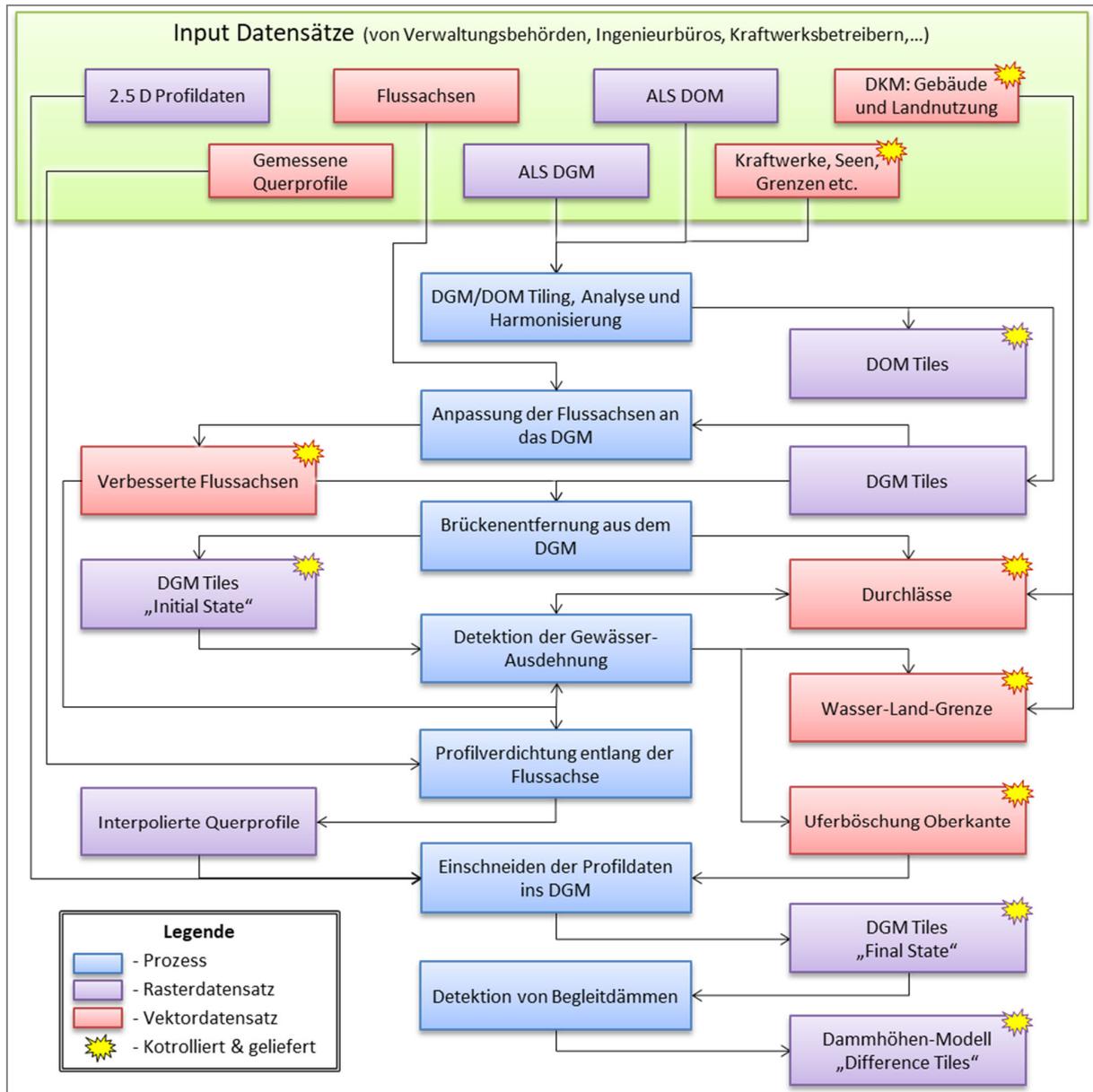


Abb. 2: Übersicht über die wichtigsten Bearbeitungsschritte und Ergebnisse. Jene Produkte, die für Weiterverarbeitung gedacht sind, wurden gelb markiert, der Rest sind interne Zwischenergebnisse

Die besondere Herausforderung bei diesem Projekt besteht in der großen Ausdehnung des Studiengebiets und der damit verbundenen Datenmenge. Konkret werden Flüsse mit einer Gesamtlänge von knapp 40.000 km sowie DGM und DOM mit rund 84.000 km² Fläche verwendet; die DKM weist über 3 Mio. Gebäude oder Gebäudeteile aus. Dies erfordert einen hohen Automatisierungsgrad in der Prozessierung, aber auch aussagekräftige Qualitätskriterien, um allfällige manuelle Korrekturen zielsicher einsetzen zu können und somit eine hohe Zuverlässigkeit aller

Ergebnisse zu gewährleisten. Die entscheidenden Arbeitsschritte werden im Folgenden näher beschrieben. Die Implementierung setzt sich aus Matlab- und Python-Scripts zusammen, wobei Letztere stark auf eine Einbindung der Punktwolken-Prozessierungssoftware OPALS (PFEIFER et al. 2014) setzen. Für GIS Operationen bzw. manuelle Kontrolle und allfällige Korrekturen kommt QGIS zum Einsatz. Der grobe Ablauf und die Zusammenhänge zwischen den Arbeitsschritten sind in Abb. 2 dargestellt.

2.1 Datenharmonisierung

Wie schon angesprochen, sind die Ausgangsdaten a priori nicht miteinander konsistent. Zwischen den verschiedenen Bundesländern bestehen beispielsweise Unterschiede hinsichtlich der Methoden zur DGM Erzeugung. Zudem verteilt sich die Erhebung der Daten auf einen Zeitraum von insgesamt 15 Jahren, was temporale Dekorrelation zur Folge hat. Diese Unterschiede müssen (i) innerhalb der Höhenmodelle an Landes-, Tile- oder Flugkampagnen-Grenzen berücksichtigt werden (siehe 2.1.1), vor allem aber auch (ii) zwischen unterschiedlichen Datensätzen (2.1.2).

2.1.1 Kontrolle und Harmonisierung des Geländemodells

Ziel der Datenaufbereitung ist idealerweise ein flächendeckend konsistentes DGM, in dem gleiche Objekte in der gleichen Art und Qualität repräsentiert sind, was insbesondere bei Gewässern (stehend und fließend), Brücken oder Bruchkanten initial nicht der Fall ist. Aufgrund der Datenmenge und mangels Informationen über Prozessierung und Datengrundlage ist jedoch eine flächendeckende Nachbearbeitung des DGM nicht sinnvoll realisierbar. Stattdessen werden bestehende Unterschiede intern dokumentiert und bei der Implementierung bzw. Parametrisierung weiterer Arbeitsschritte berücksichtigt.

Tatsächliche Anpassung erfolgt etwa bei aufgestauten Flüssen oder Seen an Landesgrenzen, da oftmals von den jeweiligen Bundesländern unterschiedliche Wasserhöhen modelliert werden, woraus sich am Übergang Sprungstellen ergeben. Mithilfe der Umriss des entsprechenden Gewässers wird der gesamte Wasserspiegel durch einfache GIS-Operationen auf eine konstante, gemittelte Höhe gebracht. Kleinräumigere Artefakte, die oftmals an den Grenzen der originalen Tiles auftreten, werden ebenfalls eliminiert, falls sie hoch genug sind, um auf die Interpretation des DGM Einfluss zu haben. Dazu werden die entsprechenden Artefakte aus dem Modell entfernt und durch Interpolation der Umgebung wieder befüllt.

Im Gegensatz zum DGM wird das Oberflächenmodell hauptsächlich als Hilfestellung bei der manuellen Kontrolle und zur Ableitung näherungsweise Gebäudehöhen für die Interpolation verwendet. Dementsprechend sind die Genauigkeitsansprüche im Vergleich zu anderen Datensätzen (z.B. Flussachsen) geringer und eine grobe Plausibilitätskontrolle der resultierenden Gebäudehöhen ist ausreichend.

2.1.2 Anpassung von Vektordaten an das DGM

Die aus unterschiedlichen Quellen stammenden und mit unterschiedlichen Methoden erhobenen Vektordaten stimmen in der Regel nicht ausreichend gut mit dem DGM überein. Das betrifft beispielsweise die Ausdehnung von Seen oder hydrologische Daten mit explizitem Raumbezug, vor allem aber die qualitativ sehr variablen Flussachsen. Da von diesen fast jedes Folgeprodukt

abhängt, ist ihre Anpassung an das DGM essentiell. Der vorrangige Grund, wieso die Vektor- an die Rasterdaten angepasst werden (und nicht umgekehrt), ist die global deutlich zuverlässigere Lagegenauigkeit der Rasterdaten. Zudem ist die Korrektur von 2D Polylinien (Flussachsen) mit weitaus weniger unsicheren Modellannahmen verbunden als das Verlegen ganzer Flusstäler im DGM.

Methodisch wird diese Korrektur mittels Querprofilen umgesetzt. Diese werden normal an die originalen Flussachsen angelegt. Ihre Ausdehnung wird etwas breiter als der höchste anzunehmende Fehler gewählt, damit das im DGM ersichtliche Flussbett jedenfalls enthalten ist. Im vorliegenden Fall hat sich aus Begutachtung der Daten eine Breite von 250 m ergeben.

Diese Querprofile werden beginnend mit der Quelle eines Flusses durchlaufen und für jedes wird aus verschiedenen Gewichtsfunktionen eine Detektor-Funktion kombiniert, deren Maximum den wahrscheinlichsten Schnittpunkt zwischen Querprofil und Flussachse laut DGM ausweist. Die Höhe des Maximums, absolut bzw. relativ zu anderen lokalen Maxima, gibt Aufschluss über die Zuverlässigkeit der Schätzung.

Im Folgenden sind kurz die Kriterien beschrieben, die für die einzelnen Gewichtsfunktionen verantwortlich sind. Diese sind so geordnet, dass die ersten Kriterien stärker diskriminieren, i.e. die Gewichte haben dort starke relative Unterschiede bzw. werden Bereiche sogar explizit ausgeschlossen. Die unteren Kriterien werden zwar immer mit einbezogen, zeigen aber vor allem dann Einfluss, wenn nicht schon eine klare Vorauswahl getroffen ist, z.B. bei breiten oder kaum definierten Flussbetten.

- Geländehöhe: Niedrige Abschnitte liegen, zumindest was die lokale Umgebung betrifft, wahrscheinlicher im Flussbett als höhere und werden daher stärker gewichtet.
- Durchlaufenes Höhenprofil: Speziell bei sehr nahe benachbarten Flüssen, aber auch in anderen Fällen kann nicht notwendigerweise davon ausgegangen werden, dass der niedrigste Punkt im Querprofil automatisch auch der Flussachse entspricht. Um möglicherweise tiefer liegende, benachbarte Täler auszuschließen, wird der Höhenverlauf seit dem letzten ermittelten Punkt der Flussachse berücksichtigt. Dieser sollte monoton fallend sein, je stärker das Gefälle, umso höher das Gewicht. Geringfügige Anstiege im Bereich der DGM Genauigkeit werden ebenfalls toleriert, größere Anstiege (z.B. mehr als wenige dm akkumuliert über 5 m Wegstrecke) führen zu einem Gewicht 0.
- Flussbettgeometrie: In der Mitte des Flussbetts wird relativ horizontales Gelände oder - bei kleinen Gewässern – ein lokales Minimum erwartet (das ALS DGM repräsentiert bestenfalls die Wasseroberfläche, nie das Flussbett). Entsprechend wird von einer geringen ersten Ableitung und einer geringen oder positiven zweiten Ableitung ausgegangen. Eine betragsmäßig große erste Ableitung bzw. eine negative zweite Ableitung führen zu geringerem Gewicht.
- Horizontale Distanz: Bei ähnlichen Voraussetzungen bezüglich Geländegeometrie wird erwartet, dass Wasser den kürzeren Weg nimmt, der folglich höher gewichtet wird. Dieses Kriterium hilft vor allem, allzu starken Zick-Zack Verlauf der korrigierten Achse innerhalb des Flussbetts zu vermeiden.
- Prädiktion aus dem bisherigen Verlauf: Neben einer kurzen Weglänge ist auch der bisherige Verlauf der Flussachse relevant. Dazu wird durch die zuletzt korrigierten Abschnitte

der Flussachse wird eine genäherte Kurve gelegt und mit dem aktuellen Querprofil verschnitten. Der Schnittpunkt ist das Zentrum einer Gauß-förmigen Gewichtsfunktion.

- Berücksichtigung der Näherungswerte: Das originale Gewässernetz dient schon implizit als Näherung, da es die Platzierung der Querprofile definiert. Explizit wird es ebenfalls durch eine Gauß-Funktion eingeführt, die ihr Zentrum an der originalen Flussachse, also in der Mitte des Querprofils, hat. Diese Kurve wird im Flussverlauf relativ flach gewählt (große Standardabweichung), hat also auch vor allem bei breiten, horizontalen Wasseroberflächen Einfluss. Außerdem wird die Näherung im Bereich der Quelle stärker gewichtet, wo viele der anderen Kriterien mangels klarem Flussbett und vorangegangenen Verlauf noch nicht sehr zuverlässig bestimmt sind.

Die unterschiedlichen Gewichtsfunktionen werden per Multiplikation zur Detektor-Funktion kombiniert. Das hat den Zweck, dass durch ein Kriterium ausdrücklich ausgeschlossene Punkte (Gewicht 0) nicht mehr in Frage kommen. Die verbesserte Lage der Flussachse ergibt sich aus dem Maximum der Detektor-Funktion. Die Ausgeprägtheit des Maximums und seine Höhe relativ zu weiteren Maxima lassen Rückschlüsse auf die Zuverlässigkeit der Schätzung zu.

In Ausnahmefällen (z.B. ausgeprägte Hindernisse im Flussbett) kann die Detektor-Funktion für sämtliche Punkte eines Querprofils 0 ergeben, wodurch kein eindeutiges Maximum bestimmbar ist. In dem Fall wird eine geometrische Extrapolation der unmittelbar zuvor schon angepassten Achsabschnitte verwendet, vgl. „Prädiktion aus dem bisherigen Verlauf“ oben.

2.2 Entfernung von Hindernissen im Flussbett

Neben Unzulänglichkeiten der DGM Interpolation über Wasserflächen (z.B. bei überhängender Vegetation oder groben Fehlern) können auch korrekt abgebildete Objekte problematisch für die Hydraulik sein. So etwa erscheinen Brücken in ihrer 2.5 D Repräsentation für die verwendeten Softwarepakete wie Dämme und müssen daher detektiert und aus dem DGM entfernt werden.

Für die Detektion wird das Höhenprofil entlang der (korrigierten) Flussachse herangezogen. In diesem Höhenprofil werden Anstiege gesucht, die über Variationen im Bereich der DGM-Genauigkeit hinausgehen, entsprechend einer hohen Ersten Ableitung des Höhenprofils. In Kombination damit wird auch das wahrscheinliche Ende des Hindernisses als darauf folgender, deutlicher Höhenabfall unter das Ausgangslevel detektiert.

Der so detektierte Abschnitt beinhaltet den oberen Teil des Hindernisses. Der zu eliminierende Abschnitt beginnt und endet aber nicht im Bereich der stärksten Steigung, sondern dort, wo sich das Hindernis vom Flussbett abzuheben beginnt. Die genaue Ausdehnung wird also bestimmt, indem unmittelbar vor und nach dem detektierten Abschnitt des Höhenprofils nach Maxima des Quotienten zwischen zweiter Ableitung und Betrag der ersten Ableitung gesucht wird. Um den Abschnitt jedenfalls ausreichend zu umfassen, wird zusätzlich ein Margin von 2 m beiderseits des Abschnitts eingefügt.

Das Ausschneiden der gefundenen Objekte wird auf Basis von Querprofilen durchgeführt (vgl. MANDLBURGER 2006). Diese werden in ein Profilkordinatensystem transformiert – entsprechend einer Begradigung der Flussachse, so dass alle Querprofile parallel zu liegen kommen. In diesem System wird zwischen den Profilen vor und nach dem zu eliminierenden Objekt interpoliert. Außerdem wird aus der Geometrie des Querprofils die ungefähre Breite des Flussbetts bestimmt (analog zu 2.3.1). Innerhalb dieser Breite werden die interpolierten

Höhenwerte übernommen, also das Hindernis entfernt. Im unmittelbar angrenzenden Uferbereich werden interpolierte und originale Höhen mithilfe gewichteter Mittelwerte ineinander überführt. Das Gewicht der interpolierten Höhen nimmt mit Abstand von der Flussachse ab, sodass vom neu interpolierten Flussbett zum ursprünglichen Höhenmodell ein fließender Verlauf gegeben ist. Beispielhafte Ergebnisse der Brückendetektion und -elimination sind in Abb. 4 dargestellt.

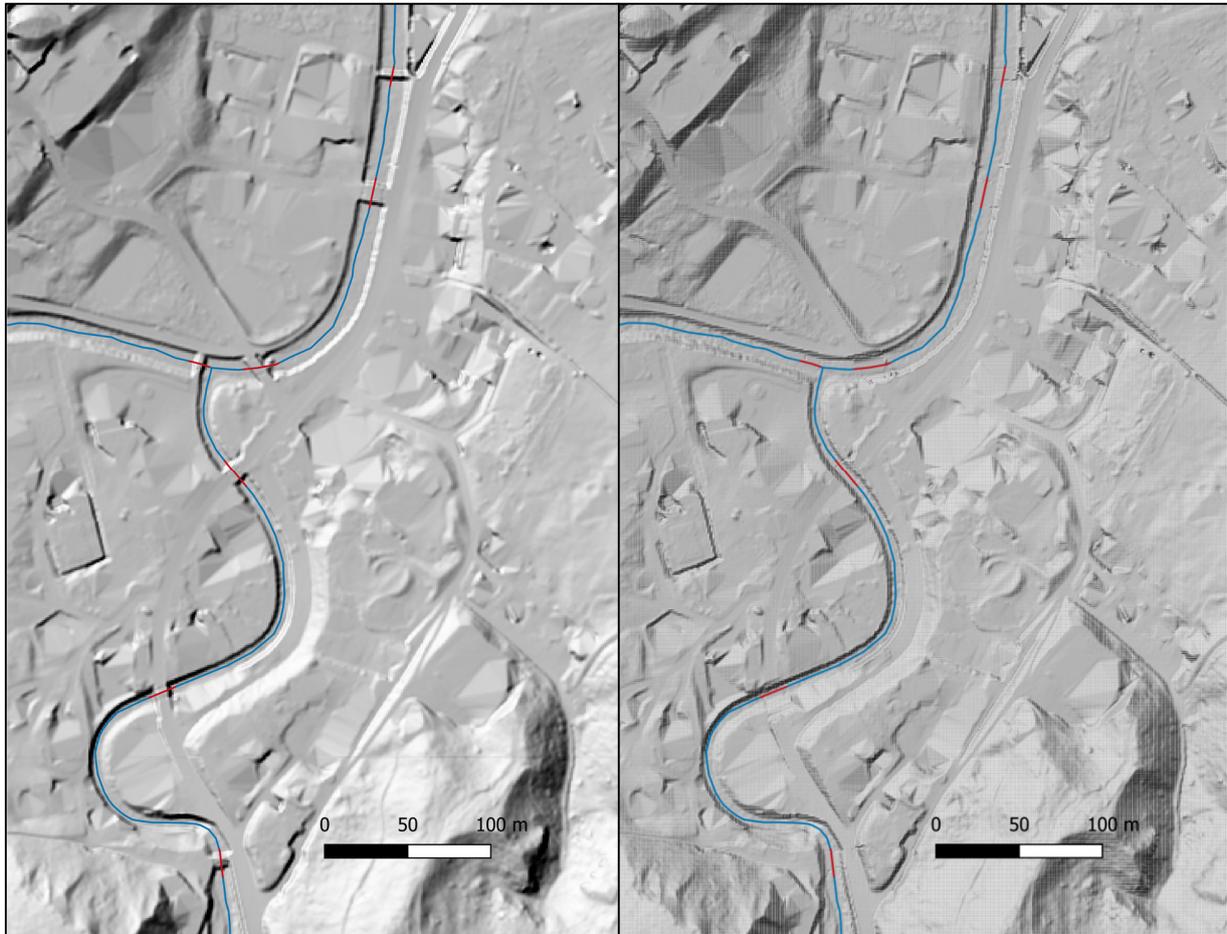


Abb. 3: Brücken-/Hindernisdetektion im Zentrum von Lech am Arlberg (links). In blau sind die Flussachsen eingezeichnet, in rot jene Achsenabschnitte, für die Hindernisse detektiert wurden. Rechts sind die Hindernisse aus dem DGM entfernt

2.3 Ableitung neuer Datensätze

Ausgehend von nunmehr geometrisch konsistenten Ausgangsdaten werden weitere Produkte abgeleitet, die für die hydraulische Simulation benötigt werden. Diese sind im Folgenden zusammengefasst.

2.3.1 Uferböschung Oberkante

Die Uferböschung Oberkante (UBOK) wird für das Setzen von Randbedingungen benötigt. Ähnlich wie bei der Bestimmung des Flussbetts im Zuge der Hinderniselimination (2.2), werden auch hierfür Querprofile verwendet. Ausgehend von der Flussachse wird das Höhenprofil in beide Richtungen geometrisch analysiert. Der erste signifikante Höhenanstieg im Querprofil ist die

Uferböschung. Dort, wo dieser Anstieg wieder endet (stark negative zweite Ableitung) ist die Oberkante. Falls eine solche Oberkante nicht klar vorhanden ist, wie etwa in alpinen Schluchten, wird stattdessen ein Grenzwert für die Höhendifferenz zum Gewässerbett angesetzt.

In der Praxis ist die zentrale Herausforderung die Definition, was unter einem signifikanten Höhenanstieg zu verstehen ist. Dabei ist einerseits die Repräsentation der Wasseroberfläche relevant, andererseits die Geländeform im Umland. Bei sehr breiten Flüssen oder überhängender Vegetation ist die interpolierte Wasseroberfläche oft sehr unruhig mit deutlichen Höhenunterschieden quer zur Flussrichtung. Im Flachland können die Höhenunterschiede innerhalb der interpolierten Wasseroberfläche in einer ähnlichen Größenordnung wie die Höhe der Uferböschung sein.

Für eine bessere Detektion der tatsächlichen Uferböschung wird die Höhenverteilung im umliegenden Gelände analysiert. Je flacher das Gelände, umso geringere Grenzwerte werden für Steigung und Höhendifferenz verwendet. Außerdem wird die ermittelte Gewässerbreite mithilfe der umliegenden Querprofile einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Allzu sprunghafte Veränderungen erfordern ggf. zumindest eine Nachkontrolle.

Abhängig vom Verlauf der Flussachse und vom Abstand der Querprofile können Selbstkreuzungen bei der resultierenden UBOK auftreten. Diese werden in der Nachprozessierung automatisiert gefunden und eliminiert, indem die auftretende Schleife entfernt wird. Zu Visualisierungszwecken wird die UBOK außerdem mit bestehenden GIS Tools geglättet und vereinfacht.

2.3.2 Wasser-Land-Grenze

Die Wasser-Land-Grenze (WLG) liegt etwa in Höhe des Wasserspiegels und wird u.a. für das Einschneiden des Flussbetts in das DGM verwendet. Die Lage der WLG wird analog zur UBOK basierend auf Gewässerquerschnitten ermittelt. Der hauptsächliche Unterschied besteht darin, dass die WLG nicht oberhalb, sondern unterhalb der Uferböschung gesucht wird, näher an der Flussachse. Als Indikator wird das positive Maximum der zweiten Ableitung verwendet, das dort auftritt, wo sich das Gelände von der Wasseroberfläche abhebt.

2.3.3 Durchlässe

Durchlässe kommen an Stellen zum Einsatz, wo Gewässer nicht überirdisch verlaufen, das Einschneiden ins Geländemodell aber aufgrund der Länge nicht praktikabel ist bzw. die Ergebnisse der Simulation korrumpieren würde; Beispiele dafür sind Kanalbrücken oder Durchleitungen unter Siedlungsgebieten. Die entsprechenden Abschnitte werden bei der Detektion von Hindernissen (siehe 2.2) und durch Verschnitt des Wasserkörpers innerhalb der WLG mit Gebäuden aus der DKM gefunden und unterstützt durch automatisiert feststellbare Kriterien eingegrenzt.

Da die Unterscheidung zwischen Durchlass oder einem großräumigen Hindernis, das aus dem DGM eliminiert werden kann, nicht allgemeingültig an objektiven Kriterien festgemacht werden kann, ist hier jedenfalls auch manuelle Interpretation notwendig. Dabei werden die vorab lokalisierten Achsenabschnitte durchgegangen und mittels Orthophoto, DGM und DOM analysiert.

2.3.4 Begleitdämme

Begleitdämme (Abb. 4) werden für die Simulation von Dammbuchszszenarien detektiert und in ihrer Geometrie beschrieben. Sie sind dadurch gekennzeichnet, sich deutlich und steil vom Ge-

lände abzuheben, im Vergleich zu anderen Objekten mit dieser Eigenschaft sind sie aber deutlich langgezogener.

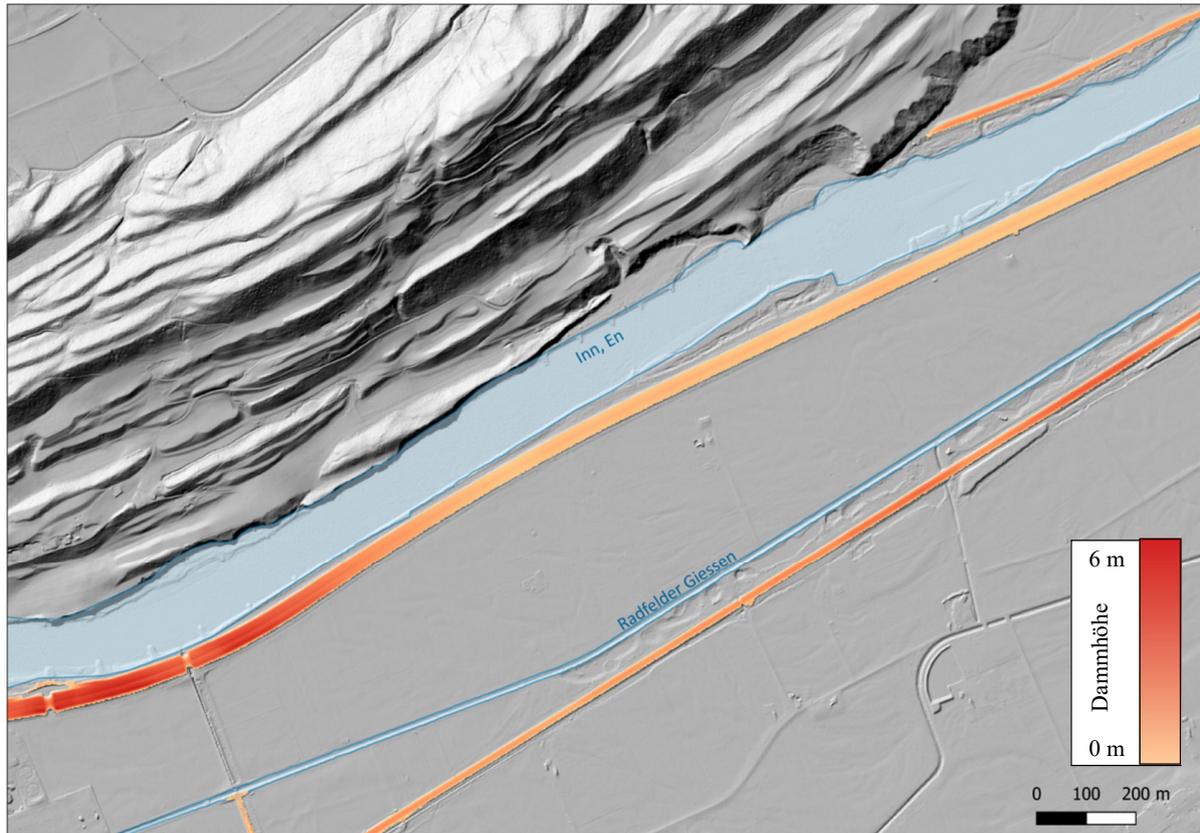


Abb. 4: Nach geometrischen Kriterien detektierte Begleittämme im Tiroler Inntal. Die Bewertung der Stabilität hängt auch von Bauweise und Nutzung ab, benötigt also weitere Informationen

Vor der Detektion wird der Suchbereich auf das unmittelbare Umland von Flüssen eingeschränkt, da die beschriebenen geometrischen Kriterien im Grunde auch bei Berggraten erfüllt sind. Für die Eingrenzung werden die HQ300 Flächen aus vorangegangenen Untersuchungen verwendet. Im Suchbereich wird dann ein modifizierter Hampel Filter eingesetzt, um jene Objekte zu identifizieren, die sich klar vom Umland abheben. Zusammenhängende Flächen werden vektorisiert und mithilfe von Form- und Flächenkriterien auf potenzielle Dammbauwerke eingeschränkt.

Für die geometrische Beschreibung der Dammhöhen werden diese aus dem DGM entfernt und die entstandenen Lücken durch Interpolation geschlossen. Aus der Differenz zwischen dem originalen und dem auf diese Weise modifizierten DGM ergibt sich die eine geometrische Beschreibung der Dammbauwerke.

2.4 Integration von Profilingen ins DGM

Da nicht die Wasseroberfläche sondern das darunter liegende Flussbett für die Simulationen relevant ist, muss dieses ins DGM eingeschnitten werden. Je nach Datenverfügbarkeit seitens der Verwaltungsbehörden/Kraftwerksbetreiber unterscheidet sich der Workflow:

- Bei Verfügbarkeit flächendeckender Repräsentationen des Flussbetts in Form von Rastermodellen können diese nach Prüfung der Konsistenz der Höhensysteme direkt eingefügt werden. Dabei wird das DGM innerhalb der UBOK durch das Modell des Flussbetts ersetzt.
- Falls dagegen nur gemessene Querprofile in Form von 3D Punkten vorhanden sind, müssen diese vorab entlang der Flussachse zu flächigen Höhenmodellen interpoliert werden. Die meist annähernd linear und normal zur Flussachse ausgerichteten Profilmunkte werden zuerst auf ein exaktes Querprofil des Gewässers projiziert. Im Anschluss werden die so erhaltenen Querprofile entlang der Flussachse durch Interpolation verdichtet (vgl. MANDLBURGER 2000; MANDLBURGER 2006). Dies geschieht erneut im Profilkordinatensystem analog zur Elimination von Brücken und Hindernissen (2.2). Diese verdichteten Punktwolken werden zu Rastermodellen interpoliert und ebenfalls innerhalb der UBOK ins DGM eingefügt.
- Wo keine gemessenen Daten über das Flussbett verfügbar sind, wird das DGM nicht verändert, die entsprechenden Bereiche werden aber per Maske ausgewiesen. Im Zuge der Simulation werden dort iterativ Abflussquerschnitte und auf Basis der WLK möglichst realistische Flussbett-Querschnitte ermittelt.

3 Ergebnisse und Fazit

Wie schon in Abschnitt 2.1.2 ausgeführt, ist die Übereinstimmung zwischen Flussachse und DGM entscheidend für fast alle weiteren Verarbeitungsschritte. Die Annahme einer fehlfreien Lage der Flussachsachse bezüglich des DGMs ist zudem in der Folge die Voraussetzung für einen möglichst hohen Automatisierungsgrad. Obwohl die Anpassung der Flussachsen grundsätzlich ebenfalls automatisiert durchgeführt wird, muss aufgrund dieser hohen Erwartungen an die Zuverlässigkeit der Resultate flächendeckend manuell nachkontrolliert werden. Vor allem die heterogene Qualität der Ausgangsdaten macht dies erforderlich. Das betrifft einerseits die Frage, wie gut die Näherung durch die originalen Flussachsen ist, andererseits aber auch das DGM. Vegetationsüberhang, große Wasserflächen ohne ALS-Punkte, die nur mittels Interpolation gefüllt wurden und undeutliche repräsentierte Flussbetten stellen potentielle Fehlerquellen dar. Zu schmale Flussläufe werden im DGM teilweise nicht aufgelöst und können von Bereichen, wo Gewässer unterirdisch verlaufen, nicht automatisch unterschieden werden. Die Anpassung der Flussachsen an das DGM ist somit sicher der arbeitsaufwändigste Schritt.

Darauf basierend führen Korrekturen (2.2) und die Ableitung von Folgeprodukten (2.3, 2.4) automatisch zu sehr guten Ergebnissen (siehe Abb. 5). Punktuell notwendige Korrekturen können aufgrund von Qualitätskriterien vorab eingegrenzt werden, was den Zeitaufwand für Nachbearbeitung im Vergleich zu flächendeckender Kontrolle massiv reduziert. Dennoch bestehen auch hier regionale Unterschiede, was vor allem auf die Qualität des DGMs zurückzuführen ist.



Abb. 5: Die wichtigsten Ergebnisse der Datenprozessierung. Parallel zu den Flussachsen (blau) sind die WL (gelb) und die UBOK (türkis) eingezeichnet. Rot sind die Flussachsenabschnitte markiert, entlang derer Hindernisse entfernt wurden, in violett ein Durchlass eines Flusses unter einem anderen. Für das Flussbett des Ziller (ganz rechts) wurde das DGM durch Profildaten ersetzt.

Die Validierung erfolgt intern durch stichprobenartige bzw. durch Qualitätsmerkmale gesteuerte manuelle Kontrolle, vor allem aber auch extern im Zuge der Weiterverwendung der Ergebnisse. Der Prozess der hydraulischen Simulation sowie der Vergleich von Ergebnissen mit bestehenden lokalen Untersuchungen (z.B. Gefahrenzonenplänen) lassen unter anderem auch Rückschlüsse auf die Qualität der räumlichen Daten zu.

4 Literaturverzeichnis

- ALI, T.A, ATABAY, S., MORTULA, M. & MA, R., 2015: Semiautomatic Extraction of the Shoreline from High-Resolution Satellite Imagery and Coastal Terrain Model. *Surveying and Land Information Science* **74**(1), 15-21.
- CASAS, A., BENITO, G., THORNDYCRRAFT, V.R., & RICO, M., 2006: The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms* **31**, 444-456.
- EU, 2000: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities* **L327**, 1-72.
- EU, 2007: Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union* **L228**, 27-34.
- GÜNERALP, I., FILIPPI, A.M. & HALES, B.U., 2013: River-flow boundary delineation from digital aerial photography and ancillary images using Support Vector Machines. *GIScience & Remote Sensing* **50**(1), 1-25.
- HÖFLE, B., VETTER, M., PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. & STÖTTER, J., 2009: Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms* **34**, 1635-1649.
- HOLLAUS, M., WAGNER, W. & KRAUS, K., 2005: Airborne laser scanning and usefulness for hydrological models. *Advances in Geosciences, European Geosciences Union* **5**, 57-63.
- MANDLBURGER, G., 2000: Verdichtung von Echolot Querprofilen unter Berücksichtigung der Flussmorphologie. *VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* **88**(4), 211-214.
- MANDLBURGER, G., 2006: Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie. TU Wien, Dissertation.
- MANDLBURGER, G. & BRIESE, C., 2007: Using Airborne Laser Scanning for Improved Hydraulic Models. *Land, Water and Environmental Management: Integrated Systems for Sustainability, Proceedings*, 731-738.
- MARKS, K. & BATES, P., 2000: Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes* **14**, 2109-2122.
- PÉNARD, L. & MOREL, M., 2012: Automatic detection of gravel bars in a river channel from airborne LiDAR-derived DTM. *HIC 2012 – 10th International Conference on Hydroinformatics*, July, Hamburg, Germany.
- PETROSELLI, A., 2012: LIDAR Data and Hydrological Applications at the Basin Scale. *GIScience & Remote Sensing* **49**(1), 139-162.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J. & KAREL, W., 2014: OPALS – A framework for airborne laser scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems* **45**, 125-126.