

Technische Notiz zu:

## Digitale Höhenmodelle für hydraulische Anwendungen



Version 1 vom 07.10.2004

### 1 Einleitung

Für die hydraulischen Berechnungen von Fließgewässern, wie sie im Rahmen von Risikoanalysen und Flussgebietsuntersuchungen durchzuführen sind, werden unterschiedliche Verfahren zur Modellierung des Wasserabflusses, der Fließgeschwindigkeiten und des Wasserspiegels angewandt. Vorrangig wird hierbei gegenwärtig zwischen 1D- und 2D-Modellierungen unterschieden.

Für beide Verfahren werden unterschiedliche Datengrundlagen zur Beschreibung eines Wasserlaufs und der Vorländer eingesetzt. Während bei der 1D-Simulation ausschließlich mit Querprofilen gearbeitet wird, ist eine flächenmäßige Erfassung des Geländes Voraussetzung für die 2D-Simulation. Bisher wurden für beide Methoden die benötigten Daten durch eine terrestrische Vermessung bzw. durch eine photogrammetrische Auswertung von Luftbildern ermittelt.

Die detaillierte und präzise Erfassung von Gelände- und Topographiedaten mittels Laserscanning erlaubt inzwischen eine effizientere Vorgehensweise. Zusätzliche Vorteile ergeben sich beim Laserscanning dadurch, dass ergänzend zu den Laserdaten auch Bilddaten erfasst werden können, die für den Hydrauliker eine wichtige Unterstützung bei der Interpretation des zu modellierenden Flusslaufes darstellen.

In den nachfolgenden Abschnitten wird die bisherige Methodik kurz skizziert und dieser die Vorgehensweise mit Laserscanning gegenübergestellt werden. Dabei werden die Vorteile des Laserscannings bezüglich Kosten und Zeitraum, als auch bezüglich der zusätzlich vorhandenen Informationen über die Abflusswirksamkeit von Bauwerken oder Oberflächen dargelegt.

### 2 Benötigte Daten

Generell werden für die hydraulische Simulation folgende Daten benötigt:

- Geländemodell flächig oder in Form von Querprofilen
- Kilometrierte Gewässerachse
- Verbauungen, Böschungs- und Ufersicherungen
- Hydraulisch wirksame Bauwerke
- Ereignisdaten (z. B. Hochwasserstände, Hochwassermarken und Überschwemmungsbereiche)
- Informationen über die „Rauheit“ des Gewässers
  - Bewuchs
  - Landnutzung
  - Oberflächenbeschaffenheit

Soweit möglich sollten alle benötigten Daten gleichzeitig und in möglichst einheitlicher Form beschafft werden.



### 3 Datenbeschaffung bisher

#### 3.1 1D-Simulation

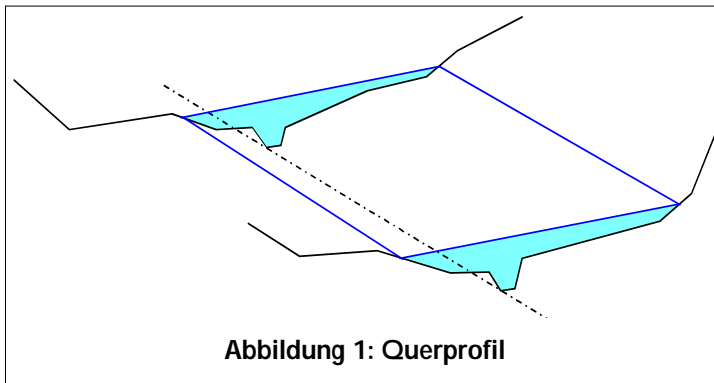


Abbildung 1: Querprofil

Bei der 1D-Simulation wird der zu betrachtende Gewässer- und Vorlandbereich in einzelne Abschnitte mit jeweils etwa konstanten hydraulischen Verhältnissen aufgeteilt. Die einzelnen Abschnitte werden an beiden Enden durch Querprofile beschrieben. Die Oberflächenbeschaffenheit des Geländes wird durch Rauheitsbeiwerte erfasst.

Die Querprofile werden meist terrestrisch, möglichst mit äquidistanten Abständen erfasst. Üblich sind Abstände von

- 100 m bis 200 m bei offenem Gelände
- 20 m bis 50 m in bebautem Gelände

Die Lage dieser Profile wird meist an Hand von Kartenmaterial festgelegt. Welche Punkte für das Profil vermessen werden, wird in der Regel dem Vermesser überlassen und nicht im Detail vom Hydrauliker festgelegt.

Profile an abflusswirksamen Bauwerken wie Wehren, Brücken, Stützmauern, etc. werden meist direkt vor und hinter dem Bauwerk aufgenommen.

Profilpunkte innerhalb des Gewässerbetts, die unterhalb der Wasseroberfläche liegen, werden bei kleineren Gewässern gleichzeitig mit dem Vorlandprofil vom Vermesser aufgenommen. Für größere Gewässer müssen diese separat per Sondierung vom Boot oder mit Sonar erfasst werden. Bei der Querprofilvermessung sind auch Sohlspünge zu erfassen, die meist in Karten nicht vermerkt sind und deren Lage erst vor Ort ermittelt werden muss.

Sonstige abflusswirksame Bauwerke werden terrestrisch vermessen, sofern diese Daten nicht aus Grundkarten oder anderen Datenbeständen zuverlässig übernommen werden können. Rauheitsbeiwerte werden aus einer (eventuell zu erfassenden) Landnutzung oder vom Hydrauliker durch Ortsbegehung abgeschätzt.

#### 3.2 2D-Simulation

Grundlage für die 2D-Simulation ist oft ein TIN (Triangulated Irregular Network) bei dem Massepunkte über eine Vermaschung zu möglichst großen und regelmäßigen Dreiecken verbunden werden.

Diese Vermaschung nimmt keine Rücksicht auf spezifische Geländeformen. Daher müssen Bruchkanten gesondert erfasst und bei der Vermaschung als vorrangig behandelt werden, d.h. Bruchkanten müssen die Seite eines Dreiecks bilden.



Im Beispiel unten ist schematisch ein Damm mit Fuß- und Kopflinie dargestellt.

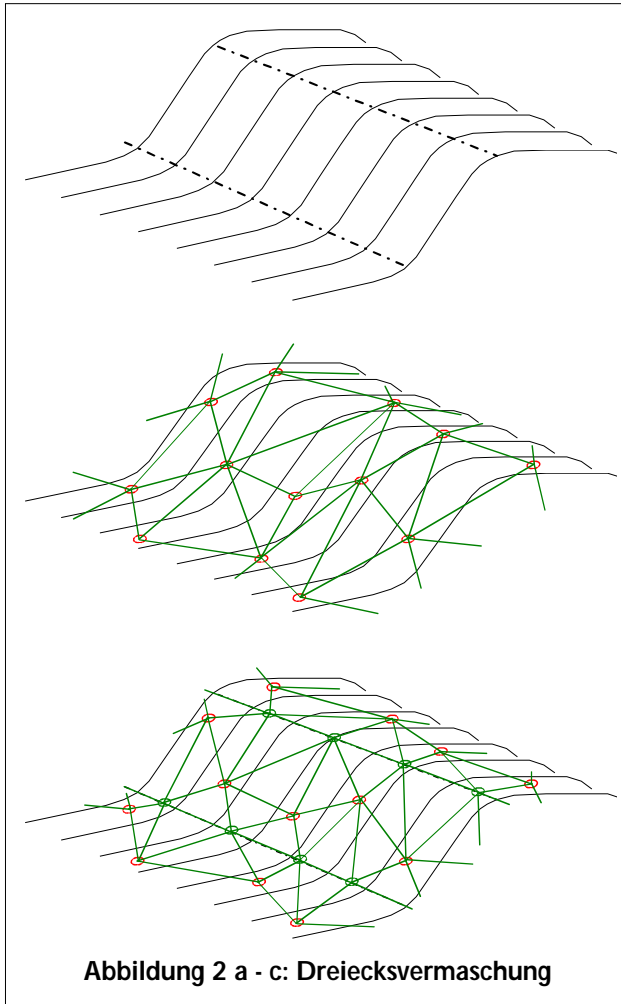


Abbildung 2 a - c: Dreiecksvermaschung

Im mittleren Diagramm sind willkürlich aufgenommene Massepunkte durch rote Kreise und die Dreiecke durch grüne Linien dargestellt. Diese vereinfachte Vermaschung gibt die Bruchkanten nicht wieder. Im Extremfall wird selbst die Dammkrone lückenhaft dargestellt.

Beim unteren Diagramm sind Fuß- und Kopflinie als Zwangslinie eingeführt (grün dargestellte Massepunkte) und entsprechend in der Dreiecksvermaschung berücksichtigt.

Die Massepunkte werden üblicherweise aus vorliegendem Daten- oder Kartenmaterial (Flurkarte, Grundkarte) entnommen, gesondert aufgenommen oder mit Luftbildern photogrammetrisch ausgewertet. Bruchkanten werden meist terrestrisch vermessen oder aus Luftbildern abgeleitet.

### 3.3 Verfahrensmängel

Zu den oben skizzierten Verfahren der Datenbeschaffung gab es über viele Jahre keine echten Alternativen, so dass die damit verbundenen Mängel akzeptiert werden mussten. Inzwischen verfügbare Alternativen machen diese Mängel heute sichtbar.

Die Erfassung von Profilen und Massepunkten erfolgt durch Vermesser und/oder Photogrammeter, die nicht über hydraulische Vorkenntnisse verfügen. Daher werden bei der Erfassung hydraulische Gesichtspunkte nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.

Der auswertende Hydrauliker wird diese Basisdaten zwar nochmals prüfen und bei einer Ortsbegehung teilweise verifizieren, wobei er sich aus Kostengründen mit Stichproben begnügen muss. Mängel in diesen Daten können aber oft nur nach einer ersten Simulationsrechnung und dem Abgleich mit bekannten Hochwasserpegeln erkannt werden.

Die Behebung dieser Mängel bedeutet üblicherweise die zusätzliche Vermessung von Profilen an hydraulisch bedeutsamen Stellen bzw. die Erfassung von weiteren Massepunkten und/oder Bruchkanten. Hierdurch entstehen zusätzliche Kosten und oft eine nicht unerhebliche Verzögerung im Projektlauf.



## 4 Datenbeschaffung mittels Laserscanning

Beim Laserscanning-Verfahren werden bei einer Befliegung je nach Anforderung digitale Höhenmodelle unterschiedlicher Auflösung und Genauigkeit erzeugt. Abhängig von der Auswertung der erfassten Daten sowie der weiteren Verarbeitung entstehen dabei

1. Höhenmodelle der Oberfläche (aus First-Echo Daten, d.h. Modell aus der ersten Reflektion des Laserstrahls), die Gebäudedächer, Baumkronen, Hochspannungsleitungen, etc. beschreiben
2. Höhenmodelle des Geländes (aus Last-Echo Daten, d.h. Modell aus der letzten Reflektion des Laserstrahls)
  - a) mit Gebäuden und Rest-Vegetation
  - b) ohne Gebäude und ohne Rest-Vegetation
3. Differenzmodelle First-Echo – Last-Echo liefern genaue Informationen über Gebäudekanten und Vegetation

Besonders das Geländemodell mit Rest-Vegetation und Gebäuden ist eine ideale Grundlage für die Extraktion von hydraulisch wesentlichen Daten. Für die hydraulischen Berechnungen selbst wird meist ein Geländemodell ohne Gebäude und Rest-Vegetation verwendet.

### 4.1 Daten für 1D-Simulationen

#### 4.1.1 Kilometrierung

Um die Querprofile später in ihrer Lage eindeutig zuordnen zu können, wird eine Kilometrierung entlang der Fluss-Längsachse benötigt. Liegt diese nicht vor, muss der Flusslauf digitalisiert werden. Hierzu kann, wie in der Abbildung zu sehen, die georeferenzierte Reliefdarstellung des Oberflächenmodells verwendet werden. Alternativ kann auch in einem True-Orthobild (siehe 5.1) digitalisiert werden. Mit der Digitalisierung der Fluss-Längsachse kann aus den Laserscannerdaten sofort und direkt das Längsprofil der Wasseroberfläche generiert werden. In diesem Längsprofil lassen sich Sohlspünge, Staustufen etc. sofort erkennen, so dass ein erster Anhaltspunkt für die Berechnung und Vermessung von den Querprofilen gegeben ist.



Abbildung 3: Digitalisierte Gewässerachse



#### 4.1.2 Querprofile

In vielen Fällen können Querprofile für 1D-Simulationen schnell und kostengünstig aus dem vorliegenden Höhenmodell gewonnen werden.

Auf der Grundlage eines Oberflächenmodells (DSM = Digital Surface Model), welches Bebauung und Vegetation des Areal wieder gibt

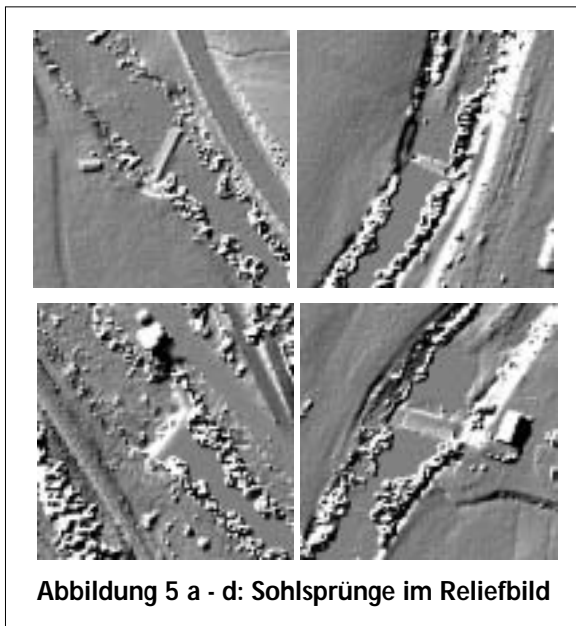


Abbildung 5 a - d: Sohlspünge im Reliefbild

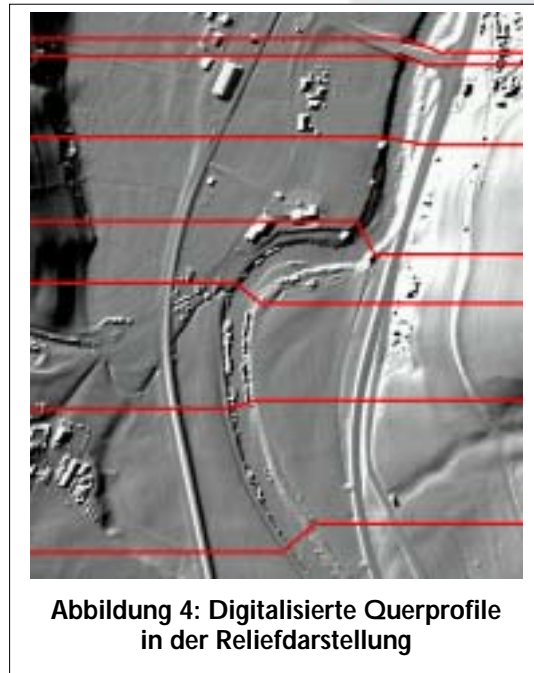


Abbildung 4: Digitalisierte Querprofile in der Reliefdarstellung

und damit auch eine Abschätzung des Rauheitsbeiwerts ermöglicht, wird die Lage der Profile vom Hydrauliker festgelegt. In der georeferenzierten Reliefdarstellung des Oberflächenmodells sind die für die Berechnung von Querprofilen markanten Stellen (z. B. Sohlspünge) leicht zu erkennen.

die Querprofile an den betreffenden Stellen direkt digitalisieren. Im direkt aus den Laserscanning-Daten berechneten Querprofil wird im Flusslauf die Wasseroberfläche abgebildet. Die Punkte auf der Wasseroberfläche (Pegelstand) können als exakte Stichtagsmessung für die Eichung eines hydraulischen Modells herangezogen werden.

Mit einfachen GIS-Werkzeugen lassen sich

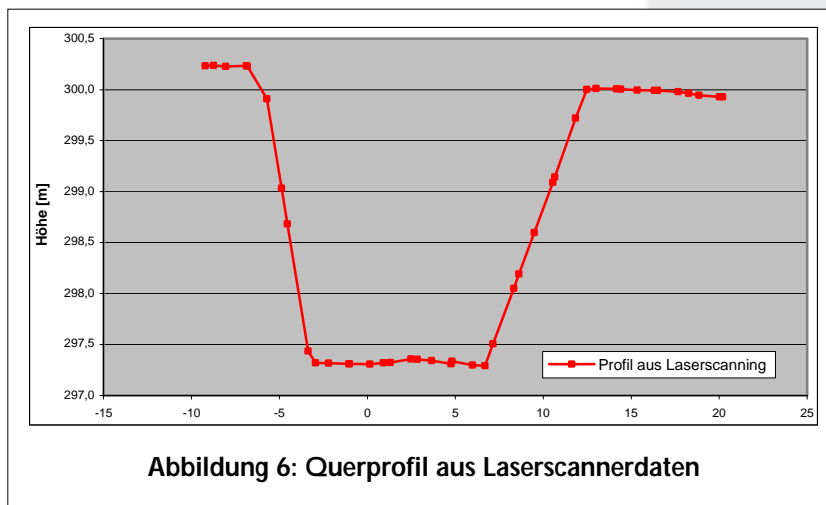


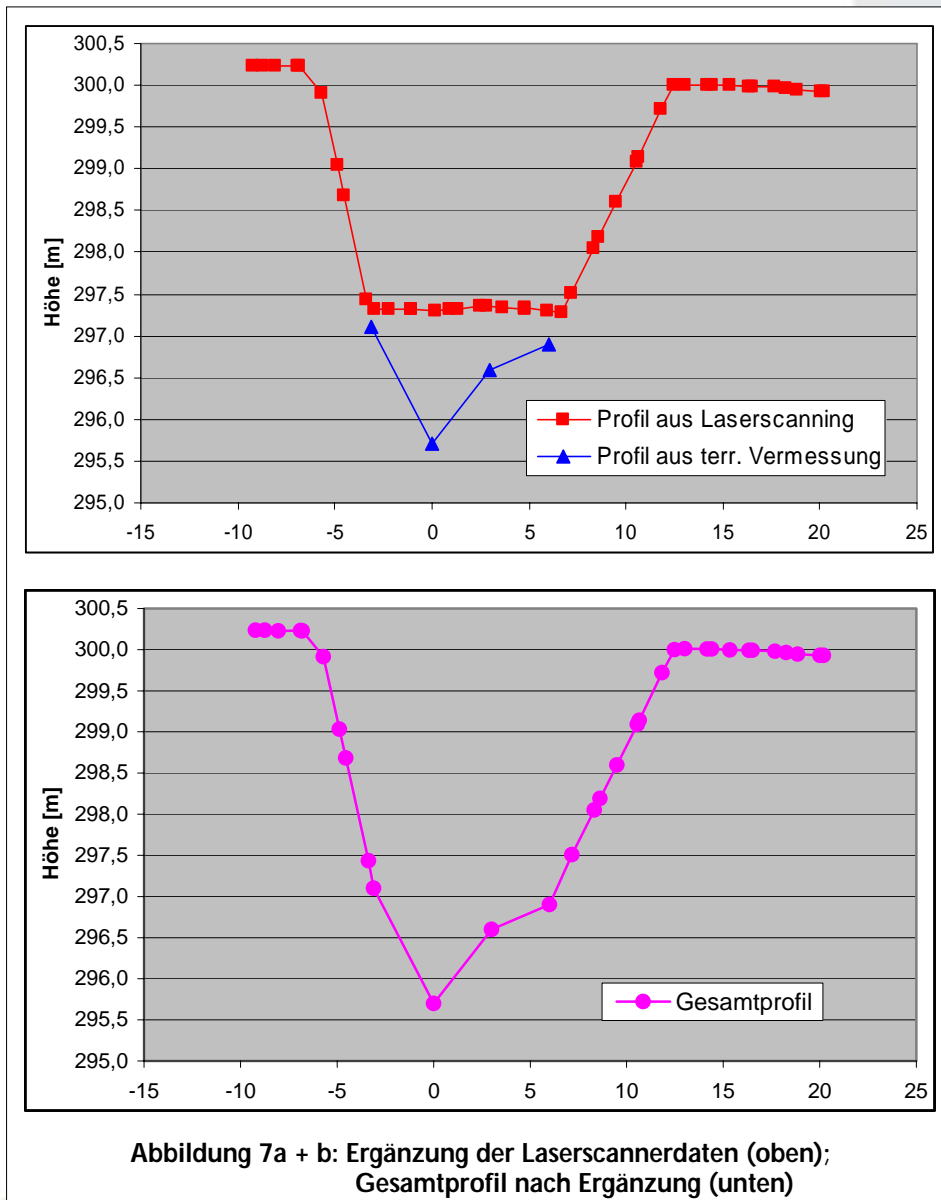
Abbildung 6: Querprofil aus Laserscannerdaten



#### 4.1.3 Querprofile unterhalb der Wasseroberfläche

Sofern der Wasserstand im Gewässer sehr niedrig ist, da die Befliegung bei extremem Niedrigwasser erfolgte und kein Aufstau von Unterwasser gegeben ist, kann die Geometrie des Gewässerbetts hinreichend genau unmittelbar aus den Laserscannerdaten abgeleitet werden.

In Bereichen, in denen aufgrund erhöhter Wasserstände eine direkte Ableitung der Gewässergeometrie aus den Laserscannerdaten nicht möglich ist, sollten unter der Wasseroberfläche liegende Höhenpunkte terrestrisch eingemessen werden. Das aus den Laserscannerdaten abgeleitete Querprofil dient in diesem Fall dazu, den zusätzlichen Vermessungsbedarf festzulegen.

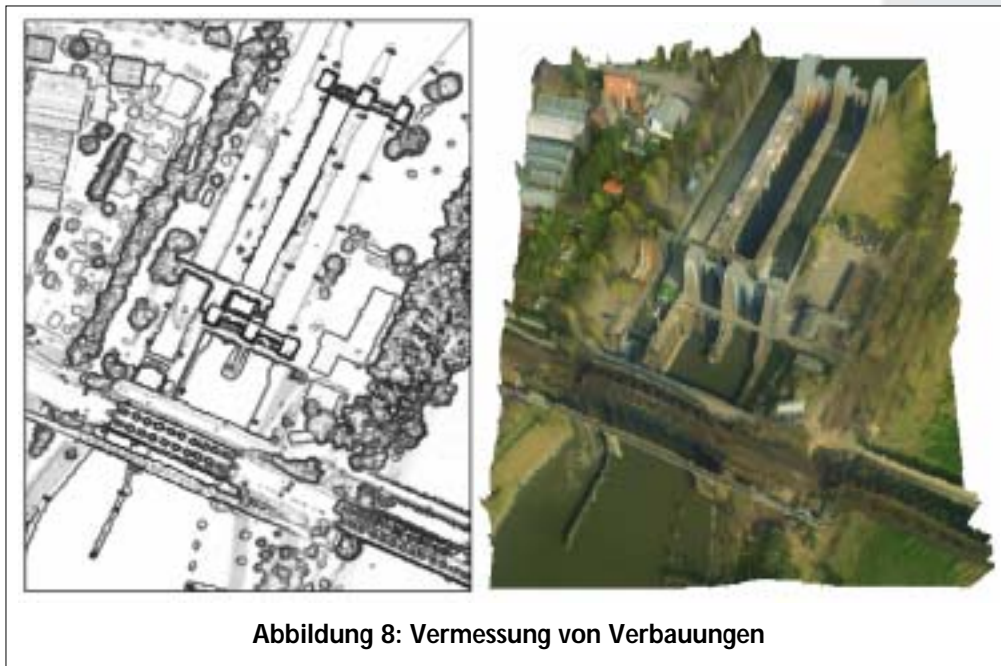




Die terrestrisch vermessenen Punkte werden in die aus den Laserscannerdaten abgeleiteten Querprofile eingefügt. Durch das Entfernen der Laserscanning Profilpunkte auf der Wasseroberfläche und das Einfügen des terrestrisch vermessenen Unterwasserquerprofils entsteht ein korrigiertes Gesamtprofil, welches sowohl die Geometrie des Gewässerbetts, als auch den Vorlandbereich detailliert abbildet.

#### 4.1.4 Verbauungen/Abflusswirksame Bauwerke

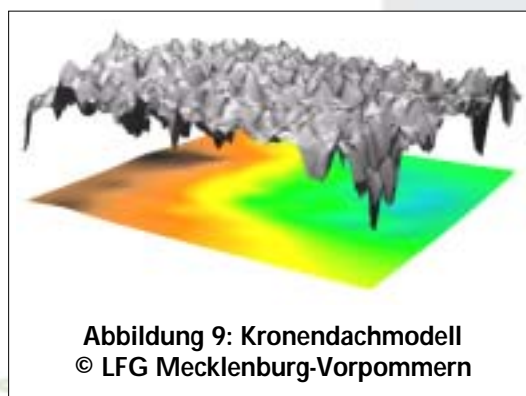
Aus hoch aufgelösten Rasterdatensätzen (z. B. 0,5 m Raster) können wichtige Informationen von abflusswirksamen Bauwerken extrahiert werden. Die terrestrische Vermessung von kompletten Bauwerken ist nur in Einzelfällen notwendig, oftmals ist die ergänzende Vermessung von Einzelpunkten (z. B. Brückenunterkante), die sich nicht aus den Laserdaten gewinnen lassen, ausreichend.



**Abbildung 8: Vermessung von Verbauungen**

#### 4.1.5 Vegetationsstand

Zur Ableitung von Rauheitsbeiwerten sind vor allem Baumbestand, Höhe und Dichte (Stammabstände) von Interesse. Waren hier in der Vergangenheit mehrere Ortsbegehungen durch den Hydrauliker notwendig, so können schon aus den Laserdaten (oder auch kombiniert mit Bilddaten vgl. 5.1) wichtige Informationen extrahiert werden. Die Ortsbegehung ist nur noch an sehr kritischen Stellen erforderlich.



**Abbildung 9: Kronendachmodell  
© LFG Mecklenburg-Vorpommern**



## 4.2 Daten für 2D-Simulationen

### 4.2.1 Bodenmodell

Ordnet man statt der größten Höhe die niedrigste Höhe einem Rastermodell zu, enthält dies immer noch ausgedehnte Objekte oberhalb des eigentlichen Bodens (große Bäume, Gebäude, etc.). Diese Objekte sind meist erkennbar und werden für die Erzeugung eines Bodenmodells durch Filteralgorithmen und interaktive Nacharbeit eliminiert. In den gefilterten Bereichen ist allerdings kein die Bodenhöhe repräsentierender Höhenwert vorhanden. Für das Bodenmodell (DTM = Digital Terrain Model) gelten die gleichen technischen Parameter wie für das DSM. Es wird weiter unterschieden zwischen einem offenem DTM (wie abgebildet) und einem FDTM (Filled DTM), in welchem die herausgefilterten Bereiche interpoliert werden, so dass ein geschlossenes Modell entsteht.

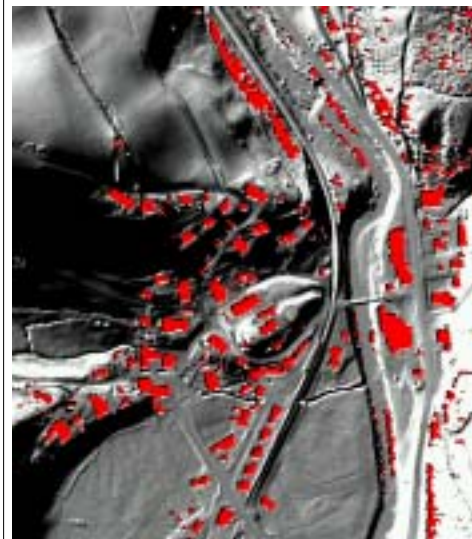


Abbildung 10: Offenes DTM  
(gefilterte Bereiche rot)

### 4.2.2 Ausgedünntes Bodenmodell

Das TIN bietet die Möglichkeit, die Datendichte je nach Geländeundulation variabel zu gestalten. Die Abweichungen von der realen Oberfläche, die bei der Berechnung angegeben werden können, sind minimal bei gleichzeitiger extremer Verringerung der ursprünglichen Datenmenge. Dabei wird typischerweise eine Reduktion auf 2-5% der ursprünglichen Datenmenge erreicht. Alle wichtigen Informationen bleiben aber erhalten, so dass das ausgedünnte Modell ohne weitere Verarbeitungsschritte in die hydraulische Simulationssoftware eingelesen werden kann.

Das zu diesem Zweck speziell berechnete TIN unterscheidet sich in der Vermaschung von einem herkömmlichen TIN. Das TIN wird von TopoSys mit Erhalt von Kanteninformationen berechnet (vgl. 3.2). Als Datengrundlage dient im Normalfall das DTM.

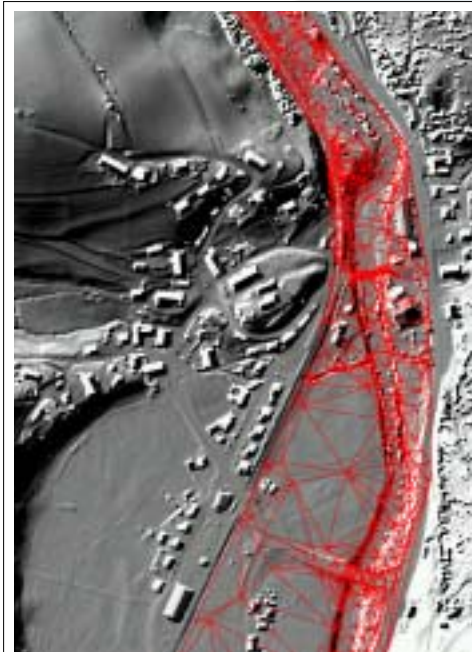


Abbildung 11: TIN im Flussbereich



#### 4.2.3 Differenzmodelle

Aufgrund der unterschiedlichen Varianten von Höhenmodellen können durch Subtraktion eines Modells vom anderen so genannte Differenzmodelle erzeugt werden. Das Differenzmodell DSM – FDTM beschreibt die Objekte auf der Erdoberfläche (Gebäude, Vegetation und nicht zum Gelände gehörende Objekte) mit ihren relativen Höhen während das Differenzmodell First Echo – Last Echo die Rasterelemente herausstellt, bei denen zwei Echos gemessen wurden (insbesondere Vegetation und Gebäudekanten).

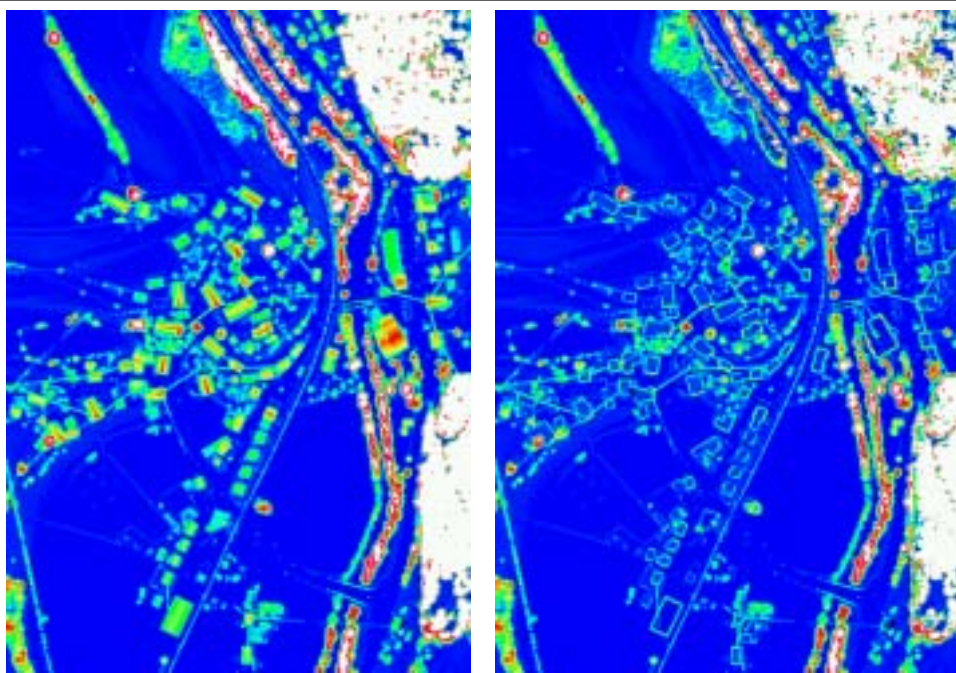


Abbildung 12: Differenzmodell DSM-DTM (links); Differenzmodell FE-LE (rechts)

#### 4.2.4 Gebäudemodelle

Zur Einbeziehung oder Ausschließung von Gebäuden in die Simulationsrechnung sind die Grundrisse und Höhen der Gebäude von Interesse. Auch für die Ableitung von Widerstandsbeiwerten, Gebäudegrößen, Gebäudeabständen sind diese Informationen wichtig und können bequem aus den Rasterdaten gewonnen werden.

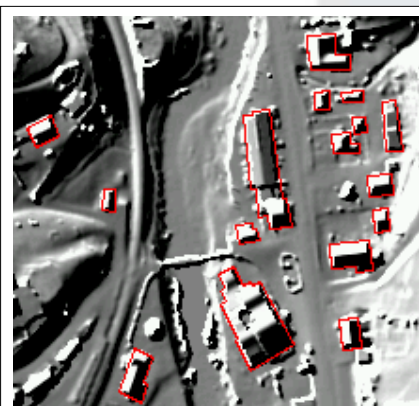


Abbildung 13: Reliefbild überlagert mit Gebäudeumrissen



## 5 Zusatzinformationen

### 5.1 True-Orthobilder

Zur besseren Interpretation der Höhendaten empfiehlt sich die Akquisition von Bilddaten parallel zur Aufzeichnung der Höhendaten. Da der TopoSys FALCON II bereits mit einem



Abbildung 14: RGB- und CIR-True-Orthobild

RGB/CIR Zeilenscanner zur Erstellung von True-Orthobildern ausgerüstet ist, fallen lediglich zusätzliche Kosten für die Prozessierung der Bilddaten an, nicht aber für die Beschaffung der Daten. Großer Vorteil bei der gleichzeitigen Erfassung ist die Tatsache, dass das Datenmaterial auf demselben Stand ist und somit keine Schwierigkeiten bei der Interpretation und Überlagerung der Daten auftreten. In Abhängigkeit von der Flughöhe können True-Orthobilder (RGB und CIR) bis zu einer Auflösung von 0,25 m erstellt werden. Zur Ableitung von Rauheitsbeiwerten ist die CIR-Darstellung besonders hilfreich, da sich die Klassifizierung von verschiedenen Vegetationsarten sehr vereinfacht.

### 5.2 Verschneidungen



Abbildung 15: Farbkodiertes DSM in 3D-Ansicht,  
Hochwasserspiegellage in DSM

Zur Bestimmung der Überflutungsgrenzen können verschiedene Hochwasserspiegellagen mit dem Höhenmodell (DSM oder DTM) verschnitten werden. Einfache Softwarepakete ermöglichen zur weiteren Unterstützung und Interpretation die Visualisierung in einer 3D-Ansicht.

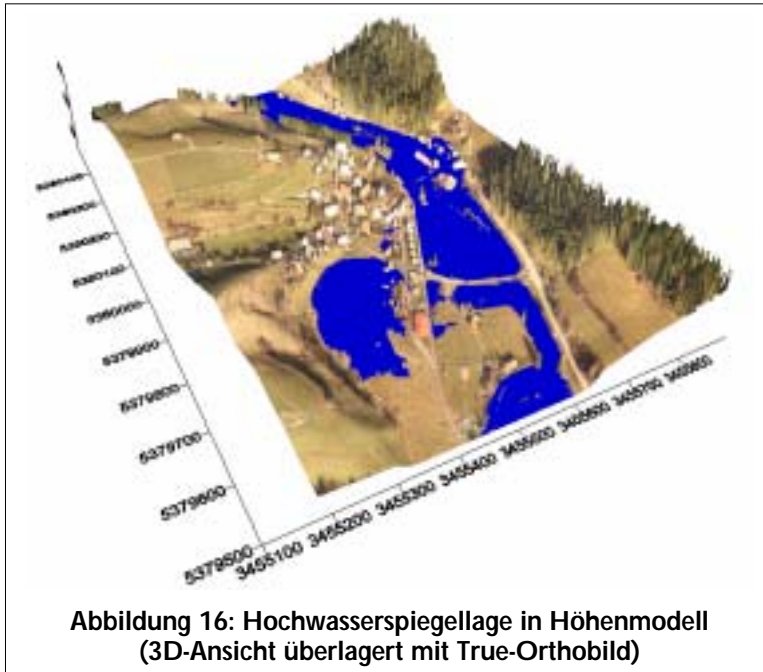


Abbildung 16: Hochwasserspiegellage in Höhenmodell  
(3D-Ansicht überlagert mit True-Orthobild)

Um das zu untersuchende Gelände möglichst realitätsnah abzubilden, kann das Höhenmodell zusätzlich mit einem True-Ortho Bild überlagert werden. Zu Demonstrationszwecken können auch virtuelle Geländebefliegungen durch das Flusstal erstellt werden.

## 6 Kostenabschätzung

### 6.1 Laserscanning-Befliegung

Die Gesamtkosten für eine Laserscanning-Befliegung (Datenakquisition und Datenprozessierung) werden in der Regel auf einen Preis pro Fläche angegeben. Da für die Befliegung von Flussläufen aber der Preis pro Flusskilometer entscheidend ist, wird der Preis im Folgenden bezogen auf den Flusskilometer angegeben.

Der endgültige Preis hängt aber letztlich von folgenden Parametern ab:

- Flussbreite und zu erfassende Gesamtflusslänge
- Breite des zu erfassenden Korridors um den Fluss (schmale oder breite Fluss- bzw. Talauen)
- Tatsächlicher Verlaufs des Flusses (lange gerade Abschnitte oder stark mäandrierender Flusslauf)
- Gewünschte Auswertungen und Zusatzinformationen

Um möglichst viele Informationen aus den Laserdaten zu extrahieren, damit der Aufwand für die terrestrische Vermessung minimiert werden kann, empfiehlt sich eine Befliegung zur Berechnung eines Höhenmodells (DSM und DTM) mit einer Rasterweite von 0,5 m.

Dabei liegt die Preisspanne zwischen 600-1000 Euro pro Flusskilometer. Die optionale Erfassung von Bilddaten und Berechnung von True-Orthobildern mit 0,25 m Auflösung kostet zusätzlich zwischen 100-200 Euro pro Flusskilometer. Für die Erstellung eines Modells mit 1,0 m Raster reduziert sich der Preis auf 400-800 Euro bzw. 70-150 Euro für die Bilddaten (0,5 m Auflösung).



## 6.2 Einsparungspotenzial

Die terrestrische Vermessung von Querprofilen ist in Abhängigkeit vom Gelände durchschnittlich in Abständen von 50-100 m notwendig. Die terrestrische Vermessung eines einzelnen Profils wird derzeit zu Preisen zwischen 70-100 Euro angeboten. Für 100 km Flusslauf sind ca. 1000-2000 Profile zu einem Preis von 70.000-200.000 Euro notwendig. Für eine Laserscanning-Befliegung desselben Gebiets fallen nur Kosten von ca. 60.000-100.000 Euro an. Neben dem kompletten Höhenmodell liefern die Laserdaten zusätzliche Informationen über

- abflussrelevante Bauwerke, Gebäudeformen, -größe und -abstände zur Ermittlung von Widerstandsbeiwerten, sowie
- Vegetationsstand und Klassifizierung der Vegetation zur Ermittlung von Rauheitsbeiwerten.

Es ergeben sich aber noch weitere Vorteile aus der Laserscanning-Befliegung:

- Nachträgliche Ermittlung von zusätzlichen Querprofilen an jeder beliebigen Stelle
- Keine Projektverzögerung wegen nachträglicher Außenarbeiten
- Weniger Ortsbegehungen (nur an erkannten Problemstellen)
- Variantenreiche Auswertung der Laserdaten (First-Echo, Last-Echo, Differenzmodelle etc.)
- kostengünstige Erfassung des Geländes mit Bilddaten und dadurch weitere Vorteile bei der Interpretation des Geländes

Die obige Aufzählung ist in keiner Weise vollständig. Die am Schreibtisch verfügbaren Höhen- und Bilddaten ermöglichen eine sehr effiziente Vorgehensweise ohne Wartezeiten. Gegenüber dem konventionellen Verfahren kann mit Einsparungen von bis zu 50% gerechnet werden.

## 7 Kundenliste (in alphabetischer Reihenfolge)

BfG Bundesamt für Gewässerkunde <http://www.bafg.de/>

GWD Gewässerdirektion Donau/Bodensee (Bereiche Ravensburg und Riedlingen) <http://www.gwd.baden-wuerttemberg.de/riedlingen/>

LTV Landestalsperrenverwaltung Sachsen <http://www.talsperren-sachsen.de/>

WOL Wasserverband Obere Lippe <http://www2.wol.biz/home/>

WSD Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Aurich

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Bremerhaven <http://www.wsa-bremerhaven.de/>

Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden <http://www.wsa-emden.de/>

WSD Wasser- und Schifffahrtsdirektion Mitte, Hannover <http://www.wsd-m.wsv.de/>

WWA Wasserwirtschaftsamt Donauwörth <http://www.bayern.de/wwa-don/>

WWA Wasserwirtschaftsamt Krumbach <http://www.bayern.de/wwa-kru/>

WWA Wasserwirtschaftsamt Traunstein <http://www.bayern.de/wwa-ts/>