

# Dienste-basierte Aufbereitung von Geländemodellen für die 3D-Geovisualisierung

Martin MAY & Torsten HEINEN

Martin May & Torsten Heinen: Institut für Geoinformatik der Westf. Wilhelms-Universität Münster, Robert-Koch-Str. 26-28, D-48149 Münster, Email: mmay@uni-muenster.de, heinent@uni-muenster.de

## 1 EINLEITUNG

In der 3D-Geovisualisierung ist das Geländemodell das Geoobjekt, das aufgrund seiner direkten Verbindung mit vielen weiteren abzubildenden Geoobjekten, deren Eigenschaften oder komplexen räumlichen Modellen (z.B. Bauwerke, Verkehrsinfrastruktur, Atmosphäre und deren jeweilige Modellierung in Abhängigkeit von der Zeit bzw. in Zusammenhang mit Simulationsmodellen) häufig Gegenstand von wissenschaftlichen Arbeiten ist. In monolithischen GIS (vollständig auf einem lokalen System installiert – evtl. mit Ausnahme der Datenhaltung) existieren meist spezialisierte Werkzeuge, anhand derer bestimmte geometrische Anpassungen vorgenommen werden können. Dies ist häufig entweder unter Anwendung von spezialisierten Werkzeugen oder einer weitgehend händischen Datenaufbereitung und Einarbeitung bestimmter Erfordernisse in die Datengrundlage bzw. das Datenmodell durch GIS-Experten verbunden. Durch verschiedene fachliche Fragestellungen ergeben sich häufig grundsätzlich verschiedene Anforderungen an die Art der Modellierung. Insbesondere eine weitgehend parametrisierte Generierung von angepassten Geländemodellen für bestimmte Fragestellungen wäre wünschenswert.

Dieser Beitrag soll die Fragestellung der weitgehend automatisierten Geländemodellerzeugung für den konkreten Anwendungsfall von Flusseinzugsgebieten vertiefen. Hierbei wird auf bestehende Methoden der algorithmischen Geometrie zurückgegriffen, die als spezialisierte Web-Dienste gemäß OGC gekapselt werden. Da ein solcher Beitrag keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann, liegt der Fokus auf einem Modul aus einer Dienstekette. Dies liefert ausgehend von einem generalisierten Dreiecksnetz (triangulated irregular network – TIN) und einem aus Polylinien von Flussprofilen erzeugten TIN ein Geländemodell, das eine möglichst realitätsnahe 3D-Visualisierung von Flussauen ermöglicht und durch die Verbindung zwischen Geoobjekt und Visualisierungsobjekt gleichzeitig weitergehende Interaktionsmöglichkeiten vorbereitet. Die Idee von Modulen oder Dienst-Modulen folgt den Anregungen von Bernardinello (BERNARDINELLO ET AL. 1992) und hat die Zielsetzung, komplexe Programmabläufe in generische funktionale Einheiten zu unterteilen, die nach Bedarf auch verteilt oder parallel ablaufen können und wiedernutzbar sind. Dieser Text baut auf die allgemeine Architektur-Beschreibung aus „Dienste-basierte Architekturen für die Web-basierte 3D-Geovisualisierung“ (SCHMIDT ET AL. 2003) auf, und bewegt sich mit dem Geländemodell im Wesentlichen auf der Ebene der ‚Features‘ aus der folgenden Abbildung:

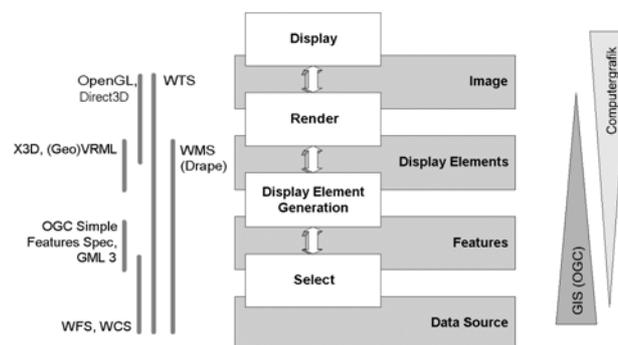


Abb. 1: OGC-Modell des Visualisierungsprozesses (leicht modifiziert) mit potenziell beteiligten Diensten und Beschreibungssprachen (Quelle: SCHMIDT ET AL. 2003)

## 2 GRUNDLAGEN

Gegenstand dieser Betrachtungen ist Software, die in etwa der breit angelegten Kategorie „multidisziplinäre ViSC-Werkzeuge“ zuzuordnen ist (FUHRMANN 2001, S. 6). Diese ist eine Untergruppe aus der Software-Domäne der 3D-Geovisualisierung. Die Kategorien werden anhand einer Vielzahl von Eigenschaften der jeweiligen betrachteten Software ermittelt.

3D-Geovisualisierung im Internet verwendet in gängigen Visualisierungs-Systemen meist Geländemodelle, die als ein Teil eines Visualisierungsdaten-Pakets verpackt oder als separater Teil zu einem Client gesendet werden. In welchem Zustand sich das Geoobjekt Geländemodell vor seinem Eintritt in die Applikation befindet, unterliegt unter Ausklammerung der womöglich nötigen Aufbereitung von Rohdaten dem Anwendungszweck. Beispielsweise können die Basisdaten, die häufig in Form von Höhenrastern vorliegen, zu einem für den Visualisierungs- oder Interaktionszweck geeigneten Geländemodell umgeformt werden. Geländemodelle können unterschiedlich großen Vorverarbeitungsaufwand verursachen und die späteren Interaktionsmöglichkeiten und die Kopplungsfähigkeit von externen Modellen beeinflussen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Geoobjekt Geländemodell mit vielen weiteren Geoobjekten in Verbindung steht und als solches ebenfalls durch eine Visualisierungspipeline in ein oder mehrere Visualisierungsobjekte umgewandelt werden muss (SCHMIDT ET AL. 2003).

Häufig verwendet werden die Ausgangsdaten des Grids in einer Punkt- oder Kanteninterpretation der Rasterzellen als Geoobjekt. So können für die Erzeugung des Visualisierungsobjekts die jeweils in einer Zelle des regelmäßigen Gitters aus einer Approximation des Grids (RASE 1998) stammenden vier Punkte, anhand von zwei Dreiecken vermascht werden, um eine flächige Repräsentation zu erreichen. Auch wenn die Dreiecke unter Berücksichtigung von umgebenden Zellen ausgerichtet werden, um die Kantenverläufe der Grid-Information so weit wie möglich anzunähern, sind nur bestimmte Winkel möglich und somit eine geringe Flexibilität, um das

Relief zu gestalten (siehe nächster Absatz und vgl. CEBECAUER ET AL. 2002). Vorteile solcher Grid-basierten Geländemodelle sind insbesondere bei größeren in Frage kommenden zu visualisierenden Arealen die unaufwändige Auswahl von beliebigen rechteckigen Bereichen und die recht einfache Erweiterungsmöglichkeit von schon auf den Client transferierten Geländeabschnitten. Dies gilt sowohl für das Geoobjekt als auch für das Visualisierungsobjekt des Geländes, sofern die Rasterstruktur noch in ihm repräsentiert wird. Beispielsweise sind eine Vielzahl von Lösungen für Level-of-Detail-Darstellungen (Entfernungsabhängige Anpassung des Detailgrads von Visualisierungsobjekten) von Raster-basierten Geländevisualisierungen bekannt, die Teile des Geländes in Abschnitten oder sogar in kontinuierlichen Übergängen anhand des „continuous level-of-detail“-Verfahrens (CLOD) angepasst visualisieren können (BARBISCH 2002, S. 6). Sollen feinere Geländestrukturen anhand von Visualisierungen, die auf diesen basieren, durch Erhöhung der Auflösung beispielsweise durch Interpolation sichtbar gemacht werden, wird das zu übermittelnde Datenvolumen bei dieser Methode trotz stark gewachsener Netz- und Rechnerressourcen schnell kritisch, da eine Verdoppelung der Auflösung für den gleichen Geländeabschnitt eine Vervierfachung der Datenmenge nach sich zieht. Es muss hierbei zusätzlich berücksichtigt werden, dass solche Verfahren für die Darstellung von Details insbesondere im Zusammenhang mit auf dem Gelände-modell zu positionierenden 3D-Objekten nur bedingt geeignet sind, da das Problem der ‚Klaffung‘ nicht nur bei statischen Visualisierungsobjekten (GRÖGER 2003, S. 337), sondern insbesondere auch bei dynamischen auftritt. Eine mögliche Lösung für die Vermeidung von offensichtlichen Klaffungen zwischen Gelände und Gebäude ist die Einfügung von Sockeln zwischen den Visualisierungsobjekten. Diese Lösung ist zwar ohne Eingriff in die Geometrien möglich, führt jedoch zu offensichtlichen Abweichungen von der Realität und müsste ebenfalls kontinuierlich an ein CLOD-Verfahren angepasst werden. Unabhängig davon, wie genau die verwendeten Rasterdaten sind, wird jedoch die Visualisierung von weiteren Objekten basierend auf dieser Geländerepräsentation selbst ohne Verwendung von LODs immer Probleme verursachen, weil diese nur begrenzt mit der ursprünglichen Rasterinformation zur Deckung zu bringen sind. Als Beispiele seien hier Gebäude, Gewässer und Trassen genannt.

Eine andere Repräsentation einer Geländeoberfläche ist das unregelmäßige Dreiecksnetz (TIN). Bei der Erzeugung aus Raster-Daten wird die zellenbasierte Höheninformation des Grids auf eine geringst mögliche Anzahl von Dreiecken reduziert – soweit dies die einzigen Maßgaben sind. Gängige Generalisierungs-Verfahren lassen dabei die Angabe einer Abweichung zu. Aus einer Eingabepunktmenge (dem Raster) wird eine reduzierte Ausgabe-Punktmenge erzeugt, die nach der Vermaschung anhand bestimmter Eigenschaften (beispielsweise Delauney-Triangulation) eine Geländeoberfläche ergibt (BENDER ET AL. 2003, S. 210). Geländemodelle aus Dreiecksnetzen sind populär, weil sie eine wenig komplexe Datenstruktur darstellen und durch Standard-Hardware in der Regel einfach gerendert werden können. Da die Auflösung von TINs gut skalierbar ist, kann hier ein Mittelweg zwischen Datenvolumen und Genauigkeit besprochen werden (vgl. BISHENG).

Weitere Vorgaben über das Standard-Verfahren hinaus können hierbei feste Flächen, Kanten oder Punkte sein. Unter der Einschränkung, dass an dieser Stelle eindeutig die oben angegebene Software-Kategorie verlassen wird, sind 3D-Modellierungsumgebungen nutzbar, die die Verarbeitung von Grids unter Einarbeitung von Kanten und das manuelle Nachverarbeiten erlauben. So ist die Schaffung von Dreiecksnetzen beliebiger Genauigkeit möglich – allerdings unter Verwendung von spezialisierter Software und durch Experten. Die zugehörige Software-Kategorie ist die der „Terrain-Modeler“ (FUHRMANN 2001, S. 6).

Der Abgrenzung halber sei hier die Kategorie der photorealistischen Landschafts-Renderer genannt. Da sie nicht echtzeitfähig sind, sind sie häufig so ausgelegt, dass sie zur Laufzeit eine Glättung der Basisdaten des Geländemodells vornehmen. Hierbei kommen fest integrierte beispielsweise fraktale Algorithmen zur Anwendung, die Glättungen und Schärfungen von Objekten bewirken können. Wird das TIN als Geländemodell nicht unterstützt, kann dies allerdings dennoch selbst in diesen Systemen, die deutlich mehr Rechenzeit zur Verfügung haben, das Ergebnis der Visualisierung sehr negativ beeinflussen, da beispielsweise die gezielte Modellierung von Geländekanten durch die Verwendung von TINs möglich wird – durch Grids jedoch nicht (BÜSCHER 2002, S. 81), was sich auch auf andere Software-Kategorien übertragen lässt.

Weitere hier nicht in Frage kommende Ansätze der Geländemodellierung sind für bestimmte Anwendungen vorstellbar, beispielsweise die Organisation anhand von Höhen- bzw. Isolinien. Auch die Reduktion auf Punktwolken, also die Vernachlässigung der Kanteninformation ist möglich und für bestimmte Operationen gut zu verwenden. Allerdings scheint für die Unterbringung von topologischen Informationen die Bildung von Verbindungskanten sinnvoll, die gleichzeitig zur Vermaschung in Form von Dreiecken nutzbar gemacht werden kann. Neben der Verwendung von Dreiecken sind auch andere planare Geometrien als Teil des Geländemodells denkbar, beispielsweise Polygone. So können plane Flächen im Gelände als eine Einheit modelliert werden. Bei den weiteren Betrachtungen bleiben auch ‚echte‘ 3D-Datenmodelle außen vor, d.h. es wird nur die Oberfläche des Geländes und nicht etwa das darunter liegende Volumen modelliert. Der volumen-basierte Ansatz wird Gegenstand weiterer Arbeiten sein. Für 3D-Analysen, wie z.B. Volumen-Berechnungen, werden bis dato hauptsächlich Voxel-Daten-Modelle genutzt, also „3d-Raster“. Die Ursache hierfür ist, dass derartige Funktionen in Anwendungen, die Vektor- oder Kanten-Formate nutzen, nur mangelhaft unterstützt werden (vgl. HANNUSCHKA 2002).

Zudem gibt es Erweiterungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel verschiedene Modelle miteinander zu vermischen. Dies kann für die Betrachtungen im Rahmen der dienste-basierten Geländemodellierung zu einem späteren Zeitpunkt vorgenommen werden. So könnten basierend auf einem hybriden Modell einige Teile als Grid andere als TIN zugegriffen werden.

Der Phantasie sind bezüglich der Geländemodellierung keine Grenzen gesetzt. Entscheidend ist letztendlich der Zweck der Anwendung (MARTINONI ET AL. 1998).

### 3 PROBLEM-BESCHREIBUNG

Im Forschungsprojekt FLUMAGIS wird ein entscheidungs-unterstützendes Geoinformationssystem realisiert, das als eine Komponente eine echtzeitfähige 3D-Geovisualisierung mit auf bestimmte Anwendungsfälle bezogenen Interaktionsmöglichkeiten enthält. FLUMAGIS soll das Flusseinzugsgebiets-Management unterstützen und hat einen starken Bezug zur Wasser-Rahmen-Richtlinie (WRRL) der Europäischen Union.

Die folgende Grafik stellt eine Auswahl der für die weiteren Betrachtungen wichtigen möglichen Verarbeitungsschritte für das Geländemodell dar, die entweder als Teil der Visualisierungspipeline oder aber zur Aufbereitung der Datengrundlage durchgeführt werden.

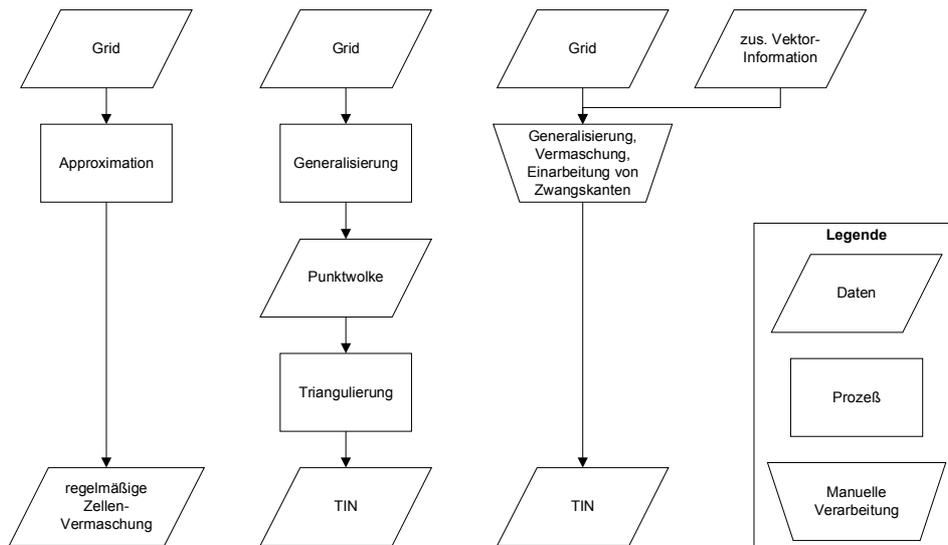


Abb. 2: Geländeaufbereitung vom Grid zum TIN (Quelle: Eigene Darstellung)

Um dem Planungsgegenstand gerecht werden zu können, müssen Fachfragen aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen Berücksichtigung finden. Aus den Anwendungsfällen und der Anforderungsanalyse ergeben sich für die 3D-Visualisierungskomponente folgende mit der Geländemodellierung in Verbindung stehenden Maßgaben (Allgemeine Anforderungen, wie die Echtzeitfähigkeit bleiben hier außen vor):

- Die Höhenverhältnisse in und um das Flussbett müssen denen der natürlichen Umwelt insoweit entsprechen, dass die Wasseroberfläche in ihrem gemessenen gemittelten Verlauf interpoliert zwischen bestimmten Stationen des Gewässers dargestellt werden kann.
- Eines der eingebunden Modelle kann den Wasserstand an bestimmten Punkten des Gewässers in Abhängigkeit von weiteren modifizierbaren Parametern ermitteln. Die Ergebnisse hieraus sollen zumindest näherungsweise darstellbar sein.
- Der visualisierte Geländeabschnitt soll anhand von fachlich festgelegten frei wählbaren Punkten im Auenverlauf selektierbar sein, dies ist nicht durch eine rechteckige Auswahlbox zu gewährleisten.
- Altarme des Gewässers sollen anbindbar sein.
- Der Verlauf des Gewässers soll (innerhalb definierter Grenzen) geändert werden können.
- Obwohl die im Projekt verwendeten Modelle noch nicht ohne Weiteres auf modifizierte Geländemodelle (aus der vorherigen Anforderung) angewendet werden können, muss der Rückbezug vom Visualisierungsobjekt zum Geoobjekt (Grid oder TIN!) vorhanden sein.
- Nutzbarkeit des Systems auch für nicht-Experten der Geländemodellierung.

Die Darstellung der Daten in ihrem nicht eingearbeiteten Zustand ist in Abbildung 3 zu sehen:

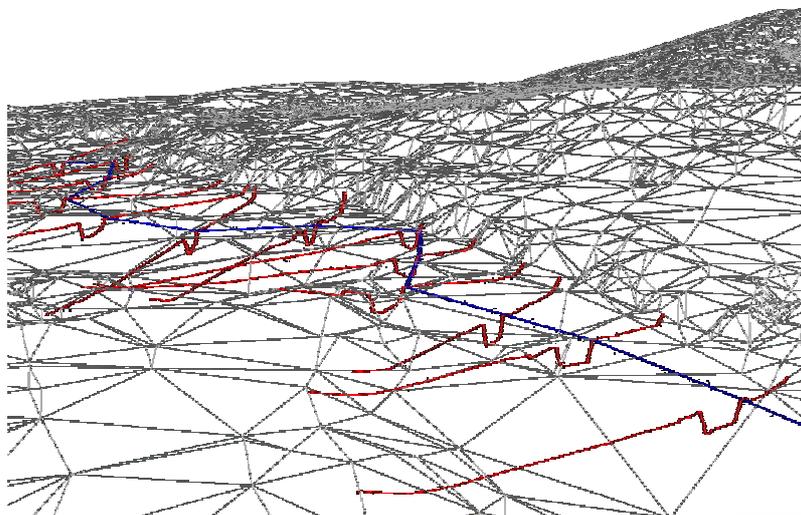


Abb. 3: TIN (weiß), Profile (rot) und Gewässerverlauf (blau) (Quelle: Eigene Darstellung)

Betrachten wir zunächst nur die erste Anforderung, so zeigt sich bei der Verwendung eines nicht weiter verarbeiteten Grids, das wie im vorigen Kapitel beschrieben regelmäßig vermascht und so in ein Visualisierungsobjekt umgesetzt wurde, dass probeweise eingefügte Wasserflächen deutliche „Treppen-Effekte“ im Uferverlauf aufweisen (siehe Abb. 4). Hierfür liegen mehrere Gründe vor:

- Das erhältliche Grid aus Geobasisdaten hat eine Auflösung von 10 Metern.
- Die Breite des Gewässers schwankt zwischen 2 und 15 Metern.
- Das Grid enthält an den wasserbedeckten Stellen des Gländes nur unzulängliche Höhen-Informationen, da es im Überflug erstellt wurde. Die hierbei verwendeten Mess-Verfahren können die Wasseroberfläche nur wenige Zentimeter tief durchdringen.



Abb. 4: Treppen-Effekt bei Grid-Vermaschung mit Wasserverschneidung (Quelle: Eigene Darstellung)

Die hier dargestellten sich ergebenden Probleme sind wie oben dargestellt hinlänglich bekannt und werden je nach Anwendungszweck entweder durch die Verwendung von Terrain-Modellern (s.o.) oder durch die Erhöhung der Auflösung des Grids anhand entsprechender Interpolationsverfahren behoben. Da die erste Variante für das gesamte Einzugs-Gebiet einen nicht leistbaren Aufwand verursachen und die Erhöhung der Auflösung das zu verarbeitende Datenvolumen exponential steigern würde, muss eine andere Lösung gefunden werden.

Desweiteren ergibt sich aus der Anforderung der möglichst genauen Darstellung der mittleren Wasserstände die Notwendigkeit, diese entweder durch Verschneidung mit dem Geländemodell zu ermitteln, oder die direkt auf die Gewässerprofile bezogenen Ufer-Informationen zu verwenden. An dieser Stelle ergibt sich das Dilemma, dass die Verschneidung der Wasserstandsinformation mit dem Geländemodell nur dann sinnvoll ist, wenn die Datengrundlage hinreichend genau ist. Um diese Genauigkeit zu erreichen, müssten die Profildaten ohnehin eingearbeitet werden – die zeitgleiche Berücksichtigung der vorhandenen Ufer-Information liegt nahe. Das Geoobjekt ‚Gewässer‘ wäre durch die Interpolation der Oberfläche zwischen den Profilen entlang dem Flussverlauf darstellbar und könnte in seiner flächenhaften Repräsentation sogar für die Synthese eines Volumenmodells in Form eines Polyeders genutzt werden. Wie oben dargestellt, kommt dann jedoch die Verwendung eines Grid-basierten Geländemodells nicht in Frage, da weder Wasseroberfläche noch Flussbett hinreichend genau modellierbar sind.

Neben der geometrischen Problemstellung der Altarmenbindung ist auch die Einhaltung bzw. Anpassung der topologischen Information des Gewässer-Netzes notwendig. Diese und der Verlauf des Gewässers wird in FLUMAGIS als Polylinie vorgehalten. Die Verbindung zum Geländemodell wird indirekt anhand von Flussprofilen möglich, die ebenfalls als Polylinien vorliegen. Zur Verdeutlichung siehe Visualisierung im experimentellen Prototyp (Abb. 5), in der die Wasseroberfläche lediglich als transparente waagerechte Ebene modelliert ist. Die Altarme werden sichtbar, sind jedoch als solche nicht identifiziert.



Abb. 5: Experimenteller Prototyp, Altarme werden sichtbar (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus dem auch im Projekt praktizierten interdisziplinären Arbeiten und dem angestrebten Partizipations-Ansatz ergibt sich, dass die beschriebenen Vorbereitungen des Geländemodells so weit wie möglich automatisiert umgesetzt werden müssen. Es wird also ein Dienst-Modul benötigt, das den ‚Fußabdruck‘ von 3D-Geoobjekten in ein umgebendes Geländemodell hineinschneiden kann. Der ‚Fußabdruck‘ des Gewässers wird in einem weiteren Modul als ungleichmäßiges Dreiecksnetz aus den Flussprofilen erstellt (was auch Teile der umgebenden Flussaue einschließt). Wie dies geschieht, ist nicht Gegenstand dieses Dokuments und orientiert sich an den fachlichen Vorgaben aus den anderen Projektteilen (vgl. Abb. 5). Mit ‚Fußabdruck‘ ist also nicht nur die umgebende Polylinie gemeint, sondern eine aus mehreren Dreiecken zusammengesetzte Fläche, also ein TIN. Der Begriff ‚footprint‘ wird beispielsweise auch in der OGC Abstract Specification (OGC 1999, S. 6) verwendet.

Zur Verdeutlichung des Dienstmoduls dient die folgende Abbildung:

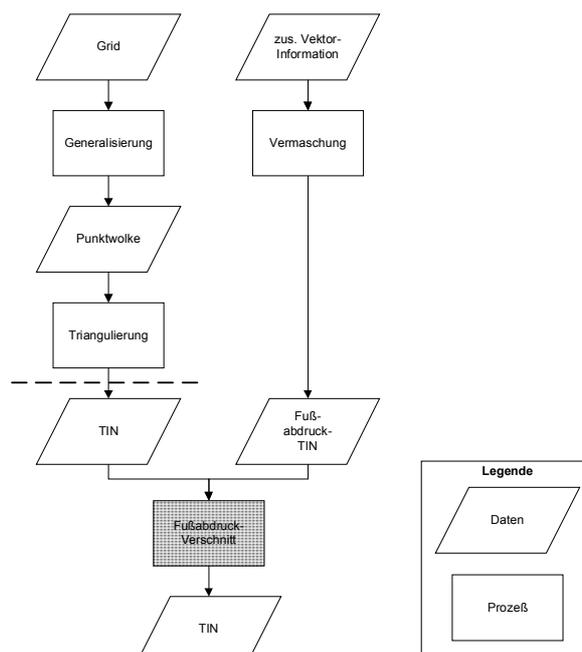


Abb. 6: Vorgehensweise zur Integration von Geländemodell und Flussprofilen (Quelle: Eigene Darstellung)

#### 4 HERLEITUNG EINES VERFAHRENS

Dieses Kapitel soll die Entwicklung eines Dienst-Moduls ‚Fußabdruck-Verschneider‘ (Arbeitstitel) verdeutlichen. In diesem Modul werden zwei topologische Dreiecksnetze zu einem neuen topologischen Dreiecksnetz verschritten. Dabei gibt es ein TIN (im Weiteren Ausgangs-TIN genannt), von dem eine zusammenhängende Teilfläche durch ein zweites (im Weiteren Fußabdruck-TIN genannt) ersetzt werden soll.

Das Ausgangs-TIN wird als ungleichmäßiges Dreiecksnetz vorgehalten. Die Geländemodelle sind mit Topologie modelliert, es sind die Entitäten Punkt, Knoten, Kante und Dreieck bekannt. Es handelt sich also um eine vereinfachte Datenstruktur, die sich an die Topologie-Spezifikation für Surfaces aus GML3 anlehnt (OGC 2003, S. 134). Das ‚TopoSurface‘ enthält gerichtete Oberflächen und Kanten, was hier zunächst vernachlässigt wird.

Das hier beschriebene Verfahren basiert auf folgenden Eigenschaften des Datenmodells für beide TINs:

- Verwendung eines vereinfachten Dreiecksnetz, das sich aus beliebig vielen Dreiecken zusammensetzt, die genau drei Kanten haben. Jede Kante hat eine Assoziation zu mindestens einem aber höchstens zwei Dreiecken und zu genau zwei Knoten. Jeder Knoten ist verbunden mit beliebig vielen Kanten und genau einem Punkt. Der Punkt enthält die geometrische Komponente als xyz-Koordinaten, ist also aus  $R^3$ . Abbildung 7 veranschaulicht dieses in einem vereinfachten Diagramm.
- Das Netz enthält für jede xy-Koordinate innerhalb seiner Außengrenzen mittelbar (durch Interpolation) oder unmittelbar (an den Knoten-Positionen) genau eine Höheninformation  $z$ , ist also eine eindeutige Funktion  $z = f(x,y)$ . Dies bedeutet, dass Überhänge, Höhlen und Löcher in der Geländeoberfläche bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt werden. Dies ist für aus Grids erzeugten Dreiecksnetzen zweifelsfrei unproblematisch, da diese ebenfalls eindeutig sind bzw. falls ein Zellen-Wert nicht vorliegt meist als Fehler oder fehlend interpretiert und daher interpoliert wird. Für aus weiteren Polylinien zusammengesetzte Dreiecksnetze muss dies jedoch berücksichtigt werden.

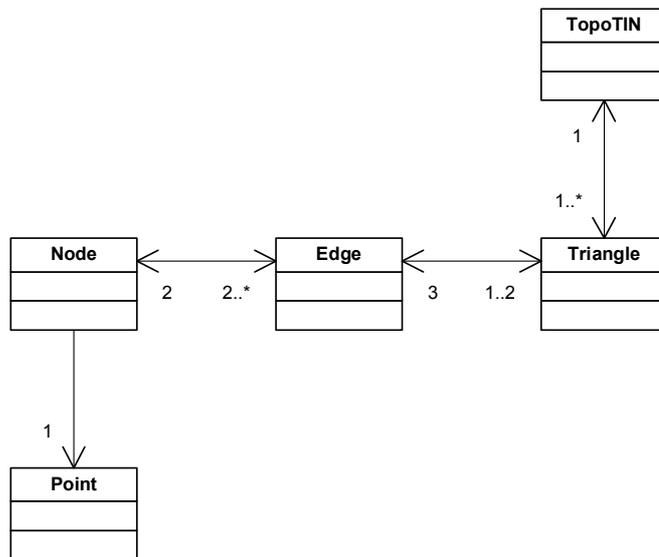


Abb. 7: Vereinfachte Topo-TIN-Datenstruktur für das Dienst-Modul (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Dienst-Modul „Fußabdruck-Verschneider“ bearbeitet somit folgende Datenflüsse, die in Abbildung 8 in verallgemeinerter Form dargestellt werden:

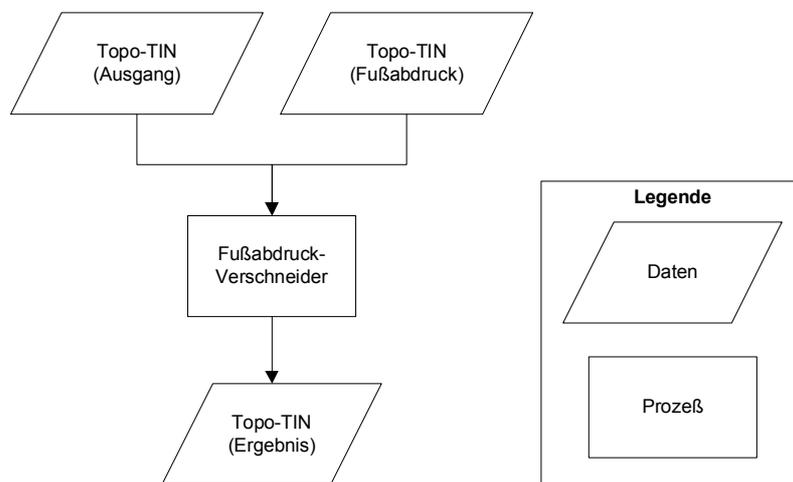


Abb. 8: Ein- und Ausgangsdaten (Quelle: Eigene Darstellung)

Verfahrensschritte:

1. Ermittlung der Außen-Kanten des Fußabdruck-TINs
2. Verschneidung der Außen-Kanten-Segmente mit den Kanten-Segmenten des Ausgangs-TINs
3. Erweiterung der Schnitt-Polylinie um die ermittelten Schnittpunkte
4. Neu-Vermaschung der außerhalb liegenden Teile der zu den geschnittenen Kanten gehörenden Dreiecke des Ausgangs-TINs
5. Entfernung der innerhalb gelegenen verbleibenden Teile des Ausgangs-TINs
6. Verbindung der beiden Teil-TINs anhand der ermittelten Knoten

Verfahren:

Zu 1.: Das Finden der äußeren Polylinie des Fußabdruck-TINs ist möglich, indem ausgehend von einer Kante, der nur ein Dreieck zugeordnet ist, alle Knoten und Kanten durchlaufen werden, für die dies gilt.

Zu 2.: Die Ermittlung der Schnittpunkte der Segmente wird dadurch vereinfacht, dass die beiden TINs unter schlichter Vernachlässigung der Höheninformation als auf die XY-Ebene projizierte Polygone betrachtet werden können. Die Kante des Fußabdruck-TINs wird unter Vernachlässigung der Höhen-Information zu einer Polylinie in derselben Ebene. Die Kanten der Dreiecke des triangulierten projizierten Polygons des Ausgangs-TINs und die Kanten dieser Polylinie stellen zwei Mengen von Linien-Segmenten dar, für deren Verschneidung der geometrische Algorithmus von Chan eingesetzt werden kann. Dieser ist exakt für die Aufgabe der Ermittlung der Schnittpunkte von zwei Segment-Mengen optimiert (CHAN 1994). Dieser Algorithmus kommt der hier gewählten Vorgehensweise entgegen, weil die End-Punkte der Kanten des TINs ohne die Unterscheidung zwischen den beiden Mengen zusätzliche Schnittpunkte ergeben würden, da sich die Kanten in eben diesen Punkten treffen. Das Ergebnis des Algorithmus nach Chan ist die Information, welche Segmente sich miteinander schneiden und der jeweilige Schnittpunkt.

Zu 3.: Der Außenrand des Fußabdruck-TINs wird dazu genutzt, die Höhenwerte der Schnittpunkte durch lineare Interpolation zu ermitteln. Die Kanten werden dann durch diese neuen Knoten ergänzt. Dies erzwingt die Unterteilung des jeweils zugehörigen Dreiecks in zwei neue unter Einfügung einer weiteren Kante.

Zu 4.: Anhand der ermittelten geschnittenen Kanten des Ausgangs-TINs können die geschnittenen Dreiecke neu gebildet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, ob zwei oder ein Eckpunkt außerhalb liegen und ob zwischen den geschnittenen Kanten Eckpunkte der Schnitt-Polylinie liegen. Hierbei können sich verschiedene Möglichkeiten der Verknüpfung ergeben, die zunächst nicht näher betrachtet werden und ggf. dazu genutzt werden können, diese „Übergangsbereiche“ so gut wie möglich an die ursprüngliche Höheninformation anzunähern. Die Höheninformation muss jedoch für alle neuen Knoten aus dem Verbindungspolygon aus Schritt 1 übernommen werden.

Zu 5.: Die nicht mehr eingebundenen Knoten aus Schritt 4 können genutzt werden, um die innerhalb der Schnitt-Kante liegenden Teile des Ausgangs-TINs topologisch zu ermitteln und zu entfernen. So kann eine weitere geometrische Suche vermieden werden.

Zu 6.: Da das Verbindungspolygon nun in beiden überarbeiteten Teilen vorhanden ist, können diese unter Reduktion der beiden Polygone auf eines miteinander verbunden werden, ohne dass weitere geometrische Operationen benötigt würden.

Das hier dargestellte Verfahren macht deutlich, wie anhand einer vereinfachten Datenstruktur ein Laufzeit-optimierter Algorithmus zur Anwendung gebracht werden kann. Der Algorithmus von Chan wird auf 2-dimensionale Linien-Segmente angewendet, was hier keine Probleme bereitet, da die Höheninformation sowieso durch lineare Interpolation ermittelt werden müssen.

## 5 FAZIT

Das vorgestellte Verfahren zeigt, wie für die spezifischen Anforderungen für eine echtzeit-interaktive 3D-Landschaftsvisualisierung ein Modul konzipiert werden kann, um bestimmte Teile eines Geländemodells in ihrer Genauigkeit zu steigern. Dazu wurde ein vereinfachtes Geländemodell verwendet und das gewählte Verfahren stark auf ein geometrisches Problem reduziert. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass das entwickelte Modul gut wiederverwendbar ist. Beispielsweise kann es auch verwendet werden, um das Geländemodell auf andere 3D-Objekte als das Gewässer vorzubereiten. Solange sich um Objekte handelt, deren Polylinien-Außenkanten (ohne Höheninformation!) sich nicht schneiden, ist auch eine mehrfache Verwendung des Moduls nacheinander möglich, da die Knoten außerhalb des neuen Fußabdrucks nicht verändert werden – somit also auch nicht die Kanten von vorher eingefügt, da diese ja eine vollständig geschlossene Verkettung von Kanten darstellen. Ebenso ist ein Einsatz an verschiedenen Stellen der Visualisierungspipeline vorstellbar, so lange das Dreiecksnetz dem spezifizierten Modell entspricht.

Das vorgestellte Verfahren hatte ursprünglich das Ziel, auch eine Echtzeit-Editierung des Benutzers zu ermöglichen. Die Möglichkeit wurde anhand der Verwendung von leistungsfähigen Datenstrukturen und Algorithmen mit optimierter Laufzeit vorbereitet. Fachspezifische Fragen, die die Bildung des eigentlichen Fußabdrucks betreffen, können in weiteren Dienst-Modulen verpackt werden. An dieser Stelle muss auch die Art der Interaktion modelliert und gegenläufig zur Visualisierungspipeline eingespeist werden. Die modulare Spezialisierung im Sinne der Einleitung legte eine Unterteilung an dieser Stelle nahe, um dieses Modul wiederverwendbar zu machen.

Als Schwachpunkt des Verfahrens ist anzusehen, dass beispielsweise die eingearbeiteten Veränderungen nicht rückgängig zu machen sind, sondern der Rückgriff auf Vorgänger-Versionen notwendig ist. Verschiedene Versionen einer Planung und die Aufeinander-Folge mehrerer Anwendungen des Moduls kann somit die Vorhaltung einer Vielzahl von vollständigen Geländemodellen erzwingen. Hierzu werden weitere Forschungen auf der konzeptuellen Ebene erfolgen, die nicht zuletzt die im Kapitel zwei erwähnten Mängel von 3D-Analyse-Funktionalitäten ebenfalls zum Gegenstand haben werden.

Sollte sich die Verwendung dieses Moduls in Zusammenhang mit den weiteren benötigten generischen Modulen für die 3D-Geovisualisierung als zweckmäßig herausstellen, wäre die Möglichkeit der Ausarbeitung einer Spezifikation als spezialisierter Web-Feature-Service (WFS) (OGC 2002) unter Verwendung einer GML3-kompatiblen TIN-Datenstruktur (OGC 2003) zu überprüfen.

Da sich als weitere Perspektive die Parallel-Verarbeitung und die Kaskadierung in Form von mehreren ähnlich spezialisierten Web-Services andeutet, wird eine verallgemeinernde Betrachtung hinsichtlich der Schaffung von Dienstnetzen für die 3D-Geovisualisierung angestrebt. Besonders vielversprechend erscheint in dem Zusammenhang die nähere Betrachtung von allgemeineren (nicht-geo) Dienste-Modellen, wie z.B. Business-Prozess-Modellen.

## 6 LITERATUR

- BARBISCH, M. (2002): Landschaftsvisualisierung mit Java 3D. Studienarbeit. Stuttgart.
- BENDER, M., M. BRILL (2003): Computergrafik. Kaiserslautern.
- BERNARDINELLO L., DE CINDIO F. (1992): A Survey of Basic Net Models and Modular Net Classes, Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 609
- BISHENG, Y. (?): Compressed Irregular Triangulation Network for Level\_of\_Detail Visualization (Paper). GIS Division, Department of Geography, University of Zurich-Irchel.
- BÜSCHER, O. (2002): Computerbasierte 3D-Visualisierung von Kompensationsmaßnahmen. Diplomarbeit, Institut für Geoinformatik der Universität Münster.
- CEBECAUER, T., J. HOFIERKA, M. SÚRI (2002): Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets. Trento, Italien.
- CHAN, T.M.-Y. (1994): A simple trapezoid sweep algorithm for reporting red/blue segment intersections. In: Proceedings of the Sixth Canadian Conference on Computational Geometry, S. 263-268.
- FUHRMANN, S., B. SCHMIDT, K. BERLIN, W. KUHN (2001): Anforderungen an 3D-Interaktionen in geo-virtuellen Visualisierungsumgebungen. Kartographische Nachrichten, Volume 51, No. 4., S. 191-195.
- GRÖGER, G., T.H. KOLBE (2003): Interoperabilität in einer 3D-Geodateninfrastruktur. In: BERNARD, L., A. SLIWINSKI, K. SENKLER (Hg.) Geodaten- und Geodienste-Infrastrukturen – von der Forschung zur praktischen Anwendung, IfGIprints 18, S. 325-343. Münster.
- HANNUSCHKA, A. (2002): Reale Virtualität – Integration der dritten und vierten Dimension in GIS. In GeoBIT Heft 1 2002, S. 32-34.
- MARTINONI, D., D. BERNHARD (1998): A conceptual framework for reliable digital terrain modelling. Department of Geography University of Zurich.
- OGC (1999): The OpenGIS™ Abstract Specification Version 4. Wayland.
- OGC (2002): Web Feature Service Implementation Specification. Version 1.
- OGC (2003): OpenGIS® Geography Markup Language (GML) Implementation Specification Version 3.
- RASE, W.-D. (1998): Visualisierung von Planungsinformationen – Modellierung und Darstellung immaterieller Oberflächen. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hg.). Bonn.
- SCHMIDT, B., M. MAY (2003): Dienste-basierte Architekturen für die Web-basierte 3D-Geovisualisierung. In: Tagungsband GI-Tage, IfGIprints 18, S. 311-323. Münster.