Seminar: Numerische Simulationsmodelle für Fließgewässer

Kapitel 4: Gitternetzgenerierung

Dirk Ditschke, Hannover[1]

Zusammenfassung

In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf der praktischen Erstellung und Bewertung von Gitternetzen für hydrodynamisch-numerischen Modelle (HN-Modelle). Es werden Qualitätskriterien für Gitternetze aufgeführt, und beispielhaft die Erstellung eines qualitativ hochwertigen Berechnungsnetzes aus digitalen Höheninformationen beschrieben. Als Beispiele dienen 2D-Netze, zum einen wegen der besseren Anschaulichkeit gegenüber 3D–Netzen, zum anderen, weil auch die meisten 3D–Modelle für Fließgewässer auf zweidimensionalen Netzen basieren.

Die theoretischen Grundlagen der Gitternetzgenerierung werden nur kurz gestreift. Für weiterführende Informationen sei auf die zahlreich vorhandene Fachliteratur oder die Handbücher der Netzgeneratoren verwiesen.

1.1 Einführung

Alle zur Zeit in der zwei- oder dreidimensionalen Simulation von Fließgewässern eingesetzten HN–Modelle benötigen für die Lösung der Navier–Stokes–Gleichungen Gitternetze. Von der Güte dieser Berechnungsnetze ist die Genauigkeit der Lösung und damit die Einsetzbarkeit der Modelle in hohem Maße abhängig.

Die eigentliche numerische Berechnung eines Modellgebietes kann je nach Modellgröße und Auflösung lange Rechenzeit beanspruchen, die reine Arbeitszeit, die dafür benötigt wird, ist jedoch verhältnismäßig gering. Sehr viel mehr Arbeitszeit nimmt in der Regel die Erstellung des Berechnungsnetzes durch den Projektbearbeiter in Anspruch. Da auch größere Simulationsrechnungen inzwischen auf preiswerten, handelsüblichen PC's durchgeführt werden können, ist die Arbeitszeit für die Netzerstellung (Preprocessing) und die Auswertung der Ergebnisse (Postprocessing) der größte Kostenfaktor.

[1] Dipl.-Ing., Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover

Die Verfügbarkeit von leistungsfähigen, günstigen Computern bietet die Möglichkeit, immer detailliertere, größere Systeme zu berechnen. Dies führt zu immer höheren Anforderungen an die Genauigkeit der Berechnungsgitter.

Moderne Netzgeneratoren können helfen, die Qualität der Gitter zu erhöhen und die Effizienz der Netzgenerierung durch verschiedene automatische Prozesse zu steigern [1]. Für ein detailliertes, qualitativ hochwertiges Gitter ist allerdings häufig noch viel Handarbeit nötig.

1.2 Grundlagen der Gittergenerierung

Gitternetze in HN–Modellen lassen sich grob in strukturierte und unstrukturierte Netze aufteilen. Kriterium ist hierbei die Nachbarschaftsbeziehung der Knoten untereinander (Topologie).

4.2.1 Strukturierte Netze

In einem strukturierten Gitter haben alle Knoten im Inneren des Untersuchungsgebietes den gleichen Nachbarschaftsgrad. Zum Beispiel haben bei einem Vierecksnetz im zweidimensionalen Fall alle Innenknoten genau 4 Nachbarknoten. Strukturierte Netze sind in der Regel Vierecksnetze, auf denen die Finite-Differenzen-Methode angewendet wird. Die Netze können rechtwinklig (Abb. 4.1) oder krummlinig in Hauptfließrichtung (Abb. 4.2) sein.

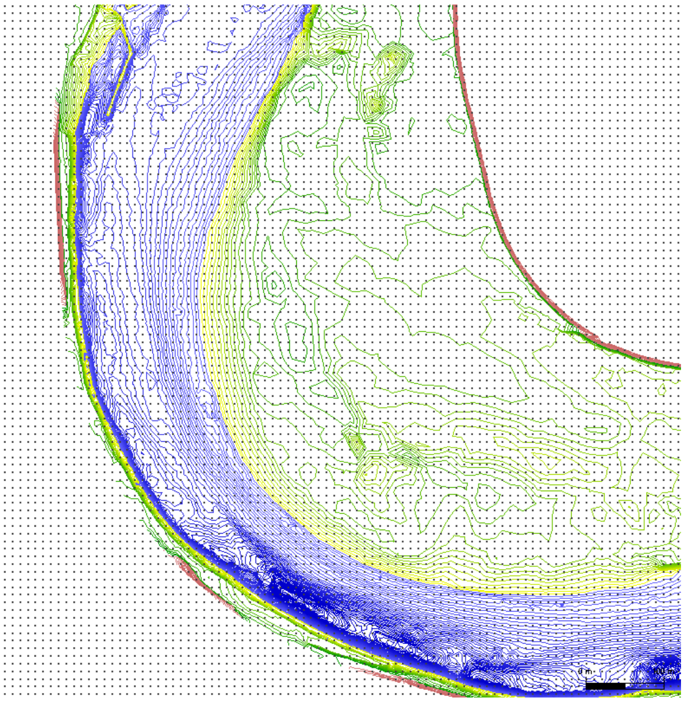

Abb. 4.1: Rechtwinkliges strukturiertes Gitter

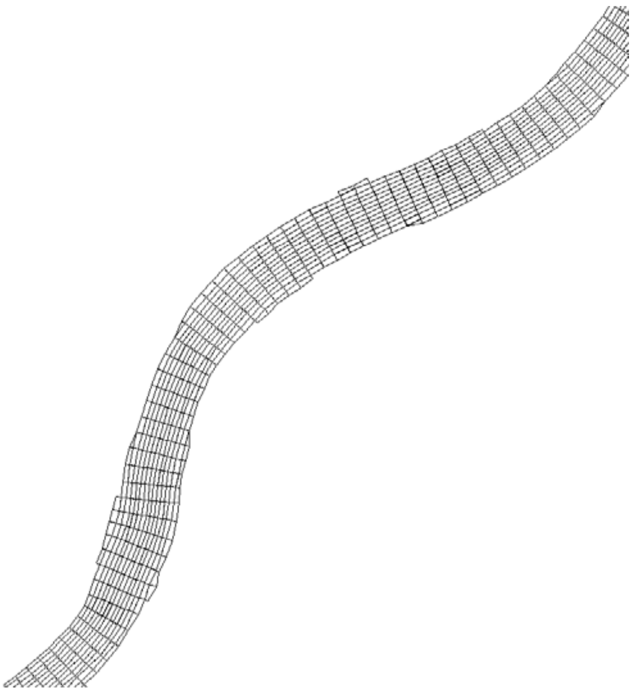

Abb. 4.2: Krummliniges strukturiertes Gitter

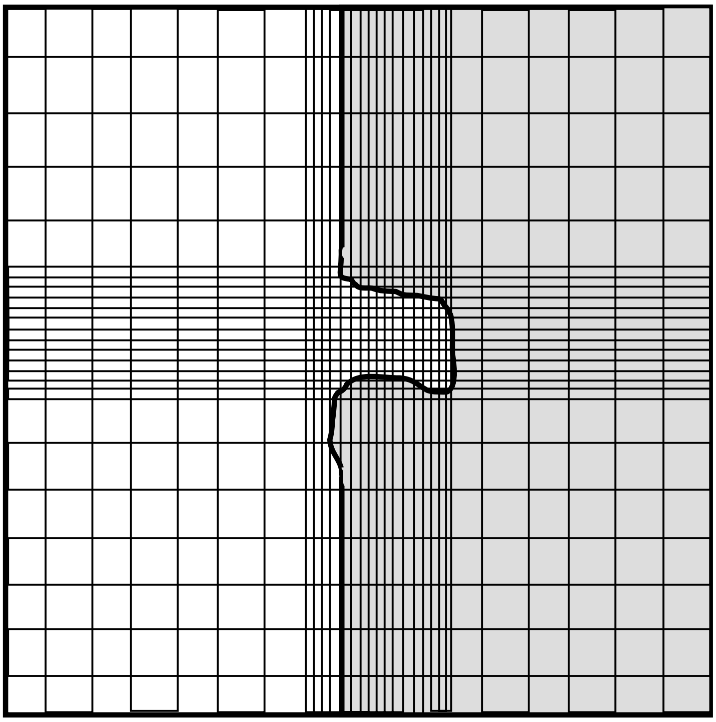

Abb. 4.3: Lokale Verfeinerung in einem strukturierten Vierecksnetz

Die Netze haben den Nachteil, dass lokale Verfeinerungen nur schwer möglich sind. In Abb.4.3 ist zu erkennen, dass bei der lokalen Verfeinerung solcher Netze zahlreiche neue Knoten außerhalb des eigentlich zu verfeinernden Gebietes entstehen. Dies führt dazu, dass strukturierte Netze für eine ähnliche Auflösung mehr Knoten benötigen als ein unstrukturiertes; allerdings können mit der Methode der Finten Differenzen auch deutlich mehr Knoten in der gleichen Zeit gelöst werden als mit Finite-Elemente- oder Finite-Volumen-Verfahren auf unstrukturierten Netzen.

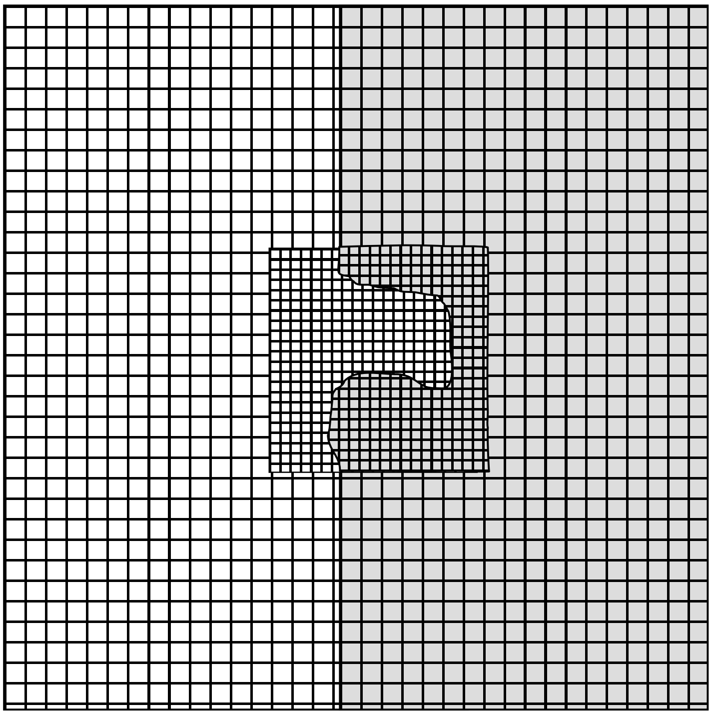

Abb. 4.4: Strukturiertes Gitter mit „Nesting“

Manche Modelle erlauben ein sogenanntes „Nesting“. Hierbei werden feiner diskretisierte Teilnetze einem gröberen Netz überlagert. Allerdings werden dann nicht die Gleichungen für das verfeinerte Gesamtmodell gelöst, sondern es wird zunächst das gröbere Modell berechnet. Aus diesem werden für das feiner diskretisierte Teilmodell Randbedingungen generiert.

4.2.2 Unstrukturierte Netze

Als unstrukturierte Netze werden im Wasserbau Dreiecksnetze oder hybride, das heißt aus Dreiecken und Vierecken zusammengesetzte Gitter verwendet. Ihr Kennzeichen ist, dass sie beliebig viele Nachbarschaftsgrade der Knoten untereinander zulassen. Prinzipiell sind auch Polyedernetze möglich, diese werden in der Simulation von technischen Strömungen inzwischen häufig eingesetzt, haben sich in der Simulation von Fließgewässern aber bislang nicht durchsetzen können.

Auf unstrukturierten Netzen werden Finite Elemente oder Finite Volumen Verfahren angewendet. Der Vorteil dieser Netze ist die bessere Möglichkeit, lokale Verfeinerungen durchzuführen. Es ist daher einfacher komplexe Geometrien abzubilden als in strukturierten Netzen. Abb. 4.5 zeigt ein solches Dreiecksnetz mit einer lokalen Verfeinerung.

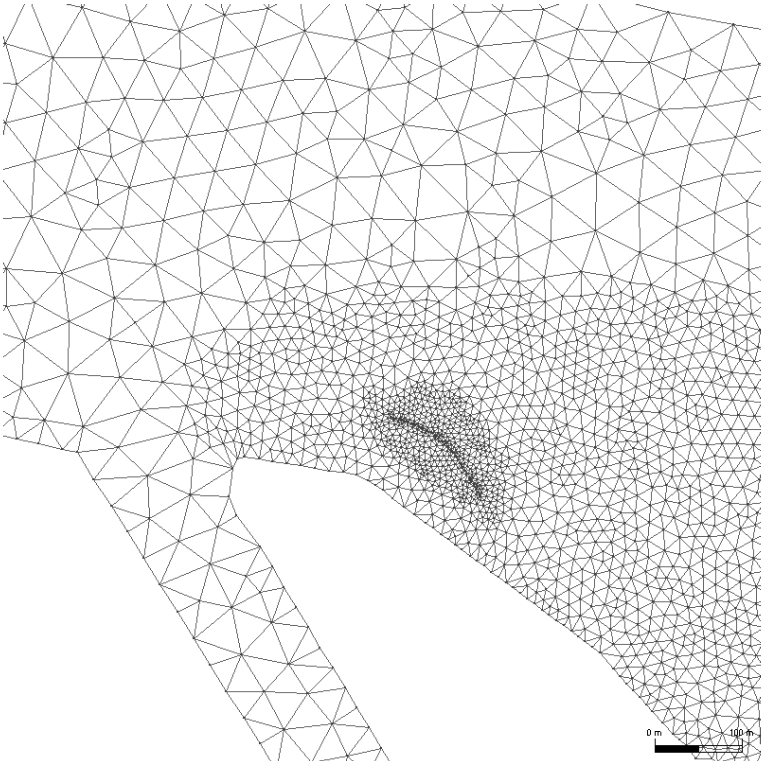

Abb. 4.5: Unstrukturiertes Dreiecksnetz mit lokaler Verfeinerung

Die folgenden Beispiele werden anhand von Dreiecksnetzen vorgestellt, die Anforderungen und die Vorgehensweise sind jedoch in der Regel übertragbar.

4.2.3 Vom 2D zum 3D-Netz

Die Gitter für die dreidimensionale hydrodynamisch-numerische Modellierung von Oberflächengewässern werden fast ausschließlich aus zweidimensionalen Gittern erzeugt. Hierbei unterscheidet man zwischen z- und σ-Netzen.

Bei z-Netzen wird ein ebenes zweidimensionales Gitter parallel auf verschiedene Höhen kopiert. Je nach Sohlhöhe und Wasserspiegellage entstehen dadurch Elemente, die nur Wasser, Boden oder Luft enthalten und Elemente, in denen eine Grenzfläche zwischen den Medien liegt.

In σ-Netzen werden ebenfalls mehrere zweidimensionale Netze übereinander gelegt. Das unterste Netz bildet die Form der Sohle ab, das oberste den Wasserspiegel. Die anderen Ebenen werden dazwischen verteilt. Alle Elemente liegen damit im Wasserkörper, sofern die Wassertiefe am Knoten nicht Null ist. Da die Ebenenanzahl im gesamten Gebiet gleich bleibt, liegen die Ebenen im Flachwasser enger zusammen als in tieferen Bereichen (Abb. 4.6).

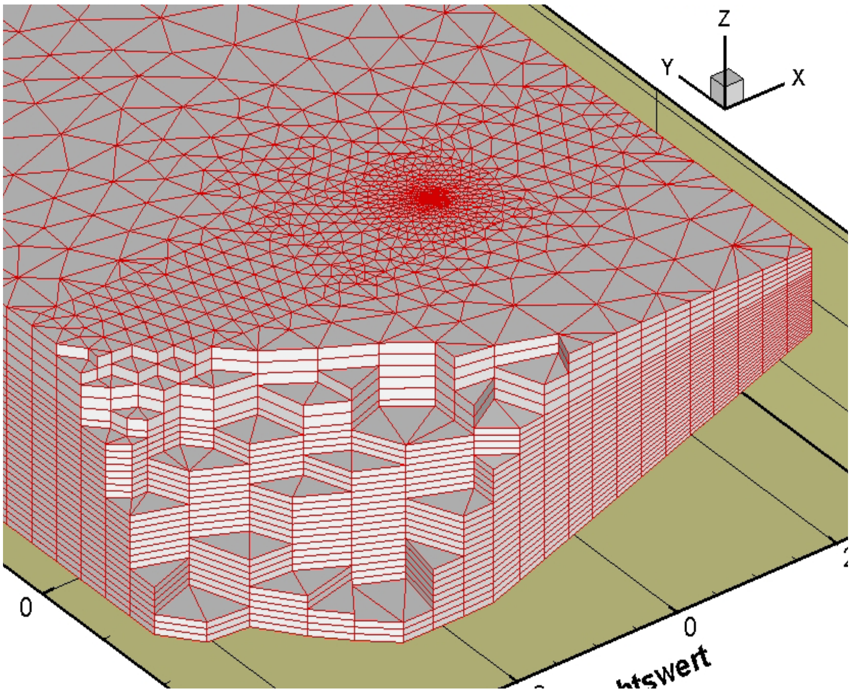

Abb. 4.6: Dreidimensionales σ - Netz

4.2.4 Triangulierungsalgorithmen

Der am weitesten verwendete Algorithmus zur Erzeugung von Dreiecksgittern geht von einer Punktmenge aus, die die Knoten des zu erzeugenden Gitters sind. Im ersten Schritt wird für diese Punkte eine sogenannte Voronoizerlegung erzeugt. Dabei wird jedem Punkt ein Polygon zugeordnet, welches das ihm am nächsten liegende Gebiet umschließt. Im zweiten Schritt werden die Knoten durch Kanten verbunden, deren Voronoizellen eine gemeinsame Kante besitzen. Die Delaunay-Triangulation erzeugt ein Gitter, bei dem im Umkreis eines jeden Dreieckes außer den eigenen Punkten kein weiterer enthalten ist (Abb. 4.7).

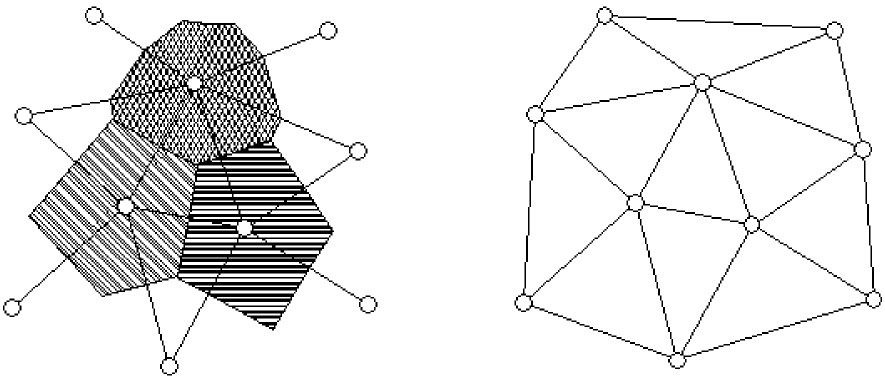

Abb. 4.7: Voronoizerlegung und Delaunaytriangulation

Als weitere Algorithmen sind die Advancing – Front – Methode und die blockstrukturierte Technik zu nennen [2].

1.3 Anforderungen an ein Berechnungsnetz

Eine der Hauptfragestellungen bei der Erstellung und Bewertung von Berechnungsnetzen ist die nach der Qualität eines Gitters. Hierbei sind zwei Aspekte zu unterscheiden. Zum einen ist dies eine den Anforderungen entsprechende Genauigkeit bei der geometrischen Abbildung des Untersuchungsgebietes, zum anderen muss das Netz so beschaffen sein, dass sich das Modell numerisch effizient berechnen lässt. Diese beiden Aspekte werden im folgenden dargestellt.

1.3.1 Abbildung der Geometrie

Das numerische Modell soll die örtlichen Gegebenheiten möglichst exakt wiedergeben. Hierzu wäre es theoretisch notwendig, jede auch noch so kleine Struktur im Gebiet mit einem Berechnungsknoten zu erfassen. Praktisch ist dies nicht durchführbar, da ein solches Modell trotz der rasanten Entwicklung der Computertechnik in absehbarer Zeit nicht zu berechnen sein wird. Es ist daher notwendig, sich auf die Abbildung der Geometrie zu beschränken, die einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Andere Geometrien, die nicht explizit im Modell abgebildet werden, werden parametrisiert. Als Parameter für die Berücksichtigung von nicht abgebildeten Geometrien hat sich die Sohlrauheit bewährt. Je nach Anforderungen an das Simulationsergebnis können mehr oder weniger Strukturen im Gebiet explizit erfasst oder parametrisiert werden.

Erfassung von Strukturkanten

Die Entscheidung, ob eine Struktur im Gebiet das Ergebnis beeinflusst, hängt vor allem von der Fragestellung und dem Untersuchungsgebiet ab. So kann es zum Beispiel für eine Simulation der Wasserspiegellage bei einem Hochwasserabfluss eventuell ausreichend sein, auf die Modellierung von Buhnen im Berechnungsnetz zu verzichten und deren Einfluss über eine erhöhte Sohlrauheit zu parametrisieren. Wenn nun allerdings der Einfluss von Buhnen oder anderen Baumaßnahmen auf den Wasserspiegel untersucht werden soll, müssen diese natürlich mit großer Genauigkeit im Berechnungsnetz wiedergegeben werden.

Da die Bewertung von Baumaßnahmen in Zukunft wohl einer der häufigsten Anwendungsfälle für zwei- und dreidimensionale Modelle sein wird und ein Netz, in dem auf die Abbildung von besonderen Strukturen verzichtet wird, keine besonderen Anforderungen an die Gittergenerierung stellt, wird im folgenden besonders auf die Erfassung von Strukturen eingegangen.

Als Strukturkanten werden klar definierte Linien bezeichnet, die einen deutlichen natürlichen oder künstlichen Wechsel der Bodengradienten beschreiben. Dies können zum Beispiel Uferböschungen, Bauwerke, Gräben im Vorland oder Deiche sein. Wenn diese Strukturen einen Einfluss auf das Ergebnis haben, werden sie als „hydraulisch wirksam“ bezeichnet und müssen im numerischen Modell erfasst sein.

Die genaue Abbildung dieser Kanten stellt an das Berechnungsgitter hohe Anforderungen. In Abb. 4.8 ist der Schnitt durch eine Uferböschung (grau) dargestellt. Wenn diese Böschung mit den in schwarz eingezeichneten Knoten (Abb. 4.8 – oben) vernetzt wird, ergibt sich ein von der tatsächlichen Uferböschung stark abweichendes Berechnungsgitter (schwarz gestrichelt). Die Abbildung der Topographie lässt sich verbessern, indem das Netz im Bereich der Gradientenwechsel, also am Fuß und am Kopf der Böschung verfeinert wird (Abb. 4.8 - mitte). Das Berechnungsnetz entspricht der abzubildenden Topographie nun schon besser. Allerdings sind am Kopf und am Fuß der Böschung immer noch Abweichungen zu erkennen. Da diese Verfeinerung an allen Strukturkanten im Gebiet erfolgen muss, wird diese genauere Abbildung der Geometrie mit einer stark erhöhten Knotenzahl und damit einer sehr viel höheren Rechenzeit „erkauft“.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Knoten des Berechnungsnetzes genau auf den Strukturkanten zu platzieren (Abb. 4.8 – unten). Die Böschung wird dann in Lage und Neigung exakt abgebildet. Hierzu sind sehr viel weniger Punkte notwendig, als wenn die Gradientenwechsel durch eine erhöhte Knotendichte abgebildet werden soll. Allerdings ist diese Vorgehensweise zur Zeit noch mit einem sehr großen Arbeitsaufwand verbunden, da bislang kein Netzgenerator für wasserbauliche Anwendungen auf dem Markt verfügbar ist, der diese Bruchkanten vollständig automatisch detektiert. Demnach ist bei einem solchen Modell die benötigte Rechenzeit zwar geringer; der Aufwand, um ein solches Netz zu erstellen, ist jedoch sehr viel größer. Zudem kann es Probleme mit der Genauigkeit geben, wenn Böschungen nur mit so wenig Knoten abgebildet werden.

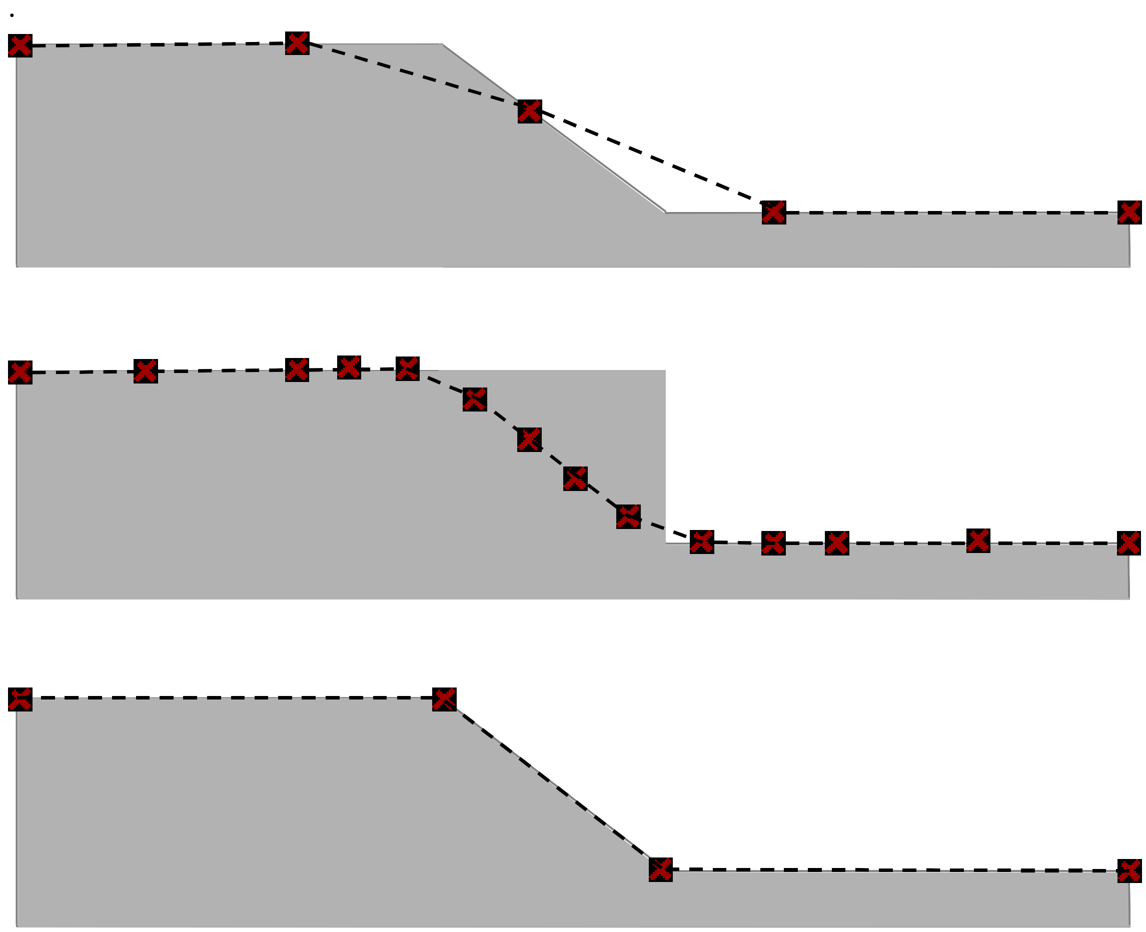

Abb. 4.8: Diskretisierungsmöglichkeiten einer Böschung im Berechnungsnetz

Lage der Elementkanten

Für eine genaue Abbildung des Untersuchungsgebietes ist nicht nur die Position der Berechnungsknoten, sondern auch die Lage der Elementkanten wichtig. Beim Beispiel einer schematischen Buhne wird deutlich, dass eine fehlerhafte Lage der Elementkanten zu einer falschen Abbildung der Geometrie führen kann, obwohl die Lage der Knoten korrekt ist. In Abb. 4.9 ist eine schematische Buhne zweimal mit jeweils den gleichen Punkten beschrieben, allerdings wurden bei drei Elementen die Kanten getauscht. Die dreidimensionale Ansicht verdeutlicht, dass Elementkanten immer auf den Strukturkanten liegen müssen und keinesfalls diese schneiden dürfen.

Fehlerhaft liegende Elementkanten können ein Berechnungsergebnis stark beeinflussen, im oben angeführten Beispiel einer Buhne wird die Wirkung der Buhne durch die fehlerhaften Elemente verringert. Wenn ein Deich solche Fehler aufweist, kann dies dramatische Auswirkungen auf das Berechnungsergebnis haben.

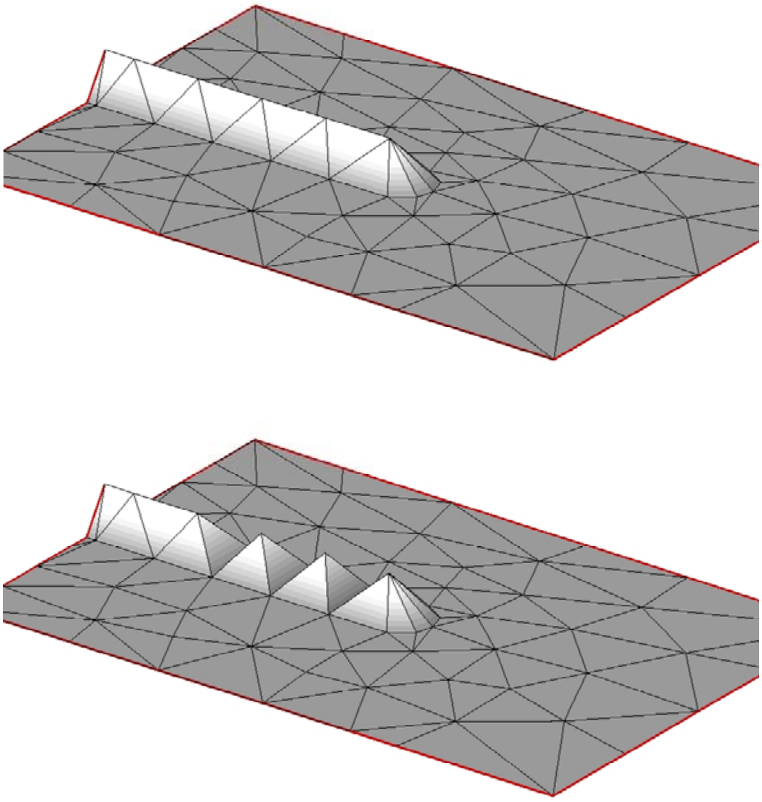

Abb. 4.9: Schematische Buhne: oben korrekt vernetzt – unten mit fehlerhafter Lage der Elementkanten

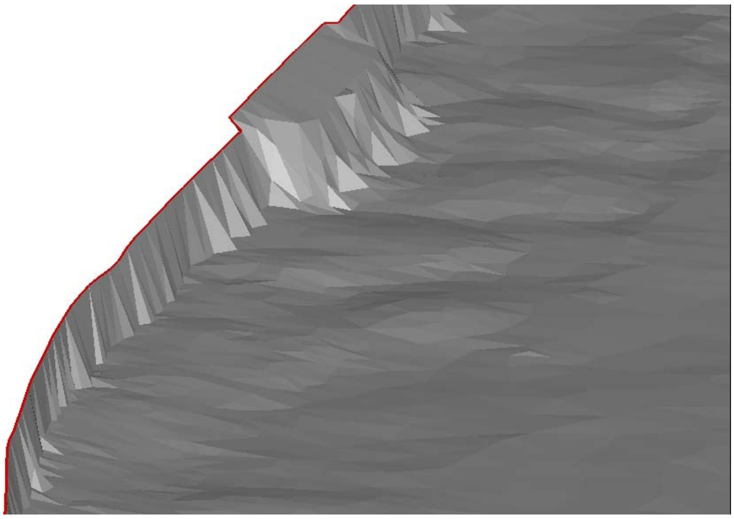

Abb. 4.10: Unnatürliche Abbildung der Böschung

In Abb. 4.10 ist an der linken Seite zu erkennen, dass an einer Uferböschung falsch orientierte Elementkanten zu einem unnatürlichen, zackenförmigen Verlauf der Böschung führen können. Dies wirkt sich im numerischen Modell als erhöhte Rauheit aus.

1.3.2 Numerische Qualität

Die numerische Qualität eines Gitternetzes wird daran bemessen, wie genau und wie schnell die Ergebnisse mit einem numerischen Modell berechnet werden können. Im Nachfolgenden werden die wichtigsten numerischen Qualitätskriterien für Gitternetze aufgeführt.

Elementform

Als Elementform sind immer gedrungene Elemente zu bevorzugen. Das heißt, Dreiecke sollten möglichst gleichseitig, Vierecke möglichst quadratisch sein. (vgl. Abb. 4.11)

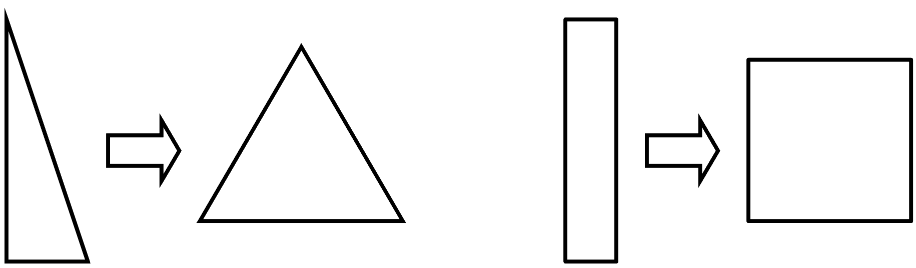

Abb. 4.11: Aus numerischer Sicht optimale Elementformen

Maße für die Qualität der Dreiecksform sind zum Beispiel der kleinste oder größte Innenwinkel im Dreieck oder der sogenannte Shape-Parameter. Ein strenges Kriterium wäre zum Beispiel die Forderung, dass kein Innenwinkel eines Dreieckes größer als 90° sein darf. Der Shape–Parameter nimmt bei gleichseitigen Dreiecken den Wert 0 an, bei extrem spitzen Dreiecken etwa 1,4. Es ist anzustreben das der maximale Shape–Parameter einem Wert von ca. 0,9 nicht übersteigt.

Eine Möglichkeit, möglichst gleichseitige Dreiecke zu erhalten, sind Glättungsalgorithmen, wie zu Beispiel die Laplace–Glättung. Bei dieser Methode werden in einem iterativen Prozess alle Innenknoten in den Schwerpunkt ihres Patches (ein Patch umfasst alle Elemente um einen Knoten) verschoben. Abb. 4.12 zeigt einen vernetzten Flussabschnitt vor (links) und nach (rechts) einer Laplace–Glättung. Schon auf den ersten Blick ist hier eine Vergleichmäßigung der Elementform insbesondere am Fuß der Böschung zu erkennen. In Abb. 4.13 ist eine statistische Auswertung der Dreiecksform dargestellt. Als Maß dient der Shape–Parameter. Anhand der steileren Kurve ist zu erkennen, das nach der Laplace–Glättung deutlich mehr Dreiecke einen niedrigen Shape–Parameter haben als vor der Glättung (flachere Kurve).

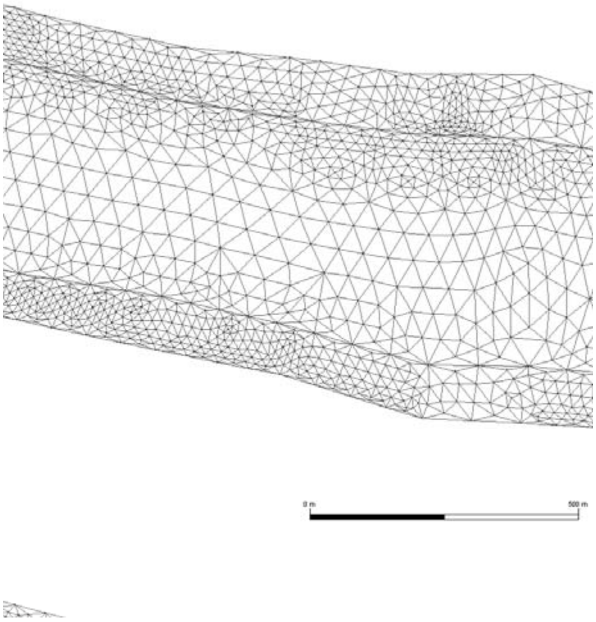

Abb. 4.12: Dreiecksnetz vor (links) und nach (rechts) einer Glättung (Laplace – Transformation)

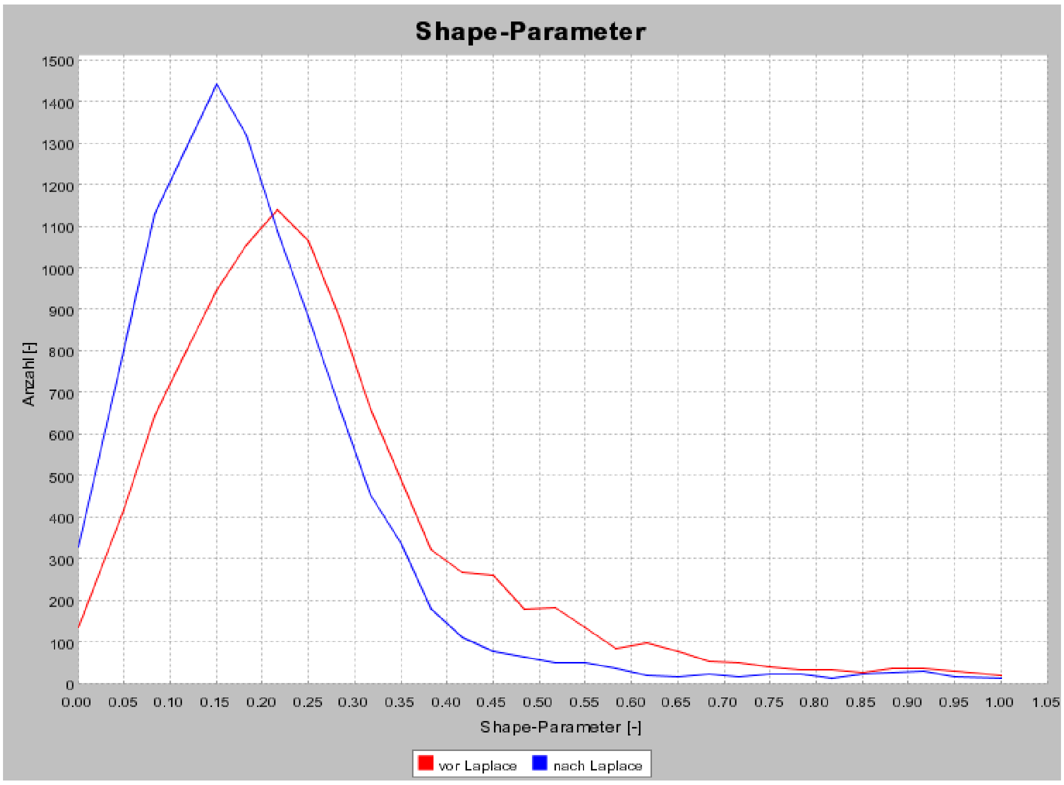

Abb. 4.13: Verteilung des Shape – Parameters über die Elementanzahl

Größenverhältnisse

Bei lokalen Verfeinerungen des Gitters sollten zwischen Bereichen mit hoher und niedriger Elementdichte eine Abstufung der Gitterfeinheit vorgesehen werden. Als Anhaltspunkt sollte das Flächenverhältnis benachbarter Elemente einen Wert von 1:2 bis 1:3 nicht überschreiten.

Anzahl Nachbarknoten

Die Anzahl der Nachbarknoten sollte möglichst gering sein, da ansonsten ein Knoten zu sehr vielen Elementen gleichzeitig gehört. Als Obergrenze sind hier 10 Nachbarknoten zu nennen. Bei Knoten, die sehr viele Nachbarknoten haben, ist in der Regel gleichzeitig die Forderung nach einer gedrungenen Elementform und einer abgestuften Gitterfeinheit verletzt.

Knotenabstand

Es ist darauf zu achten, dass der Abstand zwischen zwei Berechnungsknoten nicht unnötig klein ist. Geringe Knotenabstände erhöhen nicht nur die Gesamtanzahl der Berechnungsknoten, sondern führen bei vielen numerischen Modellen auch dazu, dass der Berechnungszeitschritt sehr klein gewählt werden muss, um die numerische Stabilität zu gewährleisten. Problematisch sind hierbei insbesondere Buhnenköpfe. Um die Form der Buhne exakt wiederzugeben, ist man geneigt, einen runden Buhnenkopf mit vielen kleinen Elementen zu diskretisieren. Da am Buhnenkopf erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten auftreten, findet man hier meist die höchsten Courant–Zahlen, die den Zeitschritt beschränken. Das Courant-Kriterium gilt bei expliziten Verfahren und besagt, dass der Zeitschritt nicht größer sein darf als die Zeit, die ein Wasserpartikel (oder eine Welle) braucht, um von einem Gitterpunkt zum nächsten zu gelangen [3].

Es kann daher sinnvoll sein, kleine Strukturen im Modell zu vergrößern, wenn dadurch das Ergebnis nicht wesentlich beeinträchtigt wird. Zum Beispiel ist durchaus zu überlegen, ob eine 30 cm Breite quer überströmte Mauer nicht genauso gut durch eine 2 m breite Mauer mit entsprechend größeren Elementen abgebildet werden kann, ohne das Ergebnis zu verfälschen.

Ausreichende Auflösung

Das Berechnungsnetz muss für die Fragestellung ausreichend fein aufgelöst sein. Es kann dabei notwendig sein, das Netz bereichsweise zu verfeinern, um bestimmte Strömungsphänomene zu simulieren, obwohl die Abbildung der Geometrie auch mit einem gröberen Netz ausreichend genau wäre. Zum Beispiel muss der Nahbereich von Bauwerken, wie Buhnen oder Brückenpfeilern, sehr fein aufgelöst werden, wenn mit dem Modell die Kolkung oder Wirbelbildung am Bauwerk untersucht werden soll.

Es ist häufig auch sinnvoll, Böschungen mit mehreren Knoten abzubilden, obwohl die Geometrie bereits mit jeweils einem Knoten auf der oberen und unteren Strukturkante eindeutig beschrieben wäre. Wenn die Wasserspiegellage zwischen dem Böschungsfuß und –kopf liegt, kommt es bei einigen Modellen zu Problemen mit der Behandlung dieser „teilbenetzten“ Elemente. Dies kann zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Wasserspiegellage oder auch des Wasservolumens führen.

Adäquate Knotenanzahl

Für die Frage, wie fein ein Berechnungsnetz aufgelöst sein muss, gilt der Leitspruch:
„So fein wie nötig, so grob wie möglich!“
Das Modell soll also so fein diskretisiert werden, dass es möglich ist, die Fragestellung zu beantworten. Allerdings sollten auch nicht zu viele Elemente verwendet werden, da ansonsten der Rechenaufwand unnötig steigt.

Die Entscheidung, ob ein Modell fein genug aufgelöst wurde, trifft der Modellierer im Wasserbaubereich in der Regel aus seiner Erfahrung. Eine nachvollziehbarere Methode ist der Test der doppelten Auflösung. Hierbei werden alle Elemente eines Berechnungsnetzes verfeinert. Wenn die Ergebnisse mit diesem verfeinerten Netz <u>bezüglich der Fragestellung</u> keinen Unterschied zum Ausgangsmodell zeigen, ist die

„Gitterunabhängigkeit“ nachgewiesen und das gröber aufgelöste Modell kann verwendet werden. Ansonsten ist die Auflösung ein weiteres Mal zu verdoppeln und der Test zu wiederholen.

Maximale Neigung von Kanten

Viele im Wasserbau eingesetzte Modelle haben Schwierigkeiten, wenn das Modell steile Bodengradienten enthält. In zweidimensionalen Modellen ist eine Abbildung von senkrechten Wänden grundsätzlich nicht möglich, da in diesem Fall an einem Knoten zwei verschiedene Höhenwerte vorliegen. Aber auch steile Böschungen stellen die numerischen Modelle vor Probleme, da diese meistens auf der Lösung der Flachwassergleichung basieren und diese Gleichung eigentlich nur bis zu einem Bodengradienten von 1:10 gilt. In der Praxis liefern die Modelle aber auch bei Bodengradienten von 1:5 oder teilweise sogar 1:3 noch ausreichend genaue Ergebnisse (Abb. 4.14). Es ist daher notwendig, die im Untersuchungsgebiet vorkommenden steilen Bodengradienten für das Rechengitter derart anzupassen, dass keine Böschungsneigungen steiler als 1:5 auftreten. Hierzu sind die Bruchkanten an der Böschungsoberkante sowie am Böschungsfuß um das notwendige Maß zu versetzen.

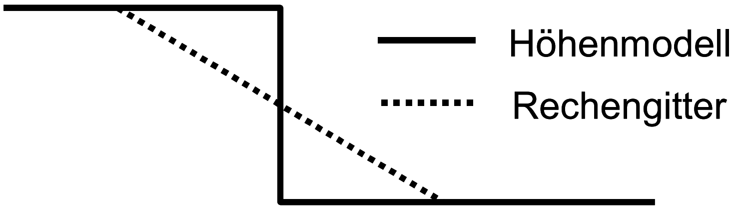

Abb. 4.14: Ersatzdarstellung für steile Bodengradienten

1.4 Erstellen eines Berechnungsnetzes

Im folgenden Abschnitt sollen beispielhaft die Arbeitsschritte von der Erfassung der Höheninformationen zum fertigen Berechnungsnetz dargestellt werden.

1.4.1 Das Digitale Geländemodell

Ausgangspunkt für die Erstellung eines Berechnungsnetzes sind die Höheninformationen aus Messungen. Neben Peilungen von Querprofilen liegen die Daten mittlerweile häufig bereits in einer großen Dichte flächenhaft aus Fächerecholotungen oder Befliegungen vor. Wenn verschiedene Datenquellen für ein Gebiet vorhanden sind, werden die Daten analysiert und ausgewählt. Kriterien für die Auswahl sind Aktualität, Genauigkeit, Datendichte und die Frage, ob die Daten zueinander passen. GIS-Systeme (vgl. Kapitel 6) können dabei eine Hilfe sein.

Aus den ausgewählten Punktinformationen wird ein digitales Geländemodell (DGM) erstellt, das auch die interpolierten Höhen zwischen den Messwerten eindeutig beschreibt. Hierzu werden die Höhenpunkte vernetzt. Bereits bei diesem Schritt ist darauf zu achten, dass Strukturkanten korrekt abgebildet werden. Das folgende Beispiel zeigt einen möglichen Fehler bei der Erstellung des digitalen Geländemodells.

Im vorliegenden Beispiel setzen sich die Daten aus Querprofilen und der Berandung des Flussschlauchs zusammen. Die Berandung stammt in diesem Fall aus einem anderen Datensatz als die Querprofile, so dass die Knoten des Randes nicht auf den Profilen liegen. Vernetzt man das aus beiden Datensätzen bestehende digitale Höhenmodell, werden zahlreiche Knoten der Querprofile direkt mit einem Randknoten verbunden, da dieser der nächstliegende ist (Abb. 4.15 – oben links). An der Darstellung der Höhenlinien (oben rechts) erkennt man, dass dies zu einem sehr unregelmäßigen, unrealistischen Böschungsverlauf führt. Die so entstandenen Fehler im DGM werden ins Berechnungsnetz übernommen. Das korrekte DGM zeigt (Abb. 4.15 – unten)

1.4.2 Erfassen der Strukturkanten

Wenn ein Netz so hoch aufgelöst werden soll, dass alle maßgeblichen Strukturkanten dargestellt werden, müssen diese vor dem Vernetzen des Gebietes identifiziert und markiert werden.

Einige Netzgeneratoren bieten hierzu die Möglichkeit, die Bruchkanten als Strukturpolygone festzulegen. Diese Polygone haben zwei maßgebliche Eigenschaften. Zum einen sind sie in ihrer Lage festgeschrieben, so dass zum Beispiel Glättungsalgorithmen oder Gebietsverfeinerungen die Lage der Polygone nicht beeinflussen. Zum anderen ist festgelegt, dass keine Elementkante ein solches Polygon schneiden darf. Dadurch lassen sich falsch orientierte Elementkanten, wie beim obigen Beispiel der schematischen Buhne, vermeiden.

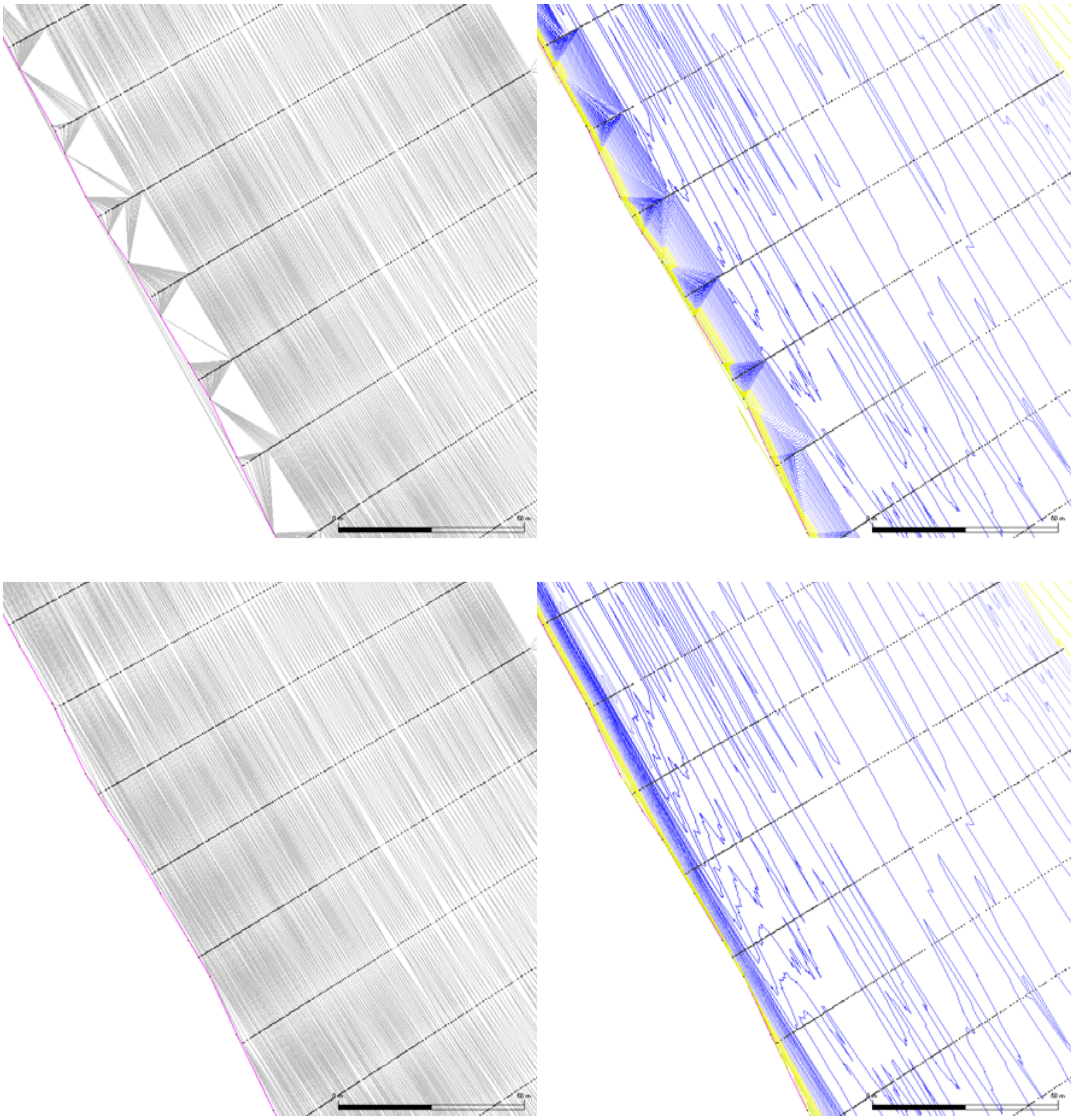

Abb. 4.15: Vernetzung eines digitalen Höhenmodells: links Netz – rechts Höhenlinien, oben fehlerhaft – unten korrekt

Die Erfassung dieser Strukturkanten erfolgt meist manuell. Als Anhaltspunkte können hier georeferenzierte Luftbilder, die digitale Bundeswasserstraßenkarte, oder Höhenlinien dienen (Abb. 4.16).

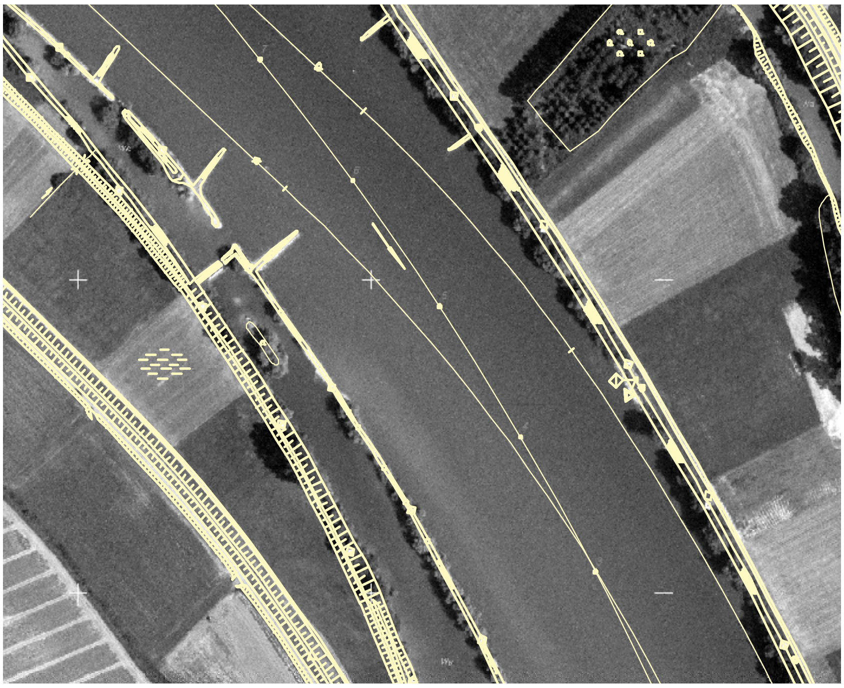

Abb. 4.16: Luftbild mit überlagerten Polygonen aus der Digitalen Bundeswasserstraßenkarte (DBWK)

Bei eng zusammenliegenden Bruchkanten, wie zum Beispiel an kurzen, steilen Böschungen, ist darauf zu achten, dass die Polygone mit einer ausreichenden Anzahl von Knoten abgebildet werden, um die Bildung von allzu gestreckten Elementen zu verhindern. An dieser Stelle ist auch die maximale Neigung der Elementkanten (s. o.) zu berücksichtigen. Um ein konkaves Modellgebiet zu erhalten, muss vor dem Vernetzen außerdem der Modellrand festgelegt werden.

1.4.3 Vernetzen und Verfeinern des Gebietes

Wenn alle Strukturkanten und der Rand definiert sind, wird das Gebiet vernetzt und anschließend verfeinert.

Das Verfeinern der Gebietes geschieht bereichsweise in kleinen Schritten. Die übliche Vorgehensweise ist hierbei, dass zunächst das Gesamtgebiet schrittweise so verfeinert wird, dass die Bereiche mit der gröbsten Diskretisierung korrekt vernetzt sind. Anschließend werden die Gebiete, in denen eine feinere Auflösung notwendig ist, lokal verfeinert. Die schrittweise Vorgehensweise ist sinnvoll, da eine Vergröberung des Netzes numerisch sehr aufwendig ist.

Die Verfeinerung kann anhand von vorbestimmten Kriterien erfolgen, die entweder die Abbildung der Geometrie oder die numerische Effizienz der Netzes optimieren. Als Kriterium für die Optimierung der Geometrie kann zum Beispiel die Abweichung des Dreiecksschwerpunktes vom DGM genutzt werden. Um die numerische Effizienz zu erhöhen, können beispielsweise alle Dreiecke mit einen besonders kleinen Innenwinkel verfeinert werden.

1.5 Bewerten eines Berechnungsnetzes

Ein Berechnungsgitter sollte immer hinsichtlich der geometrischen und der numerischen Qualität bewertet werden. Hierbei treffen jedoch zum Teil entgegengesetzte Anforderungen aufeinander. Je mehr Knoten verwendet werden, desto exakter kann eine Geometrie abgebildet werden, wenn dagegen weniger Knoten verwendet werden, lässt sich das System schneller berechnen. Mit langgezogenen Elementen benötigt man häufig weniger Knoten, um eine Geometrie abzubilden, allerdings ist die Genauigkeit bei gedrungenen Elementen größer. An steilen Sohlgradienten oder sehr schmalen Strukturen wird aus numerischen Gründen, wie oben beschrieben, bewusst auf eine genaue Abbildung verzichtet.

Für die Überprüfung der geometrischen Qualität bietet es sich an, die Höhendifferenzen zwischen Berechnungsnetz und digitalem Geländemodell zu betrachten. Diese Differenz wird an allen Knoten des Geländemodells und eventuell des Berechnungsnetzes gebildet. Die Auswertung kann optisch und statistisch erfolgen. Bei der optischen Auswertung erhalten die Knoten statt der Geländehöhe den Differenzenwert zugewiesen, der dann farbig dargestellt wird. Hierbei ist es sinnvoll, den Bereich der Differenzen, der im vorgegebenen Toleranzbereich liegt, nicht oder nur schwach einzufärben. Für positive und negative Abweichungen sollten unterschiedliche Farben gewählt werden, da sich so entscheiden lässt, ob ein systematischer Fehler vorliegt oder sich die Abweichungen im Mittel ausgleichen. In der Regel liegen die größten Höhendifferenzen im Bereich steiler Bodengradienten, da hier schon kleine Abweichungen der horizontalen Lage eine relativ starke Abweichung der Höhenwerte hervorrufen.

Zusätzlich zur optischen Kontrolle können statistische Methoden verwendet werden. So kann zum Beispiel das Volumen zwischen DGM und Berechnungsnetz berechnet werden. Man erhält einen integralen Wert, bei dem sich positive und negative Abweichungen ausgleichen. Eine geringe Volumenabweichung ist demnach ein Indiz dafür, dass kein systematischer Fehler vorliegt. Eine andere statistische Methode ist die Auswertung der Verteilung der Differenzenwerte über die Knotenanzahl. Abb. 4.17 zeigt eine solche

Darstellung. Im vorliegenden Beispiel lässt sich ablesen, dass die meisten Knoten eine Abweichung von weniger als ± 20 cm haben.

Diese statistischen Methoden geben allerdings keinen Aufschluss darüber, an welchen Stellen die Abweichungen auftreten und ob diese einen Einfluss auf das Berechnungsergebnis haben. Wenn innerhalb des Gebiets unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden (z.B. geringere Abweichung im Flussschlauch als im Vorland), ist diese Auswertung gegebenenfalls zu differenzieren.

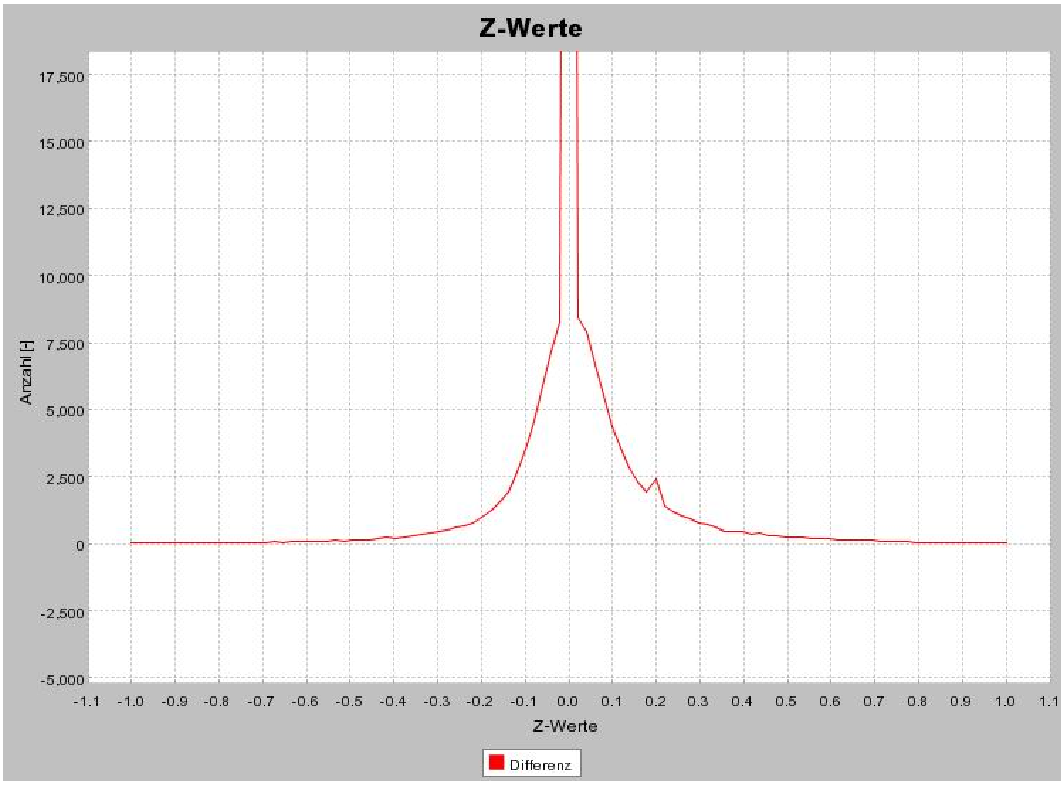

Abb. 4.17: Verteilung der Differenzen zwischen DGM und Berechnungsnetz

Auch für die numerische Qualität von Dreiecksnetzen gibt es Kontrollmöglichkeiten. Neben dem in Kapitel 1.3.2 beschriebenen Shape–Parameter können auch die Werte für die minimale Kantenlänge oder den minimalen oder maximalen Innenwinkel herangezogen werden. Diese Werte können analog zu den Differenzen (Abb. 4.17) dargestellt werden.

1.6 Literatur

[1] Lippert, C., *Präprozessor Janet - Benutzerhandbuch zur Janet-Version 1.6*. 2003, Hannover.

[2] Kasper, H., *Aspekte der Datenverarbeitung*, in *Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern*, W. Zielke, Editor. 1999, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.: Bonn. p. 123- 164.

[3] Zielke, W., *Wegweiser durch numerische Modelle*, in Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern, W. Zielke, Editor. 1999, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.: Bonn. p. 5 - 46.