

**BESTIMMUNG VON ÜBERSCHWEMMUNGSGRENZEN DURCH
KOPPLUNG VON HYDRODYNAMISCHER SIMULATION UND
GEOGRAFISCHEM INFORMATIONSSYSTEM AM BEISPIEL DER
UNTERALLER**

***DETERMINATION OF FLOODED AREAS BY COUPLING
HYDRODYNAMIC SIMULATION AND GEOGRAPHIC INFORMATION
SYSTEM EXAMPLIFIED FOR THE UNTERALLER***

von

Andreas WURPTS

Andreas MATHEJA

ABSTRACT

This paper gives an introduction to the prediction of flooded areas by a 1D hydrodynamic model (HEC-RAS) coupled to a geographic information system (ArcView) to setup model geometry and visualize results. The model area covers the Aller River between weir Celle (Aller-km 0,0) and weir Marklendorf (Aller-km 38,3). Characteristic for this section are wide forelands and a minimal bed slope of the river bed.

System geometry was calculated from a digital elevation model setup by ATKIS data and echo soundings of cross sections. The model consists of 202 cross sections with stationary flow conditions (HQ₁₀₀). It was calibrated by a flood event (01.02.1994).

Flooded areas were calculated from model results overlying the digital elevation model and presented in ArcView shape format.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Veröffentlichung gibt einen Einblick in die Ausweisung von Überschwemmungsflächen auf der Basis eines 1D hydrodynamischen Modells (HEC-RAS) in Verbindung mit einem geographischen Informationssystem (ArcView) für den Geometrieaufbau des Modells und zur Darstellung der Ergebnisse. Das modellierte Gebiet umfasst dabei die Aller zwischen dem Wehr Celle (Aller-km 0,0) und dem Wehr Marklendorf (Aller-km 38,3). Charakteristisch für das Modellgebiet ist ein breites Flusstal mit geringen Sohlneigungen.

Die Systemgeometrie wurde auf der Basis eines digitalen Geländehöhenmodells auf der Basis von ATKIS-Daten, ergänzt durch zusätzliche Querprofilpeilungen, berechnet. Das Modell besteht aus 202 Querprofilen bei stationären Strömungsverhältnissen (HQ₁₀₀). Die Kalibrierung des Strömungsmodells wurde anhand des Hochwasserereignisses vom 01.02.1994 durchgeführt.

Überschwemmungsgrenzen wurden auf der Basis der Modellergebnisse durch Überlagerung mit dem Geländehöhenmodell ermittelt und im ArcView Format präsentiert.

INHALT

1	EINLEITUNG	33
2	VORGEHEN UND METHODIK	33
2.1	Allgemeines	33
2.2	Grundlagen des digitalen Geländehöhenmodells (DGM)	34
2.3	Überschwemmungsgrenzenberechnung im digitalen Geländehöhenmodell	37
2.4	Grundlagen des hydrodynamischen Modells	37
3	BESCHREIBUNG DES MODELLGEBIETES	38
3.1	Allgemeines	38
3.2	Hydrologische und hydraulische Randbedingungen	39
3.3	Systemgeometrie der Aller	40
3.3.1	Querschnitte	40
3.3.2	Wehre	40
4	MODELLANNAHMEN	41
4.1	Allgemeines	41
4.2	Abflüsse an den Modellrändern	41
4.3	Seitliche Zuflüsse	41
4.4	Wasserstände an der unteren Modellgrenze	41
5	ERGEBNISSE DER HYDRONUMERISCHEN BERECHNUNGEN	42
5.1	Allgemein	42
5.2	Modellkalibrierung	42
5.2.1	Randbedingungen	42
5.2.2	Ergebnisse der Modellkalibrierung	42
5.2.3	Prognoserechnung für den HQ ₁₀₀ – Fall	44
6	DARSTELLUNG DER ÜBERSCHWEMMUNGSFLÄCHEN	44
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	45
8	SCHRIFTTUM	46

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1: Überfluteter Vorlandbereich der Unteraller im Februar 1994	33
Abb. 2-1: Ablaufdiagramm zur grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Ermittlung der Überschwemmungsflächen	33
Abb. 2-2: Prinzipskizze zur Begriffsdefinition	34
Abb. 2-3: Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Punkt- und Liniendaten im digitalen Geländehöhenmodell (DGM)	36
Abb. 2-4: Triangulation der Basishöhendaten (TIN)	36
Abb. 2-5: Exemplarische dreidimensionale Darstellung einer berechneten Überflutungsfläche	37
Abb. 3-1: Übersichtskarte des modellierten Gebietes	39
Abb. 3-2: Unterschrittene Abflüsse für den Pegel Marklendorf im 58-jährigen Mittel (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)	39
Abb. 3-3: Unterschrittene Abflüsse für den Pegel Celle im 58-jährigen Mittel (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)	40
Abb. 4-1: Wasserstands-/ Abflussbeziehung am Pegel Marklendorf	42
Abb. 5-1: Verteilung der Abflussmengendifferenz für die Modellkalibrierung	42
Abb. 5-2: Vergleich berechneter und gemessener Wasserspiegellagen im Rahmen der Modellkalibrierung	43
Abb. 5-3: Verteilung der Abflussmengendifferenz für den HQ ₁₀₀ -Fall	44
Abb. 5-4: Längsprofil der für den Prognosefall (HQ ₁₀₀) berechneten Wasserspiegellage	44
Abb. 6-1: Beispielhafte Konturliniendarstellung der Ergebnisse (ArcView)	44
Abb. 6-2: Überschwemmungsfläche mit Flachwasserbereichen im Stadtgebiet von Celle (TIN-Hintergrund, Flachwasserbereiche mit h < 0,5 m in hellgrau, Flussmitte gepunktet)	45

TAFELVERZEICHNIS

Tafel 2-1: Eigenschaften der ATKIS DGM 5 und 50	35
Tafel 3-1: Abflusskennwerte für den Pegel Celle (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)	39
Tafel 3-2: Abflusskennwerte für den Pegel Marklendorf (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)	39
Tafel 3-3: Abmessungen der modellierten Wehre	40
Tafel 4-1: Abflüsse an den Pegeln Celle und Marklendorf für Kalibrierung und Prognoserechnung	41
Tafel 4-2: Angenommene Zuflussverteilung für Modellkalibrierung und HQ ₁₀₀ -Fall	41

SYMBOLVERZEICHNIS

ATKIS	=	Amtlich topographisch kartographisches Informationssystem
A	=	Abflusswirksame Querschnittsfläche [L ²]
α_i	=	Koeffizient für die Geschwindigkeitsverteilung [-]
C	=	Querkontraktionskoeffizient [-]
DGK 5	=	Deutsche Grundkarte 1:5000, analog oder digital in Form von Rasterdaten
DGM 5	=	Digitales Geländehöhenmodell, Basisdaten teilweise aus DGK 5
g	=	Gravitationskonstante [L/T ²]
GIS	=	Geographisches Informationssystem
GRID	=	Gleichmäßiges Datenraster
h_e	=	Gesamtverlusthöhe [L]
h_i	=	Wasserspiegellage [L]
HQ	=	Höchster Abfluss im betrachteten Zeitraum [L ³ /T]
HW	=	Höchster Wasserstand im betrachteten Zeitraum [L]
K	=	conveyance", $\frac{Q}{I_b^{1/2}}$ [L ³ /T]
L	=	Gewichtete Fließlänge [L]
LGN	=	Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen
MHQ	=	Mittlerer höchster Abfluss im betrachteten Zeitraum [L ³ /T]
MHW	=	Mittlerer höchster Wasserstand im betrachteten Zeitraum [L]
MQ	=	Mittlerer Abfluss im betrachteten Zeitraum [L ³ /T]
MW	=	Mittlerer Wasserstand im betrachteten Zeitraum [L]
n	=	Rauhigkeitsparameter nach Manning [T/L ^{1/3}]
Q	=	Abfluss [L ³ /T]
\bar{S}_f	=	Mittlerer Reibungsverlustkoeffizient [-]
TIN	=	Triangulated Irregular Network
U	=	Hydraulischer Radius [L]
v_i	=	Strömungsgeschwindigkeit [L/T]
W	=	Wasserstand [L]

1 Einleitung

Die Abflussmengen der mitteleuropäischen Flüsse steigen während der vornehmlich in den Wintermonaten periodisch wiederkehrenden Hochwasserereignisse auf ein Vielfaches des im jährlichen Mittel auftretenden Abflusses an.

Die Abflussleistung, d.h. die bei maximal bordvollem Abfluss abführbare Wassermenge des Mittelwasserbettes, wird bei diesen Ereignissen im allgemeinen überschritten, so dass in Verbindung mit dem Wasserspiegelanstieg erhebliche Ausuferungen auftreten (Abb. 1-1), welche in Abhängigkeit vom Nutzungs- und Bebauungsgrad der überschwemmten Flächen, ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotential darstellen.



Abb. 1-1: Überfluteter Vorlandbereich der Unteraller im Februar 1994

Das oberirdische Einzugsgebiet der Aller von der Quelle bis zum Pegel Celle an der oberen Grenze des Modellgebietes beträgt 4374 km², der Direkteinzug im Modellgebiet 2925 km².

Es besteht daher eine Verpflichtung für den Hochwasserschutz (§73 des niedersächsischen Wassergesetzes, NWG), die Grenzen der Überflutung für definierte Hochwasserereignisse zu ermitteln, um diese als gesetzliches Überschwemmungsgebiet auszuweisen. In Niedersachsen konkretisiert ein Erlass des niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forst (MLF) aus dem Jahr 1982 das grundsätzliche Verfahren und gewährleistet, dass hierbei in Niedersachsen nach einheitlichen Kriterien verfahren wird.

2 Vorgehen und Methodik

2.1 Allgemeines

Die Grundlage der vorliegenden Untersuchung bildete das digitale Geländehöhenmodell des betrachteten Unterallergebietes. Es diente zunächst der Generierung der Topographie des Flussbettes und der Vor-

länder, welche Grundlage des mathematischen Strömungsmodells sind, sowie der späteren Berechnung von Überschwemmungsflächen anhand der ermittelten Wasserspiegellage.

Zur Ermittlung der Wasserspiegellage für den zu prognostizierenden HQ₁₀₀-Fall wurde das eindimensionale hydrodynamische Strömungsmodell HEC-RAS (US Army Corps of Engineers, 1998) eingesetzt. Die Berechnungen erfolgten unter Annahme stationärer Strömungszustände.

Das beschriebene Vorgehen ist flexibel hinsichtlich der zu verwertenden Datengrundlage wie auch der Ergebnisdarstellung. Insbesondere in Verbindung mit querschnittsgemittelten Modellen ermöglicht es eine umfassende Kontrolle der getroffenen Modellannahmen bereits im Anfangsstadium der Bearbeitung.

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Berechnung der Überschwemmungsflächen verdeutlicht Abb. 2-1.

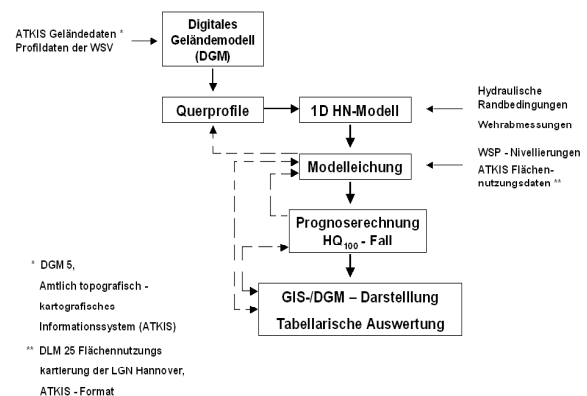


Abb. 2-1: Ablaufdiagramm zur grundsätzlichen Vorgehensweise bei der Ermittlung der Überschwemmungsflächen

Die Geländetopographie des Untersuchungsgebietes wird im eindimensionalen Modell durch repräsentative Querschnitte (cross sections) der Talau in diskreten Abständen gebildet. Die Querschnitte wurden aus dem digitalen Geländehöhenmodell abgeleitet.

Die Querschnittsmittlung der hydraulischen Parameter erfordert die Ausrichtung der Querprofile rechtwinklig zur angenommenen Strömungsrichtung. Dies bedingt u. a. abknickende Profile in Vorlandbereichen von Flusskrümmungen und Stromverzweigungen. Des weiteren variiert die Fließrichtung häufig mit der Überschwemmungshöhe und damit mit dem zu simulierenden Abfluss.

Querschnittsveränderungen wie Staustufen- und Brückenquerschnitte können einen Aufstau nach oberstrom sowie einen Absink unterhalb der jeweili-

gen Struktur verursachen. Diese Bestandteile der Modellgeometrie werden durch das digitale Geländehöhenmodell per Definition nicht aufgelöst und mussten manuell in die entsprechenden Querprofile eingearbeitet werden. Durch dichtes Gehölz bewachsene Flächen sind i.a. als nicht abflusswirksam anzusehen und müssen im mathematischen Modell explizit gekennzeichnet werden.

Infolge der o.g. Zwänge sollte das der Modellkalibrierung zugrundeliegende Hochwasser dem zu prognostizierenden hinsichtlich Abfluss, anzusetzenden Randbedingungen sowie den resultierenden Strömungszuständen vergleichbar sein (z.B. Wasserspiegellagen in beiden Fällen deutlich höher als bordvoll, gleiche Fließzustände usw.).

Der eingesetzte stationäre Rechenkern (HEC-RAS) löst querprofilweise iterativ die Energiebilanzgleichung für jedes Profil entgegen der Strömungsrichtung, wenn, wie im vorliegenden Fall, von strömendem Abfluss (subcritical discharge) im gesamten Modellgebiet ausgegangen werden kann.

In diesem Fall sind für das am unterstromigen Modellrand gelegene Profil Randbedingungen in Form von Wasserspiegellage und Abfluss zu spezifizieren. Für alle weiteren Profile ist die Abflussmenge vorzugeben.

Die schrittweise Berechnung wird entgegen der Fließrichtung durchgeführt. Im Verlauf der Modellkalibrierung erfolgt eine Anpassung der Rauigkeitsbeiwerte entgegen der Strömungsrichtung. Innerhalb eines Querschnittsprofils wird dabei zwischen linkem Vorland, Hauptquerschnitt und rechtem Vorland unterschieden.

Anhaltspunkte für die in Ansatz zu bringenden Rauigkeiten lieferten hierbei Flächennutzungskartierungen, Grundkarten sowie aus Ortsbegehungen gewonnene Informationen.

Das durch die hydronumerische Analyse gewonnene Wasserspiegelprofil in Längsrichtung diente als Eingangsgröße für die Bestimmung der Überschwemmungsgrenze im digitalen Geländehöhenmodell. Hierbei kam ein dreidimensionaler Terrainmodeller zum Einsatz, mit dessen Hilfe aus der Differenz von Geländehöhe und berechneter Wasserspiegellage die Grenzen des überschwemmten Bereiches ermittelt und in einem GIS-Format (ArcView Polygonshape) gespeichert werden können.

Die so erzeugten Daten können zur weiteren Auswertung und Bearbeitung mit allen GIS-basierten Datenquellen, wie beispielsweise digitalisierten DGK 5 – Kartierungen oder Luftbildern, überlagert werden.

Abb. 2-2 verdeutlicht die in den folgenden Kapiteln verwendeten Begriffe. Richtungsdefinitionen beziehen sich grundsätzlich auf den Blick in Fließrichtung.

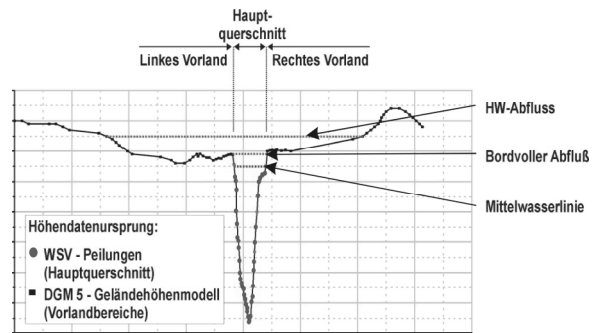


Abb. 2-2: Prinzipskizze zur Begriffsdefinition

2.2 Grundlagen des digitalen Geländehöhenmodells (DGM)

Digitalen Geländehöhenmodellen liegen georeferenzierte, d.h. mit ihrer genauen und eindeutigen Position und Ausrichtung im Raum verbundene, Höhendaten unterschiedlichen Ursprungs zugrunde. Im vorliegenden Fall basieren die Georeferenzen auf dem in der deutschen Landesvermessung üblichen Gauß-Krüger-System, welches die Position eines Objektes in einer rechtwinkligen Projektion mittels Rechts-, Hoch- und z-Wert eindeutig spezifiziert. Kern des vorliegenden Modells ist der Höhendaten-satz des Amtlichen Topographischen Kartographischen Informationssystems (ATKIS) DGM 5 der Qualitätsstufe 1 (DGM 5 (1), siehe nächste Seite).

Die niedersächsische Vermessungs- und Katasterverwaltung stellt im ATKIS-System zwei unterschiedlich genaue und verschieden strukturierte Digitale Geländehöhenmodelle bereit: das DGM 5, welches hohe Qualitätsansprüche erfüllt, und das geringeren Anforderungen genügende DGM 50. Der gitterförmige Aufbau beider Geländehöhen-Modelle ermöglicht eine einfache Datenorganisation.

Per Definition beschreibt das DGM 5 „...die Geländeoberfläche als Grenzfläche zwischen dem Erdkörper (inklusive Wasser) und der Atmosphäre durch die räumlichen Koordinaten (Rechts, Hoch, Höhe über NN) einer repräsentativen Menge von Geländepunkten. Damit werden Höheninformationen maßstabsunabhängig und datenverarbeitungsgerecht vorgehalten...“.

Das ATKIS – System stellt Höheninformationen für das gesamte Modellgebiet bereit, weist der Topographie innerhalb von Fluss- und Seenflächen jedoch die Höhe des Mittelwasserstandes zu.

Die Basis-Höhendaten zur Berechnung von ATKIS-DGM 5 Modellen werden gewonnen durch:

- Photogrammetrische, punktweise - digitale Höhenauswertung von Luftbildern sowie durch zusätzliche terrestrische Messungen in nicht einsehbaren Gebieten (z. B. Wald),
- Digitalisierung der analogen Höheninformationen (Höhenlinien/Höhenpunkte) vorhandener Deutscher Grundkarten 1:5 000 (DGK 5N) und
- Laserscanner-Verfahren.

Aus den Basis-Höhendaten wird unter Berücksichtigung geomorphologisch prägnanter Informationen wie Geripplinen und Geländekanten (Bruchkanten) das DGM 5 in einer standardmäßigen Gitterweite von 12,5 m x 12,5 m interpoliert. Die Geomorphologie-Informationen sind wesentliche Bestandteile des DGM 5. Als zusätzliche Informationen können für jeden Gitterpunkt die Richtung und Größe der Geländeneigung angegeben werden. Diese Größen können jedoch auch direkt aus dem Geländehöhenmodell abgeleitet werden.

Die DGM 5-Punkte sind im Gauß-Krüger-Koordinatensystem definiert und beziehen sich auf Normal Null (NN). Das DGM 5 approximiert die Geländeoberfläche in zwei Genauigkeitsstufen (LGN, 1998):

- Qualitätsstufe 1 – DGM 5 (1)
Durch die ausschließliche Verwendung hochqualitativer Basis-Höhendaten (entsprechend genau, zuverlässig und genügend dicht) beträgt der durchschnittliche Abstand der Gitterpunkte zur Geländeoberfläche weniger als 0,5 m.
- Qualitätsstufe 2 – DGM 5 (2)
In Gebieten, in denen die Erfassung hochqualitativer Basis-Höhendaten weder topographisch noch wirtschaftlich sinnvoll ist (kleinförmiges natürliches Gelände, wie z. B. Dünen; künstliche Geländeformen), beträgt der durchschnittliche Abstand der Gitterpunkte zur Geländeoberfläche 1,5 m.

Tafel 2-1 stellt die amtlichen DGM 5 und DGM 50 hinsichtlich der Grundgenauigkeiten vergleichend nebeneinander.

	DGM 5	DGM 50
Gitterweite	12,5 m X 12,5 m	50 m X 50 m / 3" geographisch
Durchschnittliche Höhengenaugigkeit	Stufe (1) < 0,5 m Stufe (2) < 1,5 m	Einige Meter Teilweise > 10 m
Bezugssysteme: - Lage - Höhe	Gauß – Krüger Normal Null (NN)	Gauß – Krüger / geographisch Normal Null (NN)
Zusätzliche Reliefinformationen	Neigung / geomorphologische Daten	—

Tafel 2-1: Eigenschaften der ATKIS DGM 5 und 50

Nach Auskunft der LGN Hannover liegen im Bereich der Unteraller Höhendaten mit einer hohen vertikalen Grundgenauigkeit < |0,25 m| vor.

Im Detail bestehen die Höheninformationen des ATKIS DGM aus den folgenden Objekten:

- Nivellementpunkte, die durch terrestrische, photogrammetrische oder Laserscannervermessung ermittelt werden und eine hohe Grundgenauigkeit aufweisen.
- Liniendaten mit Hochwert, wie Bruchkanten und Geripplinen. Diese Daten weisen eine vergleichbare Grundgenauigkeit auf, Geripplinen können jedoch auch durch Interpolation gebildet werden.
- Polygondaten mit oder ohne Höheninformation zur Kennzeichnung von Aussparungsflächen, innerhalb derer keine Höheninformationen vorliegen sowie keine Rasterdaten interpoliert werden.
- Punkteraster im 12,5 m X 12,5 m Abstand, die aus den vorgenannten Höhendaten interpoliert werden.

Für das vorliegende Modell wurden die Höheninformationen im Hauptquerschnitt der Aller aufgrund der o.g. Einschränkungen des ATKIS DGM 5 aus Querprofilpeilungen, welche in Abständen von 100 m bis 300 m vorliegen, ergänzt und mit den DGM 5-Daten verschnitten. Hierzu wurden zwischen die Querprofile eines am FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER vorgehaltenen eindimensionalen Modells der Allertopographie Längsprofile interpoliert und die resultierenden Daten an das DGM 5 Modell angeschlossen (Abb. 2-3 und 2-4).

Nach dem Verschneiden von ATKIS – und Peil – Daten wurden die Punkt- und Linieninformationen trianguliert, um stetig über das Modellgebiet verteilte Höheninformationen zu generieren. Die hierbei erzeugte Oberfläche wird als „Triangulated Irregular Network“ (TIN) bezeichnet, welches sich dadurch von einem Datenraster (GRID) unterscheidet, dass die zugrundeliegenden Höhendaten unregelmäßig über das Gebiet verteilt sein können. Dies ermöglicht die Einbeziehung beliebig über das Modellgebiet verteilter Linien- und Polygoninformationen in das Geländehöhenmodell.

Abb. 2-3 zeigt einen Detailausschnitt des modellierten Gebietes vor dem Hintergrund der entsprechenden DGM 5 – Karte. Die unterschiedlichen dem DGM zugrundeliegenden Höhendaten sind in dem vergrößerten Ausschnitt hervorgehoben. Die am unteren rechten Rand des Ausschnitts unregelmäßig in das 12,5 m X 12,5 m ATKIS - Raster eingefügte Punktelinie stammt aus einer Querprofilpeilung. Basierend auf diesen Informationen über den Gewässerquerschnitt wurden Punktdaten in Längsprofilrichtung zwischen Querprofilpeilungen interpoliert. Diese Profile legen den Böschungfußpunkt und die tiefste Stelle des Flussquerschnittes fest.

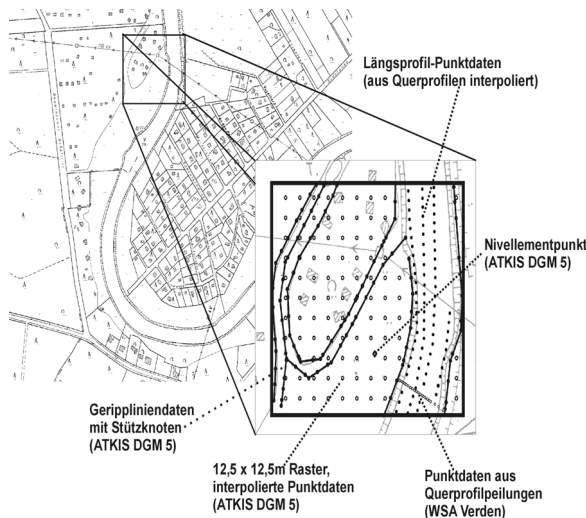


Abb. 2-3: Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Punktdaten im digitalen Geländehöhenmodell (DGM)

Die Liniendaten mit Stützpunkten sind Bestandteil des ATKIS-DGM 5 und dienen zur Abbildung von Gerippllinien, Bruchkanten und anderen Reliefmerkmalen.

Für die Triangulation von Punkt-, Linien- und Polygondaten zu einem TIN existiert eine festgelegte Rangfolge, die im Folgenden dargestellt ist:

1. Punktdaten mit z-Wert (Massenpunkte)
2. Liniendaten mit z-Wert (z.B. Bruchkanten, Gerippllinien)
3. Liniendaten ohne z-Wert
4. Polygondaten mit z-Wert (z.B. Aussparungsflächen)
5. Polygondaten ohne z-Wert (z. B. Aussparungsflächen, Gebietsumrandungen)

Entsprechend dieser Rangfolge werden bei der Erstellung eines TIN zunächst alle Massenpunkte trianguliert. Die resultierende Oberfläche enthält bereits stetig über die Fläche verfügbare Höheninformationen, kann jedoch keine Objekte auflösen, die kleiner als der mittlere Punktabstand in dem betrachteten Bereich sind.

Zu diesem Zweck werden in einem zweiten Schritt Bruchkanten und Gerippllinien dem Datensatz hinzugefügt (hervorgehobene Linien in Abb. 2-4).

Diese werden entsprechend ihrer Georeferenz im TIN platziert. Anschließend werden alle Triangulationsdreiecke, welche durch Bruchkanten geschnitten werden, gelöscht und die Triangulation unter Einbeziehung der hinzugekommenen Linienstützstellen derart aktualisiert, dass keine Schnittpunkte zwischen Bruchkanten und Triangulationsdreiecken existieren. Dieses Verfahren stellt sicher, dass in keinem Fall über eine Bruchkante hinweg trianguliert wird (Abb. 2-4).

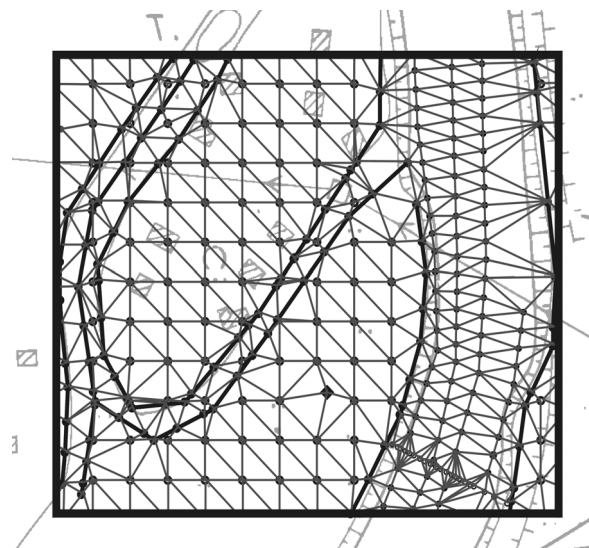


Abb. 2-4: Triangulation der Basishöhendaten (TIN)

Die Einbeziehung von Linieninformationen erlaubt eine sehr detaillierte Auflösung von Objekten, die kleiner als die mittlere Rasterauflösung sind. Zudem können mit ihrer Hilfe Unstetigkeiten in der Gelände-

oberfläche, wie Geländesprünge und Böschungen, korrekt erfasst werden.

In einem letzten Schritt werden Gebietsumrandungen (clip polygon) und Aussparungsflächen (erase polygon) dem TIN hinzugefügt.

2.3 Überschwemmungsgrenzenberechnung im digitalen Geländehöhenmodell

Die Berechnung der Überschwemmungsgrenzen erfolgt mit Hilfe eines dreidimensionalen Terrainmodellers. Das grundsätzliche Vorgehen gleicht dem zur Erstellung eines digitalen Geländehöhenmodells.

Als Eingangsdaten dienen neben dem bereits bestehenden DGM der Geländetopographie die Querprofile der hydrodynamischen Berechnung und das auf ihnen berechnete Längsprofil der Wasserspiegellage.

Jedes Querprofil ist im mathematischen Modell durch eine endliche Anzahl von Stützknoten definiert. Für diese ist neben der Sohlhöhe auch die berechnete Wasserspiegellage bekannt. Aufgrund der Querschnittsmittelung der hydraulischen Parameter werden alle Stützstellen eines Querprofils mit der gleichen berechneten Wasserspiegellage belegt.

Um diese in eine stetig über die von den Querprofilen aufgespannte Modellfläche verteilte Höheninformation umwandeln zu können, werden die Stützknoten der Querprofile trianguliert und der Wasserstand zwischen den Profilen linear interpoliert.

Die Profile selbst fungieren hierbei als Bruchkanten, wodurch sichergestellt ist, dass die auf dem jeweiligen Profil berechnete Wasserspiegellage auch im resultierenden TIN erhalten bleibt.

Dieses stellt eine entsprechend dem berechneten Spiegellinienprofil geneigte Ebene über dem Geländehöhenmodell dar.

Im Überschneidungsbereich der beiden TINs wird anschließend ein gleichmäßiges Punkteraster mit vorzugebender Ortsschrittweite generiert und für jeden Rasterpunkt die Differenz von Wasserspiegel- und Geländehöhe an der betreffenden Stelle berechnet.

Nach der Triangulation des Punkterasters können dann die Nass-Trocken-Grenze und Linien gleicher Überschwemmungshöhe abgeleitet werden.

Die Tatsache, dass die Berechnung der Überschwemmungsfläche für den gesamten Überschneidungsbereich von Geländehöhen- und Wasserspiegellagen-TIN erfolgt, bedingt, dass auch in Geländesenken außerhalb des durchströmten Bereiches der Flussaue positive Überflutungshöhen auftreten können. Diese außerhalb der Überschwemmungsflä-

che berechneten „Seen“ müssen durch eine manuelle Nachbearbeitung entfernt werden (Abb. 2-5).

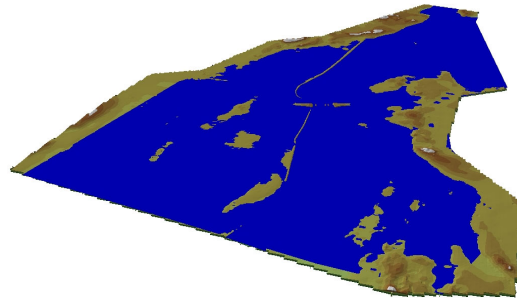


Abb. 2-5: Exemplarische dreidimensionale Darstellung einer berechneten Überflutungsfläche

Das beschriebene Vorgehen ermöglicht bei vertretbarem Rechenaufwand eine sehr präzise Konturlinienanpassung der Überschwemmungsgrenze.

2.4 Grundlagen des hydrodynamischen Modells

HEC-RAS löst iterativ die Energiebilanzgleichung des jeweils aktuellen Querprofils durch Berücksichtigung der Energieverluste in Form von Sohlreibung, Querkontraktion und -expansion des Fließquerschnittes bezogen auf das vorhergehende Profil.

Gl. 2-1 beschreibt die Energiebilanz im Fließquerschnitt (Bernoulli - Gleichung) unter Vernachlässigung des Druckterms. Das aktuell zu berechnende Querprofil ist durch den Index 2, das vorhergehende durch den Index 1 gekennzeichnet.

$$h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Gl. 2-1}$$

mit:

- h_i = Wasserspiegellage [m]
- α_i = Koeffizient für die Geschwindigkeitsverteilung [-]
- v_i = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
- h_e = Gesamtverlusthöhe [m]
- g = Gravitationskonstante [m/s²]

Der absolute Energieverlust wird durch den Term h_e gekennzeichnet, der in Gl. 2-2 näher spezifiziert ist. Die Gesamtverlusthöhe setzt sich dabei aus den mittleren Reibungsverlusten \bar{S}_f und den Energieverlusten infolge Querkontraktion/-expansion, charakterisiert durch den Koeffizienten C, zusammen.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left[\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right] \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit:

- C = Querkontraktionskoeffizient [-]
- L = Gewichtete Fließlänge [m]
- \bar{S}_f = Mittlerer Reibungsverlustkoeffizient [-]

Der Reibungsverlustkoeffizient S_f wird für jedes Querprofil entsprechend den Gl. 2-3 und 2-4 einzeln berechnet und der im Anschluss genannten Gl. 2-5 zu \bar{S}_f gemittelt.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad \text{Gl. 2-3}$$

mit:

- Q = Abfluss [m³/s]
- K = "conveyance", $\frac{Q}{I_b^{1/2}}$ [m³/s]

Die Sohlrauheit sowie die Auswirkungen von als nicht abflusswirksam gekennzeichneten Querschnittsteilen finden durch den Zwischenwert K (Conveyance) Eingang in den Verlustterm Gl. 2-4. Die Conveyance wird bei HEC-RAS für die Bereiche rechtes und linkes Vorland sowie den Hauptquerschnitt getrennt berechnet.

$$K = \frac{1.486}{n} A \cdot U^{2/3} \quad \text{Gl. 2-4}$$

mit:

- n = Rauheitsparam. nach Manning [s/m^{1/3}]
- A = Abflusswirksame Querschnittsfläche [m²]
- U = Hydraulischer Radius [m]

Im Falle nicht abflusswirksamer Querschnittsbereiche (ineffective flow areas) wird eine reduzierte Querschnittsfläche A bei gleichbleibendem hydraulischen Radius U in Ansatz gebracht. Bei vollständiger Sperrung einzelner Querschnittsbereiche (blocked obstruction) nimmt auch der hydraulische Radius zu.

Gl. 2-2 beschreibt die Verlusthöhe infolge Sohlreibung durch das Produkt aus gewichteter Fließlänge L und mittlerer Sohlreibung \bar{S}_f . Für die Mittelung der aus zwei aneinandergrenzenden Querprofilen berechneten Reibungsverlustkoeffizienten S_{f1} und S_{f2} können in HEC-RAS verschiedene Mittelungsverfahren in Ansatz gebracht werden.

Im vorliegenden Fall sind ausgeprägte Flusskrümmungen und variierende Profilstrecken zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde der in Gl. 2-5 beschriebene "average friction slope equation" - An-

satz gewählt. Quadratische Mittelungsverfahren tendieren im oben beschriebenen Fall zur Überschätzung der Verlusthöhen.

$$\bar{S}_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Der rechte Term der rechten Seite von Gl. 2-2 beschreibt die Energieverluste infolge von Querschnittsaufweitungen bzw. -einengungen. In derartigen Bereichen geht ein Großteil der kinetischen Energie des strömenden Fluids in Form turbulenter Dissipation verloren. Die Energiezehrung im Bereich von Aufweitungen (expansion loss) des Querschnitts ist dabei i.a. um das zwei- bis dreifache größer, als im Bereich von Einengungen (contraction loss).

HEC-RAS nimmt eine Aufweitung oder Einschnürung des Fließquerschnittes an, sobald die querschnittsgemittelte Geschwindigkeit gegenüber dem vorhergehenden Profil zu- bzw. abnimmt.

Der Koeffizient zur Beschreibung der Geschwindigkeitsverteilung α wird gemäß Gl. 2-6 entsprechend der Wichtung der Rauigkeitsverteilung über die Vorländer und den Hauptquerschnitt berechnet.

$$\alpha = \frac{A_t^2 \left(\frac{K_l^3}{A_l^2} + \frac{K_m^3}{A_m^2} + \frac{K_r^3}{A_r^2} \right)}{K_t^3} \quad \text{Gl. 2-6}$$

3 Beschreibung des Modellgebietes

3.1 Allgemeines

Das Modellgebiet umfasst den Bereich der Unteraller von Aller-km 0,0 in Celle bis Aller-km 38,3 in Markendorf. Das gewählte Modellgebiet ist ausreichend dimensioniert, um innerhalb des Aussagegebietes von einem vollständigen Abklingen der Randeinflüsse ausgehen zu können. Das Aussagegebiet reicht vom Pegel Celle (Aller-km 1,7) bis Thören (Aller-km 34,0) Für die Modellierung des Flusssystemes wurden neben dem Direktinzug die Zuflüsse aus Fuhse (Aller-km 3,1), Örtze (Aller-km 16,8) und Wietze (Aller-km 29,9) berücksichtigt. Die Unteraller weist im Modellbereich alle Merkmale eines alluvialen Flachlandflusses, wie starke Mäanderbildung und gemäßigtes Fließgefälle, auf.

Für den modellierten Flussabschnitt liegen in Abständen von 100 m bis 300 m insgesamt 202 Querprofilpeilungen des Mittelwasserquerschnittes vor.

Die offizielle Kilometrierung der Unteraller weicht aufgrund von Fehlstrecken z.T. erheblich von der tatsächlichen, d.h. der aus Addition der Fließlängen zwischen den Querprofilen ermittelten, ab. Aus die-

sem Grunde wurde im Rahmen dieser Ausarbeitung bei der Modellbildung und Ergebnisdarstellung zwischen der offiziellen Aller - Kilometrierung und der sog. Real - Kilometrierung unterschieden.

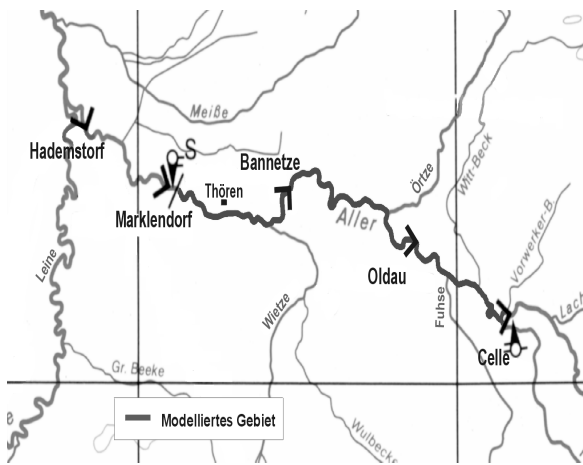


Abb. 3-1: Übersichtskarte des modellierten Gebietes

Abb. 3-1 zeigt schematisch das modellierte Gebiet. Es erstreckt sich vom Unterwasser der Wehre im Stadtgebiet Celle bis zum Oberwasser der Staustufe Marklendorf. Im Stadtgebiet Celle wurden sowohl der Nordarm, als auch die Mühlenaller modelliert.

Die Staustufen Oldau (Aller-km 14,6) und Bannetze (Aller-km 26,7) wurden unter der Annahme vollständiger Staulegung bei Hochwasser in die Modellierung einbezogen.

Für die hydronumerische Untersuchung wurde ein stationärer Fließzustand für ein aus langjährigen Datenreihen extrapoliertes Hochwasser mit 100jährige Wiederkehrwahrscheinlichkeit (HQ₁₀₀) in Ansatz gebracht.

3.2 Hydrologische und hydraulische Randbedingungen

Das oberirdische Einzugsgebiet der Aller von der Quelle bis zum Pegel Celle an der oberen Grenze des Modellgebietes beträgt 4374 km², der Direkteinzug im Modellgebiet etwa 2925 km².

Dieser setzt sich aus einer Grundfläche von etwa 725 km² für das Unterallergebiet von Celle bis Marklendorf und aus dem Direkteinzugsgebiet der einmündenden Flüsse Fuhse, Örtze und Wietze von etwa 2200 km² zusammen.

Die Scheitel der Hochwasserwellen aus den Nebenflüssen treten dabei nicht zeitgleich in die Aller ein, worin u.a. die oben beschriebene Instationarität von Abflussereignissen begründet liegt.

Pegel für das Unteraller-Gebiet existieren in Celle (Nähe Eisenbahnbrücke, Aller-km 1,73) und im Unterwasser der Staustufe Marklendorf (Aller-

km 39,31). Zusätzlich existieren Betriebspegel an den Staustufen Oldau, Bannetze und Marklendorf.

Die Abflüsse und Wasserstände (bezogen auf Pegelnullpunkt, PNP: NN + 31,80 m) im Modellgebiet zeigt für den Pegel Celle, bezogen auf 58 bzw. 10 Abflussjahre Tafel 3-1:

Kennwert	Q- / W - Wert
HQ _{Celle/Aller} , 1941-1998	342 m ³ /s (12.02.1946)
MHQ _{Celle/Aller} , 1941-1998	125 m ³ /s
MQ _{Celle/Aller} , 1941-1998	27,4 m ³ /s
HW _{Celle/Aller} , 1988-1997	4,90 m (31.01.94)
MHW _{Celle/Aller} , 1988-1997	3,87 m
MW _{Celle/Aller} , 1988-1997	1,84 m

Tafel 3-1: Abflusskennwerte für den Pegel Celle (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)

Die Abflüsse und Wasserstände bezogen auf den Pegelnullpunkt (PNP: NN + 23,01 m) des Pegels in Marklendorf verdeutlicht, bezogen auf 58 bzw. 10 Abflussjahre, Tafel 3-2.

Kennwert	Q- / W - Wert
HQ _{Marklendorf/Aller} , 1941-1998	400 m ³ /s (13.02.1946)
MHQ _{Marklendorf/Aller} , 1941-1998	169 m ³ /s
MQ _{Marklendorf/Aller} , 1941-1998	44,1 m ³ /s
HW _{Marklendorf/Aller} , 1988-1997	4,12 m (30.01.1994)
MHW _{Marklendorf/Aller} , 1988-1997	3,50 m
MW _{Marklendorf/Aller} , 1988-1997	1,72 m

Tafel 3-2: Abflusskennwerte für den Pegel Marklendorf (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)

Die Unterschreitungshäufigkeiten der Abflüsse an den Pegeln Celle und Marklendorf im langjährigen Mittel von 1941 bis 1998 verdeutlichen die Abb. 3-2 und 3-3.

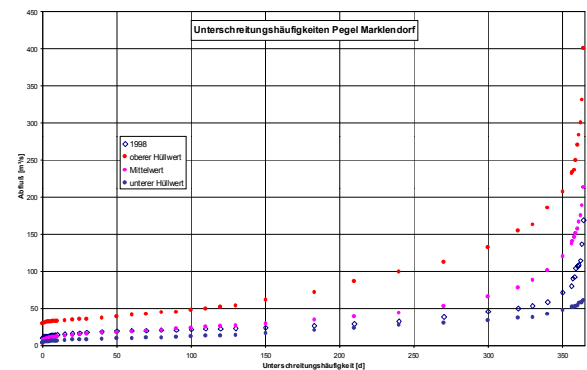


Abb. 3-2: Unterschrittene Abflüsse für den Pegel Marklendorf im 58-jährigen Mittel (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)

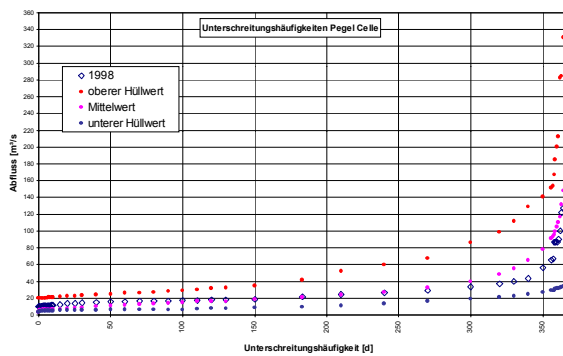


Abb. 3-3: Unterschrittene Abflüsse für den Pegel Celle im 58-jährigen Mittel (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998)

3.3 Systemgeometrie der Aller

3.3.1 Querschnitte

Die Unteraller wurde für das eindimensionale mathematische Modell durch 202 Querprofile diskretisiert. Diese wurden aus dem digitalen Geländehöhenmodell gewonnen. Die zugrundeliegenden Höhendaten stammen im Bereich des Mittelwasserquerschnittes aus Querprofilpeilungen und in den Vorlandbereichen aus dem ATKIS DGM 5 (1).

Die Position der einzelnen Querprofile innerhalb des Längsprofils der Modelltopographie war durch die Lage der Querprofilpeilungen vorgegeben. Die Profile selbst wurden direkt aus dem digitalen Geländehöhenmodell extrahiert.

In Bereichen erheblicher Querschnittseinengungen bzw. –aufweitungen wurden aus numerischen Gründen zusätzliche Querprofile mit interpoliertem Mittelwasserbett in die Berechnung aufgenommen. Dies betraf die Eisenbahnbrücke in Celle (Aller-km 1,7), die Brücke am Wilhelm-Heinichen-Ring in Celle (Aller - km 3,4), die L298 Brücke in Winsen (Aller-km 18,7), die K65 Brücke zwischen Jeversen und Thören (Aller-km 32,2) sowie die Staustufen Oldau und Bannetze.

Für die Eingangsgeometrie des hydronumerischen Modells und die Berechnung der Überschwemmungsflächen wurden die Geländeinformationen des DGM 5 in Details aktualisiert bzw. ergänzt:

- Im Bereich der Eisenbahnbrücke in Celle (Aller-km 1,7) wurde die Modelltopographie um die Veränderungen beim Neubau der Eisenbahnbrücke (Bahn-km 44,25 der Strecke Lehrte – Cuxhaven) aktualisiert. Berücksichtigt wurden die neue Einfeldbrücke, die Entfernung der alten Pfeiler, sowie die Absenkung des unmittelbaren Vorlandbereiches auf 34,70 mNN.

- Das Gelände der Justizvollzugsanstalt Celle (Aller-km 1,65) wurde aufgrund seiner Lage im Hochwasserquerschnitt der Aller berücksichtigt.
- Für den Verlauf der Bahntrasse der Strecke Lehrte – Cuxhaven liefert das DGM 5 im Stadtgebiet Celle lediglich Aussparungsflächen ohne Höhenangabe. Diese Bereiche wurden für die Modellrechnungen unter Annahme von Überschwemmungsfreiheit in das DGM integriert. Gleiches gilt für den Bereich der Kläranlage der Stadt Celle (Aller-km 2,5).
- Im Bereich der Allerbrücke der K65 zwischen Jeversen und Thören (Aller-km 32,3) wurde die Topographie aufgrund widersprüchlicher Aussagen zwischen DGM 5 und DGK 5 anhand von Planungsunterlagen des Landkreises Celle modifiziert. Dies betraf die lichte Öffnungsweite der Brückenöffnung, die Art und Anzahl der Pfeiler sowie die Höhenknoten der anschließenden Straßentrassen.

3.3.2 Wehre

Die Modellierung berücksichtigt die Staustufen Oldau (Aller-km 14,69) und Bannetze (Aller-km 26,68). Die Staustufen in Celle und Marklendorf liegen außerhalb des Modellgebietes, welches im Unter- bzw. Oberwasser dieser Bauwerke beginnt bzw. endet.

Bauwerke werden im DGM 5 per Definition nicht aufgelöst, so dass die Wehre anhand von Konstruktionszeichnungen in die entsprechenden Querprofile des hydronumerischen Strömungsmodelles eingearbeitet wurden. Sowohl für die Modellkalibrierung, als auch für die Untersuchung des HQ₁₀₀-Falles wurde vollständige Staulegung der Wehrverschlüsse angenommen.

Die Bauwerksgeometrien der Staustufen sind nicht Bestandteil des erstellten DGM.

Die für die Simulation maßgeblichen Abmessungen dieser Staustufen sind in Tafel 3-3 zusammengestellt.

Stau- stufe	Aller- km	Real- km	Stau- ziel [mNN]	Lichtes Öffnungs- maß [m]	Sohlhö- he [mNN]
Oldau	14,69	13,68	32,83	4 X 3,55 1 X 15	29,00
Ban- netze	26,68	25,54	29,62	5 X 3,65 1 X 18,00	26,5 26,65

Tafel 3-3: Abmessungen der modellierten Wehre

4 Modellannahmen

4.1 Allgemeines

Die für die eindimensionale, stationäre Modellierung eines Abflussereignisses zu spezifizierenden Randbedingungen sind die Wasserspiegellage am unterstromigen Querprofil und die Abflussmenge jedes einzelnen Profils. Des weiteren ist an Stromteilungen die prozentuale Abflussverteilung vorzugeben. Für weitere, in numerischer Hinsicht zu spezifizierende Parameter sei der Leser auf Kapitel 2.4 verwiesen.

Informationen über Abflussmengen im Modellgebiet existieren nur an den Modellrändern, namentlich den Pegeln Celle (Aller-km 1,7) und Marklendorf (Aller-km 39,31). Für die Verteilung der Differenz dieser Abflüsse kam das in Kapitel 4.3 beschriebene Verteilungsschema zum Einsatz.

4.2 Abflüsse an den Modellrändern

Die der Modellkalibrierung zugrundeliegenden Abflussmengen wurden dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, 1998) entnommen. Zur Modellkalibrierung wurde ein Hochwasserereignis vom 01.02.1994 herangezogen, für das eine aufgemessene Wasserspiegelfixierung existiert.

Der für den HQ₁₀₀-Fall angenommene Abfluss an den Pegeln Celle und Marklendorf wurde entsprechend Tafel 4-1 festgelegt. Die für den Pegel Celle angenommene Abflussmenge entspricht derjenigen, welche einem bereits bestehenden Strömungsmodell zur Simulation des HQ₁₀₀-Falles für das Celler Stadtgebiet zugrunde liegt.

Tafel 4-1 verdeutlicht die den numerischen Berechnungen zugrundeliegenden Abflüsse an den Modellrändern.

Rechnung / Datum	Pegel Celle [m³/s]	Pegel Marklendorf [m³/s]
Kalibrierung Q _{01.02.1994}	171	256
Prognoserechnung HQ ₁₀₀	315	428

Tafel 4-1: Abflüsse an den Pegeln Celle und Marklendorf für Kalibrierung und Prognoserechnung

4.3 Seitliche Zuflüsse

Für die Verteilung der Abflussmengendifferenz zwischen den Pegeln Celle und Marklendorf wurde auf ein Wichtungsschema zurückgegriffen, welches bereits in einem 1994 am FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER betriebenen Modell zum Einsatz

kam. Dieses basiert, unter Annahme einer gleichmäßigen Abflusspende im gesamten Einzugsgebiet, auf einer Verteilung der Abflussmengendifferenz zwischen den o.g. Pegeln entsprechend der relativen Einzugsgebietsflächen einzelner Flussabschnitte und Zuflüsse (Tafel 4-2).

	Aller-km	Real-km	Einzugsgebiet	01.02.1994	HQ ₁₀₀
			[km²]	[m³/s]	[m³/s]
Celle, UW Wehr Nordarm	0,00	0,00		154,00	283,50
Celle, UW Wehr Mühlenaller	0,00 ¹	0,00		17,00	31,5
Celle, Pegel	1,70	1,70		171,00	315,00
Fuhse	3,07	2,86	917,5	26,68	35,46
Direkteinzug bis km 16,78	16,78	15,70	586,5	17,05	22,67
Örtze	16,78	15,70	767,1	22,30	29,65
Direkteinzug km 16,78 bis km 29,85	29,85	28,66	79,53	2,31	3,07
Wietze	29,85	28,66	515,4	14,99	19,92
Direkteinzug km 29,85 bis km 38,3	38,20	36,89	57,6	1,67	2,22
Marklendorf	38,20	36,89		256	428,00

Tafel 4-2: Angenommene Zuflussverteilung für Modellkalibrierung und HQ₁₀₀-Fall

Am Zusammenfluss von Mühlenaller und Nordarm im Stadtgebiet Celle ist eine Abflussmengenverteilung von 90 % im Nordarm und 10 % in der Mühlenaller in Ansatz gebracht.

4.4 Wasserstände an der unteren Modellgrenze

Der für die Modellkalibrierung angenommene Wasserstand an der unteren Modellgrenze ist im Zuge einer Wasserspiegelfixierung am 01.02.1994 aufgemessen worden und beträgt 27,32 mNN.

Der höchste jemals gemessene Abfluss am Pegel Marklendorf ist datiert auf den 13.02.1946. Er beträgt 400 m³/s und hat eine Wasserspiegellage von 27,34 mNN zur Folge.

Für den zu prognostizierenden HQ₁₀₀-Fall wurde eine Abflusskurve für den Pegel Marklendorf aus Datenreihen des Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbu-

¹ Mühlenaller - Kilometrierung

ches ermittelt und für den HQ_{100} -Abfluss von $428 \text{ m}^3/\text{s}$ extrapoliert.

Abb. 4-1 zeigt die der Extrapolation zugrundeliegende Abflusskurve am Pegel Marklendorf. Die zur Simulation des HQ_{100} -Falles in Ansatz gebrachte Wasserspiegellage beträgt $27,40 \text{ mNN}$.

Bei Abflüssen oberhalb $250 \text{ m}^3/\text{s}$ tritt aufgrund des auf großer Breite abflusswirksamen Querschnittes nur noch ein unwesentlicher Anstieg der Wasserspiegellage ein.

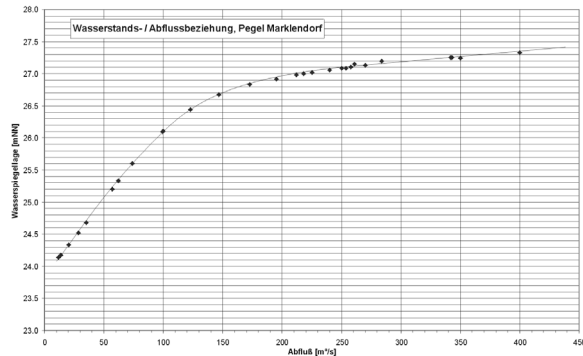


Abb. 4-1: Wasserstands-/ Abflussbeziehung am Pegel Marklendorf

5 Ergebnisse der hydronumerischen Berechnungen

5.1 Allgemein

Die Fließzustände im Modellgebiet sind durchgehend als strömend (subcritical) einzustufen. Das eingesetzte Modell berechnet in diesem Fall entgegen der Strömungsrichtung querprofilweise die Wasserspiegellage. Als Eichparameter dient die Sohlreibung in Form der Manning – Zahl n .

Die Modellkalibrierung erfolgte am unteren Modellrand in Marklendorf beginnend gegen die Fließrichtung durch Variation der Rauigkeitsparameter für den Hauptquerschnitt sowie das linke und rechte Vorland. In einer ersten Schätzung wurden diese durch Werte, die anhand der Flächennutzungskartierung des digitalen Landschaftsmodelles DLM 25 ermittelt wurden, angenommen.

Durch die Berechnung von Überschwemmungsflächen im DGM anhand von Zwischenergebnissen wurden nicht abflusswirksame Querschnittsbereiche ermittelt und im hydronumerischen Modell als solche berücksichtigt.

Eine detaillierte Anpassung der Sohlrauigkeiten anhand von DGK 5 – Kartierungen und Photos erfolgte nach Vergleich der berechneten und eingemessenen Wasserspiegellagen. Die angestrebte Übereinstimmung (Eichgenauigkeit) zwischen Rechnung und Messung betrug $\pm 3 \text{ cm}$.

5.2 Modellkalibrierung

5.2.1 Randbedingungen

Zum Soll/Ist – Vergleich von berechneter und gemessener Wasserspiegellage wurde das in Kapitel 4 beschriebene Hochwasserereignis vom 01.02.1994 herangezogen. Die Messpunkte der Wasserspiegel fixierung sind in Abständen von etwa 1 km angeordnet und liegen für beide Ufer vor. Zwischenpunkte wurden linear interpoliert. Falls in Kurvenbereichen infolge von Sekundärströmungen abweichende Wasserspiegellagen am linken und rechten Ufer auftraten, wurde der geometrische Mittelwert angesetzt.

Randbedingungen, wie die Wasserspiegellage am unteren Modellrand und die Zuflussverteilung über das Längsprofil, sind entsprechend der in Kapitel 4 vorgestellten Modellannahmen in Ansatz gebracht.

Abb. 5-2 zeigt die am 01.02.1994 aufgemessene Wasserspiegellage und die Sohltopographie im Längsprofil. Die in Tafel 4-2 beschriebene Zuflussverteilung über das Längsprofil veranschaulicht Abb. 5-1.

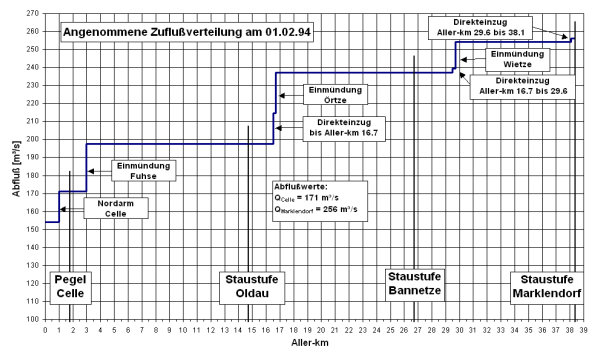


Abb. 5-1: Verteilung der Abflussmehrdifferenz für die Modellkalibrierung

5.2.2 Ergebnisse der Modellkalibrierung

Das kalibrierte Modell reproduziert die vorgegebenen Wasserstände mit der geforderten Genauigkeit. Abb. 5-2 verdeutlicht graphisch den Vergleich zwischen gemessener und berechneter Wasserspiegellage für die Modellkalibrierung.

Die berechneten Wasserstände an den eingemessenen Hochwassermarken stellen mit der erzielten Genauigkeit eine gute Näherung für die tatsächlichen Wasserstände im Untersuchungsgebiet dar.

Die Eichgenauigkeit, ausgedrückt als Abweichung zwischen Referenzwasserständen an den eingemessenen Hochwassermarken und berechneten Wasserständen, liegt damit innerhalb der mit der verfügbaren Datengrundlage realisierbaren Genauigkeit. Sie ist für die Untersuchung der Fragestellung ausreichend.

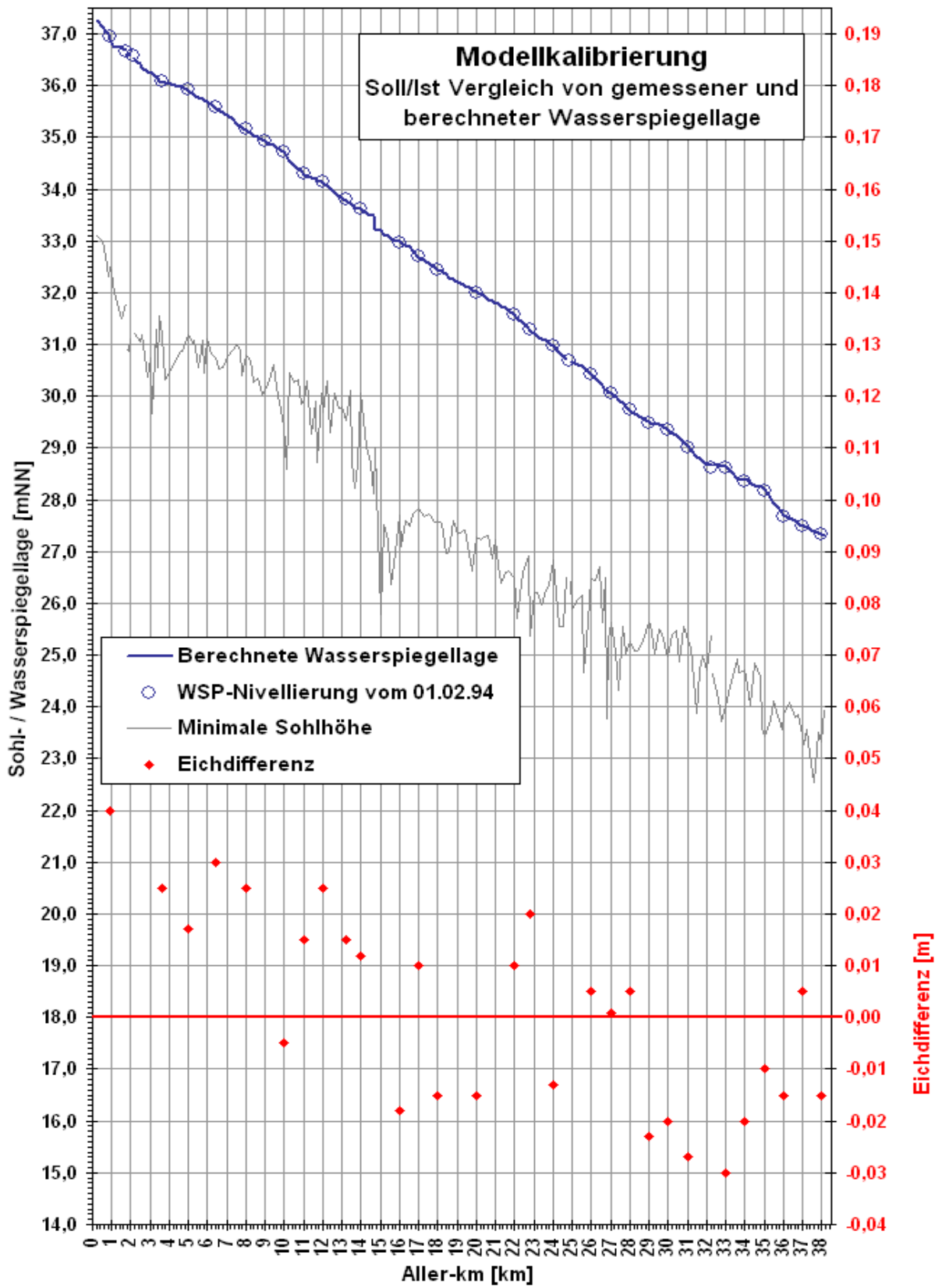


Abb. 5-2: Vergleich berechneter und gemessener Wasserspiegellagen im Rahmen der Modellkalibrierung

5.2.3 Prognoserechnung für den HQ₁₀₀ – Fall

Das zu untersuchende Hochwasser (HQ₁₀₀) ist bezüglich Abfluss, anzusetzenden Randbedingungen und den auftretenden Strömungszuständen mit dem innerhalb der Modellkalibrierung untersuchten Hochwasser vergleichbar.

Für den HQ₁₀₀-Abfluss wurde ebenfalls vollständige Staulegung und durchgehend strömender Abfluss angenommen. Die Berechnungen bestätigen diese Annahmen.

Die Wasserspiegellänge am unteren Modellrand (Kapitel 4.4) beträgt 27,40 mNN. Da diese Wasserspiegellänge eine auf der Extrapolation von statistischen Daten beruhende Annahme ist, wurde der Abstand von unterer Modell- und Aussagegebietsgrenze so groß gewählt, dass die Beeinflussung der Wasserspiegellänge im Aussagegebiet vernachlässigbar klein wird.

Die Abflussmengen betragen 315 m³/s am Pegel Celle (Aller-km 1,7) und 428 m³/s am Pegel Markkendorf (Aller-km 38,3). Analog zur Modellkalibrierung wurde die Differenz dieser Mengen entsprechend dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Wichtungsschema in Form von Zuflüssen über das Längsprofil verteilt. Abb. 5-3 zeigt die dem HQ₁₀₀-Fall zugrundeliegende Zuflussverteilung.

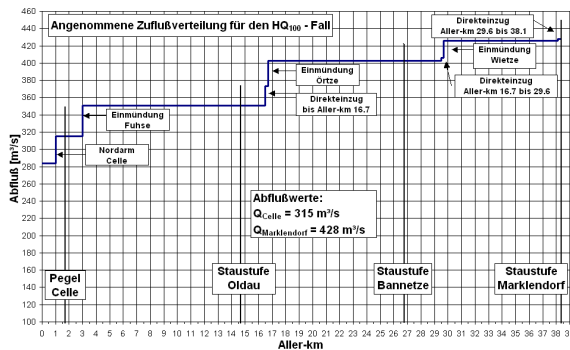


Abb. 5-3: Verteilung der Abflussmengen für den HQ₁₀₀-Fall

Die unter den o.g. Randbedingungen berechnete Wasserspiegellänge verdeutlicht Abb. 5-4. Die Berechnungen zeigten, dass die Wasserspiegellänge in der Mühlentaler im Celler Stadtgebiet aus dem Einstau des Nordarms resultiert. Eine zu Vergleichszwecken herangezogene Konturliniendarstellung der Wasserspiegellänge eines zweidimensionalen Strömungsmodells der Stadt Celle bestätigt dies.

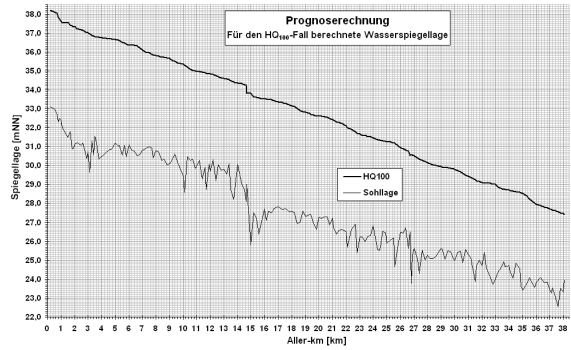


Abb. 5-4: Längsprofil der für den Prognosefall (HQ₁₀₀) berechneten Wasserspiegellänge

6 Darstellung der Überschwemmungsflächen

Das in Abb. 6-1 dargestellte Längsprofil bildete die Grundlage zur Ableitung der Überschwemmungsflächen. Die Ergebnisdarstellung erfolgte digital in Form von ArcView – Shapedateien. Die Ortsschrittweite zur Berechnung der Überschwemmungsflächen betrug 10 m. Diese umfasst die folgenden Datensätze:

- Umrissdarstellung der gesamten Überschwemmungsfläche,
- Umrissdarstellung der weniger als 0,5 m hoch überfluteten Flächen und
- Konturliniendarstellung der Überschwemmungshöhe mit 0,25 m Intervallen.

Für das dieser Darstellung zugrundeliegende Längsprofil sei auf Kapitel 5.3 verwiesen.

Abb. 6-1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der berechneten Daten. Es handelt sich um eine Konturliniendarstellung der Überschwemmungshöhe mit einem Intervall von 0,25 m, welche mit dem entsprechenden Ausschnitt einer Rasterkarte hinterlegt ist.

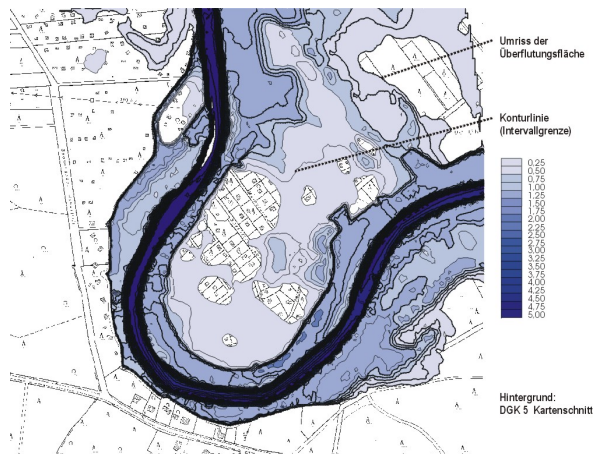


Abb. 6-1: Beispielhafte Konturliniendarstellung der Ergebnisse (ArcView)

Analog sind auch Darstellungen auf Basis des TIN (Abb. 6-2) oder vor dem Hintergrund entzerrter und georeferenzierter Luftaufnahmen des betrachteten Gebietes denkbar. Die maßstabsunabhängige Vorkhaltung der Ergebnisdaten ermöglicht im beschriebenen Verfahren eine sehr gute Anpassung der Darstellung an den jeweiligen Bedarf.

Abb. 6-2 zeigt einen Ausschnitt des Celler Stadtgebietes als TIN in Überlagerung mit der berechneten Überschwemmungsfläche. Zur groben Abgrenzung sind Bereiche mit einer Überschwemmungshöhe von weniger als 0,5 m hellgrau hervorgehoben.

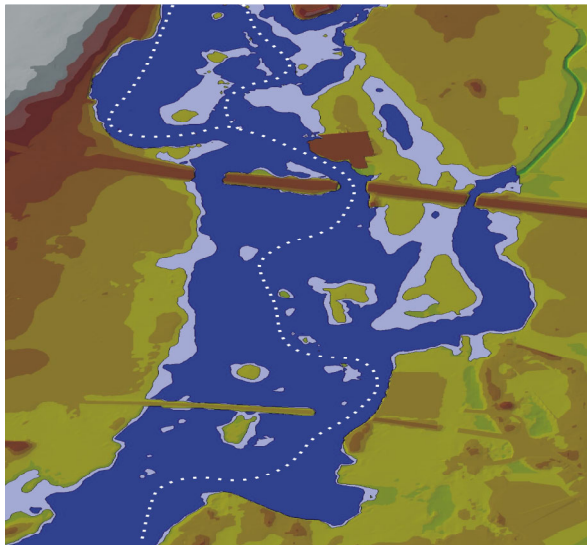


Abb. 6-2: Überschwemmungsfläche mit Flachwasserbereichen im Stadtgebiet von Celle (TIN-Hintergrund, Flachwasserbereiche mit $h < 0,5$ m in hellgrau, Flussmitte gepunktet)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Am Beispiel der Unteraller wird die GIS-basierte Berechnung und Ausweisung von Überschwemmungsgrenzen für Hochwasserereignisse beschrieben.

Das modellierte Gebiet erstreckt sich vom Unterwasser des Wehres im Stadtgebiet Celle (Aller-km 0,0) bis in das Oberwasser der Staustufe Marklendorf (Aller-km 38,3), das Aussagegebiet deckt den Bereich von Celle bis Thören (Aller-km 34,0) ab. Charakteristisch für das Modellgebiet ist ein breites Flusstal mit geringem Gefälle, das von der in diesem Bereich stark mäandrierenden Unteraller durchflossen wird.

Basis der Geometrieerstellung für das eindimensionale Strömungsmodell, wie auch der Berechnung und Darstellung von Überschwemmungsflächen, war ein digitales Geländehöhenmodell. Dieses wurde am FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER auf der Grundlage von ATKIS-Daten erstellt und durch Quer-

profilpeilungen im Mittelwasserquerschnitt der Aller ergänzt. Weitere Detailanpassungen in abflusskritischen Bereichen wurden anhand von Planungsunterlagen vorgenommen.

Das hydronumerische Strömungsmodell besteht aus 202 repräsentativen Querschnitten durch das Modellgebiet. Den Berechnungen liegt die Annahme stationären Abflusses zugrunde.

Die im Modellgebiet befindlichen Staustufen Oldau und Bannetze wurden für Hochwasser unter vollständiger Staulegung in die hydronumerische Modellierung mit einbezogen.

Die Kalibrierung des Strömungsmodells wurde anhand des Hochwasserereignisses vom 01.02.1994, für das eine aufgemessene Wasserspiegelfixierung sowie Abflussmengen an den Modellgrenzen vorliegen, in Form einer Variation der rechnerischen Sohlrauigkeiten (Eichparameter) durchgeführt.

Die hydraulischen Randbedingungen für das zu prognostizierende Ereignis entsprechen einem Hochwasser mit 100jähriger Wiederkehrwahrscheinlichkeit (HQ_{100}). Die Wasserspiegellage am unteren Modellrand wurde hierbei durch die Extrapolation der Abflussganglinie des Pegels Marklendorf ermittelt.

Die Berechnung und Darstellung der Überschwemmungsgrenzen basierte auf dem berechneten Wasserspiegellängsprofil des zu prognostizierenden HQ_{100} -Ereignisses. Hierbei wurde durch Triangulation eine entsprechend dem berechneten Längsprofil geneigte Fläche im digitalen Geländehöhenmodell aufgespannt und das Randpolygon für die Schnittlinie mit der Geländeoberfläche ermittelt. Entsprechend dieser Vorgehensweise wurden Konturlinien für die Überschwemmungshöhe im 0,25 m Intervall berechnet.

Das eingesetzte Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die im Zuge der eindimensionalen Modellbildung getroffenen Annahmen anhand der Überschwemmungsfläche umfassend und direkt überprüft und ggf. variiert werden können. Dies kommt insbesondere den mit hohem Schließungsaufwand verbundenen querschnittsgemittelten Modellen zugute, jedoch legen die umfangreichen Visualisierungs- und Kontrollmöglichkeiten der Kombination aus Geoinformationssystem und digitalem Geländehöhenmodell den beschriebenen Einsatz auch in Verbindung mit zweidimensionalen Modellen nahe. Durch den frei wählbaren Grad der Auflösung, mit dem die Überschwemmungsgrenze an die Geländekonturen angepasst wird, kann die Darstellung einer zweidimensional berechneten Wasserspiegellage von der räumlichen Diskretisierung des numerischen Modells entkoppelt und hierbei wesentlich verbessert werden.

Ein weiterer Vorteil liegt in der georeferenzierten und maßstabsunabhängigen Vorhaltung der Ergebnisse, die vielfältige Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung bzw. Weitergabe derselben ermöglicht.

Auf Grundlage der gewählten Methodik (Kopplung eines eindimensionalen HN-Modells mit einem digitalen Geländehöhenmodell) konnten für den Bereich der Unteraller die Überschwemmungsgrenzen mit einer Genauigkeit, welche kleiner als die mittlere Geländerauhigkeit ist, berechnet werden.

8 Schrifttum

Niedersächsisches Landesamt für Ökologie: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch - Weser-Emsgebiet - Abflussjahr 1998. Hildesheim, 1999

US Army Corps of Engineers: HEC-RAS Manual -Version 2.2. Vicksburg, 1998