



3D-HN-Berechnungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit des Kleebachs im Bereich der Brücke Untergasse



Auftraggeber:

Mittelhessische Wasserbetriebe, Alicenstraße 33, 35390 Gießen

Bearbeitung:

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft Universität Kassel

Martin Klein, M. Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Kassel, September 2023

BEARBEITUNG:



Universität Kassel

Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Kurt-Wolters-Straße 3

34125 Kassel

Internet: http://www.uni-kassel.de/go/wasserbau

Tel.: +49 (0)561 804-2749

Fax: +49 (0)561 804-3952

Inhaltsverzeichnis

A	Abbildungsverzeichnis				
1	ab	elle	lenverzeichnis	III	
1		Ve	eranlassung und Aufgabenstellung	1	
2	1	Da	atengrundlagen und verwendete Unterlagen	4	
3)	Ve	/ermessungsarbeiten	5	
	3.	1	Anlass und Vorgehensweise	5	
	3.	2	Ergebnis der Vermessungsarbeiten	6	
4		Ну	lydrodynamisch-numerische Modellierung	7	
	4.	1	Grundlagen der 3D-HN-Modellierung	7	
	4.	2	Untersuchungsziel und Vorgehensweise	8	
	4.	3	Modellerstellung	8	
		4.3	.3.1 Erstellung der Geländetopografie	8	
		4.3	.3.2 Erstellung der Bauwerkskomponenten	11	
		4.3	.3.3 Erstellung der 3D-HN-Modelle	11	
		4.3	.3.4 Rand- und Anfangsbedingungen	13	
5	,	Erg	Ergebnisse der 3D-HN-Untersuchung	15	
6		Zu	usammenfassung und Fazit	21	
7	,	Qu	Quellen und Literatur	23	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Luftbild des Kleebachs im Bereich Allendorf an der Lahn Brücke Untergasse (Orthofoto: [2])	1
Abb. 1.2:	Sedimentablagerungen vor der Gabionenwand oberstrom der Brücke Untergasse (mit Fließpfeil in blau), Ortsbesichtigung vom 24.05.2022	2
Abb. 1.3:	Sedimentablagerungen oberstrom (linkes Bild) und unter der Brücke Untergasse (rechtes Bild) (mit Fließpfeil in blau), Ortsbesichtigung vom 14.07.2022	2
Abb. 3.1:	ADCP-Boot mit 360 Grad-Prisma unterstrom der Brücke am 18.08.2022	6
Abb. 3.2:	Darstellung der Vermessungspunkte aus Tachymeter- und ADCP- Vermessung (Hintergrundkarten: [2])	6
Abb. 4.1:	Darstellung des auf Basis der Vermessungsdaten erstellten Gewässerschlauchs	9
Abb. 4.2:	Darstellung des DGMs für den Istzustand (Höhe in [mNN])	9
Abb. 4.3:	DGMs des Istzustandes und des Ausräumzustandes mit Verortung zweier Querprofile (QP1 und QP2).	10
Abb. 4.4:	Querprofile im Ausräumbereich, Vergleich Ist- und Ausräumzustand	10
Abb. 4.5:	Erstellte 3D-Bauwerksmodelle im Untersuchungsgebiet (grün)	11
Abb. 4.6:	Schematischer Aufbau der Modellkette des 3D-HN-Modells	. 12
Abb. 4.7:	Gesamtansicht des 3D-HN-Modellgebiets mit Ausmaß und Lage der Teilmodelle (Hintergrundkarte: [2])	13
Abb. 4.8:	Wasserstands-Abflussbeziehung an Fkm 2,577 (nach [6]) mit interpoliertem Wasserstand für den Untersuchungsabfluss	14
Abb. 4.9:	Übersicht der Randbedingungen der 3D-HN-Teilmodelle für den Untersuchungsabfluss $Q=27.5~\text{m}^3/\text{s}$ (blau: Initial- & Gesamtmodell, rot: Detailmodell)	14
Abb. 5.1:	Längsschnitt des Kleebachs im Nahbereich der Brücke	
Abb. 5.2:	Wasserspiegellängsschnitt des Kleebachs im Brückenbereich mit Differenzendarstellung für den Ist- und den Ausräumzustand für $Q=27,5\ m^3/s$	16
Abb. 5.3:	Wasserspiegellängsschnitt des Kleebachs im Brückenbereich mit Differenzendarstellung für den Ist- und den Ausräumzustand für $HQ_{10} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$	
Abb. 5.4:	Vergleich der Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung im Nahbereich der Brücke Untergasse und Verortung zweier Querprofile, berechnet mit dem Detailmodell	
Abb. 5.5:	Querprofile mit Geschwindigkeitsverteilung sowie Teilabflüssen im	3
	Nahbereich der Brücke Untergasse, berechnet mit dem Detailmodell	19

Abb. 5.6:	Dreidimensionale Stromlinien mit Fließgeschwindigkeiten im Nahbereich der Brücke Untergasse, berechnet mit dem Detailmodell			
	Tabellenverzeichnis			
Tab. 4.1:	Diskretisierung und Anzahl der Berechnungszellen im jeweiligen Teilmodell	12		

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Südwestlich der Kernstadt von Gießen fließt der im Hintertaunus entspringende Kleebach durch den Stadtteil Allendorf an der Lahn (nachfolgend Allendorf), bevor er wenige Kilometer stromab in die Lahn mündet. Bei Flusskilometer 2,8 ist das Auslassbauwerk des oberstrom der Ortschaft Allendorf gelegenen Rückhalteraums Gießen Allendorf angeordnet. Der Rückhalteraum ist laut Planunterlagen zur Kontrolle einer 75-jährlichen Hochwasserwelle bei einer maximalen Regelabgabe von Q = 30 m³/s ausgelegt [1]. Bei Flusskilometer 2,6, rund 200 m stromab des Sperrbauwerks des Rückhalteraums, wird der Kleebach innerhalb der Ortschaft Allendorf durch die Straßenbrücke der Untergasse gequert. Unmittelbar unterstrom der Brücke zweigt linksseitig aus dem Kleebach, kontrolliert durch ein Schütz, der Mühlgraben ab. Der Kleebach wird außerdem von einem rechtsseitigen Streichwehr rückgestaut, über das der verbleibende Abfluss des Kleebachs abfließt. Der Wehrbereich wird im Hochwasserfall teilweise über einen unkontrollierten Entlastungskanal mit einer Leistungsfähigkeit von Q_{Kanal} = 2,5 m³/s als Bypass umgangen [1].



Abb. 1.1: Luftbild des Kleebachs im Bereich Allendorf an der Lahn Brücke Untergasse (Orthofoto: [2])

Im Zuge der Planung des Regenrückhalteraums im Jahr 1999 wurde die hydraulische Leistungsfähigkeit des Kleebachs stromab des Sperrbauwerks untersucht. Demnach kann der Regelabfluss von $Q=30~\text{m}^3/\text{s}$ im Unterwasser des Rückhalteraums bis zur Straßenbrücke gerade noch schadlos abgeführt werden. Die hydraulische Leistungsfähigkeit der Engstelle der damaligen Brücke betrug laut Planungsunterlagen bei Volleinstau bis zur Brückenunterkante (ohne Verlandung) ca. $Q=39~\text{m}^3/\text{s}$ [1]. Unterhalb des Streichwehres wird die hydraulische Leistungsfähigkeit des Kleebachs in den Planungsunterlagen mit $Q=32~\text{m}^3/\text{s}$ angegeben [1]. Im Rahmen der Erneuerung der Untergasse wurde ab 2007 auch die in der Planung des Rückhalteraums

untersuchte Straßenbrücke über den Kleebach neu gebaut und der Fließquerschnitt unter der Brücke aufgeweitet.

Seit der baulichen Anpassung der Brücke kommt es am rechten Ufer vor der Gabionenwand sowie direkt im Bereich der Brücke zu verstärkten Sedimentablagerungen (vgl. Abb. 1.2 und Abb. 1.3). Insbesondere bei den Anliegern besteht dadurch die Sorge, dass Hochwasserabflüsse oberstrom des betroffenen Bereichs nicht mehr schadlos abgeführt werden können. Die von den Ablagerungen betroffenen Bereiche wurden deshalb durch den AG bereits unter erheblichem Kostenaufwand von den Sedimenten geräumt, wiesen jedoch nach kürzester Zeit an gleicher Stelle erneut Sedimentablagerungen in einem ähnlichen Umfang auf.



Abb. 1.2: Sedimentablagerungen vor der Gabionenwand oberstrom der Brücke Untergasse (mit Fließpfeil in blau), Ortsbesichtigung vom 24.05.2022



Abb. 1.3: Sedimentablagerungen oberstrom (linkes Bild) und unter der Brücke Untergasse (rechtes Bild) (mit Fließpfeil in blau), Ortsbesichtigung vom 14.07.2022

Vor dem Hintergrund der genannten hydraulischen und morphologischen Problematik wurde das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel beauftragt zu prüfen, ob die Sedimentablagerungen einen Einfluss auf die hydraulische Leistungsfähigkeit des Gewässerabschnittes haben. Die beauftragten Untersuchungen beinhalten eine 3D-hydrodynamisch-numerische (HN) Berechnungen des Untersuchungsgebiets für die Regelabgabe aus dem

Hochwasserrückhaltebecken (HRB) von $Q = 30 \text{ m}^3/\text{s}$. Einen Überblick über die Vorgehensweise bei den Berechnungen gibt Kapitel 4.2.

Zusätzlich zum ursprünglichen Auftrag wurde in einem Zusatzauftrag auch die Vermessung der Gewässersohle im Untersuchungsgebiet zur Generierung topografischer Grundlagendaten beauftragt. Die Vorgehensweise der Vermessungsarbeiten wird in Kapitel 3 näher erläutert.

2 Datengrundlagen und verwendete Unterlagen

Für die Untersuchungen standen dem Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft folgende Daten zur Verfügung:

Gelände- und Bauwerksinformationen

- Luftbilder des Untersuchungsgebiets [2]
- DGM1-Daten des Ufers (Aufnahmedatum 2017/2018) [3]
- Bestandsübersichtsplan der Brücke Untergasse von 2006 [4]
- Bestandsübersichtsplan der Gabionenwand an der Brücke Untergasse von 2007 [5]
- Entwurfs- und Genehmigungsplanung für den Rückhalteraum Gießen Allendorf von 1999, Teil 2 [1]

Hydraulische Daten

- Wasserstände und Abflüsse des Kleebachs für ausgewählte Hochwasserabflüsse aus dem Hochwasserrisikomanagementplan Lahn [6]
- Längsschnitt und Wasserstände des Kleebachs für ausgewählte Hochwasserabflüsse als Plandarstellung aus dem Hochwasserrisikomanagementplan Lahn [6]

3 Vermessungsarbeiten

3.1 Anlass und Vorgehensweise

Für die hydrodynamisch-numerische Simulation des Kleebachs sind neben den hydraulischen Daten auch ausreichend hoch aufgelöste topografische Daten des Vorlandes, des Uferbereiches und der Gewässersohle notwendig. Für das Land Hessen stellt die Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation flächige Überfliegungsdaten im 1x1m-Raster zur Verfügung. Diese Daten sind für trockenliegende Bereiche des HN-Modells ausreichend genau. Für nasse Bereiche, wie den Gewässerschlauch, sind diese Daten ungeeignet, da bei der vom Land Hessen durchgeführten flugzeuggestützten Laservermessung die Laserstrahlen nicht die Gewässersohle erreichen, sondern von der Wasseroberfläche reflektiert werden. Für die Gewässersohle sowie das angrenzende Ufervorland wurden daher durch eine eigene Vermessung zusätzliche Daten erhoben. In Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Vermessung der Universität Kassel wurden vom Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft an zwei Vermessungstagen Vermessungsarbeiten am Ufervorland sowie der Gewässersohle durchgeführt.

Die Vermessungsarbeiten wurden mittels Tachymeter und ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) -Boot durchgeführt. Mit dem Tachymeter wurde die Sohle der flachen Gewässerbereiche unterstrom der Brücke Untergasse sowie das Gelände des Ufervorlandes im gesamten Untersuchungsgebiet messtechnisch aufgenommen. Die Sohle der Gewässerbereiche oberstrom der Brücke wurden aufgrund zu hoher Wassertiefen und einer zu lockeren Gewässersohle mittels ADCP aufgemessen. Mit beiden Verfahren wurden im Untersuchungsgebiet in geeigneten Abständen Querprofile aufgenommen. Die Sohlhöhe unter der Brücke sowie in deren oberstromigen Nahbereich wurden mit dem ADCP-Boot in einem engen Raster flächig erfasst.

Mit dem Tachymeter werden vom Standpunkt ausgehend 3D-Koordinaten von Einzelpunkten trigonometrisch für ein lokales Koordinatensystem aufgemessen. Durch die zusätzliche Erfassung einzelner Passpunkte mittels GPS-Gerät und der anschließenden Korrelation mit den Messpunkten aus der Tachymetrie können diese aus dem lokalen in ein globales Koordinatensystem überführt werden. Üblicherweise können bei der Tachymetrie entfernungsabhängig Genauigkeiten in Höhe und Lage von \pm 0,005 m - \pm 0,02 m erreicht werden [7].

Bei den Vermessungsarbeiten mittels ADCP-Boot wurde das Gerät "RiverRay ADCP" der Firma Seba Hydrometrie GmbH & Co. KG eingesetzt. Das ADCP-Boot tastet mittels akustischer Signale die Gewässersohle ab und führt so, bezogen auf den Wasserspiegel, Tiefenmessungen durch. Die Lage und Höhe des Bootes wurde mittels Tachymeter bestimmt. Dafür wurde auf dem Boot ein 360 Grad-Prisma montiert (siehe Abb. 3.1), welches mittels Tachymeter automatisch verfolgt werden kann. Die Genauigkeit der Tiefenmessung wird laut Herstellerangaben bei gleichbleibender Wassertemperatur und Salzgehalt mit \pm 1% angegeben. Das Verfahren ist für Tiefen von 0,3 m – 100 m geeignet [8]. Die mit beiden Methoden aufgenommenen Punkte wurden hinsichtlich Plausibilität geprüft und für die weitere Verarbeitung aufbereitet.



Abb. 3.1: ADCP-Boot mit 360 Grad-Prisma unterstrom der Brücke am 18.08.2022

3.2 Ergebnis der Vermessungsarbeiten

In der nachfolgenden Abb. 3.2 sind die aufgenommenen Vermessungspunkte dargestellt. Wie zuvor beschrieben wurden der Gewässerbereich unterstrom der Brücke sowie das Ufervorland im Wesentlichen mittels Tachymeter erfasst, während der oberstromige Gewässerbereich mittels ADCP-Boot vermessen wurde.

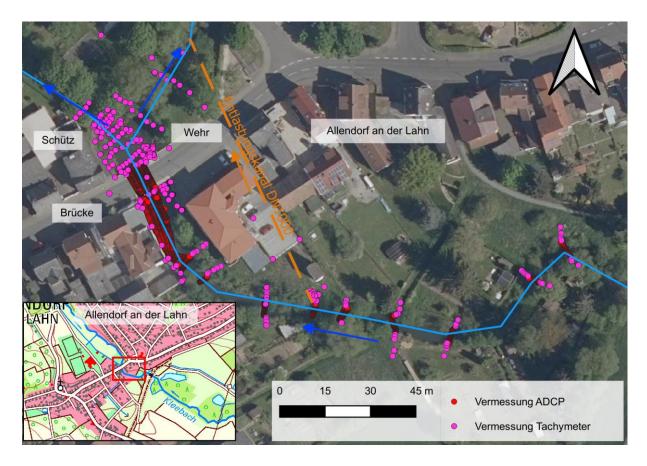


Abb. 3.2: Darstellung der Vermessungspunkte aus Tachymeter- und ADCP-Vermessung (Hintergrundkarten: [2])

4 Hydrodynamisch-numerische Modellierung

4.1 Grundlagen der 3D-HN-Modellierung

Für die dreidimensionale Modellierung der Strömungsverhältnisse des Kleebachs im Bereich Gießen/Allendorf Brücke Untergasse wurde im Rahmen dieser Studie die Software Flow-3D (Flow Science, USA) in der Version 2022R1 Update 1 eingesetzt. Das in der Software implementierte Rechenverfahren löst die nachfolgend dargestellten inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen für finite Volumen mittels der Finite-Differenzen-Methode.

Kontinuitätsgleichung

$$A_{x} \frac{\partial u}{\partial x} + A_{y} \frac{\partial v}{\partial y} + A_{z} \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} f_{s}$$

Impulsgleichung in x-Richtung

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(A_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{f_s}{\rho V_F} u + \rho g_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \rho g_x \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \rho g_x \frac{\partial u}{\partial y^2} +$$

Impulsgleichung in y-Richtung

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(A_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{f_s}{\rho V_F} v + \rho g_y$$

Impulsgleichung in z-Richtung

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_{_{E}}} \left\{ u A_{_{X}} \frac{\partial w}{\partial x} + v A_{_{Y}} \frac{\partial w}{\partial y} + w A_{_{Z}} \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(A_{_{X}} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} + A_{_{Y}} \frac{\partial^{2} w}{\partial y^{2}} + A_{_{Z}} \frac{\partial^{2} w}{\partial z^{2}} \right) - \frac{f_{_{S}}}{\rho V_{_{E}}} w + \rho g_{_{Z}} \frac{\partial w}{\partial z} + \rho g_{_{$$

Für die Berechnungen wird der Strömungsbereich in ein Netz mit rechteckigen Zellen aufgeteilt, welche parallel zu den Hauptkoordinatenachsen liegen. Die Abmessungen der resultierenden Quaderelemente sind sowohl in lateraler als auch in vertikaler Richtung vorzugeben. Die Diskretisierung der Geländeoberfläche und der Bauwerksstruktur wird in Flow-3D mit der FA-VOR- (Fractional Area-Volume Obstacle Representation) Methode realisiert. Hierbei werden die einzelnen Berechnungszellen durch zusätzliche Parameter weiter unterteilt. Folglich ist es möglich, den Verlauf der Grenzfläche einer Oberflächenstruktur (bspw. Bauwerkswand oder Wasseroberfläche) zu bestimmen, indem der Füllgrad der Zelle und die Anteile der nicht blockierten Querschnitte an den Zellgrenzflächen bekannt sind.

Neben der Definition von Rand- und Anfangsbedingungen ist die numerische Beschreibung der Turbulenz ein wichtiges Kriterium bei der dreidimensionalen Strömungssimulation. Nahezu alle in der Natur und bei technischen Bauwerken auftretenden Strömungen sind turbulent. Turbulenz ist ein hochgradig instationäres und dreidimensionales Phänomen, welches durch starke

Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen in Raum und Zeit gekennzeichnet ist. In Flow-3D stehen sechs unterschiedliche Turbulenzmodelle zur Auswahl. Zum einen die Large Eddy Simulation, auch Grobstruktursimulation genannt, und zum anderen verschiedene statistische Turbulenzmodelle, darunter das k-ω Modell und das k-ε Modell sowie das RNG (Renormalized group) Modell, welches bei dieser Studie zur Anwendung kommt. Weiterhin sind der Prandtlsche Mischwegansatz und das Eingleichungs-Turbulenzenergiemodell implementiert.

Das Pre- und Postprocessing ist direkt in Flow-3D implementiert. Zusätzlich ist eine weiterführende Auswertung der Berechnungsergebnisse mit der ergänzenden Anwendung Flow-3D Post möglich. Dieses wird im Softwarepaket von Flow Science mitgeliefert und basiert auf der freien Software ParaView. Neben dem softwareinternen Postprozessor sind zur Bearbeitung der für die Modellerstellung nötigen Eingangsdaten weiterhin GIS und 3D-Modellierungsprogramme wie beispielsweise QGIS, AutoCAD und Civil 3D der Firma AutoDesk notwendig. Mithilfe dieser Software können dreidimensionale Modelle der Topografie sowie der Bauwerksgeometrie erstellt und über eine Schnittstelle in Flow-3D importiert werden.

4.2 Untersuchungsziel und Vorgehensweise

Ziel der durchgeführten Untersuchung ist die Einschätzung der hydraulischen Auswirkungen der Sedimentablagerungen im Kleebach in Gießen/Allendorf im Bereich der Brücke Untergasse für den definierten Abfluss Q = 30 m³/s aus dem oberstromigen Hochwasserrückhaltebecken. Die Bewertung der hydraulischen Auswirkungen wird dabei vor allem anhand eines relativen Vergleichs der hydraulischen Situation mit und ohne Sedimentablagerungen im Brückenbereich durchgeführt. Aufgrund der Nahbereichsuntersuchungen und der dreidimensionalen Strömungscharakteristik im Brückenbereich ist der Einsatz eines 3D-HN-Modells notwendig.

Für die Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit wird zunächst ein 3D-HN-Modell des ausgeräumten Zustandes aufgebaut. Dafür werden die Sedimente im Brückenbereich sowie im angrenzenden Gewässerbereich bis auf die geplante Gewässersohle geräumt. Die hydraulische Leistungsfähigkeit in diesem Sohlzustand bildet die Basis des relativen Vergleichs. Anschließend wird die Hydraulik für den Istzustand basierend auf den vor Ort im August 2022 gemessenen Sedimentablagerungen numerisch berechnet. Durch den Vergleich der Hydraulik beider Sohlzustände lassen sich die hydraulischen Auswirkungen der Ablagerungen bewerten.

4.3 Modellerstellung

4.3.1 Erstellung der Geländetopografie

Die Geländetopografie wird anhand eines digitalen Geländemodells (DGM) im 3D-HN-Modell berücksichtigt. Das DGM wird dabei anhand der Überfliegungsdaten des Landes Hessen [3] für das Vorland sowie auf Basis der eigenen Vermessung für den Flussschlauch (siehe Abschnitt 3) erstellt. Die vorhandenen Überfliegungsdaten sind aus dem Jahr 2017/2018 und liegen in

einer Auflösung von 1m x 1m vor. Die vertikale Genauigkeit wird mit bis +/- 0,3 m angegeben. Das 3D-Modell von Gewässerschlauch und Ufervorland oberstrom des Brückenbereichs wurde anhand der aufgemessenen Querprofile erstellt (siehe Abb. 4.1). Zusammen mit den Überfliegungsdaten für das Vorland werden die Daten zum vollständigen DGM vereint (siehe Abb. 4.2).

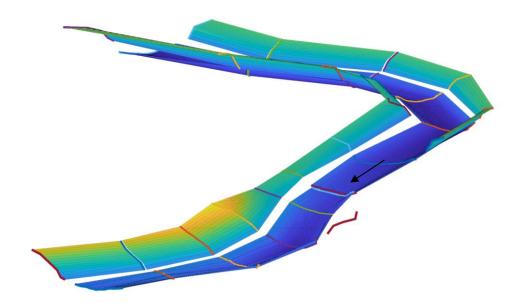


Abb. 4.1: Darstellung des auf Basis der Vermessungsdaten erstellten Gewässerschlauchs

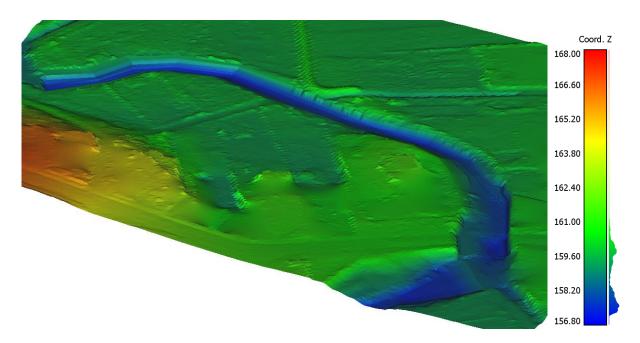


Abb. 4.2: Darstellung des DGMs für den Istzustand (Höhe in [mNN])

Für den Ausräumzustand wird der Bereich unter der Brücke sowie vor der Gabionenwand (siehe Abb. 4.3) bis auf die in den Konstruktionsplänen [4, 5] vorgesehenen Sohle von 157,0 mNN ausgeräumt (siehe Abb. 4.4). Der ausgeräumte Bereich wird an die unveränderte Gewässersohle angerampt. In Abb. 4.3 ist im Bereich der Brücke Untergasse, im Vergleich zum Istzustand, die Ausräumung deutlich zu erkennen.

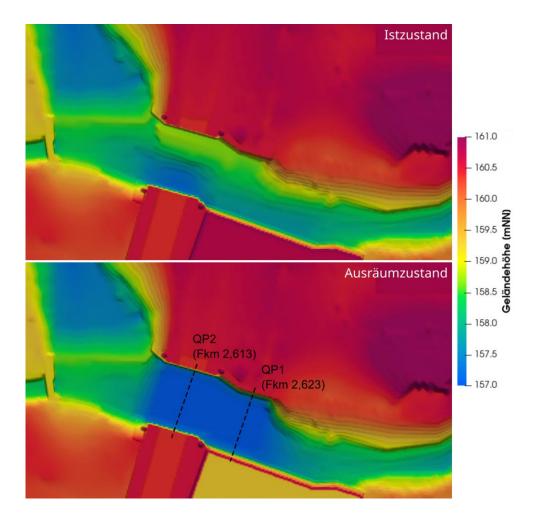


Abb. 4.3: DGMs des Istzustandes und des Ausräumzustandes mit Verortung zweier Querprofile (QP1 und QP2).

Wie in Abb. 4.3 und Abb. 4.4 zu sehen ist, liegt in beiden Querprofilen im Istzustand ein deutliches Sohlquergefälle von der rechten zur linken Gewässerseite vor. Das Quergefälle der Sohle im Bereich vor der Gabionenwand in Querprofil 1, d.h. oberstrom der Brücke, ist mit rund 0,98 m vergleichsweise gering ist. Im Bereich unter der Brücke in Querprofil 2 erhöht sich das Quergefälle auf rund 1,55 m.

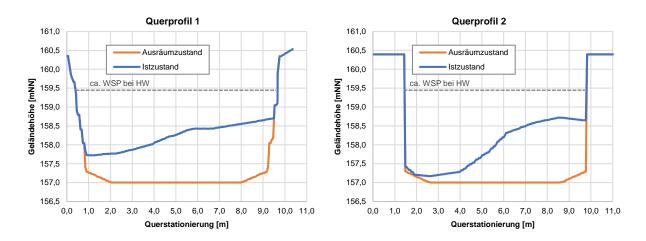


Abb. 4.4: Querprofile im Ausräumbereich, Vergleich Ist- und Ausräumzustand Seite 10

Entsprechend der vorhandenen Sedimentablagerungen wird für den Ausräumzustand somit vor allem die rechte Gewässerseite deutlich ausgeräumt. Die größte Sedimenttiefe im gesamten Ausräumbereich beträgt ca. 1,72 m, das ausgeräumte Volumen beträgt rund 290 m³.

4.3.2 Erstellung der Bauwerkskomponenten

Im Untersuchungsgebiet vorhandene und für die Untersuchung relevante Bauwerke werden im 3D-HN-Modell anhand von digitalen 3D-Bauwerksmodellen berücksichtig. Dies betrifft die Bauwerke im besonders relevanten Bereich um die Brücke Untergasse. In diesem Bereich wurden die linksseitige Uferwand, die rechtsseitige Gabionenwand sowie das Brückenbauwerk anhand der vorliegenden Bauwerkspläne und unter Berücksichtigung der eigenen Vermessung mittels 3D-CAD-Software digitalisiert. Die Wehrkrone und das Schütz wurden auf Basis der vor Ort erhobenen Vermessungsdaten digital konstruiert. Die erstellten 3D-Bauwerke sind in der nachfolgenden Abb. 4.5 zusammen mit dem DGM für den Istzustand dargestellt. Da für den Untersuchungsabfluss kein Einstau der Brücke zu befürchten war, konnte auf die Konstruktion des Fahrbahnaufbaus der Brücke verzichtet werden.

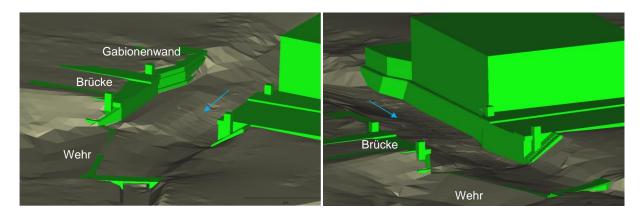


Abb. 4.5: Erstellte 3D-Bauwerksmodelle im Untersuchungsgebiet (grün)

4.3.3 Erstellung der 3D-HN-Modelle

Die erstellten DGMs der beiden Sohlzustände sowie die 3D-Bauwerksmodelle dienen als geometrische Grundlage der 3D-HN-Simulationen. Für beide Sohlzustände wird zusammen mit den Bauwerksmodellen jeweils ein eigenständiges 3D-HN-Modell aufgebaut.

Das aufgebaute 3D-HN-Modell besteht aus drei Teilmodellen. Die Teilmodelle berechnen die hydraulischen Größen im Projektgebiet entsprechend ihrer zunehmend feineren Diskretisierung mit steigender Genauigkeit. Die Modellkette ist in Abb. 4.6 schematisch dargestellt. Das Initialmodell berechnet mit einer groben Diskretisierung einen ersten Initialzustand für das Gesamtmodell. Es liefert somit ein erstes grobes Strömungsfeld des Untersuchungsgebiets und ermöglichst dem aufbauenden Gesamtmodell kürzere Rechenzeiten. Das Gesamtmodell liefert mit einer feineren Diskretisierung die Zuflussbedingungen für das Detailmodell. Im Detailmodell wird der Nahbereich des besonders relevanten Untersuchungsgebiets im Brückenbereich mit

der feinsten Diskretisierung berechnet. Die drei Teilmodelle sind voneinander entkoppelt. Dies bedeutet, dass insgesamt drei Rechenläufe notwendig sind, um die Modellkette abzuschließen und die am höchsten aufgelösten Ergebnisse des Detailmodells zu erhalten.



Abb. 4.6: Schematischer Aufbau der Modellkette des 3D-HN-Modells

Die Diskretisierung sowie die Anzahl der Berechnungszellen der Teilmodelle sind in nachfolgender Tab. 4.1 aufgeführt. Wie der Tabelle zu entnehmen ist, wurde das Gesamtmodell mit zwei unterschiedlichen Diskretisierungen aufgebaut. Während der oberstromige Bereich eine eher grobe Diskretisierung aufweist, wird der unterstromige Bereich um die Brücke Untergasse feiner aufgelöst. Durch die zunehmend feinere Diskretisierung der Teilmodelle nimmt die Anzahl der Berechnungszellen, im Detailmodell trotz geringeren Modellabmessungen, jeweils zu.

Tab. 4.1: Diskretisierung und Anzahl der Berechnungszellen im jeweiligen Teilmodell

Modell	Diskretisierung d _x / d _y / d _z [m]	Anzahl Berechnungszellen [Stk.]
Initialmodell	0,5 / 0,5 / 0,5	358.324
Gesamtmodell	0,5 / 0,5 / 0,5 (oberstrom) 0,25 / 0,25 / 0,25 (unterstrom)	1.378.112
Detailmodell	0,125 / 0,125 / 0,125	3.707.512

In der nachfolgenden Abb. 4.7 sind die Lage und das Ausmaß des 3D-HN-Modells dargestellt. Wie in der Abbildung zu erkennen, ist die Lage des Initialmodells und des Gesamtmodell deckungsgleich. Das Gesamtmodell ist entlang der gestrichelten Linie in den oberstromigen und den unterstromigen Teil mit der jeweiligen Diskretisierung aufgeteilt. Die obere Modellgrenze des Gesamtmodells wurde in ausreichendem Abstand zum unterstromigen Untersuchungsgebiet angeordnet, um den Einfluss der Randbedingung zu minimieren. Die unterstromige Modellgrenze befindet sich unterstom des dort angeordneten Wehres, wodurch ebenfalls bei schießendem Abfluss am Wehr der Einfluss der Randbedingung minimiert werden soll.

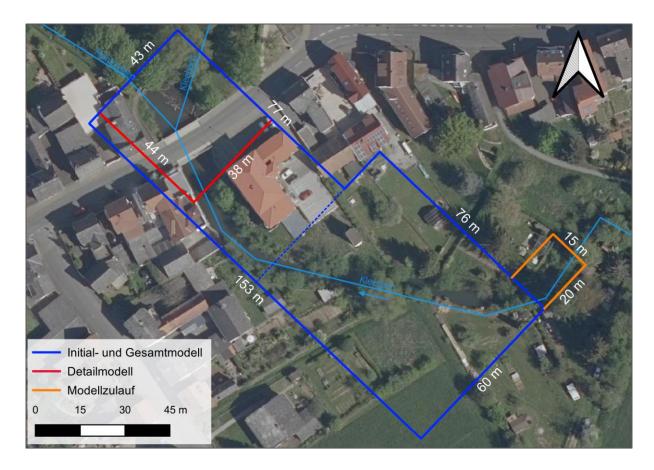


Abb. 4.7: Gesamtansicht des 3D-HN-Modellgebiets mit Ausmaß und Lage der Teilmodelle (Hintergrundkarte: [2])

4.3.4 Rand- und Anfangsbedingungen

Der Modellzufluss zum Initial- und Gesamtmodell erfolgt am oberen Modellrand über die Definition des konstanten Untersuchungsabflusses von $Q=27,5\,$ m³/s. Dieser Zufluss ist der Regelabfluss des HRB von $Q=30\,$ m³/s abzüglich des Volumenstroms von $Q=2,5\,$ m³/s, der vom Entlastungskanal oberstrom der Brücke Untergasse als Bypass an der Engstelle vorbei geleitet wird (vgl. Kapitel 1). Der Zufluss zum Initial- und Gesamtmodell erfolgt vertikal von unten nach oben, um einen am Modellrand konstanten Zufluss ohne Richtungsaufprägung zu gewährleisten. Durch die rund 120 m lange Fließstrecke von der Zuflussrandbedingung bis zum Detailmodell wird die Beeinflussung des Untersuchungsgebiets durch die obere Randbedingung vermieden. An der oberen Randbedingung des Detailmodells werden die Strömungsbedingungen aus dem Gesamtmodell übernommen. Bei der Übernahme der Hydraulik eines übergeordneten Modells an ein untergeordnetes wird darauf geachtet, dass das übergeordnete Modell einen hydraulisch stationären Zustand erreicht hat.

Als untere Randbedingung wird bei allen drei Teilmodellen die untere Modellgrenze zum Kleebach als konstanter Wasserstand definiert. Da für den Gewässerabschnitt keine Messwerte für den Untersuchungsabfluss existieren, wurde der Wasserstand für den Untersuchungsabfluss von $Q = 27.5 \text{ m}^3/\text{s}$ aus den Abfluss- und Wasserstandsangaben des Hochwasserrisikomanagementplans Lahn [6] auf 159,30 mNN interpoliert (vgl. Abb. 4.8). Es wird davon ausgegangen,

dass im Mühlgraben im Hochwasserfall kein Abfluss stattfindet. Dies stellt für das Untersuchungsgebiet den hydraulisch ungünstigen Fall dar.

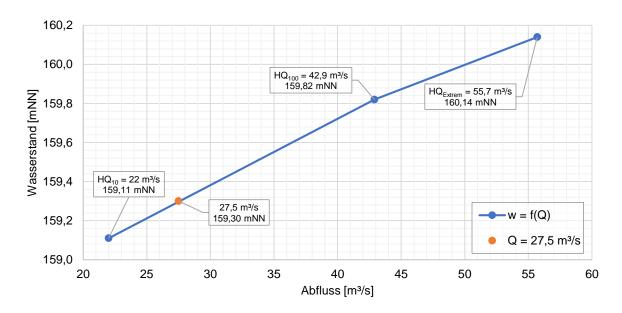


Abb. 4.8: Wasserstands-Abflussbeziehung an Fkm 2,577 (nach [6]) mit interpoliertem Wasserstand für den Untersuchungsabfluss

Außer dem Zufluss- und Abflussrand am Kleebach sind alle Modellränder geschlossen, sodass an diesen Rändern kein Wasser, z.B. über das Vorland, aus dem Modell abfließen kann. Das Wasser wird daher vollständig durch die Engstelle des Brückenbereichs geleitet. In der nachfolgenden Abb. 4.9 sind die Randbedingungen des Modells dargestellt.

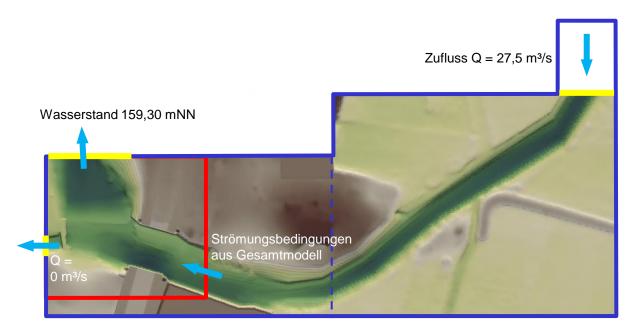


Abb. 4.9: Übersicht der Randbedingungen der 3D-HN-Teilmodelle für den Untersuchungsabfluss $Q = 27,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (blau: Initial- & Gesamtmodell, rot: Detailmodell)

5 Ergebnisse der 3D-HN-Untersuchung

Nach Durchlaufen der Modellkette von Initial-, Gesamt- und Detailmodell werden im Folgenden die Simulationsergebnisse für den Kleebach im Nahbereich der Brücke Untergasse in Allendorf für beide Sohlzustände analysiert. Der nachfolgend ausgewertete Längsschnitt ist in Abb. 5.1 in der Lage und als Geländelängsschnitt dargestellt.

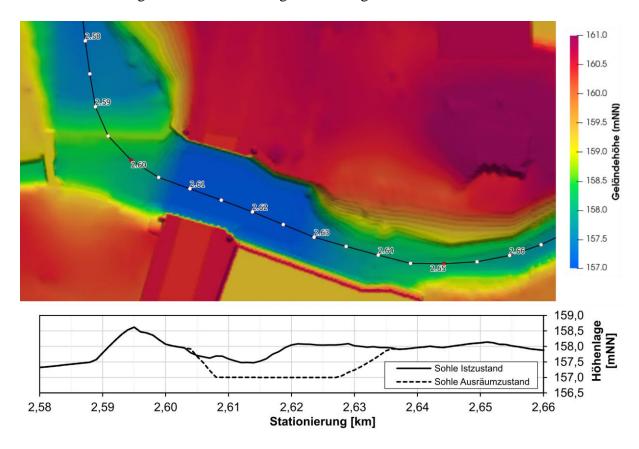


Abb. 5.1: Längsschnitt des Kleebachs im Nahbereich der Brücke

In der nachfolgenden Abb. 5.2 ist der Wasserspiegellängsschnitt des Brückenbereichs bis unterstrom des Wehres für beide Sohlzustände für den Untersuchungsabfluss von Q = 27,5 m³/s dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Wasserspiegel beider Sohlzustände in einem sehr ähnlichen Bereich liegen. In einigen wenigen Bereichen liegen die Wasserspiegeldifferenzen zwischen Ist- und Ausräumzustand bei maximal -4,2 bzw. +8,5 cm. Die maßgeblichen Wasserstände liegen für den Ausräumzustand bei ca. 159,43 mNN, für den Istzustand bei ca. 159,4 mNN. Unter Berücksichtigung der Brückenunterkante auf 159,7 mNN entspricht dies einer lichten Höhe von 27 cm bzw. 30 cm. Bei beiden Sohlzuständen ist simulationstechnisch somit ein Freispiegelabfluss unter der Brücke gewährleistet. Ob die hier berechnete lichte Höhe im tatsächlichen Hochwasserfall, zum Beispiel unter der Berücksichtigung einer möglichen Verklausung o. ä., ausreichend ist, wird in dieser Untersuchung nicht beleuchtet und muss gesondert bewertet werden.

Im hier untersuchten Nahbereich der Brücke sind die Wasserspiegel beider Sohlzustände bis zum Wehr in Fließrichtung näherungsweise horizontal, was darauf hindeutet, dass diese für den Untersuchungsabfluss maßgeblich durch das Wehr kontrolliert werden. Am Wehr findet ein doppelter Fließwechsel (strömend-schießend-strömend) statt, der im Wasserspiegellängsschnitt bei dem lokalen Wasserspiegelabfall bei ca. Fkm 2,595 zu erkennen ist.

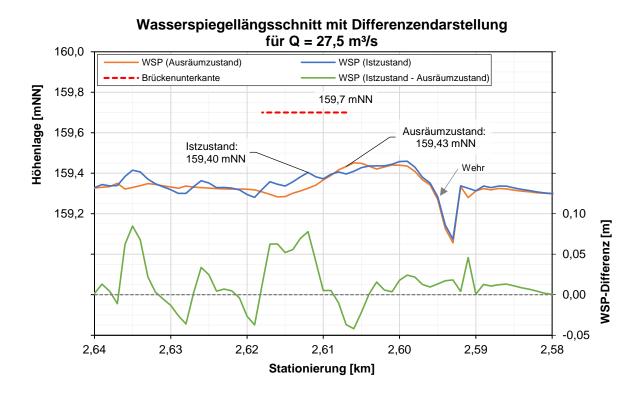


Abb. 5.2: Wasserspiegellängsschnitt des Kleebachs im Brückenbereich mit Differenzendarstellung für den Ist- und den Ausräumzustand für $Q = 27,5 \text{ m}^3/\text{s}$

Zur Einordnung der Simulationsergebnisse wurden zusätzliche Simulationen mit beiden Sohlzuständen für den Hochwasserabfluss $HQ_{10}=22~\text{m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Für die untere Randbedingung wurde der Wasserstand für den HQ_{10} entsprechend des Hochwasserrisikomanagementplans Lahn [6] mit 159,11 mNN vorgegeben.

Die Wasserspiegellagen der zusätzlich durchgeführten Simulationen sind in der nachfolgenden Abb. 5.3 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Wasserspiegel beim HQ_{10} maßgeblich durch das Wehr bestimmt werden, da die Wasserspiegel nahezu ohne Längsgefälle verlaufen und für beide Sohlzustände kaum Höhendifferenzen festzustellen sind. In dem betrachteten Gewässerbereich gibt es nur geringe Abweichungen in den Wasserständen der beiden Sohlzustände. Oberstrom des Wehres betragen die Abweichungen in wenigen Bereichen maximal -0.05 m bzw. +0.03 m. Der Abfluss unter der Brücke ist im Modell im Freispiegelabfluss möglich. Die lichte Höhe beträgt dabei ca. 35-40 cm. Wie auch beim Untersuchungsabfluss wird für den HQ_{10} der Einfluss einer möglichen Verklausung o.ä. nicht berücksichtigt.

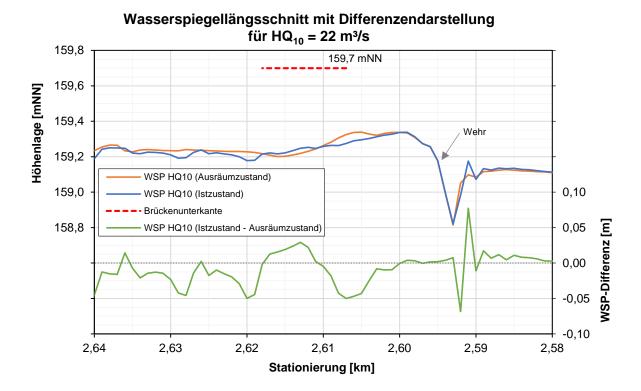


Abb. 5.3: Wasserspiegellängsschnitt des Kleebachs im Brückenbereich mit Differenzendarstellung für den Ist- und den Ausräumzustand für $HQ_{10} = 22 \text{ m}^3/\text{s}$

Bei Betrachtung von Fließgeschwindigkeiten und Abfluss in Fließrichtung im Brückenbereich, welche näherungsweise der x-Richtung im Modell entsprechen, können deutliche Unterschiede zwischen Ist- und Ausräumzustand festgestellt werden. Für den Untersuchungsabfluss ist in beiden Modellen die Verlagerung des Hauptabflusses auf die linke Gewässerseite zu beobachten. Im Ausräumzustand findet jedoch eine deutlich stärkere Bündelung der Strömung auf der linken Seite statt. Im rechtsseitigen Gewässerbereich vor der Gabionenwand bis unter die Brücke liegt bei beiden Sohlzuständen eine Rückströmzone in unterschiedlichen Ausprägungen vor (vgl. Abb. 5.4). Gegenüber der in geringem Umfang beim Istzustand vorhandenen Rückströmzone bildet sich diese beim Ausräumzustand deutlich stärker aus und nimmt einen signifikanten Teil des Abflussquerschnittes ein. Zur Bewertung der abflusswirksamen Querschnittsfläche wurden für das Detailmodell zwei Querprofile ausgewertet. Die Lage der Querprofile ist in Abb. 5.4 dargestellt.

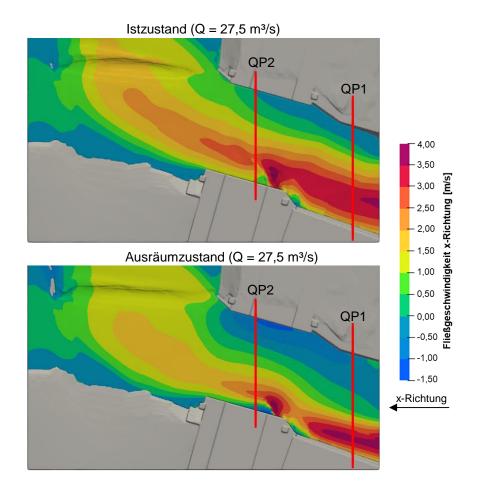


Abb. 5.4: Vergleich der Fließgeschwindigkeiten in x-Richtung im Nahbereich der Brücke Untergasse und Verortung zweier Querprofile, berechnet mit dem Detailmodell

Durch den Rückstau des Wehres und die Konzentration des Abflusses auf die linke Gewässerseite reduziert sich der abflusswirksame Querschnitt im Brückenbereich für beide Sohlzustände deutlich (vgl. Abb. 5.5). In dem in Abb. 5.5 dargestellten Querprofil 1 (QP 1) zeigt sich im Querprofil, dass für den Untersuchungsabfluss im Istzustand die Fließgeschwindigkeiten auf der linken Gewässerseite gegenüber denen auf der rechten Seite deutlich erhöht sind. Dies führt dazu, dass auf der linken Gewässerseite über 80% des effektiven Abflusses abgeführt wird. Bei Betrachtung desselben Querprofils für den Ausräumzustand zeigt sich, dass sich auch bei einer Ausräumung und somit bei einem annähernd symmetrischen Gewässerquerschnitt eine deutlich unsymmetrische Abflussaufteilung einstellt. Trotz der auf der rechten Gewässerseite ausgeräumten Sedimentablagerungen zeigt sich für die rechte Gewässerseite keine Erhöhung, sondern eine zusätzliche Verringerung der Abflussleistung. Auf der rechten Querschnittshälfte findet durch die ausgeprägte Rückströmzone ein in Fließrichtung negativer Abfluss statt. Die Abflussleistung auf der linken Gewässerseite erhöht sich, bedingt durch die ausgedehnte Rückströmzone auf der rechten Gewässerseite, im Ausräumzustand auf über 100% mit einem deutlichen Abflussschwerpunkt im ersten Viertel des Querschnittes.

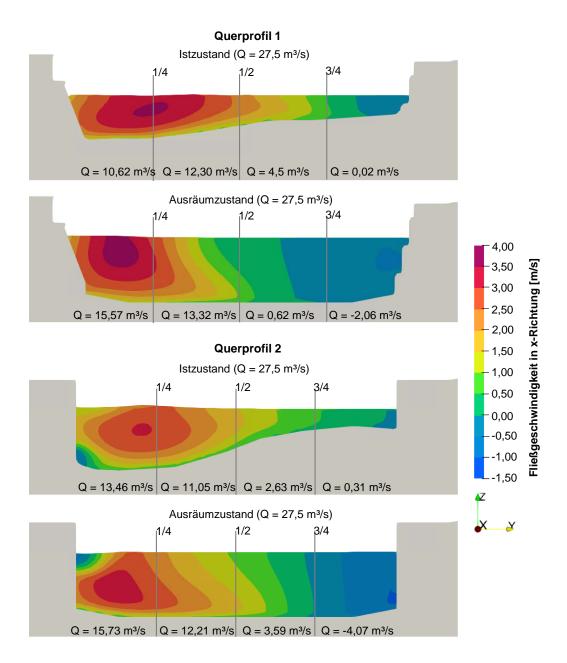


Abb. 5.5: Querprofile mit Geschwindigkeitsverteilung sowie Teilabflüssen im Nahbereich der Brücke Untergasse, berechnet mit dem Detailmodell

In Querprofil 2 (QP 2) zeigt sich eine ähnliche Situation wie in QP 1, jedoch in deutlicherer Ausprägung. Beim Istzustand wird annähernd 90% des effektiven Abflusses auf der linken Gewässerseite abgeführt. Beim Ausräumzustand verlagert sich auch in QP 2 über 100% des effektiven Abflusses auf die linke Gewässerseite, da sich auf der rechten Gewässerseite eine deutliche Rückströmzone ausbildet. Besonders stark ausgeprägt ist die Rückströmzone beim Ausräumzustand im rechten Viertel des QP 2 mit Q = -4,07 m³/s.

Wie bei Betrachtung der Querprofile aus Abb. 5.5, so wird auch bei der Auswertung der dreidimensionalen Stromlinien beider Sohlzustände die starke Ausprägung der Rückströmzone

deutlich (vgl. Abb. 5.6). Wie zuvor dargelegt, ist für den Untersuchungsabfluss im Ausräumzustand eine deutliche Vergrößerung der Rückströmzone gegenüber dem Istzustand festzustellen. Die Rückströmzone nimmt dabei einen signifikanten Anteil des Gewässerquerschnitts ein.

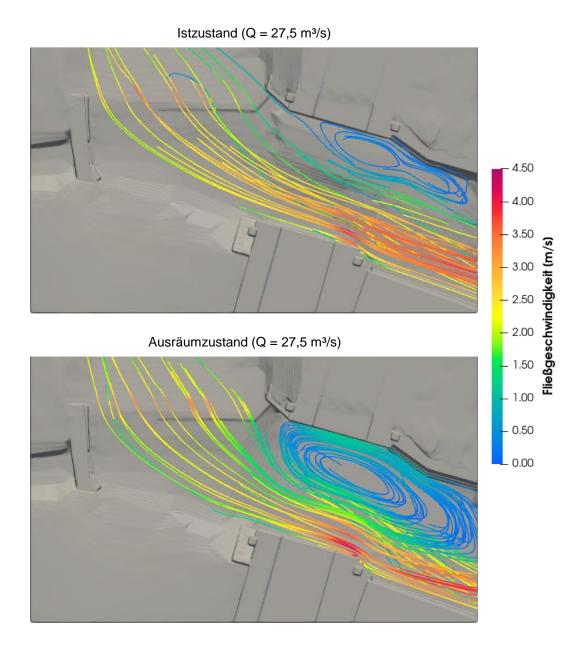


Abb. 5.6: Dreidimensionale Stromlinien mit Fließgeschwindigkeiten im Nahbereich der Brücke Untergasse, berechnet mit dem Detailmodell

Die Ausräumung der Sedimente ruft somit gegenüber dem Istzustand von August 2022 eine größere Rückströmzone hervor und wirkt dadurch eher strömungsungünstig. Die detektierte Rückströmzone im Ausräumbereich liegt im Bereich hoher Sedimentablagerungen des Istzustandes. Es ist anzunehmen, dass die Rückströmzone aufgrund ihrer verringerten Fließgeschwindigkeiten und dadurch verringerten Sedimenttransportkapazität dort im Transport befindliches Sediment ablagert und so die Auflandungen erzeugt. Für eine detailliere Betrachtung zur Entstehung der Anlandungen sind weiterführende Untersuchungen, z.B. mit morphodynamischen Simulationen, erforderlich.

6 Zusammenfassung und Fazit

Das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel wurde mit der Untersuchung der Hochwasserneutralität von Sedimentablagerungen im Kleebach in Allendorf an der Lahn im Bereich der Brücke Untergasse beauftragt. Das Untersuchungsgebiet liegt in der Ortslage von Allendorf. Der Zufluss zum Untersuchungsgebiet im Bereich der Brücke wird im Hochwasserfall von einem rund 200 m oberstrom gelegenen Hochwasserrückhaltebecken kontrolliert. Ein Entlastungskanal mit einer Leistung von $Q = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ umgeht den Brückenbereich im Hochwasserfall. Unterstrom des Brückenbereichs wird der Kleebach von einem Wehr rechtsseitig und einem Schütz zu einem Mühlgraben linksseitig rückgestaut. Der Zufluss zum Mühlgraben wurde in den durchgeführten Untersuchungen als geschlossen angenommen, was den hydraulisch ungünstigen Fall darstellt. Auf Basis eigener Vermessungen sowie vom Auftraggeber zur Verfügung gestellter Daten und Dokumente wurde ein 3D-HN-Modell des Istzustandes und des Ausräumzustandes aufgebaut. Das in drei Teile (Initialmodell, Gesamtmodell, Detailmodell) aufgebaute 3D-HN-Modell ist in der Lage, komplexe turbulente Strömungen dreidimensional zu berechnen. Bei dem zu untersuchenden Abfluss wurde sich unter Rücksprache mit dem Auftraggeber auf den Regelabfluss des Hochwasserrückhaltebeckens von Q = 30 m³/s bezogen. Auf Basis des Regelabflusses wurde unter Berücksichtigung der Umgehung des Brückenbereiches durch den Entlastungskanal mit $Q = -2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ der Untersuchungsabfluss auf $Q = 27.5 \text{ m}^3/\text{s}$ festgelegt.

Bei den Untersuchungen wurde ermittelt, dass die Wasserspiegel im Untersuchungsgebiet für den Untersuchungsabfluss maßgeblich von dem dort angeordneten Wehr kontrolliert werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die Wasserspiegel beider Sohlzustände dadurch in einem sehr ähnlichen Bereich befinden. Im Istzustand stellt sich im Brückenbereich des Kleebachs bei dem Untersuchungsabfluss von Q = 27,5 m³/s ein Wasserstand von ca. 159,40 mNN ein, was einer lichten Höhe zur Brückenunterkante von rund 30 cm entspricht. Demgegenüber wird im Ausräumzustand beim gleichem Abfluss ein Wasserstand von ca. 159,43 mNN mit einer lichten Höhe von rund 27 cm erreicht. Eine Bewertung der lichten Höhe unter der Brücke Untergasse hinsichtlich der tatsächlichen Hochwassersicherheit wurde nicht durchgeführt und bedarf einer gesonderten Betrachtung.

Durch die Ausräumung der Sedimente im Brückenbereich wird eine im Istzustand bereits vorhandene rechtsseitige Rückströmzone deutlich vergrößert, wodurch der Abfluss stärker auf die linke Gewässerseite konzentriert wird. Dies führt dazu, dass im Ausräumzustand nahezu der vollständige effektive Abfluss auf der linken Gewässerhälfte stattfindet und die rechte Gewässerseite nicht effektiv abflusswirksam ist. Für den Untersuchungsabfluss von $Q = 27.5 \text{ m}^3/\text{s}$ führt somit eine Ausräumung der Sedimente gemäß Zustand August 2022 im Kleebach Bereich Brücke Untergasse lediglich zu einer Vergrößerung der Rückströmzone, nicht jedoch zu einer Verbesserung der effektiven Abflussleistung respektive der Hochwassersicherheit.

In der durchgeführten Untersuchung konnte somit gezeigt werden, dass die zum Untersuchungszeitraum aktuellen Sedimentablagerungen keinen negativen Einfluss auf die Hochwassersicherheit haben. Es wurden jedoch keine Untersuchungen hinsichtlich der hydraulischen

Auswirkungen anderer bzw. stärkerer Sedimentablagerungen oder der größtmöglichen Ablagerung von Sedimenten durchgeführt. Vor dem Hintergrund der durchgeführten Untersuchung sowie der weiteren morphologisch-hydraulischen Fragestellungen schlägt das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft zwei mögliche weitere Vorgehensweisen vor. Zum einen könnten auf Basis morphodynamischer HN-Simulationen Untersuchungen zum Anlandungsprozess im Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Dadurch könnten die hydraulischen Auswirkungen anderer bzw. größerer Ablagerungen untersucht sowie Aussagen zu einer größtmöglichen Ablagerung getroffen werden. Alternativ dazu könnte durch ein Sedimentmanagement- und Hochwasserkonzept die Hochwassersicherheit für den Untersuchungsabfluss im Untersuchungsgebiet gewährleistet werden. Innerhalb dieses Konzeptes sollten die Anlandungen im Brückenbereich beobachtet werden. Wird eine Vergrößerung der Anlandungen über den hier untersuchten Zustand von August 2022 festgestellt, sollte mittels Baggerungen eingegriffen und die Anlandungen mindestens auf den hier untersuchten Zustand reduziert werden.

Kassel, September 2023

Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Theobald

Stephan Charbald

7 Quellen und Literatur

- [1] Lang, J.: Hochwasserschutz Wasserverband Kleebach: Entwurfs- und Genehmigungsplanung mit Umweltverträglichkeitsuntersuchung Rückhalteraum Allendorf, Brandt Gerdes Sitzmann Wasserwirtschaft GmbH. Heft 2: Fachplanung Wasserbau; Projekt-Nr. 1459. Darmstadt, 1999
- [2] Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (Hrsg.): Digitale Orthophotos DOP20. o. J.
- [3] Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (Hrsg.): 3D-Daten. 2021.
- [4] Ingenieurbüro Weber & Martin (Hrsg.): Erneuerung der Brücke über den Kleebach im Zuge der Untergasse in 35398 Gießen Allendorf: Bestandsübersichtsplan. Anlage 5a. 2006.
- [5] Ingenieurbüro für Bauwesen Krüger, Jungmann und Partner GmbH (Hrsg.): Brücke über den Kleebach im Rahmen der grundhaften Erneuerung der Untergasse in Gießen Allendorf: Bestandsübersichtsplan Gabionenwand. Plan 330a. 2007.
- [6] Sönnichsen & Partner (Hrsg.): Hochwassermanagementplan Lahn. o. J.
- [7] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall: Geodaten in der Fließgewässermodellierung. 1. Auflage, Februar 2019. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall, 2019 (DWA-Regelwerk 543-1).
- [8] Seba Hydrometrie GmbH & Co. KG (Hrsg.): RiverRay ADCP: Ein intelligentes Abflussmesssystem. 2022.