

Auftraggeber:



Büro für Freiraumplanung  
Birgit Czyppull  
Forst 2  
37639 Bevern/Forst

---

## Erläuterungsbericht

Zweidimensionale Strömungsuntersuchungen  
zur Entwicklung der Lenne  
zwischen Linnenplan und Eschershausen

Beverungen, März 2019

---

Auftragnehmer:

***Enviro*** *numerix*  

---

*Ingenieurgesellschaft mbH*

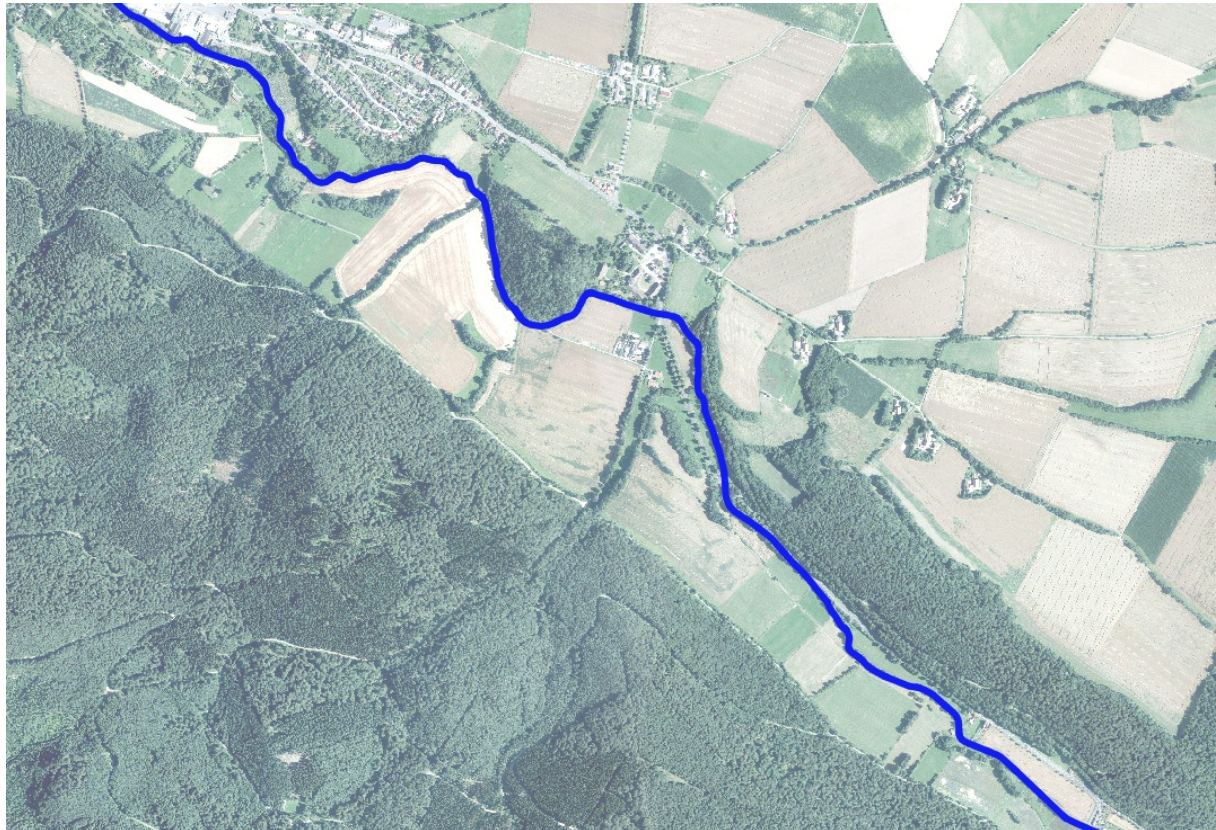
Hersteller Str. 4 b  
37688 Beverungen  
Tel.: +49(0)5273 / 368 49 95  
Fax: +49(0)5273 / 368 49 96  
E-Mail: [info@environumerix.com](mailto:info@environumerix.com)  
Internet: [www.environumerix.com](http://www.environumerix.com)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Datengrundlagen.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Hydrologie und betrachtete Abflussmengen .....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Grundlagen der numerischen Modellierung.....</b>	<b>7</b>
4.1	Allgemeines .....	7
4.2	Die Diskretisierung der Modellgeometrie .....	7
4.3	Die verschiedenen numerischen Verfahren .....	8
4.4	Die tiefengemittelte Strömungsmodellierung .....	9
4.5	Die Modellparameter.....	9
<b>5</b>	<b>Modellaufbau und Berechnungen .....</b>	<b>11</b>
5.1	Modellaufbau und Berechnung des Istzustandes .....	11
5.2	Modellumbau und Berechnung der Planungsvarianten .....	14
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen.....</b>	<b>18</b>

## 1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Stadt Eschershausen plant die Renaturierung der Lenne in einem Abschnitt zwischen Linnenplan und Eschershausen (siehe Abbildung 1.1). Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie, wurde zunächst das Potenzial einer Renaturierung mit Synergien auch in Bezug auf den Hochwasserschutz betrachtet.



**Abbildung 1.1:** Lage des betrachteten Gewässerabschnitts der Lenne zwischen Linnenplan und Eschershausen (Quelle Hintergrundbild: Orthophoto, WMS-Server [www.umweltkarten-niedersachsen.de](http://www.umweltkarten-niedersachsen.de))

Die Lenne ist in der Vergangenheit bei großen Hochwasserabflüssen wiederholt über die Ufer getreten und hat Schäden in den Ortslagen von Scharfoldendorf und Eschershausen verursacht. Es sollen daher Möglichkeiten zum Hochwasserrückhalt durch Reaktivierung von Retentionsräumen im genannten Gewässerabschnitt untersucht und konkrete Maßnahmen daraus entwickelt werden (z.B. Verwallungen). Maßgeblich ist hier der hundertjährige Hochwasserabfluss  $HQ_{100}$ .

Da Hochwasserabflüsse sehr komplexe Strömungsmuster aufweisen können, die mit eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnungen oft nur mit unzureichender Genauigkeit abgebildet werden können, erfolgen die Berechnungen in diesen Untersuchungen mit zweidimensionalen Strömungsmodellen. Damit lassen sich prinzipbedingt auch komplexe Strömungsmuster abbilden, beispielsweise werden Abflussaufteilungen automatisch berechnet und sich einstellende Querströmungen und Rückstaubereiche korrekt abgebildet.

## **2 Datengrundlagen**

Die Entwicklung der Verwallungen erfolgte nach Vorgabe bzw. in enger Zusammenarbeit mit dem Büro für Freiraumplanung, Birgit Czyppull. Folgende weitere Daten wurden für diese Untersuchungen verwendet:

- DGM 1 (Digitales Geländemodell im 1 m-Raster),
- TOP 50 Niedersachsen – Amtliche topographische Karte 1 : 50.000 – DVD mit Höhendaten (im Rahmen der Erstellung des N-A-Modells),
- Bodenkarte 1 : 50.000 (im Rahmen der Erstellung des N-A-Modells),
- Querprofile der Lenne, Vermessungsdaten des Geländes und diverse Angaben aus der Untersuchung „Ermittlung des Überschwemmungsgebietes für die Lenne und den Spüligbach“, GEUM.tec GmbH, Hannover, September 2007 (Auftraggeber: NLWKN, Betriebsstelle Hannover-Hildesheim, Hildesheim),
- eigene Fotos und Erhebungen.

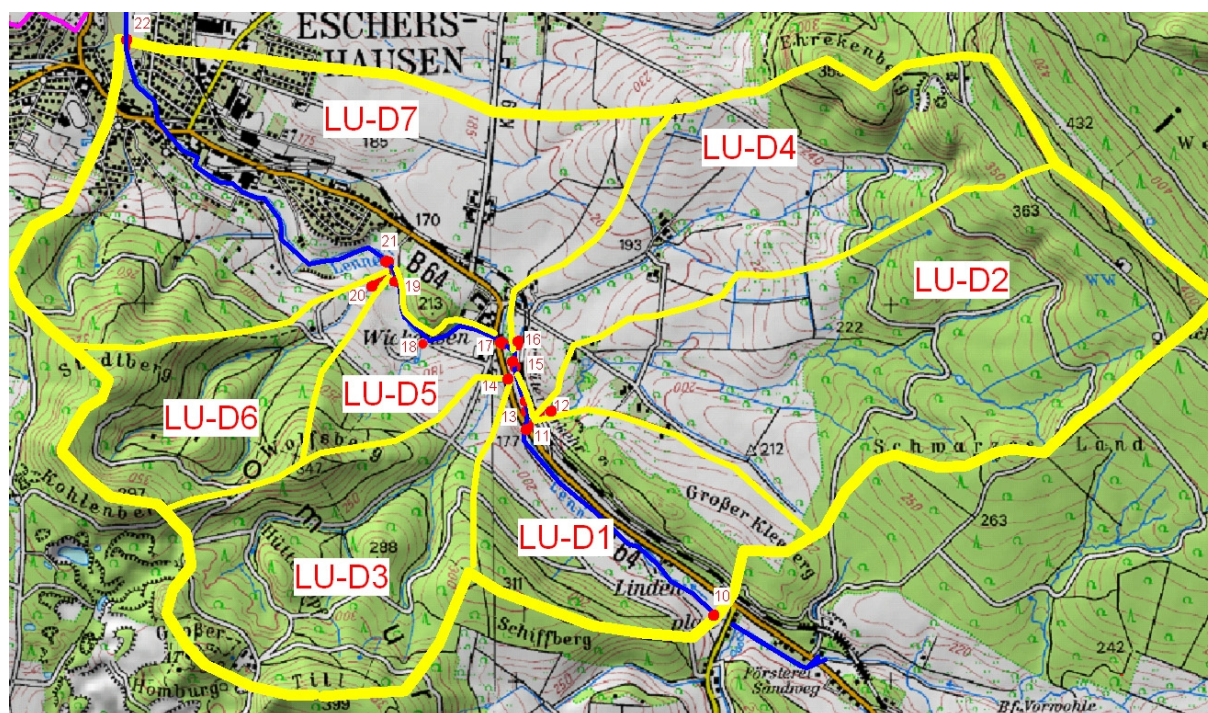
Als Hintergrund wurden zur besseren Darstellung in einigen Abbildungen Orthophotos von [www.umweltkarten-niedersachsen.de](http://www.umweltkarten-niedersachsen.de) (WMS-Server) verwendet.

### 3 Hydrologie und betrachtete Abflussmengen

Die Lenne entspringt am Holzberg zwischen Staddoldendorf und Dassel und mündet bei Bodenwerder in die Weser, bis zum Pegel Oelkassen besitzt sie eine Einzugsgebietsgröße von 65,1 km<sup>2</sup>.

In früheren Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwassersituation und zur Planung von Renaturierungsmaßnahmen an Lenne, Ruthe und Flötebach, wurde durch unser Büro bereits ein Niederschlags-Abfluss-Modell aufgebaut, mit dem die Hochwasserabflüsse der einzelnen Gewässer (und deren Abschnitte) ermittelt werden konnten.

Zur genaueren Bestimmung der Abflüsse oberhalb von Eschershausen, erfolgte in diesen Untersuchungen eine Detaillierung des vorhandenen Modells. Das Gebiet LU1 besteht nun aus den 7 Teilgebieten LU-D1 bis LU-D7. In Abbildung 3.1 sind die Teileinzugsgebiete des überarbeiteten Bereiches mit den jeweiligen Berechnungsknoten abgebildet.



**Abbildung 3.1:** Teileinzugsgebiete des N-A-Modells oberhalb von Eschershausen (Quelle Hintergrundbild: Topografische Karte 1 : 50.000, LGLN)

An dieser Stelle sollen nicht sämtliche Details zur Vorgehensweise wiederholt werden, es wird jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass in den Untersuchungen des Büros GEUM.tec aus dem Jahr 2007 (siehe Kapitel 2) auffällig große Abflusswerte ermittelt wurden (nach damaliger Absprache mit dem NLWKN). Diese waren mit unserem N-A-Modell nur zu erreichen, wenn KOSTRA-Maximalwerte verwendet und auf die übliche Abminderung in Abhängigkeit von der Gebietsgröße verzichtet wurde. Durch diese Vorgabe des NLWKN, ergeben sich auch für die Seitenbäche deutlich größere Abflüsse, als sie mit üblichen Einstellungen berechnet würden. Diese sehr hohen Werte wurden auch in diesen Untersuchungen berücksichtigt.

Das überarbeitete Modell besteht jetzt aus 39 Berechnungsknoten (vorher 27, siehe Abbildungen 3.2 und 3.3). Aus Gründen der Modelltechnik, mussten 4 Gebiete, die als Uferrandstreifen bezeichnet werden können, hinzugefügt werden. Durch diese sehr kleinen Gebiete Z1-Z4 wird eine weitere Erhöhung der Knotenanzahl vermieden. Ein Uferrandstreifen im Modell setzt sich aus der jeweiligen Gewässerlänge zwischen Knoten 13 und 19 multipliziert mit 100 m Breite zusammen, d.h. von der Gewässerachse nach rechts und links jeweils 50 m.

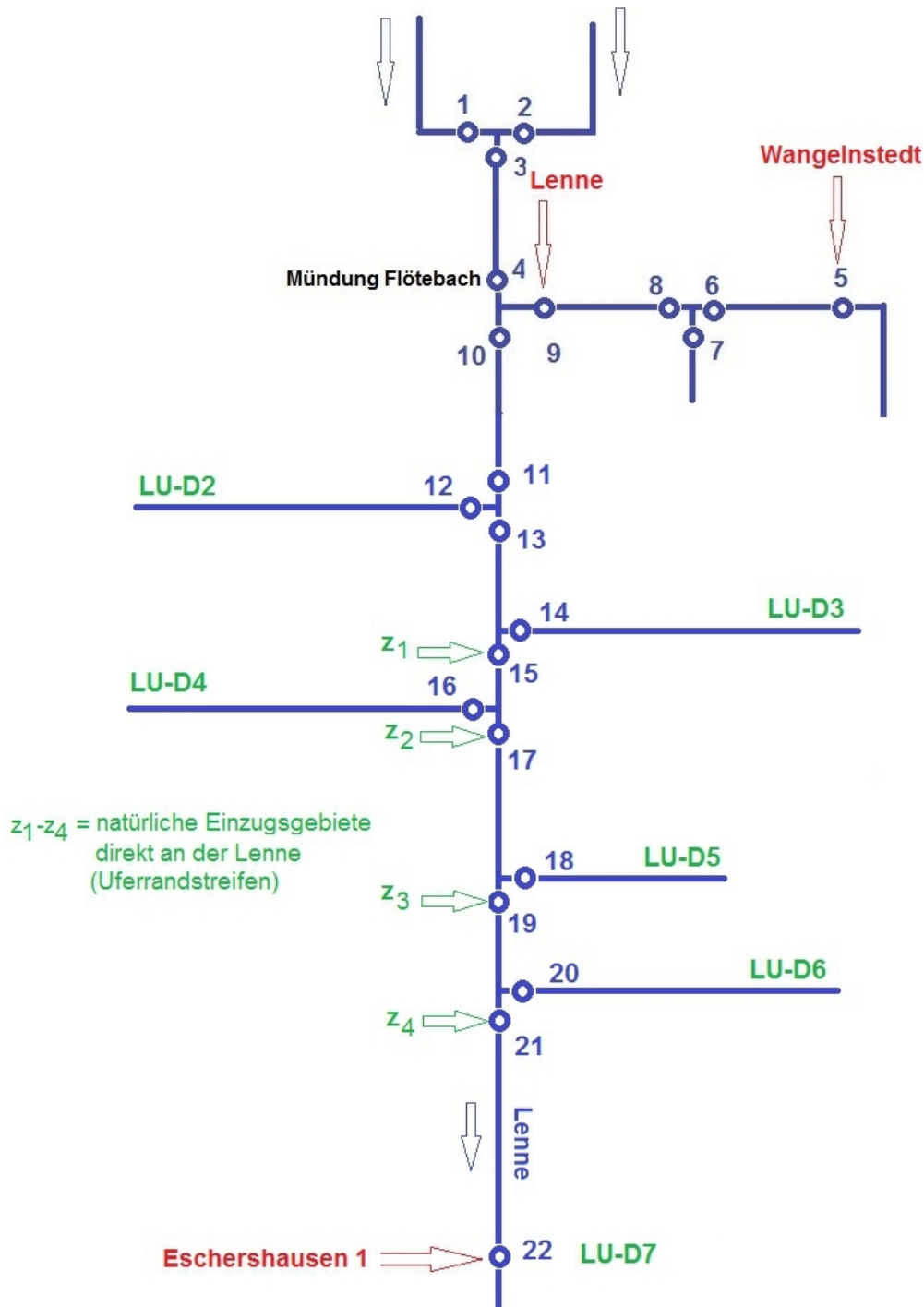
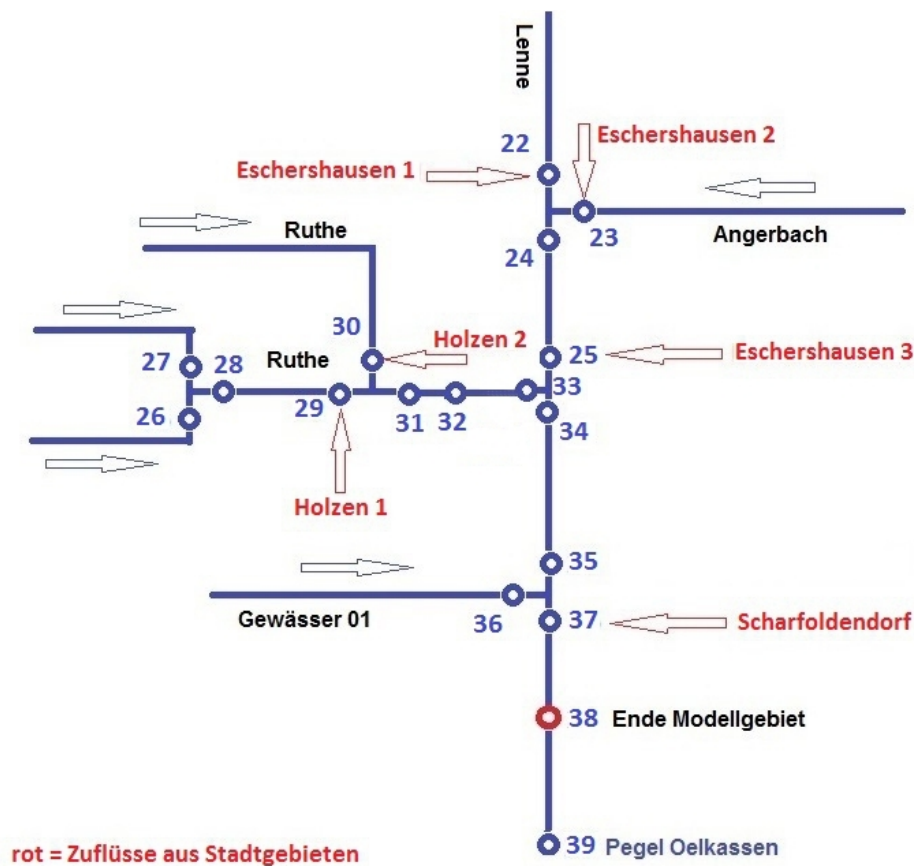


Abbildung 3.2: Systemplan des N-A-Modells oberhalb von Eschershausen (Teil 1)



**Abbildung 3.3:** Systemplan des N-A-Modells unterhalb von Eschershausen (Teil 2)

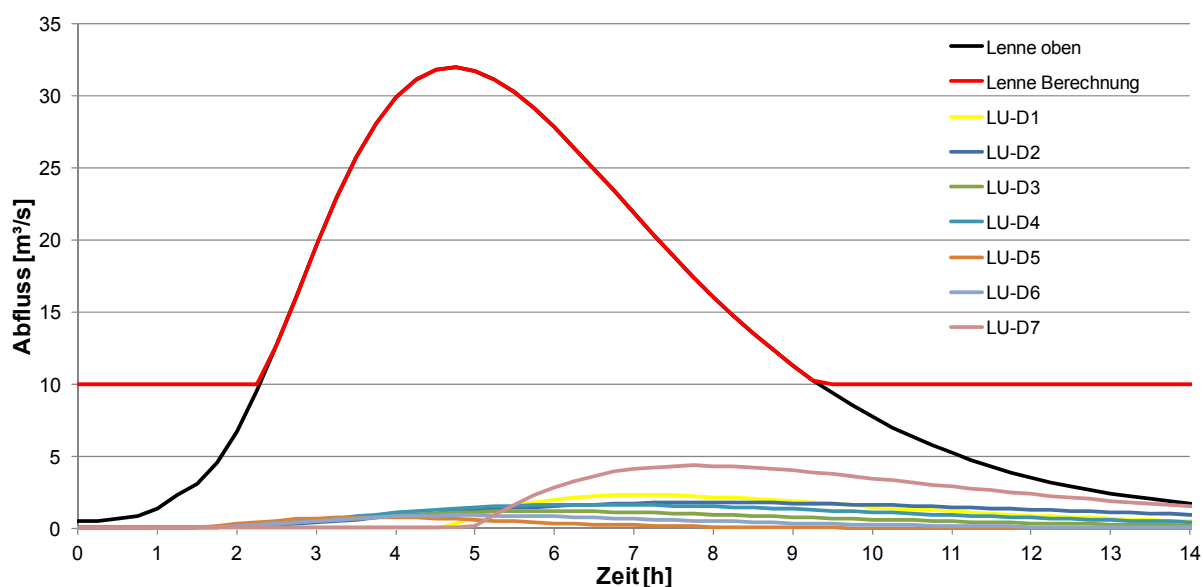
Das gewichtete Gewässergefälle der Lenne für die Gebiete Z1 bis Z4 und LU-D1 sowie LU-D7, wurde mit 9,1 ‰ dem bisherigen Modell gleichgesetzt. Allerdings wurden im alten Einzugsgebiet LU1, bei dem die Lenne mit diesem relativ geringen Gefälle maßgebend war, die steilen seitlichen Talflanken durch einen geringeren Gebietsfaktor (P1-Wert) berücksichtigt. Im jetzigen sehr detaillierten Modell (in dem die seitlichen steilen Gewässer mit ihrem tatsächlichen gewichteten Gefälle  $I_M$  einbezogen wurden) wurde ein höherer P1-Wert von 0,79 in der Berechnung angesetzt, um den Scheitelwert am Pegel Oelkassen mit 62,7 m<sup>3</sup>/s zu treffen. Für den 100-jährlichen Abfluss liegen die Abflussbeiwerte zwischen 0,30 und 0,53, je nach Beschaffenheit und Bodennutzung des jeweiligen Teileinzugsgebietes.

Neben den Eigenschaften des Einzugsgebietes, bildet die Starkniederschlagsauswertung KOSTRA (Koordinierte-Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung) des Deutschen Wetterdienstes eine weitere Grundlage der Modellierung. In Abhängigkeit von verschiedenen Dauerstufen und Jährlichkeiten wurden dabei deutschlandweit die Niederschlagshöhen und -spenden ermittelt und auf ein Rasternetz übertragen. Damit können für jeden Standort die relevanten Niederschläge berechnet und wasserwirtschaftliche Anlagen bemessen werden.

Da für die KOSTRA-Ereignisse jedoch keine zeitliche Verteilung angegeben ist, muss diese angenommen werden. Bewährt hat sich hier die Empfehlung des DVWK (jetzt DWA), die auch hier verwendet wurde. Danach sind nach 30% der Niederschlagsdauer 20% der Niederschlagsmenge gefallen und nach 50 % der Niederschlagsdauer 70% der Niederschlagsmenge. Die restlichen 30% des Niederschlags fallen dann in den verbleibenden 50% der Dauer.

Bei kleineren Einzugsgebieten sind Dauern synthetischer Niederschläge von wenigen Stunden maßgebend, sie liefern im Gewässer den höchsten Scheitelwert des Abflusses. In diesem Fall lieferte der 2-Stundenregen den maximalen Scheitel. Die Niederschlagshöhe der neuen Teilgebiete für diesen Niederschlag nach KOSTRA (55,2 mm), wurde aus dem bisherigen Modell übernommen. Sie beruht auf einer flächengewichteten Mittelbildung der Niederschlagshöhen-Anteile an den maßgeblichen KOSTRA-Rastern. Auf eine Abminderung der KOSTRA-Niederschlagshöhen aufgrund der Gebietsgröße z.B. nach VERWORN oder GROBE wurde für die Berechnung der Maximalabflüsse bewusst verzichtet (siehe oben).

Die ermittelten Abflussmengen des 27- und 39-Knotenmodells unterscheiden sich an den unveränderten Knoten nur vernachlässigbar gering. Die berechneten Ganglinien der in diesen Untersuchungen relevanten Zuflüsse sind in Abbildung 3.4 dargestellt, ihre Maximalwerte in Tabelle 3.1 aufgelistet. Damit die Betrachtungen auf der sicheren Seite liegen, wurde ein Grundabfluss von 10 m<sup>3</sup>/s gewählt (bezeichnet mit „Lenne Berechnung“).



**Abbildung 3.4:** Berechnete Ganglinien der Zuflüsse

**Tabelle 3.1:** Maximalwerte der einzelnen Zuflüsse (HQ<sub>100</sub>)

Gewässerabschnitt [-]	[m <sup>3</sup> /s]
Zufluss Lenne Linnenplan	32,005
Zufluss LU-D1	2,325
Zufluss LU-D2	1,797
Zufluss LU-D3	1,200
Zufluss LU-D4	1,651
Zufluss LU-D5	0,810
Zufluss LU-D6	0,810
Zufluss LU-D7	4,361



## **4 Grundlagen der numerischen Modellierung**

### **4.1 Allgemeines**

Ein numerisches Modell ist ebenso wie ein physikalisches Modell die vereinfachte Abbildung der natürlichen Gegebenheiten. Die Grundidee der numerischen Modelltechnik liegt in der Lösung der strömungsmechanischen Grundgleichungen für das vorgegebene Berechnungsgebiet. Dieses muss, um überhaupt berechenbar zu sein, in viele geometrisch einfache Einzelbereiche zerlegt werden (räumliche Diskretisierung).

Dieses Netz (auch Berechnungsgitter genannt) setzt sich aus Elementen und Knoten zusammen. Die Knoten geben mit ihren XYZ-Koordinaten die topographische Struktur des Untersuchungsgebietes wieder. Die Elemente entstehen aus der Verbindung dieser Knoten und prägen so die Struktur des Netzes, es handelt sich bei dem in diesen Untersuchungen verwendeten Modell um Drei- und Vierecke. Damit ist eine sehr gute Anpassung des numerischen Modells an die vorhandenen Geländestrukturen möglich. Bei dieser Verbindung werden durch lineare Interpolation aus den Punktdaten der Berechnungsknoten Flächendaten des Netzes.

Für die so entstandenen Teilgebiete werden dann jeweils die genannten mathematischen Gleichungen gelöst. Es handelt sich hierbei um partielle Differentialgleichungen, die durch entsprechende Diskretisierung in lösbar algebraische Differenzgleichungen transformiert werden. Anschließend liegen an jedem Berechnungsknoten Informationen über Fließrichtung, Fließgeschwindigkeit und Wasserspiegellage vor. Dabei werden Elemente, in denen eine Strömung durch Trockenfallen nicht vorhanden ist, automatisch erkannt und abgeschaltet.

### **4.2 Die Diskretisierung der Modellgeometrie**

Unter Kapitel 4.1 wurde bereits deutlich, dass die komplexe Form des zu untersuchenden Gebietes in viele geometrisch einfache Teilgebiete zerlegt werden muss. Grundsätzlich lassen sich Berechnungsgitter in strukturierte und unstrukturierte Gitter einteilen, wobei der Typ des Gitters und somit die Form und Anordnung der Zellen, an das numerische Verfahren gebunden ist (siehe Kapitel 4.3).

Strukturierte Gitter besitzen eine für jede Raumachse monoton steigende Indizierung der Zellen, das gesamte Gebiet besteht also aus „Sicht des Computers“ aus einem Rechteck mit gitterartiger Unterteilung. Weiterhin müssen alle Gitterlinien von einer Seite zur gegenüberliegenden Seite durchgehend verlaufen. Dieser Gittertyp wird auch als Single-Block bezeichnet. Vorteilhaft ist der geringe Speicherbedarf, sofern der Anteil der „Dead Zones“ (nicht durchströmte Zellen) nicht zu groß wird. Diese Zellen ergeben sich aus der erforderlichen Indizierung, sie werden nicht berechnet, belegen jedoch entsprechenden Speicherplatz. Single-Block-Gitter können nur aus Rechtecken bestehen, wodurch sich bezüglich der Geometrieanpassung einige Einschränkungen ergeben.

Zur Gattung der unstrukturierten Gitter zählt das Multi-Block-Gitter. Es besitzt zwar ebenfalls eine steigende Indizierung wie das Single-Block-Gitter, jedoch nur innerhalb eines jeden Blockes, so dass keine „Dead-Zones“ entstehen. Gegenüber den Single-Block-Gittern wird weniger Speicherplatz belegt und dieser Gittertyp lässt sich an erforderliche Formen besser anpassen. Die Gitterlinien in den einzelnen Blöcken müssen jedoch ebenfalls

ununterbrochen durchlaufend sein und es können ebenfalls nur Rechtecke verwendet werden.

Bei völlig unstrukturierten Gittern werden die Zellen über interne Datenverknüpfungen miteinander verbunden, wodurch eine fortlaufende Indizierung überflüssig und keine Grundstruktur erforderlich wird. Weiterhin können verschiedene Zelltypen miteinander kombiniert werden, wodurch eine hervorragende Geometrieangepassung ermöglicht wird. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde ein Gitter dieses Typs verwendet.

### **4.3 Die verschiedenen numerischen Verfahren**

Grundsätzlich wird zwischen Finite-Differenzen-, Finite-Elemente- und Finite-Volumen-Verfahren unterschieden.

Die Finite-Differenzen-Methode ist das älteste Verfahren, es wurde ursprünglich in Verbindung mit kartesischen Gittern verwendet. Das Verfahren ist sehr schnell, da die Differentialgleichungen direkt durch Differenzgleichungen angenähert werden können. Es sind auch Modelle mit gekrümmten und sogar mit unstrukturierten Gittern entwickelt worden, wobei der Vorteil der genannten Einfachheit jedoch verloren geht. Heute werden Finite-Differenzen-Modelle vorwiegend in der Grundwassersimulation verwendet, da hier eine sehr exakte Anpassung an die vorhandenen Geometrien meist nicht erforderlich ist und die Rechenzeiten sehr kurz sind.

Die Finite-Elemente-Methode wurde anfänglich zur Lösung von Festigkeitsproblemen entwickelt und hat in diesem Bereich eine weite Verwendung gefunden. Seit rund 30 Jahren wird sie verstärkt auch für Problemstellungen im Bereich der Strömungsmechanik angewendet. Der Hauptvorteil liegt in der Verwendung unstrukturierter Gitter, so dass eine sehr gute Geometrieangepassung möglich ist.

Beim Finite-Volumen-Verfahren werden zusätzlich Kontrollvolumen um die Knoten gebildet, die für eine Massenerhaltung in jeder einzelnen Zelle sorgen. Die Finite-Volumen-Verfahren kommen primär aus dem Bereich der Strömungsmechanik, so dass sich die Entwickler dieses Verfahrens schon sehr lange mit den speziellen Problemen dieses Anwendungsgebietes beschäftigt haben und somit eine große Erfahrung vorhanden ist. Das Verfahren kann mit strukturierten und unstrukturierten Gittern angewendet werden.

Mit Ausnahme der Grundwassersimulation kommen aufgrund der besseren Geometrieangepassung für Fragestellungen aus dem Wasserbau und Umweltbereich nur das Finite-Elemente- und das Finite-Volumen-Verfahren zur Anwendung. Ein Vergleich beider Verfahren ist über die unterschiedliche Formulierung und die verwendeten Algorithmen möglich, für die praktische Anwendung jedoch weniger interessant. In der Praxis sind vielmehr die Unterschiede bezüglich Flexibilität, Genauigkeit und auch Rechenzeit wichtig. Hinsichtlich der Geometrieangepassung sind, wenn unstrukturierte Gitter gewählt werden, keine Unterschiede feststellbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die beiden letztgenannten Verfahren bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit aufeinander zu bewegen und das Verfahren als solches nur von sehr begrenztem Einfluss auf die Aussage selbst ist. Die für diese Untersuchungen erforderlichen Berechnungen wurden mit dem Finite-Volumen-Verfahren durchgeführt.

#### **4.4 Die tiefengemittelte Strömungsmodellierung**

In den Bereichen der Wasserwirtschaft und Umwelttechnik sind freie Wasseroberflächen ein häufig anzutreffendes Phänomen. Es sind daher je nach Art des Fließvorganges verschiedene Lösungsansätze verwirklicht worden.

Der günstigste Fall bei zweiphasigen Systemen (z.B. Wasser und Luft) liegt vor, wenn Aussagen oder Annahmen über die vertikale Verteilung der physikalischen Größen gemacht werden können. Es ist dann möglich, die dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen, mit denen sich in Verbindung mit dem Kontinuitätsgesetz nach derzeitigem Wissensstand auch turbulente Strömungsvorgänge exakt beschreiben lassen, in der Art so zu ändern, dass ein Gleichungssystem um eine Dimension reduziert entsteht und die freie Oberfläche als Variable enthält. Mit diesen Flachwassergleichungen lassen sich viele wasserbauliche Fragestellungen beantworten. Für die Modellierung der Strömungsverhältnisse in diesen Untersuchungen kommt dieser tiefengemittelte Ansatz zur Anwendung. Das Modell arbeitet mit dem Kontinuitätsgesetz und den über die Wassertiefe integrierten Navier-Stokes-Differentialgleichungen. Die Flachwassergleichungen setzen eine statische Druckverteilung über die Wassertiefe voraus, gleichbedeutend einer Vernachlässigung der Beschleunigung der Wasserteilchen in der Vertikalen. Diese Vereinfachungen sind notwendig, um den Berechnungsaufwand zu begrenzen und zulässig, da im Verhältnis zur Ausdehnung des Modellgebiets nur geringe Wassertiefen auftreten. Das verwendete Gleichungssystem muss immer instationär arbeiten, auch wenn nur eine stationäre Betrachtung der Strömungsvorgänge erforderlich ist.

Das Modell ist in der Lage, trockene Bereiche selbständig zu erkennen und schaltet die nicht benötigten Zellen automatisch aus. Die so als trocken definierten Bereiche werden nicht weiter in die Berechnung einbezogen. Aus Gründen der numerischen Stabilität ist es erforderlich, dass an den aktiven Knoten ein Mindestwasserstand vorhanden sein muss. In der Praxis bedeutet dies, dass Bereiche im Modell als trocken behandelt werden, die in der Natur aber mit wenigen Zentimetern Wassertiefe überströmt sind. Die Auswirkungen auf die Strömung sind allerdings so gering, dass sie vernachlässigt werden können.

#### **4.5 Die Modellparameter**

Ein Modell stellt immer nur einen Ausschnitt aus der Natur dar, es müssen daher an seinen Begrenzungen entsprechende Bedingungen, die sogenannten Randbedingungen, festgelegt werden. Als Randbedingungen werden der Zufluss von oberstrom in das Modell und der Wasserstand am unterstromigen Modellauslass benötigt. Alternativ kann ein minimaler Unterwasserstand vorgegeben werden, das Modell berechnet dann die Grenztiefe am Auslassquerschnitt und nach wenigen Elementreihen stellt sich ein naturkonformer Wasserstand automatisch ein. In diesen Untersuchungen wurde so vorgegangen. Diese Vorgehensweise ist jedoch nur zulässig, wenn ein Rückstau von unterstrom ausgeschlossen werden kann.

Weiterhin sind für die Strömungsmodellierung Modellparameter erforderlich, mit deren Hilfe eine Anpassung der Berechnungsergebnisse an vorliegende Messwerte möglich wird. Da numerische Modelle immer eine Vereinfachung der vorliegenden physikalischen Gegebenheiten darstellen, können diese Modelle über Parameter an die jeweiligen

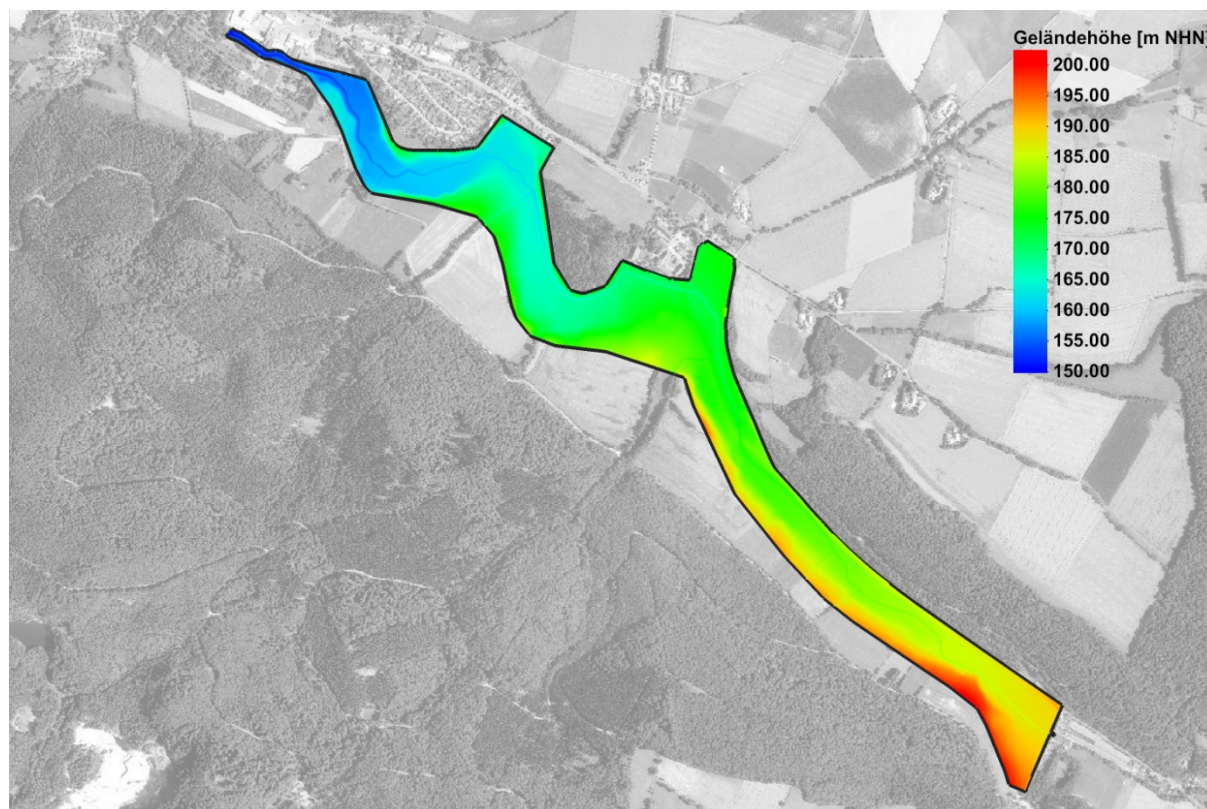
Gegebenheiten angepasst werden. Diese werden jedem Element über Geländestrukturtypen zugeordnet.

Primär handelt es sich dabei um den Einfluss der Geländerauheit, sie wird über die Strickler-Beiwerte vorgegeben und ist eine empirisch erfassbare Größe. Ein direkter Vergleich mit Strickler-Beiwerten eines 1D-Modells ist jedoch nicht möglich, da der Beiwert im 2D-Modell ausschließlich den Einfluss der Geländerauheit erfasst, während er im 1D-Modell sowohl Rauheits- als auch Turbulenzeffekte beinhaltet und sämtliche Modellvereinfachungen ausgleichen muss.

## 5 Modellaufbau und Berechnungen

### 5.1 Modellaufbau und Berechnung des Istzustandes

Das Modell wurde zunächst für den Istzustand erstellt, d.h. die Geländetopographie entspricht dem jetzigen Zeitpunkt. Es bildet die Lenne auf einer Strecke von rund 4.330 Metern ab (etwa von Station 12.547 bis 16.880) und hat eine Fläche von etwa 77 Hektar. Die Geländehöhen reichen von 150 m NHN bis ca. 201 m NHN. Die Lage und Ausdehnung des Modellgebietes ist in Abbildung 5.1 dargestellt (aufgrund der sehr feinen Auflösung des Berechnungsnetzes, wäre eine erheblich größere Abbildung zum Erkennen der Zellen erforderlich, auf eine Darstellung des Berechnungsnetzes musste daher verzichtet werden).



**Abbildung 5.1:** Darstellung des Modellgebietes mit Geländehöhen für den Istzustand

Die Netzqualität kann wesentlich die numerische Stabilität und Geschwindigkeit der iterativen Berechnungsverfahren bestimmen, so dass der Ausgestaltung des Berechnungsnetzes nicht nur aus Gründen der Genauigkeit der Ergebnisfindung eine zentrale Bedeutung zukommt. Neben der hydraulisch begründeten Anordnung und Größe der Elemente sind aber selbstverständlich auch die vorhandenen Geländestrukturen im Netz abzubilden. Das so erstellte Modell besteht aus nahezu 56.000 Elementen und mehr als 38.000 Knoten.

Für das Strömungsmodell wurden insgesamt 6 Strukturtypen definiert, die in Tabelle 5.1 aufgelistet sind, in Abbildung 5.2 ist ihre räumliche Zuordnung dargestellt. Ein wesentlicher Anteil des Modells besteht aus landwirtschaftlich genutzten Flächen bzw. Grünland.

**Tabelle 5.1:** Rauheitswerte der verwendeten Geländestrukturtypen

Strukturtyp [-]	kst-Wert [m <sup>1/3</sup> /s]	Manning n [s/m <sup>1/3</sup> ]	absolute Rauheit k [m]
Lennesohle	30	0,03333	~ 0,420
Lenneböschung	25	0,04000	~ 1,250
Befestigungen	50	0,02000	~ 0,020
Gehölze	20	0,05000	~ 4,800
Grünland	40	0,02500	~ 0,075
Siedlung	25	0,04000	~ 1,250



**Abbildung 5.2:** Strukturtypen im Modell des Istzustandes

**Hinweis:** Grünland und landwirtschaftliche Flächen wurden in einem Strukturtyp zusammengefasst, da der Ackerboden bei Überflutung ähnlich glatt wird wie das Grünland. Weiterhin existieren im Winterhalbjahr, wenn typischerweise die größeren Hochwässer ablaufen, keine hochwachsenden Pflanzen, so dass für diese Untersuchungen eine Differenzierung nicht erforderlich war. Ferner wurden Bäche und Gehölze in einem Strukturtyp zusammengefasst und Siedlungsbereiche einheitlich mit dem Typ Siedlung berücksichtigt (außer größere Straßen und Gewässer).

Die oben aufgeführten Rauheitswerte sind Literatur- und Erfahrungswerte, eine Modelleichung wurde nicht durchgeführt. Darunter wird die Anpassung der

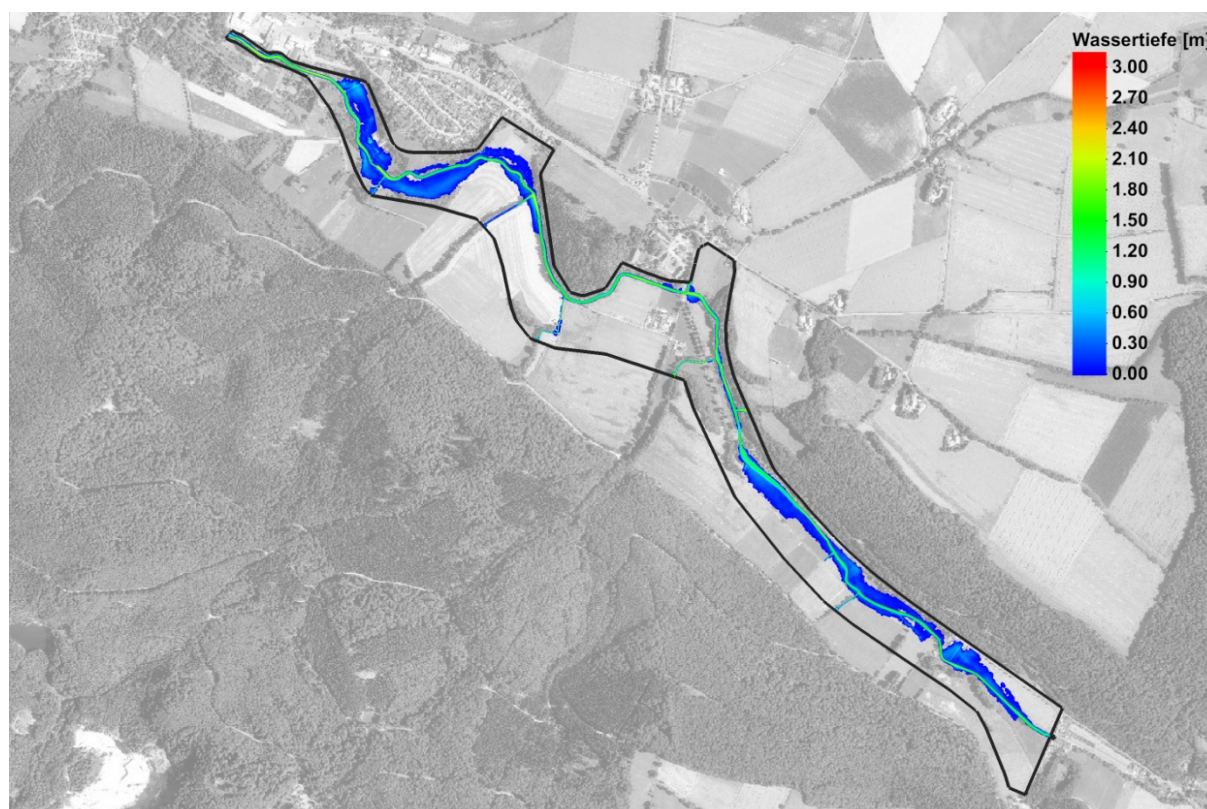
Widerstandsparameter in der Form verstanden, dass gemessene und unter gleichen Bedingungen berechnete Abflusssituationen zu nahezu gleichen Ergebnissen führen. Das Modell ist danach in der Lage, sehr zuverlässige Ergebnisse für einen weiten Abflussbereich zu liefern. Dabei handelt es sich um Absolutwerte und die sind bei Berechnungen dieser Art der kritische Punkt. Die Ermittlung von Relativwerten (beispielsweise für Variantenrechnungen) ist speziell bei geringen Änderungen deutlich genauer. Daher konnte hier auf eine Modelleichung verzichtet werden.

Weiterhin ist anzumerken, dass Strömungsmodelle des hier verwendeten Typs prinzipbedingt nur die Oberflächenströmung berechnen können, Effekte die beispielsweise durch das Grundwasser oder Kanalsysteme entstehen, werden nicht erfasst. Im numerischen Modell sind daher möglicherweise Bereiche trocken, die in der Realität nass sind. Da es sich hierbei jedoch üblicherweise nur um eingestaute Bereiche mit stehendem Wasser handelt, kann ihr Einfluss auf das Abflussgeschehen meist vernachlässigt werden.

Grundsätzlich ist darüber hinaus zu beachten, dass die Berechnungen instationär erfolgten und die Abbildungen immer nur eine Momentaufnahme darstellen. Im Detail ändert sich die Strömung mit jedem Zeitschritt und schwankt daher ebenso, wie in der Realität.

Die Abbildung 5.3 zeigt, dass das  $HQ_{100}$  in 2 Bereichen deutlich ausufernd; im oberen Bereich zwischen Linnenplan und der B64-Brücke (sogenannte Schwarze Brücke) und im unteren Modellbereich, oberhalb von Eschershausen.

Erstaunlicherweise reicht die hydraulische Leistungsfähigkeit der Lenneprofile im Abschnitt zwischen den genannten Bereichen aus, um das  $HQ_{100}$  vollständig im Gerinne abführen zu können. Auch die beiden B64-Brücken sind ausreichend leistungsfähig.



**Abbildung 5.3:** Berechnete Wassertiefen für das  $HQ_{100}$  im Istzustand

## 5.2 Modellumbau und Berechnung der Planungsvarianten

Der Untersuchung der hier vorgestellten Planungsvarianten ging eine Vielzahl von Betrachtungen und Berechnungen voraus, die hier nicht alle detailliert wiedergegeben werden sollen, da sie aus verschiedenen Gründen nicht weiter verfolgt wurden.

Beispielsweise wurden zunächst insgesamt 6 Verwallungen untersucht, es stellte sich jedoch heraus, dass das Rückhaltevermögen der beiden unteren (direkt oberhalb von Eschershausen) aufgrund der Höhenlage vergleichsweise gering war und voraussichtlich einen großen Bauaufwand erfordert hätten. Diese beiden Verwallungen wurden daher nicht weiterverfolgt. Ein oberhalb davon befindlicher Wall könnte dagegen (eine entsprechende Höhe vorausgesetzt) erhebliche Abflussmengen zurückhalten. Er wird noch detailliert erläutert. Im oberen Gewässerabschnitt zwischen Linnenplan und der B64-Brücke wurden mit Teilmodellen Varianten mit 3 und 4 Verwallungen betrachtet, aus denen die hier nun vorgestellten entwickelt wurden.

Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber und den beteiligten Fachbehörden, wurde eine Unterteilung in 2 Abschnitte beschlossen. Der Abschnitt 1 reicht von Linnenplan bis zur B64-Brücke und der Abschnitt 2 erstreckt sich unterhalb bis zum Ortsbeginn von Eschershausen.

Im Abschnitt 1 wurden 3 Verwallungen sowie eine Flutmulde unterhalb von Linnenplan in das Modell integriert und 2 ehemalige Gerinneabschnitte wieder reaktiviert. Der Abschnitt 2 enthält gegenüber dem Istzustand lediglich eine Verwallung. Die Abbildung 5.4 zeigt die geänderten Strukturtypen und die Lage der Verwallungen in beiden Abschnitten.

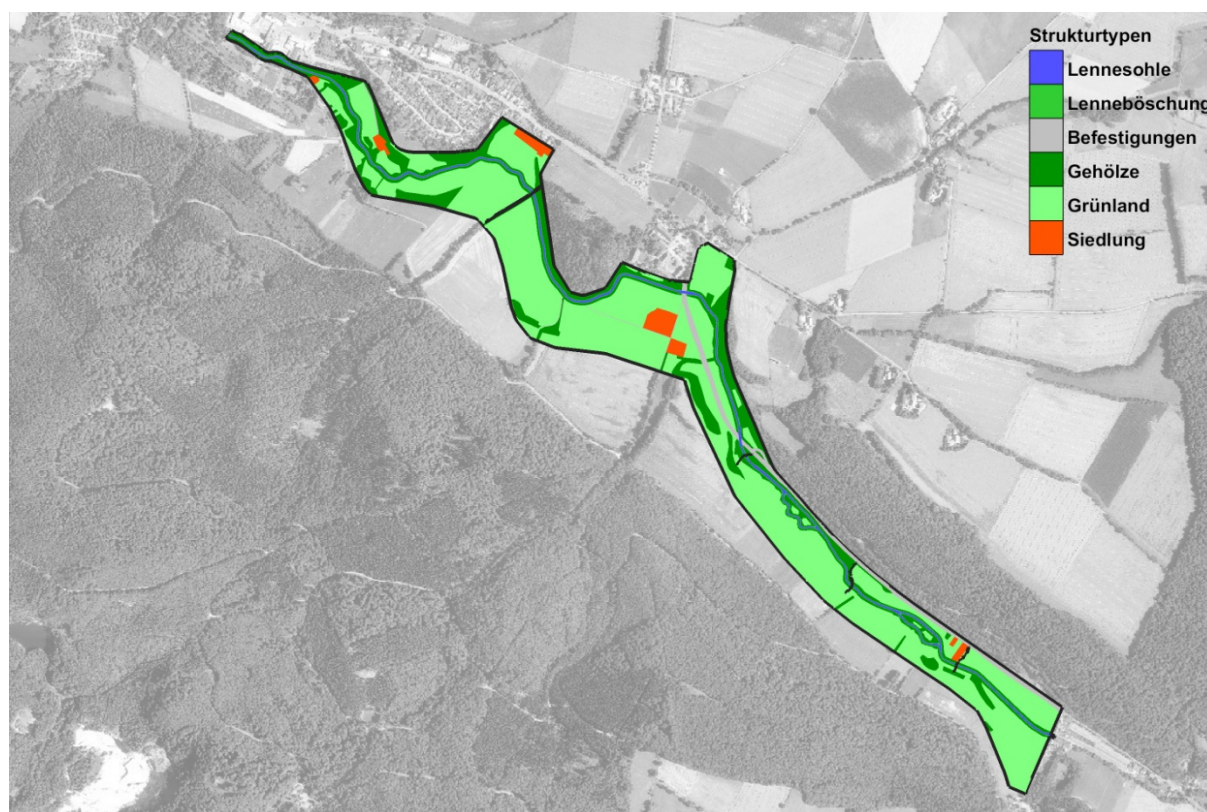
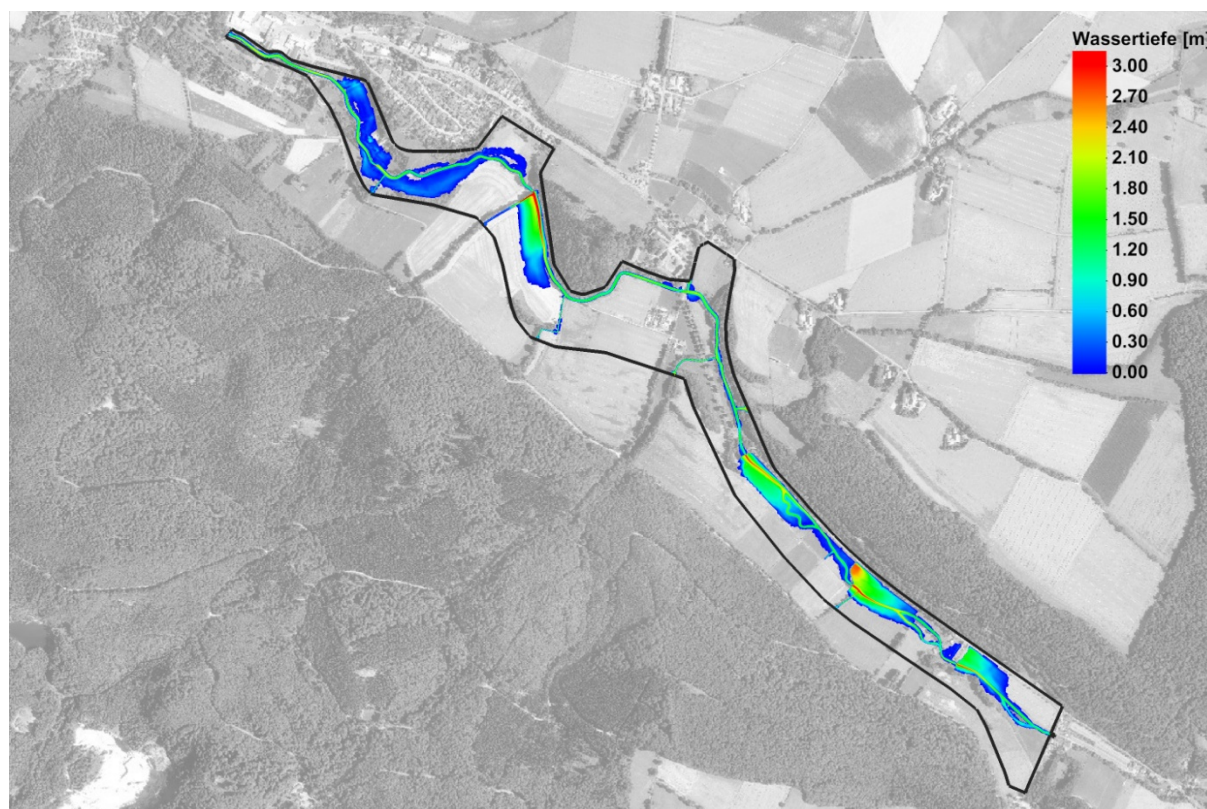


Abbildung 5.4: Strukturtypen im Modell des Planungszustandes



Die Verwallungen wurden so ausgelegt, dass sie einen Aufstau bis kurz unterhalb des Höhenniveaus der angrenzenden B64 bewirken und keine zusätzliche Gefährdung für die vorhandenen Gebäude entsteht.

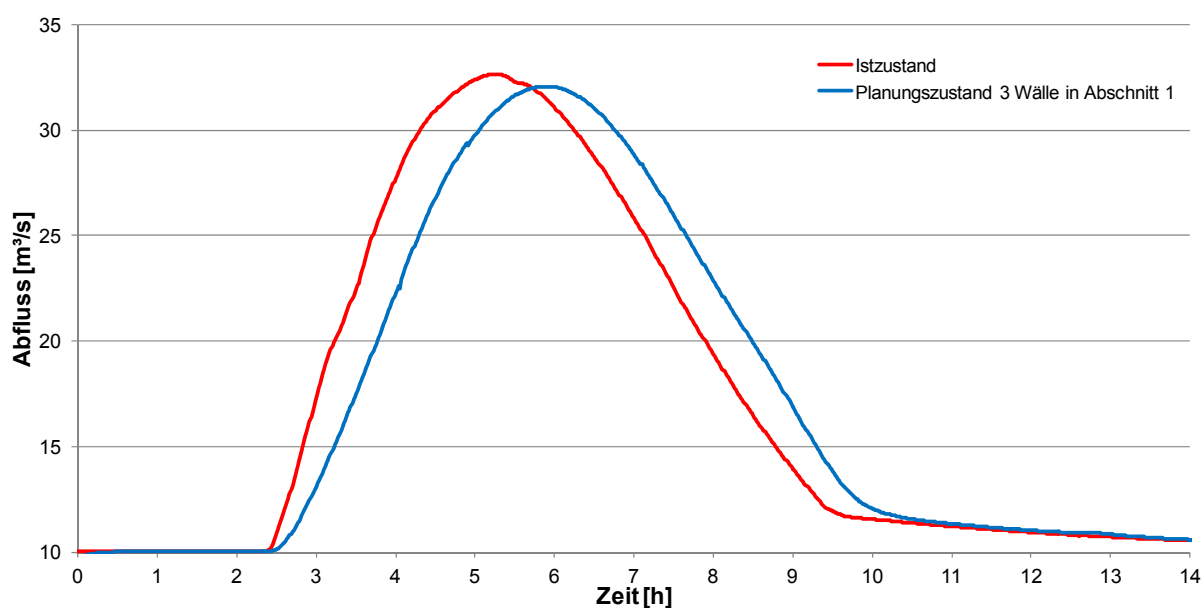
Aus Abbildung 5.5 sind die Wassertiefen sowie die Ausdehnung des überschwemmten Bereiches ersichtlich. Es zeigt sich, dass die eingestauten Flächen im Abschnitt 1 gegenüber dem Istzustand nur sehr moderat zunehmen. Der Aufstau durch die Verwallung 4 im Abschnitt 2 hingegen war vorher kaum vorhanden.



**Abbildung 5.5:** Berechnete Wassertiefen für das  $HQ_{100}$  im Planungszustand mit 4 Verwallungen

Die Wirkung der 3 Verwallungen im Abschnitt 1 auf die Ganglinie ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Deutlich ist die zeitliche Verschiebung des Scheitels aufgrund des Rückhalts erkennbar. Der Scheitel selbst nimmt um knapp  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  ab. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Ausführung der Fließquerschnitte in den Verwallungen aus ökologischen Gründen zunächst sehr moderat gewählt wurde. Es wird davon ausgegangen, dass mit einiger Feinarbeit im Rahmen der Ausführungsplanung eine Minderung des Scheitelwertes von 1 bis  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht wird.

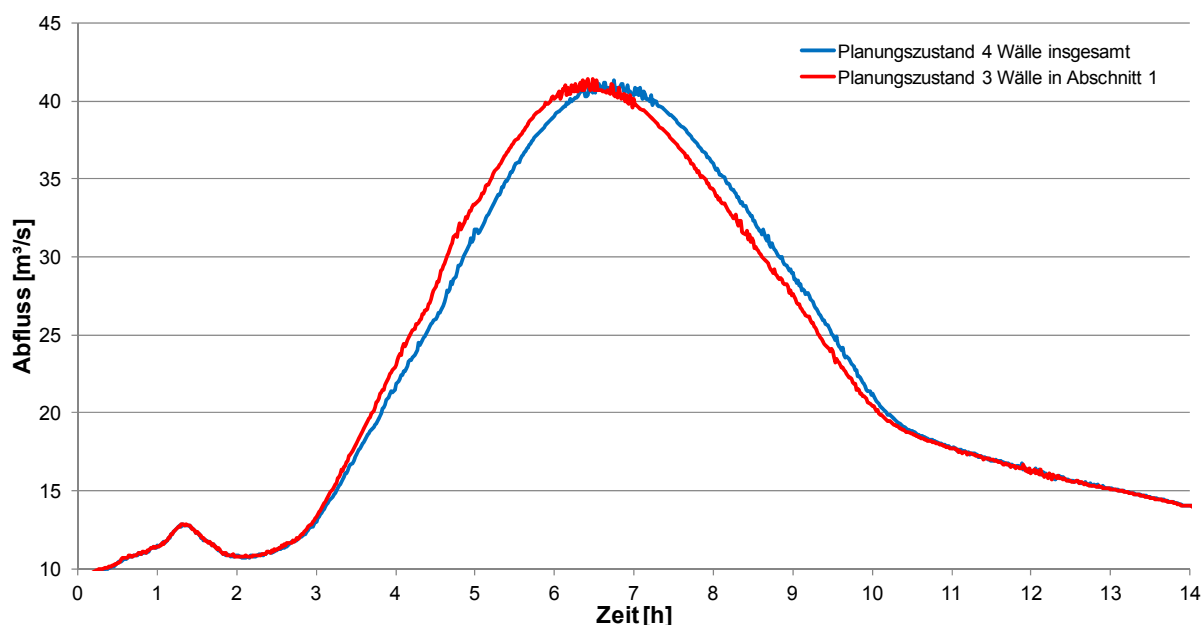
Vergleichsrechnungen mit einem vorhandenen 2D-Modell in der Ortslage von Eschershausen haben gezeigt, dass im Bereich zwischen  $30$  und  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  und je nach örtlichen Gegebenheiten, die Abflussminderung von  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  eine Wasserspiegelabnahme überwiegend zwischen  $3$  und fast  $5 \text{ cm}$  bewirkt. Somit kann voraussichtlich eine Senkung des Wasserspiegels im Bereich von etwa  $5$  bis  $7 \text{ cm}$  realisiert werden.



**Abbildung 5.6:** Berechnete Ganglinien am Ende des Abschnittes 1

Die Betrachtung des Abschnittes 2 beschränkt sich zwar nur auf die Verwallung 4, allerdings haben die Voruntersuchungen gezeigt, dass hier eine sehr große Bandbreite an Möglichkeiten zum Hochwasserrückhalt besteht. Theoretisch könnte mit einer Stauhöhe von bis zu fast 172 m NHN gearbeitet werden, ohne dass Gebäude oder Straßen betroffen wären. Bezogen auf den tiefsten Sohlenpunkt im Gerinne, bedeutet das jedoch eine Stauhöhe von mehr als 9 m (!). Dazu wäre allerdings eine rein technische Bauweise mit entsprechenden Regel- und Absperreinrichtungen erforderlich.

Zunächst wurde daher untersucht, welche Verbesserungen mit einer ökologisch verträglichen Bauweise, wie in Abschnitt 1, erreicht werden können.



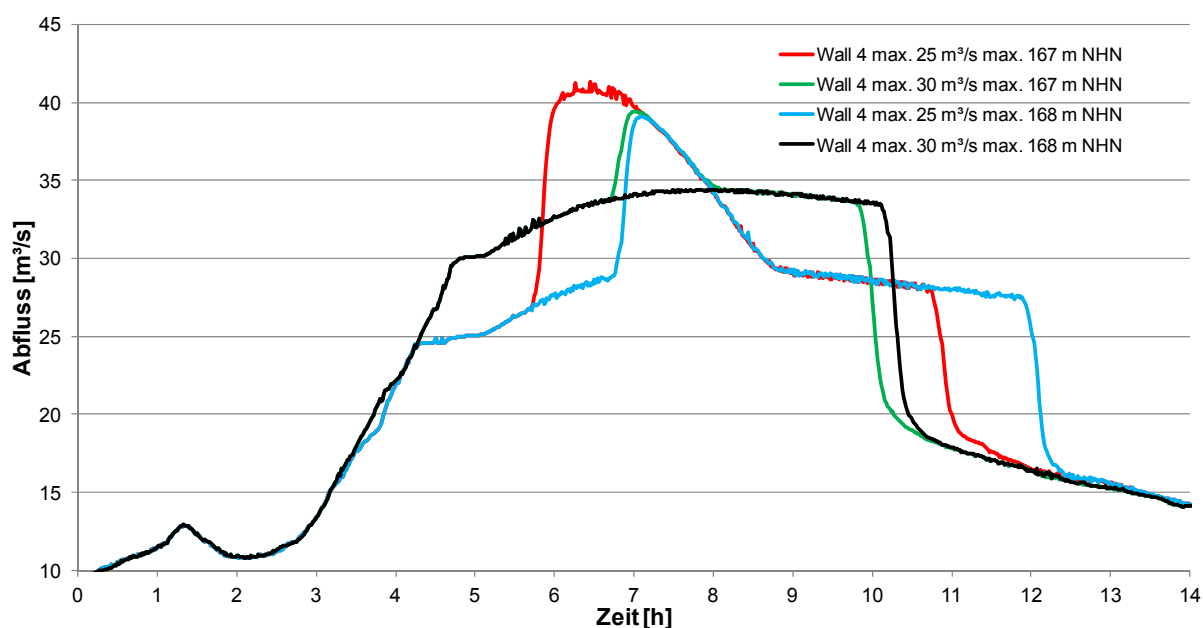
**Abbildung 5.7:** Berechnete Ganglinien am Modellende (Wall 4 unregelt)

Abbildung 5.7 stellt daher die berechneten Ganglinien am Modellende dar, wenn zusätzlich zu den 3 Wällen im Abschnitt 1 noch ein ebenfalls unregelter Wall 4 in Abschnitt 2 dazukommt. Damit ließe sich voraussichtlich ein Stauziel von etwa 166 m NHN erreichen (Wassertiefe max. etwa 2,2 m außerhalb des Gerinnes). Dabei zeigt sich zwar die zeitliche Verschiebung, allerdings kaum eine Minderung des Scheitels. Im Folgenden wird daher eine geregelte Stauhaltung für den Wall 4 betrachtet.

In Abbildung 5.8 sind die Ganglinien von 4 verschiedenen Szenarien dargestellt. Die maximale Stauhöhe beträgt 167 bzw. 168 m NHN und die Regelung begrenzt den Durchfluss auf 25 bzw. 30 m<sup>3</sup>/s (Absprache mit dem Auftraggeber).

Beim Stauziel von 167 m NHN kann die Abflussmenge nicht vollständig zurückgehalten werden und die Welle bricht beim Überschreiten des Stauziels bei beiden Abflussbegrenzungen durch. Bei der Begrenzung auf 30 m<sup>3</sup>/s erwartungsgemäß später.

Ein Stauziel von 168 m NHN reicht dagegen aus, um bei einer Abflussbegrenzung auf 30 m<sup>3</sup>/s die größeren Abflussspitzen der Hochwasserwelle zurückzuhalten. Bei maximal 25 m<sup>3</sup>/s reicht das Volumen noch nicht aus, dazu müsste das Stauziel weiter erhöht werden.



**Abbildung 5.8:** Berechnete Ganglinien am Modellende (Wall 4 geregelt)

**Wichtiger Hinweis!** Zur Einschätzung dieser Ergebnisse muss beachtet werden, dass die hier betrachtete hundertjährige Hochwasserwelle des synthetischen 2-Stunden-Ereignisses zwar den höchsten Scheitel bewirkt, aber nicht zwangsweise das größte Volumen. Es kann also passieren, dass ein Hochwasserereignis mit einem geringeren Scheitel, aber einem größeren Wellenvolumen, nicht vollständig zurückgehalten werden kann und ein Teil der Welle zeitlich verzögert dennoch durchbricht!

## 6 Zusammenfassung und Empfehlungen

In der Vergangenheit ist die Lenne bei großen Hochwasserabflüssen wiederholt über die Ufer getreten und hat Schäden in den Ortslagen von Scharfoldendorf und Eschershausen verursacht.

Da die Stadt Eschershausen die Renaturierung der Lenne in einem Abschnitt zwischen Linnenplan und Eschershausen plant, sollte das Potenzial einer Renaturierung mit Synergien auch in Bezug auf den Hochwasserschutz untersucht werden.

Es wurden daher Möglichkeiten zum Hochwasserrückhalt durch Reaktivierung von Retentionsräumen im genannten Gewässerabschnitt untersucht und Maßnahmen in Form von Verwallungen entwickelt.

Grundlage dafür, war zunächst die Ermittlung der relevanten Abflussmengen, maßgeblich ist hier der hundertjährige Hochwasserabfluss  $HQ_{100}$ . In früheren Untersuchungen zur Verbesserung der Hochwassersituation und zur Planung von Renaturierungsmaßnahmen an Lenne, Ruthe und Flötebach, wurde durch unser Büro bereits ein Niederschlags-Abfluss-Modell aufgebaut, mit dem die Hochwasserabflüsse der einzelnen Gewässer (und deren Abschnitte) ermittelt werden konnten. Zur genaueren Bestimmung der Abflüsse oberhalb von Eschershausen, erfolgte in diesen Untersuchungen eine Detaillierung des vorhandenen Modells.

Den hier vorgestellten Planungsvarianten ging eine Vielzahl von Betrachtungen und Berechnungen voraus, die hier nicht alle detailliert wiedergegeben wurden, da sie aus verschiedenen Gründen nicht weiter verfolgt wurden.

Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber und den beteiligten Fachbehörden, wurde eine Unterteilung in 2 Abschnitte beschlossen. Der Abschnitt 1 reicht von Linnenplan bis zur B64-Brücke und der Abschnitt 2 erstreckt sich unterhalb bis zum Ortsbeginn von Eschershausen.

Im Abschnitt 1 wurden 3 Verwallungen und eine Flutmulde unterhalb von Linnenplan berücksichtigt sowie 2 ehemalige Gerinneabschnitte wieder angebunden. Der Abschnitt 2 enthält gegenüber dem Istzustand lediglich eine Verwallung, die jedoch (eine entsprechende Höhe vorausgesetzt) erhebliche Abflussmengen zurückhalten und damit die Hochwassersituation in Eschershausen und Scharfoldendorf deutlich verbessern könnte.

Durch die 3 Verwallungen im Abschnitt 1 nimmt der Scheitelwert der Hochwasserwelle um knapp  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  ab. Allerdings wurde die Ausführung der Fließquerschnitte in den Verwallungen aus ökologischen Gründen zunächst sehr moderat gewählt. Es wird davon ausgegangen, dass mit einiger Feinarbeit im Rahmen der Ausführungsplanung eine Minderung des Scheitelwertes von 1 bis  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  erreicht wird.

Vergleichsrechnungen mit einem vorhandenen 2D-Modell in der Ortslage von Eschershausen haben gezeigt, dass im relevanten Abflussbereich je nach örtlichen Gegebenheiten, der Wasserspiegel überwiegend zwischen 3 und fast 5 cm sinken würde, wenn der Abfluss um  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  vermindert wird. Somit kann voraussichtlich eine Senkung des Wasserspiegels im Bereich von etwa 5 bis 7 cm realisiert werden.

Der Rückhalt deutlich größerer Abflussmengen und damit auch eine größere Wasserspiegelabsenkung in Eschershausen, könnte mit der Verwallung 4 im Abschnitt 2 erreicht werden. Im betrachteten Beispiel konnte die Hochwasserwelle deutlich gekappt werden. Dazu wären

jedoch vermutlich technischere Lösungen erforderlich, die in weitergehenden Planungen berücksichtigt werden sollten.

Ferner muss zur Einschätzung der Ergebnisse beachtet werden, dass die hier betrachtete hundertjährige Hochwasserwelle des synthetischen 2-Stunden-Ereignisses zwar den höchsten Scheitel bewirkt, aber nicht zwangsweise das größte Volumen. Es kann also sein, dass ein Hochwasserereignis mit einem geringeren Scheitel, aber einem größeren Wellenvolumen, nicht vollständig zurückgehalten werden kann und ein Teil der Welle zeitlich verzögert dennoch durchbricht!

Weitere Details zur genauen Auslegung sowie des erforderlichen Objektschutzes von Gebäuden sind im Rahmen der Ausführungsplanung zu erarbeiten. Das gilt insbesondere auch für die Sohlen- und Böschungssicherung, da teilweise erhebliche Fließgeschwindigkeiten auftreten werden! Im Rahmen der weitergehenden Planungen sollte auch der erforderliche Unterhaltungsaufwand detailliert betrachtet werden.

**Aufgestellt:**

Beverungen, den 25.03.2019



.....

M. Sc. Lothar Klauke