

Auftrag (AG): H-oeH vom 23.06.2020
Projektnummer (AN): W-11280
31.03.2023



Hochwasserrisikomanagementplan inklusive Starkregenrisikomanagement für das Spitzkunnersdorfer Wasser als Pilotprojekt



Anhang 3 - Dokumentation des zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells und der Berechnungen

Auftraggeber: **Gemeinde Leutersdorf**
Sachsenstraße 9, 02794 Leutersdorf
☎ 03586 / 33 07 – 0

Auftragnehmer:



An der Pikardie 8, 01277 Dresden
☎ 0351 / 21 683 - 30

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	2
2	Einzugsgebiet und Gewässernetz	2
3	Geodätische Grundlagen des 2D-HN-Modellnetzes	4
3.1	Übernommene Bestandsdaten	4
3.2	Erfassung neuer Daten.....	5
3.3	Digitales Geländemodell.....	5
4	Softwaretechnische Grundlagen	5
4.1	Methodik des 2D-HN-Modellansatzes	5
4.2	Beschreibung des verwendeten Berechnungsprogramms	6
4.3	Parametrisierung des Modells	9
5	Einsatzbereiche und Modellbezeichnungen	10
5.1	Berechnungssimulationen zur Ermittlung der Hochwasserscheitelabflüsse HQT	11
5.2	Hochwassersimulationen für das Spitzkunnersdorfer Wasser	13
5.3	Berechnungssimulationen zur Ermittlung der Starkregengefährdung	14
6	Berechnungen	16
6.1	Ermittlung der Leistungsfähigkeiten des Gewässers und der Brücken.....	16
6.2	Ermittlung hydrodynamischer Größen im Istzustand.....	16
6.3	Feststofftransportberechnungen	17
6.4	Ermittlung hydrodynamischer Größen im Planzustand	18
6.5	Weiterverarbeitung der Modellergebnisse	19

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 -

1 Veranlassung und Zielsetzung

Um die Gefährdungslage im Leutersdorfer Teil des Einzugsgebiets des Spitzkunnersdorfer Wassers bei Starkregen und die hydraulischen Auswirkungen der vorgeschlagenen Schutzmaßnahmen ermitteln zu können, wurde im Rahmen des Hochwasserrisikomanagementplans (HWRMP) eine zweidimensionale hydrodynamisch-numerische Modellierung (2D-HN-Modellierung) vorgenommen.

Damit lassen sich wichtige Parameter wie bspw. Wasserstände, Fließgeschwindigkeiten, spezifische Abflüsse, Schubspannungen und Abflussaufteilungen sowie die Überflutungsausbreitungen realitätsnah ermitteln.

Die 2D-HN-Modellierung dient im HWRMP der Simulation von Starkregenereignissen, den damit einhergehenden Sturzfluten und den daraus entstehenden Hochwassern im Spitzkunnersdorfer Wasser. Bei den Berechnungssimulationen werden die räumlich und zeitlich differierenden Abflussbeiwerte nach anerkannten Methoden ermittelt, so dass die Modellierung sowohl die Abflussbildung als auch die Prozesse der Abflusskonzentration und der Wellenfortpflanzung beinhaltet.

Mithilfe der Modellierung wurden also einerseits hydrologische Untersuchungen in Form einer Niederschlag-Abfluss-Modellierung (N-A-Modellierung) vorgenommen und andererseits auch das Strömungsverhalten des abfließenden Wassers berechnet und analysiert.

Die N-A-Modellierung mit ihren hydrologischen Ansätzen und den Untersuchungen zur Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse ist im Anhang 2 des HWRMP beschrieben. Im vorliegenden Anhang 3 werden die Grundlagen der Erstellung und Parametrisierung des 2D-HN-Modells sowie die Berechnungen von wild abfließendem Wasser auf den Talhängen und von Hochwasserabflüssen im Spitzkunnersdorfer Wasser beschrieben.

2 Einzugsgebiet und Gewässernetz

Das Spitzkunnersdorfer Wasser befindet sich im Süden der Oberlausitz im Landkreis Görlitz nahe der deutsch-tschechischen Grenze im Freistaat Sachsen. Das Gewässer durchfließt in nordöstlicher Richtung die Ortslagen Spitzkunnersdorf und Niederoderwitz und wird durch zahlreiche seitliche Zuflüsse gespeist, ehe es in Niederoderwitz, einem Ortsteil der Gemeinde Oderwitz, als rechter Zufluss in das Landwasser mündet. Es liegt damit in der Gewässerfolge Landwasser – Mandau – Lausitzer Neiße – Oder – Ostsee.

Das Einzugsgebiet (vgl. Abbildung 2.1) des Spitzkunnersdorfer Wassers umfasst eine Größe von ca. 11,92 km² innerhalb der Gemarkungen Spitzkunnersdorf, Nieder- und Oberoderwitz sowie Hainewalde. Es ist Teil des südöstlichen Lausitzer Berglands, einer typischen hügeligen Mittelgebirgslandschaft. Eine Übersicht zum Gewässernetz im Einzugsgebiet des Spitzkunnersdorfer Wassers im größeren Maßstab zeigt die Karte in der Anlage 1 des HWRMP.

Im Norden bildet der 510 m hohe Oderwitzer Spitzberg, einer der markantesten Kegelberge der östlichen Oberlausitz und der 413 m hohe Hofeberg die natürliche Wasserscheide. Im Südosten und Süden wird das Einzugsgebiet durch die Nordhänge der zum Landschaftsschutzgebiet Mandautal gehörenden Bergkette des Forsten und des Kälberbusches begrenzt.

Im Südwesten bestimmen der Kiesberg und der Forstenberg (Gipfelhöhe 459 m), im Süden der Butterberg (Höhe ca. 365 m) und der Steinberg (Gipfelhöhe 386 m) die Grenze der Einzugsfläche. Östlich begrenzt der Große Stein (Spitzkunnersdorfer Spitzberg), ein 471 m hoher Phonolithberg, den Rand des Einzugsgebietes. In der Basaltdecke des Großen Steins liegt das Quellgebiet des Spitzkunnersdorfer Wassers.

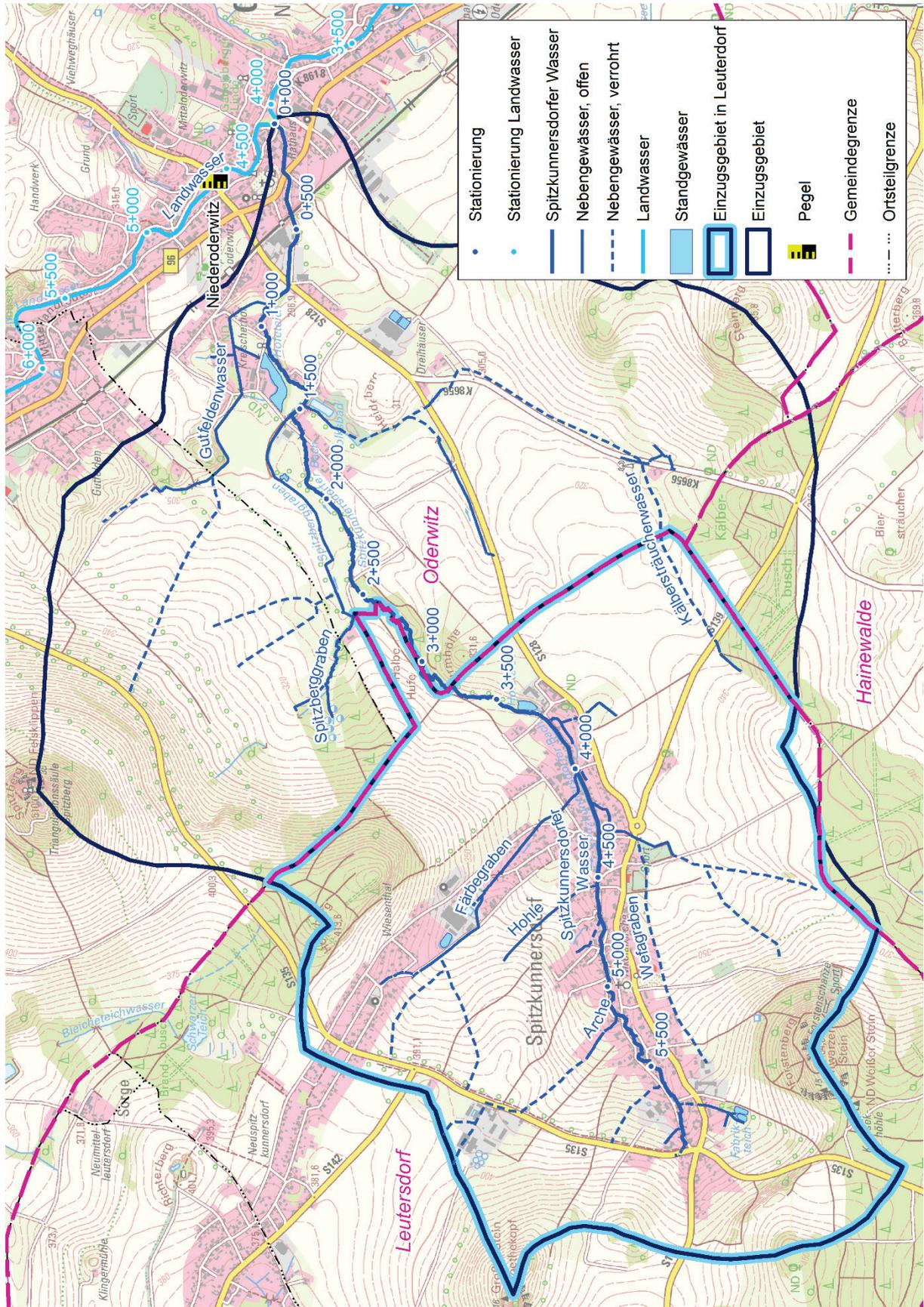


Abbildung 2.1: Einzugsgebiet des Spitzkunnersdorfer Wassers und blau umrandeter Anteil der Gemeinde Leutersdorf im Oberlauf

Außerhalb der Siedlungsräume der Ortslagen Spitzkunnersdorf und Niederoderwitz dominiert der Offenland-Charakter, meist sind nur die Einzelberge und Bergkuppen bewaldet.

Die Geländeneigungen im Einzugsgebiet betragen ausgehend von den umgebenden Bergen zum Spitzkunnersdorfer Wasser hin zwischen ca. 6 bis 11%. Die Gefälle zu den Zuflüssen Gutfeldenwasser, Spitzberggraben und Wefagraben liegen zwischen ca. 7 bis 13%.

Das Längsgefälle der Sohle des Spitzkunnersdorfer Wassers nimmt mit dem Gewässerlauf stetig ab. Während es im Oberdorf stromauf der Arche-Mündung (km 5+156) zwischen 5 und > 6 % liegt, beträgt es an den Mündungen des Wefagrabens und des Färbegrabens im Unterdorf nur ca. 1 %.

Im Unterdorf nach der Mündung des Färbegrabens beträgt das Längsgefälle der Gewässer-sohle bis zum Ortsausgang nur 0,3 ... 0,6 %. Nach dem Hofeteich herrscht mit > 1 % bis zur Gemeindegrenze wieder ein größeres Längsgefälle, bevor es in der Gemeinde Oderwitz bis zur Mündung mit fast einheitlich 0,5 % wieder abflacht.

Eine Abbildung im Kapitel 1.2.1 des HWRMP-Erläuterungsberichte zeigt einen Längsschnitt des Spitzkunnersdorfer Wassers und verdeutlicht die beschriebenen Gefälleverhältnisse.

Das Spitzkunnersdorfer Wasser besitzt eine Vielzahl von Zuflüssen, von denen einige zum Teil oder vollständig verrohrt sind. Seine wichtigsten Zuflüsse sind, in Fließrichtung gesehen,

- die Arche, Mündung bei km 5+156 von links,
- die Hohle, Mündung bei km 4+536 von links,
- der z.T. verrohrte Wefagraben (mit Entlastungsgraben/ Sportplatz), Mündung bei km 4+159 von rechts,
- der Färbegraben, Mündung bei km 4+021 von links,
- der Spitzberggraben, Mündung bei km 1+551 (Gemeinde Oderwitz) von links,
- das z.T. verrohrte Kälbersträucherwasser, Mündung bei km 1+473 (Gemeinde Oderwitz) von rechts sowie
- der Gutfeldenwasser, Mündung bei km 0+881 (Gemeinde Oderwitz) von links.

Weder am Spitzkunnersdorfer Wasser noch an seinen Nebenbächen existieren ständig beobachtete Pegel. Etwa 470 m stromauf der Mündung des Spitzkunnersdorfer Wassers befindet sich der Hochwassermeldepegel Niederoderwitz im Landwasser, einem Gewässer 1. Ordnung. Er erfasst den Zufluss des Spitzkunnersdorfer Wassers also nicht.

Ausführlichere Beschreibungen des Untersuchungsgebiets u.a. mit seinen wasserwirtschaftlichen Anlagen, Brücken und Querbauwerken finden sich im Kapitel 1.2 des Erläuterungsberichts des HWRMP. Die Schutzgebiete nach SächsNatSchG und nach Natura 2000 sowie die Flächennutzung im Einzugsgebiet des Spitzkunnersdorfer Wassers sind in der Anlage 2 des HWRMP kartografisch dargestellt.

3 Geodätische Grundlagen des 2D-HN-Modellnetzes

3.1 Übernommene Bestandsdaten

Für das Landwasser vom Pegel Niederoderwitz ca. 500 m vor bis ca. 500 m nach der Mündung des Spitzkunnersdorfer Wassers (K8618-Brücke über das Landwasser in Niederoderwitz) wurde ein 2017/ 2018 erstelltes Bestandsmodell der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV) übernommen.

3.2 Erfassung neuer Daten

Die Bachbetten des Spitzkunnersdorfer Wassers und seiner relevanten Nebenbäche einschließlich der Querbauwerke wie Brücken, Stege, Durchlässe, Sohlenabstürze etc. sowie die gewässernahen Bereiche, wie bspw. parallel verlaufende Straßen, Wege und Teiche, wurden 2020 von der DGIS GmbH terrestrisch vermessen. Diese Informationen liegen dem 2D-HN-Modellnetz zugrunde.

Im Gemeindegebiet Oderwitz erfolgte die Vermessung mit einem etwas verminderten Detaillierungsgrad, weil für die 2D-HN-Modellierung von Spitzkunnersdorf bis zum Landwasser im HWRMP vorrangig die Fortpflanzung und Verformung von Hochwasserwellen und weniger die genaue Ermittlung von Wasserständen und Überschwemmungsflächen von Interesse sind.

Von den Einläufen der Brücken und Durchlässe am Spitzkunnersdorfer Wasser wurden jeweils eine Querschnittsansicht und ein Foto angefertigt. Darüber hinaus wurde ein Längsschnitt des Spitzkunnersdorfer Wassers angefertigt, der die Gewässersohle, die beidseitigen Uferhöhen und kreuzende Bauwerke zeigt.

Die Vermessungsdaten liegen ausschließlich digital im .dwg-Format (die Fotos im .jpg-Format) vor. Sie befinden sich im Anhang 1 des HWRMP.

3.3 Digitales Geländemodell

Das 2D-HN-Modellnetz außerhalb der terrestrisch vermessenen oder mit dem Bestandsmodell am Landwasser abgedeckten Bereiche wurde mithilfe folgender Geländemodelldaten aufgebaut, die vom Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN) bereitgestellt wurden:

- DGM-Höhenraster des GeoSN; Rasterauflösung 1 m; Stand 15.01.2020

Der Staatsbetrieb GeoSN gibt für diese Daten eine Höhengenaugigkeit von $\pm 0,1$ m und eine Lagegenauigkeit von $\pm 0,5$ m an.

4 Softwaretechnische Grundlagen

4.1 Methodik des 2D-HN-Modellansatzes

Prinzipiell basieren 2D-HN-Modelle auf einem Berechnungsnetz, welches aus mehreckigen Elementen/ Zellen besteht. Es bildet die Geländeform einschließlich der Hohlform des Gewässerbettes nach und kann deshalb auch ein selbständiges digitales Geländemodell (DGM) darstellen.

Die Modellelemente müssen gewissen geometrischen Anforderungen des Berechnungsprogramms genügen und sind mit Rauheitsinformationen versehen. Sie sollten beispielsweise ausreichend feingliedrig gestaltet sein, damit sich alle potenziellen Fließwege tatsächlich abbilden und die Strömungsverhältnisse korrekt berechnet werden können.

Andererseits muss das Modellnetz die zugrundeliegenden Vermessungsdaten aus Gründen der Rechen- und Speicherkapazitäten zwangsläufig ausdünnen. In vielen Programmen wird es als Vergrößerung parallel zu einem höher aufgelösten DGM (BASIS-DGM) verwaltet. Als Schnittstelle dient dabei ein GIS.

Bei den 2D-HN-Berechnungen kommen Differenzialgleichungen, so genannte tiefengemittelte Flachwassergleichungen zum Einsatz, die von interagierenden Wasserprismen mit jeweils einheitlicher (über die Wassertiefe gemittelter) Fließgeschwindigkeit und -richtung ausgehen.

Dies geschieht durch Integration der dreidimensionalen Kontinuitätsgleichung und der Reynolds- bzw. Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Flüssigkeiten über die Wassertiefe unter Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung.

Die Grundflächen der Wasserprismen entsprechen, abhängig vom Berechnungsprogramm, entweder direkt den Zellen des Modellnetzes oder sind den Zellverbindungsknoten zugeordnet und setzen sich in diesem Fall anteilig aus den angeschlossenen Zellen zusammen. Die Differentialgleichungen werden für die Höhe jedes Wasserprismas (Wassertiefe und daraus abgeleitete absolute Wasserspiegelhöhe) sowie seine gemittelte Fließgeschwindigkeit und -richtung gelöst.

Abhängig vom jeweiligen Programmansatz liegen die Ergebnisdaten letztlich für jeden Zellmittelpunkt oder für die Zellverbindungsknoten vor. Um Überflutungsflächen und -intensitäten zu ermitteln, ist der sich zwischen diesen Stützstellen aufspannende Wasserspiegel mit dem Gelände zu verschneiden. Dafür kann in einigen Berechnungsprogrammen das Modellnetz genutzt werden, weil es selbst ein (ausgedünntes) DGM darstellt. Voraussetzung für korrekte Ergebnisse ist dabei allerdings, dass die Elementgrößen ausreichend klein gewählt wurden, damit sich alle potenziellen Fließwege in den Geländekonturen wiederfinden. Sollen die zu ermittelnden Überschwemmungsflächen und -tiefen den höchstmöglichen Genauigkeitsgrad erreichen, muss der Wasserspiegeldatensatz im GIS mit dem BASIS-DGM verschnitten und anschließend nachbearbeitet werden.

2D-HN-Berechnungsprogramme können aufgrund der angewandten Strömungsgleichungen sowohl strömende als auch schießende Abflusszustände stationär und instationär berechnen. Viele von ihnen sind zudem in der Lage, komplizierte Strömungsprozesse an Brücken- und Wehrbauwerken realitätsnah abzubilden. Aufgrund des tiefengemittelten Ansatzes stößt die 2D-HN-Modelltechnik bei stark dreidimensionalen Verhältnissen an ihre Grenzen. Gegenüber 1D-HN-Modellen liefern sie aber deutliche genauere Ergebnisse und erlauben es, auch in hydraulisch/ hydrodynamisch komplizierten Bereichen realistischere Überflutungsflächen zu ermitteln.

4.2 Beschreibung des verwendeten Berechnungsprogramms

Die 2D-HN-Modellierung im Rahmen des HWRM-Plans für das Spitzkunnersdorfer Wasser erfolgte mit dem Programmpaket SMS 13 / HYDRO_AS-2D 5.2.2. Die Software SMS stellt dabei den Pre- und Postprozessor dar und bietet somit eine Benutzeroberfläche mit Möglichkeiten der Netzgenerierung sowie der Visualisierung von Ergebnisdateien. Demgegenüber bildet HYDRO_AS-2D den Berechnungskern und fungiert damit als Solver für Finite-Volumen-Gleichungen anhand der zweidimensionalen tiefengemittelten Flachwassergleichungen.

Berechnungsnetze in HYDRO_AS-2D bestehen aus Drei- und Viereckselementen, die an den Eckpunkten durch höhenbelegte Modellnetzknotten miteinander verbunden sind. Die erwähnten Wasserprismen („Kontrollvolumen“) für die tiefengemittelten Flachwassergleichungen sind in HYDRO_AS-2D diesen Knoten zugeordnet (vgl. Abbildung 4.1). Jeder Knoten stellt dabei den Schwerpunkt der mehreckigen Prismagrundfläche dar, die sich anteilig auf die angeschlossenen Elemente erstreckt. Die in HYDRO_AS-2D angewandten Strömungsgleichungen gehen von Wasserprismen aus, die sich auf dieser Grundfläche erheben.

Modellnetze können in HYDRO_AS-2D mit relativ einfachen Mitteln in der Bearbeitungsoberfläche SMS oder über verschiedene Schnittstellen so gestaltet und manipuliert werden, dass sich darin auch filigrane Strukturen, wie bspw. Böschungskanten, Uferwände, Grabenverläufe etc. als durchgehende Elementgrenzen / Bruchlinien wiederfinden. Senkrechte Wände kann das Netz hingegen nicht, sondern nur leicht geneigt abbilden.

Indem die Grundflächen von Gebäuden, freistehenden Wänden, Pfeilern, Widerlagern o.ä. im Netz ausgespart werden, können sie als nicht durchströmbar definiert werden. Alternativ ist es möglich, Netzelemente mit einer „Nullrauheit“ (disable) zu versehen, um sie vom Abfluss auszuschließen.

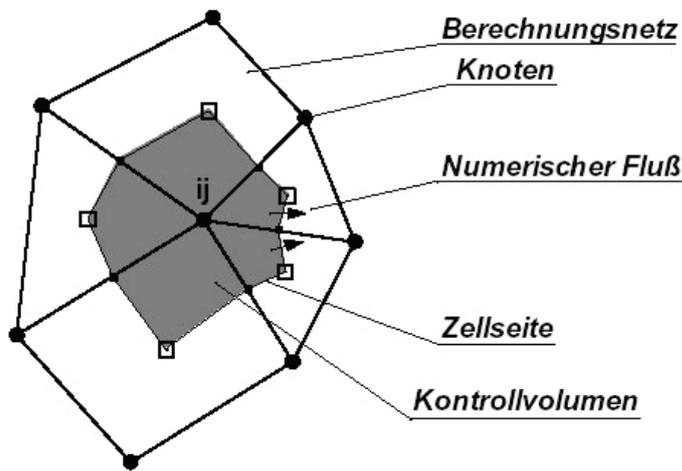


Abbildung 4.1: Methode in HYDRO_AS-2D zur Ermittlung des Kontrollvolumens (Quelle: Handbuch HYDRO_AS-2D)

Brücken und Wehrüberfälle werden mit speziellen Datensätzen erfasst. So werden Netzknoten unter dem Überbau von Brücken mit Informationen zur Höhe der Konstruktionsunterkante belegt (vgl. Abbildung 4.2). Ein Wehrüberfall kann mit Knotenverbindungen („nodestrings“) definiert werden, die mit Informationen zum Überfallbeiwert und zur Kronenhöhe belegt sind. Auf ähnliche Weise lassen sich Durchlässe nachbilden.

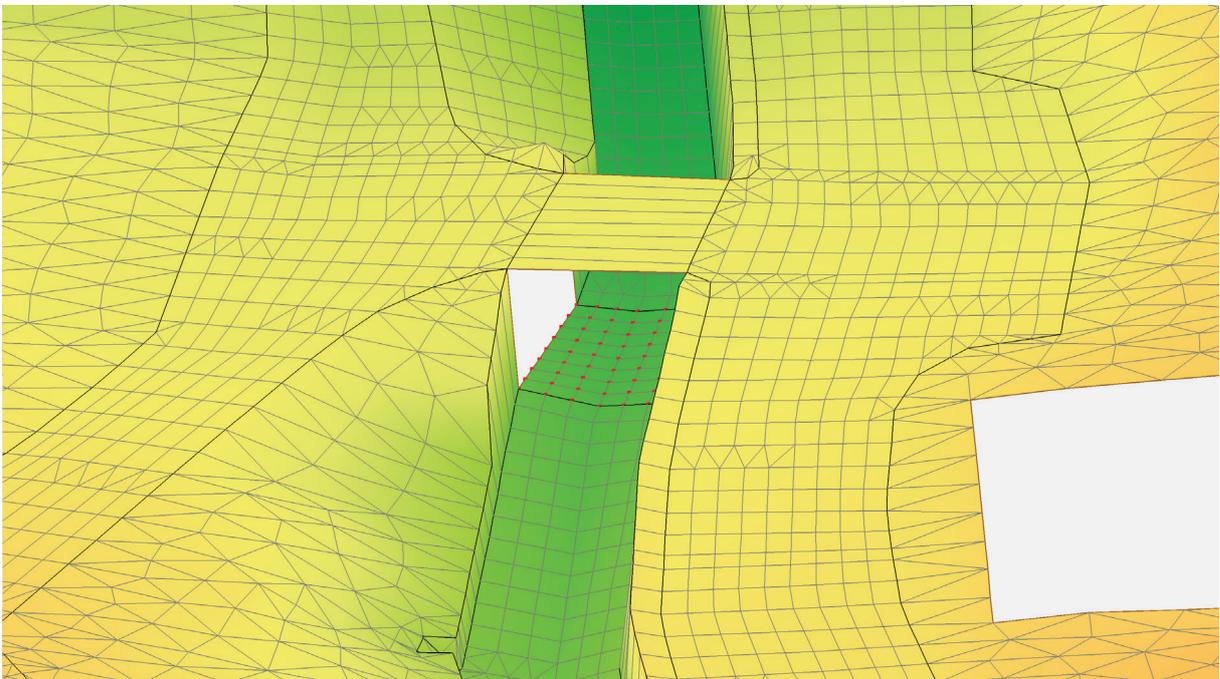


Abbildung 4.2: Räumliche Ansicht des Modellnetzes im Bereich einer Brücke, die im HW-Fall entlang der Fahrbahn quer zum Bach überströmt werden kann (rechts: ausgespartes Gebäudegrundriss)

Nodestrings können auch als Zuläufe des Modells dienen, indem an ihnen eine Abflussganglinie mit einer zu wählenden Zeitschrittauflösung sowie eine Einströmrichtung vorgegeben werden. Im vorliegenden Fall wurde diese Zulauf-Option nur am oberen Rand des Landwassers, am Pegel Niederoderwitz, angewandt.

Auch die Ausläufe des Modells werden über Knotenverbindungen entlang dafür geeigneter Querschnitte festgelegt. Auslauftrandbedingungen können u.a. als Wasserstands-Abfluss-Beziehung oder Energieliniengefälle definiert werden. Im vorliegenden Fall wurden die Auslauftrandbedingungen am unteren Ende der kürzeren Modellversion als Energieliniengefälle gemäß dem dortigen mittleren Sohlgefälle und am Auslauf der Modellversion des Gesamteinzugsgebiets als Wasserstand-Abfluss-Beziehung vorgegeben, die aus den LTV-Berechnungen für das Landwasser 2018 hergeleitet wurde.

Knotenverbindungen/ nodestrings können auch dafür genutzt werden, den durch sie fließenden Abflussanteil für jeden Zeitschritt der Berechnung aufzuzeichnen (so genannte Kontrollquerschnitte). Solche Kontrollquerschnitte wurden an möglichst vielen, dafür geeigneten Querschnitten, bspw. in Brückenöffnungen, angeordnet.

Die Grundflächen von Bauwerkspfählen und –widerlagern sowie Gebäuden wurden im Modellnetz ausgespart, um sie als nicht durchströmbar zu definieren. Alternativ könnten dafür auch Netzelemente von einer Mitwirkung am Abflussgeschehen gezielt ausgeschlossen werden („disabled“).

Die Simulation liefert skalare und vektorielle Ergebnisse (Wasserstandshöhen, Größe und Richtung von Fließgeschwindigkeiten und Schubspannungen etc.) für die benetzten Knoten des Modellnetzes und gibt Aufschluss zu Überflutungsgrenzen und Abflussaufteilungen im Flussschlauch und auf den Ufern. Bei instationären Berechnungen können zusätzlich die Retentionswirkung und Überflutungsdauer nachvollzogen werden.

Außerdem lassen sich aus den Primärergebnissen weitere Parameter, wie bspw. die Froude-Zahlen oder Energiehöhen, unkompliziert berechnen. HYDRO_AS-2D kann aufgrund der angewandten Strömungsgleichungen sowohl strömende als auch schießende Abflusszustände berechnen und ist in der Lage, komplizierte Strömungsprozesse an Bauwerken (eingestaute und überströmte Brücken, unter- und überströmte Wehre etc.) realitätsnah abzubilden. Detaillierte Informationen zur verwendeten Software HYDRO_AS-2D und den mathematischen Grundlagen können der Programmbeschreibung im Benutzerhandbuch entnommen werden.

Es ist in HYDRO_AS-2D außerdem in zwei Varianten („sources-in“ und „nodesources“) möglich, einzelnen Knoten gezielt zu- oder auslaufende Wassermengen zuzuordnen (Quellterme). Die Berechnungen laufen damit ansonsten wie eine herkömmliche 2D-HN-Klarwasserberechnung ab. Damit können prinzipiell Interaktionen mit Grundwasser- und Kanalnetzmodellierungen gesteuert oder auch Berechnungen simuliert werden. Im vorliegenden Fall wurde diese Option in ihrer „sources-in“-Variante zur Simulation von wild abfließendem Wasser, das bei Starkniederschlägen auf den Talhängen entsteht, und in ihrer „nodesources“-Variante zur Beaufschlagung des Spitzkunnersdorfer Wassers für die Hochwassersimulationen genutzt. Grundwasser- und Kanalnetzströmungen sowie die womöglich daraus resultierenden Überflutungsgefahren wurden bei den Modellberechnungen im HWRMP hingegen nicht untersucht.

Durchlässe oder verrohrte Gewässerstrecken, in denen zumindest überwiegend Druckabfluss herrscht, lassen sich in HYDRO_AS-2D, wie oben beschrieben, durch nodestrings meist ausreichend genau abbilden.

4.3 Parametrisierung des Modells

Beim Aufbau des Modellnetzes wurden gemäß den Empfehlungen des Programmentwicklers in den Bachbetten vorrangig Rechteckelemente, auf den Uferbereichen vorrangig Dreieckelemente gebildet. Im vorliegenden Fall wurden für die Bäche und Gräben im Gemeindegebiet Leutersdorf Rechtecklängen von ca. 1,5 m und –breiten von ca. 0,4 m angestrebt. Im Gebiet der Gemeinde Oderwitz wurden diesbezüglich leicht größere Elemente zugelassen.

Die Elementgrößen orientieren sich dabei prinzipiell an der jeweiligen realen, hydraulisch relevanten Struktur. Besonders schmale Bachbetten müssen also auch mit entsprechend kleinen Elementen abgebildet werden, so dass bereichsweise auch deutlich kleinere Elemente im Berechnungsnetz zu finden sind. Damit wird eine hohe Qualität der Berechnungsergebnisse sichergestellt.

Auch in den Uferbereichen wurde auf eine möglichst hohe Knotendichte mit gleichmäßigen Dreieckselementen geachtet. Im Gemeindegebiet Leutersdorf beträgt die größte Elementgröße somit ca. 5 m². Auf dem Gebiet der Gemeinde Oderwitz wurde ein weniger dichtes Netz mit maximalen Elementgrößen von ca. 50 m² gebildet, wobei bewegtes Gelände mit adäquat angepassten Elementgrößen nachgeformt wurde.

Die Netzelemente wurden nach den folgenden Geometriekriterien gestaltet und gewährleisten damit eine hohe Qualität der Berechnungsergebnisse:

- Min. Innenwinkel: 5 °
- Max. Innenwinkel: 160 °
- Max. Anzahl Nachbarknoten: 10
- kleinstes Flächenverhältnis von Nachbarelementen: 0,05
- größtes Kantenlängenverhältnis von Rechteckelementen: 20,00
- Min. Knotenabstand: 0,05 m

Die genannten Kriterien werden nur im Bereich des übernommenen Bestandsmodells an drei Stellen nicht eingehalten. Auf eine Veränderung dieser Netzteile wurde bewusst verzichtet, um die Bestandsmodell soweit wie möglich unverändert zu lassen. Auf die Berechnungsergebnisse des HWRMP kann dieser Umstand keine negativen Auswirkungen haben.

Die Elemente des Berechnungsnetzes sind mit Beiwerten nach Manning / Strickler k_{St} [m^{1/3}/s] zu belegen, um den Einfluss der Oberflächenrauheiten zu erfassen. Diese wurden entsprechend den Bereichen gleicher Nutzung aus der terrestrischen Vermessung bzw. den aktuellen ATKIS-DLM25-Daten verteilt und zunächst nach Erfahrungswerten und Literaturempfehlungen angesetzt. Die Werte wurden anschließend im Zuge der Modellkalibrierung anhand des Starkregenereignisses im Mai 2017 (vgl. HWRMP-Anhang 2) validiert und optimiert. Nachfolgend sind die wichtigsten Rauheitskategorien aufgeführt:

- Gewässersohlen: $k_{St} = 22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ bis $24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (Landwasser: $28 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$)
- Uferböschungen: $k_{St} = 16 \dots 24 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, je nach Gestaltung und Bewuchs
- Siedlungsflächen: $k_{St} = 18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Straßen: $k_{St} = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Wald, Acker: $k_{St} = 12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- Grünland: $k_{St} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Einen spürbaren Einfluss auf die mit dem 2D-HN-Modell bei Berechnungssimulationen errechnete Abflusskonzentration haben die Oberflächenrauheiten in weitläufigen Bereichen außerhalb der Gewässerbetten. Literaturangaben für die empirisch ermittelten Manning-Strickler-

Beiwerte k_{St} beziehen sich meist auf Strömungen mit einer gewissen Wassertiefe, wie sie in Flussbetten anzutreffen ist. Mit kleiner werdenden Abflusstiefen nimmt der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit aber zu und es gelten entsprechend kleinere k_{St} -Werte (stärkere Rauheiten). Bei Berechnungssimulationen muss dieser Umstand beachtet werden, weil für die überwiegend sehr flachen Zuflüsse von den Hängen ansonsten zu glatte Verhältnisse angenommen werden und sich die Abflüsse unrealistisch schnell und stark konzentrieren, was schließlich zu einer Überschätzung der Scheitelabflüsse in den Gewässern führt.

Im 2D-HN-Modell wurden aus diesem Grund die Rauheitsbeiwerte k_{St} für Acker-, Wald-, Grünland- und Siedlungsflächen wassertiefenabhängig gestaltet. Sie erreichen erst bei einer Abflusstiefe von 50 cm den vollen Wert, der bei Hochwassersimulationen bei massiv überströmten Vorländern erfahrungsgemäß gilt und in einschlägiger Fachliteratur angeführt wird. Für den Überströmungsbeginn (Wassertiefe = 0) wurde der volle Wert um ein bestimmtes Maß abgemindert. Für Wassertiefen zwischen 0 und 50 cm gilt ein linear interpolierter k_{St} -Wert.

Zum Umfang der digitalen Projektauslieferung gehören ESRI-Shapes, aus denen die Verteilung aller angesetzten k_{St} -Werte in den 2D-HN-Modellen detailgenau hervorgeht.

Für alle durchgeführten Rechengänge wurden folgende Grundlagenparameter („global parameters“) in HYDRO_AS-2D festgelegt (vgl. Benutzerhandbuch):

- Simulationszeit: Dauer des zu berechnenden Abflussereignisses; Abbruch erfolgt bei instationären Berechnungen nach Absinken des errechneten Scheitelabflusses am Modellauslauf um $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, bei stationären Berechnungen nach Erreichen des stationär-unveränderlichen Abflusszustands
- Zeitintervall SMS: Zeitschrittlänge zwischen den Ausschreibungen vollständiger Ergebnisdateien „Wasserstand“, „Fließgeschwindigkeit“ u.a.; bei instationären Berechnungen gewählt mit 60 Sekunden $\hat{=}$ 1 Minute, bei stationären Berechnungen mit 10.800 Sekunden $\hat{=}$ 3,0 Stunden (ausgewertet wird dabei der letzte Zeitschritt)
- Zeitintervall Q_Strg.dat / Pegel.dat: Zeitschrittlänge für die Zuflussganglinien und die Ausschreibungen tabellarischer Ergebnisdateien für Kontrollquerschnitte und Pegelpunkte; gewählt mit 60 Sekunden $\hat{=}$ 1 Minute
- Hmin: minimale Wassertiefe, ab der ein Abflussgeschehen am jeweiligen Knoten angenommen wird; mit $0,00001 \text{ m}$ sehr klein gewählt, um die Abflussprozesse bei Berechnungssimulationen möglichst korrekt zu erfassen
- VELMAX: maximale Fließgeschwindigkeit, die an einem Knoten in die Berechnungen eingehen kann; gewählt mit $15,0 \text{ m/s}$
- CMUVISC: Koeffizient c_{μ} in der Formel für Viskosität = $0,6$ (Standardwert)
- CFL: programminterner Berechnungskoeffizient = $0,8$ (Standardwert)
- Amin: kleinste bei der Berechnung berücksichtigte Grundflächengröße eines Kontrollvolumens; gewählt mit 0 m^2

5 Einsatzbereiche und Modellbezeichnungen

Wie in Kapitel 1 erwähnt, diente das 2D-HN-Modell der Simulation von Starkregenereignissen, den damit einhergehenden Sturzfluten und den daraus entstehenden Hochwassern im Spitzkunnersdorfer Wasser, also sowohl hydrologischen als auch hydrodynamischen Untersuchungen. Berechnungssimulationen zur Berechnung wild abfließenden Wassers wurden im HWRMP

instationär durchgeführt. Sie sind im HWRMP-Anhang 2 näher beschrieben. Die hier dokumentierten Hochwassersimulationen für das Spitzkunnersdorfer Wasser wurden hingegen stationär durchgeführt.

Eine Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse für eine das gesamte Einzugsgebiet umfassende Modellversion des Istzustands wurde mit Berechnungssimulationen für das Starkregenereignis am 14.05.2017 durchgeführt. Sie ist im HWRMP-Anhang 2 dokumentiert.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die in den verschiedenen Einsatzbereichen betrachteten Szenarios und die jeweilige Systematik der Modellbezeichnungen beschrieben, so dass eine Zuordnung zur Ablagestruktur der digital übergebenen Modelldaten möglich ist.

5.1 Berechnungssimulationen zur Ermittlung der Hochwasserscheitelabflüsse HQT

Mit der kalibrierten Modellversion wurden zunächst Berechnungssimulationen für ein statistisches Ereignis mit dem Wiederkehrintervall $T = 100$ Jahre und verschiedenen Dauerstufen D gemäß KOSTRA-DWD-2010R durchgeführt.

Dabei wurde eine räumlich gleichmäßige und zeitlich mittenbetonte Beregnung des Einzugsgebiets angenommen, wie es in [DVWK-R 113, 1984] zur Ermittlung von Hochwasserscheitelabflüssen für Gewässer mit kleinen Einzugsgebieten empfohlen wird. Aus den Ergebnissen wurde die für das Spitzkunnersdorfer Wasser im Gemeindegebiet Leutersdorf maßgebende, also die größten Hochwasserscheitelabflüsse hervorrufende Dauerstufe $D = 60$ min abgeleitet (vgl. Abbildung 5.1). Auch in den besiedelten Gebieten am Färbegraben und Wefagraben/Entlastungsgraben sowie in den großen Abflussbahnen der Ackerflächen in Spitzkunnersdorf ergeben sich bei $D = 60$ min die größten Oberflächenwasserabflüsse.

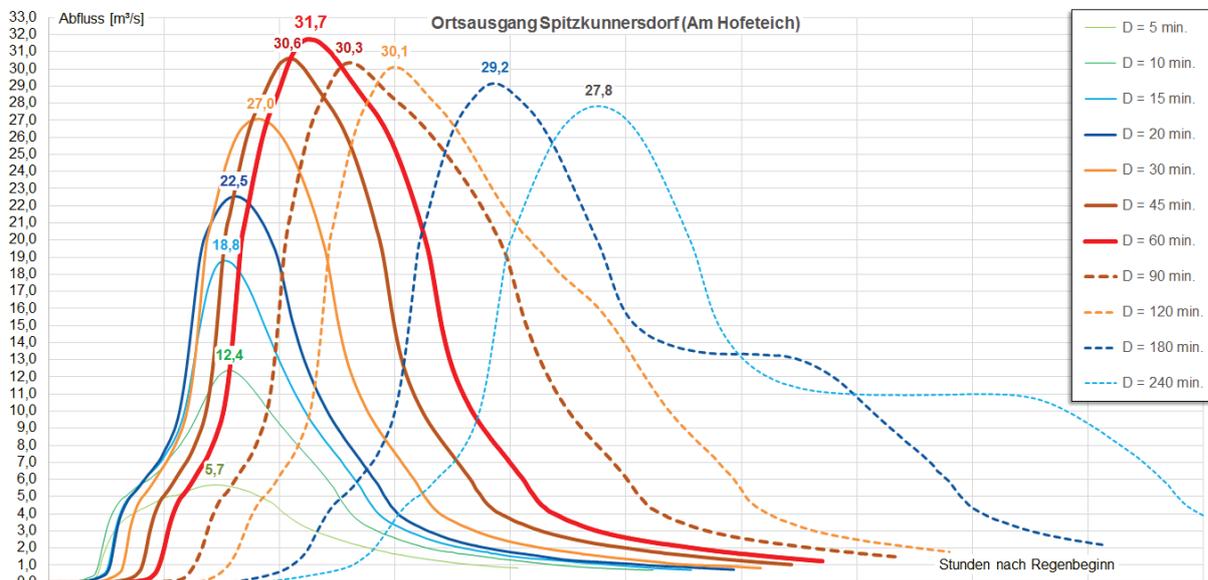


Abbildung 5.1: Für $T = 100$ a bei verschiedenen Dauerstufen D errechnete Abflussganglinien im Spitzkunnersdorfer Wasser am Ortsausgang Spitzkunnersdorf

Für diese Dauerstufe wurden schließlich auch Berechnungssimulationen für $T = 2, 5, 10, 20, 50$ und 200 Jahre durchgeführt, so dass für insgesamt sieben Jährlichkeiten T die Istzustand-Modellergebnisse bei einer räumlich gleichmäßigen und zeitlich mittenbetonten Beregnung des gesamten Einzugsgebiets des Spitzkunnersdorfer Wassers vorliegen.

Die dabei errechneten Scheitelabflüsse des Spitzkunnersdorfer Wassers bilden den hydrologischen Längsschnitt bzw. Scheitelabflusslängsschnitt des Spitzkunnersdorfer Wassers für die

Hochwasserereignisse HQT, wie er in der Abbildung 5.2 (größere Version im HWRMP-Erläuterungsbericht) für den Gewässerabschnitt im Gebiet der Gemeinde Leutersdorf dargestellt ist. Im HWRMP-Erläuterungsbericht sind die Abflüsse auch tabellarisch aufgeführt.

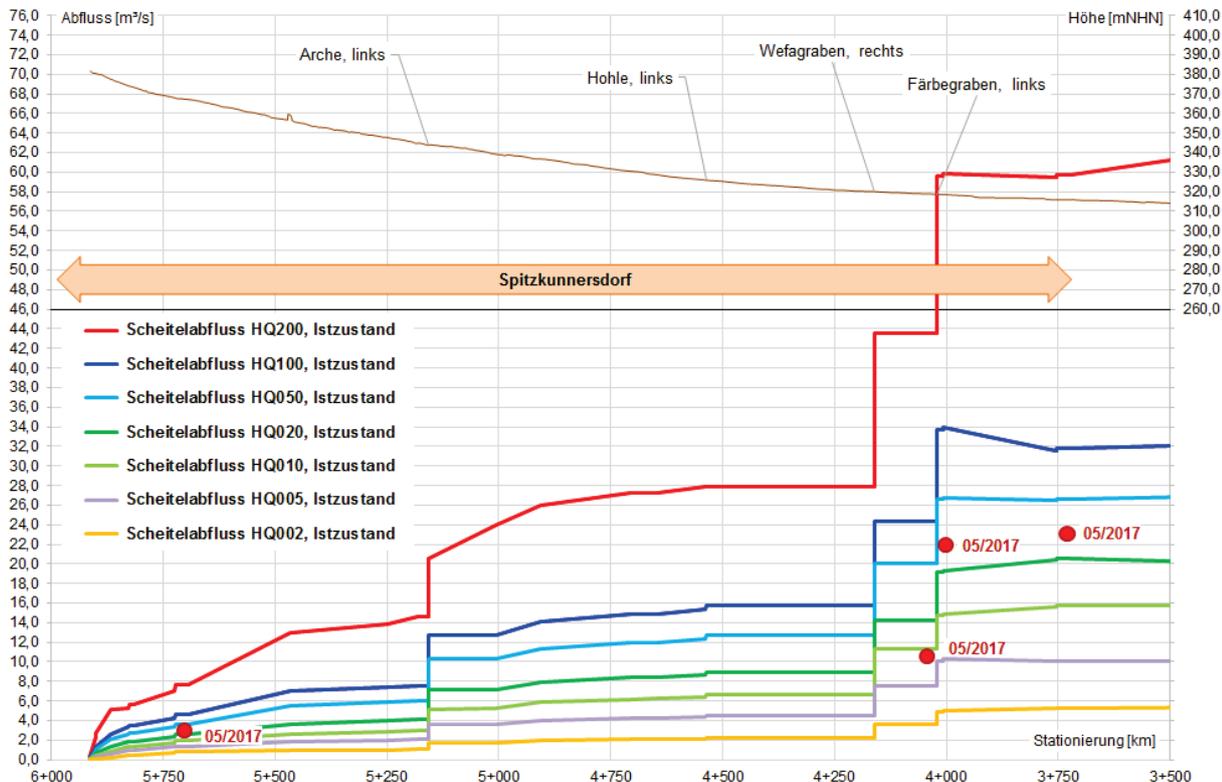


Abbildung 5.2: Längsschnitt der relevanten Scheitelabflüsse HQT des Spitzkunnersdorfer Wassers in der Gemeinde Leutersdorf (Dauerstufe D = 60 min)

Neben der Modellversion, den Jährlichkeiten und den Dauerstufen können bei Berechnungssimulationen zudem die zeitliche Niederschlagsverteilung, die Vorfeuchte und der Eichfaktor B1 aus dem SCS/Zaiß-Abflussbeiwertverfahren (vgl. HWRMP-Anhang 2) eine Rolle spielen.

Um eine klare und nachvollziehbare Ablagestruktur herzustellen, wurden die Dateionamen jeder Modellberechnung zur Berechnungssimulation nach dem folgenden Schema benannt:

- interne Projektnummer („11280_“)
- Modellversion
(Gesamteinzugsgebiet: „ges_“, Spitzkunnersdorf: „skd_“)
- Gewässerzustand
(Istzustand: „IST0_“, Planzustandsvarianten: „P0“/ „P1_“, mit HRB: „HRB_“)
- Datum der Modellerstellung („JJMMTT_“)
- Berechnungssimulation („re“)
(zur Abgrenzung gegenüber einer Hochwassersimulation „hw“)
- Jährlichkeit T in „[a]_“
- Dauerstufe in „[min]_“
- ggf. Kürzel der zeitl. Niederschlagsverteilung n. DVWK-R 113
(mittenbetont: „m_“)
- ggf. Vorregenindex VN21 nach SCS/ Zaiß in „[mm]_“
- ggf. Eichfaktor B1 nach SCS/Zaiß als Abminderung des Basiswerts in „[%]“

Damit ergibt sich beispielsweise für eine am 10.03.2021 durchgeführte Berechnungssimulation mit der Modellversion des Gesamteinzugsgebiets im Istzustand für $T = 100$ a mit einer Regendauer von 60 Minuten, einer mittenbetonten Niederschlagsverteilung, einem Vorregenindex VN21 von 7 mm und einem auf 15% abgeminderten Basiswert B1 folgender Name des Dateionders:

„11280_ges_IST0_210310_re100_060_m_07_015“

Die zugehörigen Modelldateien im .2dm-Format unterscheiden sich ausschließlich in dem Zufluss, der im Landwasser am Pegel Niederoderwitz vor der Mündung des Spitzkunnersdorfer Wassers angesetzt wird (vgl. HWRMP-Anhang 2). Erst durch die Verknüpfung der Modelldatei mit einer ASCII-Datei (.dat-Format) als „sources-in“-Quelltermdatei (vgl. Kapitel 4.3) im oben beschriebenen Dateionder werden die Berechnungssimulationen spezifiziert.

Die „sources-in“-Quelltermdatei enthält für jeden Modellknoten und jeden Berechnungszeitschritt die Vorgabe einer zufließenden Wassermenge. Sie führt dem Modell indes nur die tatsächlich zum Abfluss kommenden Niederschlagsanteile (Nettoregen) zu und wurde im Vorfeld GIS-basiert nach dem SCS/Zaiß-Verfahren mithilfe des Abflussbeiwerts aus dem Bruttoregen generiert (vgl. HWRMP-Anhang 2).

5.2 Hochwassersimulationen für das Spitzkunnersdorfer Wasser

Die aus den instationären Simulationen einer räumlich gleichmäßigen Berechnung des Einzugsgebiets für die Dauerstufe $D = 60$ min hergeleiteten Hochwasserabflüsse HQT im Spitzkunnersdorfer Wasser wurden in einer verkleinerten Version des 2D-HN-Modells („skd_klein“) als stationäre Hochwassersimulationen umgesetzt. Das verkleinerte Modell umfasst dabei nur den im HWRMP zu untersuchenden Gewässerabschnitt im Gebiet der Gemeinde Leutersdorf und zudem nur die bei Hochwasser des Spitzkunnersdorfer Wassers potenziell überschwemmbar Bereiche.

Die Berechnung der sieben untersuchten Hochwasserabflüsse HQ2, HQ5, HQ10, HQ20, HQ50, HQ100 und HQ200 erfolgte für jeden betrachteten Gewässerzustand, bspw. also auch den Istzustand, jeweils innerhalb eines Rechenlaufs mit sieben Ausschreibungszeitschritten á 3 Stunden pro Ereignis HQT. Dabei wurde der Modellzufluss ausgehend vom kleinsten Ereignis HQ2 innerhalb kurzer Zeit auf das jeweils nächsthöhere Ereignis HQT gesteigert und dann bis zum Ende des Zeitschritts konstant beibehalten, so dass sich ein stationärer Abflusszustand einstellt. Jeder ausgeschriebene Zeitschritt der Simulation entspricht also einem der betrachteten Hochwasserabflüsse HQT.

In dem Dateionder der Modellberechnung befindet sich anfangs neben der für jeden Gewässerzustand identischen .2dm-Modelldatei eine spezifische ASCII-Datei (.dat-Format) als „no-desources“-Quelltermdatei (vgl. Kapitel 4.3), die für ausgewählte Modellknoten im Gewässerbett des Spitzkunnersdorfer Wassers und jeden Berechnungszeitschritt die Vorgabe einer zufließenden Wassermenge enthält, so dass der Scheitelabflusslängsschnitt realisiert wird.

Dabei wurde darauf geachtet, dass die von Nebengewässern zufließenden Wassermengen auf mehrere Modellnetz-knoten verteilt werden, um eine unrealistisch starke Abflusskonzentration zu vermeiden. Dennoch wird dem Modell an solchen Stellen unter Umständen mehr Wasser zugeführt, als es in der Realität der Fall ist, weil aus den Nebengewässern bspw. bereits vor ihrer Mündung eventuell mehr oder weniger große Teile des Abflusses ausufernd und an anderen Stellen in den Vorfluter münden. Dieser Effekt ist praktisch nicht vermeidbar und dem Ziel geschuldet, dass Hochwasser ausschließlich im Spitzkunnersdorfer Wasser simuliert werden sollte.

Die Dateionder jeder Modellberechnung zur Hochwassersimulation für das Spitzkunnersdorfer Wasser wurden nach dem folgenden Schema benannt:

interne Projektnummer („11280_“)

Modellversion

(*Spitzkunnersdorf, verkleinert: „skd_klein“*)

Gewässerzustand

(*Istzustand: „IST0_“, Planzustandsvarianten: „HWS...“, „RH...“, „VZV_“ o.ä.;
(HWS = Hochwasserschutz, RH = Rückhalt, A/ B/ C/ D = RH-Standort, VZV =
Vorzugsvariante)*)

Datum der Modellerstellung („JJMMTT_“)

Hochwassersimulation („hw“)

(*zur Abgrenzung gegenüber einer Berechnungssimulation „re“*)

Jährlichkeiten T „7xT“

(*Jährlichkeiten T = 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Jahre*)

Damit ergibt sich beispielsweise für eine am 09.02.2022 durchgeführte Hochwassersimulation mit der verkleinerten Modellversion im Istzustand für die sieben untersuchten Jahrllichkeiten T folgender Name des Dateionders:

„11280_skd_klein_IST0_220209_hw7xT“

Weil im Zuge der HWRMP-Bearbeitung mehrere lokale Hochwasserschutzmaßnahmen und potenzielle Standorte eines Rückhalts, oft auch in verschiedenen Varianten, unter Nutzung interner Kürzel untersucht wurden, ergeben sich für die betrachteten Planzustände teils längere Dateiondernamen, die sich aus den internen Kürzeln zusammensetzen. Eine Übersichtstabelle zu den betreffenden Kürzeln liegt der digitalen Projektauslieferung bei.

Die Ergebnisse der Hochwassersimulationen für das Spitzkunnersdorfer Wasser sind im Rahmen des HWRMP bspw. in die Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten sowie den Gewässerlängsschnitt eingeflossen.

5.3 Berechnungssimulationen zur Ermittlung der Starkregengefährdung

Die Ermittlung der Hochwasserscheitelabflüsse im Spitzkunnersdorfer Wasser geht also, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, nach den Empfehlungen in [DWVK-R 113, 1984] von einer gleichmäßigen Überregnung des gesamten Einzugsgebiets aus.

Weil das wild abfließende Wasser in diesem Fall wegen der Lage im Hochwasserentstehungsgebiet des Oberlaufs diffus und allmählich in die vom Hochwasser verursachten Überschwemmungen übergeht, können die beiden Phänomene „Hochwasser“ und „wild abfließendes Wasser“ bei dieser Betrachtung im Übergangsbereich nicht klar voneinander unterschieden werden.

Für die Ermittlung der Starkregengefährdung wurden deshalb auch separate Berechnungen der 11 in der Abbildung 5.3 gezeigten Teileinzugsgebiete für die Jahrllichkeiten T = 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 a mit der Dauerstufe D = 60 min und einer zeitlich mittenbetonten Verteilung simuliert. Im Spitzkunnersdorfer Wasser findet in diesen Fällen kein bzw. ein nur geringer Hochwasserabfluss statt, so dass der errechnete Oberflächenwasserabfluss vollständig dem vom Starkregenereignis verursachten wild abfließenden Wasser entspricht.

Aus den 11 Ergebnisdatensätzen wurde schließlich eine Umhüllende gebildet, die bspw. die Grundlage der Starkregengefahrenkarten und der Ableitung von Maßnahmen zur Verminderung der Starkregengefahren darstellt.

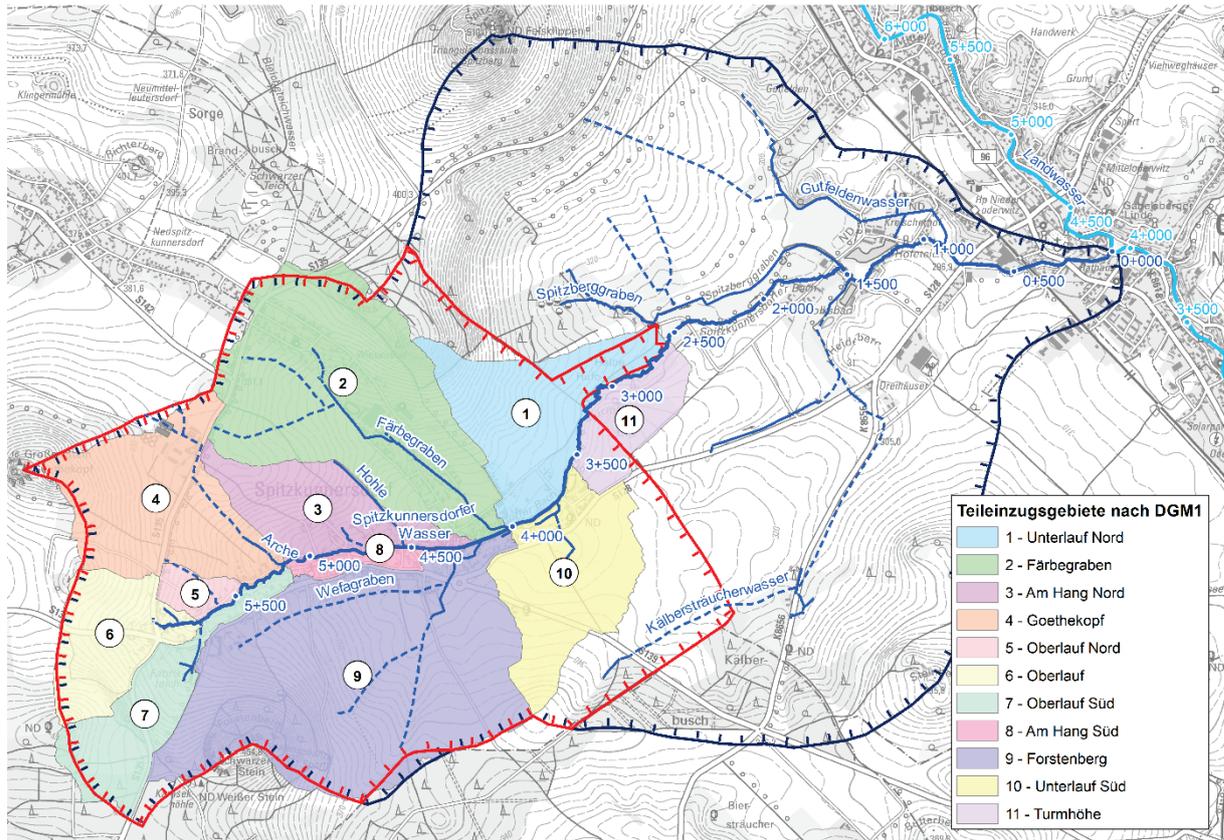


Abbildung 5.3: Untergliederung des Bearbeitungsgebiets in 11 Teileinzugsgebiete für die Untersuchung der Starkregengefährdung

Um eine klare und nachvollziehbare Ablagestruktur herzustellen, wurden die Dateinamen jeder Modellberechnung einer Berechnungssimulation zur Ermittlung der Starkregengefährdung nach dem folgenden Schema benannt:

Erster Teil: wie in Kapitel 5.1 für die Berechnungssimulationen zur Ermittlung der Hochwasserscheitelabflüsse HQT_

TEZG_“Name“

(TEZG: Teileinzugsgebiet und Name wie in der Legende der Abbildung 5.3)

Damit ergibt sich beispielsweise für eine am 10.03.2021 durchgeführte Berechnungssimulation mit der Modellversion des Gesamteinzugsgebiets im Istzustand für T = 100 a mit einer Regendauer von 60 Minuten im Teileinzugsgebiet „Oberlauf“, einer mittenbetonten Niederschlagsverteilung, einem Vorregenindex VN21 von 7 mm und einem auf 15% abgeminderten Basiswert B1 folgender Name des Dateinamers:

„11280_ges_IST0_210310_re100_060_m_07_015_TEZG_Oberlauf“

Eine Berechnungssimulation dieses Einsatzbereichs erfolgt innerhalb des oben beschriebenen Dateinamers auf Basis einer für alle Berechnungssimulationen dieser Art identischen Modelldatei im .2dm-Format in Verbindung mit einer spezifischen ASCII-Datei (.dat-Format) als „sources-in“-Quelltermdatei (vgl. Kapitel 4.3), die für jeden Modellknoten im gemeinten Teileinzugsgebiet und jeden Berechnungszeitschritt die Vorgabe einer zufließenden Wassermenge enthält. Die Quelltermdatei wurde nach der bereits im Kapitel 5.1 beschriebenen Methodik erstellt.

6 Berechnungen

6.1 Ermittlung der Leistungsfähigkeiten des Gewässers und der Brücken

Als Leistungsfähigkeiten des Gewässers werden die ausuferungsfrei bzw. schadarm im Gewässerbett ableitbaren Abflüsse, als Leistungsfähigkeiten von Brücken hingegen die einstaufrei, also ohne dass der Wasserspiegel an der Unterkante des Überbaus anschlägt, durch die Bauwerksöffnung ableitbaren Abflüsse bezeichnet. Um sie für das Spitzkunnersdorfer Wasser und seine Brücken zu ermitteln, wurden gesonderte Wasserspiegellagenberechnungen mit dem 2D-HN-Modell durchgeführt und ausgewertet.

Die genannten Leistungsfähigkeiten können nach verschiedenen Methoden ermittelt werden, die jeweils Vor- und Nachteile aufweisen. So muss bspw. entschieden werden, ob Ausuferungen für die Analyse mitberücksichtigt oder unterbunden werden. Im vorliegenden Fall wurden bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeiten im 2D-HN-Modell keine Abströmungen aus dem Gewässerbett zugelassen. Die berechneten Wasserstände steigen also unter Umständen unrealistisch weit über die bestehenden Uferhöhen hinaus.

Die Leistungsfähigkeiten des Gewässers wurden außerdem mit einem separaten Modellzustand ohne die Brückenüberbauten berechnet. Dadurch wird vermieden, dass die von einer eingestauten Brücke verursachte Wasserspiegelanhebung die Leistungsfähigkeit des Gewässerabschnitts vor der Brücke scheinbar reduziert, während das Gewässerbett selbst womöglich noch ausreichend leistungsfähig ist.

Die Berechnungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeiten im Bearbeitungsgebiet wurden stationär mit den Hochwasserabflüssen HQ2, HQ5, HQ10, HQ20, HQ50, HQ100 und HQ200 im Spitzkunnersdorfer Wasser durchgeführt.

Die Leistungsfähigkeiten des Gewässers wurden anschließend abschnittsweise und für jede Uferseite separat durch einen Vergleich der errechneten Wasserspiegel mit den Uferhöhen ermittelt. Die Leistungsfähigkeiten der Brücken, also ihr Einstaubeginn, wurden durch einen Vergleich der vor ihren Einläufen berechneten Oberwasserstände mit ihren höchsten Konstruktionsunterkanten ermittelt.

Die Ergebnisse wurden nach den entsprechenden Abflüssen HQT kategorisiert und sind in Form von farbigen Leistungsbändern für das Gewässer bzw. farbigen Punktmarkierungen für die Brücken in der HWRMP-Anlage 3 gezeigt. Die Leistungsfähigkeiten sind außerdem auch tabellarisch in der HWRMP-Anlage 12 dargestellt. Im HWRMP-Erläuterungsbericht werden die Ergebnisse eingehender erläutert.

6.2 Ermittlung hydrodynamischer Größen im Istzustand

Mit dem 2D-HN-Modell im Istzustand wurden instationäre Berechnungssimulationen für wild abfließendes Wasser bei örtlichen Starkniederschlägen und stationäre Berechnungen für Hochwasser im Spitzkunnersdorfer Wasser jeweils für die sieben Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100$ und 200 a durchgeführt und ausgewertet.

Speziell analysiert und als GIS-Daten u.a. für kartografische Darstellungen und Schadenspotenzialermittlungen aufbereitet wurden die damit berechneten

- Wasserspiegellagen, Wassertiefen und Überflutungsflächen,
- Fließgeschwindigkeiten und -richtungen sowie
- die spezifischen Abflüsse und ihre Richtungen
(als Produkt aus den Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten).

Von den instationären Berechnungssimulationen zur Ermittlung der Starkregengefährdung wurden die während des simulierten Ereignisses maximal auftretenden Ergebnisparameter „Wasserspiegel“, „Wassertiefe“, „Fließgeschwindigkeit“ und „spezifischer Abfluss“ ausgewertet. In den kartografischen Darstellungen wird diesbezüglich also die höchste Abflussbelastung im gesamten modellierten Gebiet unabhängig von ihrem zeitlichen Auftreten gezeigt.

Von den stationären Hochwasserberechnungen wurden für die weitere Auswertung die Berechnungsergebnisse nach dem Erreichen des stationären Zustands bei jedem Abflussereignis HQT verwendet. Auch hier wird also an jeder Stelle des Modellgebiets die höchste Abflussbelastung unabhängig vom zeitlichen Ablauf der Hochwasserwelle dargestellt.

Die Hochwasserberechnungen wurden zusätzlich auch mit einer angenommenen Verklauung aller Brücken am Spitzkunnersdorfer Wasser durchgeführt. Dafür wurden die Konstruktionsunterkanten der Brückenüberbauten im 2D-HN-Modell um 50 cm herabgesetzt. Eine grundlegende Verschärfung der Gefährdungslage in größeren Gebieten durch die Verklauung bestimmter Brücken wurde dabei nicht festgestellt. Auf die weitere Verarbeitung und Darstellung der Modellergebnisse mit verklaueten Brücken wurde deshalb verzichtet.

6.3 Feststofftransportberechnungen

Berechnungssimulationen für das real abgelaufene Starkregenereignis im Mai 2017 und ein statistisch 100jährliches Starkregenereignis mit räumlich gleichmäßiger Verteilung im gesamten Einzugsgebiet wurden zusätzlich auch als Feststofftransportberechnungen durchgeführt. Rechnerisch ermöglicht wurde dabei die Erosion von Bodenpartikeln nur auf den Ackerflächen.

Gegenüber den Klarwasserberechnungen wurde dafür zusätzlich zum HYDRO_AS-2D-Modul das HYDRO_FT-2D-Modul aktiviert. Es berechnet parallel zur hydraulischen Strömungsbildung den Kräfteeintrag des Wassers in die Gewässersohle, bei Überschreitung der Widerstandskräfte des anstehenden Bodens die Sedimentaufnahme, die Einmischung in das Wasser, den Stofftransport sowie die Ablagerung der Sedimente bei Unterschreitung der erforderlichen Transportgeschwindigkeiten. In der Bilanz aus Sedimentaufnahme und -ablagerung ergeben sich Erosions- und Sedimentationsbereiche, die in der Geometrie des Modellnetzes in den Berechnungszeitschritten fortlaufend aktualisiert werden.

Zur Nachbildung des Feststofftransports wurde das Berechnungsverfahren nach Meyer-Peter und Müller gewählt. Es berechnet ausschließlich den Geschiebetrieb q_B und vernachlässigt den Schwebstofftransport im Wasserkörper. Die Berechnung des Geschiebetriebes nach Meyer-Peter und Müller erfolgt nach den folgenden allgemeinen Formeln:

$$\text{Geschiebetrieb:} \quad q_B = \Phi \cdot \sqrt{(\rho_r - 1)} \cdot d_m^{3/2}$$

$$\text{bezogene Dichte:} \quad \rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{2650 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Transportintensität:} \quad \Phi = 8 \cdot (\theta' - \theta_{cr})^{3/2}$$

$$\text{Mobilitätsrate:} \quad \theta' = \left(\frac{k_{st}}{k'_{st}}\right)^{3/2} \cdot \frac{h \cdot I_R}{(\rho_r - 1) \cdot d_m}$$

$$\text{Reibungsgefälle:} \quad I_R = \frac{v^2}{k_{st}^2 \cdot h^{4/3}}$$

Der Geschiebetrieb ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit v , dem Wasserstand h , der Rauheit der Gewässersohle k_{st} sowie dem mittleren Korndurchmesser d_m des anstehenden Sediments. Zur Vereinfachung des Berechnungsverfahrens wurde die Kornrauheit k_{st} gleich der Gesamtrauheit der Gewässersohle k_{st} gesetzt. Für eine abweichende Belegung müsste

eine zusätzliche Kalibrierung für den k_{st} -Wert erfolgen, was aufgrund der fehlenden Datengrundlage als nicht zielführend eingeschätzt wurde. Der Wert θ_{cr} wird allgemein als Shields-Parameter bezeichnet und konstant mit 0,0047 angesetzt. Er kennzeichnet den Beginn des Geschiebetransports. Liegt die Mobilitätsrate θ' , d.h. das Transportvermögen des Wassers, über dem Shields-Parameter können Sedimente aufgenommen und transportiert werden. Ist die Mobilitätsrate zu gering, findet kein Transport statt.

Die erodierbare obere Ackerbodenschicht wurde als Einkornmisch mit einem mittleren Korndurchmesser von $d_m = 0,042$ mm angesetzt. Dies entspricht einem groben Schluff (gU) gemäß DIN 4022. In zwei Testberechnungen waren zuvor Varianten feinerer Schluffe simuliert worden, so dass die eigentliche gU-Feststofftransportberechnung intern als Variante 3 („V3“) bezeichnet wurde. Die beiden entsprechenden Dateiordner wurden wie folgt benannt:

„11280_skd_IST0_210323_re2017_07_015_FT_gU_V3“

„11280_ges_IST0_210310_re100_FT_gU_V3“

Alle Randbedingungen der Klarwasserberechnungen (Rauheitsbeiwerte k_{st} , Zuflüsse, Auslaufrandbedingungen, Bauwerksgeometrien, globale Parameter) wurden unverändert beibehalten. Eine Beeinflussung der Strömungsberechnung durch den Feststofftransport findet nur durch die Änderung der Netzgeometrie durch Erosion oder Sedimentation statt. Die Parameter des Wassers (Dichte, Viskosität) werden durch die simulierte Stoffaufnahme nicht beeinflusst.

Im Ergebnis der Feststofftransportberechnungen liegen, zusätzlich zu den Ergebnissen des HYDRO_AS-Moduls, die veränderten Netzgeometrien (kennzeichnen Abträge und Ablagerungen) sowie die veränderten mittleren Korndurchmesser und Konzentrationen vor (hier nicht relevant, da sich bei einer Einkornberechnung durch Umlagerungen keine Änderung ergeben).

Es wird eingeschätzt, dass die Ergebnisse der Feststofftransportberechnungen qualitative Aussagen zu erosions- bzw. sedimentationsgefährdeten Bereichen ermöglichen. Verlässliche quantitative Angaben zu den transportierten Mengen und den zu erwartenden Abtragstiefen bzw. Auflandungshöhen sind ohne eine detaillierte Kalibrierung jedoch nicht möglich.

Die Feststofftransportberechnungen wurden dazu genutzt, potenzielle Erosions- und Ablagerungstrecken zu lokalisieren. Dabei wurde deutlich, dass die mit dem genutzten Programmsystem verfügbaren Werkzeuge und Berechnungsmethoden nur bedingt für die Zielstellung nutzbar sind. So zeigen sich im Ergebnis der Berechnung recht diffuse Bilder von kleinräumigen Erosionen und Sedimentationen, die größtenteils vermischt aufscheinen. Klar definierbare Abtrags- und Auftragsbereiche lassen sich daraus nur mittels ingenieurtechnischer Bewertung ableiten.

Ein offenbar gewordener Nachteil ist zudem, dass die 2017 beobachteten Schlammablagerungen im Unterdorf mit der Berechnung nicht nachvollzogen werden konnten. Vermutlich wird der Schwebstoffanteil modelltechnisch nur unzureichend berücksichtigt, so dass die Ablagerungen in den flachen Bereichen des Unterdorfs rechnerisch ausbleiben.

Die Ergebnisse der Feststofftransportberechnungen können deswegen nur der groben Orientierung dienen und müssen gemeinsam mit den anderen Unterlagen zur Bodenerosionsgefahr gedeutet werden.

6.4 Ermittlung hydrodynamischer Größen im Planzustand

Für mehrere potenzielle Standorte eines zentralen Hochwasserrückhalts wurden zunächst Berechnungssimulationen mit einem 20- und einem 100jährigen Starkregen durchgeführt, um das jeweilige Verbesserungspotenzial dieser Standorte vorabschätzend beurteilen zu können.

Vier dieser Standorte mit einem besonders hoch erscheinenden Verbesserungspotenzial sowie der Aussicht auf technische Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit wurden im HWRMP anschließend vertiefend untersucht. Für sie wurden Beregnungssimulationen auch für die übrigen fünf Jährlichkeiten durchgeführt und ausgewertet.

Die scheidelreduzierende gemeinsame Wirkung der zwei potenziellen Rückhaltestandorte „HRB Sportplatz“ und „HRB Färbegraben“ sowie aller vier Rückhaltestandorte auf die Hochwasserabflüsse im Spitzkunnersdorfer Wasser wurde durch Beregnungssimulationen mit räumlich gleichmäßigen, zeitlich mittenbetonten Niederschlägen für die sieben Jährlichkeiten und jeweils die Dauerstufe $D = 60$ min ermittelt. Anschließend wurden diese beiden Szenarios für die sieben Jährlichkeiten auch in stationären Hochwasserberechnungen für das Spitzkunnersdorfer Wasser nach der in den Kapiteln 5.1 und 5.2 beschriebenen Methodik umgesetzt.

Für jede einzelne im HWRMP abgeleitete technische Hochwasserschutzmaßnahme am Spitzkunnersdorfer Wasser mit einem relevanten Einfluss auf das Strömungsverhalten wurden jeweils stationäre Hochwasserberechnungen für die sieben Ereignisse HQT durchgeführt. So konnten ihr Nutzen und ihre Wirtschaftlichkeit ermittelt und entschieden werden, ob sie in die Vorzugsvariante aufzunehmen sind.

Für die Gesamtheit der letztlich in der Vorzugsvariante empfohlenen technischen Hochwasserschutzmaßnahmen wurden ebenfalls stationäre Hochwasserberechnungen für die sieben Ereignisse HQT vorgenommen.

6.5 Weiterverarbeitung der Modellergebnisse

Zur Weiterverarbeitung der Modellergebnisse bspw. in Karten und für die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden zunächst die an den benetzten Modellknoten ermittelten maximalen Wasserstands- und Fließgeschwindigkeitswerte in einen Punktvektor-Datensatz und anschließend mit der Software ArcGIS 10.1 in ein unregelmäßiges Dreiecksnetz in Form eines ESRI-Terrains überführt. Mit diesem Schritt wurden alle im Berechnungsnetz des hydraulischen Modells vorhandenen Aussparungen wie Gebäude, Pfeiler und Widerlager durch Interpolation mit Wasserspiegelwerten ausgefüllt.

Die daraus abgeleiteten ESRI-TINs bzw. ESRI-Grids wurden für alle zu betrachtenden Hochwasserereignisse jeweils mit dem Berechnungsnetz des 2D-HN-Modells verschnitten, um Überflutungsflächen und Überstauhöhen zu ermitteln. Durch die Berücksichtigung sämtlicher Bruchlinien aus terrestrischen Vermessungen oder Aero triangulationen und die große Knotendichte des Berechnungsnetzes ist eine hohe Genauigkeit der auf diese Weise ermittelten Überflutungsflächen und -tiefen gewährleistet.

Die Verschneidung der Wasserspiegel mit der Geländeoberfläche erfolgte rasterzellenweise mit der Auflösung von 0,5 m. Dabei wird ein Ergebnisraster erzeugt, welches die Identifizierung überschwemmter und trocken verbleibender Flächen einschließlich der jeweiligen Flächengrößen und -volumina erlaubt. Damit ist es auch möglich, die Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten sowie spezifischen Abflüsse (als Produkt aus den Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten) beliebig zu klassifizieren.

Die während der Projektbearbeitung erzeugten und letztendlich verwendeten GIS-Datensätze sind Bestandteil der digitalen Auslieferung des HWRM-Plans.