Gewässerrandstreifenprojekt "Untere Havelniederung zwischen Pritzerbe und Gnevsdorf"

Unterlage zur Genehmigungsplanung

Hydrodynamische Modellierung der SH Rathenow

Modellaufbau und -validierung

im Auftrag des Naturschutzbundes Deutschland e. V.

Verfasser:
Dipl.-Ing. Jan Feldmann
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt

Redaktionelle Bearbeitung:
Dipl.-Ing. agr. Marianne Uden

© smile consult GmbH

Alle Rechte vorbehalten. Die Unterlagen dürfen nur nach Zustimmung der smile consult GmbH kopiert, vervielfältigt oder in andere Sprachen übersetzt werden.

Hannover, den 19.04.2017



apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt

smile consult GmbH
Vahrenwalder Straße 4
30165 Hannover

Tel.: 0511 / 54 36 17 - 40
Fax: 0511 / 54 36 17 - 66

info@smileconsult.de
www.smileconsult.de

Inhaltsverzeichnis

1. VERANLASSUNG 7

2. DATENGRUNDLAGE 8

2.1. Geländedaten 8

2.1.1. ALS-Basismodell 8

2.1.2. WSA-Fächerecholotpeilungen 8

2.1.3. NABU-Fächerecholotpeilungen 9

2.1.4. Linienecholot Vermessungen 10

2.1.5. Terrestrische Vermessungen 11

2.1.6. Vermessungsdaten des PEP 12

2.2. DBWK 13

2.3. Digitale Orthophotos 13

2.4. Biotoptypenkarte 13

2.5. Wasserwirtschaftliche Hauptzahlen 13

2.6. Wasserspiegelfixierungen und -lagenmessungen 14

2.7. ADCP–Messungen 15

2.7.1. Niedriger Abfluss 15

2.7.2. Hoher Abfluss 21

3. AKTUALISIERUNG DER GRUNDLAGENDATEN 24

3.1. DGM-Aktualisierung 24

3.2. Biotopkartierung / Flächennutzungskarte 25

4. MODELLAUFBAU 27

4.1. Erstellung des Berechnungsgitters 27

4.1.1. Integration von Bauwerken 31

4.2. Erstellung des Rauheitenmodells 32

5. VALIDIERUNG DES HYDRODYNAMISCHEN SIMULATIONSMODELLS 34

5.1. Wasserspiegelfixierung / -lagenmessung 34

5.1.1. Spezifikation der Randbedingungen 34

5.1.2. Modellergebnisse 35

5.2. ADCP-Messungen bei niedrigen Abfluss 35

5.2.1. Spezifikation der Randbedingungen 35

5.2.2. Modellergebnisse 36

5.3. ADCP-Messungen bei hohem Abfluss 40

5.3.1. Spezifikation der Randbedingungen 40

5.3.2. Modellergebnisse 40

5.4. Durchflussmessung an der Grubenlanke 42

6. MODELLBESCHREIBUNG MARINA2D 44
6.1. Hydrodynamik-Modul 44

7. ZUSAMMENFASSUNG 47

8. LITERATURVERZEICHNIS 48

9. ANLAGEN ZUM BERICHT 49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 2016 durchgeführte hydrographische Vermessungen der Havelufer, Nebengewässer und Altarme mit der Ausdehnung des numerischen Simulationsmodells (Hintergrundbild LGB) 10

Abbildung 2: 2016 durchgeführte terrestrische Vermessungen der Maßnahmenbereiche mit der Ausdehnung des numerischen Simulationsmodells (Hintergrundbild LGB) 11

Abbildung 3: Übersicht über die Vermessungsdaten des PEP 12

Abbildung 4: Wasserspiegelfixierungen und -lagenmessungen (WSA Brandenburg) 15

Abbildung 5: ADCP-Messquerschnitte im Bereich der Mögeliner Havel und der Grubenlanke 16

Abbildung 6: ADCP-Messquerschnitte im Bereich der Carritz und der Alten Havel 17

Abbildung 7: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in der Stromhavel 19

Abbildung 8: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in den Altarmen und Nebengewässern 20

Abbildung 9: Lage der 3 Messstellen 21

Abbildung 10: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten am Querschnitt 1 22

Abbildung 11: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten am Querschnitt 2 22

Abbildung 12: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten am Querschnitt 3 23

Abbildung 13: Aktualisiertes Digitales Geländemodell der Stauhaltung Rathenow (Hintergrundbild LGB) 25

Abbildung 14: Flächennutzungskarte der Stauhaltung Rathenow (Hintergrundbild LGB) 26

Abbildung 15: Berechnungsnetz der Stauhaltung Rathenow 28

Abbildung 16: Im Berechnungsnetz der SH Rathenow integrierte Strukturpolygone 29

Abbildung 17: Vernetzung des Stauhaltungsmodells Rathenow 30

Abbildung 18: Vernetzung des Stauhaltungsmodells im Maßnahmenbereich 30

Abbildung 19: Berechnungsnetz mit zugehöriger dualer Voronoizerlegung 31

Abbildung 20: Flächenmodell der Stauhaltung Rathenow im Ist-Zustand (Hintergrundbild LGB) 33

Abbildung 21: Vergleich der Wasserspiegel Messung / Simulation 35

Abbildung 22: Abflussverhältnisse bei Tikow für die Zeiträume der ADCP-Messungen 36

Abbildung 23: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten Messung – Simulation in der Stromhavel 38

Abbildung 24: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten Messung – Simulation in den Nebengewässern 39

Abbildung 25: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten - Messung und Simulation in der Carritz. 41

Abbildung 26: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten - Messung und Simulation in der Havel vor der Carritz. 41

Abbildung 27: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten - Messung und Simulation in Havel bei der Carritz. . 42

Abbildung 28: Messquerschnitte der Durchflussmessung von IWUD vom 23.05.2014 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Peildaten der Havel / SH Rathenow des WSA Brandenburg 9

Tabelle 2: Wasserstände und Durchflüsse (WSA Brandenburg-PEP) 14

Tabelle 3: Gemessene mittlere Durchflüsse und deren Standardabweichungen 18

Tabelle 4: Gemessene mittlere Durchflüsse und deren Standardabweichungen 21

Tabelle 5: Rauheiten für das Berechnungsmodell Marina2D 32

Tabelle 6: Randbedingungen der Validierungsrechnungen 34

Tabelle 7: Simulierte und gemessene Durchflüsse an den Messquerschnitten mit zugehörigen Qualitätskennzahlen 37

Tabelle 8: Simulierte und gemessene Durchflüsse an den Messquerschnitten mit zugehörigen Qualitätskennzahlen 40

Tabelle 9: Vergleich der Durchflüsse: Messung – Simulation am 23.05.2014. 43

1. Veranlassung

Die Umsetzung von Maßnahmen im Rahmen des Gewässerrandstreifenprojektes „Untere Havelniederung zwischen Pritzerbe und Gnevsdorf“ wird durch das NABU-Projektbüro „Untere Havelniederung“ in Rathenow gesteuert.

Die smile consult GmbH wurde im Januar 2016 vom Naturschutzbund Deutschland e. V. - vertreten durch das NABU-Projektbüro "Untere Havelniederung" - beauftragt, für die Stauhaltung Rathenow hydrodynamische Simulationsmodelle aufzubauen, zu kalibrieren und zu validieren.

Mit dem validierten Simulationsmodell wurden zunächst Modellrechnungen zur Optimierung und Bewertung der Einzelmaßnahmen durchgeführt und abschließend auf der Basis einer wasserbaulichen Systemanalyse die hydraulischen Nachweise für die Genehmigungsplanung erbracht.

Die Stauhaltung Rathenow erstreckt sich im Bereich der Unteren Havel-Wasserstraße vom Wehr Rathenow (UHW-km 103,5) bis zum Wehr Bahnitz (UHW-km 82,0).

In diesem Bericht werden der Modellaufbau und die Kalibrierung / Validierung des hydrodynamischen Modells der Stauhaltung Rathenow dargestellt.

2. Datengrundlage

Für den Aufbau der hydrodynamischen Simulationsmodelle wurden zunächst die Daten und Informationen aus dem PEP gesichtet und um zusätzliche Daten der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung und des NABU ergänzt. Diese Datenbasis wurde durch Datenrecherchen, Aufnahme und Prüfung von Gelände- und Bewuchsinformationen und durch zusätzliche Vermessungen in den Maßnahmenbereichen vervollständigt.

2.1. Geländedaten

Die vollständige Liste der verfügbaren Vermessungsdaten, die zum Aufbau des IST-DGM und des zugehörigen Berechnungsnetzes herangezogen wurde, ist in der Anlage 3 aufgeführt.

Alle verfügbaren Vermessungsdaten wurden in einem zeitvarianten digitalen Geländemodell integriert, welches die Basis für die Erstellung des IST-DGM bildet. In den, den Vermessungsdaten zugehörigen, Metadaten sind auch Angaben über die Messunschärfe, wenn diese zur Verfügung gestellt wurden, abgelegt. Grundsätzlich gilt bei GPS-basierten Messverfahren, dass die Höhengenauigkeit mindestens um einen Faktor von 2 schlechter ist als die Lagegenauigkeit.

2.1.1. ALS-Basismodell

Für die SH Rathenow liegen Vermessungsdaten aus unterschiedlichen Quellen und in unterschiedlicher Qualität vor. Die Basis der Geländedaten bilden die quadratischen Datenkacheln (mit jeweils 2 km Kantenlänge) des Digitalen Geländemodells des Wasserlaufes Elbe-Mitte (DGM-W) aus dem Jahr 2005 (Befliegungszeitraum: Dezember 2003) und Geländemodelle der SH Rathenow-Süd, welche im Rahmen des PEP erstellt wurden (TopoSys, Befliegungszeitraum: Dezember 2007).

Die damals geforderte Höhengenauigkeit bei der ALS-Datenaufnahme betrug 15 cm. Angaben zur Lageunsicherheit fehlen in der Regel und liegen in derselben Größenordnung.

2.1.2. WSA-Fächerecholotpeilungen

Durch den AG wurden Peildaten der Havel / SH Rathenow des WSA Brandenburg bereitgestellt. Bei den Echolotvermessungen des WSA ist von einer Höhenunschärfe der Vermessung von mehr als 10 cm auszugehen. Angaben zur Lageunsicherheit fehlen in der Regel und liegen in derselben Größenordnung. Die vorliegenden Peildaten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Jahr	Typ / Charakter	Anzahl Datenpunkte
2004	2,0 m-Raster, 3 NK	ca. 250 Tsd.
2005	2,0 m-Raster, 3 NK	ca. 200 Tsd.
2006	Linienpeilung, ~1,0 m, 2 NK	ca. 4 Mio.
2007	0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 4,8 Mio
2008	0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 4,9 Mio
2009	0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 4,2 Mio.
2010	Fächerecholot, 0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 2,1 Mio.
2011	Fächerecholot, 0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 3,5 Mio.
2012	Fächerecholot, 0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 2,2 Mio.
2013	Fächerecholot, 1,0 m-Raster, 2 NK	ca. 1,1 Mio.
2014	Fächerecholot, 0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 2,4 Mio.
2015	Fächerecholot, 0,5 m-Raster, 2 NK	ca. 980 Tsd.

(NK = Nachkommastellen)

Tabelle 1: Peildaten der Havel / SH Rathenow des WSA Brandenburg

2.1.3. NABU-Fächerecholotpeilungen

Zusätzlich sind vom NABU in der SH Rathenow in den Jahren 2017 - 2019 Fächerecholotpeilungen beauftragt und als 0,5 m-Raster zur Verfügung gestellt worden. Diese Peilungen reichen weiter an das Ufer heran als die Peilungen der Fahrrinne des WSA. Es ist ebenfalls von einer Höhenunschärfe der Vermessung von mehr als 10 cm auszugehen.

2.1.4. Linienecholot Vermessungen

Zur Vervollständigung und Aktualisierung der Gewässerbettdaten wurden Anfang 2016 durch das Ingenieurbüro Ellmann & Schulze Vermessungen der Altarme und Nebengewässer durchgeführt. Weitere hydrographische Vermessungen insbesondere der ufernahen Bereiche des Gewässerbettes wurden durch IPP Hydro Consult GmbH bzw. deren Unterauftragnehmer Hemminger Ingenieurgesellschaft mbH durchgeführt. Die Messunschärfe der durch die Ingenieurbüro's durchgeführten Echolotvermessungen liegt ebenfalls in der Größenordnung mehr als 10 cm.

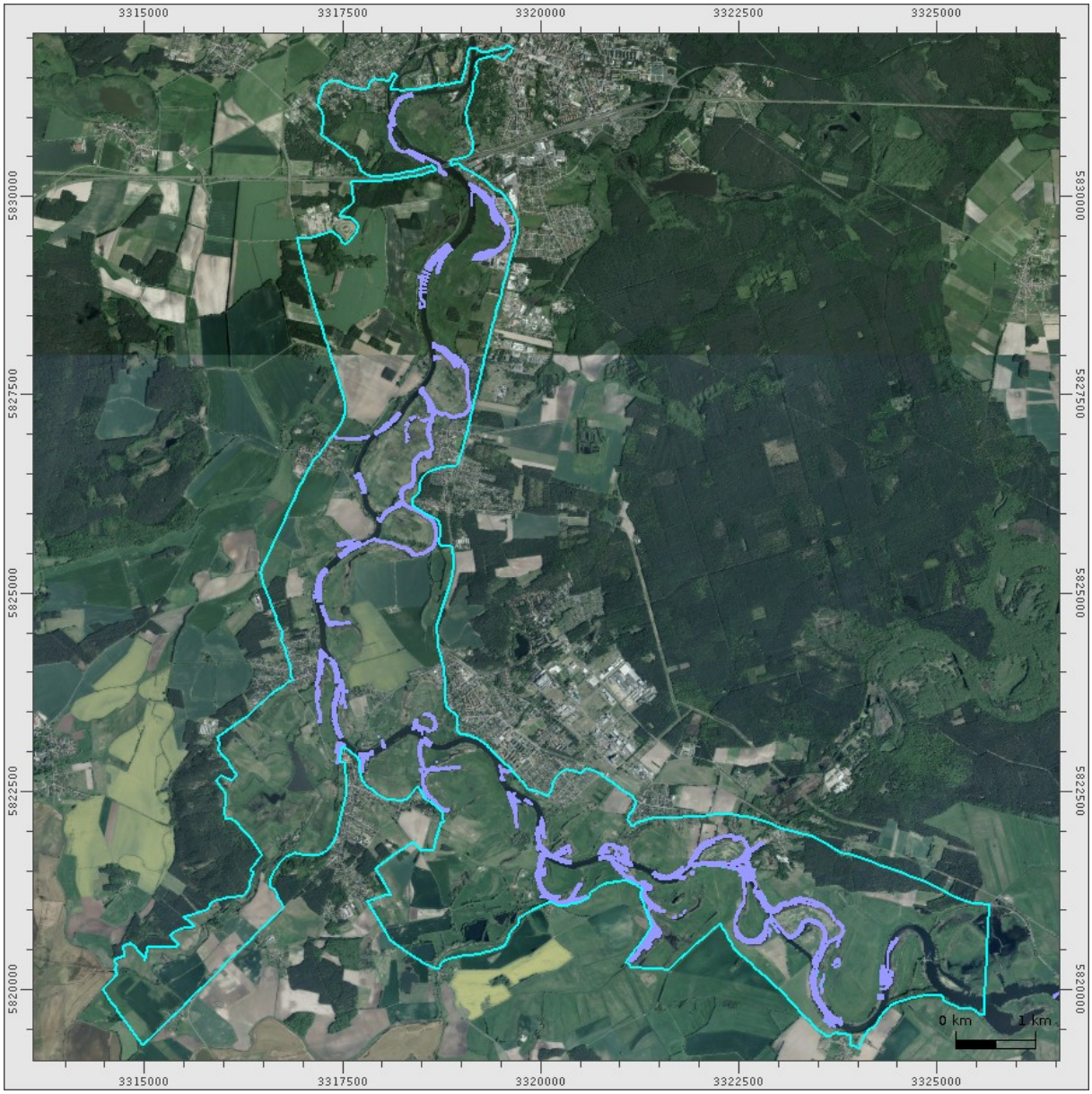


Abbildung 1: 2016 durchgeführte hydrographische Vermessungen der Havelufer, Nebengewässer und Altarme mit der Ausdehnung des numerischen Simulationsmodells (Hintergrundbild LGB)

2.1.5. Terrestrische Vermessungen

Die höchste Genauigkeit, sowohl in der Lage als auch in der Höhe wird bei terrestrischen Vermessungen erreicht. Bei Nutzung von SAPOS-HEPS kann eine Echtzeit-Positionierungsgenauigkeit von 1 - 2 cm in der Lage realisiert werden. Die Messunschärfe in der Höhe hängt u. a. von der Beschaffenheit der zu vermessenden Oberfläche ab. Bei festem Untergrund, wie Beton- oder Bitumenoberflächen, lassen sich Höhengenauigkeiten von 2 - 6 cm erreichen. Bei weichem und bewachsenem Gelände verschlechtert sich die Höhengenauigkeit signifikant. Insbesondere in den Maßnahmenbereichen wurden durch IPP Hydro Consult GmbH bzw. deren Unterauftragnehmer Hemminger Ingenieurgesellschaft mbH terrestrische Vermessungen vorgenommen (siehe Abbildung 2). Weitere terrestrische Vermessungen der Gräben im Vorland wurden durch das Ingenieurbüro Ellmann & Schulze im Jahr 2016 durchgeführt.

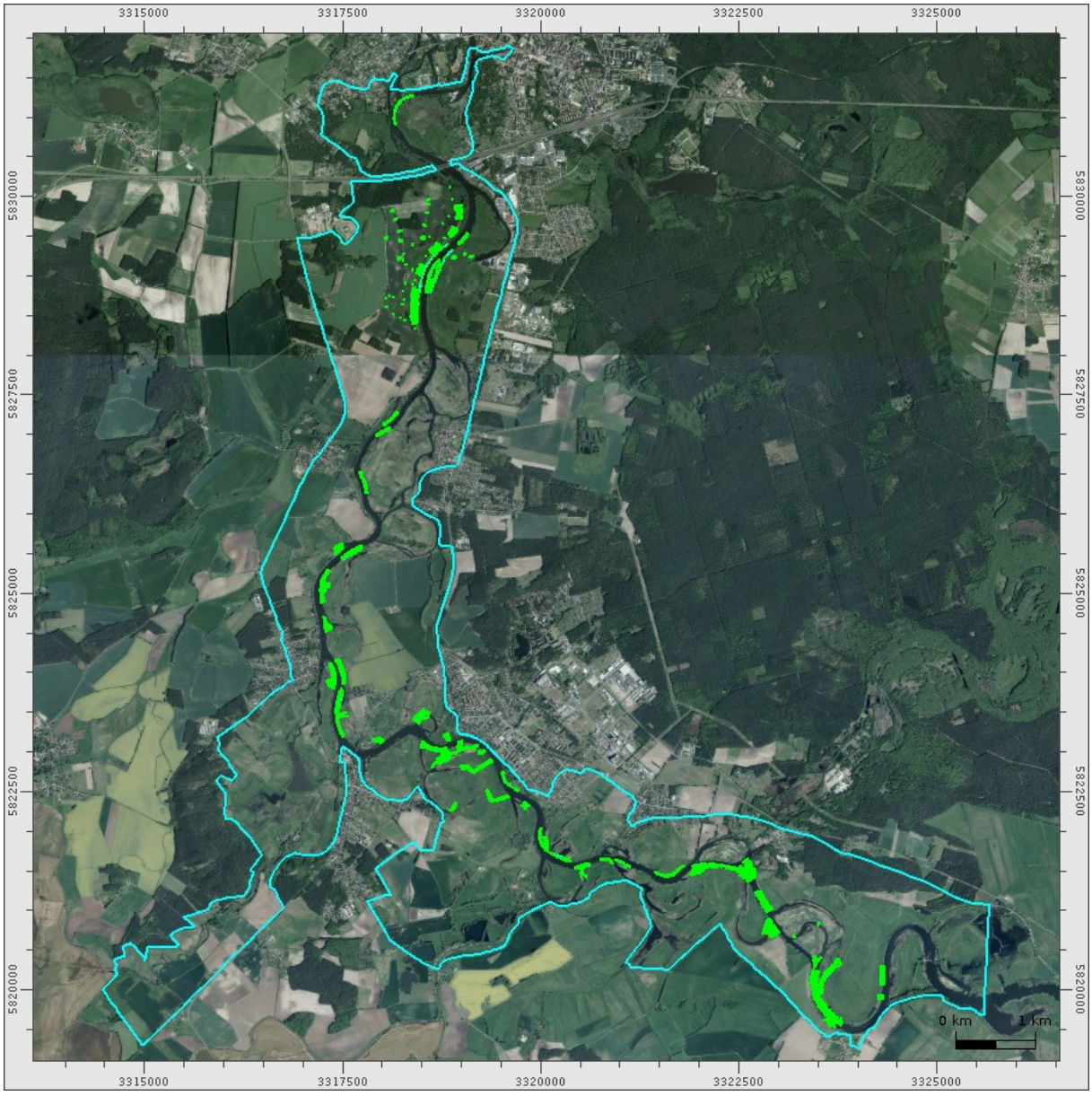


Abbildung 2: 2016 durchgeführte terrestrische Vermessungen der Maßnahmenbereiche mit der Ausdehnung des numerischen Simulationsmodells (Hintergrundbild LGB)

2.1.6. Vermessungsdaten des PEP

Im Rahmen der Erstellung des PEP wurden im Wesentlichen 2007 vom Ingenieurbüro Ellmann & Schulze umfangreiche Vermessungen der Havelrandbereiche und von Nebenarmen und Standgewässern durchgeführt. Auch diese Daten gehen bei der Modellerstellung ein. Die Messunschärfe dieser Echolotvermessungen liegt bei 10 bis 20 cm.

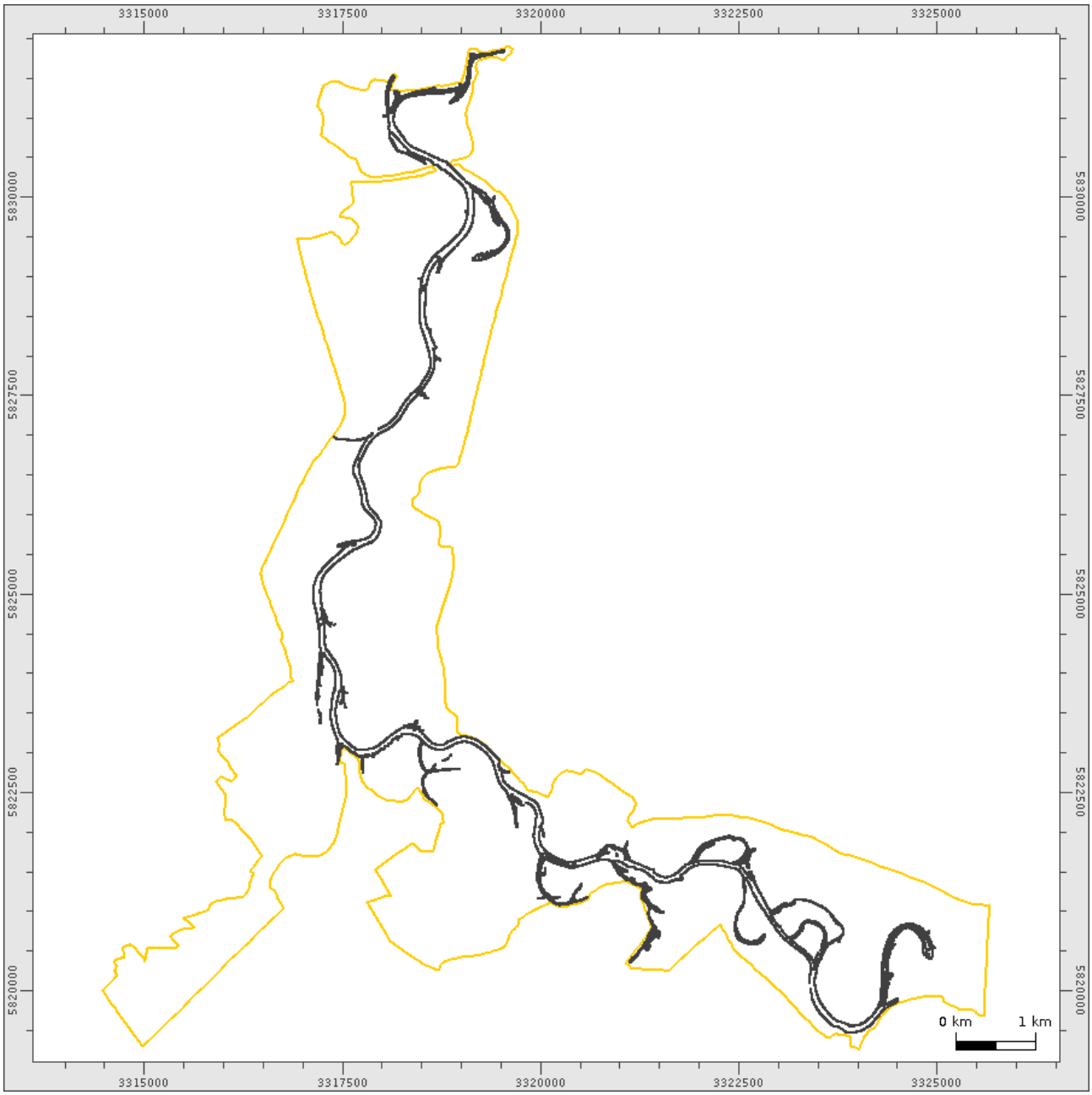


Abbildung 3: Übersicht über die Vermessungsdaten des PEP

2.2. DBWK

Hydraulisch wirksame Strukturen, wie Deiche, Brücken, Straßendämme usw. wurden im Wesentlichen der DBWK 2 entnommen. Im Rahmen der terrestrischen Vermessungen wurden, wenn für die Maßnahmenplanung notwendig, diese Strukturen neu vermessen bzw. verifiziert und als Strukturpolygone in das Berechnungsnetz integriert.

Die Lagegenauigkeit der Daten der DBWK 2 beträgt 20 - 30 cm (Standartabweichung), die Höhengenauigkeit 10 - 15 cm. Strukturinformationen, die terrestrisch vermessen wurden, weisen in der Regel höhere Genauigkeiten auf.

2.3. Digitale Orthophotos

Zur Aktualisierung der Bewuchs- und Nutzungsflächen (z. B. Ackerflächen, Röhrichte) und zur Plausibilisierung aller Modellierungsschritte wurden amtliche Digitale Orthophotos (DOP) als Web Map Service des Landesbetriebes Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) herangezogen.

2.4. Biotoptypenkarte

Basis für die Festlegung der Modellrauheiten bildet ein seit dem PEP gepflegtes Zonenmodell, welchen u. a. Fließ- und Standgewässer, Gräben, Ackerflächen usw. maskiert. Alle während der Maßnahmenplanung und Ortstermine vermessenen bzw. protokollierten Flächennutzungen wurden in das aktualisierte Zonenmodell integriert. Zusätzlich wurde diese Flächennutzungskarte während des gesamten Modellbildungsprozesses durch digitale Orthophotos plausibilisiert. Zur Lagegenauigkeit können keine Angaben gemacht werden, sie liegen aber mit Sicherheit im Rahmen der Genauigkeit der DBWK2 und der digitalen Orthophotos.

2.5. Wasserwirtschaftliche Hauptzahlen

Die Beurteilung der maßnahmenbedingten Änderungen in den hydraulischen Kenngrößen basiert auf der wasserbaulichen Systemanalyse, bei der, durch Differenzbetrachtungen, Unsicherheiten (Unschärfen) in den Basisdaten (Vermessungsdaten, Annahmen an hydrodynamische Rauheiten, Steuergrößen wie Durchflüsse und Wasserstände als auch solche, die aus den gewählten Modellannahmen herrühren) minimiert werden. Zur Beurteilung der maßnahmenbedingten Veränderungen über das gesamte Spektrum der Wasserstandabflussverhältnisse im Untersuchungsraum muss dieser durch hinreichend viele Stützstellen diskretisiert werden.
Die zu nutzenden hydraulischen Szenarien wurden in einer Beratung im LUGV am 30.06.2011 zwischen den Vertretern der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung und der Bundesländer abgestimmt. Grundsätzlich wurde festgelegt, dass für die Nachweisführung und für die Vergleichbarkeit der hydraulischen Ergebnisse die gleichen Randbedingungen (z. B. Datenreihen) wie im PEP verwendet werden sollen.

Im Rahmen des PEP hat es sich als geeignet erwiesen, aus den hydrologischen Kennzahlen der Wasserstände und Abflüsse, diese Stützstellen abzuleiten. Zum einen führten diese Kennzahlen zu einer geeigneten Diskretisierung des Abflussspektrums und zum anderen konnten auch, zum Teil fachfremde Beteiligte, die Kurve der Änderungen über das Abflussspektrum besser interpretieren. Die Kurve der maßnahmenbedingten Veränderungen ist das Ergebnis der Untersuchungen und nicht die zu ihrer Erzeugung herangezogenen Stützstellen. Es wurden die

gleichen Stützstellen wie im PEP (und in den anderen MK's) verwendet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erleichtern.Siehe hierzu PEP-Abschlussbericht S. 8-416 ff. .

Zur Steuerung des hydrodynamischen Modells werden Wasserstandinformationen am unteren Modellrand und Durchflussangaben am oberstromigen Rand verwendet. Die Genauigkeit der Wasserspiegelangaben der Pegel an der UHW liegt bei ca. 1 cm. Angaben zur Genauigkeit der Durchflussmessungen in Albertsheim liegen nicht vor. Bei Durchflussmessungen an natürlichen Gewässern muss, abhängig vom Messverfahren, von einem Fehlerbereich von mindestens 3 bis 10 % ausgegangen werden.

Die zu den statistisch ermittelten wasserwirtschaftlichen Hauptzahlen gehörenden und verwendeten Randbedingungen, die Zuflüsse am oberen sowie die Wasserstände am unteren Modellrand, sind in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Stauhaltung Rathenow	Einheit	NNQ	MNQ	SoMQ	MQ	WiMQ	MHQ	HQ2	HQ10	HQ50	HQ100	HHQ
Durchfluss Bahnitz, km 82,1	m³/s	3	12,4	50,9	75,3	99,7	158,5	176,0	214,0	256,0	273,0	300,0
Zufluss Königsgraben	m³/s	0,0	0,0	0,3	0,5	0,7	2,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
Zufluss Milower Stremme	m³/s	0,0	0,0	0,3	0,5	0,6	1,5	2,0	2,0	3,0	3,0	4,0
Wasserstand OP Rathenow Hinterarche	m	26,639	26,869	27,029	27,099	27,169	27,439	27,395	27,745	27,975	28,065	28,100
Wasserstand OP Rathenow Mühlenwehr	m	26,639	26,868	27,024	27,089	27,147	27,379	27,315	27,640	27,835	27,925	27,940

Tabelle 2: Wasserstände und Durchflüsse (WSA Brandenburg-PEP)

2.6. Wasserspiegelfixierungen und -lagenmessungen

Für die Validierung des hydrodynamischen Modells standen vom WSA Brandenburg aufgenommene Wasserspiegelfixierungen bzw. -lagenmessungen zur Verfügung (siehe Abbildung 4).

Angaben zu den Messunsicherheiten der Wasserspiegelmessungen des WSA, welche zur Validierung des hydrodynamischen Modells herangezogen wurden, lagen nicht vor. Im Bereich der Pegel kann hier auch von einer Genauigkeit von ca. 1 cm ausgegangen werden. Je weiter die gemessene Wasserspiegellage von einem terrestrisch vermessbaren Ort entfernt ist, muss von Messungenauigkeiten von mehr als 10 cm ausgegangen werden.

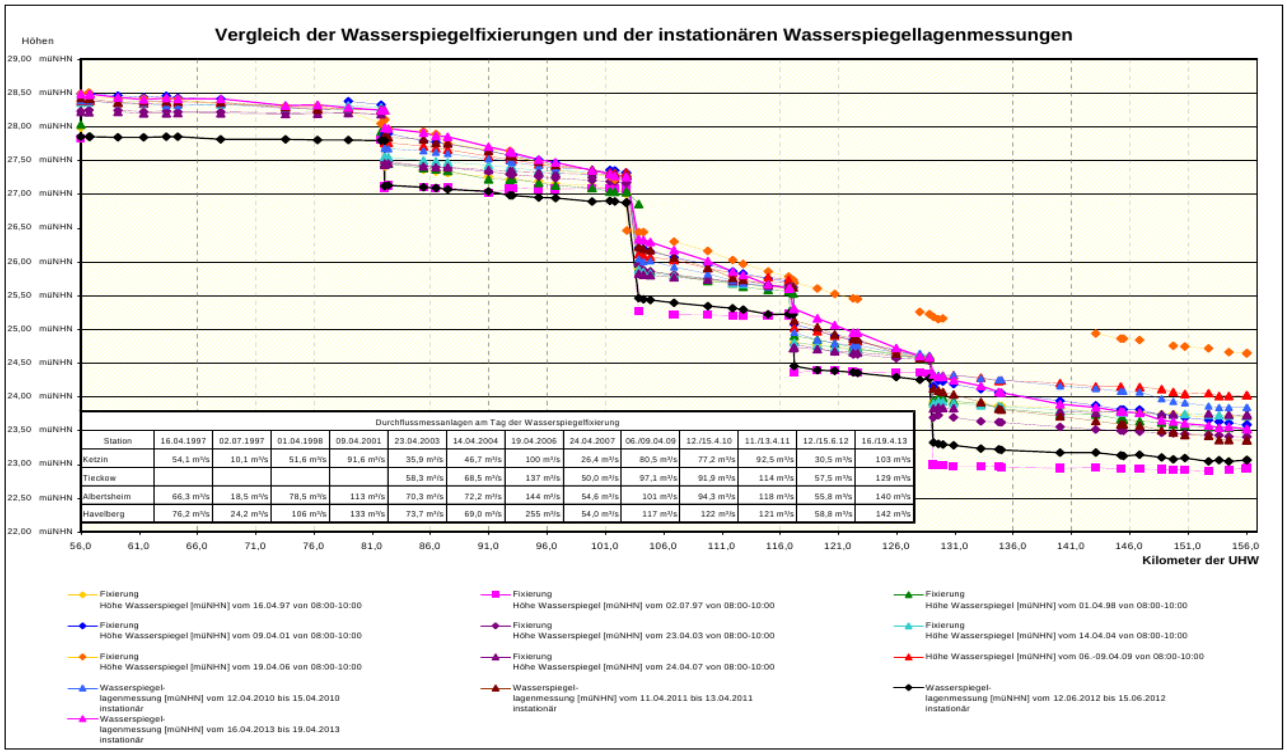


Abbildung 4: Wasserspiegelfixierungen und -lagenmessungen (WSA Brandenburg)

Bei der Simulation der Wasserspiegelfixierungen wurde für jedes Datum ein neues Netz mit der zeitlich interpolierten Tiefenverteilung des Datums der Wasserspiegelfixierung erstellt.

2.7. ADCP–Messungen

2.7.1. Niedriger Abfluss

Zur Kalibrierung des Modells bei niedrigen Abflüssen sind am 06. und 07.07.2016 sowie am 14.07.2016 von der Firma Quantum Hydrometrie ADCP-Messungen an 16 Querschnitten der Havel, der Mögeliner Havel, der Grubenlanke, der Carritz und im Bereich der Alten Havel bei Bahnitz durchgeführt worden. An den Querschnitten (siehe Abbildung 5 und 6) sind jeweils mindestens 4 Messungen durchgeführt worden, bei denen Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe gemessen sowie tiefenintegrierte Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüsse abgeleitet wurden.



Abbildung 5: ADCP-Messquerschnitte im Bereich der Mögeliner Havel und der Grubenlanke

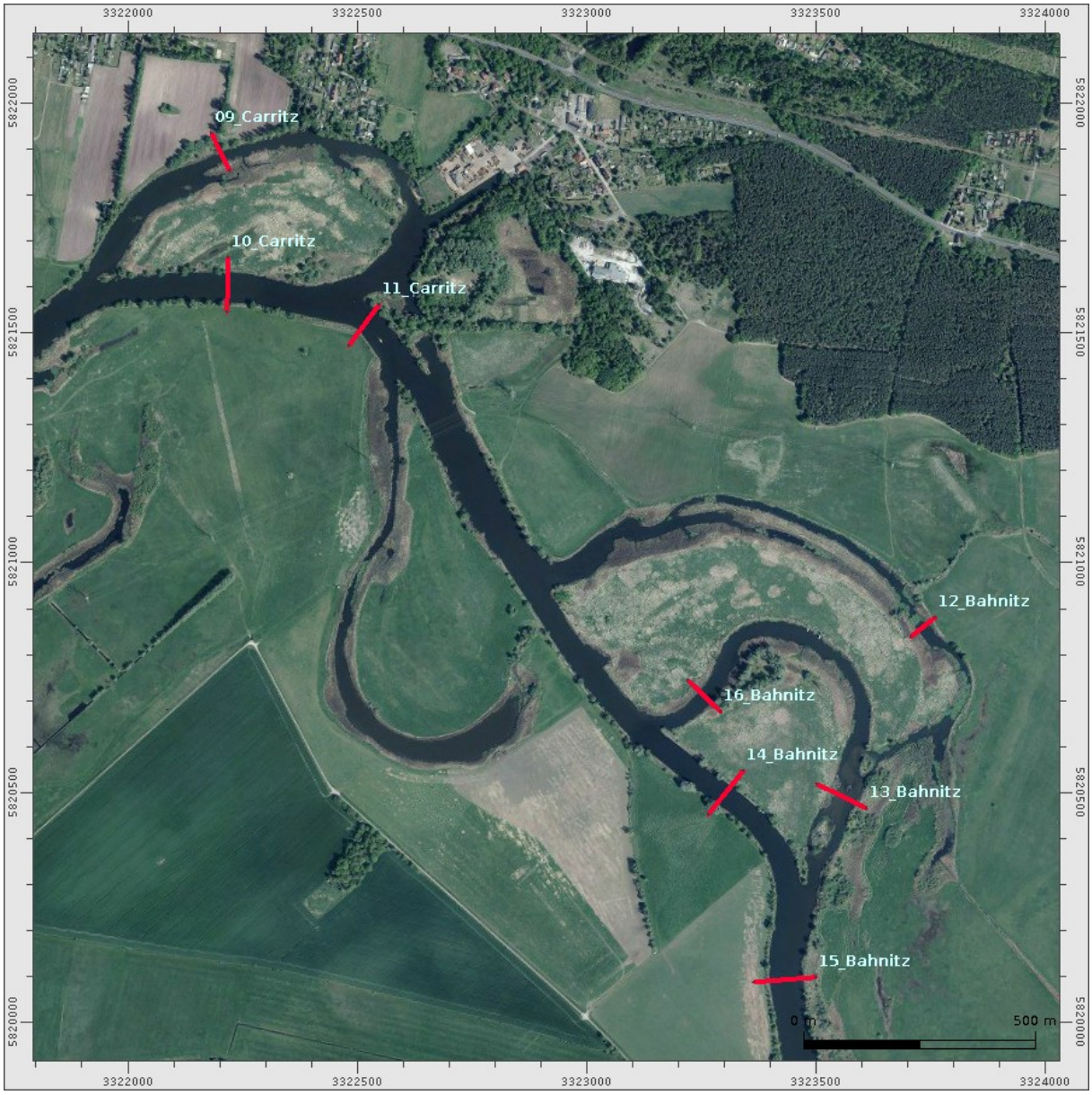


Abbildung 6: ADCP-Messquerschnitte im Bereich der Carritz und der Alten Havel

Die sich ergebenden mittleren Durchflüsse und die aus den jeweils 4 Messungen ermittelten Standardabweichungen sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt.

Querschnitt	Gewässer	Zeit	Durchfluss [m³/s] Messung	Standard-abweichung
01	Mögeliner Havel	06.07.16 16:00	00,44	0,552
02	Havel	06.07.16 13:40	13,60	1,286
03	Mögeliner Havel	06.07.16 14:10	00,26	0,172
04	Mögeliner Havel	06.07.16 11:35	01,45	0,068
05	Mögeliner Havel	06.07.16 11:00	00,77	0,493
06	Grubenlanke	06.07.16 09:40	00,11	0,113
07	Havel	07.07.16 10:25	30,13	1,333
08	Königsgraben	06.07.16 11:50	00,01	0,054
09	Carritz	07.07.16 14:00	00,54	0,201
10	Havel	07.07.16 14:30	29,06	1,358
11	Havel	07.07.16 15:00	26,85	0,507
12	Alte Havel	14.07.16 11:45	00,06	0,07
13	Alte Havel	14.07.16 14:00	00,66	0,049
14	Havel	14.07.16 12:45	34,66	1,311
15	Havel	14.07.16 13:20	36,94	1,509
16	Alte Havel	14.07.16 14:25	00,85	0,723

Tabelle 3: Gemessene mittlere Durchflüsse und deren Standardabweichungen

Bei den Geschwindigkeitsmessungen in der Stromhavel lassen sich gut die Geschwindigkeitsprofile erkennen (siehe Abbildung 7). Das Geschwindigkeitsprofil der Stromhavel im Bereich Mögelin (02_Moegelin) zeigt im linken Uferbereich eine ausgeprägte stromaufwärts gerichtete Geschwindigkeitskomponente, für die keine Erklärung gefunden werden konnte. Der zugehörige Durchfluss passt entsprechend auch nicht zu den Abflüssen im zugehörigen Zeitraum bei Tiekow, welcher zwischen 17 und 19 m³/s schwankt. Die Standardabweichung bezogen auf den mittleren Durchfluss ist in diesem Querschnitt (02_Moegelin) 3 mal so groß wie in den anderen Stromhavel-Querschnitten.

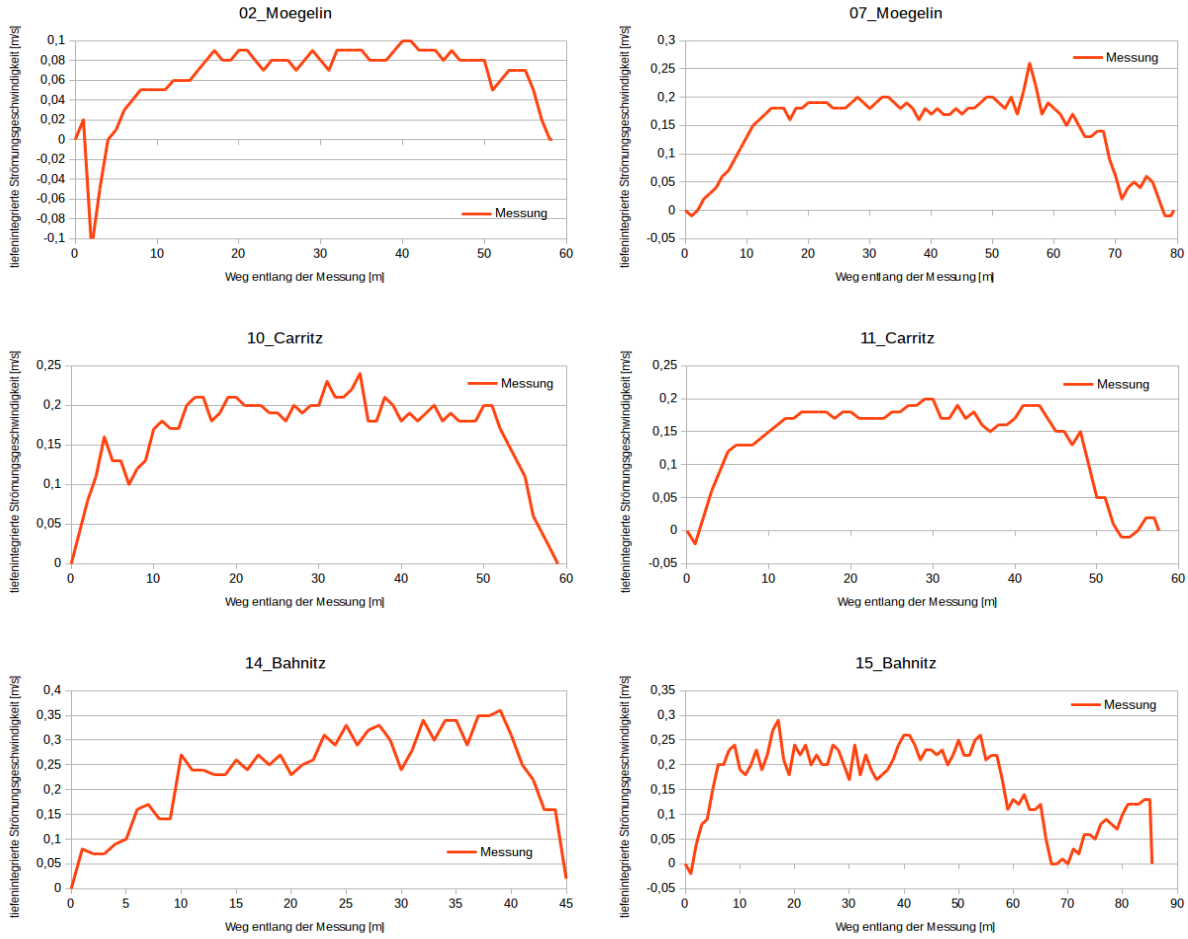


Abbildung 7: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in der Stromhavel

Bei den Messungen in den Altarmen und Nebengewässern lässt sich in der Regel kein klares Geschwindigkeitsprofil ausmachen (siehe Abbildung 8). Hier wird das Strömungsgeschehen stark durch lokale Gegebenheiten im Gewässer bestimmt. Dies zeichnet sich unter anderem auch daran ab, dass die Standardabweichung zum Teil die gleiche Größenordnung wie der gemessene Durchfluss hat oder sogar größer ist (wie z. B. am Querschnitt 01_Moegelin).



Abbildung 8: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten in den Altarmen und Nebengewässern

2.7.2. Hoher Abfluss

Zur Kalibrierung des Modells bei hohen Abflüssen sind am 20.03.2017 von der Firma Quantum Hydrometrie ADCP-Messungen an 2 Querschnitten in der Havel und an einem Querschnitt in der Carritz und im Bereich der Alten Havel bei Bahnitz durchgeführt worden. Bei den Messungen sind Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe gemessen sowie tiefenintegrierte Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüsse abgeleitet worden.



Abbildung 9: Lage der 3 Messstellen

Die sich ergebenden mittleren Durchflüsse und die aus den jeweils 3 Messungen ermittelten Standardabweichungen sind in der folgenden Tabelle 4 zusammengestellt.

Querschnitt	Gewässer	Zeit	Durchfluss [m³/s] Messung	Std Abw Messung
01	Carritz	20.03.17 11:00	06,55	0,15
02	Havel vor Carritz	20.03.17 12:00	93,20	5,81
03	Havel bei Carritz	20.03.17 13:00	90,78	3,78

Tabelle 4: Gemessene mittlere Durchflüsse und deren Standardabweichungen

Bei den Geschwindigkeitsmessungen lassen sich gut die Geschwindigkeitsprofile erkennen (siehe Abbildungen 10, 11, 12). Bei der Messung in der Carritz (Abbildung 10) sind die Schwankungen aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit deutlich höher.

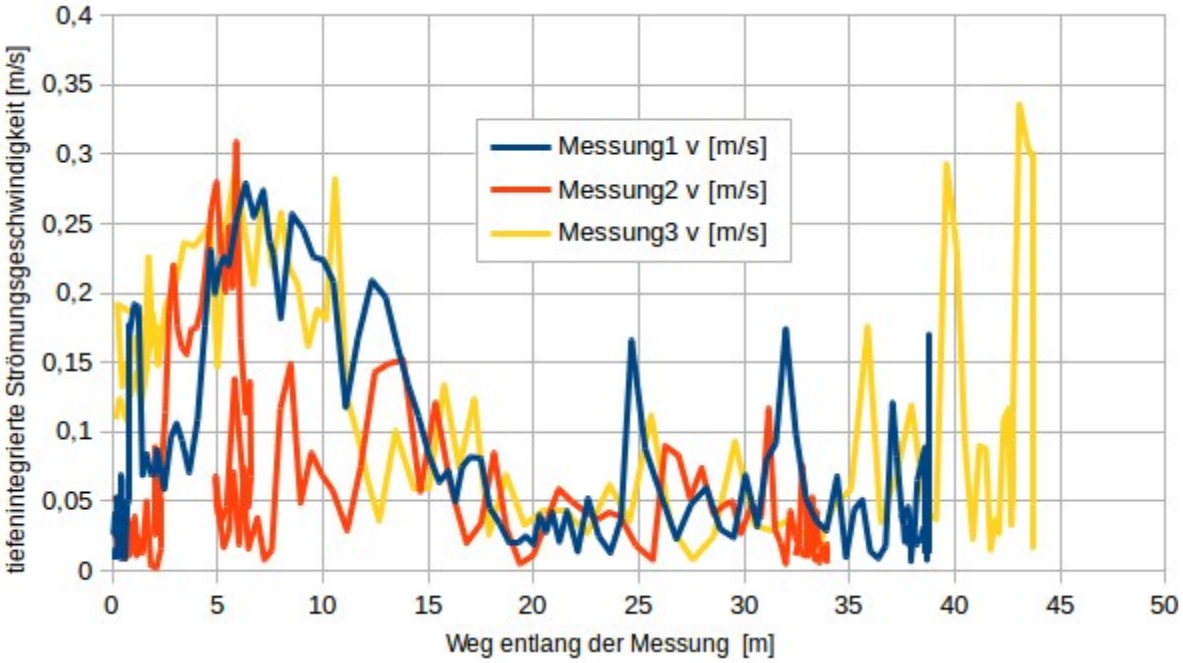


Abbildung 10: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten am Querschnitt 1

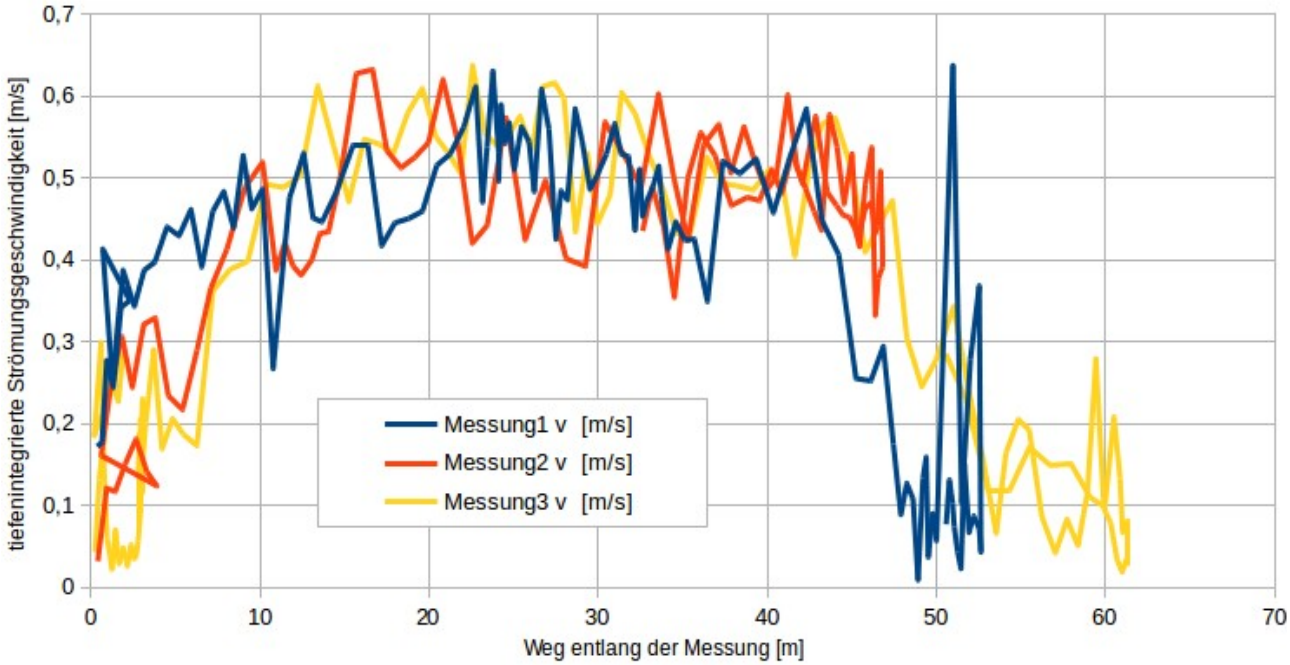
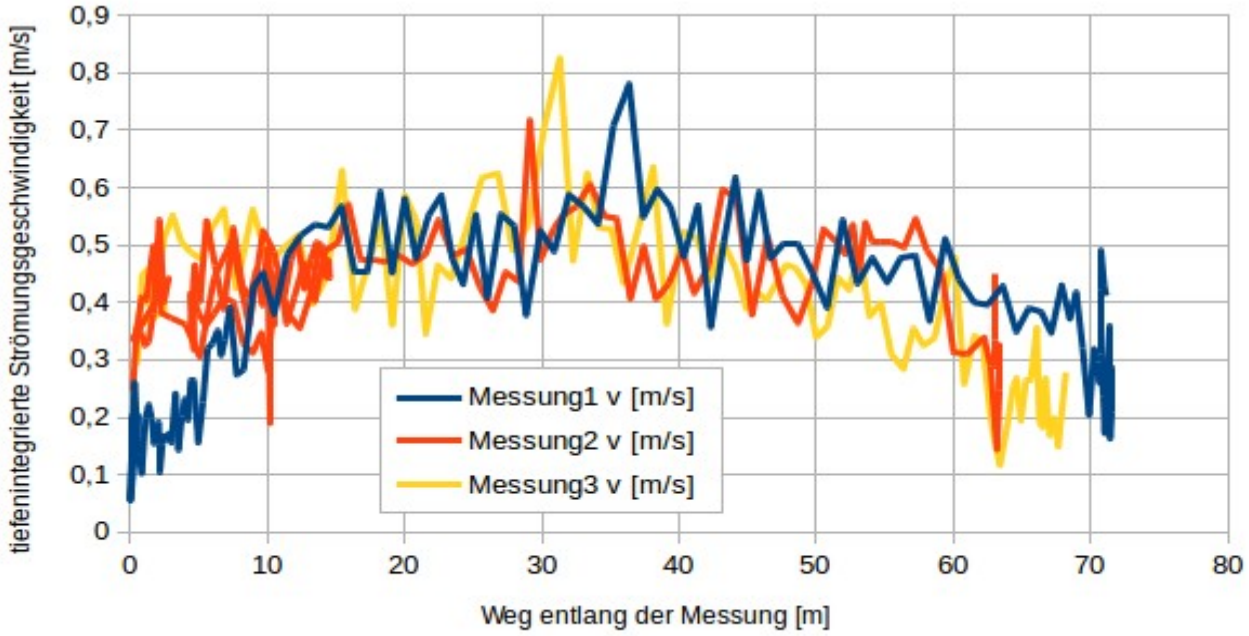


Abbildung 11: Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten am Querschnitt 2


tiefenintegrierte Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Weg entlang der Messung [m]
Messung1 v [m/s]
Messung2 v [m/s]
Messung3 v [m/s]

3. Aktualisierung der Grundlagendaten

3.1. DGM-Aktualisierung

Die DGM-Erstellung bzw. Aktualisierung erfolgt mit den Softwareprodukten der smile consult GmbH. Insbesondere das Softwareprodukt GISMO wird zum Aufbau des datenbankbasierten Digitalen Geländemodells verwendet. GISMO enthält Softwarekomponenten, die durch optimierte Morphingalgorithmen eine kontinuierliche konsistente Aktualisierung des IST-DGM durch neue Vermessungsdaten ermöglichen.

Für die SH Rathenow liegen Vermessungsdaten aus unterschiedlichen Quellen und in unterschiedlicher Qualität vor. Die Basis der Geländedaten bilden die quadratischen Datenkacheln (mit jeweils 2 km Kantenlänge) des Digitalen Geländemodells des Wasserlaufes Elbe-Mitte (DGM-W) aus dem Jahr 2005 (Befliegungszeitraum: Dezember 2003) und Geländemodelle der SH Rathenow-Süd, welche im Rahmen des PEP erstellt wurden (Befliegungszeitraum: Dezember 2007).

Die Regelmäßig durchgeführten hydrographische Vermessungen des Wasser- und Schifffahrtsamt Brandenburg (WSA Brandenburg) werden durch Messungen des NABU und durch die im Rahmen der Projektbearbeitung durch die Ingenieurbüros Ellmann & Schulze und IHU aufgenommenen Vermessungsdaten ergänzt.

Terrestrische Vermessungen von hydraulisch relevanten Gräben und der Geländeoberfläche in den Maßnahmenbereichen werden zur Prüfung und Anpassung des Basis-DGM herangezogen.

Alle verfügbaren Vermessungsdaten wurden in einem datenbankbasierten zeitvarianten digitalen Geländemodell der SH Rathenow zusammengeführt und daraus das Basis-DGM 2015/16 abgeleitet (siehe Abbildung 13). Durch Aktualisierung der Vermessungsdaten in den Vorland – und Maßnahmenbereichen sowie die Integration (örtliches Morphing) aller verfügbaren Vermessungsdaten in den Uferbereichen und Altarmen ist eine wesentliche Erhöhung der Genauigkeit des DGM erreicht worden.

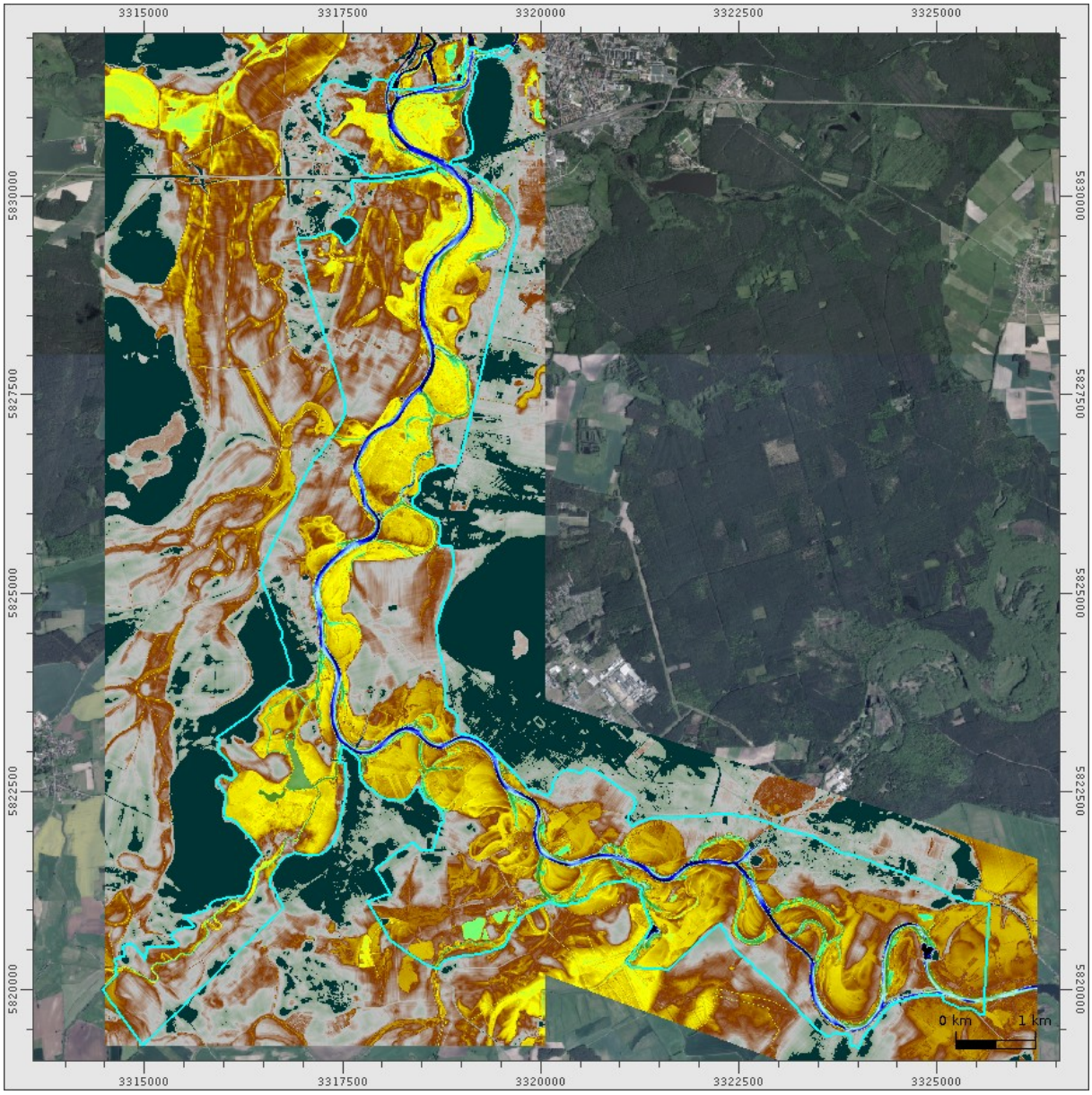


Abbildung 13: Aktualisiertes Digitales Geländemodell der Stauhaltung Rathenow (Hintergrundbild LGB)

3.2. Biotopkartierung / Flächennutzungskarte

Grundlage für die Festlegung von Rauheiten, Korngrößen und Erosionstiefen bzw. äquivalenten Modellgrößen im hydro- und morphodynamischen Modell bilden u. a. Kartierungen des Bewuchses, der Bebauung, von Fließgewässern usw. Für die Aktualisierung stand die im Rahmen des PEP erstellte Biotoptypenkarte zur Verfügung. Diese Biotopkarte wurde entsprechend der Modellausdehnung erweitert und auf der Basis von DBWK, digitalen Orthophotos und Informationen, die die Vermesser / Kartierer vor Ort zusammengetragen haben, aktualisiert. In der Abbildung 14 ist die aktualisierte Biotop- bzw. Flächennutzungskarte dargestellt.

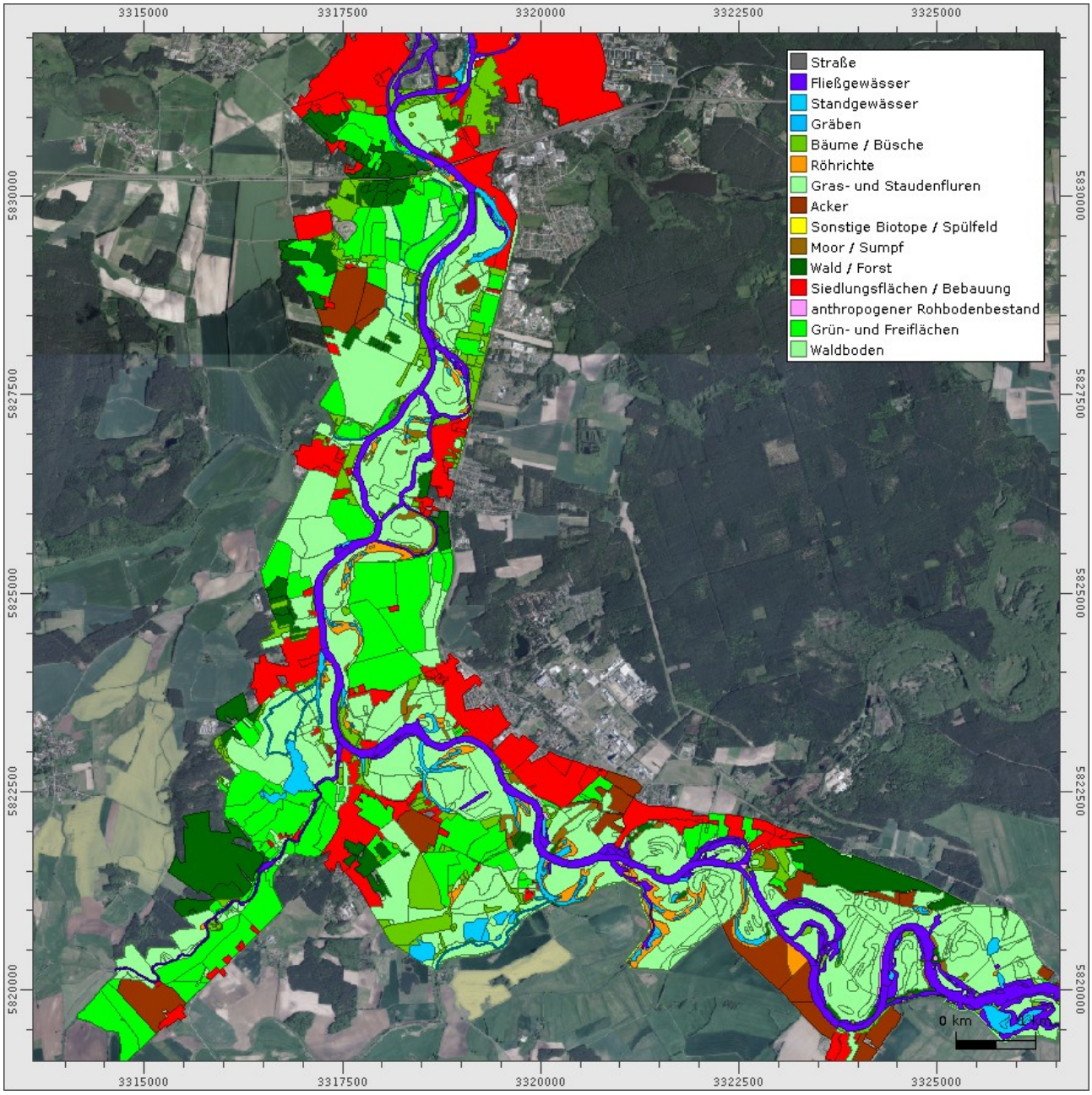


Abbildung 14: Flächennutzungskarte der Stauhaltung Rathenow (Hintergrundbild LGB)

4. Modellaufbau

Die hydrodynamischen Simulationsmodelle basieren auf unstrukturierten Dreiecksgittern. Diese werden so aufgebaut, dass die natürlichen Fließzustände so genau wie möglich abgebildet werden können, insbesondere in den Maßnahmenbereichen, für die die hydraulischen Nachweise zu erstellen sind. Gleichzeitig gilt es, die Anzahl der Berechnungsknoten so gering wie möglich zu halten, um die Rechenzeiten zu minimieren.

Für eine Berechnung sind Randbedingungen (hier: Durchflüsse am oberen und Wasserstände am unteren Modellrand), Anfangswerte für jeden einzelnen Berechnungsknoten und ein Rauheitenmodell notwendig. Alle benötigten Informationen werden über Gitternetze mit entsprechenden Daten an jedem Knoten dem numerischen Modell zugänglich gemacht.

4.1. Erstellung des Berechnungsgitters

Die Ausdehnung des Berechnungsgitters entspricht im Wesentlichen dem Staustufenmodell Rathenow aus dem PEP, jedoch wurde es in weiten Bereichen optimiert, aktualisiert sowie in den Maßnahmenbereichen höher aufgelöst und die Tiefenverteilungen wurden entsprechend den aktuellen Vermessungsdaten (siehe Kapitel 2.1) angepasst (siehe Abbildung 15). Es wurde besonders auf die gute Erfassung der Altarme, Buchten und Gräben geachtet.

Das Berechnungsnetz der SH Rathenow besitzt ca. 195.000 Knoten und 387.000 Dreieckselemente. Der Havelflussschlauch wurde mit Elementausdehnungen von um die 5 m aufgelöst. Die kleinste Kantenlänge im Modell beträgt ca. 2,6 m und die größte ist kleiner als 160 m.

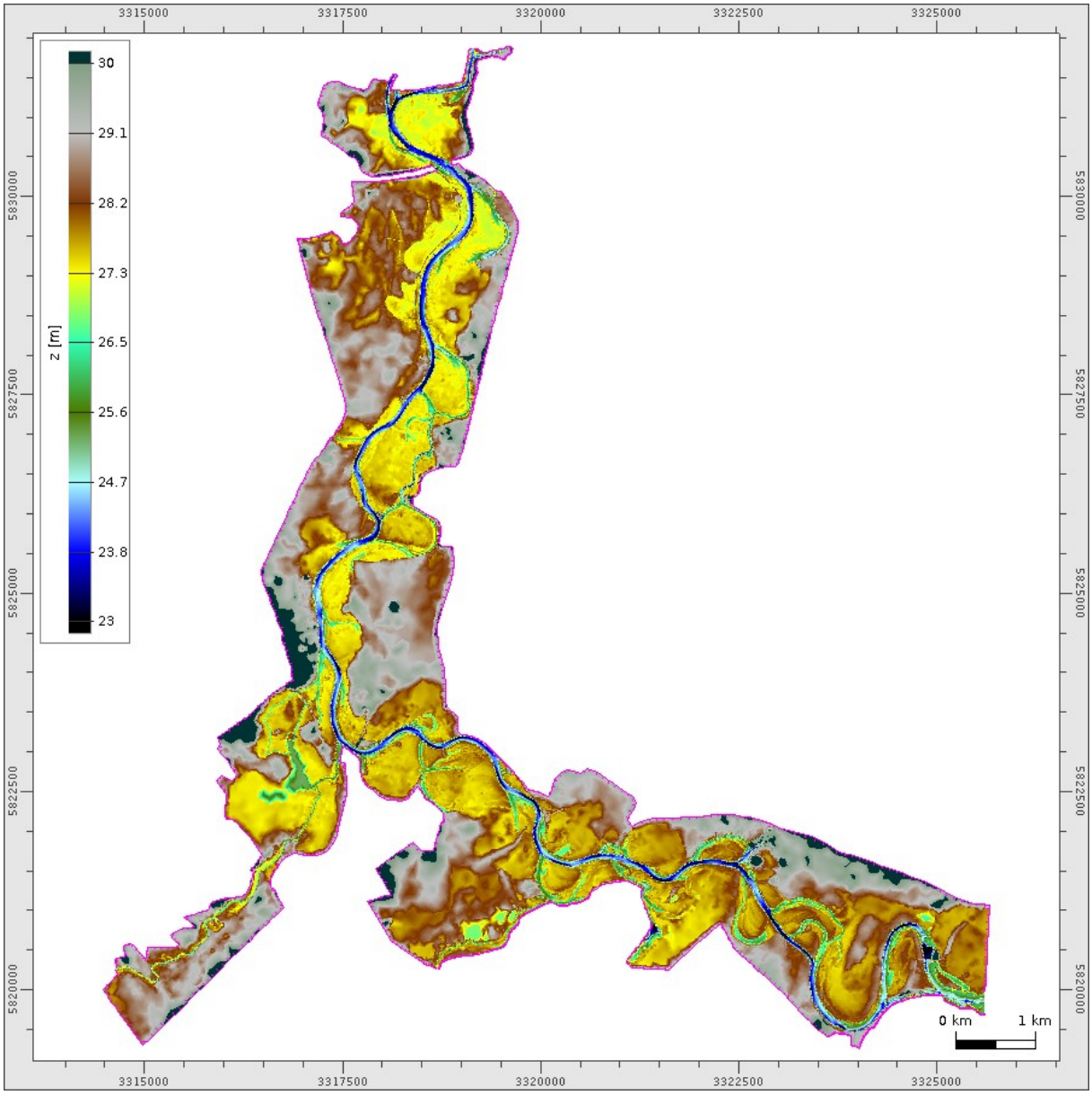


Abbildung 15: Berechnungsnetz der Stauhaltung Rathenow

Hydraulisch relevante Geländestrukturen, wie Deiche, Deckwerksoberkanten, Gräben, Brücken, Straßendämme usw., wurden bei der Netzgenerierung in Form von Strukturpolygonen berücksichtigt. Insgesamt werden 343 Strukturpolygone mit ca. 32-tausend Knoten verwendet. Die verwendeten Strukturpolygone sind in der Abbildung 16 dargestellt.

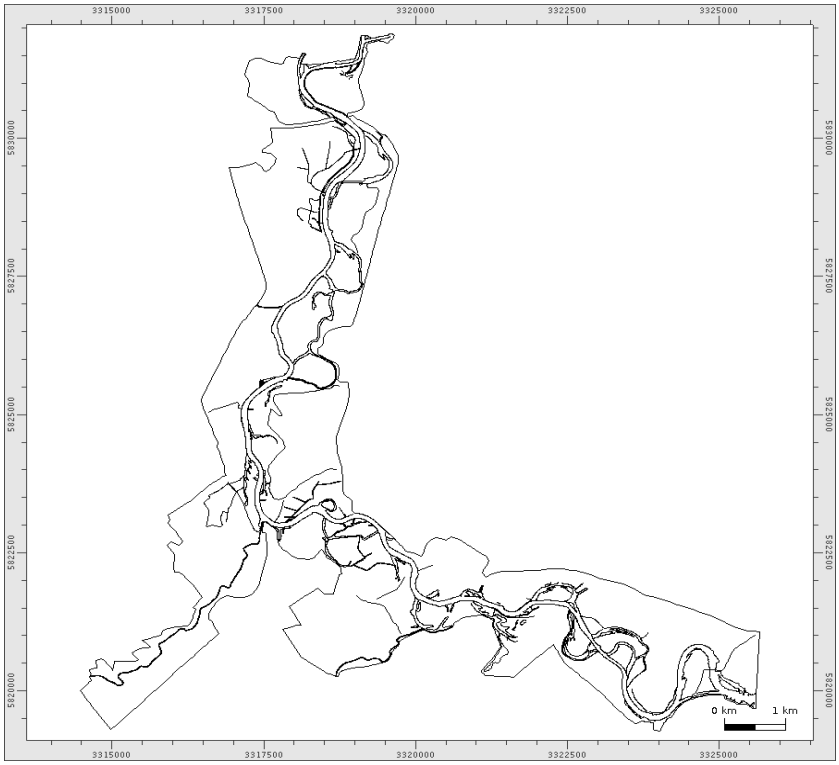


Abbildung 16: Im Berechnungsnetz der SH Rathenow integrierte Strukturpolygone

Das Berechnungsnetz der SH Rathenow besitzt ca. 195-tausend Knoten und ca. 390-tausend Dreieckselemente. Der Havelflussschlauch wurde mit Elementausdehnungen von um die 6 m aufgelöst. Die kleinste Kantenlänge im Modell beträgt ca. 2,6 m und die größte ist kleiner als 160 m und liegt auf den flachen Vorländern am Modellrand. Die Abbildung 17 zeigt das gesamte Gitternetz der Stauhaltung Rathenow und die Abbildung 18 den Ausschnitt eines hoch aufgelösten Maßnahmenbereichs.

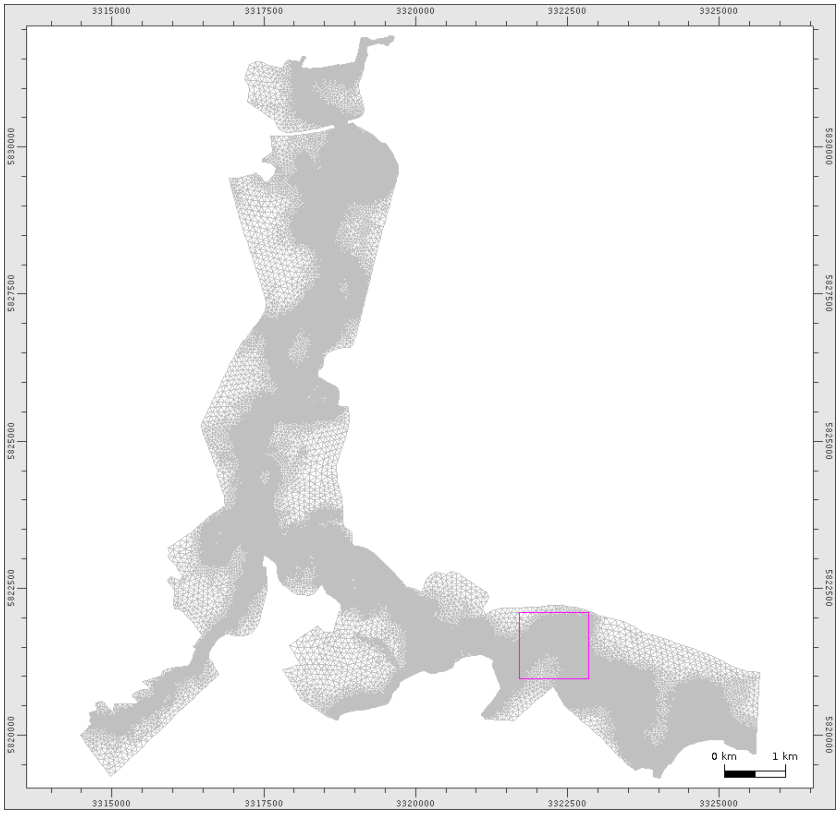


Abbildung 17: Vernetzung des Stauhaltungsmodells Rathenow

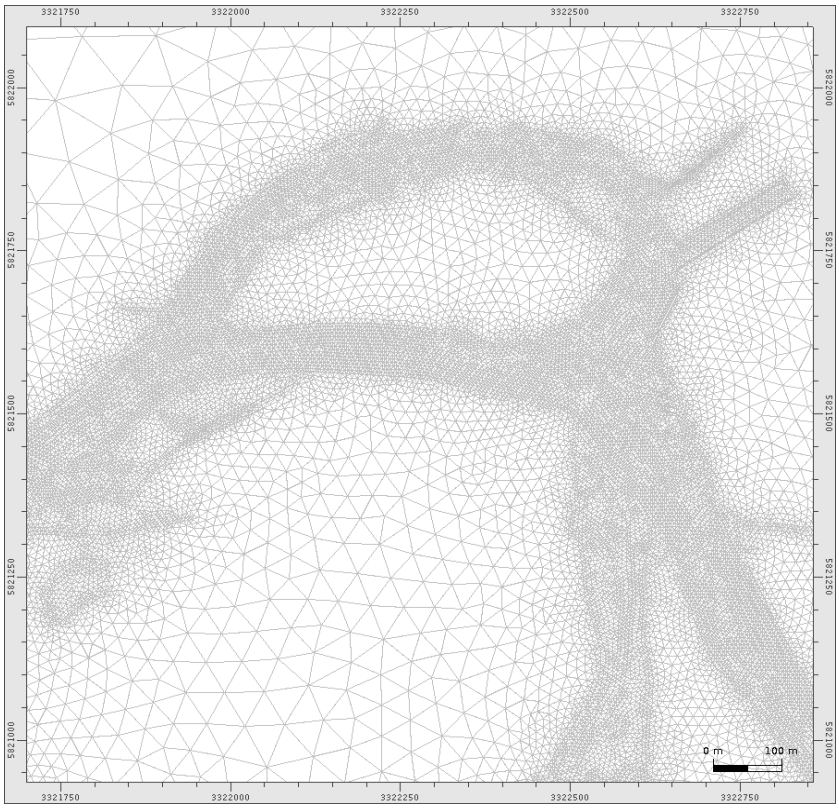


Abbildung 18: Vernetzung des Stauhaltungsmodells im Maßnahmenbereich

Die Abbildung der Geländehöhen auf das Berechnungsnetz erfolgt durch eine sowohl volumentreue als auch hydraulisch strukturerhaltende Approximation mit der Software GISMO. Die Knoten des Berechnungsnetzes sind hierbei integrale Repräsentanten der sogenannten zugehörigen Voronoiflächen (siehe Abbildung 19). Die z-Werte der Knoten werden entsprechend durch Integralbildung auf dem DGM berechnet. Um in diesem Prozess nicht hydraulisch relevante Geländestrukturen, wie Deiche, Deckwerksoberkanten, Gräben, Brücken, Straßendämme usw zu verlieren, wird diese Approximation verknüpft mit den in das Berechnungsnetz integrierten Strukturpolygonen, für die die hydraulisch relevanten Geländehöhen im Netz wiedergegeben werden.

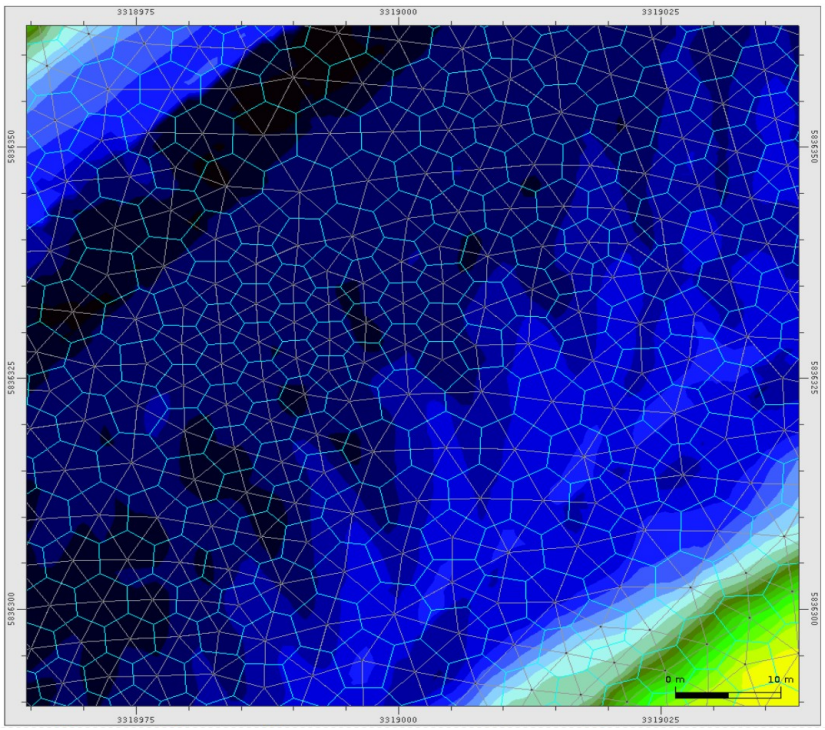


Abbildung 19: Berechnungsnetz mit zugehöriger dualer Voronoizerlegung

4.1.1. Integration von Bauwerken

Wasserbauwerke, aber auch Straßen, Brücken und Deiche stellen in der Regel feste Hindernisse dar. Die Integration in ein Berechnungsnetz muss zum einen dem hydraulischen Widerstand / Querschnitt und zum anderen den Anforderungen an die Qualität des Berechnungsnetzes genügen. Straßen, Brücken und wasserbauliche Bauwerke wurden in der Regel über Polygone und Ersatzmodelle in das Berechnungsnetz integriert.

4.2. Erstellung des Rauheitenmodells

Ausgehend von der aktualisierten Biotop- bzw. Flächennutzungskarte der Stauhaltung Rathenow wurde ein polygonales Rauheitszonenmodell über eine tabellarische Zuordnung zu Rauheitsbeiwerten nach MANNING-STRICKLER erstellt (siehe Tabelle 5).

Rauheiten für das Berechnungsmodell MARINA2D	
Biotoptypen	**Rauheit [kst in $m^{1/3}$ / s]**
Fließgewässer	40
Standgewässer	30
Gräben	28
Acker	27
Röhrichte	18
Gras- und Staudenfluren	16
Bäume / Büsche	15
Wald / Forst	14
Moor / Sumpf	20
Grün- und Freiflächen	17
anthropogener Rohbodenbestand	35
Siedlungsflächen / Bebauung	50
sonstige Biotope / Spülfeld	37
unversiegelte Uferabschnitte	35
beschädigtes Deckwerk	34
intaktes Deckwerk	36
Buhnen	32

Tabelle 5: Rauheiten für das Berechnungsmodell MARINA2D

Die im numerischen Modell einfließenden Modellrauheiten basieren auf den aktualisierten Biotop- bzw. Flächennutzungskarte der Stauhaltung Rathenow. Eine zusätzliche Variation der Rauheiten im Flussschlauch der Havel war nicht notwendig. Die Modellauflösung in der Stromhavel von um die 6 m führt zu einer groben Abbildung der in der Havel vorhandenen Transportkörper (Höhe ca. 20 cm, Kammabstände von 10 bis 15 m), sodass eine zusätzliche Parametrisierung nicht notwendig ist.

Bei der Simulation der Wasserspiegelfixierungen wurde für jedes Datum ein neues Netz mit der zeitlich interpolierten Tiefenverteilung des Datums der Wasserspiegelfixierung erstellt. Somit passte die Topographie/Bathymetrie des Flussschlauchs zu der der Wasserspiegelfixierung und die Modellrauheiten mussten im Rahmen eines Kalibrierungsprozesses nicht angepasst werden.

Das Rauheitenmodell, welches vom numerischen Modell MARINA2D gelesen wird, ist wiederum ein Dreiecksnetz, an dessen Knoten der MANNING-STRICKLER-Wert abgelegt ist. Die Übertragung vom Rauheitszonenmodell erfolgt durch eine Polygoninterpolation. In Abbildung 20 ist das sich

ergebende Rauheitenmodell für den Ist-Zustand flächenhaft dargestellt.

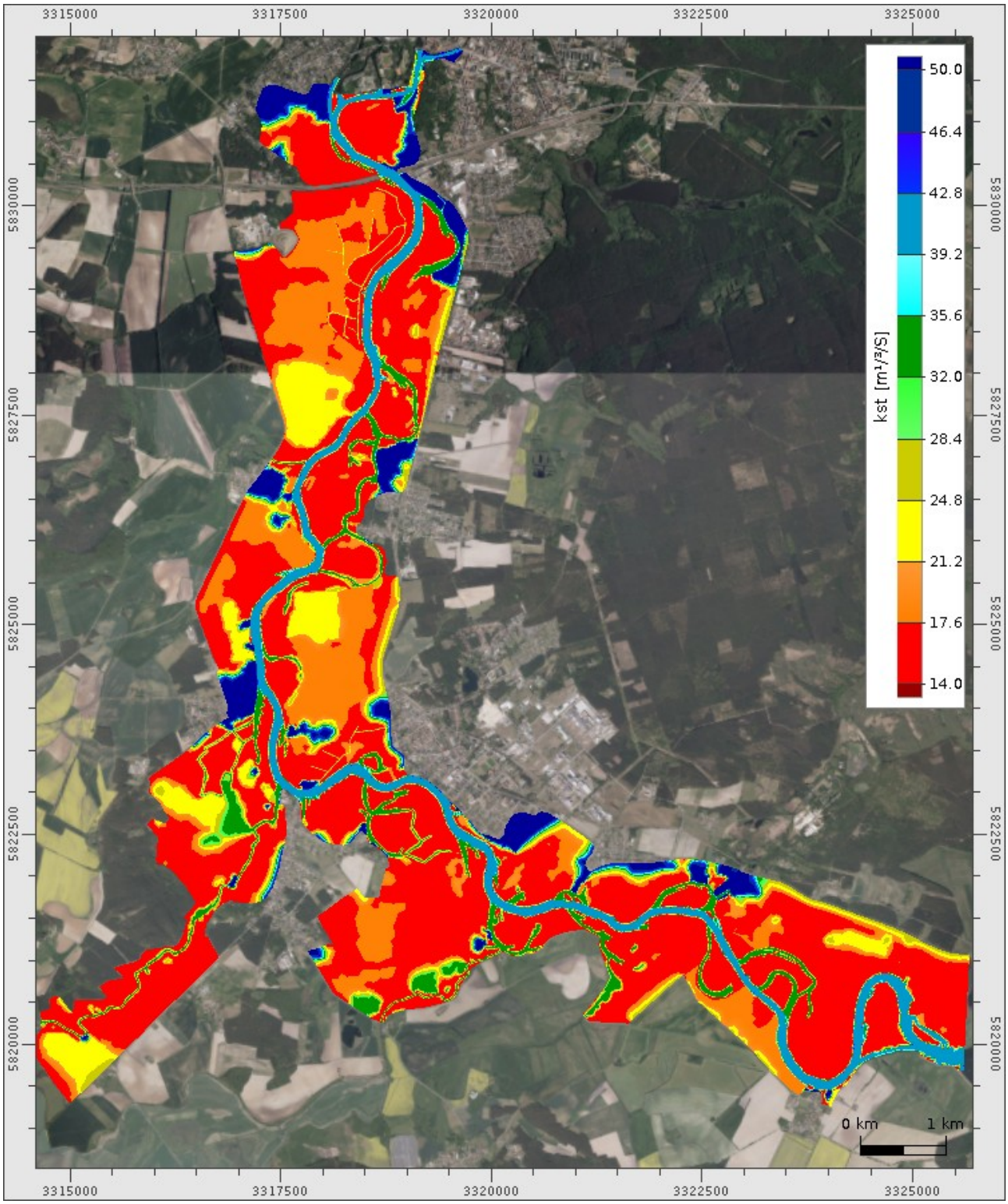


Abbildung 20: Flächenmodell der Stauhaltung Rathenow im Ist-Zustand (Hintergrundbild LGB)

5. Validierung des hydrodynamischen Simulationsmodells

Die Validierung des hydrodynamischen Simulationsmodells der Stauhaltung Rathenow erfolgt auf der Basis gemessener Wasserspiegelfixierungen bzw. -lagen (siehe Kapitel 2.6) sowie den ADCP-Messungen der Firma Quantum Hydrometrie, deren Ergebnisse bereits im Kapitel 2.7 dargestellt wurden.

5.1. Wasserspiegelfixierung / -lagenmessung

Um ein breites Abflussspektrum abzudecken, wurden drei Wasserspiegellagenmessungen zur Validierung des Modells herangezogen. Die Bandbreite der Durchflüsse variierte dabei von 18,8 m³/s bis 140,0 m³/s. Es wurden hydrodynamische instationäre Simulationen mit den entsprechenden Randbedingungen und den zum Zeitpunkt der Aufnahme gegebenen Tiefen bis zur Einstellung stationärer Verhältnisse im Modell durchgeführt. Die sich ergebenden Wasserspiegellagen wurden dann mit den gemessenen in Relation gestellt.

5.1.1. Spezifikation der Randbedingungen

Für die Festlegung der notwendigen Randbedingungen der hydrodynamischen Simulationen standen Pegel- bzw. Durchflussdaten des WSA Brandenburg für den Bereich des Projektgebietes zur Verfügung.

Der am oberen Modellrand einzusteuernde Durchfluss wurde entsprechend den Aufzeichnungen des Pegels Albertsheim (UHW-km 109,83) gewählt. Die h-Randbedingung am unteren Ausstromrand entspricht dem Oberpegel Rathenow.

Die den Simulationen zugrunde liegenden Randbedingungen können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Datum	Abfluss [m³/s]	Wasserstand [m.ü.NHN] Rathenow OP
02.07.1997	18,5	27,07
01.04.1998	101,0	27,31
11./13.04.2011	118,0	27,27
12./15.06.2012	55,8	26,88
16./19.04.2013	140,0	27,25

Tabelle 6: Randbedingungen der Validierungsrechnungen

Die Simulation der Wasserspiegelfixierungen wurde unter Verwendung der zugehörigen Tiefenverteilung in der Havel durchgeführt.

5.1.2. Modellergebnisse

Für alle berechneten Ereignisse zeigt sich, dass sowohl kleine Abflüsse ohne Ausuferungen (Q = 18,5 m³/s (02.07.1997)) als auch mittlere Hochwasserabflüsse mit Ausuferungen (Q = 140 m³/s (16.04.2013)) vom Modell innerhalb des Projektgebietes gut abgebildet werden können.

Die zu beobachtenden maximalen Differenzen der Wasserspiegellagen zwischen Simulation und Messung liegen in der Stauhaltung Rathenow unter 5 cm und somit im Bereich der Messunschärfe.

In der Abbildung 21 sind die errechneten Wasserspiegellagen den gemessenen gegenübergestellt.

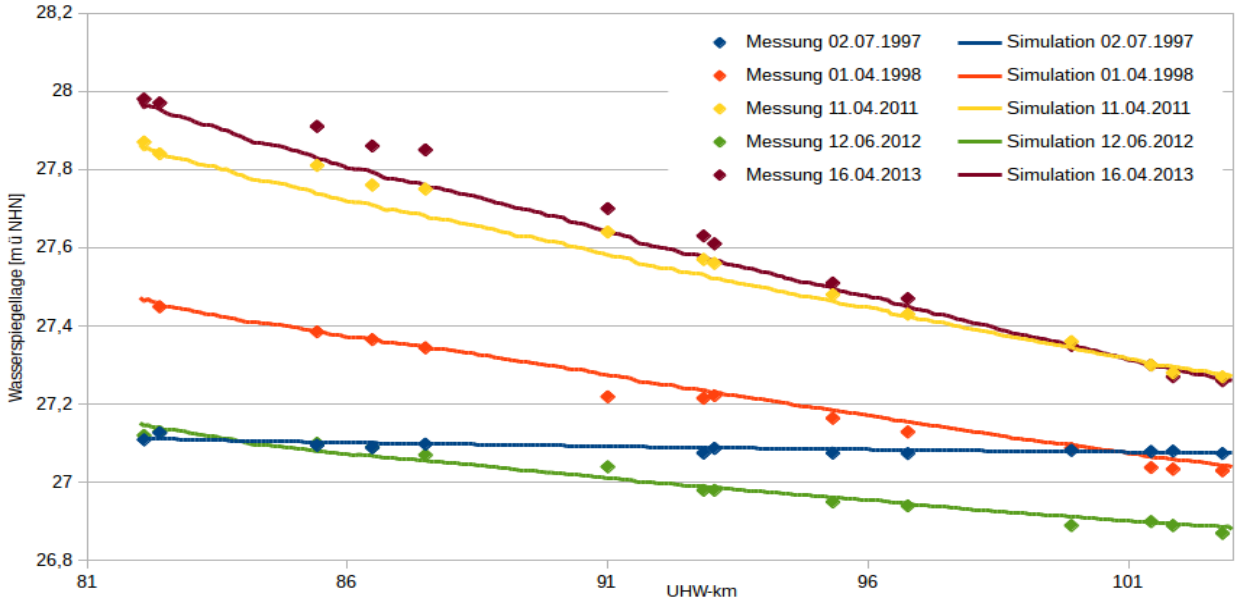


Abbildung 21: Vergleich der Wasserspiegel Messung / Simulation

5.2. ADCP-Messungen bei niedrigen Abfluss

Am 06. und 07.07.2016 sowie am 14.07.2016 wurden von der Firma Quantum Hydrometrie ADCP-Messungen an 16 Querschnitten der Havel, der Mögeliner Havel, der Grubenlanke, der Carritz und im Bereich der Alten Havel bei Bahnitz durchgeführt (siehe Kapitel 2.7).

5.2.1. Spezifikation der Randbedingungen

Während der Messkampagne schwankten die Abflüsse der Havel nicht vernachlässigbar. In der Abbildung 22 sind die Abflussganglinien bei Tiekow oberhalb von Bahnitz für die beiden Messzeiträume dargestellt.

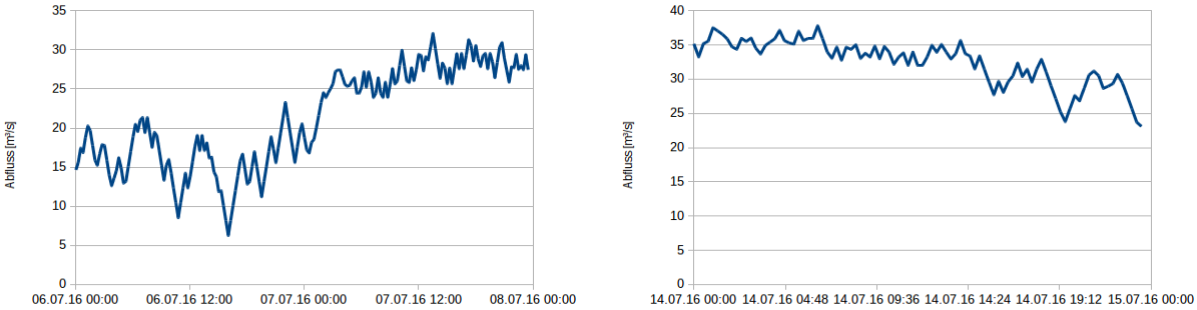


Abbildung 22: Abflussverhältnisse bei Tikow für die Zeiträume der ADCP-Messungen

Um eine Vergleichbarkeit der hydrodynamischen Simulationsergebnisse mit den Naturmessungen sicherzustellen, wurden instationäre Modellrechnungen durchgeführt:

- 06.07.2016 06:00 Uhr bis 07.07.2016 16:00 Uhr
- 14.07.2016 06:00 Uhr bis 14.07.2016 16:00 Uhr

Als hydrodynamische Randbedingungen wurde der Abfluss von Tiekow als obere Randbedingung und die Wasserstände an den Rathenower Wehren verwendet.

5.2.2. Modellergebnisse

Die hydrodynamischen Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung sowohl in den Durchflussmengen an den Querschnitten als auch in den Geschwindigkeitsverteilungen über die Querschnitte.

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Durchflüsse ist in der Tabelle 7 abzulesen. Neben den absoluten Differenzen zwischen dem Mittelwert der Messung und dem Durchfluss aus der Simulation wurde der prozentuale Fehler bzgl. des gemessenen mittleren Durchflusses berechnet. Die in der letzten Spalte angegebene Gütekennzahl setzt die absoluten Differenzen ins Verhältnis zur Standardabweichung der Messung. Ist die Gütekennzahl kleiner als 1, so ist der Betrag der Differenz kleiner als die Standardabweichung der Messung. Ist die prozentuale Abweichung zur Messung kleiner als die Messgenauigkeit, die in der Regel nicht kleiner als 10 % ist, und / oder die Gütekennzahl kleiner als 1, so kann das Simulationsergebnis als valide angesehen werden.

Insbesondere sind die Abweichungen der Durchflüsse in der Stromhavel geringer als die Messgenauigkeit der Naturmessung. Einzige Ausnahme bildet der in der Stromhavel gelegene Querschnitt mit der Bezeichnung 02_Moegelin, bei dem schon darauf hingewiesen wurde, dass die Messungen u. U. nicht plausibel sind (siehe Kapitel 2.7). Größere Unterschiede treten in den Nebengewässern auf, aber auch diese liegen, in Anbetracht der Bewuchssituation der Nebengewässer im Juli, im Rahmen der Messunsicherheit bzw. -güte.

Gewässer	Zeit	Durchfluss [m³/s]		Abweichung		Std Abw	Güte
		Messung	Simulation	absolut	%	Messung	
Mögeliner Havel	06.07.16 16:00	00,44	00,27	-00,17	-39,32	0,552	0,31
Havel	06.07.16 13:40	13,60	17,35	03,75	27,57	1,286	2,92
Mögeliner Havel	06.07.16 14:10	00,26	00,35	00,09	34,62	0,172	0,52
Mögeliner Havel	06.07.16 11:35	01,45	01,39	-00,06	-4,21	0,068	0,90
Mögeliner Havel	06.07.16 11:00	00,77	00,81	00,04	5,06	0,493	0,08
Grubenlanke	06.07.16 09:40	00,11	00,12	00,01	10,00	0,113	0,10
Havel	07.07.16 10:25	30,13	30,09	-00,04	-0,14	1,333	0,03
Königsgraben	06.07.16 11:50	00,01	00,01	00,00	0,00	0,054	0,00
Carritz	07.07.16 14:00	00,54	00,74	00,20	36,30	0,201	0,98
Havel	07.07.16 14:30	29,06	27,39	-01,67	-5,73	1,358	1,23
Havel	07.07.16 15:00	26,85	26,86	00,01	0,04	0,507	0,02
Alte Havel	14.07.16 11:45	00,06	00,05	-00,01	-23,33	0,07	0,20
Alte Havel	14.07.16 14:00	00,66	00,65	-00,01	-1,97	0,049	0,27
Havel	14.07.16 12:45	34,66	34,72	00,06	0,16	1,311	0,04
Havel	14.07.16 13:20	36,94	35,92	-01,02	-2,76	1,509	0,68
Alte Havel	14.07.16 14:25	00,85	00,65	-00,20	-23,76	0,723	0,28

Tabelle 7: Simulierte und gemessene Durchflüsse an den Messquerschnitten mit zugehörigen Qualitätskennzahlen

Die berechneten und gemessenen tiefenintegrierten Geschwindigkeiten an den Querschnitten sind in den Abbildungen 23 und 24 eingezeichnet. In den Messquerschnitten der Stromhavel lassen sich Geschwindigkeitsprofile deutlich ablesen, wohingegen in den Nebengewässern dies eher schwieriger ist. Bei der Plausibilisierung des hydrodynamischen Modells auf der Basis der ADCP-Messungen waren keine zusätzlichen Anpassungen der Modellrauheiten notwendig.

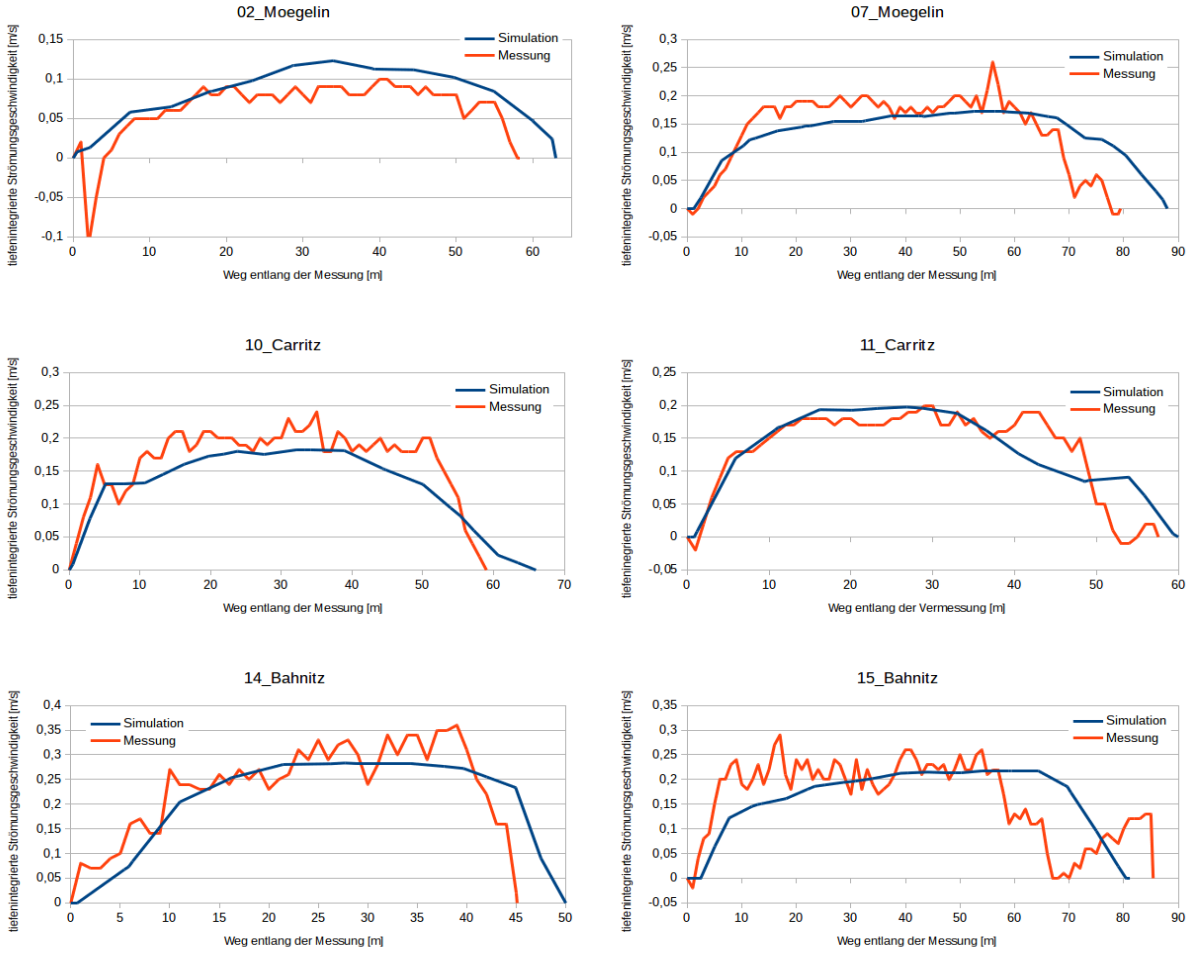


Abbildung 23: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten Messung – Simulation in der Stromhavel

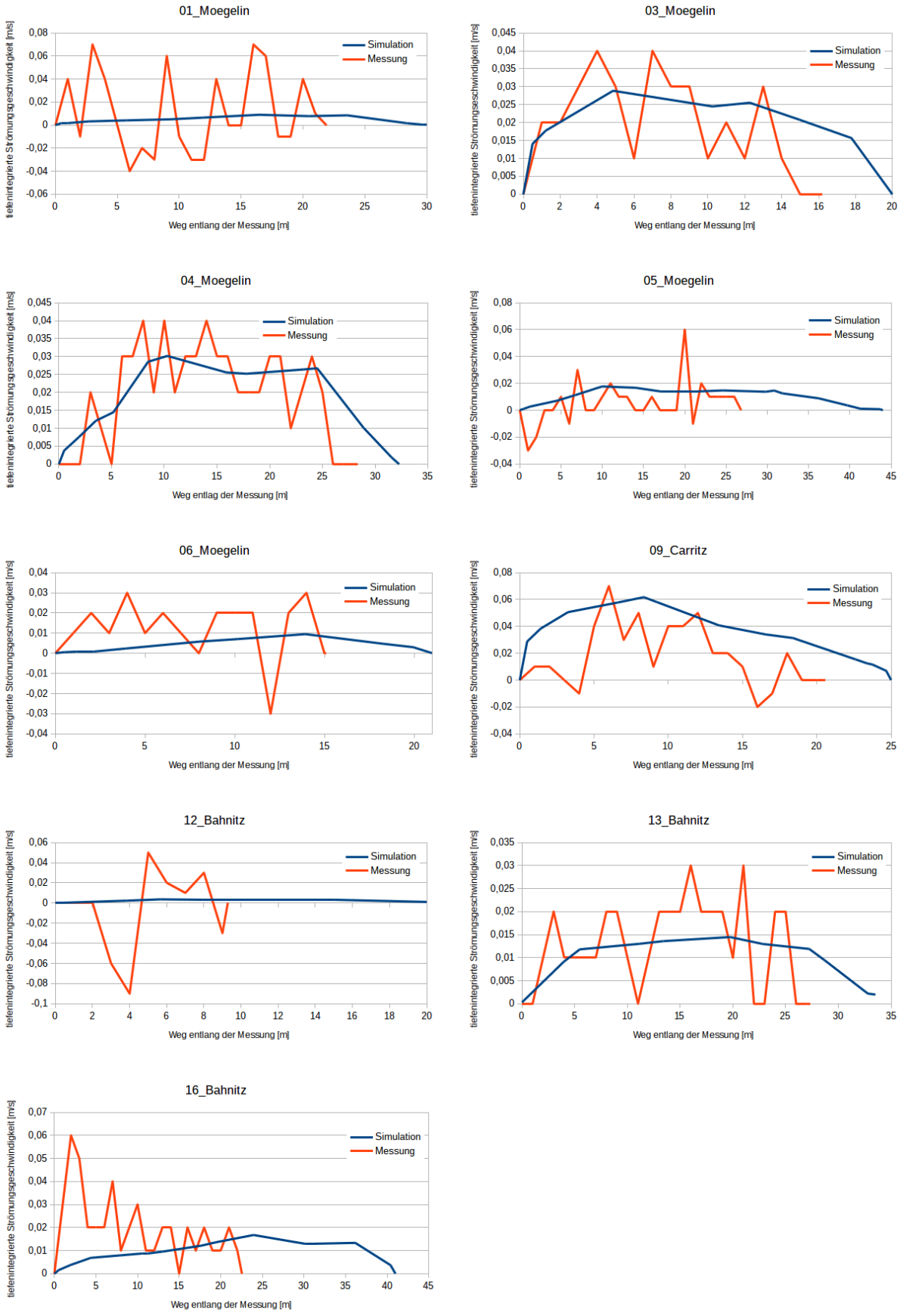


Abbildung 24: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten Messung – Simulation in den Nebengewässern

5.3. ADCP-Messungen bei hohem Abfluss

Zur weiter Kalibrierung des Modells bei hohen Abflüssen sind am 20.03.2017 von der Firma Quantum Hydrometrie ADCP-Messungen an 2 Querschnitten in der Havel und an einem Querschnitt in der Carritz durchgeführt worden. Bei den Messungen sind Strömungsgeschwindigkeit und Wassertiefe gemessen sowie tiefenintegrierte Strömungsgeschwindigkeiten und Durchflüsse abgeleitet worden (siehe Kapitel 2.7).

5.3.1. Spezifikation der Randbedingungen

Zur Validierung ist eine Berechnung mit den folgenden Randwerten durchgeführt worden.

Durchfluss Tiekow	Q = 101 m³/s
Durchfluss Albertsheim	Q = 104 m³/s
Zufluss Königsgraben	Q = 1,5 m³/s
Zufluss Stremme	Q = 1,5 m³/s
Wasserstand Rathenow OP	H = 27,31 müNHN
Wasserstand Pegel Milow	H = 27,52 müNHN
Wasserstand Wehr Bahnitz UP	H = 27,84 müNHN

5.3.2. Modellergebnisse

Die hydrodynamischen Simulationen zeigen im Rahmen der Messgenauigkeit der ADCP-Messungen eine Übereinstimmung sowohl in den Durchflussmengen an den Querschnitten als auch in den Geschwindigkeitsverteilungen über die Querschnitte.

Die ADCP-Messungen in der Havel zeigen geringere Durchflüsse, als die am Pegel Tiekow gemessen. Auch stimmt die Summe aller Durchflüsse nicht.

Der Vergleich der gemessenen und simulierten Durchflüsse ist in der Tabelle 8 abzulesen. Neben den absoluten Differenzen zwischen dem Mittelwert der Messung und dem Durchfluss aus der Simulation wurde der prozentuale Fehler bzgl. des gemessenen mittleren Durchflusses berechnet. Die in der letzten Spalte angegebene Gütekennzahl setzt die absoluten Differenzen ins Verhältnis zur Standardabweichung der Messung. Ist die Gütekennzahl kleiner als 1, so ist der Betrag der Differenz kleiner als die Standardabweichung der Messung. Ist die prozentuale Abweichung zur Messung kleiner als die Messgenauigkeit, die in der Regel nicht kleiner als 10 % ist, und / oder die Gütekennzahl kleiner als 1, so kann das Simulationsergebnis als valide angesehen werden.

Gewässer	Zeit	Durchfluss [m³/s]		Abweichung		Std Abw	Güte
		Messung	Simulation	absolut	%	Messung	
Carritz	20.03.17 11:00	06,55	06,60	00,05	0,76	0,149	0,34
Havel vor Carritz	20.03.17 12:00	93,20	101,00	07,80	8,37	5,81	1,34
Havel bei Carritz	20.03.17 13:00	90,78	94,20	03,42	3,77	3,78	0,90

Tabelle 8: Simulierte und gemessene Durchflüsse an den Messquerschnitten mit zugehörigen Qualitätskennzahlen

Die berechneten und gemessenen tiefenintegrierten Geschwindigkeiten an den Querschnitten sind in den Abbildungen 25 bis 27 eingezeichnet. Bei der Plausibilisierung des hydrodynamischen Modells auf der Basis der ADCP-Messungen waren keine zusätzlichen Anpassungen der Modellrauheiten notwendig.

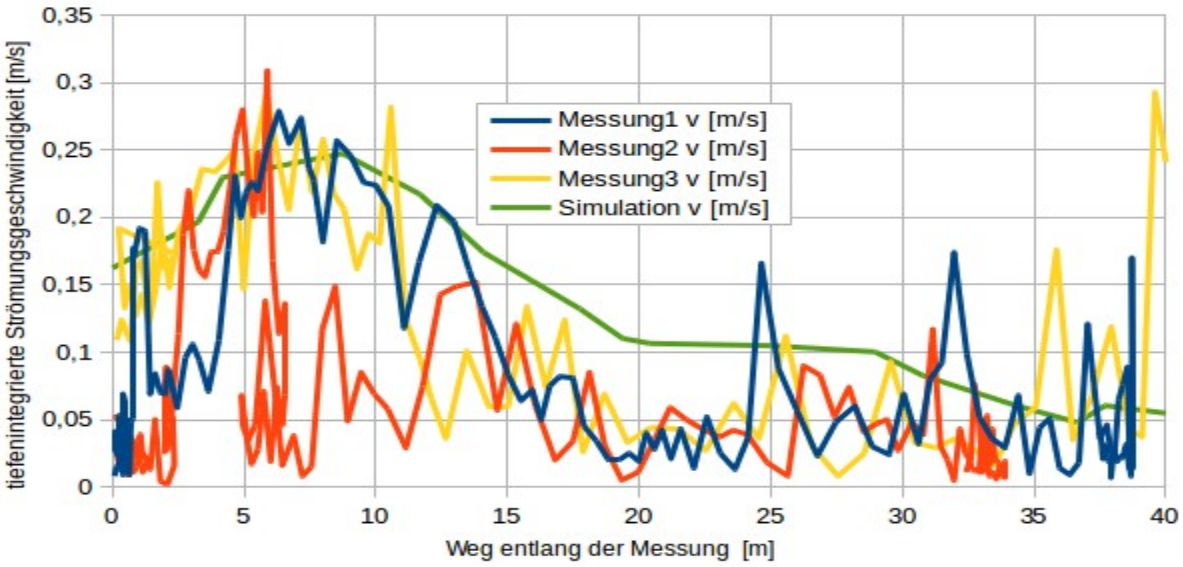


Abbildung 25: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten - Messung und Simulation in der Carritz.

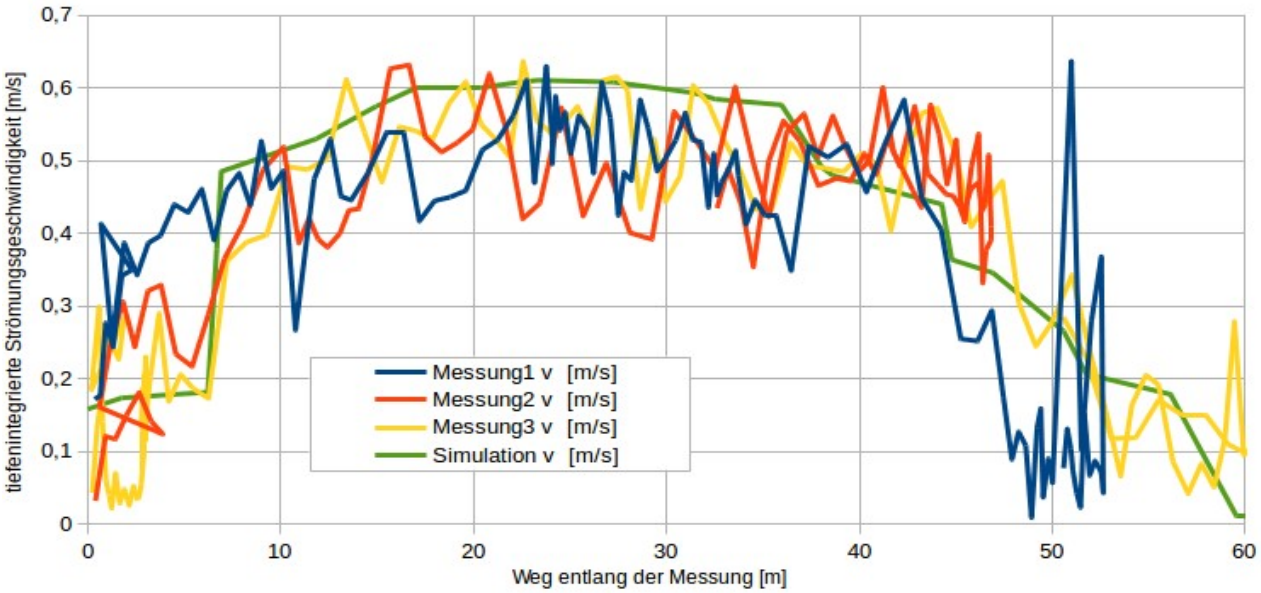


Abbildung 26: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten - Messung und Simulation in der Havel vor der Carritz.

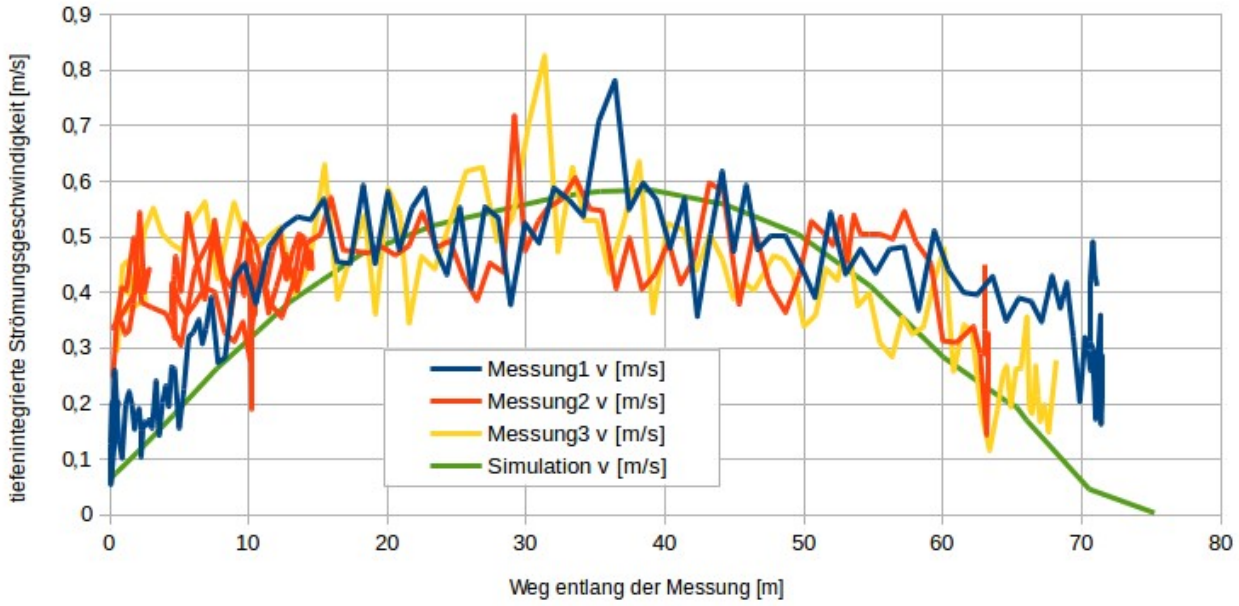


Abbildung 27: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten - Messung und Simulation in Havel bei der Carritz.

5.4. Durchflussmessung an der Grubenlanke

Am 23.05.2014 sind bei mittleren Abflussverhältnissen von der Firma IWUD Durchflussmessungen an der Grubenlanke und der Mögeliner Havel durchgeführt worden. In der Abbildung 28 sind die Messquerschnitte eingezeichnet.

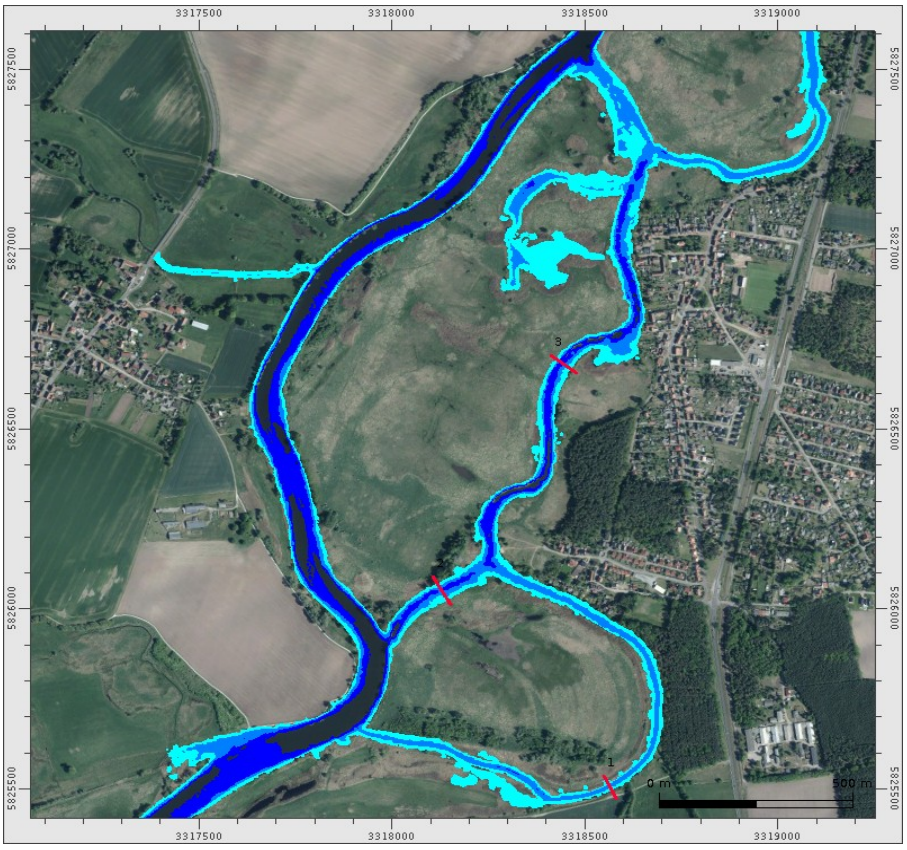


Abbildung 28: Messquerschnitte der Durchflussmessung von IWUD vom 23.05.2014

Zu dem Zeitpunkt lagen folgende Randbedingungen zur Steuerung des Modells vor.

Durchfluss Bahnitz	Q = 67,9 m³/s
Durchfluss Rathenow	Q = 71,2m³/s
Zufluss Königsgraben	Q = 1,6 m³/s
Zufluss Stremme	Q = 1,6 m³/s
Wasserstand Rathenow OP	H = 27,19 müNHN
Wasserstand Pegel Milow	H = 27,30 müNHN

Für die Berechnung ist die Sohlgeometrie von 2014 verwendet worden. Der Pegel Milow ist mit h = 27,3 müNHN eingehalten worden. In Tabelle 9 sind die Durchflüsse aus Messung und Simulation gegenüber gestellt. Es ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung. Eine zusätzlichen Anpassungen der Modellrauheiten war nicht notwendig.

Gewässer	Messstelle	Durchfluss [m³/s]	
		Messung	Simulation
Grubenlanke	1	1,3	1,2
Mögeliner Havel	2	5,2	5,8
Mögeliner Havel	3	6,6	7,1

Tabelle 9: Vergleich der Durchflüsse: Messung – Simulation am 23.05.2014.

6. Modellbeschreibung Marina2D

Das Softwarepaket MARINA2D ist ein Modellsystem zur Simulation der hydro- und morphodynamischen Vorgänge in Flüssen, Seen, Ästuaren und im Küstenbereich. Die numerische Approximation der transportdominanten, instationären Grundgleichungen erfolgt auf der Basis stabilisierter finiter Dreieckselemente und einem angepassten Adam-Bashfort-Integrationsverfahren. Eine ausgereifte Strategie zur Beschreibung des Trockenfallens und Überflutens ermöglicht die hydro- und morphodynamische Simulation in komplizierten Fluss- und Ästuar-Topographien.

Zusammen mit den Werkzeugen GISMO, JANET und DAVIT zum Prä- und Postprozessing bildet das Simulationssystem eine vollständige Prozesskette von der Aufbereitung der Naturdaten über die Gittergenerierung bis hin zur Analyse und Interpretation der Berechnungsergebnisse.

Aus dem numerischen Modellsystem MARINA2D werden für die Untersuchungen im Projektgebiet das tiefenintegrierte Hydrodynamik-Modul und das Morphodynamik-Modul zur Beschreibung von Suspensions-, Bodenfracht und resultierenden Tiefenänderungen eingesetzt.

6.1. Hydrodynamik-Modul

Grundgleichungen

Zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse wird ein zweidimensionales, tiefenintegriertes instationäres Strömungsmodell auf der Basis der tiefenintegrierten Reynolds-Gleichungen verwendet:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - g\frac{\partial \eta}{\partial x} + v\cdot 2\Omega\sin\varphi + \frac{1}{\rho(\eta + z_B)}(T_x - T_x^B + T_x^W)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - g\frac{\partial \eta}{\partial y} - u\cdot 2\Omega\sin\varphi + \frac{1}{\rho(\eta + z_B)}(T_y - T_y^B + T_y^W)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{-\partial u(\eta + z_B)}{\partial x} - \frac{\partial v(\eta + z_B)}{\partial y} \quad .$$

Hierbei ist z_B die mittlere Ruhewassertiefe bzw. Sohllage, *u* und *v* die Komponenten des Strömungsvektors und *η* die Wasserspiegelauslenkung aus der Ruhewasserlage.

Im Modell werden folgende Effekte berücksichtigt:

- Energieverluste durch Bodenreibung T^B (nach MANNING-STRICKLER und unebene Sohle)
- Energieeintrag durch Wind T^W (nach SMITH & BANKE 1975)
- Corioliseinfluss
- Überflutung und Trockenfallen
- Turbulenzmodellierung *T* (nach SMAGORINSKY 1963)

Zusätzliche Terme werden bei der Modellkopplung mit anderen Modulen berücksichtigt.

Bodenreibung / Bestimmung der Bodenschubspannung

Der Energieverlust durch Bodenreibung wird im tiefenintegrierten Strömungsmodell über die Sohlschubspannung T^B beschrieben. Die Sohlschubspannung besteht im Wesentlichen aus zwei Anteilen: der Bodenschubspannung $\vec{\tau}_B$, die proportional zum Quadrat der mittleren Geschwindigkeit ist, und einem Term $\vec{\tau}_{BX}$, der die Unebenheit der Sohle berücksichtigt:

$$T^B := \vec{\tau}_B + \vec{\tau}_{BX} \quad .$$

Allen Sohlschubspannungsgesetzen tiefenintegrierter Simulationsmodelle ist gemein, dass bei diesen die Geschwindigkeit quadratisch eingeht. Wesentliche Unterschiede ergeben sich in der Potenz, in der die Wassertiefe eingeht. Im tiefenintegrierten Strömungsmodell ist der Ansatz nach MANNING-STRICKLER implementiert, der eine Approximation des Gesetzes von NIKURADSE (1933) darstellt:

$$\frac{\tau_B}{\rho} := \frac{g}{h^{1/3} k_{Str}^2} u^2 \quad .$$

Der Stricklerkoeffizient hat die recht unhandliche Dimension $m^{1/3} s^{-1}$, die wenig über seine physikalische Bedeutung aussagt. Für die Wahl geeigneter Stricklerkoeffizienten gibt es in der Literatur vielfältige Erfahrungen. Der Stricklerkoeffizient reicht von $100\, m^{1/3} s^{-1}$ für sehr glatten neuen Stahl bis etwa $20\, m^{1/3} s^{-1}$ für Wildbäche mit grobem Geröll.

Die Berechnung der Sohlschubspannung nach den klassischen Ansätzen geht in der Regel von regelmäßigem Gewässerboden aus. Hat der Gewässergrund Bereiche mit steilen Sohlgradienten, so lassen sich diese Einflüsse durch zusätzliche Terme berücksichtigen:

$$\vec{\tau}_{BX} = \begin{pmatrix} \rho \overline{\nu_t} \left(2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \frac{\partial z_B}{\partial x} + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \frac{\partial z_B}{\partial y} \right) \\ \rho \overline{\nu_t} \left(\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \frac{\partial z_B}{\partial x} + 2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \frac{\partial z_B}{\partial y} \right) \end{pmatrix} \quad .$$

Sekundärströmungsanteil

Neben der Hauptströmung eines Gewässers entstehen in Kurven sogenannte Sekundärströmungen. Neben einem zusätzlichen Impulsverlust führen diese Strömungen in der Regel zu einer Erhöhung des Erosionsangriffs. Die Erhöhung der Bodenschubspannung wird durch:

$$\tau_{secondary\,current\,x} = \frac{7r}{\alpha'} \frac{\rho g h}{(u^2+v^2)} \left(u \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) (+v)$$

$$\tau_{secondary\,current\,y} = \frac{7r}{\alpha'} \frac{\rho g h}{(u^2+v^2)} \left(u \frac{\partial \eta}{\partial y} - v \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) (-u)$$

beschrieben. Hierbei ist r der Rauheitskoeffizient, der nach STRICKLER

$$r = g / (k_{Str}^2) h^{1/3}$$

beträgt. Der in der Literatur angegebene Korrekturfaktor α' liegt zwischen 0,75 für rauen Boden und 1 für sehr glatten Boden. Bei unterschiedlichen Modellstudien hat sich jedoch ein Wert für α' von 2 als Standardwert im Rahmen der Implementierung in MARINA2D als geeignet herausgestellt.

Turbulenzmodellierung

Turbulenz ist ein dreidimensionales Phänomen und lässt sich somit nicht direkt mit tiefengemittelten Modellen simulieren. Zur Beschreibung der Wirkung der Turbulenz auf die tiefenintegrierte Strömung kommen unterschiedliche Modellvorstellungen zum Einsatz. Im tiefenintegrierten Modell kommt eine Kombination von dynamischer Viskosität des Wassers ν_c, tiefengemittelter turbulenter Viskosität in Anlehnung an ELDER (1959) ν_E und eine Parametrisierung der durch das Berechnungsnetz nicht abbildbaren Wirbel nach SMAGORINSKY (1963) ν_S zum Einsatz:

$$\nu_t = \nu_c + \nu_E + \nu_S$$

mit der kinematischen Viskosität des Wassers $\nu_C = 10^{-6} m^2/s$.

Beim Ansatz nach ELDER (1959) wird ein Zusammenhang zur Wassertiefe und zur Bodenschubgeschwindigkeit hergestellt:

$$\nu_E = \nu_C \cdot u_* \cdot (\eta + z_B) \quad .$$

Die Bodenschubgeschwindigkeit u_* ergibt sich aus dem Reibungsansatz nach STRICKLER.

Das älteste und am besten verstandene Feinstrukturmodell ist das des Meteorologen SMAGORINSKY (1963). Es basiert auf dem Wirbelviskositätsansatz von BOUSSINESQ und kann als Anpassung des Mischungswegmodells der statistischen Turbulenzmodellierung an die Feinstrukturmodellierung verstanden werden:

$$\nu_S = (c_s \cdot \Delta)^2 \left[2 \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad .$$

Hierbei ist c_s eine Konstante und Δ die Filterlänge (ein Maß für die Gitterweite). Für den Parameter c_s wird auch hier wieder die kinematische Viskosität des Wassers verwendet.

Trockenfallen und Überfluten

In natürlichen Topographien sowohl in Flussbereichen als auch in Küstenbereichen kommt es auf Grund wechselnder Wasserstände zu einer ständigen Veränderung der Grenze zwischen wasserbedeckten und trockenen Bereichen.

Zur Klassifikation von trockenen und nassen Knoten werden Grenzwassertiefen festgelegt. Die Grenzwassertiefe h_{dry} zeigt an, dass ein Knoten als potentiell trocken betrachtet wird. Ein Knoten ist wirklich trocken, wenn die Wassertiefe kleiner als $h_{dry}/2$ ist.

Ein Element ist vollständig trocken, wenn die Wassertiefe an allen Knoten kleiner als $h_{dry}/2$ ist. Elemente, bei denen mindestens ein Knoten kleiner als h_{dry} ist, werden als teilweise trocken bezeichnet und gesondert behandelt. In teilweise trockenen Elementen wird von einer horizontalen Wasserspiegellage in Richtung des trockenen Knotens ausgegangen und die örtliche Ableitung der Wasserspiegellage, die in die Impulsgleichung eingeht, entsprechend angepasst.

7. Zusammenfassung

Ausgehend von den im Rahmen der Projektbearbeitung aktualisierten Basisdaten wurde ein hydrodynamisches Simulationsmodell der Stauhaltung Rathenow aufgebaut. Hierbei wurden insbesondere die Basisdaten der potentiellen Maßnahmenbereiche geprüft und diese Bereiche im Berechnungsnetz entsprechend höher aufgelöst. Sowohl die Modellauflösung als auch die gewählten Modellrauheiten führten bei den Validierungsrechnungen zu vertrauenswürdigen Ergebnissen im Vergleich zu den Wasserspiegelfixierungen und durchgeführten ADCP-Messungen im Projektgebiet.

Das hydrodynamische Simulationsmodell der Stauhaltung Rathenow kann für die betrachteten Fragestellungen als valide bezeichnet werden und bildet die Basis für die zu integrierenden Maßnahmen und die zugehörigen hydrodynamischen Nachweisrechnungen.

8. Literaturverzeichnis

ELDER, J. W.: The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. In: Journal of Fluid Mechanics, 5, 544–560, 1959.

HAVELSTAUBEIRATSBERICHT 2016.

HAVELSTAUBEIRATSPROTOKOLL 2016.

NIKURADSE, J.: Strömungsgesetze in rauen Rohren. Forschungsheft 361, VDI, 1933.

PEP-UH: Pflege und Entwicklungsplan Gewässerrandstreifenprojket „Untere Havelniederung zwischen Pritzerbe und Gnevsdorf". NABU-Projektbüro, 2009.

SMAGORINSKY, J.: General Circulation Experiments with the Primitive Equations. In: Mon. Weath. Rev., Vol 91, No. 3, 99-165, 1963.

SMITH, S. D. and BANKE, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. In: Quart. J. Met. Soc., 101, 665-673, 1975.

9. Anlagen zum Bericht

ANLAGE 1

Berechnungsnetz der SH Rathenow, IST ---------- 1

ANLAGE 2

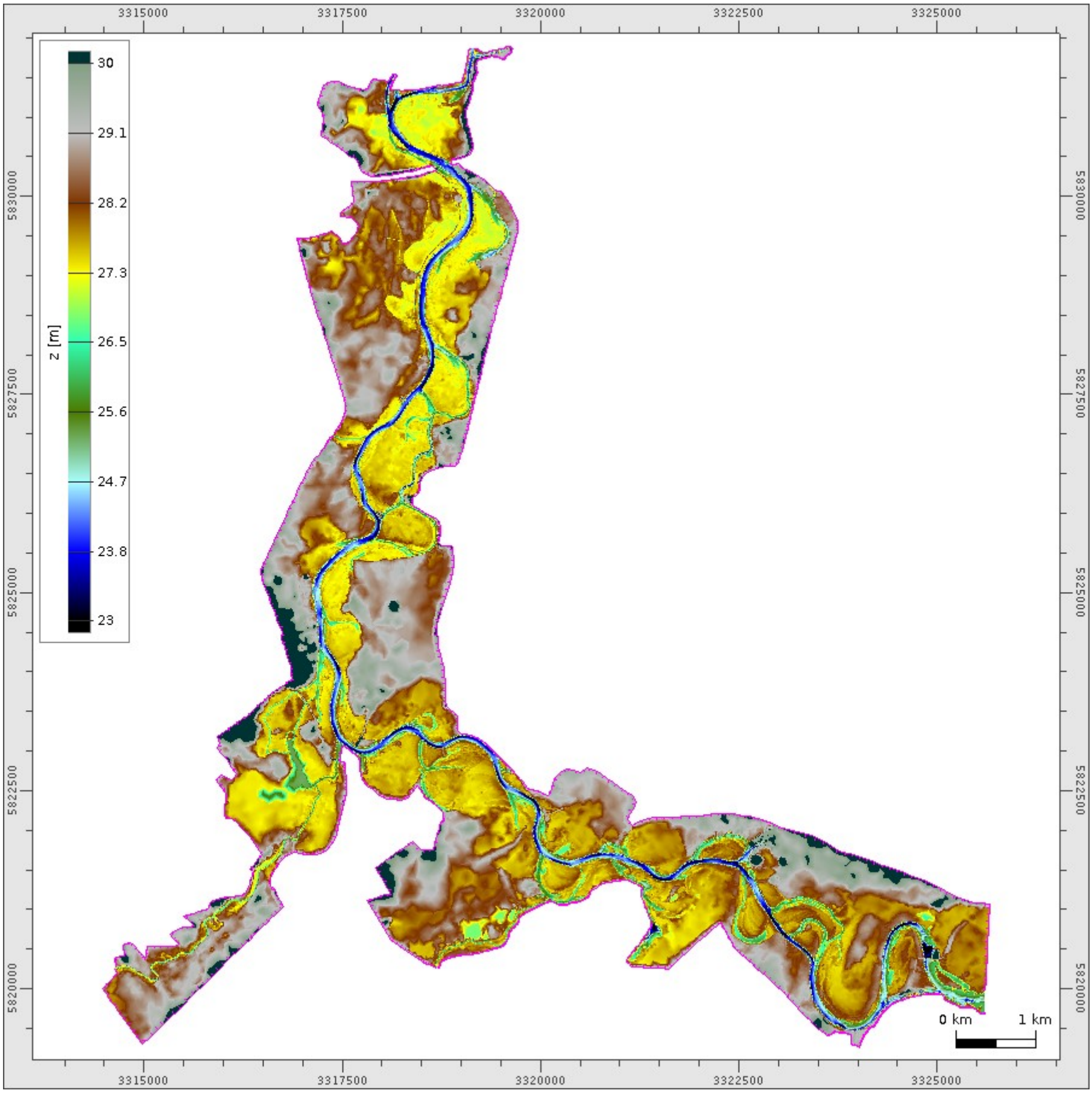
Wasserspiegelfixierungen und -lagemessungen (WSA Brandenburg) ---------- 2

ANLAGE 3

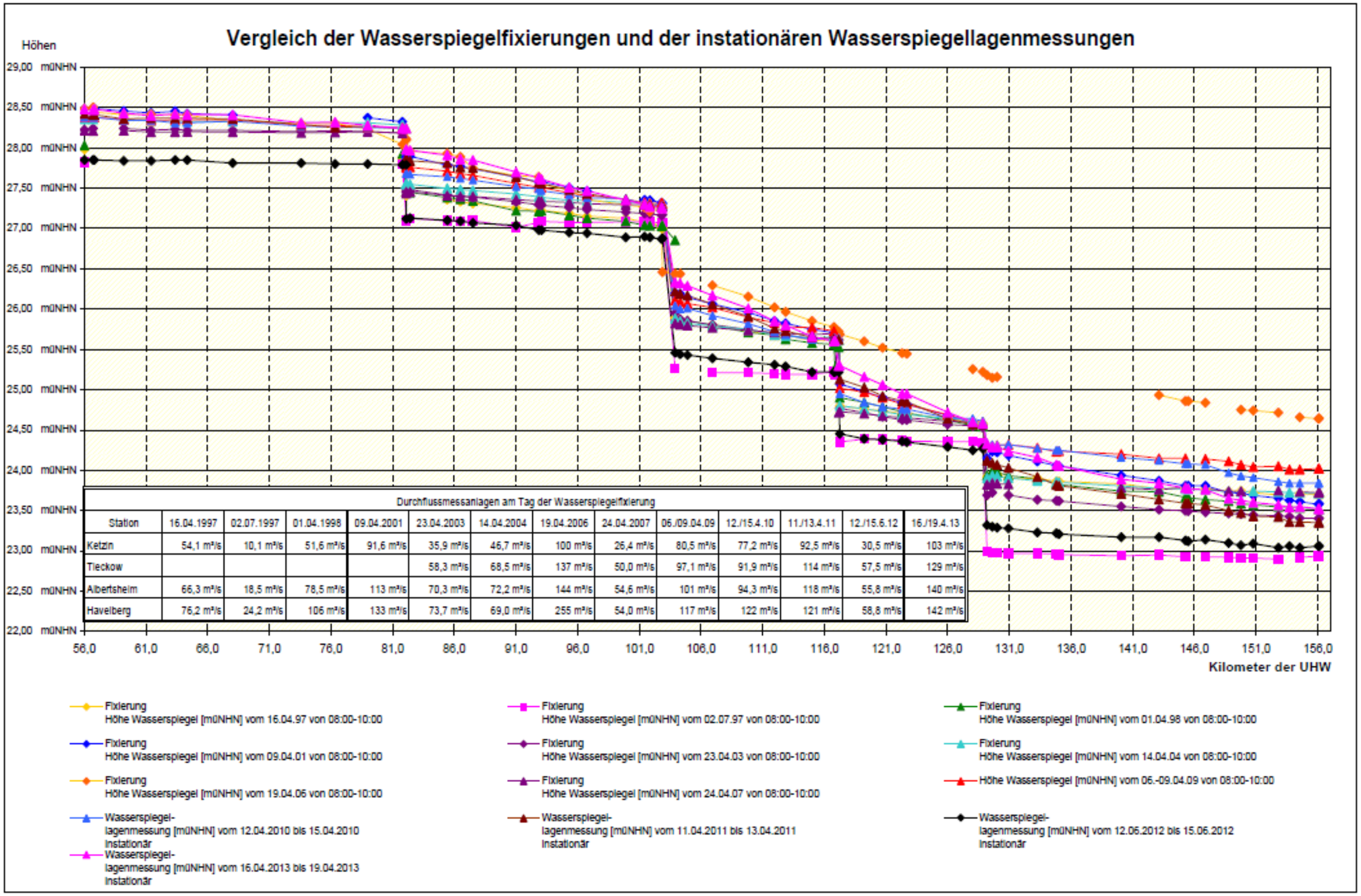
Vermessungsdaten der Stauhaltung Rathenow ---------- 3

Anlage 1

Berechnungsnetz der SH Rathenow, IST



Wasserspiegelfixierungen und -lagemessungen (WSA Brandenburg)



Durchflussmessanlagen am Tag der Wasserspiegelfixierung

Station	16.04.1997	02.07.1997	01.04.1998	09.04.2001	23.04.2003	14.04.2004	19.04.2006	24.04.2007	06./09.04.09	12./15.4.10	11./13.4.11	12./15.6.12	16./19.4.13
Ketzin	54,1 m³/s	10,1 m³/s	51,6 m³/s	91,6 m³/s	35,9 m³/s	46,7 m³/s	100 m³/s	26,4 m³/s	80,5 m³/s	77,2 m³/s	92,5 m³/s	30,5 m³/s	103 m³/s
Tieckow					58,3 m³/s	68,5 m³/s	137 m³/s	50,0 m³/s	97,1 m³/s	91,9 m³/s	114 m³/s	57,5 m³/s	129 m³/s
Albertsheim	66,3 m³/s	18,5 m³/s	78,5 m³/s	113 m³/s	70,3 m³/s	72,2 m³/s	144 m³/s	54,6 m³/s	101 m³/s	94,3 m³/s	118 m³/s	55,8 m³/s	140 m³/s
Havelberg	76,2 m³/s	24,2 m³/s	106 m³/s	133 m³/s	73,7 m³/s	69,0 m³/s	255 m³/s	54,0 m³/s	117 m³/s	122 m³/s	121 m³/s	58,8 m³/s	142 m³/s

Vermessungsdaten der Stauhaltung Rathenow

Lagestatus EPSG: **325833**

Höhenstatus: **Normalhöhe im System DHHN92**

Pos.	Titel	Datenerheber	Datenart	Aufnahme (Start)	Aufnahme (Ende)	Min X	Min Y	Max X	Max Y	Min Z	Max Z	Punkte/ Knoten
0	20170130_Ergaenzung_Havel	iHC Cottbus	Einzelschwinger	30.01.2017	30.01.2017	3317195,34	5820024,75	3323754,33	5830020,71	26,09	30,29	22.731
1	MK10_DeichVermessung	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	14.11.2016	14.11.2016	3318360,68	5828380,50	3319016,50	5829874,11	25,36	29,16	3.369
2	MK9_Echolot	iHC Cottbus	Einzelschwinger	04.11.2016	04.11.2016	3317158,77	5823161,62	3318239,86	5827261,86	23,18	26,51	3.365
3	MK9_terrestischeVermessung	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	04.11.2016	04.11.2016	3317224,99	5823102,06	3318203,44	5827271,81	24,27	28,69	1.821
4	MK10_Echolot	iHC Cottbus	Einzelschwinger	01.11.2016	03.11.2016	3318103,54	5828775,74	3318887,54	5831284,25	21,53	27,01	2.145
5	MK10_terrestischeVermessung	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	01.11.2016	03.11.2016	3318153,00	5828771,92	3319150,00	5831259,44	24,60	28,05	376
6	MK11_Echolot	iHC Cottbus	Einzelschwinger	25.10.2016	25.10.2016	3318522,97	5823059,76	3318627,92	5823155,54	22,61	26,58	141
7	MK11_terrestischVermessung	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	25.10.2016	25.10.2016	3318406,53	5822241,06	3319605,19	5823520,40	25,37	28,88	2.339
8	MK12_Echolot	iHC Cottbus	Einzelschwinger	25.10.2016	25.10.2016	3319502,38	5821374,87	3321820,08	5822661,80	23,11	26,77	1.791
9	MK12_terrestischeVermessung	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	25.10.2016	25.10.2016	3319515,19	5821406,91	3321810,97	5822730,08	24,11	28,28	2.055
10	MK8_terrestrischeVermessung	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	20.10.2016	20.10.2016	3321912,52	5819524,95	3324318,91	5821597,47	24,34	30,18	2.237
11	Mauer_Geländer	iHC Cottbus	Terrestrische Aufnahme	20.10.2016	20.10.2016	3322659,06	5821515,24	3322660,61	5821520,89	29,26	29,30	4
12	MK8_Deckwerksvermessung	iHC Cottbus	Stangenpeilung	03.10.2016	03.10.2016	3321897,63	5819524,95	3324344,56	5821632,06	21,68	29,94	4.294
13	MK8_Echolotung	iHC Cottbus	Einzelschwinger	01.10.2016	30.10.2016	3322500,14	5819541,83	3324343,79	5821630,58	21,66	26,84	2.997
14	HavelVermessung	Ellmann&Schulze	Terrestrische Aufnahme	13.06.2016	13.06.2016	3320168,35	5821676,94	3320383,56	5821808,86	24,26	26,66	66
15	Sohlhoehen200160613	Ellmann&Schulze	Terrestrische Aufnahme	13.06.2016	13.06.2016	3318301,79	5820887,56	3321837,14	5827206,35	24,26	26,66	74
16	Vermessung_06-2016	Ellmann&Schulze	Stangenpeilung	01.06.2016	30.06.2016	3318046,33	5828318,98	3318972,12	5830101,59	25,45	28,52	432
17	2016-04-29_ETRS89UTM33N7st	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	29.04.2016	29.04.2016	3317138,94	5819894,25	3326600,12	5830896,74	22,47	27,34	1.140
18	2016-04-19_Echolot_ETRS89UTM7st	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	19.04.2016	19.04.2016	3317170,95	5822737,26	3319612,60	5830849,84	21,64	26,85	16.033
19	2016-04-04_Echolot_ETRS89UTM7st	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	04.04.2016	04.04.2016	3321940,37	5819621,50	3324504,76	5821924,18	22,60	27,09	15.177
20	2016-04-11_Echolot_ETRS89UTM7st	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	01.04.2016	01.04.2016	3317393,48	5825454,91	3319121,77	5828138,39	21,73	27,08	14.782
21	2016-03-22_Echolot_ETRS89UTM7st	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	22.03.2016	22.03.2016	3318391,85	5821073,74	3321113,29	5823464,65	21,75	27,05	17.736
22	2016-02-29_Echolotmessung_ETRS89UTM7st	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	29.02.2016	29.02.2016	3320905,29	5820346,54	3322814,01	5821939,30	20,54	26,89	14.521
23	km_082-103_Juli_2015	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.07.2015	31.07.2015	3317141,20	5819465,19	3324549,87	5831519,92	20,34	26,29	979.914
24	Vermessung_Grubenlanke_2014	Vermessungsbüro J. Kuschel	Terrestrische Aufnahme	04.11.2014	05.11.2014	3318445,83	5825476,20	3318684,26	5825947,82	23,93	28,13	280
25	020914_6801km101,00-103,20_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	02.09.2014	02.09.2014	3318050,42	5829990,58	3319150,15	5831522,95	20,30	26,15	448.422
26	020914_6801km99,00-101,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	02.09.2014	02.09.2014	3318472,11	5828226,89	3319159,60	5830076,85	21,33	26,84	525.502
27	020914_6825_RHv_o.h.km102,60-104,50_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	02.09.2014	02.09.2014	3318089,58	5830882,20	3319553,92	5831833,95	20,23	26,47	274.578
28	010914_6801km93,00-95,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2014	01.09.2014	3317153,92	5823099,25	3317531,06	5824999,12	21,86	25,99	437.937
29	010914_6801km95,00-97,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2014	01.09.2014	3317138,83	5824916,75	3317985,77	5826585,90	21,90	26,43	497.838
30	010914_6801km97,00-99,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2014	01.09.2014	3317643,92	5826518,94	3318670,82	5828322,99	21,98	27,29	468.479
31	260814_6801km80,00-81,83_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3324797,04	5819823,09	3325618,85	5819990,48	23,05	26,64	170.394
32	260814_6801km82,00-82,54_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3324181,61	5819610,71	3324630,68	5819906,79	23,33	25,64	72.653
33	260814_6807_Wehrarm_Barnitz_o_Halb_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3324852,11	5819931,44	3325206,90	5820299,27	23,55	26,42	102.862
34	260814_6807_Wehrarm_Barnitz_u_Halb_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3324232,47	5819668,62	3324928,77	5820832,21	18,01	26,02	291.520
35	270814_6801km82,54-85,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3323399,75	5819459,84	3324232,81	5820246,67	22,13	26,28	292.375
36	270814_6801km85,00-87,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3322139,58	5820143,99	3323462,24	5821627,59	21,62	26,55	410.061
37	270814_6801km87,00-89,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3320375,32	5821349,06	3322226,58	5821702,70	21,17	26,59	443.789
38	280814_6801km89,00-91,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3319216,34	5821544,08	3320447,75	5823106,28	21,68	26,05	475.862
39	280814_6801km91,00-93,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2014	09.08.2014	3317449,17	5822949,94	3319296,81	5823303,39	21,25	26,75	474.576
40	TerrestrischeVermessung	Münster und Graf	Terrestrische Aufnahme	01.04.2014	01.05.2014	3317742,30	5825440,62	3318462,47	5825684,83	25,14	28,34	662

Pos.	Titel	Datenerheber	Datenart	Aufnahme (Start)	Aufnahme (Ende)	Min X	Min Y	Max X	Max Y	Min Z	Max Z	Punkte/ Knoten
41	_meg_Lotung_2014-02_HF	Münster und Graf	Fächerlotung	01.02.2014	28.02.2014	3317658,72	5825460,97	3319123,40	5828129,00	22,47	26,75	79.008
42	km_082-083	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2013	31.12.2013	3324168,49	5819599,19	3324553,30	5819962,04	23,35	26,55	28.372
43	km_083-103	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2013	31.12.2013	3317142,38	5819459,98	3324234,25	5831536,98	21,32	26,90	861.843
44	180912_6801km101.00-103.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	18.09.2012	01.11.2012	3318049,38	5829850,16	3319155,55	5831523,64	20,36	25,50	507.164
45	180912_6825_RHv_o.h.km102.60-104.50_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	18.09.2012	31.12.2012	3318097,54	5830876,39	3319556,77	5831836,85	20,37	25,65	283.980
46	180912_6825_RHv_o.h.km102.60-104.50_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	18.09.2012	01.11.2012	3318097,54	5830876,39	3319556,77	5831836,85	20,37	25,65	283.980
47	0409126807_Wehrarm_Bahnitz_o.h_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3324839,89	5819885,03	3325228,30	5820353,56	23,50	26,22	159.312
48	040912_6801km80.00-81.83_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3324795,44	5819821,26	3326591,76	5820058,19	22,65	26,23	448.852
49	050912_6801km82.10-82.54_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3324179,19	5819607,55	3324558,60	5819889,01	23,45	25,78	83.072
50	050912_6801km83.86-85.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3323397,58	5819459,55	3324230,79	5820149,19	22,37	25,85	305.913
51	050912_6807_Wehrarm_Bahnitz_u.h_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3324221,86	5819675,88	3324952,64	5820834,79	18,19	25,94	365.468
52	060912_6801km85.00-87.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3322236,48	5820066,45	3323462,66	5821623,89	21,68	25,72	441.349
53	060912_6801km87.00-89.00	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3320373,48	5821347,71	3322381,91	5821703,39	21,19	25,72	490.049
54	120912_6801km89,00-91,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3319212,57	5821537,21	3320571,83	5823104,17	21,74	25,81	539.681
55	120912_6801km91,00-93,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3317444,70	5822949,05	3319368,82	5823299,14	22,04	25,56	493.495
56	130912_6801km93,00-95,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3317148,01	5823066,64	3317565,82	5825003,47	21,91	25,40	478.590
57	130912_6801km95,00-97,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3317135,98	5824866,53	3317986,22	5826578,65	21,95	25,74	519.097
58	170912_6801km97.00-99.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3317644,25	5826474,78	3318673,59	5828217,90	22,09	25,83	470.843
59	170912_6801km99.00-101.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.09.2012	01.11.2012	3318474,33	5827970,45	3319158,59	5829962,85	21,43	25,65	609.094
60	050912_6801km82.10-82.54_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2012	31.12.2012	3324179,19	5819607,55	3324558,60	5819889,01	23,45	25,78	83.072
61	120912_6801km91,00-93,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2012	31.12.2012	3317444,70	5822949,05	3319368,82	5823299,14	22,04	25,56	493.495
62	090811_6801km101,00-103,20_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2011	09.08.2011	3318047,45	5829699,69	3319156,22	5831677,32	20,38	25,85	531.085
63	090811_6801km99,00-101,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2011	09.08.2011	3318473,31	5827894,70	3319157,09	5830086,70	21,45	26,10	616.157
64	090811_6825_RHv_oh_km102,60-104.50_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	09.08.2011	09.08.2011	3318094,73	5830889,11	3319396,68	5831796,88	20,33	25,65	269.033
65	080811_6801km93,00-95,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	08.08.2011	08.08.2011	3317133,81	5823064,33	3317574,21	5825004,99	22,03	26,46	589.698
66	080811_6801km95,00-97,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	08.08.2011	08.08.2011	3317133,92	5824906,45	3317987,20	5826595,16	22,07	26,52	584.738
67	080811_6801km97,00-99,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	08.08.2011	08.08.2011	3317643,79	5826408,30	3318673,61	5828327,69	22,10	26,22	523.727
68	040811_6801km91,00-93,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	04.08.2011	04.08.2011	3317441,49	5822810,78	3319482,42	5823307,07	22,08	26,47	629.963
69	030811_6801km85,00-87,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	03.08.2011	03.08.2011	3322140,06	5819955,85	3323472,98	5821630,86	21,81	26,54	508.957
70	030811_6801km87,00-89,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	03.08.2011	03.08.2011	3320364,04	5821345,48	3322375,79	5821703,86	21,25	26,51	521.828
71	030811_6801km89,00-91,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	03.08.2011	03.08.2011	3319215,95	5821536,11	3320569,31	5823102,59	21,79	26,35	617.064
72	020811_6801_Schleuse_Barnitz_oberhalb_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	02.08.2011	02.08.2011	3324744,59	5819843,90	3325360,60	5819997,73	23,60	26,25	126.788
73	020811_6801km82,00-82,52_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	02.08.2011	02.08.2011	3324165,98	5819601,76	3324567,13	5819891,38	23,46	26,47	84.110
74	020811_6801km82.54-85,00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	02.08.2011	02.08.2011	3323398,46	5819459,86	3324239,64	5820255,33	22,54	26,45	389.829
75	010811_6807_Wehrarm_Barnitz_unterhalb_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2011	01.08.2011	3324217,92	5819666,50	3324927,50	5820831,88	18,22	26,40	397.364
76	271010_6801km101.00-103.20_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	27.10.2010	27.10.2010	3318053,84	5829798,22	3319156,49	5831695,22	20,41	26,00	546.785
77	191010_6801km82.00-82.54_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3324161,44	5819607,59	3324553,42	5819887,76	23,45	26,39	103.218
78	191010_6807_Wehrarm Bahnitz_u.h_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3324219,11	5819671,99	3324946,38	5820829,90	18,63	26,81	445.012
79	201010_6801km82.54-85.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3323397,81	5819460,28	3324233,40	5820139,22	22,51	26,11	358.690
80	201010_6801km85.00-87.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3322240,78	5820065,56	3323467,84	5821623,79	21,91	26,10	450.549
81	201010_6801km87.00-89.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3320377,30	5821347,46	3322368,80	5821702,74	21,25	26,27	534.874
82	251010_6801km89.00-91.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3319215,39	5821539,17	3320497,00	5823101,20	21,74	26,16	592.006
83	251010_6801km91.00-93.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3317509,15	5822944,34	3319408,56	5823302,95	22,27	25,97	525.199
84	261010_6801km93.00-95.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3317136,85	5823026,32	3317622,99	5824995,62	22,16	25,98	572.730
85	261010_6801km95.00-97.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3317138,14	5824906,85	3317985,52	5826583,25	22,54	25,89	571.648
86	261010_6801km97.00-99.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3317643,46	5826414,63	3318671,69	5828299,89	22,10	25,81	529.234
87	271010_6801km99.00-101.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.10.2010	01.12.2010	3318475,37	5828082,43	3319155,80	5829970,93	21,53	25,70	583.874
88	Profilvermessung_Carritz_2010	WSA Brandenburg	Querprofile	01.08.2010	30.08.2010	3321899,53	5821390,42	3322699,61	5821936,62	22,63	26,81	3.626
89	040809_6801km101.00-103.20_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	04.08.2009	04.08.2009	3318054,02	5829777,72	3319157,95	5831517,83	21,59	25,64	504.063
90	040809_6825_RHv_o.h.km102.60-104.50_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	04.08.2009	04.08.2009	3318099,18	5830787,36	3319539,85	5831834,39	20,40	25,60	308.417

Pos.	Titel	Datenerheber	Datenart	Aufnahme (Start)	Aufnahme (Ende)	Min X	Min Y	Max X	Max Y	Min Z	Max Z	Punkte/ Knoten
91	030809_6801km97.00-99.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3317644,08	5826434,59	3318671,42	5828223,85	22,07	25,61	474.173
92	030809_6801km99.00-101.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3318476,19	5828059,12	3319159,40	5829967,85	21,61	25,82	587.848
93	270709_6801km82.00-83.54_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3324170,24	5819605,38	3324553,90	5819888,26	23,43	25,62	85.067
94	270709_6801km83.90-85.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3323399,42	5819467,64	3324230,52	5820138,25	22,40	25,71	288.130
95	270709_6807Wehrarm_Bahnitz_u.h_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3324216,86	5819672,35	3324946,63	5820830,63	18,51	26,13	361.190
96	280709_6801km85.00-87.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3322253,92	5819971,46	3323469,65	5821618,94	21,83	25,62	434.744
97	280709_6801km87.00-89.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3320377,17	5821349,93	3322365,96	5821701,57	21,22	25,72	508.191
98	280709_6801km89.00-91.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3319224,88	5821541,44	3320485,37	5823104,42	21,70	25,77	521.736
99	290709_6801km91.00-93.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3317521,74	5822950,30	3319387,57	5823302,41	22,18	25,72	476.083
100	290709_6801km93.00-95.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3317140,70	5823007,67	3317630,46	5825004,35	22,14	25,63	521.141
101	290709_6801km95.00-97.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2009	30.09.2009	3317138,95	5824908,58	3317985,93	5826554,26	22,55	25,70	548.239
102	190808_6801km101.00-103.20_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	19.08.2008	30.09.2008	3318054,48	5829830,26	3319158,99	5831524,95	21,16	25,86	484.267
103	190808_6825_RHv_o.h._km102.6-104.5_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	19.08.2008	30.09.2008	3318081,07	5830915,17	3319549,96	5831833,10	20,43	25,74	296.170
104	120808_6801km081,2-081,9_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3324793,49	5819845,02	3325356,85	5820017,19	23,67	26,38	123.572
105	120808_6801km082.00-082.54_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3324172,26	5819603,26	3324555,00	5819888,11	23,41	25,59	89.982
106	120808_6801km082.54-085.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3323396,65	5819462,88	3324224,11	5820137,35	22,36	25,68	278.193
107	120808_6801km085.00-087.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3322238,49	5820035,27	3323462,45	5821619,52	21,76	25,83	426.285
108	120808_6807_Wehrarm_Bahnitz_u_halb_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3324223,21	5819681,44	3324934,85	5820829,23	18,43	25,98	343.699
109	130808_6801km087.00-089.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3320376,50	5821349,06	3322338,40	5821699,87	21,16	25,64	480.516
110	130808_6801km089.00-091.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3319297,57	5821542,56	3320467,44	5823047,06	21,63	25,88	488.535
111	130808_6801km091.00-093.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3317525,22	5822953,81	3319386,62	5823298,83	22,18	25,67	461.479
112	140808_6801km093.00-095.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3317154,01	5823024,55	3317620,99	5824972,52	22,07	25,75	501.892
113	180808_6801km095.00-097.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3317141,16	5824897,65	3317984,60	5826532,55	22,56	25,70	524.963
114	180808_6801km097.00-099.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3317647,75	5826452,24	3318670,94	5828215,90	21,98	25,63	450.168
115	190808_6801km099.00-101.00_0,5m	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.08.2008	30.09.2008	3318476,69	5828054,48	3319158,80	5829902,05	21,82	25,82	552.873
116	2008-02-01_etrs	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	02.01.2008	02.01.2008	3319950,33	5820346,58	3322834,99	5821685,58	20,76	27,96	2.905
117	2007-12-18_echolot_etrs	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	18.12.2007	18.12.2007	3319984,70	5819460,40	3324981,20	5821938,20	18,82	26,82	8.441
118	DGM_Rathenow_Sued	TopoSys	Laserscanner	15.12.2007	15.12.2007	3318001,00	5817321,00	3331237,00	5824011,00	17,59	62,60	10.666.040
119	2007-05-04_echolot_etrs	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	04.05.2007	04.05.2007	3317138,60	5824540,40	3318515,70	5827593,90	22,24	26,54	3.815
120	2007-04-23_echolot_etrs	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	23.04.2007	23.04.2007	3317174,50	5821606,10	3321127,70	5824678,10	22,18	26,88	8.521
121	2007-04-13_echolot_etrs	Ellmann&Schulze	Einzelschwinger	13.04.2007	13.04.2007	3318025,50	5827450,50	3319614,60	5831833,40	21,05	26,65	8.511
122	etrs89_082_103	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2007	31.12.2007	3317137,15	5819468,78	3324626,60	5831835,37	20,45	26,00	4.828.006
123	etrs89_082_103	WSA Brandenburg	Fächerlotung	06.11.2006	25.11.2006	3317151,01	5819470,26	3324540,17	5829859,96	21,42	26,44	4.023.429
124	etrs89_082_103	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2005	31.12.2005	3317150,32	5819546,89	3323754,70	5831488,59	21,47	26,58	197.911
125	etrs89_082_103	WSA Brandenburg	Fächerlotung	01.01.2004	31.12.2004	3317157,97	5819473,90	3324521,94	5831475,47	21,35	26,82	253.692
126	DGM_Rathenow_Nord	DGM-W Elbe Mitte	Laserscanner	01.07.2003	01.07.2003	3314521,00	5819301,00	3320049,00	5832103,00	17,77	85,41	17.701.530
127	dgm2	Landesvermessung Brandenburg	Laserscanner	01.01.2002	01.01.2012	3284000,00	5803000,00	3344000,00	5872000,00	16,87	109,39	509.017.488