

Zeitgemäßer Einsatz eindimensionaler Feststofftransportmodelle am Beispiel der Grenzoder

Autor: Dipl.-Ing. Thorsten Hüsener, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Einleitung

Am Beispiel des BAW-Auftrages der deutsch-polnischen Arbeitsgruppe „Aktualisierung der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder“ soll gezeigt werden, wie eindimensionale Feststofftransportmodelle (1D-FTM) zeitgemäß eingesetzt werden können. Die Grundlage für diese Beauftragung bilden die im Jahre 2008 zwischen der deutschen und der polnischen Wasserstraßenverwaltungen abgestimmten „Thesen für eine spätere rechtliche Regelung zur gemeinsamen Verbesserung der Situation an den Wasserstraßen im deutsch-polnischen Grenzgebiet“. Diese Thesen sehen insbesondere Verbesserungen im Hochwasserschutz sowie der Abfluss- und Schifffahrtsverhältnisse vor. Eine mittlere Wassertiefe von 1,80 m soll mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 80 % oberhalb der Warthemündung (Abschnitt 1, entspricht einem Abfluss von 160 m³/s) und von 90 % unterhalb der Warthemündung (Abschnitt 2, entspricht einem Abfluss von 250 m³/s) erreicht werden. Die Definition zur Berechnung der mittleren Tiefe ist in Bild 1, links dargestellt, der rechte Bildteil zeigt die mittlere Tiefe als Längsschnitt im Istzustand (berechnet mit dem kalibrierten 1D-FTM der Grenzoder).

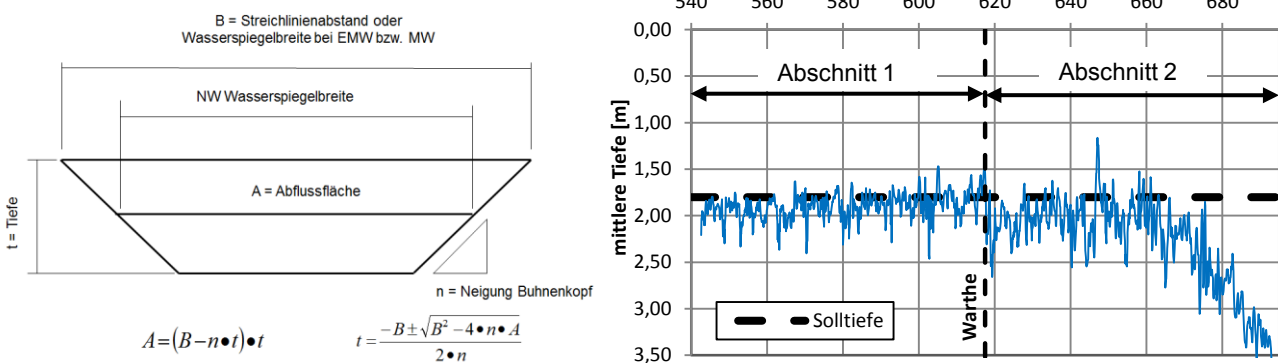


Bild 1: links: Definition der mittleren Tiefe; rechts: mittlere Tiefe im Istzustand

Charakteristik der Grenzoder

Die Grenzoder bildet zwischen der Mündung der Lausitzer Neiße (Od-km 542,4) und dem Abzweig der Westoder (Od-km 704,1) bei der Ortschaft Widuchowa auf einer Länge von ca. 162 km die Grenze zwischen Deutschland und Polen. Als größter Nebenfluss mündet bei Küstrin-Kietz (Od-km 617,5) die Warthe in die Oder und unterteilt die Grenzoder in zwei signifikant unterschiedliche Flussabschnitte. Mit der Warthemündung verdoppelt sich nahezu das Einzugsgebiet der Oder. Oberhalb der Warthemündung weist die Oder ein über alle Wasserstände sehr gleichmäßiges Fließgefälle von etwa 0,27 ‰ auf, unterhalb der Warthemündung nimmt das Gefälle zunächst von 0,17 ‰ allmählich auf 0,14 ‰ bei Hohensaaten (Od-km 666) ab. Zwischen Hohensaaten und dem Ende der Grenzoder verringert sich das Gefälle im Niedrig- bis Mittelwasserbereich dann schnell

auf nahezu 0,0 ‰. Unterhalb der Warthemündung beträgt der mittlere Abfluss ca. 540 m³/s, extreme Hochwässer (z.B. 1997) erreichen einen Abfluss von über 3000 m³/s [1].

Bei der Grenzoder handelt es sich um einen freifließenden Flachlandfluss mit feinkiesig/sandiger Sohle, der mittlere Korndurchmesser (dm) beträgt etwa 2 mm unterhalb der Neißemündung und 0,5 mm bei Widuchowa. Sohl- und Geschiebematerial sind identisch, es wird bei allen Abflüssen Geschiebe transportiert, in der Regel in Form großer Sanddünen. Das Regelungssystem der Grenzoder besteht bis Od-km 683 im Wesentlichen aus Buhnen, vereinzelt auch aus Deck- und Parallelwerken. Ab Od-km 683 finden sich an beiden Ufern ausschließlich Deckwerke. Die Regelungsbauwerke, insbesondere die Buhnen, befinden sich heute in einem uneinheitlichen, unvollständigen und schlechten Zustand, für die Unterhaltung der Bauwerke sind zwei nationale Verwaltungen zuständig.

Die Oder unterliegt bereits einem deutlich kontinentaleren Klima als alle anderen deutschen Flüsse. Beinahe in jedem Jahr tritt eine oft weit über 100 Kilometer lange geschlossene Eisdecke auf, nicht selten mit einer Mächtigkeit von über 40 cm. Für die Sicherstellung des Hochwasserschutzes, insbesondere um Eisversetzungen zu verhindern, steht eine deutsch/polnische Eisbrecherflotte mit 13 Schiffen zur Verfügung, die für den Eisauflauf und das kontrollierte Abfließen der Brucheisschollen zum Dammschen See sorgen. Wegen des schlechten Zustandes des Regelungssystems der Grenzoder wird dieser Eisauflauf zunehmend schwieriger, da der Tiefenbedarf der Eisbrecher von etwa 1,80 m oft nicht vorhanden ist. Aus diesem Tiefenbedarf leitet sich das Regelungsziel von 1,80 m mittlerer Tiefe ab.

Modellkonzept und Umsetzung

Die Aufgabenstellung für die BAW war durch vielfältige Spezifikationen gekennzeichnet, hierzu gehörte die Untersuchung lokaler, dynamischer, sowie langfristig und großräumiger Auswirkungen von Stromregelungsbauwerken auf den Geschiebetransport, die mittlere Sohlhöhe, Wasserspiegeländerungen, Dünenformen und Dünenbewegungen. Weiterhin sollte die nautische Eignung, alternative Bauzeiträume und Reihenfolgen, verschiedene Abflussszenarien sowie wasserspiegelsenkende Begleitmaßnahmen (Baggerungen) untersucht werden. Aufgrund der Fülle der Spezifikationen wurde ein bestehendes physikalisches Modell eines 7,8 km langen Oderabschnitts bei Hohenwutzen (Od-km 654,7 bis 662,5) mit vollbeweglicher Sohle zur Detail-Untersuchung der lokalen Wechselwirkung von modifizierten Stromregelungsbauwerken auf die Flusssohle, den Geschiebetransport und die Wasserspiegel verwendet [6]. Für alle großräumigen, langfristigen und zeitvariablen Fragestellungen wurde ein numerisches eindimensionales Feststofftransportmodell eingesetzt.

Das Funktionsprinzip des 1D-FTM ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Die querprofilbasierte Flussgeometrie ist in verschiedene Abflussbereiche wie Vorland, Ufer und Flussbett eingeteilt und mit unterschiedlichen Gerinnerrauheiten versehen. An den Modellrändern werden Abfluss und Wasserstand vorgegeben, im 1. Simulationsschritt werden entlang des Modellnetzes für jedes Profil Abflussfläche, Fließgeschwindigkeit, Energie- und Wasserspiegelgefälle berechnet. Im 2. Simulationsschritt wird die potentielle Feststofffracht aus den hydraulischen Parametern berechnet. Hierbei werden der Feststoffeintrag an den oberen Modellrändern, die Kornverteilung des Sohlen-

materials sowie Feststoffentnahmen durch Baggerung oder Zugaben durch Verklappen berücksichtigt. Aus der Differenz zwischen potentieller Feststofffracht und dem zur Verfügung stehenden Transportmaterial wird im 3. Simulationsschritt ein Volumen errechnet. Wird mehr Material von Oberstrom eingetragen als potentiell transportiert werden kann, kommt es zu einer Sohlaufhöhung. Ist die potentielle Feststofffracht größer als der Feststoffeintrag und steht transportierbares Material in der Sohle zur Verfügung, kommt es zu einer Sohleintiefung.

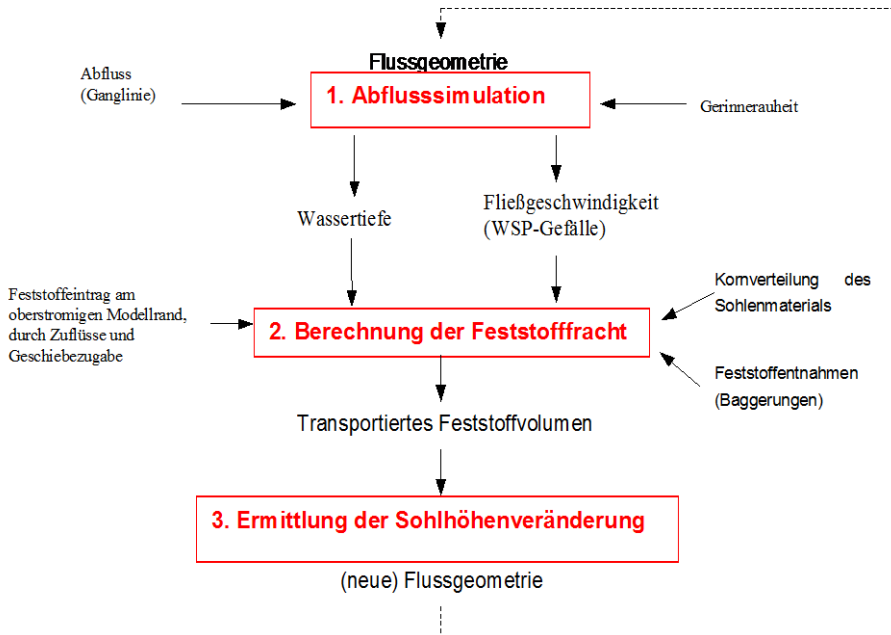


Bild 2: Funktionsprinzip des 1D-Feststofftransportmodells

Aus der berechneten Aufhöhung oder Eintiefung in einem definierten Teil der Flusssohle wird eine neue Profilgeometrie berechnet und die Simulation wird mit dem nächsten Zeitschritt wiederholt. Sollen während der Simulation Änderungen der Geometrie stattfinden, die nicht hydraulisch-morphologisch begründet sind, wie etwa Instandsetzung oder Neubau von Buhnen, wird die Simulation mit eingefrorenen Berechnungsergebnissen unterbrochen, eine neue, modifizierte Geometrie eingelesen, die Profileinteilungen ggf. neu definiert und anschließend die Simulation fortgesetzt. Für die Untersuchungen an der Grenzoder wurde das eindimensionale hydraulisch-morphologische Feststofftransportprogramm HEC-6T [8] verwendet. Das Programm HEC-6T wird innerhalb der BAW-Shell HASE betrieben. Die Shell HASE dient dabei als Pre- und Postprozessor, als Steuerungsumgebung für unterbrochene Simulationen und zur Umrechnung der Modell- und Ergebnisdaten zwischen dem SI-System und dem amerikanischen Einheitensystem. In Bild 3 ist das im Modell abgebildete Gewässernetz mit dem Oderabschnitt km 538,5 bis 694 sowie einem Teil der Lausitzer Neiße und der Warthe dargestellt.

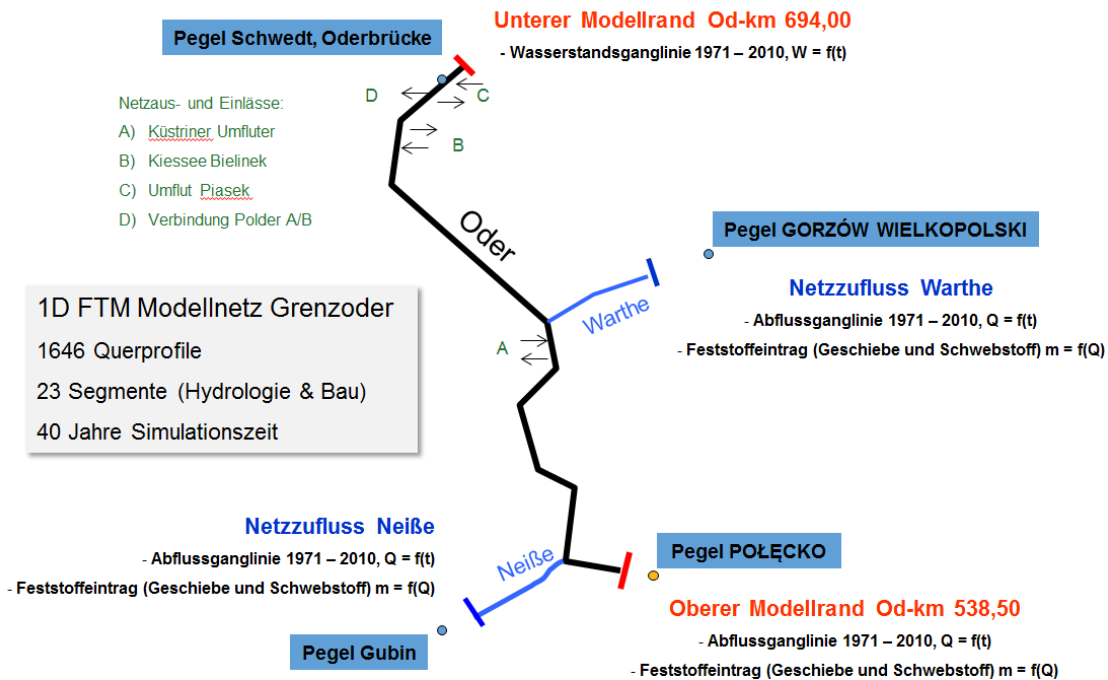


Bild 3: Modellnetz der Grenzoder, Lausitzer Neiße und Warthe

Die Profilgeometrie wurde aus Laserscanndaten der Vorländer, Sohlpeilungen und Aufmessungen der Stromregelungsbauwerke, die in Form von Bunnenschatten eingefügt wurden, aufgebaut. Das Modell wurde zunächst hydraulisch über das gesamte Abflussspektrum kalibriert, indem die Rauheitsbeiwerte anhand gemessener Wasserspiegellagen angepasst wurden. Zur Überprüfung der Abflussaufteilung ausufernder Abflüsse wurden ADCP-Messungen verwendet. In Bild 4 ist ein Vergleich von Messung und Modellrechnung der Abflussanteile für den Flussschlauch bei einem kleineren Hochwasser dargestellt. Die gute Übereinstimmung belegt die Eignung der hydraulischen Kalibrierung auch für ausufernde Abflussereignisse.

Zur Kalibrierung der morphologischen Parameter wurden diese mit dem Ziel angepasst, die in der Natur beobachtete langfristig stabile Sohlage über die gesamte Länge der Grenzoder zu erreichen. Die Abflussganglinien der Jahre 1971 bis 2010 (Tagesmittelwerte) der Pegel Połęcko (Oder), Gubin (Lausitzer Neiße) und Gorzów Wielkopolski (Warthe) sowie die Wasserstandsganglinie des Pegels Schwedt, Oderbrücke dienten als hydrologische Randbedingung.

Der Simulationszeitraum eines morphologischen Modells ist so zu bemessen, dass der Fluss nach einer Störung, hier die Änderung des Abflussquerschnitts durch die Instandsetzung oder Neubau von Buhnen, ein neues Gleichgewicht der Sohlenlage und des Wasserspiegels ausbilden kann.

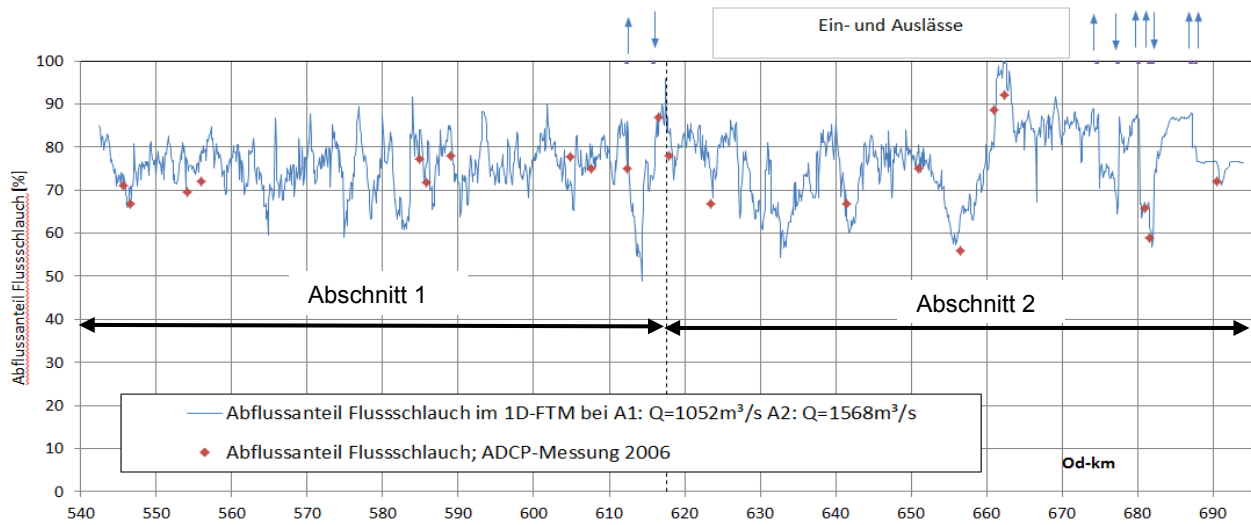


Bild 4: Abflussanteile im Flussschlauch bei Hochwasser, Berechnung aus ADCP-Messung 2006

Die hier zu untersuchenden Varianten betreffen lange Strecken und einen Umsetzungszeitraum von zunächst 20 Jahren. Der zu erwartende anschließende Anpassungszeitraum des Flusses an den neuen Zustand wurde mit mindestens 10 bis 15 Jahren angenommen.

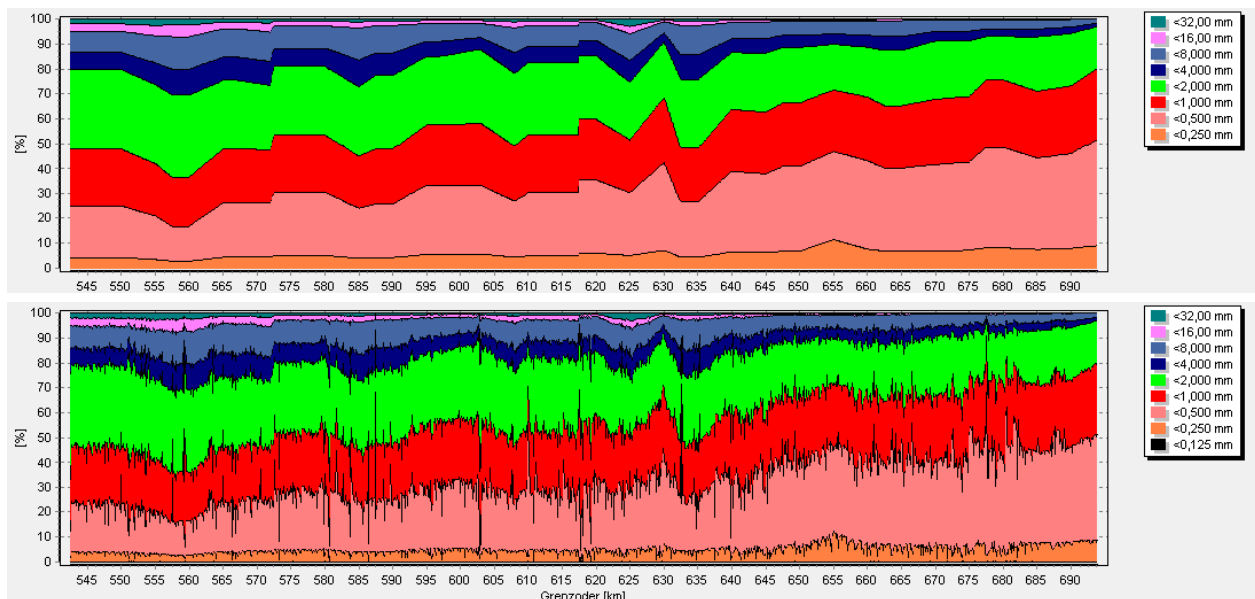


Bild 5: oben: Kornverteilung der Sohle zu Beginn der Simulation, unten: Nach 10 Jahren

Daraus folgte ein Simulationszeitraum von insgesamt 40 Jahren. Die insgesamt ca. 14.600 Tage dieses Zeitraums wurden in ca. 5000 Zeitschritten abgebildet. Die Zeitschritte sind dabei nicht äquidistant, da bei kleinen Abflüssen mit geringen Sohlveränderungen deutlich längere Zeitschritte verwendet werden können als bei hohen Abflüssen mit größeren Sohlveränderungen. Die Korngrößenzusammensetzung [4] der Gewässersohle wurde im Modell wie in Bild 5 dargestellt, abgebildet. Die obere Grafik zeigt die Vorgabe zu Beginn der Simulation, die untere Grafik die Veränderung der Sohlkornzusammensetzung nach 10 jähriger Simulationszeit. Zur Berechnung des

Feststofftransportes kann in HEC-6T aus einer Fülle von Feststofftransportformeln unterschiedlicher Gültigkeitsbereiche oder Funktionalitäten (Geschiebe-, Suspensions-, Schwebstoff- und/oder Gesamttransport) gewählt werden. Für das 1D-FTM der Grenzoder wurde die Gesamttransportmethode nach Toffaleti [9] verwendet, mit der auch die Schwebstofffracht berechnet wird. Der Schwebstoffanteil macht in der Gesamtfeststofffracht der Oder etwa 50 % aus, wie in Bild 7 links dargestellt ist. Diese Fraktion muss auch an den Modellrändern zugegeben werden. Obwohl die Schwebstofffracht als Transitmaterial durch das Modell transportiert wird und keinen Anteil am der Sohlgestaltung hat, kann die Fraktion nicht ignoriert werden, da sie Transportenergie bindet.

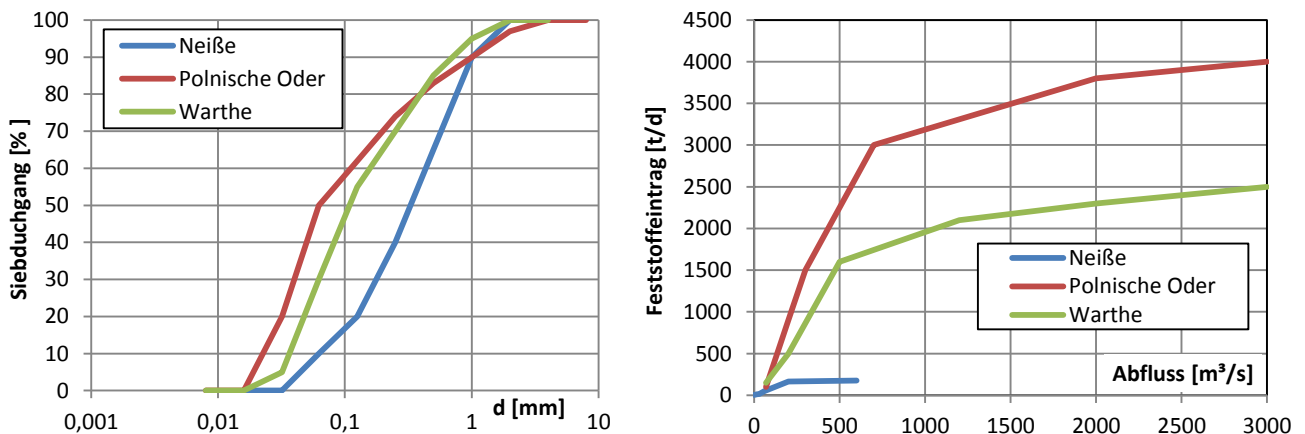


Bild 6: links: Kornverteilung; rechts: Eintragsfunktion der Feststoffe an den Q-Rändern

Für den abflussabhängigen Geschiebeeintrag am oberen Modellrand der Oder, der Lausitzer Neiße und der Warthe wurden auf der Grundlage von Feststofftransportmessungen [5] Eintragsfunktionen abgeleitet, mit den Simulationsergebnissen verglichen und der Eintrag iterativ so lange innerhalb der in der Natur beobachteten Schwankungsbreite variiert, bis eine hinreichende Übereinstimmung mit den Messdaten vorlag (siehe Bild 6 und Bild 7) und die Sohle langfristig keinen großräumigen Aufhöhungs- oder Erosionstrend mehr aufwies.

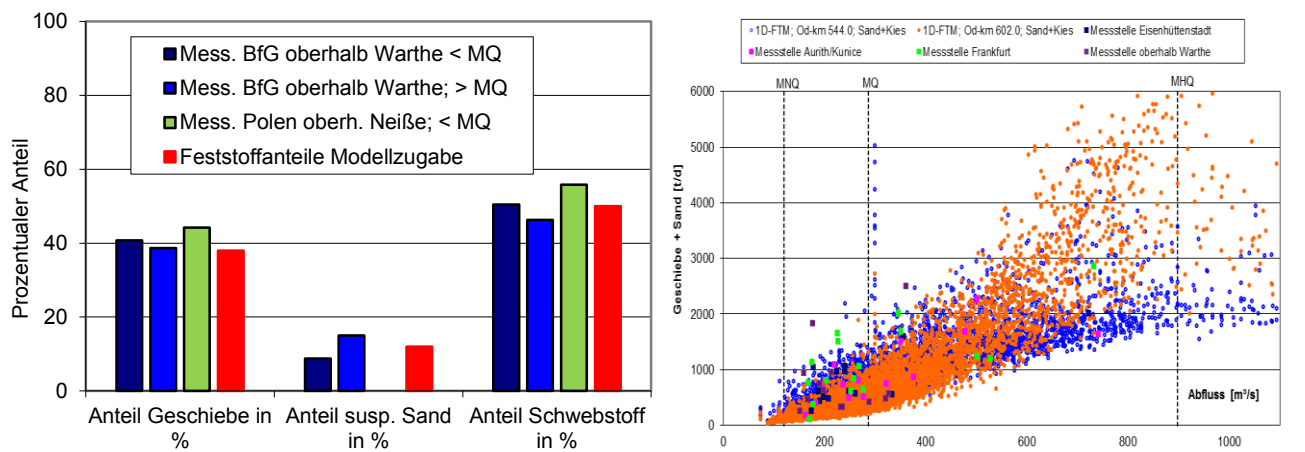


Bild 7: links: Vergleich der Feststoffanteile; rechts: Geschiebe- und suspendierte Sandfrachten an zwei Messstellen im Abschnitt 1

Untersuchungsvarianten und Szenarien

Die zu untersuchenden Varianten sollten sich an folgenden Randbedingungen orientieren:

- Anpassung des neuen Regelungskonzeptes an vorhandene Strombauwerke (Buhnen, Parallelwerken, Deckwerken).
- Beschränkung des Maßnahmenbereiches auf das Mittelwasserbett.
- Orientierung der Bauwerkssollhöhen an aktuelle hydrologische Zustände.
- Unverändertes Regelungssystem unterhalb von Od-km 683.

Nebenziele:

- Hochwasserneutralität.
- Gefahr der Bildung von Eisstau und Eisversetzungen mindern.
- Langfristige Stabilität der mittleren Höhe der Stromsohle.

Es wurden 5 Varianten untersucht, die sich in den geometrischen Sollparametern Streichlinienabstand und Bauwerkssollhöhe unterscheiden. Die Variante 1 stellt die uniforme Basis mit 126 m Streichlinienbreite im Abschnitt 1 und 172 m im Abschnitt 2 sowie einer Bauwerkssollhöhe auf EMW_{2010} dar. Die Bauwerkssollhöhen beziehen sich auf das Entwurfsmittelwasser EMW_{2010} , welches mit dem im Istzustand kalibrierten Modell (Abschnitt 1: $Q=300 \text{ m}^3/\text{s}$; Abschnitt 2: $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$) berechnet wurde. Die Variantensimulation wurde im 1D-FTM mit folgender Annahme realisiert:

- Zwei Baubereiche (jeweils beginnend am unteren Rand der Abschnitte 1 und 2).
- Baufortschritt von Unterstrom nach Oberstrom.
- Teilstrecken (Segmente) von jeweils 7,5 km in 2 Jahren (20 Jahre Bauzeit).

Hierzu wurde der Modellstrang der Grenzoder in 23 Segmente von jeweils 7,5 km Länge unterteilt, die Simulation alle 2 Jahre unterbrochen, ein neuer Geometrieabschnitt für das jeweilige Segment eingeladen, die hydraulischen Einteilungen aktualisiert und die Berechnung fortgesetzt. Neben der geometrischen Variation der Varianten wurden noch weitere Szenarien simuliert:

- Teilumsetzung der Maßnahmen nur in 3 ausgewählten Schwachstellenbereichen.
- Variation der Baureihenfolge, zuerst die drei Schwachstellenbereiche, dann der verbleibende Rest von unterstrom nach oberstrom.
- Begleitende Baggerungen zur Reduktion der durch die Baumaßnahmen bedingten Wasserspiegelanhebung mit verschiedene Intensitäten bzw. Baggervolumina.
- Bauausführungen in 13 bzw. 25 Jahren statt der 20 Jahre des Standardszenarios.
- Variation der Abflussgangline zur Simulation unterschiedlich abflussreicher oder- armer Perioden mit synthetisch erzeugten Ganglinien.

Modellergebnisse und Erkenntnisse

Die Variante 1 weist nach einer Simulationszeit von 40 Jahren im Abschnitt 1 eine sehr ausgeglichen, gleichwertige mittlere Tiefe auf, bei der die Zieltiefe von 1,80 m durchgehend sicher erreicht wird. Im Abschnitt 2 wird die Zieltiefe von 1,80 m ebenfalls erreicht, jedoch weit weniger gleichmäßig und ausgeglichen (Bild 8, obere Grafik). Darüber hinaus führt die Variante 1 zu einer nicht akzeptablen Wasserspiegelanhebung im Mittel- und Hochwasserbereich von 0,45 m respektive 0,28 m. Der steile Gradient der Anhebung findet sich im Längsschnitt insbesondere in dem

Bereich, der die größten Tiefen aufweist (siehe Bild 8, Od-km 660 bis 680). Hieraus ergaben sich Optimierungsmöglichkeiten zur Gestaltung der weiteren Varianten.

Der Abschnitt 1 blieb gegenüber der Variante 1 unverändert. Für den Abschnitt 2 galt es, Bauwerkssollhöhen und Streichlinienbreiten so zu gestalten, das eine ausgeglichene mittlere Tiefe von mehr als 1,80 m erreicht, die Wasserspiegellagen nur minimal angehoben und der bauliche Aufwand möglichst gering gehalten wird. Hierzu wurde insbesondere die Bauwerkssollhöhe an die Ist-Höhe der vorhandenen Buhnen angepasst.

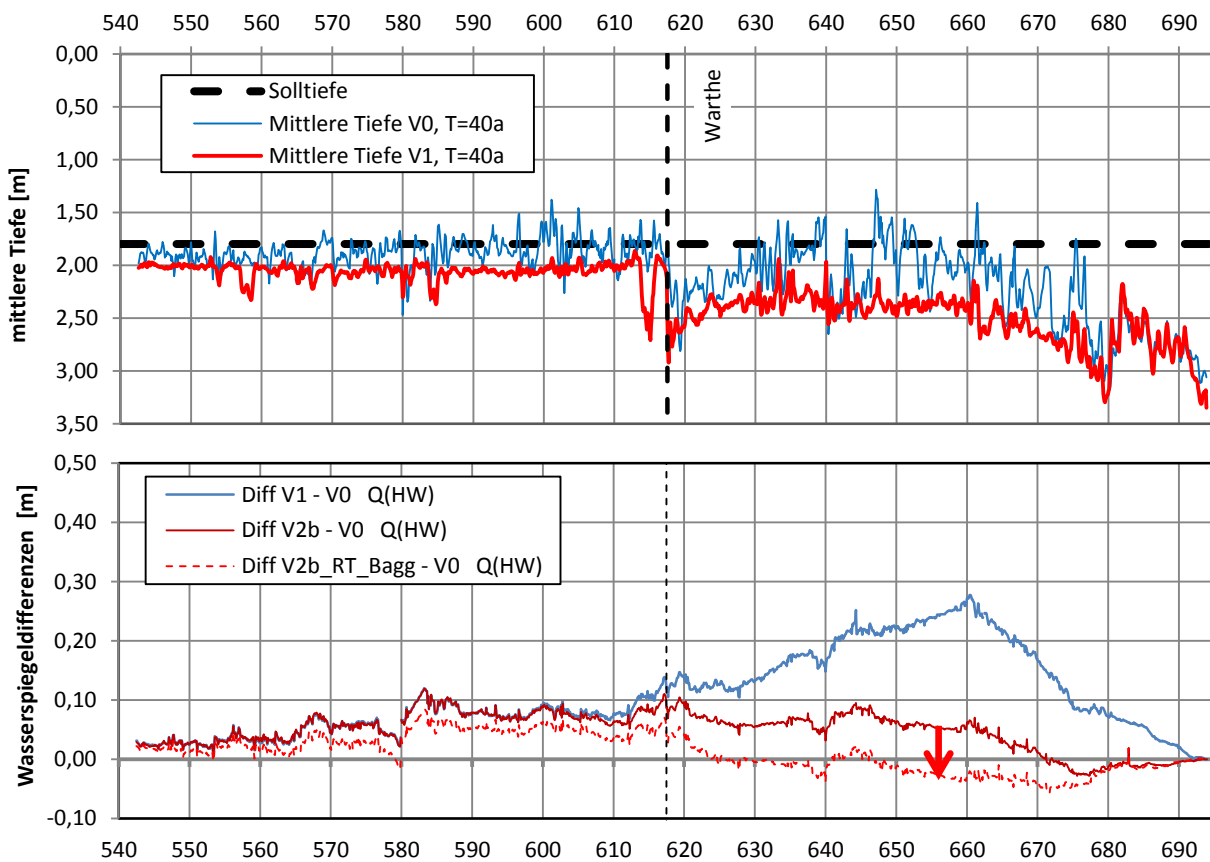


Bild 8: oben: mittlere Tiefen; unten: Wasserspiegeländerungen bei Hochwasser

Weiterhin wurde in den Szenarien mit baubegleitenden Baggerungen gezeigt, dass mit dieser Maßnahme eine Wasserspiegelanhebung nahezu vollständig kompensiert werden kann. Hierzu sind jedoch wiederholt Baggerungen über viele Jahre vorzusehen und eine Entnahme des Baggermaterials aus dem System sicherzustellen.

Die in den Simulationen berechneten Baggermengen sind jedoch als Maximalwerte anzusehen, da mit großer Wahrscheinlichkeit bedeutende Mengen transportierter Feststoffe in den durch die Regelungsmaßnahmen vergrößerten Buhnenfeldern zur Ablage kommen werden und nicht mehr gebaggert werden müssen. Diese Mengen zu prognostizieren ist mit den hier verwendeten Methoden nicht möglich. Im unteren Teil von Bild 8 wird am Beispiel von weiteren Variantenrechnungen

dargestellt, wie die Wasserspiegelanhebung bei Variante V1 durch veränderte Regelungsparameter (Variante V2b) und zusätzlich durch Baggerung (V2b_bagg) beeinflusst werden kann. Als Vorzugsvariante wurde abschließend die Variante V5, eine Detail-Optimierung der Sollbreite und –höhe im Abschnitt 2, von der BAW empfohlen, bei der das Tiefenziel von 1,80 m mittlerer Tiefe durchgängig und gleichwertig erreicht wird, die Wasserspiegelanhebung ohne Kompensationsbaggerung bei etwa 1 dm liegt und durch eine Anpassung der Bauwerkssollhöhen eine Minimierung des Bauaufwands berücksichtigt wird.

Ergänzung der Ergebnisse mit dem physikalischen Modell

Die Fragestellungen, bei denen das 1D-FTM an seine Aussagegrenze stößt, wurden mithilfe des physikalischen Modells (PM) untersucht. Dies ist vor allem bei lokalen morphologischen Phänomenen der Fall, insbesondere bei der Ausbildung der Flusssohle mit Transportköpern, Dünen, alternierenden Bänken, der Bildung von Bühnenkopfkolken oder Mittelgründen. So konnten die Varianten anhand einer besonders diffizilen Strecke morphologisch und auch nautisch [7] überprüft werden. Insbesondere der empfohlenen Bühnenkopfneigung in Richtung der Flussachse von 1:10 wird eine besondere Bedeutung zugemessen. Im Ist-Zustand sind nahezu alle Bühnen, insbesondere durch Schäden infolge unzureichender Unterhaltung, sehr viel steiler. In einem Fluss mit sehr sandigem Sohlaufbau kann dies zu tiefen und vor allem langen Bühnenkopfkolken führen, die von Bühne zu Bühne reichen und in denen ein bedeutender Teil des Abflusses stattfindet. Dies führt zur Ausbildung von Mittelgründen, die die nautische Verfügbarkeit der Tiefe besonders stark beeinträchtigt. Hier zeigt sich im PM, dass eine einheitliche flache Bühnenkopfneigung zu sehr ausgeglichenen Abflussprofilen mit geringer Mittelgrundneigung führt. Jüngste Rückmeldungen aus der Praxis mit dem Einbau von flachen Bühnenköpfen (WSA Eberswalde, Abz. Frankfurt/Oder) bestätigten die positive, tiefenverbessernde Wirkung. Die nautischen Untersuchungen zeigen, dass neben einer Verbesserung der mittleren Tiefe auch die nautische Nutzbarkeit insgesamt deutlich verbessert wird.

Ein direkter Abgleich der Modellergebnisse wurde im Sinne einer Validierung durchgeführt. Hierbei wurden mittlere Tiefen aus völlig unterschiedlichen Ausgangsdaten, aber mit ähnlichen Methoden ausgewertet und abgeglichen.

Fazit und Ausblick

Am Beispiel der „Aktualisierung der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder“ wird gezeigt, wie die Untersuchung einer langen Strecke (ca. 156 km) mit umfangreichen Regelungsmaßnahmen (ca. 2500 Bühnen) innerhalb eines Gewässernetzes (Oder, Neiße und Warthe) über einen langen Prognosezeitraum (40 Jahre) mit zahlreichen Varianten (6) und Szenarien (15) gelingen kann. Das verwendete Modellsystem aus HEC-6T und dem BAW-eigenen Pre- und Postprozessor HASE arbeitet effizient, die Rechenzeit für einen Simulationslauf beträgt ca. 30 Minuten. Mit dem 1D-FTM konnten erfolgreich langfristige, großräumige und zeitvariable Fragestellungen beantwortet werden. Alle lokalen, morphologisch-dynamisch komplexen sowie nautischen Fragestellungen konnten mit dem physikalischen Modell ergänzend beantwortet werden. Die vorgestellten Methoden wurden für die Fragestellungen an der Grenzoder ideal miteinander kombiniert,

keine Methode wäre eigenständig in der Lage gewesen, die komplexen Zusammenhänge darzustellen.

Der Einsatz eindimensionaler Feststofftransportmodelle ist bei entsprechenden Fragestellungen nach wie vor zeitgemäß und zweckmäßig. In der beschriebenen Untersuchung wird ergänzend der Einsatz numerisch-mehrdimensionaler Modelle für Strecken, die eine sehr komplexe Hydraulik aufweisen (z.B. Einmündung der Warthe mit Kietzer Umflut oder der Bereich Frankfurt/Oder und Slubice mit mehreren Brückendämmen durch große Vorländer) in der weiteren Bearbeitung empfohlen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Modellierung, Kalibrierung, Validierung und für Variantenprognosen sind in allerdings immer gute Naturmessdaten, dies gilt nicht nur für 1D-Modelle.

Literatur

- [1] Hüsener, T. Hentschel B., Ewe A. (2010): Morphologische Entwicklung der Grenzoder. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 40, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, TU Dresden
- [2] BAW (2008, 2009, 2011): Grobanalyse der Grenzoder, Abschnitt A, B, C, Untersuchung von Unterhaltungs- und Regelungsmaßnahmen (unveröffentlicht).
- [3] BAW (2014): Aktualisierung der Stromregelungskonzeption der Stromregelungskonzeption für die Grenzoder, BAW 3.02.10132.3, Gutachten der BAW (unveröffentlicht)
- [4] BfG (1997): Korngrößenzusammensetzung der Odersohle zwischen Ratzdorf und Widuchowa. BfG-Bericht Nr:1069, Berlin, 1997 (unveröffentlicht).
- [5] BfG (2008): BfG Jahresbericht 2006/2007. GGInA – Das Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Sedimentdatenbank SedDB, Seite 14, Koblenz, 2008
- [6] Hentschel, B. (2008): Hydraulische und morphologische Untersuchungen an der Oder mit Hilfe eines hydraulischen Modells mit beweglicher Sohle. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Schriftenreihe Veranstaltungen, Sedimentologische Prozesse, Koblenz 3/2009
- [7] Hentschel, B. (2006): Physikalisches Geschiebetransportmodell der Oder zur Untersuchung der Wechselwirkung von Stromregelungsbauwerken, Sohlformen und nautischen Bedingungen. Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulation im Wasserbau, Dresden, 87-95.
- [8] MBH Software (2014): Sedimentation in Stream Networks (HEC-6T). User Manual, MBH Software, Inc. Clinton MS, USA.
- [9] Simons et al (1992): Sediment Transport Technologie, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA 1992