

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

Yörük, Alpaslan

## Überprüfung der Extremwerte von Pegelschlüsselkurven mit 2D-Simulation

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103374>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Yörük, Alpaslan (2015): Überprüfung der Extremwerte von Pegelschlüsselkurven mit 2D-Simulation. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Messen und Überwachen im Wasserbau und am Gewässer. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 53. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 141-150.

### Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Überprüfung der Extremwerte von Pegelschlüsselkurven mit 2D-Simulation

Alpaslan Yörük

Wasserstandsdaten und die daraus abgeleiteten Abflüsse spielen eine elementare Rolle bei der Bewirtschaftung von Fließgewässern. Sie sind die maßgebliche Größe für beispielsweise die Bemessung und den Bau von Bauwerken bzw. teuren Baumaßnahmen, die Festlegung von Überschwemmungsgebieten sowie für die Hochwasservorhersage. Messwerte liegen meist nur für niedrige Wasserstände, d. h. kleine Abflusswerte vor. Relevant für die genannten Aufgaben sind aber hohe Abflüsse, für die Pegel- und Flügelmessungen oft keine belastbaren Daten mehr liefern. Die Messdaten sind aus diesen Gründen statistisch nicht ausreichend abgesichert.

Die Simulation von Hochwasserabflüssen im Bereich von Messpegeln kann diese Informationslücke schließen. Ein 2D-Modell erfasst detailliert die geografischen Bedingungen des Gewässers und seiner Vorländer. Es ist in der Lage, die Fließvorgänge und den sich einstellenden Wasserstand genau zu berechnen. Auch Ausuferungen und Pegelumläufigkeiten, wie sie bei Hochwasser häufig auftreten, lassen sich damit sehr gut abbilden (siehe Abbildung).

Die simulierten Abflussganglinien werden anhand von abgesicherten Abflussmessungen kalibriert und der aktuell gültigen Abflusskurve gegenübergestellt. Ergänzend klärt eine Sensitivitätsanalyse, ob und in welchem Maße die Rauheiten von Gewässersohle und Vorland die Schlüsselkurve beeinflussen.

Bei Ausuferungen und Pegelumläufigkeiten ist weiterhin zu differenzieren, inwieweit Abfluss und Pegelstand kontinuierlich interagieren oder ob es zu einer Entkopplung der beiden Größen kommt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgt abschließend eine Bewertung des Pegelstandorts und ggf. eine Empfehlungen für bauliche Veränderungen oder eine Verlagerung an einen besser geeigneten Standort.

Wasserwirtschaftsbehörden können auf dieser Basis die Abflusskurven insbesondere für den Hochwasserbereich durch gesicherte Werte ergänzen.

Stichworte: Nachrechnung/Überprüfung Pegelschlüsselkurven, 2D-Modell, HYDRO\_AS-2D

## 1 Einleitung

Pegelschlüsselkurven oder auch Abflusskurven zeigen das Verhältnis von Wasserstand  $W$  zum zugehörigen Abfluss  $Q$  für einen Pegel-Standort. Während Messgeräte den Wasserstand kontinuierlich aufzeichnen, wird der aufwändiger zu bestimmende Abfluss in größeren zeitlichen Abständen gemessen. Aus der Korrelation von Wasserstand- und Abflusswerten lässt sich die Abflusskurve ableiten, die für jeden Pegelstand einen Abflusswert liefert.

Die Güte der auf Basis der Pegelschlüsselkurve ermittelten Abflusswerte steht somit im direkten Zusammenhang zur Güte der Abflusskurve.

In der Regel bilden die Abflusskurven das Verhältnis zwischen  $W$  und  $Q$  für mittlere bis kleine Hochwasserabflüsse sehr gut ab, für extrem seltene Hochwasserereignisse sind sie jedoch mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

Dies liegt das zum einen an der Seltenheit dieser Ereignisse und zum anderen daran, dass eine Messung im Hochwasserfall technisch kaum zu bewerkstelligen ist (hohe Gefährdung, schlechte Erreichbarkeit der Messstelle, usw.).

Dieser Wertebereich ist jedoch für die Bemessung von Bauwerken, die Ermittlung von Überflutungsflächen etc. von hoher Relevanz, sodass ein großes Interesse an möglichst gesicherten Angaben besteht. Die Wasserwirtschaftsverwaltungen einiger Bundesländer haben darauf reagiert und landesweit die Pegelschlüsselkurven im Extrembereich mithilfe einer 2D-Modellierung überprüft und abgesichert (vgl. z.B. Drägerdt 2010).

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Methode zur Prüfung von Abflusskurven im Extrembereich auf Grundlage von Modellrechnungen.

## 2 Modellerstellung

Das zweidimensional rechnende hydrodynamisch-numerische Modell HYDRO\_AS-2D (Nujic/Hydrotec, 2014) eignet sich besonders gut für die Modellierung von Pegelabschnitten, weil Rauheiten abhängig vom Abfluss angegeben werden können. Modellierer können das Modell damit flexibel kalibrieren.

Im Rahmen der Umsetzung der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL, EU 2007) wurden viele Gewässerabschnitte modelltechnisch abgebildet. Diese Modelle können in der Regel für die Untersuchung von Abflusskurven verwendet werden. Um die Simulationszeiten zu minimieren, sind die Betrachtungsabschnitte mit dem Pegelstandort aus dem Gesamtmodell eines Flusslaufs auszuschneiden.

Die Anforderungen an die Genauigkeit eines Modells eines Pegelstandortes liegen über denen eines Modells zur Ermittlung von Überflutungsflächen (z.B. Approximation bzw. Interpolation der Gewässergeometrie). Die Erfahrungen zeigen, dass zumindest der Pegelbereich neu aufzunehmen ist, um eine höhere Punktdichte zu erhalten. Bestehende Modelle bieten aber den Vorteil großräumig vorliegender Modellergebnisse (zumeist HQ100 und HQextrem), aus denen evtl. auftretende Pegelumlaufigkeiten direkt erkennbar sind.

Weiterhin liefern die vorliegenden Ergebnisse Hinweise darauf, welche Fläche sinnvollerweise für das Pegelmodell zu wählen ist. Bei der Festlegung der Modellgrenzen, ist der Zufluss so anzuordnen, dass mögliche Pegelumströmungen erfasst werden und dass die Lage des Zulaufendes die Fließprozesse am Pegel nicht beeinflusst.

Der Auslaufend sollte soweit im Unterwasser liegen, dass Rückstaueffekte durch z.B. Bauwerke oder seitlich einmündender Gewässer sowie die Wahl der Modellauslaufendbedingung, die Einfluss auf die modellierte Abflusskurve haben könnten, berücksichtigt bzw. ausgeschlossen werden können.

Die gekürzten Bestandsmodelle sollten abschließend nach den folgenden Aspekten geprüft werden:

- Übereinstimmung zwischen Profilgeometrie im 2D-Modell mit Vermessungsdaten
- Wirklichkeitsgetreue Abbildung der Bauwerke (Geometrie, Überströmbarkeit usw.)
- Realitätsnahe Zuweisung von Rauheiten
- Korrekte Abbildung von Gebäude, Straßen und sonstigen abflusswirksamen Strukturen

Ist ein neues Modell zu erstellen, sind die Modellflächen auch hier möglichst gering zu wählen, um die Simulationszeiten und die Aufwände für die Vermessung und Modellierung zu minimieren. Im Vorfeld einer Modellerstellung bietet es sich an, einen Proberechenlauf allein auf Basis der Laserscan-Daten durchzuführen.

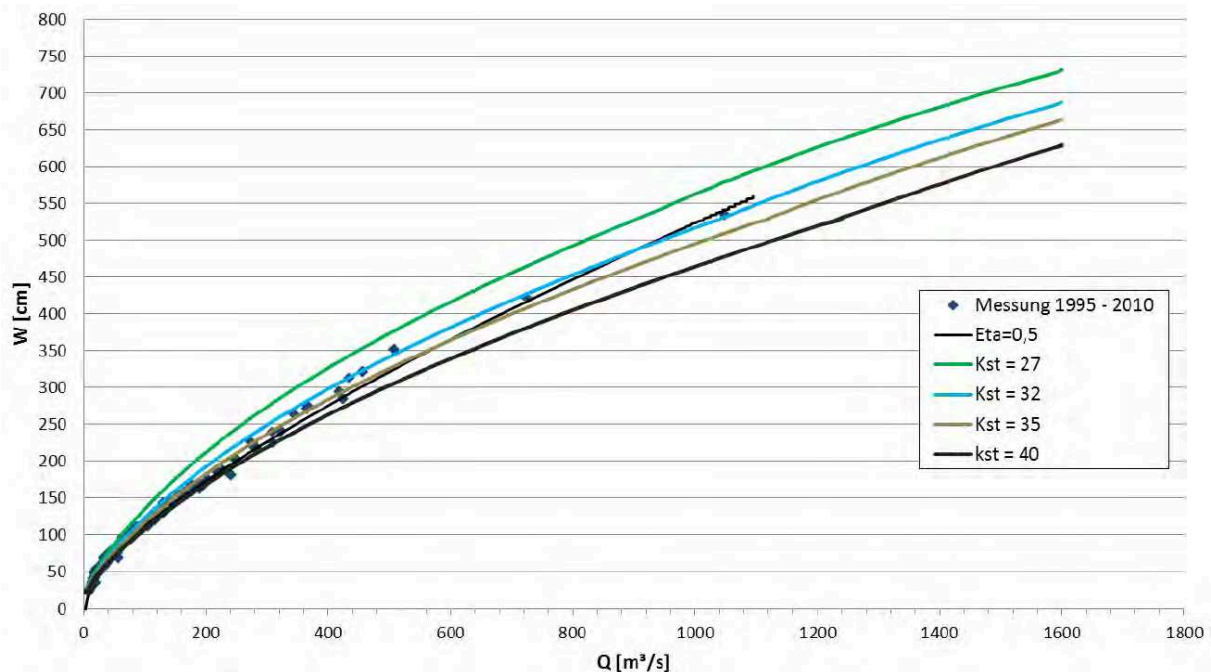
Die Ergebnisse können zur Wahl der Modellgrenzen herangezogen werden.

Die Methode zur Erstellung eines 2D-Modells sowie Möglichkeiten der Modellprüfung sind in Yörük & Sacher (2014) dargestellt.

### 3 Sensitivitätsuntersuchung und Modellkalibrierung

Ist ein 2D-Pegelmodell erstellt und hinsichtlich der Qualität geprüft, erfolgt eine Sensitivitätsstudie. Die im Vorfeld zugewiesenen Rauheitsparameter (Flussnetz auf Grundlage der Ortsbegehung und Vermessung, Vorland auf Grundlage von Landnutzungsdaten) werden in einem plausiblen Bereich variiert (zumeist +/- 20 %). Dadurch lässt sich der Einfluss der Sohlbeschaffenheit (z.B. infolge des jahreszeitlichen Bewuchses im Flussschlauchbereich) auf den Verlauf der Schlüsselkurve (vgl. Abbildung 1) quantifizieren. In der Regel ist der Einfluss der Rauheit für geringe Abflüsse eher gering, während er mit zunehmendem Abfluss deutlich zunimmt.

Weiterhin kann auf Grundlage dieser Untersuchung eine erste Schätzung für die abflussabhängigen Rauheitswerte erfolgen. Bezogen auf Abbildung 1 wäre für Abflüsse über 500 m<sup>3</sup>/s eine Rauheit von  $k_{st} = 32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  sinnvoll (blaue Kurve), während für kleinere Abflüsse ca.  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  die Rauheit  $k_{st} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (braune Kurve) angesetzt werden sollte.

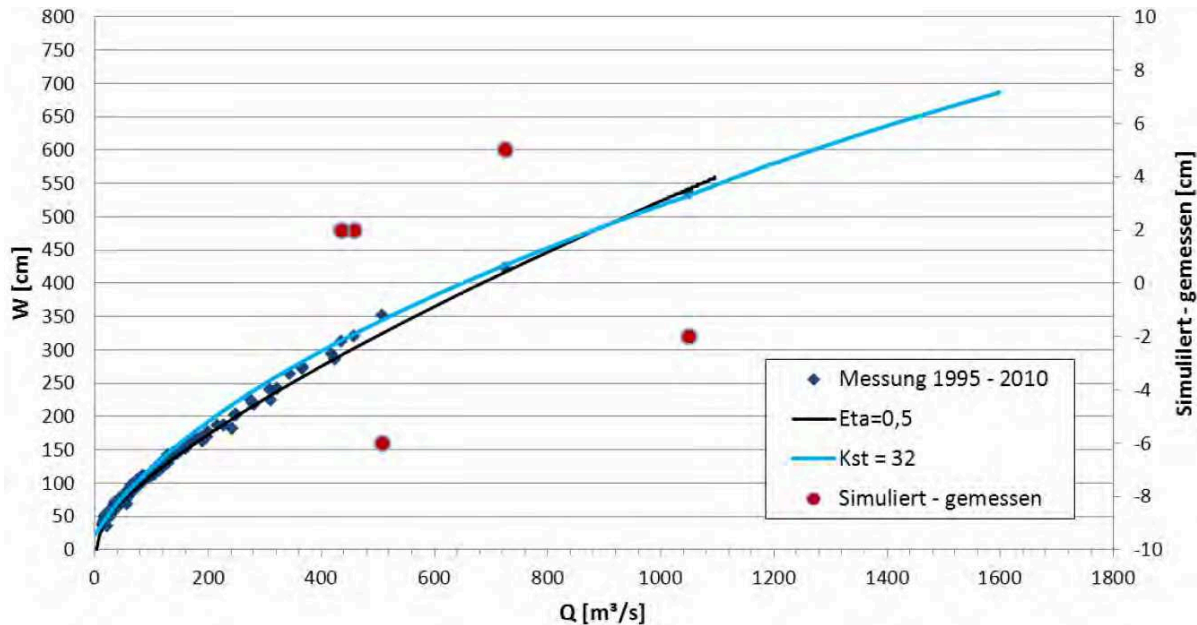


**Abbildung 1:** Einfluss der Sohlrauheit auf den Schlüsselkurvenverlauf im Modell (farbig: simulierte Abflusskurven, schwarz: aktuelle Abflusskurve)

Auf Basis der Sensitivitätsuntersuchung erfolgt die Modellkalibrierung.

Das 2D-Modell wird mit den gemessenen Abflusswerte beaufschlagt und die die simulierten Wasserstände den gemessenen gegenübergestellt. Hierbei beschränkt man sich primär auf eine definierte Anzahl von Messwerten im Hochwasserbereich. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 2, in der die höchsten 5 Messwerte

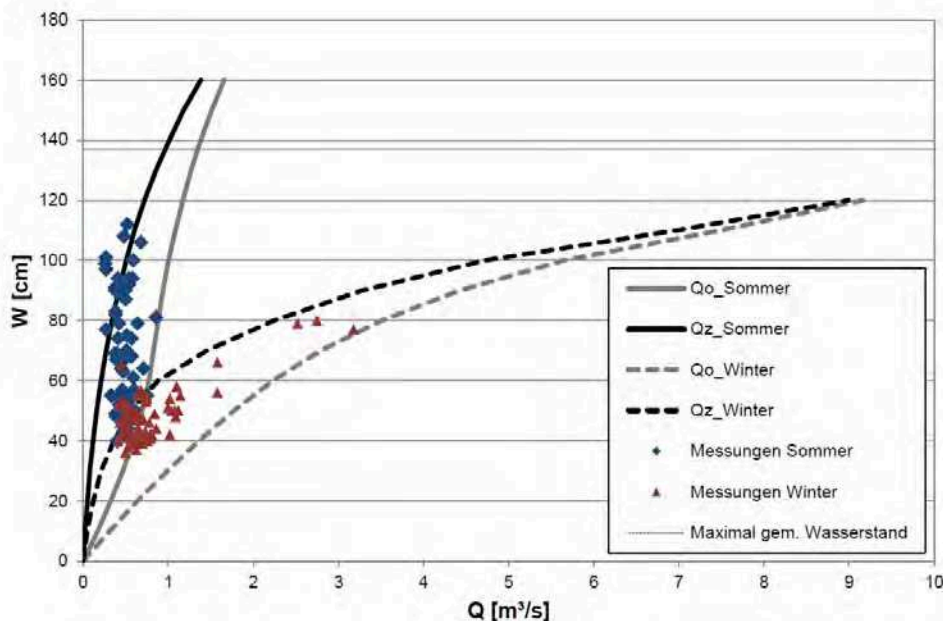
simuliert wurden und die Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Wasserstand unter 0,06 m liegt.



**Abbildung 2:** Modellkalibrierung anhand von 5 Hochwasserereignissen. Die blauen Punkte und Kurven beziehen sich auf die Primärachse, die roten Punkte auf die Sekundärachse.

Bevor eine Modellkalibrierung durchgeführt werden sollte, wird dringend empfohlen die vorliegenden W/Q-Messwerte zu analysieren und zu prüfen. Folgende Fragestellungen sind dabei von großer Bedeutung:

- Stimmt der Standort des Pegels (Wasserstandsaufzeichnung) mit dem Standort der Abflussmessung überein? Oft wird wegen der schlechten Zugänglichkeit des Pegelbereichs die Abflussmessung an naheliegenden Brücken durchgeführt und dem Wasserstand am Pegel gegenübergestellt. Dabei kann es zwischen beiden Messstellen z.B. zu einer Umströmung kommen und somit die Messung verfälschen.
- Wie groß ist der jahreszeitliche Einfluss auf die Abflusskurve (vgl. Abbildung 3)? Bei stark verkrauteten Gerinnen zeigt sich in der Regel ein weit verstreutes Bild von W/Q-Messwerten, die in dem Umfang nicht sinnvoll für eine Kalibrierung herangezogen werden können. In solchen Fällen ist eine Kalibrierung von zwei Szenarien zu empfehlen. Und zwar ein Winter-Szenario (krautfrei) und Sommer-Szenario (verkrautet). Für das Sommer-Szenario können dabei Untervarianten von Interesse sein (gemäht, Zwischenzustand, und 100 % verkrautet).



**Abbildung 3:** Beispiel für den Einfluss jahreszeitlicher Einflüsse auf die W/Q-Beziehung

- Wie aktuell sind die Messwerte? W/Q-Messungen an Pegeln werden seit Jahrzehnten kontinuierlich durchgeführt. Sollte es Zwischenzeitlich zu einem Gewässerausbau bzw. abflusswirksamen Baumaßnahme am Gewässer gekommen sein, so sollten lediglich die unbeeinflussten Messwerte für die Kalibrierung herangezogen werden.
- Ist der Pegel Umläufig? Es ist zu prüfen, ob für das Abflussspektrum der Messwerte im Rahmen der Abflussmessung der Gesamtabfluss gemessen wurde oder ob ein Teil des Abflusses wegen einer Pegelumläufigkeit nicht erfasst werden konnte.
- Wie genau ist die Messung? Falls gemessene Hochwasserwerte vorliegen, so sind dies einige wenige Werte. Wenn diese Werte im Rahmen der Kalibrierung auf den cm-genau nachgerechnet werden sollte auch die Unsicherheit der Messwerte berücksichtigt werden. Sowohl die Abflussmessung an sich birgt Unsicherheiten (bis ca. +/- 5%) (Fiedler 2008), als auch der Zeitpunkt der Abflussmessung. Denn eine Abflussmessung just zum Zeitpunkt des Eintreffens eines HW-Scheitels ist zumeist auszuschließen. Gemessen wird in der Regel am steigenden oder abfallenden Ast. Liegt ein signifikanter Hysterese-Effekt, so geht damit ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Unsicherheit einher. Weiterhin kann es zu Veränderung der Gewässersohle im Pegelbereich durch natürliche morphologische Prozesse kommen. Dies sollte im Rahmen einer Ortsbegehung ebenfalls bewertet werden.

In der Praxis wird in der Regel eine Modellkalibrierung mit dem Qualitätskriterium von maximal  $\pm 0,1$  m (Differenz gemessener / simulierter Wasserstand) als ausreichend erachtet.

## 4 Ergebnisse und Fazit

Hydrotec hat in den vergangenen Jahren hunderte von Abflusskurven auf Grundlage von Modellrechnungen (1D und 2D) untersucht. Daraus wurde deutlich, wie sinnvoll und notwendig es ist, die Abflusskurven im Extrembereich durch Modellrechnungen zu prüfen.

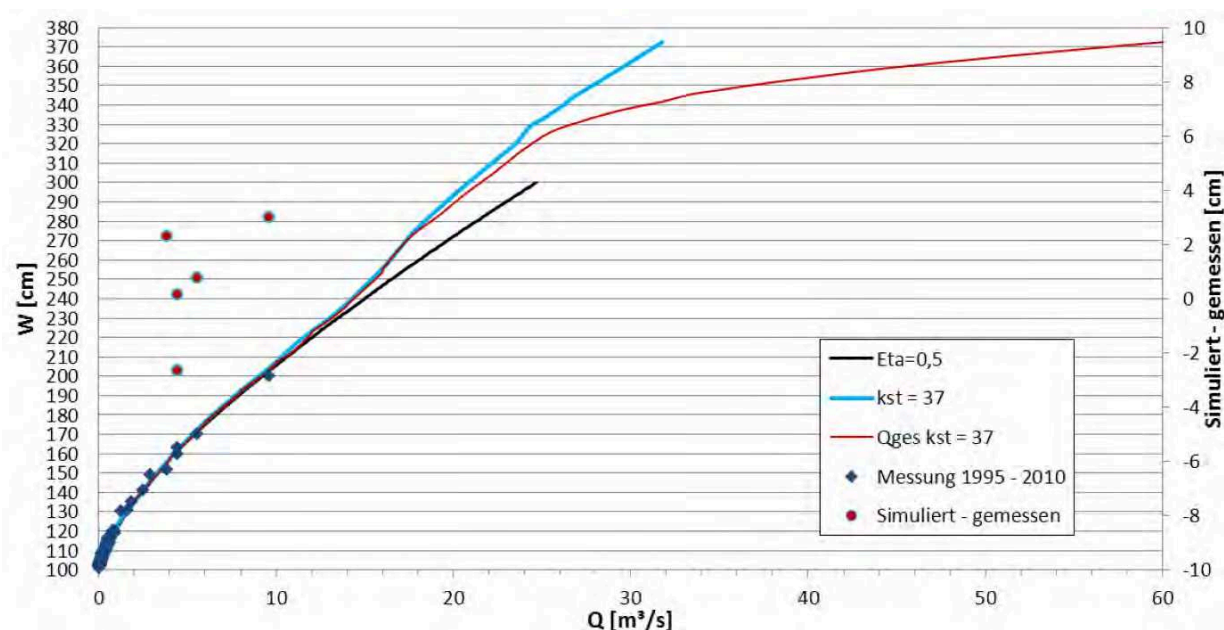
Während ein bestimmter Teil der extrapolierten Abflusskurven mit wenig Abweichung bestätigt werden konnte, unterschieden sich bei mehr als 50 % der Pegel die berechneten und die extrapolierten Abflusskurven signifikant voneinander.

Dabei zeigen sich Fälle, in denen die simulierte Abflusskurve steiler, aber auch flacher als die extrapolierte Abflusskurve verlaufen kann. Somit wurden bisher mit diesen Abflusskurven die Transformierten Abflüsse auf Basis der Wasserstandsmessungen über- bzw. unterschätzt. Ähnliche Ergebnisse werden in Drägerdt (2010) sowie in von Kalm (2014) dargestellt.

Neben einer Verbesserung der aktuell gültigen Abflusskurven auf Grundlage der Modellergebnisse konnten oft weitere Erkenntnisse gewonnen werden. So lieferten die Modellergebnisse Informationen hinsichtlich einer potenziellen Pegelumströmung sowie von Einflüssen durch seitliche Zuflüsse oder nahe gelegenen Bauwerken.

Ein Beispiel für eine Abflusskurve bei Pegelumströmung zeigt Abbildung 4. Es wird deutlich, dass das Modell Aussagen zur Abflusskurve für eine lokale Betrachtung (W/Q-Beziehung am Pegelquerschnitt) liefern kann, aber auch offen legt, ob und vor allem in welchem Umfang eine Pegelumströmung stattfindet. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können ggf. zudem historische Messwerte untersucht und der Einfluss der Umströmung nachträglich analysiert werden.

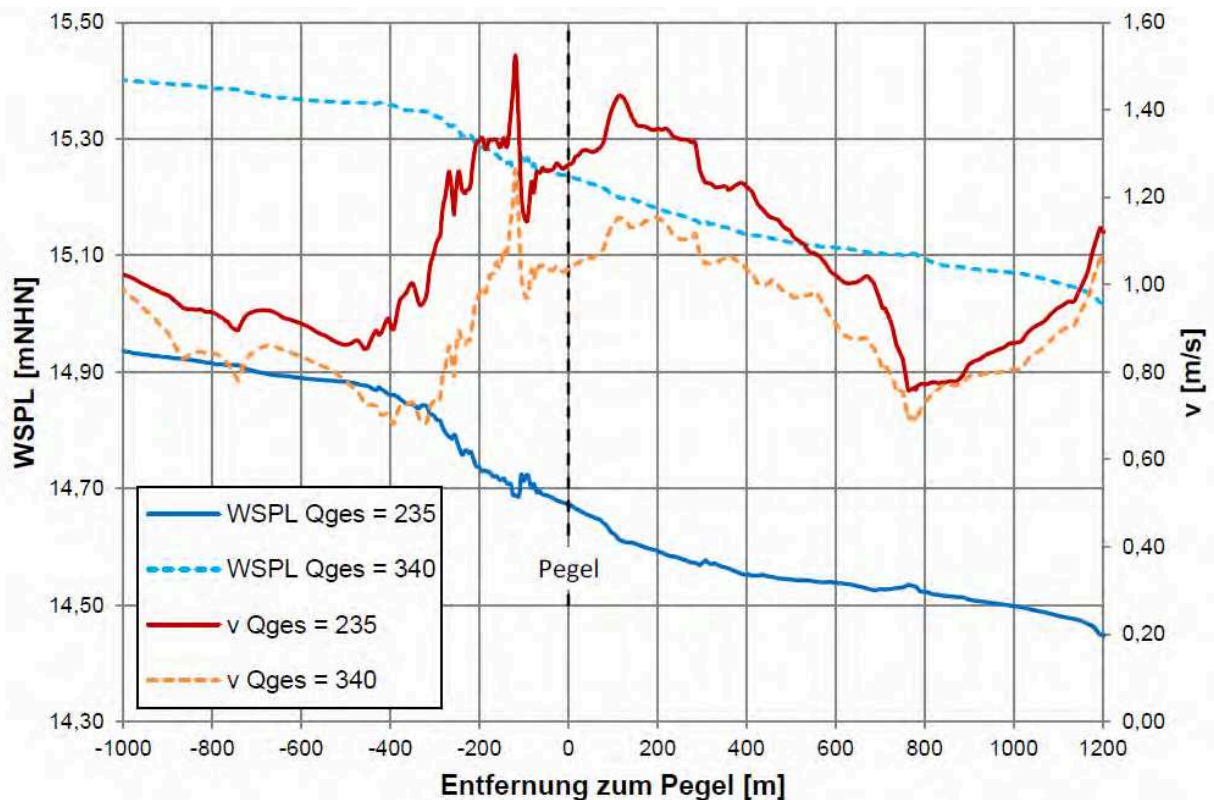




**Abbildung 4:** Simulierte Abflusskurven bei einer Pegelumströmung (blau: Abfluss durch den Pegelquerschnitt, rot: Gesamtabfluss)

Neben der Pegelumströmung zeigen die Modellergebnisse auch sehr gut Rückstauprozesse, die im Rahmen der Extrapolation der Abflusskurven nicht berücksichtigt sind. So kann ein seitlicher Zufluss unterhalb des Pegels einen signifikanten Einfluss auf die Abflusskurve besitzen. Die Modellierung kann das auf zwei Weisen abbilden: Falls eine Analyse des Untersuchungsgebietes einen direkten Zusammenhang der Abflussanteile beider Einzugsgebiete aufzeigt, so kann auf dieser Grundlage die Abflusskurve ermittelt werden. Alternativ können für unterschiedliche Zustände Varianten von Abflusskurven abgeleitet werden, die je nach maßgeblichem Fall zur Anwendung kommen.

Neben seitlichen Zuflüssen zeigen insbesondere starke Interaktionen unterhalb des Pegels zwischen Vorland- und Flussschlauchabfluss (z.B. Rückströmung Vorlandströmung in den Flussschlauch) oder auch Bauwerke unterhalb des Pegels zum Teil signifikante Einflüsse auf die Abflusskurven. In beiden Fällen wird ab einem definierten Abfluss ein Rückstau erzeugt. In manchen Fällen führt der Rückstau zu einer Verminderung des Abflusses durch den Pegelquerschnitt, bei gleichzeitiger Zunahme des Wasserspiegels. Dies ist darin begründet, dass mit zunehmendem Gesamtabfluss der Rückstauprozess beginnt und zu einer Reduktion der Fließgeschwindigkeiten führt (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Längsschnitt Wasserspiegellagen und Fließgeschwindigkeiten im Pegelbereiche

Dieser Prozess wirkt sich in deutlich steileren Verläufen der Abflusskurven im entsprechenden Abflussspektrum aus. Solche Prozesse können sehr gut in den Modellergebnissen nachvollzogen werden und bewirken ein gutes Verständnis für das Abflussverhalten des Pegelabschnittes.

Insgesamt führt die modelltechnische Überprüfung der Abflusskurven im Extrembereich größtenteils zu einer Absicherung bzw. Verbesserung der vorliegenden Abflusskurven und lieferte zusätzliche Erkenntnisse zu den Fließprozessen am Pegel. Teilweise konnten Empfehlungen zur Verlegung des Pegelstandortes an einen geeigneteren Ort gegeben werden. Dies führt wiederum zu einer deutlichen Verbesserung der Bemessungsgrundlage von Bauwerken an Gewässern, Hochwasserschutzanlagen sowie in der Ermittlung von Überflutungsflächen durch genauere Bemessungsabflusswerte.

Wasserwirtschaftlich relevante Pegel sollten deshalb anhand von Modellrechnungen überprüft werden.

Eine Herausforderung stellen derzeit Abflussquerschnitte mit breiten Vorländern dar, die eine sehr flache Abflusskurve aufweisen.

## 5 Literatur

- Drägerdt, S.; Roth, C. (2010): Hydraulische Überprüfung von Abflusskurven an Pegeln im Extrembereich Graw, K.-U. (Hrsg.): Wasserbau und Umwelt - Anforderungen, Methoden, Lösungen. Dresdner Wasserbaukolloquium 2010. Dresden, (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 40), S. 495 – 504
- EU (2007) Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie; HWRM-RL). In: ABI. Der EU L 288/27 vom 6.11.2007
- Fiedler, K.; Rutschmann, P. (2008): Erfassung hydromorphologischer Vorgänge bei Hochwasser mit Hilfe von ADCP-Messungen, tech.Diss.; TU München 2008, ISBN: 978-3-940476-12-8, Selbstverlag, München,
- Kalm von, T.; Sönnichsen, D.; Wiebe, H. (2014): Stimmt die W/Q-Beziehung bei höchsten Abflüssen? In Wasserwirtschaft (2014), Nr. 11, S. 10-15
- Nujic, M., Hydrotec (2014): HYDRO\_AS-2D - Programm zur 2D-hydrodynamischen Modellierung von Fließgewässern, Version 3.1; Dr. Nujic, Rosenheim; Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen; 2014
- Yörük, A. ; Sacher, H. (2014): Methoden und Qualität von Modellrechnungen für HW-Gefahrenflächen. In: Stamm, J. ; Graw, K.-U. (Hrsg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. 37. Dresdner Wasserbaukolloquium 2014. Dresden, 13. /14. März 2014 (Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50), S. 55 - 64

Autor:

Dr. Alpaslan Yörük

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH  
Bachstr. 62-64  
52066 Aachen

Tel.: +49 241 94689 0

Fax: +49 241 506889

E-Mail: a.yoeruek@hydrotec.de