

Donau (Iller bis Lech) – Verbesserung Hochwasserschutz - Datenmanagement und Modelle

Hydraulik – Modellaufbau und -anpassung

Bericht

Anlage 4.2

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	3
2	Modellerstellung	3
2.1	Informationen zur Modellierung - Parametereinstellung.....	3
2.2	Anfangsbedingungen	4
3	Kalibrierung.....	4
3.1	Vorgehensweise – Ergebnis der Kalibrierung.....	4
3.2	Hochwasserwelle 2013	5
3.3	Randbedingungen.....	5
3.3.1	Zuflussganglinien.....	5
3.3.2	Staufstufensteuerung.....	6
3.4	Datengrundlagen – Dokumentation des Hochwasserereignisses	6
3.5	Kalibrierung anhand amtlicher Pegel.....	6
3.5.1	Pegel Günzburg.....	6
3.5.2	Pegel Dillingen.....	8
3.5.3	Pegel Donauwörth	10
3.6	Kalibrierung anhand von Wasserspiegelfixierungen	13
3.6.1	Wasserspiegelfixierung Riedstrom (HW2013, erste Welle)	13
3.6.2	Wasserspiegelfixierung Donau (HW2013, zweite Welle).....	14
3.7	Kalibrierung anhand des Überschwemmungsgebietes	15
3.8	Fazit der Kalibrierung	15
4	Validierung	15
4.1	Vorgehensweise.....	15
4.2	Hochwasserwelle 1999	16
4.3	Randbedingungen.....	16
4.3.1	Zuflussganglinien.....	16

4.3.2	Staufstufensteuerung.....	17
4.4	Datengrundlagen.....	17
4.5	Validierung anhand amtlicher Pegel.....	17
4.5.1	Pegel Günzburg.....	17
4.5.2	Pegel Dillingen.....	19
4.5.3	Pegel Donauwörth.....	20
4.6	Validierung anhand von Wasserspiegelfixierungen.....	22
4.7	Fazit der Validierung.....	22
5	Sensitivitätsanalyse.....	22
5.1	Vorgehensweise.....	22
5.2	Ergebnis.....	23
6	Abschließende Bewertung.....	23

Anlagen:

- Anlage 4.2.1 Kalibrierung HW2013 (erste Welle) Tabelle WSPL-Fixierung Riedstrom
- Anlage 4.2.2 Kalibrierung HW2013 (zweite Welle) Längsschnitt WSPL-Fixierung Donau
- Anlage 4.2.3 Kalibrierung HW2013 (erste Welle) Georeferenzierte Luftbildaufnahmen Plan 1
- Anlage 4.2.4 Kalibrierung HW2013 (erste Welle) Georeferenzierte Luftbildaufnahmen Plan 2
- Anlage 4.2.5 Kalibrierung HW2013 (erste Welle) Georeferenzierte Luftbildaufnahmen Plan 3
- Anlage 4.2.6 Validierung HW1999 (zweite Welle) Längsschnitt WSPL-Fixierung Donau
- Anlage 4.2.7 Sensitivitätsanalyse HW2013 (zweite Welle) Längsschnitt WSPL Donau

1 **Veranlassung und Aufgabenstellung**

An der Donau zwischen Iller und Lech werden die Auswirkungen von sieben Rückhalteräumen, die die Hochwasserschutzziele unterstützen, anhand zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Berechnungen untersucht.

In Anlage 4.1 wurde das Modellkonzept vorgestellt und Festlegungen zur Vorgehensweise bei der Modellfortschreibung getroffen.

Vorliegender Bericht fasst alle zusätzlichen Modellanpassungen und verwendeten Modellgrundlagen zusammen, die im Modellkonzept nicht abschließend behandelt wurden. Insbesondere werden die Ergebnisse der Modellkalibrierung, Modellvalidierung und Sensitivitätsuntersuchung vorgestellt.

Am Ende des Modellaufbaus steht ein kalibriertes, validiertes und prognosefähiges Modell zur Untersuchung der hydraulischen Wirkungen der sieben Rückhalteräume an der Donau zur Verfügung.

2 **Modellerstellung**

Die Modellerstellung erfolgte entsprechend den Ausführungen im Bericht zum Modellkonzept (siehe Anlage 4.1). Für die Kalibrierung, Validierung und Sensitivitätsanalyse wurde das DHHN12 als Höhensystem verwendet.

HINWEIS: Für die weiteren Untersuchungen (Bezugszustand und Planzustände) wird das DHHN2016 verwendet.

2.1 **Informationen zur Modellierung - Parametereinstellung**

Alle Berechnungen wurden instationär mit den Hochwasserganglinien der Donau und ihrer Nebengewässer durchgeführt. Ausgehend von den amtlichen Pegeln an der Donau und ihrer Nebengewässer wurden die Ganglinien für die verwendeten Hochwasserereignisse zur Kalibrierung und Validierung an den Einlaufrändern des 2d-Modells vom Sachgebiet Hochwasservorhersage und Speicherbetrieb am WWA Kempten mit dem Wasserhaushaltsmodell „LARSIM“ berechnet.

Die in *Hydro_As-2d Version 4.2.7* verwendeten Berechnungsparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Berechnungsparameter Hydro_As-2d

Simulationszeit [s]	Nach Erfordernis
Zeitintervall SMS [s]	3600.0
Zeitintervall Q_Strg [s]	900.0
Hmin [m]	0.01
VELMAX [m/s]	15.0
Amin	10.0
CMUVISC	0.6
SCF	2.0
CFL	0.9

2.2 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen wurden die Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten bei Mittelwasser in der Donau und entsprechenden Abflüssen in ihren Nebengewässern vorgegeben. Damit sind die Stauräume der Staustufen schon gefüllt und es wird keine Vorlaufzeit zum Füllen des Modells benötigt.

3 Kalibrierung

3.1 Vorgehensweise – Ergebnis der Kalibrierung

Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe des gut dokumentierten Hochwasserereignisses vom Juni 2013. Zum einen besteht das Hochwasserereignis 2013 aus einer Doppelwelle. Zum anderen ist die Datenlage besser als beim Hochwasserereignis 1999, das nachfolgend zur Validierung des Modells verwendet wird.

Kalibriert wurden die Rauheitsbeiwerte nach Strickler für den Flussschlauch der Donau. Als Startwerte für die Kalibrierung wurden die Stricklerwerte aus den vorhandenen Teilmodellen der Donau übernommen. In dem Teilabschnitt von der Lechmündung bis zum unterstromigen Ende des Modells an der Staustufe Bertoldsheim wurden die Rauheiten aus dem „2d-Modell Ingolstadt“ übernommen und im Rahmen der Kalibrierung nicht variiert. Dieser Abschnitt dient in erster Linie dazu, eine gesicherte unterstromige Randbedingung an der Staustufe Bertoldsheim zu gewährleisten.

Die Stricklerwerte des Vorlands wurden gemäß dem Bericht zur Modellerstellung (Anlage 4.1) übernommen. Eine Variation der Vorlandrauheiten erfolgte nicht, da auf

Grund der geringen Fließgeschwindigkeiten im Vorland keine wesentlichen Auswirkungen auf die Wasserspiegel zu erwarten sind.

Als Ergebnis der Kalibrierung liegen die Rauheiten des Flussschlauchs der Donau vom oberstromigen Modellrand bis zur Lechmündung zwischen 35 und 37 $m^{1/3}/s$.

3.2 Hochwasserwelle 2013

Die Kalibrierung erfolgte anhand des Hochwassers von 2013. Die Ganglinie der Donau besteht aus einer Doppelwelle, wobei der erste Wellenscheitel höher war als der zweite (siehe Abbildung 1). Der Scheitelabfluss in Donauwörth betrug 986 m^3/s und liegt damit zwischen einem HQ₅ und einem HQ₁₀.

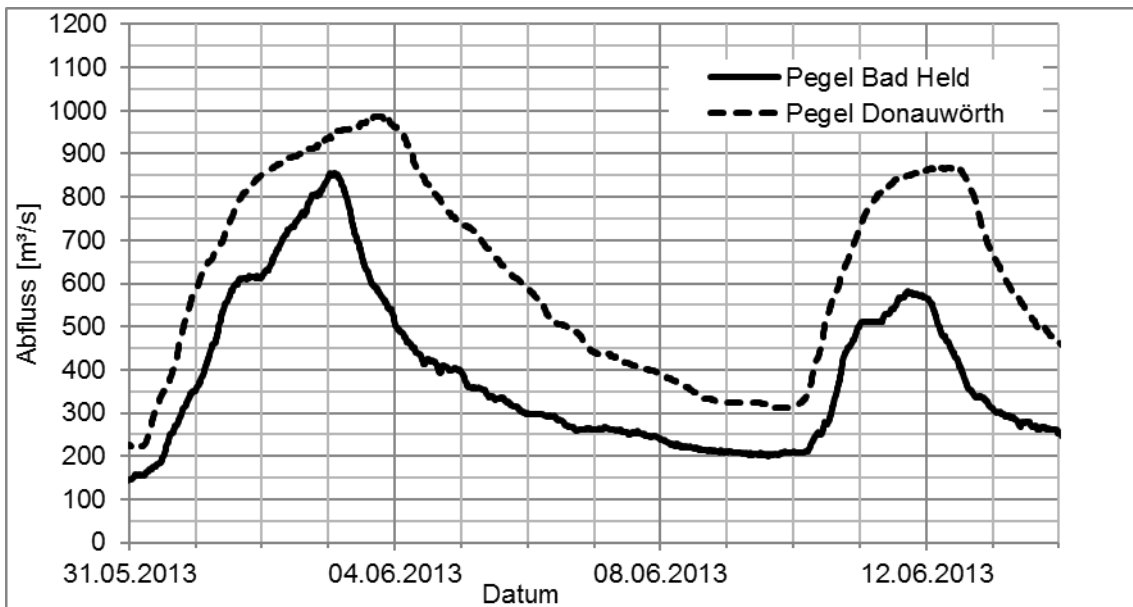


Abbildung 1: HQ₂₀₁₃ Donau, Pegel Bad Held und Pegel Donauwörth

3.3 Randbedingungen

Die wesentlichen Randbedingungen für die Kalibrierung sind die verwendeten Zuflussganglinien der Donau und ihrer Nebengewässer sowie die Steuerung der Staustufen Faimingen, Dillingen und Höchstädt, die bei Hochwasser einen Überstau fahren.

3.3.1 Zuflussganglinien

Die hydrologischen Daten wurden durch das Sachgebiet Hochwasservorhersage und Speicherbetrieb am WWA Kempten übergeben. Dies sind die Zuflussganglinien zur

Donau am oberstromigen Modellrand sowie die Ganglinien an den Zuflüssen zur Donau im Modellgebiet. Die Simulation beginnt am 31.05.2013 um 14:00 Uhr; Simulation sende ist am 15.06.2013 um 22:00 Uhr (siehe Abbildung 1).

3.3.2 Staustufensteuerung

Die Staustufen in der Donau, mit Ausnahme der Staustufe Faimingen, wurden mit der Randbedingung „H-Wehr (Steuerung)“ modelliert. Damit können gemäß Bescheid die Stauziele an den Staustufen über die gesamte Hochwasserwelle gehalten werden (siehe auch Anlage 4.1.3 zum Bericht *Modellkonzept*). Ebenso wird der Überstau der Staustufen Dillingen und Höchstädt berücksichtigt.

Die Staustufe Faimingen wurde mit der Randbedingung „H-Wehr (Zeit)“ simuliert. Die Steuerung der Staustufe erfolgte damit entsprechend der Pegelaufzeichnung für diesen Zeitraum. Diese Randbedingung wurde verwendet, um die zeitliche Entwicklung des Überstaus nachzubilden. Somit ist sichergestellt, dass die tatsächliche Überstausituation für die Kalibrierung korrekt abgebildet und nicht überschätzt wird.

3.4 Datengrundlagen – Dokumentation des Hochwasserereignisses

Das Hochwasserereignis vom Juni 2013 ist durch folgende Messungen dokumentiert:

- Aufzeichnungen des Wasserstandes und des Abflusses an den amtlichen Pegeln Günzburg, Dillingen und Donauwörth;
- Pegel Donauwörth: zusätzliche Abflussmessung während des Hochwasserereignis;
- Georeferenzierte Befliegungsfotos von Faimingen bis Donauwörth;
- Wasserspiegelfixierungen an der Donau (zweite Welle);
- Wasserspiegelfixierungen im Riedstrom (erste Welle).

3.5 Kalibrierung anhand amtlicher Pegel

3.5.1 Pegel Günzburg

Am Pegel Günzburg stimmen die berechneten und die über eine Wasserstandsmessung am Pegel und der vorhandenen Wasserstands-Abflussbeziehung (nachfolgend als W-Q-Beziehung bezeichnet) abgeleiteten Abflussganglinien sehr gut überein (siehe

Abbildung 2). Lediglich der berechnete Wellenscheitel der ersten Welle liegt über den gemessenen Werten.

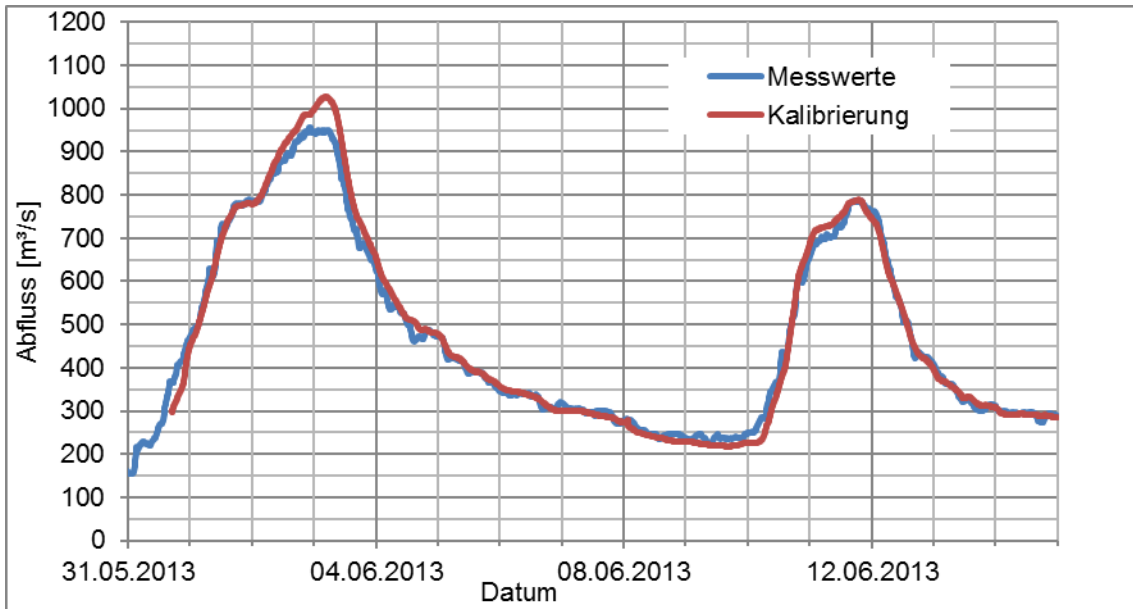


Abbildung 2: Abfluss am Pegel Günzburg beim Hochwasser 2013

Die berechneten Wasserstandsganglinien am Pegel Günzburg zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die Abweichungen betragen max. rd. 0,1 m (siehe Abbildung 3).

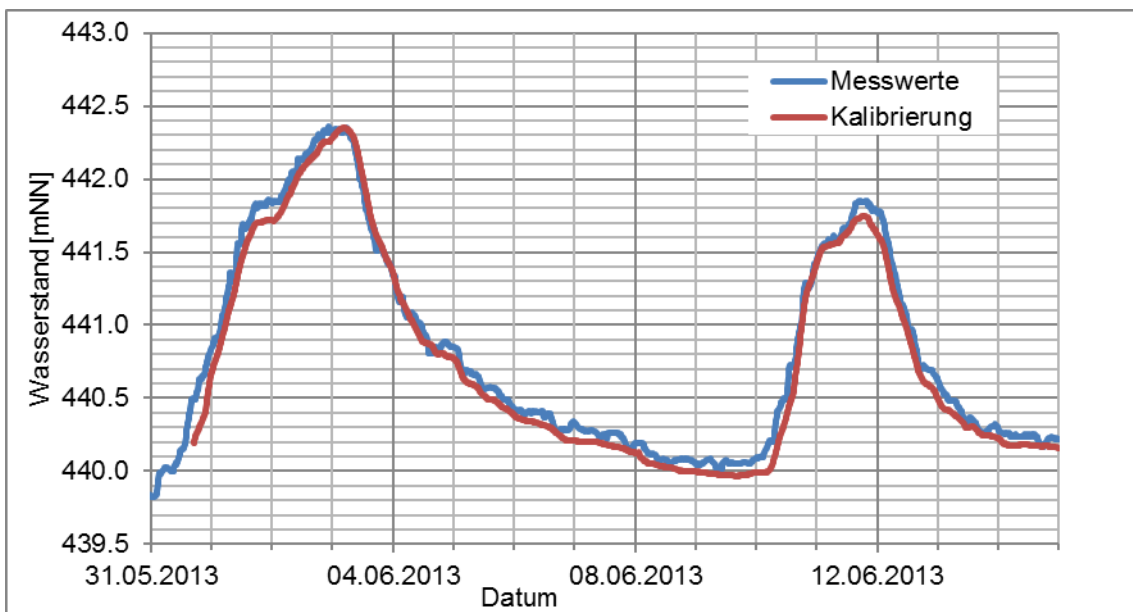


Abbildung 3: Wasserstand am Pegel Günzburg beim Hochwasser 2013

Die im Modell berechnete W-Q-Beziehung am Pegel Günzburg liegt ca. 0,1 m, bei größeren Abflüssen ca. 0,2 m unter der offiziellen W-Q-Beziehung des Pegels.

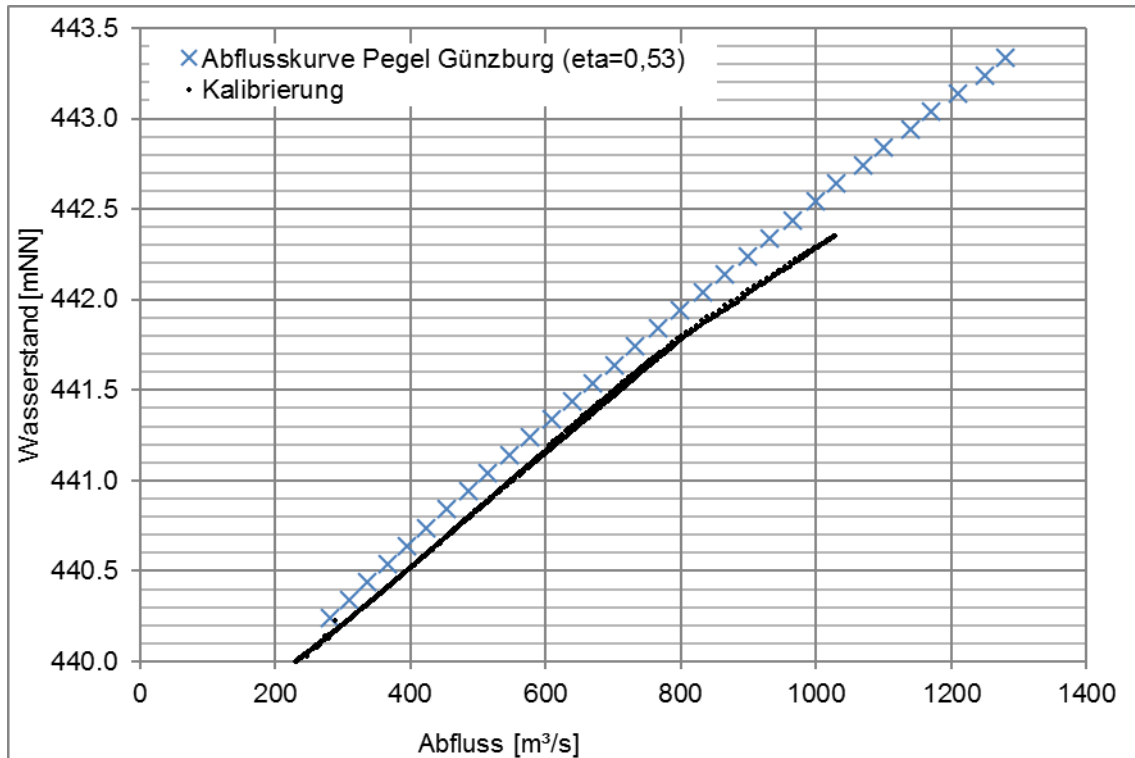


Abbildung 4: W-Q-Beziehung am Pegel Günzburg

3.5.2 Pegel Dillingen

Abbildung 5 zeigt die berechneten und gemessenen Abflussganglinien am Pegel Dillingen. Die Übereinstimmung kann als sehr gut bezeichnet werden.

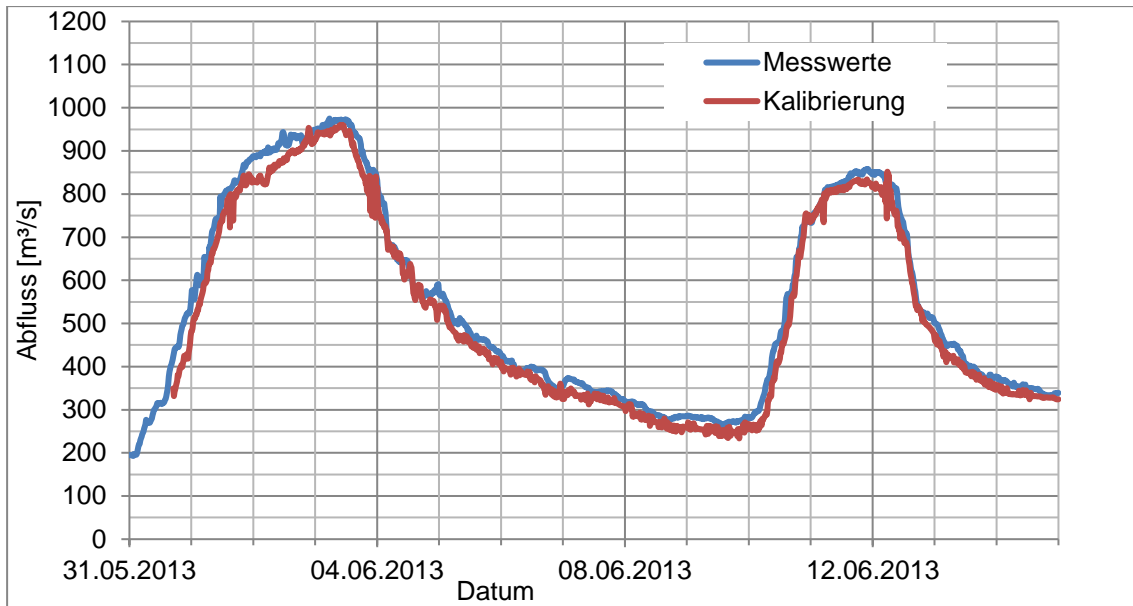


Abbildung 5: Abfluss am Pegel Dillingen beim Hochwasser 2013

Dies gilt analog für den Vergleich gemessener und berechneter Wasserspiegel, die in
Abbildung 6 eingetragen sind.

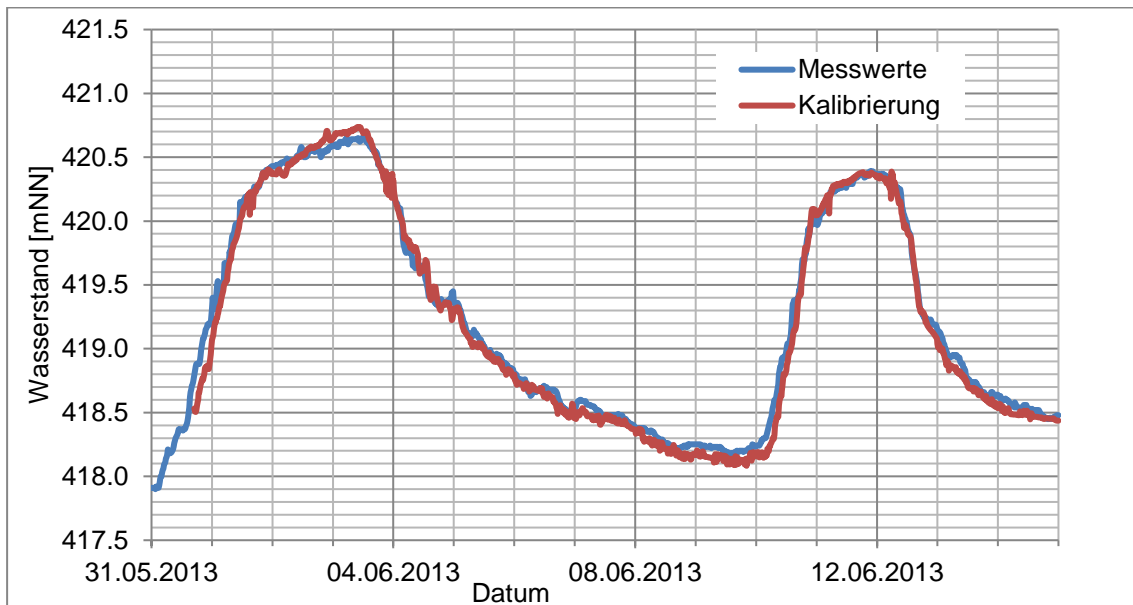


Abbildung 6: Wasserstand am Pegel Dillingen beim Hochwasser 2013

Folglich passt die W-Q-Beziehungen am Pegel Dillingen aus der Berechnung mit der
offiziellen W-Q-Beziehung sehr gut überein (siehe Abbildung 7).

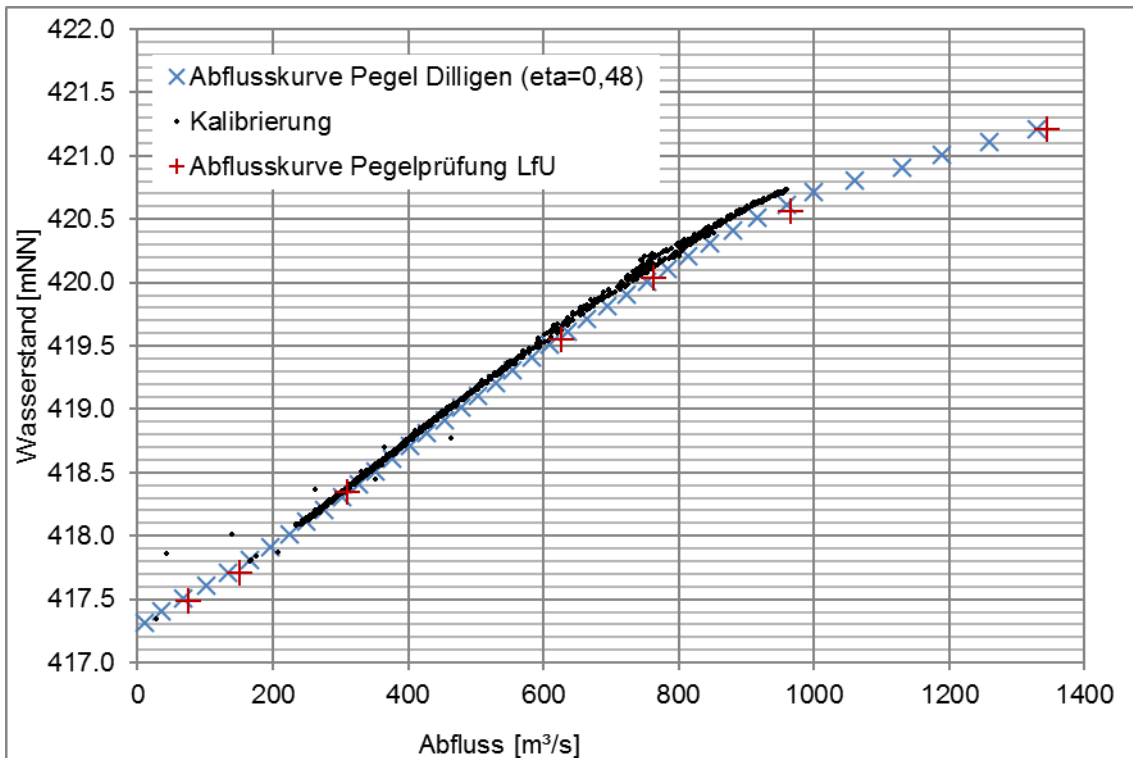


Abbildung 7: W-Q-Beziehung am Pegel Dillingen

Die sehr guten Übereinstimmungen an den Pegeln Günzburg und Dillingen belegen auch die sehr gute Qualität der durch das Sachgebiet Hochwasservorhersage und Speicherbetrieb am WWA Kempton übergebenen hydrologischen Daten.

3.5.3 Pegel Donauwörth

Am Pegel Donauwörth ist die berechnete erste Welle im Scheitel etwas breiter als die gemessene Welle. Die zweite Welle ist etwas schmaler und im Scheitel ca. 50 m³/s höher als die gemessene Welle.

In Anbetracht der Länge des Modells und des komplexen Einflusses des Riedstroms, der einen erheblichen Einfluss auf die Wellenverformung hat, kann trotz dieser Abweichungen von einer guten Übereinstimmung der Abflussganglinien am Pegel Donauwörth gesprochen werden.

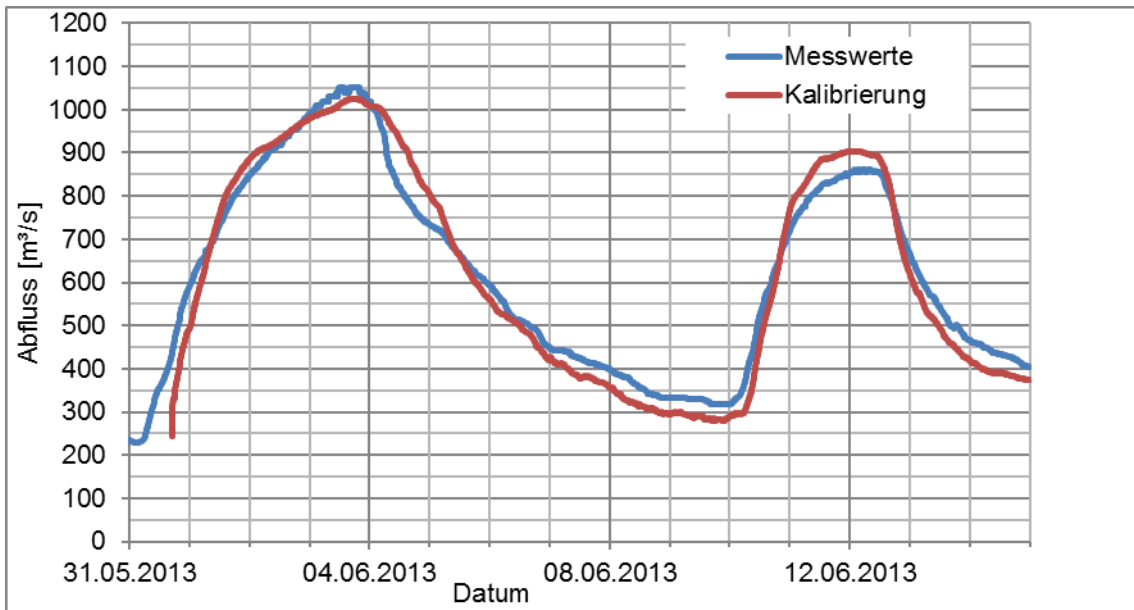


Abbildung 8: Abfluss am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 2013

Die Wasserstandsganglinie am Pegel kann bis auf ca. 0,2 m im Scheitel beider Wellen nachvollzogen werden. Angesichts möglicher Ungenauigkeiten bei der Abflussermittlung am Pegel stellt dies ebenfalls ein gutes Ergebnis dar.

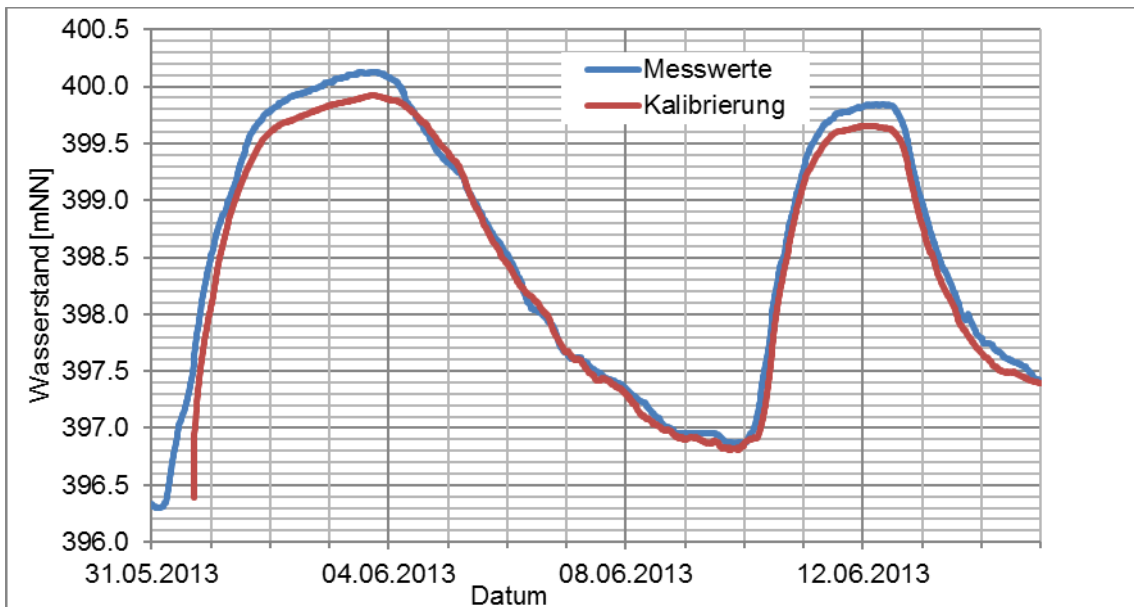


Abbildung 9: Wasserstand am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 2013

Die offizielle W-Q-Beziehung mit dem markanten Knick bei 800 m³/s kann insbesondere bei Abflüssen zwischen 700 und 1000 m³/s nur bedingt nachvollzogen werden (Abbildung 10). Der Verlauf der berechneten W-Q-Beziehung ist insgesamt flacher. Mit

einer weiteren Anpassung des Stricklerwertes kann eine Formänderung der Kurve nicht erreicht werden.

Zusätzlich kann in der berechneten W-Q-Beziehung eine Zunahme der Steigung zwischen ca. 800 und 850 m³/s beobachtet werden (siehe roter Pfeil in Abbildung 10). Dies widerspricht der Annahme einer abnehmenden Steigung bei stetiger Zunahme des Abflussquerschnittes. Der Anstieg erfolgt nur im ansteigenden Ast (beider Wellen) und muss folglich von unterstrom hervorgerufen werden. Möglicher Grund kann hier die Überstauregelung am Kraftwerk Bertoldsheim sein (Vorabsenkung um 0,3 m mit anschließendem Überstau von 0,5 m).

Der Messwert vom 03.06.2013 um 12:24 (siehe Abbildung 10) wird durch die berechnete W-Q-Beziehung in Abfluss und Höhe nicht ganz erreicht. Extrapoliert man die berechnete W-Q-Beziehung bis zum gemessenen Abfluss, so beträgt die Abweichung in der Höhe noch etwa 0,1 m.

Die Hochwasserabflussverhältnisse im Umfeld des Pegels Donauwörth können als sehr komplex eingestuft werden. Die Donau ist in dem Bereich durch viele Zuflüsse geprägt (Wörnitz, Zusam, Schmutter), die einen Einfluss auf den Pegel haben könnten. Zudem befindet sich die Donau im Abschnitt unterstrom der Staustufe Donauwörth in einem Eintiefungsprozess. Darüber hinaus besteht die begründete Vermutung der Beeinflussung des Pegels durch den Überstau an der Staustufe Bertoldsheim sowie durch den Rückstau durch den Lech.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts werden seitens des WWA Donauwörth Kontrollmessungen der W-Q-Beziehung am Pegel Donauwörth veranlasst.

Auf Grund der genannten Unsicherheiten erscheint es nicht sinnvoll, durch weitere Kalibrierung bzw. Modellanpassung eine bessere Anpassung der W-Q-Beziehungen am Pegel Donauwörth anzustreben. Die Ergebnisse des 2d-Modells erscheinen plausibel.

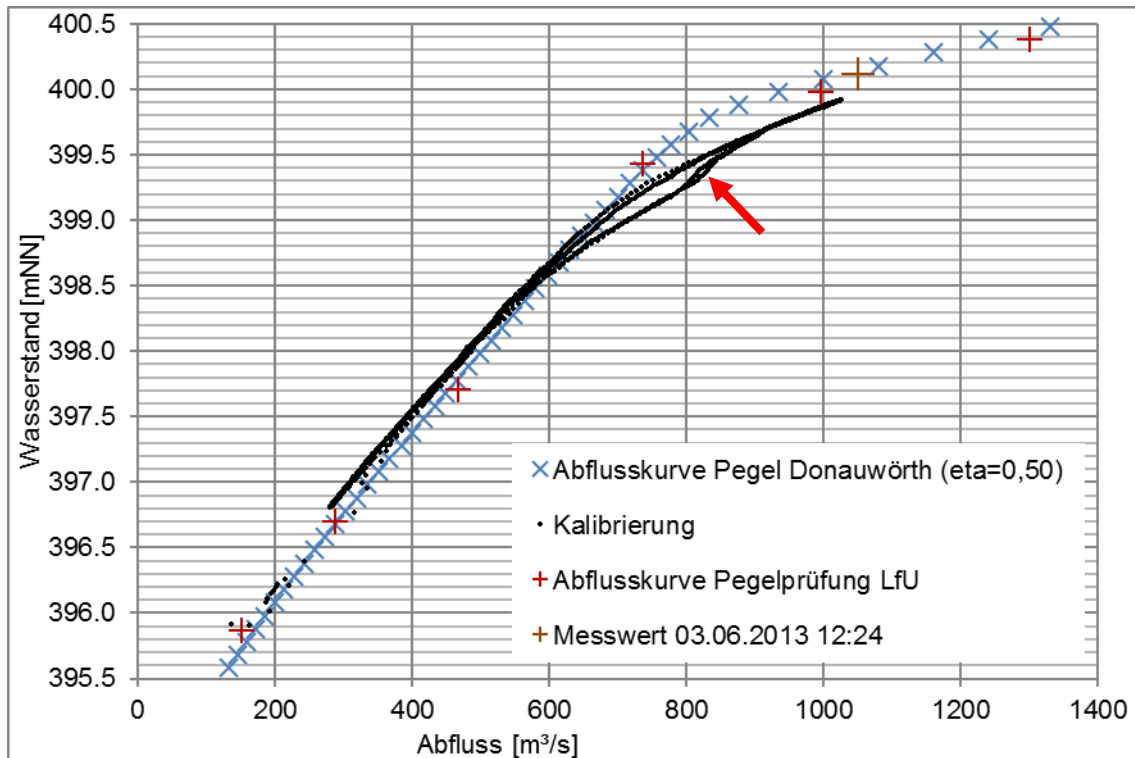


Abbildung 10: W-Q-Beziehung am Pegel Donauwörth

3.6 Kalibrierung anhand von Wasserspiegelfixierungen

Während des Hochwassers von 2013 wurden durch die Bayerischen Elektrizitätswerke BEW, die Eigentümer und Betreiber der Wasserkraftanlagen in diesem Donauabschnitt ist, Wasserspiegelfixierungen (mittels Pflockmarkierungen) im Riedstrom (während der ersten Welle) und in der Donau (während der zweiten Welle) durchgeführt.

3.6.1 Wasserspiegelfixierung Riedstrom (HW2013, erste Welle)

Während der ersten Welle erfolgte eine Wasserspiegelfixierung im Riedstrom. Die Standorte liegen rechtsseitig der Donau und reichen von Lauingen bis Steinheim (siehe Abbildung 11). Der Wasserspiegel wurde zu mehreren Zeitpunkten vermessen.

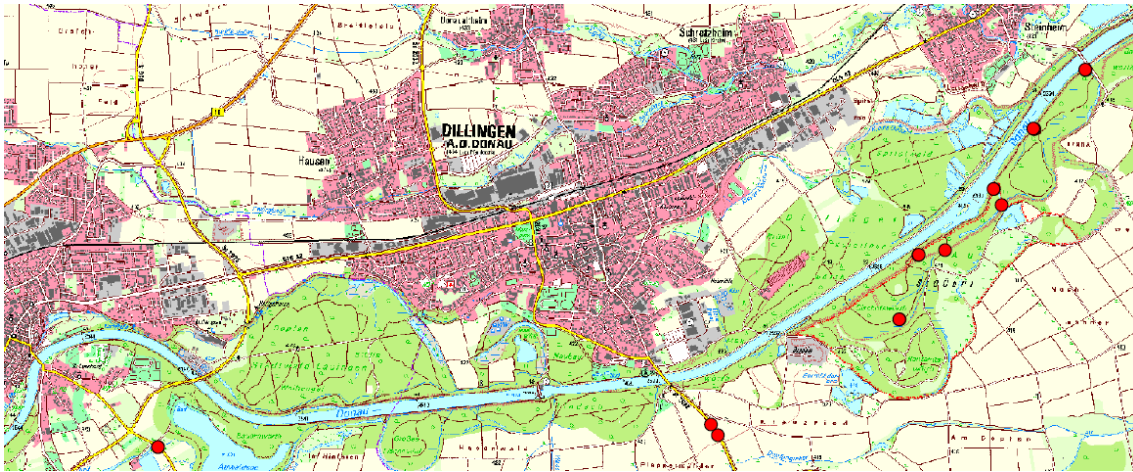


Abbildung 11: Standorte der Riedstromfixierung HW2013, erste Welle in rot

In Anlage 4.2.1 sind die Fixierungsstandorte mit Koordinaten und Aufnahmezeitpunkten aufgeführt. Daneben finden sich die berechneten Wasserspiegel und die Abweichungen zum Fixierungswert. 11 der 15 Fixierungswerte weisen Differenzen zwischen 0 und 0,2 m auf. Lediglich vier der 15 Messwerte weisen eine Differenz zwischen 0,3 und 0,4 m auf.

Für diese Riedflächen, die durch Füll- und Entleerungsvorgänge sowie verzweigte Strömungsvorgänge geprägt sind und schon kleine zeitliche Abweichungen in den Ganglinien (auch Ungenauigkeiten in den Zuflussganglinien können hier eine Rolle spielen) zu Unterschieden im Wasserspiegel führen können, ist dies ein sehr gutes Kalibrierungsergebnis.

3.6.2 Wasserspiegelfixierung Donau (HW2013, zweite Welle)

Während der zweiten Welle wurde eine Wasserspiegelfixierung an der Donau zwischen Fkm 2578 (Beginn Stauhaltung Oberelchingen) und Fkm 2508 (Brücke B2 Donauwörth) durchgeführt. Insgesamt liegen 38 Messpunkte vor. Über diese Strecke liegen die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung bis auf wenige Ausnahmen innerhalb von +/- 0,2 m (siehe Anlage 4.2.2). Über die Hälfte der Werte liegt sogar in einem Bereich von +/- 0,1 m. Der Mittelwert der Absolutwerte der Abweichungen liegt deutlich unter 0,1 m.

Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung werden als gering bewertet.

3.7 Kalibrierung anhand des Überschwemmungsgebietes

Am 03.06.2013, etwa zwischen 15:00 und 17:00 Uhr, wurde während der ersten Hochwasserwelle eine Befliegung der überschwemmten Flächen durchgeführt. Das Gebiet wurde von Helmeringen bis östlich von Donauwörth befliegen. Hauptaugenmerk lag hierbei auf dem Riedstrom. Die dabei entstandenen Fotos wurden technisch aufbereitet, d.h. georeferenziert und so verzerrt, dass diese wie Orthofotos die Überschwemmungen in der Ebene flächig darstellen. Damit ist es möglich, die aufgetretenen Überschwemmungen mit dem berechneten direkt zu vergleichen und für die Kalibrierung zu verwenden.

Die Nachrechnung des Hochwasserereignisses zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der durch die Fotos dokumentierten mit den berechneten Überschwemmungsflächen (siehe dazu die Anlagen 4.2.3, 4.2.4 und 4.2.5). Die großräumige Überschwemmungsfläche des Riedstroms wird sehr gut abgebildet. Teilweise werden sogar kleinräumige Strukturen detailreich durch die berechneten Überschwemmungen abgebildet und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Überflutungsflächen.

Auf Grundlage dieses Ergebnisses ist davon auszugehen, dass der für den Hochwasserabfluss so bedeutende Riedstrom und die zugehörigen Überströmbereiche oberstrom der Stauhaltungen im Modell sehr gut abgebildet werden und die Retentionswirkung des Riedstroms auf den Hochwasserabfluss entsprechend berücksichtigt wird.

3.8 Fazit der Kalibrierung

Mit den kalibrierten Rauheitsbeiwerten nach Strickler wird für das dokumentierte Hochwasserereignis vom Juni 2013 eine in Summe sehr gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung erreicht. Dies gilt sowohl für den Flussschlauch der Donau als auch für den Riedstrom.

Die eingestellten Stricklerwerte im Flussschlauch liegen in einem engen Band zwischen 35 und 37 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ und damit in einem auch physikalisch sinnvollen Bereich.

4 Validierung

4.1 Vorgehensweise

Die Validierung erfolgte mit Hilfe des dokumentierten Hochwasserereignisses vom Mai 1999 (Vatertags- und Pfingsthochwasser). Dieses Ereignis wurde mit dem kalibrierten Modell nachgerechnet.

4.2 Hochwasserwelle 1999

Wie das Hochwasser 2013 ist das Hochwasserereignis 1999 durch eine Doppelwelle charakterisiert. Der Scheitelabfluss der zweiten Welle ist hier aber deutlich höher (siehe Abbildung 12). Der Scheitelabfluss am Pegel Donauwörth betrug $1.060 \text{ m}^3/\text{s}$ und liegt damit zwischen einem HQ_{10} und einem HQ_{20} .

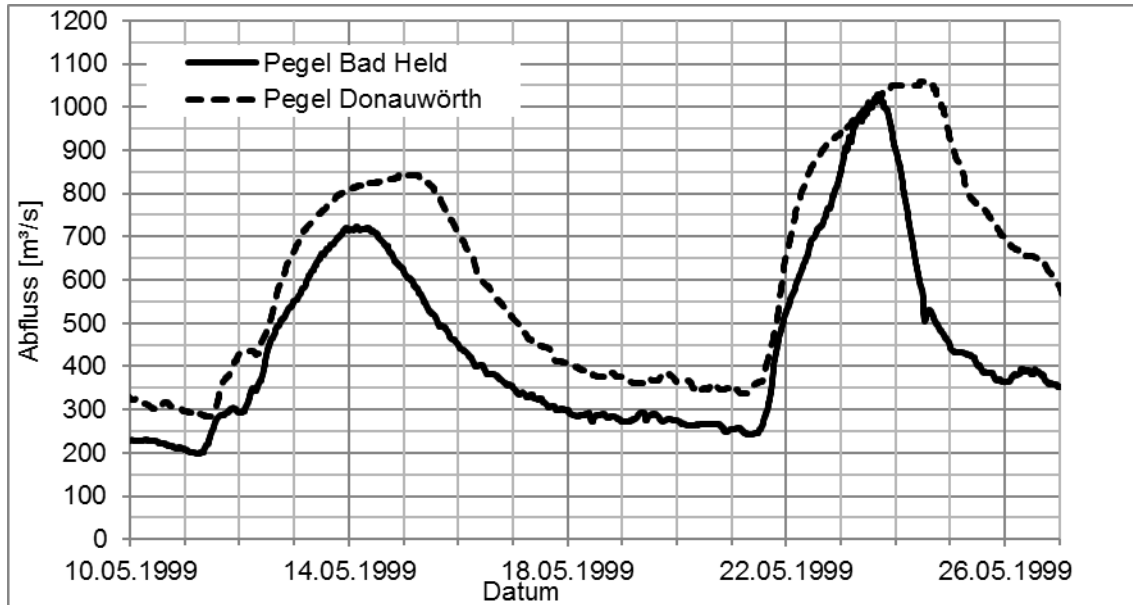


Abbildung 12: HQ_{1999} Donau, Pegel Bad Held und Pegel Donauwörth

4.3 Randbedingungen

Die wesentlichen Randbedingungen für die Validierung sind die verwendeten Zuflussganglinien der Donau und ihrer Nebengewässer für das Hochwasserereignis 1999 sowie die Steuerung der Staustufen Faimingen, Dillingen und Höchstädt, die bei Hochwasser einen Überstau fahren.

4.3.1 Zuflussganglinien

Die hydrologischen Daten wurden durch das Sachgebiet Hochwasservorhersage und Speicherbetrieb am WWA Kempten übergeben. Dies sind die Zuflussganglinie zur Donau am oberstromigen Modellrand sowie die Ganglinien an den Zuflüssen zur Donau im Modellgebiet. Simulationsbeginn ist am 11.05.1999 um 07:00 Uhr; Simulationseende ist am 26.05.1999 um 12:00 Uhr.

4.3.2 Staustufensteuerung

Die Staustufen in der Donau wurden mit der Randbedingung „H-Wehr (Steuerung)“ modelliert. Damit können die bescheidsgemäßen Stauziele an den Staustufen über die gesamte Hochwasserwelle gehalten werden (siehe auch Anlage 4.1.3 zum Bericht *Modellkonzept*).

Die drei Staustufen, Faimingen, Dillingen und Höchstädt wurden zeitweise mit der Randbedingung „H-Wehr (Zeit)“ modelliert, um die zeitlichen Entwicklungen des Überstaus abzubilden.

4.4 Datengrundlagen

Für die Validierung liegen folgende Messwerte und Aufzeichnungen zum Hochwasser 1999 vor:

- Aufzeichnungen des Wasserstandes und des Abflusses an den amtlichen Pegeln Günzburg, Dillingen und Donauwörth
- Wasserspiegelfixierung an der Donau

4.5 Validierung anhand amtlicher Pegel

4.5.1 Pegel Günzburg

Am Pegel Günzburg stimmen gemessene und berechnete Abflüsse sehr gut überein. Wie schon bei der Kalibrierung zeigt sich, dass lediglich bei den größeren Abflüssen, hier während der zweiten Welle, die berechneten Abflüsse über den gemessenen liegen.

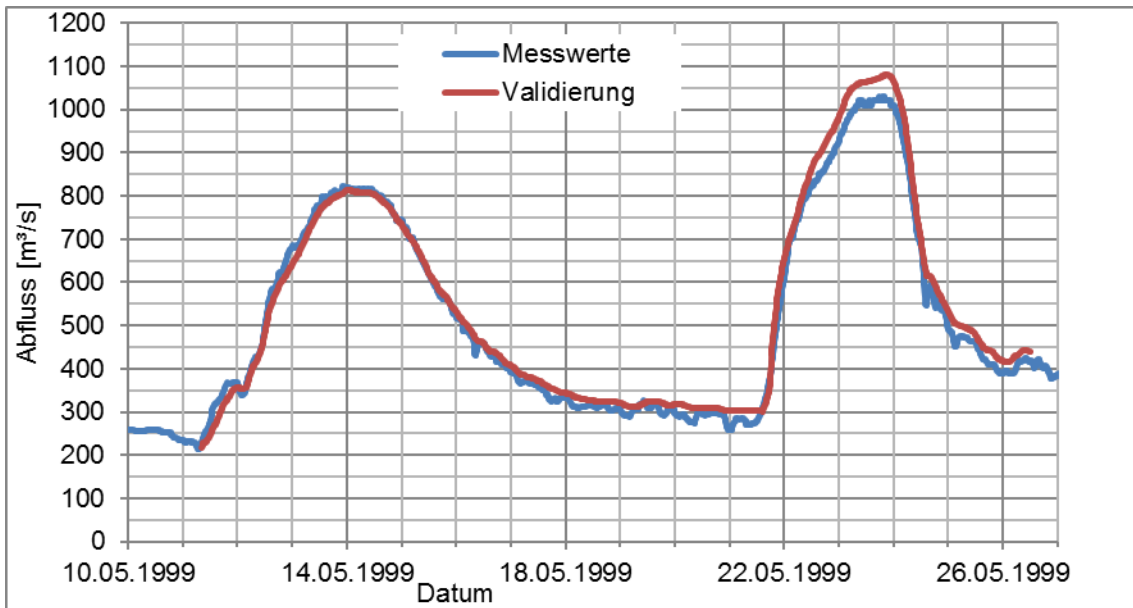


Abbildung 13: Abfluss am Pegel Günzburg beim Hochwasser 1999

Die Wasserstände am Pegel Günzburg konnten bis auf wenige Zentimeter nachvollzogen werden. Die Validierung bestätigt damit die guten Ergebnisse aus der Kalibrierung für den Pegel Günzburg.

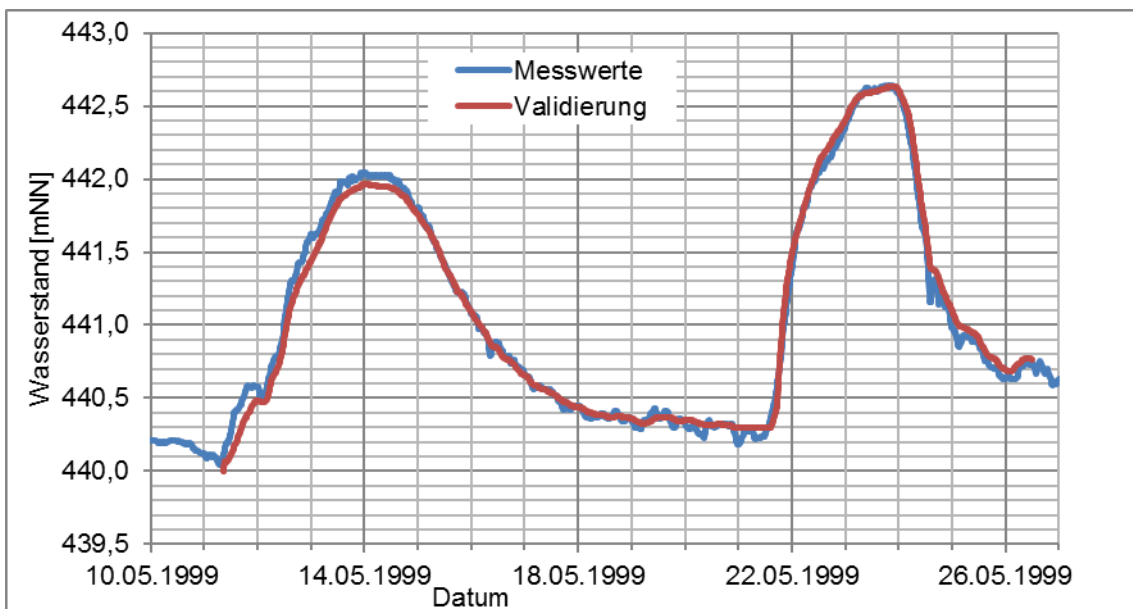


Abbildung 14: Wasserstand am Pegel Günzburg beim Hochwasser 1999

4.5.2 Pegel Dillingen

Die berechnete Abflussganglinie am Pegel Dillingen stimmt sehr gut mit der gemessenen Ganglinie überein. Die größte Abweichung tritt zum ersten Wellenscheitel auf und beträgt ca. 40 m³/s, dies entspricht etwa 5% des gemessenen Abflusses.

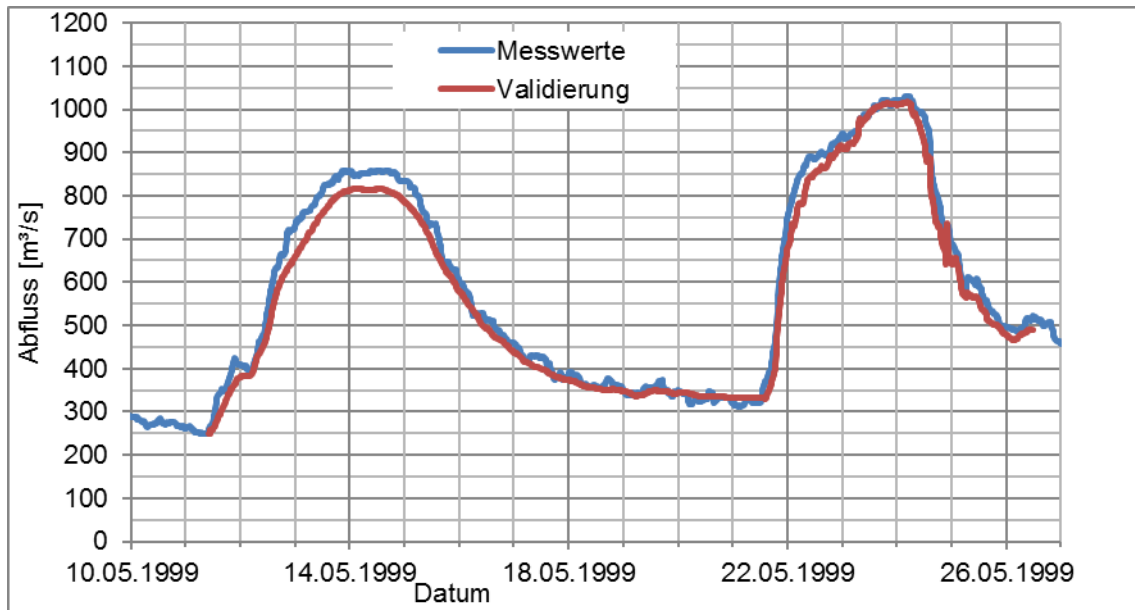


Abbildung 15: Abfluss am Pegel Dillingen beim Hochwasser 1999

Der gemessene Wasserstand kann mit den Berechnungsergebnissen ebenfalls gut nachvollzogen werden. Im fallenden Ast der ersten Hochwasserwelle liegen die berechneten Werte im oberen Bereich der gemessenen Wasserstände. Auch hier kann mit der Validierung das Kalibrierergebnis bestätigt werden.

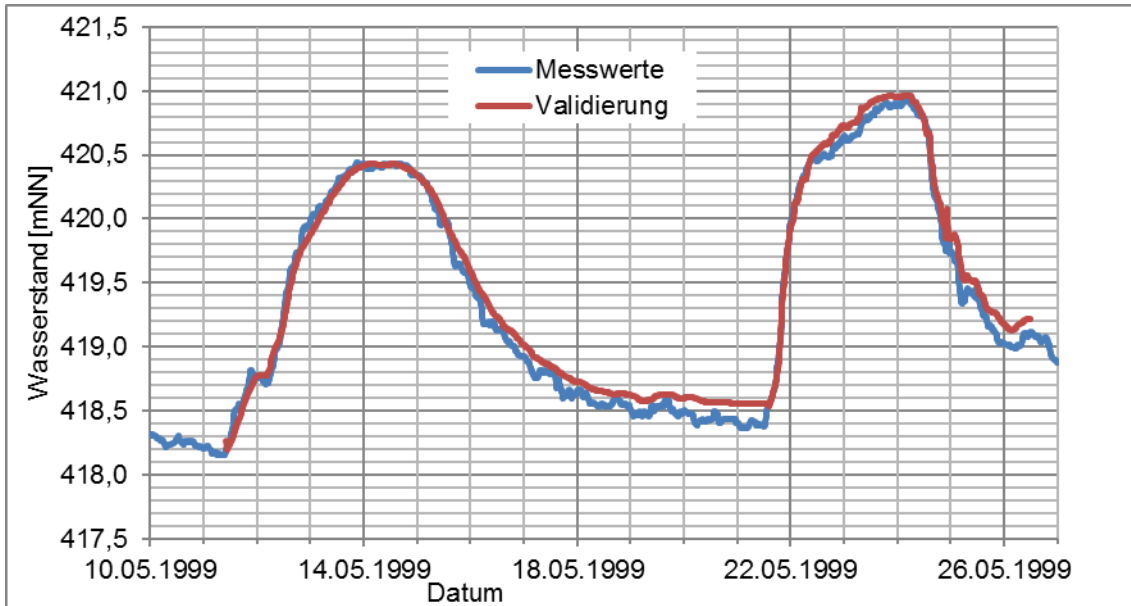


Abbildung 16: Wasserstand am Pegel Dillingen beim Hochwasser 1999

4.5.3 Pegel Donauwörth

Die Abflüsse am Pegel Donauwörth können für das Validierereignis sehr gut nachvollzogen werden. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung liegen im Scheitel bei max. 5 m³/s und sind somit gering (siehe Abbildung 17).

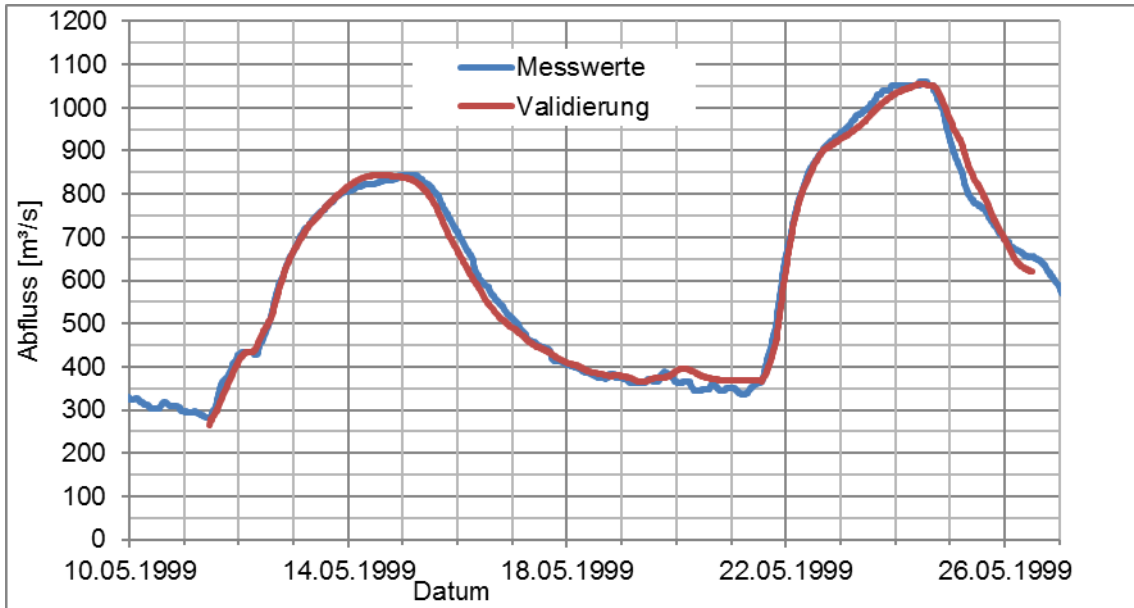


Abbildung 17: Abfluss am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 1999

Wie schon in der Kalibrierung ergeben sich zwischen gemessenen und berechneten Wasserständen am Pegel Donauwörth Abweichungen im Bereich der Wellenscheitel. Bei der ersten Welle liegt die Abweichung bei ca. 0,2 m, bei der zweiten Welle bei ca. 0,3 m (nähere Erläuterungen siehe auch Punkt 3.5.3).

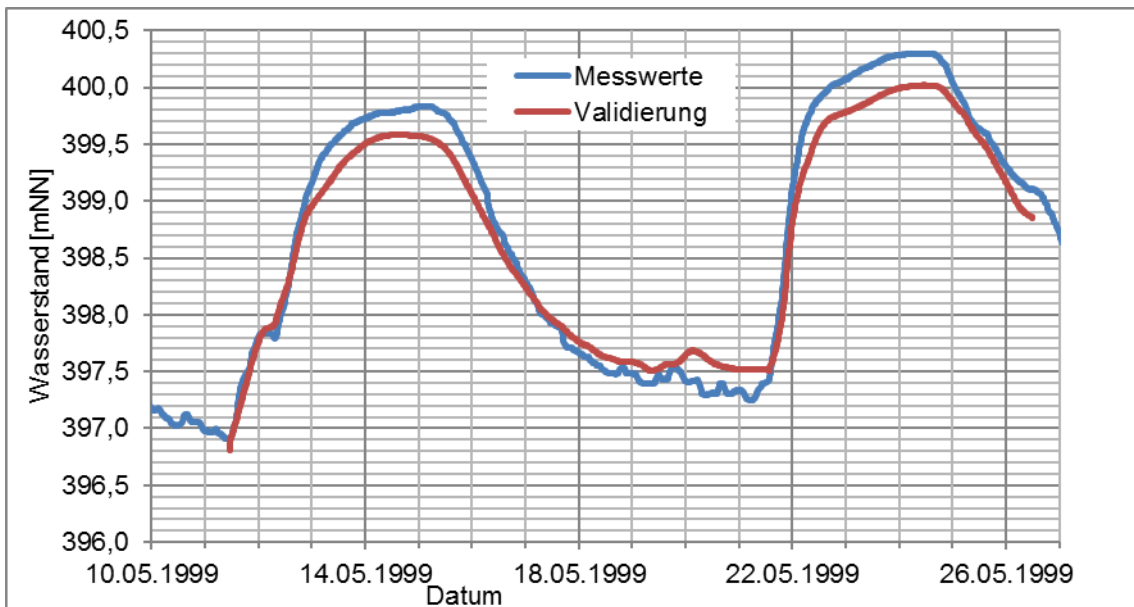


Abbildung 18: Wasserstand am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 1999

4.6 Validierung anhand von Wasserspiegelfixierungen

Für das HW1999 liegt eine Wasserspiegelfixierung an der Donau zwischen Fkm 2574,8 (Brücke A7, Unterelchingen) und Fkm 2509,0 (Donauwörth Mündung Flutmulde Nord) vor. Insgesamt handelt es sich um 92 Messwerte.

Eine Längsschnittdarstellung der Fixierungswerte, der berechneten Werte und der Differenzen befindet sich in Anlage 4.2.6.

Die Differenz von Messung und Rechnung liegt an den meisten Messpunkten in einem Band zwischen $\pm 0,3$ m. Nur an einzelnen Messpunkten treten Abweichungen um bis zu 0,5 m auf. Der Mittelwert der Absolutwerte der Abweichungen beträgt lediglich 13 cm. Für eine Validierung ist dies ein sehr gutes Ergebnis.

4.7 Fazit der Validierung

Mit den kalibrierten Rauheitsbeiwerten nach Strickler wird für das gut dokumentierte Hochwasserereignis vom Mai 1999 eine in Summe gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung erreicht. Dies gilt sowohl für die Abfluss- und Wasserstandsganglinien an den Pegeln Günzburg, Dillingen und Donauwörth als auch den Flussschlauch der Donau. Für den Riedstrom liegen keine Messwerte vor.

5 Sensitivitätsanalyse

5.1 Vorgehensweise

Rechenläufe V1 und V2:

Für die Sensitivitätsanalyse wurde der Stricklerwert der Donau vom oberstromigen Modellrand bis zur Mündung des Lechs um $2 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erhöht bzw. reduziert. Auf eine Anpassung der Vorlandrauheiten wurde verzichtet, da die Fließgeschwindigkeiten in den Vorländern, insbesondere dem Riedstrom unter $0,3 \text{ m/s}$ liegen und damit bei Variation der Rauheitsbeiwerte keine wesentlichen Unterschiede in den Wasserständen im Vorland zu erwarten sind.

Rechenlauf V3:

Um den Einfluss des Staubereichs der Staustufe Bertoldsheim zu untersuchen, wurde ein weiterer Rechenlauf durchgeführt, in dem der Stricklerwert der Donau vom oberstromigen Modellrand bis zur Lechmündung um $2 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erhöht und der Stricklerwert unterstrom der Lechmündung auf konstant $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gesetzt wurde.

Die Modellrechnungen erfolgten mit dem Hochwasserereignis 2013, das auch für die Kalibrierung verwendet wurde.

5.2 Ergebnis

Das Ergebnis der drei Rechenläufe der Sensitivitätsanalyse ist im Längsschnitt mit den jeweils maximalen Wasserspiegeln in Anlage 4.2.7 dargestellt.

Rechenläufe V1 und V2:

Die Differenzendarstellung in Anlage 4.2.7 zeigt, wie die Differenzen zu den Staustufen hin abnehmen. Die Rauheitswirkung ist proportional zum Quadrat der Fließgeschwindigkeit. Zu den Staustufen hin (von oberstrom her kommend), nimmt die Fließgeschwindigkeit und damit der Einfluss einer veränderten Sohlrauheit auf die berechneten Wasserspiegel ab.

Insgesamt kann der Einfluss der Sohlrauheit als gering bezeichnet werden. Die maximale Abweichung bei einer Variation des Stricklerwertes um $\pm 2^{1/3}/s$ beträgt ca. 0,2 m. Der Mittelwert der Absolutwerte der Abweichungen beträgt deutlich unter 0,1 m.

Im Bereich des Pegels Donauwörth bei Fkm 2508,1 treten quasi keine Abweichungen durch die veränderten Stricklerwerte auf. Dies zeigt auch, dass die in Kapitel 3.5.3 aufgezeigten Abweichungen am Pegel Donauwörth zwischen Messung und Berechnung durch eine Anpassung des Stricklerwertes nicht ausgeglichen werden können, sondern auf die genannten Einflussfaktoren zurückzuführen sind.

Rechenlauf V3:

Die Berechnung mit um $2\text{ m}^{1/3}/s$ erhöhtem Stricklerwert und Strickerwert von $35\text{ m}^{1/3}/s$ von der Lechmündung bis zum Stauraum Bertoldsheim zeigt nur geringfügige Auswirkungen von wenigen Zentimetern von Fkm 2501 bis zur Staustufe Bertoldsheim.

6 Abschließende Bewertung

Durch die Kalibrierung des Modells wird für das Hochwasserereignis 2013 eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erreicht. Dies gilt sowohl für die drei amtlichen Pegel, den Wasserstand/Geschwemmsellinien in der Donau als auch die flächige Ausbildung des Riedstroms. Lediglich der Vergleich der Daten für den Pegel Donauwörth zeigt gewisse Unterschiede auf. Dies wird aber auf die eher ungünstigen Randbedingungen am Pegel Donauwörth zurückgeführt.

Die Validierung des Modells mit dem Hochwasserereignis 1999 bestätigt die sehr gute Qualität des Modells. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung können als gering eingestuft werden.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt den relativ geringen Einfluss des Stricklerbeiwertes auf die berechneten Wasserspiegel in der Donau.

Insgesamt kann das Modell somit als prognosefähig eingestuft werden. Mit dem Modell steht ein geeignetes Werkzeug zur Untersuchung der Auswirkungen der sieben Rückhalteräumen zur Verfügung.

Abbildungsverzeichnis:

- Abbildung 1: HQ₂₀₁₃ Donau, Pegel Bad Held und Pegel Donauwörth
- Abbildung 2: Aufzeichnung Oberwasserpegel Staustufe Faimingen HW2013
- Abbildung 3: Abfluss am Pegel Günzburg beim Hochwasser 2013
- Abbildung 4: Wasserstand am Pegel Günzburg beim Hochwasser 2013
- Abbildung 5: W-Q-Beziehung am Pegel Günzburg
- Abbildung 6: Abfluss am Pegel Dillingen beim Hochwasser 2013
- Abbildung 7: Wasserstand am Pegel Dillingen beim Hochwasser 2013
- Abbildung 8: W-Q-Beziehung am Pegel Dillingen
- Abbildung 9: Abfluss am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 2013
- Abbildung 10: Wasserstand am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 2013
- Abbildung 11: W-Q-Beziehung am Pegel Donauwörth
- Abbildung 12: Standorte der Riedstromfixierung HW2013, erste Welle in rot
- Abbildung 13: HQ₁₉₉₉ Donau, Pegel Bad Held und Pegel Donauwörth
- Abbildung 14: Überstau in den Staustufen Faimingen, Dillingen und Höchstädt während der zweiten Welle des HW1999
- Abbildung 15: Abfluss am Pegel Günzburg beim Hochwasser 1999
- Abbildung 16: Wasserstand am Pegel Günzburg beim Hochwasser 1999
- Abbildung 17: Abfluss am Pegel Dillingen beim Hochwasser 1999
- Abbildung 18: Wasserstand am Pegel Dillingen beim Hochwasser 1999
- Abbildung 19: Abfluss am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 1999
- Abbildung 20: Wasserstand am Pegel Donauwörth beim Hochwasser 1999

Tabellenverzeichnis:

- Tabelle 1: Berechnungsparameter Hydro_As-2d