

Ein Seminar der



Hydrologische Wissenschaften
Fachgemeinschaft in der DWA

Hochschule Bochum
Bochum University
of Applied Sciences



Tagungsband

1.
B
H
K
2017

1. Bochumer Hydrometrie-Kolloquium

16. Februar 2017 · Hochschule Bochum

messen · bewerten · planen

Inhaltsverzeichnis

Hydrometrie 2017 – quo vadis? Neuere Entwicklungen im hydrologischen Messwesen	2
Darstellung und Kommunikation hydrometrischer Messgrößen - Daten oder Entscheidungshilfe?	9
Datenbearbeitung von Ultraschallanlagen	13
Erneuerung der Stauhöhenerfassung an der Hennetalsperre	18
Wem sollen wir glauben? Ein Wegweiser zum „wahren“ Wasserstand	24
Systematische Vergleiche von Abflussmessungen – Optimierungsansätze durch Kombinationsmöglichkeiten	29
Überprüfung der Extremwerte von Pegelschlüsselkurven mit 2D-Simulation	34
Die Verwendung von diskretisierten Abflussreihen für die statistische Ermittlung von Hochwasserwerten	38
Verbesserte Messdaten-Validierung durch Benutzerinteraktion in Kombination mit modernen Validierungsverfahren und Modellunterstützung	44

Hydrometrie 2017 – quo vadis?

Neuere Entwicklungen im hydrologischen Messwesen

Gerd Morgenschweis¹

¹Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet “Wasserwirtschaft und Wasserbau“, morgenschweis@uni-wuppertal.de

Einführung

Die von Klimaforschern prognostizierte Häufung von extremen Wetterlagen dürfte die Wasserwirtschaft sowohl in Niedrigwasser- als auch Hochwasserzeiten vor Herausforderungen bisher nicht bekannter Größenordnung stellen. Um bei aktuellen Ereignissen schnelle und fachgerechte Entscheidungen treffen zu können, bedarf es zuverlässiger und zeitnaher Informationen über Wasserstände und Durchflüsse in kleinen und großen Flusseinzugsgebieten. Da ist es durchaus verantwortungsbewusst die bestehenden gewässerkundlichen Messsysteme einer kritischen Überprüfung zu unterwerfen und neue Entwicklungen aufzuzeigen.

In Tab. 1 sind sowohl die altbewährten als auch die neu entwickelten Messverfahren zur kontinuierlichen Durchflusserfassung zusammengestellt.

Tab. 1: Überblick über Methoden der kontinuierlichen Durchflussmessung (aus: Morgenschweis, 2017)

1. Durchflussmessbauwerke (Wehre, Messgerinne, Messschwellen)
2. Wasserstand-Durchfluss-Beziehungen (W-Q)
3. Ultraschall-Laufzeitverfahren
4. Ultraschall-Dopplerverfahren
5. Magnetisch-induktive Methode
6. Messung des Wasserspiegelgefälles
7. Visuelle Durchflussmessung mit aufsteigenden Luftblasen
8. *Messung der Oberflächengeschwindigkeit*
 - *Radar-Dopplerverfahren*
 - *optische kamerabasierte Systeme*
9. Durchflusserfassung an Stauwehren und Schleusen
10. *Hybride Durchflusserfassung*

Eine kritische Durchsicht von Tab. 1 zeigt, dass darunter eine Reihe von altbekannten Verfahren sind, die sich in langjähriger Messpraxis bewährt, aber auch ihre Grenzen bzw. Defizite aufgezeigt haben, wie z.B. das W-Q-Verfahren oder die beiden Verfahren der Geschwindigkeitsmessung mit Ultraschall. Hinzugekommen sind mit der Oberflächengeschwindigkeitsmessung mittels Radar und optischen kamerabasierten Systemen zwei neue Verfahren sowie die smarte Kombination verschiedener unterschiedlicher Messmethoden bei der „hybriden Durchflusserfassung“. Diesen „neueren“ Entwicklungen, die in Tab. 1 kursiv hervorgehoben sind, sollen sich die folgenden Ausführungen widmen.

Neuere Entwicklungen der kontinuierlichen Durchflusserfassung

Bei der überwiegenden Anzahl der in Tab. 1 aufgeführten Verfahren kommen unter Wasser eingebaute Messgeräte zum Einsatz. Diese Verfahren sind per se bei Extremereignissen anfällig; sei es, dass sie bei extremem Niedrigwasserabfluss trockenfallen, sei es, dass sie bei Extremhochwasserereignissen nur einen Teil des Gewässerquerschnitts erfassen und zudem bei Unstimmigkeiten oder Ausfällen schwer zugänglich sind. Hier kommen die berührungslos arbeitenden Systeme, bei denen die Messgeräte oberhalb des höchsten Wasserspiegels, z.B. unter einer Brücke, installiert sind, zum Einsatz.

Werden solche Messsysteme intelligent kombiniert mit anderen z.B. insbesondere für Messungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich geeignete Verfahren aus Tab. 1, so handelt es sich um hybride Messsysteme, die im 2. Unterkapitel vorgestellt werden.

Kontinuierliche Messung der Oberflächengeschwindigkeit eines Gewässers

Im Gegensatz zu den kontinuierlichen Durchflussmessverfahren, bei denen versucht wird, die Geschwindigkeitsverteilung in einem Messquerschnitt so detailliert wie möglich zu erfassen, wird bei diesem Verfahren gezielt nur die Geschwindigkeit eines kleinen Ausschnitts des Querschnitts eines Gewässers, in diesem Fall die Oberflächengeschwindigkeit, messtechnisch erfasst. Aus dieser eingeschränkten Information wird dann mit Hilfe modellmäßiger Vorstellungen auf den Gesamtquerschnitt hochgerechnet. Im Prinzip ist dies die gleiche Vorgehensweise wie bei einer Einebenenanlage beim Ultraschall-Laufzeitverfahren oder beim Einsatz eines Horizontal-ADCP bei den Ultraschall-Dopplerverfahren.

Diese Vorgehensweise basiert auf dem Grundgedanken, dass sich die Geschwindigkeitsverteilung im Fließquerschnitt eines frei fließenden Gewässers an der Gewässeroberfläche widerspiegelt; so weicht die Oberflächengeschwindigkeit im Normalfall selten mehr als 10 % von der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit ab. Daher kann die Oberflächengeschwindigkeit, wenn bestimmte Randbedingungen an einer Messstelle eingehalten werden, ein geeigneter Index für die Durchflusserfassung in einem Freispiegelgerinne sein.

Unabhängig davon ist grundsätzlich zu beachten, dass bei allen Verfahren, die lediglich die Oberflächengeschwindigkeit erfassen, der Einfluss von Wind auf die Oberflächen-Fließgeschwindigkeit der Gewässer beachtet und mit geeigneten Verfahren eliminiert werden muss.

Zur messtechnischen Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit bieten sich aktuell 2 physikalisch grundlegend unterschiedliche Messverfahren an:

- Messung der Fließgeschwindigkeit mit Radar nach dem Doppler-Prinzip (Abschnitt a) und
- Messung der Fließgeschwindigkeit mit kamerabasierten optischen Systemen (Abschnitt b).

a) Messung der Oberflächengeschwindigkeit mit Radar

Radar, richtiger Mikrowellen-Radar, wird schon lange zur Wasserstandsmessung eingesetzt; im Prinzip wird dabei die Laufzeit elektromagnetischer Wellen erfasst. Mit Hilfe von Radarsensoren lassen sich jedoch auch Geschwindigkeiten messen. Dabei wird die durch den Doppler-Effekt bewirkte Veränderung der Echofrequenz (Doppler-Verschiebung) genutzt. In Abbildung 1 wird dies dadurch verdeutlicht, dass die ausgesendeten (λ) und die reflektierten (λ') Wellenlängen unterschiedlich dargestellt sind. In diesem Fall wird die Frequenzverschiebung beim Reflektieren der elektromagnetischen Wellen an der Wasseroberfläche, die sich in Bezug auf Sender und Empfänger bewegt, erzeugt. Auf Grund des Vergleichs der abgestrahlten Frequenz f_1 mit der durch die Wasseroberfläche reflektierten Frequenz f_2 können dann die lokalen Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden. Nach dem k-Index-Verfahren werden daraus die für die

Durchflussberechnung nach der Kontinuitätsgleichung benötigten mittleren Querschnittsgeschwindigkeiten und letztendlich der aktuelle Durchfluss errechnet.

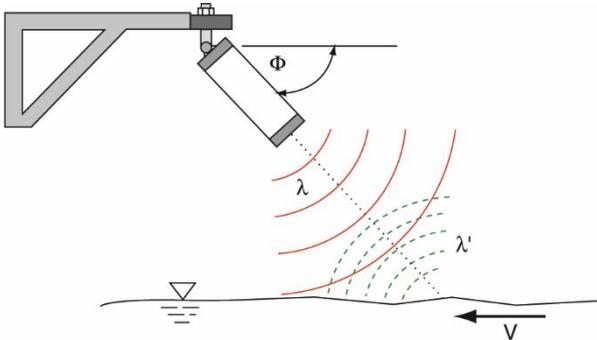


Abbildung 1: Messprinzip der Radar-Geschwindigkeitsmessung nach dem Doppler-Prinzip (Felder & Siedschlag 2004)

Wesentliche *Voraussetzung* für die Anwendung dieses Verfahrens ist, dass die Wasseroberfläche sich sichtbar bewegt und eine entsprechende Rauheit aufweist, damit eine auswertbare Dopplerfrequenz gemessen werden kann. Je welliger die Wasseroberfläche und je schneller die Fließgeschwindigkeit ist, desto zuverlässiger sind die Messergebnisse. Die Wellenhöhe sollte nach Herstellerangabe minimal 3 mm betragen.

Es werden *Radarsensoren* der auf diesem Gebiet führenden Hersteller im praktischen Einsatz, ihre Montage- und Kalibriermöglichkeiten sowie Messergebnisse vorgestellt.

Die *Messgenauigkeit* liegt laut Werksangaben bei ± 1 % vom Istwert für das abgetastete Messvolumen (Unsicherheit ± 2 cm/s). Mit einer Unsicherheit der Wasserstandsmessung von ± 1 % für Messwerte im Bereich zwischen 0 und 6000 mm ergibt dies für den ermittelten Durchfluss eine typische Gesamtmessunsicherheit von ± 5 % vom Messwert unter normalen Messbedingungen.

Als *zusammenfassende Bewertung* ist festzuhalten, dass mit dem Radar-Doppler-Verfahren zur Geschwindigkeitsmessung eine Alternative zu den übrigen in Tab. 1 vorgestellten Verfahren zur Verfügung steht. Wie die Erfahrungen der letzten Jahre zeigen, handelt es sich um ein einfach zu handhabendes, wartungsarmes und zuverlässiges Messsystem, wenn die physikalischen und hydraulischen Randbedingungen an der jeweiligen Messstelle eingehalten werden.

Zu mehr Details zum Radar-Geschwindigkeitsmessverfahren wird auf Sévar et al. (2004); Felder et al. (2004), Sommer et al. (2009) und Morgenschweis (2017) verwiesen.

b) Messung der Oberflächengeschwindigkeit mit optischen kamerabasierten Systemen

Kamerabasierte optische Systeme erfassen die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers über die Aufnahme und Bearbeitung digitaler Bilder. Die theoretischen Grundlagen dieses Verfahrens wurden in den 1980-iger Jahren mit dem „Particle Image Velocimetry“ (PIV) erarbeitet und anfangs i. W. bei wasserbaulichen Laboruntersuchungen eingesetzt. Später wurde das Verfahren für großräumige Freilandeinsätze unter dem Namen „Large-Scale Particle Image Velocimetry“ (LSPIV) ausgeweitet. 2008 haben Muste und Fujita in einem grundlegenden Artikel den aktuellen Stand der Entwicklung vorgestellt (Muste et al. 2008).

Vom *Messprinzip* her geht es bei den optischen Verfahren darum, *Strömungsmuster*, die sich an der Oberfläche eines frei fließenden Gewässers abhängig von Geometrie und Rauheit des Gewässerbettes mehr oder weniger deutlich ausbilden, durch die Aufnahme von Bildern mit einer Digitalkamera und zugehöriger Hard- und Software zu identifizieren und ihren Versatz in Raum und Zeit durch eine Bildersequenz zu verfolgen. Abbildung 2 verdeutlicht diese Vorgehensweise.

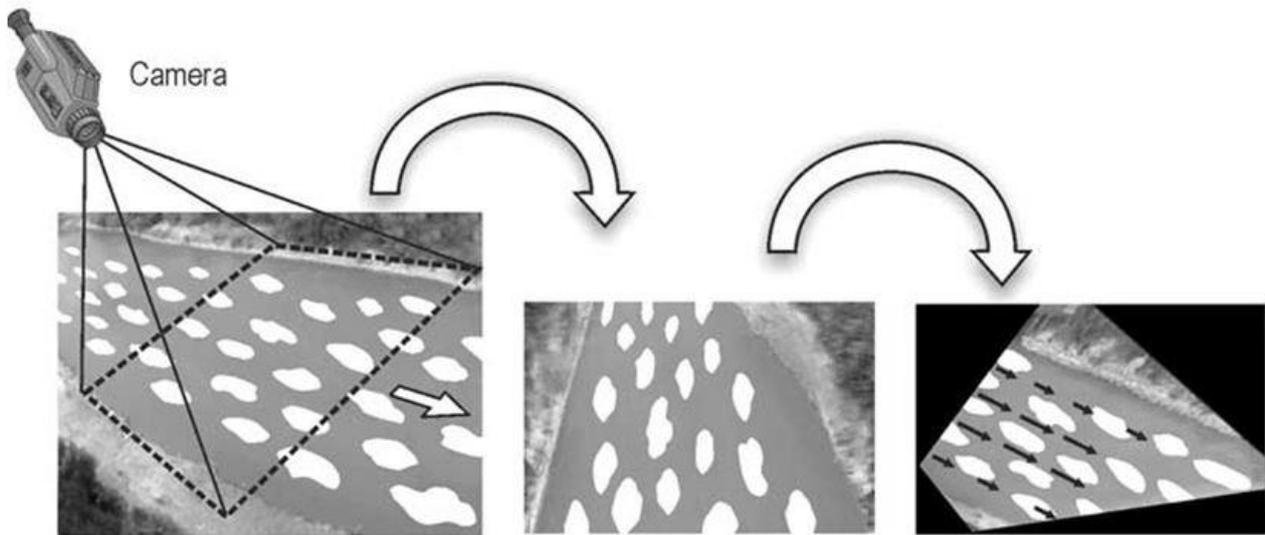


Abbildung 2: Messprinzip der kamerabasierten optischen Erfassung der Oberflächengeschwindigkeit (nach Muste et al. 2008)

Ein optisches kamerabasiertes Messsystem setzt sich grundsätzlich aus einer *Digitalkamera* mit Recheneinheit und Datenlogger zur kontinuierlichen Bildaufnahme und einer Software zur *Bildverarbeitung* für die Aufbereitung der Bildersequenzen zusammen.

Es werden Details der *Kameramontage* und *-ausrichtung* in Bezug auf die Wasseroberfläche (senkrechte oder schräge Aufnahme) sowie die einzelnen Schritte der *Bildverarbeitung* (Entzerrung, Filterung, perspektivische Transformation und Skalierung der Bilder) vorgestellt.

Besondere Bedeutung kommt dabei der *Skalierung* der Bildvektoren, durch die die längentreuen Bildkoordinaten in das übergeordnete geodätische Messnetz übertragen werden und so die aufgenommenen Pixel der Bildkoordinaten in metrische Dimension (Meter, Zentimeter) übertragen werden, zu. Dazu werden im Uferbereich des Gewässers in der Nähe der Messstelle mindestens 6 Georeferenzpunkte (GCP in Abb. 3), deren Lage und Höhe geodätisch eingemessen werden, installiert. Dies wird als Handicap dieser Methode bei mobiler Anwendung angesehen, da dadurch ihr ad-hoc-Einsatz an einer beliebigen Stelle im Gewässer verhindert wird. Bei kontinuierlichen Messungen dürfte die einmalige Einmessung dieser Punkte kein großes Problem darstellen.

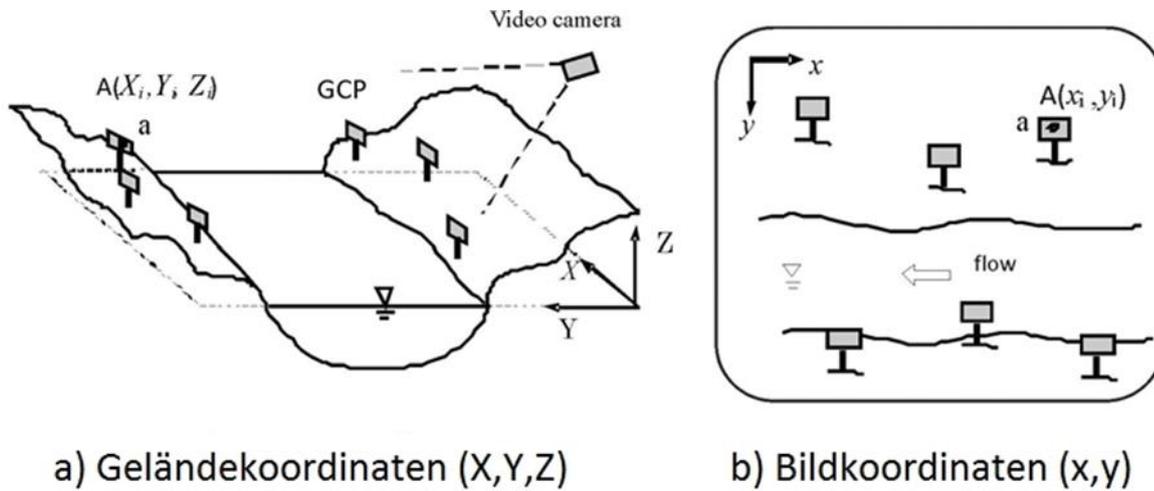


Abbildung 3: Transformation der Bildinformationen von Gelände- in Bildkoordinaten (nach Muste et al. 2008)

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

Vorteilhaft ist, dass die kontinuierliche Messung der Oberflächenfließgeschwindigkeit mit fest installierten (Video-) Kameras *berührungslos* arbeitet und im Gegensatz zum vorgestellten Radar-Verfahren die *Geschwindigkeitsverteilung* an der Gewässeroberfläche messen kann. Das Verfahren bietet so bei schwierigen und eventuell gefährlichen Strömungsverhältnissen sichere Rahmenbedingungen für Personal und Messgeräte. Die Aufnahmegeräte sind bei Einsatz von handelsüblichen Kameras *kostengünstig*.

Nachteilig ist, dass die Messung durch Sichtbeeinträchtigungen bei Starkregen, Schneefall, Nebel oder Staub erschwert oder sogar unmöglich gemacht wird. Diese äußeren Randbedingungen bewirken, dass die optischen Verfahren prinzipiell *nicht universell* einsetzbar sind.

Dennoch ist als *Fazit* festzuhalten, dass die kamerabasierte Wasserstands- und Durchflussmessung, die im letzten Jahrzehnt eine sehr stürmische Entwicklung erfahren hat, eine vielversprechende Feldmesstechnik ist.

Als *Ausblick* ist noch anzumerken, dass zur Zeit verschiedene Forscherteams an der Entwicklung geeigneter Software arbeiten, die zum einen die aufwändige Installation und Einmessung von Bodenkontrollpunkten (GCP oder GRP) überflüssig machen (vgl. Tsubaki et al. 2015, Eichendorff 2017), und zum anderen die fachliche Nachbearbeitung von Videoaufzeichnungen ermöglichen (Le Boursicaud et al. 2016). Ebenso wird an hochgenauen Bildauswertetechniken gearbeitet, um die Auswertegeschwindigkeit zu erhöhen und so die Technik für den Echtzeit-Einsatz zu ertüchtigen (Fujita et al 2015).

Hybride Durchflussermittlung

In der Praxis können an einer Messstelle komplexe hydraulische Randbedingungen wie Überstau, instationärer Durchfluss sowie lokale Störeinflüsse wie Verkrautung auftreten, die die Durchflussmessung mit den in Tab. 1 aufgeführten Methoden erschweren bzw. sogar unmöglich machen. Hier bietet sich der Einsatz *hybrider Messsysteme* an, bei denen verschiedene Messverfahren sinnvoll kombiniert werden. So gibt es in der Praxis schon Beispiele für den kombinierten Einsatz von z.B. Radar- Oberflächengeschwindigkeitsmessung mit Ultraschall-Laufzeit-Messung oder horizontaler Ultraschall-Doppler-Messtechnik oder dem ΔW -Verfahren. Der Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten ist dabei grundsätzlich keine Grenze gesetzt.

Neben dem zeitgleichen Einsatz verschiedener, physikalisch sehr unterschiedlicher Messverfahren müssen dafür geeignete *Berechnungsalgorithmen* zur Verfügung stehen, die zum einen eindeutig festlegen, wann welches Messsystem unter welchen Bedingungen den Vorzug erhält und die zum anderen den Gesamtdurchfluss aus den verschiedenen Messverfahren zusammengesetzt berechnen. Im Idealfall wird dadurch die Genauigkeit und Zuverlässigkeit eines Messsystems über das gesamte Durchflussspektrum eindeutig erhöht, abgesehen davon dass in einigen komplexen Fällen mit extremen Strömungsverhältnissen dadurch überhaupt erst Messdaten zur Verfügung gestellt werden können.

In Morgenschweis (2017, Kap. 5.11) sind 5 *Anwendungsbeispiele* angeführt; im Vortrag wird die hybride Nutzung von Radar-Oberflächengeschwindigkeits- und Wasserspiegelgefällemessungen konkret am Beispiel des Pegels Kessel/Niers, der durch starke saisonale Verkrautung gekennzeichnet ist, vorgestellt.

Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass durch die Kombination beider Messverfahren die Schwierigkeiten aufgrund von Verkrautung und Windeinfluss auf die Durchflusserfassung umgangen sowie eine zusätzliche Ausfall-Sicherheit durch Redundanz gewonnen werden konnte (Messstellendokumentation Kessel, Niersverband, Dose 2016, unveröffentlicht).

Zusammenfassende Wertung und Ausblick

Alle 3 vorgestellten „neueren“ Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie Wasserstand und Durchfluss auch bei extremen Strömungsverhältnissen sicher und zuverlässig erfassen können. Das heißt, dass selbst bei Niedrigwasserabfluss mit extrem tiefen Wasserständen, bei Hochwasserabfluss mit hoher Treibgutbelastung, bei lokal durch Verkrautung gestörten Durchflusssituationen und selbst bei instationären Strömungsverhältnissen eines dieser Verfahren in der Lage ist, brauchbare Durchflussdaten zu liefern.

Die Nachteile der Messverfahren, die lediglich die Oberflächengeschwindigkeit messtechnisch erfassen - sei es mit Radar-Dopplersonden, sei es mit kamerabasierten optischen Verfahren -, aufzuweisen, kann bei hybriden Messsystemen durch geschickte Kombination verschiedener Messverfahren ausgeglichen werden.

Als *Fazit* ist demnach festzuhalten, dass mit den vorgestellten neuen Entwicklungen im Hydrometriesektor in Zukunft prinzipiell für jede denkbare Abflusssituation geeignete Messverfahren zur Verfügung stehen. Dies wird jedoch nicht durch *ein* universell einsetzbares Messverfahren erreicht, sondern durch die geschickte Kombination verschiedener Messtechniken.

Somit scheint die Vision, die der Autor 2013 auf dem Tag der Hydrologie in Bern vorgetragen hat (Morgenschweis, 2013), nämlich die „Bereitstellung von Wasserstands- und Durchflussdaten jederzeit und für jeden Punkt im Gewässer“, heute schon mehr und mehr Realität zu werden. Insbesondere die rasante Entwicklung bei den optischen kamerabasierten Verfahren ermutigt den Autor zu dieser Vorausschau!

Literatur

- Eichendorff, P. (2017): Hybrides kameragestütztes Messverfahren zur berührungslosen Messung der Fließgeschwindigkeitsverteilung an der Oberfläche von Freispiegelströmungen. Tag der Hydrologie Trier 2017, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung.
- Felder, A. u. Siedschlag, S. (2004): Fließgeschwindigkeitserfassung an Flüssen mit dem Radarsensor Kalesto. Seminar „Neue Entwicklungen der Durchflussmessung in natürlichen und künstlichen Gerinnen“ vom 11.–12.3.2004 an der TU München. ATV-DVWK: Hennef.
- Fujita, I., Notoya, Y. & M. Shimono (2015): Development of UAV-based river surface velocity measurement by STIV based on high-accurate image stabilization techniques. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 2015, The Hague, pp. 1-10.
- Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F. & J. Le Coz (2016): Gauging extreme floods on Youtube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges. Hydrological Processes Vol. 30, Issue 1, pp. 90-105.
- Morgenschweis, G. (2013): Hydrometrisches Informationssystem der Zukunft – Bereitstellung von Wasserstands- und Durchflussdaten jederzeit und für jeden Punkt im Gewässer. Tag der Hydrologie Bern 2013, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, H. 32.13, 1-10.
- Morgenschweis, G. (2017): Hydrometrie. Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. Springer VDI, 2. Auflage (im Druck).
- Muste, M., Fujita, I. und Hauet, A. (2008): Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. Water Resour. Res., Vol. 44, 2008, pp. 1-14, W00D19, doi: 10.1029/2008WR006950
- Sévar, J.-M., Warmbier, G. u. Wagner, L. (2004): Geschwindigkeits-Radar-Durchflusssensoren im Abwasserkanal. Seminar „Neue Entwicklungen der Durchflussmessung in natürlichen und künstlichen Gerinnen“ vom 11.–12.3.2004 an der TU München. ATV-DVWK: Hennef.
- Sommer, W. u. Wiesenberger, B. (2009): RQ-24 non-contact discharge measurement. Nordic Water, Reijkjavik.
- Tsubaki, R., Fujita, I., Kwonkyu, Y. & M. Muste (2015): Large-scale particle image velocimetry (LSPIV) implementation on smartphone. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 2015, The Hague, pp. 1-7

Darstellung und Kommunikation hydrometrischer Messgrößen - Daten oder Entscheidungshilfe?

Marc Scheibel¹

¹Wupperverband, Wassermengenwirtschaft & Hochwasserschutz, schei@wupperverband.de

Einleitung

Daten umgeben uns mittlerweile allüberall. Zahlreiche Daten werden gesammelt und ausgewertet. Dies gilt für das berufliche, wie auch das private Umfeld. Überall wird gemessen, vermessen und gespeichert. Welchen Wert Daten haben erkennen wir unter anderem daran, wie das Geschäftsmodell vieler Anbieter von Diensten im Internet funktioniert: Daten sind zur Ware geworden. Doch erst die Zusammenstellung und Auswertung vieler Daten bringt den eigentlichen Gewinn: Informationen. Sie spiegeln dann beim Beispiel Internet unsere vermeintlichen Interessen und Gewohnheiten wieder und sollen es ermöglichen uns gezielt zu bewerben und schlussendlich Geschäfte abzuschließen mit den entsprechenden Anbietern. Smartphones zeichnen unsere Bewegung auf, helfen uns Wege und wichtige Punkte zu finden, geben uns Tipps in welchem Hotel wir absteigen sollen oder wo wir nach unserem Geschmack am besten essen gehen sollten.

Daten alleine sind also wertvoll. Sie müssen stimmig und repräsentativ sein. Den „wahren“ Wert entwickeln sie aber erst durch verarbeitende Prozesse. Am Beispiel Internet und Kaufempfehlungen kann man es verdeutlichen: allein die Information, welche Kennzahlen ein Produkt hat nützen nicht allein bei einer Kaufentscheidung. Erst durch den Vergleich – einem Benchmark – erkennen wir welches Produkt welches Preis-Leistungsverhältnis bietet, oder zu welcher Preisspanne ich meine Anforderungen erfüllt bekommen kann. Oftmals kenne ich aber diese Anforderungen selbst noch gar nicht und muss mich auch hier beraten lassen, was ich wofür brauche.

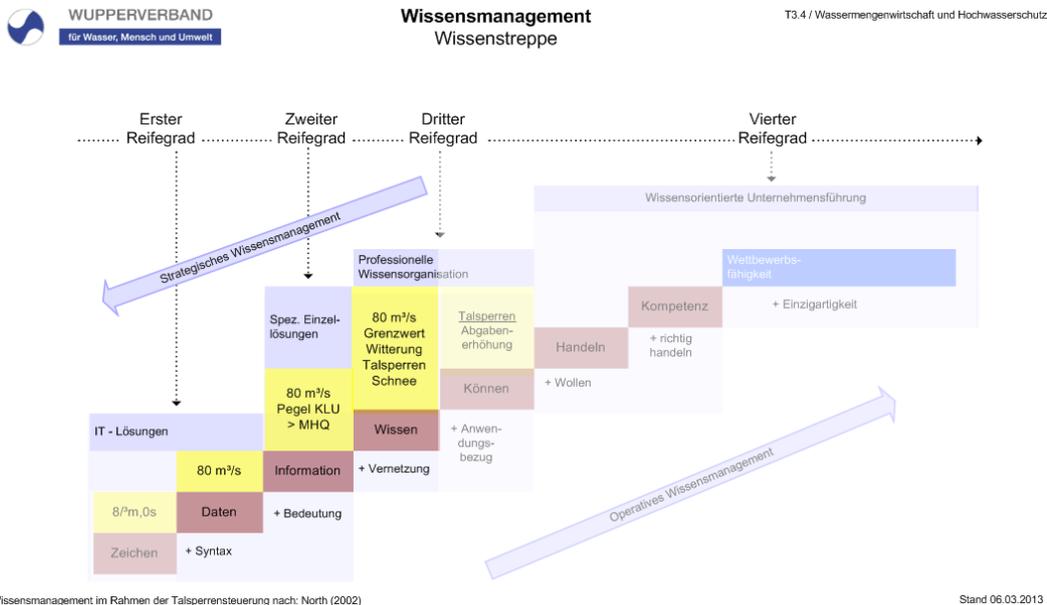
Somit ist die Kombination aus Datensammeln und Verarbeitung ein notwendiger Schritt um Informationen zu generieren. Durch die Ergänzung weiterer benötigter Informationen und Randbedingungen kann dann eine Entscheidung getroffen werden. Ziel des Bereitstellers sollte es also sein, Zielgruppengerechte Daten so aufzubereiten und zu ergänzen, dass der „Entscheider“ eine möglichst umfangreiche Hilfestellung bekommt Fehler aufgrund seiner Aktionen zu minimieren.

Von den Daten zum Wissen

Am Beispiel der Talsperren-Steuerung eingetragen in die Wissenstreppe (nach North 2002) – siehe Abbildung 1 - soll verdeutlicht werden, was damit gemeint ist:

Im Einzugsgebiet der Talsperre werden Messungen durchgeführt. Diese werden vor Ort als elektronische Signale verarbeitet. Durch Umrechnung erhält man nun die gewünschten Parameter, wie zum Beispiel Füllstände oder Abflüsse. Man erhält eine Zeitreihe zu einem bestimmten Parameter. Wüsste ich nicht durch Erfahrung, was der jeweilige aktuelle Wert bedeutet, könnte ich ihn nicht einordnen – mir fehlen Vergleichsgrößen. Durch die Bereitstellung (im Vorfeld ist somit die Ermittlung notwendig) dieser Werte wird dem Ganzen eine Bedeutung gegeben und kann ich eine Einordnung treffen: handelt es sich um eine gewöhnliche oder außergewöhnliche Situation – ich habe eine Information. Um beim Beispiel Abfluss zu bleiben: fließt gerade viel oder wenig Wasser. Durch die Vernetzung mit weiteren Informationen erlange ich

notwendiges Wissen zur Einschätzung der Situation: kommt weitere Niederschlag und ist dadurch mit höherem Abfluss zu rechnen? Liegt sogar noch Schnee im Einzugsgebiet welcher Schmelzen kann?



Wissensmanagement im Rahmen der Talsperrensteuerung nach: North (2002)

Stand 06.03.2013

Abbildung 1: Wissensstreppe (modifiziert auf Beispiel Talsperren, nach North 2002)

Wenn es nun noch möglich ist einen Anwendungsbezug zu meinen Handlungsmöglichkeiten herzustellen, erkenne ich die Möglichkeiten und konkreten Handlungsoptionen in einer bestimmten Situation. Hierzu bedarf es im Vorfeld allerdings des Trainings der Fähigkeiten der möglichen Tätigkeiten (eine Feuerwehr kann nicht erst im Einsatzfall üben). Ist die Fähigkeit gegeben, liegt es allein am „Wollen“ die Handlungen auch durchzuführen. Mit zunehmender Erfahrung aus dem Handeln erlange ich letztendlich die Kompetenz, welche notwendig ist ein guter Entscheidungsträger zu sein.

Darstellungsmöglichkeiten von Daten

Werden aufbereitete Daten zur Verfügung gestellt ist die Darstellung ein weiterer wichtiger Aspekt. Welcher Zeitraum, welcher Ausschnitt, welche Skala gewählt wird trägt maßgeblich zur Interpretation bei. Dies wird leider auch immer wieder zur Manipulation der Leser von Diagrammen und Zahlenbeispielen verwendet. Schauen Sie also ganz genau hin.

Auch hier Beispiele zum Abfluss: Anhand der Abbildung 2 kann man die unterschiedlichen Möglichkeiten erläutern. In der ersten Graphik links sieht der Abfluss sehr ausgeprägt und hoch aus – die Skala ist so ausgewählt den gesamten gemessenen Bereich anzuzeigen. Wähle ich jedoch eine Skala ab 0 schaut die Amplitude / Ausschlag der Welle bereits viel kleiner aus – siehe zweite rechte Graphik. Wenn ich nun noch Grenzwerte hinzufüge, wie in der dritten unteren Graphik, kann der Leser eine sinnvollere Interpretation vornehmen. Für die Fragestellung ob es sich aktuell um viel Abfluss handelt erkennt man den Abstand zu den Hochwassergrenzen und bekommt eine wirkliche Information für die entsprechende Fragestellung.

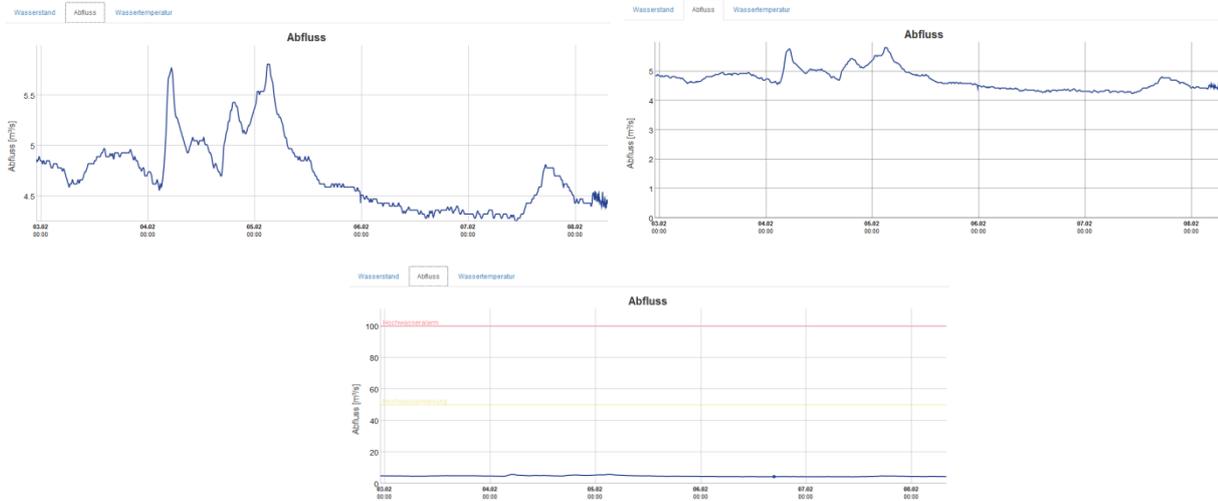


Abbildung 2: Verschiedene Skalen ein und derselben Zeitreihe in einem Diagramm

Das Zielgruppengerechte Darstellen setzt auch ein Eingehen auf die fachlichen Vorkenntnisse voraus. Einer Darstellung muss immer auch möglichst eine Konsequenz entnommen werden können. Abbildung 3 soll ein Beispiel zeigen, wie auch „Nicht-Hydraulikern“ die Bedeutung eines bestimmten Wasserstandes vermittelt werden kann.

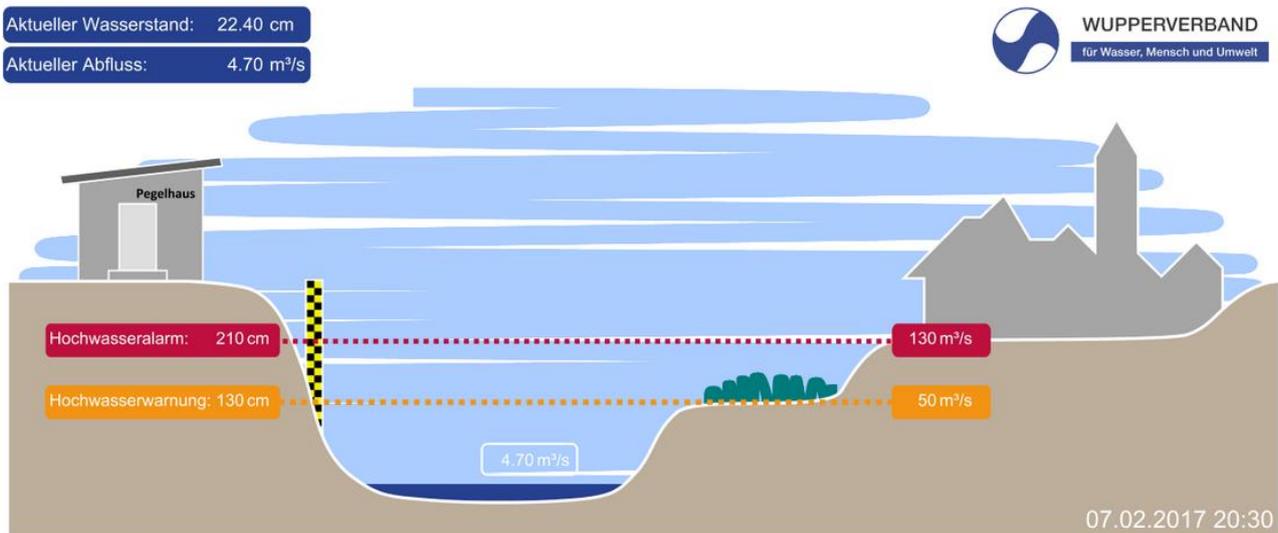


Abbildung 3: Anschauliche Darstellung eines Wasserspiegels

Wer das Bild sieht kann erkennen, wie weit der aktuelle Wasserspiegel entfernt liegt von eventuellen Ausuferungen. Solche Bilder können auch animiert für Zeiträume bereitgestellt werden.

Während kritischer Situationen herrscht meistens Hektik und es ist wichtig die Übersicht zu behalten. Daher sollten auch übersichtliche Darstellungen der Daten gewählt werden. Selbst wenn große Fachkunde und können vorhanden sind, müssen Informationen gebündelt werden um die bestmöglichen Entscheidungen treffen zu können. Abbildung 4 zeigt Beispiele für Übersichten, die einem Betrieb helfen Anlagen nach vorgegebenen Randbedingungen zu steuern. Links ist der Zustand der Stauanlage dargestellt: man erkennt den aktuellen Zulauf und Füllzustand, die zugehörigen Orientierungsgrößen und die aktuelle Abgabe. In der Graphik rechts sind die aktuellen Kennzahlen der zugehörigen Pegel dargestellt.

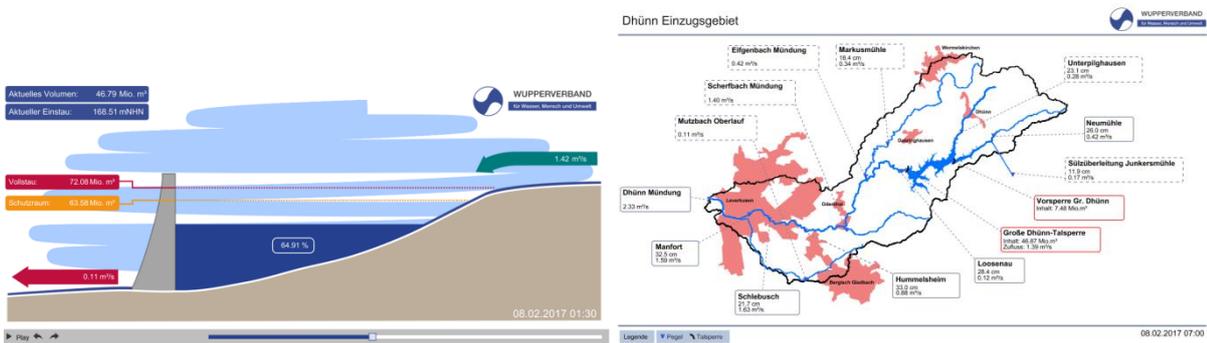


Abbildung 4: Übersichtsbilder zum Zustand einer Anlage und des relevanten Systems

Fazit

Der Wupperverband bemüht sich den Akteuren zielgruppengerechte Informationen bereitzustellen. Einen großen Anteil nehmen hier selbstverständlich auch Daten ein. Diese werden allerdings aufbereitet und mit zusätzlichen Informationen ergänzt. Ziel ist es durch Expertisen der Fachleute, den Akteuren Einordnungen zur jeweiligen Situation zu ermöglichen und sachgerechte Entscheidungen treffen zu können. Die Daten treten hier als Werkzeug in Ihrer Bedeutung etwas in den Hintergrund und sind Mittel zum Zweck. Daher wird auf dem Hochwasserportal die Situationsanalyse im Vordergrund stehen, welche der Hydrologe vom Dienst nutzen kann Wissen zu vernetzen. Durch die Zusammenarbeit mit anderen Verbänden, dem Land und dem Deutschen Wetterdienst ist es so möglich im Einsatzfall, wie in der täglichen Arbeit zu unterstützen, Wissen zu bündeln und die Kompetenz aller Beteiligten kontinuierlich zu steigern.

Im Vortrag werden hierzu weitere Beispiele gegeben.

Literatur

North, K. (2002): Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. Wiesbaden: Springer Open

Datenbearbeitung von Ultraschallanlagen

Alexander Hartung¹

¹Emschergenossenschaft und Lippeverband, Abteilung Wasserwirtschaft, alexander.hartung@eglv.de

Einführung

Stationäre Ultraschalldurchflussmessanlagen (US-Anlagen) nach dem Laufzeitverfahren oder kombiniert mit dem Dopplerverfahren werden bei vielen Verbänden und wasserwirtschaftlichen Behörden eingesetzt. Die Vorteile dieser Anlagen, eine sehr genaue Abbildung des instationären Durchflussprozesses und die dadurch erweiterten Einsatzmöglichkeiten z. B. in Rückstaubereichen, schaffen ein vielfältiges und breites Einsatzgebiet.

Wie bei grundsätzlich jeder anderen Messeinrichtung auch, produzieren die US-Anlagen zunächst einmal Rohdaten, die Fehler enthalten können und daher einer weiteren Bearbeitung und Aufbereitung bedürfen. So ist die erfasste Fließgeschwindigkeit stärkeren Schwankungen unterworfen, zum einen liegt dies im instationären Fließprozess selber begründet, zum anderen werden trotz Filterung der reflektierten Ultraschallsignale nicht alle Störungen aufgrund von Hindernissen, Lufteintrag oder zu starker Trübung im Gewässer entfernt. In speziellen Situationen können auch starke Änderungen der Leitfähigkeit sowie ausgeprägte Temperaturunterschiede Fehler verursachen. Die parallel stattfindende Wasserstandserfassung beinhaltet die üblichen Fehlerquellen, die bei einer Wasserstandsmessung auftreten können.

Bei der Bearbeitung der Rohdaten können zwei hauptsächliche Anwendungsfälle unterschieden werden, die Online- und die Offlineverwendung der Daten. Für die Hochwasservorhersage oder bei einem Einsatz zu Steuerungszwecken (z. B. als Ablaufpegel eines Hochwasserrückhaltebeckens) werden die Daten online in die entsprechenden Vorhersagemodelle oder Steuerungsanlagen eingespeist. Hier kommen aufgrund der engen Zeitintervalle von wenigen Minuten bis vielleicht Stunden und der zwingenden permanenten Verfügbarkeit nur automatisch ablaufende Korrekturprogramme zum Einsatz. Obwohl deren Möglichkeiten zur Fehlerkorrektur natürlich eingeschränkt sind, schaffen es passend kombinierte Algorithmen dennoch, einen Großteil üblicher Fehlerquellen zu entfernen. Dies sind einfache Min / Max Überschreitungen, die Eliminierung negativer Werte und eine sinnvolle Lückenfüllung. Weiterhin können Konstantwerte, zu steile Anstiege und zu starke Schwankungen bzw. Rauschen erkannt und entweder eliminiert oder sinnvoll ersetzt werden.

Im offline Fall werden die Daten durch einen Sachbearbeiter analysiert und korrigiert. Hierbei stehen neben der „einfachen“ Fehlerkorrektur (siehe online Fall) vor allem weitergehende Analysen, wie die Kalibrierung anhand von Abflussmessungen oder die Ableitung einer Abflusstafel aus den US-Daten im Vordergrund. Darüber hinaus sind Vergleiche mit Nachbarstationen oder die Einbeziehung anderer Datenquellen wie z. B. der Gebietsniederschlag sinnvoll, um die berechneten Durchflüsse möglichst umfassend zu plausibilisieren. Für die bei Emschergenossenschaft und Lippeverband vorgesehene Datenbearbeitung der Ultraschallanlagen wird zunächst der offline Fall betrachtet.

Konzept der Datenbearbeitung

Im Zuge einer Konzepterstellung müssen vielfältige Aspekte mit beachtet werden. Zu beantwortende Fragen können auch z. B. sein: Wer soll die Datenbearbeitung durchführen? Welche Kenntnisse und Grundlagen sind

hierfür erforderlich? Wieviel Zeit soll auf die Datenbearbeitung verwendet werden und bis zu welcher Tiefe soll die Bearbeitung erfolgen? Weiterhin sind auch die Datenflüsse sowie der Ablageort der Daten entscheidend: An welcher Stelle der internen Übertragungskette und mit welchem Programm soll die Bearbeitung der Daten durchgeführt werden?

Für den Einsatz bei Emschergenossenschaft und Lippeverband wird das eigene Personal bevorzugt, da hier jahrelange Betriebserfahrung mit den Anlagen und kurze Bearbeitungswege vorhanden sind. Bei der Bearbeitungstiefe wurde abgestimmt, dass alle Arbeiten zur Erstinbetriebnahme und die Überarbeitung anlagenspezifischer Parameter bis auf weiteres in die Hände des Anlagenherstellers gegeben werden. Die Daten werden von den Anlagen per GPRS auf den Server des Herstellers und von dort aus zum Verband hin übermittelt. Über mehrere interne Stufen gelangen die Rohdaten der US-Anlagen schließlich in das hydrologische Datenbankmanagementsystem des Verbandes. Hier sollen zukünftig auch die Bearbeitungsalgorithmen sowie alle notwendigen Parameter zentral mit abgelegt werden.

So liegen als Rohdaten der Wasserstand (h), die Geschwindigkeiten (v_i) in den einzelnen Ebenen, die Temperatur und die Statusmeldungen der Anlage vor. Ebenso werden die berechnete mittlere Geschwindigkeit (v_m) und der berechnete Durchfluss (Q) mit übermittelt. Der Durchfluss wird nach (1) ermittelt. Hierbei wird die Fläche (A) des Wasserkörpers als Funktion des Wasserstandes (h) durch ein Polynom 6. Ordnung in Form von (2) dargestellt. Die Polynomparameter (p_i) sind entsprechend zu bestimmen.

$$Q = v_m * A \quad (1)$$

$$A = p_6 * h^6 + p_5 * h^5 + p_4 * h^4 + p_3 * h^3 + p_2 * h^2 + p_1 * h + p_0 \quad (2)$$

Die Geschwindigkeiten in den einzelnen Ebenen (v_i) werden zunächst nach (3) zu v_g gemittelt, die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit (v_m) ergibt sich nach (4) unter Einbeziehung der K-Faktoren. Hierbei stellt K_2 einen konstanten Wert dar und K_1 ergibt sich nach (5) in Abhängigkeit des Wasserstandes (h) sowie der Einbauhöhe der Sensoren (z) in den einzelnen Ebenen. Der entsprechende Funktionswert von K_1 wird nach (5) ebenfalls als Polynom 6. Ordnung mit den Polynomparametern (o_i) dargestellt

$$V_g = \frac{(V_1+V_2+\dots+V_i)}{i} \quad (3)$$

$$V_m = K_1 * K_2 * V_g \quad (4)$$

$$K_1 = o_6 * \left(\frac{z}{h}\right)^6 + o_5 * \left(\frac{z}{h}\right)^5 + o_4 * \left(\frac{z}{h}\right)^4 + o_3 * \left(\frac{z}{h}\right)^3 + o_2 * \left(\frac{z}{h}\right)^2 + o_1 * \left(\frac{z}{h}\right) + o_0 \quad (5)$$

Für jede Station müssen daher im Datenbankmanagementsystem weitere Parameter wie der K_2 Faktor, die Einbauhöhen (z) der Sensoren und die Polynomparameter (2 und 5) als Stammdaten einer jeweiligen Station mit eingepflegt werden. Die hier aufgeführten Gleichungen basieren im Wesentlichen auf der ISO 6416 (2004) sowie Frey (2011).

Bevor auf die einzelnen Schritte der Datenbearbeitung näher eingegangen wird, soll noch die Frage nach dem Grund für die Datenbearbeitung beantwortet werden. Durch die Verwendung der Daten in der Hochwasservorhersage, den hydrologischen Gebietsmodellen und der vorgesehenen Steuerung von Anlagen ergibt sich viel stärker als bisher der Bedarf an geprüften Daten mit einem sehr hohen Qualitätsniveau. Hierfür ist es notwendig, die erforderlichen Parameter und das Wissen um die Anlagenspezifika zu erwerben. Weiterhin ergibt sich nach größeren Hochwasserereignissen immer wieder der Bedarf, die aufgezeichneten Rohdaten innerhalb von 1 bis 2 Tagen nach dem Ereignis in geprüfter und evtl. überarbeiteter Form bereit zu stellen. Dies ist sinnvoll und effizient nur mit den entsprechenden Werkzeugen in Verbindung mit dem erforderlichen Wissen zu erfüllen, daher muss beides im Vorfeld bereitgestellt werden.

Ablauf der Datenbearbeitung

Die detaillierte Datenbearbeitung gliedert sich in mehrere aufeinander folgende Schritte, wobei der Beginn vergleichbar ist mit der automatischen Datenaufbereitung für eine online Verwendung. Zunächst werden die Wasserstandsdaten W bearbeitet:

1. Überprüfen von Min Max Werten, Entfernen negativer Werte und zu steiler Gradienten.
2. Sinnvolle Lückenfüllung in Abhängigkeit der Lückenlänge.
3. Rauschunterdrückung (hierbei darf keine zu starke Glättung oder Dämpfung erfolgen).
4. Berechnung der Abweichungen zu den Korrekturwerten (Handablesung der Pegelwartung).

Die Berechnung der Abweichungen im vierten Schritt ist nur eine qualitative Information, eine automatische Korrektur ist nicht immer sinnvoll und empfehlenswert.

Nachdem die Daten für W korrigiert wurden, erfolgt die Bearbeitung der Geschwindigkeiten v_i aus den einzelnen Messebenen. Dabei werden die Arbeitsschritte 1 und 2 wie bei W angewendet. Eine Rauschunterdrückung ist hier im Gegensatz zum Wasserstand nicht erwünscht, bzw. muss viel strengeren Kriterien genügen, da nicht der instationäre Charakter der Fließgeschwindigkeit eliminiert werden soll.

Im Anschluss werden die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m und der Durchfluss Q neu gerechnet. Hierbei können auch die Statusmeldungen der Anlage ausgewertet werden. Die Statusmeldungen eröffnen die Möglichkeit, weitere Fehlerbehandlungsroutinen für die Berechnung zu implementieren. Damit sind die Methoden einer automatischen Datenbearbeitung weitestgehend ausgeschöpft.

Die nun folgenden Arbeitsschritte sind wieder an einen Sachbearbeiter gebunden:

1. Die Abweichung der Wasserstände zu den Korrekturwerten wird analysiert und die Wasserstände werden angepasst.
2. Eine Veränderung der Wasserstände zieht eine vollständige Neuberechnung der Geschwindigkeiten v_g und v_m sowie der Durchflüsse nach sich.
3. Es werden W - Q Diagramme angefertigt. Dabei werden Zeitintervalle farbig markiert und so unterscheidbar gemacht. Ein Beispiel wird im folgenden Absatz aufgeführt. Als sinnvolle Zeitintervalle kommen Tage, Wochen, Monate, Sommer / Winter sowie ganze Jahre in Frage.
4. Im Zusammenhang mit den Statusinformationen der Anlage können weitere Parameter wie die Ebenenkonfiguration und die Abschaltgrenzen untersucht werden.
5. Die Punktmenge der W - Q Diagramme wird manuell bereinigt und dann zur Ableitung einer Abflusstafel verwendet. Diese Abflusstafel kann als Rückfallebene bei Ausfällen eines oder mehrerer Messpfade verwendet werden. Bei speziellen hydraulischen Situationen wie z. B. Rückstau ist die Abflusstafel aber nicht verwendbar.

Im folgenden Abschnitt wird ein Praxisbeispiel aufgeführt.

Beispiel aus der Praxis

Für den Punkt 3 aus der Datenbearbeitung durch einen Sachbearbeiter wird ein entsprechendes Beispiel mit realen Daten aufgeführt. Zunächst wird ein W - Q Diagramm mit farbig markierten Tageseinheiten erstellt, das den Verlauf einer kleinen Hochwasserwelle im Juni 2016 (siehe Abbildung 1) umfasst. Die Daten des 25. Juni

2016 (blaue Punkte) weisen im oberen Bereich eine Auffälligkeit auf, wohingegen die restlichen Daten sehr schön den An- und Abstieg der Hochwasserwelle darstellen.

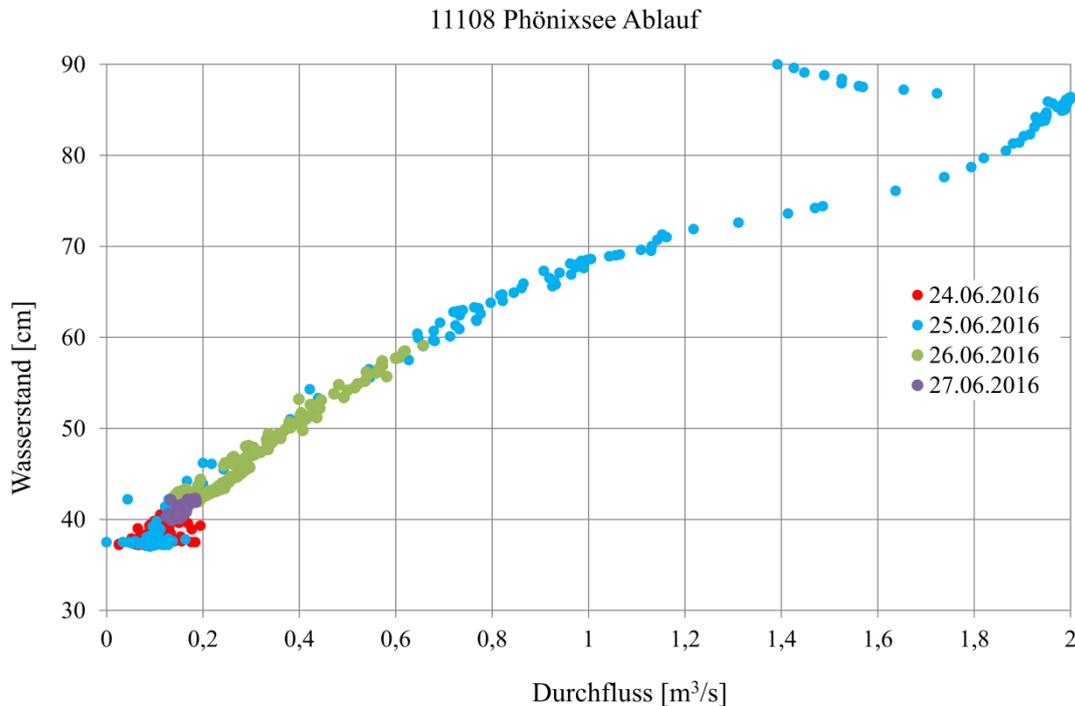


Abbildung 1: W-Q Diagramm, Emscher Pegel 11108 Phoenixsee Ablauf

Um die Ursache für diese abweichenden Punkte zu finden, wurde unter anderem auch die Gangliniengrafik (siehe Abbildung 2) vom 25. Juni 2016 untersucht. Dort zeigt sich, dass bei einem Wasserstand von 86,5 cm die Anlage die Durchflüsse deutlich anders berechnet. Um diesen Fehler zu beheben, wurde im Weiteren der Kontakt mit dem Hersteller aufgenommen, damit die Konfiguration angepasst werden kann.

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird ein Konzept für die Datenbearbeitung von Ultraschallanlagen entworfen. Dabei wird für die Anwendung in der Praxis zwischen einer online und einer offline Bearbeitung unterschieden. Die entsprechenden Berechnungsgleichungen zur Ermittlung des Durchflusses sowie die unterschiedlichen Bearbeitungsschritte werden vorgestellt. Anhand einer realen Datenreihe werden exemplarisch mögliche Fehlerquellen vorgestellt. Das vorgestellte Konzept inklusive der Bearbeitungsschritte wird Gegenstand einer Masterarbeit sein, die dort noch einmal vertieft die bereits praktizierten Arbeiten untersuchen wird.

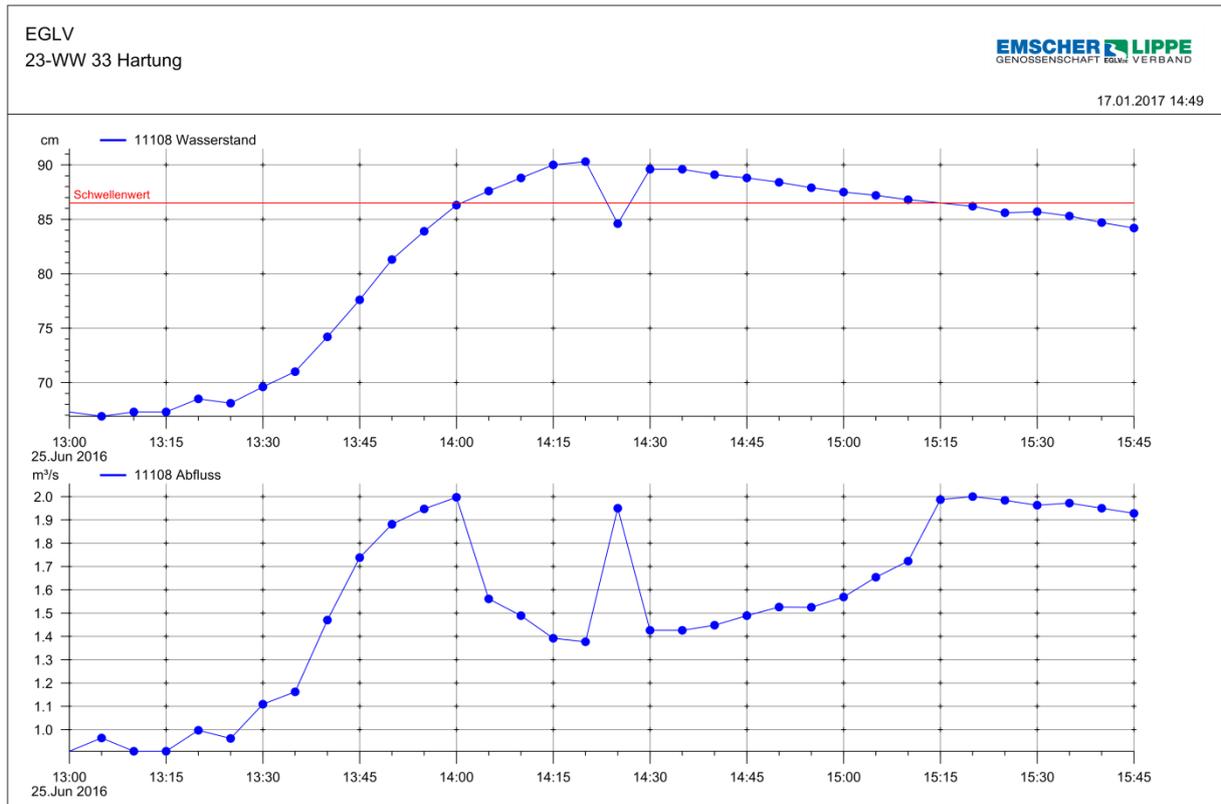


Abbildung 2: Ganglinie 25. Juni 2016 Emscher Pegel 11108 Phoenixsee Ablauf

Literatur

ISO 6416 (2004): Hydrometry - Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method. 3rd Edition, International Organization for Standardization, Switzerland.

Frey, W. (2011): Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen. (Hrsg.): Bayerisches Landesamt für Umwelt, München.

Erneuerung der Stauhöhenerfassung an der Hennetalsperre

Sebastian Weltmann¹

¹Ruhrverband, swt@ruhrverband.de

An der Hennetalsperre wurde der Stauspiegel bisher mit einem Druckluftpegel erfasst. Bei Tiefbauarbeiten an der Dammkrone wurden die Zuleitungen zerstört. Ein neues Messsystem zur Stauhöhenerfassung sollte den Wasserdruck direkt messen. Dazu wurde die Betonwand des Kontrollgangs, der entlang des wasserseitigen Dammfußes verläuft, von innen nach außen durchbohrt und eine Messeinrichtung eingebaut. Über die Erfahrungen beim Einbau in 24 m Wassertiefe wird berichtet.

Die bisherige Stauhöhenmessung an der Hennetalsperre

Die Hennetalsperre liegt südlich von Meschede im Einzugsgebiet der Ruhr und wurde 1955 in Betrieb genommen. Mit einem Stauvolumen von 38,4 Mio. m³ dient sie im Talsperrenverbundsystem des Ruhrverbands zur Sicherung der Wasserversorgung des Ruhrgebiets. Ihr Steinschüttdamm ist als einer der drei Ersten in Deutschland mit einer bituminösen Oberflächendichtung und einem Beton-Kontrollgang am wasserseitigen Dammfuß ausgerüstet (s. Abbildung 1).

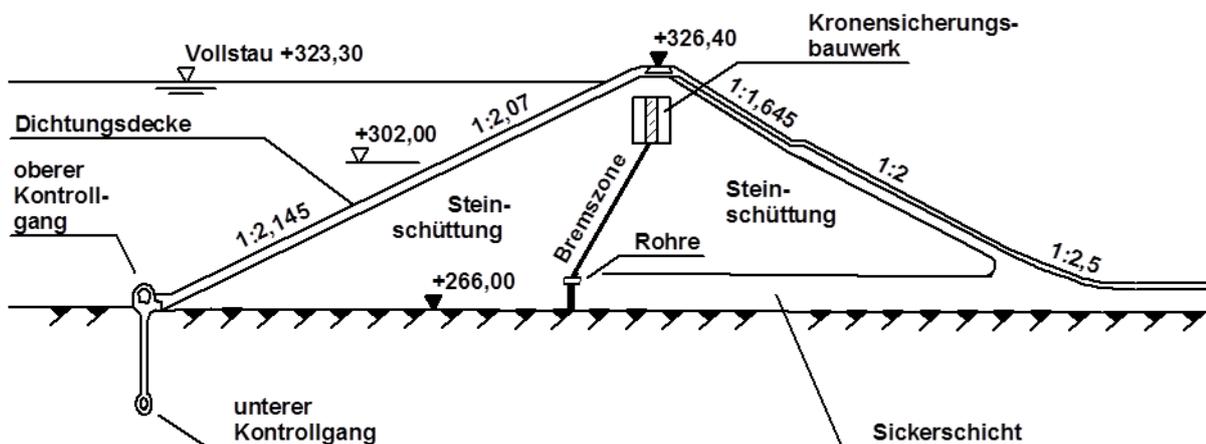


Abbildung 1: Querschnitt des Henne-Staudamms

Zur Kontrolle der Stauhöhe dient an der Hennetalsperre ein Staffelpiegel, dessen Pegellatten mit jeweils drei Metern Messbereich gebaut wurden. Eine kontinuierliche Aufzeichnung der Stauhöhe erfolgte bisher über einen Druckluftpegel mit pneumatischer Waage. Dieses System perlt kontinuierlich Luft in einer Ausperlglocke in die Talsperre ein. Der zum Ausperlen der Luft unter Wasser erforderliche Gegendruck wird mechanisch erfasst und elektronisch gespeichert.

Dieses System ist jedoch relativ träge, da die Messleitungen an der Hennetalsperre zwischen dem Druckluftpegel und der Ausperlglocke ca. 300 m lang sind. Aufgrund des großen Luftvolumens in den Leitungen dauert es recht lange, bis ein Druckausgleich im System stattgefunden hat. Hinzu kommt, dass der

Druckluftpegel nur einen Messbereich von 15 m erfassen kann. Um dennoch den bewirtschafteten Stauhöhenbereich messen zu können, wurden in den 70er Jahren drei Ausperltöpfe in etwa 14 m, 28 m und 42 m Tiefe unter Vollstau montiert. Das Umschalten der jeweiligen Messbereiche erfolgte von Hand vor Ort.

Die Notwendigkeit des Umbaus

Beim Umbau der Dammkrone aus Gründen der Freizeitnutzung im Sommer 2014 musste der Trassenverlauf der Messleitungen gekreuzt werden. Bei den Tiefbauarbeiten wurden alle drei Leitungen über eine große Distanz unplanmäßig zerstört. Eine ordnungsgemäße Wiederherstellung war nicht möglich. Lediglich der Anschluss der obersten Messglocke mit einem Messbereich von etwa 14 m unter Vollstau konnte provisorisch wieder in Betrieb genommen werden. Daher musste nach einer dauerhaften Lösung gesucht werden.

Es boten sich zwei Möglichkeiten an. Die Erste sah vor, die Messleitungen von Tauchern von der Ausperlglocke bis zum ersten Übergabeschacht (etwa 5 m unter Vollstau) komplett austauschen zu lassen. Die Zweite war ein ganz neues System mit direkter elektronischer Erfassung des Stauspiegels unter Wasser. Auch hierfür wären professionelle Taucher erforderlich.

Die Entscheidung fiel auf die zweite Lösung, da insbesondere das Ersetzen der Messleitung in rd. 40 m Tiefe sehr aufwändig gewesen wäre. Der Zustand der Ausperlglocken war ebenfalls unbekannt. Hinzu kam der vergleichbar hohe Wartungsaufwand von Druckluftpegeln gegenüber elektronischen Bauteilen.

Im November 2014 waren Taucherarbeiten an der Hennetalsperre zum Setzen von Revisionsverschlüssen an den Grundablässen geplant. In diesem Zusammenhang konnten die Taucherarbeiten wirtschaftlich kombiniert werden.

Bohrungen im Kontrollgang für die neue Messeinrichtung

Als Einbaustelle wurde der Kontrollgang des Dammes ausgewählt, in dem bereits verschiedene Messeinrichtungen, z.B. zur Überwachung der bituminösen Außendichtung sowie der Durchsickerung des Untergrundes, eingebaut sind. Die geplante Stauhöhenerfassung sollte nun vom Kontrollgang durch den Beton in den Stauraum eingebaut werden. Hierzu musste eine Bohrung durch die Kontrollgangwandung in das Staubecken vorgetrieben werden, in die das ausgewählte Messsystem, ein Druckmessumformer mit keramischer Messzelle vom Typ VEGABAR 82, eingebaut werden sollte. Die Arbeiten im Stauraum waren in 24 m Wassertiefe durchzuführen, wobei aus Redundanzgründen zwei Bohrungen, je mit einem Durchmesser von 100 mm, durch die Kontrollgangwandung vorzutreiben waren.

Wegen der Geometrie des Stollens und zur besseren Abdichtung der Kernbohrungen war es erforderlich, die Bohrungen in einem Winkel von 30° zur Lotrechten und mit einer Länge von 1 m durchzuführen. Dabei konnte die Bohrkronen im rechten Winkel aus dem Stollen austreten, was ein späteres Abdichten mit einem Pressring vereinfachen würde.

Die Kernbohrfirma durchbohrte die Betonwand problemlos von innen nach außen. Nach dem Durchtritt der Bohrkronen in den Stauraum konnte die Austrittsstelle freigelegt und von Sedimenten befreit werden. Um den Wassereintritt ins Stollensystem nach Entfernung des Bohrgerätes zu verhindern, wurde eine Holzplatte mit Gummidichtung von außen auf den Stollen aufgedübelt. Im Anschluss konnte das Bohrgerät im Stollen demontiert werden.

Nach der ersten Bohrung wurde sofort die zweite Bohrung durchgeführt. Abschließend wurde im Kontrollgang je eine Box zur äußeren Abdichtung des Bohrloches von Innen an die Stollenwandung geschraubt. Bis zu diesem Punkt verlief alles nach Plan.

Probleme beim Einbau

Im weiteren Verlauf sollte die außen liegende Holzplatte demontiert und das Messrohr (\varnothing 28 mm) von Tauchern bis zur Abdichtbox eingesteckt werden, wobei das Messrohr mit einem Pressring formschlüssig abgedichtet werden sollte. Hiernach wären die „nassen“ Arbeiten abgeschlossen gewesen.

Allerdings zeigten sich Probleme beim Lösen der außen liegende Holzplatte.

Die Abdichtbox, die an die Wölbung des Kontrollgangs angepasst war, wurde mit Moosgummistreifen gedichtet und acht Schwerlastankern gegen die Innenwand geschraubt. Nach Lösen der Holzplatte durch die Taucher verlagerte sich der Talsperrendruck auf die im Stollen befindliche Abdichtbox. Hier lösten sich die Moosgummidichtungen unter dem hohen Wasserdruck seitlich aus der Box. Ein weiteres Arbeiten war im Stollen aufgrund des Wassereintruchs kaum möglich. Die Taucher mussten die Kernbohrung wieder mit der Holzplatte verschließen. Zunächst wurde die Abdichtbox mit neuen Dichtungen aus Gummistreifen versehen. Leider brachte auch dies beim erneuten Abheben der äußeren Holzplatte keine Änderung. Erneut war der Wasserdruck so stark, dass er einen Teil der Dichtungstreifen seitlich herausdrückte und somit ein gefahrloses Durchstecken des Messrohres für die Taucher unmöglich machte.

Das grundlegende Problem war zu diesem Zeitpunkt, zwei Löcher im Kontrollgang einer Talsperre mit 38,4 Mio. m³ Wasservolumen wieder dicht zu bekommen.

Somit musste schnell eine neue Lösung gefunden werden.

Lösung der Einbauprobleme

Von Innen wurde ein Stück Messrohr (\varnothing 28 mm) mit Außengewindeanschluss bis etwa 30 cm vor die Holzplatte eingesteckt und mit einem doppelten Pressring in 60 cm Tiefe im Bohrloch verpresst (s. Abbildung 2). Hierbei konnte auch die geringe Menge des Leckagewassers, das an der Holzplatte vorbeiströmte, durch das Messrohr abfließen. Danach wurde ein weiteres kurzes Stützrohr (\varnothing 60 mm) über das Messrohr gestülpt, gegen den doppelten Pressring geschoben und am Beginn der Kernbohrung nochmals mit einem Pressring verschraubt. Somit konnte der spätere Wasserdruck auf zwei Pressringe verteilt werden.

An der Stolleninnenwand wurde das Stützrohr zusätzlich durch zwei Querriegel an der Innenwand gesichert. Nach der Montage eines Kugelhahns an der Messleitung war das System auf der Kontrollstollenseite dicht. Anschließend füllte sich allmählich das Rohrsystem mit dem Leckagewasser, was durch kurze Öffnung des Kugelhahns überprüft werden konnte.

Die Taucher konnten nun die Holzplatte gefahrlos abheben.

Mit einer Säge entfernten die Taucher um die Bohrung herum den Verschleißbeton, der auf dem Kontrollgang aufgebracht war, bis zur bituminösen Schicht, um einen Auflagepunkt für die äußere Verrohrung vorzubereiten. Das zweite Stück Messrohr wurde von außen auf das Außengewinde des bereits verbauten ersten Messrohres aufgeschraubt. Hierbei dichtete ein dritter Pressring mit breitem Flansch sowohl von oben gegen die bituminöse Schicht als auch in der Bohrung gegen den Betonstollen. Somit war die Rohrdurchführung an drei Stellen gesichert und wasserdicht verschlossen.

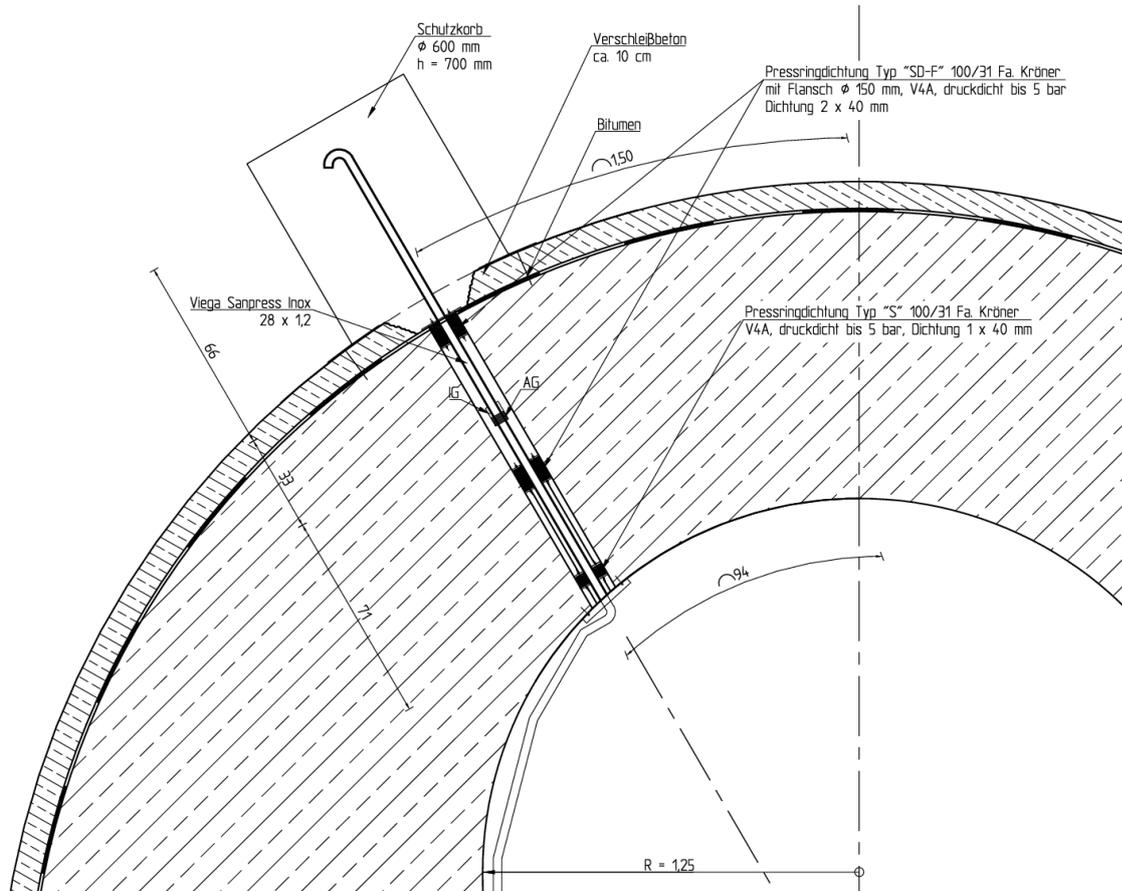


Abbildung 2: Zeichnung der Einbausituation der Stauhöhenmessung

Der vorher entfernte Verschleißbeton zum Schutz der bituminösen Schicht wurde wieder mit einem speziellen Unterwasserbeton verschlossen und das Messsystem gegen herab rutschende Gesteinsbrocken und Sedimente mit einem Schutzkorb gesichert.

Die ursprüngliche Planung war von einem Tauchereinsatz an zwei Tagen ausgegangen. Aufgrund der Vielzahl von Schwierigkeiten und der effektiven Tauchzeit von maximal 30 Min. je Taucher ergab sich letztlich ein Aufwand von fünf Tagen.

Nach Fertigstellung der Taucherarbeiten wurde das Messsystem im Stollen abschließend verrohrt. Hierbei wurde auch ein zweiter Kugelhahn mit Spülmöglichkeit in jedes Rohrsystem verbaut, um ein Versotten der Leitung zu verhindern.

Der Druckaufnehmer wurde elektrisch angeschlossen. Er misst den Wasserdruck der Talsperre sowie gleichzeitig den im Kontrollgang herrschenden Luftdruck und errechnet daraus den Wasserstand in der Talsperre (s. Abbildung 3)

Ein Schaltschrank mit Auswerteeinheit und Anzeige am Eingang zum Kontrollgang an der Dammkrone erleichtert die wöchentliche Pegelkontrolle.

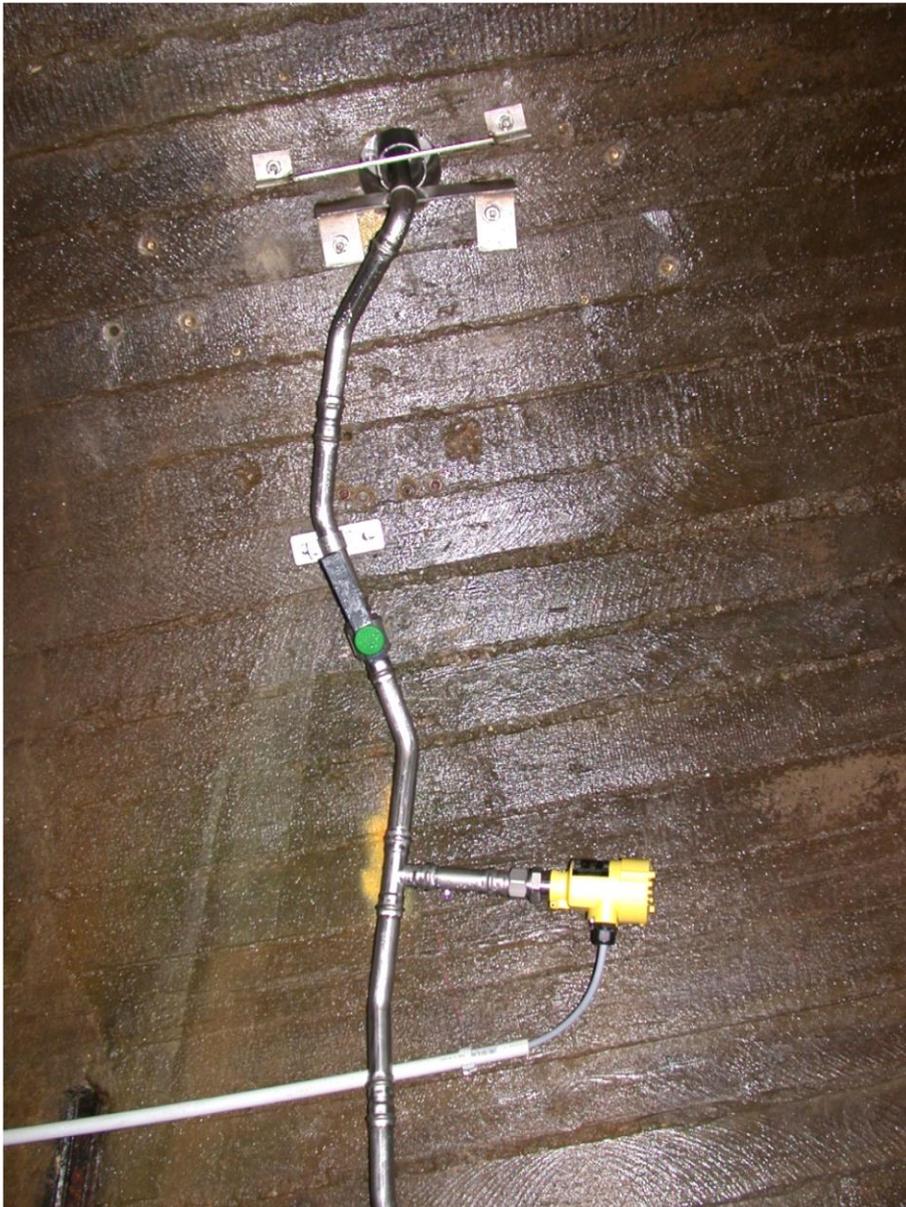


Abbildung 3: Messeinrichtung an der Wandung des Kontrollgangs

Weitere Korrekturen bei der Inbetriebnahme

In den ersten Wochen wurde die Messeinrichtung parallel zur alten, provisorisch instandgesetzten, obersten Messglocke betrieben. Hierbei zeigte sich bei einer Absenkung der Talsperre um etwa 2 m eine Differenz zwischen beiden Messeinrichtungen von 18 cm.

Als Ursache für diese Abweichung wurde der Luftdruck im Stollensystem ausgemacht. Durch die verschiedenen Zugänge zum Kontrollgang an der Dammkrone und am Dammfuß wirkt der Stollen wie ein Kamin und kann keinen wirklichen Bezug zum Außenluftdruck herstellen. Es war also erforderlich, den Luftdruck am oberen Eingangsbauteil zu messen und weiterhin den Wasserdruck im Stollen zu erfassen. Dazu musste eine zweite (Luft-)Drucksonde am Eingang zum Kontrollgang angeschlossen werden. Die bereits

verwendete Auswerteinheit übernimmt nun die Differenzdruckmessung von Luft und Wasserdruck und ermittelt somit die wahre Stauhöhe. Seit der Inbetriebnahme der getrennten Erfassung der Drücke ist der Stauspiegel um 4 m gesunken. Eine Abdrift zur Pegellatte ist nicht mehr zu bemerken.

Daher konnte die neue Stauhöhenmessung an der Hennetalsperre zum 1.7.2015 in den Regelbetrieb übergehen.

Wem sollen wir glauben? Ein Wegweiser zum „wahren“ Wasserstand

Christoph Brügger¹, Martin Brinkmann¹, Roland Funke¹

¹Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW,
christoph.bruegger@lanuv.nrw.de, martin.brinkmann@lanuv.nrw.de, roland.funke@lanuv.nrw.de

Der Wasserstand als eine der wichtigsten Eingangsmessgrößen in der Hydrometrie

Einleitung

Bereits seit Jahrtausenden werden Wasserstände gemessen, um hydrologische Grundlagendaten zur Nutzung des Wassers oder zur Abwendung von Schäden zu erhalten. Noch heute ist die wichtigste Einrichtung eines Pegels die Pegellatte. Nur mit einer intakten und in ihrer Lage regelmäßig geprüften Pegellatte können alle darauf aufbauenden kontinuierlich aufzeichnenden Geräte zuverlässige Daten erheben.

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich die verfügbare Messtechnik und die Datenverarbeitung in immer schnellerem Tempo entwickelt. Gleichzeitig hat sich die Anzahl der Hydrologen in Behörden und Verbänden erheblich reduziert.

Inzwischen sind die meisten Pegel mit modernster Messtechnik ausgestattet und die dort erhobenen Wasserstände stehen unmittelbar nicht nur an den hydrologischen Facharbeitsplätzen, sondern auch der interessierten Öffentlichkeit auf verschiedenen Internetplattformen zur Verfügung.

Während in der Vergangenheit der Wasserstand der kontinuierlich aufzeichnenden Geräte eines Pegels gemäß Pegelvorschrift (LAWA 1997) regelmäßig mehrmals wöchentlich von Pegelbeobachtern mit dem Lattenpegelstand abgeglichen wurde, erlaubt die aktuelle Technik eine Fernüberprüfung der Messdaten. Dadurch können die Intervalle am Pegel auf eine monatliche Kontrolle vergrößert werden.

Die unterschiedlichen Sensoren und Messprinzipien, die zur Erfassung der Wasserstände (W) eingesetzt werden, haben bei guten Messbedingungen Genauigkeiten, die unter der von der Pegelvorschrift geforderten Genauigkeit von 1 cm liegen. Dennoch werden im täglichen Messbetrieb immer wieder Abweichungen zwischen W-Gebern und Pegellatte bzw. verschiedenen W-Gebern eines Pegels festgestellt werden, die mitunter deutlich größer als 1 cm betragen (Beispiel in Abb. 1).

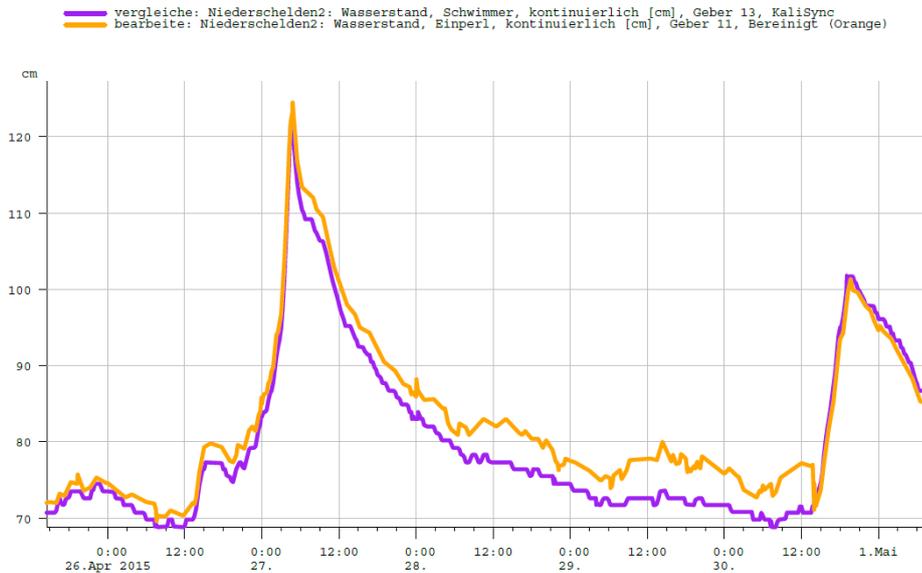


Abbildung 1: Abweichende W-Geber (ocker:Einperlsensor , lila: Schwimmer mit Winkelkodierer)

Ziel der vorliegenden Ausarbeitung

Regelmäßige Abweichungen der W-Geber einer Messstelle sollten dauerhaft nicht akzeptiert werden, da sie sowohl den Betriebsaufwand am Pegel als auch den Korrekturaufwand der mehr oder weniger fehlerhaft aufgezeichneten Daten erhöht. Auf der anderen Seite werden durch ständiges Nachjustieren der W-Geber vor Ort die vorhandenen systematischen Abweichungen kaschiert. Somit erschwert sich die Suche nach den Ursachen in der werktäglichen Betriebskontrolle.

Da heutzutage die Rohdaten der Pegel in operativen Modellen z.B. zur Hochwasservorhersage verwendet werden und diese als zeitnah veröffentlichte Pegeldata via Internet auch immer mehr Beachtung in der (Fach-) Öffentlichkeit finden, sollte in der Hydrometrie auf eine hohe, dem Zweck angepasste Rohdatenqualität hingearbeitet werden.

In der vorliegenden Kurzfassung zum Vortragsthema werden einzelne exemplarische Beispiele für unsichere W-Aufzeichnungen gezeigt. Darüber hinaus werden Möglichkeiten zur Fehlerbehebung und zur Verbesserung der Rohdatenqualität genannt.

Jedes Messprinzip hat seine Stärken und Schwächen

Beispiel 1: Probleme mit undichten Schwimmerschächten und Zulaufleitungen

Das älteste Messprinzip zur kontinuierlichen Erfassung des Wasserstandes ist der Schwimmerpegel. Probleme treten am Schwimmerpegel insbesondere dann auf, wenn der Wasserstand im Gewässer nicht mehr ungestört mit dem Wasserstand im Schwimmerschacht korrespondieren kann. Dies ist oftmals der Fall, wenn sich nach größeren HW-Ereignissen Feststoffe im Schacht/Zulaufsystem ablagern.

Es kann davon ausgegangen werden, dass jeder Pegelschacht und jede Zulaufleitung mehr oder weniger undicht ist. Je größer die Undichtigkeiten des Schacht/Zulaufsystems, desto intensivere Wechselwirkungen mit dem Grundwasser in der Umgebung des Pegels sind zu erwarten.

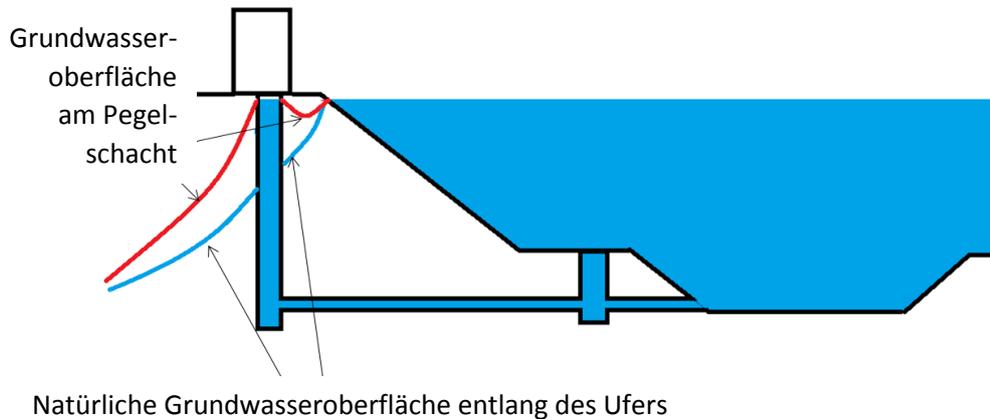


Abbildung 2: Undichtiges Schacht-/Rohrsystem bei anlaufendem Hochwasser

Je größer der Unterschied zwischen Grundwasseroberfläche am Pegelschacht und dem Wasserstand im undichten Pegelschacht ist, desto größer ist bei einem anlaufendem Hochwasser der Zustrom von Schachtwasser ins Grundwasser (Abbildung 2). Beim ablaufendem Hochwasser fließt dem Schacht in umgekehrter Richtung Grundwasser incl. der ausgeschwemmten Feststoffe zu (Abbildung 3).

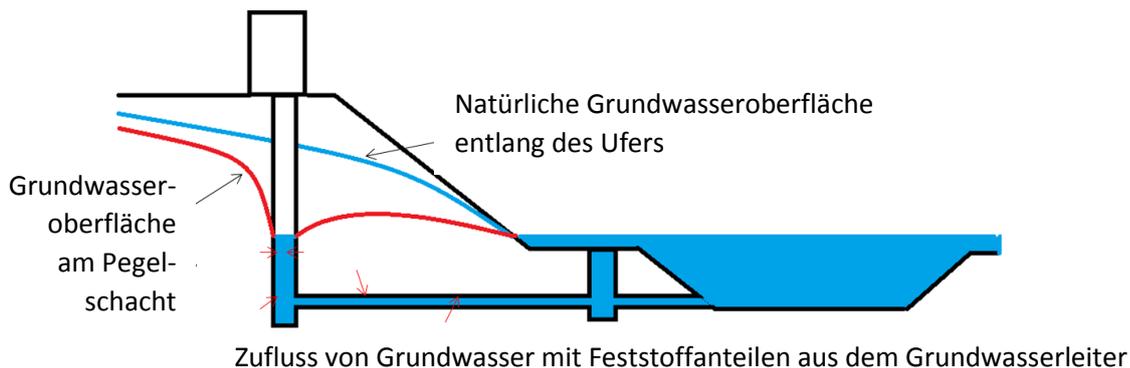


Abbildung 3: Undichtiges Schacht-/Rohrsystem bei ablaufendem Hochwasser

Mit dem Grad der Undichtigkeit nimmt dann auch der Feststoffanteil im zufließenden Grundwasser zu. Diese Feststoffanteile setzen sich regelmäßig im Schacht-/Rohrsystem ab und können es regelrecht verstopfen. Dabei wird die Umgebung des Schachtes und des Zulaufrohres mit jedem Hochwasser immer stärker „ausgeschwemmt“. Über die Jahre verstärkt sich dieser Prozess. Durch unsachgemäßes Hoch- und Überdruckspülen wird dieser Prozess ebenfalls verstärkt. An einigen Messstellen konnte schon beobachtet werden, dass bei vollgefülltem Schacht und verschlossenem Zulaufrohr das Wasser aus der Böschung austrat. Solche Schächte sind in der Regel unbrauchbar, weil sie im Hochwasserfall regelmäßig fehlerhafte Daten liefern.

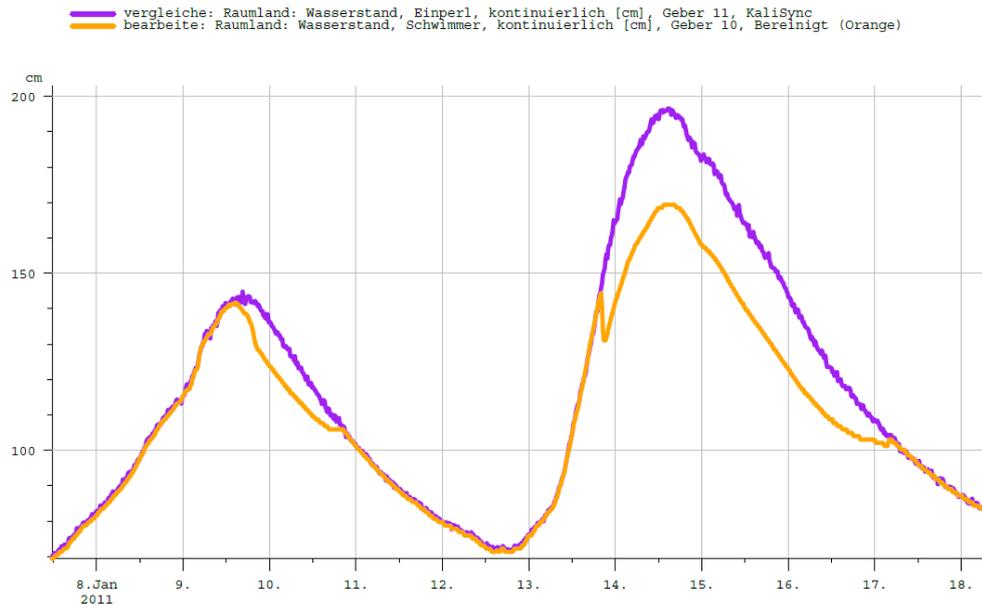


Abbildung 4: W-Ganglinien an einem Pegel mit defektem Schacht-/Rohrsystem (lila: unbeeinflusster Einperl-Sensor, ocker: durch Grundwasser beeinflusste Messwerte des Schwimmersystems)

Beispiel 2: Unzureichende Temperaturkompensation von Drucksonden

Bei Drucksonden kann unter Umständen eine unzureichende Temperaturkompensation des Messsignals beobachtet werden. Aktuell wird im LANUV untersucht, ob dabei die Umgebungstemperatur des Messsignalkabels eine ursächliche Rolle spielt.

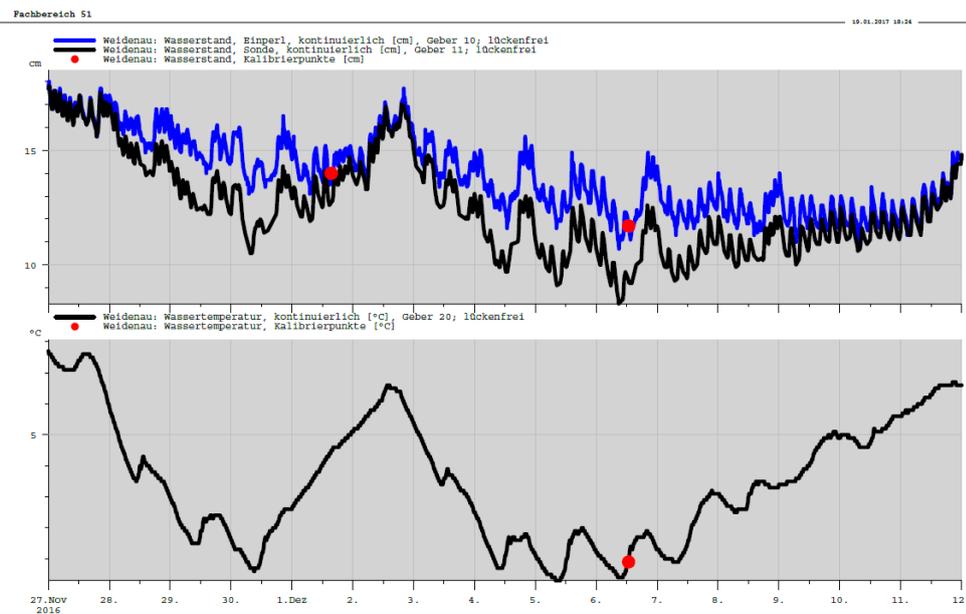


Abbildung 5: Darstellung zweier abweichender W-Ganglinien und der Wassertemperaturganglinie (oben blau: Einperlsensor; schwarz: Drucksonde mit zunehmenden Abweichungen unterhalb 6°C Wassertemperatur, unten Wassertemperatur)

Wem sollen wir glauben – Welches ist der richtige Wasserstand?

Das Mehr-Geber Prinzip

Bestand bisher nur zu den Kontrollterminen mit Ablesung des Lattenpegels eine Möglichkeit der Überprüfung der kontinuierlich aufgezeichneten Messwerte, bieten sich durch die redundante Ausstattung der Messstellen und die aktuelle Übertragung der Daten weitere Möglichkeiten. Mit zwei Gebern, möglichst mit unterschiedlichen Messprinzipien (diversitär redundant) wird die „Online“-Prüfung der Ganglinien ermöglicht, so dass systematische Abweichungen kurzfristig erkannt und nach Identifikation der Ursache beseitigt werden können. Weiterhin erscheint es dabei sinnvoll, die Geber vor Ort möglichst ohne stetiges Nachjustieren laufen zu lassen, um nicht eine falsche Genauigkeit für genau eine Wasserstandsganglinie vorzutäuschen.

In den vergangenen Jahren wurde durch das LANUV an einigen Pegeln, an denen regelmäßig abweichende Wasserstände der redundanten Geber festgestellt wurden, die Ursachenforschung intensiviert. Ist die Abweichung nicht eindeutig einem der beiden Geber zuzuordnen, kann die (temporäre) Installation eines zusätzlichen 3. Gebers von großem Vorteil sein. Messen 2 Geber eines Pegels weitgehend gleiche Wasserstände, deutet dies in den meisten Fällen auf die Ursache der Abweichung im 3. Geber hin.

Im Regelbetrieb bieten 2 Geber plus Kontrollwerte des Lattenpegels umfangreiche Möglichkeiten zur zuverlässigen automatisierten (Vor-) Plausibilisierung der Messdaten. Im Falle dauerhafter, signifikanter und nicht behebbarer Abweichungen ermöglicht ein 3. Geber erweiterte Möglichkeiten durch Vergleichsroutinen. Das Mehr-Geber-Prinzip führt somit neben der höheren Ausfallsicherheit auch zu einer höheren Datenqualität und liefert damit in der Folge belastbarere Ergebnisse aus operativen Anwendungen wie z.B. Hochwasservorhersagemodellen.

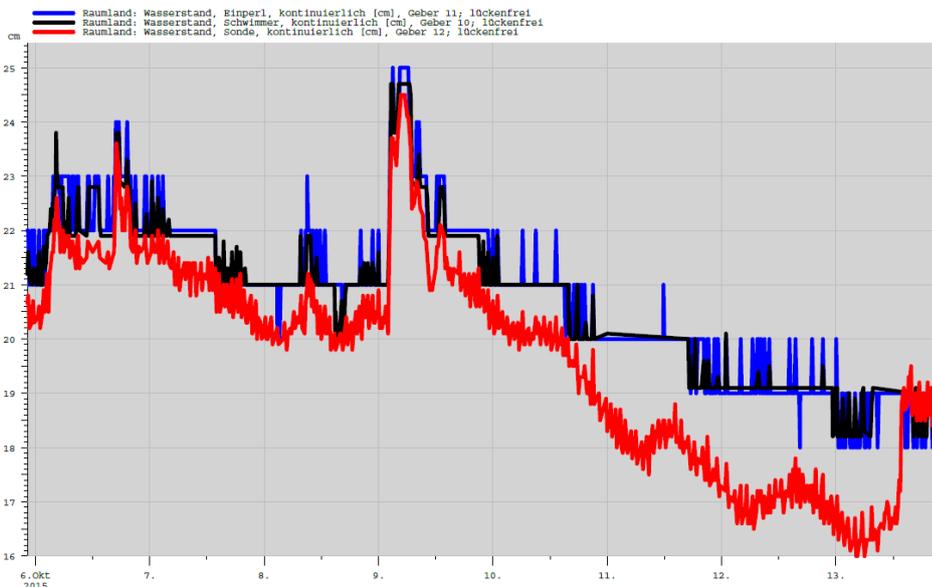


Abbildung 6: Beispiel für die Eignung eines „3-Geber Pegels“ zur besseren Rohdaten – Vorplausibilisierung.

Literatur

LAWA (1997): Pegelvorschrift Stammtext, 4. Überarbeitete Auflage (Hg.): Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Bundesministerium für Verkehr (BMV) Berlin und Bonn 1997

Systematische Vergleiche von Abflussmessungen – Optimierungsansätze durch Kombinationsmöglichkeiten

Fabian Netzel¹, Christoph Mudersbach¹ und Marc Scheibel²

¹Hochschule Bochum, Lehrgebiet Wasserwesen, fabian.netzel@hs-bochum.de

²Wupperverband, Wassermengenwirtschaft & Hochwasserschutz, schei@wupperverband.de

Einleitung

Abflussmessungen stellen die Grundlage für eine Vielzahl wasserwirtschaftlicher Aufgabenstellungen dar. Verschiedenste Bemessungsansätze und wasserwirtschaftliche Fragestellungen basieren auf den gemessenen hydrometrischen Kenngrößen, Wasserstand und Abfluss (Morgenschweis 2010). Ergänzend zu den genannten Planungsaufgaben ermöglichen die generierten Messwerte eine effektive und nachhaltige Bewirtschaftung des zur Verfügung stehenden Wassers und sind im Nachgang grundlegend für die Bewertung und das Monitoring einer jeden Maßnahme (ISO 2007). Um die mittels verschiedener Messsysteme generierten Daten zu überprüfen, wurden in Zusammenarbeit mit dem Wupperverband an mehreren Pegelmessstellen Messkampagnen mit unterschiedlichen Messsystemen (u.a. hydrometrischer Flügel, Radar- und ADCP-Systeme) durchgeführt und diese im Anschluss systematisch miteinander verglichen. In einem weiteren Schritt erfolgte eine detaillierte Untersuchung der Verteilung der Fließgeschwindigkeiten und der durchflossenen Querschnittsfläche. Darauf aufbauend wurden mögliche Kombinationen der zur Verfügung stehenden Messtechniken untersucht, um diese zu optimieren und eingangs festgestellte Abweichungen zu minimieren.

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die Ergebnisse aus den einzelnen detaillierten Untersuchungsschritten einer Messkampagne gegeben, woraufhin zwei Messsysteme miteinander kombiniert und erneut ausgewertet werden. Das Augenmerk richtet sich bei den hier vorgestellten Vergleichen und Kombinationsmöglichkeiten auf die Radar-Messtechnik (k-Faktoren). Es werden die Ergebnisse einer Messkampagne am Pegel Hummelsheim dargestellt.

Datengrundlage

Als Datengrundlage werden die Rohdatensätze der jeweiligen Messsysteme oder Auswertungen aus den zugehörigen Softwareprodukten verwendet. Um einen einheitlichen Vergleich der ADCP-Daten mit den parallel durchgeführten Systemen zu ermöglichen, erfolgte für die durchgeführten ADCP-Messungen zusätzlich eine Nachbearbeitung mit der Software AGILA (Projektion der gemessenen Querschnittsgrößen aus der Überfahrt auf einen aus der Hauptströmung resultierenden Bezugsquerschnitt (Adler, Nicodemus 2012)). Weiter wurden für die jeweiligen Messkampagnen charakteristische Pegelmessstellen ausgewählt, um die erzielten Ergebnisse gegebenenfalls auf ähnliche Messstellen übertragen zu können. Unterscheidungsmerkmale sind beispielsweise die Sohlbeschaffenheit (befestigt – unbefestigt), die Gewässerbreite und die Fließtiefe bzw. der mittlere Wasserstand. Die Abflussmessungen mit den genannten Systemen erfolgten dann in Abhängigkeit der örtlichen Verhältnisse wie Wassertiefe, Gewässerbreite, etc. und sofern möglich simultan oder unmittelbar hintereinander.

Methodik

In einem ersten, den Untersuchungen vorangegangenen Schritt wurden die eingesetzten Systeme zur Abflussmessung hinsichtlich der Größen Wasserstand w , Gesamtabfluss Q , durchflossene Querschnittsfläche A und mittlere Fließgeschwindigkeit im Messquerschnitt v_m verglichen. In einem zweiten Schritt wurden daraufhin die Geschwindigkeitsverteilungen der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m und der Oberflächenfließgeschwindigkeit v_o über den Messquerschnitt für die eingesetzten Systeme dargestellt. Weitergehend wurde der Messquerschnitt analog zu der im Zuge der Radarmessung vorgenommenen Stationierung des Radarsensors über dem Gewässer in verschiedene Sektoren unterteilt. Für jeden dieser Sektoren erfolgte anschließend die Darstellung von v_m und v_o , entsprechend gemittelt über die Breite für jeden Sektor. Die Messergebnisse wurden erneut miteinander verglichen. Abschließend wurden ergänzend dazu die durchflossenen Querschnittsflächen, resultierend aus dem angewendeten Messsystem, gegenübergestellt.

Mit den so gewonnenen Informationen erfolgte eine Überprüfung und gegebenenfalls Korrektur der bei der Radarmessung angesetzten k -Faktor zur Umrechnung der gemessenen Oberflächenfließgeschwindigkeit in die mittlere Fließgeschwindigkeit sowie des hinterlegten Querprofils zur Bestimmung des Gesamtabflusses und der Teilabflüsse für jeden Sektor. Nach erfolgter Überprüfung oder Korrektur wurde die Radarmessung erneut ausgewertet und mit den parallel durchgeführten Abflussmessungen hinsichtlich der Kenngrößen Q , A , und v_m verglichen.

Ergebnisse

Bei der Darstellung der mittleren Fließgeschwindigkeit v_m und Oberflächenfließgeschwindigkeit v_o für die eingesetzten Systeme Radar, ADCP und hydrometrischer Flügel (vgl. Abbildung 1) liegen unterschiedlich große Abweichungen für die Kern- und Randbereiche des Messquerschnitts am Pegel Hummelsheim vor. Es lassen sich für die Oberflächenfließgeschwindigkeiten v_o geringere Abweichungen für die Randbereiche als im Kernbereich feststellen. Hinsichtlich der v_m -Verteilung weist die Radarmessung tendenziell niedrigere Geschwindigkeitswerte als die Flügel- und ADCP-Messung auf (vgl. Abbildung 1, oben).

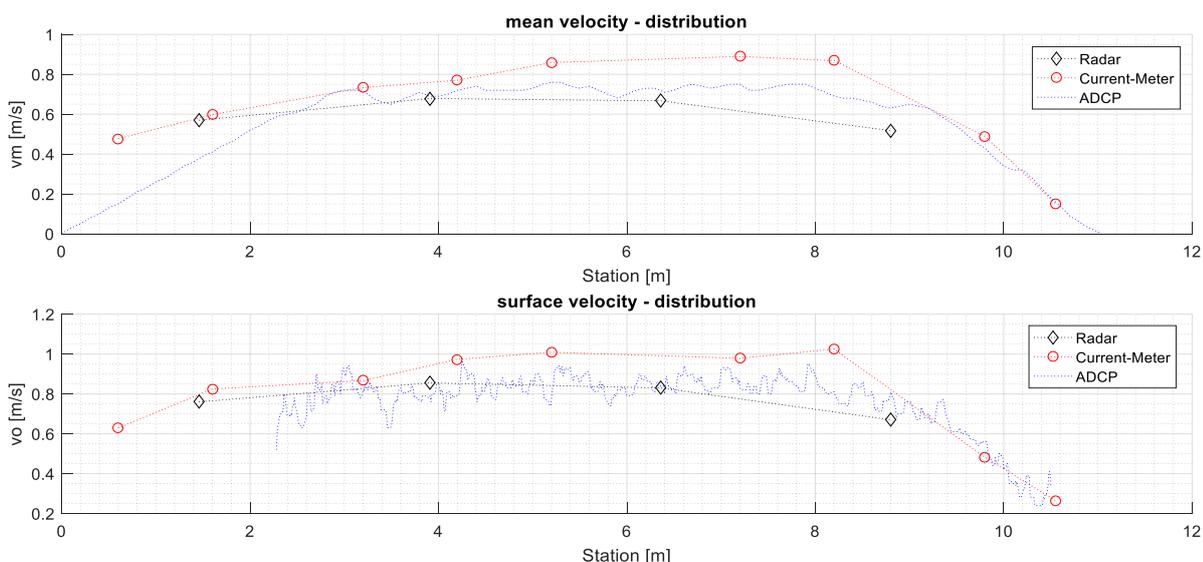


Abbildung 1: v_m - und v_o -Verteilung am Pegel Hummelsheim aus Radar-, Flügel- und ADCP-Messung

Um einen direkten Vergleich zur Radarmessung durchführen zu können, erfolgte im zweiten Schritt die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeiten und Oberflächenfließgeschwindigkeiten, bezogen auf die Stationierung der Radarmessung ($v_{m,station}$ und $v_{o,station}$). Abbildung 2 zeigt die resultierenden Geschwindigkeitsverteilungen. Die Werte in den Randbereichen stimmen für Radar- und Flügelmessung gut überein, wohingegen die Messwerte im Kernbereich (Station 2 und 3) sowohl für $v_{m,station}$ (vgl. Abbildung 2, oben) als auch für $v_{o,station}$ (vgl. Abbildung 2, unten) stärker voneinander abweichen. Im linken Randbereich liegt zudem eine starke Abweichung der ADCP-Daten gegenüber der Systeme hydrometrischer Flügel und Radar vor. Hier ist zu beachten, dass dieser Bereich aus den Messzellen des Kernbereiches extrapoliert wurde und somit nicht durch Messwerte gestützt ist. Durch eine Anpassung bzw. Erhöhung der k-Faktoren für den Kernbereich der Abflussmessung, können die Abweichungen der mittleren Fließgeschwindigkeit ($v_{m,station}$) minimiert werden.

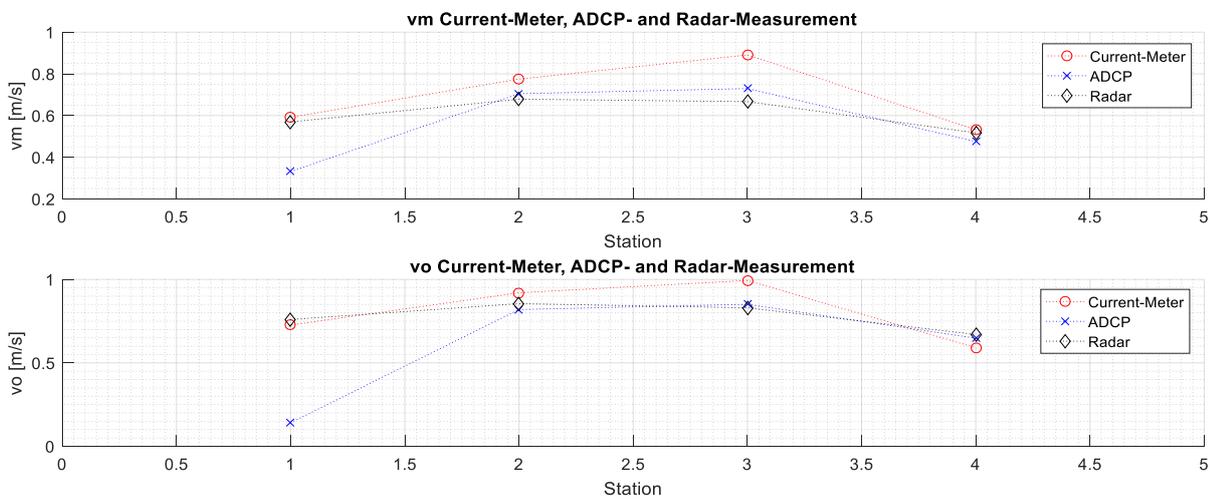


Abbildung 2: $v_{m,station}$ - und $v_{o,station}$ -Verteilung am Pegel Hummelsheim aus Radar-, Flügel- und ADCP-Messung

Der zur Umrechnung der gemessenen Oberflächenfließgeschwindigkeit in die mittlere Fließgeschwindigkeit benötigte, messstellenspezifische k-Faktor ist Abhängig von der gegebenen Profilgeometrie (Sommer GmbH 2013, Morgenschweis 2010). Ergänzend zu den vorangegangenen Untersuchungen wurden daher die jeweils während einer Messung ermittelten und im Messsystem hinterlegten Querprofildaten gegenübergestellt. Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen Messprofile für die jeweiligen Systeme zur Abflussmessung. Auffällig sind die deutlichen Unterschiede der Systeme in den Randbereichen (Stationierung 0 – 2,00 m und 8,00 – 11,50 m). Für den Abschnitt zwischen Stationierung 2,00 – 8,00 m wird das vorliegende Profil durch die eingesetzten und hier dargestellten Systeme gut abgebildet.

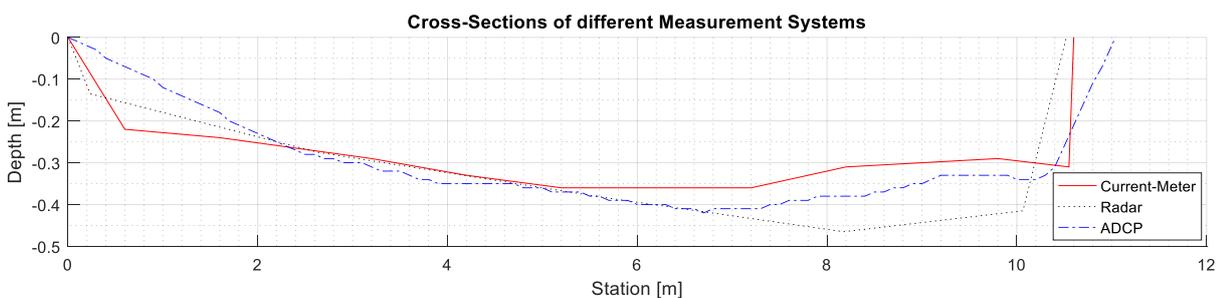


Abbildung 3: Vergleich der durchflossenen Querprofile am Pegel Hummelsheim

Die systematischen Vergleiche der durchflossenen Querschnittsfläche A zeigten bereits Abweichungen der Radarmessung zur durchgeführten Flügelmessung von 15 % (10 % zur ADCP-Messung). Ebenfalls in den nicht extrapolierten Messbereichen der ADCP-Messung weicht die Radarmessung deutlich von dem dargestellten Profil ab. Zusätzlich zu einer Anpassung der k -Faktoren wurde daher das hinterlegte Querprofil der Radarmessung mittels der Flügelmessung korrigiert und diese erneut ausgewertet.

Abbildung 4 zeigt die stationsbezogenen Geschwindigkeitsverteilungen und beinhaltet die neu berechnete Radarmessung mit angepassten Faktoren und korrigiertem Querprofil. Durch eine Erhöhung der k -Faktoren wurden insbesondere die v_m -Werte im Kernbereich den parallel durchgeführten Abfluss- bzw. Geschwindigkeitsmessungen angepasst. Infolge der ebenfalls korrigierten Querschnittsfläche wurden die k -Faktoren für die Randbereiche ebenso leicht erhöht (vgl. Abbildung 4).

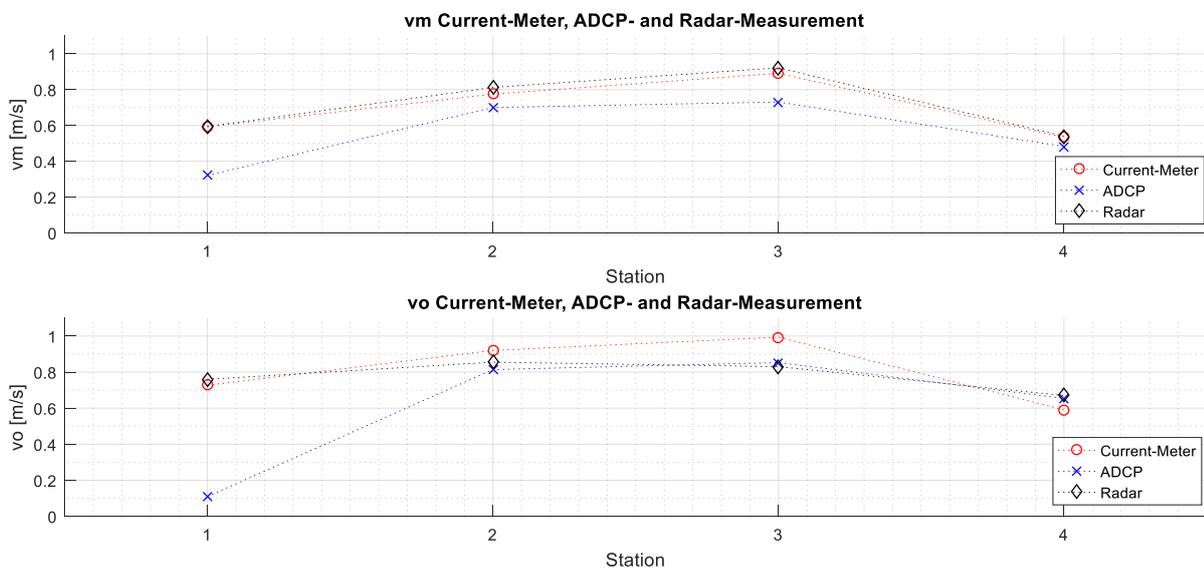


Abbildung 4: $v_{m,station}$ - und $v_{o,station}$ -Verteilung mit angepasster Radarmessung Pegel Hummelsheim

Die Ergebnisse des abschließenden, erneuten systematischen Vergleichs für die durchflossene Querschnittsfläche A , den Gesamtdurchfluss Q und die mittlere Fließgeschwindigkeit v_m zeigt die nachfolgende Tabelle 1. Die Abweichung der Radarmessung gegenüber der durchgeführten Flügelmessung als Referenzgröße konnte durch eine Anpassung der k -Faktoren sowie des durchflossenen Querprofils von 10 – 21 % auf 7 % verringert werden.

Tabelle 1: Systematischer Vergleich der Radarmessung

	A	Q	v_m
	Referenzgröße Flügel		
vor Anpassung	15 %	10 %	21 %
mit Anpassung	0 %	6 %	7 %

Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge vergleichender und ergänzender Abflussmessungen wurden an unterschiedlichen Pegeln Messkampagnen mit verschiedenen Systemen durchgeführt. Ein vorangegangener, systematischer Vergleich der Größen A , Q und v_m und die dabei festgestellten Abweichungen der einzelnen Systeme untereinander haben Anlass zu einer detaillierten Betrachtung der Messgrößen gegeben. Diese wurden in den hier

vorgestellten Untersuchungen insbesondere für die durchgeführte Radarmessung überprüft. Durch Vergleiche der mittleren Fließgeschwindigkeiten v_m und Oberflächenfließgeschwindigkeiten v_o für definierte Abschnitte der durchflossenen Querschnittsfläche und eine anschließende Anpassung der k-Faktoren und des Messprofils konnten die Abweichungen zwischen den zu untersuchenden Parametern deutlich verringert werden.

Die hier vorgestellten Ergebnisse resultieren aus einer Messkampagne am Pegel Hummelsheim. Dieser weist ein Messprofil mit bewegter Sohle und nur durch Steinschüttungen befestigte Ufer auf. Aus den großen Abweichungen, insbesondere bei der Bestimmung der durchflossenen Querschnittsfläche, lässt sich zunächst ableiten, dass vor allem bei Pegelmessstellen mit sich möglicherweise veränderndem Messquerschnitt eine regelmäßige Überprüfung und unter Umständen Berichtigung des hinterlegten Profils sowie der k-Faktoren erforderlich ist. Die Korrektur kann sowohl für berührungslos arbeitende Radarmessungen, als auch für stationäre Systeme ohne direkte Erfassung des Messquerschnitts, wie Ultraschalllaufzeitanlagen, erfolgen. Weiter zeigen die Untersuchungen, dass durch die Kombination und den zeitgleichen Einsatz unterschiedlicher Messtechniken und damit verbundenen Korrektur- und Anpassungsverfahren eine signifikante Abnahme der Messabweichungen und damit eine deutliche Zunahme der Messgenauigkeit erzielt werden kann. Hinsichtlich der Kombinationsmöglichkeiten zwischen den einzelnen Messsystemen sind dabei verschiedene Zusammenstellungen möglich.

Es bedarf zusätzlich zum Vergleich der einzelnen zu kombinierenden Messsysteme auch einer Qualitätsbewertung des Messsystems selbst. So geben beispielsweise die Anzahl der Messlotrechten über die Gewässerbreite, die Messdauer zur Bestimmung der Punktgeschwindigkeit, Uferabstände, die Größe der Extrapolationsbereiche und weitere Randbedingungen zusätzlich Aufschluss über die Qualität der angewendeten und zu kombinierenden Messtechniken.

Als Ausblick sollen im Zuge weiterer Untersuchungen sowohl alternative Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Messsysteme geprüft und ausgewertet werden als auch eine erweiterte Bewertung von unterschiedlichen Systemen zur Abflussmessung erfolgen.

Literatur

- Adler, M., Nicodemus, U. (2012). Benutzerhandbuch. AGILA 7. Programm zum Auswerten und Archivieren von ADCP-Messungen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- ISO (2007). "Hydrometric Uncertainty Guidance" (HUG), ISO/TS 25377:2007, International Organisation of Standardization, Genf.
- Morgenschweis, G. (2010). Hydrometrie. Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen, Springer.
- Sommer GmbH (2013). RP-30 Radar Profiler. Mobiles Abfluss-Messsystem. Benutzerhandbuch. Ausgabe Oktober 2013, Koblach, Österreich.

Überprüfung der Extremwerte von Pegelschlüsselkurven mit 2D-Simulation

Alpaslan Yörük^{1,2}

¹Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes Lehrgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, alpaslan.yoeruek@htwsaar.de

²Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, a.yoeruek@hydrotec.de

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 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.).

Für die Bemessung von Bauwerken, die Ermittlung von Überflutungsflächen etc. ist dieser Wertebereich jedoch 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.

Modellerstellung

Das zweidimensional rechnende hydrodynamisch-numerische Modell HYDRO_AS-2D (Hydrotec/Nujic, 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.

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). Daher ist zumindest der Pegelbereich mit dichteren Profilabständen zu vermessen, um eine höhere Geometrieinformation zu erhalten.

Oftmals liegen schon 2D-Modelldaten des Gewässers vor. Sie bieten den Vorteil großräumig vorliegender Modellergebnisse (zumeist HQ100 und HQextrem), aus denen evtl. auftretende Pegelumläufigkeiten direkt erkennbar sind. Weiterhin liefern sie Hinweise darauf, welche Fläche sinnvollerweise für das Pegelmodell zu wählen ist.

Die gekürzten Bestandsmodelle sind auf die folgenden Aspekte zu prüfen:

- 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 aus Laserscandaten zu erstellen, sind die Modellflächen auch hier möglichst gering zu wählen, um die Simulationszeiten und die Aufwände für die Vermessung und Modellierung zu minimieren.

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

Sensitivitätsuntersuchung und Modellkalibrierung

Im Rahmen der Sensitivitätsstudie werden die im Vorfeld zugewiesenen Rauheitsparameter in einem plausiblen Bereich variiert (zumeist +/- 20 %, tlw. getrennt für Flussnetz und Vorland). Dadurch lässt sich der Einfluss der Sohlbeschaffenheit 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.

Vor den Kalibrierungsrechnungen sind die vorliegenden W/Q-Messwerte zu analysieren und zu prüfen. Folgende Fragestellungen sind dabei von großer Bedeutung:

- Stimmt der Standort des Pegels (Wasserstandszeichnung) mit dem Standort der Abflussmessung überein?
- Wie groß ist der jahreszeitliche Einfluss auf die Abflusskurve?
- Wie aktuell sind die Messwerte?
- Ist der Pegel umläufig?
- Wie genau ist die Messung?

Zur Modellkalibrierung wird das 2D-Modell mit den gemessenen Abflusswerte beaufschlagt und die simulierten Wasserstände den gemessenen gegenübergestellt. Hierbei beschränkt man sich primär auf eine definierte Anzahl von Messwerten im Hochwasserbereich. Ein Beispiel zeigt die Abbildung 1, in der die höchsten 5 Messwerte betrachtet wurden und die Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Wasserstand unter 0,06 m liegt.

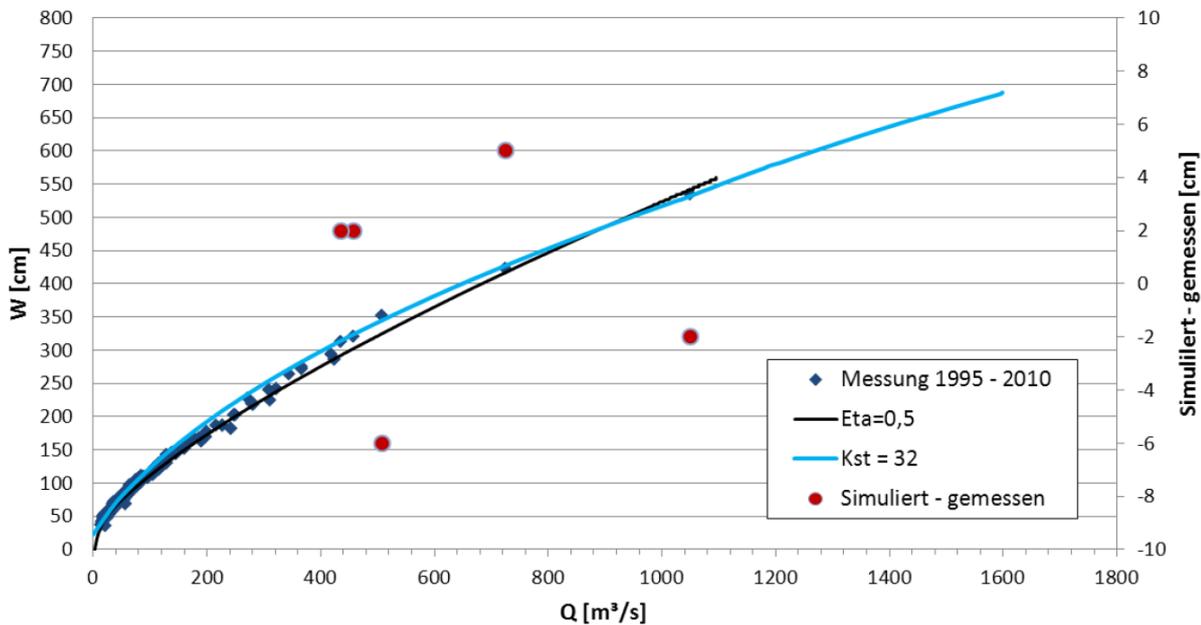


Abbildung 1: Modellkalibrierung anhand von 5 Hochwasserereignissen. Die blauen Punkte und Kurven beziehen sich auf die Primärachse, die roten Punkte auf die Sekundärachse.

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.

Ergebnisse und Fazit

Erfahrungen zeigen, dass ein bestimmter Teil der extrapolierten Abflusskurven mit wenig Abweichung bestätigt werden kann, während bei mehr als 50 % der Pegel die berechneten und die extrapolierten Abflusskurven signifikant voneinander abweichen.

Dabei zeigen sich Fälle, in denen die simulierte Abflusskurve steiler, aber auch flacher als die extrapolierte Abflusskurve verlaufen kann. Mit diesen Abflusskurven wurden die transformierten Abflüsse auf Basis der Wasserstandsmessungen bisher 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 erlangt man mit Modellrechnungen oft weitere Erkenntnisse z. B. zu einer potenziellen Pegelumströmung sowie zu Einflüssen durch seitliche Zuflüsse, Rückstau oder nahe gelegene Bauwerke.

Solche Prozesse können sehr gut in den Modellergebnissen nachvollzogen werden und bewirken ein gutes Verständnis für das Abflussverhalten des Pegelabschnittes.

Ein Beispiel für eine Abflusskurve bei Pegelumströmung zeigt Abbildung 2. 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. historische Messwerte untersucht und der Einfluss der Umströmung nachträglich analysiert werden.

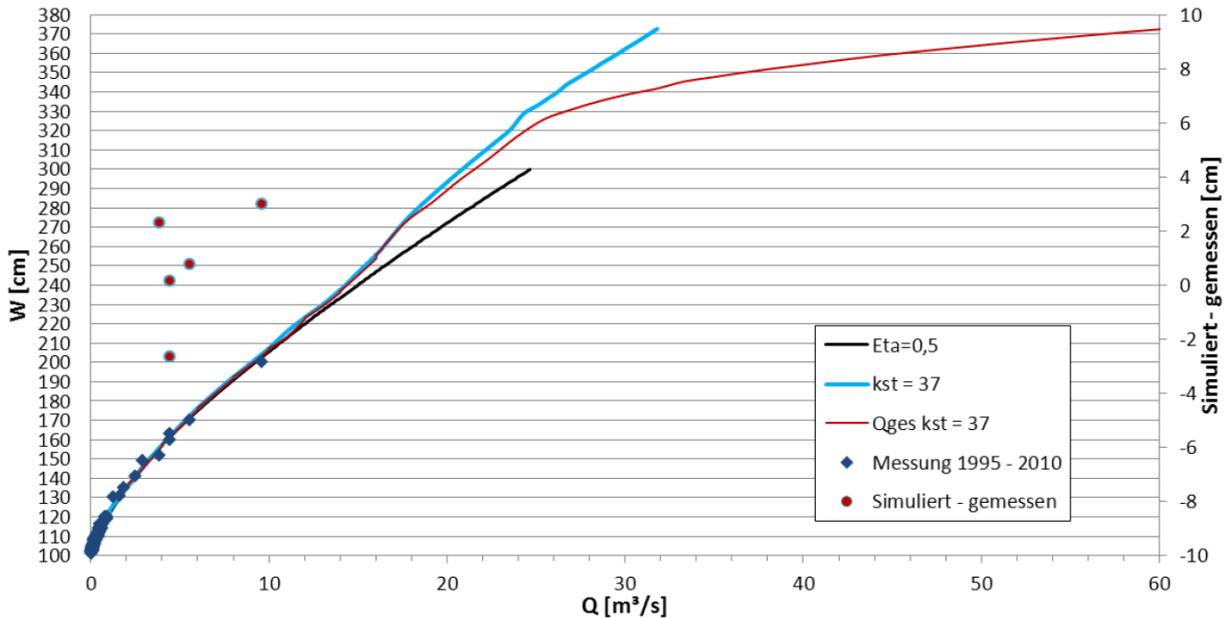


Abbildung 2: Simulierte Abflusskurven bei einer Pegelumströmung (blau: Abfluss durch den Pegelquerschnitt, rot: Gesamtabfluss)

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.

Eine ggf. erforderliche Verlegung des Pegelstandortes an einen geeigneteren Ort führt 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.

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
- Hydrotec, Nujic, M. (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
- Kalm von, T.; Sönnichsen, D.; Wiebe, H. (2014): Stimmt die W/Q-Beziehung bei höchsten Abflüssen? In Wasserwirtschaft (2014), Nr. 11, S. 10-15
- Yörüük, 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

Die Verwendung von diskretisierten Abflussreihen für die statistische Ermittlung von Hochwasserwerten

Jens Bender^{1,2}, Christoph Mudersbach^{2,3} und Jürgen Jensen¹

¹Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), jens.bender@uni-siegen.de

²wbu consulting Ingenieurgesellschaft mbH, Siegen

³Hochschule Bochum, Lehrgebiet Wasserwesen

Einführung

Statistische Auswertungen sollten in der Ingenieurhydrologie generell auf langjährig gemessenen Zeitreihen (Abflusszeitreihen) basieren (DWA, 2012; Bender et al., 2014). Über die kontinuierliche Beobachtung der hydrologischen Größen werden sich stetig ändernde Systemzustände erfasst, die sich in derselben Form nicht wiederholen. Der kontinuierliche Abflussverlauf ist mathematisch allerdings nicht darstellbar. Somit ist es für eine numerische Auswertung erforderlich, die kontinuierlichen Messungen in diskrete Daten zu überführen. Mit der Wahl des Diskretisierungszeitschritts Δt ist jedoch unweigerlich ein Informationsverlust verbunden, da der tatsächliche Verlauf des Abflusses mit diskreten Daten nur genähert wiedergegeben werden kann (Morgenschweis, 2010). Im Wesentlichen hängt der Informationsverlust innerhalb eines Zeitschritts Δt von der Geschwindigkeit der Abflussänderung innerhalb von Δt ab. Dabei ist der Informationsverlust umso größer, je größer die Änderung des Abflusses innerhalb eines Zeitschritts ist. Daher erhöht sich der Informationsverlust i. d. R. während eines Hochwasserereignisses, da während dieser Zeit (schnelle) Abflussänderungen zu beobachten sind. Die Geschwindigkeit der Abflussänderung wiederum ist u. a. abhängig von der Größe des Einzugsgebiets A_{EO} , da in kleineren Einzugsgebieten Abflussänderungen meistens schneller ablaufen als in großen. Darüber hinaus hat das zeitliche Auftreten einer Hochwasserwelle einen Einfluss auf den Grad des Informationsverlustes. Tritt der Scheitelwert beispielsweise am Ende eines Zeitintervalls auf, wird ein Teil der Hochwasserganglinie im Mittelwert des Zeitintervalls t und der andere Teil im Zeitintervall $t+1$ berücksichtigt. Wohingegen ein Auftreten des Scheitels in der Mitte eines Zeitintervalls zur vollen Berücksichtigung bei der Mittelwertbildung in t führt.

Abbildung 1 stellt den Einfluss einer Diskretisierung beispielhaft für zwei unterschiedlich große Einzugsgebiete und für verschiedene Zeitschritte dar. Im linken Teil von Abbildung 1 ist eine Hochwasserganglinie des Pegels Reckenberg (Gewässer Ostrach) mit einer Einzugsgebietsgröße von $A_{EO} = 127 \text{ km}^2$ abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der Scheitelwert der Hochwasserwelle bei einer Zeitreihe mit 15 min-Mittelwerten ($\Delta t = 15 \text{ min}$) bei $Q_{S,15 \text{ min}} = 31 \text{ m}^3/\text{s}$ liegt. Bei $\Delta t = 60 \text{ min}$ reduziert sich der Scheitelwert bereits auf $Q_{S,60 \text{ min}} = 27 \text{ m}^3/\text{s}$ und bei $\Delta t = 24 \text{ h}$ auf $Q_{S,24 \text{ h}} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$. Unter der Annahme, dass die 15 min-Zeitreihe die tatsächliche Abflussganglinie des Pegels repräsentiert (d. h. kein Informationsverlust vorliegt), entspricht dies einer Abnahme von ca. 61 %. Auf der rechten Seite in Abbildung 1 ist hingegen die Abflussganglinie eines Hochwasserereignisses am Pegel Emmerich (Gewässer Rhein) mit einem Einzugsgebiet von $A_{EO} = 159.555 \text{ km}^2$ dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass alle drei Ganglinien nahezu identisch sind und der Informationsverlust wesentlich geringer ist.

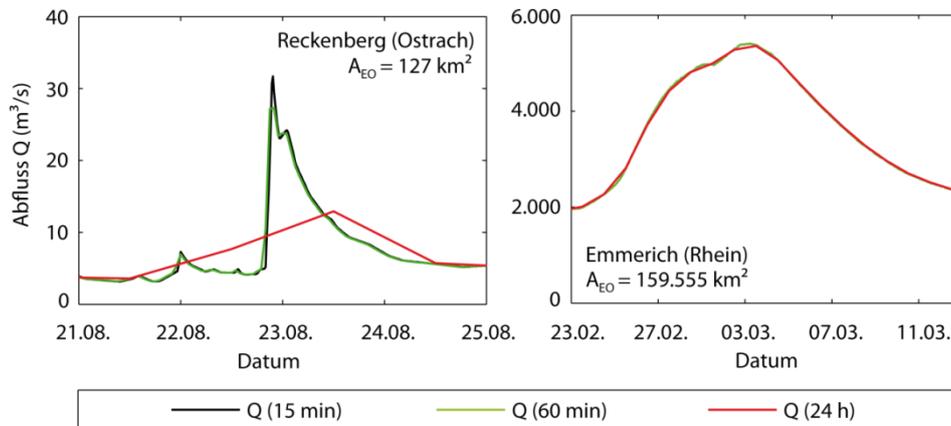


Abbildung 3: Beispiele des Informationsverlustes infolge der Diskretisierung von Abflusszeitreihen bei unterschiedlich großen Einzugsgebieten

Die Wahl eines sinnvollen Diskretisierungszeitschritts hängt im Wesentlichen mit der Aufgabenstellung für die die Daten verwendet werden sollen zusammen. Der Diskretisierungszeitschritt sollte umso kleiner gewählt werden, je genauer die Abflusskurve abgebildet werden muss. Bei jährlichen Wasserbilanzen beispielsweise, können Monatsmittelwerte ausreichend sein, wohingegen bei Analysen von Hochwasserereignissen deutlich geringere Zeitschritte erforderlich sind. In einer Vielzahl von Studien werden für die univariate extremwertstatistische Auswertung von Hochwasserabflüssen Zeitreihen mit einem relativ großen Zeitschritt von $\Delta t = 24$ h (Tagesmittelwerte) verwendet, ohne dass auf den Einfluss der Diskretisierung eingegangen wird. In der Literatur finden sich kaum Hinweise oder Empfehlungen für die Verwendung von Diskretisierungszeitschritten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße (oder anderer kennzeichnender Parameter der betrachteten Einzugsgebiete) und der Datenverwendung. Lediglich Maniak (2010) greift die Thematik auf, erwähnt aber eher allgemeingültig: „Bei Abflüssen aus Einzugsgebieten von mehr als 10000 km² reichen oft Tagesschritte aus.“

Es ist anzunehmen, dass die Wahl des Diskretisierungszeitschritts einen deutlichen Einfluss auf die statistische Ermittlung von Hochwasserwerten hat und die Ergebnisse in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße teilweise erheblich beeinflusst. In diesem Beitrag werden Abflusszeitreihen von Pegeln mit Einzugsgebietsgrößen von $A_{EO} = 1,37$ bis 159.555 km² und mit zeitlichen Auflösungen von $\Delta t = 15$ min, 60 min und 24 h statistisch analysiert. Die Untersuchungen sollen den Einfluss der Datendiskretisierung auf die Ermittlung von statistischen Hochwasserwerten darstellen und zu einer Sensibilisierung der Ergebnisinterpretation führen. Es ist anzumerken, dass die hier aufgeführte Methodik und Ergebnisse einen Auszug aus weitergehenden Betrachtungen darstellen, die in Bender (2015) nachzulesen sind.

Methodik

Bei der statistischen Analyse von Hochwasserdaten ist man häufig an der Ermittlung von Bemessungsabflüssen einer bestimmten Jährlichkeit T interessiert. Daher ist es naheliegend, als Maß für den Einfluss der Diskretisierung die Differenz von Bemessungsabflüssen der Jährlichkeit T als Kriterium heranzuziehen. Dazu werden hochaufgelöste Abflusszeitreihen verschiedener Einzugsgebietsgrößen als Ausgangszeitreihen verwendet. Abflusszeitreihen mit einer Auflösung von $\Delta t = 15$ min sind als kleinstes standardmäßiges Zeitintervall bei den zuständigen Landesbehörden und Pegelbetreibern verfügbar. Auf Basis dieser Zeitreihen erfolgt die Kollektivbildung für die statistischen Untersuchungen. Es werden die jährlichen Maximalabflüsse (AMAX) verwendet, die unter Berücksichtigung des Unabhängigkeitskriteriums nach Svensson et al. (2005) aus den Abflusszeitreihen gewonnen werden. Im nächsten Schritt wird eine

Extremwertverteilungsfunktion an das Kollektiv angepasst und für jede Abflusszeitreihe das Hochwasserereignis der Jährlichkeit $T_{15 \text{ min}} = 100 \text{ a}$ (HQ_{100}) bestimmt. Um ein vergleichbares Vorgehen für alle Pegel zu gewährleisten, wird auf die Anpassung verschiedener Verteilungsfunktionen und anschließende Anpassungstests verzichtet und es wird lediglich die Verallgemeinerte Extremwertverteilung (*engl. Generalized Extreme Value distribution, GEV*) verwendet; die Parameterschätzung erfolgt über die Maximum-Likelihood Methode.

Im nächsten Schritt wird auf Basis der 15 min-Zeitreihe eine Mittelwertbildung mit einem Zeitschritt von $\Delta t = 60 \text{ min}$ und $\Delta t = 24 \text{ h}$ durchgeführt, d. h. die Zeitreihen werden nachträglich mit einem größeren Zeitschritt diskretisiert. Anschließend wird die o. g. Vorgehensweise, d. h. Kollektivbildung und Anpassung der GEV, wiederholt und die entsprechenden Hochwasserereignisse $HQ_{100,60\text{min}}$ bzw. $HQ_{100,24\text{h}}$ berechnet. Der Einfluss der Diskretisierung wird anschließend über das Verhältnis R von $HQ_{100,60\text{min}}$ bzw. $HQ_{100,24\text{h}}$ zu den Hochwasserereignissen auf Basis der 15 min-Zeitreihen ($HQ_{100,15\text{min}}$) bestimmt:

$$R_{60\text{min}} = \frac{HQ_{100,60\text{min}}}{HQ_{100,15\text{min}}} \text{ bzw. } R_{24\text{h}} = \frac{HQ_{100,24\text{h}}}{HQ_{100,15\text{min}}}.$$

Generell sind Werte von $R < 1$ zu erwarten, was bedeutet, dass die Bemessungsereignisse nach der weiteren Diskretisierung geringer ausfallen als die Ereignisse, die auf Basis der 15 min-Zeitreihen gewonnen wurden. Werte von $R = 1$ implizieren, dass beide gewonnenen Hochwasserereignisse identisch sind. Bei Werten von $R > 1$ fallen die Bemessungsereignisse auf Basis der 60 min- bzw. 24 h-Zeitreihe höher aus als auf Basis der 15 min-Zeitreihe. Theoretisch betrachtet ist dieser Fall nicht möglich, da mit zunehmenden Wert von Δt die Werte der Stichprobe nur geringer werden können und somit auch die Bemessungsereignisse geringer ausfallen müssen.

Die Anwendung dieser Methodik auf eine Vielzahl von Abflusszeitreihen mit unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen gibt dann Aufschluss darüber, bei welcher Einzugsgebietsgröße eine Diskretisierung mit entsprechendem Zeitintervall zu einer maßgeblichen Abweichung der Bemessungswerte gegenüber denen aus den hochaufgelösten Zeitreihen gewonnenen führt.

Datengrundlage

Für die Untersuchungen wurden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (LANUV), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Abflusszeitreihen mit einer zeitlichen Auflösung von $\Delta t = 15 \text{ min}$ zur Verfügung gestellt, sowie entsprechende Daten von der Onlineplattform des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) bezogen. Somit befinden sich, mit Ausnahme einiger Pegel der BfG, alle Pegel in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Bayern. Bei allen Zeitreihen handelt es sich um geprüfte Abflusswerte der zuständigen Behörde. Neben der Anforderung, ein möglichst großes Spektrum von Einzugsgebietsgrößen zu verwenden, wurden für die Verwendung folgende Anforderungen an die Zeitreihen gestellt:

- Aufzeichnungsdauer mindestens 25 Jahre
- keine Aufzeichnungslücken
- keine Beeinflussungen durch Speicher im Oberlauf, Rückstau o. ä.

Insbesondere bei der letzten Anforderung ist anzumerken, dass es nicht eindeutig möglich ist, einen Pegel als speicherbeeinflusst zu klassifizieren. In den Einzugsgebieten größerer Gewässer, wie beispielsweise dem Rhein, finden sich häufig Talsperren und andere künstliche Speicher. Es gibt jedoch keine allgemeingültige

Festlegung, ab welchem Grad des Speicherausbaus ein Pegel als beeinflusst gilt. Daher wird ein Pegel als speicherbeeinflusst klassifiziert und damit abgelehnt, wenn sich eine Angabe dazu in den Stammdaten des Pegels wiederfindet.

Insgesamt entsprechen 371 Pegelzeitreihen den o. g. Anforderungen (Abbildung 2).

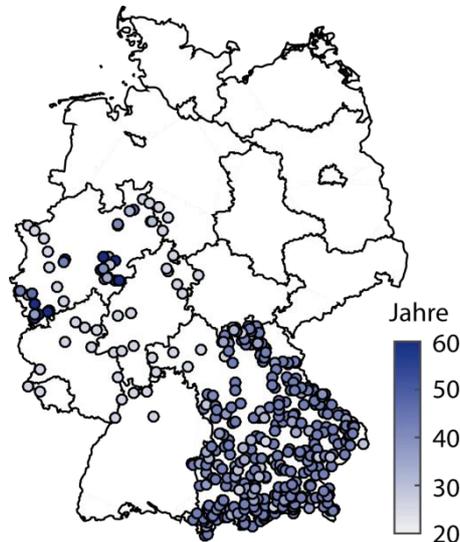


Abbildung 2: Verwendete Pegel mit den entsprechenden Aufzeichnungsdauern

Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse für den Fall der $R_{60\text{min}}$ -Werte (Abbildung 3, links) für den Hochwasserabfluss HQ_{100} betrachtet. Es ist zu erkennen, dass eine Diskretisierung der Ausgangszeitreihen mit $\Delta t = 60$ min weitestgehend HQ_{100} -Werte liefert, die denen auf Basis der hochaufgelösten Ausgangszeitreihe entsprechen. Insbesondere bei Einzugsgebietsgrößen ab 100 km^2 liegen die meisten resultierenden Hochwasserverhältnisse in einem Bereich zwischen 0,95 und 1. Bei kleineren Einzugsgebieten ($A_{EO} < 100 \text{ km}^2$) hat die Diskretisierung einen stärkeren Einfluss auf die Berechnung der Bemessungswerte. Wenn auch der Großteil der $R_{60\text{min}}$ -Werte oberhalb von 0,95 liegt, ist eine deutliche Zunahme der Varianz festzustellen und der Wert von 0,95 wird vermehrt nicht erreicht.

Die Ergebnisse der Berechnungen für eine Ausgangszeitreihe mit Tagesmittelwerten (24 h) sind beispielhaft für das HQ_{100} in Abbildung 3 (rechts) dargestellt. Wie zu erwarten war, liegen die Werte von $R_{24\text{h}}$ deutlich unter denen von $R_{60\text{min}}$. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Informationsverlust durch die Diskretisierung bei Tagesmittelwerten wesentlich größer ist als bei Stundenmittelwerten. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Varianz von $R_{24\text{h}}$ mit abnehmender Einzugsgebietsgröße deutlich zunimmt.

Obwohl $R_{60\text{min}}$ bzw. $R_{24\text{h}}$ theoretisch nur Werte von maximal 1 annehmen kann (der Informationsverlust infolge einer Diskretisierung kann nicht zu einer Erhöhung des Scheitelwertes führen), finden sich in beiden Fällen einige Werte mit $R > 1$ (in Abbildung 3 rot markiert). In diesen Fällen hat die Diskretisierung dazu geführt, dass für das Kollektiv ein stärker ausgeprägter positiver Krümmungsparameter der Verallgemeinerten Extremwertverteilung geschätzt wurde und die Verteilung somit einen stärker ausgeprägten konkaven Verlauf besitzt. Dies wiederum führt dann zu größeren Bemessungswerten, besonders im Extrapolationsbereich.

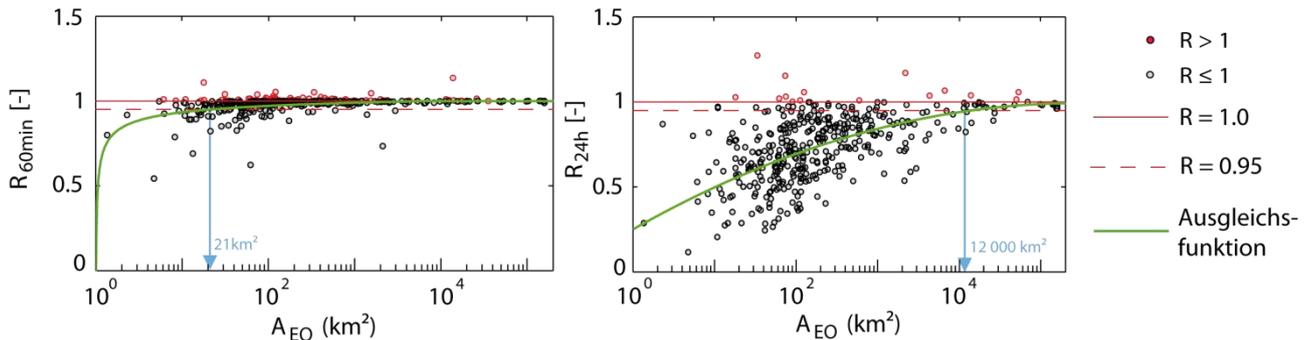


Abbildung 3: Verhältnis R der ermittelten Hochwasserereignisse der Jährlichkeiten $T = 100$ a aus 15 min- und 60 min-Abflusszeitreihen (links) und aus 15 min- und 24 h-Abflusszeitreihen (rechts)

Es stellt sich die Frage, ab welcher Einzugsgebietsgröße 60 min- bzw. 24 h-Mittelwerte des Abflusses für extremwertstatistische Analysen verwendet werden können, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Dazu wird eine parametrische Ausgleichsfunktion an die Beobachtungswerte von $R_{60\text{min}}$ bzw. $R_{24\text{h}}$ und die logarithmierten Einzugsgebietsgrößen A_{EO} angepasst. Unter der Annahme, dass eine hinreichend genaue Bestimmung des „wahren“ Bemessungswertes mit einer Fehlertoleranz von 5 % erreicht ist, liegt die gesuchte Einzugsgebietsgröße dort, wo die Ausgleichsfunktion einen Wert von $R_{60\text{min}/24\text{h}} = 0,95$ erreicht. Um zu vermeiden, dass die nicht plausiblen Werte von $R > 1,0$ die Anpassung der Ausgleichsfunktionen verzerren, werden sie bei der Anpassung nicht berücksichtigt.

Im Fall der 60 min-Mittelwerte liefert eine Potenzfunktion (in Abbildung 3, links grün dargestellt) unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate (siehe z. B. Papula, 2011) die beste Anpassungsgüte. Für die 24 h-Mittelwerte hingegen stellt eine Polynomfunktion 2. Grades die beste Anpassungsgüte dar. So kann bei der Verwendung von 60 min-Mittelwerten eine belastbare Abschätzung eines HQ_{100} bereits ab einer Einzugsgebietsgröße von $A_{\text{EO}} = 21 \text{ km}^2$ durchgeführt werden. Bei der Verwendung von 24 h-Mittelwerten hingegen ist eine Abschätzung erst bei etwa $A_{\text{EO}} = 12.000 \text{ km}^2$ zu empfehlen.

Diskussion und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass die Diskretisierung von Abflusszeitreihen einen bedeutenden Einfluss auf die statistische Ermittlung von Bemessungsabflüssen hat. Insbesondere bei sehr kleinen Einzugsgebieten (z. B. $A_{\text{EO}} < 100 \text{ km}^2$) und großen Diskretisierungsperioden (z. B. $\Delta t = 24 \text{ h}$) ist der Informationsverlust durch die Diskretisierung derart groß, dass eine zuverlässige Ermittlung von Bemessungswerten nicht mehr möglich erscheint. Die hier vorgestellten Ergebnisse unterstreichen daher die Notwendigkeit, für die Ermittlung von Bemessungsereignissen möglichst hochaufgelöste Zeitreihen als Grundlage zu verwenden. Häufig stehen in der Praxis aber nur diskretisierte Werte in Form von Stunden- oder Tagesmittelwerten zur Verfügung. Dies ist insbesondere für Aufzeichnungsperioden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts der Fall, in der noch keine kontinuierliche Erfassung von Wasserständen bzw. Abflüssen flächendeckend verfügbar war. Für diese Situation können die hier ermittelten Ausgleichsfunktionen dazu verwendet werden, die Ergebnisse auf Basis der diskretisierten Zeitreihen in Abhängigkeit der betrachteten Einzugsgebietsgröße mit einem Korrekturfaktor zu versehen.

Es ist jedoch anzumerken, dass die hier durchgeführten Untersuchungen auf bereits diskretisierten Zeitreihen basieren. Das heißt, die verwendeten Abflusszeitreihen mit $\Delta t = 15 \text{ min}$ beinhalten bereits einen, wenn auch vermutlich sehr geringen, Informationsverlust, der an dieser Stelle keine Berücksichtigung finden kann. Aus diesem Grund werden weitere Untersuchungen durchgeführt, bei denen Scheitelwerte, wie sie für die meisten Pegelstellen vorliegen, Berücksichtigung finden. Weiterhin werden neben der Einzugsgebietsgröße weitere

kennzeichnende Parameter, wie z. B. das mittlere Gefälle, Einzugsgebietsform, Fließweglänge etc. in die Untersuchungen mit einfließen.

Literatur

- Bender, J. (2015): Zur Ermittlung hydrologischer Bemessungsgrößen an Flussmündungen mit Verfahren der multivariaten Statistik, Dissertation, Universität Siegen, ISSN 1868-6613.
- Bender, J., Wahl, T., Jensen, J. (2014): Multivariate design in the presence of non-stationarity, *Journal of Hydrology*, 514, 123-130.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt M 552 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Maniak, U. (2010): *Hydrologie und Wasserwirtschaft - Eine Einführung für Ingenieure*, 6. Auflage, Springer.
- Morgenschweis, G. (2010): *Hydrometrie: Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen*, Springer.
- Papula, L. (2011): *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*, 6. Auflage, Springer Verlag Heidelberg.
- Svensson, C., Kundzewicz, Z.W, Maurer, T. (2005): Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series, *Hydrological Sciences Journal*, 50 (5), 811 – 824.

Verbesserte Messdaten-Validierung durch Benutzerinteraktion in Kombination mit modernen Validierungsverfahren und Modellunterstützung

Dirk Schwanenberg¹ und Uwe Haß²

¹KISTERS AG, Aachen, dirk.schwanenberg@kisters.de

²KISTERS AG, Karlsruhe, uwe.hass@kisters.de

Einleitung

Die Einführung von Werkzeugen zur Qualitätssicherung und –lenkung erhält in der meteorologischen und hydrologischen Gemeinschaft eine wachsende Aufmerksamkeit. Die Motivation dazu sind schnell wachsende Datenmengen hochaufgelöster Echtzeitdaten oder Rasterprodukte und deren Verwendung in operationellen Anwendungen wie Hochwasservorhersage- oder Entscheidungshilfesystemen. In diesem Umfeld stößt eine rein visuell, von einem Bearbeiter durchgeführte Datenvalidierung und Ersatzwerkbildung schnell an personelle und organisatorische Grenzen.

Ein Lösungsweg stellt die verstärkte Anwendung von modernen Validierungsverfahren und die Einbindung von statistischen oder deterministischen Modellen dar. In Kombination mit einem prozessorientierten Management verbleibt dabei die Kontrolle über den Gesamtprozess beim menschlichen Bearbeiter und gibt ihm die nötigen Instrumente in die Hand, automatisch durchgeführte Prozesse zu überwachen, Probleme zu identifizieren und bei Bedarf einzugreifen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt einerseits allgemeine Terminologien und Techniken. Andererseits wird auf deren Umsetzung in bereits existierenden oder sich aktuell in der Entwicklung befindenden Wasser-Lösungen der KISTERS AG eingegangen und im Anwendungsfall präsentiert.

Terminologie, Techniken und Werkzeuge

Fachanwendungen in der Meteorologie und Hydrologie orchestrieren die gesamte Prozesskette vom Abruf eines Sensors, der Datenübertragung und -import in ein zentrales Messdatenmanagementsystem, der Datenvalidierung, ggf. einer Ersatzwertbildung und stellen davon abgeleitete Datenprodukte in vielfältigen Formen Nutzern zur Verfügung. In diesem Zusammenhang können die verwendeten Instrumente zur Qualitätssicherung und –lenkung in technische und fachliche Komponenten unterteilt werden (Abbildung 1).

Eine wesentliche technische Komponente stellen System- und Anwendungsmetriken (*System and Application Metrics*) dar, die ein Monitoring der Hardware, des Betriebssystems und der Anwendungen ermöglichen. Dies umfasst beispielsweise die Verfügbarkeit der Hardware, des Netzwerks und der Anwendungen, dem freien Speicherplatz, die Größe und Zuwachs der Datenbank, eine Liste der noch ausstehenden oder fehlgeschlagener Importe oder Verarbeitungs- und Berechnungsschritte. Adressaten dieser Metriken sind in der Regel Systemadministratoren, aber auch Fachanwender, um Probleme im technischen Betriebsablauf zur identifizieren.

Zur tieferen Analyse technischer Probleme bedarf es eines weitergehenden Werkzeugs zur Prozessanalyse (*Process Analytics*). Da meteorologische und hydrologische Messnetze häufig sowohl in der Sensorik als auch in Bezug auf die Datenerfassung und -übertragung redundant ausgelegt sind, stellen kurzfristige Störungen bei einzelnen Komponenten noch keine Beeinträchtigung des Gesamtsystems dar. Ziel der Prozessanalyse ist es deshalb, Warnungen und Fehlermeldungen zu strukturieren, zu klassifizieren sowie Prozessketten in ihrer Gesamtheit zu evaluieren.

Quality Assurance and Quality Control (QA/QC)

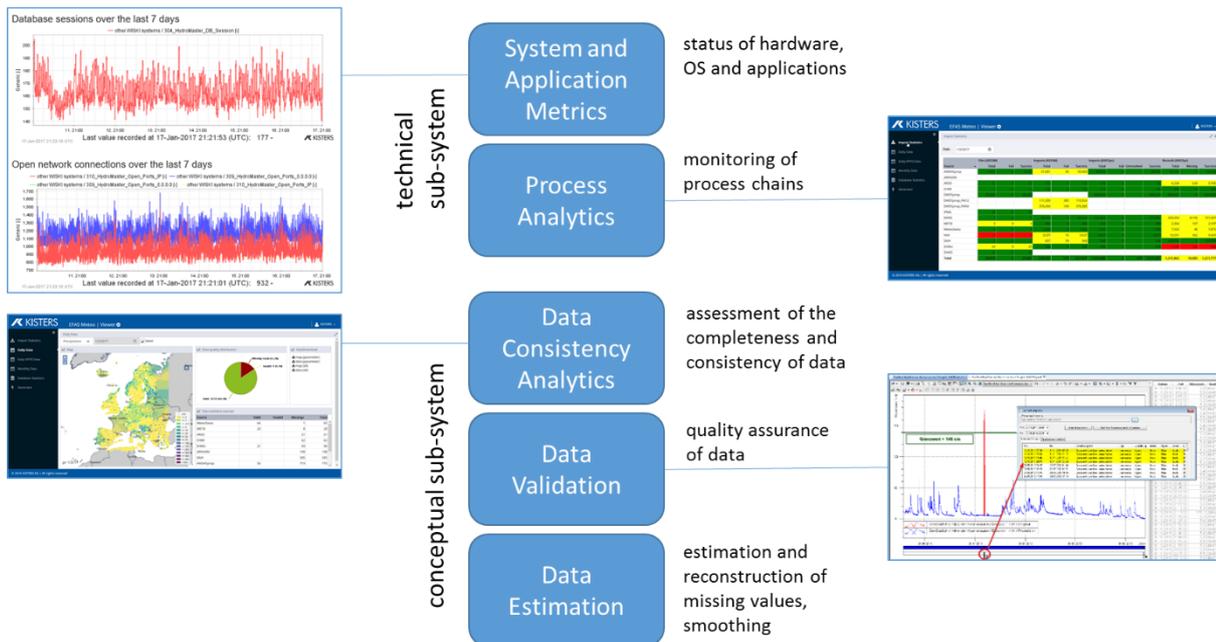


Abbildung 1: Übersicht der Werkzeuge zur Qualitätssicherung in den KISTERS Wasserlösungen.

Auf der fachlichen Ebene beschreibt die Analyse des Datenbestands (*Data Consistency Analytics*) den Zustand von Daten in der zentralen Datenhaltung. Dies beinhaltet beispielsweise eine Statistik wie vollständig Daten in einem bestimmten historischen Zeitbereich sind (Anzahl von Werten oder Lückenanteil pro Zeitintervall) oder wie aktuell Daten im Vergleich zum Ist-Zeitpunkt vorliegen.

Ein weiteres Werkzeug der Qualitätssicherung stellt die Datenvalidierung (*Data Validation*) dar. Sie dient zur Evaluierung der Verlässlichkeit vorhandener Daten. Neben primären, auf eine einzelne Zeitreihe angewandten Verfahren, existieren eine Vielzahl von sekundären Verfahren. Diese überprüfen beispielweise die innere Konsistenz von Daten verschiedener Parameter an einer Station oder den räumlichen Zusammenhang von Daten eines Parameters zwischen mehreren Stationen. In diesem Kontext können statistische und deterministische Modelle verwendet werden, um Zusammenhänge zwischen Daten verschiedener Parameter aus Daten oder physikalischen Gesetzen abzuleiten und zur Validierung zu verwenden.

Als letzter Baustein der fachlichen Prozesskette dient eine Ersatzwertbildung (*Data Estimation*) der Füllung von Datenlücken, der Rekonstruktion oder Glättung von Daten bzw. der Korrektur von klar beschreibbaren Fehlern, die von der Datenerfassung und -verarbeitung herrühren wie der Entfernung von Ausreißern.

Die oben beschriebenen Werkzeuge werden bei Messnetzbetreibern über organisatorische Maßnahmen eingebettet. In diesem Zusammenhang spricht man von Geschäftsprozessen als eine Verknüpfung von einzelnen Aufgaben oder Arbeitsabläufen von Bearbeitern zur Erreichung einer betrieblichen Zielsetzung. Diese besteht beispielsweise in der zeitnahen Bereitstellung einer qualitativ hochwertigen Datenbasis. Eine stärkere Einbettung von Geschäftsprozessen in die Fachanwendung unter dem Begriff *Business Process*

Management (BPM) ermöglicht es weiterhin, Arbeitsabläufe in der Software zu strukturieren, deren Status zu erfassen und dem Anwender gezielt die benötigten Werkzeuge zur Verfügung zu stellen. Die Integration des BPM ermöglicht darüber hinaus das Monitoring dieser Prozesse auf Managementebene.

Beispiele aus der Praxis

EMS - – Prozessüberwachung und Datenvalidierung

Der europäische Frühwarndienst Copernicus Emergency Management Service (EMS, 2017) besteht aus den operationellen Systemen European Flood Awareness System (EFAS) und European Forest Fire Information System (EFFIS). Eine Schlüsselkomponente beider Systeme ist das von KISTERS und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) seit Ende 2016 produktiv betriebene Meteorological Data Collection Centre (EMS-MDCC). Es hat den Zweck, meteorologische Daten aus 16 Ländern zu sammeln, zu validieren, in Rasterprodukte umzurechnen und zur weiteren Nutzung zu verteilen (Abbildung 2).

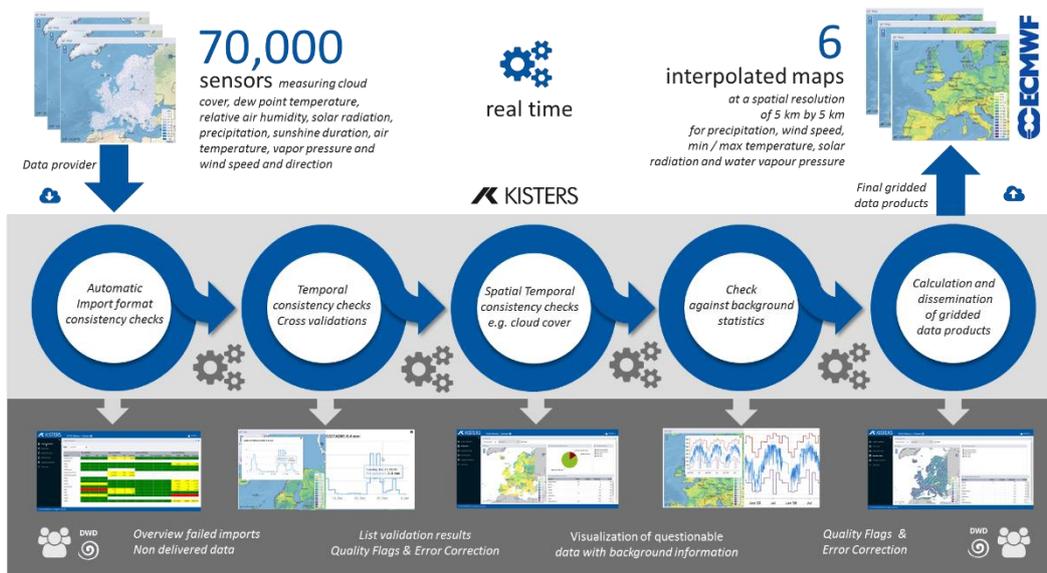


Abbildung 2: Ablauf der Echtzeitdatenvalidierung und Rastererzeugung im EMS-MDCC

Die Komponenten der Qualitätssicherung und –lenkung umfassen hier eine Überwachung des technischen Systemzustands, sämtlicher Importe, der Datenkonsistenz, vielfältiger fachlicher Datenvalidierungsschritte sowie der Erzeugung und Kontrolle der Rasterprodukte. Das Projektteam des DWDs und KISTERS führt damit eine technische und fachliche Systemüberwachung durch.

Modellbasierte Talsperrenüberwachung

KISTERS implementierte in den Jahren 2015 und 2016 ein Informationssystem zur Überwachung von 12 Talsperren des türkischen Energieunternehmens EnerjiSA. Ziel des neuen Systems ist es, die Messdaten von ca. 1500 Sensoren im Bauwerkskörper der Talsperren sowie deren Umgebung zu erfassen, zeitnah zusammenzutragen, aufzubereiten und modellbasiert zu validieren (De Simonis und Funke, 2016). Mit dem Werkzeug können Verhaltensanomalien rasch und präzise festgestellt und erforderliche Maßnahmen initiiert werden.

Grundlage der Bauwerksmodellierung ist das statistische Hydrostatic-Season-Time (HST) Modell (Ferry und Wilm, 1958). Die Parameter des Modells werden anhand eines historischen Zeitfensters von vorvalidierten Beobachtungsdaten identifiziert. Die danach mit dem Modell simulierten Bauwerksbewegungen können dann

mit den Beobachtungen abgeglichen werden und führen bei zu großen Abweichungen zu einem Alarm. Die Talsperrenbetreiber evaluieren und klassifizieren die Alarmmeldungen. Eine bestätigte Alarmmeldung führt zu weiteren Analysen und Sicherungsmaßnahmen. Bei einem Fehlalarm wird das Modell ggf. angepasst oder verfeinert. Der gesamte Geschäftsprozess der oben beschriebenen Talsperrenüberwachung, insbesondere die Interaktion zwischen dem Informationssystem und dem Talsperrenbetreiber, ist in Abbildung 3 als BPMN-Diagramm dargestellt.

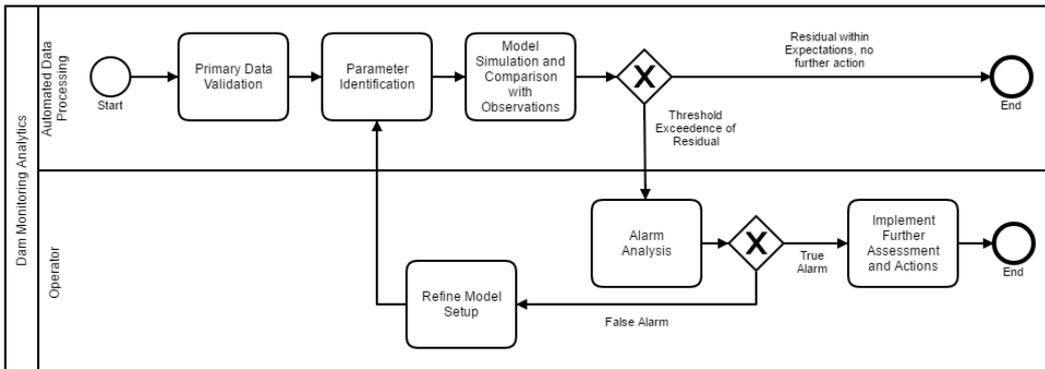


Abbildung 3: Geschäftsprozess der Talsperrenüberwachung in BPMN Notation mit der Interaktion zwischen dem automatisierten Überwachungssystem und dem Personal des Dammbetreibers

Eine wesentliche Komponente des Überwachungsprozesses ist neben der automatisierten Datenverarbeitung die Darstellung verschiedener Informationen in einer grafischen Benutzeroberfläche (Abbildung 4).

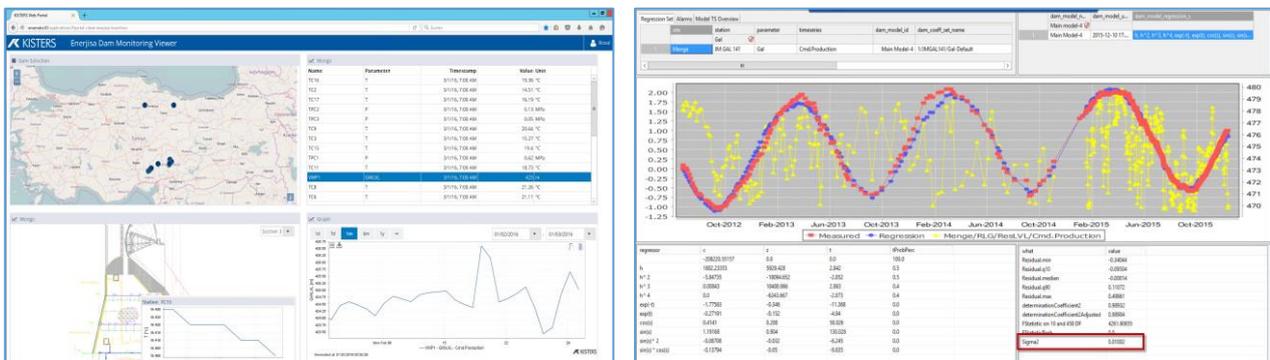


Abbildung 4: Beispiele der graphischen Benutzeroberfläche zur Visualisierung von Beobachtungsdaten, Modellberechnungen und daraus abgeleiteten Analysen am Beispiel Enerjisa

Zusammenfassung

Die Kombination von modular anwendbaren technischen und fachlichen Werkzeugen ermöglicht eine nahtlose Qualitätssicherung und –lenkung von Daten in wasserwirtschaftlichen Informationssystemen. Auf diese Art können steigende Datenmengen in Kombination mit höheren regulatorischen Anforderungen und teils schwindenden Personalressourcen bewältigt werden. Damit verändert sich die Rolle des menschlichen Systembetreibers weg von einer ausführenden Aufgabe hin zu einer überwachenden Instanz. Dabei kann die Interaktion zwischen dem teils automatisiert ablaufenden System und dem Systembetreiber in Geschäftsprozessen definiert und mit Hilfe von Software unterstützt werden.

Literatur

- Copernicus EMS (2017): Directorate Space, Security and Migration, European Commission Joint Research Centre (EC JRC). Accessed January 21, 2017. <http://emergency.copernicus.eu/>.
- De Simone, S.V. und Funke, R. (2016): Messdatenmanagement zur Talsperrenüberwachung der Enerjisa Hydropower, Türkei, Wasserwirtschaft 09/2016.
- Ferry, S. und Wilm, G. (1958): Méthodes d'analyse et de surveillance de déplacements observés par le moyen de pendules dans les barrages. In: ICOLD (Hrsg.): Sixième Congrès des grands barrages, New York (1958), R.118, Q.21.