SIMK® - Kalibrierung von Durchfluss-messstellen in Flüssen und Kanälen[1]

von: Dr. - Ing. C. Kölling, ISAR CONSULT GmbH

Internationales Seminar über „Neue Entwicklungen in der Durchflussmessung in natürlichen und künstlichen Gerinnen“, TU München, München 2004

ISAR CONSULT
Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft GmbH
http://www.isar-consult.de

1. Praxiseinsatz des SIMK® - Kalibrierverfahrens

SIMK® ist ein universell anwendbares Verfahren zur genauen wasserstands- und profilabhängigen Kalibrierung von Durchflussmessstellen, das sich im langjährigen Praxiseinsatz international bewährt hat. SIMK® basiert auf der numerischen Simulation der stark profil- und wasserstandsabhängigen dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnisse $k = v_m / v_l$ mit Hilfe eines hoch auflösenden Finite - Element - Strömungsmodells.

SIMK® ▸ Simulation von $k = v_m / v_l$

v_m gesuchte mittlere Geschwindigkeit $v_m = Q / A$ des Abflussquerschnitts
v_l punktuell oder linienförmig gemessene lokale Geschwindigkeit

Abb. 1 SIMK® - Radardurchflussmessstelle Schrottenbaummühle / Ilz (AG: WWA Passau)

[1] Dieser Fachaufsatz steht unter http://www.isar-consult.de als PDF - Datei zum Download bereit.

Abb. 2 Brückenmontage der Radarsensoren für die berührungslose Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessung der Ilz (AG: WWA Passau)

Die Abb. 1 zeigt exemplarisch eine typische Praxisanwendung des SIMK® - Kalibrierverfahrens. Das Foto wurde von der in Abb. 2 dargestellten Straßenbrücke aus nach oberstrom aufgenommen und zeigt die Anstromverhältnisse der vom Wasserwirtschaftsamt (WWA) Passau betriebenen Durchflussmessstelle Schrottenbaummühle an der Ilz. An der Brückenunterseite wurden entsprechend Abb. 2 zwei Radarsensoren montiert, mit deren Hilfe die Wasserstände h und die Oberflächenströmungsgeschwindigkeiten v_l der Ilz in Intervallen von 3 Minuten berührungslos gemessen und digital gespeichert werden.

Die den aktuell gemessenen Wasserständen entsprechenden stark wasserstands- und profilabhängigen Geschwindigkeitsverhältnisse $k(h) = v_m / v_l$ werden im Messwertumformer der Durchflussmessanlage online aus einer k - h - Kalibriertabelle abgegriffen. Diese Kalibriertabelle wurde zuvor mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens einmalig für die speziellen hydraulischen Randbedingungen der Durchflussmessstelle Schrottenbaummühle bestimmt und im Messwertumformer digital hinterlegt. Die durch SIMK® - Kalibrierung bestimmten dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnisse $k(h) = v_m / v_l$ erlauben genaue wasserstandsabhängige Online - Umrechnungen der aktuell gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten v_l in die mittleren Geschwindigkeiten $v_m = k(h) * v_l$ und damit in die gesuchten Abflüsse $Q = A * v_m$ der Ilz. Die Messwerte h und v_l und die online bestimmten Abflüsse Q werden entsprechend dem vorgegebenen Messintervall digital gespeichert. Sowohl die aktuellen Momentanwerte als auch alle digital gespeicherten h, v_l und Q - Werte sind mittels Modem jederzeit abrufbar und damit beispielsweise für aktuelle Hochwassernachrichten und Hochwasservorhersagen unmittelbar und ohne jegliche weitere Nachbearbeitung direkt nutzbar.

Das WWA Passau und das Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) in München verfügen über ein landesweites Messdatenfernabfragesystem, das in vordefinierten Intervallen vollautomatisch aktualisierte Intra- bzw. Internetveröffentlichungen ihrer digital erfassten Hochwassermessdaten erlaubt (vergl. z. B. [1]).

2. Aufgabe des SIMK®-Kalibrierverfahrens

Die an der TU München entwickelten Grundlagen des SIMK® - Kalibrierverfahrens [4] basieren auf der einfachen Kontinuitätsgleichung:

$$Q = A(h) * v_m \qquad (1)$$

mit

Q [m^3/s] gesuchter Durchfluss,

A [m^2] durchflossene Querschnittsfläche als Funktion der Wassertiefe h,

v_m [m/s] mittlere Fließgeschwindigkeit $v_m = Q / A$ und

v_l [m/s] an einer bekannten Querprofilposition (x,y) gemessene lokale Fließgeschwindigkeit.

Da die mittleren Fliessgeschwindigkeiten v_m des Abflussquerschnitts in der Regel von den punktuell oder linienförmig gemessenen lokalen Fliessgeschwindigkeiten v_l abweichen, setzen genaue Durchflussmessungen gemäß (1) genaue Kenntnisse der dimensionslosen stark profil- und wasserstandsabhängigen Geschwindigkeitsverhältnisse

$$k_l = v_m / v_l \qquad (2)$$

voraus, die durch Kalibrierung bestimmt werden müssen. Einsetzen von (2) in (1) ergibt

$$Q = A(h) * k_l(h) * v_l \qquad (3)$$

Gemäß (3) hängen genaue Durchflussmessungen in gleicher Weise von den Genauigkeiten ab, mit denen

- die wasserstands- und profilabhängigen Querschnittsflächen A(h),
- die ebenfalls wasserstands- und profilabhängigen dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnisse k(h)
- und die an bekannten Querprofilpositionen (x,y) gemessenen lokalen Fließgeschwindigkeiten v_l.

bereitgestellt werden. Bei geeigneter Messstellenauswahl ist die genaue wasserstandsabhängige Bestimmung von A(h) bei bekannter Gewässersohle und gemessenem Wasserstand eine einfache Geometrieaufgabe, die keiner weiteren Erläuterung bedarf. Bei Beachtung der Einsatzvoraussetzungen können die lokalen Fließgeschwindigkeiten v_l nach Herstellerangaben mit Genauigkeiten von mindestens ± 2% gemessen werden.

Die dimensionslosen Skalierungsfaktoren $k_l(h)$ hängen vor allem von den bekannten Geometrieparametern

- Profilform,
- aktuell gemessenem (Hoch-) Wasserstand und
- der Position (x,y) der lokalen Geschwindigkeitsmessung

sowie in geringerem Maß außerdem von der Reynoldszahl Re und der Wandrauheit k_s ab [4]. Bei hydraulisch sinnvoller Messstellenauswahl und Positionierung der Geschwindigkeitssonden können für typische Kanal- und Flussprofile je nach Art und Position der lokalen Geschwindigkeitsmessung stark variierende wasserstands- und profilabhängige Skalierungsfaktoren im Bereich von ca.

$$60\ \% \le k_l \le 120\ \% \qquad (4)$$

erwartet werden. Dabei sind vor allem für naturnahe Flüsse innerhalb desselben Messquerschnitts und für konstante Positionen der lokalen Geschwindigkeitsmessungen wasserstandsabhängige Schwankungen der Skalierungsfaktoren k_l um 10 bis 25 % typisch.

Bei hydraulisch ungünstiger Messstellenauswahl oder bei ungünstiger Positionierung der Geschwindigkeitssonden treten noch wesentlich größere Variationen der Skalierungsfaktoren auf. Sofern sich die Messstelle beispielsweise unmittelbar unterstrom einer scharfen Flusskrümmung oder eines großen Brückenpfeilers oder unmittelbar oberstrom einer Wehranlage befindet, treten im Bereich der Messstelle vor allem bei Hochwasser möglicherweise Totwasserbereiche oder gar lokale Rückstromzonen auf. Sofern die lokalen Geschwindigkeiten in Totwasserbereichen gemessen werden, können die zugehörigen Skalierungsfaktoren k(h) Werte von mehreren 100 % erreichen. In den meist stark wasserstandsabhängigen Rückstromzonen sind die Skalierungsfaktoren negativ.

Daraus folgt:

1. Bei hydraulisch ungünstiger Messstellenauswahl oder bei ungünstiger Positionierung der Geschwindigkeitssonden können auch mit Hilfe sehr genauer Wasserstands- und lokaler Geschwindigkeitsmessungen in der Regel keine genauen Durchflüsse bestimmt werden, weil die lokal gemessenen Geschwindigkeiten v_l nicht ausreichend repräsentativ sind für die gesuchten mittleren Geschwindigkeiten v_m des gesamten Abflussquerschnitts.
2. Bei hydraulisch sinnvoller Messstellenauswahl und hydraulisch sinnvoller Positionierung der Geschwindigkeitssonden sind die lokalen Geschwindigkeitsmessungen v_l dagegen für die gesuchten mittleren Geschwindigkeiten v_m repräsentativ, aber die dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnisse $k_l = v_m / v_l$ sind keineswegs konstant, sondern können auch in diesem Fall starken Schwankungen unterliegen.

3. Aufgrund von (3) können deshalb auch bei hydraulisch sinnvoller Messstellenauswahl und Positionierung der Geschwindigkeitssonden und bei sehr genauen Wasserstands- und lokalen Geschwindigkeitsmessungen die gesuchten Durchflüsse Q nicht genauer bestimmt werden, als dies die (3) zugrunde liegenden Kenntnisse der sehr stark profil- und (hoch-) wasserstandsabhängigen Skalierungsfaktoren $k_I = v_m/v_I$ erlauben.

Also wird zusätzlich zu genauen Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen ein universell einsetzbares Verfahren benötigt, das für hydraulisch sinnvoll gewählte Messstellen und hydraulisch sinnvoll positionierte Geschwindigkeitssonden die in (2) definierte stark profil- und wasserstandsabhängige Skalierungsfunktion $k_I(h) = v_m/v_I$ für den gesamten zu erwartenden Wasserstandsschwankungsbereich

$$h_{min} \le h \le h_{max} \qquad (5)$$

mit hoher Genauigkeit und in kurzer Zeit bis in den extremen Hochwasserbereich bereitstellt. Dieses Verfahren ist das nachfolgend erläuterte SIMK® - Kalibrierverfahren.

3. Grundlagen des SIMK® - Kalibrierverfahrens

Gemäß (2) entspricht der für die Messstellenkalibrierung benötigte dimensionslose Skalierungsfaktor $k_I = v_m / v_I$ exakt dem mit v_m multiplizierten Kehrwert der axialen Geschwindigkeitsverteilung $v_I(x,y)$ des Fluss- bzw. Kanalprofils. Daher setzen universelle Bestimmungen von k_I detaillierte Kenntnisse der auf v_m bezogenen turbulenten axialen Geschwindigkeitsverteilungen v(x,y) voraus. Das Kalibrierverfahren **SIMK®** basiert auf der **Sim**ulation der wasserstandsabhängigen dimensionslosen Skalierungsfaktoren $\mathbf{k_I}$. Hierzu werden mit Hilfe eines numerischen Strömungsmodells turbulente Geschwindigkeitsverteilungen für Flüsse und Kanäle beliebiger Form und Größe berechnet. Die axiale Geschwindigkeitsverteilung wird durch die in Profilebene vorherrschenden Sekundärströmungen stark beeinflusst, die durch die Behinderung des turbulenten Impulsaustausches im Bereich der Profilränder und des freien Wasserspiegels entstehen [4].

Folglich hängen die axialen Geschwindigkeitsverteilungen $v_I(x,y)$ und damit auch die gesuchten Skalierungsfaktoren $k_I = v_m/v_I$ besonders stark von Profilform und aktuellem Wasserstand ab. Profilform und Wasserstand des Fluss- bzw. Kanalprofils sind jedoch bekannt bzw. werden kontinuierlich gemessen. Um die genaue Kenntnis dieser beiden besonders einflussreichen geometrischen Faktoren ausnutzen zu können, sind genaue Berücksichtigungen von Profilform und aktuellem Wasserstand von zentraler Bedeutung. Deshalb werden beim SIMK® - Kalibrierverfahren beliebige Profilformen mit Hilfe der flexiblen Finite - Element - Methode sehr genau und detailliert diskretisiert. Die Abb. 3 zeigt anhand der SIMK® - Kalibrierung einer in Muka Keratan installierten Ultraschall - Laufzeitanlage exemplarisch die Finite - Element - Diskretisierung eines durch Spundwände begrenzten 20 m breiten Betonkanals mit unterschiedlich breiten grasbewachsenen Vorländern, die ebenfalls durch Spundwände begrenzt sind und nur bei Hochwasser überflutet werden. In diesem 43 m breiten stark gegliederten Querprofil mit sehr unterschiedlichen Wandrauheiten werden Wasserstandsschwankungen von ca. $24.0 \le h \le 29.0$ mNN erwartet.

Um auch bei Niedrigwasser Geschwindigkeiten messen zu können, wurden die Ultraschallsensoren entsprechend Abb. 3 an den gegenüber liegenden Spundwänden des Hauptgerinnes unterhalb des niedrigsten erwarteten Wasserstands auf einem Niveau von 23.20 mNN installiert. Die Abb. 3 zeigt die Finite - Element - Diskretisierung für den erwarteten Maximalwasserstand von ca. HHW = 29.0 mNN, der einem erwarteten Maximalabfluss von ca. $Q_{max} = 450$ m^3/s entspricht.

Die Abb. 3 verdeutlicht, dass durch die gewählte Dreiecksvermaschung beliebige Profilformen wasserstandsabhängig sehr genau und detailliert erfasst werden können. Außerdem können aufgrund dieser Profildiskretisierung auch entlang des hydraulischen Umfangs variierende Profilrauheiten sehr detailliert berücksichtigt werden, denn jeder Außenkante des Finite - Element - Netzes können unabhängig voneinander

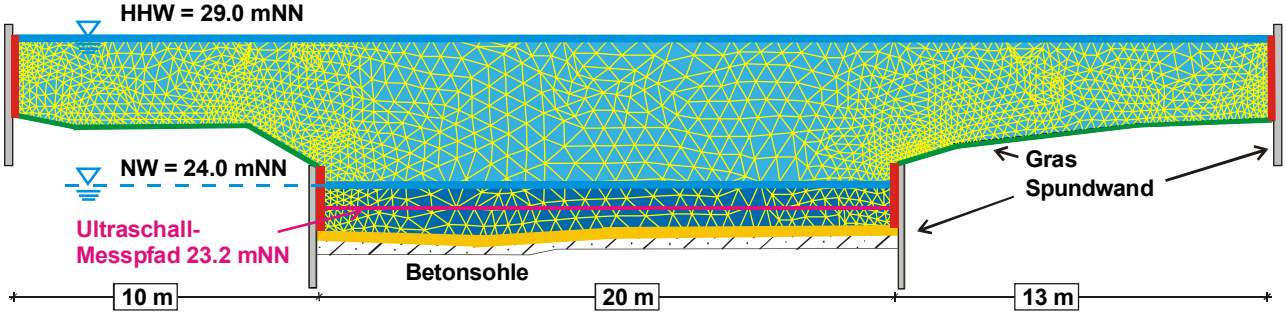


Abb. 3 Finite - Element - Diskretisierung eines stark gegliederten Messquerschnitts einer Ultrschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage in Muka Keratan / Malaysia für den maximalen Hochwasserstand HHW

beliebige Wandrauheiten zugewiesen werden, die im SIMK® - Strömungsmodell auf der Grundlage des universellen logarithmischen Wandgesetzes detailliert berücksichtigt werden [4]. Beispielsweise wurden der glatten Betonsohle des Hauptgerinnes geringere Wandrauheiten (k_s in mm) zugewiesen als den grasbewachsenen Vorländern. Besonders hohe Wandrauheiten wurden entlang der vertikalen Spundwände vorgegeben. Analoge Finite - Element - Diskretisierungen wurden entsprechend (5) auch für systematisch variierte geringere Wasserstände h erstellt.

Unter Berücksichtigung der auf diese Weise detailliert definierten Profilformen und der abschnittsweise variierenden Wandrauheiten werden mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells die turbulenten axialen Geschwindigkeitsverteilungen des Fluss- bzw. Kanalprofils simuliert. Durch die gleichzeitige Simulation der sehr einflussreichen Sekundärströmungen werden mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells hohe Genauigkeiten erzielt. Die detaillierte Erfassung beliebiger Profilgeometrien und abschnittsweise variierender Wandrauheiten ermöglicht universelle Einsatzmöglichkeiten des SIMK® - Kalibrierverfahrens, die in [4] durch umfangreiche Vergleiche von simulierten und gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen nachgewiesen sind. Die Anwendung des SIMK® - Kalibrierverfahrens setzt voraus, dass sich die Geschwindigkeitsverteilung des Fluss- bzw. Kanalprofils in Fliessrichtung nur allmählich ändert, da alle Gradienten in Fliessrichtung gegenüber denen in Profilebene vernachlässigt werden. Inzwischen vorliegende langjährige internationale Praxiserfahrungen zeigen, dass sich diese Voraussetzung durch hydraulisch sinnvolle Messstellenauswahl in den weitaus meisten Fällen in guter Näherung erfüllen lässt. Eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen und Voraussetzungen des SIMK® - Modells ist in [4] enthalten. Zusammenfassende Darstellungen liefern die Fachaufsätze [6] und [8].

4. Verifikationen des SIMK® - Kalibrierverfahrens

Die Leistungsfähigkeit des SIMK® - Strömungsmodells wurde überprüft, indem turbulente Geschwindigkeitsverteilungen für verschiedene Profilformen berechnet und mit genauen Labormessungen verschiedener Autoren verglichen wurden. Beispielsweise zeigt der rechte Isotachenplan der Abb. 4 die von Nezu und Rodi [10] mit Hilfe berührungsloser Laser - Doppler - Messungen ermittelte turbulente axiale Geschwindigkeitsverteilung in der linken Hälfte eines teilgefüllten Rechteckkanals. Diese gemessene Geschwindigkeitsverteilung stimmt mit dem mit Hilfe des SIMK® - Modells simulierten linken Isotachenplan der Abb. 4 sehr gut überein. Das für diese Profilform typische Abtauchen der Maximalgeschwindigkeit unter die freie Oberfläche und das charakteristische Ausbeulen der Isotachen in Richtung Profilwand werden mit Hilfe des SIMK® - Modells genau und detailliert simuliert.

Die Ursache dieser guten Übereinstimmungen verdeutlicht der in Abb. 5 dargestellte Vergleich der simulierten und gemessenen Sekundärströmungen. Die Profilecke des Rechteckkanals verursacht eine starke Eckströmung entlang der Winkelhalbierenden, die einen im Uhrzeigersinn rotierenden Oberflächen- und einen gegenläufig rotierenden Sohlwirbel antreibt. Der am freien Wasserspiegel stark verminderte vertikale und stattdessen erhöhte horizontale Impulsaustausch bewirkt wasserspiegelnah große Horizontalkomponenten des Oberflächenwirbels. Diese verursachen in Wasserspiegelnähe einen starken konvektiven Impulstransport vom Ufer in Richtung Profilmitte, der die axialen Oberflächengeschwindigkeiten reduziert. Die in Wasserspiegelnähe stark anisotrope Turbulenz bewirkt außerdem eine Vergrößerung und Verlagerung des Oberflächenwirbels vom Ufer in Richtung Profilmitte. Dadurch wird der Sohlwirbel in die Profilecke gedrängt und aufgrund des verstärkten Einflusses der Wandreibung verkleinert. Daher überwiegt der Oberflächen- den Sohlwirbel nach Ausdehnung und maximaler Geschwindigkeit deutlich. In Profilmitte verursacht die vom Wasserspiegel zur Profilsohle gerichtete starke Vertikalströmung des Oberflächenwirbels die für gedrungene Rechteckprofile typische Verlagerung des axialen Geschwindigkeitsmaximums unter die freie Wasseroberfläche. In analoger Weise können auch für andere Wasserstände weitere Merkmale der axialen Geschwindigkeitsverteilungen anhand der zugehörigen Sekundärströmungen simuliert und erklärt werden [4].

Die universelle Anwendbarkeit des SIMK® - Modells auf Profile beliebiger Form verdeutlichen beispielhaft die in den Abb. 6 und 7 dargestellten Vergleiche der simulierten Geschwindigkeiten mit Heißfilmmessungen von Tominaga, Nezu und Ezaki [14] für die rechte Hälfte eines symmetrischen Vorlandprofils. Erwartungsgemäß verursacht die komplexere Profilform auch komplexere Strukturen der turbulenten Geschwindigkeitsverteilungen. Beispielsweise erzeugt die einspringende Profilecke besonders starke Sekundärströmungen entlang der Winkelhalbierenden, die jedoch von der Ecke in Richtung Profilmitte und damit genau umgekehrt gerichtet sind wie bei der ausspringenden Profilecke des Rechteckkanals. Diese kräftige Eckströmung in der Trennflächenzone des Vorlandprofils treibt ein System von fünf gegenläufig rotierenden Sekundärwirbeln innerhalb einer Profilhälfte an. Gemäß Abb. 7 wird jeder dieser fünf Wirbel mit Hilfe des SIMK® - Modells sehr detailliert und in guter Übereinstimmung mit den Messungen simuliert.

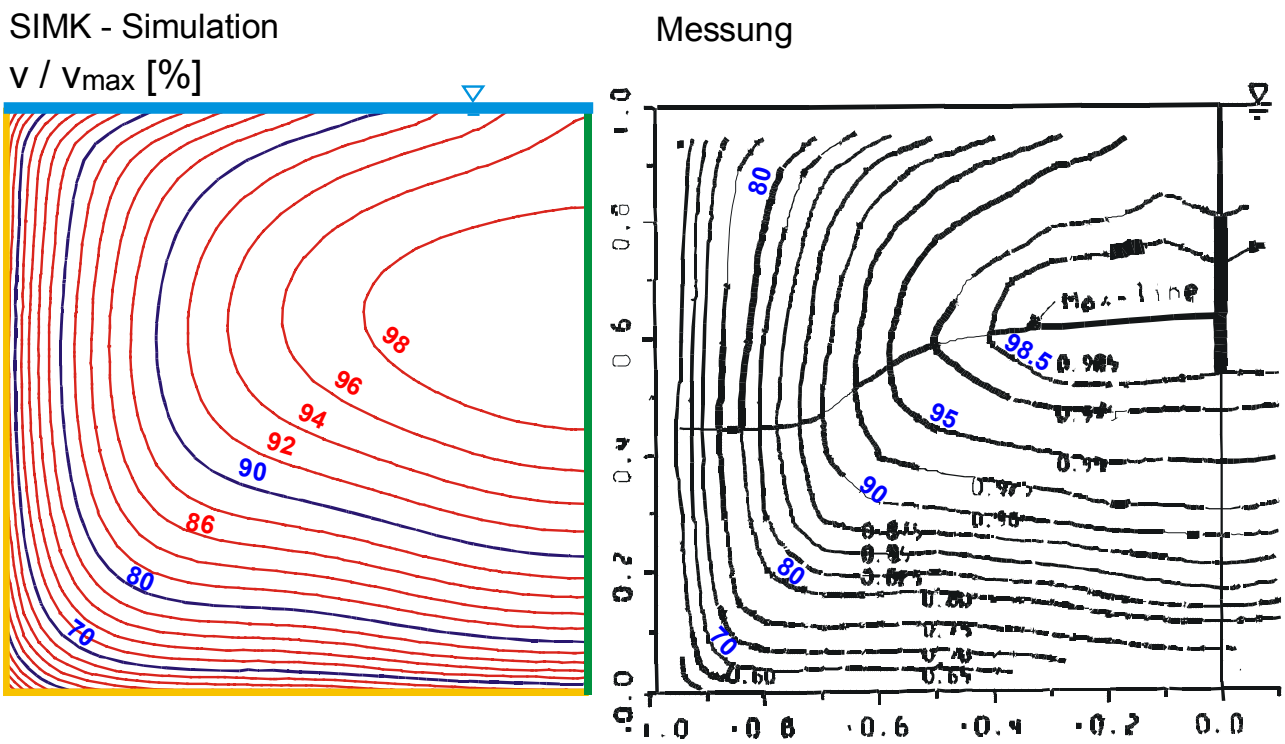


Abb. 4 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte und gemessene [10] Axialgeschwindigkeiten in der linken Hälfte eines Rechteckkanals

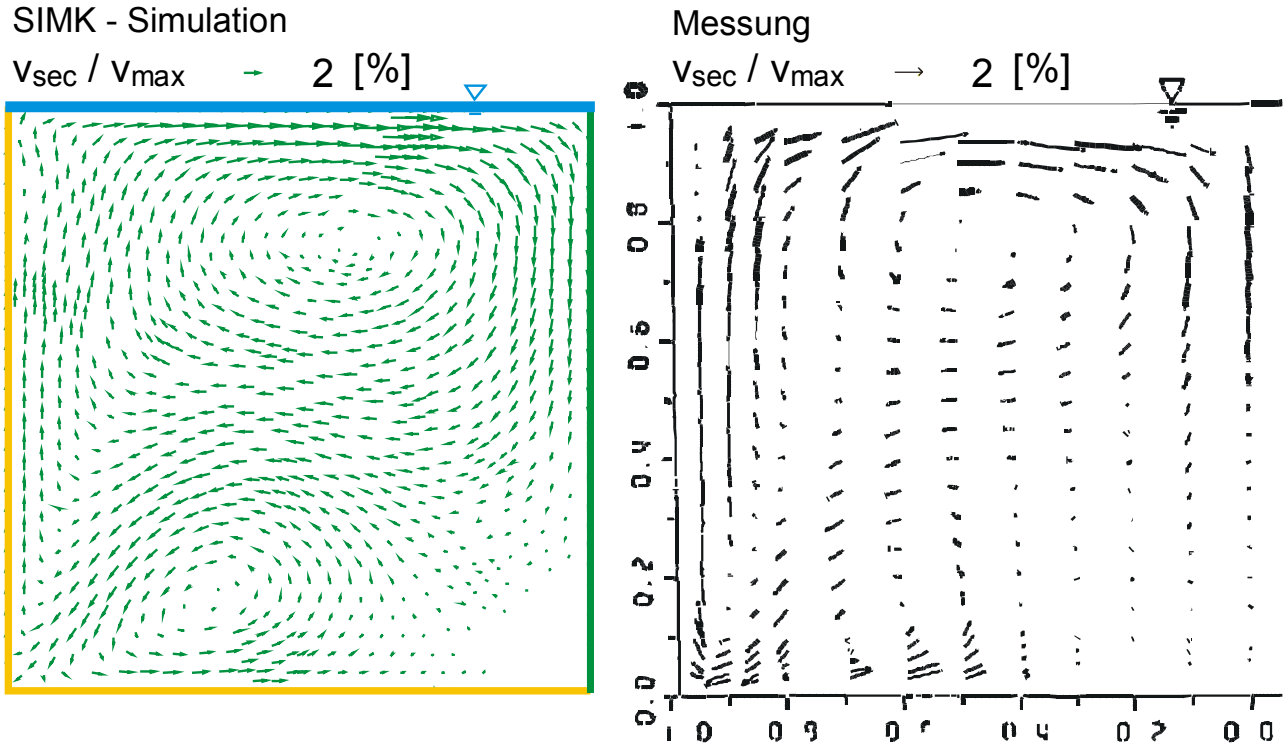


Abb. 5 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte und gemessene [10] Sekundärgeschwindigkeiten in der linken Hälfte eines Rechteckkanals

In [4] sind für weitere Profilformen und unterschiedliche Wasserstände ca. 20 weitere Vergleiche von simulierten Geschwindigkeiten mit genauen Labormessungen angegeben. Trotz sehr unterschiedlicher Profilformen stimmen die Simulationen auch in diesen Fällen gut mit den Messungen überein. Daher können auch für unregelmäßige Flussprofile hohe Genauigkeiten des SIMK® - Modells erwartet werden. Da die vielen Details der Sekundärströmungen und deren Einflüsse auf die axialen Geschwindigkeitsverteilungen zuverlässig simuliert werden, ermöglicht das SIMK® - Modell genaue und detaillierte Berechnungen der in (2) definierten stark profil- und (hoch-) wasser-

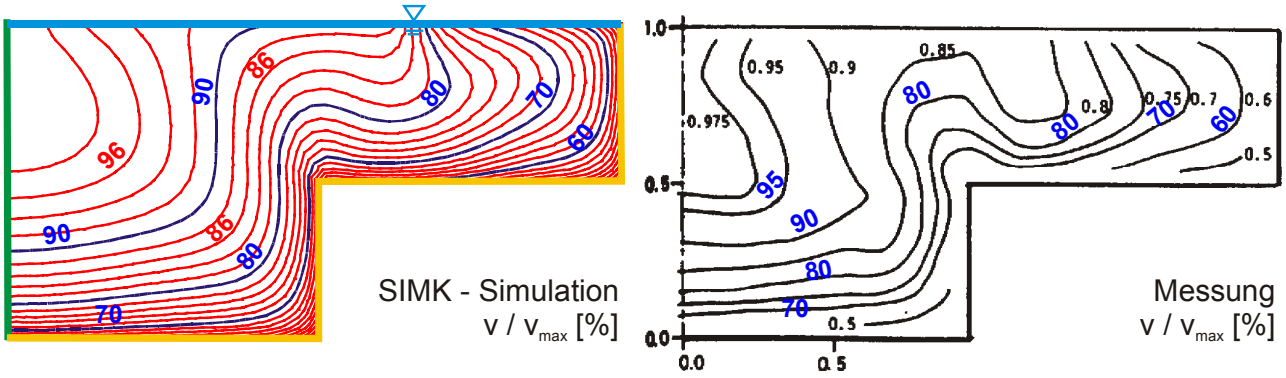


Abb. 6 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte und gemessene [14] Axialgeschwindigkeiten in der rechten Hälfte eines Vorlandprofils

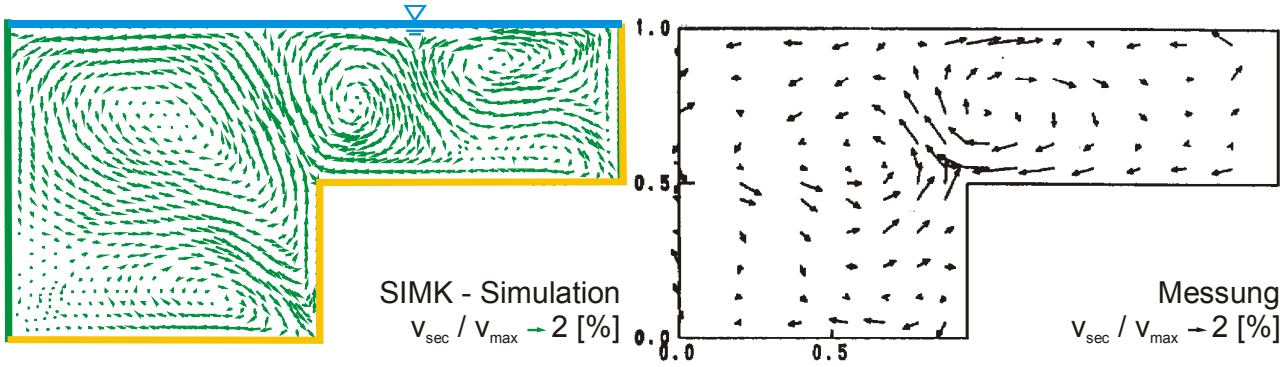


Abb. 7 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte und gemessene [14] Sekundärgeschwindigkeiten in der rechten Hälfte eines Vorlandprofils

standsabhängigen dimensionslosen Skalierungsfaktoren $k_I = v_m/v_I$.

Die dem SIMK® - Modell zugrunde liegenden strömungsmechanischen Grundgesetze werden bei SIMK® - Kalibrierungen von Durchflussmessanlagen gezielt ausgenutzt, um auf der Grundlage weniger lokaler Geschwindigkeitsmessungen v_I an besonders ausgewählten Positionen (x,y) des Abflussquerschnitts A(h) auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $v_m = Q / A$ und damit auf den Durchfluss Q zu schließen. Dabei werden von den Ergebnissen des SIMK® - Modells keine Absolutgeschwindigkeiten, sondern nur die in (2) definierten dimensionslosen Geschwindigkeitsverhältnisse $k(x,y) = v_m / v(x,y)$ genutzt. Da diese Skalierungsfaktoren zwar stark von den (gemessenen) Wassertiefen, aber bei den für Flüsse und Kanäle typischen Reynoldszahlen nur geringfügig von den Absolutwerten der ebenfalls gemessenen Geschwindigkeiten abhängen, ist das SIMK® - Kalibrierverfahren auch bei Rückstau sehr gut einsetzbar, da dessen Einfluss nicht berechnet, sondern mit Hilfe von h und v_I aktuell gemessen wird.

5. Überprüfungen des SIMK® - Kalibrierverfahrens

Die Genauigkeit und universelle Anwendbarkeit des SIMK® - Kalibrierverfahrens wurde von verschiedenen Fachbehörden überprüft, indem die mit Hilfe des SIMK® - Kalibrierverfahrens für unterschiedliche Kanal- und Flussquerschnitte bestimmten Durchflüsse mit davon unabhängigen Referenzdurchflussmessungen verglichen wurden.

5.1 Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (VAO)

In der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München in Obernach (VAO) wurden in einem 2.5 m breiten geradlinigen Rechteckkanal für drei verschiedene Wassertiefen SIMK® - Durchflussmessungen durchgeführt. Hierzu wurden die Wassertiefen h mit Hilfe eines Lattenpegels und die Maximalgeschwindigkeiten v_{max} mit Hilfe eines hydrometrischen Flügels gemessen. Die Positionen der flachen und daher in der Praxis leicht bestimmbaren Geschwindigkeitsmaxima (vergl. Abb. 4) wurden mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells ebenso bestimmt wie die zugehörigen wasserstandsabhängigen dimensionslosen Skalierungsfaktoren $k_{max} = v_m / v_{max}$. Außer v_{max} wurden keine weiteren Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Die Tab. 1 fasst die daraus entsprechend (3) bestimmten Durchflüsse $Q_{SIMK} = A(h) * k_{max} * v_{max}$ zusammen.

In analoger Weise wurden auch die beiden in Tab. 1 angegebenen Durchflüsse Q_{SIMK} in einem gekrümmten Trapezkanal mit be-

Kanal	h [m]	A [m²]	Q_{SIMK} [l/s]	Q_{VAO} [l/s]	ΔQ [%]
Rechteck,	0.89	2.22	223	231	**-3.5**
b = 2.49 m	1.48	3.69	254	253	**0.5**
	1.91	4.76	319	302	**5.6**
Trapez,	0.159	0.349	27.6	27.6	**0.0**
b_s = 1.71 m	0.161	0.353	37.3	37.8	**-1.3**

Tab. 1 Überprüfung von 5 SIMK® - Durchflussmessungen in einem Rechteck- und einem Trapezkanal der VAO [13]

weglicher Sohle bestimmt. Dieser Trapezkanal weist eine Sohlbreite von b_s = 1.71 m, Böschungsneigungen von 1 : 3 und einen Krümmungsradius von 40 m auf, dessen Einfluss im SIMK® - Strömungsmodell berücksichtigt wird. Abb. 8 zeigt exemplarisch die mit Hilfe des SIMK® - Modells simulierte Geschwindigkeitsverteilung des Trapezkanals in überhöhter Darstellung. Gemäß Abb. 8 herrschen am rechten Außenufer des gekrümmten Trapezkanals steilere Geschwindigkeitsgradienten als am linken Innenufer. Dies ist auf krümmungsinduzierte Fliehkräfte zurückzuführen, die aufgrund der vom freien Wasserspiegel zur Profilsohle abnehmenden Axialgeschwindigkeiten zusätzliche Sekundärströmungen erzeugen, die an der freien Wasseroberfläche in Richtung Außenufer und an der Kanalsohle in Richtung Innenufer gerichtet sind. Da diese Zusatzeffekte beim SIMK® - Modell berücksichtigt werden, können mit Hilfe des SIMK® - Modells auch turbulente Geschwindigkeitsverteilungen in langgestreckten Flusskrümmungen realistisch simuliert werden, die in der Praxis häufig auftreten.

5.2 Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Die in der VAO durchgeführten Vergleichsmessungen haben den Vorteil, dass die SIMK® - Durchflussmessungen mit sehr genauen Referenzmessungen (Dreiecks - Messwehr) verglichen werden konnten. Nachteilig ist jedoch, dass die Durchflussmessungen nicht in natürlichen Gewässern durchgeführt werden konnten und dass die in der VAO realisierbaren Durchflüsse wesentlich kleiner sind als in großen Kanälen und Flüssen. Daher wurden die mit Hilfe des SIMK® - Kalibrierverfahrens erzielbaren Genauigkeiten zusätzlich in großmaßstäblichen Feldtests überprüft. Hierzu wurden im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wasserstandsabhängige SIMK® - Kalibrierungen für zehn verschiedene Kanal- und Flussprofile im Großraum Berlin und in Sachsen erstellt. Auf der Grundlage dieser SIMK® - Kalibrierungen führte die BfG anschließend in diesen Gewässern Durchflussmessungen durch und verglich diese mit unabhängigen Referenzmessungen. Die dabei untersuchten Wassertiefen variierten zwischen 2.4 und 7.0 m, die Kanalbreiten zwischen 14 und 70 m. In der Elbe wurden in verschiedenen Flußquerschnitten unter Berücksichtigung großflächiger Vorlandüberflutungen Gewässerbreiten von bis zu 200 m analysiert. Die im Rahmen dieser Praxistests untersuchten Durchflüsse variierten im Bereich von

$$0.5\ m^3/s \le Q \le 1500\ m^3/s \qquad (6)$$

Diese umfangreichen Feldtests der BfG wurden mit gutem Erfolg abgeschlossen und sind in [11] dokumentiert. Stellvertretend für diese zehn Feldtests werden im folgenden Vergleichsmessungen vorgestellt, die von der BfG am Elbpegel Dresden und an der Durchflussmessstelle Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstrasse im Zentrum Berlins durchgeführt wurden.

5.2.1 Pegel Dresden an der Elbe

Der im Dresdener Stadtzentrum gelegene Pegel befindet sich in einer langgestreckten Flusskrümmung der Elbe. Die Mittelwassertiefe der Elbe beträgt hier ca. 3.0 - 3.5 m. Diese kann bei Hochwasser auf mehr als 8.0 m ansteigen. Bei Mittelwasser beträgt die Wasserspiegelbreite der Elbe in Dresden ca. 110 m. Diese kann sich durch großflächige Vorlandüberflutungen auf ca. 160 m erhöhen. Die Abb. 9 zeigt die mit Hilfe des SIMK® - Modells simulierte turbulente Geschwindigkeitsverteilung der Elbe in stark überhöhter dimensionsloser Darstellung.

Die Abb. 9 zeigt für die Elbe ebenso wie die Abb. 8 für den gekrümmten Trapezkanal der VAO eine deutliche durch krümmungsinduzierte Fliehkräfte verursachte Verlagerung des Geschwindigkeitsmaximums in Richtung Außenufer. Außerdem zeigt die Abb. 9, dass zwischen Außenufer und Flussmitte ein ca. 30 m breiter und bis zu 0.6 m tiefer oberflächennaher gelb hinterlegter Querprofilbereich existiert, in dem die

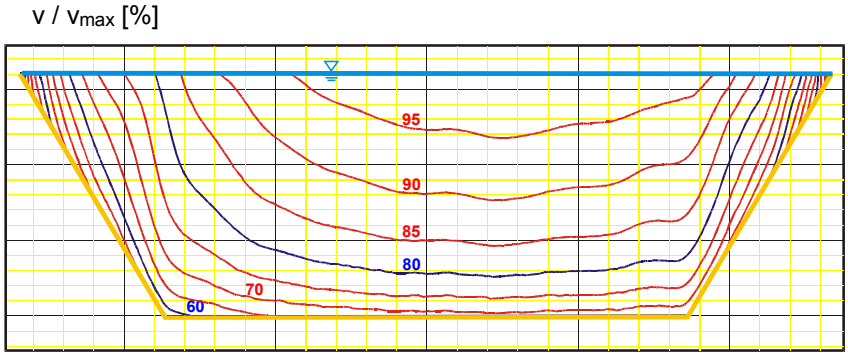


Abb. 8 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte turbulente Geschwindigkeitsverteilung in einem gekrümmten Trapezkanal der VAO [13]

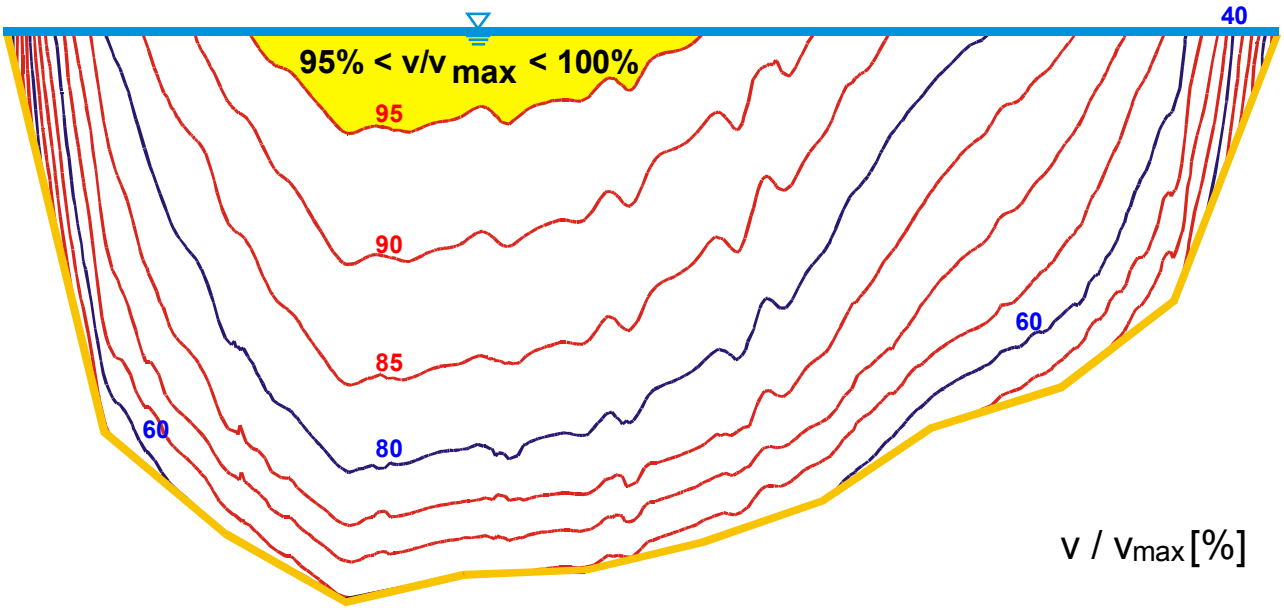


Abb. 9 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte turbulente Geschwindigkeitsverteilung der Elbe am Pegel Dresden in stark überhöhter Darstellung (AG: BfG, [11])

Axialgeschwindigkeiten nur geringfügig zwischen 95 und 100 % der Maximalgeschwindigkeit variieren. Dieses Ergebnis des SIMK® - Modells wurde ausgenutzt, um in der Elbe mit sehr geringem Aufwand genaue Durchflussmessungen durchführen zu können. Dazu wurden innerhalb des gelb hinterlegten Bereichs mit Hilfe eines hydrometrischen Flügels drei Einzelgeschwindigkeiten gemessen und anschließend gemittelt. Unter der vereinfachenden Annahme, dass dieses Mittel 97.5 % der Maximalgeschwindigkeit entspricht, wurde auf die mittlere Fliessgeschwindigkeit und damit auf den Durchfluss der Elbe geschlossen, der als Q_{SIMK} bezeichnet wird. Diese Art der Durchflussermittlung wurde von der BfG für 12 sehr unterschiedliche Abflusszustände wiederholt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2 zusammengefasst [11].

Als Referenz enthält die Tab. 2 die als Q_{Profil} bezeichneten Messergebnisse, die jeweils auf Vollprofilaufnahmen basieren. Diesen Vollprofilaufnahmen liegen jeweils ca. 100 bis 200 Flügelmessungen zugrunde, die innerhalb des gesamten Abflussprofils durchgeführt wurden. Unabhängig von den zwischen Q =152 m^3/s und Q = 844 m^3/s sehr stark schwankenden Durchflüssen variieren die Abweichungen zwischen den SIMK® - Durchflussmessungen und den Vollprofilaufnahmen gemäß Tab. 2 nur zwischen 0.0 und 6.7%. Im Mittel unterschieden sich die 12 resultierenden Durch-

Nr.	Datum	A [m^2]	Q_{Profil} [m^3/s]	Q_{SIMK} [m^3/s]	**ΔQ [%]**
1	10.11.94	236.1	153.8	158.6	**3.1**
2	17.11.	236.0	151.9	156.9	**3.3**
3	19.01.95	317.5	269.4	271.3	**0.7**
4	25.01.	488.7	634.8	592.5	**6.7**
5	05.04.	601.8	844.2	825.1	**2.3**
6	18.04.	526.5	719.8	723.8	**0.6**
7	18.07.	287.8	235.1	237.8	**1.1**
8	25.07.	277.7	223.0	216.0	**3.1**
9	11.10.	285.8	228.1	228.9	**0.4**
10	19.10.	273.7	201.4	212.1	**5.3**
11	29.03.96	505.3	670.0	638.1	**4.8**
12	03.04.	384.0	403.7	403.9	**0.0**
				Mittel:	**2.6**

Elbe (km 57.8)
Pegel Dresden

BfG

mit:

A: Fläche des Meßquerschnitts

Q_{profil}: klassische Flügelmessung

Q_{SIMK}: SIMK - Auswertung von v_{max}

ΔQ: $\Delta Q = | Q_{SIMK} - Q_{PROFIL} | / Q_{Profil}$

Tab. 2 Überprüfung von 12 SIMK® - Durchflussmessungen in der Elbe am Pegel Dresden [11]

flüsse um 2.6 %. Vergleichbare Ergebnisse wären auch erzielt worden, wenn die Oberflächengeschwindigkeiten der Elbe von einer Brücke aus mittels Radar oder Video berührungslos und kontinuierlich gemessen worden wären.

Bei den in Tab. 2 zusammengefassten Vergleichsmessungen ist zu beachten, dass die ausnahmslos guten Übereinstimmungen nicht unter Labor-, sondern unter Praxisbedingungen erzielt wurden. Insbesondere weist die Elbe ein natürliches Flussbett auf. Sowohl die Sohlrauheit als auch das Energieliniengefälle des Flusses mussten für die SIMK® - Simulationen geschätzt werden. Grundlage dieser Schätzungen waren lediglich die pauschalen Informationen „Sandsohle und grasbewachsene Vorländer“ sowie grobe Abschätzungen typischer Mittelwasserabflüsse. Obwohl sich der Messquerschnitt in einer typischen Flusskrümmung der Elbe befindet und jeweils nur drei oberflächennahe lokale Einzelgeschwindigkeiten gemessen wurden, wurden mit Hilfe des SIMK® - Kalibrierverfahrens die in Tab. 2 angegebenen hohen Messgenauigkeiten erzielt. Vergleichbar gute Ergebnisse wurden auch für die anderen Vergleichsmessstellen der BfG [11] und für zahlreiche andere vergleichbare Durchflussmessstellen erzielt.

Die Tab. 2 beweist, dass mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens auch in großen Flüssen trotz geschätzter Energieliniengefälle und Sohlrauheiten reproduzierbar genaue Durchflussmessungen erzielt werden, weil von den SIMK® - Simulationen keine von den aktuellen Energieliniengefällen und Sohlrauheiten stark abhängigen Absolutgeschwindigkeiten v, sondern nur dimensionslose Geschwindigkeitsverhältnisse k_l übernommen werden. Im Gegensatz zu v_l sind die Kalibrierfaktoren $k_l = v_m / v_l$ bei den für Flüsse und große Kanäle typischen Reynoldszahlen von

$$10^5 \leq Re \leq 10^8 \qquad (7)$$

vom aktuellen Energieliniengefälle nahezu unabhängig und lassen sich aufgrund realistisch geschätzter Sohlrauheiten für hydraulisch sinnvoll gewählte Positionen (x,y) der lokalen Geschwindigkeitsmessungen v_l mit hoher Genauigkeit bestimmen. Deshalb reichen praxisgerechte Rauhigkeitsinformationen wie beispielsweise „Sandsohle und grasbewachsene Vorländer“ in Kombination mit inzwischen vorliegenden langjährigen Projekterfahrungen völlig aus, um die gesuchten dimensionslosen Skalierungsfaktoren $k_l = v_m / v_l$ mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens mit hoher Genauigkeit zu berechnen. Die maßgebenden Einflüsse des aktuellen rückstauabhängigen Energieliniengefälles und der tatsächlichen Sohlrauheit werden nicht aus den dimensionslosen Ergebnissen k_l der SIMK® - Simulationen abgeleitet, sondern sie sind in den dimensionsbehafteten lokalen Geschwindigkeiten v_l enthalten, die bei SIMK® - Durchflussmessungen im Gegensatz zu einfachen Pegelmessungen stets gemessen werden. Aus demselben Grund zeichnen sich SIMK® - Durchflussmessungen im Gegensatz zu einfachen Pegelmessungen auch bei veränderlichem Rückstau (z. B. infolge von Bewuchs oder unterstromiger Abflusshindernisse) durch hohe Messgenauigkeiten aus.

5.2.2 Pegel Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße in Berlin

Die Abb. 10 bis 13 zeigen exemplarisch typische Ergebnisse der im Auftrag der BfG erstellten SIMK® - Kalibrierung des Pegels Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße im Zentrum Berlins [11]. Das in Abb. 10 dargestellte Finite - Element - Netz veranschaulicht die flexible Erfassung der Querschnittsgeometrie. Die seitlichen Spundwände und die wesentlich glattere Sandsohle des Profils werden im SIMK® - Modell durch unterschiedliche Wandrauheiten berücksichtigt. Die Abb. 11 zeigt die auf v_{max} bezogene turbulente Geschwindigkeitsverteilung dieses Profils, die mit Hilfe des SIMK® - Modells simuliert wurde. Infolge der unterschiedlichen Wandrauheiten treten in Sohlnähe steilere Geschwindigkeitsgradienten auf als in der Nähe der vertikalen Spundwände. Deutlich sind das Abtauchen des Geschwindigkeitsmaximums unter die freie Oberfläche, das starke Zurückbiegen der wasserspiegelnahen Isotachen in den Uferbereichen und das markante Ausbeulen der Isotachen in Richtung der Profilwände erkennbar. Diese Effekte sind auf die stark profilabhängigen Sekundärströmungen zurückzuführen [4], die ebenfalls mit Hilfe des SIMK® - Modells berechnet wurden und in Abb. 12 dargestellt sind.

Die gesuchten Kalibrierfaktoren k_l folgen aus der Auswertung der in Abb. 11 dargestellten axialen Geschwindigkeitsverteilung. Hierzu sind in Abb. 13 dieselben Ergebnisse in veränderter Form dargestellt. Anstelle von v_l / v_{max} zeigt die Abb. 13 die auf v_m bezogene invertierte Geschwindigkeitsverteilung v_m / v_l des Profils Mühlendamm in überhöhter Darstellung, die gemäß (2) mit der gesuchten Verteilung der dimensionslosen Skalierungsfaktoren k_l identisch ist. Mit Hilfe des hinterlegten Koordinatenrasters können in dieses Profil leicht die Positionen (x,y) eingetragen werden, an denen beispielsweise mit Hilfe eines hydrometrischen Flügels (vergl. Abb. 9 und Tab. 2), eines oberhalb des Wasserspiegels montierten Radarsensors (vergl. Abb. 2) oder eines sohl- oder ufernah installierten Ultraschall - Doppler - Sensors (vergl. z. B. [2], [5], [9]) lokale Geschwindigkeiten v_l gemessen werden. Aus der Isoliniendarstellung kann unmittelbar der für diese Position gültige Skalierungsfaktor k_l abgelesen werden. v_l und k_l sowie die wasserstandsabhängige Querschnittsflä-

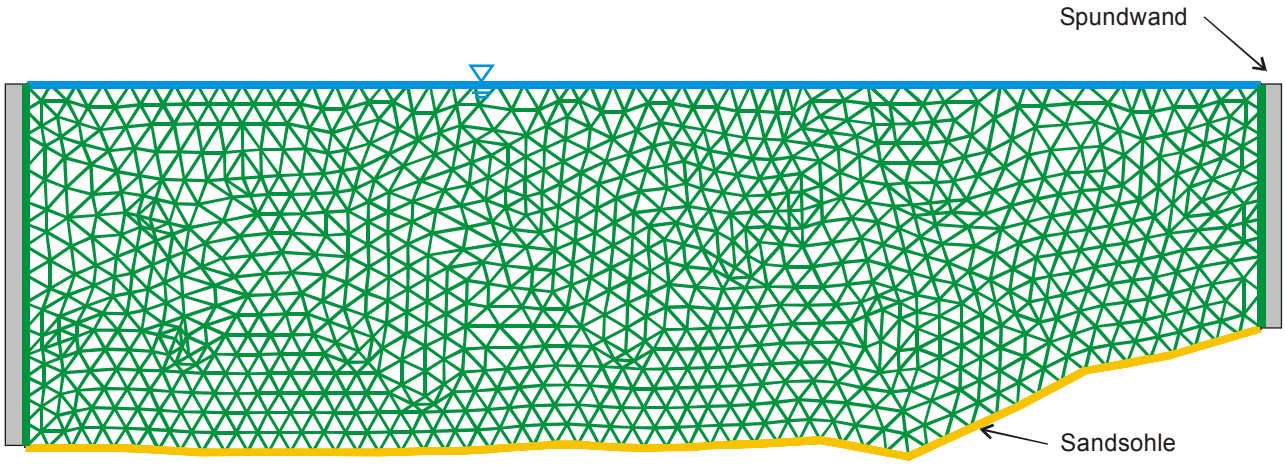


Abb. 10 Finite - Element - Netz des Profils Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße in Berlin (AG: BfG, [11])

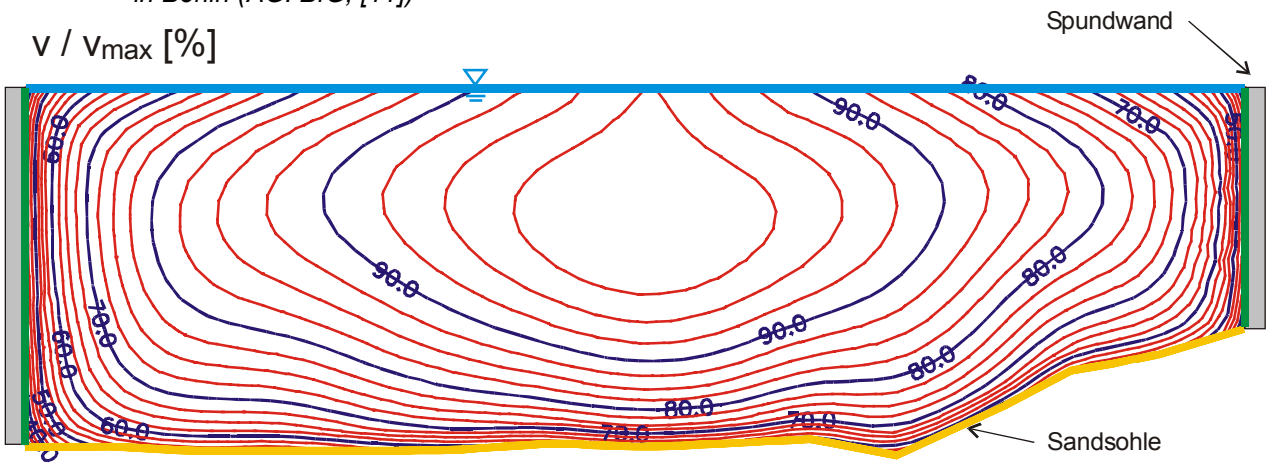


Abb. 11 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte turbulente Axialgeschwindigkeitsverteilung für das Profil Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße in Berlin (AG: BfG, [11])

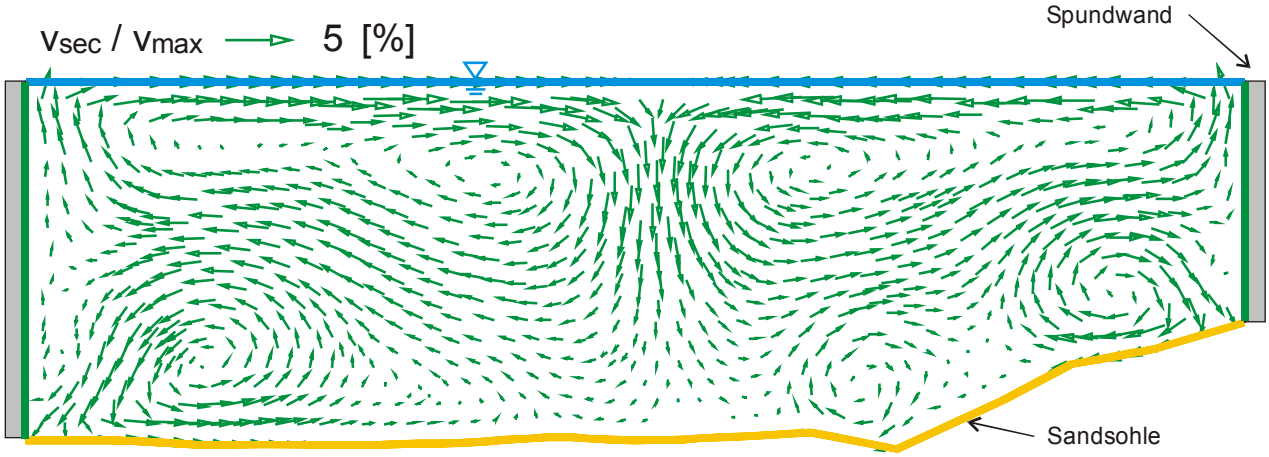


Abb. 12 mit Hilfe des SIMK® - Strömungsmodells simulierte Verteilung der Sekundärströmungen für das Profil Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße in Berlin (AG: BfG, [11])

che A(h) genügen, um gemäß (3) den gesuchten Durchfluss Q zu bestimmen.

SIMK® ist nicht auf punktuelle Geschwindigkeitsmessungen v_P an einer bekannten Position $P(x=x_P,y=y_P)$ begrenzt, sondern in analoger Weise auch auf linienförmige Geschwindigkeitsmessungen anwendbar, die als Messsignal die mittlere Geschwindigkeit v_{AB} entlang einer durch die Endpunkte $A(x=x_A,y=y_A)$ und $B(x=x_B,y=y_B)$ definierten bekannten Messstrecke A - B liefern. Beispielsweise liefern Ultraschall - Laufzeit - Anlagen als Messsignal die mittlere Geschwindigkeit v_{AB} entlang des Ultraschallmesspfades A - B, dessen Lage durch die Montagepositionen A und B der beidseits des Messquerschnitts installierten Ultra-

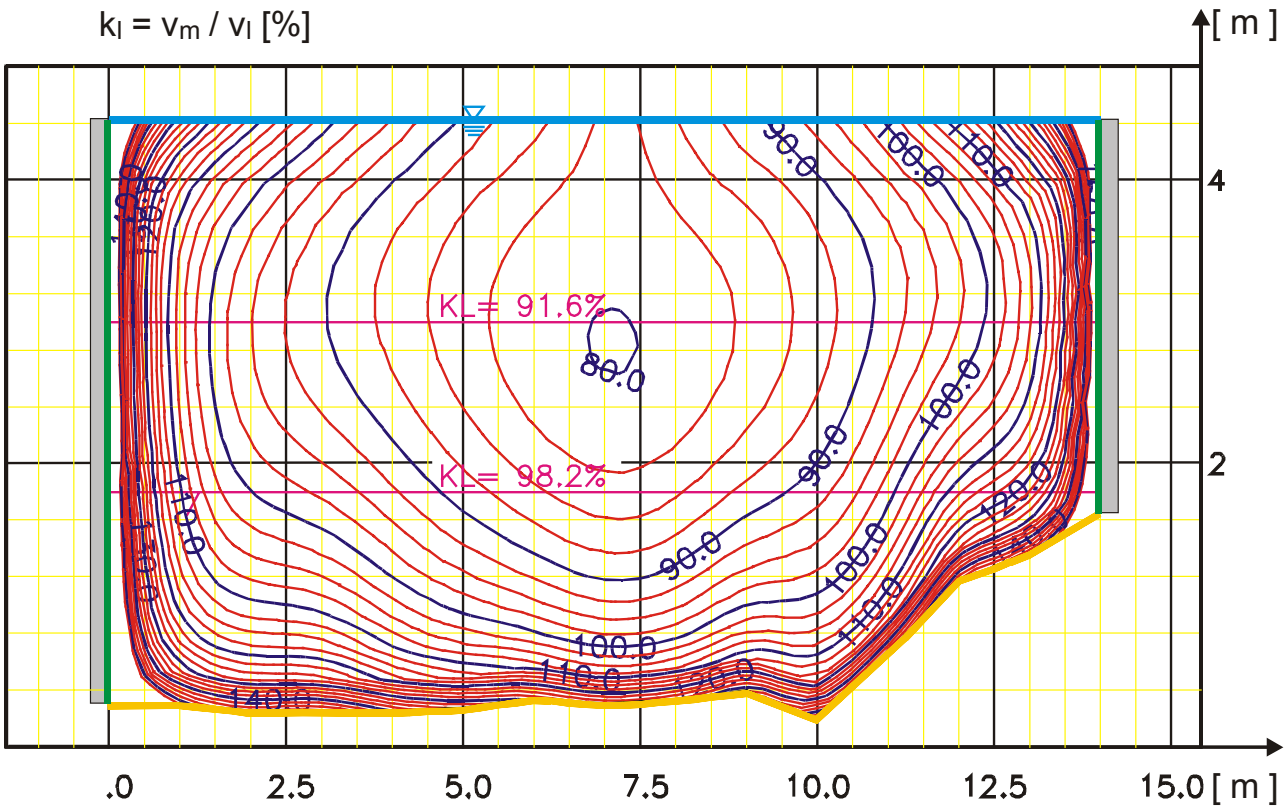


Abb. 13 simulierte flächendeckende Verteilung der Skalierungsfaktoren $k_l = v_m / v_l$ für das Profil Mühlendamm mit Auswertung für die beiden angegebenen Ultraschall - Messpfade (AG: BfG [11])

schallwandler exakt definiert und damit genau bekannt ist. Auch dieses Linienmittel v_{AB} kann ebenso wie eine punktuelle Geschwindigkeitsmessung v_P als eine lokale Geschwindigkeit v_l aufgefasst werden, die in der Regel von der mittleren Profilgeschwindigkeit $v_m = Q / A$ abweicht. Trägt man in Abb. 13 die Messpfade A - B der Ultraschallanlage ein und mittelt die simulierten k_l - Werte entlang dieser Messstrecken, so erhält man mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens exakt die gesuchten Skalierungsfaktoren $k_l = v_m / v_l$ dieser Ultraschallmesspfade. Für die beiden in Abb. 13 dargestellten Messpfade ergeben sich für den angegebenen Wasserstand beispielsweise Kalibrierfaktoren von $k_{l1} = v_m / v_{AB} = 91.6$ % bzw. $k_{l2} = 98.2$ %.

Durch gezielte Wiederholung der SIMK® - Simulationen und SIMK® - Auswertungen für systematisch variierte Wasserstände h erhält man die vollständige profil- und (hoch-) wasserstandsabhängige Kalibrierfunktion $k_l(h)$ des untersuchten Messquerschnitts für den gesamten praxisrelevanten Wasserstandsschwankungsbereich (5). Da der Kalibrierfaktor k_l ebenso wie die Querschnittsfläche A eine profilabhängige Funktion des (Hoch-) Wasserstandes h ist, können beide Faktoren zur ebenfalls profil- und (hoch-) wasserstandsabhängigen reduzierten Querschnittsfläche

$$A_{red}(h) = A(h) * k_l(h) \qquad (8)$$

zusammengefasst werden. Damit vereinfacht sich (3) zu

$$Q = A_{red}(h) * v_l \qquad (9)$$

Formal entspricht (9) der einfachen Kontinuitätsgleichung (1). Die (hoch-) wasserstandsabhängige reduzierte Querschnittsfläche $A_{red}(h)$ der Gleichung (9) enthält im Gegensatz zur geometrischen Querschnittsfläche A(h) der Gleichung (1) jedoch nicht nur geometrische Informationen, sondern gemäß (8) darüber hinaus stark profil- und wasserstandsabhängige hydraulische Informationen, die mit Hilfe des SIMK® - Kalibrierverfahrens bereitgestellt werden. Dieselben hydraulischen Informationen enthält (1) in Form der mittleren Fließgeschwindigkeiten v_m des gesamten Abflussquerschnitts. Da v_m jedoch nicht unmittelbar gemessen werden kann, ist (1) für kontinuierliche (Online -) Auswertungen lokaler Geschwindigkeitsmessungen nicht praktikabel. Im Gegensatz dazu entspricht der zweite Faktor der Gleichung (9) exakt der mit Hilfe alternativer physikalischer Verfahren messbaren lokalen Fließgeschwindigkeit v_l, weil die ergänzenden hydraulischen Informationen mit Hilfe des SIMK® - Kalibrierverfahrens vom zweiten auf den ersten Faktor transformiert werden.

In 5.2.1 wurde anhand der von der BfG in der Elbe durchgeführten Referenzmessungen begründet, warum die dimensionslosen Kalibrierfaktoren k_l vor allem von den rein geometrischen Parametern

- Profilform,
- aktuell gemessener (Hoch-) Wasserstand und

- Position (x,y) der lokalen Geschwindigkeitsmessung v_l

abhängen, die zum Zeitpunkt der Wasserstandsmessung vollständig bekannt sind. SIMK® ist somit eine universell einsetzbare Methode, die diese bekannten geometrischen Informationen gezielt ausnutzt, um daraus in Form von $k_l(h)$ sehr genaue (hoch-) wasserstandsabhängige hydraulische Informationen zu generieren, die vollständig im ersten stark profil- und wasserstandsabhängigen Faktor der Gleichung (9) berücksichtigt werden. Der große Vorteil dieses SIMK® - Ansatzes besteht darin, dass der durch Messung kontinuierlich bestimmbare zweite Faktor von (9) für alle Profilformen, Wasserstände und Sensorpositionen vollkommen unabhängig von diesen hydraulischen Zusatzinformationen wird. Es genügt somit, lokale Strömungsgeschwindigkeiten v_l reproduzierbar genau an einer sinnvoll gewählten und genau bekannten Position des Messquerschnitts kontinuierlich zu messen und entsprechend (9) mit der zugehörigen profil- und (hoch-) wasserstandsabhängigen reduzierten Querschnittsfläche $A_{red}(h)$ zu multiplizieren, um daraus auch für komplexe Profilformen und stark schwankende Wasserstände genaue Durchflussmesswerte Q ableiten zu können.

Dazu muss die stark profil- und (hoch-) wasserstandsabhängige $A_{red}(h)$ - Funktion für den zu untersuchenden Messquerschnitt nur einmalig durch SIMK® - Kalibrierung bestimmt und im Messwertumformer der Durchflussmessstelle in Form einer einfachen A_{red} - h - Tabelle digital hinterlegt werden. Im Rahmen der kontinuierlichen Messungen wird der dem aktuell gemessenen Wasserstand h entsprechende $A_{red}(h)$ - Faktor aus dieser Kalibriertabelle abgegriffen und entsprechend (9) mit der lokal gemessenen Fließgeschwindigkeit v_l multipliziert. Das Ergebnis dieser einfachen Multiplikation ist der gesuchte Durchfluss Q, der auf diese Weise bis in den extremen Hochwasserbereich mit hoher Genauigkeit und ohne weitere Nachbearbeitung online bestimmt und deshalb für aktuelle Hochwasservorhersagen, Hochwasserwarnungen und Abflusssteuerungen genutzt werden kann.

Der Vergleich von (1) und (9) zeigt somit, dass SIMK® eine Methode ist, die ständig durchzuführende, meist relativ aufwändige und daher für aktuelle Hochwasservorhersagen, Hochwasserwarnungen und Abflusssteuerungen ungeeignete Interpretationen lokaler Geschwindigkeitsmesswerte (v_l ⇨ v_m) durch eine systematische und deshalb nur einmalig durchzuführende Transformation bekannter geometrischer Informationen in gesuchte hydraulische Informationen (A ⇨ A_{red}) ersetzt. SIMK® verursacht daher je Messstelle nur einmalige Installations-, aber keinerlei laufende Kosten. Stattdessen werden die laufenden Betriebskosten stark reduziert. Die Vorteile des SIMK® - Kalibrierverfahrens können daher durch ein einmaliges einfaches Update dauerhaft genutzt werden. Aus demselben Grund nimmt die Effektivität des SIMK® - Kalibrierverfahrens mit zunehmender Messdauer und Messfrequenz zu und bietet vor allem für Hochwasserabflussmessungen große Vorteile.

In der geschilderten Weise wurde die oben erläuterte SIMK® - Kalibrierung der Durchflussmessstelle Berlin - Mühlendamm für systematisch variierte Wasserstände wiederholt und für kontinuierliche Videodurchflussmessungen genutzt. Im Rahmen einer viermonatigen Testmessung wurde hierzu seitlich der etwa 14 m breiten Spree - Oder - Wasserstraße eine Videokamera montiert, mit deren Hilfe die Wasseroberfläche des Kanals kontinuierlich gefilmt wurde. Mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung wurden aufgrund dieser Videofilme die Oberflächengeschwindigkeiten v_o des Kanals innerhalb eines genau definierten kleinen Fensters berührungslos und kontinuierlich bestimmt. Im Auftrag der BfG wurden die diesem Videofenster entsprechenden dimensionslosen wasserstandsabhängigen Skalierungsfaktoren $k_o = v_m / v_o$ entsprechend Abb. 13 durch SIMK® - Kalibrierung bestimmt, um aus den berührungslos gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten v_o entsprechend (8) und (9) auf die gesuchten Durchflüsse Q_{SIMK} zu schließen. Diese Video - Durchflussmessanlage wurde von der

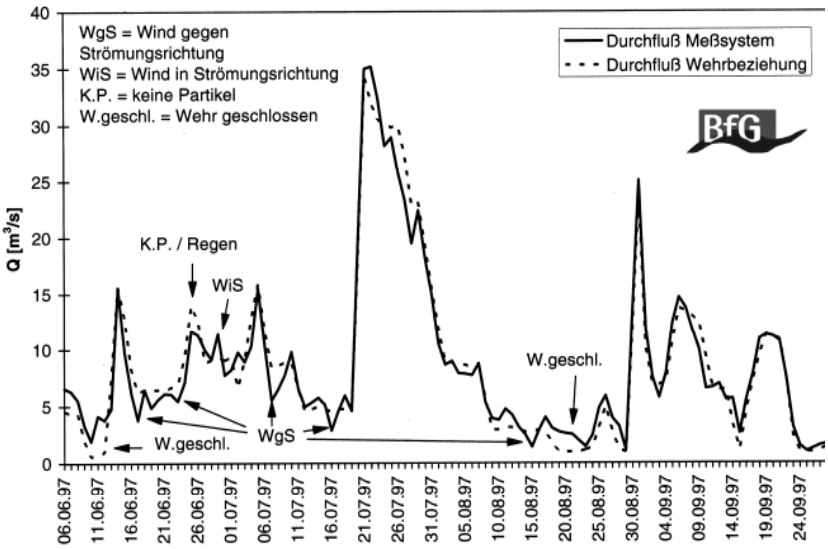


Abb. 14 Vergleich der mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens kalibrierten Videodurchflussmessungen mit zeitgleichen Wehrdurchflussmessungen am Pegel Mühlendamm an der Spree - Oder - Wasserstraße in Berlin (AG: BfG, [11])

BfG über einen Zeitraum von 16 Wochen betrieben.

Die Abb. 14 zeigt einen Vergleich der in dieser Zeit mittels Videoanlage gemessenen Durchflüsse Q_{SIMK} mit den Durchflüssen Q_{Wehr}, die von der BfG aus zeitgleichen Oberwasserstandsmessungen an einer etwa 200 m unterstrom existierenden ca. 14 m breiten Wehranlage abgeleitet wurden. Beide Ganglinien stimmen für den gesamten Messzeitraum vor allem bei großen Abflüssen gut überein. Eine ausführliche Erläuterung und Beurteilung dieser Videomessungen enthält [12].

Bei diesen Videodurchflussmessungen ist zu beachten, dass in dem ca. A = 55 m^2 großen Mittelwasserquerschnitt der Spree - Oder - Wasserstraße bei Durchflüssen von Q < 5 m^3/s mittlere Strömungsgeschwindigkeiten von nur v_m < 0.1 m/s auftreten. Erwartungsgemäß wurden die zugehörigen geringen Oberflächengeschwindigkeiten v_o entsprechend Abb. 14 vorübergehend durch Wind verfälscht. Ein Ziel der viermonatigen BfG - Testmessungen bestand darin, die aus Wind, Regen und anderen Störeinflüssen resultierenden Anwendungslimitierungen von Videodurchflussmessungen praxisnah zu prüfen und zu dokumentieren. Bei Oberflächengeschwindigkeiten von v_o > 0.25 m/s waren gemäß Abb. 14 praktisch keine Beeinflussungen der Video - Durchflussmessungen durch Wind mehr feststellbar. Bei Oberflächengeschwindigkeiten von v_o > 0.25 m/s können wasserstandsabhängige SIMK® - Kalibrierungen somit typischerweise genutzt werden, um auf der Basis berührungsloser Video- oder Radarmessungen von Oberflächengeschwindigkeiten die Durchflüsse in Flüssen und Kanälen kontinuierlich mit hoher Genauigkeit zu messen. Bei kleineren Oberflächengeschwindigkeiten müssen vorübergehend geringe Messwertverfälschungen durch Wind in Kauf genommen werden, so dass in diesem Fall alternative Geschwindigkeitsmessverfahren bevorzugt werden sollten.

5.3 Wasserwirtschaftsamt Weilheim

Für die in Abb. 15 dargestellte Radarmessstelle Rißbachdüker am Rißbach können Windeinflüsse sicher ausgeschlossen werden, denn in dieser in unmittelbarer Nähe der österreichisch - deutschen Grenze gelegenen Durchflussmessstelle herrschen selbst bei Mittelwasser Oberflächengeschwindigkeiten von ca. v = 1.3 m/s. Der Rißbach mündet ca. 5 km oberstrom des Sylvenstein - Stausees in die Isar und entwässert einen ca. 182 km^2 großen Teil des hochalpinen Karwendelgebirges. Daher hat der Rißbach Wildbachcharakter und ist durch sehr schnell und stark schwankende Wasserstände und Abflüsse gekennzeichnet. In der in Abb. 15 dargestellten nur ca. 20 m breiten und durch steile Felswände begrenzten Durchflussmessstelle traten während des Pfingsthochwassers 1999 mit ca. Q_{max} = 345 m^3/s [1] Scheitelabflüsse auf, durch die eine hier installierte Seilkrananlage zerstört wurde.

Im Auftrag des WWA Weilheim wurde das in Abb. 15 gut erkennbare Radar - Geschwindigkeitsmesssystem mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens für den gesamten praxisrelevanten Wasserstandsschwankungsbereich (5) kalibriert, der über den Scheitelwasserstand des Pfingsthochwassers 1999 hinausgeht. Als Datengrundlage der SIMK® - Kalibrierung diente ausschließlich eine genaue Querprofilaufnahme desjenigen Abflussquerschnitts, in dem die Oberflächenströmungsgeschwindigkeiten v_o mittels Radar berührungslos gemessen werden und das in Abb. 15 dargestellte Foto, auf dessen Grundlage die Sohl- und Wandrauheiten des Abflussquerschnitts abgeschätzt wurden.

Aufgrund der wasserstandsabhängigen SIMK® - Kalibrierung der Rißbachmessstelle wurde für die berührungslosen Radar - Geschwindigkeitsmessungen eine hydraulisch optimale Querprofilposition ($x=x_P$, $y=h$) empfohlen, und dem WWA Weilheim wurden die dieser optimierten Messpositi-

Abb. 15 SIMK® - Radardurchflussmessstelle Rißbachdüker / Rißbach (AG: WWA Weilheim)

on entsprechenden Kalibrierfunktionen $k(h) = v_m / v_o$ und $A_{red}(h) = A(h) * k(h)$ zur Verfügung gestellt. Daraufhin wurde der Radarsensor auf die empfohlene Querprofilposition ($x=x_P$, $y=h$) ausgerichtet, und die mit Hilfe des SIMK® - Modells bestimmte wasserstandsabhängige Kalibrierfunktion $A_{red}(h)$ wurde im Messwertumformer der Radaranlage in digitaler Form hinterlegt, so dass mit Hilfe der so konfigurierten Radaranlage die gesuchten Durchflüsse Q entsprechend (9) dauerhaft ohne jede weitere Nachbearbeitung unmittelbar bestimmt, digital gespeichert und per Modem fernabgefragt werden können.

Die auf diese Weise bestimmten Durchflüsse Q_{SIMK} wurden vom WWA Weilheim überprüft, indem sie mit unabhängigen Referenzdurchflussmessungen Q_{Ref} verglichen wurden, die vor allem auf Tracermessungen basieren. Das WWA Weilheim hat seine Überprüfungen in [3] dokumentiert und kommt zu folgender zusammenfassenden Bewertung der mit Hilfe des SIMK® - Kalibrierverfahrens für den in Abb. 15 dargestellten Pegel Rißbach erzielten Durchflussmessergebnisse: „Das SIMK® - Verfahren, aufbauend auf einem einfachen Querprofil, liefert praktisch identische Werte verglichen mit den langjährig aufwändig ermittelten Daten der W / Q - Beziehung."

5.4 Wasserwirtschaftsamt Passau

Auch die Messgenauigkeit der in Kap. 1 erläuterten SIMK® - Radardurchflussmessanlage Schrottenbaummühle / Ilz wurde anhand unabhängiger Vergleichsmessungen des WWA Passau überprüft. Da mit Hilfe der in Abb. 2 dargestellten Radaranlage die Wasserstände h_R und die Oberflächengeschwindigkeiten v_R der Ilz in Intervallen von 3 Minuten berührungslos gemessen und digital gespeichert werden, konnten in dieser Messstelle bereits wenige Wochen nach Inbetriebnahme mehrere Ilzhochwässer registriert und vollständig aufgezeichnet werden.

Die Abb. 16 zeigt exemplarisch ein ca. zwölfstündiges Hochwasser (ca. HQ_1), das in der Nacht vom 07.10. auf den 08.10.2003 in dem in Abb. 1 dargestellten Ilzabschnitt auftrat und von der Radaranlage ausfallfrei registriert wurde. Während dieses Hochwassers stiegen die Wasserstände um ca. $\Delta h_R = 0.8$ m und die Oberflächenströmungsgeschwindigkeiten von $v_R = 0.97$ m/s bis auf $v_R = 2.47$ m/s um mehr als 250 % an. Innerhalb von 18 Stunden verzehnfachten sich die mit Hilfe der Radaranlage registrierten Durchflüsse von $Q_{SIMK} = 3.4$ bis auf $Q_{SIMK} = 33.2$ m³/s. Wie erwartet ist der Hochwasseranstieg steiler als der nachfolgende Hochwasserabfall. Am Abend des 07.10.2003 wurden während dieses relativ kleinen Ilzhochwassers kontinuierliche Abflusszunahmen um bis zu ca. 25 % innerhalb von nur 30 Minuten registriert. Diese

WWA Passau - Radaranlage Schrottenbaummühle / Ilz

ISAR CONSULT
Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft GmbH
www.isar-consult.de

Schrottenbaummühle		Messwert	Min	Mittel	Max	Σ [T.m³]
0205	Abfluss	Q_{SIMK} [m³/s]	3.41	14.17	33.17	2448
0011	Geschwindigkei	v_R [m/s]	0.973	1.656	2.471	
0010	Pegelstand	h_R [m]	0.61	0.96	1.42	

Messzeitraum: von Di, 07.10.03 00:00
bis Do, 09.10.03 00:00

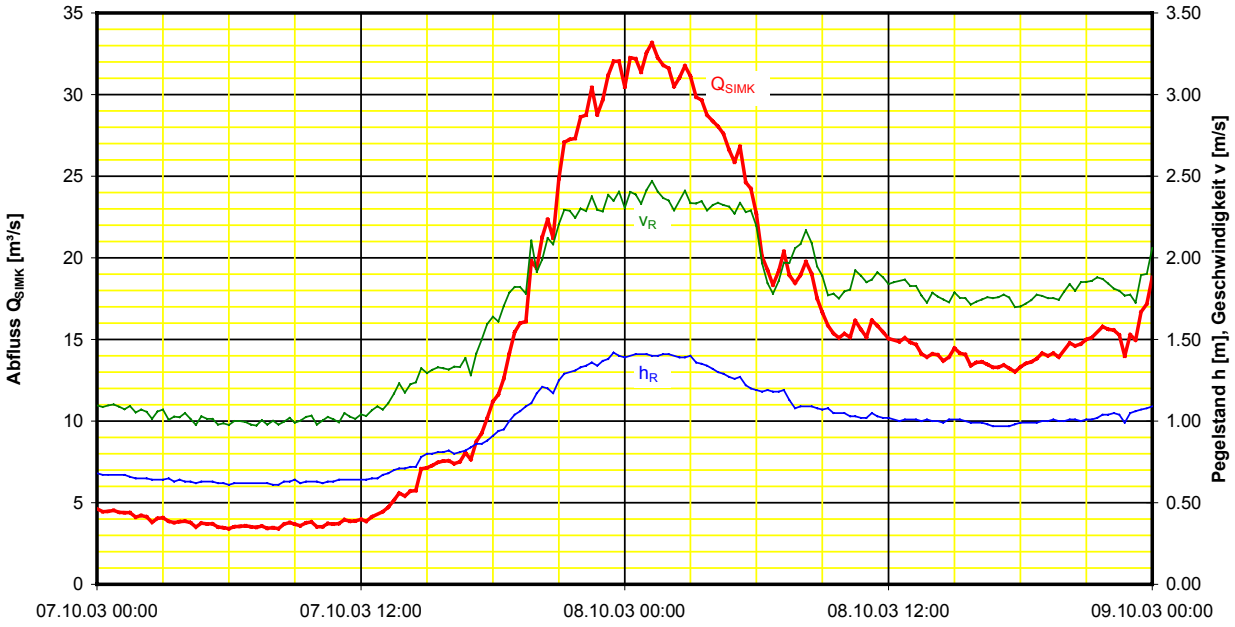


Abb. 16 detaillierte und ausfallfreie Hochwasseraufzeichnung mit Hilfe der in Abb. 1 und 2 dargestellten SIMK® - Radardurchflussmessstelle Schrottenbaummühle / Ilz (AG: WWA Passau)

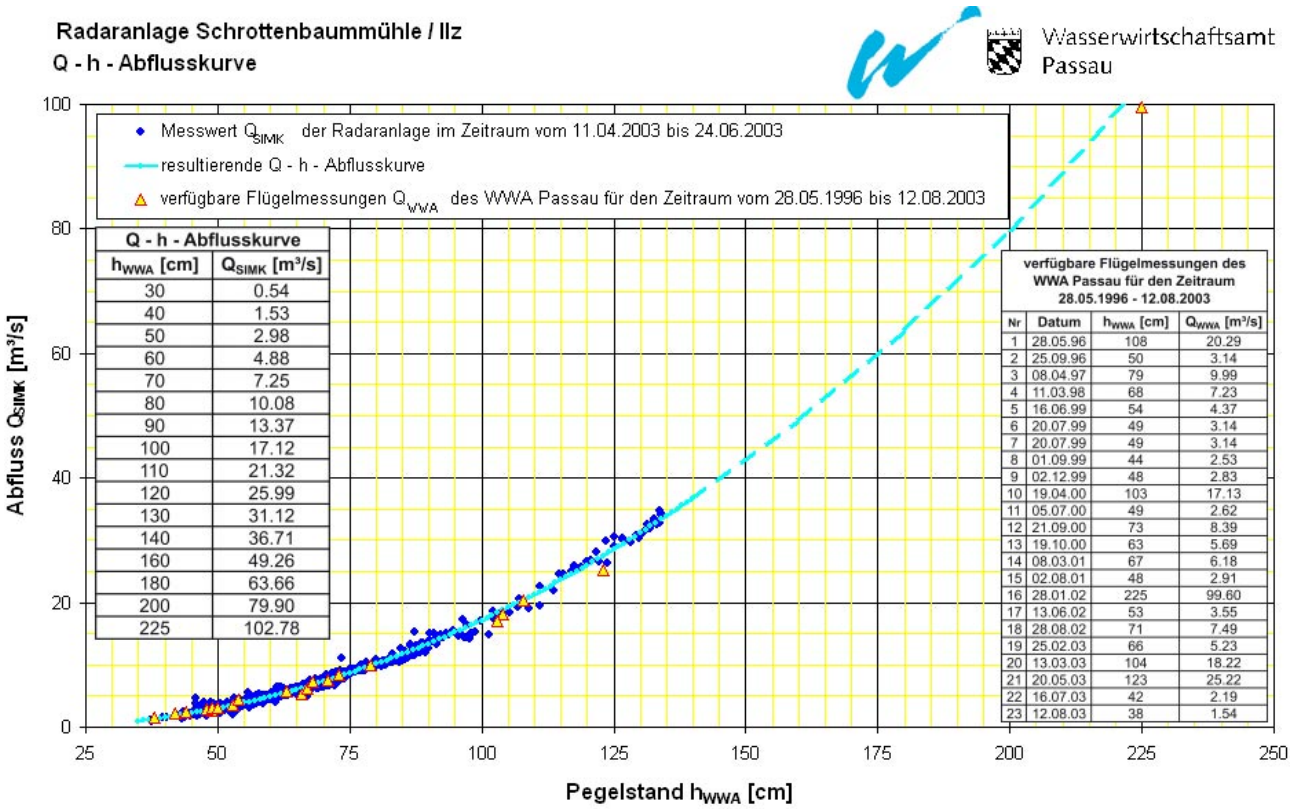
Zeitspanne ist etwa so groß wie die Dauer einer vollständigen Geschwindigkeitsprofilaufnahme mit Hilfe eines hydrometrischen Messflügels.

Ca. 20 m unterstrom der in Abb. 2 dargestellten Ilzbrücke befindet sich der Lattenpegel Schrottenbaummühle, an dem die Ilzwasserstände h_{WWA} vom WWA Passau seit vielen Jahren gemessen werden. Darüber hinaus führte das WWA Passau zwischen dem 28.05.1996 und dem 12.08.2003 von der in Abb. 2 dargestellten Brücke aus insgesamt 23 Geschwindigkeitsprofilaufnahmen der Ilz mittels hydrometrischem Messflügel durch. Dies entspricht einer auch für vergleichbare Durchflussmessstellen typischen mittleren Messfrequenz von ca. 3.2 Flügelmessungen pro Jahr.

Die mit Hilfe der Flügelmessungen bestimmten Ilzdurchflüsse Q_{WWA} und die zeitgleich registrierten Ilzwasserstände sind in Abb. 17 in tabellarischer und graphischer Form angegeben. Hiernach wurden mit Hilfe der Flügelmessungen innerhalb von ca. 7 Jahren Wasserstandsschwankungen von $0.38\ m \le h_{WWA} \le 1.23\ m$ und Durchflussschwankungen von $1.54\ m^3/s \le Q_{WWA} \le 25.22\ m^3/s$ erfasst. Am 28.01.2002 gelang es dem WWA Passau zusätzlich, ein mit $h_{WWA} = 2.25\ m$ und mit $Q_{WWA} = 99.6\ m^3/s$ wesentlich größeres Ilzhochwasser mit Hilfe des Abflussmesswagens des WWA Landshut zu dokumentieren.

Um die mit Hilfe der SIMK® - Radardurchflussmessanlage berührungslos gemessenen Durchflüsse Q_{SIMK} unmittelbar mit den Flügelmessungen Q_{WWA} des WWA Passau vergleichen zu können, wurden die zwischen dem 11.04.2003 und dem 24.06.2003 mittels Radar gemessenen Durchflüsse Q_{SIMK} über den zeitgleich vom WWA Passau gemessenen Wasserständen h_{WWA} aufgetragen. Für die elfwöchigen Radarmessungen resultieren daraus für das eingestellte Messintervall von $\Delta t = 3$ Minuten bzw. für die dem entsprechende Radarmessfrequenz von ca. 175000 Messungen pro Jahr etwa 36000 Q_{SIMK} / h_{WWA} - Messwertpaare, die in Abb. 17 zusätzlich dargestellt sind.

Die Flügelmessungen Q_{WWA} des WWA Passau und die SIMK® - Radardurchflussmessungen Q_{SIMK} zeigen für den durch die vorhandenen Flügelmessungen durchgehend dokumentierten Messbereich $0.38\ m \le h_{WWA} \le 1.23\ m$ gute Übereinstimmungen. Sowohl die Flügelmessungen als auch die Radarmessungen weisen geringe Schwankungen auf, so dass für dieselben Wasserstände h_{WWA} geringfügig variierende Durchflüsse Q_{SIMK} und Q_{WWA} vorliegen. Diese geringen Schwankungen der Einzelmesswerte entsprechen dem hochturbulenten Strömungscharakter des naturnahen Flusses (vergl. Abb. 1). Dies verdeutlicht die in Abb. 17 zusätzlich sowohl graphisch als auch tabellarisch angegebene Ausgleichskurve durch alle für den elfwöchigen Radarmesszeitraum vorliegenden Q_{SIMK} / h_{WWA} - Messwertpaare, die



Q - h - Abflusskurve

h_{WWA} [cm]	Q_{SIMK} [m³/s]
30	0.54
40	1.53
50	2.98
60	4.88
70	7.25
80	10.08
90	13.37
100	17.12
110	21.32
120	25.99
130	31.12
140	36.71
160	49.26
180	63.66
200	79.90
225	102.78

verfügbare Flügelmessungen des WWA Passau für den Zeitraum 28.05.1996 - 12.08.2003

Nr	Datum	h_{WWA} [cm]	Q_{WWA} [m³/s]
1	28.05.96	108	20.29
2	25.09.96	50	3.14
3	08.04.97	79	9.99
4	11.03.98	68	7.23
5	16.06.99	54	4.37
6	20.07.99	49	3.14
7	20.07.99	49	3.14
8	01.09.99	44	2.53
9	02.12.99	48	2.83
10	19.04.00	103	17.13
11	05.07.00	49	2.62
12	21.09.00	73	8.39
13	19.10.00	63	5.69
14	08.03.01	67	6.18
15	02.08.01	48	2.91
16	28.01.02	225	99.60
17	13.06.02	53	3.55
18	28.08.02	71	7.49
19	25.02.03	66	5.23
20	13.03.03	104	18.22
21	20.05.03	123	25.22
22	16.07.03	42	2.19
23	12.08.03	38	1.54

Abb. 17 Q - h - Abflusskurve des Pegels Schrottenbaummühle / Ilz auf der Basis elfwöchiger SIMK® - Radarmessungen und siebenjähriger historischer Flügelmessungen des WWA Passau

der Q - h - Abflusskurve des langjährigen Ilzpegels Schrottenbaummühle entspricht. Die auf diese Weise mittels elfwöchiger SIMK® - Radardurchflussmessungen Q_{SIMK} erzielte Q - h - Abflusskurve des vorhandenen Ilzpegels Schrottenbaummühle ist praktisch identisch mit derjenigen Ausgleichskurve, die für denselben Pegel aus den 23 innerhalb von ca. sieben Jahren erzielten Flügelmessungen abgeleitet werden kann.

Die Abb. 17 zeigt somit, dass mit Hilfe von SIMK® - Kalibrierungen auch in naturnahen Flussabschnitten wie der in Abb. 1 dargestellten Ilz bereits unmittelbar nach Montageabschluss für den gesamten Wasserstands- und Durchflussschwankungsbereich reproduzierbar genaue Durchflussmessungen erzielt werden, die weder Messstellenbesuche noch aufwändige nachträgliche Messdatenauswertungen erfordern und daher im Gegensatz zu Flügelmessungen auch für aktuelle Hochwassermeldungen, Hochwasservorhersagen und Abflusssteuerungen geeignet sind.

Die am Ilzpegel Schrottenbaummühle vollautomatisch, berührungslos und daher wartungsfrei durchgeführten elfwöchigen SIMK® - Radardurchflussmessungen Q_{SIMK} liefern für diesen Pegel praktisch dieselbe Q - h - Abflusskurve wie alle innerhalb von mehr als sieben Jahren durchgeführten Flügelmessungen Q_{WWA}. Dies bestätigt die in Kap. 5.3 zitierte Beurteilung des SIMK® - Kalibrierverfahrens durch das WWA Weilheim.

Die erzielbaren Genauigkeiten von SIMK® - Durchflussmessungen sind somit sowohl in Kanälen (vergl. 5.1 und 5.2.2) als auch in naturnahen Flüssen (vergl. 5.2.1, 5.3, 5.4 und 5.5) zumindest nicht schlechter als die von Flügelmessungen, aber SIMK® - Durchflussmessungen erfordern im Gegensatz zu Flügelmessungen weder laufende Betriebskosten noch Messdatennachbearbeitungen.
Im Gegensatz zu Flügelmessungen erlauben SIMK® - Durchflussmessungen dauerhaft kurze Messintervalle von wenigen Minuten. Daher sind berührungslose und deshalb auch bei Hochwasser ausfallsichere und wartungsfreie SIMK® - Durchflussmessungen im Gegensatz zu personalintensiven Flügelmessungen auch für simultane zeitlich hoch auflösende Messungen kurzzeitiger seltener Hochwasserereignisse an allen relevanten Messstellen eines Einzugsgebiets geeignet. Außerdem sind die Ergebnisse von SIMK® - Durchflussmessungen im Gegensatz zu Flügelmessungen sofort verfügbar und damit onlinefähig.

Aufgrund der in Abb. 17 dokumentierten Messgenauigkeiten und der erläuterten Vorteile von SIMK® - Durchflussmessungen plant das WWA Passau den bedarfsgerechten temporären Einsatz mobiler SIMK® - Radaranlagen, um mit deren Hilfe von vorhandenen Brücken aus bei Hochwasser kurzfristig in hoher zeitlicher Auflösung komplette Wasserstands- und Abflussganglinien zu messen und um darauf basierend die zugehörigen Q - h - Abflusskurven dieser Messstellen entsprechend Abb. 17 schnell, kostengünstig, hoch auflösend und genau zu ermitteln.

5.5 Wasserwirtschaftsamt Landshut

Das in Abb. 18 dargestellte Digitalfoto wurde von der Europabrücke Kelheim aus nach oberstrom aufgenommen und zeigt die typischen Anstromverhältnisse der vom WWA Landshut betriebenen Durchflussmessstelle Kelheim an der Donau. Bei Niedrigwasser weist die Donau hier eine Wassertiefe von ca. h = 1.1 m und eine Breite von B = 105 m auf. Während des Pfingsthochwassers 1999 wurde mit h = 7.7 m eine um ca. Δh = 6.6 m größere Wassertiefe und mit B = 194 m eine nahezu doppelt so große Wasserspiegelbreite gemessen. Dabei wurden die in Abb. 18 gut erkennbaren ausgedehnten Vorländer um mehr als 2 m überflutet.

Von der Europabrücke Kelheim aus führt das WWA Landshut regelmäßig vollständige Geschwindigkeitsprofilaufnahmen mittels hydrometrischem Schwimmflügel durch. Aufgrund des mehrere hundert Quadratmeter großen Abflussquerschnitts erfordert dies zahlreiche Flügelmessungen, die vor allem bei Hochwasser sehr zeitaufwändig sind. Um die Genauigkeit und die Praxistauglichkeit des SIMK® - Verfahrens zu überprüfen und um den regelmäßig zu wiederholenden Aufwand der Flügelmessungen zu vermeiden oder zumindest stark zu reduzieren, wurden im Auftrag des WWA Landshut wasserstandsabhängige SIMK®- Kalibrierungen der Donaumessstelle Kelheim durchgeführt.

Für den Donaupegel Kelheim ergibt sich aus den wasserstandsabhängigen SIMK®- Simulationen ein ortsfester außermittig gelegener ca. 20 m breiter oberflächennaher Querprofilbereich, in dem wasserstandsunabhängig die maximalen Axialgeschwindigkeiten v_{max} zu erwarten sind. Dem WWA Landshut wurde deshalb empfohlen, nur in diesem genau angegebenen ca. 20 m breiten oberflächennahen Querprofilbereich drei voneinander unabhängige Flügelmessungen durchzuführen. Die größte der daraus resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten kann für alle praxisrelevanten Wasserstände als gute Näherung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit v_{max} des gesamten Donauabflussquerschnitts angesehen werden. Mit Hilfe des SIMK®- Verfahrens wurden entsprechend (2) und (8) die wasserstandsabhängigen Kalibrierfunktionen $k_{max}(h) = v_m / v_{max}$ und $A_{red}(h) = A(h) * k_{max}(h)$ des Donaupegels Kelheim bereitgestellt, die es entsprechend (9) ermögli-

Abb. 18 SIMK® - Durchflussmessstelle Kelheim / Donau (AG: WWA Landshut)

chen, aus den drei genannten Flügelmessungen unmittelbar auf die gesuchten Durchflüsse Q_{SIMK} der Donau zu schließen.

Entsprechend diesem stark vereinfachten Verfahren wurden nachträglich alle 28 in Tab. 3 zusammengefassten historischen Geschwindigkeitsprofilaufnahmen des WWA Landshut ausgewertet. Q_{Profil} bezeichnet dabei die aus den vollständigen Auswertungen aller Flügelmessungen resultierenden Durchflüsse, während Q_{SIMK} diejenigen Durchflüsse bezeichnet, die sich für denselben Abflussquerschnitt gemäß der oben erläuterten Empfehlung unter Berücksichtigung von nur drei ausgewählten Flügelmessungen und der wasserstandsabhängigen Kalibrierfunktion $A_{red}(h)$ ergeben. Die $\Delta Q = (Q_{SIMK} - Q_{Profil}) / Q_{Profil}$ - Werte, die in der letzten Spalte der Tab. 3 angegeben sind, bezeichnen die auf Q_{Profil} bezogenen Abflussdifferenzen.

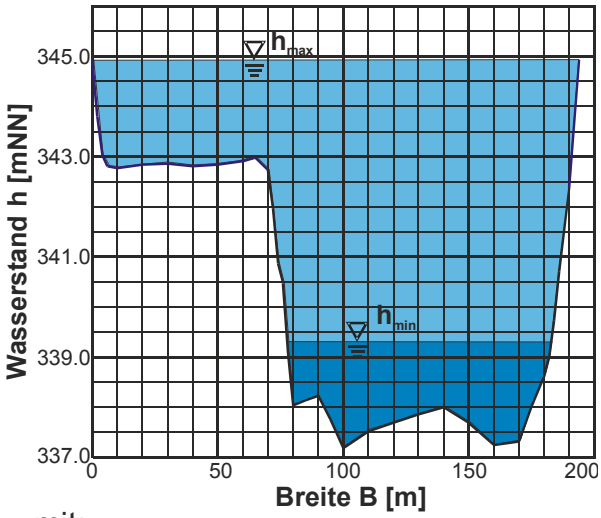
Flügelmessungen, bei denen Überflutungen der ausgedehnten Donauvorländer auftraten, sind in Tab. 3 durch Fettdruck hervorgehoben. Gemäß Tab. 3 liefert die stark vereinfachte SIMK® - Durchflussbestimmung mit ΔQ = -0.6 % für den Pegel Kelheim / Donau im Mittel nahezu dieselben Ergebnisse wie die wesentlich aufwändigeren Auswertungen der vollständigen Flügelmessungen. Abweichungen von ± 10 % werden für keine der 28 Vergleichsmessungen erreicht. Die Abweichungen ΔQ zeigen keinen wasserstandsabhängigen Trend, obwohl die zugehörigen Kalibrierfaktoren systematischen stark wasserstandsabhängigen Variationen unterliegen. Da sich insbesondere für die in Tab. 3 durch Fettdruck hervorgehobenen Hochwasserabflüsse trotz stark veränderter Kalibrierfaktoren nur geringe Abweichungen ΔQ ergeben, beweist die Tab. 3, dass profil- und wasserstandsabhängige SIMK® - Kalibrierungen genaue Durchflussbestimmungen bis in den extremen Hochwasserbereich erlauben. Die vorgelegten SIMK® - Kalibrierergebnisse lassen sich daher für den in Abb. 18 dargestellten Pegel Kelheim / Donau nutzen, um in Zukunft die Donaudurchflüsse ohne Genauigkeitsverlust auf der Grundlage sehr stark vereinfachter Flügelmessungen oder berührungsloser und daher ausfallsicherer und wartungsfreier Radarmessungen (vergl. Abb. 2) zu bestimmen.

Nr.	Datum	A [m²]	Q_{Profil} [m³/s]	Q_{SIMK} [m³/s]	ΔQ [%]
1	**23.02.99**	**641.9**	**1392.9**	**1412.1**	**1.4**
2	23.03.99	305.1	479.5	489.1	**2.0**
3	27.04.99	284.9	450.1	457.6	**1.7**
4	**15.05.99**	**755.6**	**1646.6**	**1686.1**	**2.4**
5	**24.05.99**	**954.8**	**2048.7**	**2240.0**	**9.3***
6	16.06.99	353.5	573.9	560.6	**-2.3**
7	21.07.99	294.5	452.5	465.9	**3.0**
8	11.10.99	222.3	266.6	268.4	**0.7**
9	09.11.99	210.0	226.4	218.6	**-3.4**
10	20.01.00	238.5	314.1	320.1	**1.9**
11	13.04.00	289.0	452.5	450.8	**-0.4**
12	05.09.00	285.3	430.5	434.1	**0.8**
13	12.10.00	266.4	369.8	354.4	**-4.2**
14	23.11.00	235.4	282.7	256.6	**-9.2**
15	18.01.01	240.1	292.6	271.6	**-7.2**
16	06.03.01	366.1	659.8	652.2	**-1.2**
17	06.06.01	257.6	386.1	406.6	**5.3**
18	06.09.01	249.7	366.7	384.0	**4.7**
19	15.10.01	198.6	217.6	205.4	**-5.6**
20	13.11.01	213.6	254.8	244.8	**-3.9**
21	16.05.02	244.9	315.1	296.6	**-5.9**
22	25.07.02	208.5	242.6	242.5	**0.0**
23	**14.08.02**	**785.2**	**1700.0**	**1691.9**	**-0.5**
24	14.10.02	294.6	438.0	422.1	**-3.6**
25	17.12.02	268.6	354.5	345.9	**-2.4**
26	25.02.03	227.8	292.3	294.3	**0.7**
27	31.03.03	228.2	309.2	309.8	**0.2**
28	17.07.03	154.9	139.9	138.7	**-0.9**
				Mittel:	**-0.6**

* Deichbruch während der Abflussmessung

Wasserwirtschaftsamt Landshut

Donau (km 2412.7)
Pegel Kelheim



mit:

A:	Fläche des Messquerschnitts
Q_{Profil}:	Klassische Flügelmessung
Q_{SIMK}:	SIMK - Auswertung von v_{max}
ΔQ:	$\Delta Q = (Q_{SIMK} - Q_{Profil}) / Q_{profil}$

Tab. 3 Überprüfung der wasserstandsabhängigen SIMK® - Kalibrierung der in Abb. 18 dargestellten Durchflussmessstelle Kelheim / Donau anhand 28 historischer Flügelmessungen des WWA Landshut

6. weitere Praxisanwendungen des SIMK® - Kalibrierverfahrens

Auch für weitere Messstellen existieren unabhängige Vergleichsmessungen, die zu ähnlichen Resultaten führten wie die in 5. erläuterten Überprüfungen des SIMK® - Kalibrierverfahrens. Daher werden nachfolgend keine weiteren Überprüfungen des SIMK® - Verfahrens, sondern exemplarisch 6 realisierte Praxisanwendungen des SIMK® - Kalibrierverfahrens vorgestellt, die weitere typische Anwendungen des SIMK® - Verfahrens zeigen.

Die Abb. 19 zeigt die mit Hilfe des SIMK® - Modells simulierte turbulente Geschwindigkeitsverteilung für das in Abb. 3 dargestellte stark gegliederte Vorlandprofil Muka Keratan für einen Maximalwasserstand von 7 m, bei dem beide Vorländer um ca. 3 m überflutet sind. An den Übergängen vom Hauptgerinne zu den Vorländern bilden sich gemäß Abb. 19 hochturbulente Trennflächenzonen aus, die durch steile horizontale Geschwindigkeitsgradienten gekennzeichnet sind. Diese für Vorlandprofile typischen Trennflächenzonen (vergl. Abb. 6, Abb. 18 und Tab. 3) werden mit Hilfe des SIMK® - Modells aufgrund der detaillierten Profildiskretisierung (vergl. Abb. 3) ohne weitere Vorgaben simuliert. Auf der Basis der in Abb. 19 dargestellten dimensionslosen Geschwindigkeitsverteilung und einiger weiterer Simulationen wasserstandsabhängiger Geschwindigkeitsverteilungen wurde die Kalibrierfunktion k(h) für den zusätzlich in Abb. 19 eingetragenen Ultraschall - Laufzeit - Messpfad entsprechend Kap. 5.2.2 in Form einer wasserstandsabhängigen k_l - h Tabelle bestimmt.

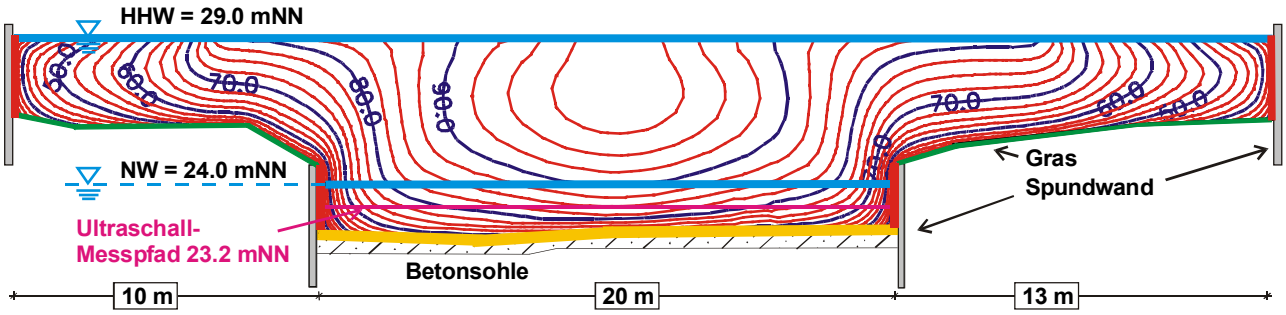


Abb. 19 SIMK® - Hochwasserkalibrierung der Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage Muka Keratan / Malaysia (vergl. Abb. 3)

Die Abb. 20 zeigt mit dem Pegel Helmarshausen an der Diemel einen typischen Mittelgebirgsfluss, in dem im Auftrag des Staatlichen Umweltamtes Kassel eine Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage installiert wurde, die mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens wasserstandsabhängig kalibriert wurde.

Die Abb. 21 zeigt eine im Auftrag des Straßen- und Wasserbauamtes Pfarrkirchen am Pegel Bruckhäuser im Kollbach installierte 2 - Ebenen - Ultraschall - Kreuzstrecken - Durchflussmessanlage, die mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens kalibriert wurde. Am linken Flussufer sind die beiden oberhalb der Mittelwasserlinie installierten Ultraschallsensoren der beiden oberen Ultraschall - Messpfade deutlich zu erkennen, die im Gegensatz zu den beiden ständig eingestauten unteren Ultraschall - Messpfaden nur bei Hochwasser aktiviert werden. Am 28.01.2003 wurde mit Hilfe dieser Ultraschallanlage ein Kollbachhochwasser von bis zu Q_{max} = 49.7 m^3/s registriert, bei dem ein Hochwasserstand erreicht wurde, der das Niveau der Brückenunterkante nur um wenige Dezimeter unterschritt. Dieses Hochwasser bewirkte einen vorübergehenden Einstau der beiden oberen Ultraschall - Messpfade. Während dieses Hochwassers führte das Straßen- und Wasserbauamt Pfarrkirchen zu Vergleichszwecken mehrere Flügelmessungen durch, die gut mit den Ergebnissen der SIMK® - Ultraschall - Durchflussmessungen übereinstimmten.

Abb. 20 SIMK® - Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage Helmarshausen / Diemel (AG: Staatliches Umweltamt Kassel)

Abb. 21 SIMK® - Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage Bruckhäuser / Kollbach (AG: Straßen- und Wasserbauamt Pfarrkirchen)

Auch die Abb. 22 zeigt eine mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens kalibrierte 2 - Ebenen - Ultraschall - Kreuzstrecken - Durchflussmessanlage. Die Messstelle befindet sich am Pegel Marpent des Flusses Escaut. Dieser typische nordfranzösische Flachlandfluss ist durch ein sehr geringes Fließgefälle und geringe Strömungsgeschwindigkeiten gekennzeichnet.

Abb. 22 SIMK® - Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage Marpent / Escaut (Frankreich)

Die Abb. 23 zeigt den von den Alzwerken als Triebwasserkanal ihres Wasserkraftwerks Burghausen genutzten trapezförmigen 4.5 m tiefen Alzkanal. Die Sohle und die beidseitigen steilen Böschungen dieses ca. $A = 50\ m^2$ großen Oberwasserkanals bestehen aus sehr glattem Beton, so dass in diesem Kanal bei bordvollem Abfluss trotz der hohen Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu ca. $v_m = 1.9$ m/s nur relativ geringe Reibungsverluste auftreten. Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Oberwasserkanals und damit auch die im Wasserkraftwerk gewinnbare elektrische Leistung wird durch jahreszeitlich variierenden Algenbewuchs beeinflusst. Um die Einflüsse dieser jahreszeitabhängigen Bewuchsänderungen zu erfassen, wurde im Auftrag der Alzwerke Burghausen eine Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage im Alzkanal installiert, die mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens kalibriert wurde. Aufgrund der völlig geradlinigen ungestörten Messstellenanströmung reichte hierzu die Installation eines einzigen Ultraschall - Messpfades aus.

Die Abb. 24 zeigt die im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) mit Hilfe des SIMK® - Verfahrens kalibrierte Durchflussmessstelle Mehring an der Mosel. Bei Mittelwasser ergibt sich für diese Messstelle eine Wasserspiegelbreite von ca. $B = 156$ m, eine maximale Wassertiefe in Flussmitte von ca. $t_{max} = 9.1$ m und ein Mittelwasserabfluss von ca. $MQ = 290\ m^3/s$. Bei einem HQ_{200} werden um ca. 3.5 m höhere Wasserstände, wesentlich größere Strömungsgeschwindigkeiten und Hochwasserabflüsse von ca. $HQ_{200} = 4000\ m^3/s$ erwartet.

Abb. 23 SIMK® - Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage Guflham / Alzkanal (AG: Alzwerke Burghausen)

In dieser Messstelle werden die Wasserstände h und die Strömungsgeschwindigkeiten v_i mit Hilfe eines H - ADCP - Systems („horizontal acoustic doppler current profiler“) kontinuierlich gemessen und mit Hilfe der im Messwertumformer digital hinterlegten SIMK® - Kalibrierkurve k(h) online in die zugehörigen Durchflüsse Q konvertiert.

H - ADCP - Messsysteme sind flexibel einsetzbar, weil sie in Ufernähe oder an vorhandenen Brückenpfeilern relativ einfach montiert werden können, aber nicht an der Montageposition, sondern in mittels Software konfigurierbaren Horizontalabständen lokale Strömungsgeschwindigkeiten v_i in genau definierten kleinen Messfenstern („cells“) messen, deren Positionen sich mit Hilfe

Abb. 24 SIMK® - H - ADCP - Durchflussmessanlage Mehring / Mosel (AG: Bundesanstalt für Gewässerkunde)

des SIMK® - Verfahrens gut optimieren lassen. Durch die bei H - ADCP - Messsystemen sehr einfach realisierbare räumliche Trennung von Montage- und exakt definierbarer Messposition lassen sich einfache Sensormontagen an oft vorhandenen Strukturen (z. B. Ufermauer, Brückenpfeiler) mit hydraulisch optimalen Messpositionen kombinieren, die sich typischerweise nicht in der Nähe, sondern in größeren Abständen von diesen Strukturen befinden.

7. Datengrundlage des SIMK® - Kalibrierverfahrens

SIMK® - Kalibrierungen von Durchflussmessstellen erfordern lediglich folgende Grundlageninformationen und Vorgaben:

- den gesamten praxisrelevanten Wasserstandsschwankungsbereich (5) abdeckende geometrische Profilaufnahme desjenigen Abflussquerschnitts, in dem die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten v_l gemessen werden,
- grobe Angaben zur Beschaffenheit der Gewässersohle, der Uferbereiche und der Vorländer (Kies / Sand / Wasserbausteine / Beton / Spundwand, Wiese, etc.),
- nach Möglichkeit Lagepläne und Digitalfotos der geplanten Messstelle sowie des Zu- und Abstrombereichs,
- zu untersuchende Wasserstands- und Abflussschwankungen ($h_{min} \leq h \leq h_{max}$ und $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$)
- und, sofern bekannt oder bereits vorab entschieden (z. B. bei Ultraschall - Laufzeitanlagen oder bei bereits installierten Radaranlagen), genaue oder einschränkende Angaben zu den Positionen (x,y) der lokalen Geschwindigkeitsmessungen.

Bei der Profilaufnahme des Messquerschnitts ist bei Radaranlagen zu beachten, dass die Oberflächenströmungsgeschwindigkeiten nicht unmittelbar unterhalb der Radarsensoren, sondern in einem entsprechend dem Einstrahlwinkel von ca. 40^o bis 60^o nach ober- oder unterstrom versetzten Abflussquerschnitt gemessen werden. Nach Möglichkeit sollte die Querprofilaufnahme in digitaler Form (z. B. als x - y - Ascii - Datensatz) bereitgestellt werden.

8. erweitertes SIMK® - Kalibrierverfahren

Aus hydraulischen Gründen sollten Durchflussmessstellen im Gewässerlängsschnitt möglichst so positioniert werden, dass sich die Geschwindigkeitsverteilung in Fliessrichtung entsprechend Kap. 3 nur allmählich ändert und somit gleichmäßige Messstellenanströmungen erzielt werden. Vor allem in großen Flüssen sind diese idealen Messstellenpositionierungen nicht immer realisierbar. Um bei Bedarf genaue Durchflussmessungen auch in Flussabschnitten durchführen zu können, in denen sich die Geschwindigkeitsverteilung in Fließrichtung stark ändert, existiert ein erweitertes SIMK® - Kalibrierverfahren, das es erlaubt, auch stark ungleichmäßig angeströmte Durchflussmessstellen bis in den extremen Hochwasserbereich zuverlässig zu kalibrieren.

Beim erweiterten SIMK® - Kalibrierverfahren wird nicht nur die Flussgeometrie des Messquerschnitts, sondern zusätzlich die des Zu- und Abstrombereichs berücksichtigt, so dass hydraulisch optimale Positionen (x,y) der lokalen Geschwindigkeitsmessungen und die zugehörigen Kalibrierfunktionen k(h) auch bei starken Sohlhöhen-, Richtungs- und Querschnittsänderungen (hoch-) wasserstandsabhängig bestimmt werden können. Beim erweiterten SIMK® - Kalibrierverfahren werden durch starke Flusskrümmungen, größere Seitenzuflüsse, Wasserausleitungen und / oder Hindernisse verursachte Strömungsablösungen und Rückstromzonen zusätzlich berücksichtigt, so dass annähernd uferparallele Messstellenanströmungen nicht vorausgesetzt werden müssen. Auch Wasserspiegelquerneigungen, die bei großen Strömungsgeschwindigkeiten und damit besonders bei Hochwasser praxisrelevant sind und sowohl die durchflossene Querschnittsfläche A(h) (vergl. (3)) als auch die geeignete Position der Wasserstandsmessung beeinflussen, werden beim erweiterten SIMK® - Kalibrierverfahren realitätsnah erfasst. Sofern erforderlich, werden beim erweiterten SIMK® - Kalibrierverfahren auch Beeinflussungen der wasserstandsabhängigen Kalibrierfunktionen k(h) durch vorhandene Wehre, Kraftwerksein- und -ausläufe, Kühlwasserentnahmen, Überfälle, Abstürze, Sohlrampen, Leitwerke, Buhnen, Brückenpfeiler, Durchlässe, etc. berücksichtigt.

Nachfolgend wird anhand von drei ausgeführten Praxisbeispielen exemplarisch verdeutlicht, dass der erhöhte Kalibrieraufwand des erweiterten SIMK® - Verfahrens zuverlässige und reproduzierbare Durchflussmessungen bis in den extremen Hochwasserbereich auch in solchen Flussabschnitten erlaubt, die durch gestörte Anströmverhältnisse gekennzeichnet sind. Erweiterte SIMK® - Kalibrierungen bieten daher stark erweiterte Anwendungsmöglichkeiten kontinuierlicher Durchflussmessverfahren.

8.1 Ultraschalldurchflussmessanlage Araizeki - Wehr / Seta - River (Japan)

Eine typische Praxisanwendung des erweiterten SIMK® - Kalibrierverfahrens zeigen die in Abb. 25 schematisch dargestellten Messpfade einer Ultraschall - Laufzeit - Responder - Durchflussmessan-

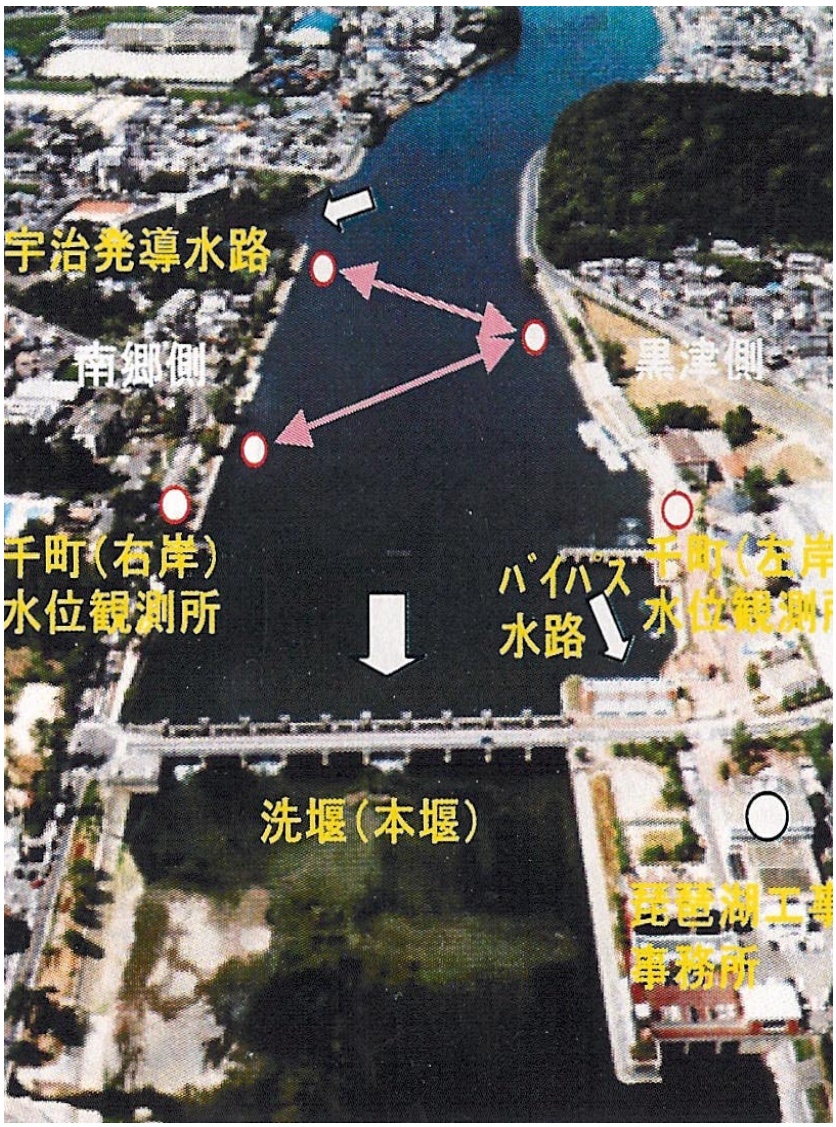


Abb. 25 SIMK® - Ultraschall - Laufzeit - Responder - Durchflussmessanlage unmittelbar oberstrom der zehnfeldrigen Araizeki - Wehranlage / Seta - River (Japan)

lage im japanischen Seta - River. Der Seta - River weist an dieser Messstelle ein ca. 3900 km^2 großes Einzugsgebiet auf, das auch den ca. 80 km nordöstlich von Osaka gelegenen Lake Biwa einschließt, der mit 674 km^2 der größte japanische Binnensee ist. Aus betrieblichen Gründen musste die Ultraschallanlage in dem hier ca. 150 m breiten Seta - River unmittelbar oberstrom der zur Abflusssteuerung des Lake Biwa genutzten zehnfeldrigen Araizeki - Wehranlage (Q_{max} = 1200 m^3/s) installiert werden, obwohl diese Staustufe bei bestimmten Betriebszuständen stark unsymmetrisch angeströmt wird. Gemäß Abb. 25 befindet sich die Messstelle unmittelbar unterstrom einer S - förmigen Flusskrümmung und unterstrom einer rechtsseitigen Kanalkraftwerksausleitung. Außerdem werden die lokalen Strömungsverhältnisse vor allem bei Mittel- und Niedrigwasser durch die stark unsymmetrische Anströmung des unterstrom der Durchflussmessstelle vorhandenen linksseitigen Flusskraftwerks beeinflusst, in dessen Zustrombereich sich entsprechend Abb. 25 fünf Pfeiler einer alten Wehranlage befinden, die heute als Wasserbaumuseum genutzt werden. Trotz der komplexen und durchflussabhängig stark variierenden Anströmverhältnisse der Araizeki - Staustufe wurde diese Ultraschall - Responderanlage mit Hilfe des erweiterten SIMK® - Kalibrierverfahrens erfolgreich kalibriert.

8.2 Radardurchflussmessanlage Vorderhornbach / Tiroler Lech (Österreich)

Die Abb. 26 zeigt die Lechbrücke Vorderhornbach, an der eine Radardurchflussmessanlage installiert wurde, die im Auftrag der EON Wasserkraft GmbH ebenfalls mit Hilfe des erweiterten SIMK® - Verfahrens kalibriert wurde. Die im Tiroler Lechtal gelegene Durchflussmessstelle Vorderhornbach befindet sich ca. 36 km oberstrom von Füssen und wird von der EON Wasserkraft GmbH für aktuelle Hochwassermeldungen und Hochwasservorhersagen genutzt, die dazu dienen, den Hochwasserrückhalteraum des ca. 15 km^2 großen Forggensees im Hochwasserfall optimal zu bewirtschaften und dadurch Hochwassergefährdungen des unterstromigen Lech- und Donautals zu reduzieren.

Das ca. 680 km^2 große Einzugsgebiet des Lechpegels Vorderhornbach erreicht mit der Parseier Spitze Geländehöhen von bis zu 3036 mNN und ist dementsprechend hochalpin. Daher ist der Tiroler Lech ein verzweigter stark hochwasser- und geschiebeführender Wildfluss, dessen grobschottriges Flussbett sich bei Hochwasser stark verändern kann. Durch wiederholte Sohlprofilaufnahmen wurden bereichsweise großflächige Sohlerosionen von $\Delta s \geq 2.0$ m während eines einzigen Hochwassers nachgewiesen. Das Sohlgefälle des Lech beträgt am Pegel Vorderhornbach ca. 6 ‰ und bewirkt hohe Strömungsgeschwindigkeiten, die bei Mittelwasser etwa v_m = 1.5 m/s betragen und bei Hochwasser in kurzer Zeit auf ca. v_{max} = 4.5 m/s ansteigen können.

Aufgrund dieser hydraulischen Randbedingungen war es äußerst schwierig, im Tiroler Lech eine geeignete Durchflussmessstelle zu finden. Um bei Hochwasser ausreichende Vorlaufzeiten für die Abflusssteuerung des Forggensees zu gewährleisten, musste die Messstelle einerseits ausreichend weit oberstrom des Forggensees installiert werden. Andererseits sollte an der Messstelle ein möglichst großer Teil des 1432 km^2 großen Lecheinzugsgebiets des Forggensees erfasst werden. Daher kam als potentieller Messstellenstandort nur der ca. 22 km lange Lechabschnitt zwischen Vorderhornbach und Reutte in Frage. Aufgrund der im Hochwasserfall zu erwartenden sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten und der instabilen Flussmorphologie sollten die Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen auf jeden Fall berührungslos und damit bevorzugt von einer vorhandenen Brücke aus erfolgen. Entlang des genannten 22 km langen Lechabschnitts existieren jedoch nur 6 Lechbrücken, von denen sich 5 in Bereichen sehr instabiler ungesicherter und teilweise stark verzweigter Sohlstrecken befinden.

Daher wurde als Durchflussmessstelle schließlich die in Abb. 26 dargestellte Lechbrücke bei Vorderhornbach gewählt, die sich unmittelbar oberstrom eines den Fluss querenden Felsriegels befindet, der Sohlerosionen verhindert. Die Lechbrücke Vorderhornbach befindet sich entsprechend Abb. 26 in einer Rechtskrümmung des Flusses. Unterstrom der Lechbrücke ist das Flussaußenufer durch Felsen, oberhalb der Lechbrücke dagegen durch Buhnen fixiert, die aus schweren Wasserbausteinen bestehen. Da der Lech im Bereich der Brücke Vorderhornbach außerdem nicht verzweigt ist, ein relativ kleines fixiertes stabiles Querprofil und ein überdurchschnittlich großes Gefälle aufweist, sind im Bereich der gewählten Messstelle im Gegensatz zu den weitaus meisten Flussabschnitten des Tiroler Lech keine Auflandungen zu erwarten.

Die Flussgeometrie ist somit im Bereich der Durchflussmessstelle Vorderhornbach langzeitstabil und erlaubt damit langfristig stabile und reproduzierbare Durchflussmessungen. Die berührungslosen Radarmessungen von der vorhandenen Lechbrücke aus gewährleisten auch bei Hochwasser trotz sehr großer Strömungsgeschwindigkeiten ausfallsichere Wasserstands- und Geschwindigkeitsmessungen. Allerdings wird die Messstellenanströmung vor allem bei Hochwasser durch die entlang des oberstromigen Außenufers vorhandenen Buhnen und vor allem durch die beiden im Flussbett angeordneten massiven Brückenpfeiler stark gestört. Au-

Abb. 26 SIMK® - Radardurchflussmessanlage Vorderhornbach / Lech (AG: EON Wasserkraft GmbH)

ßerdem kann im Hochwasserfall aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten keinesfalls ein im Messquerschnitt horizontaler Wasserspiegel vorausgesetzt werden. Stattdessen ist mit einer starken vom Außen- zum Innenufer gerichteten Wasserspiegelquerneigung und mit einem beträchtlichen oberstromigen Pfeileraufstau zu rechnen. Um die stark wasserstandsabhängige Beeinflussung der gesuchten Kalibrierfunktion k(h) durch diese Störeinflüsse realitätsnah berücksichtigen zu können, wurde die Durchflussmessstelle Vorderhornbach mit Hilfe des erweiterten SIMK® - Verfahrens bis in den erwarteten extremen Hochwasserbereich von ca. Q_{max} = 750 m^3/s kalibriert.

8.3 Ultraschalldurchflussmessanlage Ästuarsperrwerk Tonegawa (Japan)

Die Abb. 27 zeigt ein Luftbild des zehnfeldrigen Ästuarsperrwerks Tonegawa, das gezeitenabhängig so gesteuert wird, das Salzwassereinträge in den Unterlauf des hier ca. 600 m breiten Tonegawa minimiert und Hochwasserschäden vermieden werden. Das Ästuarsperrwerk Tonegawa befindet sich ca. 80 km östlich von Tokio und 19.5 km oberstrom der Tonegawa - Mündung in den Pazifik. Mit einem Mittelwasserabfluss von ca. Q_m = 350 m^3/s und einem Hochwasserabfluss von bis zu ca. Q_{max} = 16000 m^3/s ist der Tonegawa der größte Fluss Japans. Oberstrom des Ästuarsperrwerks wurde im Tonegawa eine Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage installiert, die mit Hilfe des erweiterten SIMK® - Verfahrens für verschiedene Betriebszustände des Ästuarsperrwerks kalibriert wurde.

9. Vorteile des SIMK® - Kalibrierverfahrens

SIMK® transformiert vorhandene oder einfach beschaffbare geometrische Grundlageninformationen in hydraulische Kenndaten, die die speziellen stark geometrie- und wasserstandsabhängigen Strömungsverhältnisse der Messstelle nicht nur für Mittel-, sondern vor allem auch für Hochwasser individuell und wasserstandsabhängig beschreiben und in Form einer profil- und wasserstandsabhängigen dimensionslosen Kalibrierfunktion $k(h) = v_m / v_l$ zur Verfügung gestellt werden.

SIMK® zeichnet sich aus durch:

- universelle Anwendbarkeit auf Fluss- und Kanalquerschnitte beliebiger Form und Größe,
- systematische wasserstandsabhängige Kalibrierungen bis in den extremen Hochwasserbereich,
- hohe Genauigkeit,
- flexible herstellerunabhängige Kombinierbarkeit mit jeder Art von punktueller (z. B. Ultraschall - oder Radar - Doppler) oder linienförmiger (z. B. Ultraschall - Laufzeit) Geschwindigkeitsmessung,

Abb. 27 SIMK® - Ultraschall - Laufzeit - Durchflussmessanlage oberstrom des zehnfeldrigen Ästuarsperrwerks / Tonegawa (Japan)

- Unabhängigkeit vom aktuellen (Hochwasser-) Abfluss und deshalb
- abflussunabhängige jederzeitige schnelle Verfügbarkeit.

SIMK® - Kalibrierungen liefern sehr einfache k - h - bzw. A_{red} - h - Tabellen, die

- je Durchflussmessstelle nur einmal bestimmt werden müssen,
- im Messwertumformer der Durchflussmessstelle in digitaler Form hinterlegt werden
- und unmittelbar anschließend auch bei Rückstau genaue Durchflussmessungen
- bis in den extremen Hochwasserbereich erlauben.

SIMK® - Durchflussmessungen sind daher gekennzeichnet durch

- geringe einmalige Investitionskosten,
- keine laufenden Betriebskosten,
- hohe Genauigkeiten,
- Wartungsfreiheit,
- sehr große Ausfallsicherheit,
- die Realisierbarkeit sehr kleiner Messintervalle (im Minuten- oder bei Bedarf sogar im Sekundenbereich) und
- die sofortige digitale Online - Verfügbarkeit aktueller Durchflussmesswerte ohne jede Nachbearbeitung.

SIMK® bietet somit besondere Vorteile, um folgende Aufgaben mit großer Ausfallsicherheit kurzfristig, genau, wartungsfrei, kostengünstig und bei Bedarf vollautomatisiert zu lösen:

- zeitgleiche kontinuierliche Erfassung und Aufzeichnung der Hochwasserabflüsse aller relevanten Pegel eines Einzugsgebietes,
- Online - Ausgabe und Datenfernübertragung aktueller (Hochwasser-) Abflussmesswerte,
- Hochwassernachrichten und Hochwasservorhersagen,
- optimale Bewirtschaftung begrenzter Hochwasserstauräume und andere Abflusssteuerungen
- und kurzfristige Bereitstellung lückenloser Q - h - Abflusskurven.

Literatur

[1] Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW):
Internetangebot des Bayerischen Hochwassernachrichtendienstes, http://www.hnd.bayern.de.

[2] Burggraf, R., Kölling, C.:
SIMK - Durchflussmessungen in den Hauptsammlern des Münchner Kanalnetzes, Nürnberger Wasserwirtschaftstag vom 27.06.2002 des ATV - DVWK - Landesverbandes Bayern, Nürnberg 2002 (Dieser Fachaufsatz steht unter http://www.isar-consult.de als PDF - Datei zum Download bereit.).

[3] Hannweber, M.:
Erfahrungsbericht des Sachgebietes Gewässerkunde zum SIMK - Durchflussmessverfahren, interner Bericht des WWA Weilheim (unveröffentlicht), Weilheim 2001.

[4] Kölling, C.:
Finite - Element - Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und teilgefüllten Rohrleitungen, Heft 60 des Lehrstuhls für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München, München 1994.

[5] Kölling, C., Petroff, A. M.:
New Finite Element Model accurately predicts velocity profiles.
Proc. of the 67th Water Environment Federation Conference, pp. 327 - 338. Chicago 1994.

[6] Kölling, C.,Valentin, F.:
SIMK - Abflussmessungen. Wasserwirtschaft 85 (1995), Nr. 10.

[7] Kölling, C.:
Kalibrierung von Abflußmeßstellen mit Hilfe des SIMK - Verfahrens,
Workshop Ultraschall - Durchflußmessungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Berlin 1996.

[8] Kölling, C.:
Praxiserfahrungen über SIMK - Durchflußmessungen in Flüssen und Kanälen.
Internationales Wasserbau - Symposium Planung und Realisierung im Wasserbau. Heft 82 des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, S. 565 - 582, München 1998.

[9] Kölling, C.:
SIMK - Kalibrierung von Durchflußmeßanlagen, Heft 19 der ATV - DVWK - Schriftenreihe Durchflußmessung an Regenüberlaufbecken“, Hennef, September 2000.

[10] Nezu, I., Rodi, W.:
Experimental study on secondary currents in open channel flow.
21st IAHR Congress, Proc. Vol. 2, pp. 114-119. Melbourne 1985.

[11] Siedschlag, S.:
Erfahrungen mit dem SIMK - Verfahren bei der Durchflussermittlung an Bundeswasserstraßen im Zusammenhang mit unterschiedlichen Methoden zur lokalen Fließgeschwindigkeitsmessung, BfG - Bericht 1099, Berlin 1997.

[12] Siedschlag, S.:
Durchflussermittlung mit Hilfe digitaler Bildverarbeitung und SIMK - Kalibration.
Wasserwirtschaft 88 (1998), Nr. 6.

[13] Strobl, T., Aufleger, M.:
Überprüfung von SIMK - Durchflussmessungen an der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Obernach vom 10.10.95, interner Bericht (unveröffentlicht), Obernach 1995.

[14] Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K.:
Experimental study on secondary currents in compound open - channel flows.
Proc. of the 23rd IAHR Congress, Ottawa 1989, pp. A15-A22.

Autor:

Dr. - Ing. Christian Kölling
Bürgermeister - Graf - Ring 10
D - 82538 Geretsried

ISAR CONSULT Ingenieurbüro für Wasserwirtschaft GmbH
ck@isar-consult.de
http://www.isar-consult.de

Tel.: +49 - (0)8171 - 17830
Fax: +49 - (0)8171 - 17805