

Numerische Simulation von windinduziertem Wellenüberlauf über Hochwasserentlastungen mit Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

Dominik Mayr und Nils B. Kerpen

Zusammenfassung

Hochwasserentlastungsanlagen von Speichern sind nach weltweit anerkannter Praxis auf ein gleichzeitiges Auftreten von maximaler Wasserabgabe und überlagerten Wellen zu Folge von Starkwinden auszulegen (ICOLD, 2012). Dabei werden die Wirkungen des extremen Abflusserignisses mit einer geringen Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 5.000 oder 10.000 Jahren mit Windereignissen höherer Auftretenswahrscheinlichkeit von 25 bzw. 50 Jahren überlagert.

Wird Wasser bei gleichzeitigem Auftreten von windinduzierten Wellen über eine Hochwasserentlastungsanlage abgegeben, beeinflussen die Wellen gegebenenfalls:

- die Gesamtförderfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlage,
- die Drücke entlang des Überfallrückens,
- die maximalen Spiegellagen bei Wehrbrücken und entlang der Schussrinne sowie
- das Überschwappen von Wellen.

Als Lagrange-basierte Simulationsmethode gewinnt das Smoothed Particle Hydrodynamics Verfahren (SPH) vor allem durch den Einsatz von immer leistungsstärkeren Grafikkarten zunehmend an Bedeutung. Mit dem Softwarepaket DualSPHysics steht eine Sammlung von C++- und CUDA-Codes für die Lösung realer technischer Probleme zur Verfügung. Diese kann auch zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen im Küsteningenieurwesen und der Talsperrenhydraulik Anwendung finden.

Im Beitrag wird die Simulation der Wasserabgabe über Wehrkronen von Hochwasserentlastungsanlagen ohne bzw. mit überlagerten Wellen mittels DualSPHysics dargestellt. Die Validierung der berechneten Strömungsparameter wie Wasserspiegel, Geschwindigkeiten, Stromlinien und Drücke erfolgt mit Messergebnissen, die an einem hydraulischen Modellversuch gewonnen wurden. Diese Versuche wurden am Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau-, Ästuar- und Küsteningenieurwesen der Leibniz Universität Hannover durchgeführt.

1 Einleitung

Bei windinduziertem Wellenüberlauf über eine Hochwasserentlastungsanlage (HWE) stellen sich im Bereich der Überfallkrone komplexe Strömungszustände ein. In Abb. 1 ist die Wasserabgabe über einen festen Überfallrückens ohne bzw. mit überlagerten Windwellen dargestellt. Wie Naturbeobachtungen zeigen, kann es bei windinduziertem Wellenüberlauf zu einem Abheben des Wassers vom Überfallrückens kommen (Li. et. al., 2021 und Naturbeobachtung: <https://www.youtube.com/watch?v=8wj559NaaMY>). Der Wasserstand im Bereich des Überfallrückens ist dann höher als bei einer Zuströmung zum Überfall ohne Wellen. Dies ist für die Beurteilung des Freibordes z.B. bei Brücken über den Überfall und entlang des Ablaufgerinnes sowie der Förderfähigkeit der HWE von Bedeutung.

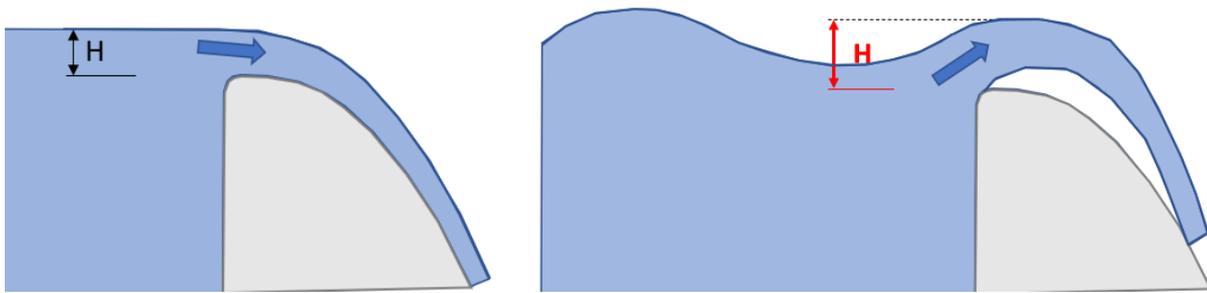
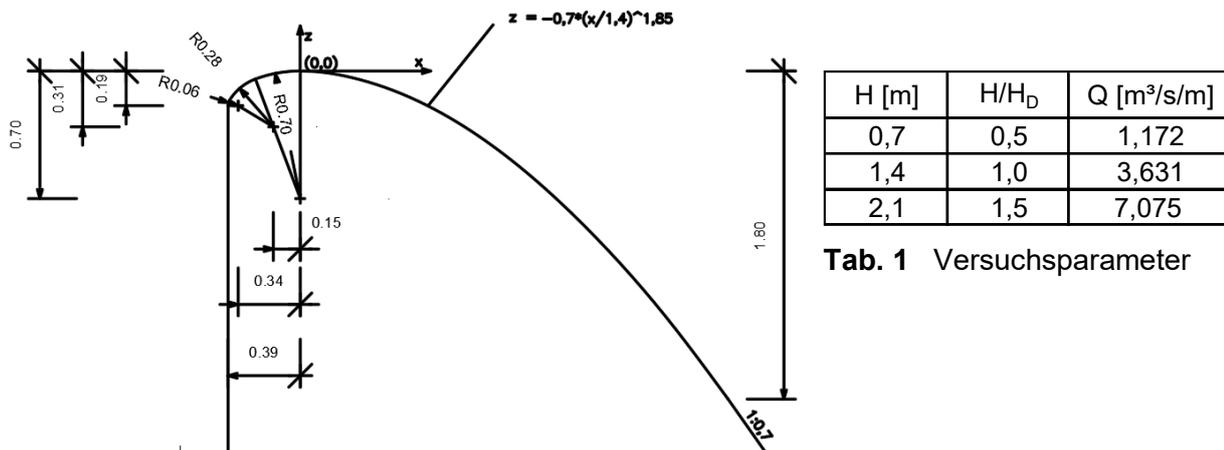


Abb. 1 Überlauf über eine feste Überfallschwelle, links: ohne überlagerte Wellen, rechts: mit überlagerten Windwellen

Zur Erfassung der Strömungssituation an einem festen Überfall mit einer Standardform nach USACE (1970) wurden 2D-numerische Simulationen nach der Smoothed Particle Hydrodynamics – Methode (SPH) durchgeführt und mit Ergebnissen von hydraulischen Modellversuchen verglichen. Die hydraulische Kontur des Überfalles ist auf die Energiehöhe H_D im Speicher von 1,4 m ausgelegt (Hager et.al, 2021, Abb. 2). Es wurden folgende Energiehöhen H im Speicher und Stationärzuflüsse Q [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$] zur HWE untersucht (Tab. 1):



Tab. 1 Versuchsparameter

Abb. 2 Hydraulische Kontur der Überlaufschwelle

Für die stationären Energiehöhen H im Speicher wurden regelmäßige Wellen für Tiefwasserverhältnisse mit verschiedenen Wellenhöhen und -längen simuliert: Wellenhöhen 0,7 m bis 1,85 m, Wellenperioden von 2,8 bis 4,6 s, mittlere Wellenlängen von 12,25 m bis 17,6 m.

Bei einem Windereignis in Richtung einer HWE wird durch die Windschubspannungen an der Wasseroberfläche eine Wasserströmung induziert. Diese wurde als Grundlage der Untersuchungen nach dem theoretischen Verfahren nach Shemdin (1973) für eine Windgeschwindigkeit w_{10} von 30 m/s ermittelt (Abb. 3, links). Diese theoretische Randbedingung wurde im hydraulischen wie im numerischen Modell nachgestellt (siehe Kap. 4.1).

Mit Ausnahme der Angaben zum Modellaufbau sind alle Angaben in dieser Veröffentlichung auf die Natur bezogen, wenn nicht ausdrücklich auf Modellwerte hingewiesen wird.

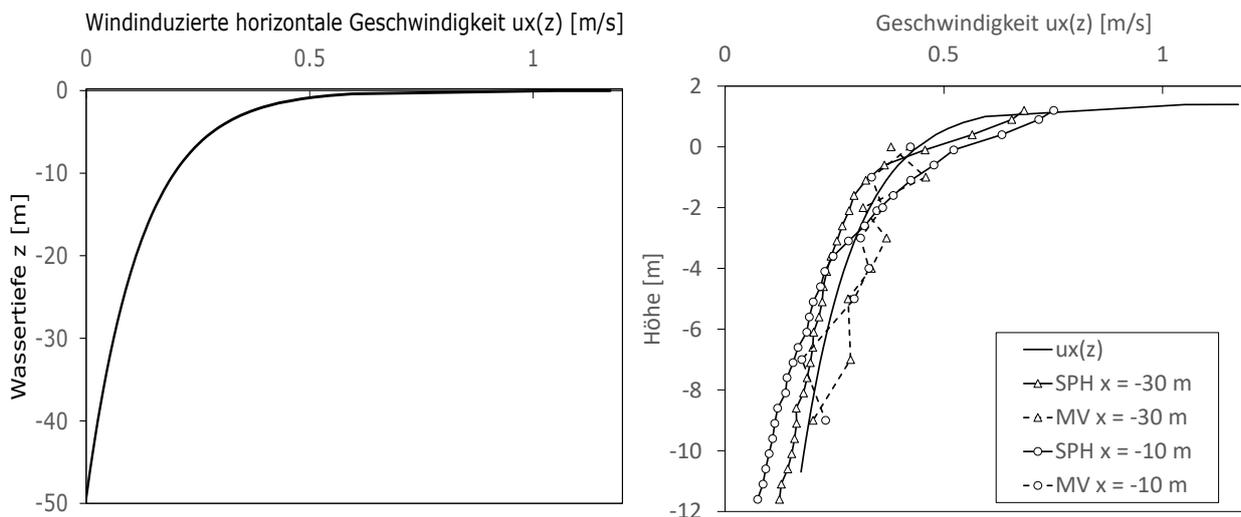


Abb. 3 links: Windinduzierte Horizontalgeschwindigkeit $u_x(z)$ im Speicher n. Shemdin (1973), rechts: Simulationsergebnisse der Geschwindigkeitsprofile, MV: Modellversuchswerte, SPH: numerisch berechnete Werte

2 Hydraulische Modellversuche

Die hydraulischen Versuche wurden als 2D-Ausschnittsmodell für die Zuströmung zu einer HWE aus einem Stauraum nach dem Froude'schen Ähnlichkeitskriterium durchgeführt. Der Modellmaßstab wurde mit 1:20 gewählt, um Maßstabeffekte weitgehend auszuschließen.

Das Modell der idealisierten Hochwasserentlastungsanlage wurde in einer 2,69 m breiten und etwa 15 m langen Strömungsrinne errichtet. Im Mittelteil des Versuchsstands befindet sich der Überfall im Bereich einer einseitigen 2,0 m breiten und 0,85 m hohen Glassektion, durch die Strömungsprozesse unterhalb der Wasseroberfläche beobachtet werden können. In den Versuchen war der unterstromige Abschnitt des Überlaufes nicht belüftet. Der Längsschnitt des Versuchsaufbaus ist in Abb. 4 dargestellt, Impressionen des Modells in Abb. 5.

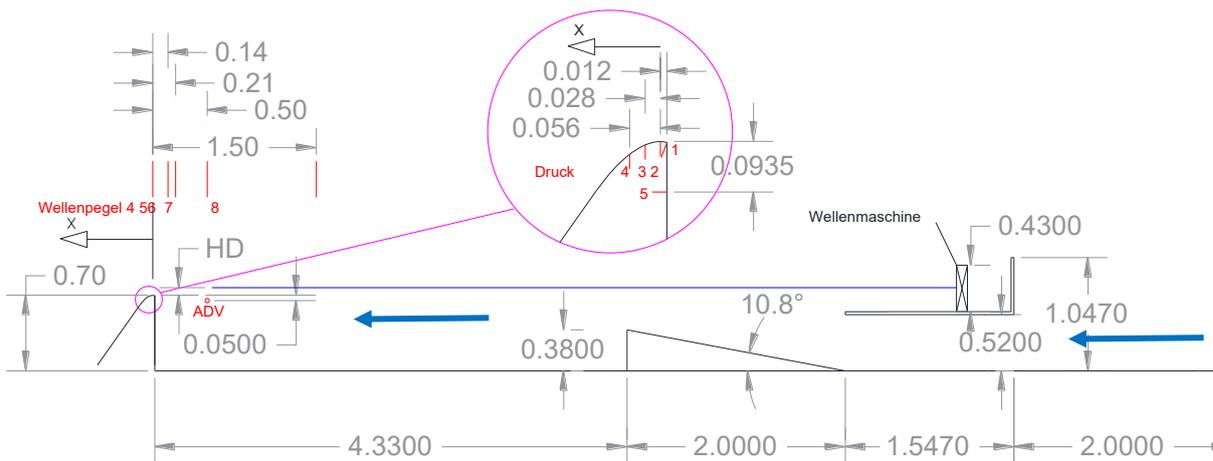


Abb. 4 Längsschnitt Modellgerinne, Fließrichtung von rechts nach links

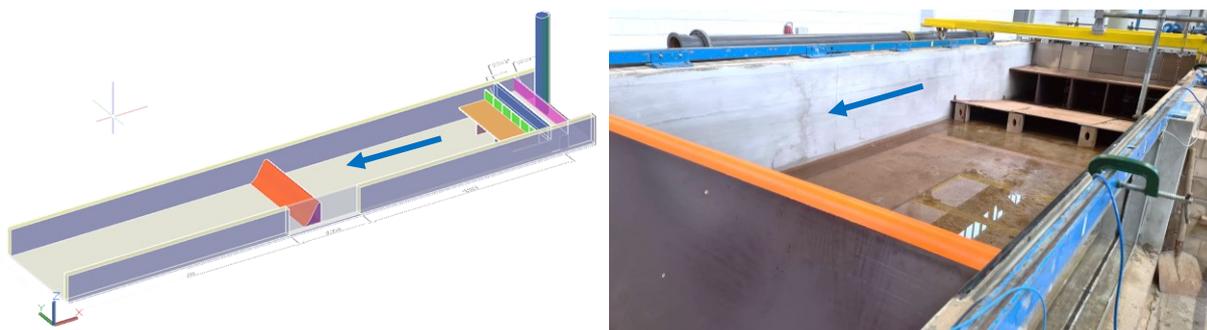


Abb.5 Links: 3D-Ansicht Modellgerinne, rechts: Blick gegen die Fließrichtung

Mehrere Gleichrichter und Rampen im Zulaufbereich zum Modell sichern eine homogene Durchströmung des Untersuchungsgebietes entsprechend der Vorgaben (Abb. 3). Oberhalb der Strömungsgleichrichter wurde eine Wellenmaschine (Piston type) mit einer maximalen Auslenkung (Stroke) von 20 cm installiert. Diese kann im Modell Wellen mit einer Höhe von bis zu 10 cm erzeugen.

Über eine 2 m lange und um $10,8^\circ$ geneigte Rampe wird der Zustrom aus den Strömungsgleichrichtern in den approximierten Stauraum des Reservoirs geleitet. Länge und Neigung der Rampe sind Resultat einer Kalibrierung zur Optimierung der geforderten Anströmsituation im Nahfeld des Überfalls (vgl. Abb. 3).

Die Wasserspiegelauslenkungen wurden durch Ultraschallwellenpegel WP (Fabr.: General Acoustics USS10, Sampling Frequenz: 50 Hz, Messbereich: 100 cm, Genauigkeit: 0,2 mm) in unterschiedlichen Abständen zur Überfallkrone erfasst. Zur punktuellen Messung von 3D Strömungsgeschwindigkeiten wurde eine frei positionierbare Sonde (Fabr.: Nortek Vectrino Plus, Sampling Frequenz: 200 Hz, Messbereich: ± 30 cm/s, Genauigkeit: $\pm 0,5$ mm/s) eingesetzt. In der Überfallkrone waren fünf Druckdosen eingelassen (Fabr.: STS ATM.1ST/N, Sampling Frequenz: 100 Hz, Messbereich: 0-150 mbar, Genauigkeit: 0,15 mbar, Durchmesser Messmembran: 12,7 mm), die die Druckverteilung über dem Überfallrücken dokumentieren.

Mittels einer Kamera (Fabr.: Logitech Brio 4K, Bildrate: 30 fps, Auflösung: 4096 x 2160 Pixel) wurde das Strömungsverhalten unmittelbar über der Überfallkrone dokumentiert. Durch die Zugabe von Tracern (Kunststoffpartikel, fluoreszierender Farbstoff) wurden Strömungsprozesse wie beispielsweise Stromfäden oder welleninduzierte Oszillationen sichtbar gemacht. In einer zentralen Datenerfassung wurden die Wasserstandsänderungen, Drücke und Geschwindigkeiten im Modell mit einer Messfrequenz von 100 Hz aufgezeichnet, die Videoaufzeichnungen mit 30 Hz.

3 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) – Numerische Simulationen

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) ist ein Lagrange'sches netzloses Verfahren. Bei diesem wird ein Kontinuum durch eine Reihe von Materialpunkten oder Partikeln diskretisiert. Bei der Simulation der Strömungsdynamik werden die diskretisierten Navier-Stokes-Gleichungen lokal am Ort jedes Partikels integriert, entsprechend den physikalischen Eigenschaften der umgebenden Partikel. Die Menge der benachbarten Partikel wird durch eine Abstandsfunktion (Kernel Funktion) bestimmt, die kugelförmig ist, mit einer zugehörigen charakteristischen Länge oder Glättungslänge, die mit h bezeichnet wird. Bei jedem Zeitschritt werden für jedes Partikel neue physikalische Größen berechnet und die Partikel bewegen sich dann entsprechend den aktualisierten Werten (Monaghan, 1992 und Moreira, et. al. 2020).

SPH wurde in den letzten Jahren wegen des kostengünstigen Einsatzes von immer leistungsfähigeren Graphikkarten zur Berechnung von Strömungen mit starken Deformationen, komplexen Geometrien und beweglichen Randbedingungen immer häufiger eingesetzt. Für die Anwendung von SPH zur Simulation von Wellenüberläufen im Küsteningenieurwesen liegen umfangreiche Erfahrungen vor (Altomare, et. al. 2021).

Die hier dargestellten numerischen Simulationen wurden mit dem open-source Softwarepaket DualSPHysics, Version 5.0, Beta Version durchgeführt. In diesem Programm ist ein Set von C++- und CUDA-Codes implementiert. Zur Simulation von inkompressiblen Fluiden ist der so genannte „leicht kompressibler Berechnungsansatz“ WCSPH (Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics) implementiert. Die Simulationen wurden zweidimensional für ein vertikales Schnittmodell der identischen Geometrie des Gerinneversuches durchgeführt. Zur exakten Eingabe der Überfallkontur wurden die Randpartikel im so genannten Freedraw Modus definiert, d.h. die Positionierung ist unabhängig von der sonst üblichen Geometrieingabe an Gitterpunkten.

Typische Berechnungsparameter wurden auf Grundlage von Literaturangaben angesetzt: Als Randbedingung zwischen Fluid und fester Berandung wurde die so genannte modified Dynamic Boundary Condition (mDBC) verwendet, die die exakte Definition der Strömungsberandung ermöglicht; Koeffizient zur Berechnung der Glättungslänge $\text{Coef}_h = 1,2$; Kernel Funktion: Wendland 5. Ordnung; Multiplikationskoeffizient für den Zeitschritt $\text{CFL}_{\text{number}} = 0,2$; Zeit-Integrationschema: Symplectic; Künstliche Viskosität $\alpha = 0,01$; Diffusionsterm für die Dichte $\delta = 0,1$; Ausgabe-Zeitintervall 0,02 s.

Einer der wichtigsten Parameter für die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist das Verhältnis einer charakteristischen Länge L im Strömungsfeld und dem Partikelabstand d_p . Generell gilt, dass die Genauigkeit der Ergebnisse für größere Werte von L/d_p zunimmt. Dies führt im Gegenzug zu längeren Rechenzeiten. Für die Berechnung von Wellenerscheinungen wird ein Verhältnis von 10 zwischen der Wellenhöhe h und d_p empfohlen (Altomare, et. al. 2021).

Für die hier dargestellten Berechnungen wurde in SPH der Abstand zwischen den einzelnen Partikel d_p generell zu 0,0035 m gesetzt. Damit ergibt sich je nach dem Abfluss das Verhältnis $H/d_p = 10 \div 30$. Das Einströmen des Fluids wurde wie im Modellgerinne an der Sohle vorgegeben, die Wellen wurden analog zum hydraulischen Modell mit einer horizontal beweglichen vertikalen Platte erzeugt.

Für die Berechnungen wurden die hochparallelisierbaren Berechnungsvorgänge mit der Grafikkarte NVIDIA RTX 3090 für 685.000 Partikel durchgeführt (Rechenzeit: 2,45 h zur Simulation von 180 Sekunden am Prototyp).

3.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Strömungsprofils der Zuströmung an die theoretisch ermittelte windinduzierte Fließgeschwindigkeit erfolgte für stationäre Zuströmung mit der in Kapitel 2 beschriebenen Rampe. Im rechten Bild der Abb. 3 ist für $H = H_D = 1,4$ m die Horizontalkomponente des theoretischen Geschwindigkeitsprofils $u_x(z)$ mit den am Modellversuch gemessenen und mittels SPH berechneten Werten für die 10 und 30 m oberstrom des Überfallrückens angeordneten Profile enthalten. Es zeigt sich, dass beide Modelle das idealisierte Strömungsprofil im Talsperrenraum abbilden können. Die numerischen Strömungsprofile weisen dabei eine höhere Homogenität auf als die experimentell ermittelten Strömungsprofile. Die gemittelte Abweichung zum theoretischen

Wert der Geschwindigkeit beträgt für die Messungen am Modellversuch 27,3 % bzw. 13 % für den Profilabstand von 30 bzw. 10 m zur Wehrkrone. Für die SPH Berechnungen ergaben sich Werte zu 13,5 % bzw. 25,5 %.

3.2 Überlauf mit stationärem Abfluss für verschiedene Durchflüsse

Für Stationärabfluss ist in Abb. 6 für die drei untersuchten Energiehöhen der Vergleich der Wasserspiegellagen zwischen den Berechnungsergebnissen (SPH), den Messungen am Modellversuch (MV) und dem von Hager et. al. (2021) vorgeschlagenen Näherungsverfahren dargestellt. Die mittlere Abweichung zwischen SPH-Rechnung und den Modellversuchsmessungen beträgt + 5 % bei H = 0,7 m, -0,4 % bei H = 1,4 m und +2,3 % bei H = 2,1 m.

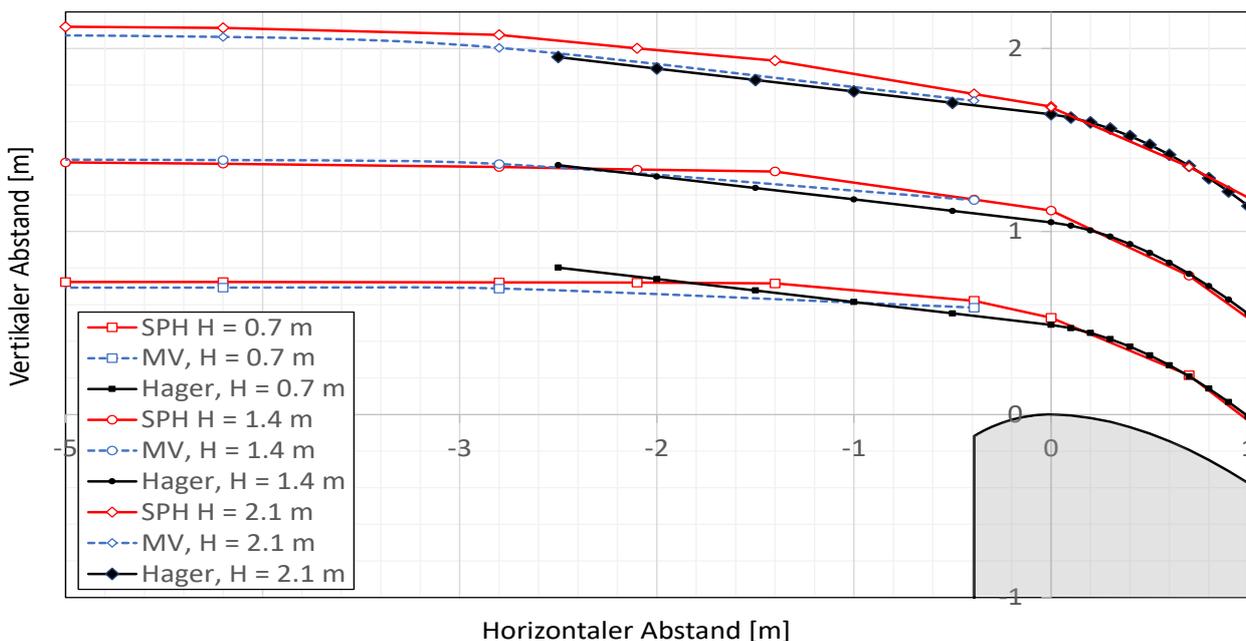
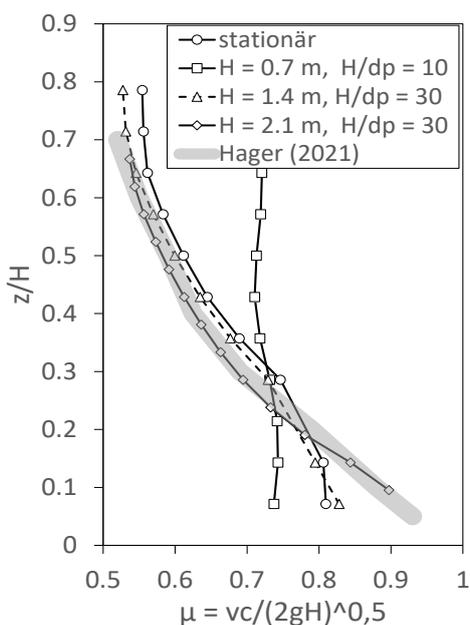


Abb. 6 Wasserspiegellagen im Bereich der Überfallkrone, Vergleich SPH, Modellversuch (MV) und Näherungsverfahren nach Hager et. al. (2021)



Die für die Überfallkrone mit SPH berechneten Verhältnisse μ der Absolutgeschwindigkeiten v_c zur Maximalgeschwindigkeit $v = (2gH)^{1/2}$ sind in Abb. 7 den in Hager et. al. (2021) publizierten Messwerten gegenübergestellt. Für die Energiehöhen von 2,1 m bzw. 1,4 m zeigt sich für $H/d_p = 20$ bis 30 in qualitativer Hinsicht eine Übereinstimmung mit den Messergebnissen an hydraulischen Modellen. Die sich für $H = 0,7$ m abweichende Verteilung kann mit dem geringen Verhältnis von $H/d_p = 10$ erklärt werden.

Abb. 7 Wehrkrone, Stationärzustand, normierte Geschwindigkeitsverteilung der Absolutgeschwindigkeiten v_c

Die gemittelte absolute Abweichung des berechneten μ -Wertes zu den publizierten Messwerten beträgt 11,3 % bei $H = 1,4$ m und 1,8 % bei $H = 2,1$ m.

Für $H = 1,4$ m wurde in einer Zusatzberechnung der Einfluss des Verhältnisses $H/d_p = 30$ statt 20 untersucht. Die Abweichung im μ -Wert reduziert sich dadurch von 11,3 % auf 9,7 %.

3.3 Überlauf mit stationärem Abfluss und überlagerten Wellen

Die nachfolgenden Darstellungen beziehen sich auf $H = 1,4$ m, regelmäßige Stokeswellen 1. Ordnung mit einer mittleren Wellenhöhe H_m von 1,84 m und einer Wellenperiode T_m von 4,61 s. Die gemessenen bzw. berechneten Wasserspiegellagen im Speicherraum sind in Abb. 8 einschließlich der auf die Wellenhöhe H_m bezogenen Differenzwerte dargestellt, für Profile mit einem oberstromigen Abstand von der Wehrkrone von -0,39 m bzw. -2,8 m. Zusätzlich ist der auf den Stationärzustand Q_{stat} normierte Abfluss über die Wehrkrone dargestellt. Der maximale Überlauf erreicht mehr als das Doppelte des Stationärabflusses. Ausgehend vom Stationärzustand zeigt sich nach der Einschwingphase, dass ab der 90. Berechnungssekunde das SPH Modell das am Modellversuch beobachtete Verhalten nachbilden kann. Der zwischen Sekunde 90 und 150 nach Willmott et. al (2012) berechnete verfeinerte Übereinstimmungsindex d_r (entnommen aus Altomare, et. al., 2021) wurde im Profil -0,39 m zu 0,89, im Profil -2,8 zu 0,88 bestimmt. Dies entspricht nach der von Gruwez et. al (2020) vorgeschlagenen Bewertungsterminologie einer sehr guten Übereinstimmung.

In Abb. 9 sind neben dem Stationärwasserspiegel die berechneten Wasserspiegellagen für die Achtelperioden eines Wellendurchganges dargestellt, wobei alle Werte auf die stationäre Energiehöhe H normiert sind. Oberhalb der Wehrkrone schwankt der Wasserspiegel von -63 % bis +37 % um den Wert der Energiehöhe H . Bei Bezug auf die stationäre Wasserspiegelhöhe an der Wehrkrone beträgt die Schwankung -46 % bis +72%. Entlang des Überlaufrückens nimmt die Wassertiefe im Extremfall den doppelten Wert des stationären Wertes an. Diese Ergebnisse können zur Beurteilung des Freibords bei Wehrbrücken oder der Höhe der Wände des Ablaufgerinnes dienen.

In Anlehnung an Abb. 7 ist in der Abb. 10 für die Achtelperioden eines Wellendurchganges die für die Überfallkrone mit SPH berechneten Verhältniswerte μ der Absolutgeschwindigkeiten v_c zur theoretischen Maximalgeschwindigkeit $v = (2gH)^{1/2}$ aufgetragen (die Wasserspiegellage je Periodenzeitpunkt kann Abb. 8 entnommen werden). Der gemittelte instationäre μ -Wert schwankt von -35 % bis +17 % um den stationären μ -Wert.

Abb. 11 zeigt den Druckverlauf für die Wehrkrone am Messpunkt P2 (siehe Abb. 2). Es zeigt sich eine qualitative Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus den Modellversuchen und den SPH Berechnungen bzw. dem gebildeten gleitenden Durchschnitt gD über 5 Messwerte. Die Modellversuchsmessungen und die Berechnung weisen negative Drücke zum Zeitpunkt des Wellenbergsdurchganges auf. Der aus der SPH Berechnung zwischen Sekunde 90 und 150 berechnete mittlere negative Druck beträgt -0,044 bar, der mittlere positive Druck +0,035 bar. Gegenüber den Modellmessungen ergibt sich bezüglich der negativen Drücke eine Abweichung von - 1,6 % und eine Erhöhung von + 4,1 % bezüglich der positiven Drücke.

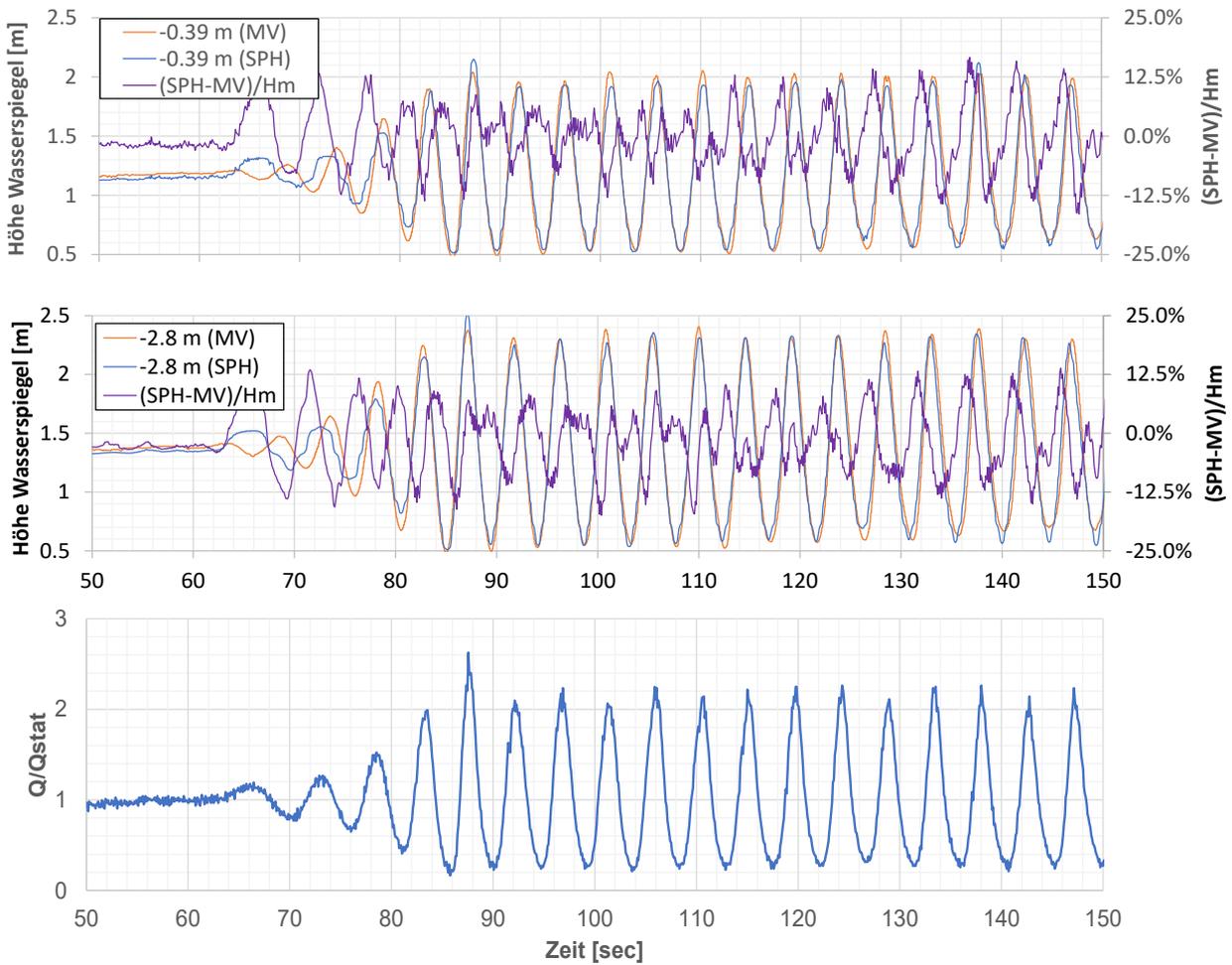


Abb. 8 Wasserspiegel – Ganglinien für Modellversuch (MV) und SPH Berechnung (SPH), Oben: Profil 0,39 m ow-seitig der Wehrkrone, Mitte: Profil 2,8 m ow-seitig der Wehrkrone und bezogene prozentuelle Abweichung, Unten: Bezogener Kronenabfluss

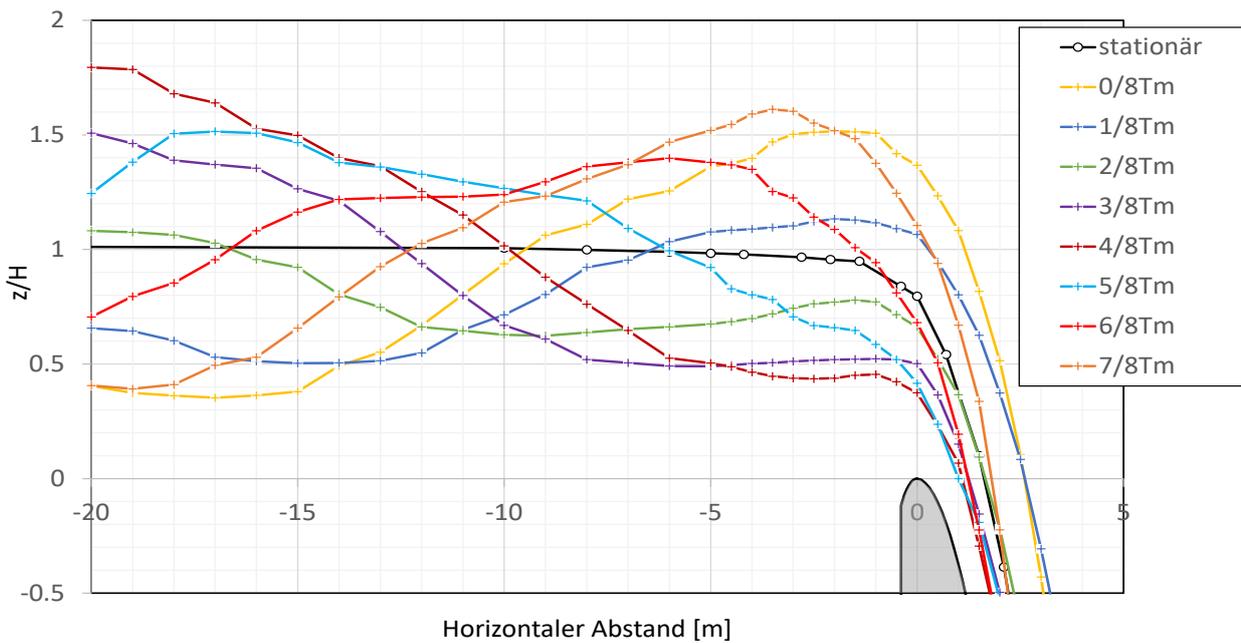


Abb. 9 Normierte Wasserspiegellagen bei Wellendurchgang am Wehrüberfall, Darstellung für 8-tel Periodenzeitpunkte

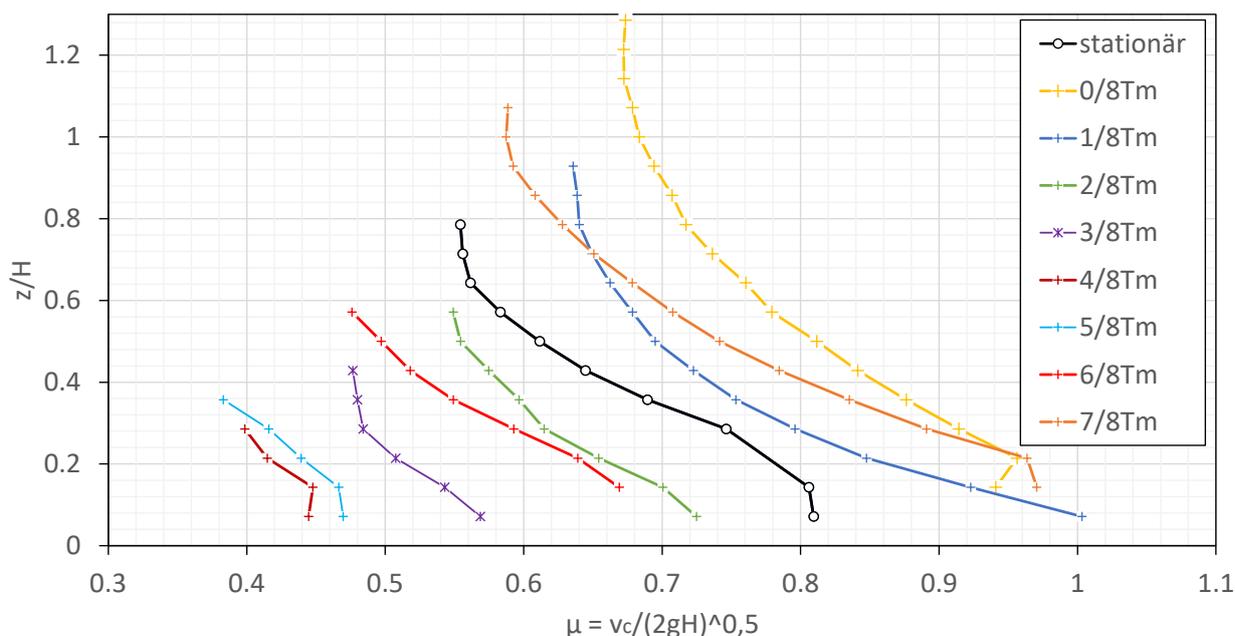


Abb. 10 Normierte Geschwindigkeitsverteilung der Absolutgeschwindigkeiten v_c aus SPH Berechnungen an der Wehrkrone bei Wellendurchgang, Darstellung für 8-teil Periodenzeitpunkte

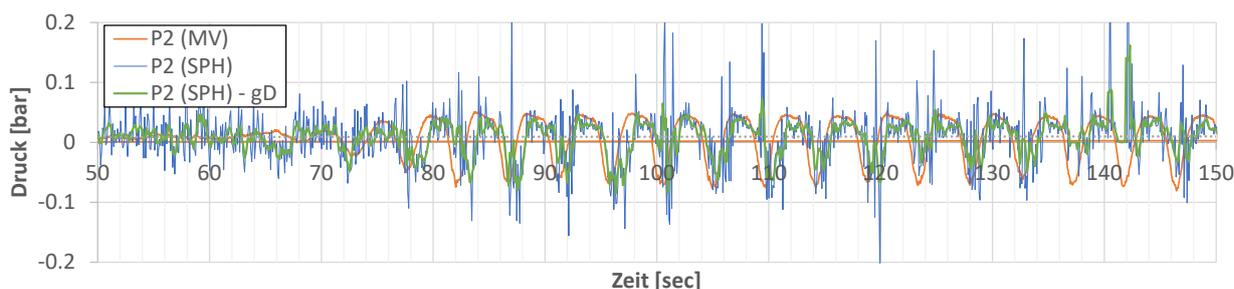


Abb. 11 Druckverlauf für die Wehrkrone, Messstelle P2, Modellversuch (MV), SPH Berechnung (SPH) und dem gleitenden Durchschnitt gD

4 Zusammenfassung, Ergebnisse, Empfehlungen

Im Beitrag wird die Simulation der Wasserabgabe über Hochwasserentlastungsanlagen ohne bzw. mit überlagerten Wellen unter Verwendung des Smoothed Particle Hydrodynamics Verfahrens (SPH) mit dem Softwarepaket DualSPHysics dargestellt. Eine Validierung der Berechnungsergebnisse erfolgte anhand von Messergebnissen aus einem hydraulischen Modellversuch und Literaturangaben. Für stationäre Abflussbedingungen betragen die Abweichungen für drei untersuchte Wasserspiegellagen $-0,4\%$ bis $+5\%$ gegenüber den Modellmessungen, für die Geschwindigkeiten an der Wehrkrone $+1,8\%$ bis $11,3\%$ gegenüber Literaturangaben. Das SPH Modell kann den Überlauf mit stationärem Zufluss und überlagerten Wellen nachbilden. Der nach Literaturangaben berechnete Übereinstimmungsindex d_r für die Wasserspiegelverläufe weist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modellversuchsdaten und Berechnung aus. An der Wehrkrone ergibt sich für die SPH Berechnung gegenüber den Modellmessungen bezüglich der gemittelten negativen bzw. positiven Drücke eine Abweichung von $-1,6\%$ bzw. $+4,1\%$. Auf Grundlage dieser Abweichungen kann im Hinblick auf eine Beschreibung des Prozessverständnisses von einer zufriedenstellenden Übereinstimmung ausgegangen werden.

Aus der im Beitrag dargestellten Simulation für den Überlauf an einer Wehrkrone mit konstantem Zufluss und überlagerten Wellen kann folgendes abgeleitet werden:

- Die maximale Wasserspiegellage an der Wehrkrone ist um ca. 70 % höher als bei stationärem Abfluss.
- Der maximale Überlauf kann mehr als das Doppelte des Stationärabflusses betragen.
- Bei Auslegung des Wehrrückens auf ein druckfreies Profil ist davon auszugehen, dass bei überlagerten Wellen zeitweise Unterdrücke entlang des Wehrrückens auftreten.
- Entlang des Überlaufrückens nimmt die Wassertiefe im Extremfall den doppelten Wert des stationären Wertes an.

Generell lassen sich die Ergebnisse der Modellversuche und SPH Berechnungen zu Hochwasserentlastungen dahingehend zusammenfassen, dass solche - auf die jeweiligen Anlagenverhältnisse angepasste - Berechnungsergebnisse zur Beurteilung des Freibords bei Wehrbrücken oder der Höhe der Wände des Ablaufgerinnes dienen können. Zur naturähnlichen Simulation der Strömungsprozesse über Wehrrücken mittels SPH wird empfohlen, das Verhältnis der Energiehöhe im Oberwasserbereich zur Partikelgröße d_p Werte größer als 20 zu wählen.

Literatur

- International commission on large dams ICOLD, (2012). Bulletin on safe passage of extreme floods, Bulletin 142
- Li, L., et. al. (2021). Hydraulics of levee overtopping, IAHR Monograph, CRC Press, Taylor and Francis group
- US army waterways experiment station, (1970). Hydraulic design criteria, United states army corps of engineers (USACE), Vicksburg MI
- Shemdin, O., H. (1972). Wind-generated current and phase speed of wind waves, Journal of physical oceanography, Vol. 2, 411 – 419
- Monaghan, J. (1992). "Smoothed particle hydrodynamics." Ann. Rev. Astrophysics 30: 429–453.
- Moreira, A. B. et. al. (1985). Overview of Large-Scale Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of Dam Hydraulics, J. Hydraul. Eng., 2020, 146(2): 03119001
- Altomare, C.; Gironella, X.; Crespo, A. (2021). Simulation of random wave overtopping by a WCSHP model, Applied Ocean Research, 116 (2021)
- Hager, W., H., et. al. (2021). Hydraulic engineering of dams, CRC Press, Taylor & Francis Group
- Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K., (2012). A refined index of model performance. Int. J. Climatol. 32, 2088–2094 <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.2419>.
- Gruwez, V., Altomare, C., Suzuki, T., Streicher, M., Cappiotti, L., Kortenhaus, A., Troch, P., (2020). Validation of RANS modelling for wave interactions with sea dikes on shallow foreshores using a large-scale experimental dataset. J. Mar. Sci. Eng. 8, 650 <https://doi.org/10.3390/jmse8090650>.

Anschrift der Verfasser

Dr. Dominik Mayr
3d-Hydro Engineering GmbH,
Ingenieurbüro für konstruktiven Wasserbau
Am Andritzbach 30, 8045 Graz
dominik.mayr@3dHE.at

Dr.-Ing. Nils B. Kerpen
Ludwig-Franzius-Institut für Wasserbau-,
Ästuar- und Küsteningenieurwesen
Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str 4
kerpen@lufi.uni-hannover.de