

Strömungs- und Sedimentationsverhältnisse in Hochwasserrückhaltebecken

Dipl.-Ing. Mark Wolfgang Schultz

Verlandung von Hochwasserrückhaltebecken

Abhängig von den Eigenschaften des Einzugsgebietes und der Stärke des Niederschlags kann es zu unterschiedlich starkem Erosionsabtrag kommen, dessen Folge Sedimenteintrag in Hochwasserrückhaltebecken ist. Durch die Hochwasserspeicherung in den Becken und die dadurch erhöhten Aufenthaltszeiten sinken die Sedimente zu Boden, so dass es langfristig zur Verlandung der Becken kommt. Dabei ist die Art der Ablagerung von der geometrischen Form des Speichers oder des Beckens und der örtlichen Anordnung der Entleerungs- und Entnahmeeinrichtungen abhängig.

Aus sicherheitstechnischen und oftmals auch aus hygienischen Gründen muss die Verlandung dringend verringert werden. Aufgrund der häufig sehr kleinen Grundablässe sind Spülungen allerdings selten durchführbar und es bleibt nur die kostenaufwendige Baggerung der Sedimente. Durch die zunehmende Verlandung gewinnt die Frage nach ökonomischen und naturverträglichen Lösungsmöglichkeiten immer mehr an Bedeutung.

Zur Ausarbeitung von praxistauglichen und kosteneffizienten Lösungsmöglichkeiten für die Sedimentationsverringern wurde deshalb ein kombiniertes Programm aus Naturmessungen und physikalischen Modellversuchen angeboten.

Naturuntersuchungen

Die Naturmessungen fanden an einem repräsentativen Hochwasserrückhaltebecken des Kocher-Lein-Verbandes ca. 80 km nord-östlich von Stuttgart statt (Abb. 1) und wurden durch anschließende Laborversuche ergänzt. Es war eine erste Abschätzung der Sedimentcharakteristik möglich.

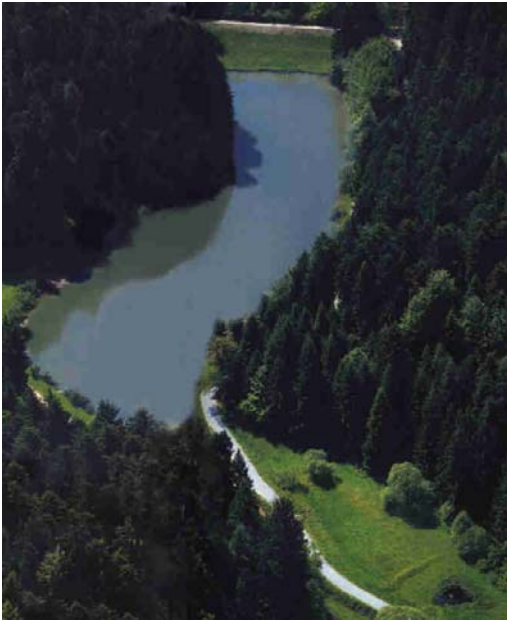


Abb. 1: Das HRB Hüttenbühl

Das im Dauerstau betriebene Becken hat ein Hochwasserrückhaltevolumen von ca. 550000 m³ und ein Einzugsgebiet von ca. 15,5 km². Es liegt im Schwäbischen Wald, einem Gebiet mit hauptsächlich sandigem Boden.

Die Untersuchungen während eines Zeitraumes von ca. 2 ½ Jahren ergaben, dass im Schnitt täglich etwa 2-3 Tonnen an Schwebstoffen in dem Becken sedimentieren. Sie haben eine durchschnittliche Lagerungsdichte von etwa 1,2 g/cm³, besitzen mittlere Korngrößen von ca. 35 µm und sedimentieren mit mittleren Sinkgeschwindigkeiten von ca. 4*10⁻⁴ m/s. Die

durchschnittliche kritische Erosionsschubspannung liegt mit etwa 0,5-1 N/m² so niedrig, dass es zu keiner Resuspension der Ablagerungen kommt.

Modellversuche

Für das repräsentative Hochwasserrückhaltebecken wurde ein physikalisches Modell mit einem Längenmaßstab von 1:50 und einem Höhenmaßstab von 1:25 gebaut (Abb. 2). In dem Modell fanden Tracer und Sedimentversuche statt, um die Strömungscharakteristik, Ablagerungszonen und abgelagerte Massen im Becken zu untersuchen.

Dazu wurden der Tracer und die Modellschwebstoffe (Quarzmehl) in einem Zugabebehälter gemeinsam mit Wasser verrührt und dann impulsartig der Strömung zugegeben. Während die gesamte Tracermasse wieder ausgetragen wurde, lagerte sich ein Teil der Sedimente im Becken ab.



Abb. 2: Physikalisches Modell des HRB

Zunächst wurden stationäre Versuche bei verschiedenen Wasserständen durchgeführt, um den Einfluss von Buh-

nen und Leitelementen zu testen. Das Ziel der Leitelemente war die Durchschleusung der Sedimente durch das Becken, bevor sie sich absetzen.

Obwohl der Strömungsverlauf durch die Einbauten - zumindest bei niedrigem Wasserstand - deutlich beeinflusst wurde, zeigten sich nur geringe Verbesserungen der Sedimentablagerungen. Folglich wird die Sedimentation in erster Linie durch Turbulenzen beeinflusst, die durch die Strömung entstehen.

Zur näheren Strömungsbetrachtung wurden bei Versuchen ohne Einbauten bei 2 Wasserständen (Dauerstau und Stauziel) die am Grundablass aufgezeichneten Tracerkurven ausgewertet.

Die Kurven zeigten eine Überlagerung von Dispersions- und Mischungsströmung: Ein hoher Peak am Anfang zeigte, dass ein Teil der Strömung das Becken ohne große Einmischung durchfließt. Daran anschließend wurde der Tracer in Form eines langen Tailings ausgetragen, das auf eine Entmischung aus Rückströmzonen deutet (siehe Abb. 3).

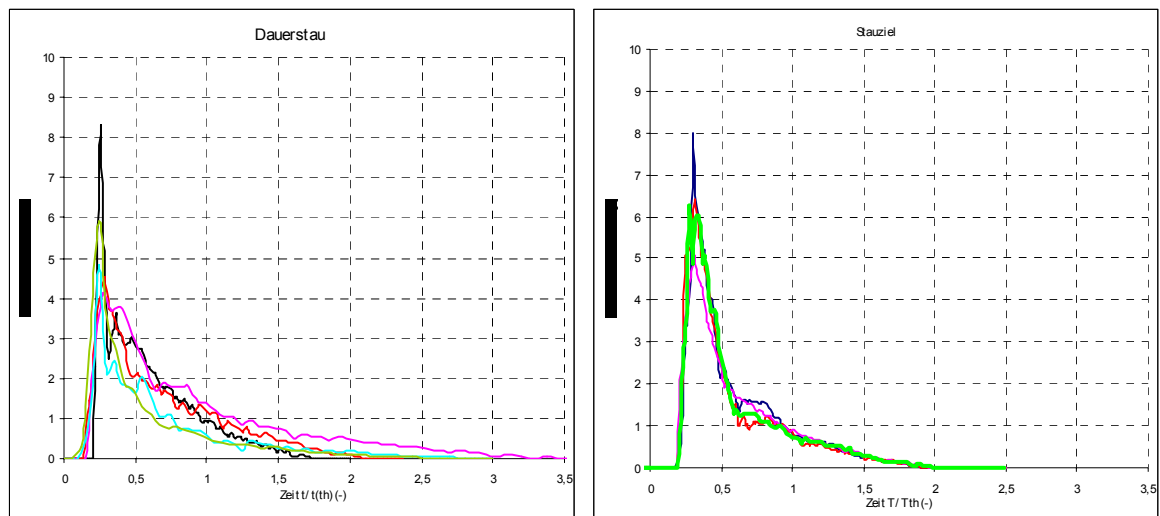


Abb. 3: Tracerkurven des Naturmodells bei Dauerstau und Stauziel

An den Kurven ist zu erkennen, dass bei hohem Wasserstand der Anteil der Längsdispersion sehr ausgeprägt ist. Der langsamere Austrag aus Rückstromzonen zeichnet sich deutlich davon ab. Bei niedrigem Wasserstand ist kein deutlicher Knick zu sehen, die laterale Durchmischung ist höher. Dies liegt vermutlich an der komplexen Beckengeometrie, die bei niedrigem Wasserstand einen großen Einfluss auf die Strömung zeigt.

Die höhere Durchmischung konnte mit der Berechnung des Mischungsindex bestätigt werden. (Abb. 4). Der Mischungsindex dient zur Beurteilung der Mischung im Becken und liegt zwischen null und eins.

$$\text{Definition Mischungsindex: } \frac{\sigma}{t_{th}} [-] \quad (1)$$

mit σ : Standardabweichung der Verweilzeitkurve

t_{th} : theoretische Aufenthaltszeit

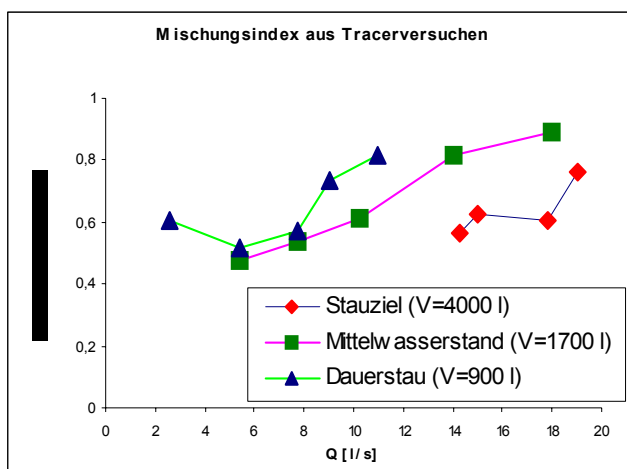


Abb. 4: Mischungsindizes

wirbeln zurückgehalten wurden und im Becken sedimentierten. Dies bestätigten Untersuchungen der abgelagerten Korngrößen. D. h. das größere Beckenvolumen reagiert träger, es mischen sich weniger Schwebstoffe in Rückströmzonen ein. Das bedeutet, dass in tiefen Becken mit gleich großem Stauvolumen weniger Sedimentation zu erwarten ist.

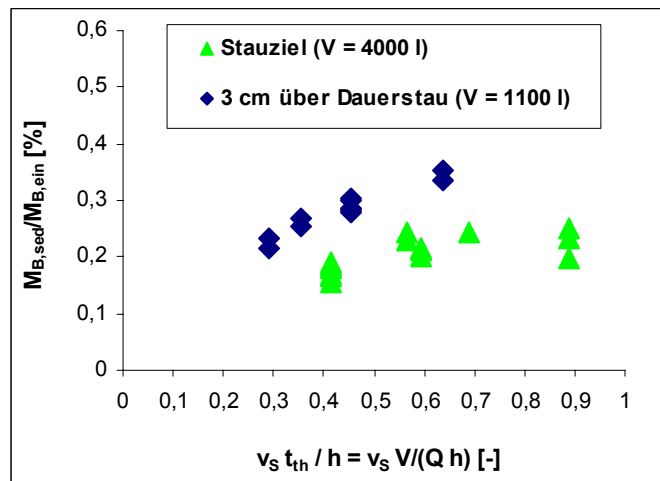


Abb. 5: Ablagerungen im Modell des HRB

Versuche im Rechteckbecken

Die Sedimentation in einem Becken kann vereinfacht durch den linearen Abbau erster Ordnung angenähert werden, der definiert ist als

$$\frac{dc}{dt} = -r \cdot c \quad [-] \quad (2)$$

dabei ist c: Konzentration [g/l]

$$r: \text{ Reaktions-/Abbaukonstante [1/s]:} \quad r = \alpha \cdot v_s/h \quad (3)$$

mit h: Wassertiefe, v_s : mittlere Sinkgeschwindigkeit

$$\alpha = 1 - \frac{\tau}{\tau_{crit,S}} \quad [-] \quad \text{Parameter zur Berücksichtigung der Turbulenz}$$

wenn $\alpha = 0$: keine Sedimentation, $\alpha = 1$: maximale Sedimentation

Zur Ermittlung der Reaktionskonstanten r , die den Abbau bzw. die Sedimentation eines Systems beschreibt, muss für das Becken ein Ersatzsystem aufgestellt und geeignete Systemfunktionen an die Messkurven angepasst werden. Dies geschieht zunächst für Messkurven ohne Abbau (Tracerkurven), um unbekannte Strömungsparameter, wie z. B. Dispersion und Fließgeschwindigkeit, zu ermitteln. (Dabei wird α gleich Null gesetzt, da der Tracer vollständig ausgetragen wird und kein Abbau stattfindet.) Mit bekannten Strömungsparametern wird dann die Systemfunktion unter Variierung von r an die Trübekurven angepasst, bis die Abweichung der beiden Kurven minimal ist.

Aufgrund der komplexen Beckengeometrie des nachgebauten Naturbeckens und der Überlagerung von Dispersions- und Mischungsströmung wurden zusätzliche Tracer- und Sedimentationsversuche in einem weiteren Versuchsstand durchgeführt. Es handelte sich um ein längs durchströmtes, 5x2 m großes Rechteckbecken. Die Versuche in dem Becken fanden bei 2 Wassertiefen (0,2 m und 0,4 m) und einem Abfluss von $Q = 20$ l/s statt. Eine speziell gebaute Sonde erlaubte die gleichzeitige Aufzeichnung des Tracers und der Trübe am Grundablass. Für diese Versuche sollte die Sedimentationsrate r bestimmt werden, um zu sehen, wie exakt der Unterschied der Ablagemengen bei verschiedenen Wasserständen aus den Tracer- und Trübekurven berechenbar ist. Das Ergebnis kann mit den abgelagerten Massen verglichen werden.

Die Tracerkurven zeigten eine stark dispersive Durchströmung des Beckens ohne anschließenden Austrag aus Rückstromzonen (s. Abb. 6). Bei dem hohen

Wasserstand (doppelte theoretische Aufenthaltszeit) erfolgte der Tracer- und Trübeausstrag am Grundablass wesentlich langsamer, es lagerten sich mit ca. 40 % der anfänglichen Schwebstoffmasse etwa 12 % mehr ab als bei dem niedrigen Wasserstand.

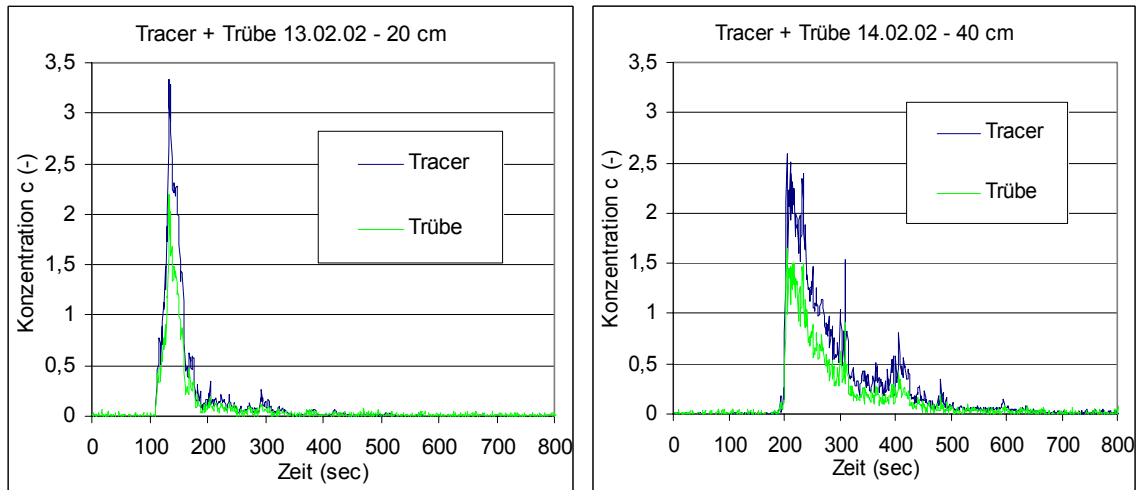


Abb. 6: Messkurven am Auslauf des Rechteckbeckens bei 2 Wasserständen

Die stark dispersive Strömung kann mit der 1-d Stofftransportgleichung (stationäre Lösung für impulsartige Zugabe) beschrieben werden:

$$c_{out}(t) = \frac{u \cdot M_{so}}{Q} \cdot \frac{1}{\sqrt{4\pi Kt}} \cdot e^{-\frac{(l-ut)^2}{4Kt}} \cdot e^{-r \cdot t} \quad (4)$$

Bei Anpassung der Funktion an die Tracerkurven ($r = 0$) ergab sich der Dispersionskoeffizient K bzw. die dimensionslose Peclet-Zahl ($Pe = K/(u \cdot l)$). Bei dem hohen Wasserstand war die Längsdispersion mit $0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ ca. doppelt so hoch wie bei dem niedrigen. Die Peclet-Zahlen betragen $0,02$ bei dem hohen, $0,007$ bei dem niedrigen Wasserstand.

Mit nun bekannter Dispersion und Fließgeschwindigkeit wurde die Abbaurrate durch Anpassung der Gleichung (4) an die Trübekurven bestimmt. Es ergab sich für den niedrigen Wasserstand $r = 0,0045 \text{ 1/s}$ und für den hohen Wasserstand $r = 0,0025 \text{ 1/s}$. Da die Sinkgeschwindigkeit nicht von der Wassertiefe abhängig und somit in beiden Fällen gleich groß ist erhält man durch Multiplikation von r mit der Wassertiefe h die unterschiedliche Sedimentationsrate bei den beiden Wasserständen (s. a. Gleichung 3): bei niedrigem Wasserstand ist $\alpha = 0,0009/v_s$, bei hohem Wasserstand $\alpha = 0,001/v_s$. Somit beträgt die Sedimentationsrate bei hohem Wasserstand ca. 11 % der Rate bei niedrigem Wasserstand.

D. h. es konnte eine sehr gute Annäherung an die tatsächlichen Ablagerungsmengen erreicht werden.

Gegenüberstellung der Ergebnisse

Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass die Strömung und die Sedimentationsraten in beiden Becken sehr unterschiedlich sind.

Die Sedimentation ist in erster Linie von der Durchströmung abhängig, die bei natürlichen Staubecken (vor allem bei niedrigem Wasserspiegel) stark von der Beckengeometrie beeinflusst wird.

Bei dem Modell des Hochwasserrückhaltebeckens kam es bei dem niedrigen Wasserstand durch den starken Einfluss der Beckengeometrie zu einer stärkeren lateralen Dispersion in die Rückströmzonen als bei hohem Wasserstand, wobei mehr Sedimente in Rückströmzonen gelangen und dort sedimentieren.

Im Gegensatz dazu führten bei dem längs durchströmten Modell die höheren Fließgeschwindigkeiten bei dem niedrigen Wasserstand zu geringerer Längsdispersion und geringerer lateraler Vermischung und letztendlich zu weniger Ablagerungen als bei dem hohen Wasserstand.

Zusammenfassung/Schlussfolgerungen

Zur Ausarbeitung von Lösungsmöglichkeiten zur Sedimentationsverringering in Hochwasserrückhaltebeckens wurde ein kombiniertes Programm bestehend aus Naturmessungen an einem repräsentativen Becken und physikalischen Modellversuchen angeboten.

Die Naturmessungen ließen eine erste Abschätzung der Sedimentcharakteristik und des Ablagerungsverhaltens zu.

Stationäre Tracer- und Sedimentversuche an dem Modell des Hochwasserrückhaltebeckens gaben Aufschluss über das Strömungs- und Ablagerungsverhalten bei verschiedenen Wasserständen. Durch die komplexe Beckengeometrie kam es in dem Becken zu deutlichen lateralen Vermischungen und Rückströmzonen, die bei niedrigem Wasserstand wesentlich ausgeprägter waren und zu größeren Ablagerungsmengen führten. Bei großem Wasservolumen (d. h. bei hohem Wasserstand) zeigt sich, dass bei komplexer Beckengeometrie eher in tiefen Becken eine geringere Ablagerungsrate zu erwarten ist.

Weitere Untersuchungen wurden an einem zweiten Versuchsstand mit einfacher Beckengeometrie durchgeführt, einem längs durchströmten Rechteckbecken. Die Tracer- und Trübekurven am Grundablass zeigten eine Dispersionsströmung ohne Rückströmzonen. Es konnten Systemfunktionen angepasst und Strömungs- und Sedimentationsparameter berechnet werden. Der Dispersionskoeffizient war bei halber theoretischer Aufenthaltszeit (niedriger Wasserstand) etwa halb so groß, die Ablagerungsrate war gegenüber dem höheren Wasserstand um ca. 11 % verringert. Das entsprach den gewogenen Ablagerungsmassen, die bei dem niedrigen Wasserstand um ca. 12 % niedriger lagen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Sedimentation maßgebend von der Strömung beeinflusst wird. In der Natur sind vor allem die instationären Füllvorgänge der Becken für die unterschiedlichen Ablagerungsraten verantwortlich, wobei kleinere, häufig auftretende Hochwasser bei statistischer Langzeitbeobachtung zu stärkerer Sedimentation führen als Extremereignisse. Eine Sedimentationsverringering kann durch eine gezielte Beckensteuerung durch Erhöhung der Regelabgabe erfolgen.

Ausblick

Anhand der Modellexperimente und der Berechnungen konnte gezeigt werden, dass bei bekannter stationärer Beckendurchströmung und bekanntem Trübeverlauf am Grundablass eine Abschätzung der Sedimentationsraten im Becken möglich ist. Dabei ist die Berechnung der strömungsrelevanten Parameter bei komplexen Beckengeometrien, die zu Vermischungen führen, wesentlich aufwendiger.

Da in der Natur die meisten Sedimente durch instationäre Hochwasserwellen in die Becken eingetragen werden, muss das Konzept einer Kopplung der 1-dimensionalen Dispersions- und 0-dimensionalen Mischungsströmung auf die Instationarität erweitert werden. Das Ziel ist die Abschätzung der Sedimentation einzelner Hochwasserereignisse für beliebige Becken.

Bei kombinierten Funktionen, z. B. bei einer Überlagerung von Mischungs- und Dispersionsströmung, muss berücksichtigt werden, dass sich mit steigendem Zufluss der Anteil der Mischungs- bzw. Dispersionsströmung verlagert.

Können die gemessenen Kurven angepasst und die zu erwartenden Ablagerungsraten rechnerisch abgeschätzt werden, stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit, zunächst auf das repräsentative Naturbecken, aber auch auf

beliebig andere Hochwasserrückhaltebecken. Dafür muss die Strömungscharakteristik der Becken bekannt sein und am Grundablass gemessene Trübekurven müssen vorliegen.

Referenzen:

- [1] Baerns et. Al. (1992): Chemische Reaktionstechnik.
- [2] Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (1998): Entleerung, Spülung und Räumung von Speichern und Becken.
- [3] Schultz, W. (2001): Approach for Reducing Sedimentation in Flood Retention Reservoirs. Proceedings of the 29th IAHR Congress, Beijing.
- [4] Westrich, B. (1977): Water Exchange in confined basins induced by unsteady main stream currents. IAHR-Congres, Baden-Baden.
- [5] Westrich, B., Schultz, W. (2001): Naturmessungen zur Abschätzung der Sedimentationscharakteristik im Hochwasserrückhaltebecken Hüttenbühl. Technischer Bericht, Versuchsanstalt, Universität Stuttgart, TB 01/1 (VA28).
- [6] Westrich, B., Schultz, W. (2001): Physikalische Versuche am Modell des Hochwasserrückhaltebeckens Hüttenbühl zur Ausarbeitung von Lösungsmöglichkeiten zur Verringerung der Sedimentation in Hochwasserrückhaltebecken. Technischer Bericht, Versuchsanstalt, Universität Stuttgart, TB 01/8 (VA35).

Adresse des Autors:

Mark Wolfgang Schultz

Versuchsanstalt, Institut für Wasserbau,

Pfaffenwaldring 61

70 550 Universität Stuttgart, Germany

Telefon: +49 711/685-4772; Fax: -4681; Wolfgang.Schultz@iws.uni-stuttgart.de