

Bemessung von Sedimentationsräumen

FA 5.191

Forschungsstellen: Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie mbh, Hannover

FlowConcept GmbH, Hannover

Bearbeiter: Grotehusmann, D. / Hunze, M. / Müller, K. / Rüter, J.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Februar 2020

1 Einleitung

Zukünftig werden die Notwendigkeit der Regenwasserbehandlung und die Qualität der Reinigungsleistung der Regenwasserbehandlungsanlagen am Feinanteil der Feststoffe im Niederschlagsabfluss (AFS_{fein} der AFS_{63}) definiert. Die Sedimentationsleistung der im Bereich der Bundesfernstraßen üblicherweise eingesetzten Becken bezüglich dieses Parameters ist zu erarbeiten. Vor allem sind auch Angaben notwendig, ab welcher Sedimenthöhe im Becken eine Remobilisierung der abgelagerten Sedimente zu befürchten ist, um daraus für den Betrieb Reinigungsintervalle festlegen zu können.

2 Material und Methoden

Die Projektbearbeitung gliedert sich in eine Erhebungsuntersuchung an bestehenden Beckenanlagen und in eine nachfolgende 3D-Simulation ausgewählter Beckenanlagen.

Von rund 50 Anlagen sind bei den zuständigen Straßenbaubehörden und der DEGES Daten angefordert worden, von denen 20 Anlagen für die Erhebungsuntersuchung ausgewählt wurden. Bei dieser Erhebungsuntersuchung wurden die Planangaben zu den Anlagen überprüft sowie eine Kartierung der Beckensedimente durchgeführt.

Je Becken wurden in der Regel drei Sedimentmischproben entnommen (Nähe Zulauf, Beckenmitte und Nähe Ablauf) und auf folgende Parameter untersucht:

- Korngrößen (T, U, fS, mS, gS, fG)
- Trockensubstanz
- Glühverlust (unterteilt nach T+U und Sandfraktion)

Zur Berechnung der hydraulischen Belastung der Beckenanlagen wurden hydrologische Langzeitsimulationen mit dem Programm *erwin* (IFS, 2002) durchgeführt.

Für die 3D-Berechnungen wurde das Programmsystem FLUENT 17.2 (ANSYS, 2016) eingesetzt. Die Berechnungen erfolgten zum einen unter Berücksichtigung der freien Wasseroberfläche, um die Zuströmung des Wassers von den Zuläufen oberhalb des Dauerstaus realistisch abbilden zu können. Zum anderen wurden Berechnungen mit einer festen Lage des Wasserspiegels durchgeführt, da der zeitliche und damit auch der

Kostenaufwand für die komplexen Berechnungen mit freier Oberfläche hoch sind. Der Transport der Feststoffe erfolgte auf Basis der Advektions-Diffusions-Gleichung.

3 Ergebnisse der Erhebungsuntersuchung

3.1 Kenndaten der Beckenanlagen

Während der Erhebungsuntersuchung wurden an den Becken und aus den Planunterlagen die Parameter erfasst, die die Strömungsverhältnisse beeinflussen (zum Beispiel Geometrie, Zu-, Ablaufkonstruktion, Bemessungsgrößen). Weiter wurde eine Sedimentkartierung in den Anlagen durchgeführt und Sedimente aus den Becken auf ihre Korngrößenverteilung untersucht.

Bis auf zwei Anlagen werden alle anderen Anlagen im Dauerstau betrieben.

Zum Rückhalt von Leichtflüssigkeiten sind bei den Anlagen überwiegend feste Tauchwände im Beckenbereich oder im Ablaufbauwerk integriert. Bei fünf Anlagen erfolgt der Leichtflüssigkeitsrückhalt über getauchte Rohre im Gegengefälle.

Der Zulauf erfolgt zum überwiegenden Teil in Beckenlängsrichtung. Nur in vier Fällen erfolgt die Beschickung der Becken strömungsgünstig quer zur Beckenausrichtung.

Die auf die Betriebsdauer bezogene flächenspezifische AFS_{63} -Fracht in den Becken beträgt bei den Anlagen in der Regel zwischen 66 bis 301 kg/(ha*a) (unteres und oberes Quartil); der Median beträgt 142 kg/(ha*a) und der Mittelwert 277 kg/(ha*a). Der Maximalwert in Höhe 1 322 kg/(ha*a) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht durch den "normalen" Autobahnbetrieb bedingt; hier werden Bautätigkeiten als Ursache angesehen.

Die Sedimente in den Becken sind im Mittel zu rund 70 % der Ton- und Schlufffraktion (AFS_{63}) zuzuordnen. Erwartungsgemäß steigt der Feinanteil vom Zulauf bis zum Ablauf an, wo in den meisten Fällen der Feinanteil bei über 85 % liegt. Der Glühverlust der Sedimente liegt im Mittel bezogen sowohl für AFS als auch auf AFS_{63} bei 14 %.

Ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Sedimentmenge und spezifischen Beckenparametern lässt sich nicht erkennen. Es ist weder bezogen auf das spezifische Dauerstauvolumen, noch bezogen auf die spezifische Beckenoberfläche oder auf die Dauerstautiefe eine Abhängigkeit der spezifischen AFS_{63} -Fracht im Becken festzustellen. Auch eine naheliegende Abhängigkeit zwischen der Fracht und der Oberflächenbeschickung ist nicht zu erkennen.

3.2 Auswahl der Becken für die 3D-Simulation

Für die 3D-Simulationen wurden nach Abstimmung mit dem projektbegleitendem Arbeitskreis zwei Beckenanlagen ausgewählt. Das RRB Schwalenberg West befindet sich an dem Parkplatz Schwalenberg West an der A 7 Fahrtrichtung Kassel bei km 223+500. Insgesamt sind 1,86 ha Fläche angeschlossen, welche

sich aus Fahrbahn und Parkplatzfläche der Rastanlage zusammensetzt. Die Anlage ist auf ein zehnjährliches Ereignis bemessen, der Bemessungszufluss beträgt $Q_{zu,n}=1=200,5$ l/s und der Beckenablauf ist auf 86 l/s gedrosselt. Das Becken hat ein spezifisches Dauerstauvolumen von 235 m³/ha.

Das zweite Becken ist ein RRB mit vorgeschaltetem Absetzbecken und befindet sich an der A 72 km 146+560 Fahrtrichtung Leipzig. Von dieser Beckenanlage wird ausschließlich das Absetzbecken betrachtet. Das Absetzbecken ist mit einer Betonsohle versehen und die Böschungen sind mit Betonsteinen gepflastert. Entsprechend den Angaben aus den RiStWag (FGSV, 2016) ist der Zulauf zur Anlage getaucht ausgeführt. Der Ablauf des Absetzbeckens in das nachfolgende RRB erfolgt über drei getauchte Rohre DN 800. Das Becken hat ein spezifisches Dauerstauvolumen von 87 m³/ha.

Wegen der Querschnittsverengung treten hier höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf, daher ist diese Ablaufgestaltung nach heutigem Entwässerungsregelwerk nicht zulässig.

3.3 Auswahl der hydraulischen und stofflichen Belastung für die 3D-Simulation

Aus der statistischen Auswertung der Ergebnisse der N-A-Simulation wird die hydraulische Belastung für die 3D-Simulation gewählt. Für die statistische Auswertung wird die maximale Oberflächenbeschickung herangezogen, da diese für den langfristigen feinstpartikulären Feststoffrückhalt maßgeblich ist.

Die AFS-Zulaufbelastung wird aufgrund einer Literaturlauswertung von Messdaten an Bundesfernstraßen (ifs, 2018) zu 160 mg/l angenommen. Dazu wurden vier Kornklassen gebildet, deren Korngröße jeweils dem Mittelwert der T+U-Fraktion und den Sandfraktionen entsprechen. Mit 140,8 mg/l dominiert die kleinste Kornfraktion (0,032 mm). Diese wird als AFS₆₃ angegeben.

4 Ergebnisse der 3D-Simulation

4.1 Vorgehensweise

Aus den vorliegenden Planunterlagen beziehungsweise aus den vor Ort aufgenommenen Daten wurden die Computermodelle für die beiden Becken erstellt.

Zunächst wurde für beide Becken eine Berechnung mit freiem Wasserspiegel, aber ohne Berücksichtigung der Feststoffe im Becken (Sediment) und im Zufluss, durchgeführt. Ziel dieser Berechnungen war eine Wasserspiegellage bei der entsprechenden Zulaufbelastung zu berechnen. Diese Wasserspiegellage wurde dann in einem zweiten Schritt für die Simulation mit festem Wasserspiegel, aber mit Berücksichtigung der Feststoffe, durchgeführt.

4.2 Modellaufbau

Der Modellaufbau für die beiden Becken erfolgte mithilfe des Programmsystems GAMBIT 2.4.

Bei Anlage 13 wurden aus modelltechnischen Gründen die getauchten und mit Gegengefälle verlegten Ablaufrohre durch Rechteckprofile mit gleicher Fläche und ohne Gefälle ersetzt. Die Sohlhöhe der Ablaufrohre wurde auf 0,78 m über Beckensohle erhöht, die damit etwa der mittleren Höhe der ansteigenden Rohrleitungen entsprach.

Bei der Anlage 1 "RRB Schwalenberg West" ergaben die ersten Berechnungen, dass aufgrund des seitlichen Beckenzulaufs bereits bei den kleinen Oberflächenbeschickungen ($q_a=0,54$ m/h) ablaufnahe Sedimente remobilisiert wurden und der Wirkungsgrad negativ war. Dieses Becken wurde wegen des ungünstigen seitlichen Beckenzulaufs modelltechnisch umgestaltet, sodass sich Zulauf und Ablauf in einer Linie befinden.

4.3 Ergebnis RRB Schwalenberg West (Anlage 1)

Das umgestaltete RRB hat deutlich bessere Sedimentationseigenschaften als das Becken 1 im Originalzustand, bei dem der Zulauf seitlich in das Becken einströmt.

Bei einer Sedimentbelegung, die einer zehnjährigen Zulauf-fracht entspricht, wird auch bei einer Oberflächenbeschickung von $q_a=0,54$ m/h, die von 88 % der Zuflusssumme im Jahr unterschritten wird, noch ein Wirkungsgrad von 76 % erzielt. Für den weitaus größten Teil der Jahreszuflüsse (Median $q_a=0,04$ m/h) sind die Absetzwirkungen deutlich besser. Bei höherer Sedimentbelegung, die der Zulauf-fracht von 22 Jahren entspricht, werden durch Remobilisierung mehr Sedimente ausgetragen als bei dem Ereignis als Zulauf-fracht angesetzt wurde. Der Wirkungsgrad ist mit -16 % negativ. Die maximale Sedimenthöhe im Ablaufbereich beträgt dabei 51 cm. Damit ist das Sediment noch 44 cm unterhalb der Tauchwand beziehungsweise 89 cm unterhalb des Ablaufrohrs. Die zusätzlich zur Zulauf-fracht ausgetragene Sedimentmenge ist jedoch mit rund 0,4 % der Jahreszufluss-fracht so gering, dass sich der gesamte Wirkungsgrad des Beckens nicht signifikant verschlechtern kann.

Bei einem Extremereignis mit einer deutlich größeren hydraulischen Belastung ($q_a=2,16$ m/h, bei der N-A-Simulation nicht aufgetreten) beträgt die zusätzlich zur Zulauf-fracht ausgetragene Sedimentmenge knapp 2 % der Jahreszufluss-fracht. Auch durch ein derartiges Extremereignis kann damit der Gesamtwirkungsgrad des Beckens nicht signifikant verschlechtert werden. Bis zu maximalen Sedimenthöhen von rund 50 cm im Ablaufbereich wird daher der Gesamtwirkungsgrad dieses Beckens unter Beachtung möglicher Remobilisierung bei starken und Extremereignissen zu rund 70 % abgeschätzt.

Eine Räumung des Sediments bei diesem Becken wird nach den Berechnungen ab einer maximalen Sedimenthöhe von 50 cm im Ablaufbereich empfohlen. Damit liegt die Sedimentschicht direkt an der Sohle des Ablaufbauwerks und 45 cm unter der Tauchwand.

Die Berechnungsergebnisse zeigen ein Ertüchtigungspotenzial auf. Das Nadelöhr bei dieser Anlage ist neben dem punktuellen Zulauf vor allem das kleine Ablaufbauwerk mit einer gesamten

Breite unterhalb der Tauchwand von 2,3 m. Bei einem Ablaufbauwerk mit Überlaufschwelle hinter der Tauchwand über die ganze Beckenbreite, wie zum Beispiel bei RiStWag-Anlagen oder bei Regenklärbecken nach DWA-A 166 üblich, wäre die Strömung im Ablaufbereich gleichgerichtet und die Sedimentationsleistung besser.

4.4 Ergebnis Absetzbecken (Anlage 13)

Das nach den RAS-Ew Bemessungskriterien großzügig bemessene Absetzbecken weist bei Sedimenthöhen bis 50 cm (rund 30 cm unter Sohle getauchte Ablaufrohre) bezogen auf AFS63 auch für halbjährlich auftretende Ereignisse mit einer Oberflächenbeschickung von $q_a=3,6$ m/h einen Wirkungsgrad von rund 30 bis 35 % auf. Es werden zwar schon ablaufnahe Feinsedimente remobilisiert, der Wirkungsgrad ist aber insgesamt noch deutlich positiv.

Bei einer Sedimenthöhe von 70 cm (rund 10 cm unter Sohle getauchte Ablaufrohre) tritt bei der gleichen Belastung bereits durch remobilisierte ablaufnahe Feinsedimente ein negativer Wirkungsgrad auf und es wird knapp 2 % der jährlich in das Becken gelangenden AFS63-Fracht ausgetragen. Bei einer Extrembelastung mit vierfach höheren Abflüssen ($q_a=14,5$ m/h) beträgt, bei der Sedimenthöhe von 70 cm, die ausgetragene AFS63-Fracht bereits rund 20 % der Jahresfracht. Bei dem realen Becken tritt aufgrund der großzügigen Dimensionierung ein derartiges Ereignis weniger als alle zehn Jahre einmal auf. Für streng nach RAS-Ew bemessene Becken ist ein derartiges Ereignis jedoch bereits alle fünf Jahre zu erwarten. Aus Sicht des Gewässerschutzes sollte daher die Sedimenthöhe nicht bis auf diesen Wert steigen.

Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Rechenläufe sollte eine Sedimenträumung aus dem Absetzbecken bei Sedimenthöhen von 50 cm, entsprechend 30 cm unterhalb der Sohle der getauchten Zulaufrohre erfolgen, um eine signifikante Remobilisierung auch für Extremereignisse mit einem Wiederkehrintervall $T>5$ a zu vermeiden.

Auch bei diesem Becken kann eine Verbesserung der Reinigungsleistung durch den Umbau der Ablaufkonstruktion erzielt werden. Die getauchten Ablaufrohre, die einfach und kostengünstig die Funktion einer Tauchwand übernehmen, haben den Nachteil, dass sie relativ nah über der Beckensohle angeordnet sind. Zudem wird hier der gesamte Abfluss durch das an der Sohle knapp 7 m breite Becken wieder auf drei Ablaufrohre mit DN 800 reduziert. Die Fließgeschwindigkeiten werden somit deutlich erhöht. Bei dem Ereignis mit 3,6 m/h Oberflächenbeschickung ($Q_{zu}=350$ l/s) tritt in den getauchten Ablaufrohren immerhin eine Fließgeschwindigkeit von 0,23 m/s auf und damit auch eine nennenswerte Erhöhung der Fließgeschwindigkeit im Umfeld. Nach den RAS-Ew sollte unterhalb einer Tauchwand eine Fließgeschwindigkeit von 0,05 m/s nicht überschritten werden. Auch wenn hier die Verhältnisse nicht direkt vergleichbar sind (bei einer Tauchwand würde eine Erhöhung der

Fließgeschwindigkeit die gesamte Breite unterhalb der Tauchwand betreffen und somit eine größere Sedimentoberfläche gefährden), sind die im Bereich der getauchten Ablaufrohre auftretenden Fließgeschwindigkeiten deutlich größer.

Mit einer Wehrschwelle im Ablauf über die gesamte Beckenbreite und einer davor angeordneten Tauchwand wäre hier eine wesentliche Verbesserung der Absetzeigenschaften und vor allem auch ein besserer Schutz vor Remobilisierung gegeben.

5 Empfehlungen

Sedimenträumung

Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen der hydraulischen Belastung in Verbindung mit der Sedimenthöhe konnte nicht ermittelt werden. Die Berechnungsergebnisse an den beiden Beckenanlagen deuten jedoch darauf hin, dass vor allem die Sedimenthöhe im Ablaufbereich eine Sedimentremobilisierung stärker beeinflusst, als die Höhe der hydraulischen Belastung. Nicht die absolute Sedimenthöhe auf der Beckensohle ist dabei entscheidend, sondern der Abstand zwischen der Oberfläche des ablaufnahen Sediments und der Sohle des Ablaufs beziehungsweise der Tauchwand.

Beim untersuchten Absetzbecken mit der Ablaufkonstruktion aus drei getauchten Ablaufrohren wird eine Sedimenträumung angeraten, wenn dieser Abstand zwischen Rohrsohle und Sediment 30 cm unterschreitet. Das entspricht einer ablaufnahen Sedimentschicht von 50 cm. Damit wird ein übermäßiger Sedimentaustrag durch Remobilisierung auch bei seltenen Ereignissen vermieden.

Eine direkte Übertragung dieses Werts auf Beckenanlagen mit Ablauf über eine breite Wehrschwelle mit davor liegender Tauchwand ist nicht möglich, da sich die Strömungsverhältnisse im Ablaufbereich deutlich unterscheiden. Als erste Näherung und mit Sicherheitszuschlag kann folgende Annahme für nach RAS-Ew bemessene Beckenanlagen mit Tauchwand und Ablauf über eine breite Wehrschwelle getroffen werden: Als Unterkante der Tauchwand wird der Rohrscheitel der Ablaufrohre (DN 800) angesetzt und der Abstand zwischen Rohrsohle und Sediment von 30 cm addiert. Damit beträgt der zulässige Abstand zwischen Tauchwand und Sediment 1,1 m. Diese Beckenanlagen wären dann zu räumen, wenn der Abstand zwischen Sediment und Tauchwandunterkante 1,1 m unterschreitet. Unter Annahme einer Beckentiefe von 2 m, einer notwendigen Eintauchtiefe der Tauchwand von 0,4 m und einem Abstand zwischen Tauchwand und Sediment ist dann zu räumen, wenn die Sedimentschicht 0,5 m ($2,0\text{ m}-0,4\text{ m}-1,1\text{ m}=0,5\text{ m}$) beträgt.

Bei dem groß dimensionierten RRB wird eine Sedimenträumung ab einer maximalen Sedimenthöhe im Ablaufbereich von 50 cm (45 cm unterhalb der Tauchwandunterkante) empfohlen, um den Gesamtwirkungsgrad bezogen auf AFS63 von über 70 % nicht durch größere Remobilisierungsereignisse zu verschlechtern.

Eine von der Beckenform und der Ablaufkonstruktion unabhängige Angabe für zulässige Sedimenthöhen bis zur Sedimenträumung können nicht angegeben werden. Bei "punktuellen" Ablaufkonstruktionen mit einer oder mehreren Rohrleitungen sind in jedem Fall größere Anforderungen an den Abstand zwischen Sediment und Rohrsohlen zu legen als bei breiten Ablaufkonstruktionen mit Wehrschwellen. Bei letzteren Konstruktionen ist bei nach den RAS-Ew bemessenen Becken davon auszugehen, dass bei einem Abstand zwischen Unterkante Tauchwand und Sedimentoberfläche von 1,1 m eine ausreichende Sicherheit gegen übermäßige Remobilisierung vorliegt.

Die Empfehlungen zur notwendigen Sedimenträumung aus Absetz- und Regenrückhaltebecken sollten in jedem Fall von der Sedimenthöhe in Bezug auf die Ablaufhöhe (Rohrleitungen beziehungsweise Tauchwände) und nicht von der absoluten Sedimenthöhe über der Beckensohle abhängig gemacht werden.

Konstruktive Hinweise

In Grotehusmann et al. (2006) wurden anhand von Felduntersuchungen und 3D-Simulationen Vorschläge zur Zulaufgestaltung von Absetzbecken erarbeitet, die im Wesentlichen auf einen teileingestauten Zulauf und eine bessere Verteilung der Zulaufwassermengen (zum Beispiel über die Aufteilung des Zuflusses auf zwei Rohrleitungen großen Durchmessers) bestanden. Das damals detailliert untersuchte Becken hatte einen als Wehrschwelle über die ganze Beckenbreite gestalteten Ablauf. Dadurch ergab sich im letzten Beckendrittel eine gleichgerichtete Strömung Richtung Wehrschwelle.

Bei den im Rahmen dieses Vorhabens detailliert untersuchten Becken war sowohl der Zulauf als auch der Anlagenablauf punktuell, wodurch sich über den gesamten Zeitraum der Zuflüsse eine Walzenströmung über den gesamten Beckenbereich mit höheren Fließgeschwindigkeiten in der Beckenmitte ergeben hat.

Die Sedimentationsleistung der Absetzbecken könnte durch ein Ablaufbauwerk entsprechend den Vorgaben der RiStWag (Wehrschwelle über die gesamte Beckenbreite) deutlich gesteigert werden.

Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass getauchte Ablaufleitungen anstelle von Tauchwänden für Sedimentationsanlagen nicht geeignet sind, da sie die Abflüsse punktuell aus einer größeren Tiefe (dichter über der Sedimentschicht) abziehen, als Wehrschwellen mit Tauchwand.

6 Weiterer Forschungsbedarf

Um den Einfluss der Ablaufkonstruktion näher zu erfassen, wären weitere Berechnungen mit einem Absetzbecken sinnvoll. Hier sollten die getauchten Ablaufrohre durch eine Wehrschwelle über die gesamte Beckenbreite mit vorgeschalteter Tauchwand ersetzt werden. An diesem modifizierten Becken sollte dann bei der hohen Zuflussbelastung ($q_a=14,5$ m/h) und einem Abstand zwischen Sediment und Tauchwandunterkante

von 0,9 m die Berechnung durchgeführt werden (Rechenlauf entspricht dann dem mit Sedimenthöhe von 70 cm und hoher Zuflussbelastung). Es wird vermutet, dass die Sedimentausträge signifikant geringer sind als bei der Variante mit den getauchten Ablaufrohren. Dann kann gegebenenfalls in einer weiteren Variante der Abstand zwischen Sedimentschicht und Tauchwandunterkante verringert werden.

Als weitere Variante "Ertüchtigung von RRB" kann die Anlage 1 im Ablaufbereich ebenfalls mit einem breiten Überlaufwehr mit Tauchwand versehen werden. Prinzipiell wäre eine derartige Konstruktion aus Edelstahl auch nachträglich in bestehende Beckenanlagen einbaubar. In der Berechnung mit dem Extremereignis ($q_a=2,16$ m/h) kann für die hohe Sedimentvorbelegung im Becken überprüft werden, ob auch mit dieser Konstruktion eine Remobilisierung eintritt. Wenn sich - wie hier vermutet - dann keine Remobilisierung mehr einstellt, könnte eine relativ einfache Konstruktion zur Ertüchtigung des Ablaufbereichs von RRB entwickelt werden.

Die bisherigen Berechnungen konnten nur Wirkungsgrade und Remobilisierungsraten für bestimmte Kombinationen von hydraulischer Belastung und Sedimenthöhe im Becken ergeben. Für eine Extrapolation der ermittelten Wirkungsgrade auf längere Zeiträume müsste ein funktionaler Zusammenhang zwischen der hydraulischen Belastung und dem Sedimentationswirkungsgrad sowie zwischen der Sedimenthöhe im Becken, der hydraulischen Belastung und der Remobilisierung hergestellt werden. Dafür reicht die bisherige Datengrundlage nicht aus und es müssten weitere 3D-Berechnungen für unterschiedliche Randbedingungen durchgeführt werden. Aus diesem funktionalen Zusammenhang könnte dann eine Akkumulations- und Abtragsfunktion (Sedimentations-Remobilisierungsfunktion) abgeleitet werden, die einer Niederschlags-Abfluss-Simulation nachgeschaltet werden kann. Damit könnte dann zum Beispiel über einen Zeitraum mehrerer Jahre die Rückhaltewirkung der Beckenanlagen ermittelt werden.

7 Literatur

ANSYS (2016): Fluent-Benutzerhandbuch, ANSYS Germany GmbH, Darmstadt.

DWA (2016): DWA Arbeitsblatt A-102: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer (Entwurf, Oktober 2016)

DWA (2013a): DWA Arbeitsblatt 117: Bemessung von Regenrückhalteräumen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 12/2013

DWA (2013b): DWA Arbeitsblatt 166: Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung – Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

- DWA (2015): DWA Arbeitsblatt 102: Niederschlagsbedingte Siedlungsabflüsse – Grundsätze und Anforderungen zum Umgang mit Regenwasser (Bearbeitungsstand September 2015), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Eyckmanns-Wolters, R.; Fuchs, S.; Maus, Ch.; Sommer, M.; Voswinkel, N.; Mohn, R.; Uhl, M.; Schmitt, Th.; Berger, Ch. (2013): Reduktion des Feststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen, Phase 1 Projektbericht, im Auftrag des MKULNV
- FGSV (2005): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew), Ausgabe 2005
- FGSV (2016): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten (RiStWag), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2016
- GEIGER, W.F.; FREHMANN, T.; MIETZEL, T.; USTOHAL, P. (2002): Vergleichende Modelluntersuchungen zur Wirkungsweise von Regenentlastungsanlagen – Resuspension der Sedimente in Regenbecken – Universität Essen, Siedlungswasserwirtschaft, DFG Forschungsprojekt GE 459/12- 2, Schlussbericht, unveröffentlicht
- GROTEHUSMANN, D.; KASTING, U.; HUNZE, M. (2006): Optimierung von Absetzbecken, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 944, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Bonn, 2006
- GROTEHUSMANN, D.; FUCHS, S.; LAMBERT, B.; RÜTER, J. (2010): RBF Halensee, Inbetriebnahme und messtechnische Begleitung, Schlussbericht, im Auftrag der Berliner Wasserbetriebe, unveröffentlicht
- GROTEHUSMANN, D.; LAMBERT, B.; FUCHS, S.; GRAF, J. (2017): Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss, Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 05.152/2008/GRB, im Auftrag des BMVI
- HIRT, C.W. und NICHOLS, B.D. (1981): Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. Journal of Computational Physics, No. 39, 201-225.
- IFS (2018): Immissionsbezogene Bewertung der Einleitung von Straßenabflüssen, Gutachten im Auftrag der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr
- IFS (2002): Programm: *erwin*. Regenwasserbewirtschaftung, Version 4.03, Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie, Hannover, 2002
- LAMBERT, B.; GROTEHUSMANN, D.; RÜTER, J. (2013): Studie zur Festlegung der Regenwasserbehandlungsanlagen für das Einzugsgebiet der Alten und der Neuen Wuhle, Untersuchung im Auftrag der Berliner Wasserbetriebe, Berlin, 2013.
- LANGE, G., D. GROTEHUSMANN, U. KASTING, M. SCHÜTTE, M. DIETERICH, W. SONDERMANN (2003): Wirksamkeit von Entwässerungsbecken im Bereich von Bundesfernstraßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 861, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2003
- MAUS, Ch.; UHL, M. (2009): Traceruntersuchungen zur Wirksamkeit von Regenbecken, Korrespondenz Abwasser, 2/2009
- MUNLV, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2004): RdErl. IV-9 031 001 2104 vom 26.05.2004: Anforderungen an die Niederschlagsentwässerung im Trennverfahren
- MUTH, W. (1990): Regenüberlaufbecken – Strömungsuntersuchungen an rechteckigen Durchlaufbecken, Versuchsanstalt für Wasserbau, FH Karlsruhe, Schlussbericht im Auftrag des Regierungspräsidiums Karlsruhe, unveröffentlicht
- MUTH, W. (1992): Regenüberlaufbecken, Strömungsuntersuchungen am Durchlaufbecken, Korrespondenz Abwasser, 6/1992
- NLSTBV (2014): Niedersächsische Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr, Beckenbuch RRB Schwalenberg West
- Orszag, S.A., Staroselsky, I.; Flannery, W.S. und Zhang, Y. (1996): Introduction to renormalization group modeling of turbulence. In: Simulation and Modeling of Turbulent Flows, Oxford University Press, 1996
- PAULSEN, O. (1987): Kontinuierliche Simulation von Abflüssen und Stofffrachten in der Trennentwässerung, Mitteilungen; Heft 62 des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover
- STOTZ, G.; KRAUTH, K. (2001): Wirkung von Regenklärbecken für die Reinigung von Niederschlagswasser, Korrespondenz Abwasser, 5/2001
- VERWORN, H.-R.; KENTER, G. (1993): Abflußbildungsansätze für die Niederschlag-Abfluß-Modellierung, Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, 24/1993

WEIß, G. (2009): Konstruktion, technische Ausrüstung und Betrieb von Regenbecken, DWA Wasser-Wirtschafts-Kurs Entwässerungskonzepte, 04. – 06. März in Kassel

ZIOR, F. (1987): Regenwasserabfluß auf Fahrbahnoberflächen: experimentelle und theoretische Untersuchungen; Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, TU Darmstadt, 38/198