Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Entwicklung einer Nachrüst-einheit für Strassenabläufe (Schlammsammler)

Développement d'équipements complémentaires pour (sacs) dépotoirs

Optimization of an upgrade unit for road sewage drains

Hochschule für Technik Rapperswil
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC
Oberseestr. 10
8640 Rapperswil

AWEL Amt für Abfall, Wasser,
Energie und Luft
Walcheplatz 2
8090 Zürich

wst21 Michele Steiner
Mattenhof 20
8051 Zürich

Hochschule für Technik Rapperswil
IET Institut für Energietechnik
Oberseestr. 10
8640 Rapperswil

CREABETON PRODUKTIONS AG
Aarauerstrasse 75
5201 Brugg AG

Forschungsprojekt VSS 2017/225 auf Antrag des Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Juli 2021 **1702**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Entwicklung einer Nachrüst-einheit für Strassenabläufe (Schlammsammler)

Développement d'équipements complémentaires pour (sacs) dépotoirs

Optimization of an upgrade unit for road sewage drains

Hochschule für Technik Rapperswil
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC
Oberseestr. 10
8640 Rapperswil

AWEL Amt für Abfall, Wasser,
Energie und Luft
Walcheplatz 2
8090 Zürich

wst21 Michele Steiner
Mattenhof 20
8051 Zürich

Hochschule für Technik Rapperswil
IET Institut für Energietechnik
Oberseestr. 10
8640 Rapperswil

CREABETON PRODUKTIONS AG
Aarauerstrasse 75
5201 Brugg AG

Forschungsprojekt VSS 2017/225 auf Antrag des Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Juli 2021 **1702**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Jean-Marc Stoll
Fabio Corradini

Mitglieder
Michele Steiner
Stefan Schmid
Felix Hermann
Thomas Rohr
Alain Schubiger

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

Begleitkommission

Präsident
Reto Battaglia

Mitglieder
Marguerite Trocmé
Hartmut Stiess
Willy Steiner
Matthias Meier
Peter Ebner

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Creabeton Baustoff AG
Wst21

Antragsteller

Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von http://www.mobilityplatform.ch heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum **4**
Zusammenfassung **7**
Résumé **9**
Summary **11**

1 Einleitung **13**
1.1 Ausgangslage 13
1.2 Stand der Technik 14
1.3 Ziele und Vorgehen 15

2 Grundlagen **17**
2.1 Strassenabwasser 17
2.2 Strassenabläufe 18
2.3 Reinigung der Schlammsammler 19
2.4 Regenereignis 20
2.5 Potentielle Schlammmenge im Strassenablauf 20

3 Material und Methoden **23**
3.1 Testanlage Europabrücke 23
3.1.1 Beschreibung der Anlage 23
3.1.2 Konzept Praxisversuche Europabrücke 26
3.2 Testanlage Richterswil 29
3.2.1 Beschreibung der Anlage 29
3.2.2 Konzept Praxisversuche Richterswil 30

4 Vergleich der Realität mit der CFD-Simulation (Phase 1) **31**
4.1 Vorgehen 31
4.2 Ergebnisse Vergleich Simulation mit Realität ohne Nachrüsteinheit 31

5 Entwicklung der Nachrüsteinheit mit CFD (Phase 2) **33**
5.1 Erläuterung der Auswertungsverfahren 33
5.1.1 Auswertung anhand der Wassertemperatur 34
5.1.2 Auswertung anhand der turbulenten kinetischen Energie 35
5.1.3 Verwendetes Regenereignis 36
5.2 Ergebnisse der verschiedenen Konzepte 36
5.3 Weiterentwicklung des besten Konzepts 41
5.3.1 Kranz erster Versuch 41
5.3.2 Kranz bei hohem konstanten Volumenstrom 42
5.3.3 Kranz unterschiedliche Breite 44
5.3.4 Kranz unterschiedliche Höhe 45
5.3.5 Kranz mit und ohne Neigung 46

6 Simulationen mit Partikeln **47**
6.1 Methodik 47
6.2 Modell und Materialeigenschaften 47
6.3 Versuche mit Schlammspiegel und einer Kornfraktion 47
6.4 Versuche ohne Schlammspiegel mit 3 Kornfraktionen 49
6.5 Vorläufiges Fazit 50

7 Bau und Erprobung der Nachrüsteinheit (Phase 3) **51**
7.1 Prototypen 51

7.2 Einbau in bestehende Schlammsammler 53

8 Überprüfung der Wirkung in der Realität (Phase 4) 55
8.1 Schlammmenge und Schwermetallgehalt nach einem Jahr....55
8.2 Vergleich der Simulation mit der Realität....59
8.3 Versuche zum Partikelrückhalt 62

9 Diskussion 65
9.1 Aktuelle Schwäche der Nachrüsteinheit 65
9.2 Höhe der Platzierung des Kranzes (Nachrüsteinheit) 66
9.3 Vergleichbarkeit der Praxisversuche 67

10 Schlussfolgerung 69
10.1 Wirkung der Nachrüsteinheit "Kranz" 69
10.2 Weitere Simulationen zum Partikelfluss 69
10.3 Montage und Reinigung....70

Anhänge 71
Glossar 90
Literaturverzeichnis 91
Projektabschluss 93

Zusammenfassung

Das verschmutze Abwasser, welches bei Regenereignissen auf Strassen anfällt, fliesst durch Strassenabläufe (Schlammsammler). Eine deren Aufgaben ist es, das Wasser zu behandeln, indem die Partikel sedimentieren und sich am Boden in Form von Schlamm ansammeln. Der Abfluss des Wassers im Schlammsammler verläuft über einen Tauchbogen, wodurch ebenfalls leichtere Flüssigkeiten wie bspw. Öl zurückgehalten werden. Das "behandelte" Wasser fliesst danach teilweise in Aufbereitungsanlagen oder auch direkt in Oberflächengewässer. Bei stärkeren Regenereignissen ist die Verweilzeit im Schlammsammler sehr gering, was sich direkt auf die Absetzleistung auswirkt. Zudem wird bereits abgesetzter Schlamm teilweise wieder aufgewirbelt und ausgetragen. Für grössere Schlammsammler fehlt in urbanen Gebieten der Platz. Zudem würde ein Aus- bzw. Umbau aller Schlammsammler einen enormen Aufwand bedeuten, welcher jeglichen Rahmen sprengen würde.

Aus diesem Grund wurde nach einer Möglichkeit geforscht, eine Nachrüsteinheit für Schlammsammler zu entwickeln, welche die Absetzleistung insgesamt und vor allem den Rückhalt von Partikeln bei stärkeren Regenereignissen verbessert. Mit Hilfe von Strömungssimulationen auf Basis von Computermodellen wurde eine Nachrüsteinheit entwickelt, welche schnell und einfach zu montieren ist und die Reinigungsarbeiten nicht beeinträchtigt. Hierzu wurde in originalgetreuen Massstab eine Versuchsanlage mit diversen Messinstrumenten gebaut. Anhand dieser Anlage konnten relevante Parameter wie der Temperaturverlauf des Wassers im Sammler sowie die Wassermengen erfasst werden. Anhand dieser Parameter konnte ein präzises Simulationsmodell erschaffen werden, welches die Realität bestmöglich abbildete. Durch den Abgleich des Modells mit der Realität wurde eine solide Simulationsgrundlage geschaffen, welche es ermöglichte, am Computer die Auswirkungen verschiedener Nachrüsteinheiten auszuwerten. Die beste Nachrüsteinheit wurde in die Praxis umgesetzt und in Kurz- sowie Langzeitversuchen getestet. Die Kurzzeitversuche beinhalteten einmalige Regenereignisse von fünf Minuten und fanden auf der Versuchsanlage statt. Bei den Langzeitversuchen wurde die Nachrüsteinheit in normale Strassenabläufe eingebaut und ein Vergleich "mit vs. ohne" über den Zeitraum von einem Jahr aufgestellt.

Sowohl die Messungen auf der Versuchsanlage als auch die Simulationen zeigten, dass der Wasserstrom in den Schlammsammler hauptsächlich am Rande entlangläuft. Aufgrund dessen erwies sich ein Kranz am Rand der Sammler mit einer Breite von 20 cm als wirkungsvolle Massnahme (Nachrüsteinheit), um den Wasserfluss in die unteren Schichten zu reduzieren. Zudem ist dadurch eine ausreichend grosse Öffnung in der Mitte des Schlammsammlers für das Aussaugen des abgesetzten Schlamms vorhanden. Es zeigte sich, dass sich durch die Nachrüsteinheit die Zeit verdoppelte, bis das Wasser in die unteren Schichten vorgedrungen war. Folglich kann von einer reduzierten Aufwirbelung des bereits abgesetzten Schlamms ausgegangen werden. Allerdings verkleinerte die Nachrüsteinheit das Volumen, welches für den Wasserdurchsatz vorhanden war, wodurch im oberen Bereich grössere Turbulenzen auftraten. Dies hatte zur Folge, dass sich neu eingetragene Partikel vor allem während stärkeren Regenereignissen schlechter absetzten. Es ist noch unklar, bei welcher Regenintensität sich der kritische Punkt befindet, bei dem die Absetzleistung zu gering ist und den besseren Rückhalt wieder zunichte macht. Zudem wurde eine weitere Schwachstelle der Nachrüsteinheit identifiziert. Die Nachrüsteinheit (Kranz), welche eine Fläche von 20 cm rund um den Schlammsammler im 90° Winkel zur Seitenwand bildet, bietet eine Ablagefläche für den eingetragenen Schlamm. Folglich lagerte sich ein Teil des Schlamms auf der Nachrüsteinheit ab und sedimentierte nicht in die unteren Schichten. Es wird vermutet, dass ein Teil davon bei einem erneuten Regenereignis leichter wieder aufgewirbelt und ausgetragen wird. Ein gewisser Anteil bleibt jedoch auch auf der Nachrüsteinheit liegen. Wie gross das Verhältnis der beiden Teile ist, ist jedoch unklar. Eine Neigung im Kranz könnte hierbei Abhilfe schaffen und dafür sorgen, dass der Schlamm besser in den unteren Bereich rutscht und dadurch der Wirkungsgrad angehoben wird.

Über alle 6 Kurzzeitversuche konnte mit der Nachrüsteinheit einen erhöhten GUS-Rückhalt von 11 % und Zink-Rückhalt von 22 % verzeichnet werden. Hierbei zeigte sich jedoch erneut die Problematik, dass sich ein Teil der sedimentierten Partikel auf dem Kranz (Nachrüsteinheit) befanden und nicht bis in die unteren Schichten gelangen.

Die Langzeitversuche ergaben in 2 von 3 Schlammsammlern durch die Nachrüsteinheit einen schlechtere GUS-Akkumulation (20 und 50 % weniger im Vergleich zu ohne Nachrüsteinheit) jedoch einen deutlich bessere Schwermetall-Akkumulation. Es wurde mit der Nachrüsteinheit bis zu 95 % mehr Blei, 94 % mehr Chrom, 147 % mehr Kupfer und 206 % mehr Zink akkumuliert als ohne. Diese Angaben sind jedoch lediglich Erfahrungswerte aus den Langzeitversuchen, welche, aufgrund der unterschiedlichen Niederschlagsverhältnisse und Verkehrsaufkommen der beiden Messperioden (Juni 2018 – Juni 2019 ohne und Juni 2019 – Juni 2020 mit Nachrüsteinheit) mit Vorsicht zu betrachten sind. Die einjährige Messperiode mit Nachrüsteinheit beinhaltete die Monate März bis Juni 2020. Während dieser Zeit war durch den Lockdown das Verkehrsaufkommen reduziert. Es ist davon auszugehen, dass bei normalem Verkehrsaufkommen (wie in der Messperiode im Vorjahr ohne Nachrüsteinheit) die Schwermetall-Akkumulation im Vergleich noch grösser ausgefallen wäre.

Die Nachrüsteinheit hat das Potential, den Partikel-Rückhalt zu steigern. Insbesondere bei der Akkumulation von Schwermetallen im Schlammsammler konnte in der aktuellen Version eine deutliche Steigerung festgestellt werden. Für einen besseren Rückhalt der leichteren Fraktion sind jedoch weitere Optimierungsschritte notwendig, welche anhand von Simulationen zum Partikelfluss evaluiert werden könnten. Nebst der Neigung ist ebenfalls die Höhe und die Breite der Nachrüsteinheit ein entscheidender Faktor, welcher noch optimiert werden könnte, um den Rückhalt zu steigern. Erste Partikelflusssimulationen haben die Dynamik im Schlammsammler bestätigt. Die Verkleinerung des aktiven Volumens im oberen Teil der Nachrüsteinheit sorgt auch in den Simulationen für einen stärkeren direkten Austrag der einströmenden Partikel und einem besseren Rückhalt der bereits abgesetzten Partikel.

Résumé

Les eaux usées polluées, qui sont produites lors des précipitations sur les routes, s'écoulent par des égouts routiers (dépotoir). Une de leur tâche consiste à retenir les sédiments et permettre leur accumulation au fond du dépotoir. L'eau ressort du dépotoir par un coude plongeur, ainsi que les liquides plus légers comme le pétrole sont également retenus. L'eau éclaircit s'écoule ensuite en partie dans des stations d'épuration ou directement dans les eaux de surface. Lors de pluies fortes, le temps de séjour dans les dépotoirs est très court, ce qui a un effet direct sur la capacité de sédimentation. En outre, les boues déjà sédimentées sont à nouveau remuées et évacuées. Dans les zones urbaines, il n'y a pas de place pour des grands dépotoirs. En outre, une extension ou une conversion de tous les dépotoirs nécessiterait un effort énorme, qui dépasserait les limites de tout cadre.

C'est pourquoi des recherches ont été menées sur la possibilité de mettre au point un équipement complémentaire pour les dépotoirs qui améliorerait la performance globale de décantation et, surtout, la rétention des particules lors de pluies fortes. À l'aide d'une simulation de flux basée sur des modèles informatiques, un équipement complémentaire a été développée, qui est rapide et facile à installer et qui n'interfère pas avec les travaux de nettoyage. Pour cela, une installation d'essai avec de divers instruments de mesure a été construite à une échelle correspondante à l'original. À l'aide de ce système, des paramètres relevants tels que la courbe de température de l'eau dans le collecteur et les quantités d'eau ont pu être enregistrés. Ces paramètres ont été utilisés pour créer un modèle de simulation précis qui reflète au mieux la réalité. En comparant le modèle avec la réalité, une base de simulation solide a été créée, ce qui a permis d'évaluer sur ordinateur les effets des équipements complémentaire différents. Le meilleur équipement complémentaire a été mis en pratique et testé lors d'essais à court et à long terme. Les essais à court terme ont inclus des épisodes de pluie ponctuels de cinq minutes et ont eu lieu dans l'installation d'essai. Lors des essais à long terme, l'équipement complémentaire a été installé sur des routes normales et une comparaison a été faite sur une période d'un an.

Les mesures effectuées sur l'installation d'essai ainsi que les simulations ont montré que le flux d'eau dans les dépotoirs s'écoule principalement le long des bords. Par conséquence, un anneau au bord des collecteurs d'une largeur de 20 cm s'est révélé une mesure efficace (équipement complémentaire) pour réduire le débit d'eau dans les couches inférieures. L'anneau offre également une ouverture suffisamment grande au centre du dépotoir pour permettre d'aspirer les boues décantées. On a constaté que l'unité modernisée doublait le temps nécessaire à l'eau pour pénétrer dans les couches inférieures. Par conséquent, on peut supposer une turbulence réduite des boues déjà décantées. Cependant, l'équipement complémentaire a réduit le volume disponible pour le débit d'eau, ce qui a entraîné une plus grande turbulence dans la zone supérieure. En conséquence, les particules nouvellement introduites se sont déposées plus lentement, surtout lors de fortes pluies. On ne sait pas encore à quelle intensité de pluie se situe le point critique où la vitesse de décantation devient trop faible et où la meilleure rétention est perdue. En outre, un autre point faible de l'équipement complémentaire a été identifié. L'anneau, qui forme une zone de 20 cm au bord des dépotoirs à un angle de 90° par rapport à la paroi latérale, fournit une zone de stockage pour les boues qui sont transportées. Par conséquence, une partie des boues c'est déposée sur l'équipement complémentaire et n'a pas sédimenté dans les couches inférieures. On suppose qu'une partie de cette boue sera remuée et évacuée plus facilement en cas de nouvelle pluie. Toutefois, un certain montant reste sur l'équipement complémentaire. On ne sait cependant pas exactement quelle est la proportion des deux parties. Une inclinaison de l'anneau pourrait remédier à cette situation et assurer que la boue glisse mieux dans la zone inférieure, ce qui augmenterait l'efficacité.

Une amélioration de la rétention du MES de 11 % et de la rétention du zinc de 22 % a été enregistrée sur l'ensemble des 6 tests à court terme. Cependant, cela a de nouveau révélé

le problème que certaines des particules sédimentées se trouvaient sur l'anneau (équipement complémentaire) et n'atteignaient pas les couches inférieures.

Les tests à long terme dans 2 des 3 dépotoirs ont montré une rétention du MES moindre (20 et 50 %) mais une rétention des métaux lourds nettement augmentée grâce à l'équipement complémentaire. Avec l'équipement complémentaire, on a retenue jusqu'à 95 % de plomb en plus, 94 % de chrome en plus, 147 % de cuivre en plus et 206 % de zinc en plus. Toutefois, ces chiffres ne sont que des valeurs empiriques issues des tests à long terme, qui doivent être traités avec prudence en raison des différents volumes de précipitations et de trafic des deux périodes de mesure. La période de mesure avec l'équipement complémentaire comprenait les mois de mars à juin 2020, période pendant laquelle le volume de trafic a été réduit en raison du verrouillage. On peut supposer qu'avec un volume de trafic normal (comme lors de la période de mesure de l'année précédente sans l'équipement complémentaire), la rétention de métaux lourds aurait été encore plus importante en comparaison.

L'équipement complémentaire a le potentiel d'augmenter la rétention des particules. Dans la version actuelle, une augmentation significative de la rétention des métaux lourds en particulier a été observée. Pour une meilleure rétention de la fraction la plus légère, cependant, d'autres étapes d'optimisation sont nécessaires, qui pourraient être déterminées par des simulations du flux de particules. Outre l'inclinaison, la hauteur et la largeur de l'équipement complémentaire sont également des facteurs décisifs qui pourrait être optimisé pour augmenter la rétention. Les premières simulations de flux de particules ont confirmé la dynamique dans le dépotoir. La réduction du volume actif au-dessus de l'équipement complémentaire assure également une décharge directe plus forte des particules entrantes et une meilleure rétention des particules déjà décantées dans les simulations.

Summary

The polluted road runoff, which is produced during rainfall events on roads, flows through street drains (sludge collectors). One of their tasks is to clear the water by sedimentation of the particles and their accumulation on the ground in the form of sludge. The water in the sludge collector is drained off via an immersion bend, which also leads to a retainment of lighter liquids such as oil. The "purified" water then partly flows into treatment plants or directly into surface waters. During heavy rainfall events, the residence time in the sludge collector is very short, which has a direct effect on the settling capacity. In addition, sludge that has already settled is whirled up again and discharged. In urban areas there is no space for larger sludge collectors. In addition, an expansion or conversion of all sludge collectors would require enormous effort, which would go beyond the bounds of any framework.

For this reason, research was conducted into the possibility of developing a retrofit unit for sludge collectors that would improve the overall settling performance and, above all, the retention of particles during heavy rainfall events. With the help of flow simulation on the basis of computer models, a retrofit unit was developed which can be installed quickly and easily and does not impair the cleaning work. For this purpose, a test facility with various measuring instruments was built in an original scale. With the help of this system, relevant parameters such as the temperature curve of the water in the collector and the water quantities could be recorded. Based on these parameters, a precise simulation model was created which best reflects reality. By comparing the model with reality, a solid simulation basis was created, which made it possible to evaluate the effects of various retrofit units by computer. The best retrofit unit was put into practice and tested in short and long-term trials. The short-term tests included one-time rain events of five minutes and took place at the test facility. In the long-term tests, the retrofit unit was installed in normal roadways and a comparison was made over a period of one year.

The measurements on the test facility as well as the simulations showed that the water flow into the sludge collector runs mainly along the edges. Therefore, a rim inside the collector with a width of 20 cm proved to be an effective measure (retrofit unit) to reduce the water flow into the lower layers. It also provides a sufficiently large opening in the center of the sludge collector for the suction of the settled sludge. It was found that the retrofitted unit doubled the time it took for the water to penetrate the lower layers. Consequently, a reduced turbulence of the already settled sludge can be assumed. However, the retrofit unit reduced the volume available for the water throughput, resulting in greater turbulence in the upper area. As a result, newly introduced particles settled more poorly, especially during heavy rainfall events. It is still unclear at what rain intensity the critical point is reached at which the settling capacity is too low and the better retention is negated again. In addition, a further weak point of the retrofit unit was identified. The retrofit unit (rim), which forms an area of 20 cm at the border of the sludge collector at a 90° angle to the side wall, provides a storage area for the sludge that is brought in. Consequently, some of the sludge was deposited on the retrofit unit and did not sediment into the lower layers. It is assumed that some of it will be more easily stirred up again and discharged during the next rainfall event. Though, a certain proportion remains on the retrofit unit. However, it is not clear how large the ratio of the two parts is. An inclination in the rim could remedy this situation and ensure that the sludge slides better into the lower area, thereby increasing the efficiency.

Over all 6 short-term tests, an improved TSS (total suspended solids) retention of 11 % and zinc retention of 22 % was recorded. However, this again revealed the problem that some of the sedimented particles were on the rim (retrofit unit) and did not reach the lower layers.

Long-term tests in 2 out of 3 sludge collectors showed a worse TSS retention (20 and 50 %) but a significantly better heavy metal retention with the retrofitted unit. Up to 95 % more lead, 94 % more chromium, 147 % more copper and 206 % more zinc were retained with the retrofit unit. However, these figures are only empirical values from long-term tests, which should be treated with caution due to the different precipitation and traffic volumes of the two measuring periods. The one-year measurement period with retrofit included the

months March to June 2020, during which time the traffic volume was reduced due to the lockdown. It can be assumed that with normal traffic volumes (as in the previous year's measurement period without the retrofit unit), the retention of heavy metals would have been even greater in comparison.

The retrofit unit has the potential to increase particle retention. The current version of the system shows a significant increase in the retention of heavy metals in particular. For a better retention of the lighter fraction, however, further optimization steps are necessary, which could be determined by simulations of the particle flow. In addition to the inclination, the height and width of the retrofit unit is also a decisive factor, which could be optimised to increase the retention. Initial particle flow simulations have confirmed the dynamics in the sludge collector. In these simulations, the reduction of the active volume above the retrofit unit also ensures a stronger direct discharge of the inflowing particles and a better retention of the already settled particles.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Das Abwasser von stark befahrenen Strassen gilt als verschmutzt. Verschmutztes Abwasser muss laut Gewässerschutzverordnung (GSchV) vor der Einleitung in ein Gewässer gereinigt werden. Als wichtiger Parameter von Strassenabwasser gilt der Gehalt an gesamten ungelösten Stoffen (GUS). Als GUS sind alle Partikel definiert, die von einem Filter mit Maschenweite von 0.45 µm zurückgehalten werden. Für Strassenabwasser gibt es jedoch keine eindeutigen Grenzwerte. Der Höchstwert bei der Einleitung von kommunalem Abwasser (aus einer ARA oder auch bei Industrieabwasser) in Gewässer beträgt 20 mg GUS pro Liter Abwasser [1].

Der Stand der Technik zur Abscheidung von GUS aus Strassenabwasser ist in einer Publikation des ASTRA (Bundesamt für Strassen) zusammengefasst [2]. Gemäss dieser Zusammenstellung weisen bepflanzte Retentionsfilter, Bankette und Sandfilter ergänzt mit einer Adsorberschicht bei den Ablaufkonzentrationen die beste Leistung auf und werden in Kategorie A (beste von fünf Kategorien) klassiert. Dabei beruht die Klassierung auf der Eliminationsleistung der wichtigsten Schadstoffgruppen im Strassenabwasser (gemessen als Wirkungsgrad und in der Ablaufkonzentration). GUS-Konzentrationen werden durch diese Systeme beispielsweise unter 10 mg/l gesenkt. Die beschriebenen Systeme sind sogenannte zentrale SABA (Strassenabwasserbehandlungsanlagen), da das Strassenabwasser von grösseren Strassenflächen an einem Punkt, eben zentral, behandelt wird. In urbanen Gebieten ist für solche Anlagen oft der Platz nicht vorhanden.

Eine Alternative zu zentralen Systemen sind dezentrale Systeme, wie beispielsweise der Strassenablauf (ältere Bezeichnung: Schlammsammler). Strassenabläufe sind in bestehenden Strassensystemen weit verbreitet, aber ihr Abscheidegrad liegt weit unter dem gewünschten Wert von < 20mg/l. In der oben genannten Studie sind die Strassenabläufe denn auch am schlechtesten klassiert (Kategorie E, GUS > 40 mg/l). Ein weiteres Problem der heutigen Strassenabläufe tritt bei Starkregen ein: Die sedimentierten Partikel im Strassenablauf werden wieder remobilisiert und ausgespült. Oft ist es aber auf Grund der Platzverhältnisse sowie aus finanziellen Gründen nicht möglich, bestehende Strassenabläufe durch Systeme der Kategorie A zu ersetzen. Es ist also wünschenswert, die Strassenabläufe bezüglich Abscheideleistung, speziell bei Starkregen, zu verbessern. Auch wenn damit nicht die Leistung einer zentralen SABA erzielt wird, würde eine Verbesserung dem Gewässerschutz dienen.

Strassenabläufe sind Bestandteil der bestehenden Strassenentwässerung und müssen daher nicht neu eingebaut werden. Interessant ist deshalb eine Nachrüstung, die zur Ausbildung einer beruhigten Schicht im unteren Drittel der Strassenabläufe führt. Dadurch könnte die Abscheideleistung (speziell auch bei Starkregen) deutlich verbessert werden. Ausserdem könnte das Wartungsintervall (beispielsweise auf 2 Jahre) verlängert werden.

1.2 Stand der Technik

Dort, wo eine zentrale oder dezentrale Versickerung von Strassenabwasser nicht möglich ist (z.B. auf Grund von fehlendem Platz oder zu hohen Kosten), wird dieses in oberirdische Gewässer eingeleitet, nachdem die Partikel in einem Strassenablauf auf den Boden sedimentiert sind [3]. Bei starkem Abwasser-Anfall werden aber bereits sedimentierte Partikel wieder aufgewirbelt, was den Abscheidegrad stark verschlechtert. Fachleute schätzen den Wirkungsgrad von Absetzbecken (vergleichbar mit Schlammsammlern) auf rund 20 – 30 % [4]. Eine genaue Messung des Wirkungsgrads ist schwierig, weil die genaue Belastung weder beim Zufluss noch beim Abfluss bekannt ist, und zusätzlich beide einer starken Dynamik unterworfen sind.

Bei einer entwässerten Fläche von 250 m^2 pro Strassenablauf, einer Regenmenge von 1‘200 mm/a und einem Abflussbeiwert von 0.9 passieren jeden Schacht jährlich 270 m^3 Strassenabwasser. Darin sind bei einer durchschnittlichen GUS-Menge von 250 mg/l 67.5 kg GUS pro Jahr enthalten. Bei einer angenommenen Dichte von 1.05 kg/l, einem Wasseranteil von 30 % im abgesetzten Schlamm und einem Schachtdurchmesser von 85 cm ergäbe das eine Höhe im Schacht von rund 15 cm, wenn der gesamte Schlamm im Strassenablauf zurückgehalten würde. Effektiv wird in den Strassenabläufen heute nur 20 – 30 % davon zurückgehalten (Messungen in Männedorf: 3 – 6 cm). Durch die Ausbildung einer beruhigten Schicht von 30 cm Höhe sollte es möglich sein, den zurückgehaltenen GUS-Anteil auf 40 - 60 % zu erhöhen. Nach 2 Jahren wäre die akkumulierte Schlammschicht mit max. 20 cm Höhe immer noch deutlich innerhalb der beruhigten Schicht.

Möglichkeiten zur Verbesserung der Absetzleistung sind der Einbau von Lamellen oder, gemäss Merkblatt der Stadt Zürich, der Einbau von speziellen Filtersystemen als auch die Verwendung von Filtersäcken [5]. Diese Methoden führen aber zu einem höheren Aufwand beim Unterhalt der Strassenabläufe. Auch wird die Wirkung unterschiedlich beurteilt. In einer Studie aus dem Jahr 2014 kamen die Autoren allerdings zum Schluss, dass der Wirkungsgrad, mit dem Einbau von Lamellen bei Absetzbecken, nicht merklich verbessert werden konnte [6].

Der Einbau von Filtersäcken wurde in einer Studie der Berner Fachhochschule untersucht (Kaufmann, 2008) und als „zweckmässige Lösung“ bewertet. Die Untersuchungen zeigten, dass bei richtiger Dimensionierung (200 m^2 Strassenfläche pro 1 m^2 Filter) 20 – 30 kg Schlamm pro Jahr und Filtersack zurückgehalten werden können. In einer anderen Studie des ehemaligen GSA in Bern wurde mit Filtervlies eine Abtrennleistung der GUS von 80 % und der Schwermetalle zwischen 60 und 70 % erreicht [7]. Neuere Messungen bestätigen die Wirkungsgrade in diesem Bereich [8].

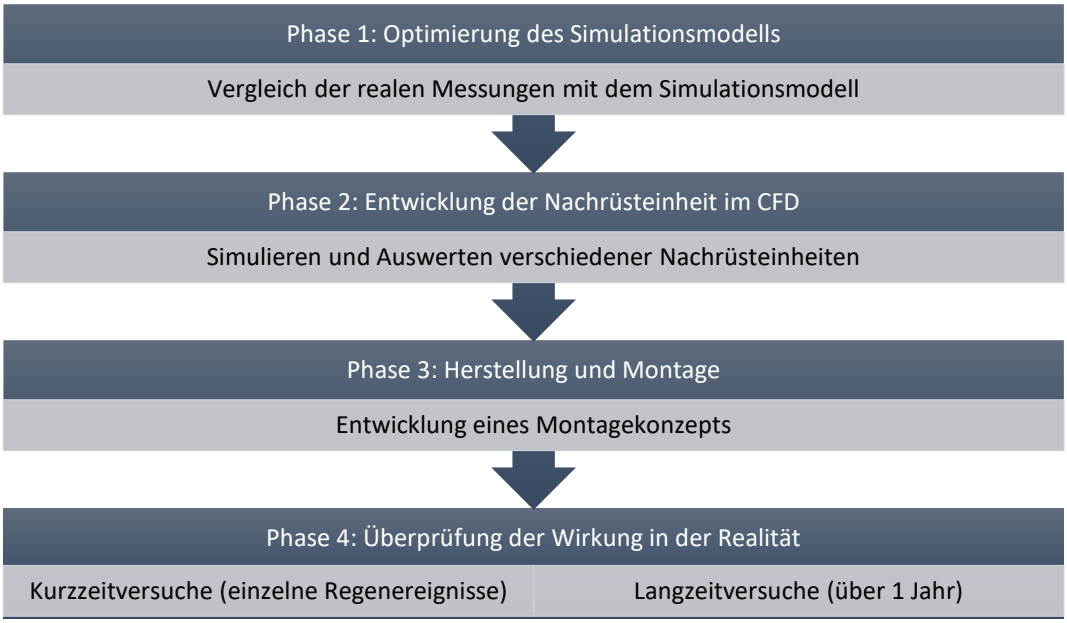
Andere dezentrale Systeme können entweder nicht in bestehende Schächte eingebaut werden, oder weisen einen höheren Unterhaltsaufwand auf. Eine Übersicht über verschiedene solcher dezentralen Systeme bietet die Broschüre: Dezentrale Behandlung von Strassenabflüssen [9].

1.3 Ziele und Vorgehen

Die Problematik der Strassenabläufe besteht darin, dass die Hauptfracht der Verschmutzung in der ersten Hälfte des Volumens eines Regenereignisses auftritt. Die restliche Hälfte des Regenwassers folgt anschliessend mit einer deutlich kleineren Verschmutzung und einer ebenfalls kleineren Schmutzfracht. Bei der Optimierung der Abscheideleistung geht es daher vor allem darum, den first-flush so abzubremsen, dass sich die Partikel absetzen, und das gesamte Strassenabwasser so durch den Strassenablauf zu führen, dass bereits sedimentierte Partikel nicht wieder aufgewirbelt werden. Zusätzlich soll die Nachrüsteinheit die Reinigungsarbeiten nicht erschweren und im optimalen Fall die Intervalle der Reinigungszyklen erhöhen.

Hierzu soll mit Hilfe von Computersimulationen eine Nachrüsteinheit konzipiert werden, welche die Remobilisierung des bereits abgesetzten Schlamms in der unteren Hälfte des Schlammsammlers verhindert. Durch die Simulationen können verschiedene Varianten von Nachrüsteinheiten direkt miteinander verglichen werden. Wodurch aufwändige und technisch schwierige Versuchsreihe in der Praxis, zur Evaluation der besten Einheit, hinfällig werden. Eine Feldstudie mit verschiedenen Varianten von Nachrüsteinheiten ist nicht nur sehr zeitintensiv, sondern enthält durch die Variablen wie Regen-Menge/Intensität als auch dem Verkehrsaufkommen viele Unsicherheiten.

Um die Parameter der Simulation möglichst präzise auf die Realität abzustimmen, soll als erstes (Phase 1) die Simulation mit der realen Fluiddynamik abgeglichen werden. Anschliessend sollen verschiedene Nachrüsteinheiten am Computer simuliert und ausgewertet werden (Phase 2). Darauffolgend soll die Nachrüsteinheit, welche in den Simulationen das beste Ergebnis erzielte, in die Praxis umgesetzt und ein einfaches Montagekonzept erarbeitet werden (Phase 3). Zum Schluss gilt es die Nachrüsteinheit in der Praxis auf ihre Wirkung während einer Einsatzdauer von einem Jahr zu testen (Phase 4).



2 Grundlagen

2.1 Strassenabwasser

Gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV, 1998, aktualisiert 2016) legt die Behörde die Anforderungen an die Einleitung von Strassenabwasser „auf Grund der Eigenschaften, des Standes der Technik und des Zustandes des Gewässers im Einzelfall fest“. Die Umsetzung dieser Bestimmung erweist sich aber als schwierig, so dass bisher keine einheitlichen Grenzwerte verfügbar sind. Als Vergleichswerte werden daher in der folgenden *Tab. 1* die „Anforderungen an die Wasserqualität von Fliessgewässern“ (Anhang 2.1 der GSchV) sowie die „allgemeinen Anforderungen an die Einleitung von Industrieabwasser in Gewässer“ (Anhang 3.2 der GSchV) verwendet.

Tab. 1: *Vergleich GSchV mit den Schadstoffen im Strassenabwasser*

Parameter	**Anforderung GSchV**		**Stoff-konzentrationen im Strassenabwasser** [2]
	Einleitung Indust-rieabwasser	**Oberirdische Gewässer (nach Durchmischung)**	
Gesamte ungelöste Stoffe (GUS)	20 mg/l	keine Trübung	100 – 263 mg/l
Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)	10 mg/l	1 – 4 mg/l	4 – 33 mg/l
Blei (Pb)	0.5 mg/l	0.01 mg/l	0.01 – 0.05 mg/l
Chrom (Cr)	2 mg/l	0.005 mg/l	0.01 – 0.02 mg/l
Kupfer (Cu)	0.5 mg/l	0.005 mg/l	0.06 – 0.18 mg/l
Zink (Zn)	2 mg/l	0.02 mg/l	0.2 – 0.9 mg/l

Ein Vergleich der Werte zeigt auf, dass DOC- und GUS-Werte im Strassenabwasser deutlich über den Einleitgrenzwerten liegen, die für Industrieabwasser gelten (linke Spalte). Die Konzentrationen der Schwermetalle Blei, Chrom, Kupfer und Zink liegen zwar unterhalb der Grenzwerte für Industrieabwasser, allerdings werden die Anforderungen an oberirdische Gewässer nur bei einer Verdünnung um Faktor 4 bis 40 eingehalten (mittlere Spalte). Bei kleinen Vorflutern ist daher mit einer Überschreitung dieser Werte zu rechnen. Bei den Konzentrationsangaben muss berücksichtigt werden, dass Strassenabwasser nur anfällt, wenn es regnet. Die Kontamination besteht dadurch vor allem am Anfang der Regenereignisse, was zur Folge hat, dass die Belastung des Strassenabwassers sehr hohen Schwankungen ausgesetzt ist.

2.2 Strassenabläufe

In der Schweiz gibt es unterschiedliche Variationen von Strassenabläufen. Nicht unter jedem Strassenablauf befindet sich direkt ein Schlammsammler. Aus logistischen Gründen wird das Abwasser teilweise unterirdisch über mehrere Meter zu einem Schlammsammler geleitet. Dort erfolgt die Einleitung in den Schlammsammler über einen Seiteneinlass. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Einlaufbedingungen in den Schlammsammler. Nebst den in *Abb. 1* und *Abb. 2* dargestellten Einträgen über den Rost gibt es noch den Eintrag über den Seiteneinlass, welcher in *Abb. 3* dargestellt ist. Schlammsammler mit einem Seiteneinlass stellen jedoch den Ausnahmefall dar. Deshalb wurde in diesem Projekt der Fokus auf Schlammsammler mit direkten Rosteintrag gelegt.

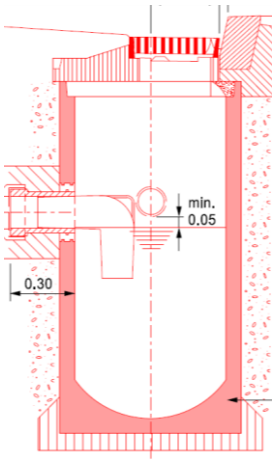


Abb. 1: *Schlammsammler mit Rosteintrag (direkt)* **[10]**

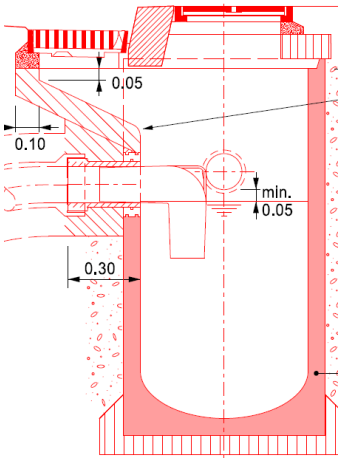


Abb. 2: *Schlammsammler mit Rosteintrag (seitlich)* **[10]**

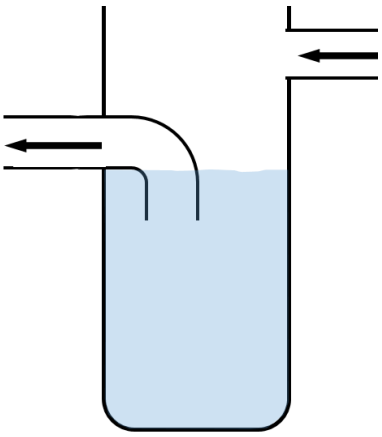


Abb. 3: *Schlammsammler mit Seiteneinlass*

2.3 Reinigung der Schlammsammler

Im Stadtgebiet der Stadt Zürich gibt es ungefähr 36'000 Schlammsammler [11]. Diese werden mindestens einmal im Jahr gereinigt. Zu diesem Zweck hat die Gruppe Saugarbeiten zwei hochmoderne, mobile Aufbereitungsanlagen. Das sind 6- bis 8-achsige Lastwagen mit einem speziellen Tankaufbau. Die mobilen Aufbereitungsanlagen werden von je drei Personen bedient. Dabei handelt es sich um einen Lastwagenfahrer und zwei Maschinenführer. Der Lastwagenführer fährt die Aufbereitungsanlage rückwärts an den zu reinigenden Schlammsammler heran. Ein Maschinenführer öffnet den Schlammsammler mit einem Hakenwerkzeug. Anschliessend wird der Saugrüssel mit einem Durchmesser von 20 cm in den Schacht gelassen. Der vordere Teil des Saugrüssels ist rundum mit Wasserdüsen ausgestattet. Der Schacht wird zuerst von oben nach unten abgespült. Danach wird zuerst ein Teil des Wassers abgesogen, so dass sich der Wasserstand unter dem Ausfluss befindet. Anschliessend wird durch die Einspülung von Wasser der Schlamm aufgewirbelt bevor der komplette Sammler ausgepumpt wird. Das gesamte abgesaugte Wasser wird in einem Reinigungstank kontinuierlich aufbereitet. Der Schacht wird dann mit gesäubertem Wasser wieder bis zum Tauchbogen befüllt. Dies um Geruchsbildung zu vermeiden. Der gesammelte Schlamm wird etwa alle 100 bis 200 Schächte zu einer Zwischendeponie gebracht, von wo er in eine Aufbereitungsanlage gelangt. Die mobile Aufbereitungsanlage kann pro Tag zwischen 80 und 100 Schächte reinigen. [12] In der *Abb. 5* sind die Platzverhältnisse im Schlammsammler während der Reinigungsarbeiten gut zu erkennen. Diese geben Aufschluss zu potentiellen Nachrüsteinheiten in Bezug darauf, wie stark sie die Reinigungsarbeiten beeinträchtigen.

Abb. 4: *ERZ-Saugwagen mit Saugrüssel*

Abb. 5: *Saugrüssel im Schlammsammler*

2.4 Regenereignis

Die relevanten Regenereignisse, welche den GUS-Austrag erhöhen, sind Starkregen mit einer hohen Intensität. Durch die hohen Wassermengen findet eine Verwirbelung im gesamten Schlammsammler statt, wodurch der abgesetzte Schlamm wieder mobilisiert und teilweise über den Tauchbogen ausgetragen wird. Für den Abgleich mit dem Simulationsmodell und die Durchführung der Kurzzeitversuche musste eine Durchflussmenge definiert werden, welche solch einem intensiven Starkregen entspricht. Um die Durchflussmenge in Relation zu starken Regenereignisse zu setzten wurde die Schweizer Norm SN 640 350 „Oberflächenentwässerung von Strassen“ herbeigezogen. Anhand dieser Norm wurde die Regenintensität der Messreihen ausgewertet und sichergestellt, dass die Nachrüsteinheit bei dem entsprechenden Wasserdurchsatz verglichen und geprüft wurde. Das Regenereignis im Kapitel „Vergleich der Realität mit der Computersimulation" entsprach demnach einem 10-minütigen halbjährlich bis jährlich wiederkehrenden Ereignis. Diese Intensität entspricht einem starken Regenereignis mit hoher Intensität und diente als Grösse für den Volumenstrom. Die Berechnungen dazu befinden sich im Anhang-I.

2.5 Potentielle Schlammmenge im Strassenablauf

Die potentielle Schlammmenge, welche sich während einem Jahr in einem Schlammsammler absetzen kann, ist ein wichtiger Faktor bei der Konstruktion der Nachrüsteinheit. Je nach Schlammmenge variiert die Höhe der angestrebten beruhigten Schicht im unteren Teil des Schlammsammlers. Sprich umso mehr Schlamm sich im Sammler ablagert, desto grösser muss das Volumen des beruhigten Teils im Sammler sein. Aus diesem Grund wurde die maximal mögliche Schlammmenge berechnet. Die Daten zu den Berechnungen stammen aus unterschiedlichen Quellen und bilden dadurch ein breites Spektrum an verschiedenen Situationen bezüglich Verkehrsaufkommen ab. Die Schlammmenge, welche in den Strassenablauf gelangt, ist stark von der Strassenunterhaltsreinigung abhängig. Es hat sich gezeigt, dass sich durch häufiges Wischen der Strassen eine deutliche Reduktion der Schlammmenge ergab [13]. Aus diesem Grund kann keine exakte Aussage getroffen werden, wie viel Schlamm sich absetzt. Deshalb wurden folgende Erfahrungswerte zu Stofffrachten und deren Eintrag in Strassenabläufe herbeigezogen.

1. **Vierspurige Autobahn mit ca. 40'000 Fahrzeugen pro Tag** [14]
   Auf einer Fläche von 42'500 m^2 fällt jährlich eine Schlammmenge von ca. 12'000 kg an.

2. **Verbindungsstrasse Autobahnanschluss ca. 17'000 Fahrzeugen pro Tag** [7]
   Auf einer Fläche von 10'000 m^2 fällt jährlich eine GUS-Menge von ca. 700 – 1'000 kg an.

3. **Seestrasse in Männedorf** [8]
   Auf einer Fläche von 200 m^2 fällt während einem Jahr ca. 50 kg Schlamm an.

4. **Berechnung mit der Vergleichskonzentrationen GUS bei einem DTV > 16'000 Fz/d in Zürich gemäss Niederschlag 2018** [15]
   Auf einer Fläche von 250 m^2 fällt jährlich eine Menge von 20 – 50 kg Schlamm an.

Tab. 2: *Potentielle Schlammmenge in einem Schlammsammler bei 100 % Abscheideleistung und Rückhalt*

Bezeichnung	Schlammmenge in kg pro Jahr auf 250 m^2	Höhe[1] in m im Schlammsammler bei einem Durchmesser von 0.8 m
1 Autobahn	70.6	0.12
2 Verbindungsstrasse	17.5 – 25.0	0.03 – 0.04
3 Seestrasse	62.5	0.10
4 Europabrücke	20 - 50	0.03 – 0.08

Anhand der *Tab. 2* ist ersichtlich, dass potentiell bei stark befahrenen Strassen jährlich eine Schlammhöhe von 12 cm möglich ist. Jedoch müsste hierfür ein Wirkungsgrad des Schlammrückhalts von 100 % vorhanden sein. Trotzdem ist es erstrebenswert eine beruhigte Schlammschicht von bis zu 20 cm anzusteuern, welche bei einem intensiven Regenereignis nicht aufgewirbelt wird. Folglich müssten bei einem Wirkungsgrad von 50% die Sammler nur noch alle drei Jahre ausgepumpt werden.

[1] Für die Dichte des Schlamms wurde eine Schätzung von 1.2 t / m^3 angenommen

3 Material und Methoden

3.1 Testanlage Europabrücke

3.1.1 Beschreibung der Anlage

Für die Projektphasen „Vergleich der Realität mit der Computer-Simulation (Phase 1)“ und "Überprüfen der Wirkung in der Realität (Phase 4)" wurde eine Testanlage im Originalmassstab verwendet. Dafür wurde eine bereits vorhandene Anlage umgebaut und mit entsprechender Messtechnik ausgerüstet. In *Abb. 6* ist ein Schema der Anlage dargestellt. Hierbei fliesst das gesamte Regenwasser des Einzugsgebiets zum ersten Schacht. Das Einzugsgebiet eines Schlammsammlers erstreckt sich in der Regel auf einem Bereich zwischen 200 und 600 m^2. Die Anlage an der Europabrücke hat jedoch ein Einzugsgebiet von 1'350 m^2. Im ersten Schacht (MS1) befindet sich ein Schieber, mit dem der Anteil des Abwassers geregelt werden kann, welcher zum Schlammsammler geleitet wird. Das restliche Wasser fliesst über einen Bypass an der Anlage vorbei. Dies ermöglichte es, auch bei einem leichten Regen die Wassermenge eines starken Regens durch den Schlammsammler zu leiten. Nach dem ersten Schacht fliesst das Wasser in ein Auffangbecken mit der Grösse 3x3m über dem Schlammsammler. Dort verteilt es sich und prasselt von allen Seiten über den Einlaufrost in den Schlammsammler. Durch diese Verteilung wird eine einseitige Wassereintragung vermieden und ein realistischer Einlauf ermöglicht. Vom Schlammsammler fliesst das Wasser über einen Tauchbogen in einen weiteren Schacht (MS2), in welchem sich die Durchflussmessung befindet.

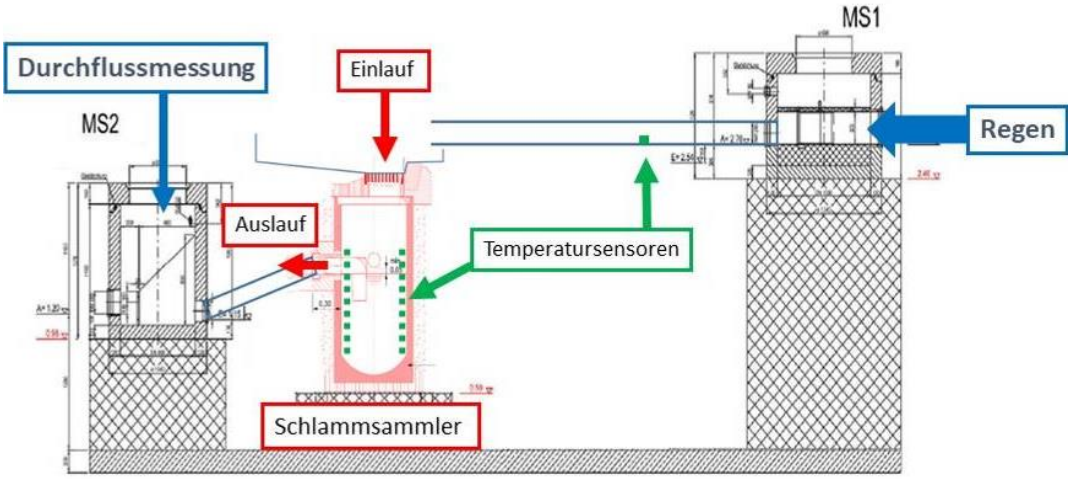


Abb. 6: *Schema Testanlage Europabrücke*

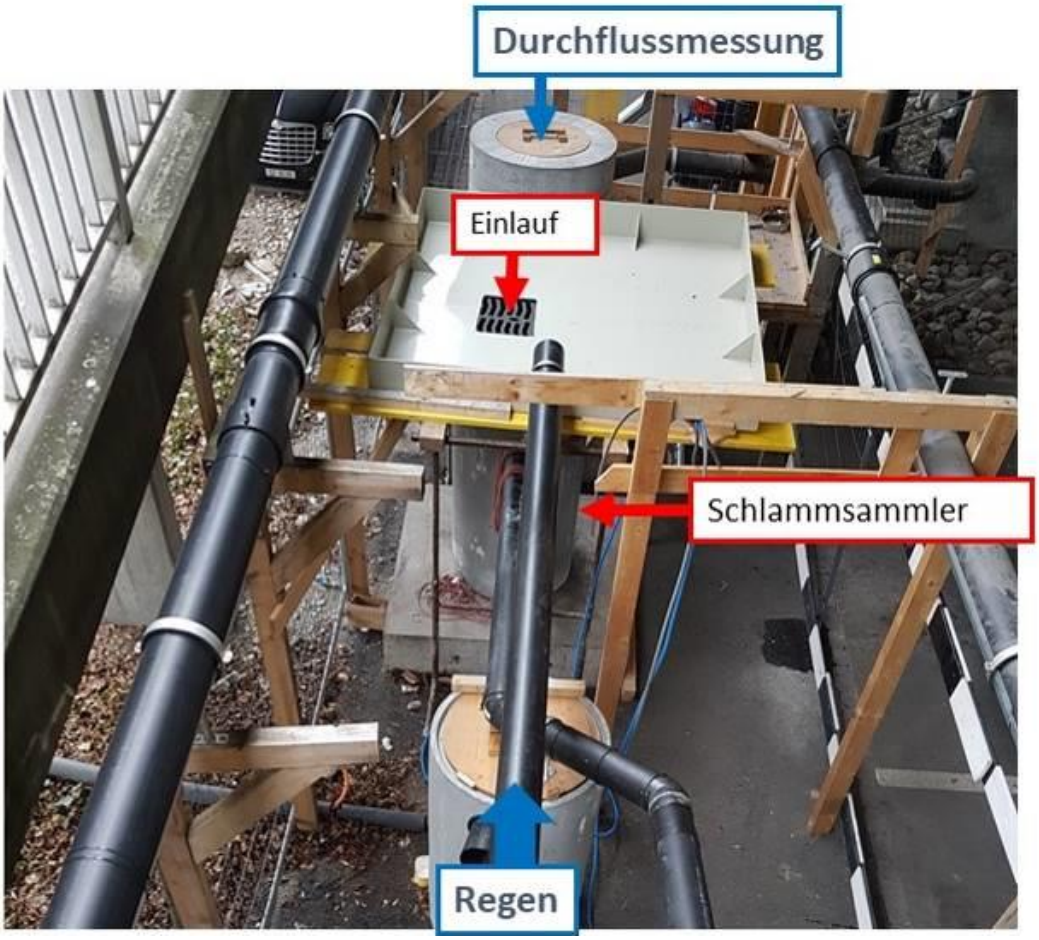


Abb. 7: *Testanlage Europabrücke mit der Ansicht von oben*

Temperaturmessung

Die Messung der Temperaturschichten im Schlammsammler erfolgte über Kabeltemperaturfühler, welche im Sammler auf unterschiedlichen Höhen angebracht wurden. Dabei wurden 21 Sensoren mit jeweils einem Höhenunterschied von 4 cm und in einem 120° Abstand an der Innenwand des Sammlers befestigt (siehe *Abb. 8*). Jeder der drei Sensorenstränge enthält dadurch 7 Temperatursensoren in einem Abstand von 12 cm von Sensor zu Sensor. Zusätzlich wurde ein Temperatursensor im Zulaufrohr angebracht, um die Temperatur des Regenwassers zu erfassen. Durch die Anbringung am Rande des Sammlers und der kleinen Fläche, welche der Sensor durch das herausragen in Richtung Mitte bildet, wird das Strömungsprofil so gering wie möglich beeinflusst. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Sensoren einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Strömung haben.

Abb. 8: *Temperatursensoren im Schlammsammler*

Durchflussmessung

Die Messung des Durchflusses erfolgte über das Wehr nach dem Schlammsammler. Anhand einer Ultraschallsonde wurde der Wasserstand gemessen und dadurch der Durchfluss berechnet.

Aufzeichnung der Messdaten

Die Temperatursensoren und die Ultraschallsonde für die Durchflussmessung wurden über ein Modul von der Firma National Instruments an einen Laptop angeschlossen, mit dem die Signale kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Die Aufzeichnung erfolgte mit dem Programm LabVIEW und zeichnete alle 0.5 Sekunden die Messewerte auf.

3.1.2 Konzept Praxisversuche Europabrücke

Für die Projektphase "Überprüfen der Wirkung in der Realität (Phase 4)" wurden insgesamt sechs Versuche bei der Versuchsanlage Europabrücke durchgeführt. Drei Versuche davon mit und drei ohne Nachrüsteinheit. Bei jedem Versuch wurden dieselben Bedingungen gesetzt, welche nachstehend erläutert werden.

Versuchsdurchführung

Bei jedem Versuch wurde der Sammler zuerst komplett entleert. Anschliessend wurden 30 kg aufbereiteter Schlamm eingefüllt und der Sammler wieder bis zum Auslauf mit Wasser befüllt. Laborversuche haben gezeigt, dass der Schlamm mehrere Stunden benötigt, um sich abzusetzen (siehe hierzu Anhang-IV). Deshalb wurde nach der Befüllung jeweils bis zum nächsten Tag (23 Stunden) gewartet, bis der Versuch durchgeführt wurde. Damit bei jedem Versuch dieselbe Wassermenge durch den Sammler fliesst, wurde ein künstliches Regenereignis durch Wassereinspülung mittels Hochdruckspülfahrzeug erzeugt. Die Wassermenge belief sich bei jedem Versuch auf 2.8-3.5 l/s während einer Dauer von 5 Minuten. Dies entspricht ungefähr einem halbjährlichen wiederkehrendem Starkregen im Mittelland. Das Wasser wurde in die Leitung, welche in das Auffangbecken über dem Sammler fliesst, eingeleitet. Dadurch verteilte sich das Wasser im Auffangbecken und floss von allen Seiten über den Rost in den Sammler. Das eingeleitete Wasser stammte aus dem Werkhof und entsprach der Wasserqualität von aufbereitetem Frischwasser. Dies wurde jedoch nicht anhand von Stichproben kontrolliert. Um den Rückhalt bzw. den Austrag der Schlammmenge zu bestimmen, wurde am Auslauf kontinuierlich über die gesamte Versuchsdauer eine Probe genommen.

Probenahme und Analyse

<u>Probenahme vor dem Versuch</u>

Nachdem das Probenmaterial (30kg Schlamm) in den Sammler gegeben und mit Wasser zur Auslaufhöhe aufgefüllt wurde, wurde der gesamte Inhalt aufgewirbelt. Dies erfolgt mithilfe einer Pumpe, welche das Wasser im Sammler im Kreis förderte. Nach einer Förderzeit von fünf Minuten wurde 15-mal ein Liter Probe des durchmischten Inhalts mit einem Massbecher abgeschöpft. Aus dieser 15 Liter Sammelprobe wurden anschliessend ein Liter für die Laboranalyse entnommen. Durch dieses Vorgehen wurde eine repräsentative Probenahme sichergestellt, so dass die Unsicherheit aufgrund der grossen Volumendifferenz von 400 Liter Inhalt zu 1 Liter Probe verringert wurde. Diese Probe wurde auf GUS analysiert. Dadurch wurde eruiert, welcher Anteil des Schlamms aufgewirbelt und gelockert wurde.

<u>Probenahme während dem Versuch</u>

Während der gesamten Versuchsdauer wurde beim Ausfluss des Sammlers mittels Schlauchquetschpumpe eine Sammelprobe abgepumpt. Hierbei förderte die Pumpe 1.5 Liter pro Minute. Dies ergab am Schluss über die Versuchsdauer von 5 Minuten eine Sammelprobe des Auslaufs von 7.5 Liter. Diese Sammelprobe wurde aufgewirbelt und davon 1 Liter zur Analyse von GUS, Zink und Kupfer an das externe Analyselabor Bachema eingesendet.

Schwermetallanalyse Ausgangsmaterial Schlamm

Damit die Konzentration im Auslauf in Relation mit dem Inhalt des Sammlers gesetzt werden konnte, wurden insgesamt vier Schlammproben von je 500 g auf Schwermetalle analysiert. Die Analyse führte das externe Analyse Labor Bachema mittels Schwermetall Fingerprint RFA durch. Nebst einer Probe vom gesamten Schlamm (Probe Versuch 7) wurde eine Schlammprobe (Probe Versuch 1) in drei Fraktionen aufgeteilt und ebenfalls analysiert. Die Fraktionen waren korngrössenspezifisch in folgende Bereich eingeteilt: >2 mm, 0.5-2 mm und <0.5 mm. Die Analyseergebnisse sind in *Tab. 3* dargestellt.

Tab. 3: *Kupfer und Zink Gehalt des Schlamms*

	Bezeichnung der Fraktion	**Korngrösse der Fraktion**	**Fraktionsanteil**	**Kupfer**	**Zink**
	-	mm	%	mg/kg TS	mg/kg TS
Probe Versuch 1	Gross	2 - 8	25	58	230
	Mittel	0.5 – 2	33	66	250
	Klein	< 0.5	42	67	290
	Berechnet Gesamt	< 8	100	64	262
Probe Versuch 7	Gesamt	< 8	100	75	250

Schlamm Aufbereitung und Partikelgrösse

Um bei allen Versuchen möglichst dieselbe Zusammensetzung des Strassenschlamms zu haben, wurde dieser zuerst aufbereitet. Es wurden insgesamt 400 kg Strassenschlamm bestmöglich "homogenisiert". Hierzu wurde der Schlamm zuerst auf einer Blache ausgelegt und mehrmals mit einer Schaufel vermengt (*Abb. 9*). Grosse Steine und Äste wurden aussortiert. Anschliessend wurde der Schlamm getrocknet und bei 8 mm abgesiebt. Der aufbereitete Schlamm wurde auf 6 Behälter aufgeteilt. Aus jedem Behälter wurde eine Referenzprobe von 500 g entnommen und erneut bei 2 mm und bei 0.5 mm abgesiebt. Die dadurch erhaltenen Konzentrate und Rückstände wurden gewogen und es ergab sich eine Partikelgrössenverteilung in Bezug auf die Masse. Die Partikel < 0.5 mm wurden zusätzlich mittels Laserbeugungsspektrometer analysiert. Dadurch ergab sich eine Partikelgrössenverteilung in Bezug auf die Anzahl Partikel, welche <0.5 mm waren. Die Ergebnisse aller Proben wurden miteinander verglichen und befinden sich im Anhang-V. Die Abweichung hierbei lag bezogen auf das arithmetische Mittel bei maximal 12%. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Schlammproben in Bezug auf die Partikelgrösse für alle sechs Versuche eine sehr ähnliche Zusammensetzung hatten.

***Abb. 9**: Schlamm ausgelegt*

***Abb. 10:** Schlamm getrocknet und gesiebt bei 8 mm*

3.2 Testanlage Richterswil

3.2.1 Beschreibung der Anlage

Für die Projektphase "Überprüfen der Wirkung in der Realität (Phase 4)" wurde nebst der Testanlage bei der Europabrücke eine weitere in Richterswil verwendet. Diese befindet sich direkt neben dem Bahnhof und besteht aus drei Schlammsammlern und einer Messeinrichtung (siehe *Abb. 11*). Das Abwasser der drei Sammler fliesst in einem Messschacht zusammen. Das Einzugsgebiet der Sammler ist wie folgt: Nr. 1 = 365 m^2, Nr. 2 = 200 m^2, Nr. 3 = 201 m^2 [16]. Die Strassen des Einzugsgebiets werden pro Jahr ca. 15 Mal gewischt. Die zuständigen Personen für die Unterhaltsarbeiten wurden angewiesen, während der Projektlaufzeit, die Intervalle konstant zu halten und nicht zu verändern.

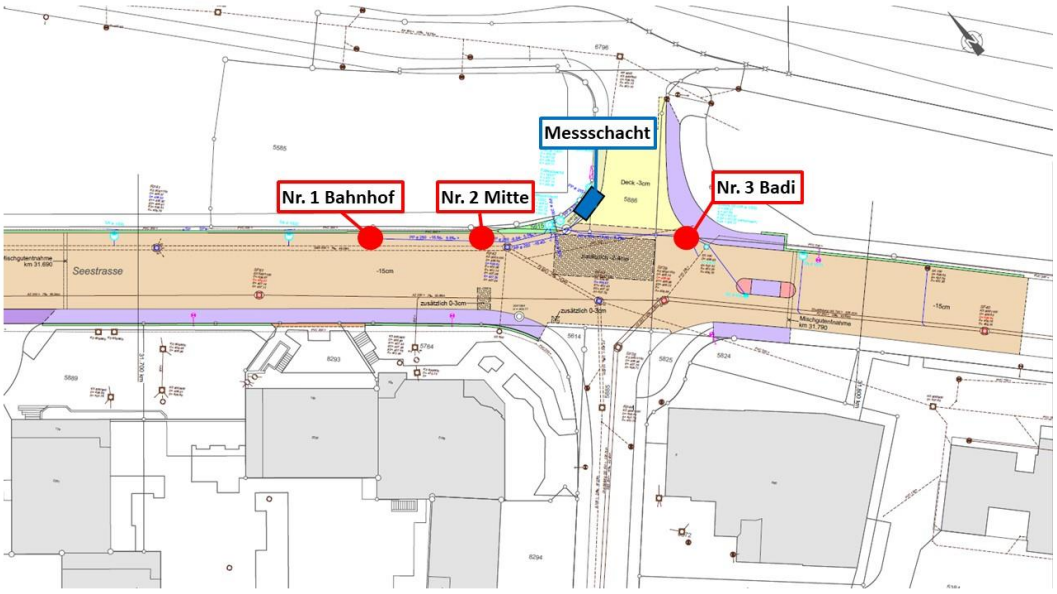


Abb. 11: *Situationsplan der Testanlage in Richterswil*

3.2.2 Konzept Praxisversuche Richterswil

Bestimmung der Schlammmenge

Für die Phase "Überprüfung der Wirkung in der Realität (Phase 4)" (Kapitel 7) wurde die Schlammmenge, welche während einem Jahr in jedem der drei Schlammsammler anfällt, gemessen. Die erste Messung fand vor dem Einbau der Nachrüsteinheit statt, welche die Schlammmenge der Zeitperiode vom 22.05.2018 bis zum 11.06.2019 umfasst (385 Tage). Während dieser Periode wurden die Sammler nicht entleert. Dadurch wurde ein Referenzwert ermittelt, welcher aufzeigt, wie viel Schlamm ohne Nachrüsteinheit im Sammler akkumuliert wurde. Anschliessend wurde in alle drei Sammler eine Nachrüsteinheit eingebaut und erneut während 385 Tagen (11.06.2019 bis 30.06.2020) betrieben. Nach dieser Zeitperiode wurde erneut die Schlammmenge der drei Sammler bestimmt.

Vorgehen

Für die Bestimmung der Schlammmenge wurde jeder Sammler einzeln ausgepumpt und über einen Filtersack entleert. Die Filtersäcke sind so aufgebaut, dass sie partikuläres Material bis ca. 2 µm Korndurchmesser zurückhalten. Nach der Befüllung der Filtersäcke wurden diese während 3 Wochen zum Abtropfen überdacht aufgehängt (siehe *Abb. 12*). Danach wurde das Gewicht des Inhaltes bestimmt, indem die Filtersäcke gewogen und das Gewicht des leeren Filtersackes subtrahiert wurde. In einem nächsten Schritt wurden alle Steine > 1 cm aussortiert und eine Referenzprobe von einem Kilogramm zur Analyse der Trockensubstanz (TS) genommen. Die Analyse wurde von der externen Firma Bachema AG durchgeführt. Anhand der TS der Referenzproben wurde das Trockengewicht der gesamten Schlammmenge bestimmt. Zusätzlich wurde bei den zur Analyse eingesendeten Proben ein Schwermetall Screening mittels RFA-Fingerprint gemacht.

Abb. 12: *Befüllter Filtersack zum Abtropfen aufgehängt*

4 Vergleich der Realität mit der CFD-Simulation (Phase 1)

4.1 Vorgehen

Mit Hilfe der Testanlage unter der Europabrücke wurden während einem halben Jahr Regenereignisse aufgezeichnet, bis ein verwertbares Regenereignis vorhanden war. In dem angewandten Konzept sind die Temperaturschichten und deren Durchwirbelung das aussagekräftige Kriterium für den Strömungsverlauf. Aus diesem Grund sind die ersten 5 Min. eines Regenereignisses ausschlaggebend. Danach ist das Wasser im Schlammsammler durchmischt und es liegt keine Temperaturschichtung mehr vor. Folglich ist die Temperatur auf jeder Höhe ungefähr dieselbe. Auch bei einem schwachen Regenereignis erfolgt eine leichte Durchmischung der Temperaturschichten, wodurch über die gesamte Höhe eine einheitliche Temperatur zustande kommt. Aus diesem Grund wurde ein starker Platzregen benötigt, welcher gleich zu Beginn eine Wassermenge, vergleichbar mit einem Starkregen, erbrachte. Zusätzlich musste ein Temperaturunterschied von mindestens 1 bis 2 °C zwischen dem Standwasser im Sammler und dem Regenwasser vorliegen.

Vom erfassten Regenereignis wurden die Startbedingungen in die CFD-Simulation übertragen und das Regenereignis nachsimuliert. Die Einstellungen der Simulationen wurden solange angepasst bis das Ergebnis nahe an der Realität lag. Hierfür wurden alle Sensoren, welche sich zu Beginn des Regenereignisses im Wasser befanden, miteinander verglichen. Anhand der Temperaturveränderung der Messpunkte auf unterschiedlichen Höhen im Sammler konnte die Realität mit der Simulation verglichen werden. Eine Modellbeschreibung der Simulation befindet sich im Anhang-II.

4.2 Ergebnisse Vergleich Simulation mit Realität ohne Nachrüsteinheit

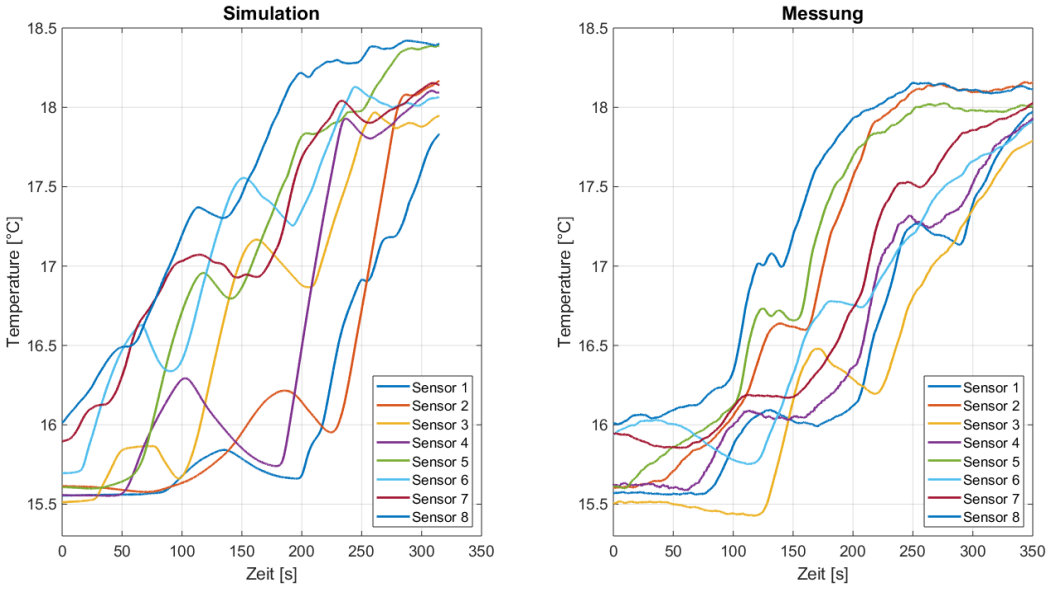


Abb. 13: *Vergleich des Temperaturverlaufs der Messung und der Simulation*

In *Abb. 13* ist der direkte Vergleich der Simulation und der Realität abgebildet. Der Vergleich zeigt den Temperaturverlauf der untersten acht Sensoren (Sensor 1 = tiefste, Sensor 8 = höchste) im Schlammsammler während den ersten 350 Sekunden eines starken Regenereignisses. Es ist ersichtlich, dass sowohl in der Realität als auch in der

Simulation die Wassertemperatur an den Messpunkten nach 300 Sekunden den Temperaturbereich des Regenwassers erreichen. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass der grobe Temperaturverlauf der Realität und der Simulation miteinander übereinstimmt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Sensoren im nachfolgenden Vergleich (*Abb. 14 & Abb. 15*) wird ersichtlich, dass der Temperaturverlauf in der Simulation der Realität sehr nahekommt. Kleine Abweichungen sind aufgrund von Messunsicherheiten und Vereinfachungen in der Simulation unumgänglich. Beim Sensor 5 liegt beispielsweise die maximale Abweichung von 0.74 °C beim Zeitpunkt von 103 Sekunden vor. Diese Abweichung kommt dadurch zustande, weil der steilste Temperaturanstieg in der Simulation ca. 30 Sekunden früher stattfand. Die Durchschnittliche Abweichung liegt bei 0.08 °C. Beim Sensor 8 liegt die grösste Abweichung von 0.95 °C beim Zeitpunkt 97 Sekunden vor. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei 0.28 °C.

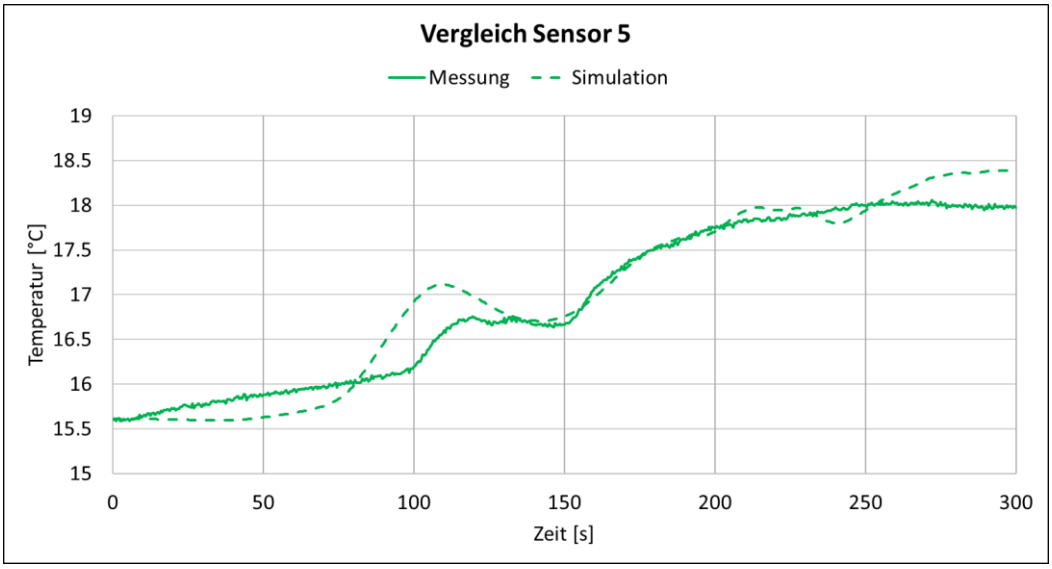


Abb. 14: *Vergleich Sensor 5 der Simulation und Realität*

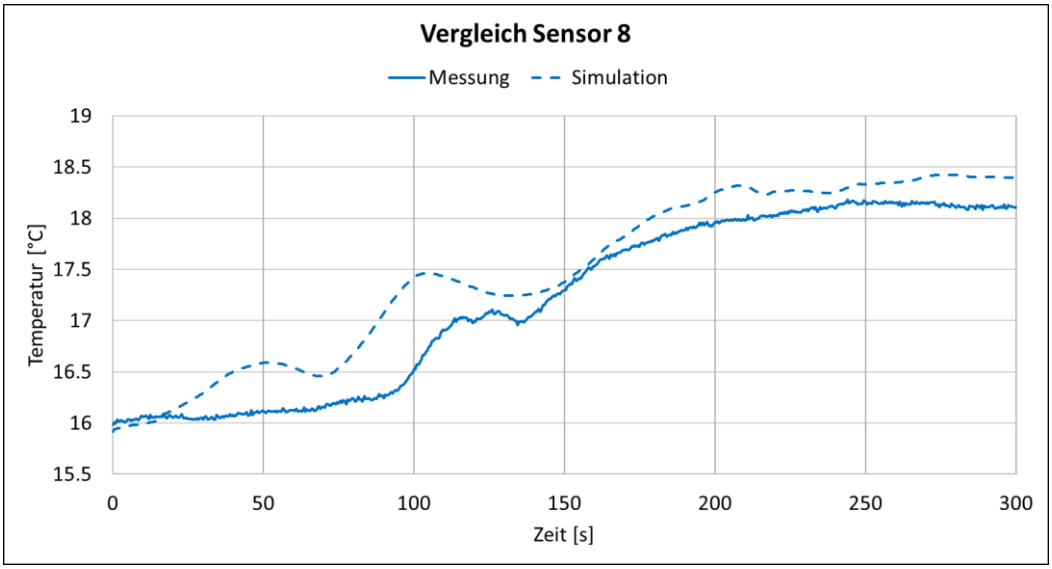


Abb. 15: *Vergleich Sensor 8 der Simulation und Realität*

5 Entwicklung der Nachrüsteinheit mit CFD (Phase 2)

Der Vergleich der Realität mit der CFD-Simulation bestätigte, dass mit der Simulation realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden. Dies erlaubt es, verschiedene Nachrüsteinheiten mittels Computer zu simulieren und deren Effekt auszuwerten. Dadurch können verschiedene Strömungsumlenkungen vorab getestet werden, um herauszufinden, welche die gewünschten Effekte erzielen. Mit den Einbauten in der Simulation soll ein strömungsberuhigender Effekt im unteren Teil des Schlammsammlers bei starken Regenereignissen forciert werden. Dies würde eine geringere Aufwirbelung des bereits abgesetzten Schlamms bedeuten und folglich eine geringere Austragung. Bei den folgenden Simulationen handelt es sich um Strömungssimulationen des Wassers ohne Partikel. Simulationen zum Partikelfluss sind deutlich aufwändiger, benötigen mehr Rechenleistung und sind dadurch zeitintensiver. Folglich wurden im Rahmen dieses Projektes parallel zu den Praxisversuchen lediglich erste Tests mit Partikelflusssimulationen durchgeführt. Die Partikelflusssimulationen werden in Kapitel 6 "Simulationen mit Partikel" erläutert.

5.1 Erläuterung der Auswertungsverfahren

Die Simulation erlaubt es, den Wasserfluss auf verschiedene Arten zu betrachten. Dies ermöglichte eine breit abgestützte Aussage bezüglich der Funktionsfähigkeit potentieller Nachrüsteinheiten. Zum einen lässt sich der Temperaturverlauf im Sammler anzeigen und zum anderen kann ebenfalls die turbulente kinetische Energie (tkE) angezeigt werden. Um ein komplettes Bild im ganzen Sammler zu erhalten, können aus unterschiedlichen Ansichten verschiedene Ebenen (X-, Y-, Z-Achsen) betrachtet werden. In diesem Bericht wird aufgrund der Übersichtlichkeit jedoch nur die Ebene dargestellt, welche am aussagekräftigsten ist. Für die Beurteilung der Nachrüsteinheiten wurden diverse Ansichten überprüft und miteinbezogen.

5.1.1 Auswertung anhand der Wassertemperatur

Die Farben in der Simulation zeigen unterschiedliche Temperaturen an (von Blau=kalt bis hin zu Rot=warm). Zu Beginn des Versuchs (unten nicht dargestellt) herrscht im Sammler eine beruhigte Temperaturschichtung bei rund 15.5 °C, welche vom untersten bis zum obersten Sensor eine maximale Temperaturdifferenz von 0.5 °C aufweist. Das Standwasser im Sammler ist in der Simulationsansicht somit blau eingefärbt. Das einströmende Regenwasser hat eine höhere Temperatur (in diesem Fall ~18.5° C). In der *Abb. 16* ist zu Veranschaulichung eine Momentaufnahme nach 100s dargestellt. Es ist zu erkennen, wie das wärmere Regenwasser (orange) das Wasser im Schlammsammler von oben her langsam aufwärmt. Anhand der Temperaturverteilung über den zeitlichen Verlauf der Simulation können Aussagen über die Durchmischung im Sammler getroffen werden. Je länger es dauert bis das Wasser im unteren Bereich erwärmt wird (sich gelb/orange verfärbt) desto beruhigter ist das Wasser in diesem Bereich. Dadurch kann die Nachrüsteinheit auf ihre strömungsberuhigende Eigenschaft im unteren Teil des Sammlers beurteilt werden.

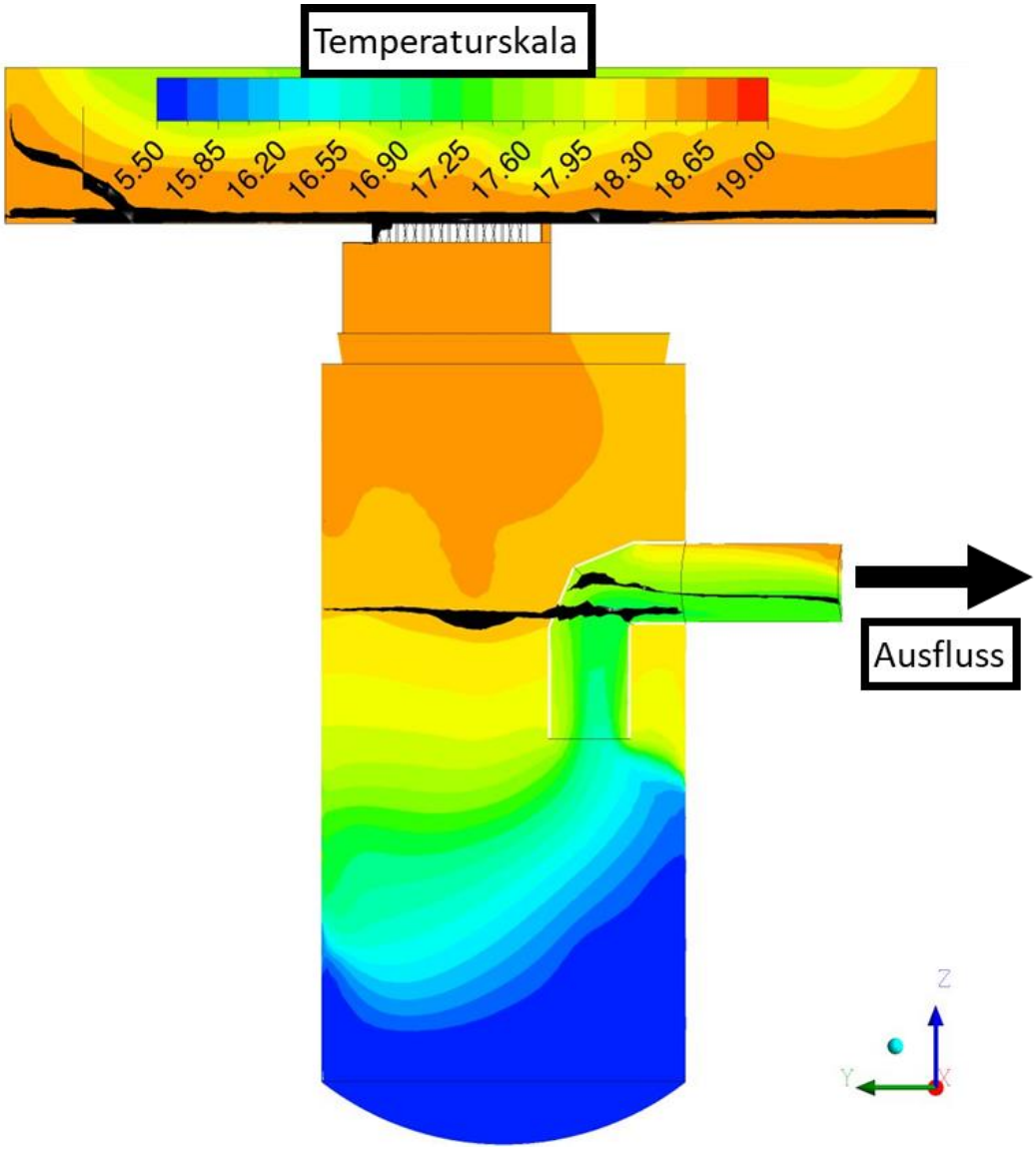


Abb. 16: *CFD Simulations-Maske für die Temperatur*

5.1.2 Auswertung anhand der turbulenten kinetischen Energie

In *Abb. 17* ist die Maske für die turbulente kinetische Energie dargestellt (abgekürzt als "tkE" bezeichnet). Hierbei bezieht sich die Farbskala auf die aktuell vorhandene turbulente kinetische Energie mit der Einheit m^2/s^2. Hier sind ebenfalls blau eingefärbt die Stellen mit geringen Turbulenzen und die roten mit hohen. Mit dieser Ansicht können Aussagen getroffen werden wo zum aktuellen Zeitpunkt Verwirbelungen auftreten, welche bereits abgesetzten Schlamm wieder aufwirbeln.

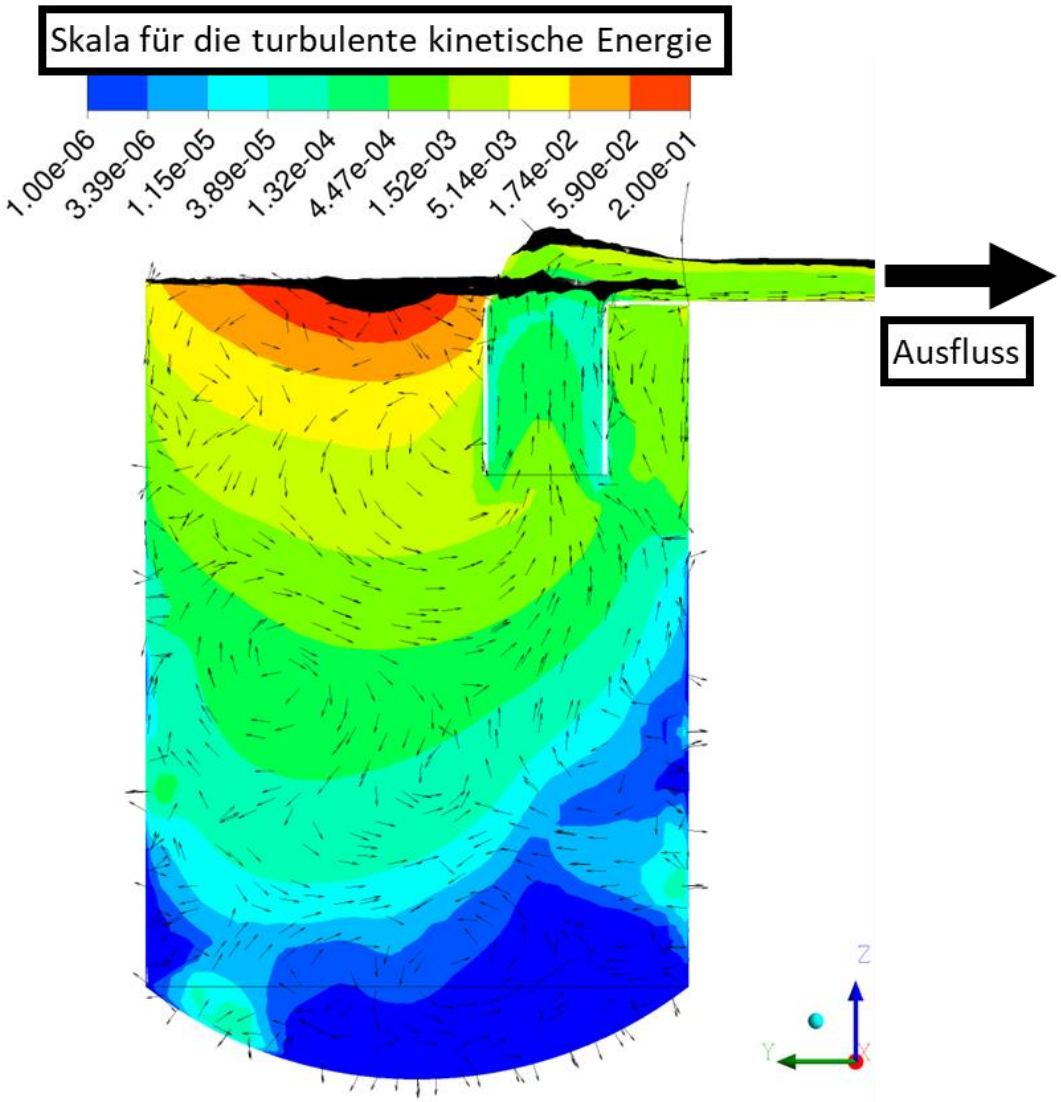


Abb. 17: *CFD Simulations-Maske zur turbulenten kinetischen Energie*

5.1.3 Verwendetes Regenereignis

Für den Simulationsvergleich der verschiedenen Konzepte wurde ein reales starkes Regenereignis verwendet. Dieses Regenereignis wurde mit der Testanlage bei der Europabrücke aufgezeichnet. Der Verlauf der Wassermenge ist in *Abb. 18* dargestellt. Der Volumenstrom nahm zu Beginn stark zu und erreicht nach ca. 80 Sekunden sein Maximum von 3.5 l/s. Anschliessend verringerte er sich wieder auf 1.7 l/s und nahm dann ab der 200sten Sekunde langsam ab. Für die Auswertung der verschiedenen Konzepte wurden die Zeitpunkte bei 100, 200 und 300 Sekunden zum Vergleich der Wassertemperaturen und turbulenten kinetischer Energie gewählt.

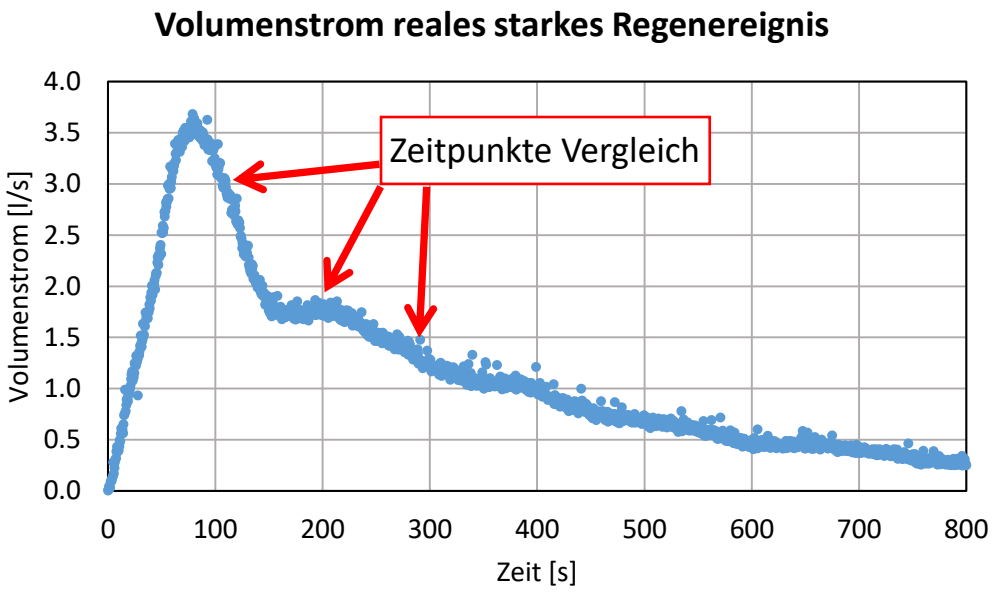


Abb. 18: *Volumenstrom über die Zeit bei den Simulationen*

5.2 Ergebnisse der verschiedenen Konzepte

Am Computer wurden verschiedene Konzepte simuliert und geprüft. Zu Beginn ging es darum herauszufinden, welche Einbaustrukturen eine strömungsberuhigende Auswirkung auf die unteren Schichten im Sammler haben. Hierzu wurden Platten und Kreuze in verschiedenen Anordnungen platziert und die Resultate ausgewertet. Eine 3D-Ansicht aller simulierten Einbauten befindet sich im Anhang-III.

Nachfolgend sind einige dieser Konzepte und deren Simulationsergebnisse dargestellt und erläutert. Der Vergleich der Simulationsergebnisse wird anschliessend in *Tab. 4* aufgezeigt.

Doppelkreuz

Prinzip: Das Doppelkreuz sollte die Querströmung im unteren Bereich des Sammlers reduzieren und dadurch zu einer beruhigten Schicht beitragen. Zusätzlich soll lediglich das Segment von einer Aufwirbelung betroffen sein, über dem die Wassereintragung stattfindet.

Ergebnis: Anhand der Simulationsergebnisse ist zu erkennen, dass die Durchwirbelung der Temperaturschichten im unteren Bereich des Sammlers sogar eher begünstigt wird. Auch der Vergleich der turbulenten kinetischen Energie zeigt lediglich eine sehr geringe Verbesserung im unteren Bereich des Sammlers.

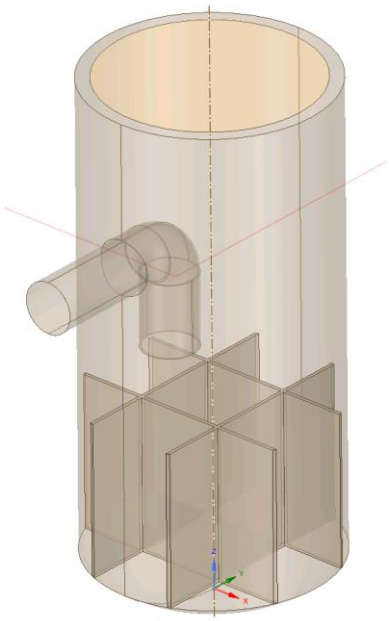


Abb. 19: *3D-Darstellung Doppelkreuz im Schlammsammler*

Platten

Prinzip: Das von oben einströmende Strassenabwasser wird durch die Platten abgefangen. Dadurch überträgt das Wasser die kinetische Energie auf die Platten, welche am oberen Teil des Sammlers aufgehängt sind. Das Wasser fliesst anschliessend über die Platten in den Sammler und hat einen sanfteren Aufschlag auf das bereits vorhandene Wasser im Sammler.

Ergebnis: Der sanftere Aufprall ist in der Ansicht der tkE klar zu erkennen. Jedoch hat dies nur einen Effekt auf die oberen Wasserschichten. In den unteren Schichten gibt es trotzdem eine schnelle und starke Durchmischung. Diese hat sich aufgrund der mittigen Lage der Platte auf den Rand des Sammlers ausgelagert und ist dort nun stärker ausgeprägt. Dieser Effekt ist in der Ansicht der Wassertemperaturen deutlich ersichtlich.

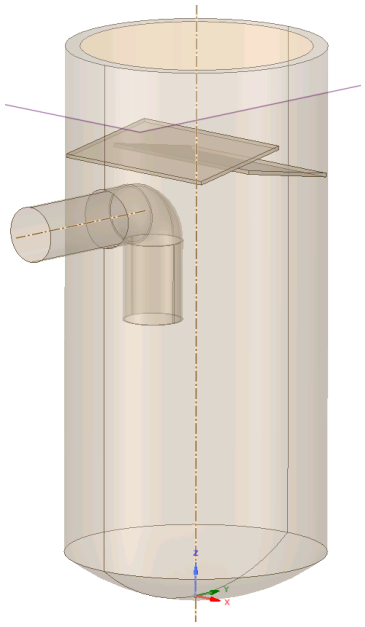


Abb. 20: *3D-Darstellung Platten im Schlammsammler*

Kreuz mit Platte

Prinzip: Eine Kombination aus der Variante Kreuz und der Variante Platte. Hier sollten die beiden Vorteile der jeweiligen Varianten vereint werden. Zum einen sollen die Stärke des Wasseraufpralls durch die Platte und zum anderen die Querströmung durch das Kreuz verringert werden. Die durchgehende Bauform vom Boden bis zur Verengung des Rosteinlasses sollte für die nötige Stabilität sorgen.

Ergebnis: Ein strömungsberuhigender Effekt durch das Kreuz ist auch hier leicht zu erkennen. Vor allem in den unteren Schichten bei der tkE Ansicht ist dies sichtbar. Die Durchmischung der Temperaturschichten zeigt allerdings keine Verbesserung. Lediglich der Ort verlagert sich mehr in die Mitte und ist bei 300 s nicht mehr so ausgeprägt am Rand anzutreffen wie beim "Standard".

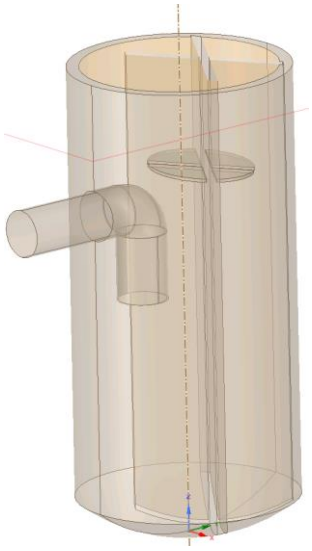


***Abb. 21**: 3D-Darstellung Kreuz mit Platten im Schlammsammler*

Platten mit Kranz

Prinzip: Bei der Variante "Platten" zeigte sich, dass die Durchmischung (durch die mittige Anordnung der Platten) sich stärker an den Rand verlagerte. Aus diesem Grund wurde im unteren Bereich ein Kranz am Rand des Sammlers angebracht. Dieser Kranz soll die Durchmischung am Rand stoppen, so dass die unteren Schichten nicht aufgewirbelt werden.

Ergebnis: In der Ansicht der Wassertemperatur und auch der tkE ist ersichtlich, dass der Kranz die Durchmischung am Rand des Sammlers hemmt. Da der Kranz relativ tief angebracht wurde, ist der Effekt jedoch nicht sehr stark. Das Potential des Kranzes ist allerdings deutlich zu erkennen. Aus diesem Grund wurde diese Variante weiterverfolgt.

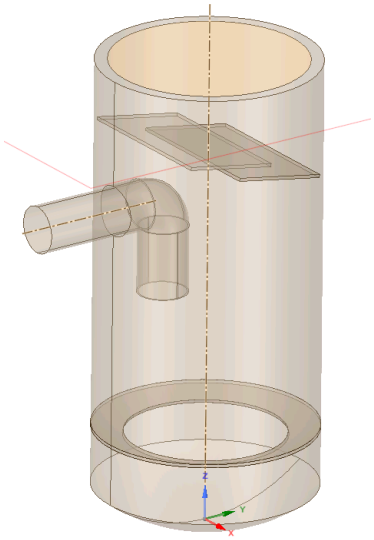
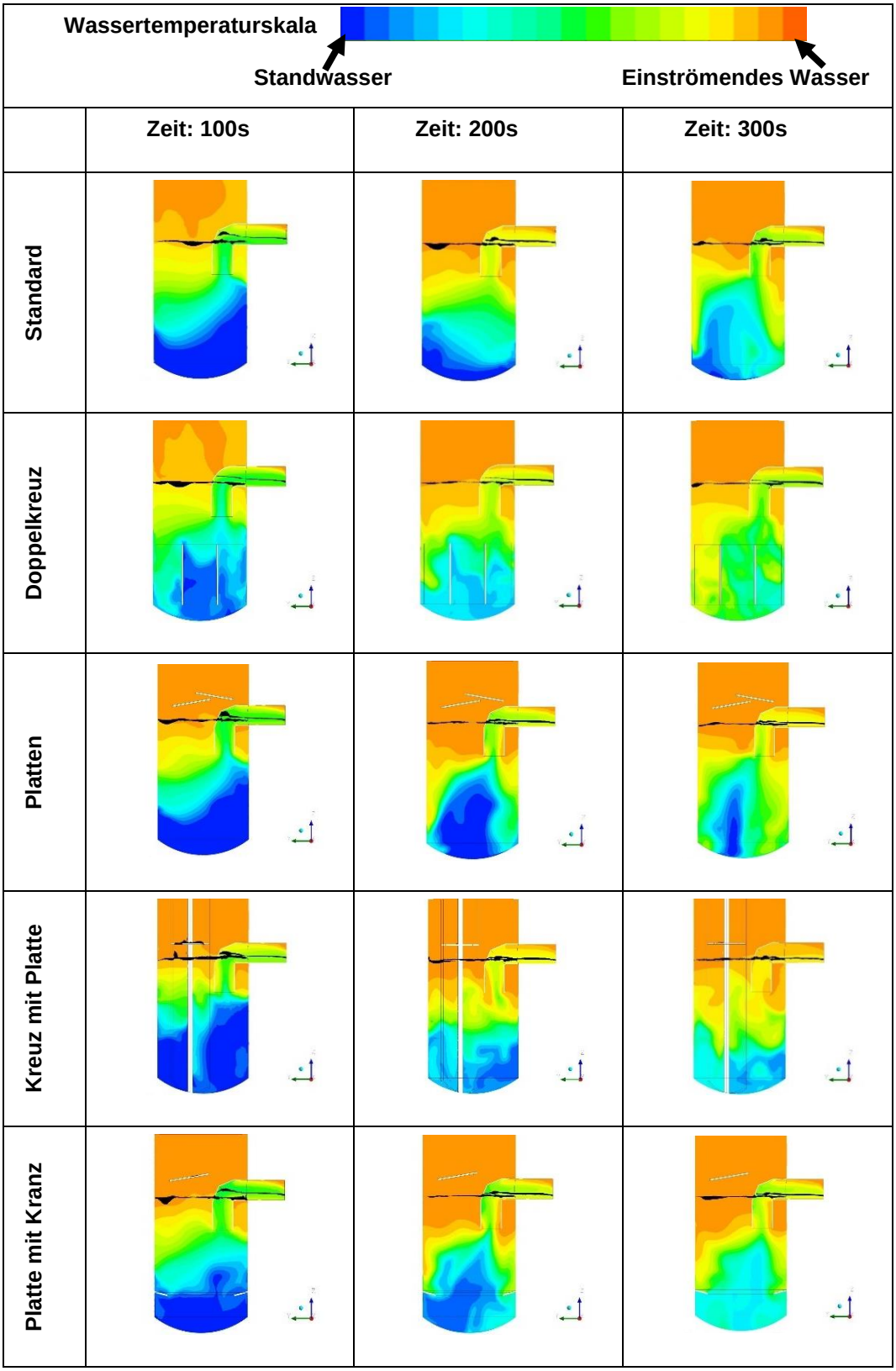


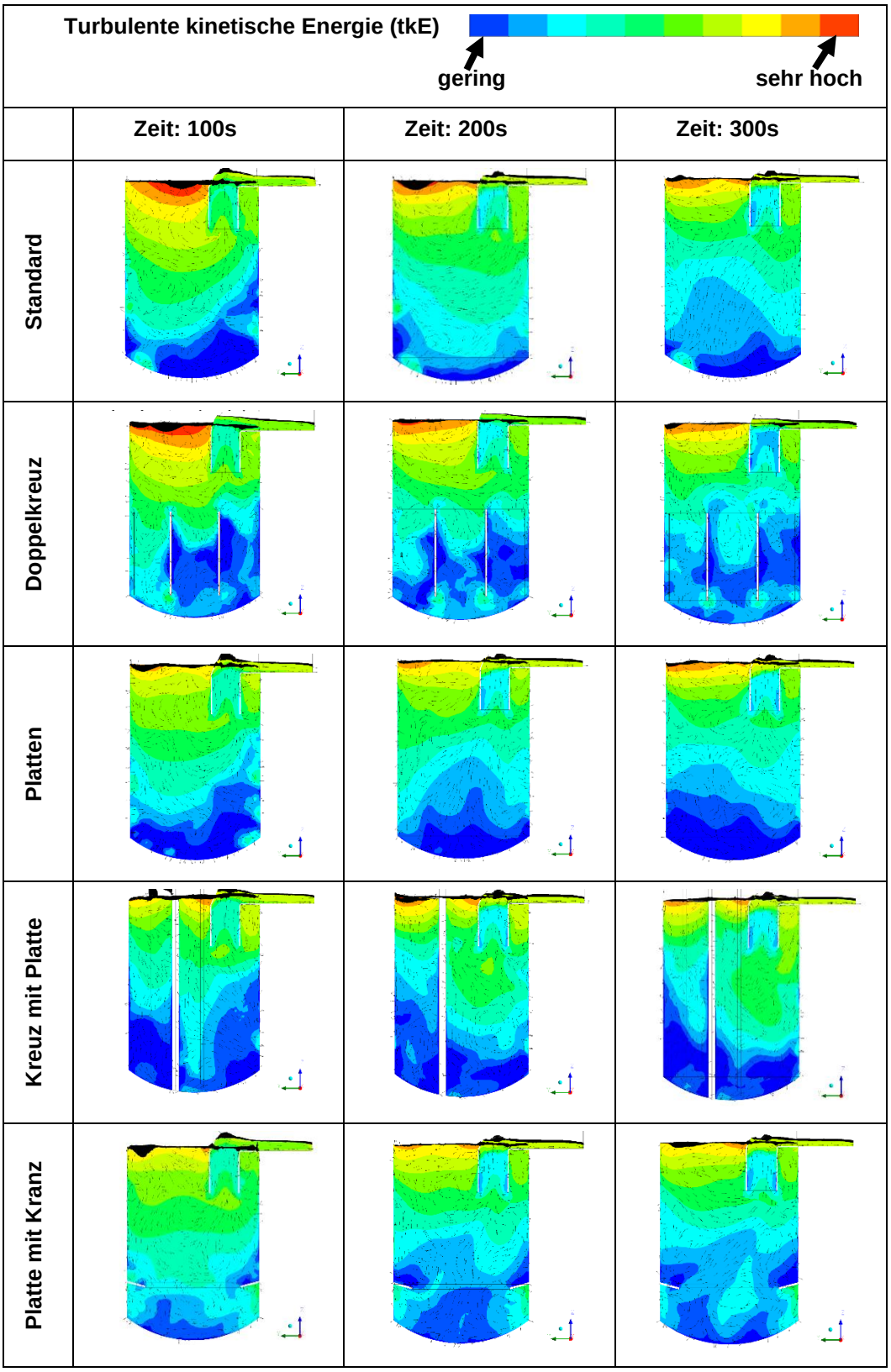
***Abb. 22:** 3D-Darstellung Platten mit Kranz im Schlammsammler*

In den nachfolgenden *Tab. 4* & *Tab. 5* ist der Simulationsvergleich der zuvor beschrieben Konzepte ersichtlich.

***Tab. 4**: Simulationsvergleich verschiedener Varianten in der Temperatur-Maske*



Tab. 5: *Simulationsvergleich verschiedener Varianten mit der Kinetik-Maske*



5.3 Weiterentwicklung des besten Konzepts

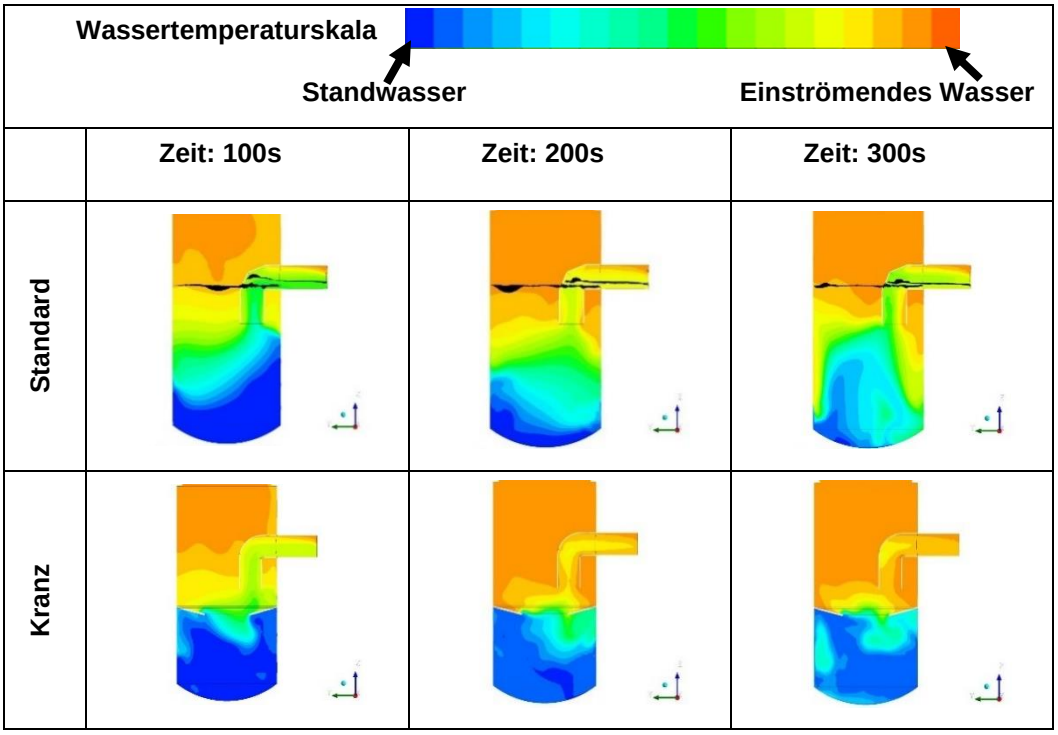
In den vorhergehenden Versuchen zeigte sich bei der Variante "Platte mit Kranz", dass der Kranz rund um den Sammler die Durchmischung in die unteren Schichten reduziert. Aus diesem Grund wurde die Auswirkung des Kranzes genauer untersucht.

5.3.1 Kranz erster Versuch

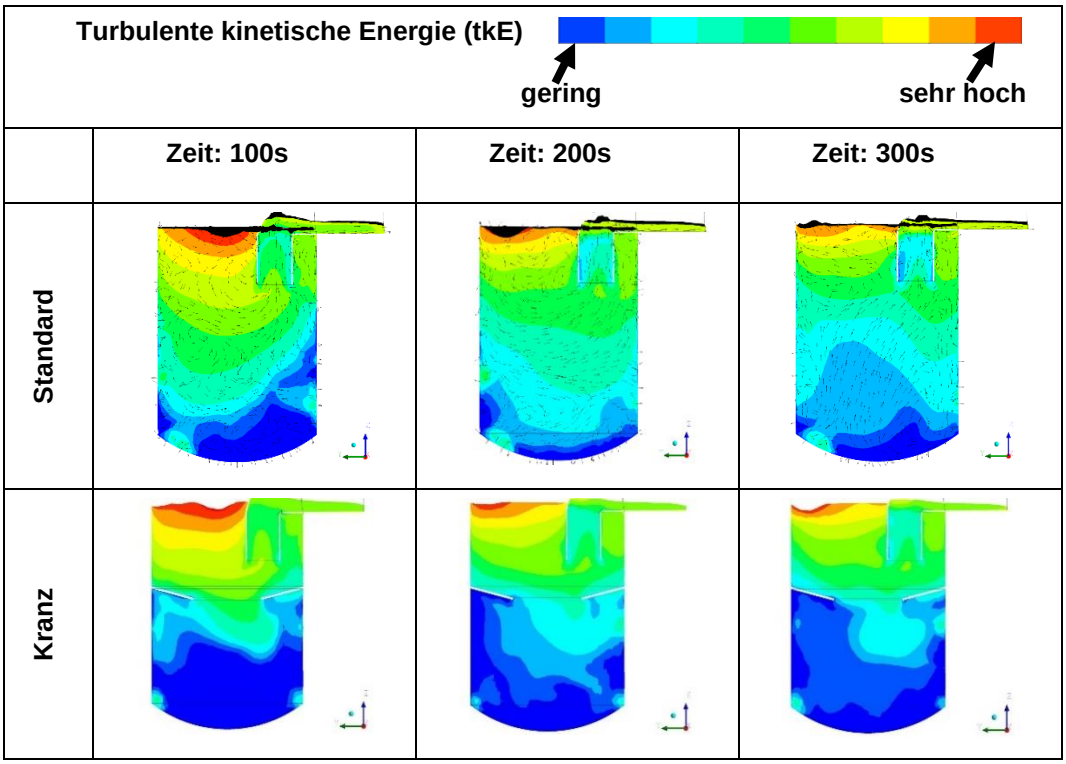
Der Kranz wurde etwas höher angesetzt und befindet sich nun 60 cm ab Boden und somit 10 cm unter dem Einlauf in den Tauchbogen. Zugleich wurde der Kranz breiter gemacht und er ragte somit von der Aussenwand her 20 cm nach innen.

Nachfolgend sind die Vergleiche der Wassertemperatur und der turbulenten kinetischen Energie zu den Zeitpunkten 100, 200 und 300 s dargestellt. Hierbei wurde ebenfalls das Regenereignis aus Kapitel 5.1.3 verwendet. Bei beiden Ansichten ist deutlich zu erkennen, dass der Kranz die Durchmischung in die unteren Schichten abbremst. Dies hat folgenden Grund: Bei einem Schlammsammler fliesst das Wasser über den Tauchbogen ab. Da der Einlauf in den Tauchbogen sich in Richtung Mitte orientiert, fliesst das Wasser aus der Mitte in den Tauchbogen. Dadurch entsteht eine Art "Sog" und das Wasser fliesst am Rand des Sammlers nach unten. Durch den Kranz wird der Wasserfluss am Rand unterbunden und die Schichten unterhalb bleiben nahezu unbewegt. Durch diesen Effekt wird jedoch die Aufenthaltszeit des einströmenden Wassers kürzer, weil das verfügbare Durchflussvolumen im Sammler kleiner wird. Dies hat zur Folge, dass sich neu eingetragene Partikel schlechter absetzten. Hingegen werden die bereits abgesetzte Partikel weniger aufgewirbelt, was deren Rückhalt verbessert.

Tab. 6: *Simulationsvergleich Wassertemperatur Standard vs. Kranz*



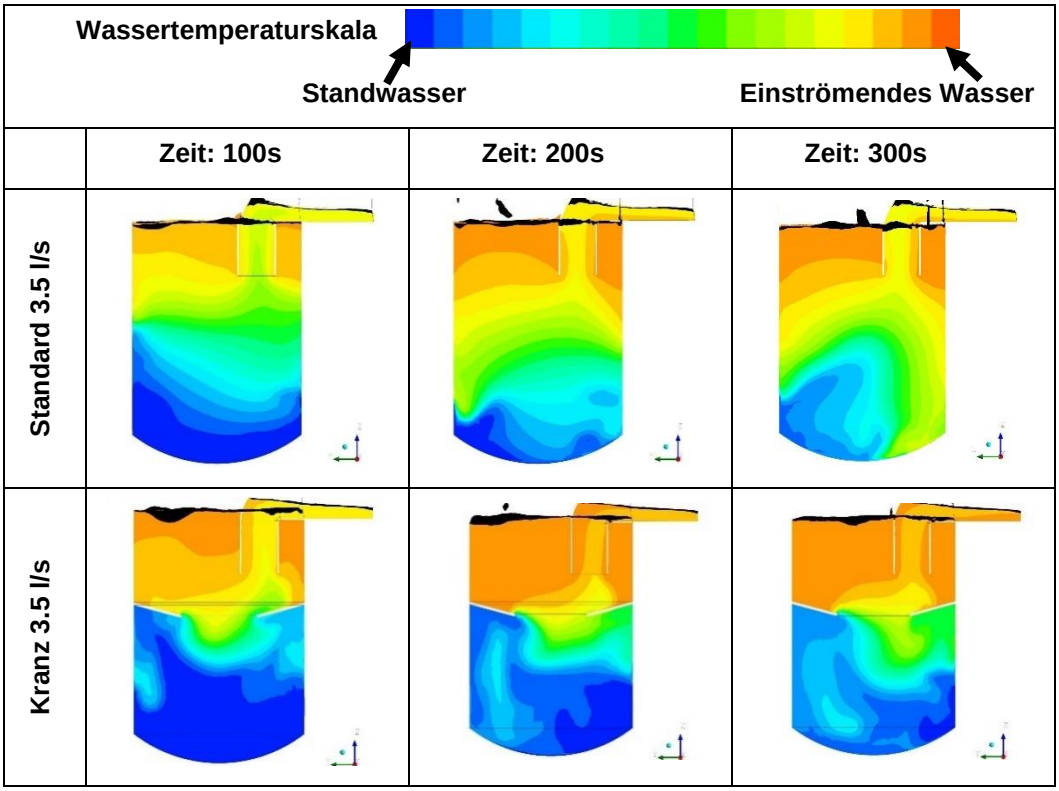
Tab. 7: *Simulationsvergleich Kinetische Energie Standard vs. Kranz*



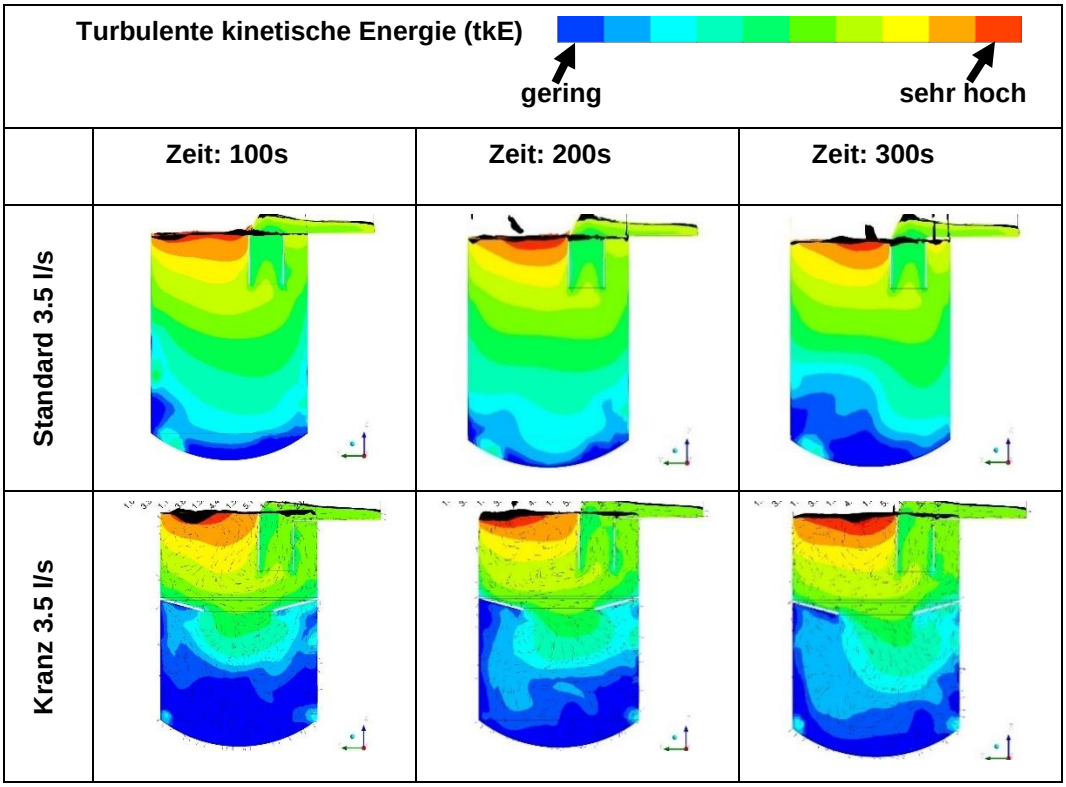
5.3.2 Kranz bei hohem konstanten Volumenstrom

Um zu überprüfen, ob der gewünschte Effekt auch bei einem konstant hohen Volumenstrom (längerer Starkregen) weiterhin besteht, wurde nebst der Simulation mit dem Regenereignis aus Kapitel 5.1.3 weitere Simulationen mit einem konstanten Volumenstrom von 3.5 l/s durchgeführt. In der *Tab. 8* & *Tab. 9* ist der Vergleich dieser Simulationen ersichtlich. Es zeigte sich, dass auch bei einem sehr hohen konstanten Volumenstrom durch den Kranz die Durchmischung in die unteren Schichten reduziert werden kann.

Tab. 8: *Simulationsvergleich Wassertemperatur Standard vs. Kranz bei konstant hohem Volumenstrom*



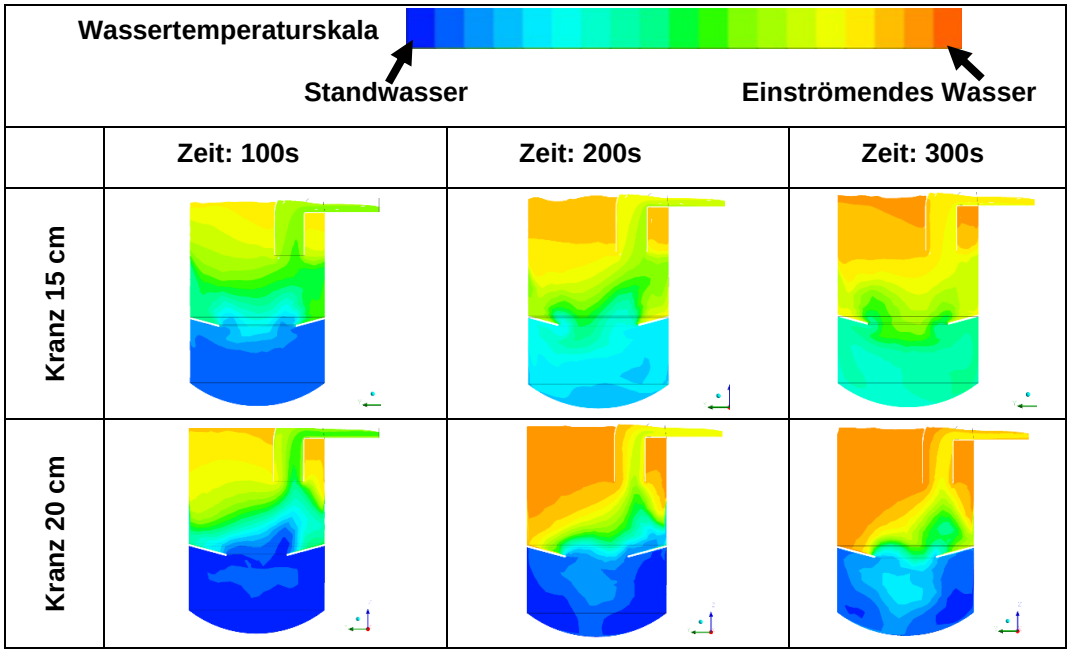
Tab. 9: *Simulationsvergleich kinetische Energie Standard vs. Kranz bei konstant hohem Volumenstrom*



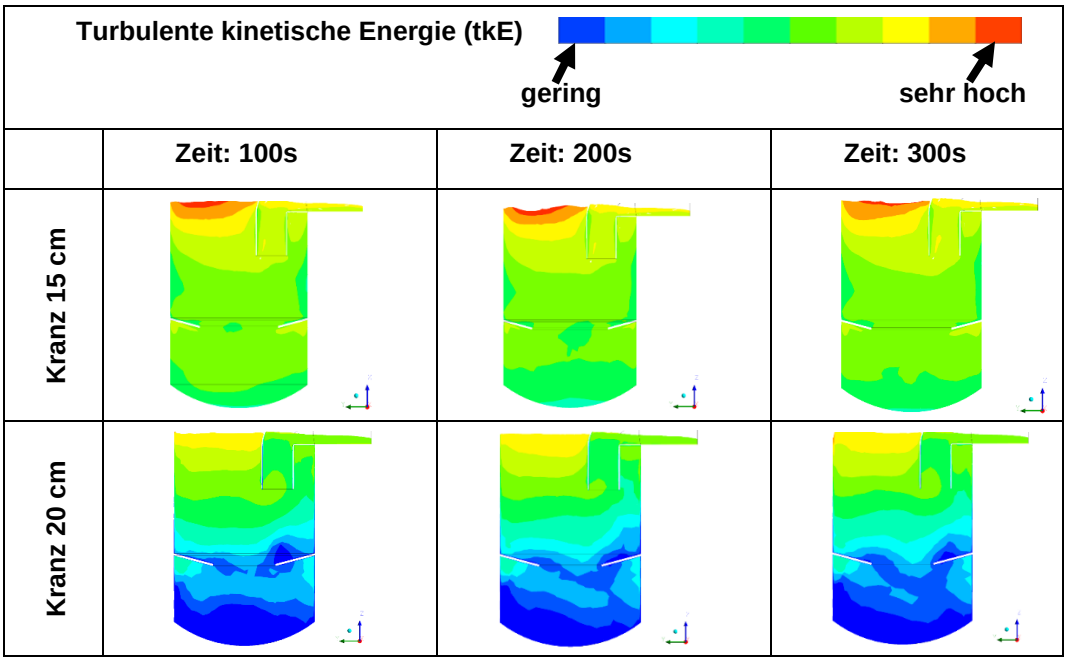
5.3.3 Kranz unterschiedliche Breite

Simulationen mit unterschiedlicher Breite des Kranzes haben gezeigt, dass diese einen signifikanten Einfluss auf die Durchmischung in den Wasserschichten unterhalb des Kranzes haben. In den ersten Simulationen hatte der Kranz rund herum eine Breite von 20 cm. Bei einem Schlammsammler Durchmesser von 70 cm bleibt dadurch in der Mitte ein Loch von 30 cm übrig. Dies würde für das Aussaugen mittels Saugwagen immer noch ausreichen, jedoch wäre die Bewegungsfreiheit des Saugrüssels eingeschränkt. Aus diesem Grund wurde dieselbe Simulation mit einer Kranzbreite von 15 cm durchgeführt. In dem nachfolgenden Vergleich (*Tab. 10 & Tab. 11*) ist zu erkennen, dass sowohl die Temperatur als auch die tkE in den unteren Schichten beim schmaleren Kranz schneller ansteigen. Wodurch eine grössere Durchmischung stattfinden muss.

Tab. 10: *Simulationsvergleich Wassertemperatur bei unterschiedlicher Kranzbreite*



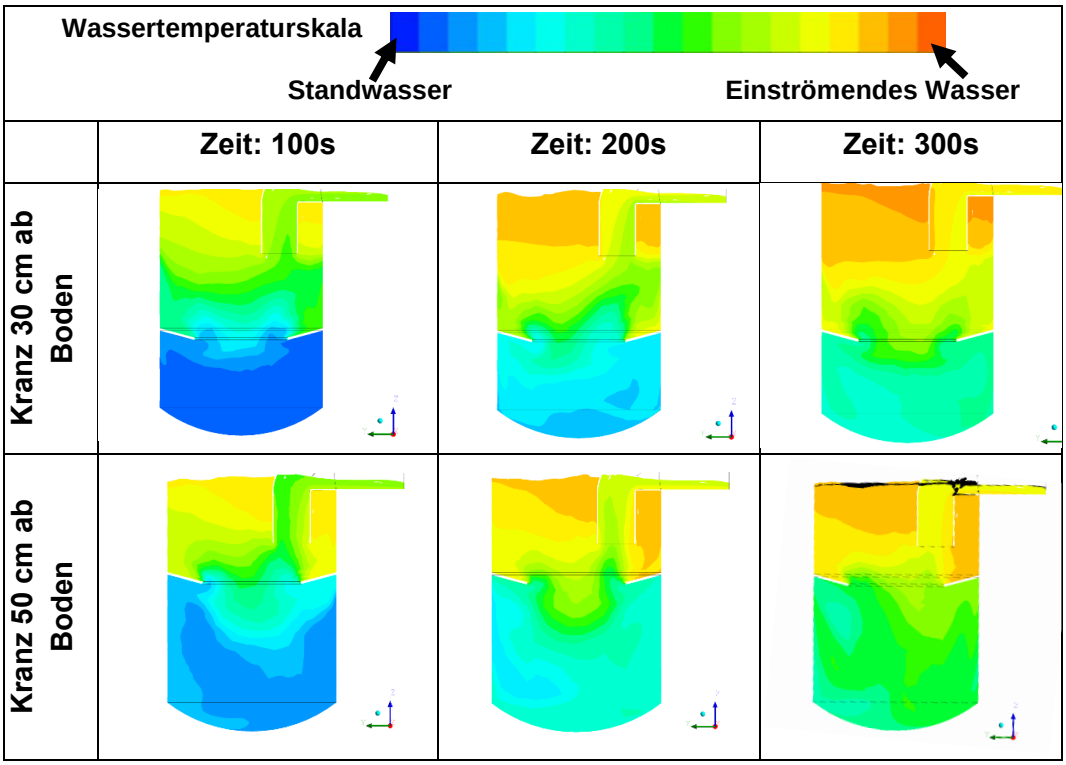
Tab. 11: *Simulationsvergleich kinetische Energie bei unterschiedlicher Kranzbreite*



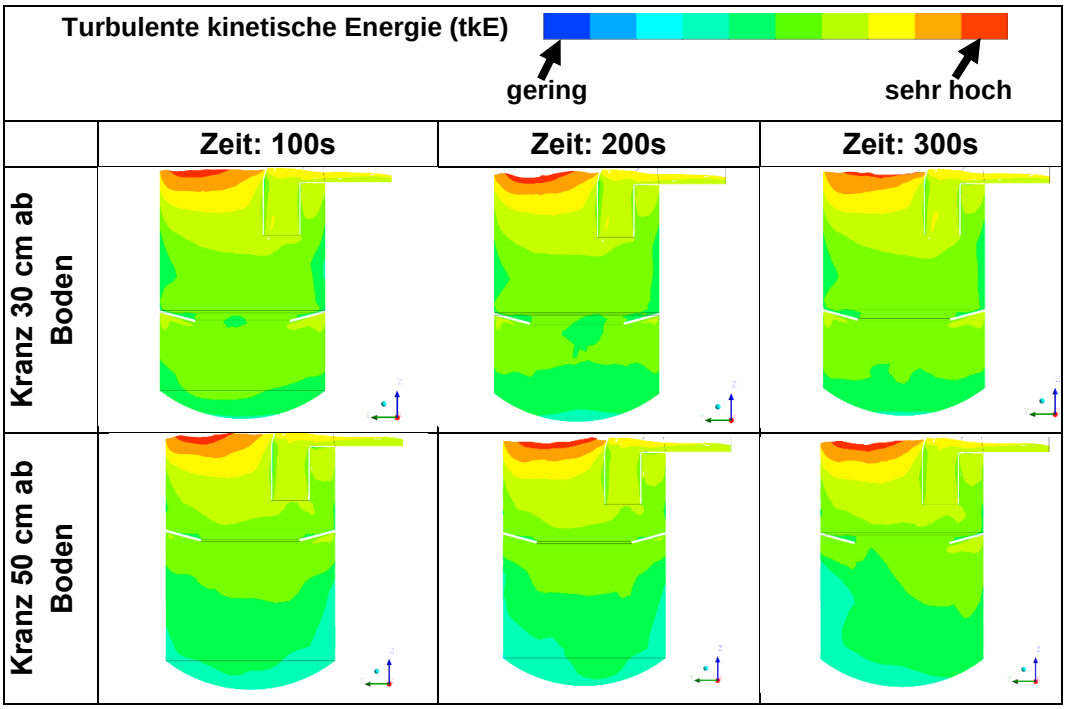
5.3.4 Kranz unterschiedliche Höhe

Die Höhe, auf welcher der Kranz angebracht wird, hat ebenfalls einen Einfluss auf die Durchmischung im unteren Bereich des Sammlers. Allerdings zeigen die Simulationsergebnisse, dass der Effekt der Höhe geringer ist als jener der Breite. Nachfolgend sind die Simulation mit einer Kranzhöhe von 30 cm und 50 cm ab Boden dargestellt.

Tab. 12: *Simulationsvergleich Wassertemperatur bei unterschiedlicher Kranzhöhe*



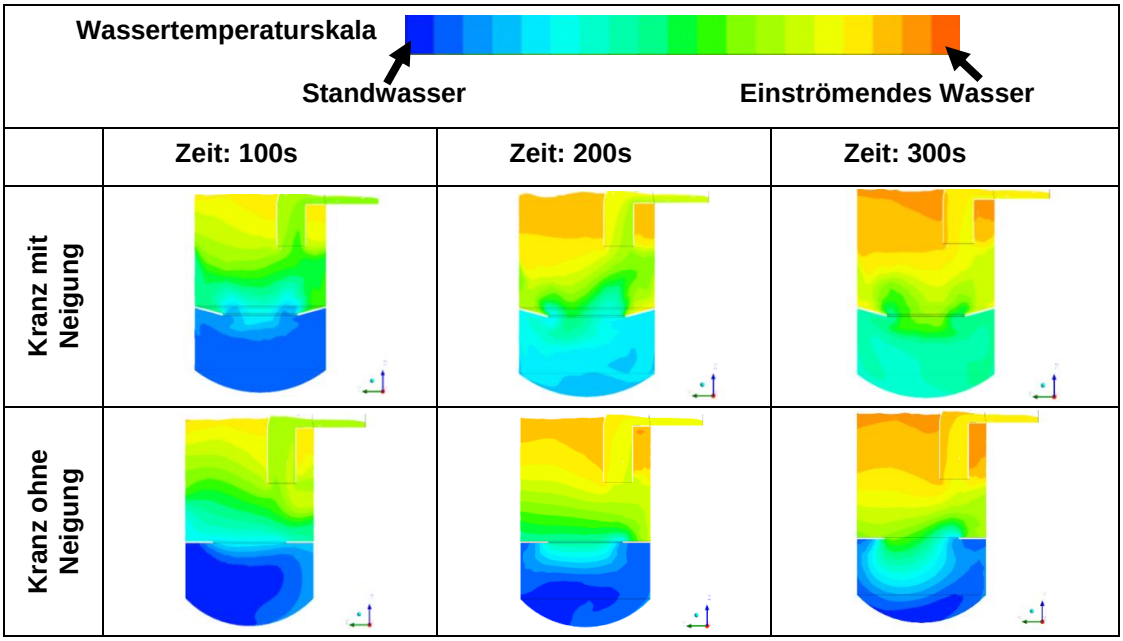
Tab. 13: *Simulationsvergleich kinetische Energie bei unterschiedlicher Kranzhöhe*



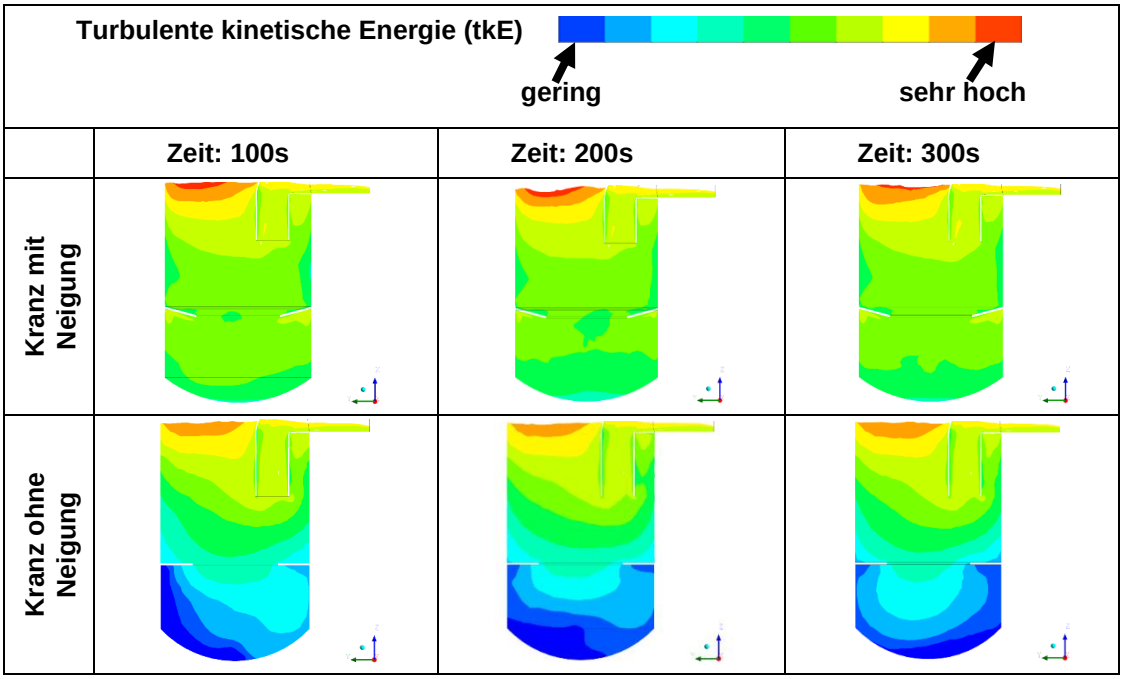
5.3.5 Kranz mit und ohne Neigung

Bei der Herstellung der Nachrüsteinheit stellte sich heraus, dass die Neigung des Kranzes gegen die Mitte nur schwer zu realisieren war. Aus diesem Grund wurde die Nachrüsteinheit ohne Neigung hergestellt und getestet. Um sicher zu stellen, dass der gewünschte Effekt des Partikelrückhalts bei der Nachrüsteinheit nicht nur aufgrund der Neigung zustande kam, wurde ebenfalls eine Simulation ohne Neigung durchgeführt. In dem nachfolgenden Vergleich (*Tab. 14* & *Tab. 15*) zeigen die Simulationsergebnisse den Unterschied auf. Die Simulation zeigt, dass durch den flachen Kranz die Schicht unter der Nachrüsteinheit beruhigter ist als mit einer Neigung. Dieser Effekt sollte die Aufwirbelung vom bereits abgesetzten Schlamm noch mehr reduzieren. Allerdings ist durch die fehlende Neigung das Absetzen von Partikeln, welche am Rand des Sammlers sedimentieren, erschwert.

Tab. 14: *Simulationsvergleich Wassertemperatur mit und ohne Neigung des Kranzes*



Tab. 15: *Simulationsvergleich kinetischen Energie mit und ohne Neigung des Kranzes*



6 Simulationen mit Partikeln

6.1 Methodik

Um Simulationen einer partikelbeladenen Strömung durchzuführen, sind nebst den Strömungsgleichungen noch weitere Gleichungen für die Partikel zu lösen. Es gibt dazu verschiedene Ansätze, der einfachste davon beschreibt die Partikel mit einer Konzentrationsgleichung. Die Partikel werden sozusagen in der Flüssigkeit verschmiert. Aufwändigere Ansätze beschreiben jedes Partikel und dessen Interaktion mit der Flüssigkeit separat. Doch auch mit einer Konzentrationsgleichung können wesentliche Eigenschaften der Partikel abgebildet werden. In den nachfolgend gezeigten Berechnungen sind die Partikel mit einer Sinkgeschwindigkeit versehen, sie können sich also durch die Strömung hindurchbewegen, ohne die Strömung selbst zu beeinflussen (ähnlich wie Schneeflocken in der Luft). Treffen sie so auf ein Hindernis, den Gefässboden beispielsweise, können sie sich dort ansammeln. Mit diesem Formalismus kann das Absetzverhalten von Partikeln simuliert werden.

Sollen in einer Strömung verschiedene Partikel simuliert werden, so muss für jede Fraktion eine Gleichung mitgelöst werden und in jeder davon kann eine andere Sinkgeschwindigkeit definiert sein.

Wenn auch die einzelnen Partikel die Strömung nicht beeinflussen, so macht dies die Gesamtheit der Partikel aber schon: aus der Partikelkonzentration pro Volumeneinheit wird eine Kraft berechnet, welche in die Strömungsgleichungen eingesetzt wird und die Strömung beschleunigt oder verzögert. So sinkt beispielsweise eine Wolke aus schwereren Partikeln schneller ab, als deren einzelne Partikel für sich allein sinken würden, dabei bildet sich eine nach unten gerichtete Strömung.

6.2 Modell und Materialeigenschaften

Das in den Simulationen verwendete Modell entspricht jenem der Versuchsanlage Europabrücke. Von einem Einlaufrohr herkommend, fliesst das Wasser zuerst in eine flache Wanne, worin sich der Rost des Schlammsammlers befindet. Durch diesen hindurch gelangt es in den Schlammsammler und von dort über den Tauchbogen in den Auslauf. Der Schlammsammler kann mit oder ohne Kranz ausgerüstet sein.

Die Materialeigenschaften des Strassenschlamms sind noch weitgehend unbekannt. Deshalb wurde mit verschiedenen Materialdichten und Absetzgeschwindigkeiten gearbeitet – die bisher gemachten Simulationen sind so eher als Sensitivitätsstudie zu werten denn als realistisches Abbild der tatsächlichen Situation. Die verwendeten Materialdichten variierten von 1005 kg/m^3 bis 1600 kg/m^3 und die Sinkgeschwindigkeiten von 1 – 10 mm/s. Mit genauerer Kenntnis der Materialien wird sich diese Spannweite in zukünftigen Simulationen eingrenzen lassen.

6.3 Versuche mit Schlammspiegel und einer Kornfraktion

In der ersten Versuchsreihe wurde angenommen, dass abgesetztes Material im Schlammsammler vorhanden ist. Ein Starkregen bewirkt eine Einströmung von 3.5 l/s, belastet mit einer Partikelkonzentration von 0.01 (kg Partikel / kg Wasser). Die Modellzeit betrug in einer ersten Serie 60 s. Die verschiedenen Materialien bewirkten ein unterschiedliches Strömungsverhalten: die ganz leichten abgesetzten Partikel wurden innerhalb dieser Minute ausgewaschen, während die schweren Partikel im Sammler verblieben. Bei einer Materialdichte von 1020 kg/m^3 wurden die Partikel im Sammler ohne Kranz ausgewaschen, hingegen mit dem Kranz nicht. Aufgrund dieses Ergebnisses wurden nachfolgend Simulationen über eine Modellzeit von 5 Minuten und der Materialdichte von 1020 kg/m^3 bei gleichem Zustrom (3.5 l/s, Partikelkonzentration 0.01) gemacht.

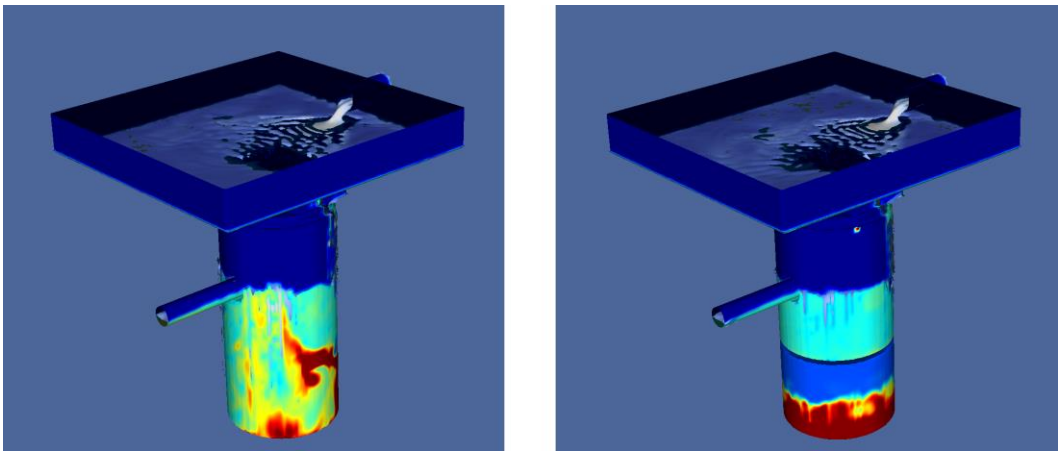


Abb. 23: *Aussenansicht des Simulationsmodells ohne Kranz (links) und mit Kranz (rechts). Oben befindet sich das Becken mit Einlauf und Rost des Schlammsammlers. Die Simulationszeit beträgt 50 Sekunden. Die Einfärbung zeigt Wasserstand und Partikelkonzentration, Wasser ist mittelblau, die Partikelkonzentration steigt von hellblau über gelb bis rot an.*

In der obigen *Abb. 23* ist das Simulationsergebnis nach 50s dargestellt. Es fällt auf, dass ohne Kranz der Auswaschungsprozess des abgelagerten Materials schon begonnen hat, während der Schlammspiegel rechts noch einigermassen intakt ist. Der Vertikalschnitt in der nächsten Abb. zeigt das Innere des Schlammsammlers.

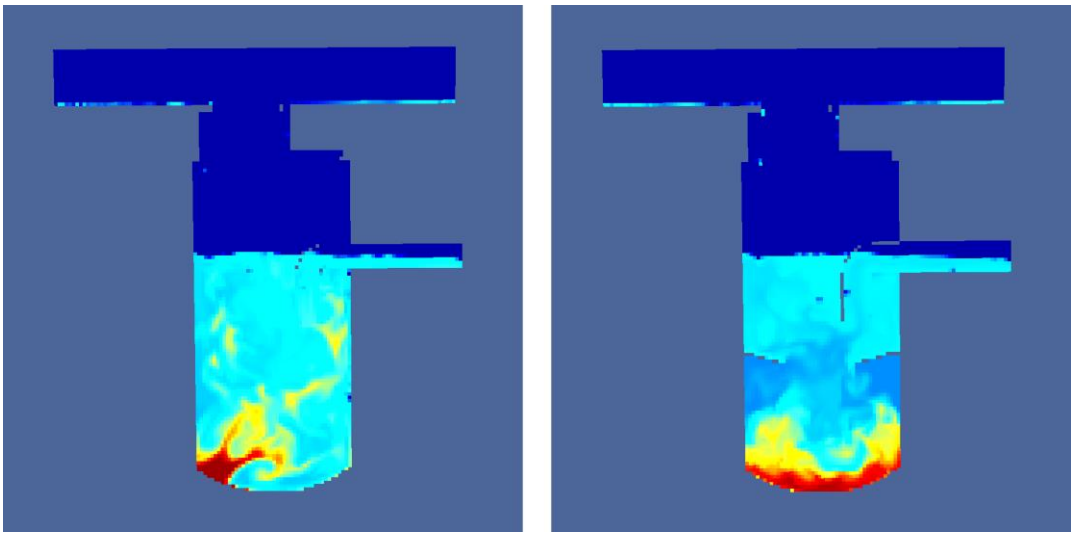


Abb. 24: *Vertikalschnitt durch den Schlammsammler zur gleichen Zeit und mit gleicher Einfärbung wie in Abb. 23.*

In der *Abb. 24* ist deutlich zu sehen, dass der Kranz (nun sichtbar im rechten Bild) eine Beruhigung der Strömung unterhalb verursacht. Dies äussert sich darin, dass der abgelagerte Schlamm noch weitgehend vorhanden ist. Im linken Bild, ohne Kranz, ist er schon weitgehend remobilisiert. Es ist aber auch zu sehen, dass der Kranz eine Verkleinerung des aktiven Volumens im Schlammsammler bewirkt.

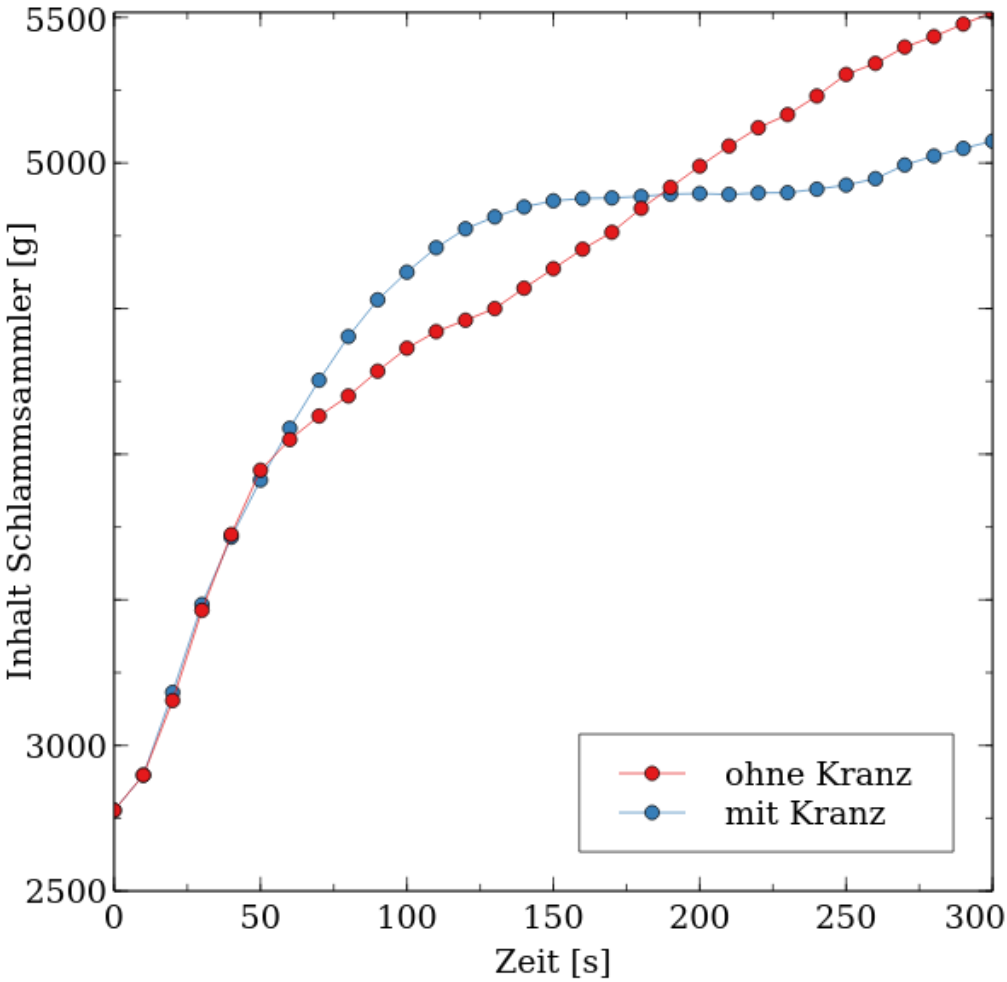


Abb. 25: *Partikelinhalt des Schlammsammlers über die Zeit ohne Kranz (rot) und mit Kranz (blau).*

Ein Vergleich des Partikelinhaltes im Schlammsammler über die Zeit (*Abb. 25*) zeigt die oben besprochenen Effekte. Der abgelagerte Schlamm am Anfang der Simulation beträgt 2.8 kg. Mit dem Zustrom des belasteten Strassenabwassers steigt der Partikelinhalt an, bis 50 s in beiden Simulationen gleich. Ab dieser Zeit kommt die Remobilisierung des abgelagerten Schlammes dazu. Diese verläuft im Sammler ohne Kranz wesentlich schneller, was dazu führt, dass mit Kranz mehr Material im Sammler verbleibt. Nach etwa 3 Minuten wird das kleinere aktive Volumen oberhalb des Kranzes dominant und vom jetzt einströmenden Material wird ein grösserer Teil gerade wieder ausgetragen.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde unbelastetes Regenwasser, ebenfalls 3.5 l/s, in den Schlammsammler mit schon abgesetztem Material eingeleitet. Die Dichte des abgelagerten Materials war 1020 kg/m^3, also 2 % höher als diejenige des Wassers, die anfängliche Konzentration betrug 0.01. Innerhalb der Modellzeit von 5 Minuten wurden die abgelagerten Partikel mehrheitlich ausgewaschen. Mit eingebautem Kranz dauerte dieser Prozess aber wesentlich länger.

6.4 Versuche ohne Schlammspiegel mit 3 Kornfraktionen

Bei diesen Versuchen wurde zeitweise belastetes Regenwasser in einen Schlammsammler eingeleitet, der frei von abgesetzten Partikeln war. Die eingeleitete Wassermenge war mit 0.5 l/s geringer als bei den vorherigen Versuchen. Es ging darum, herauszufinden, wie sich die Verringerung des aktiven Volumens oberhalb des Kranzes auswirken würde und wieviel Material durch die Kranzöffnung in den unteren strömungsberuhigten Teil des Schlammsammlers kommen würde und ob es dort auch

verbleiben würde. Bei einer Modellzeit von 5 Minuten wurde angenommen, dass das Regenwasser während 2 Minuten belastet war, danach dann nicht mehr. Die Belastung bestand aus 3 Fraktionen mit Dichten von 1020, 1050 und 1100 kg/m^3 bei einer Konzentration von je 0.01. In diesen Versuchen zeigte sich, dass das verkleinerte aktive Volumen dominant ist.

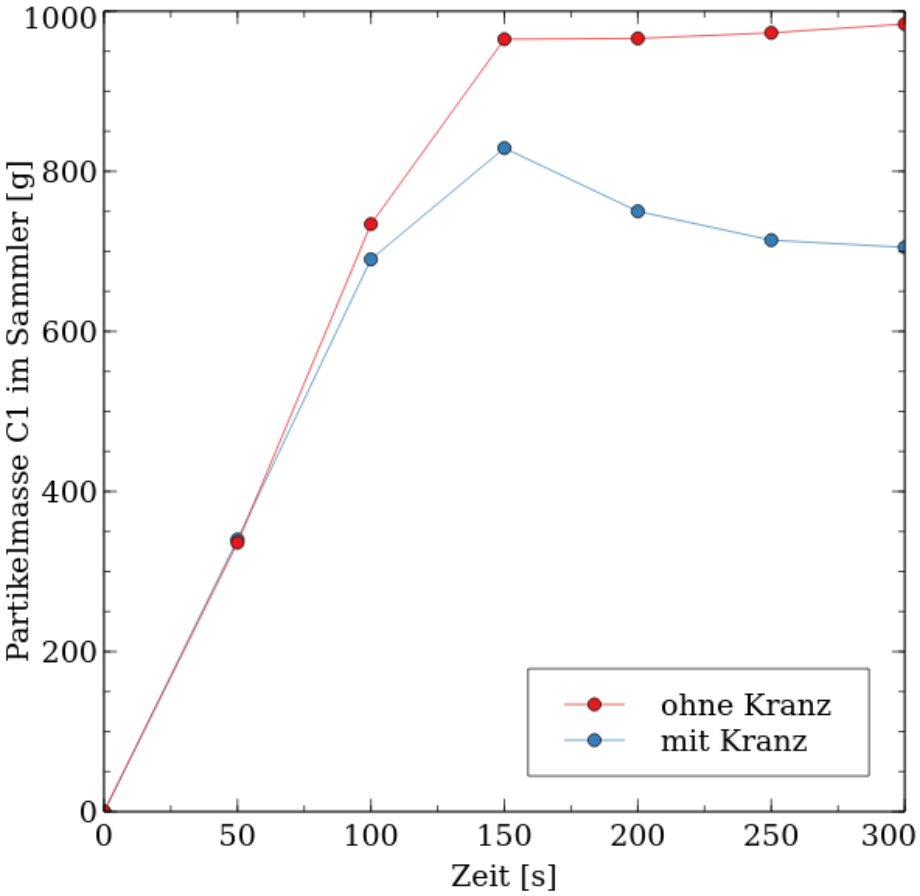


Abb. 26: *Resultate einer Simulation mit dem 3-Korn-Modell, reduzierter Einströmung von 0.5 l/s, belastetem Strassenabwasser während der ersten 2 Minuten und frisch gereinigtem Schlammsammler. Die 3 Kornfraktionen verhalten sich sehr ähnlich, so dass nur die leichteste mit einer Materialdichte von 1020 kg/m3 dargestellt ist. Die Modellzeit beträgt 5 Minuten.*

Wenn belastetes Regenabwasser in den frisch gereinigten Schlammsammler eingetragen wird, wie in *Abb. 26* dargestellt, zeigt es sich, dass das kleinere aktive Volumen mit eingebautem Kranz vor allem dazu führt, dass mehr Material gleich wieder ausgetragen wird. Es ist aber zu erwarten, dass sich bei längerer Simulationsdauer die Verhältnisse wieder ändern und sich aufgrund der geringeren Strömung in der unteren Kammer das sich dort befindliche Material eher an der Stelle verbleiben wird.

6.5 Vorläufiges Fazit

Die bisher gemachten Partikelsimulationen zeigen eine definitive Wirkung des Kranzes für die Beruhigung der Strömung im unteren Teil des Schlammsammlers. Dem wirkt aber die Verkleinerung des aktiven Volumens oberhalb des Kranzes entgegen. Die Lage des Kranzes ist daher von grosser Bedeutung, auch der Durchmesser der verbleibenden Öffnung ist sehr wichtig. In den nachfolgenden Untersuchungen soll daher herausgefunden werden, wo die optimale Lage des Kranzes ist und welche Breite er haben soll.

7 Bau und Erprobung der Nachrüsteinheit (Phase 3)

Der Bau der Nachrüsteinheit wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Creabeton durchgeführt. Die Nachrüsteinheit "Kranz" war laut Simulationen die erfolgversprechendste Variante. Für den Einbau in einen bestehenden Schlammsammler wurde ein Konzept entwickelt bei dem die Nachrüsteinheit an einem Stück in den Sammler eingeführt und anschliessend "aufgeschoben" werden kann. Es erwies sich als sehr kostspielig, eine Neigung beim Kranz zu schaffen, ohne dass sich der Aufwand bei der Herstellung und dem Einbau enorm vergrösserte. Aus diesem Grund wurde für die Prototypen auf die Neigung im Kranz verzichtet. Anhand von Simulationen wurde der Einfluss der Neigung getestet und es zeigte sich, dass die Aufwirbelung des bereits abgesetzten Schlamms trotzdem reduziert wird (siehe hierzu Kapitel 5.3.5). Allerdings bleibt der durch den Regen neu eingebrachte Schlamm auf dem Kranz einfacher liegen und rutscht nicht mehr so gut nach unten.

7.1 Prototypen

Holz

Verschiedene Ansätze zur Einbringung und Montage der Nachrüsteinheit in bestehende Schlammsammler wurden unter Zusammenarbeit mit Creabeton erarbeitet. Von der meistversprechenden Variante wurde von Creabeton aus Holz ein Prototyp hergestellt. Dieser Prototyp ist für Schlammsammler mit der Grösse von einem Meter Durchmesser ausgelegt. Eine kleinere Version für Schlammsammler mit einem Durchmesser von 70 oder 80 cm stellt somit beim Einbringen durch den Rost keine Schwierigkeiten dar. Der Einbau wurde bei einem Schlammsammler der Testanlage in Richterswil durchgeführt. Der Test gab Aufschluss darüber, ob der "Aufschiebemechanismus" nach dem Einführen in den Sammler funktioniert. Die Nachrüsteinheit konnte in wenigen Minuten in den Sammler eingebracht und "aufgeschoben" werden. Die Höhe lässt sich nach Belieben variieren, da die Nachrüsteinheit an Ketten am Kragen des Rostes befestigt wird.

Abb. 27: *Nachrüsteinheit aus Holz "zusammengeschoben"*

Abb. 28: *Nachrüsteinheit aus Holz "geöffnet"*

Abb. 29: *Nachrüsteinheit aus Holz im Schlammsammler "geöffnet"*

Stahl

Für die Versuche der Phase "Überprüfung der Wirkung in der Realität (Phase 4)" wurde die Nachrüsteinheit aus rostfreiem Stahl hergestellt. Das Funktionsprinzip bleibt dasselbe. Jedoch wurden für die Aufhängung keine Schnüre, sondern Ketten verwendet. Die Nachrüsteinheiten für die Testanlage in Richterswil hatten einen Durchmesser von einem Meter und eine Randbreite von 20 cm. Folglich war der Innendurchmesser noch 60 cm, wodurch genügend Spielraum für Reinigungsarbeiten gegeben war. Der Schlammsammler bei der Testanlage Europabrücke hatte lediglich einen Durchmesser von 70 cm. Aus diesem Grund musste diese Nachrüsteinheit kleiner dimensioniert werden. Hier lag der Durchmesser bei 70 cm, die randbreite bei 15 cm und folglich der Innendurchmesser bei 40 cm.

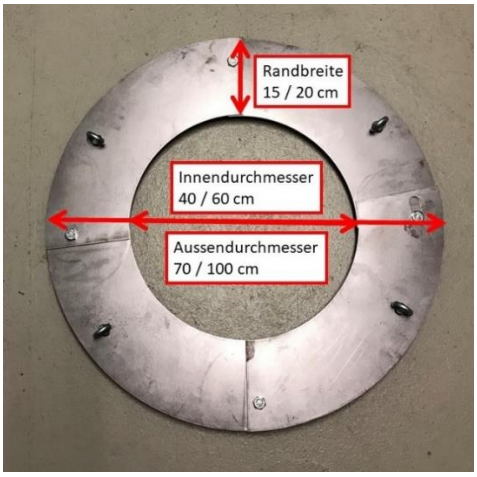


Abb. 30: *Masse der eingebauten Nachrüsteinheiten*

7.2 Einbau in bestehende Schlammsammler

Für den Einbau wurden zusätzlich nebst der eigentlichen Nachrüsteinheit noch weitere Komponenten für die Befestigung benötigt. Diese umfassten Metallketten, Aufhängehaken (inkl. Dübel) und Karabiner. Für die Aufhängung wurden vorab im Kragen des Schlammsammlers zwei Aufhängehaken angebracht. Die Ketten wurden an den Ösen der Nachrüsteinheit durch einen Karabiner befestigt. Anschliessend konnte die Nachrüsteinheit zusammengeschoben in den Sammler hinuntergelassen und dort durch Ziehen an den Ketten geöffnet werden. Die Höhe der Nachrüsteinheit kann individuell bestimmt werden, da die Kette in jedem beliebigen Glied am Haken eingehängt werden kann. Die Dauer für den Einbau inklusive Bohrung und Montieren der Aufhängehaken beschränkt sich auf maximal 20 min. Die Nachrüsteinheit bleibt anschliessend fix montiert und wird auch bei der Reinigung nicht entfernt. Die Öffnung in der Mitte bietet genügen Spielraum um mit dem Saugwagen den Schlammsammler zu entleeren.

Abb. 31: *Eingebaute Nachrüsteinheit mit Durchmesser von 1m*

8 Überprüfung der Wirkung in der Realität (Phase 4)

Um die Nachrüsteinheit auf ihre Wirksamkeit zu prüfen, wurden vier verschiedene Methoden erarbeitet, welche in einer Übersicht in *Abb. 32* dargestellt sind. Die Versuche dazu wurden an den Testanlagen mit den Standorten Richterswil oder Europabrücke durchgeführt. In Richterswil wurde die im Sammler zurückgebliebene Schlammmenge nach einer Laufzeit von einem Jahr mit und ohne Nachrüsteinheit verglichen. Die Methode der kontinuierlichen Probenahme konnte ausfolgendem Grund nicht durchgeführt werden. Im Vorjahr wurde in einem anderen Projekt ein System getestet, welches einen Rückstau des Abwassers vor der Probenahmestelle im Messschacht verursachte. Dieser Rückstau hatte Einfluss auf die Konzentration der volumenproportionalen Probenahme und lieferte dadurch für den Vergleich keine brauchbaren Resultate. Aufgrund dessen, dass keine verwendbaren Vergleichswerte vorhanden waren, wurde auf diese Methode verzichtet und sich stärker auf die Versuche bei der Europabrücke konzentriert. Bei der Europabrücke wurden die Simulationen mit den Temperaturmessungen eines realen Regenereignisses verglichen. Zusätzlich wurden noch Kurzzeitversuche zum Partikelrückhalt durchgeführt.

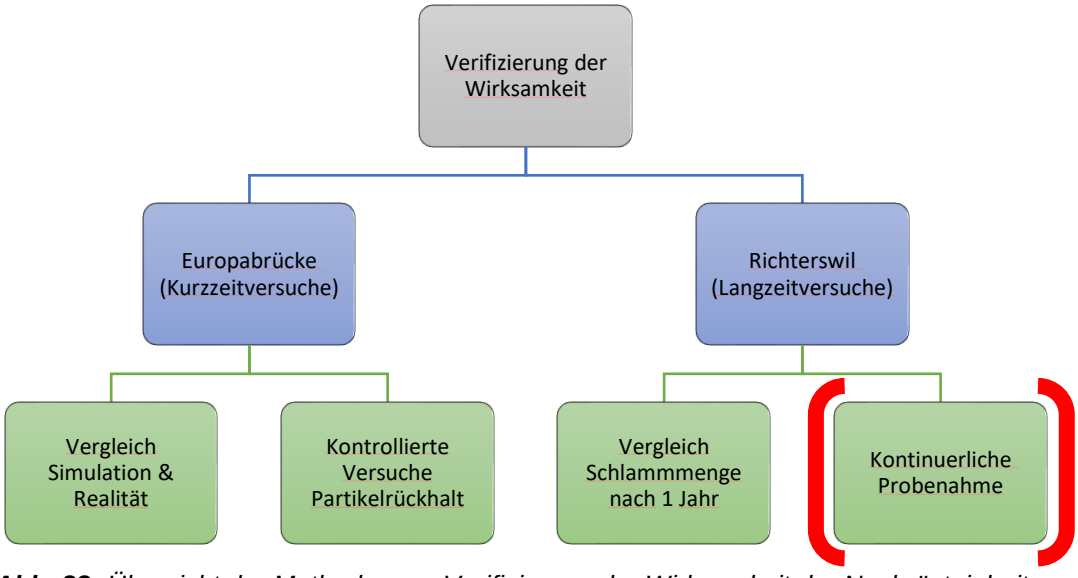


Abb. 32: *Übersicht der Methoden zur Verifizierung der Wirksamkeit der Nachrüsteinheit (in roten Klammern nicht realisierte Methode)*

8.1 Schlammmenge und Schwermetallgehalt nach einem Jahr

Für den Vergleich der Schlammmenge nach einem Jahr wurde die Nachrüsteinheit in den drei Schlammsammlern der Testanlage in Richterswil eingebaut. Die Sammler wurden während einem Jahr mit der eingebauten Nachrüsteinheit betrieben. Vor dem Einbau wurde die Schlammmenge, welche sich während einem Jahr ohne Nachrüsteinheit abgesetzt hatte, von jedem der drei Sammler einzeln ausgepumpt, gewogen und auf die Trockensubstanz bestimmt (siehe hierzu Kapitel 3.2.2). Zusätzlich wurde von jedem Sammler eine Schlammprobe mittels Schwermetall Screening auf deren Gehalt bestimmt. Die Analysen wurden von dem externen Labor Bachema AG durchgeführt. Dieselbe Analyse der zurückgehaltenen Schlammmenge wurde nach einem Jahr mit der eingebauten Nachrüsteinheit durchgeführt. In der nachfolgenden *Tab. 16* sind die Ergebnisse der Bestimmung der Schlammmenge aufgezeigt. Die Periode ohne Nachrüsteinheit erstreckte sich vom 22.05.2018 bis zum 11.06.2019 und umfasste demnach 385 Tage. Die Periode mit Nachrüsteinheit war vom 11.06.2019 bis 30.06.2020 und umfasste ebenfalls 385 Tage. Die Nachrüsteinheiten wurden bei allen drei Sammlern auf einer Höhe ca. 25 cm unter dem Ende des Tauchbogens angebracht. Dadurch ergab sich eine potentielle Absetzhöhe für den Schlamm unterhalb der Nachrüsteinheit von ca. 40cm.

Tab. 16: *Abgesetzte Schlammmenge nach einem Jahr ohne und mit Nachrüsteinheit*

	Nr. 1 (Bahnhof)		Nr. 2 (Mitte)		Nr. 3 (Badi)	
Jahresperiode 2019 ohne und 2020 mit Nachrüsteinheit	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Schlammenge TS Gewicht [kg]	13.4	6.7	10.8	8.7	3.3	3.5
Differenz TS Gewicht [kg]	**-6.7 (-50%)**		**-2.1 (-20%)**		**+0.2 (+6%)**	

Es wurde erwartet, dass sich mit der Nachrüsteinheit während einem Jahr mehr Schlamm bzw. GUS absetzt als ohne. Dies konnte durch die Messungen nicht bestätigt werden. In dem Sammlern Nr. 1 Bahnhof wurde 50% und in Nr. 2 Mitte ca. 20% weniger Schlamm erfasst. Im Sammler Nr. 3 Badi konnte eine leichte Zunahme von ca. 6% verzeichnet werden.

Anders sieht es beim Schwermetallgehalt aus. Die wichtigsten Elemente sind in der *Tab. 17* abgebildet. Es zeigte sich, dass auch Blei immer noch im Strassenabwasser vorhanden ist. Dies lässt vermuten, dass Autoreifen im Umlauf sind, welche nebst Kautschuk und Zink ebenfalls noch Blei enthalten. Zudem sind Auswuchtungsgewichte aus Blei bei den Reifen in der EU seit 2003 verboten, diese werden jedoch trotzdem noch eingesetzt. Vor allem Privatpersonen sind sich dessen Verbot nicht bewusst. Das komplette Analyseergebnis aller gemessenen Elemente befindet sich im Anhang-VI.

***Tab. 17**: Schwermetallgehalt im Schlamm nach einem Jahr ohne und mit Nachrüsteinheit*

		Nr. 1 (Bahnhof)		Nr. 2 (Mitte)		Nr. 3 (Badi)	
Jahresperiode 2019 ohne und 2020 mit Nachrüsteinheit		2019	2020	2019	2020	2019	2020
Blei	Konzentration TS [mg/kg]	25	35	59	36	25	46
	Differenz Konzentration in %	**+40**		**-39**		**+84**	
	Total bezogen auf die gesamte Menge TS [mg]	335	235	637	313	83	161
	Differenz Total in %	**-30**		**-51**		**+95**	
Chrom	Konzentration TS [mg/kg]	31	42	35	38	23	42
	Differenz Konzentration in %	**+35**		**+9**		**+83**	
	Total bezogen auf die Gesamte Menge TS [mg]	415	281	378	331	76	147
	Differenz Total in %	**-32**		**-13**		**+94**	
Kupfer	Konzentration TS [mg/kg]	130	240	200	220	120	280
	Differenz Konzentration in %	**+85**		**+10**		**+133**	
	Total bezogen auf die gesamte Menge TS [mg]	1'742	1'608	2'160	1'914	396	980
	Differenz Total in %	**-8**		**-11**		**+147**	
Zink	Konzentration TS [mg/kg]	560	1'300	930	1'300	520	1'500
	Differenz Konzentration in %	**+132**		**+40**		**+188**	
	Total bezogen auf die gesamte Menge TS [mg]	7'504	8710	10'044	11'310	1'716	5'250
	Differenz Total in %	**+16**		**+13**		**+206**	

Es zeigte sich, dass die Konzentration an Schwermetallen, bezogen auf ein Kilogramm Trockensubstanz, bei der Jahresperiode bis 2020 mit Nachrüsteinheit deutlich höher lag als bei der Jahresperiode 2019 ohne Nachrüsteinheit. Beim Sammler Nr. 1 Bahnhof liegt bspw. die Differenz in der Kupferkonzentration bei +85% (130 mg/kg im 2019 ohne Nachrüsteinheit und 240 mg/kg im 2020 mit Nachrüsteinheit). Wird die Konzentration mit der totalen Trockenmasse multipliziert ergibt sich daraus die totale Menge an Schwermetall, welche sich während einer Jahresperiode im Sammler abgelagert hat. Dadurch, dass die beiden Sammler Nr. 1 und Nr. 2 in der Jahresperiode 2020 weniger Schlamm aufwiesen, verringerte sich die Differenz der totalen Menge an Schwermetall entsprechend. Folglich ergab sich bspw. beim Sammler Nr. 1 eine Differenz der totalen Kupfermenge von -8% (1'742 mg im 2019 ohne Nachrüsteinheit und 1'608 mg im 2020 mit Nachrüsteinheit). Bei der Zinkmenge ergab sich jedoch trotzdem noch eine erhöhte Ablagerung von +16% (7'504 mg im 2019 und 8'710 mg im 2020).

Beim Sammler Nr. 3 wurde mit der Nachrüsteinheit im Jahr 2020 bei jedem gemessenen Element eine höhere Akkumulation verzeichnet. Diese lag bei der totalen Zinkmenge sogar bei +206 %.

Die Durchschnittswerte über alle drei Sammler, pro Kilogramm Trockensubstanz (TS) und Total, sind in der *Tab. 18* ersichtlich. Pro Kilogramm Trockensubstanz haben sich mit Nachrüsteinheit (2020) im Schnitt mehr Schwermetalle akkumuliert als ohne Nachrüsteinheit (2019). Auf die absolute Menge betrachtet befand sich mit Nachrüsteinheit weniger Blei (-33%) und Chrom (-13%) dafür mehr Kupfer (5%) und Zink (31%) in den Sammlern.

Tab. 18: *Vergleich der Mengen-gewichteten Mittelwerte aller drei Sammler nach einem Jahr ohne (2019) und mit (2020) Nachrüsteinheit.*

	Blei		Chrom		Kupfer		Zink	
Jahresperiode	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Konzentration TS [mg/kg]	36	39	30	41	150	247	670	1367
Differenz Konzentration in %	**7**		**37**		**64**		**104**	
Total bezogen auf die gesamte Menge TS [mg]	352	236.2	290	253	1433	1501	6421	8423
Differenz Total in %	**-33**		**-13**		**5**		**31**	

8.2 Vergleich der Simulation mit der Realität

Die Simulationen haben gezeigt, dass durch die Nachrüsteinheit eine geringere Durchmischung unterhalb des Kranzes (Nachrüsteinheit) stattfinden sollte. Um dies zu überprüfen wurden Versuche bei der Testanlage Europabrücke durchgeführt. Hierbei wurde anhand der Temperatursensoren gemessen wie lange es dauert, bis das Regenwasser in die unteren Schichten vorgedrungen ist. Es wurden jeweils drei Versuche mit (Versuch 1-3) und drei ohne (Versuch 5-7) Nachrüsteinheit durchgeführt. Versuch Nummer 4 musste aufgrund technischer Fehler verworfen werden.

Nachfolgend in den *Abb. 33-28* ist das Temperaturprofil über den Zeitraum eines Versuches mit und ohne Nachrüsteinheit abgebildet. Dabei ist der Sensor 16 jener, der direkt unter der Wasseroberfläche war. Dieser schlägt zuerst an, sobald das Regenwasser einströmt. Die Sensoren 1-6 sind die untersten sechs Sensoren, sprich die ersten sechs Sensoren, welche sich oberhalb des Schlammspiegels aber noch unterhalb des Kranzes befanden. Die Kurve "Temp. Regen" zeigt die zum Zeitpunkt vorherrschende Temperatur des in den Sammler einströmenden Wassers. Diese war zu Beginn um ca. 6-7°C höher als das Wasser im Sammler. Dadurch konnten die nachfolgend erläuterten Erkenntnisse gewonnen werden. Der Durchfluss, welcher sich an der rechten Achse orientiert, zeigt den zum Zeitpunkt aktuellen Volumenstrom durch den Sammler an.

Im Vergleich über die gesamte Versuchsdauer (*Abb. 25 & 26*) ist ersichtlich, dass sich ohne Nachrüsteinheit bereits nach ca. 150 Sekunden eine stabile Temperatur bei den untersten Sensoren einstellt. Mit Nachrüsteinheit stellt sich ein stabiles Temperaturprofil allmählich nach ca. 250 Sekunden ein. Dies zeigt auf, dass die Durchmischung ohne Nachrüsteinheit in den unteren Ebenen, wo sich der Schlamm befindet, früher erfolgt und folglich auch grössere Turbulenzen vorherrschen.

Bei genauerer Betrachtung der ersten 50 Sekunden (*Abb. 27 & 28*) ist ersichtlich, dass die unteren sechs Sensoren, bei den Versuchen ohne Nachrüsteinheit, zu einem früheren Zeitpunkt einen Temperaturanstieg verzeichnen. Dieser erfolgt nach ca. 25 Sekunden. Bei den Versuchen mit Nachrüsteinheit verändert sich die Temperatur der untersten sechs Sensoren erst nach einer Versuchsdauer von ca. 40 Sekunden. Dieser Unterschied zeigt ebenfalls auf, dass es länger dauert, bis das einströmende Wasser in die unteren Ebenen gelangt. Durch den schwächeren Fluss in den unteren Bereich entstehen dort auch weniger Turbulenzen. Folglich wird der Schlamm weniger aufgewirbelt und auch ausgetragen.

Diese Unterschiede zeichneten sich bei allen drei Versuchen mit und ohne Nachrüsteinheit ab. Somit kann ausgeschlossen werden, dass ein zufälliger Strömungsverlauf dafür verantwortlich war. Die Diagramme zu den restlichen Versuchen befinden sich im Anhang-VII.

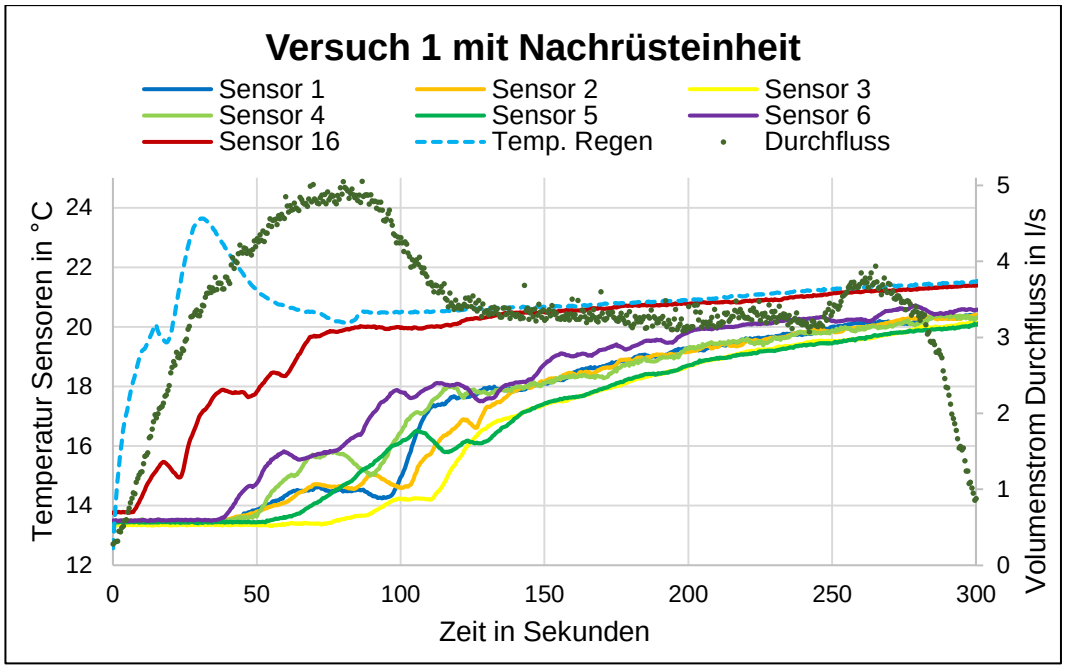


Abb. 33: *Temperaturprofil über den Zeitraum vom Versuch 1 mit Nachrüsteinheit*

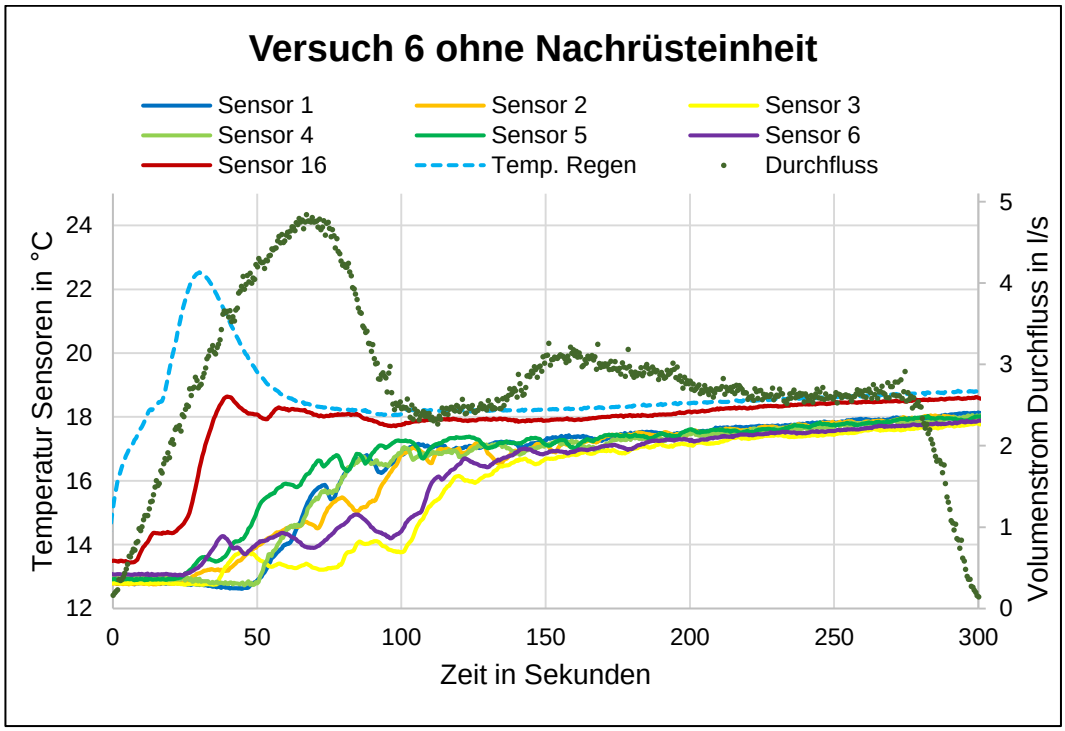


Abb. 34: *Temperaturprofil über den Zeitraum vom Versuch 7 ohne Nachrüsteinheit*

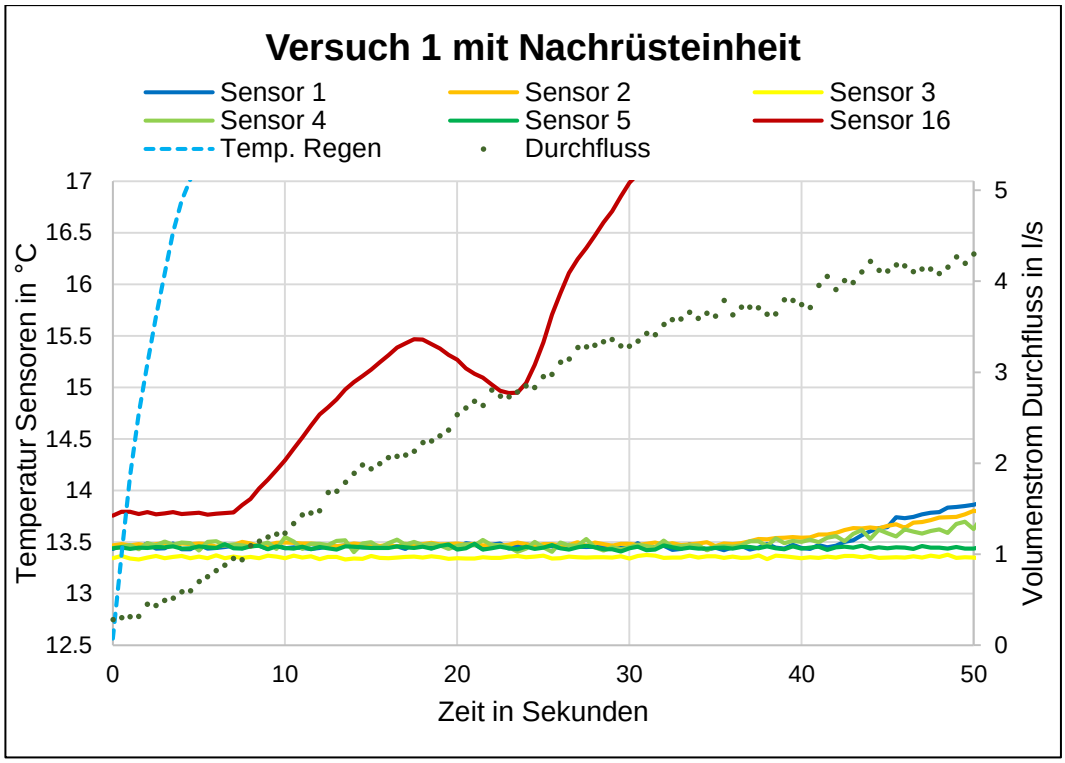


Abb. 35: *Temperaturprofil die ersten 50 Sekunden vom Versuch 1 mit Nachrüsteinheit*

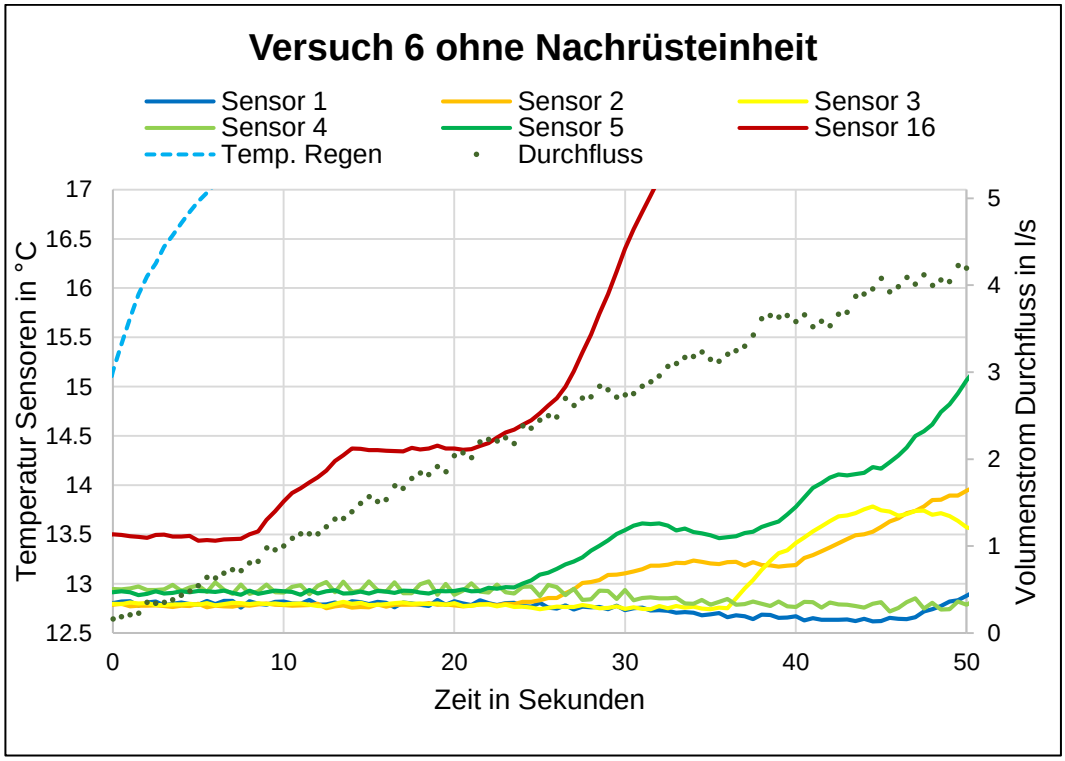


Abb. 36: *Temperaturprofil über die ersten 50 Sekunden vom Versuch 6 ohne Nachrüsteinheit*

8.3 Versuche zum Partikelrückhalt

Um die effektive Wirksamkeit der Nachrüsteinheit zu quantifizieren wurden bei den Versuchen der Versuchsanlage Europabrücke Proben am Auslauf entnommen (Beschreibung des Vorgehens in Kapitel 3.1.2). Diese Proben wurden auf GUS, Kupfer und Zink analysiert. In den nachfolgenden *Tab.n 19-21* sind die analysierten Parametern aller Versuche in Relation zum Wasserdurchsatz aufgezeigt.

Am Wasserdurchsatz ist ersichtlich, dass nicht bei allen Versuchen exakt derselbe Wasserdurchfluss vorherrschte. Der Peak Volumenstrom ist der maximale Volumenstrom, welcher während dem Versuch gemessen wurde. Dieser lag jeweils nur während wenigen Sekunden vor, ist allerdings für die Aufwirbelung der Schlammschicht relevant.

Bei dem Vergleich der GUS-Auslaufkonzentrationen in *Tab. 19* ist ersichtlich, dass im Durchschnitt über alle sechs Versuche mit der Nachrüsteinheit weniger GUS ausgetragen wurde als ohne. Der Unterschied betrug im Schnitt 11%. Im direkten Vergleich der einzelnen Versuche mit ähnlichen Parametern ist eine Wirkung der Nachrüsteinheit in zwei von drei Vergleichen ersichtlich. Dies beim Vergleich Nr.1 mit Nr. 5 sowie Nr. 2 mit Nr. 7. Beim Vergleich Nr. 3 mit Nr. 6 hingegen ist mit der Nachrüsteinheit eine schlechtere Wirkung erbracht worden.

Beim Vergleich der Kupfer-Auslaufkonzentrationen in *Tab. 20* ist im Durchschnitt über alle sechs Versuche keine Verbesserung oder Verschlechterung ersichtlich. Im direkten Vergleich der einzelnen Versuche mit ähnlichen Parametern ist in zwei Vergleichen eine leicht schlechtere Wirkung ersichtlich (Vergleich Nr.1 mit Nr. 5 und Nr. 3 mit Nr. 5). Beim Vergleich Nr. 2 mit Nr. 7 ist eine leicht bessere Wirkung zu erkennen.

Beim Vergleich der Zink-Auslaufkonzentration in *Tab. 21* wurde beim Versuch Nr. 6 eine sehr hohe Zink-Konzentration von 330 µg/l gemessen. Wegen dem sehr grossen Unterschied zu den Konzentrationen der anderen Versuche wurde dieser Wert als Ausreisser betrachtet und nicht in die Auswertung einbezogen. Somit wurde die Berechnung der durchschnittlichen Konzentrationen ohne den Versuch Nr. 6 durchgeführt. Dadurch ergab sich im Durchschnitt über die verbleibenden fünf Versuche eine Verbesserung im Zink-Rückhalt von 22%. Im direkten Vergleich der einzelnen Versuche mit ähnlichen Parametern ist in einem der zwei Vergleich eine viel bessere Wirkung ersichtlich (Vergleich Nr. 2 mit Nr. 7). Beim zweiten vergleich von Nr. 1 mit Nr. 5 ist eine leicht schlechtere Wirkung ersichtlich.

Tab. 19: *GUS Konzentrationen beim Auslauf der Versuche Europabrücke*

		Wasser			GUS		
		Wasserdurch-fluss Total	Ø Volumen-strom	Peak Volumenstrom	Auslauf Konz.	Ø Auslauf Konz.	Ø Wirkung
	Nr.	Liter	l/s	l/s	mg/l	mg/l	%
Mit Nachrüst einheit	1	1028	3.2	5.1	79	89	-11%
	2	880	2.9	4.6	77		
	3	830	2.6	4.4	110		
Ohne Nachrüst einheit	5	925	2.9	5.1	120	100	
	6	831	2.7	4.8	100		
	7	882	2.9	5.1	81		

Tab. 20: *Kupfer Konzentration beim Auslauf der Versuche Europabrücke*

		Wasser			Kupfer		
		Wasserdurch-fluss Total	Ø Volumen-strom	Peak Volumenstrom	Auslauf Konz.	Ø Auslauf Konz.	Ø Wirkung
	Nr.	Liter	l/s	l/s	µg/l	µg/l	%
Mit Nachrüst einheit	1	1028	3.2	5.1	31	24.0	0%
	2	880	2.9	4.6	20		
	3	830	2.6	4.4	21		
Ohne Nachrüst einheit	5	925	2.9	5.1	29	23.7	
	6	831	2.7	4.8	20		
	7	882	2.9	5.1	22		

Tab. 21: *Zink Konzentration beim Auslauf der Versuche Europabrücke*

		Wasser			Zink		
		Wasserdurch-fluss Total	Ø Volumen-strom	Peak Volumenstrom	Auslauf Konz.	Ø Auslauf Konz.	Ø Wirkung
	Nr.	Liter	l/s	l/s	µg/l	µg/l	%
Mit Nachrüst einheit	1	1028	3.2	5.1	80	46.7	-22%
	2	880	2.9	4.6	30		
	3	830	2.6	4.4	30		
Ohne Nachrüst einheit	5	925	2.9	5.1	70	60.0	
	6	831	2.7	4.8	~~330~~		
	7	882	2.9	5.1	50		

9 Diskussion

9.1 Aktuelle Schwäche der Nachrüsteinheit

Es konnte aufgezeigt werden, dass durch die Nachrüsteinheit "Kranz" die Turbulenzen im unteren Bereich des Sammlers verringert wurden. Folglich wird Strassenschlamm, welcher sich bereits unterhalb der Nachrüsteinheit befindet, weniger aufgewirbelt und ausgetragen. Zurzeit behindert die Nachrüsteinheit jedoch den durch ein Regenereignis neu eingetragenen Schlamm, sich unterhalb der Nachrüsteinheit (Kranz) abzusetzen. In den Praxisversuchen wurde ein Kranz verwendet, welche keine Neigung aufwies. Durch die horizontale Lage des Kranzes bot dieser eine Ablagefläche für den neu eingetragenen Schlamm. Beim Entleeren der Sammler in Richterswil war deutlich zu erkennen, dass sich ein Teil des Schlamms auf dem Kranz ablagerte (siehe *Abb. 37*). Dieser Anteil Schlamm wird bei einem stärkeren Regenereignis leichter ausgetragen. Folglich wurde ein schlechterer Wirkungsgrad erzielt als erwartet. Aus diesem Grund wurde zu Beginn der Ansatz verfolgt, einen geneigten Kranz einzubauen. Dies stellte sich allerdings als sehr schwierig heraus. Durch die Neigung im Kranz weist dieser im zusammengeklappten Zustand andere Dimensionen auf. Der Kranz ist dann wesentlich "dicker", wodurch er sich nicht mehr durch die schmale Öffnung des Strassenablaufs einführen lässt. Für die Umsetzung eines geneigten Kranzes müsste ein neues Konzept zur Montage ausgearbeitet werden. Das aktuelle Konzept weist eine einfache Handhabung und schnelle Montage der Nachrüsteinheit auf. Ein neues Konzept würde mit grosser Wahrscheinlichkeit einen erhöhten Aufwand bei der Montage bedeuten.

Abb. 37: *Schlamm auf dem Kranz nach einem Jahr beim Entleeren des Sammlers*

9.2 Höhe der Platzierung des Kranzes (Nachrüsteinheit)

Bei den Praxisversuchen wurde die Nachrüsteinheit 30 cm unterhalb des Einlaufs in den Tauchbogen platziert (siehe *Abb. 38*). Dadurch ergab sich eine Höhe unterhalb des Kranzes von 30-45 cm. Dies ist der beruhigte "Stauraum" des Schlamms. Oberhalb der Nachrüsteinheit ist die turbulente Zone. Durch die Nachrüsteinheit wird im Stauraum die Turbulenz verringert, jedoch die Turbulenz im oberen Bereich entsprechend vergrössert, da die kinetische Energie immer noch vorhanden ist und nicht vernichtet werden kann. Durch die höheren Turbulenzen im oberen Bereich wird das Absetzen der eingetragenen Partikel erschwert. Es wird vermutet, dass dieser Effekt bei leichtem Regen nicht sehr grosse Auswirkungen hat, bei starkem Regen jedoch schon. Sprich ab einem gewissen Wasserdurchsatz werden die meisten Partikel direkt wieder ausgetragen und können sich gar nicht erst absetzen. Durch die Nachrüsteinheit wird dieser Effekt früher auftreten, da die Turbulenzen im oberen Bereich höher sind. Je weiter unten die Nachrüsteinheit platziert wird, desto geringer sind auch die Turbulenzen im oberen Bereich. Folglich gilt es die optimale Höhe der Nachrüsteinheit zu definieren. Diese ist stark vom Einzugsgebiet des Sammlers abhängig. Bei einem grösseren Einzugsgebiet ist der Wasserdurchsatz höher und der Kranz müsste weiter unten platziert werden. Allerdings wird dadurch der Stauraum verkleinert bei gleichzeitigem höheren Partikeleintrag aufgrund des grösseren Einzugsgebietes.

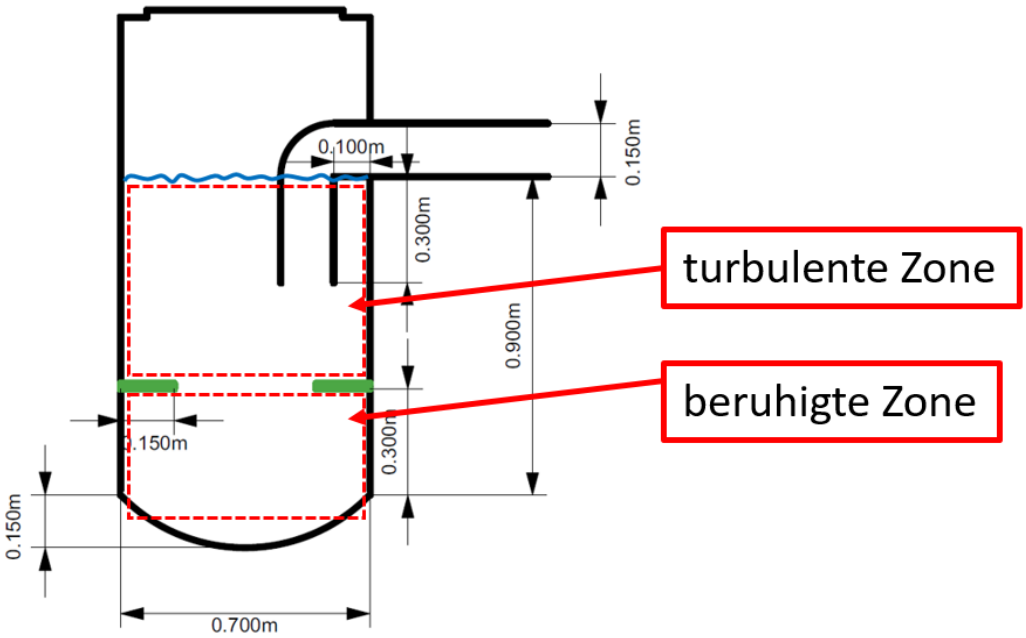


Abb. 38: *Zeichnung mit Massen eines Schlammsammlers mit Nachrüsteinheit (grün=Kranz)*

9.3 Vergleichbarkeit der Praxisversuche

Bei den Praxisversuchen war es beinahe unmöglich in zwei Versuchen exakt dieselben Bedingungen zu schaffen. Selbst bei den kontrollierten Versuchen bei der Europabrücke, bei welchen der Wasser-Durchfluss mittels Hochdruckspülfahrzeug bereitgestellt wurde, sind unterschiedliche Wassermengen aufgezeichnet worden. Bei den Versuchen während einem Jahr mit den drei Sammlern in Richterswil ist die Unsicherheit in den Vergleichen noch deutlich grösser. Zum einen war die Niederschlagsmenge und auch dessen Verteilung von starken und schwachen Regenereignissen nicht kontrollierbar und variierte mit grosser Wahrscheinlichkeit. Zum anderen war auch der durchschnittliche Tagesverkehr (DTV) während der ausserordentlichen Lage im 2. Quartal 2020 durch den Lockdown deutlich geringer. Das ASTRA veröffentlichte Zahlen zur Veränderung des Verkehrsaufkommens während des Lockdowns. Diese beziehen sich jedoch nur auf 10 ausgewählte Messstellen wovon allesamt Autobahnen sind. Demnach verringerte sich auf der A3 in Zürich beim Äschertunnel das Verkehrsaufkommen gemäss folgender *Tab. 22*:

Tab. 22: *Reduktion des Verkehrsaufkommen im Zeitraum um den Lockdown* [17] *(Quelle: ASTRA)*

	März	April	Mai	Juni
A3 in Zürich beim Aeschertunnel (Westring Zürich)	–24 %	–35 %	–16 %	–5 %

Es ist anzunehmen, dass sich das Verkehrsaufkommen auf der Seestrasse in Richterswil in dieser Zeit ebenfalls reduziert hatte. Zum Zeitpunkt der Auswertung lagen jedoch keine verfügbaren Werte zur Seestrasse vor. Die Reduktion hat einen direkten Einfluss auf den Partikeleintrag in die Sammler. Dadurch entstand eine grosse Unsicherheit im direkten Vergleich der beiden Versuchsjahre. Als grobe Abschätzung wurde vorliegend die Schadstofffracht proportional mit der Verkehrsreduktion extrapoliert. Demnach fielen über das ganze Jahr 6.7 % weniger Schadstoffe an. Was zur Folge hätte, dass der Wirkungsgrad der Nachrüsteinheit besser ausgefallen wäre. Im Durchschnitt über alle drei Sammler würden sich dadurch der Wirkungsgrad wie folgt verändern:

- Blei -28 % (zuvor -33 %)
- Chrom -6 % (zuvor -13 %)
- Kupfer +12 % (zuvor +5 %)
- Zink +41 % (zuvor +31 %)

10 Schlussfolgerung

10.1 Wirkung der Nachrüsteinheit "Kranz"

Die Messungen des Temperaturprofils beim Sammler bei der Europabrücke zeigten auf, dass die Turbulenzen in der Schicht unterhalb der Nachrüsteinheit durch den Kranz auch in der Praxis verringert werden. Dies deckt sich sehr gut mit den Simulationsergebnissen. Demnach werden die bereits abgesetzten Partikel weniger aufgewirbelt und ausgetragen. Allerdings zeigte sich ebenfalls, dass sich ein Teil der Partikel auf dem Kranz absetzte und nicht in den unteren Bereich sedimentierte. Vermutlich erzielte der Kranz durch diesen Effekt bei den Starkregen-Versuchen bei der Europabrücke nur einen Wirkungsgrad von durchschnittlich 11% beim GUS-Rückhalt.

Bei den Praxisversuchen über ein Jahr sammelte sich mit Nachrüsteinheit in zwei von drei Sammlern deutlich weniger GUS an (20 und 50% weniger). Es zeigte sich jedoch auch, dass sich mit der Nachrüsteinheit deutlich mehr Schwermetalle pro Kilogramm TS-Schlamm ansammelten als ohne (bis zu 188% mehr beim Zink). Dies deutet darauf hin, dass schwere Partikel (> 1'500 kg/m^3) sich trotz der grösseren Turbulenzen, welche durch die Nachrüsteinheit im oberen Bereich erzeugt werden, absetzten können. Die leichteren Partikel hingegen werden aufgrund der grösseren Turbulenzen öfters direkt wieder ausgetragen. Zudem hatte der Sammler Nr.1 mit dem grössten Einzugsgebiet die grösste Differenz (-50%) im total abgesetztem GUS. Dies würde die Hypothese bestätigen, da durch das grössere Einzugsgebiet mehr Wasserdurchsatz vorhanden war und folglich auch öfters Turbulenzen im oberen Bereich. Zudem zeigte sich bei den Partikelflusssimulationen derselbe Effekt. Die Fraktion mit einer geringen Dichte (1'020 kg/m^3) wird mit dem Kranz, durch das geringere aktive Volumen oberhalb, direkt wieder ausgespült.

Folglich ist der Kranz in der aktuellen Version noch nicht als Nachrüsteinheit zu empfehlen. Beim Rückhalt von Schwermetallen weist die Nachrüsteinheit im aktuellen Zustand bereits gute Erfolge auf. Bei leichten Partikeln wie bspw. Reifenabrieb besteht der Verdacht, dass diese in der aktuellen Ausführung noch schlechter zurückgehalten werden. Eine Neigung des Kranzes und/oder das Anbringen auf einem tieferen Niveau könnten diesen Effekt jedoch reduzieren und für einen besseren Wirkungsgrad über alle Fraktionen sorgen. Allerdings müsste für eine Neigung im Kranz ein neues Montagekonzept erarbeitet werden. Wenn sich die Partikel durch eine Neigung nicht mehr auf dem Kranz absetzen, besteht die Möglichkeit, die Breite des Kranzes zu erhöhen. Die Simulationen haben gezeigt, dass dadurch die Partikel im unteren Bereich noch weniger aufgewirbelt werden. Es ist durchaus auch denkbar, dass durch ein herabsetzten des Kranzes (um 20 cm) das aktive Volumen oberhalb bereits ausreichend ist und sich leichte Partikel bei einem normalen Regenereignis ebenfalls absetzten können.

10.2 Weitere Simulationen zum Partikelfluss

Die Nachrüsteinheit wurde aufgrund von Simulationsergebnissen entwickelt. Die Simulationen, die dafür durchgeführt wurden, bezogen sich auf die Temperaturen und die kinetische Energie, welche im Wasser vorherrschten. Diese Art von Simulation bildet die Realität sehr gut ab, was anhand der Temperaturmessungen in der Praxis sowohl ohne als auch mit Nachrüsteinheit verifiziert werden konnte. In einem anderen Simulationsmodell können auch Partikelflüsse abgebildet werden. Diese Simulationen sind aufwändiger und benötigen mehr Zeit und sind im Zeitrahmen dieses Projekts nur in kleinem Umfang möglich gewesen. Es wurden einige Tastversuche mit Partikelfluss-Simulationen vom AWEL durchgeführt, um abzuklären, ob der Kranz auch in der hier denselben Effekt aufweist. Diese Simulationen zeigten ebenfalls, dass durch die Nachrüsteinheit bereits abgesetzte Partikel weniger schnell ausgetragen werden.

Mit solch einem Partikelflussmodell könnte bspw. der Einfluss der Neigung beim Kranz abgeschätzt werden. Es ist anzunehmen, dass durch die Neigung im Kranz sich weniger Partikel darauf absetzen und dadurch direkt in den unteren Bereich sedimentieren. Folglich

werden diese bei einem stärkeren Regen weniger aufgewirbelt und ausgetragen. Zudem könnte die Partikelfluss-Simulation Aufschluss darüber geben, ob die Partikel im Sammler auch bei schwachen Regen ausgetragen werden oder nicht. Es ist denkbar, dass bis zu einem bestimmten Wasserdurchsatz sich die Partikel, aufgrund der geringeren Turbulenzen im oberen Bereich, noch absetzen. Hier spielt auch die Höhe des Kranzes eine wesentliche Rolle. Der Kranz könnte aufgrund der bisherigen Erfahrungen noch bis zu 20 cm tiefer platziert werden. Folglich würde sich die turbulente Zone im oberen Bereich vergrössern und somit auch der mögliche Wasserdurchsatz, bis ein negativer Wirkungsgrad auftritt.

10.3 Montage und Reinigung

Die Montage der Nachrüsteinheit "Kranz" konnte einfach bewerkstelligt werden. Hierzu mussten lediglich zwei Haken, welche zur Befestigung der Aufhängung dienten, angebracht werden. Die Nachrüsteinheit kann zusammen- und wieder aufgeschoben werden. Dadurch ist sie innert kürzester Zeit im Sammler platziert. Durch die Kettenglieder der Aufhängung, lässt sie sich auf beliebiger Höhe anbringen. Der gesamte Vorgang inklusive Bohren der zwei Löcher für die Haken und dem nivellieren der Höhe dauerte nicht länger als 20 min. Durch mehrmaliges Montieren der Nachrüsteinheit und der dadurch gewonnenen Erfahrung, kann die Montagezeit sicherlich noch weiter reduziert werden. Einmal angebracht, muss die Nachrüsteinheit auch für die Reinigungsarbeiten nicht mehr entfernt werden. Durch die grosse Öffnung in der Mitte kann der Saugrüssel ungehindert bis zum Grund vordringen. Dadurch entsteht bei den Reinigungsarbeiten kein Mehraufwand im Vergleich zum Sammler ohne Kranz. Durch eine Neigung im Kranz, welche erstrebenswert ist, würde sich die Montage erschweren. Es gibt bereits einige Ansätze, wie eine Einbringung des Kranzes trotz Neigung möglich wäre. Diese sind allerdings entweder sehr viel teurer oder aufwändiger in der Montage.

Anhänge

I **Berechnung Regenintensität** **73**

II **Modellbeschreibung CFD Simulation** **74**

III **Skizzen aller simulierten Nachrüsteinheiten** **76**

IV **Absetzverhalten Schlamm** **82**

V **Partikelgrössenverteilung & Durchgangs-summenkurve des Schlamms für die Versuche bei der Europabrücke** **83**

VI **Analyseergebnisse der Bachema** **84**

VII **Temperaturprofil über die Versuchsdauer aller Praxisversuche** **87**

I Berechnung Regenintensität

Kürzel	Beschreibung	Einheit
i (t,T)	Intensität eines Regens der Dauer t und einer Wiederkehrperiode T	[mm/h]
t	Regendauer	Stunden [h]
T	Wiederkehrperiode: Intervall, in dem eine bestimmte Regenintensität im Mittle mindesten einmal erreicht oder überschritten wird	Jahre [a]
a_T	Koeffizient in Abhängigkeit der Region	-
b_T	Koeffizient in Abhängigkeit der Region	-
E	Einzugsgebiet Schlammsammler	[m^2]
Q	Volumenstrom	[l/s]

$$\boldsymbol{i(t,T) = \frac{a_T}{t + b_T}}$$

$$\boldsymbol{i(0.17, 0.5) = 46.39 \frac{mm}{h}}$$

$$\boldsymbol{i(0.17, 1) = 61.22 \frac{mm}{h}}$$

Auf ein Einzugsgebiet eines Schlammsammlers in der Stadt Zürich von E=250 m^2 ergeben sich folgende Volumenströme:

$$\boldsymbol{Q_{T0.5} = \frac{i \times E}{3600} = 3.22\ l/s}$$

$$\boldsymbol{Q_{T1} = \frac{i \times E}{3600} = 4.25\ l/s}$$

II Modellbeschreibung CFD Simulation

Gleichungssystem und Numerische Implementation

Für die Simulationen wurde ANSYS CFX 2019R3 verwendet. ANSYS CFX ist ein Industriestandard zur Berechnung vieler Strömungsphänomene und dient zur iterativen Lösung der Navier-Stokes (N-S) Gleichungen.

Die Simulationen wurden inkompressibel und mit einem iterativen Zeitschrittverfahren zweiter Ordnung durchgeführt. Der Zeitschritt betrug 0.05 s. Die beiden Fluide wurden durch ein "*Volume of fluid*" Modell abgebildet. Um trotz konstanten Dichten den Einfluss der unterschiedlichen Temperaturen zu berücksichtigen, wird die Boussinesq-Approximation verwendet. Sie fügt einen Quellenterm proportional zu den Temperaturdifferenzen ein. Als Turbulenzmodell wurde das k-omega SST Modell gewählt.

Simulationsmethode

Die Parameter der Simulation gelten für alle Geometrievarianten. Die Simulationsdomäne wurde analog zu den Messungen mit einem Wasserstand von 0.8 m und einer Temperaturschichtung (siehe *Abb. 39* initialisiert. Ausserdem wurde der hydrostatische Druck ($\boldsymbol{P_{hyd}} = \boldsymbol{\rho g z}$) innerhalb der von Wasser benetzten Region definiert.

Die Simulationsdauer betrug 300 s bzw. 6'000 Zeitschritte. Dies war genug Zeit, um den *First Flush* und die weitere Entwicklung der Verwirbelungen im Schlammsammler abzubilden. Das Konvergenzkriterium für jeden Zeitschritt betrug 1.0E-4.

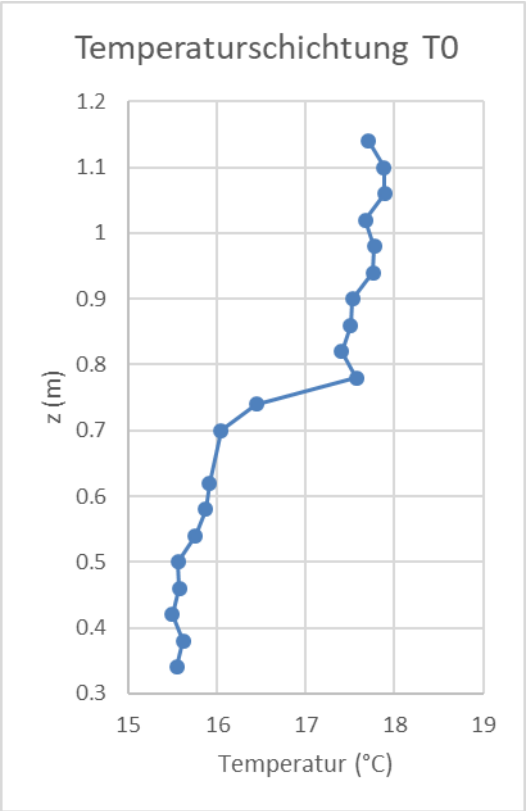


Abb. 39: Initiale Temperaturschichtung bei einem Wasserstand von ca. 0.8 m.

Mesh

Für alle Geometrien wurde ein neues Netz, jedoch mit den gleichen Parametern erstellt. Die maximale Elementgrösse betrug 0.05 m. An den Wänden wurden zehn Randschichten mit einer Wachstumsrate von 1.2 erstellt.

Randbedingungen

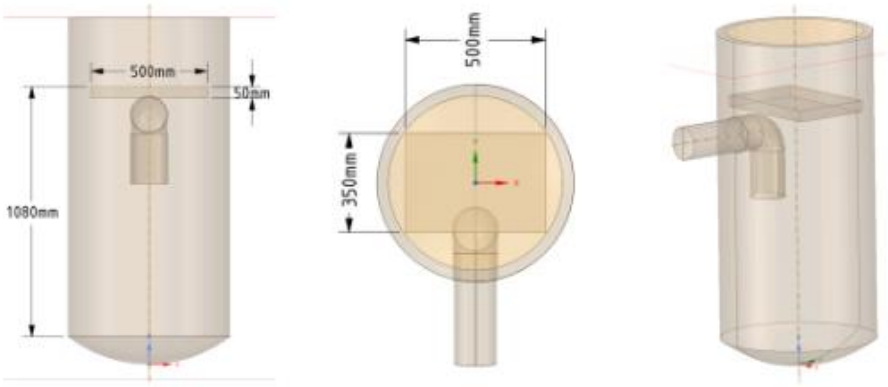
Für die Definition der Randbedingungen wurde die Messung des Regenereignisses am 30. September 2018 gewählt. An der Einlassbedingung ist ein Massenstrom von 2 kg/s mit einer konstanten Temperatur von 18.6 °C definiert. Für den Auslass des Tauchbogens und die Öffnung des Auffangbehälters über dem Schlammsammler ist eine Auslassrandbedingung mit konstantem Druck definiert. Die Wände des Schlammsammlers sind als no-slip Randbedingungen definiert.

Tab. 23: Fluideigenschaften

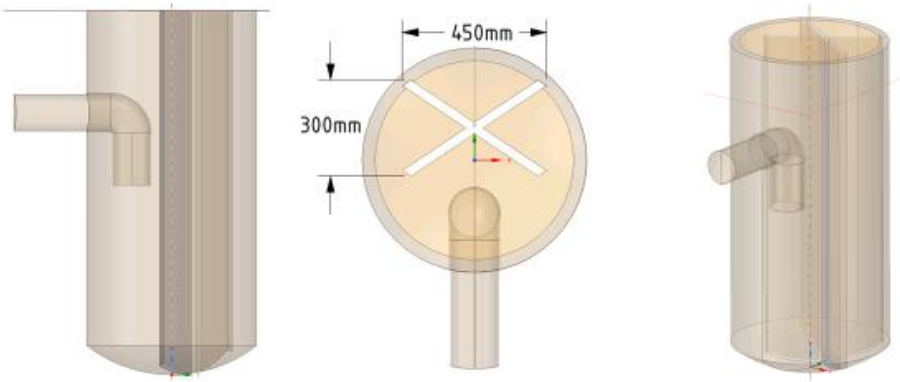
	Einheiten	**Wasser**	**Luft (25 °C)**
Dichte $\boldsymbol{\rho}$	Kg/m^3	997.0	1.185
Dynamische Viskosität η	Pa s	8.899E-4	1.831E-5
Wärmeausdehnung γ	K^{-1}	2.57E-4	3.356E-3

III Skizzen aller simulierten Nachrüsteinheiten

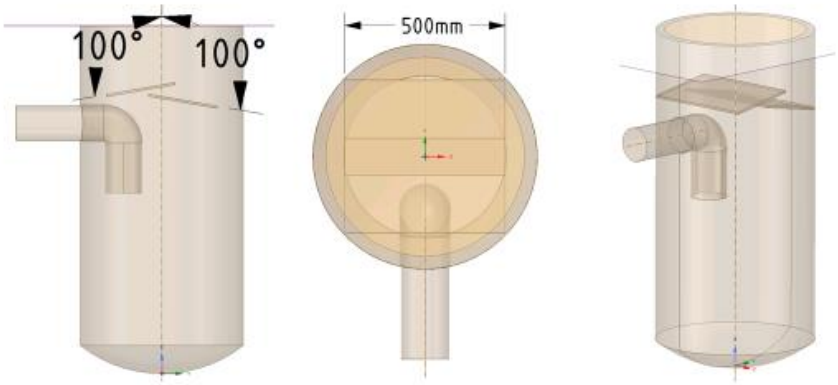
Variante 1 - Platte



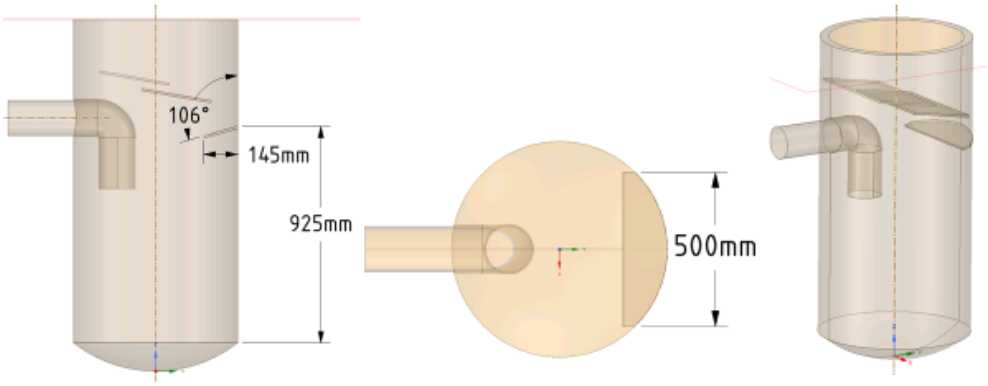
Variante 2 - Kreuz



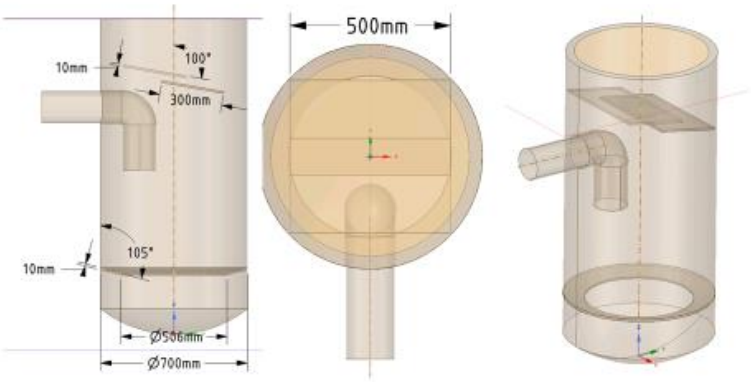
Variante 3 - Platten



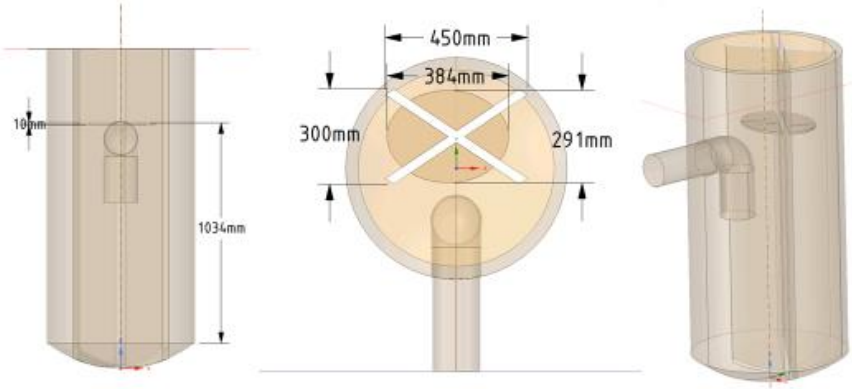
Variante 4 – Drei Platten



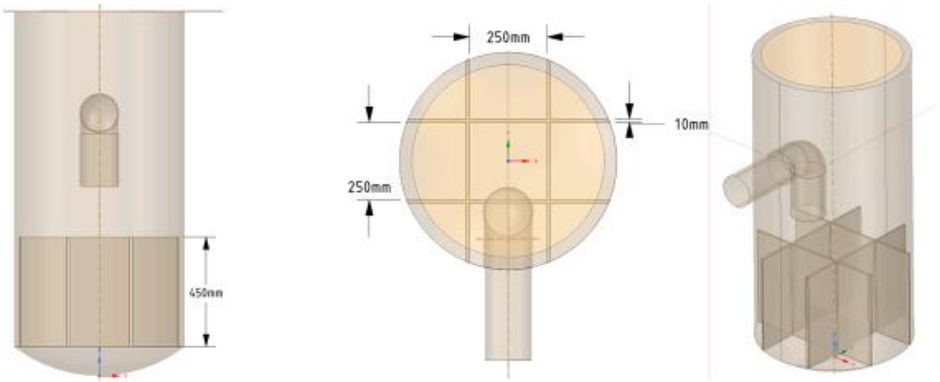
Variante 5 – Zwei Platten mit Kranz



Variante 6 – Kreuz mit Platte



Variante 7 - Kreuzwand



Kranz V2

Breiter Kranz (20cm)
Oben (50cm ab Boden)

Kranz V2.1

Breiter Kranz (20cm)
Unten (30cm ab Boden)

Kranz V2.1.2

Schmaler Kranz (15cm)
Unten (30cm ab Boden)

Kranz V2.2

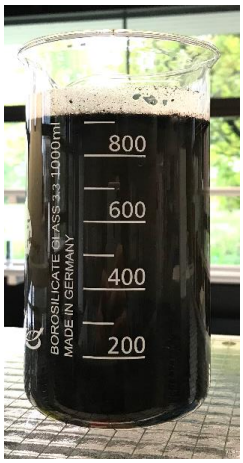
Schmaler Kranz (15cm)
Oben (30cm ab Boden)

Kranz V3

Gerader Ausführung
Schmaler Kranz (15cm)
Unten (30cm ab Boden)

IV Absetzverhalten Schlamm

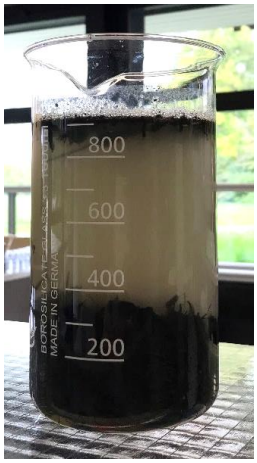
Nach 5 min



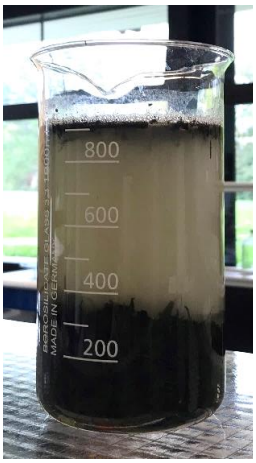
Nach 30 min

Nach 60 min

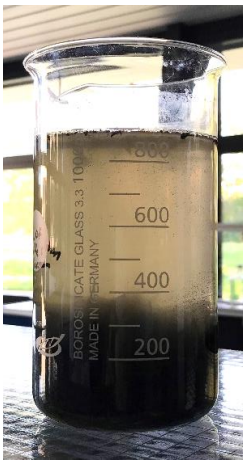
Nach 120 min



Nach 150 min

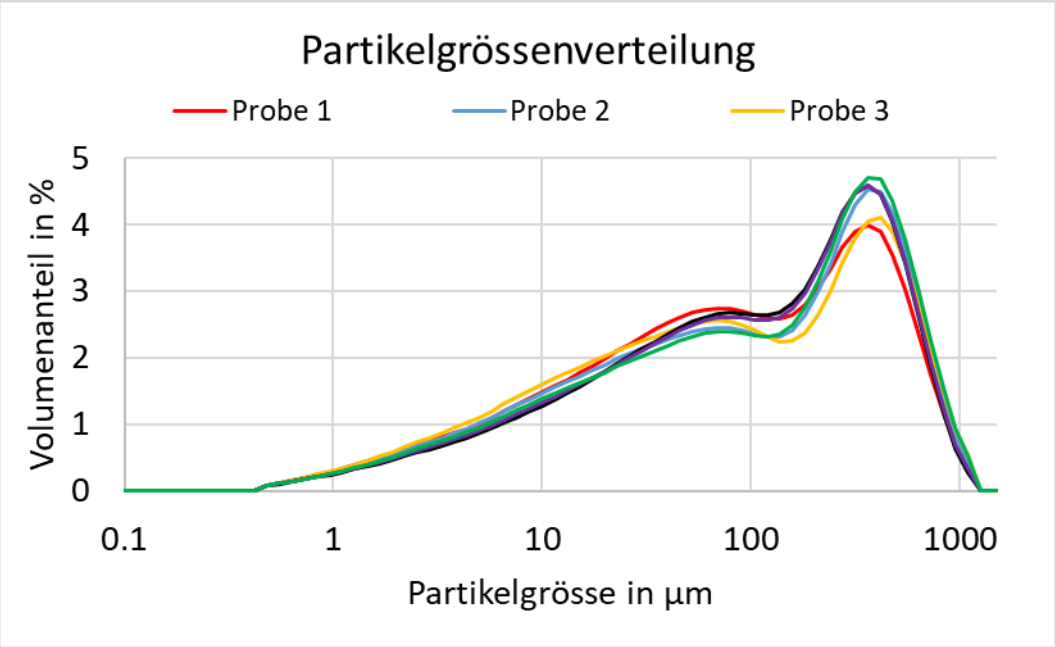


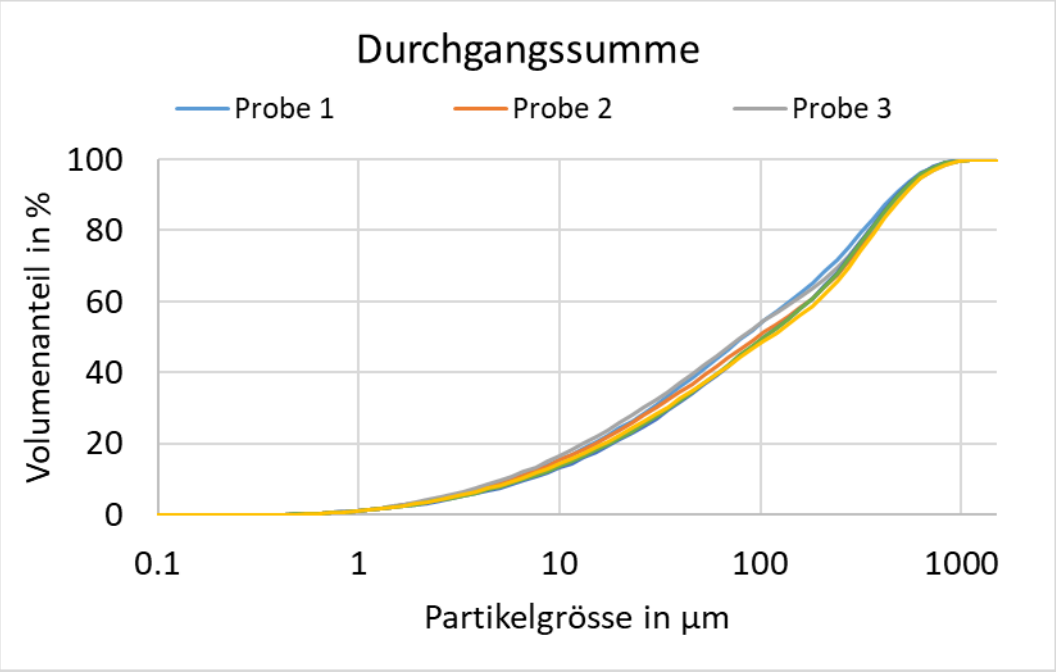
Nach 360 min



Nach einem Tag

V Partikelgrössenverteilung & Durchgangs-summenkurve des Schlamms für die Versuche bei der Europabrücke





VI Analyseergebnisse der Bachema

Langzeitversuch in Richterswil Periode bis 2019

Objekt: **Schlammsammler Richterswil**
Auftraggeber: Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)
Auftrags-Nr. Bachema: 201909124

Anhang: Element-Übersichtsanalyse XRF

Bachema AG
Rütistrasse 22
CH-8952 Schlieren

Telefon
+41 44 738 39 00
Telefax
+41 44 738 39 90
info@bachema.ch
www.bachema.ch

Chemisches und mikrobiologisches Labor für die Prüfung von Umweltproben (Wasser,Boden, Abfall, Recyclingmaterial) Akkreditiert nach ISO 17025 STS-Nr. 0064

Probenbezeichnung			Badi 1079.32g (alte Bachema Nr. 19/31246) 40076	Bahnhof 1239.82g (alte Bachema Nr. 19/31244) 40074	Mitte 1108.87g (alte Bachema Nr. 19/31245) 40075		VVEA Typ A (U)	VVEA Typ B
Schwermetalle								
Antimon	mg/kg TS	Sb	6	7	11		3	30
Arsen	mg/kg TS	As	4	3	4		15	30
Blei	mg/kg TS	Pb	25	25	59		50	500
Cadmium	mg/kg TS	Cd	<0.5	<0.5	<0.5		1	10
Chrom	mg/kg TS	Cr	23	31	35		50	500
Kobalt	mg/kg TS	Co	25	27	27			
Kupfer	mg/kg TS	Cu	120	130	200		40	500
Molybdän	mg/kg TS	Mo	4	3	5			
Nickel	mg/kg TS	Ni	20	19	26		50	500
Quecksilber	mg/kg TS	Hg	<0.1	<0.1	<0.1		0.5	2
Thallium	mg/kg TS	Tl	<2	<2	<2			
Zink	mg/kg TS	Zn	520	560	930		150	1'000
Zinn	mg/kg TS	Sn	21	24	43			
Seltene Erden und übrige Elemente								
Barium	mg/kg TS	Ba	190	200	200			
Cäsium	mg/kg TS	Cs	<10	<10	<10			
Cer	mg/kg TS	Ce	17	12	21			
Gallium	mg/kg TS	Ga	4	2	4			
Germanium	mg/kg TS	Ge	<5	<5	<5			
Lanthan	mg/kg TS	La	<10	<10	13			
Neodym	mg/kg TS	Nd	<20	<20	<20			
Niob	mg/kg TS	Nb	<10	<10	<10			
Rubidium	mg/kg TS	Rb	21	<20	26			
Selen	mg/kg TS	Se	<2	<2	<2			
Silber	mg/kg TS	Ag	<2	<2	<2			
Strontium	mg/kg TS	Sr	160	240	190			
Uran	mg/kg TS	U	<10	<10	<10			
Vanadium	mg/kg TS	V	18	24	32			
Wolfram	mg/kg TS	W	<10	<10	<10			
Halogenide / Schwefel								
Brom	mg/kg TS	Br	2	3	3			
Chlor	mg/kg TS	Cl	980	650	1'500			
Jod	mg/kg TS	I	<10	<10	<10			
Schwefel	mg/kg TS	S	2'400	2'600	3'700			
Matrixelemente								
Aluminium (als Oxid)	% v. TS	Al_2O_3	2.7	2.6	3.1			
Calcium (als Oxid)	% v. TS	CaO	9.0	19	12			
Eisen (als Oxid)	% v. TS	Fe_2O_3	1.9	1.7	2.3			
Kalium (als Oxid)	% v. TS	K_2O	0.46	0.45	0.54			
Magnesium (als Oxid)	% v. TS	MgO	1.1	1.5	1.3			
Mangan (als Oxid)	% v. TS	MnO	<0.03	<0.03	0.03			
Phosphor (als Oxid)	% v. TS	P_2O_5	0.27	0.25	0.28			
Silizium (als Oxid)	% v. TS	SiO_2	24	28	26			
Titan (als Oxid)	% v. TS	TiO_2	0.16	0.16	0.18			

							Referenzwert	
Probenbezeichnung			**Badi 1079.32g**	**Bahnhof 1239.82g**	**Mitte 1108.87g**		VVEA Typ A (U)	VVEA Typ B
Proben-Nr. Bachema			31246	31244	31245			
Tag der Probenahme			11.07.19	11.07.19	11.07.19			
Probenparameter								
Angelieferte Probemenge	kg		1.3	1.3	1.2			
Trockensubstanz (105°C)	%		59.2	69.1	51.2			

Langzeitversuch in Richterswil Periode bis 2020

Objekt: **Schlammsammler Richterswil**
Auftraggeber: HSR Hochschule für Technik Rapperswil
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik UMTEC
Auftrags-Nr. Bachema: 202007505

Anhang: Element-Übersichtsanalyse XRF

Bachema AG
Rütistrasse 22
CH-8952 Schlieren

Telefon
+41 44 738 39 00
Telefax
+41 44 738 39 90
info@bachema.ch
www.bachema.ch

Chemisches und mikrobiologisches Labor für die Prüfung von Umweltproben (Wasser,Boden, Abfall, Recyclingmaterial)
Akkreditiert nach ISO 17025
STS-Nr. 0064

Probenbezeichnung		Nr. 1 Bahnhof 34927	Nr. 2 Mitte 34928	Nr. 3 Badi 34929		VVEA Typ A (U)	VVEA Typ B
Schwermetalle							
Antimon	mg/kg TS Sb	11	11	13		3	30
Arsen	mg/kg TS As	5	5	6		15	30
Blei	mg/kg TS Pb	35	36	46		50	500
Cadmium	mg/kg TS Cd	<0.5	<0.5	<0.5		1	10
Chrom	mg/kg TS Cr	42	38	42		50	500
Kobalt	mg/kg TS Co	35	30	37			
Kupfer	mg/kg TS Cu	240	220	280		40	500
Molybdän	mg/kg TS Mo	6	6	7			
Nickel	mg/kg TS Ni	28	29	34		50	500
Quecksilber	mg/kg TS Hg	<0.1	0.1	0.1		0.5	2
Thallium	mg/kg TS Tl	<2	<2	<2			
Zink	mg/kg TS Zn	1'300	1'300	1'500		150	1'000
Zinn	mg/kg TS Sn	52	51	57			
Seltene Erden und übrige Elemente							
Barium	mg/kg TS Ba	150	170	280			
Cäsium	mg/kg TS Cs	<10	<10	<10			
Cer	mg/kg TS Ce	15	23	49			
Gallium	mg/kg TS Ga	5	5	6			
Germanium	mg/kg TS Ge	<5	<5	<5			
Lanthan	mg/kg TS La	<10	11	30			
Neodym	mg/kg TS Nd	<20	<20	75			
Niob	mg/kg TS Nb	<10	<10	<10			
Rubidium	mg/kg TS Rb	23	27	30			
Selen	mg/kg TS Se	<2	<2	<2			
Silber	mg/kg TS Ag	<2	<2	<2			
Strontium	mg/kg TS Sr	170	150	90			
Uran	mg/kg TS U	<10	<10	<10			
Vanadium	mg/kg TS V	31	33	38			
Wolfram	mg/kg TS W	<10	<10	<10			
Halogenide / Schwefel							
Brom	mg/kg TS Br	3	3	4			
Chlor	mg/kg TS Cl	340	250	200			
Jod	mg/kg TS I	<10	<10	<10			
Schwefel	mg/kg TS S	3'800	3'700	4'500			
Matrixelemente							
Aluminium (als Oxid)	% v. TS Al_2O_3	3.3	3.4	3.7			
Calcium (als Oxid)	% v. TS CaO	14	11	4.0			
Eisen (als Oxid)	% v. TS Fe_2O_3	2.6	2.6	3.0			
Kalium (als Oxid)	% v. TS K_2O	0.56	0.57	0.58			
Magnesium (als Oxid)	% v. TS MgO	1.3	1.2	1.1			
Mangan (als Oxid)	% v. TS MnO	<0.03	<0.03	<0.03			
Phosphor (als Oxid)	% v. TS P_2O_5	0.30	0.29	0.38			
Silizium (als Oxid)	% v. TS SiO_2	26	27	26			
Titan (als Oxid)	% v. TS TiO_2	0.20	0.20	0.23			

						Referenzwert	
Probenbezeichnung		**Nr. 1 Bahnhof**	**Nr. 2 Mitte**	**Nr. 3 Badi**		*VVEA Typ A (U)*	*VVEA Typ B*
Proben-Nr. Bachema		34927	34928	34929			
Tag der Probenahme		20.07.20	20.07.20	20.07.20			
Probenparameter							
Angelieferte Probemenge	kg	1.3	1.1	1.0			
Trockensubstanz (105°C)	%	48.0	51.8	38.8			

Praxisversuche Europabrücke

Objekt: **Schlammsammler Europabrücke**
Auftraggeber: Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)
Auftrags-Nr. Bachema: 202005053

Bachema AG
Rütistrasse 22
CH-8952 Schlieren

Telefon
+41 44 738 39 00
Telefax
+41 44 738 39 90
info@bachema.ch
www.bachema.ch

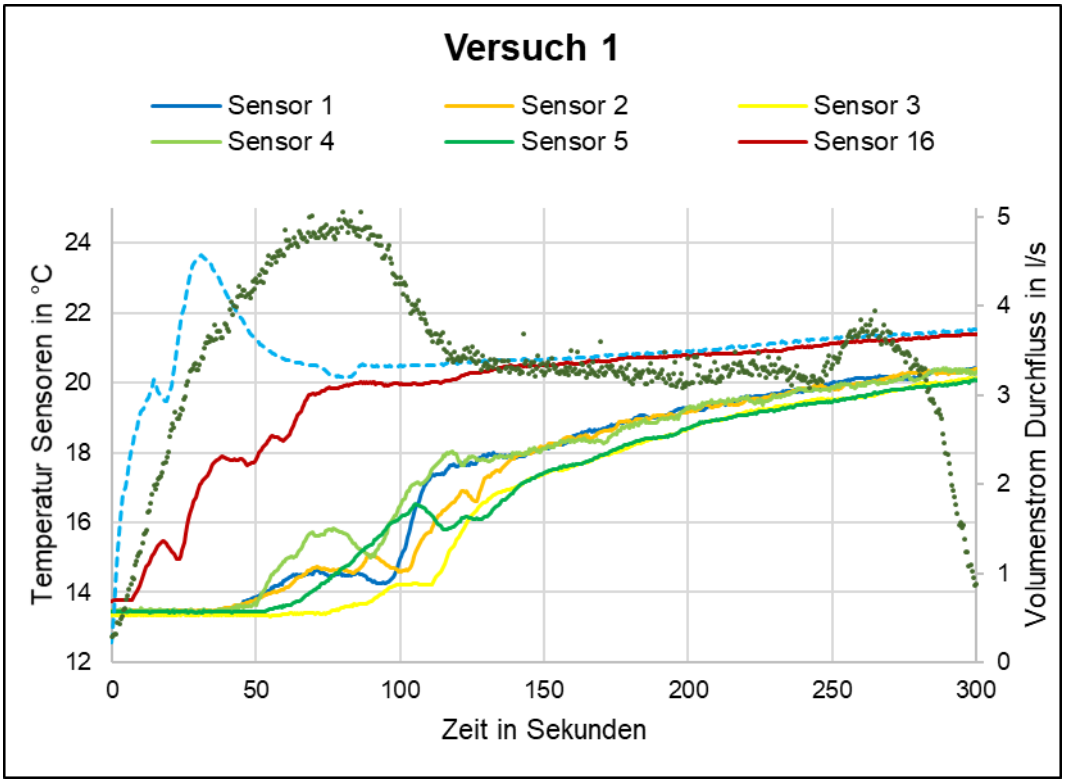
Chemisches und mikrobiologisches Labor für die Prüfung von Umweltproben (Wasser,Boden, Abfall, Recyclingmaterial) Akkreditiert nach ISO 17025 STS-Nr. 0064

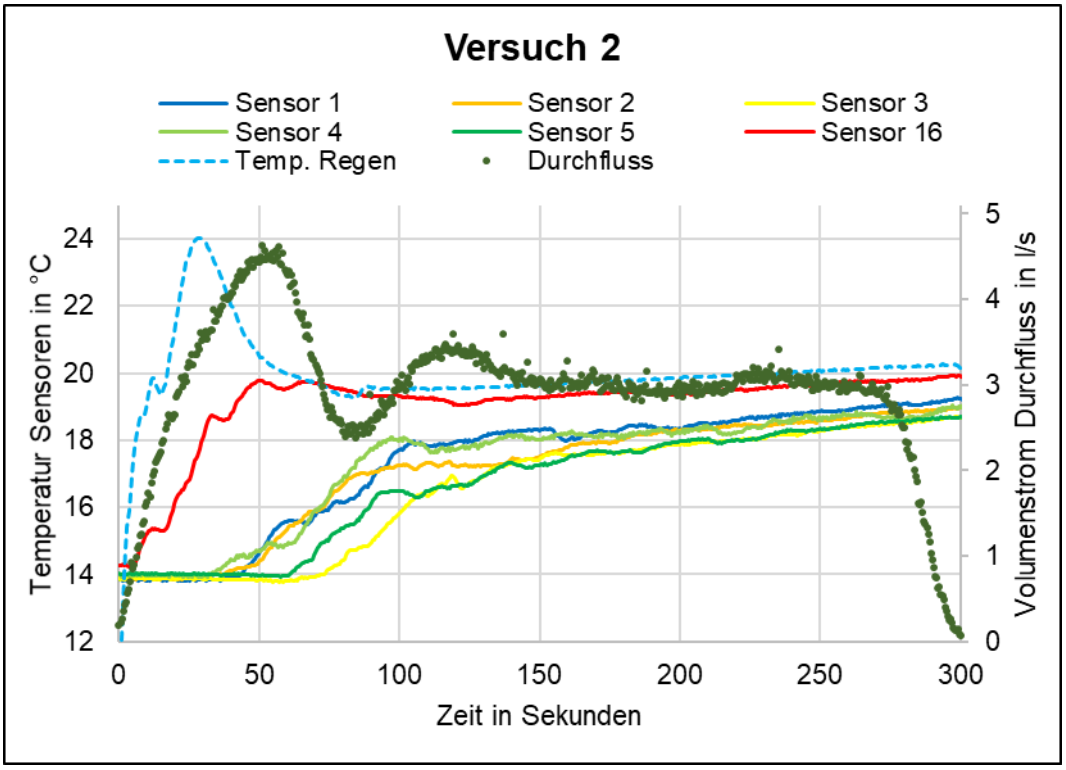
Probenbezeichnung		AM Total	AM >2mm	AM 0.5-2mm	AM <0.5mm	Referenzwert VVEA Typ A (U)	Referenzwert VVEA Typ B
Proben-Nr. Bachema		24130	24131	24132	24135		
Tag der Probenahme		28.04.20	28.04.20	28.04.20	28.04.20		
Schwermetalle aus Schwermetall-Fingerprint (XRF, Hg (AAS), vollständig s. Anhang)							
Antimon	mg/kg TS Sb	4	3	3	<2	3	30
Arsen	mg/kg TS As	5	7	5	4	15	30
Blei	mg/kg TS Pb	59	120	66	76	50	500
Cadmium	mg/kg TS Cd	0.7	1.5	0.9	<0.5	1	10
Chrom	mg/kg TS Cr	62	69	53	69	50	500
Kobalt	mg/kg TS Co	11	12	<10	19		
Kupfer	mg/kg TS Cu	75	58	66	67	40	500
Molybdän	mg/kg TS Mo	5	5	3	4		
Nickel	mg/kg TS Ni	43	50	40	33	50	500
Quecksilber	mg/kg TS Hg	<0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	2
Thallium	mg/kg TS Tl	<2	<2	<2	<2		
Zink	mg/kg TS Zn	250	230	250	290	150	1'000
Zinn	mg/kg TS Sn	21	43	25	57		

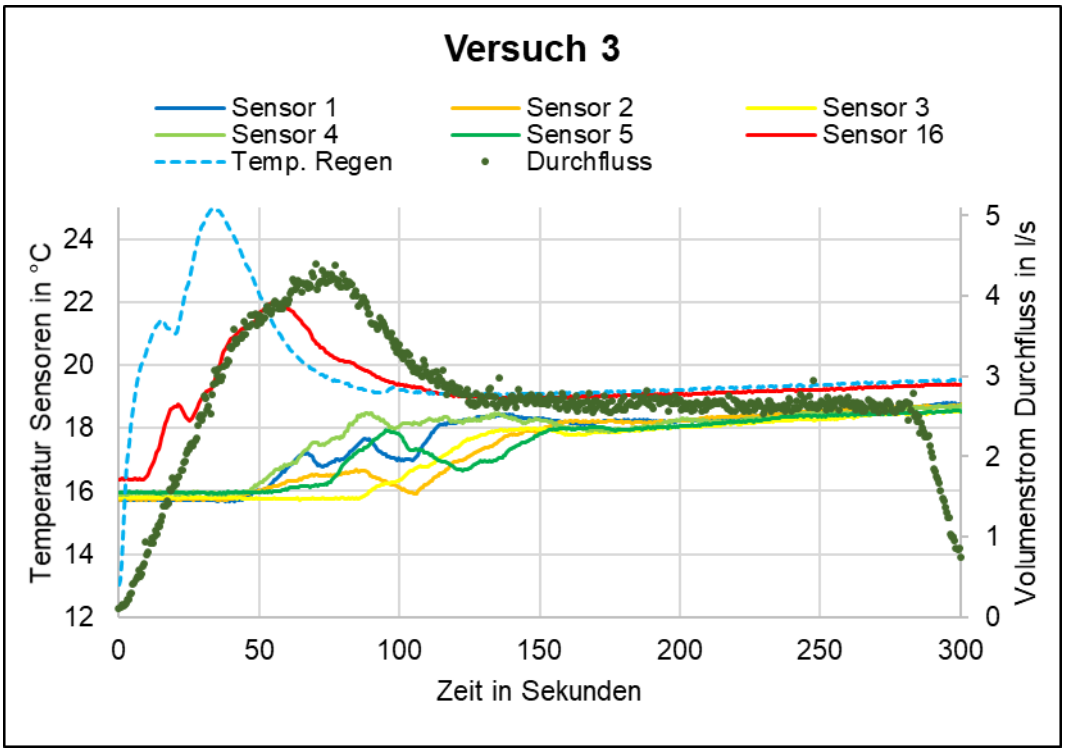
Probenbezeichnung		SS 1 M	SS 2 M	SS 3 M	SS 5 M	Referenzwert GSchV Einl. in Gew. Industrie-abwasser	Referenzwert GSchV Einl. in Kanal. Industrie-abwasser
Proben-Nr. Bachema		24136	24137	24138	24139		
Tag der Probenahme		06.05.20	07.05.20	08.05.20	13.05.20		
Physikalisch-chemische Parameter							
Gesamte ungelöste Stoffe	mg/l	79	77	110	120	20	
Elemente und Schwermetalle							
Kupfer (gesamt) ICP	mg/l Cu	0.031	0.020	0.021	0.029	0.5	1
Zink (gesamt) ICP	mg/l Zn	0.08	0.03	0.03	0.07	2	2

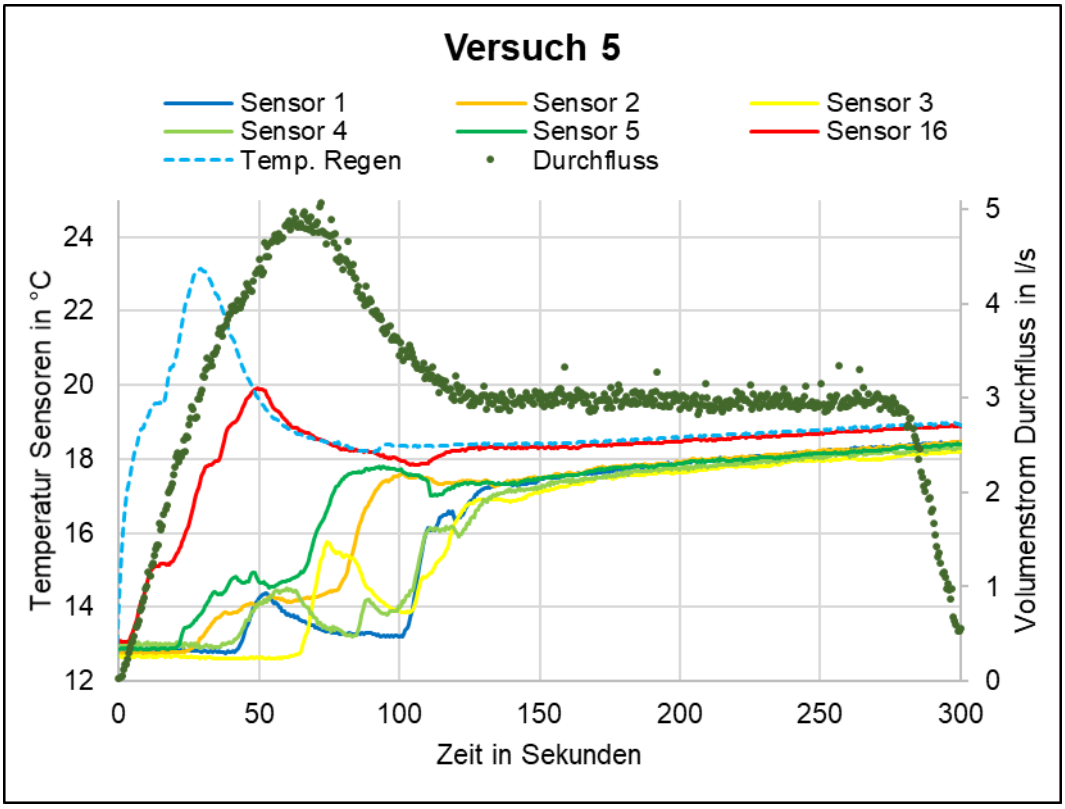
Probenbezeichnung		SS 6 M	SS 7 M			Referenzwert GSchV Einl. in Gew. Industrie-abwasser	Referenzwert GSchV Einl. in Kanal. Industrie-abwasser
Proben-Nr. Bachema		24140	24141				
Tag der Probenahme		14.05.20	15.05.20				
Physikalisch-chemische Parameter							
Gesamte ungelöste Stoffe	mg/l	100	81			20	
Elemente und Schwermetalle							
Kupfer (gesamt) ICP	mg/l Cu	0.020	0.022			0.5	1
Zink (gesamt) ICP	mg/l Zn	0.33	0.05			2	2

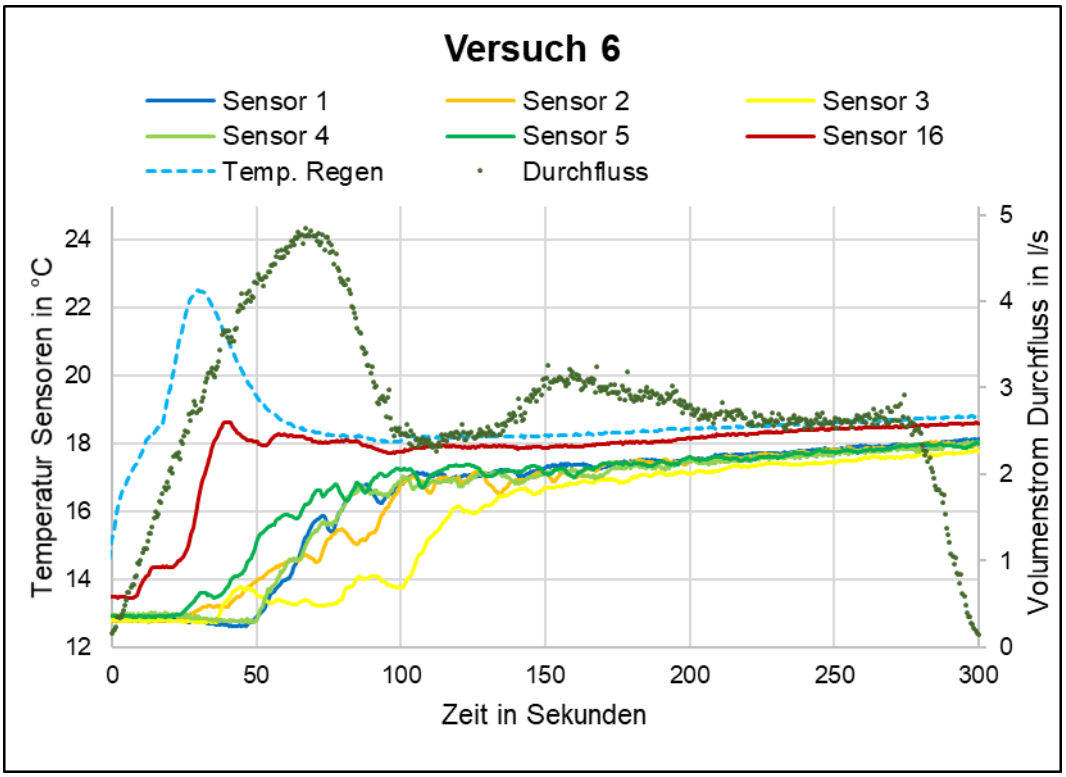
VII Temperaturprofil über die Versuchsdauer aller Praxisversuche

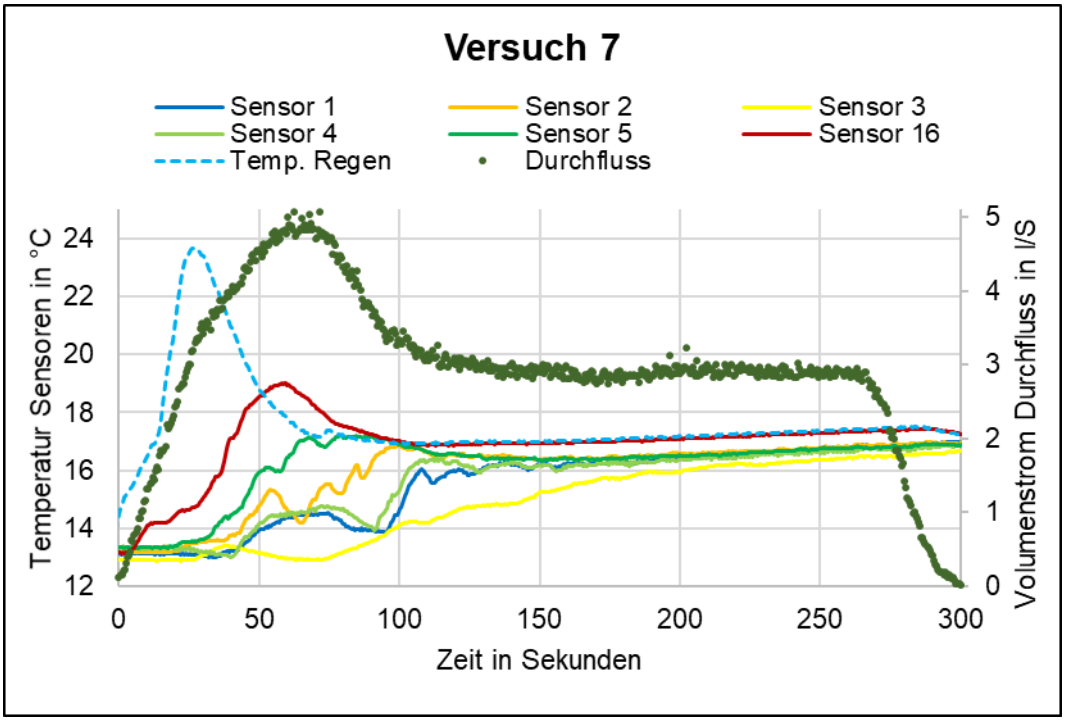





Versuch 3
Sensor 1
Sensor 2
Sensor 3
Sensor 4
Sensor 5
Sensor 16
Temp. Regen
Durchfluss
Temperatur Sensoren in °C
Volumenstrom Durchfluss in l/s
Zeit in Sekunden
12
14
16
18
20
22
24
0
1
2
3
4
5
0
50
100
150
200
250
300


Versuch 5
Sensor 1
Sensor 2
Sensor 3
Sensor 4
Sensor 5
Sensor 16
Temp. Regen
Durchfluss
Temperatur Sensoren in °C
Volumenstrom Durchfluss in l/s
Zeit in Sekunden
12
14
16
18
20
22
24
0
1
2
3
4
5
0
50
100
150
200
250
300


Versuch 6
Sensor 1
Sensor 2
Sensor 3
Sensor 4
Sensor 5
Sensor 16
Temp. Regen
Durchfluss
Temperatur Sensoren in °C
Volumenstrom Durchfluss in l/s
Zeit in Sekunden
12
14
16
18
20
22
24
0
1
2
3
4
5
0
50
100
150
200
250
300


Versuch 7
Sensor 1
Sensor 2
Sensor 3
Sensor 4
Sensor 5
Sensor 16
Temp. Regen
Durchfluss
Temperatur Sensoren in °C
Volumenstrom Durchfluss in l/S
Zeit in Sekunden
12
14
16
18
20
22
24
0
1
2
3
4
5
0
50
100
150
200
250
300

Glossar

Begriff	Bedeutung
CFD	*Computational Fluid Dynamics, Strömungssimulation auf Basis von Computermodellen*
Cu	Kupfer
Cr	Chrom
ERZ	Entsorgung und Recycling Zürich
First-flush	Erster Schadstoffeintrag bei einem Regenereignis
GUS	Gesamte ungelöste Stoffe
GSchV	Gewässerschutzverordnung
National Instruments	Die Firma National Instruments verkauft Module, welche die Verarbeitung, Übermittlung und Speicherung auf einen Computer ermöglichen.
Pb	Blei
Sammler	Schlammsammler bzw. der Schacht im Strassenablauf
tkE	Turbulente kinetische Energie
TS	Trockensubstanz
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
Zn	Zink
WTA *PMV*	Wechseltextanzeige (WTA) *panneau à messages variables (PMV)*
WWW	Wechselwegweisung (WWW) *panneau de direction à indications variables (WWW)*

Literaturverzeichnis

Dokumentation

[1]	«Gewässerschutzverordnung (GSchV), SR 814.201» 2020.
[2]	M. Steiner, P. Goosse, F. Rutz, R. Brodmann und A. Pazeller, «Strassenabwasserbehandlungsverfahren: Stand der Technik,» ASTRA Bundesamt für Strassen, Bern, 2010.
[3]	D. Göbbels, H. Häusermann, E. Suter, K. Venzin und M. Pezzatti, «Gewässerschutz an Strassen, Strassenentwässerung,» TBA Zürich, AWEL, Zürich, 2014.
[4]	H. Häusermann, M. Boller, M. Steiner und J. Mieleitner, «Belastung des Zürichsees durch die Strassenentwässerung,» Baudirektion Kanton Zürich, Zürich, 2009.
[5]	T. K. &. S. Zürich, «Merkblätter Strassenentwässerung - Dezentrale technische Systeme zur Behandlung von Strassenabwasser,» Zürich, 2017.
[6]	C. Meier, M. Krüttli und M. Steiner, «Strasse und Verkehr: Eignung von Absetzbecken mit und ohne Lamellen,» VSS Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2014.
[7]	EAWAG, «Schadstoff im Strassenabwasser einer befahrenen Strasse und deren Retention mit neuartigen Filterpaketen aus Geotextil und Adsorbermaterial,» 2006.
[8]	M. Steiner, «Evaluation der Leistungsfähigkeit und Optimierung der Strassenabläufe (Schlammsammler) und Filterscäke an der Kantonsstrasse in Männedrof,» wst21, 2016.
[9]	H. Sommer, M. Post und F. Estupinan, «Dezentrale Behandlung von Strassenabflüssen,» Berlin, 2015.
[10]	Normenkommission Tiefbau- und Entsorgungsdepartement, TED Normen Bau von Entwässerungsanlagen und Strassen, Zürich, 2016.
[11]	Gampp, Interviewee, ERZA, Angaben des Fachstellenleiter bei der Beischitung der Reinigungsarbeiten. [Interview]. 18 September 2018.
[12]	W. Steiner, Interviewee, Erfahrungsbericht Baudirektion TBA Zürich. [Interview]. 2019.
[13]	«Erste technische Strassenabwasser-Behandlungsanlage der Schweiz,» Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2010.
[14]	«Testanlage Europabrücke - Dezentrales Filterschachtsystem CBB friwa-saba Filter Prototyp II,» Holinger, Winterthur, 2017.
[15]	w. M. Steiner, «Dezentrale Behandlung von Strassenabwasser,» Zürich, 2019.
[16]	ASTRA, «Bundesamt für Statistik, Strassenverkehrszählung,» 2020. [Online]. Available: https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/schweiz-strassenverkehrszaehlung.html. [Zugriff am 2020].

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11.12.2020

Grunddaten

Projekt-Nr.:	VSS_2017/225
Projekttitel:	Optimierung einer Nachrüsteinheit für Strassenabläufe (Schlammsammler)
Enddatum:	23.11.2020

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Durch den Abgleich des Modells mit der Realität wurde eine solide Simulationsgrundlage geschaffen, welche es ermöglichte, am Computer die Auswirkungen verschiedener Nachrüsteinheiten auszuwerten. Die beste Nachrüsteinheit wurde in die Praxis umgesetzt und in Kurz- sowie Langzeitversuchen getestet. Die Kurzzeitversuche beinhalteten einmalige Regenereignisse von fünf Minuten und fanden auf der Versuchsanlage statt. Bei den Langzeitversuchen wurde die Nachrüsteinheit in normale Strassenabläufe eingebaut und ein Vergleich über den Zeitraum von einem Jahr aufgestellt.
Sowohl die Messungen auf der Versuchsanlage als auch die Simulationen zeigten, dass der Wasserstrom in den Schlammsammler hauptsächlich am Rande entlangläuft. Aufgrund dessen erwies sich ein Kranz am Rand der Sammler mit einer Breite von 20 cm als wirkungsvolle Massnahme (Nachrüsteinheit), um den Wasserfluss in die unteren Schichten zu reduzieren. Zudem ist dadurch eine ausreichend grosse Öffnung in der Mitte des Schlammsammlers für das Aussaugen des abgesetzten Schlamms vorhanden. Es zeigte sich, dass sich durch die Nachrüsteinheit die Zeit verdoppelte, bis das Wasser in die unteren Schichten vorgedrungen war. Folglich kann von einer reduzierten Aufwirbelung des bereits abgesetzten Schlamms ausgegangen werden. Allerdings verkleinerte die Nachrüsteinheit das Volumen, welches für den Wasserdurchsatz vorhanden war, wodurch im oberen Bereich grössere Turbulenzen auftraten. Dies hatte zur Folge, dass sich neu eingetragene Partikel vor allem während stärkeren Regenereignissen schlechter absetzten. Es ist noch unklar, bei welcher Regenintensität sich der kritische Punkt befindet, bei dem die Absetzleistung zu gering ist und den besseren Rückhalt wieder zunichte macht. Zudem wurde eine weitere Schwachstelle der Nachrüsteinheit identifiziert. Die Nachrüsteinheit (Kranz), welche eine Fläche von 20 cm rund um den Schlammsammler im 90° Winkel zur Seitenwand bildet, bietet eine Ablagefläche für den eingetragenen Schlamm. Folglich lagerte sich ein Teil des Schlamms auf der Nachrüsteinheit ab und sedimentierte nicht in die unteren Schichten. Es wird vermutet, dass ein Teil davon bei einem erneuten Regenereignis leichter wieder aufgewirbelt und ausgetragen wird. Ein gewisser Anteil bleibt jedoch auch auf der Nachrüsteinheit liegen. Wie gross das Verhältnis der beiden Teile ist, ist jedoch unklar. Eine Neigung im Kranz könnte hierbei Abhilfe schaffen und dafür sorgen, dass der Schlamm besser in den unteren Bereich rutscht und dadurch der Wirkungsgrad angehoben wird.
Über alle 6 Kurzzeitversuche konnte ein verbesserter GUS-Rückhalt von 11 % und Zink-Rückhalt von 22 % verzeichnet werden. Hierbei zeigte sich jedoch erneut die Problematik, dass sich ein Teil der sedimentierten Partikel auf dem Kranz (Nachrüsteinheit) befanden und nicht bis in die unteren Schichten gelangen.
Die Langzeitversuche ergaben in 2 von 3 Schlammsammlern durch die Nachrüsteinheit einen schlechteren GUS-Rückhalt (20 und 50 %) jedoch einen deutlich besseren Schwermetall-Rückhalt. Es wurde mit der Nachrüsteinheit bis zu 95 % mehr Blei, 94 % mehr Chrom, 147 % mehr Kupfer und 206 % mehr Zink zurückgehalten. Diese Angaben sind jedoch lediglich Erfahrungswerte aus den Langzeitversuchen, welche, aufgrund der unterschiedlichen Niederschlagsverhältnisse und Verkehrsaufkommen der beiden Messperioden mit Vorsicht zu betrachten sind. Die einjährige Messperiode mit Nachrüsteinheit beinhaltete die Monate März bis Juni 2020. Während dieser Zeit war durch den Lockdown das Verkehrsaufkommen reduziert. Es ist davon auszugehen, dass bei normalem Verkehrsaufkommen (wie in der Messperiode im Vorjahr ohne Nachrüsteinheit) der Schwermetall-Rückhalt im Vergleich noch grösser gewesen wäre.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Es wurde eine Nachrüsteinheit entwickelt, welche den Rückhalt von Schwermetallen in Strassenabläufen steigert. Zugleich werden die Reinigungsarbeiten nicht beeinflusst und es entsteht auch keinen Mehraufwand. Die Nachrüsteinheit hat jedoch noch Optimierungspotential und sollte vor dem flächendeckenden Einsatz vorab noch weiterentwickelt werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Nachrüsteinheit hat das Potential, den Partikel-Rückhalt zu steigern. Insbesondere beim Rückhalt von Schwermetallen konnte in der aktuellen Version eine deutliche Steigerung festgestellt werden. Für einen besseren Rückhalt der leichteren Fraktion sind jedoch weitere Optimierungsschritte notwendig, welche anhand von Simulationen zum Partikelfluss evaluiert werden könnten. Nebst der Neigung ist ebenfalls die Höhe und die Breite der Nachrüsteinheit ein entscheidender Faktor, welcher noch optimiert werden könnte, um den Rückhalt zu steigern. Erste Partikelflusssimulationen haben die Dynamik im Schlammsammler bestätigt. Die Verkleinerung des aktiven Volumens im oberen Teil der Nachrüsteinheit sorgt auch in den Simulationen zu einem stärkeren direkten Austrag der einströmenden Partikel und einem besseren Rückhalt der bereits abgesetzten Partikel.

Publikationen:

Keine

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Stoll Vorname: Jean-Marc

Amt, Firma, Institut: UMTEC Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Der Bericht zeigt in gut strukturierter Form die Vorgehensweise und Ergebnisse des Forschungsauftrages auf. Dabei werden die Schwierigkeiten und Herausforderungen des Projekts offen kommuniziert: Ein Zielkonflikt zeigte sich im Besonderen bei der Umsetzung der Nachrüsteinheit: Im "Anwendungsfall" Starkregenereignis geht der verbesserte Rückhalt des bereits abgesetzten Schlammes zulasten der Absetzwirkung für neu eingetragene Schlamm- resp. Schadstoffpartikel. Aufgrund der begrenzten Ressourcen konnte im Rahmen des Projekts nicht die kritische Regenintensität bestimmt werden, bei der die verringerte Absetzleistung die Vorteile des verbesserten Schlammrückhaltes zunichte macht.

Umsetzung:

Die Forschungsarbeit hat aufgezeigt, dass die CFD-Simulation ein geeignetes Hilfsmittel ist, um einen Prototypen zu entwickeln. Aufgrund des oben erwähnten, noch nicht abschliessend gelösten Zielkonflikts steht jedoch noch keine einsetzbare Nachrüsteinheit zur Verfügung. Der Bericht macht aber konkrete Vorschläge, wie ein verbesserter "Prototyp 2.0" aussehen könnte.

weitergehender Forschungsbedarf:

Weitergehender Forschungsbedarf hat sich hinsichtlich der Optimierung der jetzigen Nachrüsteinheit gezeigt. Der Bedarf umfasst die Aspekte des grundsätzlichen Designs (Neigung und Einbauhöhe des Kranzes), des Nachweises mittels Messprogramm sowie der Praktikabilität (Einbau des Kranzes in bestehende Strassenabläufe).

Einfluss auf Normenwerk:

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ist kein Einfluss auf das Normenwerk ersichtlich.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Battaglia Vorname: Reto

Amt, Firma, Institut: Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA)

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

sig. Reto Battaglia

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3 **Seite 3 / 3**