



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**

# **In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen**

**On-site runoff experiments on roads**

**Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des  
autoroutes**

**Institut für Umweltingenieurwissenschaften, ETH Zürich**  
**Felix Naef**  
**Michael Margreth**

**Scherrer AG, Hydrologie und Hochwasserschutz, Reinach**  
**Simon Scherrer**  
**Peter Kienzler**  
**Roger Frauchiger**

**Bürkel, Baumann und Partner, Ingenieure & Planer, Winterthur**  
**Peter Bürkel**

**Forschungsauftrag VSS 2003/205 auf Antrag des Schweizerischen  
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

**Juli 2011**

**1349**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Felix Naef

### Mitglieder

Peter Bürkel

Roger Frauchiger

Peter Kienzler

Michael Margreth

Simon Scherrer

## Federführende Fachkommission

Fachkommission 2: Projektierung

## Begleitkommission

### Präsident

Peter Rauch

### Mitglieder

Markus Boller

Stanislav Draslar

Michel Jobin

Marco Krättli

Sébastien Lehman

Xavier Robyr

## KO-Finanzierung des Forschungsauftrags

Tiefbauamt / Nationalstrassen Kt. Zürich

## Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>6</b>
<b>Summary</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Methode</b> .....	<b>10</b>
2.1 Berechnungsintensitäten .....	10
2.2 Standorte.....	11
2.2.1 Birmensdorf.....	11
2.2.2 Mt Russelin.....	11
2.2.3 Delémont.....	12
2.3 Versuchsaufbau .....	12
2.3.1 Wasserfilmdicke, Fließgeschwindigkeiten, Anlaufzeiten .....	12
2.3.2 Wasserlauf am Strassenrand und Schluckvermögen der Schlamm-sammler.....	19
2.3.3 Messung der Fließgeschwindigkeit bei den Schluckversuchen .....	19
<b>3 Berechnungs- und Wasserfilmversuche auf der Fahrbahn</b> .....	<b>23</b>
3.1 Messungen und Beobachtungen .....	23
3.2 Messung der Fließgeschwindigkeiten .....	26
3.2.1 Birmensdorf:.....	26
3.2.2 Mt Russelin und Delémont:.....	27
3.2.3 Vergleich der 3 Standorte: .....	27
3.2.4 Weitere Beobachtungen:.....	28
3.3 Anlaufs- und Drainagezeiten.....	29
3.4 Auswertung und Interpretation der Wasserfilmmessungen .....	32
3.4.1 Vertikales Geschwindigkeitsprofil:.....	33
3.4.2 Ist die Wasserströmung auf der Strassenoberfläche laminar oder turbulent?.....	33
3.4.3 Fließformeln .....	34
3.4.4 Bewertung der Versuche.....	35
3.4.5 Zusammenfassung der Resultate und Konsequenzen der Versuche .....	36
3.4.6 Gefahr von Aquaplaning .....	37
<b>4 Wasserlauf am Strassenrand</b> .....	<b>39</b>
4.1 Fragestellung.....	39
4.2 Messungen und Beobachtungen: Wasserlauf .....	39
4.3 Auswertung der Wasserlaufversuche .....	42
4.4 Schlussfolgerungen.....	43

<b>5</b>	<b>Schluckvermögen und Strömungsverhältnisse um den ersten Ablauf .....</b>	<b>46</b>
5.1	Einführung.....	46
5.2	Auswertung der Versuche.....	46
5.3	Schlussfolgerungen .....	47
<b>6</b>	<b>Störungen des Normalbetriebes.....</b>	<b>50</b>
6.1	Einführung.....	50
6.2	Verstopfung des Einlaufes durch Laub.....	50
6.3	Ungünstige Anströmungen .....	51
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung und Konsequenzen.....</b>	<b>52</b>
7.1	Einführung.....	52
7.2	Wichtige Resultate .....	52
7.2.1	Strassenoberfläche .....	52
7.2.2	Wasserlauf am Strassenrand.....	52
7.2.3	Schluckvermögen der Abfläufe .....	52
7.3	Beurteilung der SN- Normen Entwässerung aufgrund dieser Ergebnisse .....	52
7.4	Weiteres Vorgehen .....	53
	<b>Abkürzungen.....</b>	<b>61</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>62</b>
	<b>Projektabschluss.....</b>	<b>63</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....</b>	<b>66</b>

## Zusammenfassung

Eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung der heute gültigen Normen zur Strassenentwässerung bildete der Bericht "Abschätzung von Abflüssen aus versiegelten und unversiegelten Flächen und Einzugsgebieten" (VSS, 2000). Die differenzierte Betrachtungsweise der Fliessvorgänge auf der Strassenoberfläche in der heutigen Norm verlangt jedoch eine Überprüfung der üblicherweise bei der Strassenentwässerung verwendeten Fliessgesetze und ein besseres Verständnis der Wirkungsweise der Einläufe bei unterschiedlichen Wassermengen.

Zu diesem Zweck wurden die in diesem Bericht vorgestellten Beregnungsexperimente auf drei ausgewählten Autobahnabschnitten durchgeführt. An jedem Standort wurden jeweils zwei Versuchsserien durchgeführt. Mit Beregnungs- und Wasserfilmversuchen wurden die Fliessvorgänge auf der Strassenoberfläche untersucht und Fliessgeschwindigkeiten, Wasserfilmhöhen, Anlaufs- und Drainagezeiten gemessen. Mit den Versuchsergebnissen wurden vorhandene Fliessformeln überprüft und weiterentwickelt. So liessen sich Wasserfilmtiefe und das zurückgehaltene Wasservolumen in Funktion der Niederschlagsintensität, des Gefälles und der Oberflächenrauigkeit bestimmen und so das Retentionsvolumen und die Aquaplaninggefahr abschätzen.

Mit Wasserlauf-Versuchen wurden Fliessgeschwindigkeiten, Fliesszeiten, Wasserfilmhöhen und Wasserspiegelbreiten des Wasserlaufs am Strassenrand in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität, des Gefälles und der Oberflächenrauigkeit untersucht. Von speziellem Interesse waren dabei die Ausbildung und das Verhalten des Wasserlaufs bei Extremereignissen. Für verschiedene Wassermengen wurden das Schluckvermögen und das Umströmen der Abläufe in Abhängigkeit der Fliessgeschwindigkeit und des Gefälles ermittelt. Hierbei wurde auch der Einfluss der Verschmutzung der Einlauföffnung in Betracht gezogen.

Obwohl die Fliessvorgänge an der Strassenoberfläche komplex waren, liessen sie sich mit der Formel von Strickler (Dracos, 1987) reproduzieren. Die resultierenden Wassertiefen waren jedoch geringer als im Bericht VSS (2000) angenommen. Die Gefahr von Aquaplaning ist auf Normalstrecken gering, in Verwindungsstrecken aber zu berücksichtigen.

Auch die Abflüsse am Strassenrand liessen sich mit der Formel von Strickler reproduzieren, allerdings lagen die aus den Versuchen hergeleiteten Rauigkeitsbeiwerte bei gleichem Belag wesentlich höher als denjenigen, die für die Strassenoberfläche hergeleitet wurden ( $k_s=92$  statt 40).

Auch bei grossen Abflüssen war nicht die Kapazität der Ablaufroste limitierend für das Schluckvermögen, sondern Breite und Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten des Wasserlaufes. Am Standort Birmensdorf mit grossem Längs- und Quergefälle wurden bis zu 20 l/s gefasst, in Mt Russelin mit einem gerinnen Längsgefälle weniger als die Hälfte.

Die Resultate dieser Untersuchung ermöglichen eine Aktualisierung der heutigen Normen. Dabei muss jedoch zuerst grundsätzlich entschieden werden, welche Prioritäten bei der Konzeption der Strassenentwässerungen gesetzt werden sollen. Soll die Anzahl der Abläufe möglichst gering gehalten werden oder soll die Breite des Wasserlaufes beschränkt werden oder die Retention auf der Strassenoberfläche optimiert werden.

## Résumé

Le rapport "Evaluation des écoulements (suite à de fortes pluies) sur des surfaces perméables, imperméables et des bassins versants" (VSS, 2000) constitue une base essentielle pour le développement des normes actuelles d'évacuation des eaux de chaussée. Cependant, la façon de considérer le processus d'écoulement à la surface de chaussée dans la norme actuelle demande une vérification des lois d'écoulement usuelles des eaux de route et une meilleure compréhension du mode d'action des cheminées d'évacuation et des grilles en présence de différents débits d'eau.

Dans ce but, les méthodes expérimentales présentées dans ce rapport ont été réalisées sur trois tronçons d'autoroutes ciblées. Sur chaque site, deux séries expérimentales ont été exécutées. Les processus d'écoulement à la surface des autoroutes ont été analysés par des expériences d'arrosage et de film d'eau. En outre, la vitesse d'écoulement, la hauteur du film d'eau, le temps de ruissellement et de drainage de la surface de la chaussée ont été mesurés. Grâce aux résultats, les lois d'écoulement existantes ont été vérifiées et perfectionnées. De cette façon, il a été possible de déterminer la profondeur du film d'eau et le volume d'eau retenue en fonction de l'intensité des précipitations, de la pente et de la rugosité de la surface de la chaussée, et ainsi d'estimer le volume de rétention et le danger d'aquaplaning.

Les expériences d'écoulement avec formation de filets d'eau ont permis d'étudier la vitesse et le temps d'écoulement, la hauteur et la largeur du filet d'eau sur l'accotement en fonction de l'intensité des précipitations, de la pente et de la rugosité. Un intérêt particulier a été porté sur la formation et le comportement du filet d'eau lors d'événements pluvieux extrêmes. Pour différents débits d'eau, la capacité d'absorption et les processus d'écoulement autour des cheminées d'évacuation ont été calculés en fonction de la vitesse d'écoulement et de la pente. A ce sujet, l'influence des dépôts à l'entrée des grilles a été considérée.

Les processus d'écoulement à la surface de chaussée, bien que complexes, ont pu être reproduits grâce à la formule de Strickler (Dracos, 1987). Cependant, les hauteurs d'eau résultantes étaient inférieures à celles admises dans le rapport VSS (2000). Le danger d'aquaplaning sur des routes normales est faible, mais il doit être pris en considération dans les tronçons de raccordement.

Les écoulements au bord de la route ont aussi été simulés avec la formule de Strickler. Toutefois, sur le même revêtement, les valeurs de rugosité déduites des expériences étaient, de manière significative, plus hautes que celles déduites de la surface de chaussée ( $k_s = 92$  au lieu de  $k_s = 40$ ).

Lors d'écoulements importants, ce n'est pas la capacité d'absorption des grilles qui est limitante, mais plutôt la largeur et la répartition des vitesses d'écoulement du filet d'eau. Sur le site de Birmensdorf, comportant de grandes pentes longitudinales et transversales, jusqu'à 20 litres d'eau par seconde ont pu être captés, contre moins de la moitié au Mt Russelin, où la pente de la chaussée est faible.

Les résultats de ces recherches permettent d'actualiser la norme actuelle. Il faudra de plus décider quelle sont les priorités à donner lors de la conception de l'évacuation des eaux de chaussée. Il s'agit, soit de minimiser le nombre des bouches, soit de limiter la largeur du fil d'eau au bord de la chaussée ou encore d'optimiser la rétention à la surface de chaussée.

## Summary

The Swiss norms for the drainage of roads have been developed based on the report "Discharge estimation from sealed und unsealed areas and catchments" (VSS, 2000). The norms consider the processes on the surface of the road in great detail. This calls for an evaluation of the generally used formulas to estimate flows on the surface of roads and a better understanding of the efficiency of the water intakes along the road.

To the purpose, sprinkling experiments have been made on three highway sections. On each location, two types of experiments were performed. The flow on the street surface has been observed and flow depths, flow velocity, time to peak and drainage times measured. The data was used to check commonly used formulas and estimate water depth as function of rainfall intensity, slope, and surface roughness. This allowed the assessment of the retention volume and the risk of aquaplaning.

The second set of experiments considered the water flow along the edge of the road, especially during extreme precipitation. Of special interest was the capacity of the water intakes and how much water was flowing around these intakes. Additional experiments were made with dry leaves in the water to simulate the clogging of the intakes.

Although the flow processes on the surface were complex, the formula of Strickler (eng. Manning; Dracos, 1987) with calibrated roughness coefficients produced acceptable results. The resulting water depths were smaller than assumed in the original report (VSS, 2000). The risk of aquaplaning is usually small, however, it cannot be neglected when the slopes approach zero.

The Strickler formula produced also acceptable results for the flow along the edges of the road. However, the estimated roughness coefficients were much higher than the one used for the surface of the road ( $k_s = 92$  instead of 40).

The intake capacities were not limiting, even for large discharges. More important were width and velocity distribution of the water flowing along the edge. At the location Birmsendorf more than 20 l/s could enter the intake, due to the large longitudinal and cross slopes. In Mt Russelin, a site with small longitudinal slopes, less than half that amount could be taken.

The results of this study allow a meaningful update of the existing norms. However, a decision on the priorities has to be taken, whether the number of intakes along the road should be minimized, the width of the water flow constrained or the water retention on the road optimized.

## **DANK**

Die hier vorgestellten, sehr aufwendigen Versuche waren nur möglich dank der uneigennütigen Unterstützung durch verschiedene Institutionen und Fachleuten.

Die tatkräftige, kontinuierliche Hilfe von Arthur Bachmann (Amt für Verkehr, Kt. Zürich) und Michel Jobin (Jobin SA, Delémont) haben die Untersuchungen erst ermöglicht.

Bei der Auswahl der Beregnungsstandorte und der Logistik der Versuche konnten wir uns verlassen auf:

- Frach E., Hydraulik AG, Zürich
- Stucki P., Chefbauleiter, IG Bauleitung, N 20, Zürich
- Brahier D., Service Centre d'entretien des ponts et chaussées, Delémont
- Eggenschwiler Th., Amt Verkehr und Tiefbau des Kantons Solothurn
- Degoumois Y., Etat du Valais, Service des routes et cours d'eau – Routes Nationales – Environnement, Sion.

Peter Rauch, Präsident der EK2.07 und die gesamte Expertenkommission begleitete uns engagiert durch das gesamte Projekt. Frau Geraldine Gaillard verfasste für uns das Résumé.

All den Genannten und Ungenannten sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Dieses Projekt war für uns eine grosse Erfahrung, was neben den interessanten Ergebnissen auch auf die engagierte Unterstützung der erwähnten Personen zurückzuführen ist.



# 1 Einleitung

Bei der Projektierung des Entwässerungssystems von Strassen muss das Zusammenspiel von Starkregen, Abfluss auf der Strassenoberfläche und am Strassenrand verstanden werden und die Schluckfähigkeit der Einläufe berücksichtigt werden, um die Kapazität der Kanalisation ermitteln zu können. In dem Bericht "Abschätzung von Abflüssen aus versiegelten und unversiegelten Flächen und Einzugsgebieten" (VSS, 2000) wurden diese Zusammenhänge untersucht und darauf aufbauend die Normen zur Entwässerung von Strassen (SN 640 350, 640 353, 640 356, 640 357) entwickelt.

Diese Normen stützen sich ab auf die in dem Bericht vorgestellten Resultate von 2D-Berechnungen der Abflüsse auf der Strassenoberfläche und am Strassenrand während Starkregen. Als wesentliche Neuerung gegenüber der Vorgängernorm, die Wassertiefen nur statisch betrachtete, wird nun der zeitliche Verlauf berücksichtigt. Da die grössten Abflüsse durch extreme Starkniederschläge verursacht werden, sind sie nur von sehr kurzer Dauer. Dabei können einzelne Abläufe kurzzeitig umströmt werden und sich am Strassenrand ein etwas breiterer Wasserlauf ausbilden. Durch die differenziertere Betrachtungsweise reduzieren sich jedoch die Dimensionierungswassermengen und die Zahl der notwendigen Einlässe. Gleichzeitig verringern sich die Spitzenabflüsse in der Kanalisation und damit die Belastung der Anlagen und Gewässer, die die Wassermengen aufzunehmen haben. Die differenziertere Betrachtungsweise der heutigen Norm verlangt eine detaillierte Kenntnis der Fliessvorgänge auf der Strassenoberfläche. Um diese hydraulischen Fragestellungen zu klären, hat das Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU) der ETH, in Zusammenarbeit mit den Firmen Bürkel, Baumann und Schuler und Scherrer AG das Forschungsprojekt "In Situ Abflussversuche" durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden bei Beregnungsversuchen an drei Standorten ausführliche Messungen vorgenommen und ausgewertet. Sie erlauben eine Überprüfung der üblicherweise in der Strassenentwässerung verwendeten Fliessgesetze und ein Verständnis der Wirkungsweise der Einläufe bei unterschiedlichen Wassermengen. In der alten Norm wurde angenommen, dass sich das anfallende Wasser umgehend in der Kanalisation wieder findet, d.h. die Kapazität und Wirkungsweise der Einläufe wurde nicht berücksichtigt. In der heutigen Norm kann diese nicht mehr vernachlässigt werden, es muss abgeschätzt werden, wie viel Wasser ein Ablauf fassen kann und wie viel Wasser den Ablauf umströmt. Grundlagen dazu liefern die Beregnungsexperimente. Im Weiteren sollen mit diesen Untersuchungen Grundlagen zur Festlegung der Kapazität der Schachtdeckel erhoben werden, auf die in der Norm SN 640356 verwiesen wurde.

An drei Standorten wurden jeweils zwei Versuchsserien durchgeführt. In Kapitel 2 werden zuerst die gewählten Versuchsstandorte vorgestellt und danach die Messmethoden zur Erfassung der Fliessvorgänge auf der Strassenoberfläche und am Strassenrand erläutert. Mit Beregnungs- und Wasserfilmversuchen wurden die Fliessvorgänge auf der Strassenoberfläche untersucht. Fliessgeschwindigkeiten und Wasserfilmhöhen, Anlauf- und Drainagezeiten wurden gemessen. Mit den Versuchsergebnissen sollen die vorhandenen Fliessformeln überprüft und weiterentwickelt werden, um die Wasserfilmdicke und das zurückgehaltene Wasservolumen in Funktion der Niederschlagsintensität, des Gefälles und der Oberflächenrauigkeit bestimmen und somit das Retentionsvolumen und die Aquaplaningefahr bestimmen zu können (Kap. 3). Mit den Wasserlauf-Versuchen wurden Fliessgeschwindigkeiten, Fliesszeiten, Wasserfilmhöhen und Wasserspiegelbreiten des Wasserlaufes am Strassenrand in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität, des Gefälles und der Oberflächenrauigkeit untersucht. Damit wurden Fliessformeln überprüft, um Wasserlaufbreite und das Retentionsvolumen des Wasserlaufes zu bestimmen. Von speziellem Interesse ist die Ausbildung der Wasserlaufbreite bei Extremereignissen (Kapitel 4). Für verschiedene Wassermengen wurde das Schluckvermögen und das Umströmen der Abläufe in Abhängigkeit der Wasserlaufbreite, der Fliessgeschwindigkeit und des Gefälles ermittelt. Hierbei wird auch der Einfluss der Verschmutzung der Einlauföffnung in Betracht gezogen. Einige Hinweise zu Abweichungen vom Normalbetrieb sind in Kapitel 6 aufgeführt. Die Formeln für die Fliessvorgänge auf der Strassenoberfläche und am Strassenrand werden mit den Annahmen des ersten Berichts (VSS, 2000) und mit den Grundlagen der bestehenden Normen verglichen und Fragen zur heutigen Vorgehensweise formuliert (Kap. 7).

## 2 Methode

### 2.1 Beregnungsintensitäten

Um die Vorgänge auf der Strasse verfolgen und dokumentieren zu können, ist messtechnisch ein grosser Aufwand nötig. Beregnungsexperimente sind deshalb sinnvoll, weil die hohen Niederschlagsintensitäten, auf die die Strassenentwässerung ausgelegt ist, in der Natur selten auftreten. Mit künstlicher Beregnung können Intensitäten von beliebiger Grösse zu jedem gewünschten Zeitpunkt erzeugt und deren Auswirkungen dokumentiert werden.

Im Extremfall sind natürliche Niederschlagsintensitäten von mehreren hundert Millimeter pro Stunde möglich. Je grösser die Niederschlagsintensität ist, desto kürzer ist jedoch deren Dauer. Das gefallene Volumen ist auch bei hohen Intensitäten wegen der kurzen Dauer weniger eindrücklich (Tab. 1). Die schon ab mittleren Intensitäten auftretenden Sichtbehinderungen führen dazu, dass die Autofahrer ihre Geschwindigkeiten während solcher Ereignisse reduzieren und bei den höchsten Intensitäten teilweise sogar anhalten. Wie schon in VSS (2000) ausgeführt, macht es deshalb wenig Sinn, die Strassenentwässerung auf extremste Intensitäten auszulegen, die nur alle 5 bis 10 Jahren auftreten und nur wenige Minuten dauern. In der Norm SN 640353 wurde deshalb die Wiederkehrperiode des massgebenden Regens auf ein Jahr festgelegt. Bei den Versuchen wurden auch höhere Intensitäten verwendet, um das Verhalten des Entwässerungssystems im „Überlastfall“ zu verstehen.

Tabellen 1 und 2 geben einen Überblick über die mit den ANETZ-Stationen in der Schweiz ermittelten Niederschlagsintensitäten, -dauern und -volumen (VSS, 2000). Die minimalen Werte wurden in Zermatt beobachtet, die maximalen in Lugano. Anhand dieser Tabellen, die die grossen regionalen Unterschiede aufzeigen, lassen sich die bei den Versuchen verwendeten Intensitäten einordnen.

*Tabelle 1: Minimale und maximale Intensitäten und Volumen für 10 Minuten-Niederschläge in der Schweiz (aus VSS, 2000) für unterschiedliche Jährlichkeiten.*

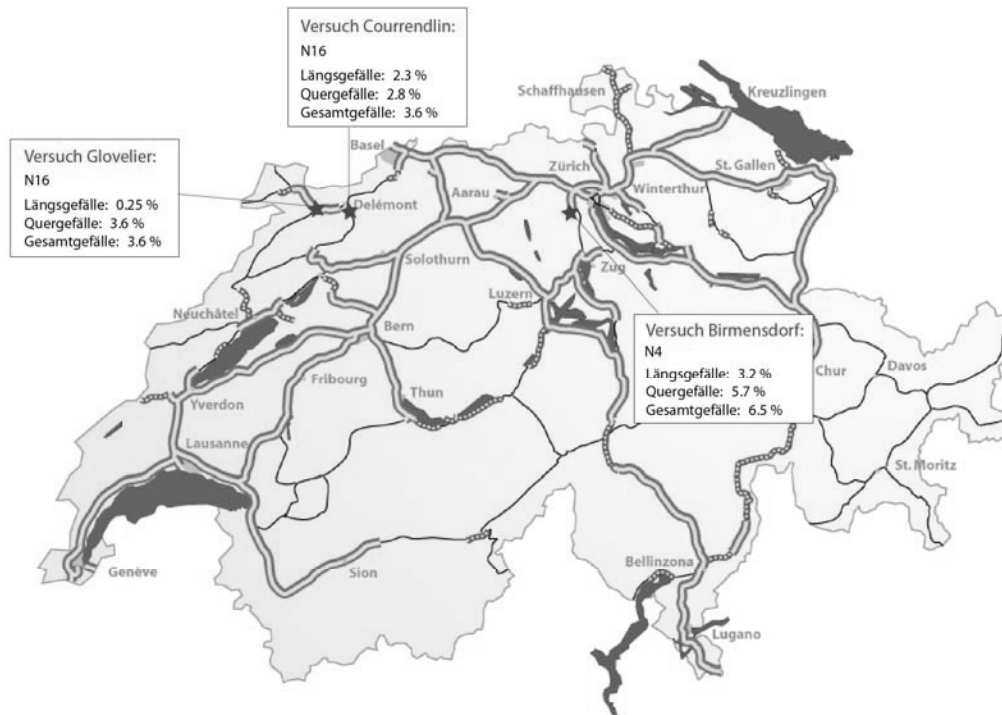
Jährlichkeit	Niederschlagsintensität [mm/h]		Niederschlagsvolumen [mm]	
	min	max	min	max
1 j.	23	104	4	17
5 j.	38	161	6	27
10 j.	45	187	8	45
100 j.	66	270	11	45

*Tabelle 2: Minimale und maximale Intensitäten für 60 Minuten-Niederschläge (aus VSS, 2000) für unterschiedliche Jährlichkeiten.*

Jährlichkeit	Niederschlagsintensität [mm/h]	
	min	max
1 j.	9	38
5 j.	11	57
10 j.	12	66
100 j.	16	96

## 2.2 Standorte

Die Standorte mussten verschiedene, anspruchsvolle Randbedingungen erfüllen. Die Suche, die schweizweit durchgeführt wurde, gestaltete sich erheblich aufwendiger als zu erwarten war. Die Strecken mussten die notwendigen Längs- und Quergefällen aufweisen, sie mussten verkehrsfrei gemacht werden können und die Wasserzufuhr musste sichergestellt sein. Diese Bedingungen waren nur an wenigen Orten erfüllt; erst nach aufwendiger Suche über weite Teile der Schweiz konnten passende Standorte gefunden werden. Eine zeitliche Verzögerung des Projektes ergab sich dadurch, dass die Sperrung der Versuchsstrecken mit anderen Arbeiten koordiniert werden musste. Abbildung 1 zeigt die Lage der ausgewählten Versuchsstandorte, die Gefällsverhältnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.



Quelle der Hintergrundkarte: [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Autbahnnetz\\_schweiz.png#file](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Autbahnnetz_schweiz.png#file)

Abbildung 1: Übersicht über das Schweizerische Autobahnnetz mit der Lage der Versuchsstandorte.

### 2.2.1 Birmensdorf

Die ersten Versuche wurden auf der N20 auf einem Splittmastixasphalt (SMA) in der Nähe von Birmensdorf durchgeführt, unmittelbar westlich der Ausfahrt des Eggraintunnels auf der Spur Richtung Urdorf. Die Strasse war zur Zeit der Messungen am 6. - 7. Juni 2006 fertig gestellt, aber noch nicht für den Verkehr geöffnet. Die Längsneigung war gross und betrug 3.2%, die Querneigung 5.7%. Für die Versuche standen zwei Hydranten unmittelbar bei der Tunnelausfahrt zur Verfügung. Die Zuleitung des Wassers zum Versuchfeld wurde mit Schläuchen mit einem Durchmesser von 50 mm über eine Länge von 150 m bewerkstelligt. Damit konnte maximal eine Wassermenge von 22 Litern pro Sekunde aufgebraucht werden.

### 2.2.2 Mt Russelin

Für den zweiten Versuch wurde ein Standort mit geringem Gefälle und ähnlichen Asphaltverhältnissen gesucht. Entsprechende Bedingungen fanden sich auf der neu erstellten N16 in der unmittelbaren Nähe von Glovelier, östlich der Einfahrt zum Tunnel du Mt Russelin auf der Spur Richtung Porrentruy. Die Längsneigung betrug 0.25%, die Querneigung 3.6%. An diesem Standort wurden am 9. und 10. August 2006 die Beregnungsversuche durchgeführt. In Mt Russelin kamen ebenfalls zwei Hydranten zum Einsatz. Die Zuleitung zum Versuchsfeld erfolgte hier über Schläuche mit einem Durchmesser von 75

mm über eine Länge von 100 m. Als maximale Durchflussleistung wurde in Mt Russelin 38 Liter pro Sekunden erreicht.

### 2.2.3 Delémont

Für den dritten Standort wurde ein mittleres Gefälle gesucht. Ein entsprechender Standort mit einer Längsneigung von 2.3% und einer Querneigung von 2.8% wurde südlich von Delémont, am derzeitigen Ende der Ausbaustrecke der N16, nahe der Birs vorgefunden. Da keine Hydranten zur Verfügung standen, musste das Wasser mit grossem Aufwand aus einem in der Nähe liegenden Überlauf- und Absetzbecken gepumpt werden. Mittels zweier Pumpen konnte über Schläuche mit einem Durchmesser von 75mm und 50mm eine maximale Wassermenge von rund 19 Litern pro Sekunden eingesetzt werden.

Tabelle 3: Längs- und Quergefälle bei den drei Versuchsstandorten

%	Birmensdorf	Delémont	Mt Russelin
<b>Längsgefälle</b>	3.2	2.3	0.25
<b>Quergefälle</b>	5.7	2.8	3.6
<b>Gesamtgefälle</b>	6.5	3.6	3.6

## 2.3 Versuchsaufbau

An jedem Standort wurden zwei unterschiedliche Versuche mit verschiedenen Wassermengen durchgeführt. Zum einen wurde untersucht, wie sich die Strassenoberfläche benetzt und welche Wasserfilmdicken sich bei Starkniederschlägen mit unterschiedlichen Intensitäten auf der Strasse bilden. Zum anderen wurden die Wasserläufe am Strassenrand genauer untersucht und das Schluckvermögen des Entwässerungssystems, bestehend aus Einlaufrost und Schlammsammler zu ermitteln.

### 2.3.1 Wasserfilmdicke, Fließgeschwindigkeiten, Anlaufzeiten

Zur Bestimmung der Wasserfilmdicke auf der Strassenoberfläche bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten wurden am Standort Birmensdorf Beregnungsversuche auf einer Fläche von 133 m<sup>2</sup> durchgeführt. Dabei wurden Beregnungsintensitäten von 50 mm/h und 100 mm/h aufgebracht. Die verwendete Beregnungsanlage bestand aus drei Aluminiumrohren, die auf Holzklappböcken in 80 cm Höhe installiert wurden (Abb. 2 und 3). Auf diesen Rohren waren in regelmässigen Abständen 15 Düsen platziert, die eine gleichmässige Beregnung über die ganze Fläche gewährleisteten. Durch die Verwendung von Rundumsprinklern auf dem mittleren Strang und Halbkreis- und Viertelkreis-sprinkler an den beiden äusseren Strängen wurde eine rechteckige Beregnungsfläche erreicht. Die Beregnungsintensität wurde ermittelt, indem der Durchfluss mit einer Wasseruhr im Minutenabstand gemessen wurde und durch die berechnete Fläche geteilt wurde.



Abbildung 2: Beregnungsversuch Standort Birmensdorf

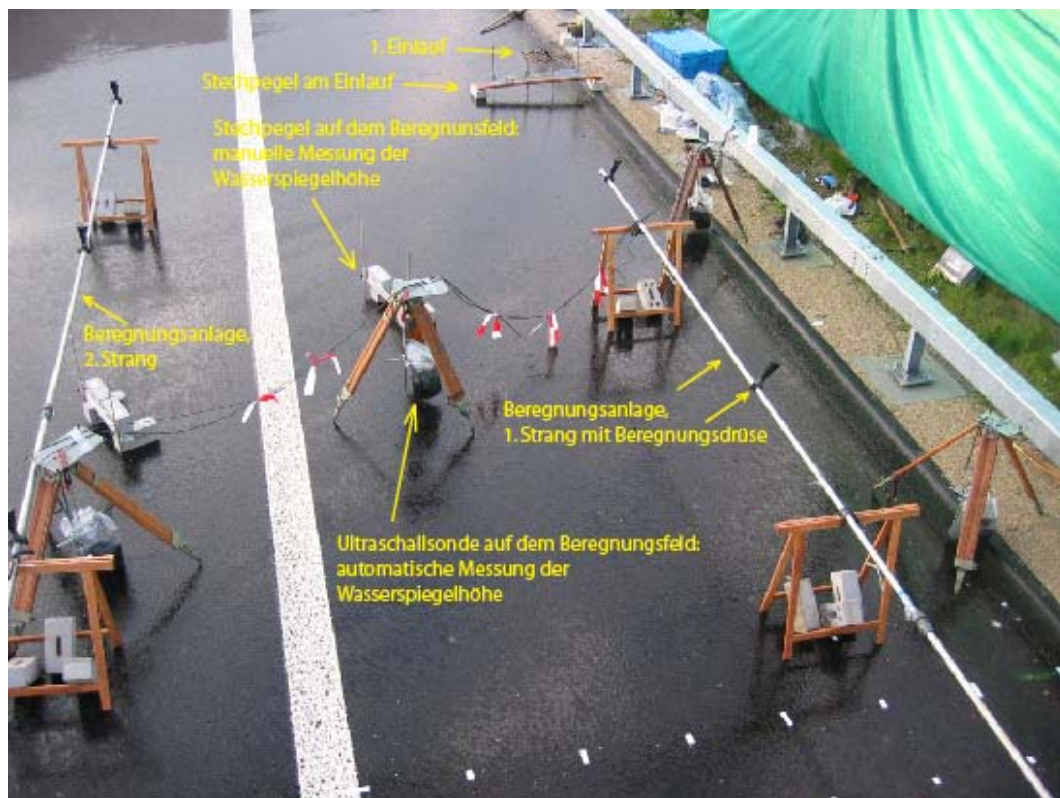


Abbildung 3: Aufbau des Beregnungsversuches zur Ermittlung der Wasserfilmdicke auf der Strassenoberfläche am Standort Birmensdorf

Die Tiefe des Wasserfilms auf der Strassenoberfläche wurde mit sechs Stechpegeln bestimmt, die so angeordnet waren, dass die Wassertiefe nach 2 m, 4 m und 6 m Fließstrecke abgelesen werden konnte. Die Stechpegel konnten mit einer Genauigkeit von

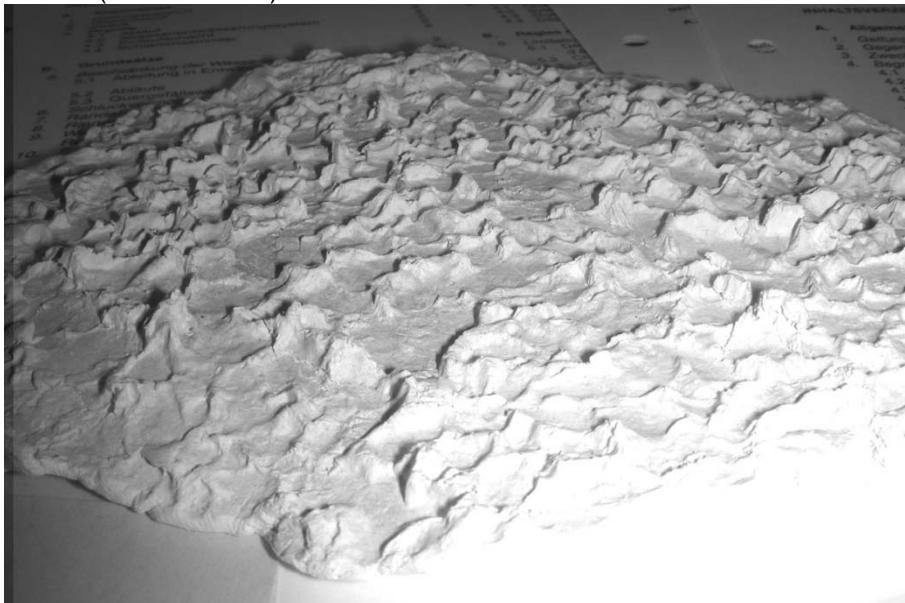
0.1 mm manuell abgelesen werden. Zusätzlich waren drei Ultraschallpegel „UNAM-30“ des Herstellers *baumer* installiert, die die Wassertiefe mit einer Frequenz von 240 kHz mit einer Auflösung von 0.3 mm messen. Der Öffnungswinkel der Sonden beträgt 10°. Die Messungen wurden mit einem Campbell CR10X - Datenlogger alle zwei Sekunden aufgezeichnet.

Mit der Beregnungsanlage und dem zur Verfügung stehenden Wasserdruck konnte eine Niederschlagsintensität von 100 mm/h erreicht werden. Diese Intensität entspricht dem höchsten einjährigen 10-Minutenregen in der Schweiz. Ereignisse mit höherer Jährlichkeit können diesen Wert aber wesentlich überschreiten. Der Aufprall der Regentropfen störte die Wasseroberfläche auf der Strassenoberfläche so stark (Abb. 4), dass die Ableisungen der Stechpegel ungenau und die Messungen der Ultraschallsonden massiv gestört wurden.



*Abbildung 4: Durch Regentropfen verursachte unruhige Wasseroberfläche bei den Beregnungsversuchen in Birmensdorf*

Die Wassertiefen auf der Strassenoberfläche liegen auch bei extremen Intensitäten im Bereich von wenigen Millimetern. Die genaue Messung bereitet jedoch auch Schwierigkeiten, wegen den Unebenheiten der Strassenoberfläche, die in der Grössenordnung der beobachteten Wassertiefen liegen. Dies zeigt ein Gipsabdruck (Negativbild) der Strassenoberfläche in Mt Russelin (Abb. 5). Abbildung 6 zeigt ein vermessenes Querprofil, die Höhenunterschiede bewegen sich in einer Grössenordnung von 2 bis 4 mm. Mit den Stechpegeln wurde jeweils die Wassertiefe über den Erhebungen, nicht in den Tiefpunkten gemessen. Die Ultraschallpegel decken mit ihrem Öffnungswinkel von 10 Grad einen weiteren Bereich ab, die gemessenen Werte entsprechen einer mittleren Wassertiefe. Zusätzliche Unsicherheiten im Bereich von 2 mm ergeben sich aus der unruhigen Wasseroberfläche (siehe Abb. 19).



*Abbildung 5: Gipsabdruck (Negativbild) der Strassenoberfläche in Mt Russelin. Die Oberflächen an den anderen beiden Standorten zeigen ein ähnliches Bild.*

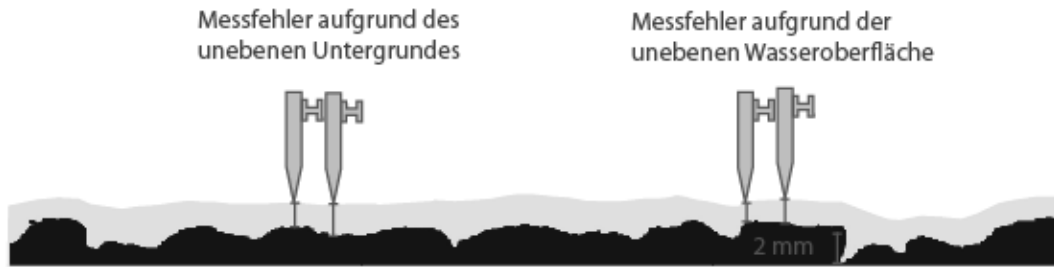


Abbildung 6: Vermessenes Querprofil der Strassenoberfläche in Mt Russelin. Die vermessenen Querprofile an den anderen beiden Standorten zeigen ein ähnliches Bild. Bei der Messung der Wassertiefe mit den Stechpegeln ergeben sich aufgrund der unebenen Wasseroberfläche und der Rauigkeit der Strassenoberfläche Messfehler im Bereich von Millimetern.

Aufgrund der Schwierigkeiten mit der Berechnungsanlage am Standort Birmensdorf wurde bei den Standorten Mt Russelin und Delemont der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasserfilmdicke verändert. Statt einer Beregnung wurde Wasser über eine Breite von 4 m gleichmässig aus einem Filterrohr auf die Strasse aufgebracht (Abbildungen 7 & 8).

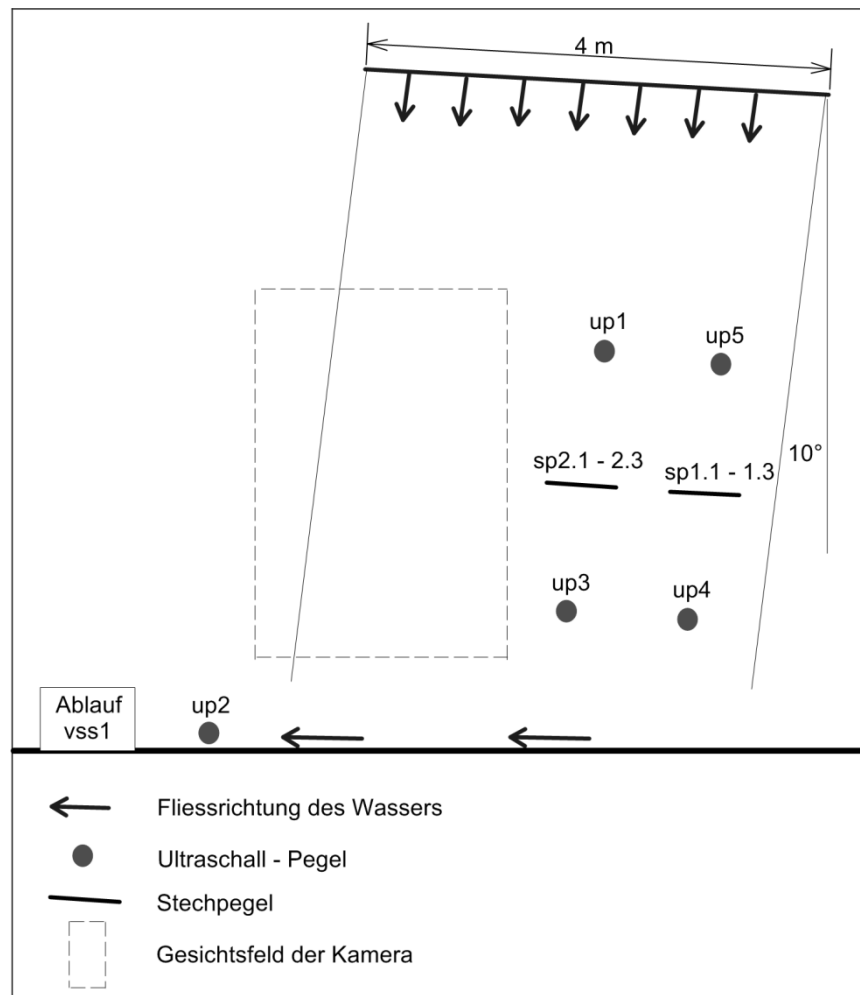


Abbildung 7: Versuchsaufbau in Mt Russelin und Delemont zur Ermittlung der Wasserfilmdicke bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten (schematisch dargestellt).



Abbildung 8: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Wasserfilmdicke, Fließgeschwindigkeit und Anlaufzeiten für verschiedene Niederschlagsintensitäten in Delémont.

Der Ausfluss aus dem Filterrohr wurde durch Ablesungen an einer Wasseruhr ermittelt. Seitliches Wegfliessen wurde durch eine sorgfältige Abdichtung verhindert. Damit konnte die Störung der Wasseroberfläche durch den Aufprall der Wassertropfen vermieden und maximale Intensitäten von über 100 mm/h aufgebracht werden. Bei einem Niederschlagsereignis nimmt der Abfluss auf der Strassenoberfläche mit zunehmendem Abstand zum oberen Strassenrand zu; bei dieser Versuchsanordnung ist er jedoch konstant und muss entsprechend umgerechnet werden. Die Intensität ist umgekehrt proportional zum Abstand vom oberen Strassenrand. Die Niederschlagsintensität ergibt sich durch Division des Filterrohrausflusses durch die Breite des benetzten Strassenabschnittes und den Abstand zum oberen Strassenrand. Formel 1 und Abbildung 9 zeigen den Zusammenhang zwischen Niederschlagsintensität, Filterrohrausfluss und der Strassenbreite.

$$I = \frac{Q * 3600}{a * b} \quad (1)$$

wobei

- I: Niederschlagsintensität [mm/h]
- Q: Ausfluss aus dem Filterrohr [l/s]
- a. Abstand zum oberen Strassenrand [m]
- b: Breite des Strassenabschnitts [m]



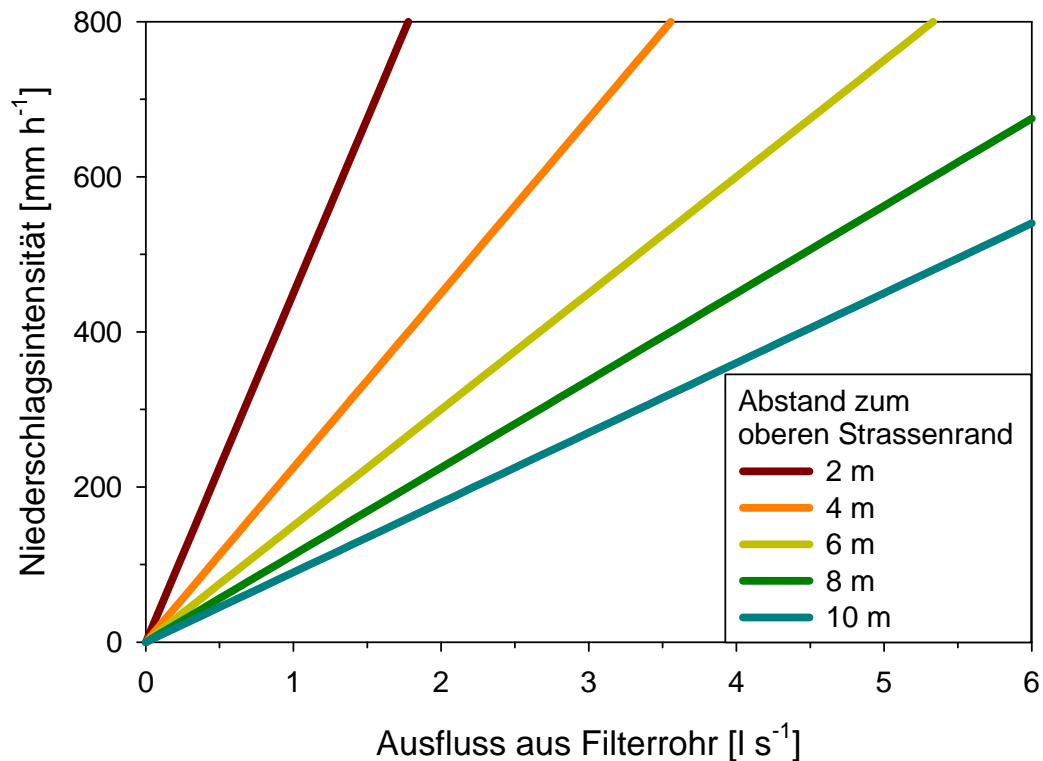


Abbildung 9: Umrechnung des Filterrohrausflusses in Niederschlagsintensitäten für verschiedene Abstände zum oberen Strassenrand bei einer Breite des benetzten Strassenabschnittes von 4 m.

Die Fliessgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche wurden mit "particle tracking" ermittelt. Dafür wurde unbeschichtetes, mit fluoreszierender grüner bzw. roter Signalfarbe eingesprühtes Laserdruckerpapier ( $80g m^{-2}$ ) in  $2 mm * 2 mm$  grosse Partikel geschnitten und am oberen Ende der Versuchsstrecke eingespeist (Abb. 10). Die Fliessbewegungen der Partikel, die ein ideales Schwimmverhalten zeigten und gut sichtbar waren, wurden mit einer Videokamera verfolgt, die auf einer Hebebühne senkrecht über dem Versuchsfeld montiert war (Abb. 11).

Im Gesichtsfeld der Kamera wurden auf der Strasse Markierungen in regelmässigen Abständen angebracht. Mit Hilfe einer Filmverarbeitungs- Software wurde nach den Versuchen für jede untersuchte Wassermenge die Geschwindigkeit der Partikel ermittelt, indem die Fliesszeit für eine Wegstrecke von 2 m berechnet wurde (vgl. Abb. 12). Wenn die Digitalkamera, die in einer Sekunde 24 Bilder aufnimmt, den Durchgang der Partikelwolke in 142 Einzelbildern zeigt, beträgt die Fliesszeit 5.9 Sekunden und die Fliessgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche 0.34 m/s. Zusätzlich erlaubten die Aufnahmen die Beobachtung der Strömung, deren Entwicklung mit zunehmender Durchflussmenge und die Verformung der Partikelwolke. Die Verformung lieferte Hinweise zum vertikalen Geschwindigkeitsprofil bei unterschiedlicher Wassertiefe.



Abbildung 10: Eingabe der Papierpartikel während des Wasserfilmversuches in Delémont.



Abbildung 11: Positionierung der beiden Kameras senkrecht über dem Versuchsfeld



Distanz = 2 Meter, Insgesamt 142 Bilder, Fließzeit = 5.9 Sekunden, Geschwindigkeit = 0.34 m / s

Abbildung 12: Ermittlung der Fließgeschwindigkeit der Wasseroberfläche auf der Strasse mit "particle tracking" in Delémont bei einer Wassermenge von 3.6 l/s.

### 2.3.2 Wasserlauf am Strassenrand und Schluckvermögen der Schlammsammler

In einer zweiten Versuchsserie zur Untersuchung des Wasserlaufs am Strassenrand und des Schluckvermögens der Ablaufschächte, wurden verschiedene Abflüsse am Strassenrand bereitgestellt. Der Gesamtabfluss, sowie die Abflüsse in die einzelnen Schächte, wurden mit verschiedenen Methoden bestimmt. Zum einen wurde der Zufluss mit einer Wasseruhr ermittelt. In den Ablaufschächten wurden Ultraschallsonden installiert, die den Abfluss jede Minute aufzeichneten. Darüber hinaus wurden der Wasserspiegel und der Fließquerschnitt des Wasserlaufs am Strassenrand vermessen. Mit Stechpegeln wurde die Höhe des Wasserstandes an mehreren Punkten manuell gemessen. Diese Messungen wurden ergänzt durch Ultraschallpegel, die den Wasserstand alle 2 Sekunden zeitlich hoch aufgelöst aufzeichneten (Versuchsaufbau, Schluckversuche, Abbildungen 13 und 14). Anhand der vermessenen Topographie liess sich der Fließquerschnitt und durch Multiplikation mit der mit particle tracking ermittelten Fließgeschwindigkeitsverteilung der Abfluss berechnen und mit den mit der Wasseruhr gemessenen Werte vergleichen.

### 2.3.3 Messung der Fließgeschwindigkeit bei den Schluckversuchen

Zur Messung der Fließgeschwindigkeit wurde wie beim Wasserfilmversuch die Strömung der Wasseroberfläche mit gefärbten Papierpartikeln sichtbar gemacht und mit Videoaufnahmen festgehalten. Im Folgenden wird dies anhand eines Beispiels am Standort Mt Russelin illustriert (vgl. Abb. 15). Aufgrund der geneigten Strassenoberfläche nehmen die Wassertiefe und damit die Fließgeschwindigkeit des Wassers gegen die Strassenmitte hin ab. Deshalb wurde die Fließgeschwindigkeit in mehreren Abschnitten des Gerinnequerschnitts gemessen (Abb. 16). Die Breite der Messabschnitte war an den verschiedenen Versuchsstandorten konstant.

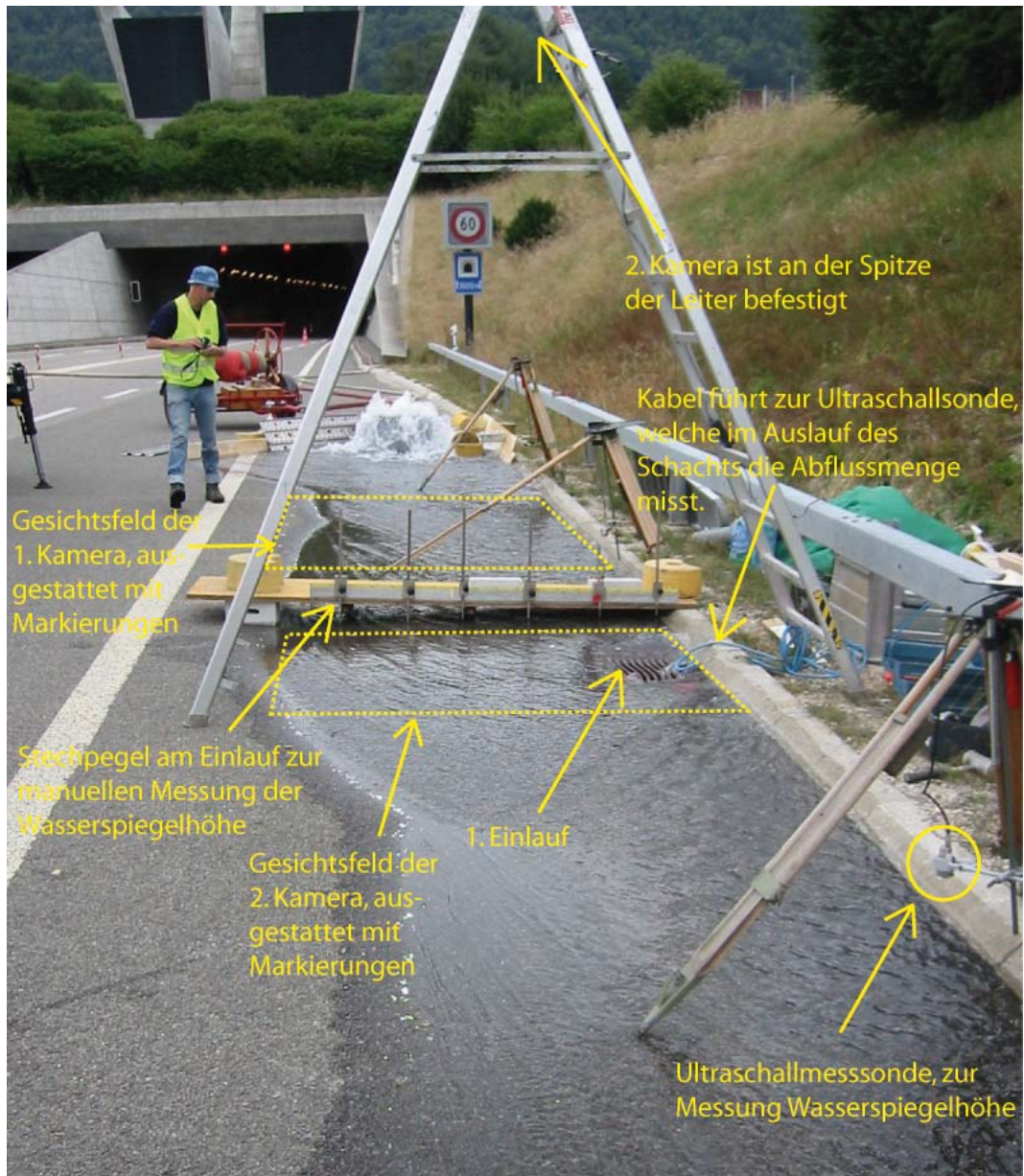


Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Schluckvermögens in Mt Russelin.

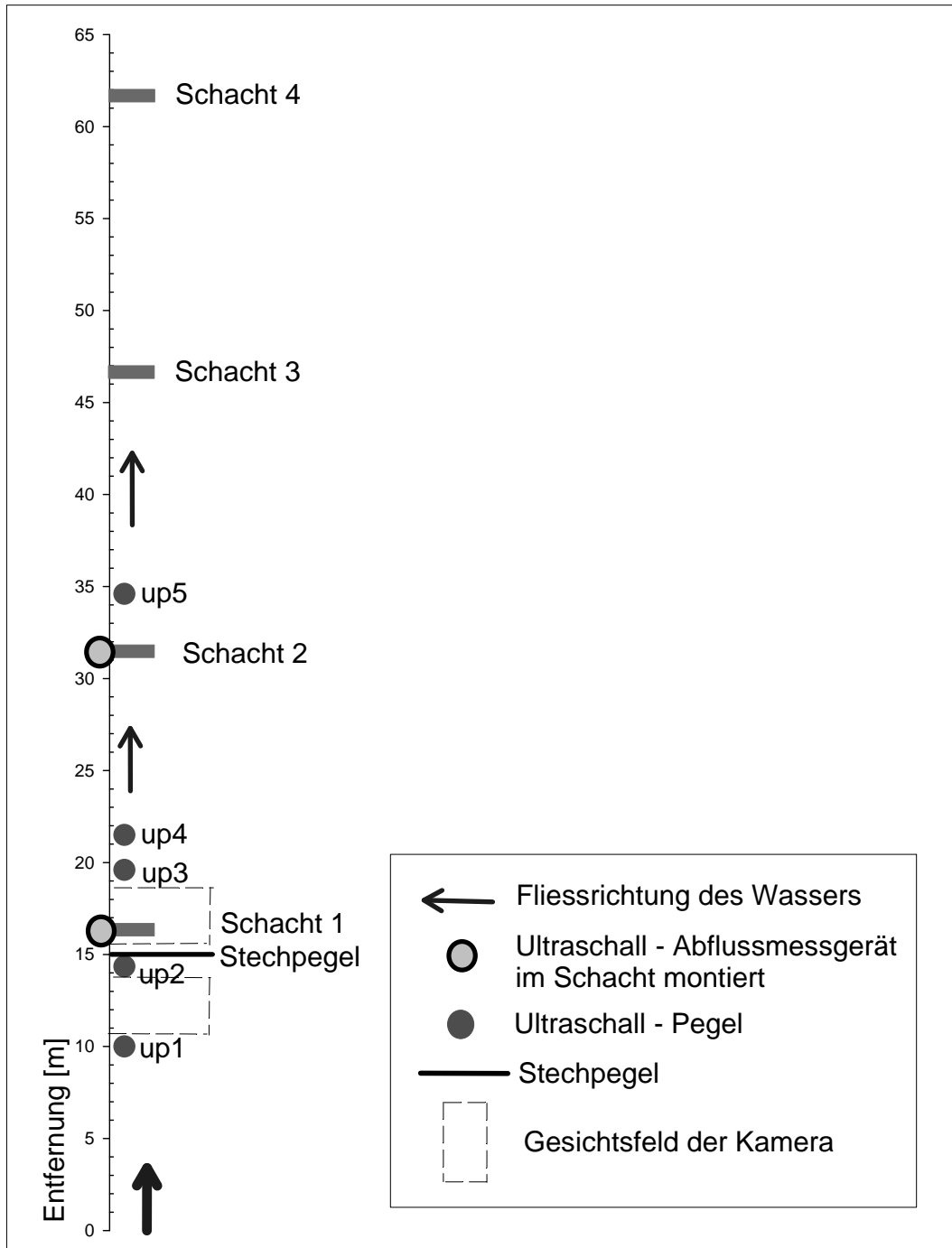


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Schluckvermögens in Mt Russelin.



Distanz = 2 Meter, Insgesamt 51 Bilder, Fließzeit = 2.1 Sekunden, Geschwindigkeit = 0.95 m / s

Abbildung 15: Ermittlung der Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche mit particle tracking beim Standort Mt Russelin bei einer Wassermenge von 24 l/s.

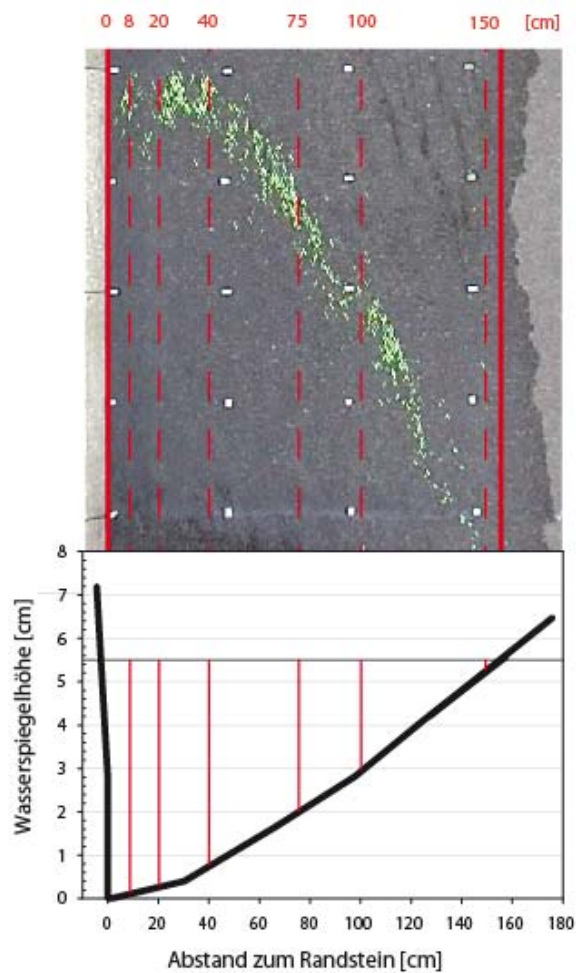


Abbildung 16: Gerinnequerschnitt des Wasserlaufes in Mt Russelin bei einer Durchflussmenge von 24 l/s. Die senkrechten roten Striche stellen die Grenzen der Teilabschnitte dar, in welchen jeweils die Geschwindigkeit gemessen wurde. Darüber ist die entsprechende Partikelwolke abgebildet, die aufzeigt, wie die Fließgeschwindigkeit gegen die Strassenmitte hin abnimmt.

### 3 Beregnungs- und Wasserfilmversuche auf der Fahrbahn

#### 3.1 Messungen und Beobachtungen

An allen drei Standorten wurde die Höhe des Wasserfilms für verschiedene Regenintensitäten ermittelt. Während in Birmensdorf Beregnungsexperimente durchgeführt wurden, wurde an den anderen Standorten ein Wasserfilm auf der Strassenoberfläche mittels eines geschlitzten Filterrohrs erzeugt. Um die Messungen an den drei Standorte vergleichen zu können, wurden die Abflüsse der Standorte Delémont und Mt Russelin in Beregnungsintensitäten für eine Strassenbreite von 6 m umgerechnet (Abb. 17 und 18).

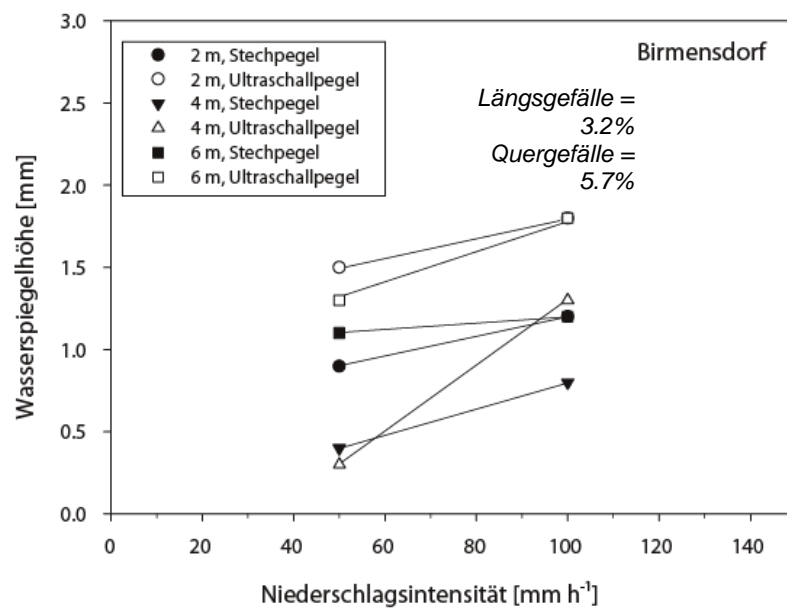


Abbildung 17: Wassertiefen in 2m, 4m und 6m Abstand von der Strassenmitte bei der Beregnung mit 50 mm/h und 100 mm/h am Standort Birmensdorf. Widersprüche in den Messungen dürften auf die in Abschnitt 2.3.1 aufgeführten Probleme zurückgeführt werden.

Die Messungen in Birmensdorf zeigen kein einheitliches Bild. Bei einer gleichmässigen Überregnung sollte die Wassertiefe von der Strassenmitte gegen den Strassenrand stetig zunehmen. Bei den Messungen sind die Wassertiefen 2 m und 6 m von der Strassenmitte jedoch beinahe gleich, während die mittlere Messung 4 m von der Strassenmitte wesentlich geringer ist (Abb. 17). Dafür dürften die in Abschnitt 2.3.1 aufgeführten messtechnischen Probleme verantwortlich sein. Die gemessenen Wassertiefen sind gering, sie liegen zwischen 0.3 mm und 1.8 mm bei Niederschlagsintensitäten von 50 mm/h und 100 mm/h.

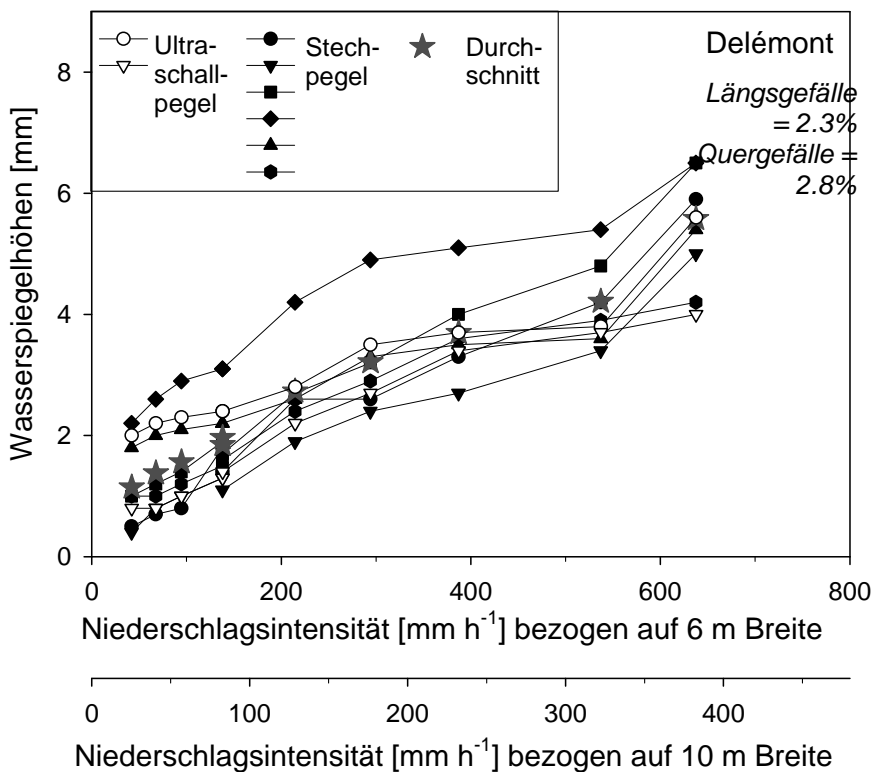


Abbildung 18: Wassertiefen bei äquivalenten Niederschlagsintensitäten zwischen 40 mm/h und 640 mm/h beim Standort Delémont.

In Delémont und Mt Russelin sind die Messungen konsistenter, obwohl auch hier Streuungen von über 2 mm zu beobachten sind. Die höheren Wassermengen und das geringere Gesamtgefälle von 3.6 % führten bei den Versuchen zu grösseren Wassertiefen. Doch auch bei diesen Versuchen stellte sich keine ebene Wasseroberfläche ein, obwohl diese nicht durch den Aufprall der Regentropfen gestört wurde (vgl. Abb. 19).



Abbildung 19: Wasserfilm auf der Strasse am Standort Delémont. Deutlich ist die unregelmässige Wasseroberfläche zu sehen.

Eine Vermessung der Versuchsfläche in Delemont ergab, dass schon die Strassenoberfläche nicht eben ist und sich deshalb neben kleinräumigen Störungen der Wasseroberfläche durch örtliche Rauigkeitsunterschiede auch ungleichförmige Fließwege einstellen (Abb. 20)



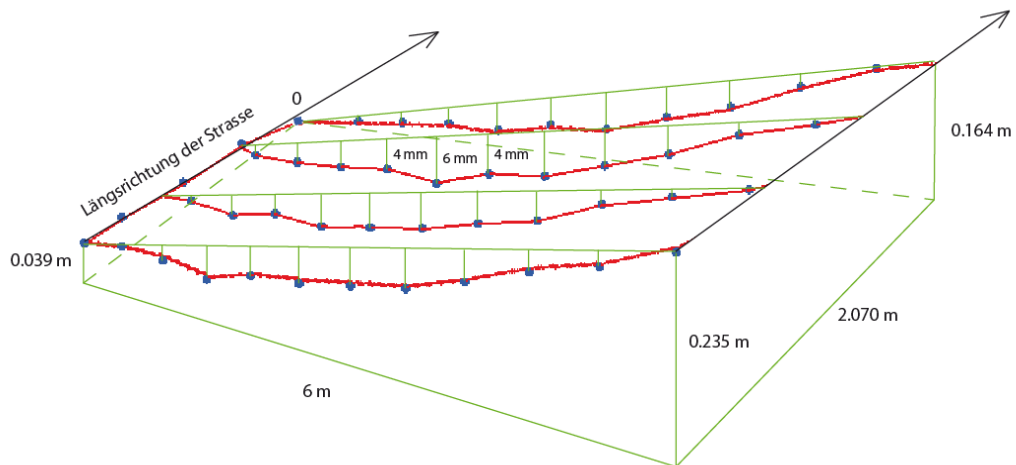


Abbildung 20: Die detaillierte Vermessung des Versuchsfeldes in Delémont zeigt Unebenheiten der Strassenoberfläche, die zu ungleichförmigen Fließwegen führen. Das Profil wurde 60-fach überhöht, um die Höhendifferenzen sichtbar zu machen.

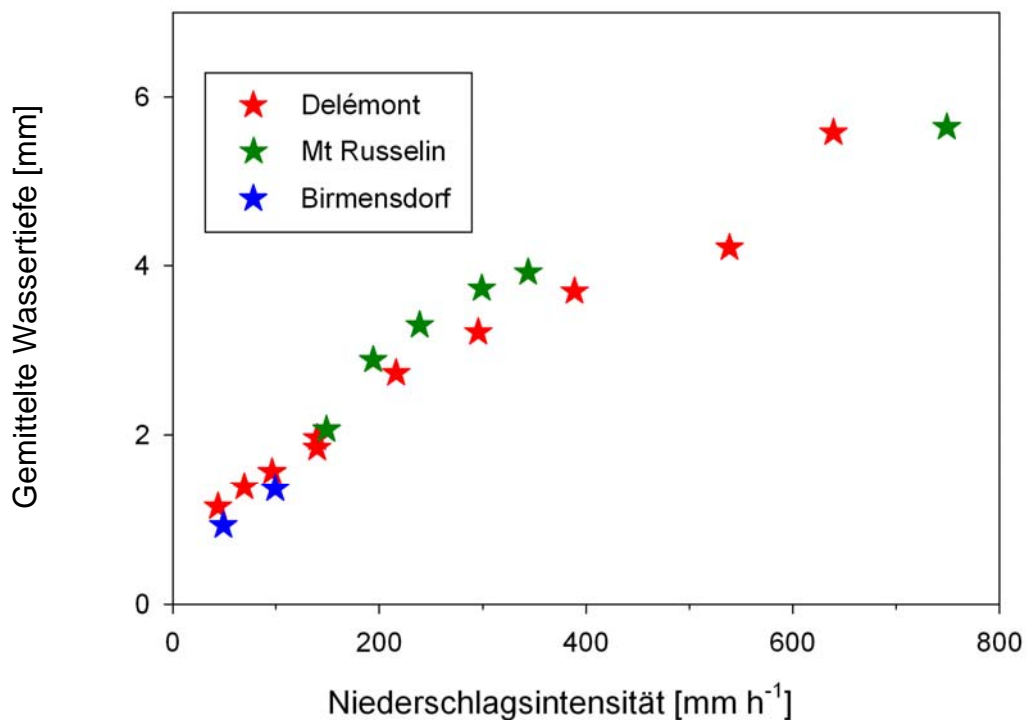


Abbildung 21: Gemittelte Wassertiefen bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten an den drei Standorten.

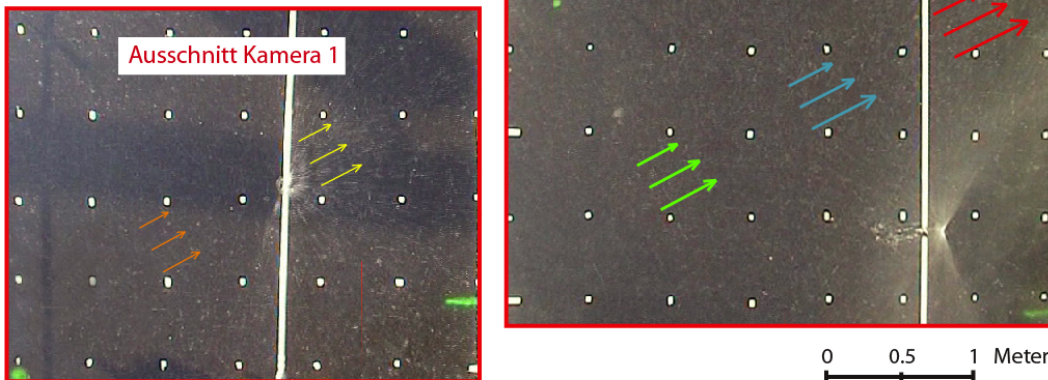
Die in Abbildung 21 zusammengestellten Mittelwerte der Messungen der Wassertiefen bei den verschiedenen Niederschlagsintensitäten an den drei Standorten ergeben ein konsistentes Bild. Die Messungen in Delémont und Mt Russelin, die beide ein identisches Gesamtgefälle von 3.6 % aufweisen, stimmen über den gesamten Bereich gut überein. Am wesentlich steileren Standort Birmensdorf erlaubte es die Versuchsanordnung nicht, mit Niederschlagsintensitäten über 100 mm/h zu berechnen.

## 3.2 Messung der Fließgeschwindigkeiten

### 3.2.1 Birmensdorf:

Da bei gleichmässiger Beregnung die Wassertiefe gegen den Strassenrand hin zunimmt, nimmt auch die Fließgeschwindigkeit zu. Deshalb wurde die Fließgeschwindigkeit in Birmensdorf an mehreren Abschnitten des Versuchsfeldes gemessen (Abb. 22).

Mittels particle tracking gemessene Fließgeschwindigkeiten (Vektoren) der Wasseroberfläche beim Beregnungsversuch in Birmensdorf. Die Vektoren sind massstabsgetreu dargestellt.



Beregnungsintensität:	beobachtete Fließgeschwindigkeiten:				
	①	②	③	④	⑤
50 mm h <sup>-1</sup>	0.135m/s	0.138m/s	0.177m/s	0.192m/s	0.208m/s
98 mm h <sup>-1</sup>	0.157m/s	0.165m/s	0.231m/s	0.246m/s	0.278m/s
108 mm h <sup>-1</sup>	0.165m/s	0.183m/s	0.255m/s	0.286m/s	0.327m/s

Abbildung 22: Fließrichtung und Fließgeschwindigkeiten der Wasseroberfläche bei Niederschlagsintensitäten von 50 mm/h, 98 mm/h und 108 mm/h auf dem Beregnungsfeld bei Birmensdorf.

Bei einer Beregnungsintensität von 50 mm/h nimmt die Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche gegen den Strassenrand hin von 0.135 m/s (Abb. 22, Abschnitt 1) auf 0.208 m/s (Abschnitt 5) um 54% zu. Bei 108 mm/h beträgt diese Zunahme fast 100%. Die Fließgeschwindigkeit der Wasseroberfläche nimmt nicht nur gegen den Strassenrand hin, sondern auch mit zunehmender Beregnungsintensität zu (siehe auch Abb. 23). Bei Abschnitt 5 (Strassenbreite = 6.8 Meter) beträgt diese bei einer Zunahme der Niederschlagsintensität von 50 mm/h auf 108 mm/h 57%.

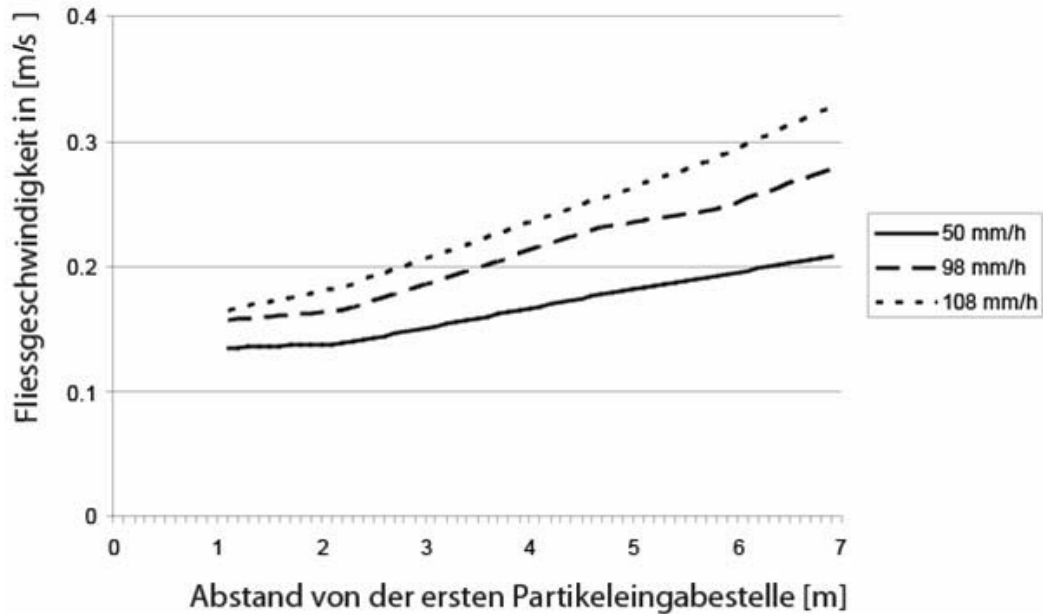


Abbildung 23: An der Wasseroberfläche gemessene Geschwindigkeiten beim Beregnungsversuch in Birmensdorf bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten. Das Gesamtgefälle der Strassenoberfläche beträgt 6.5 %.

### 3.2.2 Mt Russelin und Delémont:

Da in Mt Russelin und in Delémont nicht flächenhaft beregnet, sondern das Wasser von der Strassenmitte her über eine Breite von 4 Metern gleichmässig eingespeist wurde, nimmt die Fliessgeschwindigkeit gegen den Strassenrand hin nicht zu.

Abbildung 24 zeigt, dass sich an den beiden Standorten, die beide ein Gesamtgefälle von 3.6% aufweisen, die Geschwindigkeiten der Wasseroberfläche mit zunehmendem Abfluss gleich entwickeln. Bemerkenswert ist, dass die Geschwindigkeitszunahme bei Abflüssen bei 150 mm/h an beiden Standorten stagniert und bei 300 und 350 mm/h wieder zunimmt. Auch die aus Wassertiefen und Zuflussmengen berechneten mittleren Fliessgeschwindigkeiten verhalten sich an beiden Standorten ähnlich und betragen ungefähr die Hälfte der Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche.

### 3.2.3 Vergleich der 3 Standorte:

In Birmensdorf, wo das Gesamtgefälle mit 6.5% gegenüber 3.6% in Delémont und Mt Russelin fast doppelt so gross ist, sind die Fliessgeschwindigkeiten an der Oberfläche um 20% höher als an den beiden flacheren Standorten. Die mittlere Geschwindigkeit liegt in Birmensdorf bei 50 mm/h um 30%, bei 50 mm/h um 50% über derjenigen in Delémont und Mt Russelin (vgl. Abb. 24).

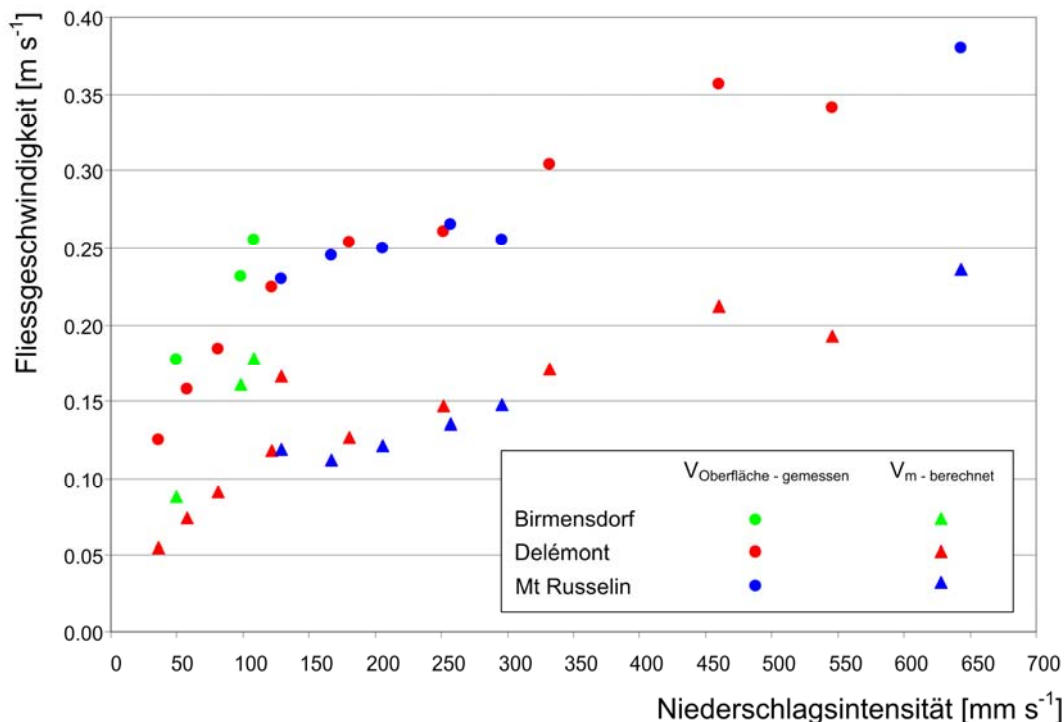


Abbildung 24: Fließgeschwindigkeit auf der Wasseroberfläche bei den Wasserfilmversuchen an den drei Standorten als Funktion der Niederschlagsintensität und die mittleren berechneten Fließgeschwindigkeiten. Die angegebenen Niederschlagsintensitäten in Delémont und Mt Russelin beziehen sich auf einen Abstand zur Wassereingabestelle von 6 Metern.

### 3.2.4 Weitere Beobachtungen:

Die Videoaufnahmen der Partikelbewegungen, die während den Versuchen gemacht wurden, erlauben neben der Bestimmung der Geschwindigkeit auch Einblicke in das Fließverhalten. In Abbildung 25 sind die Partikelwolken der Wasserfilmversuche bei unterschiedlichen Wassermengen nach einer Fließstrecke von einigen Metern an den drei Standorten abgebildet.

Bei geringen unterscheiden sich Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten kleinräumig. Entlang von Tiefstellen sind die Fließgeschwindigkeiten wesentlich höher als bei Erhebungen. Die kleinräumigen Geschwindigkeitsunterschiede bewirken, dass die Partikelwolke in die Länge gezogen wird (siehe Versuch Birmensdorf bei 50 mm/h). Die Partikelwolke in Delémont wird mit zunehmender Niederschlagsintensität kleiner. Bis 122 mm/h ist die Partikelwolke eher langgezogen. Bei 180 mm/h ist eine rundliche kompakte Form erkennbar, die sich mit weiter zunehmender Niederschlagsintensität zu einer quer zur Fließrichtung ovalen kompakten Form entwickelt.

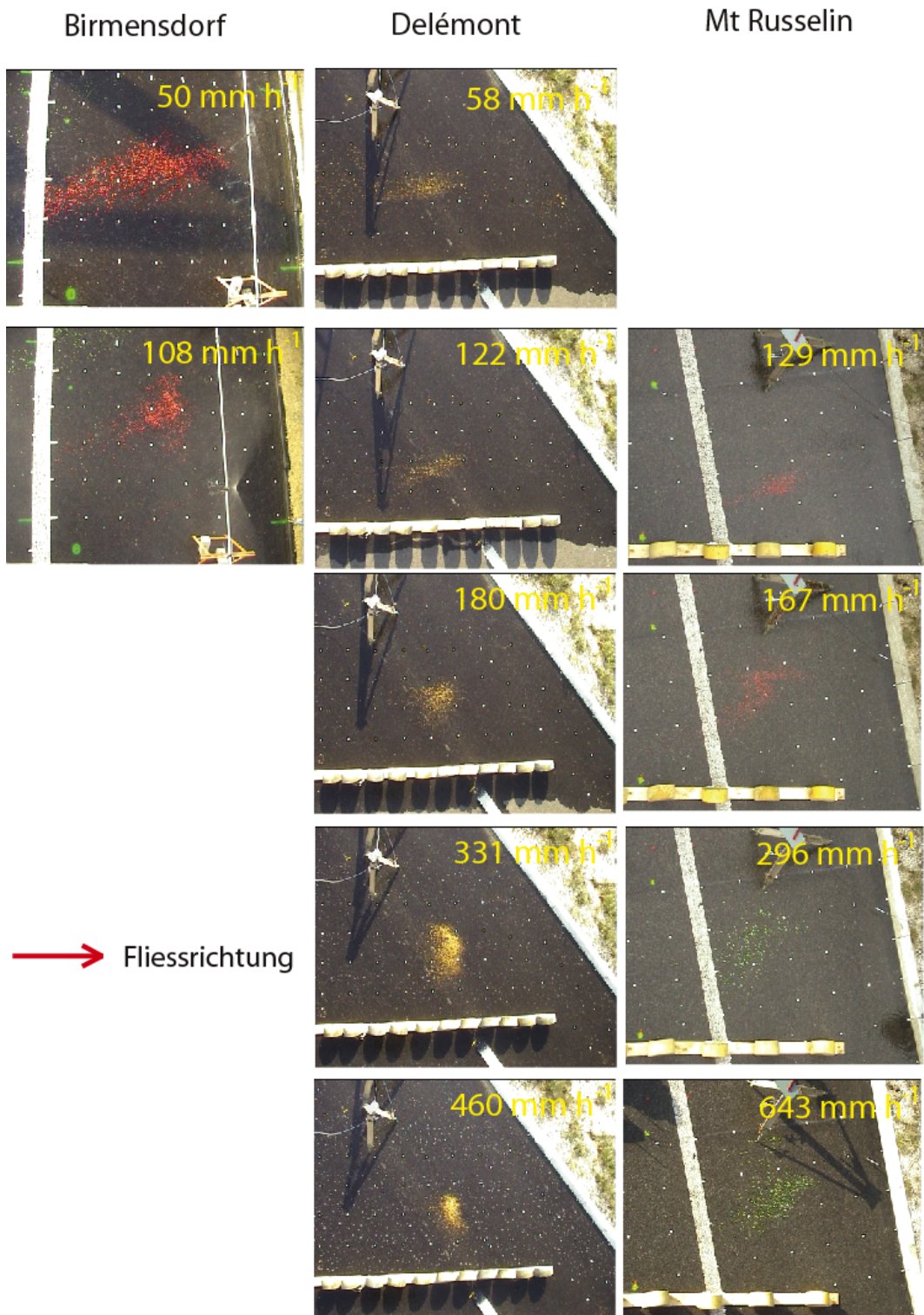


Abbildung 25: Unterschiedliche Verformung der Partikelwolken an den drei Standorten bei unterschiedlichen Abflussmengen.

### 3.3 Anlaufs- und Drainagezeiten

Die Anlaufzeit wird definiert als die Zeit, die nach Beginn eines konstanten Starkregens verstreicht bis am Strassenrand ein konstanter Abfluss erreicht wird. Die Anlaufzeit ist eine wichtige Grösse, um die Reaktion des Entwässerungssystems zu erfassen. Die Drainagezeit entspricht der Zeit, bis nach dem Ende des Niederschlags auch das Ende des Abflusses am Strassenrand erreicht wird.

Zur Messung der Anlaufs- und Drainagezeiten wurden die Zuflüsse auf die Strassenoberfläche (2.3 l/s beim 1., 2.0 l/s beim 2. Versuch und 5 l/s beim 3. Versuch in Mt Russelin) plötzlich ab- und wieder angestellt. Dabei wurde die Wassertiefe durch die installierten Ultraschallpegel registriert. Aufgetragen sind in Abbildung 26 und 27 die Messungen der Wassertiefen über die Zeit an den drei Ultraschallpegeln up3, up4 und up5.

Die Messung der Anlaufzeit gestaltete sich wegen der Trägheit der Bewässerungsanlage schwierig, der Anstieg erfolgte ungleichförmig in jeweils etwa einer Minute

Die Messungen der Drainagezeiten an den drei Pegeln zeigen, trotz der Streuungen, ein konsistenteres Bild. Die Halbwertszeit, d.h. die Zeit, die verstreicht bis sich die Wassertiefe halbiert hat, beträgt bei den verschiedenen Versuchen um 2 Minuten.

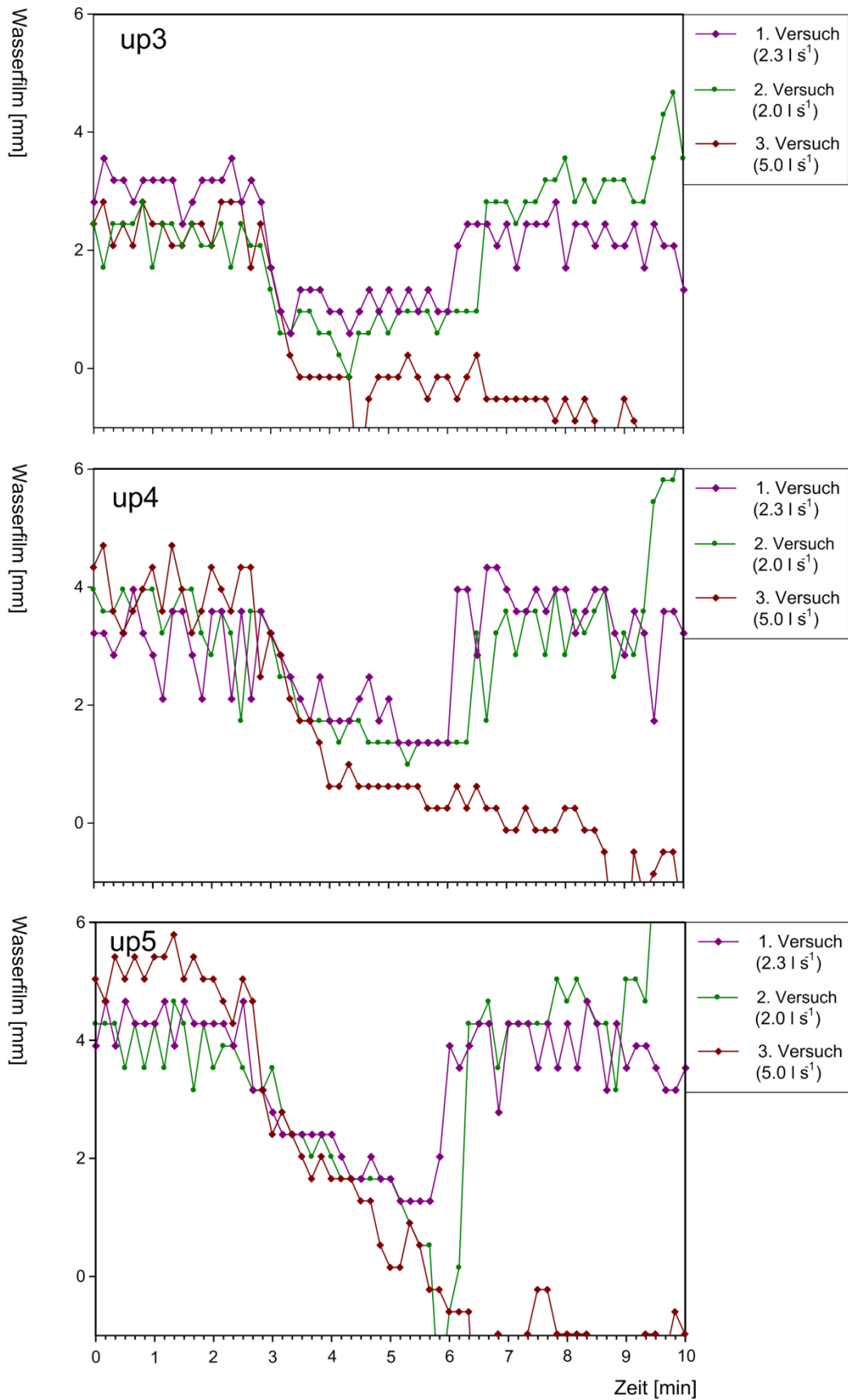


Abbildung 26: Aufzeichnungen der Ultraschallpegel bei drei unmittelbaren Unterbrüchen und darauf folgendem Start des Wasserflusses in Mt Russelin bei 2.3, 2.0 und 5.0 l/s. Die Standorte der Ultraschall-Pegel sind in Abb. 14 dargestellt.

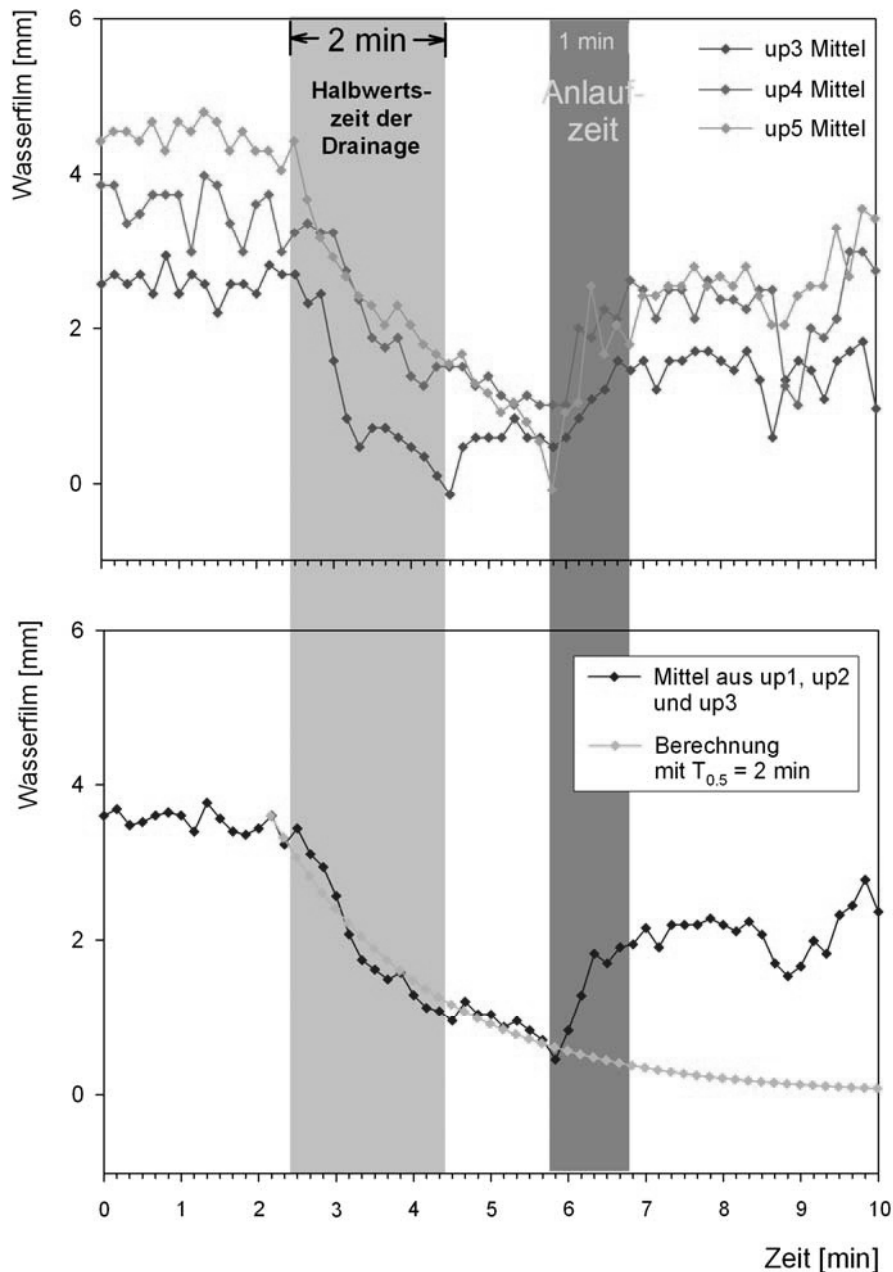


Abbildung 27: Drainage- und Anlaufzeit bestimmt aus den gemittelten, von den Ultraschall-Pegeln up3, up4 und up5 gemessenen Wassertiefen (oben) und den gemittelten Wassertiefen der drei Ultraschall-Pegel (unten).

### 3.4 Auswertung und Interpretation der Wasserfilmmessungen

Ein Ziel der Versuche war, die Hydraulik des Abflusses auf der Strassenoberfläche besser zu verstehen. Das gleiche Ziel verfolgt die empfehlenswerte und detaillierte Publikation FSS (2008). Diese enthält eine ausführliche Zusammenstellung der relevanten Literatur und stützt sich ab auf Beregnungsversuche im Labor. Unsere Versuche fanden in grösserem Massstab auf Strassenabschnitten statt. Sie werden im Folgenden genutzt, um die vorhandenen Fließformeln zu überprüfen oder weiterzuentwickeln. Mit der hergeleiteten Fließformel lassen sich dann Wassertiefen für unterschiedliche Niederschläge, Gefällsverhältnisse und Beläge ermitteln. Mit einer solchen Formel lassen sich verschiedene Fragestellungen untersuchen, wie z.B. das Retentionsvolumen auf der Strassenoberfläche oder die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Aquaplaning:



- was für eine vertikale Geschwindigkeitsverteilung besteht im Wasserfilm auf der Strassenoberfläche?
- ist die Wasserströmung laminar oder turbulent?
- mit welcher der zahlreichen publizierten Fließformeln können die Messungen reproduziert werden, so dass sie für Abschätzungen empfohlen werden können?
- welche Widerstandsbeiwerte und Parameter sollen verwendet werden?

### 3.4.1 Vertikales Geschwindigkeitsprofil:

Mit particle tracking wurden die Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche gemessen. Wird eine konstante vertikale Geschwindigkeitsverteilung angenommen, ergibt sich die Wassertiefe, indem der Ausfluss aus dem Filterrohr durch die Breite der benetzten Oberfläche und die an der Oberfläche gemessene Fließgeschwindigkeit dividiert wird. In Abbildung 28 sind die so berechneten Wassertiefen den gemessenen Tiefen gegenübergestellt. Die tatsächlichen Wassertiefen sind wesentlich grösser als die berechneten, die mittleren Fließgeschwindigkeiten entsprechen etwa der halben Oberflächen-geschwindigkeit.

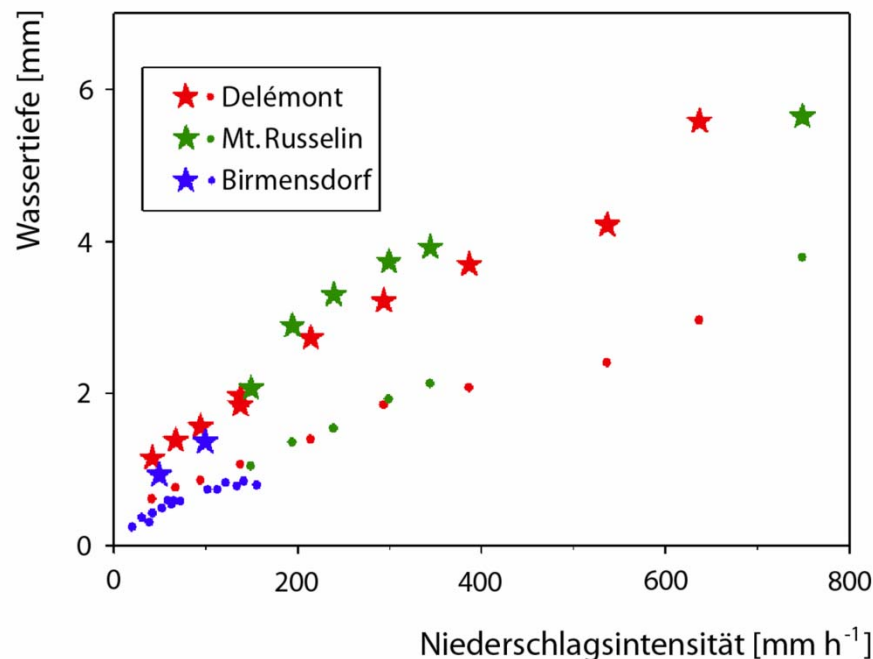


Abbildung 28: Vergleich der gemessenen Wasserspiegelhöhen (Sterne) mit Wasserspiegelhöhen, die sich aus den Abfluss- und Geschwindigkeitsmessungen an der Wasseroberfläche ergeben (Punkte). Die Niederschlagsintensität bezieht sich auf eine Strassenbreite von 6 m.

### 3.4.2 Ist die Wasserströmung auf der Strassenoberfläche laminar oder turbulent?

Die Verteilung der Geschwindigkeit über die Wassertiefe ist bei laminaren und turbulenten Strömungen unterschiedlich, bei laminarer Strömung nimmt die Fließgeschwindigkeit von der Sohle zur Wasseroberfläche kontinuierlich zu; bei turbulenter Strömung ist die Geschwindigkeitsverteilung durch den Energieaustausch ausgeglichener. Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung erfolgt, wenn die kritische Reynoldszahl  $Re_{kr}$  überschritten wird.  $Re_{kr}$  liegt gemäss Dracos (1987) bei 2320, bei zahlreichen Versuchen wurden jedoch wesentlich höhere Werte beobachtet.

Reynoldszahl bei den Abflussversuchen auf der Strassenoberfläche:

$$Re = v \cdot R / \nu$$

charakteristische Geschwindigkeit  $v = 0.1$  bis  $0.4$  m/s

hydraulischer Radius (Wassertiefe)  $R = 0.001$  bis  $0.005$  m

kinematische Viskosität  $\nu = 1.24 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,

Damit ergeben sich für die beobachteten Abflüsse auf der Strassenoberfläche Reynoldszahlen  $Re$  zwischen 80 und 1500, die klar unter  $Re_{kr}$  liegen. Damit ist die Strömung laminar, was den starken vertikalen Gradienten, der bei den Experimenten gemessen wurde, erklärt.

### 3.4.3 Fließformeln

Obwohl sich die zahlreichen publizierten Formeln (Zusammenstellung siehe z.B. Zior, 1987) in ihrem Aufbau unterscheiden, stützen sie sich auf ähnliche Parameter ab, wie Sohlgefälle, Rauigkeit, Wassertiefe, etc. Wie in Abschnitt 2.3 aufgezeigt, sind diese Parameter schwer zu definieren. Die im Verhältnis zur Wassertiefe sehr hohe Unebenheit der Strassenoberfläche ermöglicht keine sinnvolle Festlegung der Wassertiefe und der Rauigkeit. In den Abbildungen 29 bis 31 sind die mit diesen Formeln anhand der vorgegebenen Parameter ermittelten Wassertiefen den an drei Versuchsstandorten gemessenen Wassertiefen gegenübergestellt.

Offensichtlich werden die Wassertiefen mit den vorgegebenen Standardparametern (Zior, 1987) nicht richtig erfasst. Andererseits wird der generelle Verlauf der Wassertiefe mit zunehmendem Abfluss von allen Formeln erfasst, so dass sich alle Kurven durch Eichung recht gut an die Messungen anpassen lassen. Wird z.B. in der Formel von Strickler (Dracos, 1987) zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit

$$v = k_{st} \cdot J^{1/2} \cdot R^{2/3},$$

J: Gefälle, R: hydraulischer Radius (angenähert Wassertiefe),

ein Rauigkeitsbeiwert  $k_{st}$  von 40 statt der in Zior (1987) vorgeschlagenen 92 gewählt, werden die Messungen gut repräsentiert.

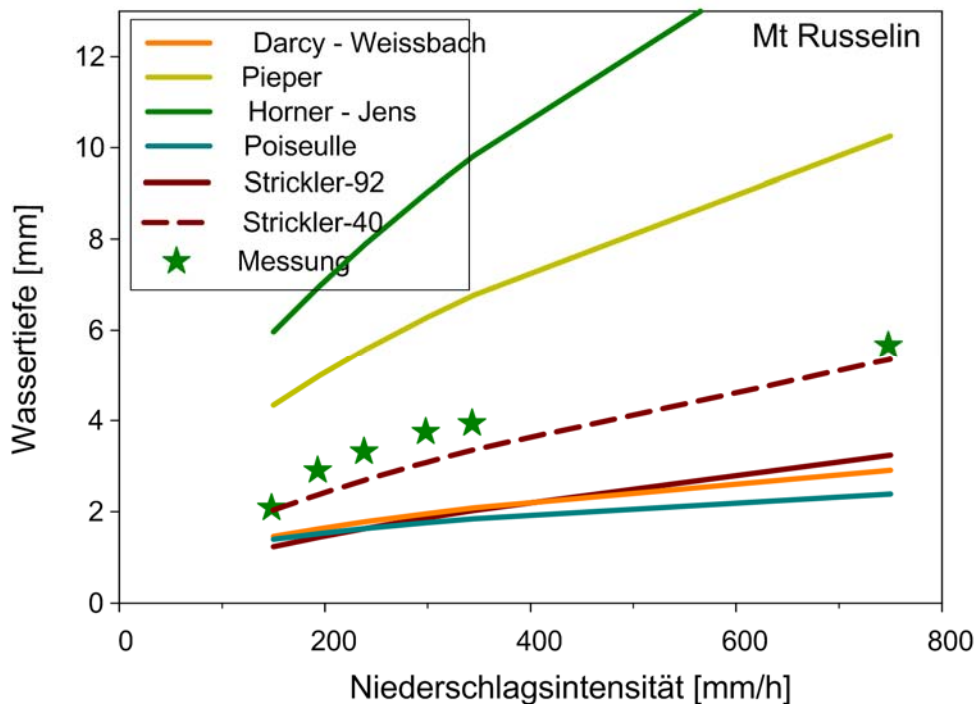


Abbildung 29: Wassertiefen auf der Strasse am Standort Mt Russelin bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten. Vergleich der Messungen (Sterne) mit Wassertiefen, die mit den erwähnten hydraulischen Formeln berechnet wurden (Linien).

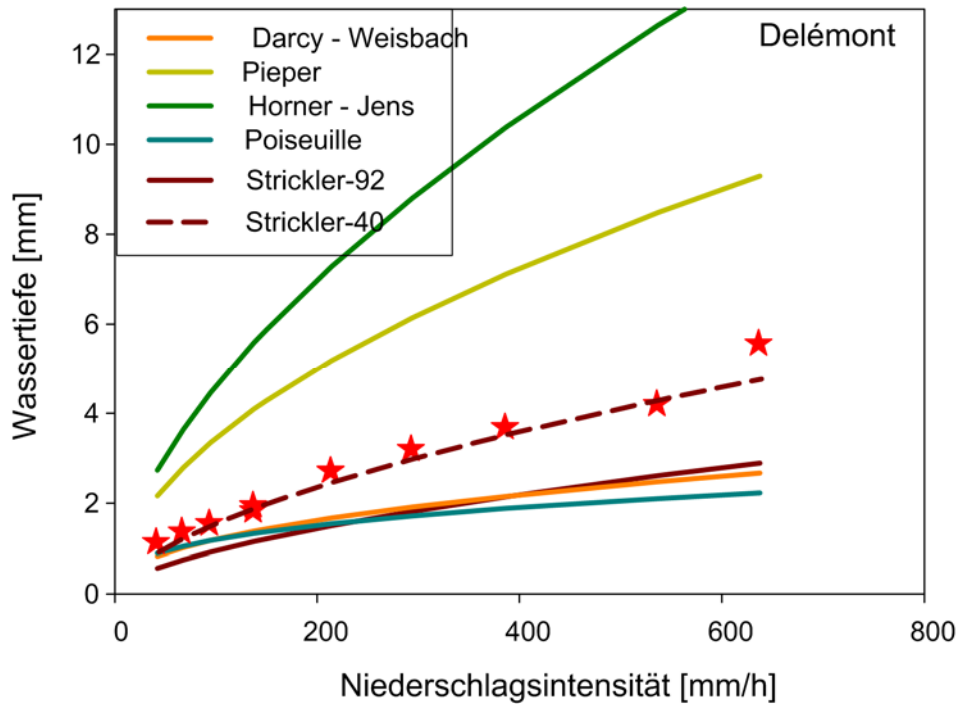


Abbildung 30: Wassertiefen auf der Strasse am Standort Delémont bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten. Vergleich der Messungen (Sterne) mit Wassertiefen, die mit den erwähnten hydraulischen Formeln berechnet wurden (Linien).

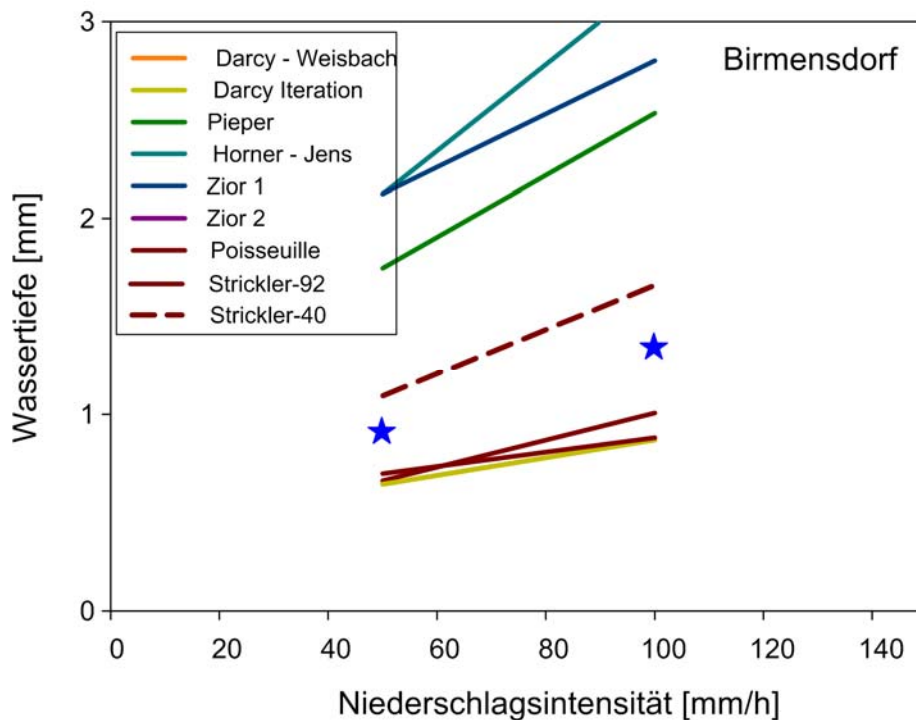


Abbildung 31: Wassertiefen auf der Strasse am Standort Birmensdorf bei verschiedenen Niederschlagsintensitäten. Vergleich der Messungen (Sterne) mit Wassertiefen, die mit den erwähnten hydraulischen Formeln berechnet wurden (Linien).

### 3.4.4 Bewertung der Versuche

Dass unsere Versuche nicht im Labor sondern auf tatsächlichen Strassenoberflächen durchgeführt wurden, hat verschiedene Konsequenzen. Geeignete Versuchsflächen zu finden war aufwendig, es konnten nur neuere Strassenabschnitte auf Autobahnen mit

ähnlicher Oberflächenbeschaffenheit berechnet werden mit Fallliniengefälle, die sich zwischen 3.6% und 7.3% bewegten. Die Versuche auf realen Strassenoberflächen repräsentieren aber die realen Verhältnisse mit allen Ungenauigkeiten und zeigen, dass auch mit hohem Messaufwand nur eine begrenzte Genauigkeit erreicht werden kann und dass die Strömungsverhältnisse weit von den vereinfachten Annahmen der theoretischen Modelle entfernt sind. Die Fliessvorgänge liessen sich mit der Formel nach Strickler (Dracos, 1987) nachrechnen, wenn ein  $k_{st}$  Wert von 40 statt 92 gewählt wurde. Die Wassertiefen liessen sich an den drei Standorten mit der Formel von Strickler gut reproduzieren, sie wird deshalb für die Abschätzung der Wassertiefen verwendet. Allerdings gelang das nur, wenn ein  $k_{st}$  von 40, statt des in der Literatur empfohlenen Wertes von 92 gewählt wurde. Dieser für eine glatte Oberfläche ungewöhnlich tiefe Wert wurde durch Eichung ermittelt. Er widerspiegelt die Tatsache, dass die Formel von Strickler ausserhalb des Bereiches verwendet wird, für die sie entwickelt wurde. Auch mit anderen Ansätzen, wie äquivalente Sandrauhigkeit liess sich kein sinnvoller Rauigkeitsbeiwert ermitteln. Strömungen, bei denen die Wassertiefe im Bereich der Unebenheiten der Oberfläche liegt, gehorchen anscheinend anderen Gesetzen.

### 3.4.5 Zusammenfassung der Resultate und Konsequenzen der Versuche

In Abbildung 32 sind die Wassertiefen auf der Strassenoberfläche bei unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten und Gesamtgefällen zwischen 0.5 % und 7.3% dargestellt. Im rot abgegrenzten Bereich liegen Werte, die für die Strassenentwässerung relevant sind. Er zeigt die in der Schweiz zu erwartenden ein bis fünfjährigen 10-Minuten Niederschlagsintensitäten von 50 (Wallis) bis 150 mm/h (Tessin). Extreme 10-Minutenregen mit einer Niederschlagsintensität von 100 mm/h und 300mm/h, die alle 100 Jahre wiederkehren, liegen im grün abgegrenzten Bereich.

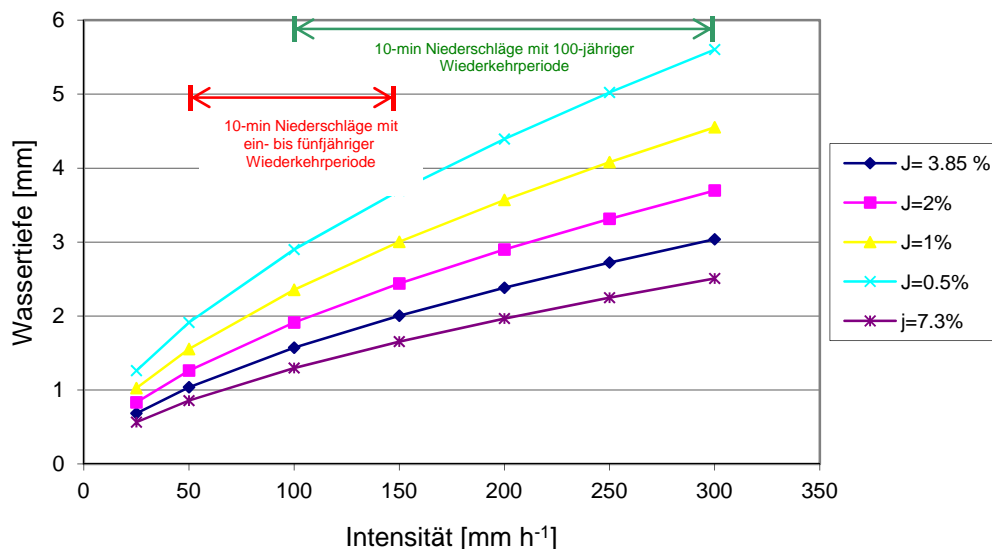


Abbildung 32: Wassertiefen als Funktion des Gefälles für unterschiedliche Niederschlagsintensitäten. Für 10-min Niederschläge mit einer Wiederkehrperiode zwischen einem und fünf Jahren kann sich ein Wasserspiegel mit einer Dicke von 1.6 bis 3.7mm, für Extremniederschläge mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren bilden sich Wasserspiegel mit einer Dicke von 2.5 bis 5.6 mm aus.

Aufgrund unserer Versuche sind in der Schweiz auf Strassenoberflächen folgende Wassertiefen zu erwarten:

im Normalfall: 1- 2 mm,	bei geringen Gefällen von 0.5%:	3 mm
im Extremfall: 2- 3.5 mm,		4.5 mm

Diese liegen unter denen, die in dem Bericht VSS (2000) pg. 115 mit Modellrechnungen und geschätzten Parametern ermittelt worden sind In Unebenheiten wie Spurrinnen, etc. können diese Werte überschritten werden.

Die mittleren Fliessgeschwindigkeiten bei einem Gefälle von 3.5% liegen

bei einem Niederschlag von	50 mm/h	bei	0.05 m/s
	100 mm/h		0.10 m/s
	150 mm/h		0.12 m/s
	200 mm/h		0.12 m/s
	350 mm/h		0.17 m/s

Die Anstiegszeiten bei den aufgebrachtten Wassermengen lagen bei 1 Minute, die Drainage erfolgte mit einer Halbwertszeit (Rückgang auf 50 %) in 2 Minuten.

### 3.4.6 Gefahr von Aquaplaning

Eine wichtige Aufgabe der Strassenentwässerung ist das Verhindern oder eine wesentliche Reduktion der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Aquaplaning. Auch hier sei auf die grundlegende Publikation FSS (2008) verwiesen, der auch die Grundlage für Abbildung 33 liefert, die die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Aquaplaning als Funktion der Tiefe des Wasserfilms, des Reifenprofils und der Fahrgeschwindigkeit darstellt. Abbildung 33 zeigt auch den Bereich der nach unseren Versuchen in der Schweiz zu erwartenden Wassertiefen: Diese liegen im Normalfall zwischen 1 mm und 2 mm und können bei Strassenabschnitten mit Gefällen von 0.5% 3mm erreichen. Bei Quergefällswechseln mit noch geringeren Gefällen können lokal grössere Wassertiefen entstehen. Nach Abbildung 33 besteht demnach bei Reifenprofilen von 4 mm und Geschwindigkeiten von 80 km/h bei den in der Schweiz normalerweise zu erwartenden Niederschlagsintensitäten keine Aquaplaninggefahr. Bei geringeren Reifenprofildicken und Geschwindigkeiten über 80 km/h ist während Intensitätsspitzen, die jährlich bis 5jährlich während einiger Minuten auftreten, Aquaplaning möglich.

Um die tatsächliche Gefahr von Aquaplaning bei diesen extremen Intensitäten einschätzen zu können, ist zu berücksichtigen, dass bei Niederschlagsintensitäten von über 150 mm/h die Sicht durch die Windschutzscheibe so stark eingeschränkt ist, dass praktisch nur noch im Schritttempo gefahren werden kann.

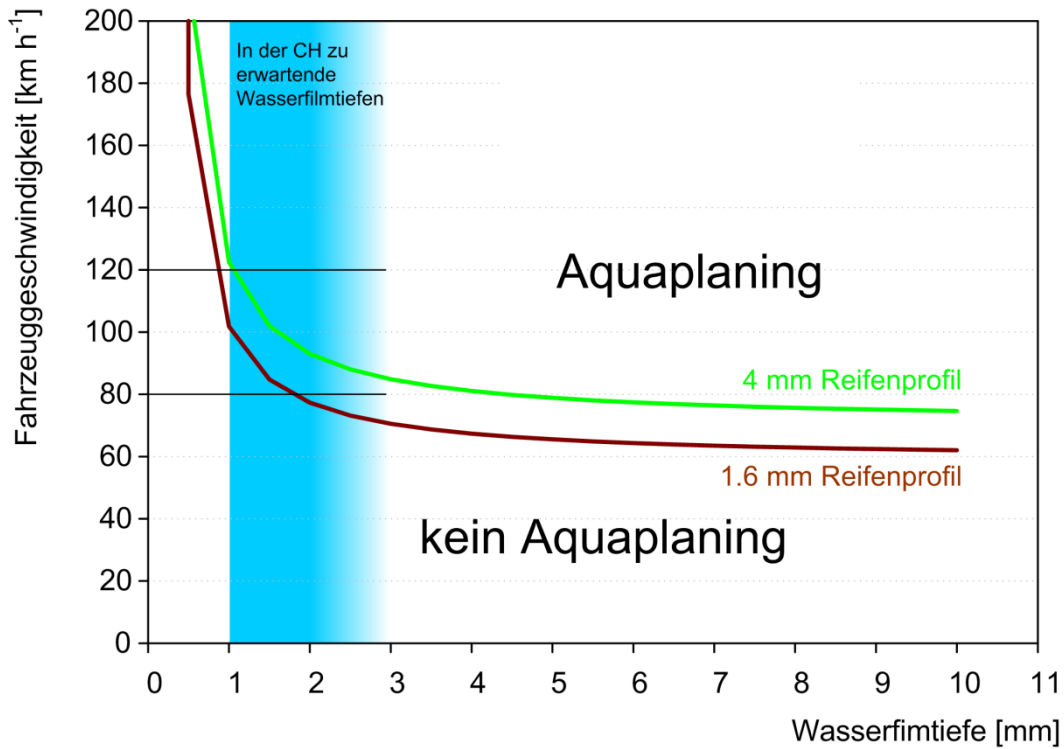


Abbildung 33: Das Auftreten von Aquaplaning in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke variiert mit dem Reifenprofil. Bei Geschwindigkeiten unter 80 km/h, einer Wasserfilmdicke von 3mm und einem Reifenprofil von 4 mm besteht wenig Gefahr. Bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h kann mit gleichem Reifenprofil schon bei einer Wasserfilmdicke von 1 mm Aquaplaning einsetzen. Bei geringerem Profil setzt Aquaplaning schon bei tieferen Geschwindigkeiten ein.

## 4 Wasserlauf am Strassenrand

### 4.1 Fragestellung

Mit der zweiten Versuchsserie wurde das Verhalten des Wasserlaufs am Strassenrand untersucht. Dieser wird mit zunehmender Abflussmenge breiter und nimmt so grössere Teile der Fahrbahn in Anspruch. Folgende Fragen interessieren hier:

- wie breit wird der Wasserlauf in Abhängigkeit des Längs- und Quergefälles, der Rauigkeit des Belags und der Niederschlagsintensität,
- wie viel Wasser wird im Wasserlauf gespeichert (Retention)?

Während bei geringen Wassermengen ein Ablauf alles Wasser fasst und in die Kanalisation leitet, wird bei grösseren Abflüssen und Fliessgeschwindigkeiten ein Teil des Wassers den Ablauf umströmen. Damit verbreitet sich der Wasserlauf kontinuierlich entlang einer Gefällsstrecke.

### 4.2 Messungen und Beobachtungen: Wasserlauf

Um das Verhalten des Wasserlaufes am Strassenrand und um die Einläufe herum zu erfassen und das Schluckvermögen der Ablaufschächte zu bestimmen, wurden Abflussmengen von 5 l/s bis 40 l/s am Strassenrand aufgebracht. Die Abbildungen 34 bis 36 zeigen die Abflüsse an den drei Standorten während den Versuchen. Diese wurden mit einer Wasseruhr zu verschiedenen Zeitpunkten und kontinuierlich mit Ultraschallsonden gemessen.

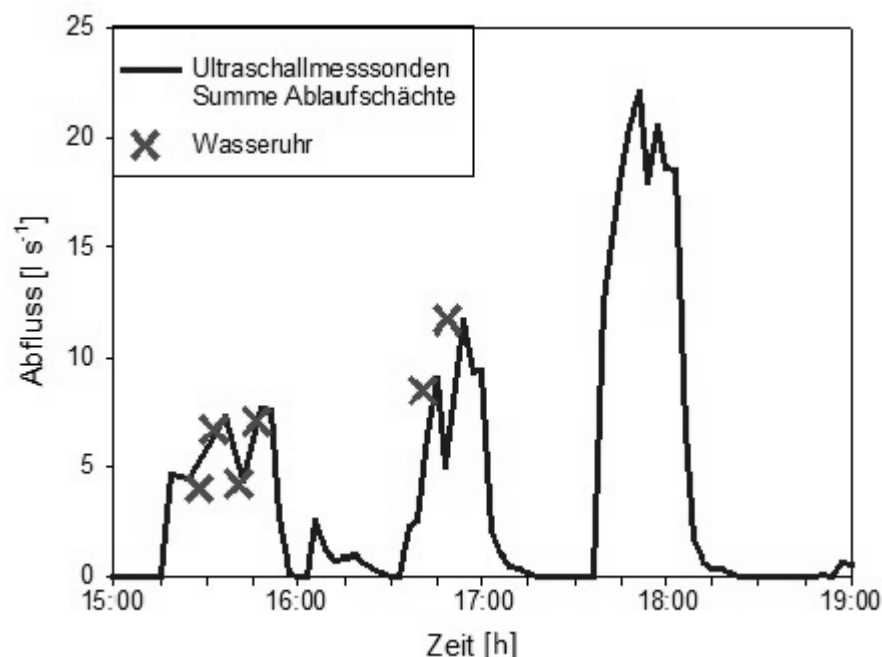


Abbildung 34: Während den Wasserlauf- Versuchen am Standort Birmensdorf aufgebraachte Wassermengen. Dargestellt sind die kontinuierlichen Messungen der Ultraschall-Sonden und die punktuellen Messungen der Wasseruhr.

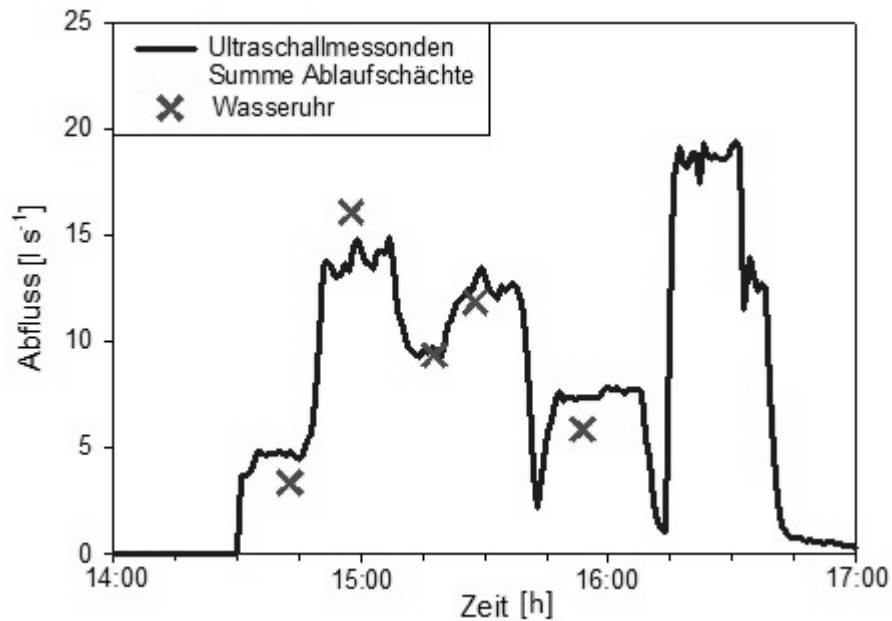


Abbildung 35: Während den Wasserlauf- Versuchen am Standort Delémont aufgebrachte Wassermengen. Dargestellt sind die kontinuierlichen Messungen der Ultraschallsensoren und die punktuellen Messungen der Wasseruhr.

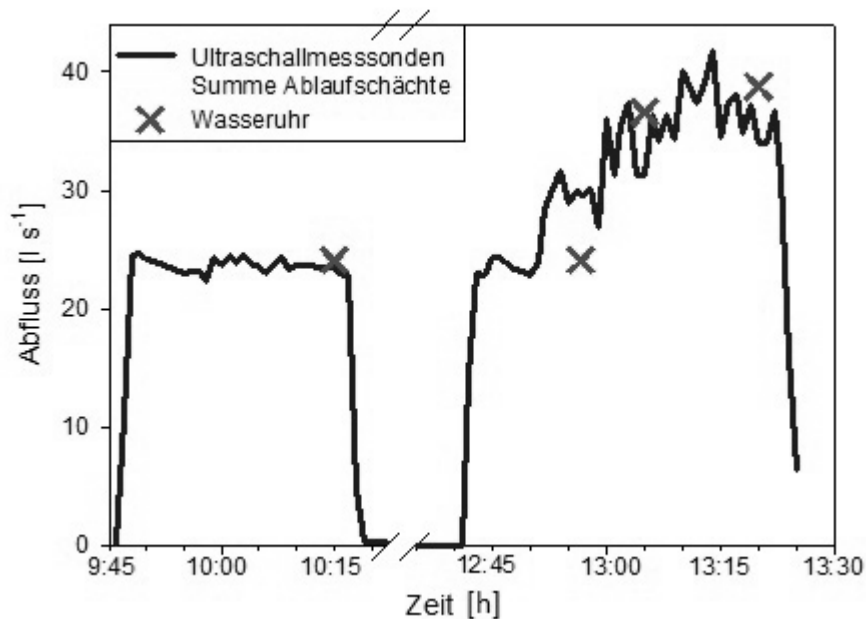


Abbildung 36: Während den Wasserlauf- Versuchen am Standort Mt Russelin aufgebrachte Wassermengen. Dargestellt sind die kontinuierlichen Messungen der Ultraschallsensoren und die punktuellen Messungen der Wasseruhr..

Abhängig vom Quergefälle und der Wassermenge stellen sich an den Standorten unterschiedliche Wasserspiegelbreiten ein. Abbildung 37 gibt einen Überblick über die mit Videoaufnahmen gemessenen Wasserspiegelbreiten in Abhängigkeit der Abflussmenge. Während den Versuchen wurden wiederum die Geschwindigkeiten der Wasseroberfläche mit particle tracking gemessen. In der Videoaufnahme ist die gebogene Form der Partikelwolke erkennbar, die auf die Geschwindigkeitsabnahme der Wasseroberfläche mit abnehmender Wassertiefe hinweist (Abb. 38). Abbildung 39 zeigt die mit Ultraschall- und Stechpegeln gemessenen Wassertiefen sowie die mit particle tracking ermittelten Fließgeschwindigkeiten bei einem Abfluss von 19 l/s in Delémont.



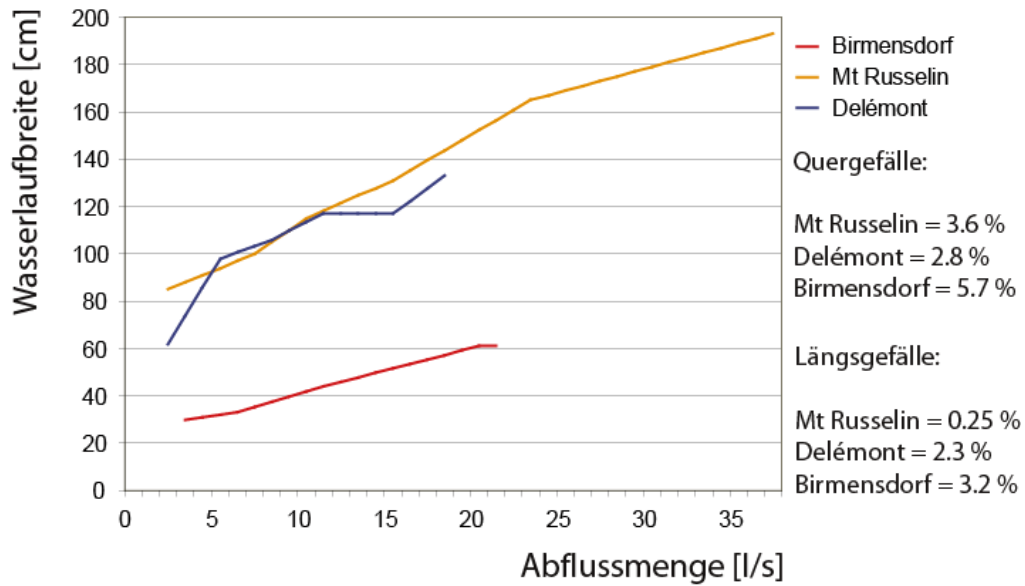


Abbildung 37: Breite des Wasserlaufes an den drei Standorten in Abhängigkeit der Abflussmenge. Aufgrund des grossen Längs- und Quergefalles ist der Wasserlauf in Birmensdorf weit schmaler als in Mt Russelin und Delémont.

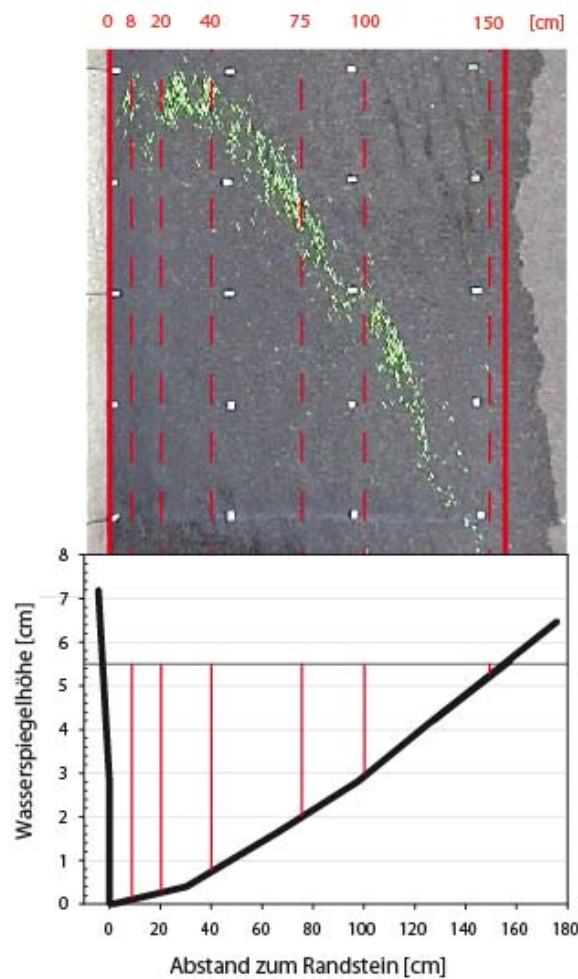


Abbildung 38: Aufsicht und Gerinnequerschnitt des Wasserlaufes in Mt Russelin bei einer Durchflussmenge von 24 l/s. Die Verformung der Partikelwolke zeigt, wie stark die Fliessgeschwindigkeit gegen die Strassenmitte hin abnimmt. Die senkrechten roten Striche stellen die Grenzen der Teilabschnitte dar, für die die Geschwindigkeiten mit particle tracking ermittelt wurden.

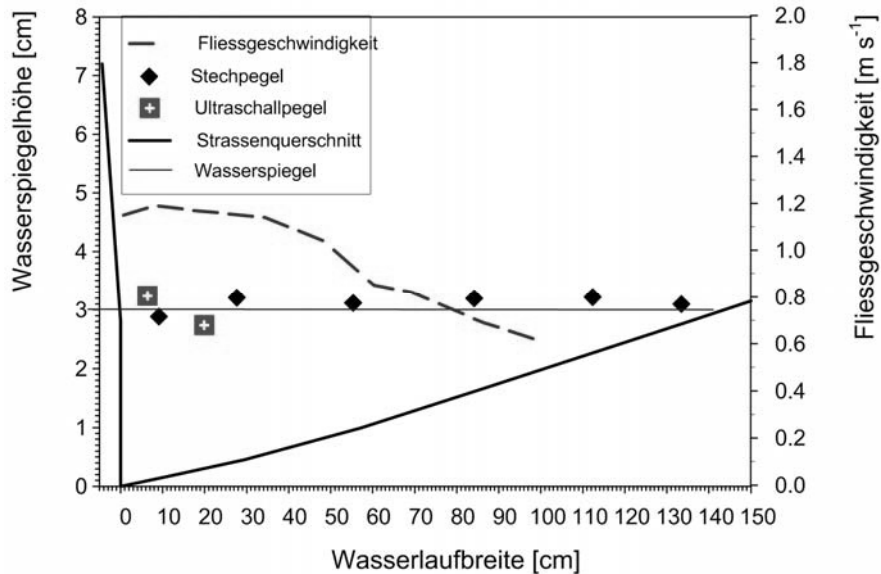


Abbildung 39: Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefe am Standort Delémont bei einem Abfluss von 19 l/s.

### 4.3 Auswertung der Wasserlaufversuche

Mit den Wasserlauf-Versuchen wurden zwei Ziele verfolgt. Zum einen sollten Formeln entwickelt oder überprüft werden, um Breite und Fließgeschwindigkeiten des Wasserlaufes am Strassenrand abzuschätzen. Damit lässt sich Verhalten und Retentionsvermögen des Wasserlaufes bei grossen Niederschlagsintensitäten abschätzen. Zum zweiten soll die Anströmung der Abläufe untersucht werden, um deren Schluckvermögen abschätzen zu können. Dafür reichen eindimensionale Betrachtungen nicht, da die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt berücksichtigt werden muss.

In Abbildung 40 werden die über die Breite des Wasserlaufes an der Wasseroberfläche gemessenen Geschwindigkeiten mit berechneten mittleren Geschwindigkeiten verglichen. Durch die gegen die Strassenmitte stark abnehmende Wassertiefe reduzieren sich auch die Fließgeschwindigkeiten. Die Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt wurde mit dem Programm HEC-RAS berechnet (siehe: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>), das eine Option enthält um nach dem Ansatz von Einstein Quasi-2D-Geschwindigkeitsverteilungen herzuleiten. Dabei wird der Querschnitt in einzelne Segmente unterteilt, in denen iterativ die mittleren Geschwindigkeiten abgeschätzt werden.

In Birmensdorf stimmen die gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten und die berechneten mittleren Geschwindigkeiten gut überein. Das bedeutet, dass das vertikale Geschwindigkeitsprofil praktisch konstant ist. In Delemont liegen die mittleren Geschwindigkeiten etwas tiefer, d.h. dass sich im vertikalen Geschwindigkeitsprofil die Geschwindigkeit mit zunehmender Wassertiefe reduziert.

Anders sehen die Resultate in Russelin aus. Hier beträgt die mittlere Geschwindigkeit nur die Hälfte der Oberflächengeschwindigkeit; es besteht also im vertikalen Profil ein starker Gradient. Ein so prägnantes Profil wäre bei laminaren Strömungen zu erwarten. Nach Tabelle 6 (im Anhang) liegen die Reynoldszahlen aber auch in Russelin bei allen Wassermengen über  $Re_{kr}=2300$ . Allerdings dürfte bei den geringeren Tiefen gegen die Strassenmitte hin die Strömung laminar werden. Die Strömung in Russelin verhält sich in verschiedener Hinsicht speziell. Bei Abflüssen zwischen 10.5 l/s und 16 l/s ist der Wasserspiegel zur Strassenmitte, d.h. zu den kleineren Wassertiefen hin geneigt (Abb. 41). Die Fließgeschwindigkeit liegt bei allen Abflüssen im Bereich der kritischen Geschwindigkeit (Tab. 6 im Anhang, Abb. 42). Im Weiteren ist auf den Videoaufnahmen ersichtlich, dass in Russelin stehende Wellen und Querströmungen auftreten. Es ist offensichtlich, dass die Strömungsverhältnisse bei geringen Längsgefällen von 0.25% unübersichtlich werden und schwer zu erfassen sind.

Wie bei den Wasserfilmversuchen stimmen, trotz der geschilderten Schwierigkeiten, die Berechnungen der mittleren Geschwindigkeiten mit der Formel von Strickler an allen Standorten mit den beobachteten mittleren Geschwindigkeiten überein (Abb. 42). Obwohl

der Belag über die gesamte Strassenbreite identisch ist, konnte bei der Auswertung der Wasserlaufversuche, im Gegensatz zu den Wasserfilmversuchen, ein  $k_{st}$  von 92 statt der üblichen 40 verwendet werden. Die wenigen Zentimeter Wassertiefe genügen offensichtlich, um den k-Wert in den üblichen Bereich zurückzuführen.

## 4.4 Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, dass sich das Verhalten des Wasserlaufs, d.h. Wasserlaufbreite, -tiefe und Geschwindigkeitsverteilung, trotz der teilweise komplizierten Strömungsverhältnisse gut reproduzieren lassen.

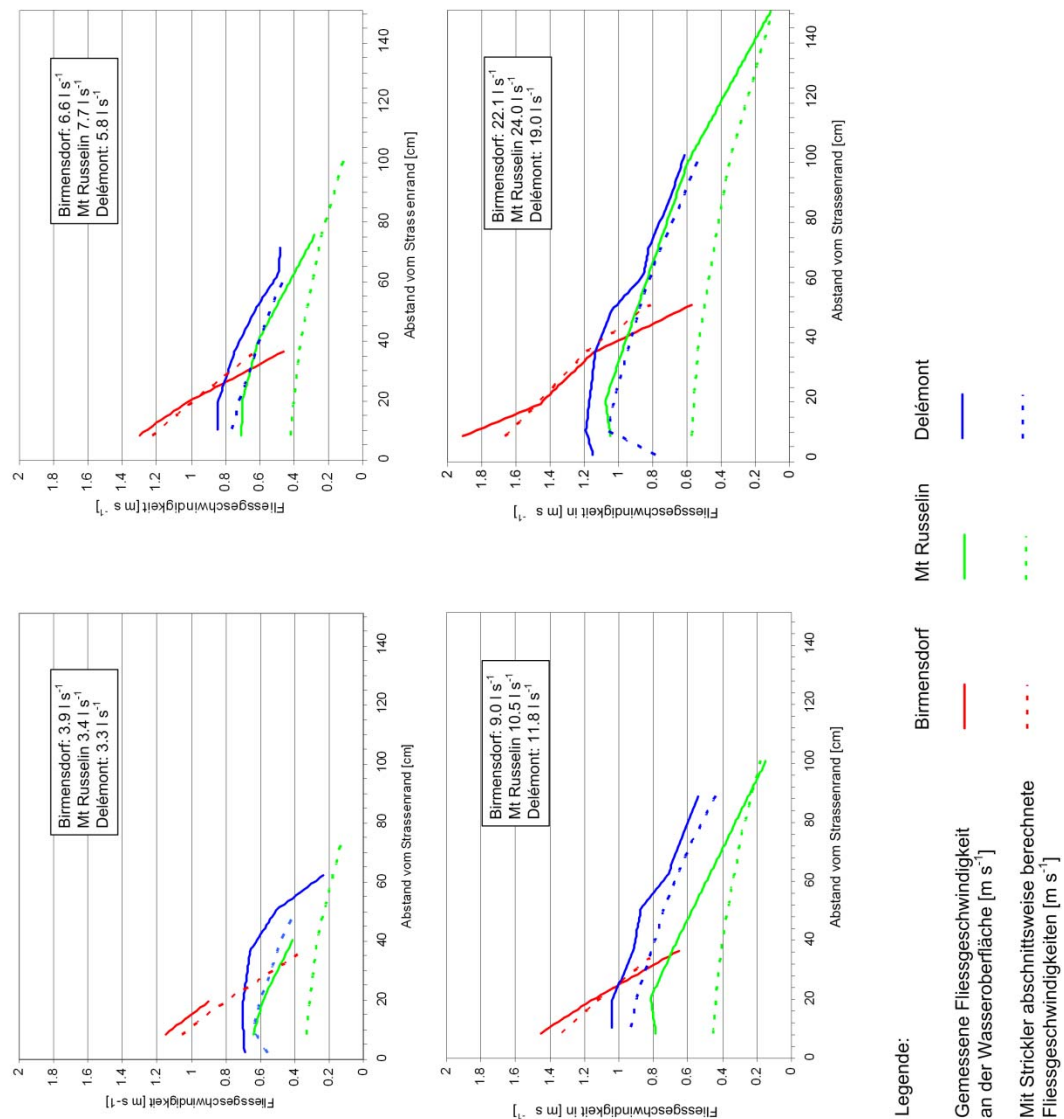


Abbildung 40: Gemessene Fließgeschwindigkeiten an der Oberfläche und berechnete mittlere Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Breite des Wasserlaufs (Tabelle 5, im Anhang). Für die Berechnung mit Strickler wurde ein  $k$ -Wert von 92 verwendet. In Delémont und in Birmensdorf stimmen die gemessenen Fließgeschwindigkeiten relativ gut mit den berechneten Durchschnittsgeschwindigkeiten überein. In Mt Russelin übertreffen die gemessenen Fließgeschwindigkeiten die berechneten um fast das Doppelte.

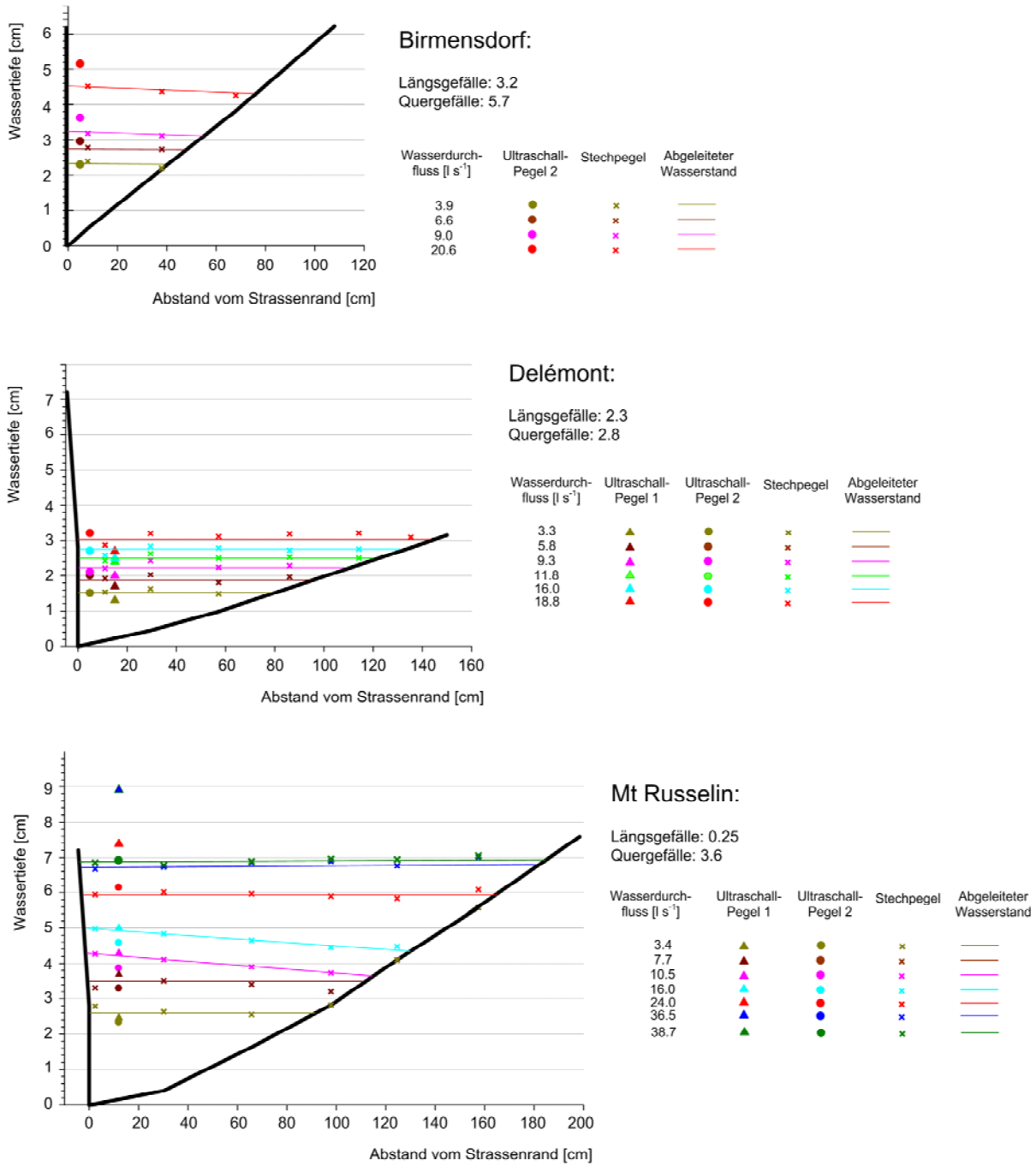


Abbildung 41: Querschnitte der Strassenrandbereiche an den Standorten Birmensdorf, Delémont und Mt Russelin. Eingetragen sind die mit den Stechpegeln und den Ultraschallsonden gemessenen Wassertiefen bei den aufbrachten Wassermengen.

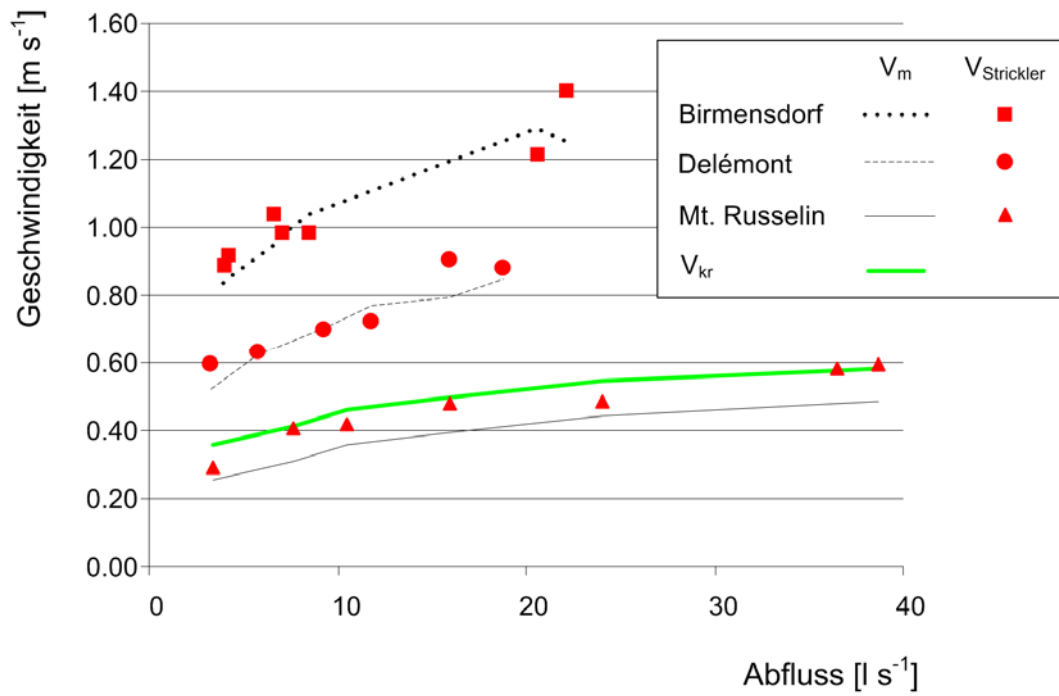


Abbildung 42: Bei den Abflussversuchen stimmen an allen drei Standorten die mittleren Fließgeschwindigkeiten gut mit den mit Strickler berechneten Fließgeschwindigkeiten überein. In Mt Russelin liegen die Fließgeschwindigkeiten im Bereich der kritischen Geschwindigkeit ( $V_{kr}$ ).

## 5 Schluckvermögen und Strömungsverhältnisse um den ersten Ablauf

### 5.1 Einführung

Die Abläufe haben die Aufgabe, das auf der Strassenoberfläche anfallende Wasser in die Kanalisation zu leiten. Wie effektiv sie diese Aufgabe bewältigen können, hängt von der Ausgestaltung des Rostes, der Konstruktion des Schachtes und der Anströmung des Ablaufes ab.

Hydraulische Modellversuche (Eggenberger & De Giorgi, 1999) haben gezeigt, dass das Schluckvermögen eines richtig montierten und unverschmutzten Rostes hoch ist. Auch bei den hier beschriebenen Versuchen wurde die Kapazität der Roste bei weitem nicht erreicht, die Fläche der Roste in Fliessrichtung wurde nur zu einem kleinen Teil beansprucht (Abb. 43).

### 5.2 Auswertung der Versuche

So ist für die in Fliessrichtung gefassten Wassermengen entscheidend, wie der Rost an-geströmt wird und wie breit der Wasserlauf ist. Abbildung 44 zeigt die beobachteten Strömungsverhältnisse beim ersten Ablauf des untersuchten Strassenabschnittes an den drei Standorten. Die vom Sammler aufgenommenen Wassermengen wurden mit Ultra-schallsonden im Auslauf des Sammlers gemessen.



*Abbildung 43: Aufnahme eines Einlaufschachtes während eines Versuches in Birmensdorf. Von der zur Verfügung stehenden Rostfläche wird in Fliessrichtung selbst bei grossen Durchflussmengen nur ein kleiner Teil beansprucht. Das Fassungsvermögen wird von den Anströmbedingungen und der Breite des Wasserlaufes bestimmt und kaum von der Schluckfähigkeit des Rostes und des Schachtes.*

Die gefassten Wassermengen sind sehr unterschiedlich. Der Ablauf im steilen Strassenabschnitt in Birmensdorf vermag 11.6 l/s vollständig aufzunehmen. Auch bei 22.1 l/s wird noch 93% Wassers gefasst, nur 1.6 l/s fließen vorbei. Der Einlauf in Delémont vermag dagegen schon 3.3 l/s nicht mehr vollständig zu schlucken; mit 0.8 l/s fliesst rund ein Viertel der gesamten Abflussmenge vorbei. Bei 18.8 l/s werden mit 6.6 l/s rund ein Drittel nicht mehr gefasst. Noch stärker ist die Umströmung im flachen Strassenabschnitt in Mt Russelin. Bei einem Abfluss von 24 l/s werden nur noch 45% gefasst. Interessant ist, dass aufgrund der geringen Fliessgeschwindigkeiten bis zu 10% der gefassten Wassermenge von unten her durch eine Rückströmung in den Ablauf gelangt (Abb. 44, oben

rechts). Diese Mengen wurden mit Hilfe des Particle trackings ermittelt.

Abbildung 45 zeigt die Wasserlaufbreite oberhalb des ersten Ablaufs und die Breite des Anteils des Wasserlaufs, der vom Ablauf gefasst wird. Während die Breite des gefassten Wasserlaufs die Breite des Rostes in Birmensdorf und Delémont nur wenig überschreitet, fließt in Mt Russelin ein wesentlicher Anteil vorbei.

Aus diesen Messungen lässt sich das Schluckvermögen der Ablaufschächte in Abhängigkeit des Abflusses darstellen (Abb. 46).

### 5.3 Schlussfolgerungen

Für die Effizienz der Strassenentwässerung ist die Schluckfähigkeit der Abläufe von entscheidender Bedeutung. Die Versuche haben gezeigt, dass das Schluckvermögen der Roste nicht limitierend ist. In Birmensdorf mit seinem hohen Längs- und Quergefälle ist der Wasserlauf so schmal und tief und besitzt eine so hohe Fließgeschwindigkeit (Abb. 41), dass 20 l/s problemlos geschluckt werden können. Bei dem geringen Längsgefälle in Mt Russelin üfert die Wasserlaufbreite dagegen aus und aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit fließt auch noch Wasser von unterhalb in der Rost ein. Die heutige Norm SN 640 356 setzt jedoch eine feste Schluckfähigkeit der Abläufe voraus und äussert sich nicht über die Festlegung der Wasserlaufbreiten. Diese haben jedoch einen Einfluss auf die zu definierenden Abstände der Abläufe. Mit den hier erarbeiteten Grundlagen lassen sich diese Mängel beheben.

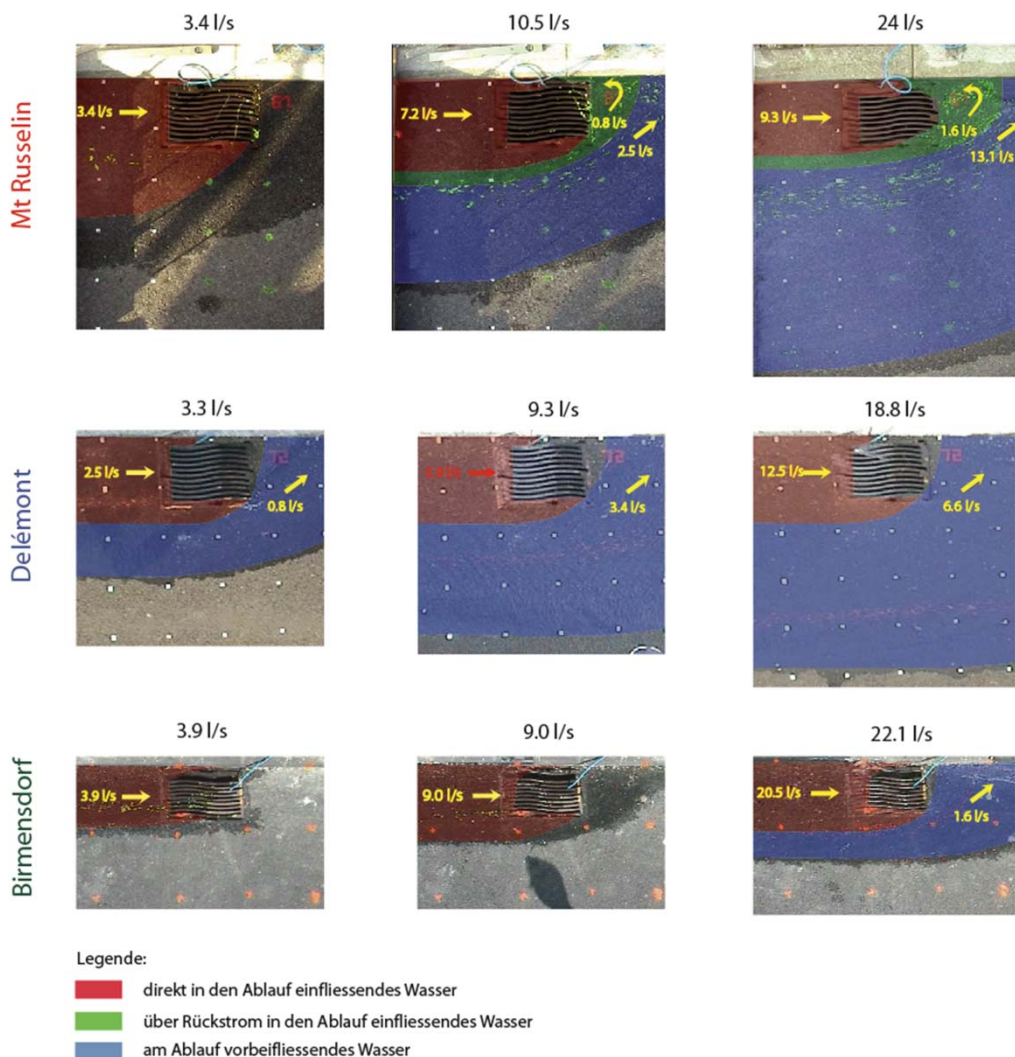
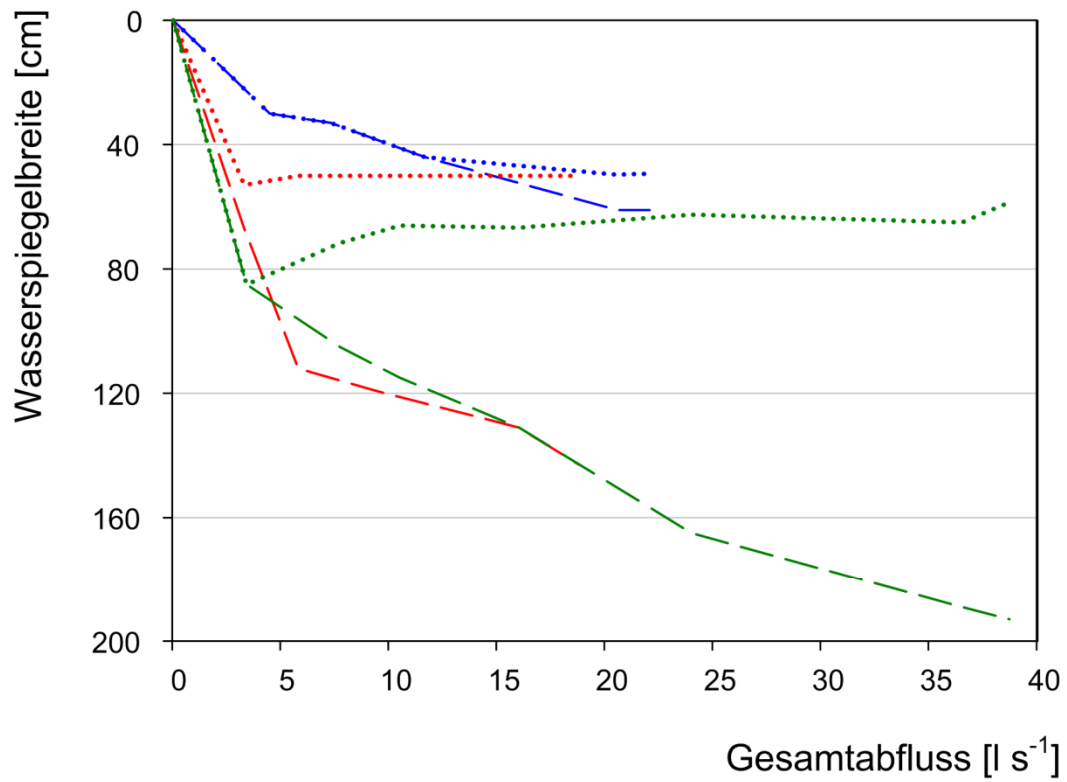


Abbildung 44: Strömungsverhältnisse an den drei Standorten Birmensdorf, Delémont und Mt Russelin, bei Abflussmengen von 3 bis 24 l/s. Die direkt über dem Rückstrom und die vorbeifließenden Mengen wurden mit particla tracking ermittelt



Legende:

	Wasserlauf- breite [cm]	Wasserlaufbreite des gefassten Anteils [cm]
Birmensdorf	— — — —	- - - - -
Mt Russelin	— — — —	- - - - -
Delémont	— — — —	- - - - -

Abbildung 45: Wasserlaufbreite oberhalb des ersten Ablaufes und Breite des Anteils, der vom Ablauf gefasst wird.



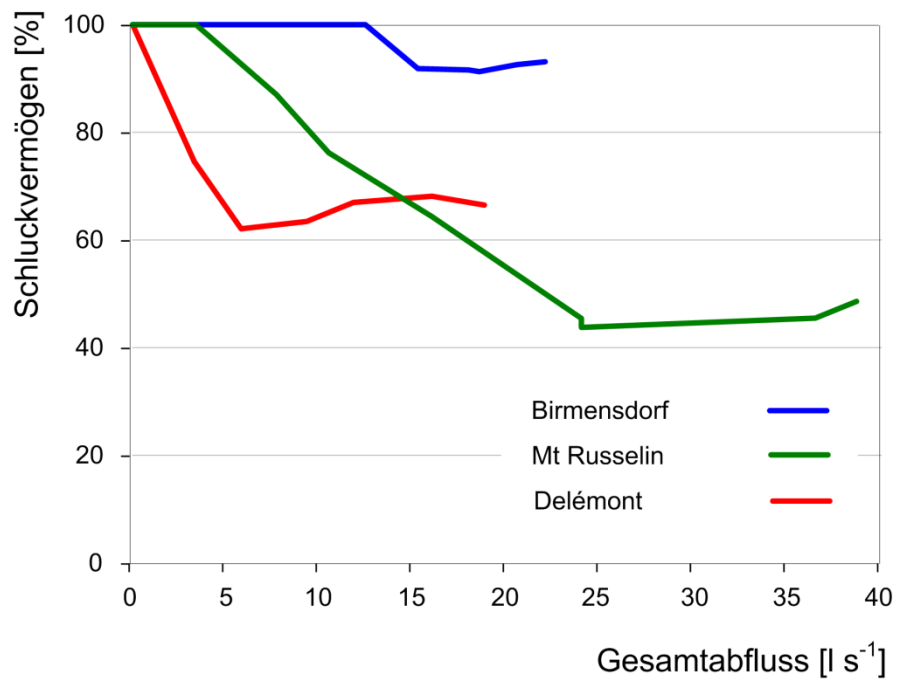


Abbildung 46: Schluckvermögen eines Ablaufs im Verhältnis zum Gesamtabfluss am Strassenrand.

## 6 Störungen des Normalbetriebes

### 6.1 Einführung

Die beschriebenen Versuche wurden an Strassenabschnitten ohne Krümmungen, Gefällwechsel und mit Reinwasser unter kontrollierten Anströmbedingungen durchgeführt. Diese sind in der Praxis nicht immer gegeben. So kann das Abwasser mit Laub, Hagel oder Abfall belastet sein, die den Zufluss zu den Einlaufrosten behindern. Gefällsänderungen und Hindernisse können bewirken, dass die Abläufe umströmt werden. Die Probleme konnten in diesem Projekt nicht genauer untersucht werden, sondern werden hier nur an drei Beispielen illustriert.

### 6.2 Verstopfung des Einlaufes durch Laub

Zur Untersuchung des Schluckvermögens unter widrigen Bedingungen wurde am Standort Delémont trockenes Herbstlaub in den Wasserlauf eingespeist. Die im Ablaufschacht installierte Abflussmesssonde zeigte daraufhin ein vermindertes Schluckvermögen des Schachtes an. Der Abfluss reduzierte sich aufgrund der Verstopfung von 14 l/s auf immer noch beachtliche 9 l/s (Abb. 48). Die Abnahme war damit weniger dramatisch, wie man aus dem visuellen Eindruck schliessen würde (Abb. 47). Offensichtlich konnte das Wasser seitlich und auch zwischen dem Laub hindurch weiterhin in den Einlauf strömen. Es ist jedoch möglich, dass bei ungünstigeren Verhältnissen die Abnahme des Schluckvermögens stärker ausfällt.



Abbildung 47: Behinderung des Ablaufs durch Herbstlaub am Standort Delémont.

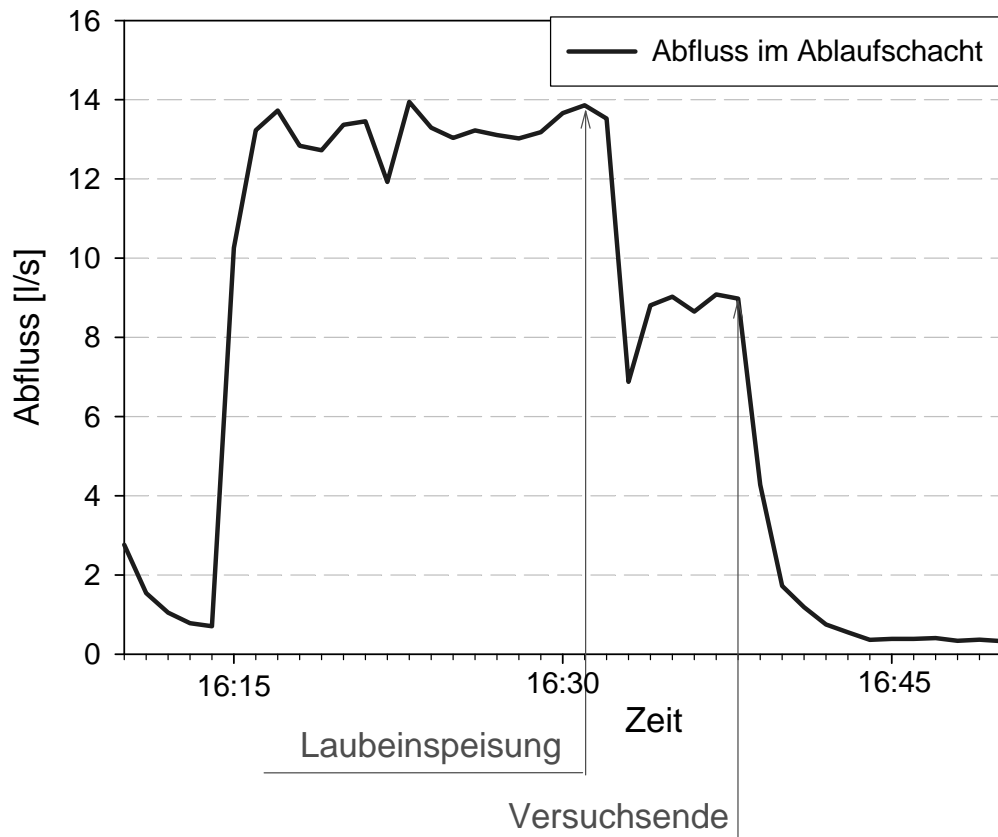


Abbildung 48: Auswirkung des Laubes im Wasserlauf auf das Fassungsvermögen des Ablaufes am Standort Delémont.

### 6.3 Ungünstige Anströmungen

Eine ungünstige Anordnung der Abläufe kann ihre Wirksamkeit stark einschränken, wie die folgenden Beispiele zeigen (Abb. 49). Das linke Bild wurde nach einem kurzen, intensiven Gewitter aufgenommen. Hier bewirkte eine Strassenverengung oberhalb des Ablaufes eine Querströmung, die einen Grossteil des Abflusses am Ablauf vorbeiführt. Das rechte Bild zeigt eine Situation nach einem Wasserrohrbruch. Durch eine Änderung im Quergefälle der Strasse wechselt der Wasserlauf auf die linke Strassenseite, so dass der Einlauf praktisch kein Wasser aufnimmt (siehe auch Abb. 1 in SN 640 356).



Abbildung 49: Die Anströmung eines Ablaufes kann durch Hindernisse oder Quergefälleänderungen ungünstig beeinflusst werden, z.B. durch eine Strassenverengung (links) oder ungünstiges Quergefälle (rechts).

## 7 Schlussfolgerung und Konsequenzen

### 7.1 Einführung

In dem Projekt "In Situ Abflussversuche" wurden an drei Standorten umfangreiche Messungen von Abflüssen und Wassertiefen vorgenommen bei Wassermengen, die von Niederschlägen mit ein- bis 100-jährlichen Wiederkehrperioden erzeugt werden. Die Auswahl der Standorte, die Durchführung und Auswertung der Experimente gestaltete sich wesentlich aufwendiger als geplant. Die Gründe dafür wurden im Bericht erläutert. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass die Ergebnisse an realen Strassen und nicht im Labor gewonnen wurden.

Die Untersuchungen führten zu einem guten Verständnis der Vorgänge auf der Strassenoberfläche, der Entstehung des Wasserlaufs am Strassenrand und der Wirkung der Abläufe.

### 7.2 Wichtige Resultate

#### 7.2.1 Strassenoberfläche

An drei Standorten konnten die Abflüsse bei ähnlichen Belägen bei Gefällen zwischen 3.6 % und 6.5 % untersucht werden. Standorte mit geringeren Gesamtgefällen konnten nicht gefunden werden. Obwohl die beobachteten Fliessvorgänge komplex waren, liessen sie sich durch die Formel von Strickler (Dracos, 1987) mit einem Rauigkeitskoeffizienten von  $k_{st}$  von 40 gut reproduzieren. Die beobachteten Wassertiefen waren geringer als im Bericht VSS (2000) aufgrund von Literaturrecherchen angenommen wurde. Die Gefahr von Aquaplaning ist auf Normalstrecken gering, ist aber, wie FSS (2008) aufzeigt, in Verwindungsbereichen zu berücksichtigen.

#### 7.2.2 Wasserlauf am Strassenrand

Die Längsgefälle an den drei Standorten variierten zwischen 0.25 % und 3.2 %. Am unübersichtlichsten war die Strömung am Standort Mt Russelin mit dem kleinsten Gefälle. Auch hier liessen sich jedoch die Abflüsse und Wassertiefen mit der Formel von Strickler reproduzieren. Allerdings musste dafür, im Gegensatz zu den Experimenten auf der Strassenoberfläche, ein  $k_{st}$  von 92 verwendet werden. Mit dem Programm HEC-RAS konnte auch die Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten im Querprofil reproduziert werden. Damit lässt sich die Anströmung der Abläufe gut nachbilden.

#### 7.2.3 Schluckvermögen der Abläufe

Auch bei grossen Abflüssen war nicht die Kapazität der Ablaufroste limitierend. Entscheidend für den Anteil des gefassten Abflusses sind vielmehr die Breite und die Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten des Wasserlaufes. Diese Parameter lassen sich aufgrund unserer Resultate ermitteln. Am Standort Birmensdorf waren die Fliessgeschwindigkeiten hoch aufgrund des grossen Längsgefälles und die Wasserlaufbreite gering aufgrund des grossen Quergefälles. Das führte dazu, dass bis 20 l/s gefasst werden konnten. Im Gegensatz dazu wurde in Mt Russelin bei grossen Abflüssen weniger als die Hälfte des Abflusses gefasst.

### 7.3 Beurteilung der SN- Normen Entwässerung aufgrund dieser Ergebnisse

Die aktuellen Normen zur Strassenentwässerung sollten im Lichte der obigen Resultate überprüft werden, im speziellen folgende Punkte der Norm SN 640 356 und in der Folge auch in SN 640 357 (Kapitel 10):

*Abschnitt 6. Schluckvermögen der Einlaufroste:*

"Der Hersteller oder Lieferant der Ablaufroste hat das Schluckvermögen  $Q_E$  .....anzugeben."

Dieser Abschnitt sollte geändert werden. Der Hersteller der Ablaufroste hat wenig Einfluss auf das Schluckvermögen. Es hat sich gezeigt, dass dafür nicht die Konstruktion der Ablaufroste massgebend ist, sondern die Anströmbedingungen.

*Abschnitt 9. Wasserlaufbreiten bei der massgebenden Regenintensität:*

"Die Wasserlaufbreite  $B_A$  beträgt bei der massgebenden Regenintensität an allen Strassen grundsätzlich 1,5 m."

Auf Strassenabschnitten mit grösseren Gefällen wird diese Wasserlaufbreite nie erreicht, in flachen Abschnitten umfliesst bei dieser Breite 50 % des Abflusses den Ablauf.

*Abschnitt 10. Bestimmen der Abstände der Abläufe:*

"Zur Bestimmung der Abläufe ist wie folgt vorzugehen:

- Festlegen der Breite des Wasserlaufs  $B_A$  gemäss Ziffer 9
- Bestimmen des Schluckvermögens  $Q_E$  gemäss Ziffer 6"

Diese beiden Parameter lassen sich, wie oben erwähnt, nicht wie in der Norm vorgegeben, bestimmen.

## **7.4 Weiteres Vorgehen**

Das Zusammenspiel der Parameter  $B_A$ ,  $Q_E$  und  $a$  (Abstand der Abläufe) ist komplexer als bei der Konzeption der Norm angenommen, es lässt sich jedoch aufgrund der hier erzielten Ergebnissen ausreichend genau beschreiben. Um diese Erkenntnisse in eine verbesserte Norm umzusetzen, muss jedoch entschieden werden, welche Prioritäten bei der Konzeption der Strassenentwässerung gesetzt werden sollen. Soll die Anzahl Abläufe möglichst gering gehalten werden, die Breite des Wasserlaufs festgelegt werden, oder wie in der ASTRA-Richtlinie gefordert, die Retention auf der Strassenoberfläche optimiert werden?

# I Anhänge Messungen und Berechnungen

*Tabelle 4: Messungen der Wasseruhr und der Ultraschallsonden in den Einlaufschächten im Vergleich mit den berechneten Abflüssen anhand der an der Wasseroberfläche gemessenen Fließgeschwindigkeiten, der beobachteten Wasserspiegelbreiten und Wassertiefen.*

Standort	Gefälle [%]	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Abfluss gemäss Ultraschall- Abflussmesssonde [l s <sup>-1</sup> ]			Streifenweise berechneter Abfluss aus gemessenem V [l s <sup>-1</sup> ]	Wasserfilm- breite [cm] gemäss Videoanalyse	Wasserfilmtiefe gemäss Stechpegel am Bordstein [cm]
	LG = Längsgefälle QG = Quergefälle GG = Gesamtgefälle		1. Einlauf	2. Einlauf	gesamt			
Birmensdorf	LG = 3.2% QG = 5.7% GG = 6.5%	3.9	4.5	0	4.5	6.0	30	2.4
		6.6	5.8	0	5.8	7.1	33	2.8
		11.6	11.6	0	11.6	10.5	44	3.2
		22.1	20.5	1.5	22	27.8	61	4.3
		20.6	19	1.5	20.5	26.4	61	4.4
Mt Russelin	LG = 0.25% QG = 3.6% GG = 3.6%	3.4	1.8	0	1.8	6.5	85	2.6
		7.7	2	0.7	2.7	11.8	100	3.4
		10.5	3.7	2.5	6.2	18.0	115	4
		16	7.3	5.9	13.2	27.9	131	4.7
		24	12	11.5	23.5	46.5	165	6
		36	12	24	36	63.9	189	6.8
		38.7	12	22.8	34.8	68.4	193	7
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	3.3	3.8	1.3	5.1	3.2	67	1.45
		5.8	4.9	3.1	8	6.7	112	2.7
		9.3	6.6	3.7	10.3	9.7	119	2.25
		11.8	9.3	4.4	13.7	14.6	126	2.6
		16	10.4	4.3	14.7	16.2	131	1.9
		19	13.1	5.3	18.4	21.8	143	3

Tabelle 5: Vergleich der an der Wasseroberfläche über die Breite des Wasserlaufes gemessenen Fließgeschwindigkeiten mit den mit Strickler und HEC-RAS berechneten Fließgeschwindigkeiten.

Standort	Gefälle [%] LG = Längsgefälle QG = Quergefälle GG = Gesamtgefälle	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Fließgeschwindigkeiten [m s <sup>-1</sup> ]: v Strickler = durchschnittliche Geschwindigkeit berechnet mit Strickler; v particle tracking = Fließgeschwindigkeit der Wasseroberfläche, berechnet mit particle tracking																				
			Abstand zum Strassenrand [cm]						19			20			36			40			50		
			v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking			
Bimmsdorf	LG = 3.2% QG = 5.7% GG = 6.5%	3.9	2.4																				
				v Strickler	v particle tracking																		
				1.15	1.14																		
				1.30	1.34																		
				1.45	1.49																		
Mt Russelin	LG = 0.25% QG = 3.6% GG = 3.6%	7.7	2.4																				
				v Strickler	v particle tracking																		
				1.70	1.91																		
				0.33	0.64																		
				0.42	0.71																		
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	19	2.4																				
				v Strickler	v particle tracking																		
				0.78	1.15																		
				1.02	1.04																		
				1.06	1.19																		

Fortsetzung Tabelle 5:

Standort	Gerfälle [%] LG = Längsgefälle QG = Quergefälle GG = Gesamtgefälle	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Fließgeschwindigkeiten [m s <sup>-1</sup> ]: v Strickler = durchschnittliche Geschwindigkeit berechnet mit dem Strickler; v particle tracking = Fließgeschwindigkeit der Wasseroberfläche, berechnet mit particle tracking																
			52		62		75		88		100		102		109		150		
			v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	v Strickler	v particle tracking	
Birmensdorf	LG = 3.2% QG = 5.7% GG = 6.5%	3.9																	
				0.57	0.97														
				0.65	1.04														
							0.12												
							0.24	0.28					0.11						
Mt Russelin	LG = 0.25% QG = 3.6% GG = 3.6%	10.5																	
							0.29				0.18	0.15							
							0.36				0.26	0.28							
							0.43				0.35	0.59					0.10	0.11	
							0.51	0.41			0.43	0.76					0.23	0.26	
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	38.7																	
							0.52				0.45	0.77							
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	3.3																	
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	5.8																	
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	9.3																	
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	11.8																	
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	16																	
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	19																	



Tabelle 6: Aufgeführt sind die berechnete mittlere ( $V_m$ ), die mit Strickler berechnete Geschwindigkeit ( $V_{st}$ ), die kritische Geschwindigkeit ( $V_{kr}$ ) und die Reynoldszahl für die unterschiedlich aufgebrachten Wassermengen bei den Versuchen an den drei Standorten.

Standort	Abfluss [l s <sup>-1</sup> ]	Breite [m]	Höhe [m]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Neigung [%]	k	$V_m$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{st}$ [m s <sup>-1</sup> ]	$V_{kr}$ [m s <sup>-1</sup> ]	Reynold
Delémont	3.3	0.765	0.0145	0.0055	2.3	92	0.59	0.52	0.27	3479
	5.8	0.97	0.019	0.0092	2.3	92	0.63	0.63	0.31	4822
	9.3	1.19	0.0225	0.0134	2.3	92	0.69	0.70	0.33	6303
	11.8	1.26	0.026	0.0164	2.3	92	0.72	0.77	0.36	7552
	16	1.31	0.027	0.0177	2.3	92	0.90	0.79	0.36	9850
	18.8	1.43	0.03	0.0215	2.3	92	0.88	0.85	0.38	10602
Mt Russelein	3.4	0.9	0.026	0.0117	0.25	92	0.29	0.25	0.36	3047
	7.7	1.08	0.035	0.0189	0.25	92	0.41	0.31	0.41	5750
	10.5	1.16	0.043	0.0249	0.25	92	0.42	0.36	0.46	7300
	16	1.33	0.05	0.0333	0.25	92	0.48	0.39	0.50	9702
	24	1.66	0.06	0.0498	0.25	92	0.48	0.44	0.54	11660
	36.5	1.87	0.067	0.0626	0.25	92	0.58	0.48	0.57	15741
	38.7	1.88	0.069	0.0649	0.25	92	0.60	0.49	0.58	16601
Birmensdorf	3.9	0.38	0.023	0.0044	3.2	92	0.89	0.84	0.34	8277
	4.1	0.38	0.0235	0.0045	3.2	92	0.92	0.85	0.34	8701
	6.6	0.46	0.0275	0.0063	3.2	92	1.04	0.94	0.37	11571
	7	0.49	0.029	0.0071	3.2	92	0.99	0.98	0.38	11521
	8.4	0.54	0.0315	0.0085	3.2	92	0.99	1.03	0.39	12545
	9	0.54	0.0315	0.0085	3.2	92	1.06	1.03	0.39	13441
	20.6	0.77	0.044	0.0169	3.2	92	1.22	1.29	0.46	21575
	22.1	0.75	0.042	0.0158	3.2	92	1.40	1.25	0.45	23763

Tabelle 7: Wassertiefen, gemessen mit Stechpegeln

Standort	Gefälle [%]	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Niederschlagsin- tensität [mm h <sup>-1</sup> ]	Wasserspiegellhöhen gemäss Stechpegel [cm]												Durchschnitt Sp 1 - 6							
				Abstand zum oberen Ende des Berechnungsfeldes [m]						Abstand zum oberen Ende des Berechnungsfeldes [m]													
				2	2	4	4	6	6	2	2	4	4	6	6								
Birmensdorf	LG = 3.2% QG = 5.7% GG = 6.5%	1.85	50	Sp1	1.1	1.3	0.4	0.3	0.9	1.5	1.2	1.8	0.8	1.3	1.2	1.8	0.92						
					1.2	1.8	0.8	1.3	1.2	1.8	1.2	1.8	0.8	1.3	1.2	1.8							
					1.2	1.8	0.8	1.3	1.2	1.8	1.2	1.8	0.8	1.3	1.2	1.8							
Mt Russelin	LG = 0.25% QG = 3.6% GG = 3.6%			Strassenbreite	2m	6m	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Sp1	Sp2	Sp3	Sp4	Sp5	Sp6	Durchschnitt					
					450	150	1.6	1.5	1.9	1.4	1.6	2.5	1.6	1.5	1.9	1.4	1.6		2.5				
				585	195	2.8	2.5	3.2	2.3	2.2	3.1	2.8	2.5	3.2	2.3	2.2	3.1	2.7					
				720	240	3.1	2.7	3.7	2.7	2.8	3.9	3.1	2.7	3.7	2.7	2.8	3.9	3.1					
				900	300	3.4	3	4.6	3.3	3.9	4.6	3.4	3	4.6	3.3	3.9	4.6	3.8					
				1035	345	3.4	3.2	4.9	3.6	4.1	4.6	3.4	3.2	4.9	3.6	4.1	4.6	4.0					
				2250	750	7	3.7	8.2	6.6	5.2	8.1	7	3.7	8.2	6.6	5.2	8.1	6.5					
				126	42	0.5	0.4	1	2.2	1.8	1	0.5	0.4	1	2.2	1.8	1	1.2					
				203	68	0.7	0.8	1.2	2.6	2	1	0.7	0.8	1.2	2.6	2	1	1.4					
				284	95	0.8	1	1.4	2.9	2.1	1.2	0.8	1	1.4	2.9	2.1	1.2	1.6					
428	143	1.4	1.1	1.7	3.1	2.2	1.6	1.4	1.1	1.7	3.1	2.2	1.6	1.8									
630	210	2.6	1.9	2.7	4.2	2.6	2.7	2.6	1.9	2.7	4.2	2.6	2.4	2.7									
882	294	2.6	2.4	3.2	4.9	3.3	2.9	2.6	2.4	3.2	4.9	3.3	2.9	3.2									
1161	387	3.3	2.7	4	5.1	3.5	3.6	3.3	2.7	4	5.1	3.5	3.6	3.7									
1611	537	4.2	3.4	4.8	5.4	3.6	3.9	4.2	3.4	4.8	5.4	3.6	3.9	4.2									
1913	638	5.9	5	6.5	6.5	5.4	4.2	5.9	5	6.5	6.5	5.4	4.2	5.6									
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%				0.28	126	42	0.5	0.4	1	2.2	1.8	1	0.28	126	42	0.5	0.4	1	1.2			
					0.45	203	68	0.7	0.8	1.2	2.6	2	1	0.45	203	68	0.7	0.8	1.2	2.6	2	1	1.4
					0.63	284	95	0.8	1	1.4	2.9	2.1	1.2	0.63	284	95	0.8	1	1.4	2.9	2.1	1.2	1.6
					0.95	428	143	1.4	1.1	1.7	3.1	2.2	1.6	0.95	428	143	1.4	1.1	1.7	3.1	2.2	1.6	1.8
					1.43	630	210	2.6	1.9	2.7	4.2	2.6	2.7	1.43	630	210	2.6	1.9	2.7	4.2	2.6	2.7	2.7
					1.96	882	294	2.6	2.4	3.2	4.9	3.3	2.9	1.96	882	294	2.6	2.4	3.2	4.9	3.3	2.9	3.2
2.58	1161	387	3.3	2.7	4	5.1	3.5	3.6	2.58	1161	387	3.3	2.7	4	5.1	3.5	3.6	3.7					
3.58	1611	537	4.2	3.4	4.8	5.4	3.6	3.9	3.58	1611	537	4.2	3.4	4.8	5.4	3.6	3.9	4.2					
4.25	1913	638	5.9	5	6.5	6.5	5.4	4.2	4.25	1913	638	5.9	5	6.5	6.5	5.4	4.2	5.6					

LG = Längsgefälle  
 QG = Quergefälle  
 GG = Gesamtgefälle

Tabelle 8: Messung der Wassertiefen mit Ultraschallpegeln

Standort	Gefälle [%]	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Niederschlagsintensität [mm h <sup>-1</sup> ]			Wasserspiegelhöhe gemäss Ultraschallpegel [cm]							Durchschnitt ohne up 1
						Abstand zum oberen Rand des Berechnungsfeldes [m]							
						2	2	4	4	4	4	6	
Birmensdorf	LG = 3.2% QG = 5.7% GG = 6.5%	1.85	50	2m	6m	10m	up 1	up 3	up 4	up 5			
							1.4	7.4	4.8	5	1.6	3.1	
							4	6	2.9	3.9	3.1	4.6	
Mt Russelin	LG = 0.25% QG = 3.6% GG = 3.6%	3.7	100	2m	6m	10m	up 1	up 3	up 4	up 5			
							6.8	1.5	3.2	3.3			
							7.5	2.1	4	3.7			
							8.5	2.7	4.1	3.9			
							9	3.1	3.5	4.1			
							8.4	3.1	3.7	4.6			
8	2.7	4.1	5.1										
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	0.28	42	25	2	0.8	up 1	up 2					
							126	2	0.8				
							203	68	41	2.2	0.8		
							284	95	57	2.3	1		
							428	143	86	2.4	1.3		
							630	210	126	2.8	2.2		
							882	294	176	3.5	2.7		
							1161	387	232	3.7	3.4		
							1611	537	322	3.8	3.7		
							1913	638	383	5.6	4		

LG = Längsgefälle  
 QG = Quergefälle  
 GG = Gesamtgefälle

Tabelle 9: Messung der Fliessgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche mit „particle tracking“ beim Beregnungsversuch in Birmensdorf

Standort	Gefälle [%]	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Niederschlagsintensität [mm h <sup>-1</sup> ]	mittlerer Abstand zum oberen Rand des Beregnungsfeldes [m]				
				2.5	3.5	5.7	6.7	7.7
				Fliessgeschwindigkeit der Wasseroberfläche [m s <sup>-1</sup> ]				
Birmensdorf	LG = 3.2% QG = 5.7% GG = 6.5%	1.85	50	0.135	0.138	0.177	0.192	0.208
		3.7	100	0.165	0.183	0.255	0.286	0.327

LG = Längsgefälle  
 QG = Quergefälle  
 GG = Gesamtgefälle

Tabelle 10: Messung der Fliessgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche mit „particle tracking“ bei den Wasserfilmversuchen in Mt. Russelin und Delémont.

Standort	Gefälle [%]	Abfluss gemäss Wasseruhr [l s <sup>-1</sup> ]	Niederschlagsintensität [mm h <sup>-1</sup> ]			Fliessgeschwindigkeit der Wasseroberfläche [m s <sup>-1</sup> ]		Durchschnitt [m s <sup>-1</sup> ]
			mittlerer Abstand zum Wasserausgaberohr			0.24	0.23	
			2m	4m	6m			
Mt Russelin	LG = 0.25% QG = 3.6% GG = 3.6%	1	450	150	90	0.24	0.23	0.235
		1.3	585	195	117	0.24	0.25	0.245
		1.6	720	240	144	0.26	0.26	0.260
		2	900	300	180	0.26	0.26	0.260
		2.3	1035	345	207	0.27	0.26	0.265
		5	2250	750	450	0.35	0.38	0.365
Delémont	LG = 2.3% QG = 2.8% GG = 3.6%	0.28	126	42	25	0.112	0.125	0.119
		0.45	203	68	41	0.146	0.158	0.152
		0.63	284	95	57	0.182	0.184	0.183
		0.95	428	143	86	0.213	0.224	0.219
		1.43	630	210	126	0.255	0.254	0.255
		1.96	882	294	176	0.264	0.261	0.263
		2.58	1161	387	232	0.309	0.304	0.307
		3.58	1611	537	322	0.371	0.357	0.364
		4.25	1913	638	383	0.357	0.341	0.349

## Abkürzungen

R	hydraulischer Radius
Re	Reynoldszahl
Re <sub>kr</sub>	kritische Reynoldszahl
$\nu$	kinematische Viskosität
J	Gefälle
k <sub>st</sub>	Rauhigkeitsbeiwert nach Strickler
Q <sub>e</sub>	Schluckmenge Einlaufrost
B <sub>a</sub>	Wasserlaufbreite am Strassenrand
LG	Längsgefälle
QG	Quergefälle
GG	Gesamtgefälle

## Literaturverzeichnis

Dracos, T. 1987: Hydraulik. Vorlesungsunterlagen. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft, ETH – Hönggerberg.

Eggenberger, De Giorgi, (1999): Untersuchung der Schluckfähigkeit von Einlaufrosten. Departement Departement Architektur, Gestaltung und Bauingenieurwesen der Zürcher Fachhochschule Winterthur.

FSS (2008): Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen – Berechnung der Wasserfilmdicke. In Forschung, Strassenbau und Verkehrstechnik. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Strassenbau, Strassenverkehr, Bonn.

VSS (2000): Abschätzung von Abflüssen aus versiegelten und unversiegelten Flächen und Einzugsgebieten. Institut für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich. Forschungsbericht im Auftrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS).

Zior, F. (1987): Regenwasserabfluss auf Fahrbahnoberflächen : experimentelle und theoretische Untersuchungen. Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt, Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik Nr. 38.

# 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

ARAMIS SBT

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am:

#### Grunddaten

Projekt-Nr.:

Projekttitel:

Enddatum:



#### Texte:

Zusammenfassung der  
Projektresultate:

Durch Abflussversuche auf drei Strassenabschnitten mit unterschiedlichen Gefällen wurde das System Abfluss auf der Strassenoberfläche, am Strassenrand und Kapazität der Abläufe erforscht. Obwohl die Fliesszustände aufgrund der grossen Rauigkeit der Strassenoberfläche im Verhältnis zur Wassertiefe ausserhalb des Bereichs der üblichen Fliessformeln liegen, konnten die Wassertiefen mit der Formel von Strickler gut reproduziert werden, allerdings unter Verwendung eines sehr tiefen Rauigkeitsbeiwertes. Durch die auch bei extremen Niederschlagsintensitäten gemessenen geringen Wassertiefen ergibt sich bei Oberflächengefällen von mehr als 0.5 % keine Aquaplanigefahr.

Die Strömung im Wasserlauf am Strassenrand wird bei geringen Gefällen unübersichtlich, dennoch liessen sich die Wassertiefen und die 2D-Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten gut reproduzieren.

Es zeigte sich, dass für die Kapazität der Abläufe nicht die Ausgestaltung der Einlaufroste limitierend ist, sondern Breite und die Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten im Wasserlauf. Bei geringeren Gefällen werden die Abläufe schon bei geringeren Wassermengen umströmt.

Anhand der Versuche und Auswertungen lassen sich die Fliessverhältnisse bei unterschiedlichen Niederschlags- und Gefällsverhältnissen und Abständen von Einläufen reproduzieren



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die Suche von geeigneten Standorten für die Abflussversuche gestaltete sich aufgrund der zahlreichen Randbedingungen äusserst schwierig und die Anforderungen an die Messtechnik waren sehr hoch. Die detaillierten, hochaufgelösten Messungen erlaubten es aber, die komplexe Hydraulik zu erfassen und die Projektziele zu erreichen

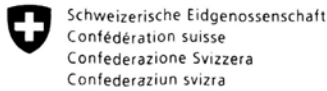
Folgerungen und  
Empfehlungen:

Es zeigte sich, dass die Abflussmengen, die vom Ablauf gefasst werden kaum von der Ausgestaltung des Einlaufrostes beeinflusst wird, sondern von der Breite und Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten des Wasserlaufs am Strassenrand. Eine Norm über Prüfbedingungen für Einlaufroste ist deshalb nicht notwendig. Aufgrund der Resultate sind jedoch Anpassungen der Norm SN 640 356 notwendig bezüglich Schluckvermögen der Einlaufroste, Wasserlaufbreiten und Bestimmung der Abstände der Abläufe. Dabei ist vorerst die Frage zu klären, ob die Anzahl der Abläufe minimiert, die Breite des Wasserlaufs beschränkt oder die Wirkung der Retention optimiert werden soll.

Publikationen:

Schlussbericht "In-situ-Abflussversuche auf Strassen"





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

**Beurteilung der Begleitkommission:**

*Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.*

Beurteilung:

**In dem Projekt wurden mit aussergewöhnlich aufwendigen Versuchen die Abflussverhältnisse auf Strassen untersucht. Neben der Messtechnik war auch die Auswertung und Interpretation der Messungen komplex. Die Resultate erweitern die Kenntnis der Hydraulik der Abflüsse auf der Strasse, so dass diese Vorgänge befriedigend nachgerechnet werden und bei der Weiterentwicklung der Normen berücksichtigt werden können.**

**Die Ziele der Forschung sind erreicht.**

Umsetzung:

Siehe unten

weitergehender  
Forschungsbedarf:

Wenn die Retention auf der Strasse gezielt eingesetzt werden soll um die Belastung der Gewässer zu reduzieren, sind Simulationsrechnungen notwendig, um das Zusammenspiel Niederschlagsverläufe, Wasserlaufbreiten und Spitzenabfluss zu optimieren. Ein Bedarf dazu ist zur Zeit nicht nachgewiesen.

Einfluss auf  
Normenwerk:

Aufgrund der Forschungsarbeit sind Anpassungen der Entwässerungsnormen sinnvoll, wie im Abschnitt Folgerungen und Empfehlungen ausgeführt. Es betrifft dies  
SN 640 356: Ablauf, Strassenablauf  
SN 640 357: Bemessung der Leitungen

**Präsident Begleitkommission:**

Name:	<input type="text" value="Rauch"/>	Vorname:	<input type="text" value="Peter"/>
Amt, Firma, Institut:	<input type="text" value="Sennhauser, Werner &amp; Rauch AG"/>		
Strasse, Nr.:	<input type="text" value="Schöneeggstrasse 30"/>		
PLZ:	<input type="text" value="8953"/>	Email:	<input type="text" value="peter.rauch@swr.ch"/>
Ort:	<input type="text" value="Dietikon"/>	Telefon:	<input type="text" value="043 500 45 45"/>
Kanton, Land:	<input type="text" value="Zürich, Schweiz"/>	Fax:	<input type="text" value="043 500 45 01"/>

**Unterschrift Präsident Begleitkommission:**



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht <i>Influence of In-Vehicle Information Systems on Driver Behaviour and Road Safety</i> <i>Report part of traffic psychology</i> <i>Influence des systèmes d'information embarqués sur le comportement de conduite et la sécurité routière</i> <i>Rapport partiel de la psychologie de circulation</i>	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers <i>Entwurf und Gestaltung von Unter- und Überführungen für Fussgänger und leichte Zweiräder</i> <i>Conception and disposition of lower and upper crossings for pedestrians and cyclists</i>	2008
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt <i>Développement des mélanges bitumineux optimaux et sélection des liants appropriés;</i> <i>D-A-CH - projet initial</i> <i>Development of Optimal Bituminous Mixtures and Selection of Appropriate Binders;</i> <i>D-A-CH - Initiation Project</i>	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung <i>Profit et coûts, bilans écologiques des systèmes d'évacuation de l'eau de ruissellement des routes</i> <i>Cost and Benefits, ecological balances of different concepts of management and treatment of road run-off</i>	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten <i>Banque de données pour taux de génération de trafic</i> <i>Database for trip generation rates</i>	2008
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen <i>Modélisation d'objets et de processus pour le système d'information routier</i> <i>Modeling of objects and processes for the road information system</i>	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen <i>Impact of traffic calming measures on noise immissions</i> <i>Impacts des mesures de modération du trafic sur les immissions sonores</i>	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen <i>Functional requirements for traffic collection systems relating to traffic lights</i> <i>Exigences fonctionnelles en matière de systèmes de détection du trafic en rapport avec les installations de feux de circulation</i>	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen <i>Profil géométrique type pour tous les types de véhicules</i> <i>Standard profile of cross sections for all vehicle types</i>	2010
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts <i>Validierung des CRS-Oedometers mittels intakter Proben</i> <i>Validation of Constant Rate of Strain oedometer on intact samples</i>	2010
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit <i>Coûts horaires du trafic des personnes: Dépendance de la perception et de la distance</i> <i>Willingness to pay in passenger transportation: Perception and distance dependence</i>	2008
1286	VSS 2000/338	Verkehrssqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung <i>Niveau de service et capacité pour les routes à deux voies sans séparation des sens de circulation</i> <i>Level of Service and capacity for undivided two-lane streets</i>	2010
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure: ponts à culées intégrales <i>Tragwerk-Baugrund Interaktion: Brücken mit Integralen Widerlagern</i> <i>Soil-Structure interaction: bridges with integral abutments</i>	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz <i>La circulation du point de vue des enfants: Les trajets scolaires des élèves du primaire en Suisse</i> <i>Traffic and children: Primary school children's routes to school in Switzerland</i>	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement <i>Coordination entre information de trafic individuelle et gestion de trafic</i> <i>Coordination between individual traffic information and traffic management</i>	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen <i>Essais de gonflement de longue durée sur roches anhydrites</i> <i>Long-term swelling tests on anhydritic rock</i>	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet <i>Entretien des infrastructures routières dans les zones bâties: caractéristiques et conséquences</i> <i>Special features and consequences of road facility maintenance in built-over areas</i>	2009
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme <i>Control of effectiveness of road restraint systems</i> <i>Contrôle de l'efficacité des dispositifs de retenue de véhicules</i>	2011
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel <i>Détection d'incidents dans les tunnels routiers</i> <i>Incident Detection in Road Tunnels</i>	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen <i>Prévision de gel et de brouillard pour les routes</i> <i>Prediction of frost and fog for roads</i>	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten <i>Principes pour la quantification des effets des déficits de la sécurité</i> <i>Basis for the quantification of the effects of safety deficits</i>	2011
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen <i>Alternatives aux passages pour piétons dans les zones 30</i> <i>Alternatives to zebra crossings in 30km/h zones</i>	2010
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation <i>Energy extraction from urban tunnels, evaluation of systems</i> <i>Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains; évaluation de systèmes</i>	2010
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau <i>Analyse inverse pour la construction routière</i> <i>Inverse analysis in Road Geotechnics</i>	2011