



Fürstentum Liechtenstein

Vorarlberg

Graubünden

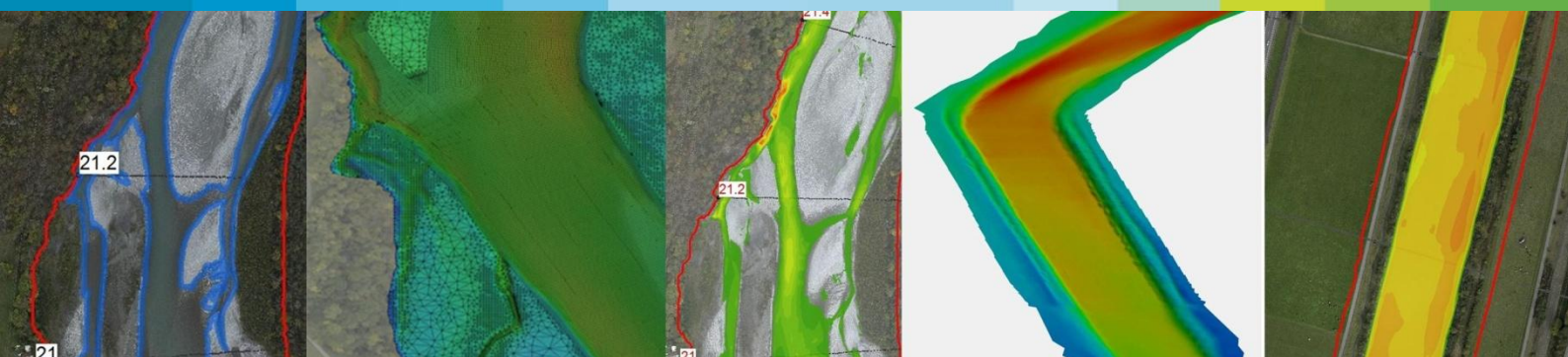
St. Gallen

Internationale Rheinregulierung

# Alpenrhein

## D6 Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für unterschiedliche Anforderungsprofile

### Arbeitspaket 4 Hydraulische Modellierung



## Zukunft Alpenrhein

Eine Initiative der Internationalen Regierungskommission Alpenrhein (IRKA)  
und der Internationalen Rheinregulierung (IRR)

# Alpenrhein D6

Quantitative Analyse von Schwall/Sunk-Ganglinien für  
unterschiedliche Anforderungsprofile

## Arbeitspaket 4 Hydraulische Modellierung

**Auftraggeber:**

IRKA

Internationale Regierungskommission Alpenrhein

Mit Unterstützung von:

Internationale Rheinregulierung; Bundesamt für Umwelt; Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

**Auftragnehmer:**



Hunziker, Zarn & Partner AG  
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau  
Gassa Sutò 43A  
CH-7013 Domat/Ems



Mayr&Sattler  
Ingenieurbüro für Kulturtechnik und  
Wasserwirtschaft  
Albertgasse 19/15-16  
A-1080 Wien

**Bearbeitung:**

Christian Jecklin, dipl. Kult.-Ing ETH Zürich

Dr. Benno Zarn, dipl. Bau-Ing. ETH Zürich

Ingo Niederbichler, Dipl.-Ing.

Dr. Peter Mayr, Dipl.-Ing.

Domat/Ems und Wien, 31. Januar 2012

# Inhaltsverzeichnis

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 1     | Zusammenfassung .....                            | 8  |
| 2     | Übersicht .....                                  | 9  |
| 2.1   | Festlegung Perimeter .....                       | 9  |
| 2.2   | Abhängigkeiten und Methodik .....                | 9  |
| 2.3   | Eingesetzte Programme .....                      | 10 |
| 2.4   | Schwall-Sunk-Ganglinien .....                    | 11 |
| 2.5   | Resultate .....                                  | 12 |
| 3     | Mastrilser Rheinauen .....                       | 13 |
| 3.1   | Topographiedaten und Netzerstellung .....        | 13 |
| 3.1.1 | Perimeter und Topographiedaten .....             | 13 |
| 3.1.2 | Netzgenerierung .....                            | 14 |
| 3.1.3 | Vergleich Topographiedaten/Berechnungsnetz ..... | 15 |
| 3.2   | Rauheiten und Kalibrierung .....                 | 15 |
| 3.2.1 | Substrat .....                                   | 15 |
| 3.2.2 | Kalibrierung .....                               | 16 |
| 3.3   | Resultate .....                                  | 19 |
| 3.3.1 | Ist-Zustand .....                                | 19 |
| 3.3.2 | Anforderungsprofil 1 .....                       | 20 |
| 3.3.3 | Anforderungsprofil 2 .....                       | 21 |
| 3.3.4 | Anforderungsprofil 3 .....                       | 22 |
| 3.3.5 | Anforderungsprofil 4 .....                       | 23 |
| 4     | Buchs .....                                      | 24 |
| 4.1   | Topographiedaten und Netzerstellung .....        | 24 |
| 4.1.1 | Perimeter und Topographiedaten .....             | 24 |
| 4.1.2 | Netzgenerierung .....                            | 25 |
| 4.1.3 | Vergleich Topographiedaten/Berechnungsnetz ..... | 26 |
| 4.2   | Rauheiten und Kalibrierung .....                 | 26 |
| 4.3   | Resultate .....                                  | 29 |
| 4.3.1 | Ist-Zustand .....                                | 29 |
| 4.3.2 | Anforderungsprofil 1 .....                       | 30 |
| 4.3.3 | Anforderungsprofil 2 .....                       | 31 |
| 4.3.4 | Anforderungsprofil 3 .....                       | 32 |
| 4.3.5 | Anforderungsprofil 4 .....                       | 33 |
| 5     | Koblach .....                                    | 34 |
| 5.1   | Topographiedaten und Netzerstellung .....        | 34 |
| 5.1.1 | Perimeter und Topographiedaten .....             | 34 |
| 5.1.2 | Netzgenerierung .....                            | 35 |

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 5.1.3 | Vergleich Topographiedaten/Berechnungsnetz ..... | 36 |
| 5.2   | Rauheiten und Kalibrierung .....                 | 36 |
| 5.3   | Resultate .....                                  | 38 |
| 5.3.1 | Ist-Zustand .....                                | 38 |
| 5.3.2 | Anforderungsprofil 1 .....                       | 39 |
| 5.3.3 | Anforderungsprofil 2 .....                       | 40 |
| 5.3.4 | Anforderungsprofil 3 .....                       | 41 |
| 5.3.5 | Anforderungsprofil 4 .....                       | 42 |

# Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 1: Schematische Darstellungen der Einbindung des Arbeitspaketes 4 Hydraulik in die übrigen Arbeitspakete (AP: Arbeitspaket, v: Fliessgeschwindigkeit, h: Fliesstiefe, z: Wasserspiegel, t: Zeit). ....                                                   | 9  |
| Abb. 2: Schwall-Sunk Ganglinien Mastrils. Die simulierten Abschnitte sind farbig hervorgehoben. ...                                                                                                                                                           | 11 |
| Abb. 3: Schwall-Sunk Ganglinien Buchs. Die simulierten Abschnitte sind farbig hervorgehoben. ....                                                                                                                                                             | 12 |
| Abb. 4: Schwall-Sunk Ganglinien Koblach. Die simulierten Abschnitte sind farbig hervorgehoben. ....                                                                                                                                                           | 12 |
| Abb. 5: Untersuchungsperimeter Mastrilser Rheinauen (rot) und Modellperimeter (blau) mit Rheinkilometer. ....                                                                                                                                                 | 13 |
| Abb. 6: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz der Mastrilser Rheinauen. ....                                                                                                                                                                                     | 14 |
| Abb. 7: Vergleich Topographieaufnahmen mit Berechnungsnetz am Beispiel des Querprofils km 21 (Lage siehe Abb. 5). ....                                                                                                                                        | 15 |
| Abb. 8: Sohlsubstrat in den Mastrilser Rheinauen aus Arbeitspaket 5. ....                                                                                                                                                                                     | 16 |
| Abb. 9: Vergleich der berechneten und beobachteten Wasserspiegel bei km 21.6 mit mässig guter Übereinstimmung. ....                                                                                                                                           | 17 |
| Abb. 10: Vergleich der benetzten Fläche im Orthofoto vom 25. Okt. 2009 und mit benetzter Fläche aus dem numerischen Modell für einen Abfluß von 45 m <sup>3</sup> /s (blau). Der Untersuchungsperimeter ist rot umrandet. ....                                | 18 |
| Abb. 11: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen wie heute (links Sunkabfluss von 27 m <sup>3</sup> /s und rechts Schwallabfluss von 189 m <sup>3</sup> /s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)). ....            | 19 |
| Abb. 12: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 1 (links Sunkabfluss von 30 m <sup>3</sup> /s und rechts Schwallabfluss von 150 m <sup>3</sup> /s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)). .... | 20 |
| Abb. 13: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 2 (links Sunkabfluss von 60 m <sup>3</sup> /s und rechts Schwallabfluss von 130 m <sup>3</sup> /s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)). .... | 21 |
| Abb. 14: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 3 (links Sunkabfluss von 74 m <sup>3</sup> /s und rechts Schwallabfluss von 115 m <sup>3</sup> /s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)). .... | 22 |
| Abb. 15: Fliesstiefen Anforderungsprofil 4 mit konstantem Abfluss von 95 m <sup>3</sup> /s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)). ....                                                                                    | 23 |
| Abb. 16: Perimeter Buchs (rot) mit Rheinkilometer. ....                                                                                                                                                                                                       | 24 |
| Abb. 17: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz. ....                                                                                                                                                                                                             | 25 |
| Abb. 18: Vergleich Topographieaufnahmen mit Berechnungsnetz anhand des Querprofils bei km 52.2 (Lage siehe Abb. 5). ....                                                                                                                                      | 26 |
| Abb. 19: Vergleich der berechneten und beobachteten Wasserspiegel bei km 52.21 mit sehr guter Übereinstimmung (Q = 107 m <sup>3</sup> /s). ....                                                                                                               | 27 |
| Abb. 20: Vergleich der berechneten und beobachteten Wasserspiegel bei km 51.75 mit sehr guter Übereinstimmung (Q = 107 m <sup>3</sup> /s). ....                                                                                                               | 27 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abb. 19: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen (links Sunkabfluss von $64.70 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $190.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 4.0 m (rot)).                  | 29 |
| Abb. 20: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 1 (links Sunkabfluss von $79 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.8 m (rot)).  | 30 |
| Abb. 21: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 2 (links Sunkabfluss von $95 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $140 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.8 m (rot)).  | 31 |
| Abb. 22: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 3 (links Sunkabfluss von $106 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $125 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)). | 32 |
| Abb. 23: Fliesstiefen Anforderungsprofil 4 mit konstantem Abfluss von $116 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).                                                                                         | 33 |
| Abb. 24: Untersuchungsperimeter Koblach (rot) und Modellierungsabschnitt (blau) mit Rheinkilometer.                                                                                                                                                                  | 34 |
| Abb. 25: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz im Übergangsbereich zum Untersuchungsperimeter mit der feinen Vermaschung.                                                                                                                                               | 35 |
| Abb. 26: Vergleich Topographieaufnahmen mit Berechnungsnetz anhand des Querprofils km 71 (Lage siehe Abb. 24).                                                                                                                                                       | 36 |
| Abb. 27: Vergleich Längenprofil Wasserspiegel aus 1d-Modell und 2d-Modell für einen Sunkabfluss von $100 \text{ m}^3/\text{s}$ .                                                                                                                                     | 37 |
| Abb. 28: Vergleich Längenprofil Wasserspiegel aus 1d-Modell und 2d-Modell für einen Schwallabfluss von $285 \text{ m}^3/\text{s}$ .                                                                                                                                  | 37 |
| Abb. 29: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen wie heute (links Sunkabfluss von $106 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $285 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).                  | 38 |
| Abb. 30: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 1 (links Sunkabfluss von $106 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $240 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).       | 39 |
| Abb. 31: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 2 (links Sunkabfluss von $113 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $220 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).       | 40 |
| Abb. 32: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 3 (links Sunkabfluss von $119 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).       | 41 |
| Abb. 33: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 4 (links Sunkabfluss von $133 \text{ m}^3/\text{s}$ und rechts Schwallabfluss von $180 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).       | 42 |

# Tabellenverzeichnis

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1: Übersicht über die Untersuchungsabschnitte.....                         | 9  |
| Tab. 2: Sohlrauheiten der Mastrisler Rheinauen aus der Substratkartierung. .... | 16 |
| Tab. 3: Modellrauheiten Buchs. ....                                             | 28 |
| Tab. 4: Modellrauheiten Koblach. ....                                           | 37 |

# 1 Zusammenfassung

Die drei Untersuchungsperimeter befinden sich bei Mastrils, Buchs und bei Koblach in der internationalen Rheinstrecke (IRR). Die Festlegung erfolgte aufgrund der unterschiedlichen Morphologien. Bei Mastrils ist der Alpenrhein verzweigt, bei Buchs formt er alternierende Bänke und bei Koblach ist die Sohle in etwa eben. Die Untersuchungsabschnitte wurden so gewählt, dass die Strukturen im Flussbett repräsentativ sind, aber die Morphologie möglichst nicht durch Zusatzeffekte wie Kurven oder Mündungen überlagert ist.

In den rund 1 km langen Untersuchungsstrecken bei Buchs und bei Koblach sowie in der mit 1.5 km etwas längeren Strecke bei Mastrils wurden mit 2d-Abflussmodellen Fliesstiefen, Fliessgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen für verschiedene Schwall-Sunk-Ganglinien simuliert und alle 10 Minuten ausgewertet. Diese Resultate sind eine der Grundlagen für die Habitatmodellierungen, welche auf den gleichen Berechnungsnetzen basieren wie die Hydraulikmodelle. Die Habitatmodelle verlangen sehr feinmaschige (1m \* 2m), rechteckige Berechnungsnetze. Diese wurden mit den Topographiedaten aus dem Arbeitspaket 3 generiert und mit Hilfe von Wasserspiegellagen und benetzten Flächen aus Orthofotos kalibriert. Damit die Berechnungsergebnisse möglichst für die ganzen Untersuchungsstrecken repräsentativ sind, wurden die Modelle mit Hilfe der regelmässig aufgenommen Querprofilen rheinauf- und abwärts ergänzt.



## 2 Übersicht

### 2.1 Festlegung Perimeter

Im Alpenrhein sind zwischen Reichenau und dem Bodensee drei grundsätzlich unterschiedliche Morphologien anzutreffen. Hauptursache dafür sind Unterschiede in der verfügbaren Bettbreite. Um die Auswirkungen von Schwall und Sunk bei unterschiedlichen Morphologien erfassen zu können, wurden drei Untersuchungsstrecken definiert (Tab. 1). Der Untersuchungsperimeter wurde jeweils so gewählt, dass er für die Morphologie typische Strukturen enthält. Weiter wurde darauf geachtet, dass die Morphologie möglichst nicht von Kurven oder Zuflüssen beeinflusst ist. Wegen der begrenzten Länge der Mastrilser Rheinauen war dort die Auswahlmöglichkeit eingeschränkt.

Tab. 1: Übersicht über die Untersuchungsabschnitte.

| Bezeichnung          | Morphologie        | Untersuchungsperimeter | Modellperimeter |
|----------------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| Mastrilser Rheinauen | verzweigt          | km 20.4 - 22.0         | km 19.6 - 23.5  |
| Buchs                | alterierende Bänke | km 51.0 - 52.8         | km 51.4 - 52.4  |
| Koblach              | ebene Sohle        | km 70.6 - 71.6         | km 69.6 – 72.6  |

### 2.2 Abhängigkeiten und Methodik

Das Arbeitspaket 4 Hydraulik ist stark in die übrigen Arbeitspakete eingebunden. Die Hauptresultate Fliessgeschwindigkeit, Fliesstiefe, Wasserspiegel für verschiedene Schwall-

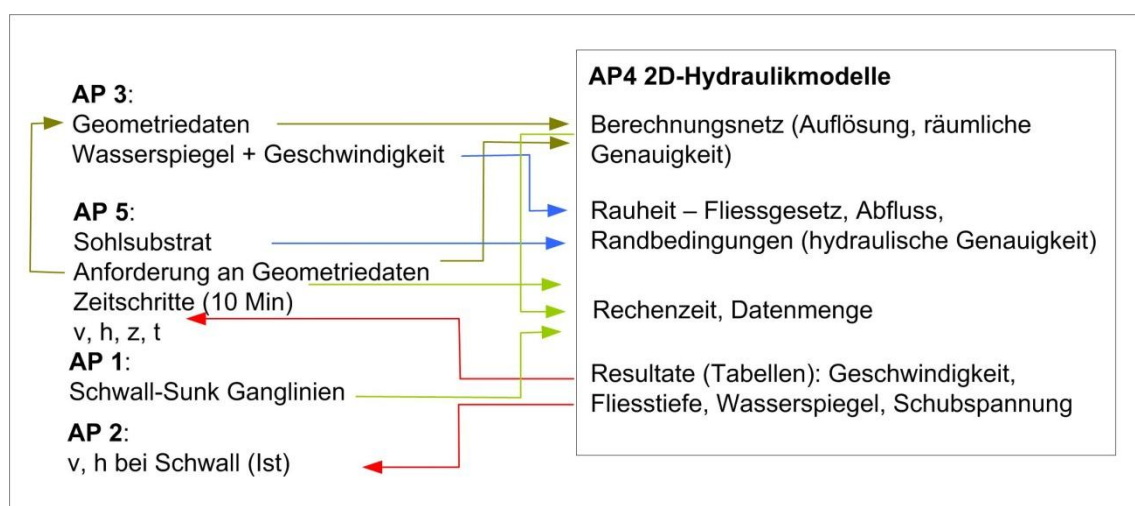


Abb. 1: Schematische Darstellungen der Einbindung des Arbeitspaketes 4 Hydraulik in die übrigen Arbeitspakete (AP: Arbeitspaket, v: Fliessgeschwindigkeit, h: Fliesstiefe, z: Wasserspiegel, t: Zeit).

Sunk-Ganglinien sind Eingangsgrößen für die Habitatmodellierung. Weiter lieferten die Hydraulikmodelle für das Arbeitspaket 2 Fließgeschwindigkeiten und Fliesstiefen bei Schwall für den Ist-Zustand, welche für die Erstellung der Referenzkurven von verschiedenen limnologischen Parametern wichtig waren. So wurden zum Beispiel in den Mastrilser Rheinauen im Modell 106 Standorte speziell ins Berechnungsnetz eingebunden und ausgewertet.

Die topographischen Grundlagen für die Erstellung des Berechnungsnetzes stammen aus dem Arbeitspaket 3. Die Habitatmodellierung stellte besondere Anforderungen an das Berechnungsnetz. Es sind Rechteckmaschen mit einer Größe von 1m auf 2m notwendig und die hydraulischen Parameter müssen für die Schwall-Sunk Ganglinien alle 10-Minuten verfügbar sein. Um am unteren Ende des Untersuchungsperimeters eine möglichst zutreffende Randbedingung (Wasserspiegel) für das ganze untersuchte Abflussspektrum zu erhalten, wurden die Modelle mit den offiziellen Querprofilen des Alpenrheins verlängert. Eine solche Verlängerung ist aus hydraulischen Gründen auch am oberen Modellende notwendig. Für die Kalibrierung der Modelle standen Wasserspiegelaufnahmen und Fließgeschwindigkeiten sowie Orthofotos aus dem Arbeitspaket 3 zur Verfügung, welche zeitgleich mit der Topographie erfasst wurden. Informationen über die Rauheit stammen aus Substratkartierungen (AP5) und früher durchgeführte Untersuchungen am Alpenrhein.

## **2.3 Eingesetzte Programme**

Für die Erstellung des Berechnungsnetzes wurde die Software SMS (surface water modelling system) von Aquaveo verwendet. Diese Software verfügt über eine Implementierung des hydraulischen Modells Hydro\_As-2d. Es ermöglicht instationäre, zweidimensionale Abflussberechnungen. Unter anderem können Strömungsfelder detailliert untersucht (z.B. Durchflussaufteilung, Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilung), Retentionswirkungen bestimmt oder Pegel- und Abflussganglinien an beliebigen Kontrollquerschnitten und Kontrollpunkten ermittelt werden. Das Programm wird für Spezialprobleme in der Hydraulik und Überflutungsberechnungen eingesetzt. Die Darstellung der Resultate erfolgt mit ArcGIS von ESRI.

## 2.4 Schwall-Sunk-Ganglinien

Die Berechnungen erfolgten für die Schwall-Sunk-Ganglinien für den Ist-Zustand und für die Anforderungsprofile 1 bis 4. Die Ganglinien sind im Arbeitspaket 1 definiert. Von diesen Ganglinien, welche sich über eine Woche erstrecken, wurden folgende Tage simuliert beziehungsweise ausgewertet:

Mastrilser Rheinauen: Donnerstag, 11.1.2001

Buchs: Dienstag/Mittwoch 18./19.1.2000

Koblach: Dienstag/Mittwoch 18./19.1.2000

Die modellierten Schwall-Sunk-Ganglinien sind für den Ist-Zustand und die Anforderungsprofile 1 bis 4 in Abb. 2 bis Abb. 4 dargestellt. Farbig hervorgehoben ist der Ausschnitt, welcher modelliert wurde. Die Simulation startet mit einer Schwallspitze und endet mit einem Sunk. Die Auswertung erfolgte von Sunk bis Sunk. Beim Anforderungsprofil 4 ist der Abfluss konstant. Die hydraulische Modellierung erfolgte mit dem Wert entsprechend den Ausführungen im Kapitel 4 des Arbeitspaketes 1. Bei der Habitatmodellierung wurde zusätzlich der mittlere Abfluss der Periode von 1999 bis 2008 der Monate November bis März analysiert (siehe auch Arbeitspaket 1, Abschnitt 3.4).

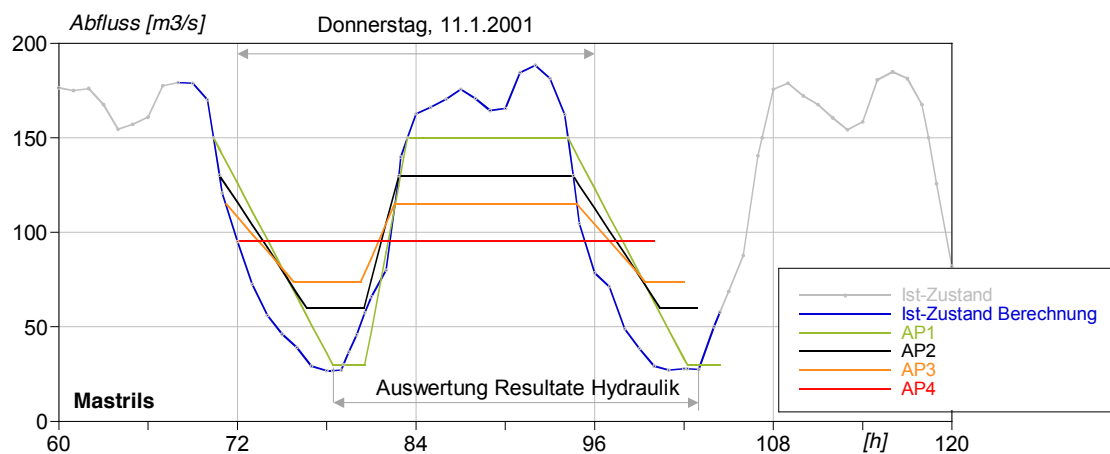


Abb. 2: Schwall-Sunk Ganglinien Mastrils. Die simulierten Abschnitte sind farbig hervorgehoben.

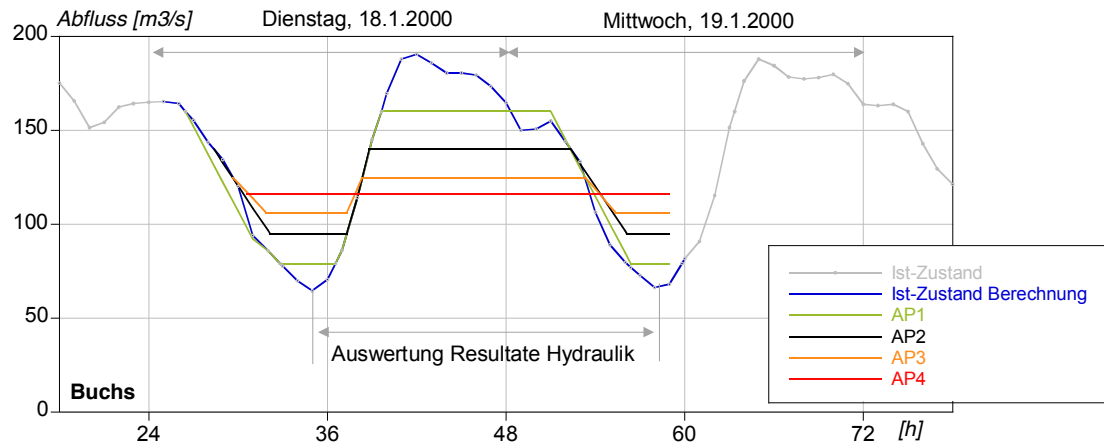


Abb. 3: Schwall-Sunk Ganglinien Buchs. Die simulierten Abschnitte sind farbig hervorgehoben.

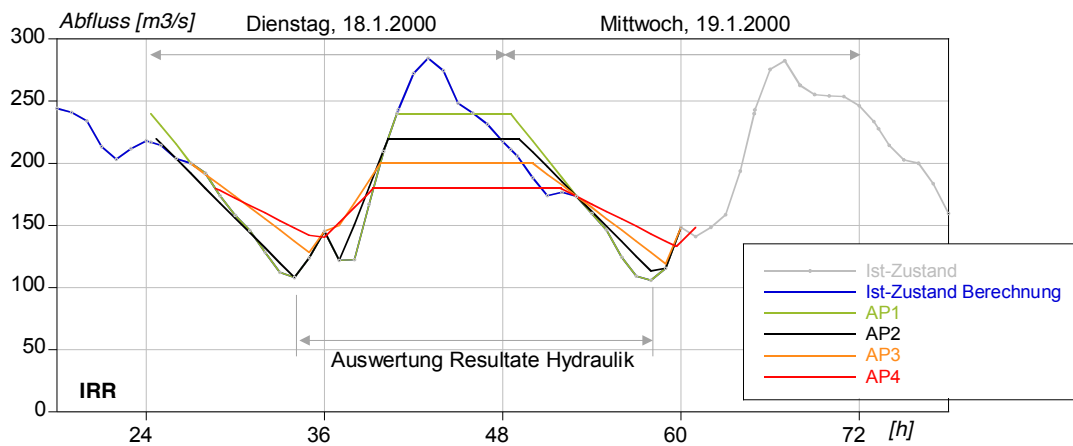


Abb. 4: Schwall-Sunk Ganglinien Koblach. Die simulierten Abschnitte sind farbig hervorgehoben.

## 2.5 Resultate

Die Parameter Geschwindigkeit, Fliesstiefe und Wasserspiegel wurden alle 10 Minuten ermittelt und als Text-Datei den Bearbeitern des Arbeitspaketes 5 übergeben. In dieser Dokumentation ist der Vollständigkeit halber für den Ist-Zustand und die Anforderungsprofile 1 bis 4 die Fliesstiefe beim Sunk- und Schwallabfluss dargestellt, beziehungsweise beim Anforderungsprofil 4 in den Strecken Mastrils und Buchs von einem konstanten, mittleren Abfluss.

## 3 Mastrilser Rheinauen

### 3.1 Topographiedaten und Netzerstellung

#### 3.1.1 Perimeter und Topographiedaten

Der Perimeter der Untersuchungstrecke Mastrilser Rheinauen umfaßt den Abschnitt zwischen Rheinkilometer 20.4 und 22.0 (rot umrandet in Abb. 5). In diesem Perimeter mit einer Fläche von 0.38 km<sup>2</sup> waren für die Netzerstellung aus dem Arbeitspaket 3 rund 31'000 Geländepunkte des Gerinnes und der Uferbereiche verfügbar, welche aus folgenden Grundlagen stammen:

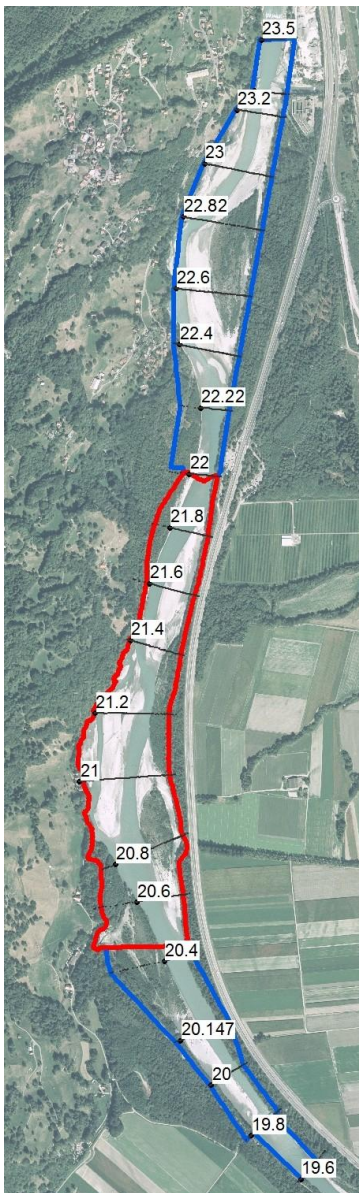


Abb. 5: Untersuchungsperimeter Mastrilser Rheinauen (rot) und Modellperimeter (blau) mit Rheinkilometer.

- Laserscan Daten sowie hochauflösende Orthophotos außerhalb des Gerinnes und in den nicht benetzten Gerinneabschnitten (Kiesbänke) aus Befliegung
- Echolotaufnahmen in den benetzten Bereichen in den Gerinnen
- Terrestrische Ergänzungsaufnahmen in den Randbereichen zwischen Gerinne und Uferbereichen
- Terrestrische Querprofilaufnahmen im 200 m Abstand außerhalb des Untersuchungsperimeter aus dem Jahr 2005

Der gesamte Modellperimeter erstreckt sich von Rheinkilometer 19.6 bis 23.5. Außerhalb des Untersuchungsperimeters (Modellein- und –auslauf; blau umrandet in Abb. 5) basiert die Netzerstellung nur auf den terrestrischen Querprofilaufnahmen aus dem Jahr 2005.

### 3.1.2 Netzgenerierung

Die Netzerstellung erfolgte mit der Software SMS. Das Berechnungsnetz besteht in den benetzten Bereichen aus Rechteckselementen mit der Grösse 1 x 2 m. Außerhalb des Gerinnes wurde die übliche Dreiecksvermaschung verwendet. Die Terrainhöhen sind aus einem Raster der Geländemolldaten (1 x 1 m) auf das Berechnungsnetz interpoliert. Im Modellein- und Modellauslauf sind die Vermaschungselemente entsprechend der Auflösung der Topographieinformationen deutlich größer gewählt. Insgesamt beinhaltet das Berechnungsnetz rund 160'000 Elemente.

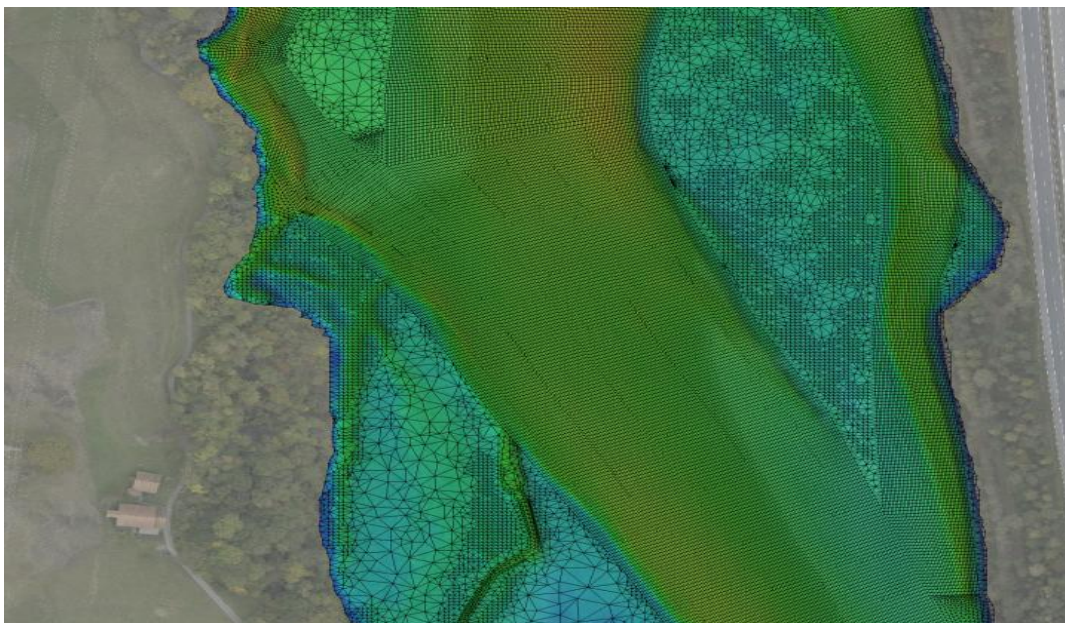


Abb. 6: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz der Mastrilser Rheinauen.



### 3.1.3 Vergleich Topographiedaten/Berechnungsnetz

Abb. 7 zeigt den Vergleich des Berechnungsnetzes (rot) und der Topographiedaten (blau) am Beispiel des Querprofils km 21. Die beiden Linien sind praktisch deckungsgleich. Zusätzlich zeigt die Abbildung die Sohlenlage aus dem Jahr 2005.

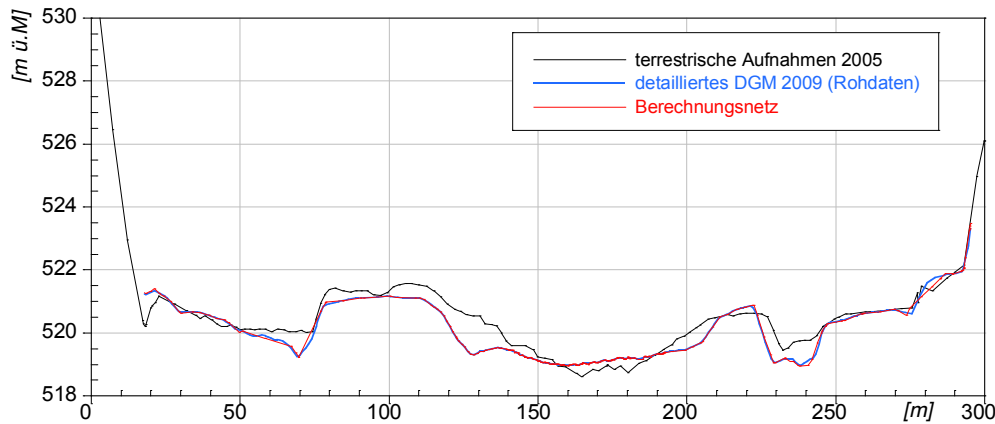


Abb. 7: Vergleich Topographieaufnahmen mit Berechnungsnetz am Beispiel des Querprofils km 21 (Lage siehe Abb. 5).

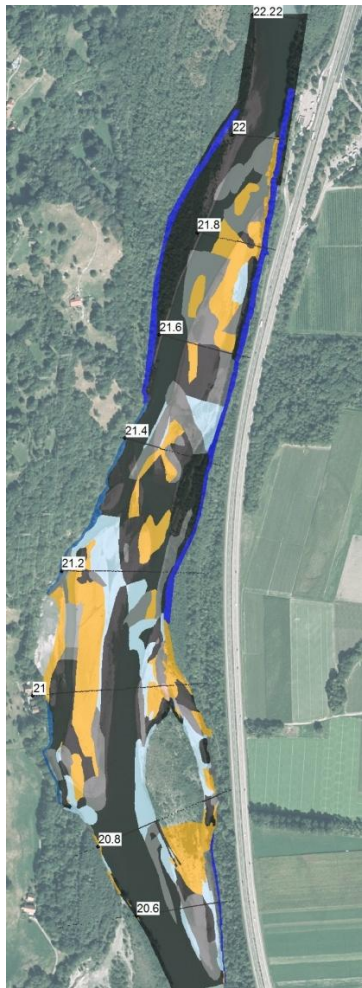
## 3.2 Rauheiten und Kalibrierung

### 3.2.1 Substrat

Für die Habitatmodellierungen wurden im AP5 die dominierenden Sohlsubstrate im Untersuchungsperimeter in Klassen kartiert (Abb. 8 und Tab. 2). Aus den geschätzten Korndurchmessern der Substrate können die Rauheiten abgeleitet werden. Die Umrechnung erfolgte mit dem oberen Grenzwert der Klasse mit dem Stricklerbeiwert 21.

z.B. für Grobkies (2 – 6 cm):  $k_{st} = \frac{21}{\sqrt[3]{0.06}} \sim 33$

Für die feinen Körner (Sand, Ton sowie Fein- und Mittelkies) wird ein k-Wert von  $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  verwendet, weil neben dem Kornwiderstand durch Riffelbildung zusätzlich ein Formwiderstand zu berücksichtigen ist. Den Blöcken im Uferschutz und Fels wird eine Rauheit von  $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  zugeordnet.



Tab. 2: Sohlrauheiten Mastrilser Rheinauen aus der Substratkartierung.

| Klasse                      | k-Wert [ $m^{1/3}/s$ ] |
|-----------------------------|------------------------|
| S1 Ton, Schluff             | 40                     |
| S2 Sand < 2mm               | 40                     |
| S3 Feinkies (2-6 mm)        | 40                     |
| S4 Mittelkies (6-20 mm)     | 40                     |
| S5 Grobkies (2-6 cm)        | 33                     |
| S6 kleine Steine (6-12 cm)  | 30                     |
| S7 grosse Steine (12-20 cm) | 27                     |
| S8 Blöcke (> 20 cm)         | 25                     |
| S9 Fels                     | 25                     |



Abb. 8: Sohlsubstrat in den Mastrilser Rheinauen aus Arbeitspaket 5.

### 3.2.2 Kalibrierung

Vom 4. Nov. 2009 sind in den Mastrilser Rheinauen in ausgewählten Querprofilen Geschwindigkeitsmessungen mit zugehörigem Abfluss und Wasserspiegel verfügbar. Mit diesen Daten war aber eine Kalibrierung schwierig und nur begrenzt möglich. Die Übereinstimmung von Rechnung und Beobachtung ist unterschiedlich. Teilweise ist sie gut; aber es treten lokal auch Abweichungen von bis zu 20 cm auf, welche nicht mit einer Anpassung der Rauheiten im üblichen Bereich kompensiert werden kann. Die Gründe für die Abweichungen liegen neben Modellungenauigkeiten auch bei den schwierigen Messbedingungen (z.T. hohe Fließgeschwindigkeiten) und einem stark schwankenden Abfluss wegen des Kraftwerksbetriebs. So nahm der Abfluss während den Geschwindigkeitsprofilmessungen von 55 auf 85  $m^3/s$  zu.



Zudem ist der untere Untersuchungsperimeter noch von den Abflussverhältnissen im folgenden Flussabschnitt geprägt (siehe auch Ausführungen im folgenden Abschnitt).

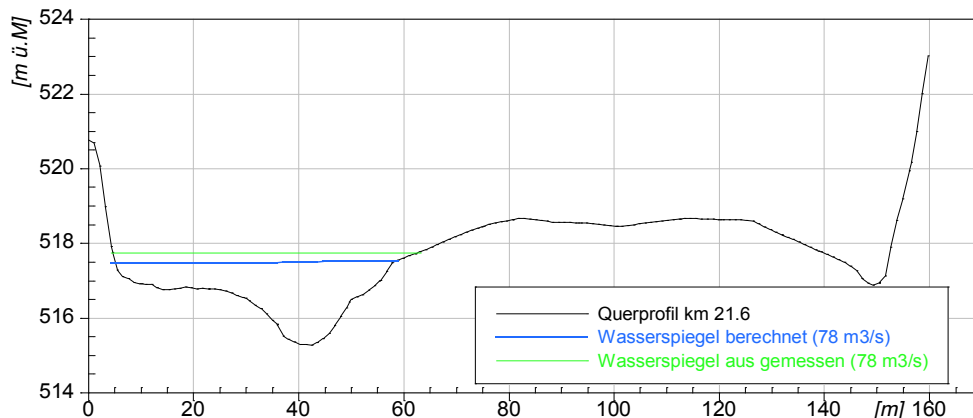


Abb. 9: Vergleich der berechneten und beobachteten Wasserspiegel bei km 21.6 mit mässig guter Übereinstimmung.

Wegen diesen Schwierigkeiten erfolgte zusätzlich eine Modellüberprüfung mit Hilfe der benetzten Fläche des Orthofotos aus der Befliegung des Untersuchungsperimeters vom Samstag, dem 25. Okt. 2009 zwischen 11:00 und 12:00 Uhr. Für dieses Zeitfenster resultiert aus den Abflusswerten von den Messstationen Domat/Ems am Alpenrhein und Chur an der Plessur sowie der Abschätzung der Fliesszeit zwischen diesen beiden Messstationen und Mastrils ein Abfluss von 43 bis 45 m³/s. Abb. 10 zeigt die berechneten Wasserfläche für 45 m³/s (blau umrandet) mit der benetzten Fläche aus dem Orthofoto. Die Übereinstimmung ist bis auf den Bereich mit der kleinen Kiesbank zwischen km 21.8 und 22.0 gut. Diese Kiesbank wird im Modell bei 45 m³/s knapp überströmt, war aber bei der Befliegung nicht benetzt. Offensichtlich stimmt die Modellverlängerung mit den Querprofildaten aus dem Jahr 2005 nicht genau mit den Aufnahmen vom November 2009 überein (siehe auch Abb. 7). Diese Ungenauigkeit an den Modellrändern (vor allem am unteren) muss akzeptiert werden.



Abb. 10: Vergleich der benetzten Fläche im Orthofoto vom 25. Okt. 2009 und mit benetzter Fläche aus dem numerischen Modell für einen Abfluß von 45 m<sup>3</sup>/s (blau). Der Untersuchungsperimeter ist rot umrandet.



## 3.3 Resultate

### 3.3.1 Ist-Zustand

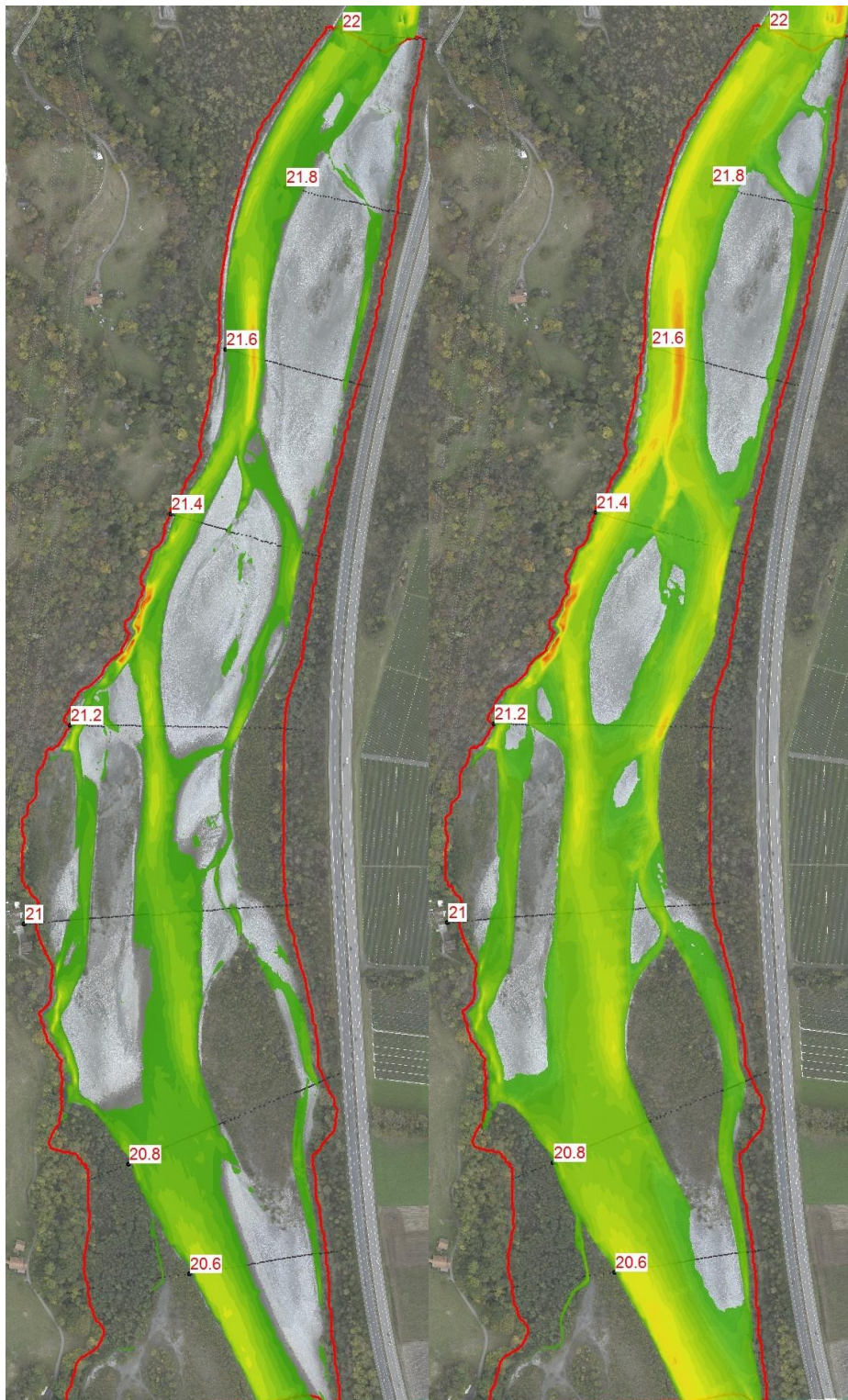


Abb. 11: Fließtiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen wie heute (links Sunkabfluss von 27 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 189 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).



### 3.3.2 Anforderungsprofil 1

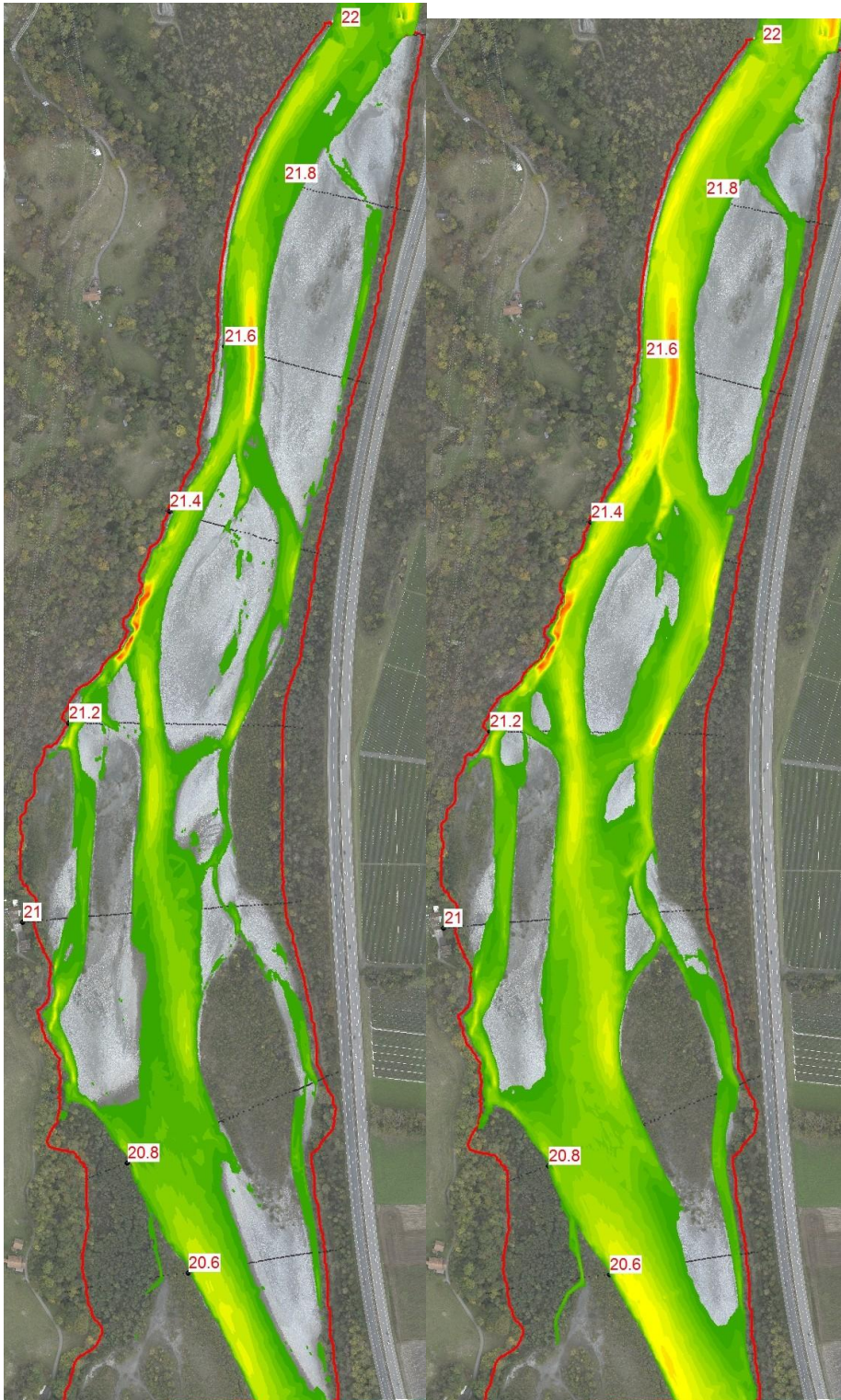


Abb. 12: Fließtiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 1 (links Sunkabfluss von  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  und rechts Schwallabfluss von  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).



### 3.3.3 Anforderungsprofil 2

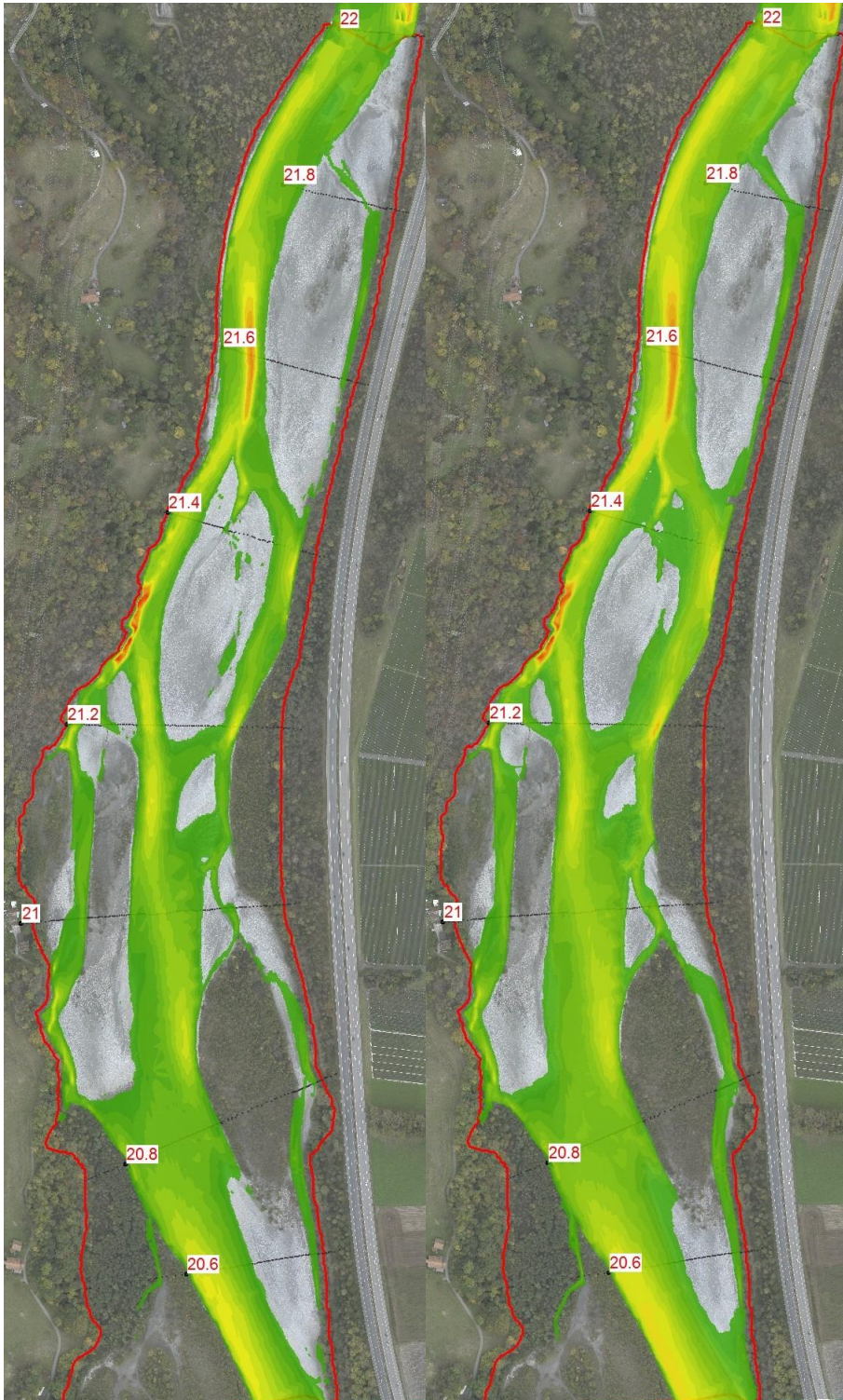


Abb. 13: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 2 (links Sunkabfluss von  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  und rechts Schwallabfluss von  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).



### 3.3.4 Anforderungsprofil 3

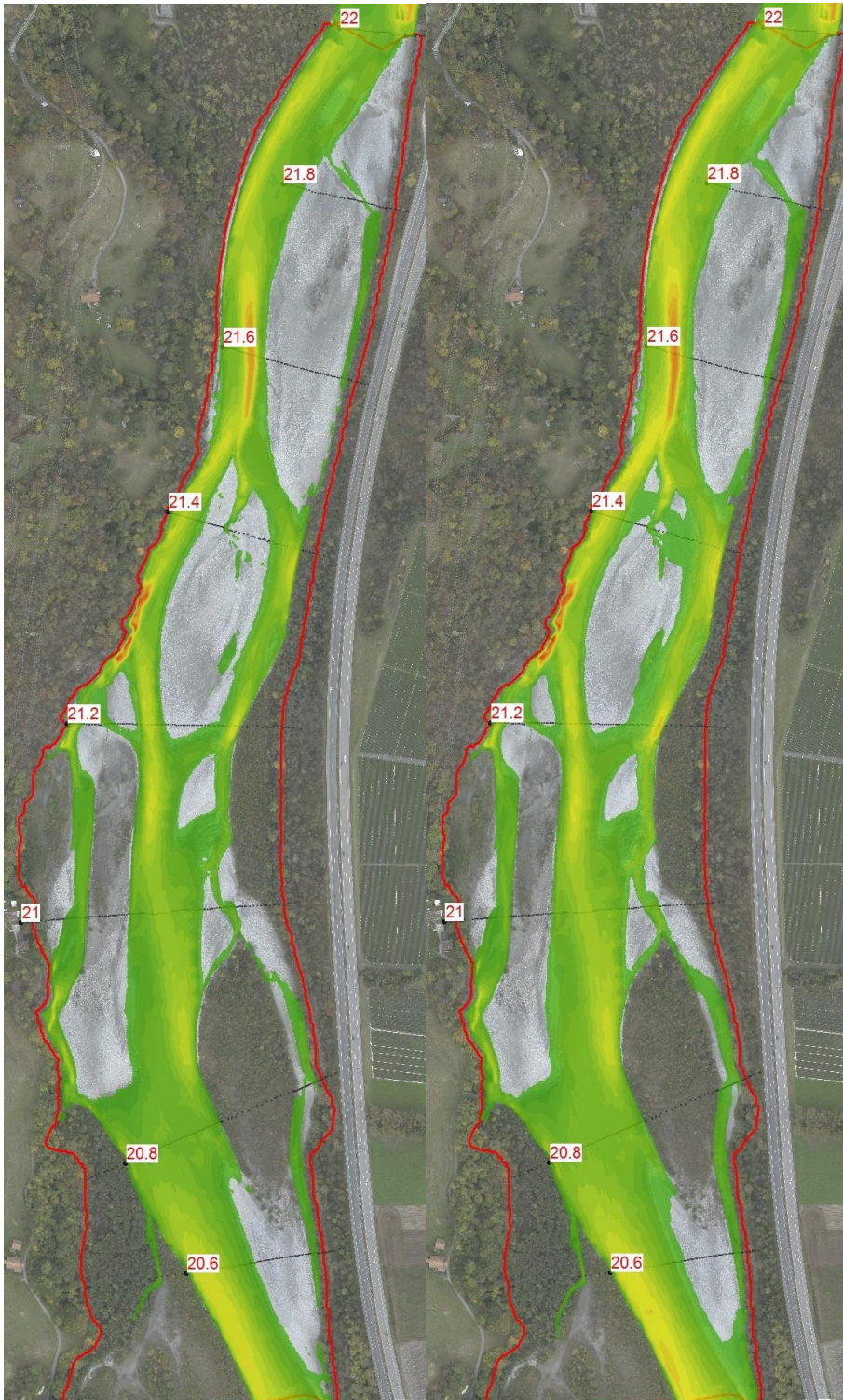


Abb. 14: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 3 (links Sunkabfluss von 74 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 115 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).

### 3.3.5 Anforderungsprofil 4



Abb. 15: Fliesstiefen Anforderungsprofil 4 mit konstantem Abfluss von 95 m³/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).



## 4 Buchs

### 4.1 Topographiedaten und Netzerstellung

#### 4.1.1 Perimeter und Topographiedaten

Der Perimeter der Untersuchungstrecke Buchs umfasst den Abschnitt zwischen Rheinkilometer 51.4 und 52.4 (rot umrandet in Abb. 5).

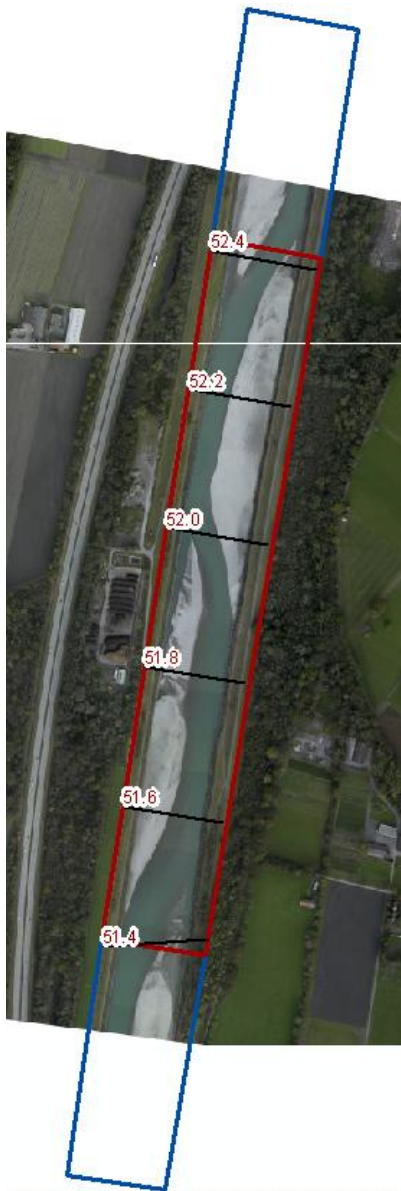


Abb. 16: Perimeter Buchs (rot) mit Rheinkilometer.



In diesem Perimeter mit einer Fläche von 0.15 km<sup>2</sup> waren für die Netzerstellung aus dem Arbeitspaket 3 der Laserscan und rund 12'000 Geländepunkte des Gerinnes und der Uferbereiche verfügbar, welche aus folgenden Grundlagen stammen:

- Laserscan Daten sowie hochauflösende Orthophotos aus Befliegung außerhalb des Hauptgerinnes und in den nicht benetzten Gerinneabschnitten (Uferböschungen)
- Echolotaufnahmen in den benetzten Bereichen im Hauptgerinne
- hochauflösendes DGM aus AP3

Das hydraulische Modell reicht beidseits rund 0.3 km über den eigentlichen Untersuchungsperimeter hinaus (blau umrandet in Abb. 16).

#### 4.1.2 Netzgenerierung

Die Netzerstellung erfolgte mit der Software SMS. Das Berechnungsnetz besteht in den benetzten Bereichen aus Rechteckselementen mit der Grösse 1 x 1 m. Außerhalb des Gerinnes wurde die übliche Dreiecksvermaschung verwendet. Die Terrainhöhen sind aus einem Raster der Geländemolldaten (0.5 x 0.5 m) auf das Berechnungsnetz interpoliert. Im Modellein- und -auslauf sind die Vermaschungselemente entsprechend der Auflösung der Topographieinformationen deutlich größer gewählt. Insgesamt beinhaltet das Berechnungsnetz rund 150'000 Elemente.

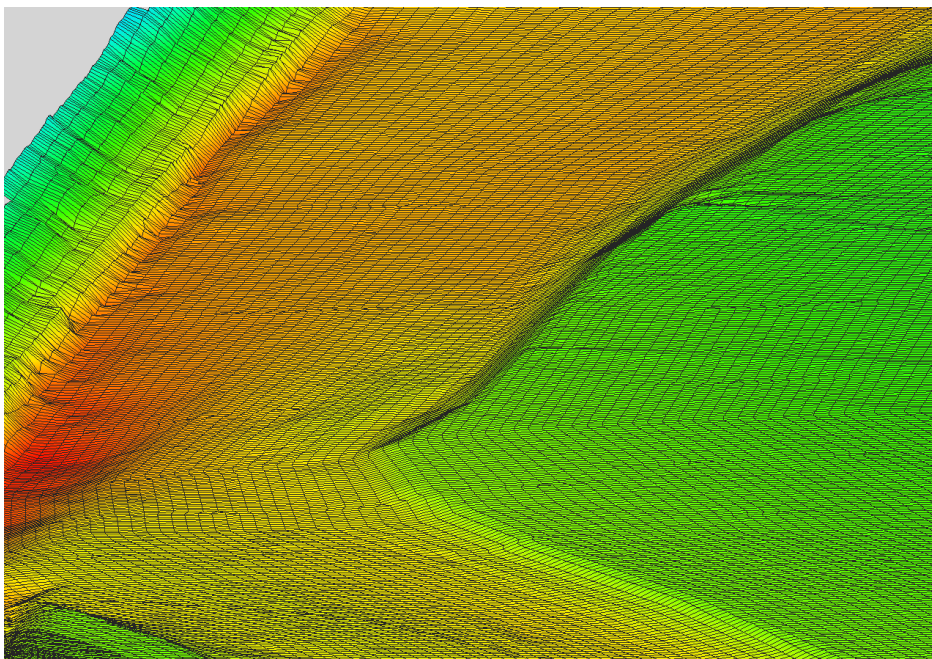


Abb. 17: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz.

### 4.1.3 Vergleich Topographiedaten/Berechnungsnetz

Abb. 18 zeigt den Vergleich des Berechnungsnetzes (rot) und der Topographiedaten (blau) am Beispiel des Querprofils km 52.2. Die beiden Linien sind praktisch deckungsgleich.

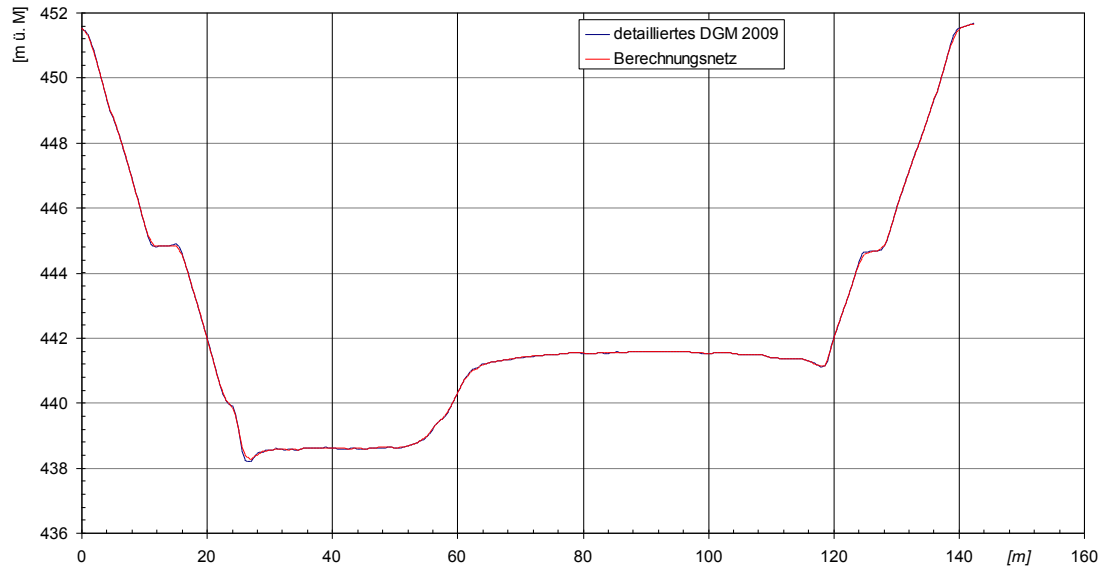
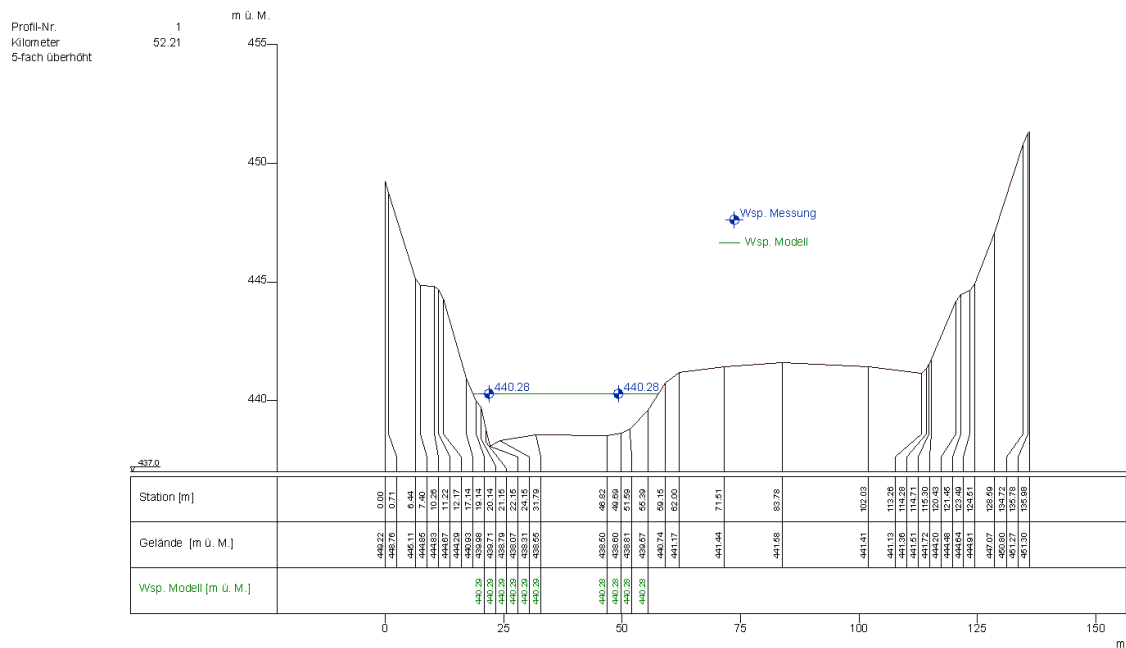


Abb. 18: Vergleich Topographieaufnahmen mit Berechnungsnetz anhand des Querprofils bei km 52.2 (Lage siehe Abb. 5).

## 4.2 Rauheiten und Kalibrierung

In Buchs wurde keine Substratkartierung durchgeführt. Die Vergabe von Rauheitswerten erfolgte entsprechend der Substratverteilung in der Sohle, der Uferstrukturen und der vorhandenen Vegetationsstrukturen im Umland.

Vom 4. Nov. 2009 sind in Buchs in 2 Querprofilen (km 51.75 und km 52.21) Geschwindigkeitsmessungen mit zugehörigem Abfluss und Wasserspiegel verfügbar. Mit diesen Daten wurde das Modell kalibriert und es konnte eine gute Übereinstimmung erreicht werden. Die maximale Abweichung zur beobachteten Wasserspiegelhöhen liegt bei 3 cm (siehe Abb. 19 und Abb. 20).



Die aus der Kalibrierung resultierenden Modellrauheiten sind Tab. 3 zu entnehmen.

Tab. 3: Modellrauheiten Buchs.

|          | k-Wert [ $m^{1/3}/s$ ] |
|----------|------------------------|
| Sohle    | 34                     |
| Vorland  | 25                     |
| Böschung | 18                     |



## 4.3 Resultate

### 4.3.1 Ist-Zustand

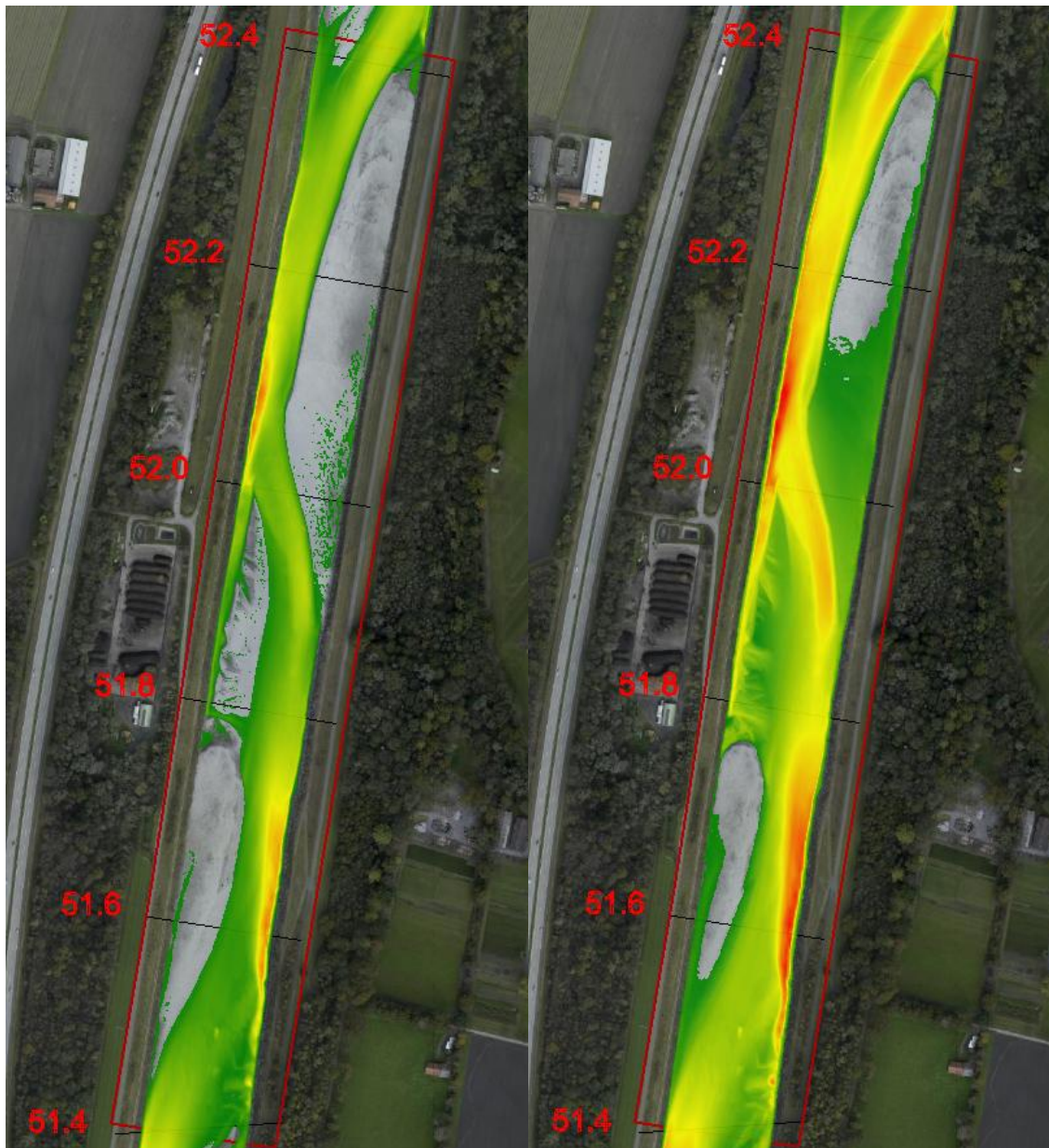


Abb. 19: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen (links Sunkabfluss von  $64.70 \text{ m}^3/\text{s}$  und rechts Schwallabfluss von  $190.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in  $0.2 \text{ m}$ -Schritten von  $0.2 \text{ m}$  (dunkelgrün) bis  $4.0 \text{ m}$  (rot)).

#### 4.3.2 Anforderungsprofil 1

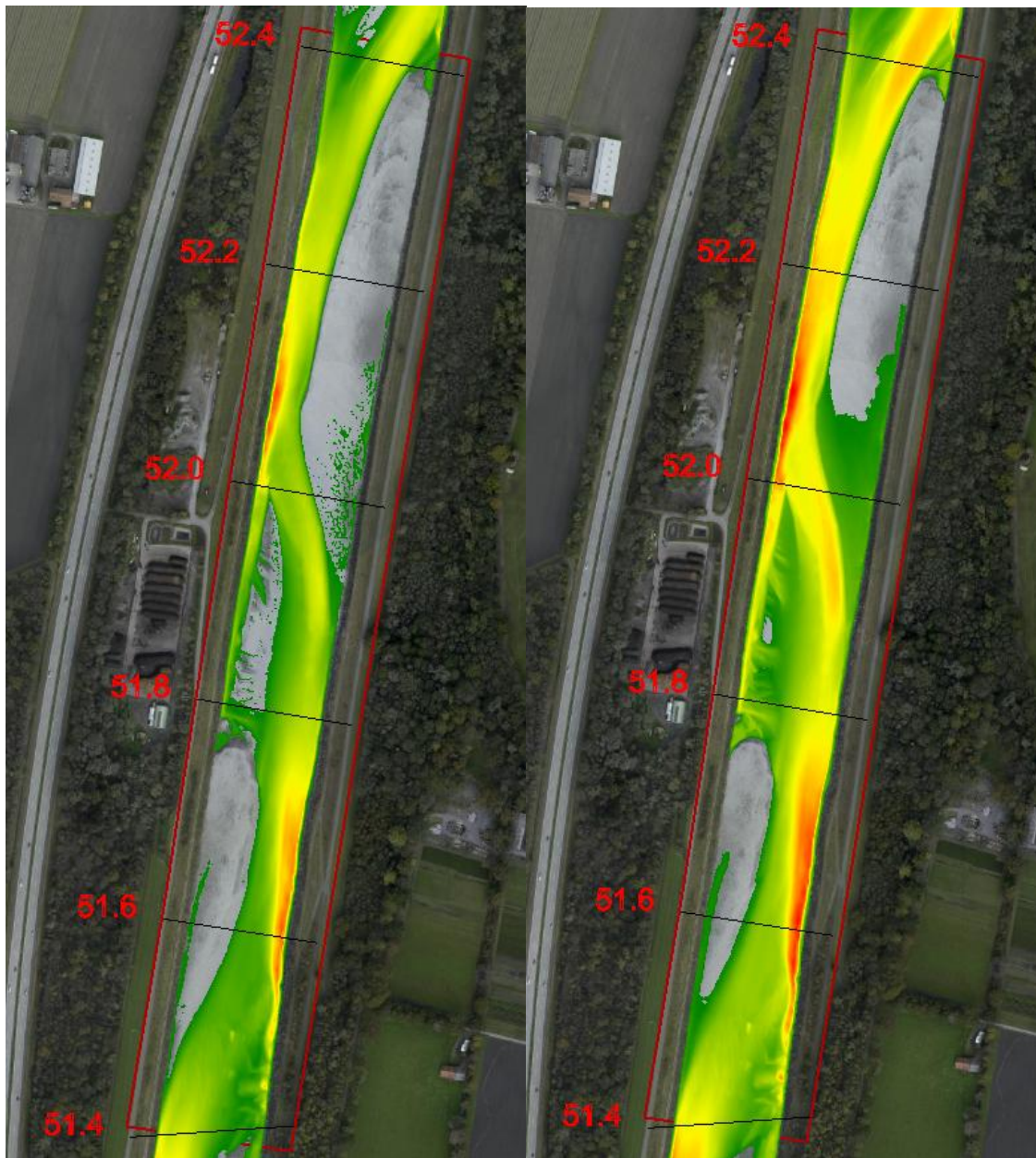


Abb. 20: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 1 (links Sunkabfluss von  $79 \text{ m}^3/\text{s}$  und rechts Schwallabfluss von  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.8 m (rot)).



#### 4.3.3 Anforderungsprofil 2

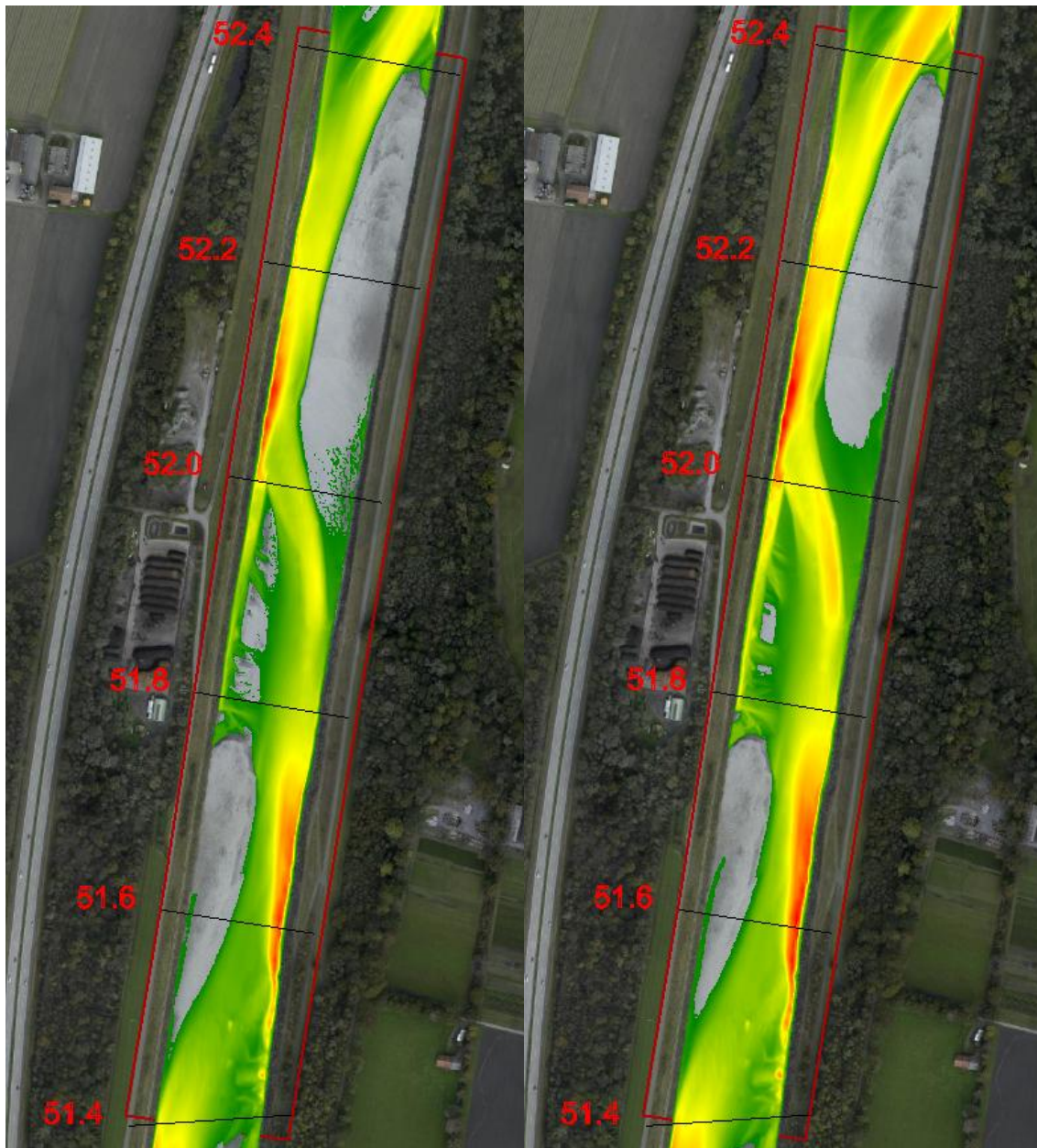


Abb. 21: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 2 (links Sunkabfluss von 95 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 140 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.8 m (rot)).

#### 4.3.4 Anforderungsprofil 3

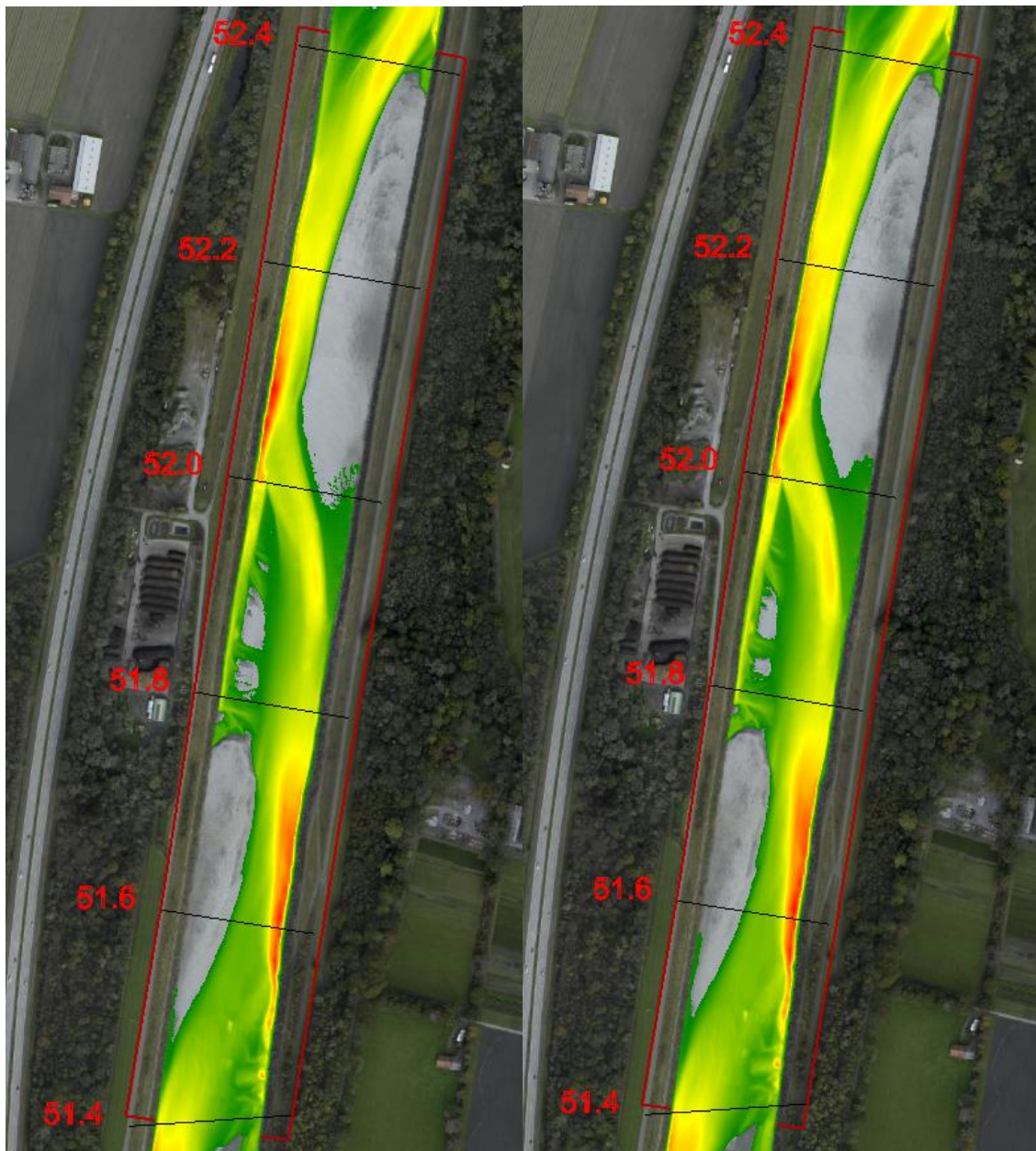


Abb. 22: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 3 (links Sunkabfluss von 106 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 125 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).



#### 4.3.5 Anforderungsprofil 4



Abb. 23: Fliesstiefen Anforderungsprofil 4 mit konstantem Abfluss von  $116 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (dunkelgrün) bis 3.6 m (rot)).



## 5 Koblach

### 5.1 Topographiedaten und Netzerstellung

#### 5.1.1 Perimeter und Topographiedaten

Der Perimeter der Untersuchungstrecke Koblach umfaßt den Abschnitt zwischen Rheinkilometer 70.6 und 71.6 (rot umrandet in Abb. 24). Dieser Perimeter wurde so festgelegt, dass er möglichst unbeeinflusst von der Frutzmündung und der Rechtskurve bei km 72 ist. Als Grundlage dazu diente die Verformung der Sohlenlage der offiziellen Rheinprofile. Der Unter-

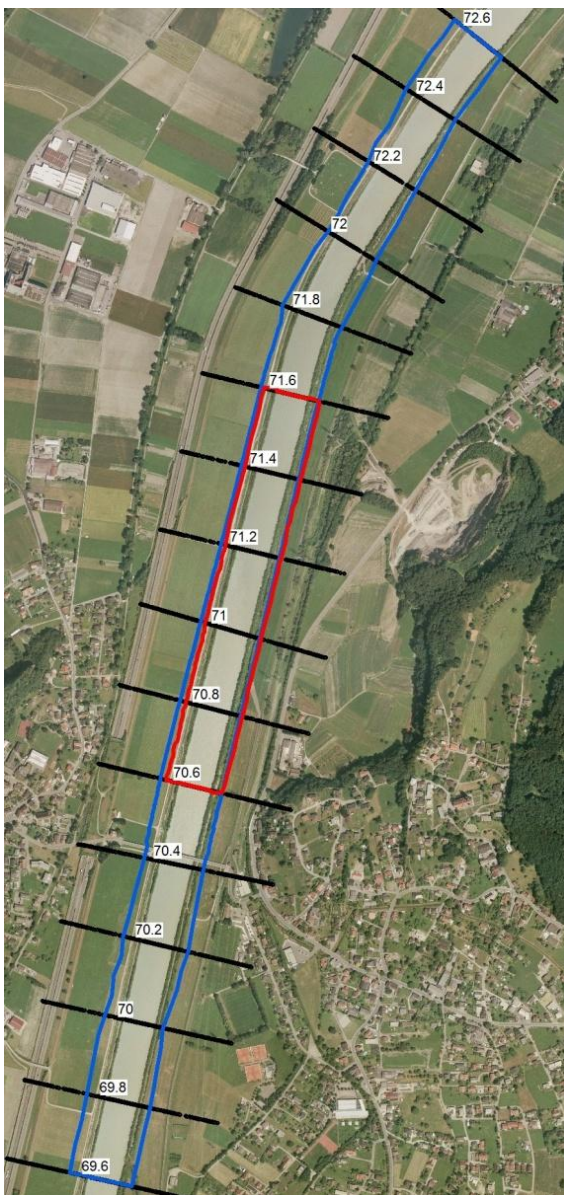


Abb. 24: Untersuchungsperimeter Koblach (rot) und Modellierungsabschnitt (blau) mit Rheinkilometer.

suchungsperimeter hat praktisch die gleichen Abmessungen wie der Abschnitt in Buchs, weil die Analyse auf das Mittelgerinne begrenzt werden kann. Für den 0.15 km<sup>2</sup> grossen Perimeter waren rund 14'200 Geländepunkte des Gerinnes und der Uferbereiche aus folgenden Grundlagen verfügbar:

- Laserscan Daten sowie hochauflösende Orthophotos aus Befliegung außerhalb des Hauptgerinnes und in den nicht benetzten Gerinneabschnitten (Uferböschungen)
- Echolotaufnahmen in den benetzten Bereichen im Hauptgerinne
- Querprofilaufnahmen 2009 (Uferbereich)

Das hydraulische Modell reicht beidseits rund 1 km über den eigentlichen Untersuchungsperimeter hinaus, nämlich von km 69.6 bis km 72.6 (blau umrandet in Abb. 24). Ausserhalb des Untersuchungsperimeters sind die Querprofile aus dem Jahr 2009 alle 25 m verfügbar, wobei die Daten des Mittelgerinnes von Echolotaufnahmen stammen, diejenigen der Ufer und der Vorländer von terrestrischen und Laser-Scan Aufnahmen.

### 5.1.2 Netzgenerierung

Die Netzerstellung erfolgte mit der Software SMS. Das Berechnungsnetz besteht im Untersuchungsperimeter aus Rechteckselementen mit der Grösse 1 x 2 m. Die Höhen wurden aus einem Raster der Geländemodelldaten (1 x 1 m) auf das Berechnungsnetz interpoliert. Für die Modellierung der Ufer wurden auch noch Informationen aus den Querprofilen 2009 verwendet, um die „Datenlücke“ im Übergangsbereich benetzt / nicht benetzt von rund 6 m zu

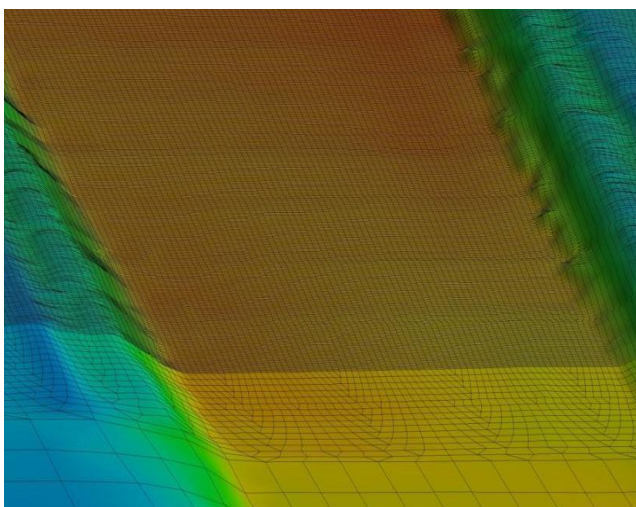


Abb. 25: Ausschnitt aus dem Berechnungsnetz im Übergangsbereich zum Untersuchungsperimeter mit der feinen Vermaschung.

schliessen. Der Modellein- und -auslauf basiert nur auf den Querprofilaufnahmen im Abstand von 25 m. In diesen Abschnitten sind die Netzelemente größer. Insgesamt besteht das Berechnungsnetz aus rund 79'000 Elementen.

### 5.1.3 Vergleich Topographiedaten/Berechnungsnetz

Abb. 26 zeigt den Vergleich des Berechnungsnetzes (rot) und der Topographiedaten (blau) am Beispiel des Querprofils km 71. Die beiden Linien sind praktisch deckungsgleich. Zusätzlich zeigt die Abbildung das Querprofil aus dem Jahre 2009. Im definitiven Berechnungsmodell war das Vorland nicht mehr enthalten, weil mit dem reduzierten Modell die Rechenzeit minimiert werden konnte und das Vorland bei den untersuchten Szenarien nicht benetzt wird.

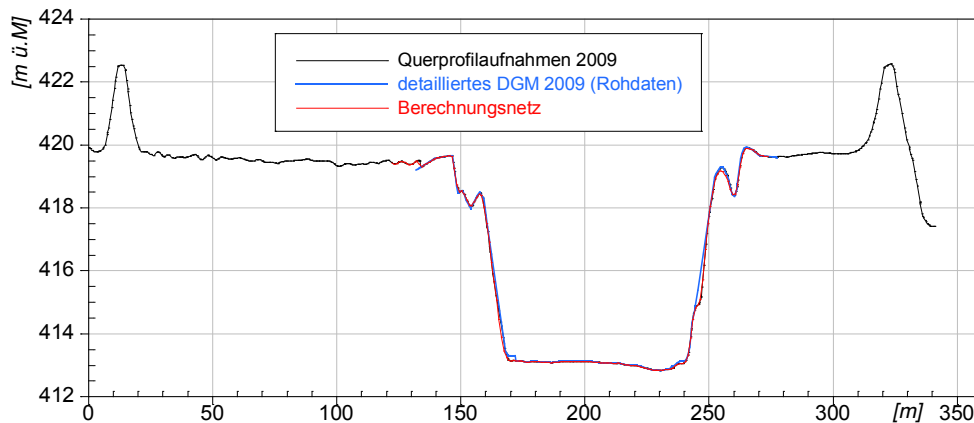


Abb. 26: Vergleich Topographieaufnahmen mit Berechnungsnetz anhand des Querprofils km 71 (Lage siehe Abb. 24).

## 5.2 Rauheiten und Kalibrierung

In Koblach wurde keine Substratkartierung durchgeführt. Dafür standen Informationen über Rauheiten von verschiedenen hydraulischen Modellen zur Verfügung. Diese wurden mit Hilfe von Sohlproben, Pegelrelation der Abflussmessstation Diepoldsau sowie von Spuren der Hochwasser von 1987 und 2005 überprüft. Die Rauheiten und die untere Randbedingung konnten aus dem 1d-Modell übernommen werden (Tab. 4). Für die Überprüfung des 2d-Modells dienten die Wasserspiegel eines typischen Sunkabflusses ( $100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) und eines typischen Schwallabflusses ( $285 \text{ m}^3/\text{s}$ ) aus dem aktuellen, geeichten 1d-Staukurvenmodell des Alpenrheins. Der Vergleich der mit den beiden Modellen berechneten Wasserspiegel zeigt eine

gute Übereinstimmung (Abb. 27 und Abb. 28). Die Abweichungen bei km 72 sind auf die Kurve zurückzuführen, welche im 1d-Modell nicht korrekt erfasst wird. Im Zuströmbereich resultiert mit dem 2d-Modell ein etwas tieferer Wasserspiegel als mit dem 1d-Modell.

Tab. 4: Modellrauheiten Koblach.

|                    | k-Wert [ $m^{1/3}/s$ ] |
|--------------------|------------------------|
| Sohle              | 35                     |
| Vorgrund / Vorland | 32.5                   |
| Kiesweg            | 40                     |
| Buschvegetation    | 15                     |

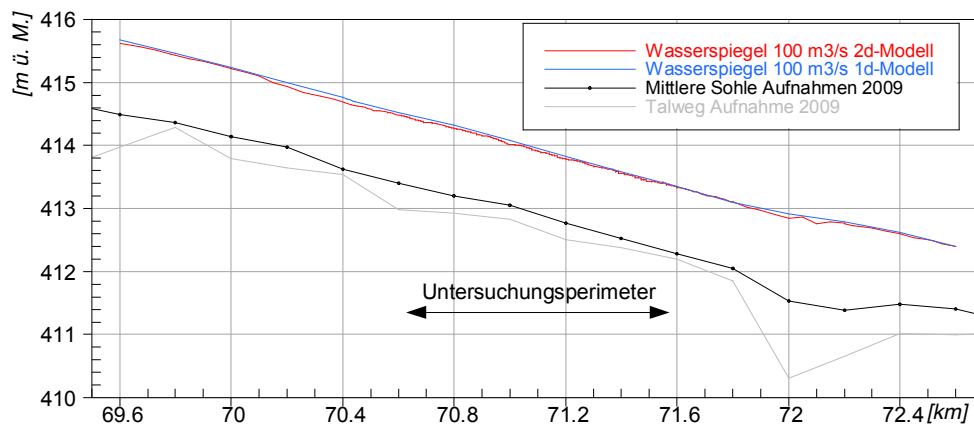


Abb. 27: Vergleich Längenprofil Wasserspiegel aus 1d-Modell und 2d-Modell für einen Sunkabfluss von 100 m³/s.

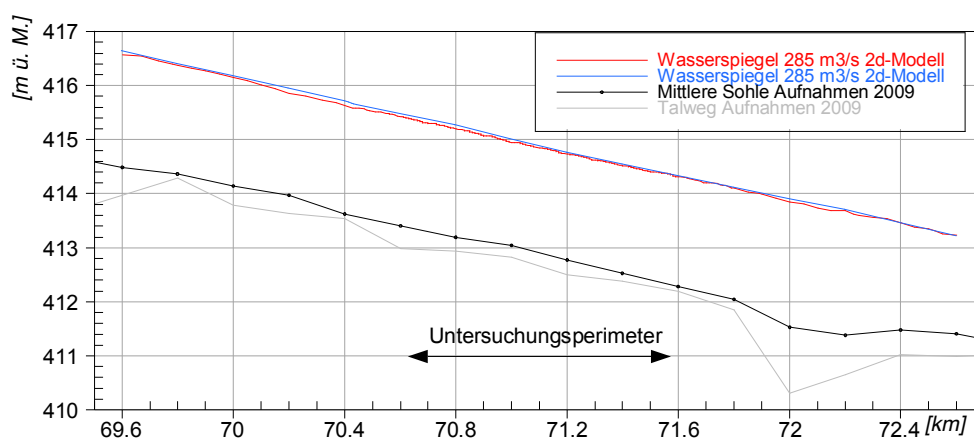


Abb. 28: Vergleich Längenprofil Wasserspiegel aus 1d-Modell und 2d-Modell für einen Schwallabfluss von 285 m³/s.



## 5.3 Resultate

### 5.3.1 Ist-Zustand

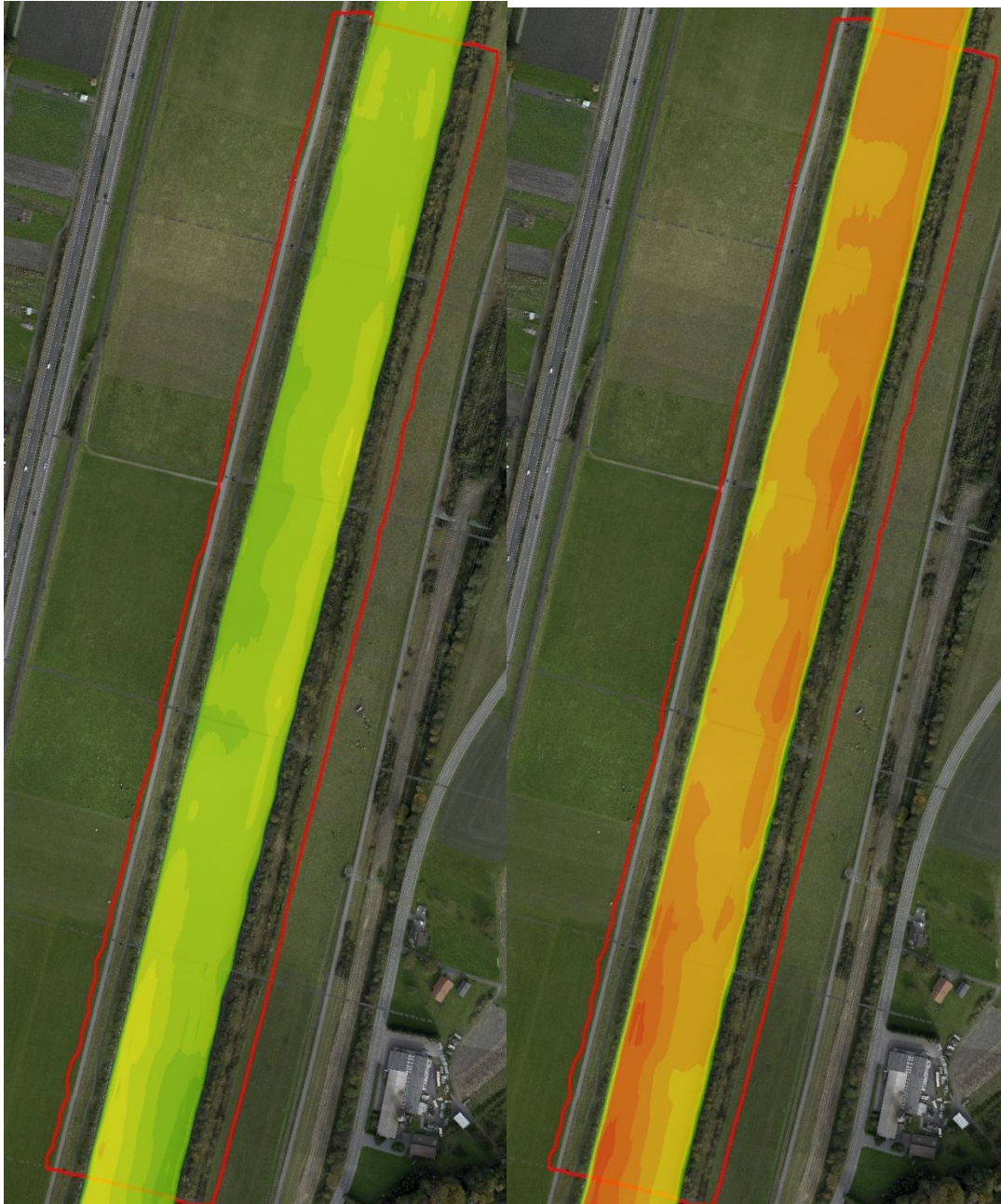


Abb. 29: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen wie heute (links Sunkabfluss von 106 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 285 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).

### 5.3.2 Anforderungsprofil 1

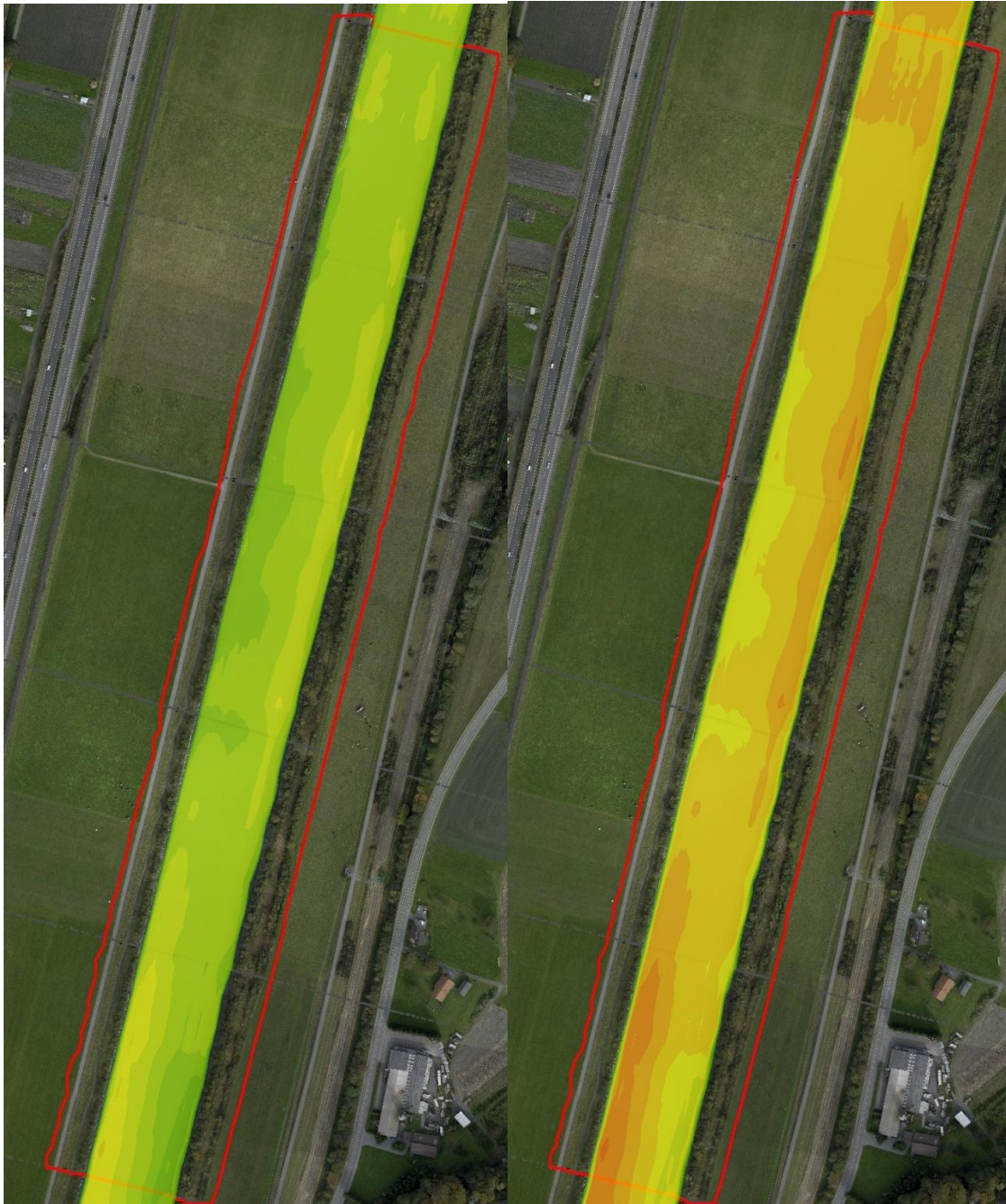


Abb. 30: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 1 (links Sunkabfluss von 106 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 240 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).



### 5.3.3 Anforderungsprofil 2

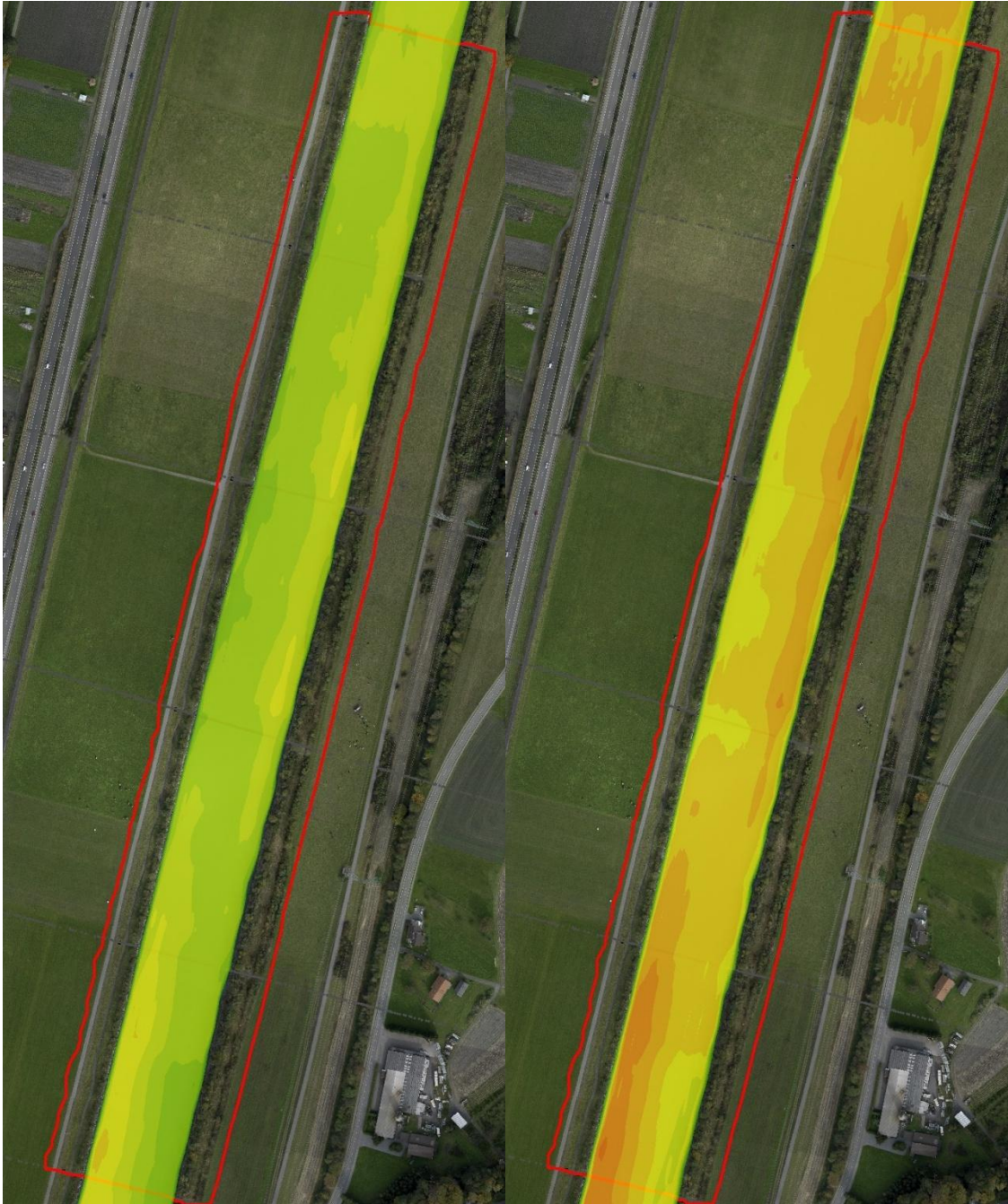


Abb. 31: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 2 (links Sunkabfluss von  $113 \text{ m}^3/\text{s}$  und rechts Schwallabfluss von  $220 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).

### 5.3.4 Anforderungsprofil 3

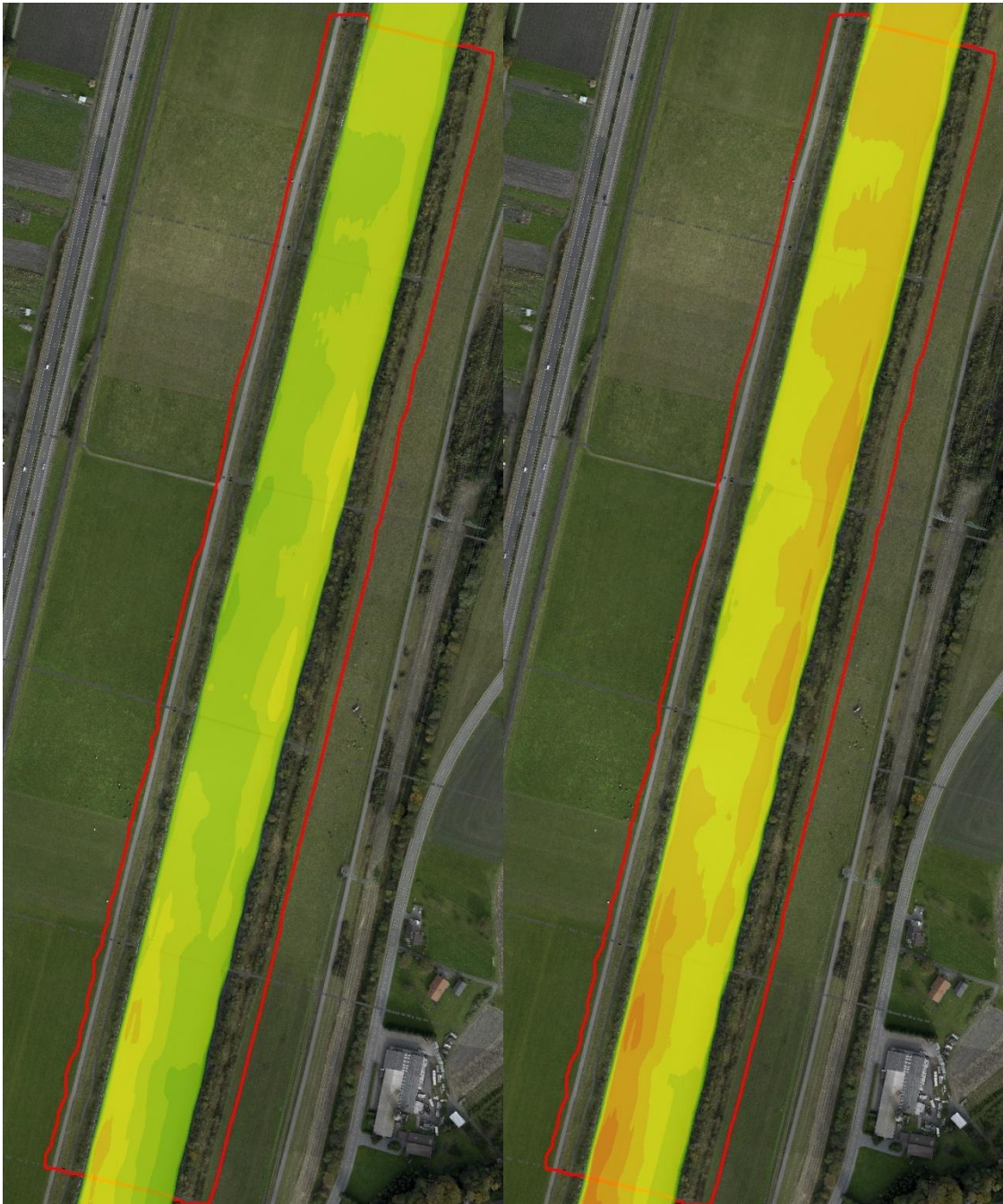


Abb. 32: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 3 (links Sunkabfluss von  $119 \text{ m}^3/\text{s}$  und rechts Schwallabfluss von  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).



### 5.3.5 Anforderungsprofil 4

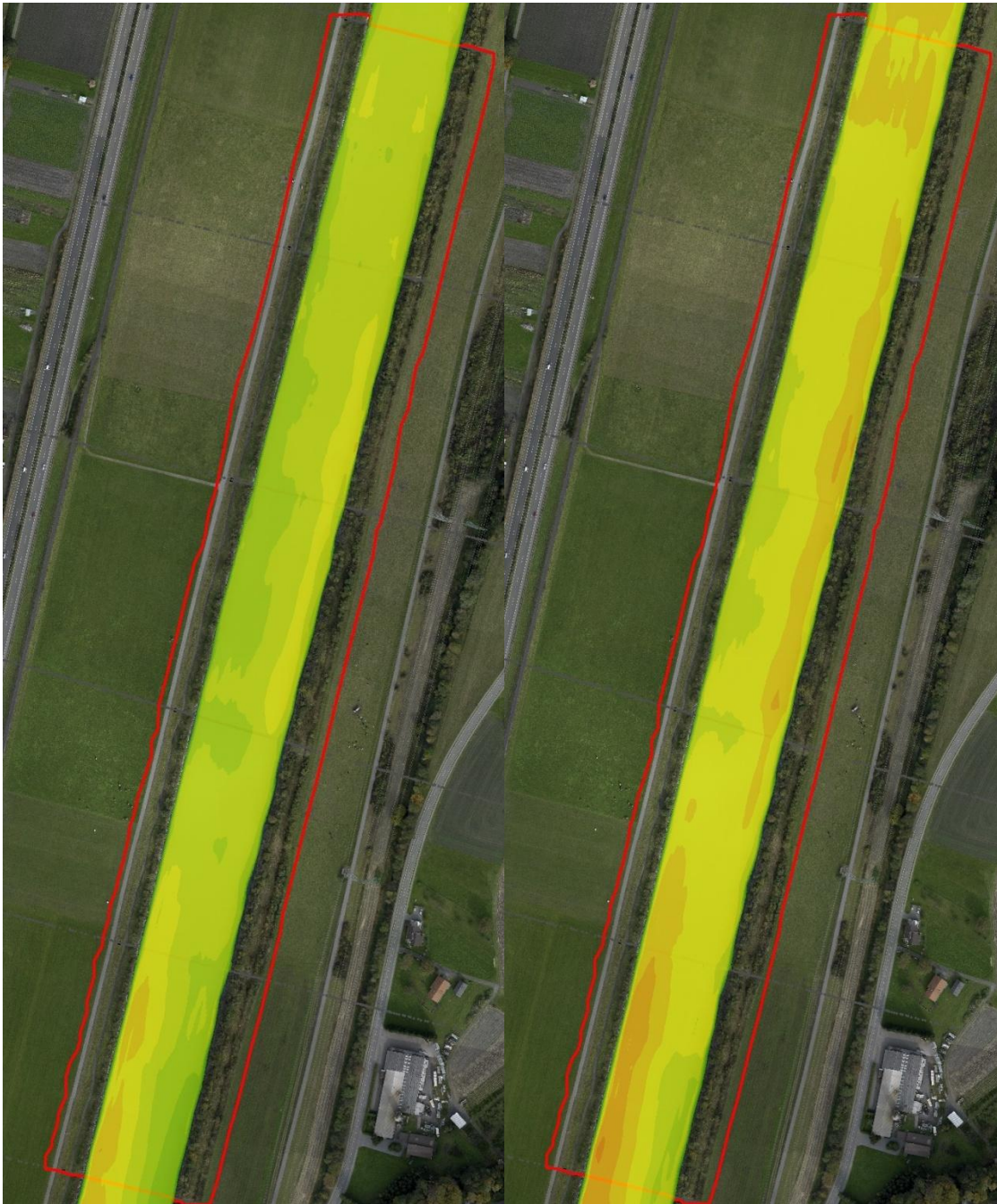


Abb. 33: Fliesstiefen mit Sunk- und Schwallverhältnissen Anforderungsprofil 4 (links Sunkabfluss von 133 m<sup>3</sup>/s und rechts Schwallabfluss von 180 m<sup>3</sup>/s; Farbabstufung in 0.2 m-Schritten von 0.2 m (grün) bis 3.0 m (rot)).