

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Zentgraf, Rolf-Dieter; Schlenker-Bohr, Sabine**

## **3D-HN-Modellierung der Loreleystrecke als Bestandteil der Untersuchung zur Havarie des TMS Waldhof**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101954>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zentgraf, Rolf-Dieter; Schlenker-Bohr, Sabine (2013): 3D-HN-Modellierung der Loreleystrecke als Bestandteil der Untersuchung zur Havarie des TMS Waldhof. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Havarie des TMS Waldhof - Bergung, Analysen, Einsichten. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 27-34.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## 3D-HN-Modellierung der Loreleystrecke als Bestandteil der Untersuchung zur Havarie des TMS Waldhof

Dipl.-Ing. Rolf Zentgraf, Dipl.-Inf. Sabine Schlenker-Bohr, Bundesanstalt für Wasserbau

### 1. Modellgebiet

Zwischen Bingen und Koblenz durchzieht der Rhein das Rheinische Schiefergebirge als antezedentes Durchbruchstal und trennt damit die Mittelgebirge Hunsrück und Taunus. Das Gestein des Rheinischen Schiefergebirges ist plattig, geneigt und bildet durch die kantigen Brüche eine raue Felssohle.

Vom „Geisenrücken“, einem Mittelfels im Rhein zwischen Rhein-km 551,90 und Rhein-km 552,60, durchläuft eine tiefe Rinne den Rhein, welche in den Bereichen am „Kammereck“ (Rhein-km 552,80), am „Betteck“ (Rhein-km 553,60) und an der „Loreley“ (Rhein-km 554,30) ausgeprägte Kolke aufweist (Bild 1). Für die Untersuchungen mit dem Binnenschiffsführungssimulator wurde ein großräumiges zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (2D-HN-Modell) eingesetzt. Die Rinne mit den Kolken prägt der Strömung eine Turbulenz auf, die sich als sehr unruhiges Fahrwasser bemerkbar macht. Zudem ändern sich die Strömungsverhältnisse aufgrund der Wasserführung erheblich.

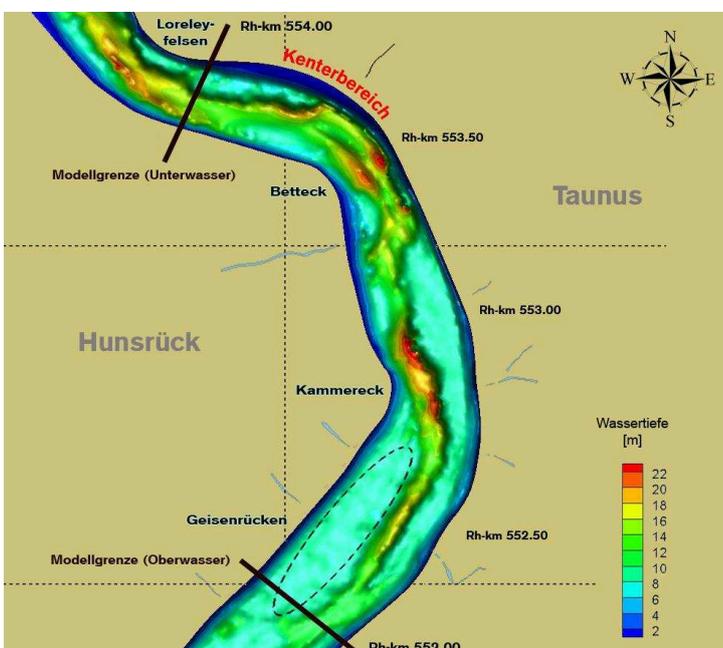


Bild 1: *Wassertiefen aus dem 2D-HN-Modell bei einem Hochwasserabfluss von  $Q = 4360 \text{ m}^3/\text{s}$*

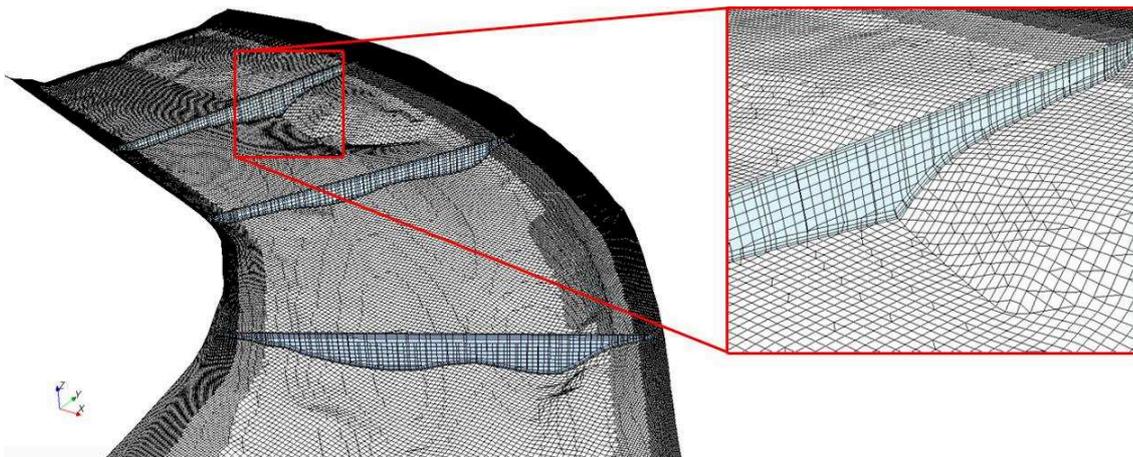
Zur Untersuchung dieser komplexen Strömungscharakteristik wurde im Nahbereich der Unfallstelle ein 3D-HN-Modell aufgebaut. Mit diesem Modell können Abflusszenarien, wie das Hochwasser am Tag der Havarie des TMS Waldhof am 13.01.2011, nachgerechnet und lokale Strömungsverhältnisse detailliert analysiert werden.

Im Untersuchungszeitraum war die Hochwassermarke I am Pegel Kaub (HWM I 460 cm bei Rhein-km 546,23) um ca. 1,10 m überschritten. Der Hochwasserabfluss betrug  $Q = 4360 \text{ m}^3/\text{s}$ , es herrschten Wassertiefen von bis zu 22 m.

## 2. Aufbau des 3D-HN-Modells

Dem 3D-HN-Modell des Rheinabschnitts von Rhein-km 552,0 bis Rhein-km 554,0 liegen die gleichen Basisdaten (Peilung 2008 des WSA Bingen) wie dem großräumigen 2D-HN-Modell zugrunde. Das Rechennetz besteht aus etwa 5 Millionen Volumenelementen mit Kantenlängen zwischen 0,5 m und 4 m. Das hochaufgelöste Rechengitter ist notwendig, um die dreidimensionale Strömungscharakteristik mit Wirbel- und Walzenbildungen zu erfassen.

Die Projektion des Berechnungsgitters auf die Flusssohle ist in Bild 2 dargestellt. An drei Querschnitten (Rhein-km 553,5, Rhein-km 553,65 und Rhein-km 553,8) ist exemplarisch die horizontale Aufteilung der Volumenelemente projiziert. Dabei sind die Volumenelemente an der Sohle, am Ufer und im Bereich der Wasserspiegeloberfläche dichter, als im restlichen Teil des Strömungsfeldes. Die Sohlrauheit wird anhand der Erfahrungen aus dem 2D-HN-Modell mit 19 cm Kornrauheit angenommen.



*Bild 2: Projektion des Berechnungsgitters des 3D-HN-Modells auf die Gewässersohle bzw. auf ausgewählte Profilquerschnitte*

## 3. Verifizierung des 3D-HN-Modells

Zur Verifizierung des 3D-HN-Modells wurden Naturmessungen in diesem Rheinabschnitt durchgeführt. Am 17.04.2012 wurden bei einem Mittelwasserabfluss von etwa  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$  an drei Querprofilen (Rhein-km 553,5, Rhein-km 553,65 und Rhein-km 553,8) Fließgeschwindigkeiten über die Tiefe verteilt gemessen. Der Abflusszustand zum Zeitpunkt der Naturmessung wurde im 3D-HN-Modell nachgerechnet. Der Vergleich der Naturmessdaten mit den Berechnungsergebnissen ist in Bild 3 dargestellt und zeigt eine gute Übereinstimmung.

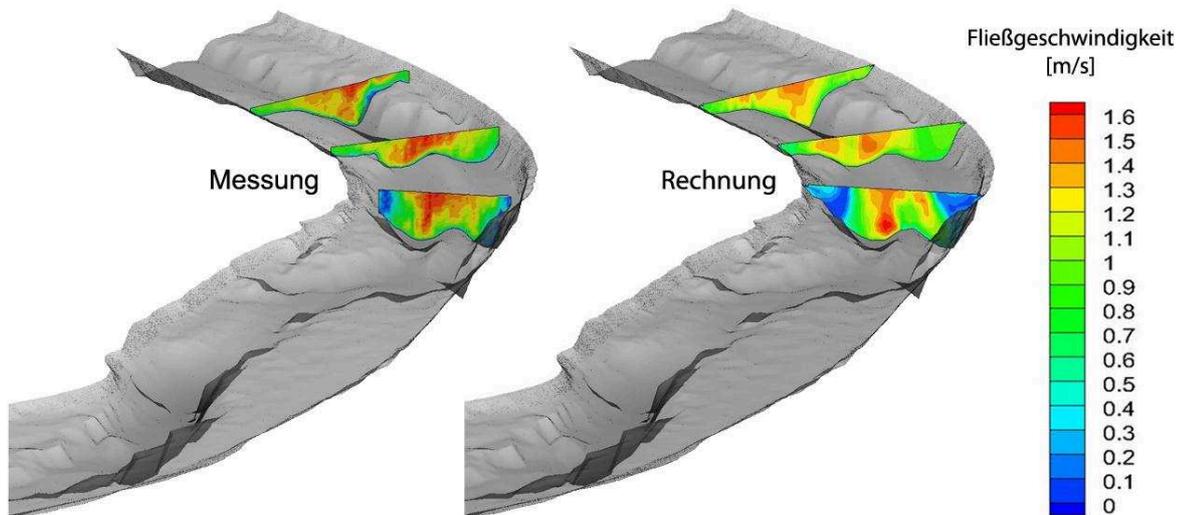


Bild 3: *Darstellung der Fließgeschwindigkeiten (Messung links; Berechnung rechts) bei einem Mittelwasserabfluss von  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$  an den drei Messprofilen bei Rhein-km 553,5, Rhein-km 553,65 und Rhein-km 553,8*

Um die Berechnungsergebnisse des 3D-HN-Modells mit Hochwasserereignissen zu verifizieren, wurden diese mit entsprechenden Hochwasserberechnungen aus dem kalibrierten tiefengemittelten 2D-HN-Modell verglichen. Es zeigten sich gute Übereinstimmungen bezüglich der gemittelten Fließgeschwindigkeiten.

#### 4. Strömungsverhältnisse des Rheins zum Zeitpunkt der Kenterung

Mit dem verifizierten 3D-HN-Modell wurde der Abflusszustand am Tag der Havarie berechnet. Bild 4 zeigt bei dem untersuchten Hochwasserabfluss die Fließgeschwindigkeiten in unterschiedlichen Wassertiefen (1 m, 2 m und 3 m unter der Wasserspiegellage). Laut Ladekontrollbericht hatte das TMS Waldhof einen Tiefgang von 3,12 m. Über diese abladerelevante Tiefe hinaus treten im Bereich des Fahrwassers hohe Geschwindigkeitsgradienten zwischen 2,0 m/s und 3,0 m/s auf.

In Bild 5 sind im Bereich des „Bettecks“ bei Rhein-km 553,5 exemplarisch der Verlauf der Stromlinien über die Tiefe dargestellt. Die Detailansicht in Bild 5 a) zeigt deutlich, wie sich die von der Wasserspiegeloberfläche ausgehenden Stromlinien im Bereich der Kolke bei Rhein-km 553,7 aufgrund der Spiralströmung über die Tiefe hinweg „eindreihen“. Die Detailansicht in Bild 5 b) stellt exemplarisch einen walzenartigen Strömungszustand im Bereich eines Kolkes bei Rhein-km 553,5 dar.

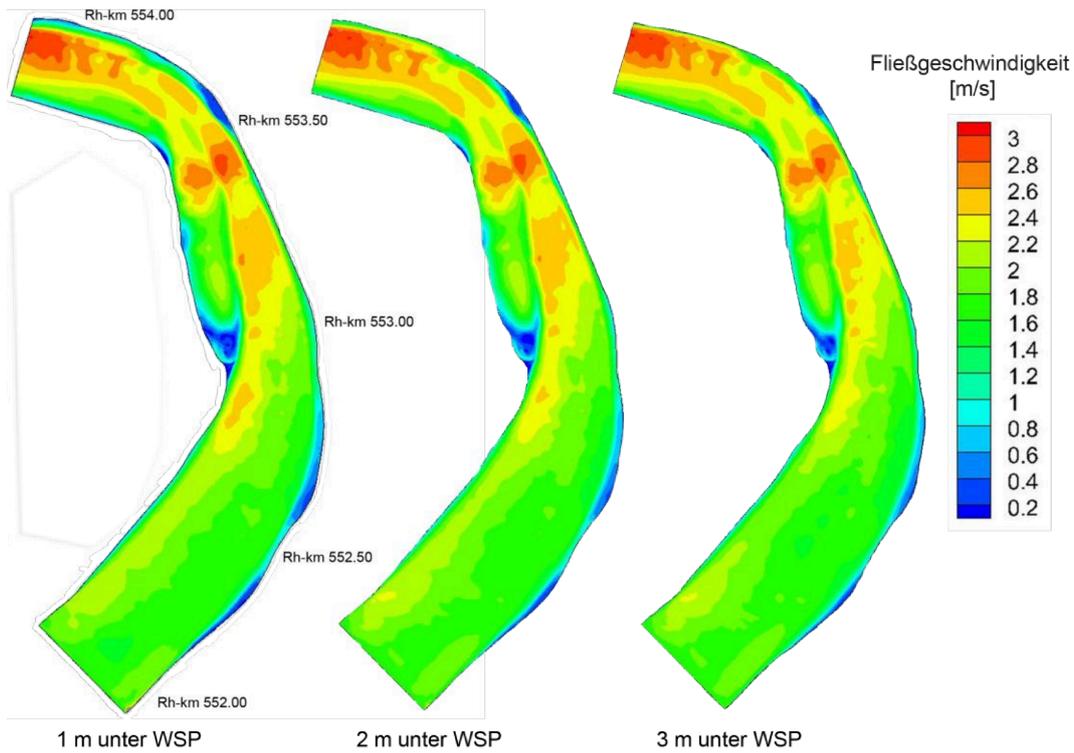


Bild 4: *Fließgeschwindigkeiten bei dem untersuchten Hochwasserabfluss von  $Q = 4360 \text{ m}^3/\text{s}$  in unterschiedlichen Wassertiefen (1 m, 2 m und 3 m unter der Wasserspiegellage)*

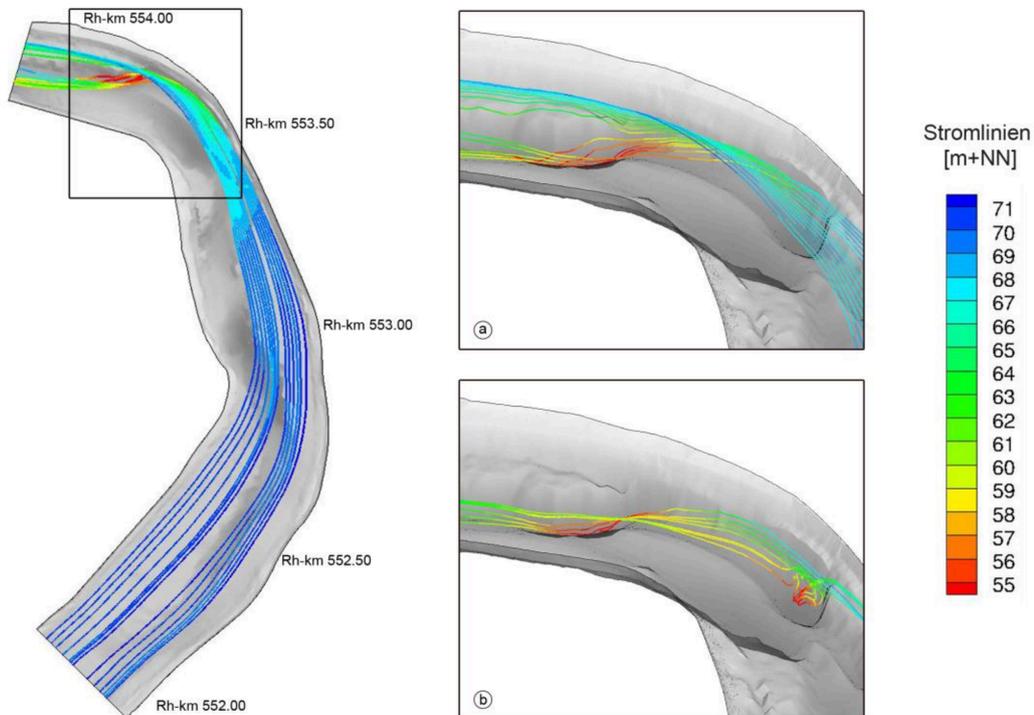


Bild 5: *Exemplarische Darstellung des Stromlinienverlaufs über die Tiefe aus dem 3D-HN-Modell im Bereich des „Bettecks“*

#### 4.1 Analyse der Fließgeschwindigkeiten entlang der Fahrspur

Um den Einfluss der Strömungsverhältnisse auf die Fahrt des TMS Waldhof zu analysieren, werden in diesem Kapitel die Fließgeschwindigkeiten aus dem 3D-HN-Modell bezogen auf die Fahrspur des TMS Waldhof ausgewertet. Entlang der Fahrspur werden die Anteile der Fließgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Kenterung getrennt für die drei Raumrichtungen  $x'$ ,  $y'$  und  $z$  betrachtet. Bei den Fließgeschwindigkeiten in  $x'$ -Richtung (in Fahrtrichtung) und  $y'$ -Richtung (quer zum Schiff) handelt es sich um ein um die  $z$ -Achse gedrehtes Koordinatensystem. Die Fließgeschwindigkeitsanteile in  $z$ -Richtung sind die vertikalen Komponenten der Strömung. Folgend werden die  $z$ - und  $y'$ -Anteile der Fließgeschwindigkeit dargestellt.

##### **Fließgeschwindigkeitsanteile in $z$ -Richtung**

In Bild 6 rechts ist zusätzlich zu den Fließgeschwindigkeitsanteilen in  $z$ -Richtung die Fahrspur des TMS Waldhof bei dem untersuchten Hochwasserabfluss eingetragen. Entlang dieser Fahrspur wurden die Geschwindigkeiten in  $z$ -Richtung in einer Tiefe von 2 m unter der Wasserspiegellage ausgewertet (Bild 6, links). Das Diagramm entlang der Fahrspur verdeutlicht die wechselnden Strömungsangriffe auf das Schiff. Das Schiffssymbol bei Rhein-km 553,34 entspricht etwa dem Ort der Begegnung (Bug/Bug) mit dem üGMS Acropolis um 04:41:02 Uhr. Das Schiffssymbol bei Rhein-km 553,67 stimmt etwa mit dem Bereich der Havarie, als sich die Radarbilder des TMS Waldhof um 04:42:08 Uhr begannen aufzulösen, überein. Da das Schiffssymbol in der Abbildung etwa längenmaßstäblich dargestellt ist, kann man gut erkennen, dass je nach Position des Schiffes unterschiedliche hydraulische Kräfte auf Bug und Heck wirken, die in Verbindung mit den freien Oberflächen der Ladung eine bug- bzw. hecklastige Vertrimmung bewirken können.

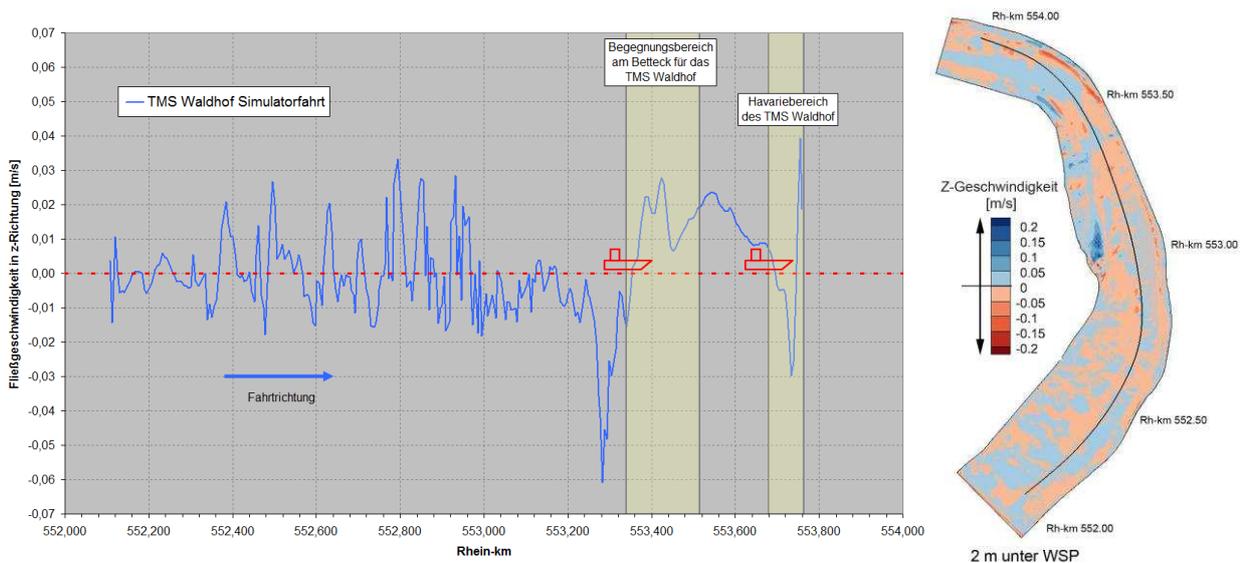


Bild 6: *Fließgeschwindigkeitsauswertung in  $z$ -Richtung entlang der Fahrspur des TMS Waldhof (links); Fließgeschwindigkeitsanteil in  $z$ -Richtung mit der Fahrspur des TMS Waldhof überlagert (rechts)*

### **Fließgeschwindigkeitsanteile in $y'$ -Richtung**

In Bild 7 sind die Fließgeschwindigkeitsanteile in  $y'$ -Richtung entlang der Fahrspur dargestellt. Es handelt sich um den Anteil der Strömungsgeschwindigkeit entlang der  $y'$ -Achse des schiffsfesten Koordinatensystems (Bewegung seitlich bzw. Drehung um die Hochachse  $z$ ). Analog sind die Schiffssymbole längenmaßstäblich am Begegnungsbereich am „Betteck“ und am Havariebereich exemplarisch eingetragen. Bezogen auf das Schiffssymbol sind in der Abbildung positive Fließgeschwindigkeitsanteile Richtung Backbord und negative Fließgeschwindigkeitsanteile Richtung Steuerbord dargestellt. Auffällig ist auch hier die inhomogene Verteilung der am Schiffskörper auftretenden hydraulischen Kräfte. Die zum Teil hohen Geschwindigkeitsgradienten von bis zu 0,4 m/s zwischen Bug und Heck wirken sich auch auf die notwendigen Rudermanöver aus.

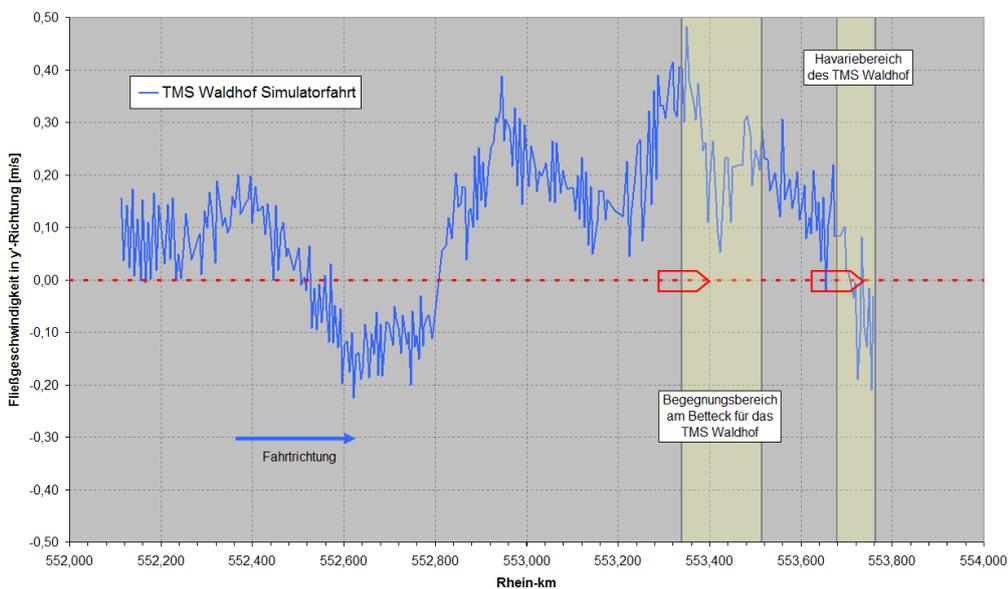


Bild 7: *Fließgeschwindigkeitsauswertung in  $y'$ -Richtung entlang der Fahrspur des TMS Waldhof*

### **Visualisierung der berechneten Strömungsverhältnisse im Bereich der Kenterstelle**

In der Visualisierungsanlage der BAW wurde das Sichtmodell der Gebirgsstrecke, das Modell des TMS Waldhof sowie die Berechnungsergebnisse des 3D-HN-Modells zusammengeführt. In Bild 8 ist die Situation bei dem Hochwasserabfluss unmittelbar vor dem Kenterprozess dargestellt. Die Abbildung zeigt das TMS Waldhof etwa bei Rhein-km 553,7 im Bereich der roten Fahrinnenbegrenzungstonne (siehe Markierung). Der Verlauf der tiefen Rinne bzw. die ausgeprägten Kolke sind gut zu erkennen.

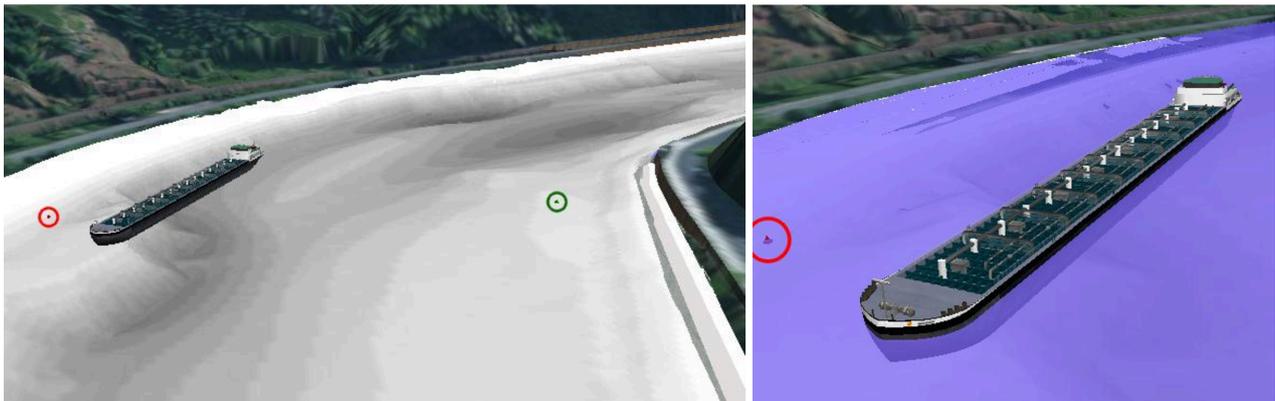


Bild 8: TMS Waldhof im Bereich der Kenterstelle ohne (links) und mit leicht transparent dargestellter Wasserspiegellage (rechts)

In Bild 9 sind die Berechnungsergebnisse bei dem untersuchten Hochwasserabfluss exemplarisch in der Visualisierungsanlage der BAW dargestellt. Aus dem 3D-HN-Modell sind die z-Komponenten der Fließgeschwindigkeit jeweils flächig in einer Tiefe von 1,5 m unter der Wasserspiegellage (WSP) sowie an drei Querschnitten entlang des Schiffes dargestellt. In der Darstellung sind geringe Fließgeschwindigkeitsanteile in z-Richtung transparent abgebildet.

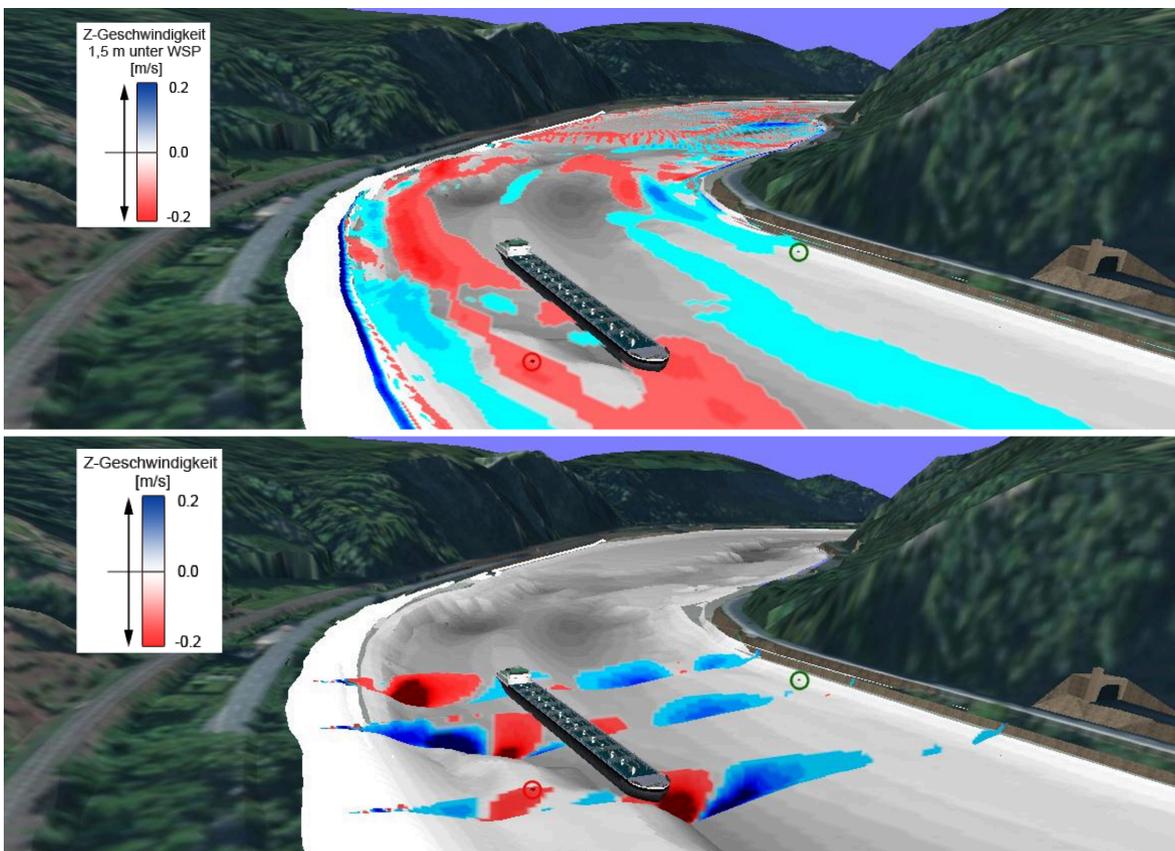
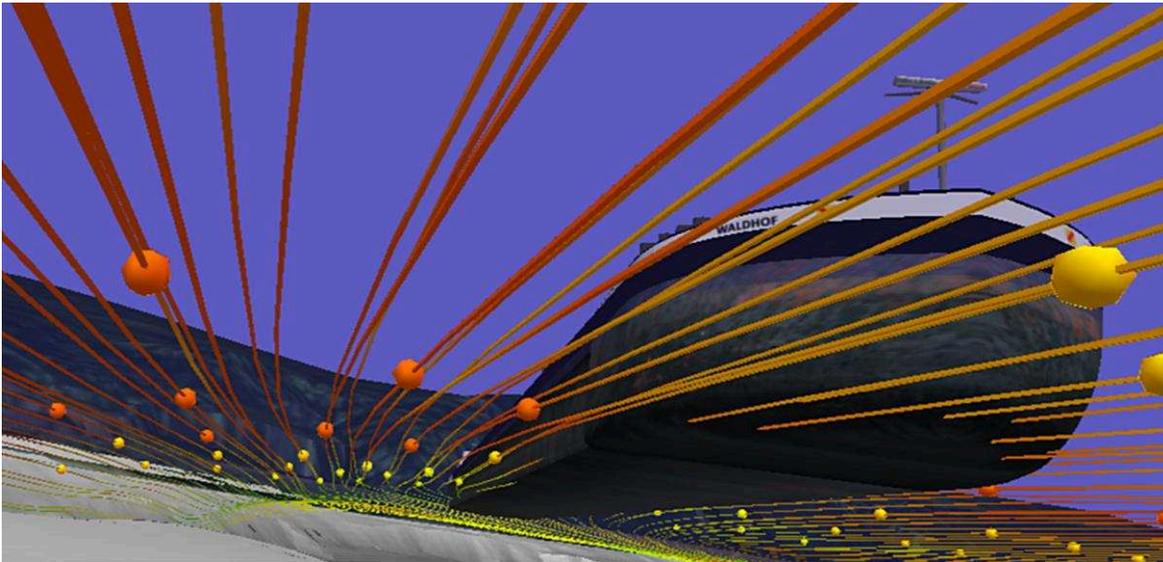


Bild 9: Darstellung der Berechnungsergebnisse des 3D-HN-Modells, des Sichtmodells der Gebirgsstrecke und des TMS Waldhof in der Visualisierungsanlage der BAW

In Bild 10 sind die nach der Fließgeschwindigkeit eingefärbten Stromlinien dargestellt. Um den Strömungseinfluss auf das TMS Waldhof zu visualisieren, wurde das Schiff in das ungestörte Strömungsfeld (Berechnung ohne Interaktion Strömung/Schiff) in den Bereich der Havarie gesetzt. Der Blick auf das Unterwasserschiff zeigt den Strömungsangriff auf das Schiff.



*Bild 10: Blick auf das Unterwasserschiff des TMS Waldhof und Darstellung der Stromlinien (eingefärbt nach der Fließgeschwindigkeit) aus dem 3D-HN-Modell*

Die differenzierte Analyse der dreidimensionalen Strömung im Bereich der Loreleystrecke belegt, dass hier die Navigation mit einem Schiff anspruchsvoll ist. Die Strömungsverhältnisse bewirken je nach Abfluss und Position ungleichmäßige hydraulische Belastungen auf ein Schiff. Die Untersuchungen mit dem 3D-HN-Modell zeigen, dass etwa bei Rhein-km 553,7 im Bereich neben der roten Fahrrinnenbegrenzungstonne Strömungen existieren, die für einen Talfahrer ein krägendes Moment in Richtung Steuerbord erzeugen.

#### **Literatur:**

BAW: Teilbericht zur Havarie des Tankmotorschiffes Waldhof – Untersuchung der Ursachen der Havarie, Eigenverlag – Karlsruhe (2012).