

12.12.2024

## Erweiterung und Instandsetzung Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt

Teil B:  
Abschlussbauwerk (TO11)  
Unterlage 4 – Hydraulische Nachweise

Entwurfs- und Genehmigungsplanung



Blick vom Tosbecken auf das Abschlussbauwerk

**Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt**  
c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH  
Rießnerstraße 18  
99427 Weimar

**TRACTEBEL**  


 **INROS LACKNER**

**Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt**

c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH  
Rießnerstraße 18 | 99427 Weimar  
Tel: +49 3643 746-400 | Fax: +49 3643 746-405  
hydroprojekt-DE@tractebel.engie.com  
www.hydroprojekt.de


**Unterschriftenblatt**

Projekt **Erweiterung und Instandsetzung HRB Straußfurt**  
**Teil B:**  
**Abschlussbauwerk (TO11)**  
Unterlage 4 – Hydraulische Nachweise

Projektnummer 100 3492 (Tractebel Hydroprojekt GmbH)  
2022-0617 (Inros Lackner SE)

Auftraggeber **Thüringer Fernwasserversorgung**  
Anstalt des öffentlichen Rechts  
Haarbergstr. 37  
99097 Erfurt

Freigabe:

  
i. V. Dr. Michael Sabrowski  
Leiter Stauanlagenmanagement  
Erfurt, den 12.12.2024

  
i. V. Detlef Hogg  
Projektingenieur

Auftragnehmer **Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt**  
c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH  
Rießnerstraße 18  
99427 Weimar

Projektleitung Dipl.-Ing. Lars Schaarschmidt

Fachliche Qualitätssicherung Dipl.-Ing. Holger Rosenkranz

Bearbeitung Dr.-Ing. Paolo Dapoz

Dresden, 12.12.2024

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt

  
Lars Schaarschmidt  
Projektleiter

  
Dr.-Ing. Paolo Dapoz  
Projektingenieur

## 3d-hn-Modellierung Abschlussbauwerk - Rev2

### INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung	1
2	Verwendete Software	2
3	Beschreibung des Bauwerkes und geplante Anpassungen	2
4	Nachweiskonzept und hydraulische Randbedingungen	3
5	Methodik zur Tosbeckenoptimierung	4
6	Methodik Nachweiserbringung der Leistungsfähigkeit	6
7	Berechnungen mit dem Schnittmodell	6
7.1	Ausgangsgeometrie	6
7.2	Berechnungsnetz	7
7.3	Randbedingungen	8
7.4	Ergebnisse	8
8	Modellvalidierung	9
9	Berechnungen mit dem Gesamtmodell (GM)	10
9.1	Ausgangsgeometrie	10
9.2	Berechnungsnetz	11
9.3	Randbedingungen	12
9.4	Ergebnisse	13
9.4.1	BHQ1 – Tosbeckenbemessung	13
	BHQ1 - Reduzierung der Tosbeckenlänge	16
	BHQ1 - Erhöhung Flügelwände	17
	BHQ1 – Ermittlung Strömungskräfte	18
9.4.2	Nachweis Leistungsfähigkeit	20
	BHQ1 Lastfall (n-1)	20
	BHQ2 Lastfall (n)	22
9.4.3	Risikobetrachtungen	24
	Bauzustand für Baugrube 2 Lastfall BHQ1 (n-2)	24
	Lastfall BHQ2 (n-1)	25
10	Zusammenfassung	26
11	Anlagenverzeichnis	27

## 1 Veranlassung

Das Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt ist ein wesentlicher Bestandteil des funktionalen Hochwasserschutzes für die Gebiete an der unteren Unstrut. Die Stauanlage soll nach über 60 Jahren Betrieb instandgesetzt und erweitert werden. Geplant ist, den Vollstau um 1 m zu erhöhen. Damit soll das Speichervolumen von 18,6 Millionen Kubikmetern um ca. 10 Millionen Kubikmeter erweitert werden. Das bedeutet, dass alle relevanten Bauwerke in ihrer Höhe baulich angepasst sowie neue Dammbauwerke, bei Erfordernis mit zugehörigem Schöpfwerk, errichtet werden müssen.

Ziel des Vorhabens ist es weiterhin, die notwendigen Anlagenobjekte des HRB Straußfurt so instand zu setzen, dass seine regelwerkskonforme Nutzungsdauer insgesamt für weitere 80 bis 100 Jahre gegeben ist.

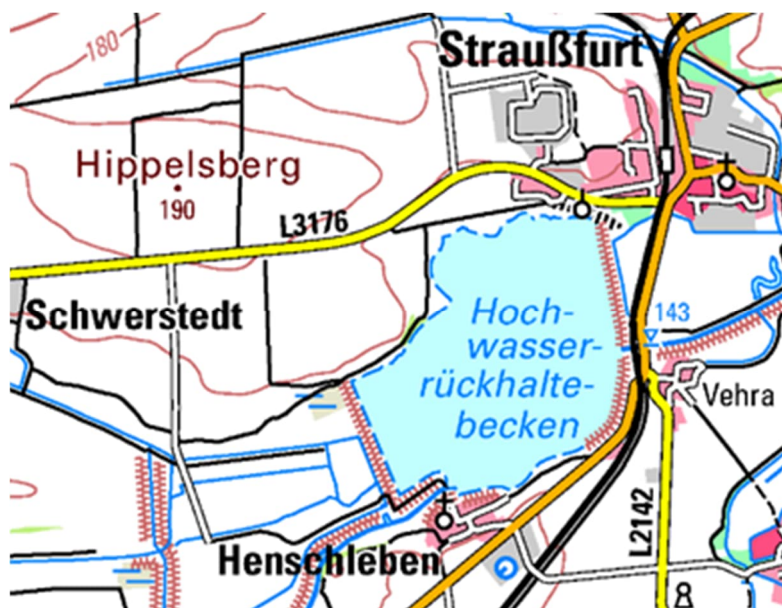


Abbildung 1: Lage des HRB

Mit Hilfe einer dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellierung soll die Leistungsfähigkeit des Abschlussbauwerkes (TO11) nachgewiesen werden und die Geometrie und Länge des Tosbeckens optimiert werden. Ziel der Tosbeckenoptimierung ist eine möglichst geringe Tosbeckenlänge bei Gewährleistung eines hydraulisch stabilen Abflusses, d.h. vollständig abgeschlossener Energieumwandlung am Tosbeckenende.

Bei einer 3d-hn Modellierung erfolgt eine Diskretisierung des Fließvolumens in dreidimensionale Zellen. Für jede Zelle werden die Fließgleichungen nach Navier-Stokes pro Zeitintervall gelöst. Nach Erreichen eines gleichmäßigen Fließzustandes (stationärer Fließzustand) können für jede Berechnungszelle des Modelles die charakteristischen Fließparameter des Strömungsmediums (wie Fließgeschwindigkeit in x-, y-, z-Richtung, Fließtiefe, Druck, Scherkraft, usw.) für die weitere Planung ausgewertet und herangezogen werden.

Der vorliegende Bericht stellt die hydraulischen Randbedingungen zur Führung der Hochwasserschutz- und Hochwassersicherheitsnachweise am Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt zur Verfügung.

Nach der Darstellung der Methodik werden im Folgenden die Nachweise zur Leistungsfähigkeit im Hochwasserbemessungsfall 1 und 2 wiedergegeben.

Die darin ermittelten Wasserspiegellagen sowie Fließgeschwindigkeiten und Scherkräfte gehen als maßgebende Randbedingung bzw. Einwirkung in die weiteren Planungen und in die zu führenden Sicherheitsnachweise für Massiv-, Stahl- und Erdbau ein.



## 2 Verwendete Software

Die Erstellung der 3d-Geometrie des Bauwerkes erfolgt mit unterschiedlicher 3d-Modellierungssoftware der Firma Autodesk wie Civil 3D, Revit und Autocad 2024.

Die Analyse der erzeugten 3d-Volumenkörper erfolgt unter Verwendung der Software Papa's Best STL-Viewer.

Die Strömungsmodellierung (Prä-Prozessor, Solver) erfolgt durch die Verwendung des kommerziellen Programmes FLOW-3D HYDRO von Flow Science Inc. (USA) in der Version 23.2.0. FLOW-3D ist seit ca. 18 Jahren auf dem deutschen Markt vertreten und stellt ein benutzerfreundlicheres Softwarepaket zur 3D-Strömungsmodellierung gegenüber anderer Open-Sources-Software dar, welche in erster Linie an Forschungseinrichtungen verwendet werden. In FLOW-3D werden die Randbedingungen sowie das Rechnetz und die numerischen Parameter festgelegt.

Zur Auswertung und Visualisierung der Strömungsberechnungen wird der implementierte Post-Prozessor von FLOW-3D und vereinzelt das Programm Flow3D POST von Flow Science Inc. (USA) in der Version 23.2.0 verwendet.

## 3 Beschreibung des Bauwerkes und geplante Anpassungen

Es ist geplant, einen Ersatzneubau der Anlage und die Anhebung des Vollstauzieles um 1,0 m auf 150,81 m NHN vorzunehmen.



Abbildung 1: Unterwasseransicht des Abschlussbauwerkes, Quelle: Steve Bauerschmidt

Das Abschlussbauwerk TO11 gliedert sich in die massiven Teilbauwerke und die Stahlwasserbauteile. Zu den massiven Teilbauwerken des Abschlussbauwerks zählen das Wehrbauwerk, die Flügelwände, das Tosbecken mit den dazugehörigen Wehrwangen sowie die Wehrbrücke.

Bei dem Teilbauwerk Wehr für das Ersatzneubau handelt es sich um eine 4-feldrige Wehranlage mit einer lichten Wehrfeldbreite von jeweils 4,00 m. Die Wehrpfeiler und Wehrwangen sind senkrecht zur Achse des Hauptdamms angeordnet. Die Wangen der Wehranlage und die Pfeiler dienen als Auflager für die Wehrbrücke. Die Wangenbreite beträgt 1,00 m und die Pfeilerbreite 1,50 m. Wangen und Pfeiler sind oberwasserseitig abgerundet; unterwasserseitig wird auf eine Ausrundung der Pfeiler verzichtet.

Die Oberkante der Bodenplatte befindet sich im Bereich der Wehrschwelle bei 142,40 m NHN und fällt auf 140,40 m NHN Richtung Tosbecken ab.

Die massiven Flügelwände schließen nördlich sowie südlich seitlich an das Wehr an und binden in den Hauptdamm ein.

Das massive Tosbecken schließt unterwasserseitig an das Wehr an. Im Anschluss an das Tosbecken ist fugenlos die Endschwelle angeordnet.

Die Geometrie und Länge des Tosbeckens ergibt sich aus den hydraulischen Anforderungen zur Energieumwandlung und wurde im Zuge dieser 3d-hn-Modellierung optimiert.

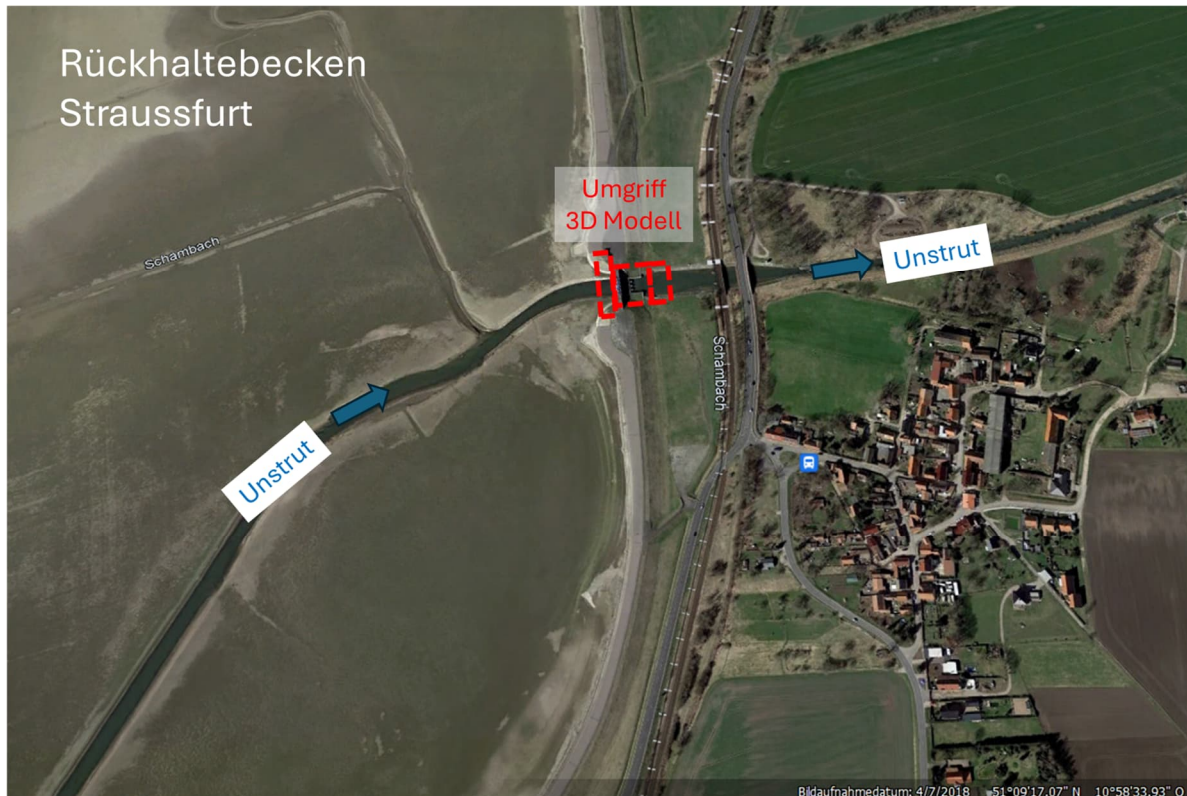


Abbildung 1 – Übersicht des Rückhaltebeckens mit Modellumgriff

## 4 Nachweiskonzept und hydraulische Randbedingungen

Mit Hilfe der 3d-hn-Modellierung sind grundsätzlich folgende 3 Nachweise zu erbringen:

1. Tosbeckenbemessung (und -optimierung): Nachweis der ausreichenden Energieumwandlung im Tosbecken im Hochwasserbemessungsfall 1
2. Nachweis der Leistungsfähigkeit TO11 im Hochwasserbemessungsfall 1
3. Nachweis der Leistungsfähigkeit TO11 im Hochwasserbemessungsfall 2
4. Außergewöhnliche Bemessungslastfälle

### Zu Punkt 1:

Das Tosbecken muss gem. [DIN 19700-11] alle Abflüsse bis zum Hochwasserbemessungsfall 1 (BHQ1) schadlos abführen können. Für diese Bemessung ist gem. dem angestrebten Steuerkonzept der maximal mögliche Stauspiegel  $Z_{H1,2} = 151,85$  m NHN, bei welchem die

Hochwasserentlastungsanlage (HWE TO14 – nicht Teil der vorliegenden 3d-Untersuchung) 410 m<sup>3</sup>/s abführt und die restlichen 157 m<sup>3</sup>/s über die 4 Wehrfelder des Abschlussbauwerkes (TO11) abgeführt werden müssen.

Steuervarianten, bei denen mit geringerem Stauziel und somit geringerem Abfluss über die HWE jedoch höhere Abflüsse über das Abschlussbauwerk (TO11) abgeführt werden müssten, werden aufgrund der höheren Unterwasserstände zwischen Abschlussbauwerk und den darauffolgenden Bahn- und Straßenbrücken nicht angestrebt. Solche Steuervarianten werden deshalb als außergewöhnlich angesehen und sind für das Tosbecken nicht bemessungsmaßgebend.

Der Unterwasserstand wird mit 146,00 m gewählt. Dies entspricht gem. der 2d-hn-Berechnung dem Unterwasserstand bei einem Abfluss von 100 m<sup>3</sup>/s über das Abschlussbauwerk und 0 m<sup>3</sup>/s über die HWE. Dieser Ansatz wird gewählt, da es aufgrund unterschiedlicher Steuervarianten über Abschlussbauwerk und HWE zu unterschiedlichen Unterwasserständen kommen kann. Mit der Annahme eines niedrigen Unterwasserstandes und damit geringem unterwasserseitigen Stützkörper im Unterwasser liegt man bei der Bemessung auf der sicheren Seite.

#### Zu Punkt 2 und 3:

Das Konzept zum Nachweis der Leistungsfähigkeit TO11 in den Hochwasserbemessungsfällen 1 und 2 und die hierbei anzusetzenden Randbedingungen sind dem Teil A, Anlage 3 zu entnehmen.

#### Zu Punkt 4

Für Risikobetrachtungen wurden die außergewöhnlichen Bemessungslastfälle (n-1)-Fall bei BHQ2 und (n-2)-Fall bei BHQ1 als Hochwassersicherheitsnachweise für den Bauzustand wenn die ersten zwei Wehrfelder bereits in Betrieb sind und die zweite Baugrube hergestellt wird.

## 5 Methodik zur Tosbeckenoptimierung

Als Grundlage für das numerische Modell dient die Entwurfsplanung für das Abschlussbauwerk für das Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt mit Stand 11.03.2024.

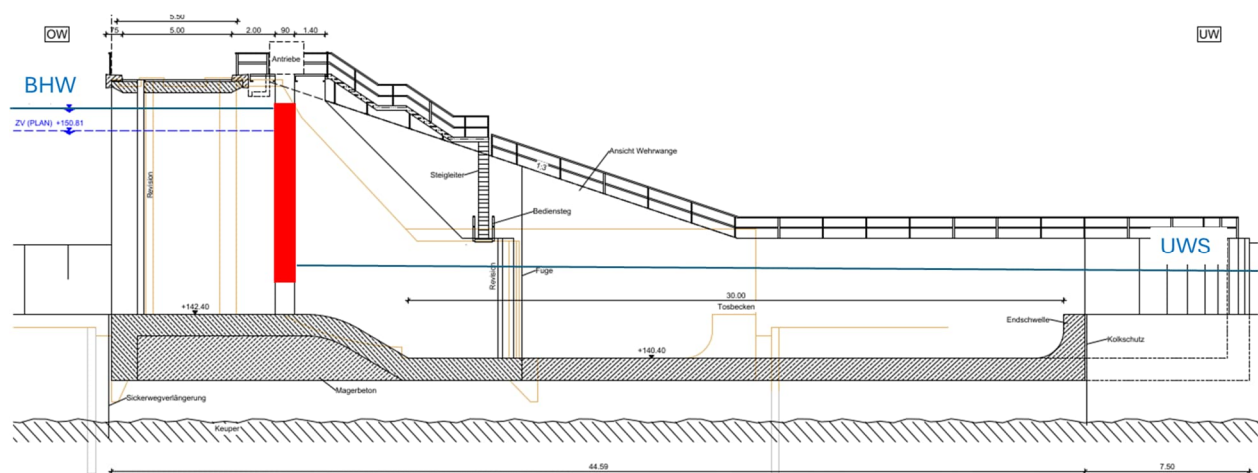


Abbildung 2 - Längsschnitt Abschlussbauwerk (Vorplanung)

Gegenüber der Geometrie der Vorplanung (siehe Abbildung 2) wurden bereits im ersten Berechnungslauf Optimierungen vorgenommen: Es wurde auf die Ausrundung am Ende der Tosbeckensohle verzichtet und eine Verkürzung des Tosbeckens von 30 auf 24 m berücksichtigt (Längenangabe von Ende Wehrausrundung bis Tosbeckenendschwelle).

Das Strömungsgeschehen eines Tosbeckens (TB) kann, wenn eine ausreichenden Fließbreite vorhanden ist, in erster Linie als zweidimensionaler Fließprozess in x-z Richtung gesehen werden. Diese Vereinfachung wurde im Folgenden als Schnittmodell bezeichnet. Der Vorteil des Schnittmodells gegenüber dem dreidimensionalen Gesamtmodell liegt in den weniger zeitintensiven Berechnungsläufen.

Am Abschlussbauwerk wurde zur Tosbeckenoptimierung in einem 1. Schritt ein Schnittmodell mit einer einheitlichen Breite von 3 m verwendet. Somit konnten mit schnellen Berechnungsläufen systematisch verschiedene Geometrieanspassungen am Tosbecken voruntersucht werden.

Im Schnittmodell wurde außerdem eine Validierung der gewählten Berechnungszellengröße vorgenommen. Diese Zellengröße wird im Anschluss im Gesamtmodell beibehalten.

Nach Fertigstellung der Berechnungen im Schnittmodell wurde die ausgewählte Geometrie am Gesamtmodell untersucht und die Energieumwandlung des Gesamtbauwerkes überprüft. Hierbei wurden auch etwaige Einflüsse aus der y-Strömungsrichtung berücksichtigt.

Die im Hochwasserbemessungsfall 1 über 3 Wehrfelder (beim Ausfall eines Wehrfeldes) á 4,00 m Breite abzuführenden 157 m³/s ergeben im 3 m breiten Schnittmodell einen erforderlichen Abfluss von 39,3 m³/s.

In folgender Tabelle sind die geometrischen Randbedingungen des Schnittmodelles zusammengestellt. Eine Anpassung einiger Parameter im Zuge der Auswertung der Berechnungen war unerlässlich. Diese werden im Folgenden im jeweiligen Abschnitt beschrieben.

Tabelle 1: Aufstellung der Ausgangsparameter am Schnittmodell für BHQ1 im (n-1)-Fall

Schnittmodell-Nr.	OW-Stand [m NHN]	UW-Stand [m NHN]	Schützöffnung [m]	TB-Länge [m]	TB-Sohlhöhe [m NHN]	TB-Endschwelle [m]	*Qges1 [m³/s]	*Q SM [m³/s]
SM 1	Z <sub>H1</sub> 151,85	146,0	f(Q SM)  220 cm 165 cm 160 cm 162 cm	24,0	140,40	2,0	157,0	39,3

\* Durchflusswert wird in der 3d-hn-Modellierung ermittelt und muss größer als der angegebene Wert sein

Zunächst wurde die Schützöffnungshöhe (1,62 m) ermittelt, welche die erforderliche spezifische Abflussleistung erzielt. Im weiteren Verlauf der 3d-hn Modellierung wurden folgende Parameter zur geometrischen Optimierung des Bauwerkes variiert:

- Tosbeckenlänge 22 m,
- Tosbeckeneintiefung 1,5 m,
- Verwendung von Störkörpern,
- 2. Reihe Störkörper.

Bereits im Schnittmodell stellte sich heraus, dass zur Stabilisierung der Energieumwandlung Störkörper erforderlich sind.

Die im Schnittmodell optimierte Geometrie wurde am Gesamtmodell überprüft.



## 6 Methodik Nachweiserbringung der Leistungsfähigkeit

Am Gesamtmodell erfolgte die Erbringung der Nachweise der Leistungsfähigkeit des Abschlussbauwerkes.

Als Randbedingung wurde hierbei genau wie im Schnittmodell der Ober- und Unterwasserstand definiert. Nach dem Erreichen eines stationären Abflussgeschehens wurde der Durchfluss ausgewertet, welcher über die Anlage bei den angegebenen Randbedingungen abgeführt werden kann.

Im Folgenden sind die geplanten Rechenläufe am Gesamtmodell mit den zugehörigen Randbedingungen zusammengefasst:

Tabelle 2 - Aufstellung der Lastfälle zur Erbringung der Nachweise der Leistungsfähigkeit

LF am Gesamtmodell	OW-Stand [m NHN]	UW [m NHN]	Schützstellung/-öffnung	Beaufschlagte Wehrfelder	Erf. gesamte Durchflussleistung [m³/s]	Bemerkung
GM 0 a Tosbeckenbemessung	$Z_{H1.2}=151,85$	146,0	RB aus Ergebnis SM	(n-1)	157,0	Nachweis Energieumwandlung TB - inneres WF geschlossen
GM 0 b Tosbeckenbemessung	$Z_{H1.2}=151,85$	146,0	RB aus Ergebnis SM	(n-1)	157,0	Nachweis Energieumwandlung TB - äußeres WF geschlossen
GM 1 Hochwasserbemessungsfall 2	$Z_{H1.2}=151,85$	147,70	maximal 4,89 m	(n)	478,0	Nachweis Leistungsfähigkeit für BHQ2
GM 2 a Hochwasserbemessungsfall 1	$Z_{H1.2}=151,85$	147,45	maximal 4,89 m	(n-1)	157,0	Nachweis Leistungsfähigkeit für BHQ1 im (n-1) Fall – inneres WF geschlossen
GM 2 b Hochwasserbemessungsfall 1	$Z_{H1.2}=151,85$	147,45	maximal 4,89 m	(n-1)	157,0	Nachweis Leistungsfähigkeit für BHQ1 im (n-1) Fall - äußeres WF geschlossen

## 7 Berechnungen mit dem Schnittmodell

### 7.1 Ausgangsgeometrie

Im Folgenden werden aus 27 Schnittmodellen beispielhaft die 2 maßgebenden erläutert und verglichen: das Schnittmodell SM 03 mit 24 m TB-Länge und 2 m Eintiefung sowie 1,65 m Schützöffnungshöhe und das Schnittmodell SM 30 mit 24 m TB-Länge, 2 m Eintiefung sowie 1,62 m Öffnungshöhe mit der Ergänzung von 2 Störkörpern.

Für die Schnittmodelle wurden 4 bzw. 6 Komponenten definiert:

- Oberwassersohle mit einer absoluten Rauheit von 8 cm (SM 03, SM 30)

- Wehrsohle mit angeschlossenen Tosbecken und Tosbeckenendschwelle (Rauheit 2 cm) (SM 03, SM 30)
- Unterwassersohle mit einer absoluten Rauheit von 8 cm (SM 03, SM 30)
- Verschluss mit einer Öffnungshöhe von 1,65 m bzw. 1,62 m (Rauheit 1 cm) (SM 03, SM 30)
- 2 Störkörper der Abmessungen  $B \cdot L \cdot H = 0,75 \cdot 1,5 \cdot 1,6$  m (Rauheit 1 cm) (nur SM 30)

In der folgenden Abbildung ist die aus Flow3D entnommene Geometrie für die Modelle SM 03 und SM 30 dargestellt.

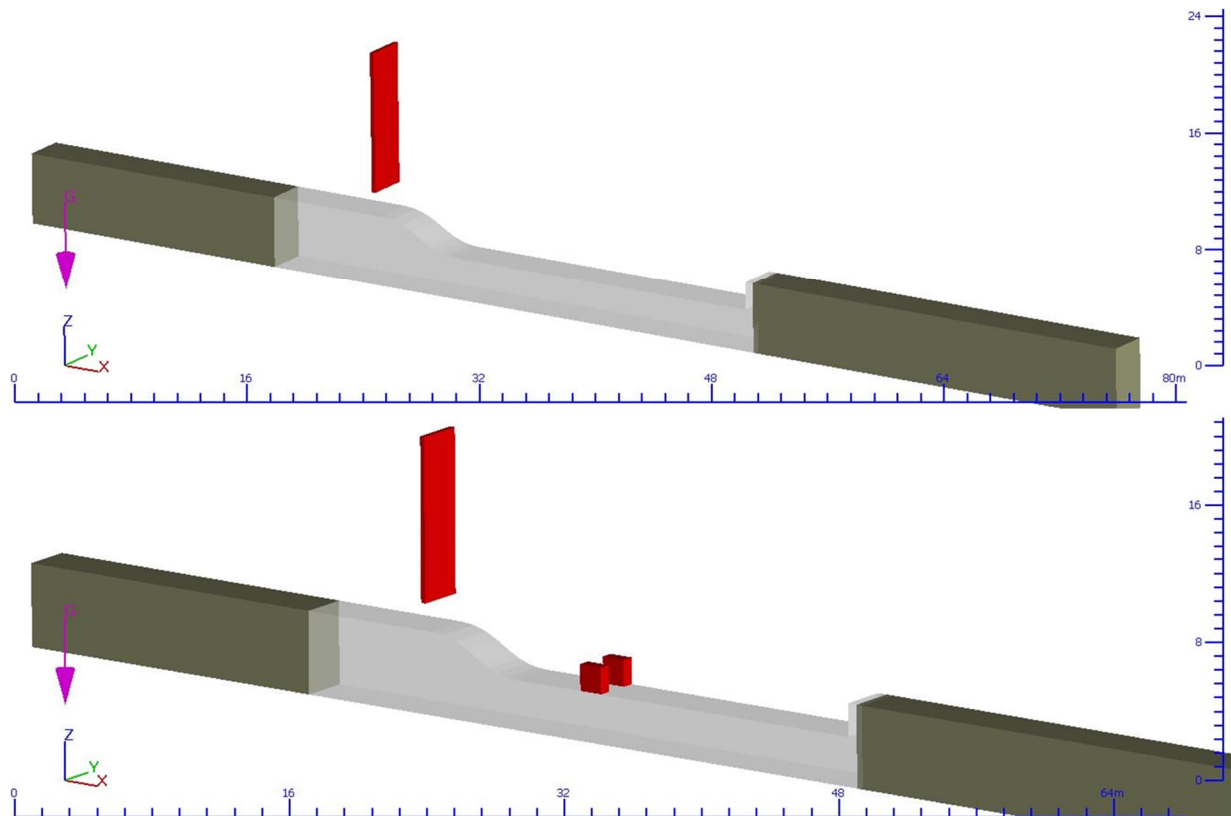


Abbildung 3 – Modellgeometrie SM 03 (oben) und SM 30 (unten) mit 24 m Tosbeckenlänge und 2 m Eintiefung.

## 7.2 Berechnungsnetz

Zur Lösung des Schnittmodells wurde ein einziger rechteckiger Netzblock gewählt (zur Validierung siehe Kapitel 8). Es wurde eine gleichmäßige Netzgröße der Abmessungen  $15 \cdot 15 \cdot 15$  cm gewählt. Die Gesamtanzahl an Zellen beläuft sich auf ca. 1 Mio. Ein Teil der Zellen im Unterwasser wurde als nicht durchströmbar definiert, um die Berechnung weiter zu beschleunigen. Die für die Berechnung aktiven Zellen belaufen sich auf ca. 520.000.

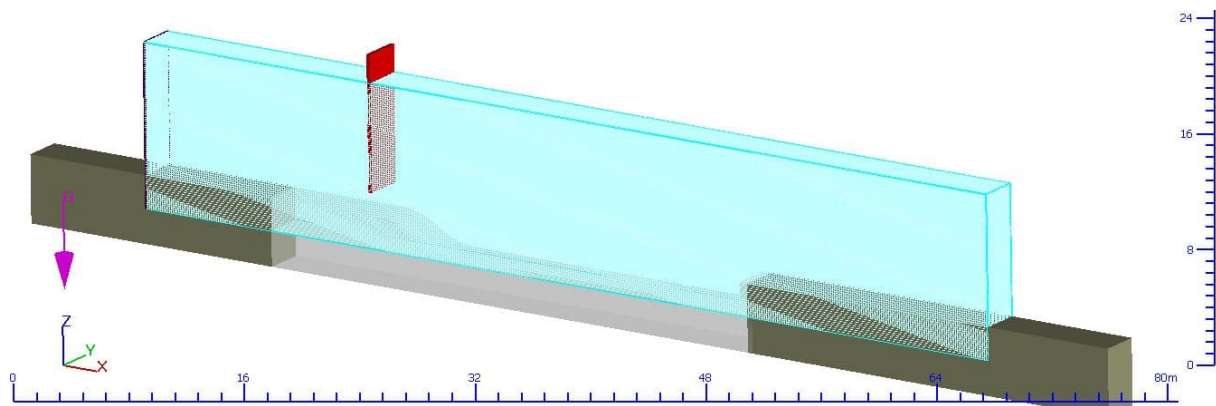


Abbildung 4 – Berechnungsnetz zur Lösung der Fließgleichungen.

## 7.3 Randbedingungen

Zum Lösen der Fließgleichungen im Modell benötigt das System Randbedingungen (RB) am Netzrand, welche vorab definiert werden. Im Oberwasser wurde eine Druckhöhe des anstehenden Wasserkörpers von 151,85 m definiert. Dem Unterwasser wurde eine Druckhöhe von 146,0 m zugewiesen (vgl. auch Tabelle 1). Die RB Druckhöhe ermöglicht sowohl Zu- wie auch Ausströmen aus dem Modell; die Strömungsrichtung ergibt sich dabei aus dem Potentialunterschied beider Randbedingungen. Der linke und rechte Netzrand wurden als Symmetrieebene definiert. Die untere Netzebene wurde als Wand (undurchlässig) definiert und dem oberen Netzrand wurde eine Druckhöhe von 0 zugewiesen.

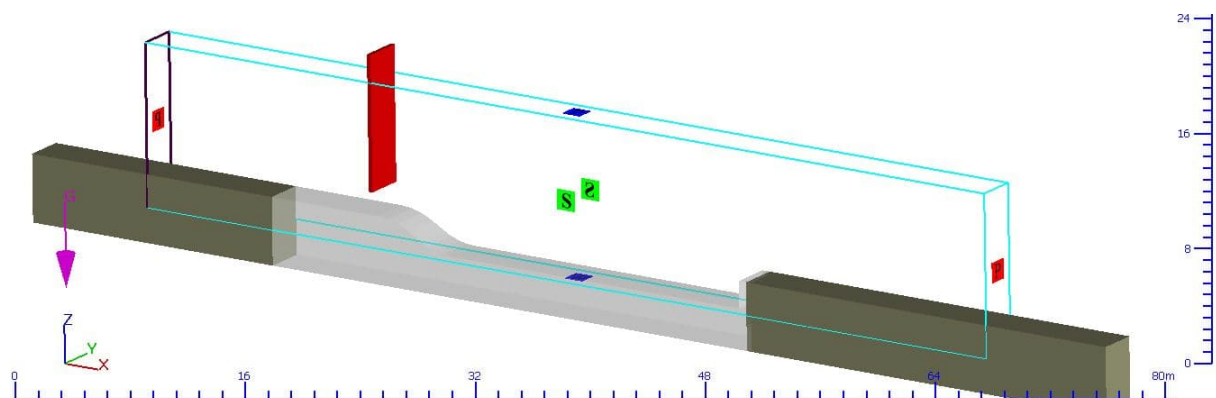


Abbildung 5 – Randbedingungen am Berechnungsmodell.

Als Turbulenzmodell wurde das von FLOW-3D empfohlene Modell RNG - renormalized group model verwendet.

## 7.4 Ergebnisse

Die iterative Suche nach der Öffnungshöhe der Wehrschützes hat ergeben, dass bei ca. 1,62 der geforderte spezifische Durchfluss (für eine 3 m Breite Wehrscheibe) von 39,5 m/s abgeführt werden kann.

Für das Schnittmodell SM 03 ist klar zu erkennen, dass ein konzentrierter Abflussstrahl das Tosbecken an der Sohle durchquert und die Endschwelle so gut wie ungebremst passiert. Erst nach Überschreitung der Endschwelle und erneuter Umlenkung des Sohlstrahles baut sich die Geschwindigkeit allmählich ab. Die Sohlgeschwindigkeit am Übergang vom Bauwerk zum Gewässerbett werden im Bereich zwischen 5 -6 m/s abgeschätzt, je nach Tiefenlage.

Diese Fließcharakteristik wurde auch bei einem 30 m langen Tosbecken vorgefunden.

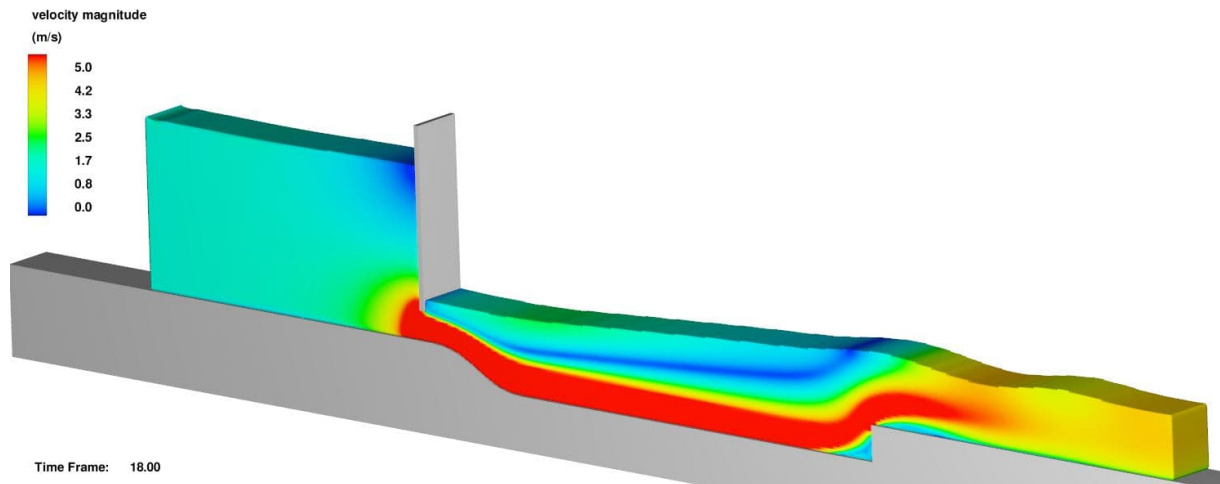


Abbildung 6 – Geschwindigkeitsfeld Schnittmodell SM 03.

Durch das Einsetzen von Störkörpern im Schnittmodell wurde erreicht, dass die Energieumwandlung ab dem Aufprall des Abflussstrahles auf den Störkörper initiiert und deutlich verstärkt wird. Nach dem Passieren der Störkörperebene vergleichmäßigt sich die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich von ca. 3-4 m/s. Ab der Tosbeckenendschwelle bestehen Geschwindigkeiten zwischen 4,0 und 4,5 m/s über den gesamten Fließquerschnitt verteilt.

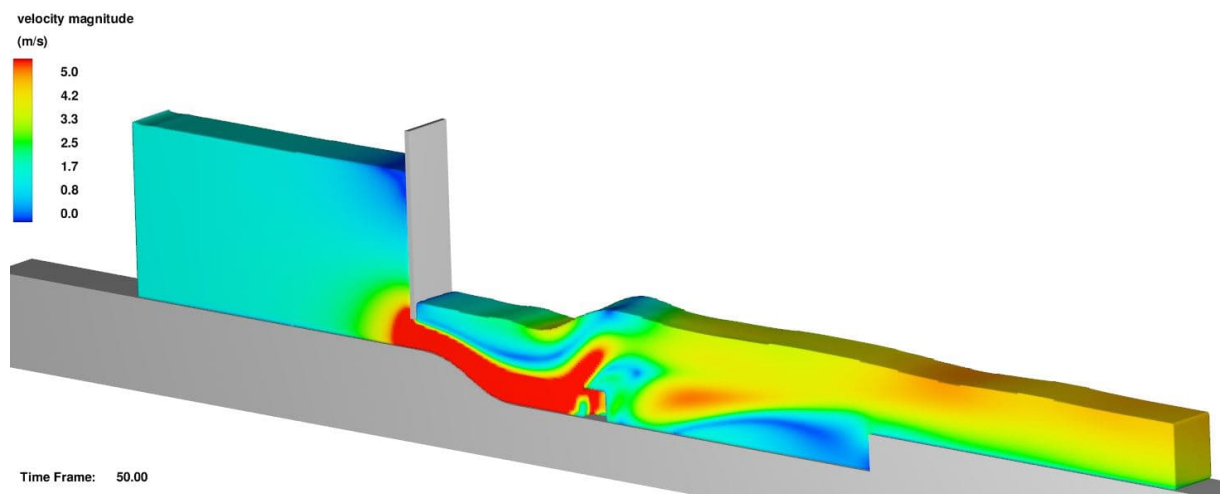


Abbildung 7 – Geschwindigkeitsfeld Schnittmodell SM 03

## 8 Modellvalidierung

Die Modellvalidierung erfolgte mit Hilfe einer Netzunabhängigkeitsstudie. Für unterschiedliche Berechnungsmodelle mit gleicher Geometrie (24 m TB-Länge und 2,0 m Eintiefung sowie Störkörper der Abmessung  $B \cdot L \cdot H = 0,75 \cdot 1,5 \cdot 1,4$ ) wurde die Zellengröße variiert, um nach etwaigen Abweichungen zu suchen. Bei Zellengrößen von  $20 \cdot 20 \cdot 20$  cm;  $15 \cdot 15 \cdot 15$  cm;  $10 \cdot 10 \cdot 10$  cm sowie  $8 \cdot 8 \cdot 8$  cm lagen die Abweichungen zwischen den ermittelten Durchflüssen bei ca. 3%. Die gewählte Zellengröße von  $15 \cdot 15 \cdot 15$  cm wurde somit bestätigt und wurde auch für das Gesamtmodell beibehalten.



## 9 Berechnungen mit dem Gesamtmodell (GM)

### 9.1 Ausgangsgeometrie

Zur geometrischen Modellierung des Gesamtsystems wurde das vorhandene 3d Modell umgearbeitet und in verschiedene Einzelkomponenten unterteilt. Es wurden folgende Komponenten benötigt:

- Wehrsohle mit Wehrrücken
- Wehr
- Tosbecken
- Tosbeckenendschwelle
- Zwischenpfeiler
- Flügelwände
- Verschlüsse 1, 2, 3, 4
- Störkörper (verschiedene Anordnungen und Größen)
- Verzahnte Endschwelle
- 2 seitliche Störkörper an den Rändern der Endschwelle
- Gewässersohle mit Böschungen im Oberwasser
- Gelände im Oberwasser
- Gewässersohle mit Böschungen im Unterwasser
- Vorland im Unterwasser

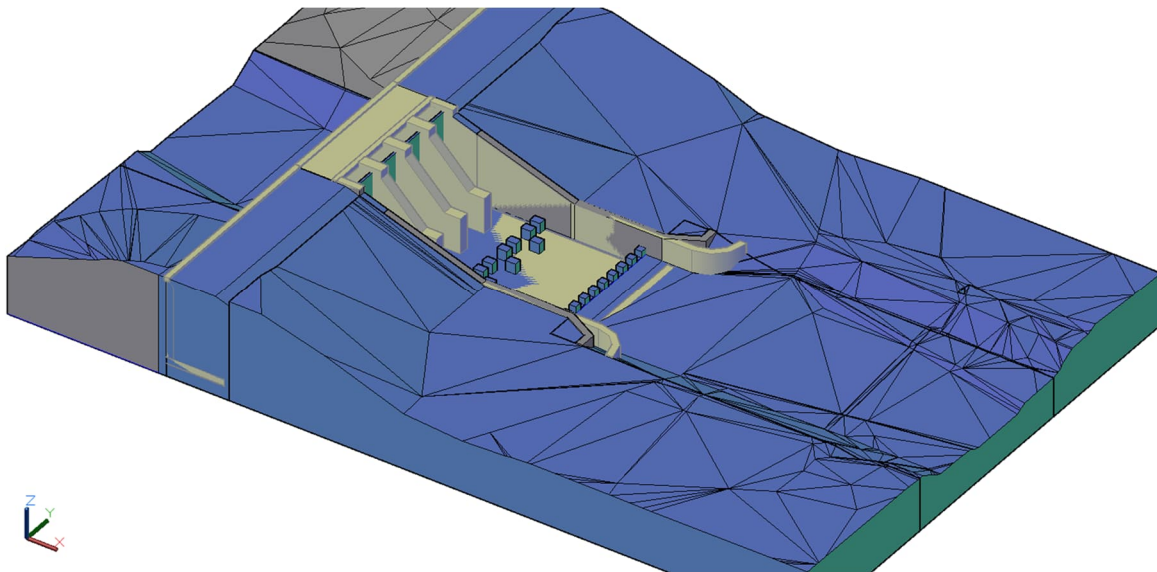


Abbildung 8 – Auszug aller in Autocad 3d modellierten 3d Komponenten

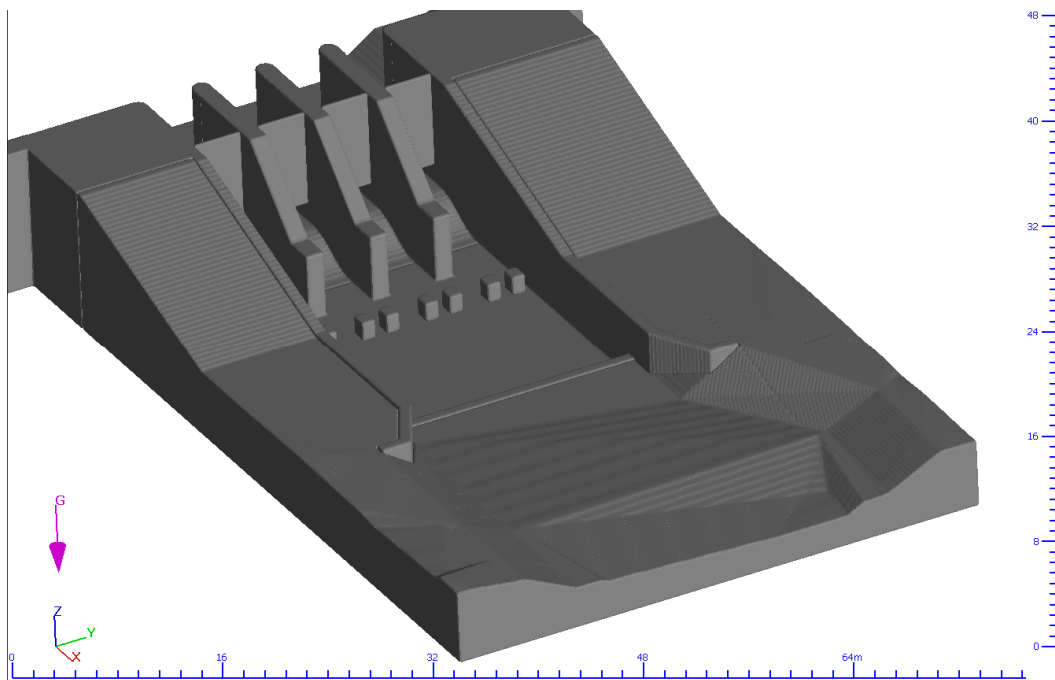


Abbildung 9 – Darstellung einer entsprechend dem Berechnungsnetz diskretisierten Geometrie

Allen Betonbauwerken wurde eine absolute Rauheit von 20 mm zugewiesen, um auf der sicheren Seite liegend etwaige Auswaschungen und Freilegungen des Betongefüges zu berücksichtigen. Eine Ausnahme hierzu sind die Störkörper, welche mit einer Rauheit von 10 mm definiert wurden. Die Verschlüsse wurden ebenfalls mit 10 mm Rauheit belegt.

Die Flusssohle mit Böschungen wurde mit 150 mm Rauheit infolge der Sicherung mit Wasserbausteinen und die Vorländer wurden mit 50 mm Rauheit belegt.

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass erfahrungsgemäß der Einfluss der Rauheiten bei 3d-Berechnungen, bei denen sehr große Fließtiefen vorhanden sind, im Gegensatz zur 2d-Modellierung eine untergeordnete Rolle spielt.

## 9.2 Berechnungsnetz

Für das Gesamtmodell wurden 3 orthogonale rechteckige Netzblöcke angeordnet. Der mittlere größte Netzblock (Block 1 - grün) deckt zum Großteil die Wehrfelder mit den Verschlüssen sowie das Tosbecken ab. Im Oberwasser ist ein breiteres Netz (Block 2 - türkis) zur Abdeckung und Ermöglichung des

seitlichen Zuströmens angeordnet worden. Im Unterwasser wurde Block 3 mit niedrigerer Höhe angeordnet. Die Unterkante aller Netzblöcke liegt bei 140 m NHN.

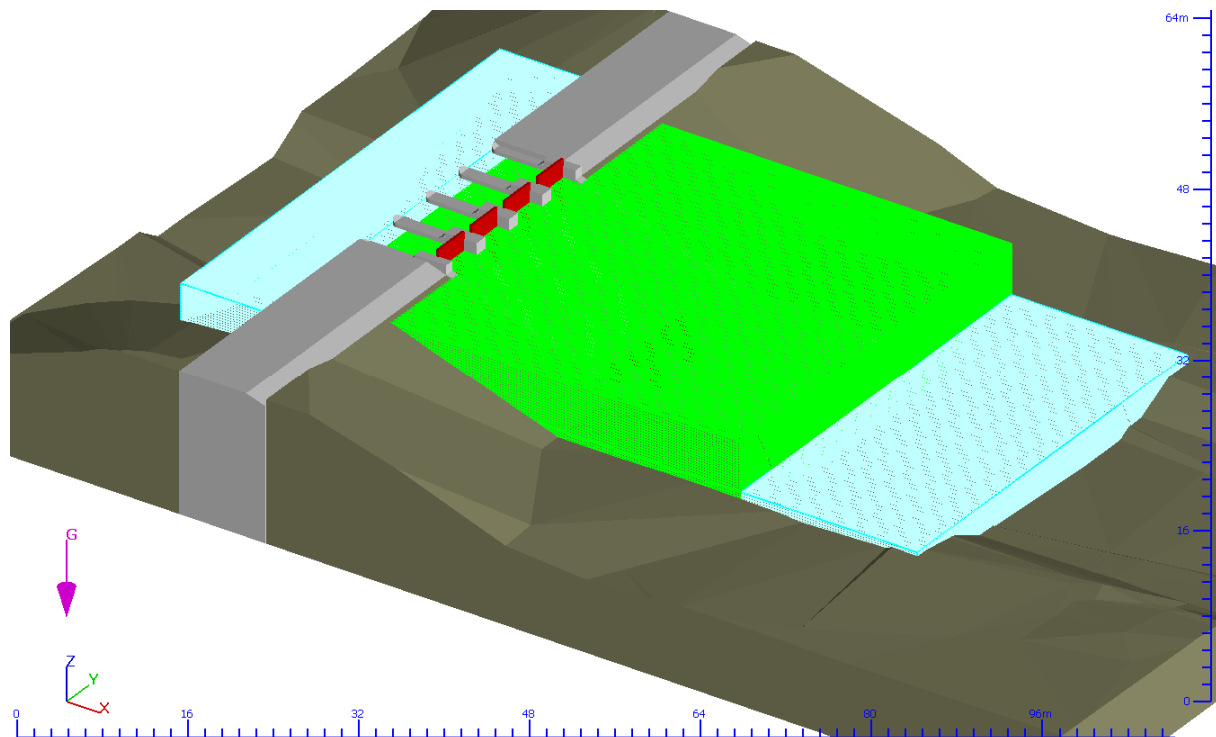


Abbildung 10 – Berechnungsnetz für das Gesamtmodell

Die unter Abschnitt 8 validierte Zellengröße wurde uniform auf alle 3 Blöcke angewendet. Beim Netzblock 1 und 2 wurde eine zusätzliche xy-Kontrollebene auf Höhe der Oberkante des Netzblockes 3 eingefügt, um eine Übereinstimmung der z-Lagen zu erzielen. Dies verhindert, dass eine weitere Interpolation am Übergang zwischen zwei Netzblöcken erforderlich wird. Im Netzblock 1 wurde zudem Zellen im Unterwasser des Bauwerkes in Bereichen, wo kein Fließvorgang zu erwarten ist für die Berechnung entfernt.

Die so zusammengestellten Netzblöcke weisen insgesamt 31,8 Millionen Zellen auf. Durch die Belegung des Bauwerkes mit Gelände sowie durch die obengenannte Zellenentfernung bleiben ca. 4,5 Mio. aktive Zellen übrig.

Für einzelne Modelle wurden geringfügige Veränderungen im Modellnetz vorgenommen auf die hier nicht eingegangen wird.

### 9.3 Randbedingungen

Ähnlich wie beim Schnittmodell wurden für die ober- und unterwasserseitigen Randbedingungen Druckhöhen (P in folgender Abbildung) in Abhängigkeit vom Lastfall eingestellt. Im Gesamtmodell wurden jedoch auch die seitlichen Blockebenen mit den Wasserdruckhöhen belegt, um eine seitliche Zu-/Ausströmung zu ermöglichen. Die Unterkante aller Netzblöcke wurde als Wand (W) definiert und die Oberkante als Druckrandbedingung mit Wert 0 in Übereinstimmung mit dem Schnittmodell.

Die Netzblockverbindungsebenen (G) werden vom System automatisch erkannt und als Symmetriestandbedingung beim Berechnungsbeginn definiert.

Die verwendeten Wasserdruckhöhen sind in folgender Tabelle (Tabelle 3) zusammengestellt:

Tabelle 3: Aufstellung der Ausgangsparameter am Gesamtmodell für BHQ1 im (n-1)-Fall

Lastfall	OW-Stand [m NHN]	UW-Stand [m NHN]	Beschreibung
BHQ1	Z <sub>H1</sub> 151,85	146,0	Tosbeckenbemessung
BHQ1	Z <sub>H1</sub> 151,85	147,45	Nachweis Leistungsfähigkeit
BHQ2	Z <sub>H1</sub> 151,85	147,7	Nachweis Leistungsfähigkeit

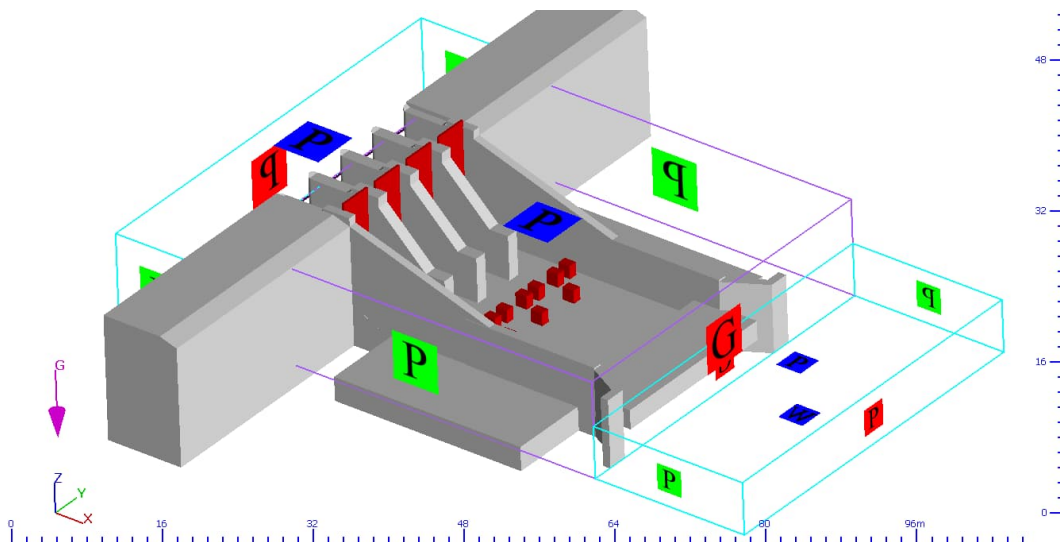


Abbildung 11 – Randbedingungen am Gesamtmodell

Die hier beschriebenen Randbedingungen wurden für alle Untersuchungen am Gesamtmodell belasten.

## 9.4 Ergebnisse

### 9.4.1 BHQ1 – Tosbeckenbemessung

#### Geometrische Optimierung am Gesamtmodell

Die Tosbeckenbemessung erfolgt im Lastfall BHQ1 mit einem niedrigerem Unterwasserstand von 146,0 m NHN (vgl. Abschnitt 4 Punkt 1.), um den ungünstigsten Fall für die Energieumwandlung abzubilden.

In der folgenden Abbildung sind die Geometrien zu den untersuchten Einbauteilen zur Energieumwandlung dargestellt. Für alle Varianten wurde ein 24,0 m langes Tosbecken mit 2,0 m Eintiefung und 1,62 m Schützöffnung zugrunde gelegt. Es wurden grundsätzlich folgende Varianten untersucht:

1. die Anordnung von Störkörpern (SK) im Drittelpunkt des Tosbeckens bei einem Verbaugrad von ca. 50 %.
2. Die Ergänzung mit einer 2. SK-Zeile im Strömungsschatten der Zwischenpfeiler.
3. Die Störkörperanordnung aus Punkt 1. und 2. in Kombination mit einer verzahnten Endschwelle.
4. Die Anordnung von jeweils einem Randstein auf der Endschwelle, um einer bei der SK-Anordnung unter Punkt 1 entlang der Flügelwände entstehenden Kurzschlussströmung entgegenzuwirken.



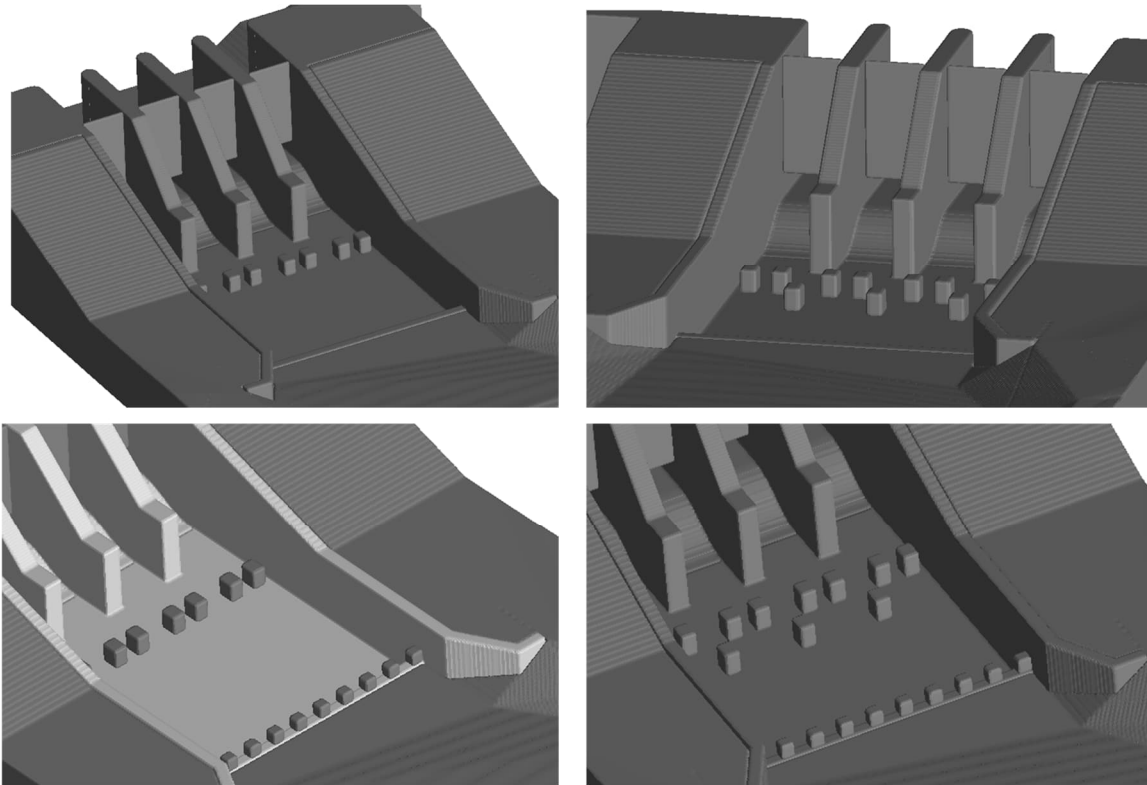


Abbildung 12 – Untersuchte Hauptgeometrien: 1 Zeile Störkörper (oben links), 2 Zeilen Störkörper (oben rechts), 1 bzw. 2 Zeilen Störkörper mit verzahnter Endschwelle (unten links bzw. rechts)

Für den Lastfall BHQ1 werden im Folgenden die Ergebnisse der 1. und 2. Störkörperanordnung wiedergegeben. Die Anordnungen 3 und 4 führten nicht zu akzeptablen Ergebnissen und werden hier nicht ausgewertet.

Eine detailliertere Auswertung aller Lastfälle am Gesamtmodell erfolgt in der Anlage 1.

Bei beiden Modellen werden beim angegebenen Öffnungsgrad des Wehrverschlusses ca. 210 m<sup>3</sup>/s abgeführt, was den geforderten Durchfluss für BHQ1 von 157 m<sup>3</sup>/s deutlich übersteigt.

Vor allem in Abbildung 14 ist ersichtlich, wie die 1. Reihe Störkörper die Strömung zwischen den Störkörpern bündelt und diese als konzentrierten Strahl durch das Tosbecken ableitet. Durch die Anordnung der 3 Störkörper in der 2. Reihe beim GM 111 (Modellnummerierung siehe Tabelle 5) werden diese Strahlen unterbunden und es tritt eine gleichmäßige Durchmischung im Tosbecken ein.

Die Geschwindigkeiten in Sohlhöhe an der Tosbeckenendschwelle belaufen sich auf ca. 2,5-3,5 m/s mit Strahlbündel von 5 m/s für das einreihige Modell und auf 2,5-3,5 m/s ohne wesentliche Strahlbündel mit der zweireihigen Störkörperanordnung.

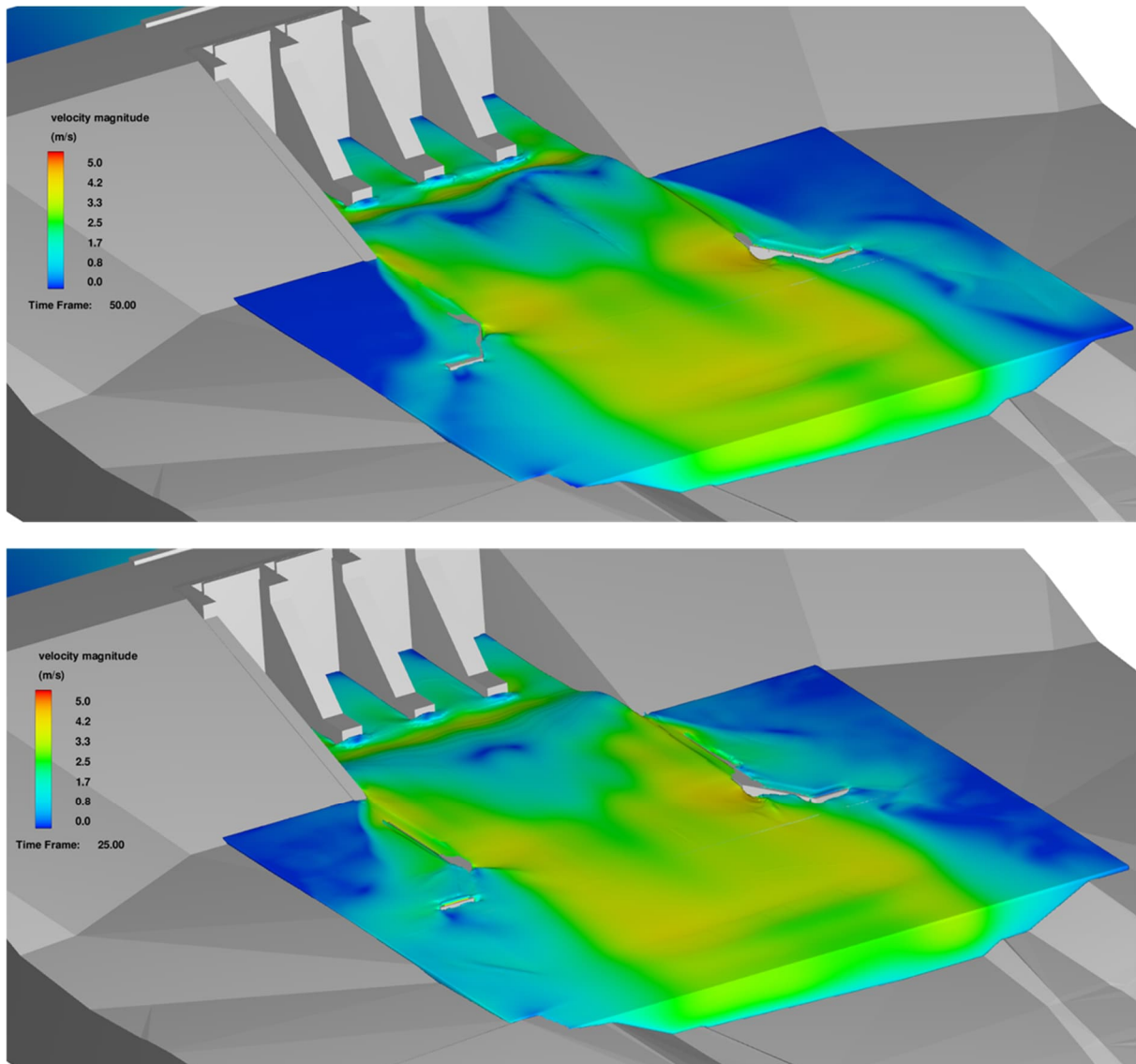


Abbildung 13 – Fließgeschwindigkeiten bei einreihiger (GM 110 - oben) bzw. zweireihiger (GM 111 - unten) Störkörperanordnung (3d-Ansicht)

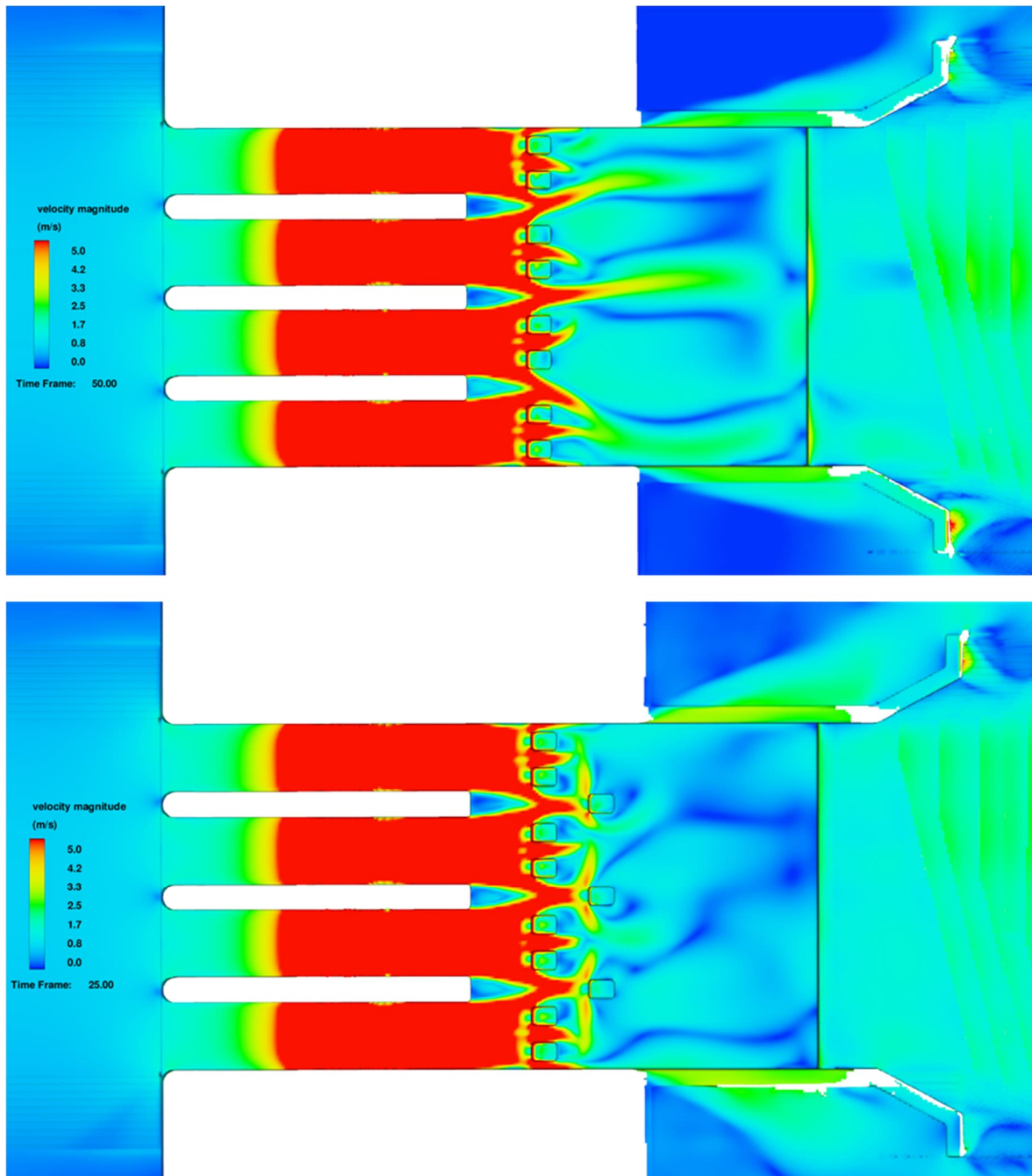


Abbildung 14 – Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten – Darstellung Sohlgeschwindigkeit bei einreihiger (GM 110 - oben) bzw. zweireihiger (GM 111 - unten) Störkörperanordnung

## BHQ1 - Reduzierung der Tosbeckenlänge

In einem weiteren Schritt wurde unter Beibehaltung der Parameter vom Modell 111 (im vorigen Abschnitt einsehbar) die Tosbeckenlänge auf 22 m reduziert. In den folgenden Abbildungen sind die wesentlichen Ergebnisse dargestellt. Eine detailliertere Auswertung ist in der Anlage 1 zu finden.

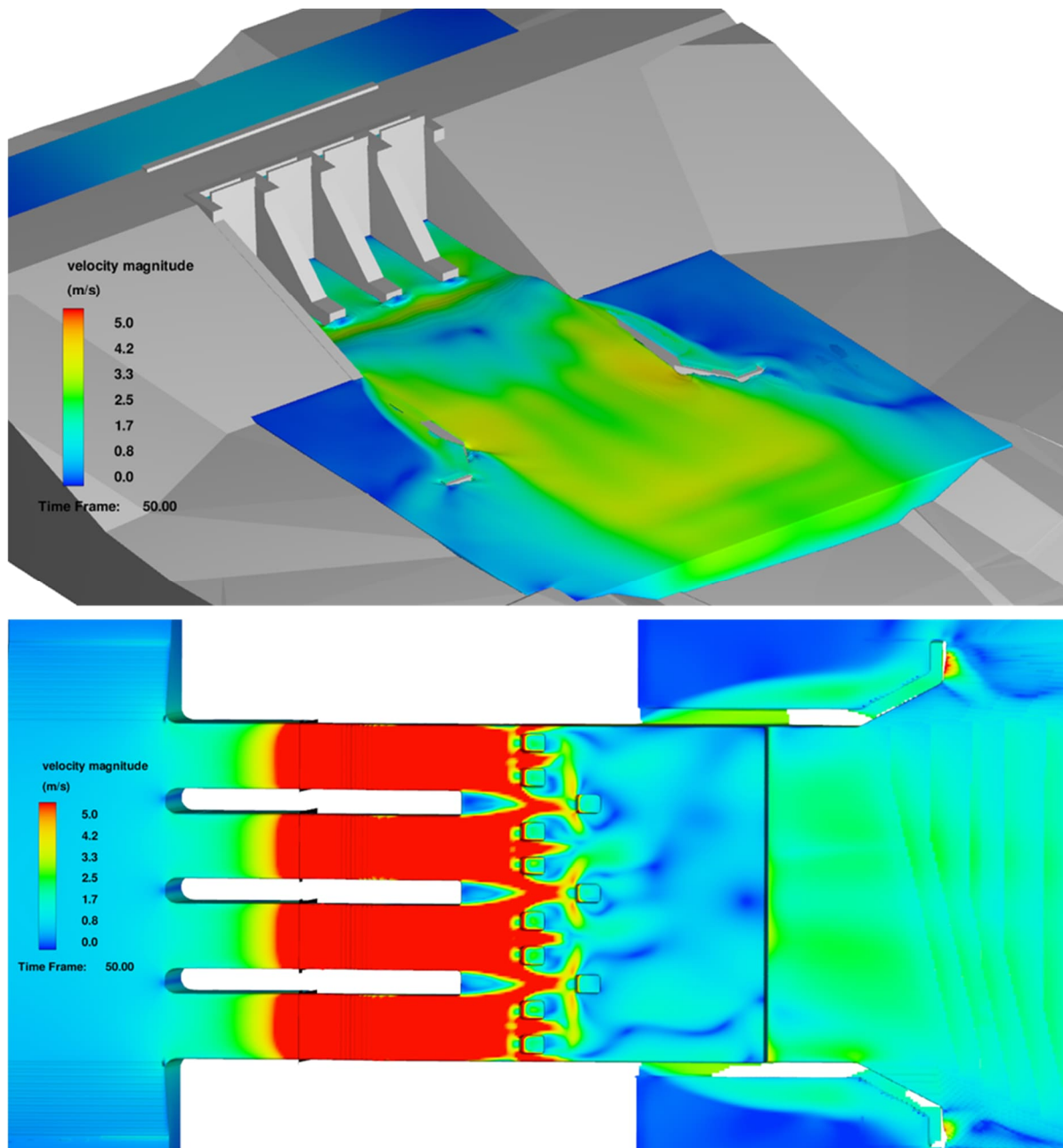


Abbildung 15 – Zweireihige (GM 115) Störkörper bei einer 22 m Tosbeckenlänge - Fließgeschwindigkeiten in der 3d-Ansicht und als Ansicht von unten

Bei Geschwindigkeiten im Bereich der Tosbeckenendschwelle zwischen 2,5 und 3,5 m/s kann festgehalten werden, dass diese Tosbeckengeometrie ausreichend wäre, um eine sichere und vollständige Energieumwandlung im Tosbecken zu gewährleisten. Um etwaige Restsicherheiten und Zukunftsreserven beizubehalten wird das, Tosbeckenlänge dennoch mit einer Länge von 24 m ausgeführt

## BHQ1 - Erhöhung Flügelwände

Um das seitliche Überlaufen der Flügelwände und die damit verbundene mögliche Erosion des anstehenden Geländes zu vermeiden, wurde ein Modell mit um 20 cm erhöhten Flügelwände konzipiert. In folgender Abbildung 16 ist das Geschwindigkeitsfeld als 3d Ansicht enthalten.



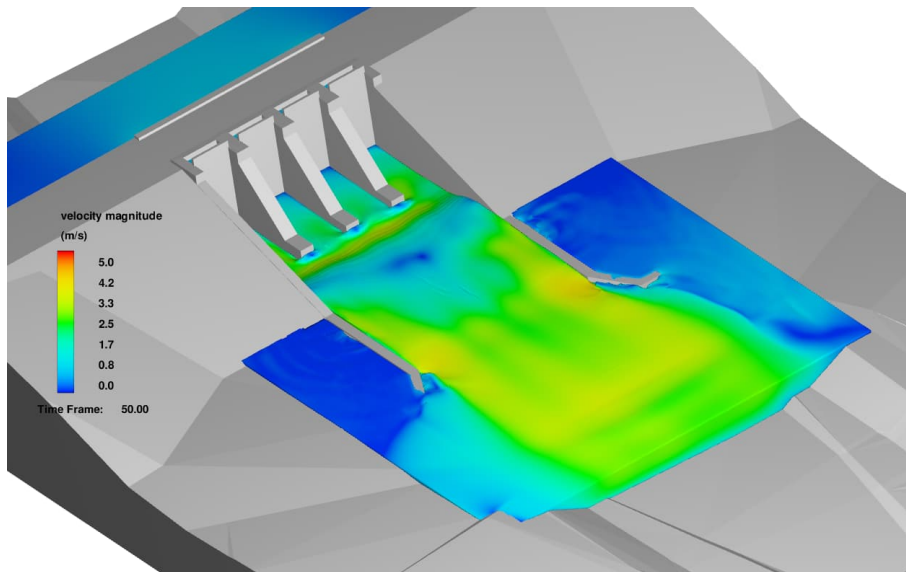


Abbildung 16 – Erhöhung der Flügelwände um 20 cm (GM 117) – Geschwindigkeiten als 3d-Ansicht

Im Vergleich zu Abbildung 15 ist erkennbar, dass durch die Erhöhung von lediglich 20 cm kein Wasser seitlich über die Flügelwände läuft.

## BHQ1 – Ermittlung Strömungskräfte

Zur Nachweisführung in der Tragwerksplanung werden die Kräfte, welche vom strömenden Wasser an das Bauwerk übertragen werden, benötigt, um die Bauwerksbauteile zu bemessen. Hierfür wurde ein Modell erstellt, bei dem für jede erfragte Einwirkung eine gesonderte Komponente definiert wurde. Als Randbedingungen wurde das BHQ1 bei einem Unterwasser von 146,00 m NHN modelliert. Die Sohleintiefung beträgt 2 m und die Tosbeckenlänge 24 m. Die Öffnungshöhe aller Verschlüsse beträgt 1,62 m.

Es wurden folgende Komponenten definiert:

- Störkörper 1 bis 8 einzeln
- Störkörper 9+10+11 als gesammelte Komponente
- Tosbeckenendschwelle
- Wehrverschluss 2

Die Strömung wurde für 10 Sekunden berechnet und im Anschluss wurde der maximale Wert der jeweiligen Belastung ausgelesen.

In Abbildung 17 ist beispielhaft die kombinierte Kraft aus Druckkraft und Schubspannung auf den Störkörper Nummer 2 in x und y Richtung dargestellt. Die X-Richtung ist vom OW zum UW. Die Y-Achse ist quer zur Hauptströmung. Dabei ist der Unterschied zwischen x und y um einen Faktor 10 gegeben. Die Kraft in z-Richtung ist vernachlässigbar, da diese lediglich aus der Schubspannungskraft zustande kommt.

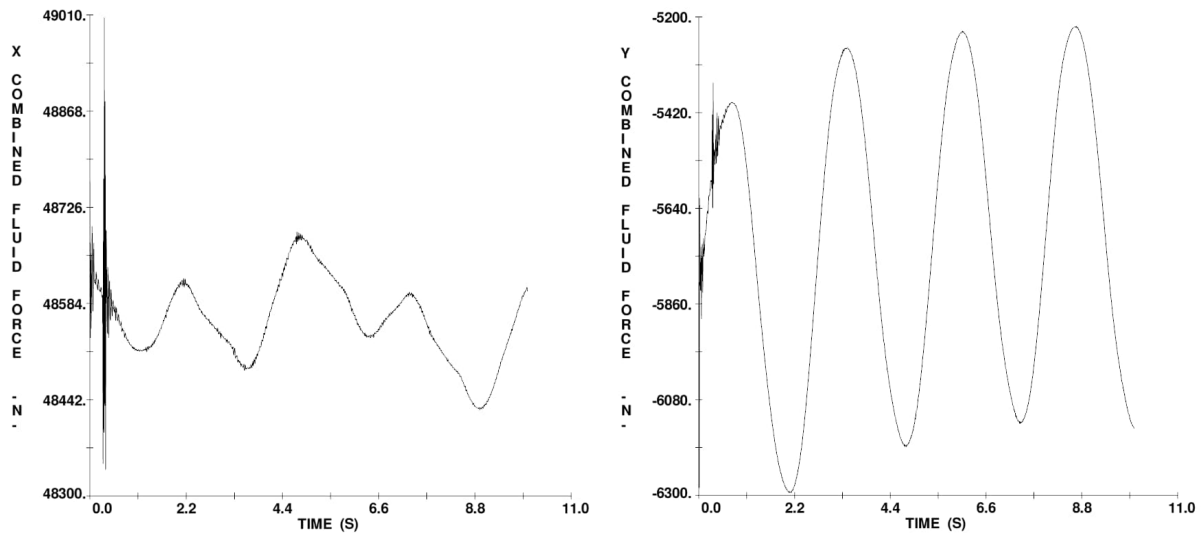


Abbildung 17– BHQ1 (GM 202) – Kraft auf SK 2 in x- (links) und y- (rechts) Richtung

Die Pulsation kurz nach dem 0 Zeitpunkt ist lediglich ein numerisches Phänomen infolge des Model-  
lanlaufes und kann ausgeklammert werden.

In folgender Tabelle werden die Kräfte für die obengenannten Komponenten zusammengefasst. Die  
Kräfte in y Richtung wirken für den ausgewählten Störkörper nur in einer Richtung; hier ist jedoch da-  
von auszugehen, dass sie z.B. bei einer asymmetrischen Beaufschlagung auch in der Gegenrichtung  
wirken können. Es ist somit drauf zu achten, dass die seitliche Anschlussbewehrung der Störkörper  
auf beiden Seiten gleich ausgeführt wird. Die hervorgerufenen Zugkräfte in y-Richtung werden i. d.  
Regel bereits über die Konstruktionsbewehrung vollständig abgetragen.

Tabelle 4 Zusammenstellung der Einwirkungen

Komponente	*X kombiniert [kN]	*Y kombiniert [kN]	*Z kombiniert [N]
SK 1	49,9	-1,0	(-0,001)
SK 2	48,7	-6,3	(-0,001)
SK 3	47,7	-6,5	(-0,001)
SK 4	48,4	-6,1	(-0,001)
SK 5	57,0	-3,6	(-0,001)
SK 6	55,4	-10,9	(-0,001)
SK 7	55,6	-2,2	(-0,001)
SK 8	55,0	-4,8	(-0,001)
SK 9+10+11	63,2	(10,7)	(-0,001)
Tosbeckenend- schwelle	1749,3	12,4	(-0,001)
Verschluss 2	1076,7	13,7	(-0,001)

\*X-Koordinate in Fließrichtung, Y-Koordinate quer zur Fließrichtung (vgl. Abbildung 11)

Zur Bemessung der Störkörper wird empfohlen für die 1. Reihe eine Belastung in x Richtung von  
60 kN anzusetzen. Die Ausführung der Störkörper der zweiten Reihe soll identisch mit der ersten erfol-  
gen, um Fehler in der Bauausführung auszuschließen. Die Belastung in y-Richtung variiert stark, ist  
jedoch viel kleiner als die in x Richtung. Hier wird empfohlen eine Belastung von 15 kN je Störkörper  
für jede Richtung anzusetzen.

## 9.4.2 Nachweis Leistungsfähigkeit

### BHQ1 Lastfall (n-1)

Wie im Nachweiskonzept erläutert, wurde der (n-1)-Fall für BHQ1 beim Ausfall eines äußeren und beim Ausfall eines inneren Wehrfeldes untersucht.

Die Strömungsfelder sind in den folgenden zwei Abbildungen enthalten.

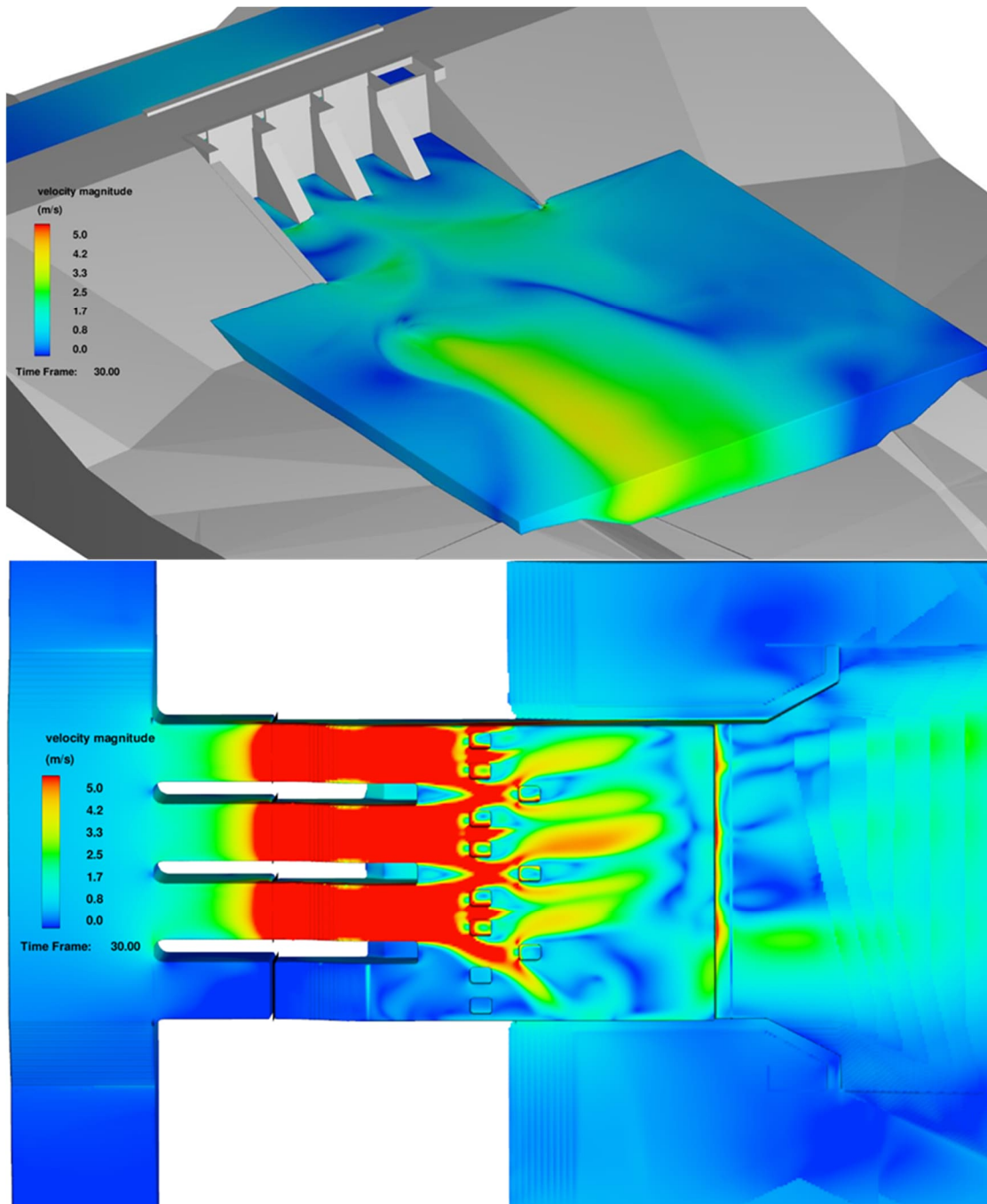


Abbildung 18 – Ausfall eines äußeren Verschlusses bei BHQ1 (GM 123b) – Geschwindigkeiten als 3d-Ansicht und Ansicht von unten

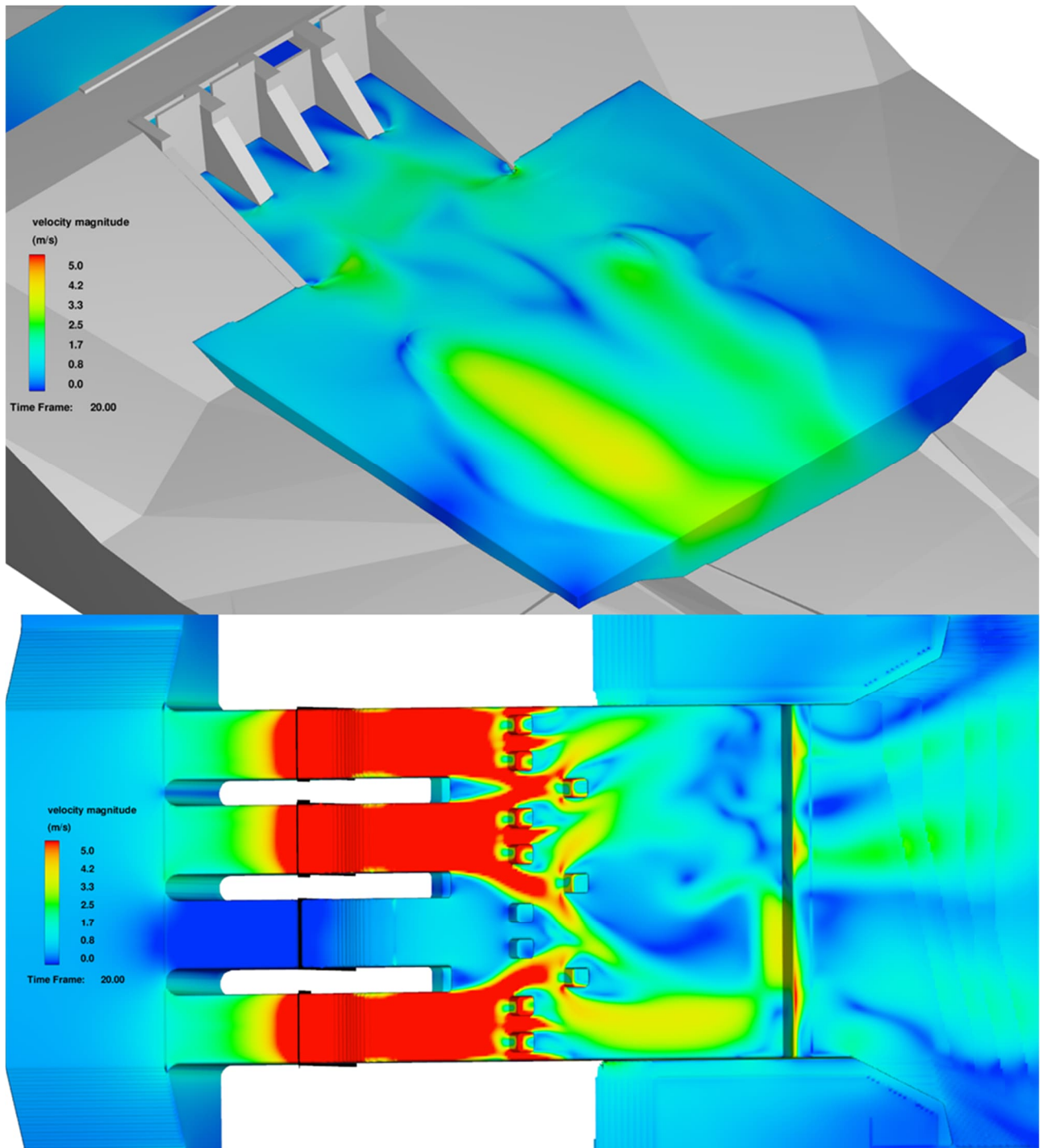


Abbildung 19 – Ausfall eines inneren Verschlusses bei BHQ1 (GM 124b) – Geschwindigkeiten als 3d-Ansicht und Ansicht von unten

Zum Abführen des geforderten Abflusses für BHQ1 von  $157 \text{ m}^3/\text{s}$  über drei Wehrfelder müssen alle drei funktionsfähige Verschlüsse  $2,00 \text{ m}$  gezogen werden. Bei dieser Öffnungshöhe werden ca.  $162 \text{ m}^3/\text{s}$  beim verschlossenen äußeren Segment bzw.  $165 \text{ m}^3/\text{s}$  Durchfluss vom Programm ermittelt (vgl. auch Zusammenstellung in der Tabelle 5).

**Die Leistungsfähigkeit der Anlage bei BHQ1 Lastfall (n-1) ist somit in Hinblick auf eine maximal möglichen Öffnungshöhe der Verschlüsse von  $4,89 \text{ m}$  weitestgehend gegeben.**

Anhand des Strömungsbildes ist ersichtlich, dass infolge der nicht symmetrischen Beaufschlagung des Tosbeckens die Energieumwandlung schlechter erfolgt. Bei beiden Lastfällen passieren zwei

gebündelte Strahlen die Endschwelle. Die Geschwindigkeiten dieser Strahlen liegen zwischen 3 und 4 m/s und sind somit unter Betrachtung der mit Wasserbausteinen gesicherten Flusssohle akzeptabel.

## BHQ2 Lastfall (n)

Ausgehend vom Modell 111: 24 m Tosbeckenlänge, 2 m Eintiefung mit 2 Störkörperreihen wurden die Randbedingungen für das BHQ2 gesetzt. Die einzige Änderung ist der Unterwasserstand, der um 1,7 m erhöht auf 147,70 m NHN gesetzt wurde. Dieser Wasserstand wurde mit Hilfe eines 2D-Modells ermittelt.

Die iterative Suche nach der Schützöffnung ergab im Modell 135a eine Öffnungshöhe aller 4 Verschlüsse von 4,20 m. Bei dieser werden ca. 473 m<sup>3</sup>/s ggü. den geforderten 478 m<sup>3</sup>/s abgeführt.

Die gleiche Berechnung mit einer Schützöffnung aller 4 Verschlüsse von 4,25 m wurde vollständigshalber durchgeführt (Modell 135aa). Der gemessene Durchfluss bei dieser Öffnungshöhe beträgt 493,3 m<sup>3</sup>/s.

Die Verschlüsse können zudem bis 4,89 m gezogen werden, sodass genügend Zukunftsreserven zum Abdecken von Modellungenauigkeiten vorhanden sind.

**Die Leistungsfähigkeit der Anlage bei BHQ2 Lastfall (n) ist gegeben.**

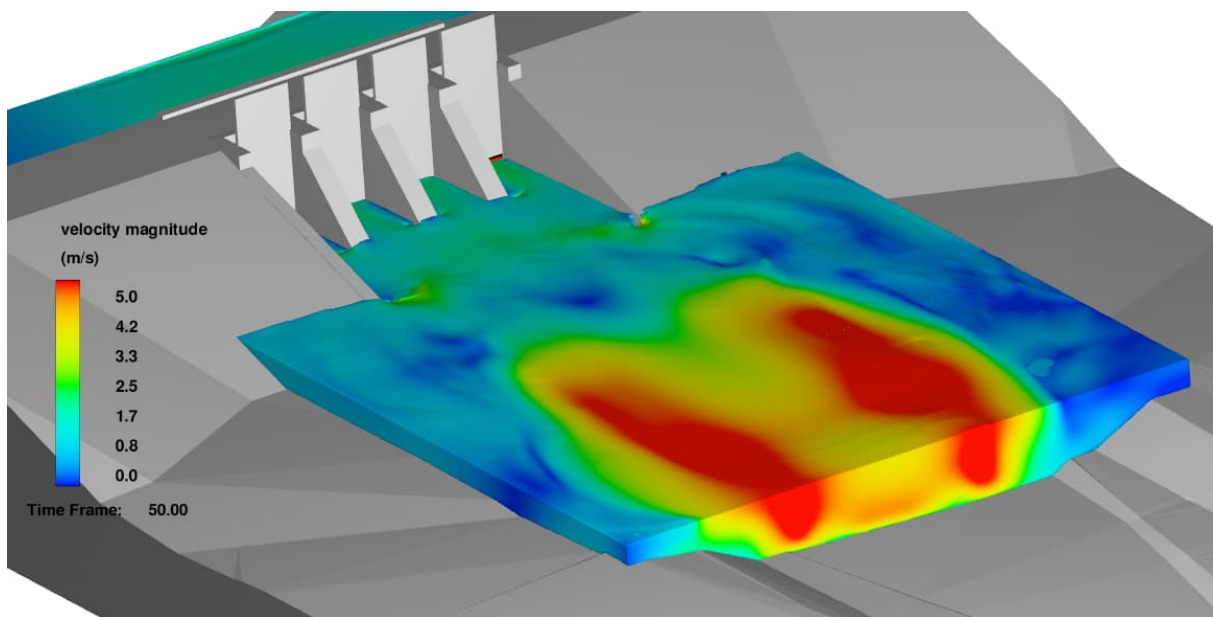


Abbildung 20 – BHQ2 (GM 135a) – Geschwindigkeiten in der 3d-Ansicht – Schützöffnung 420 cm



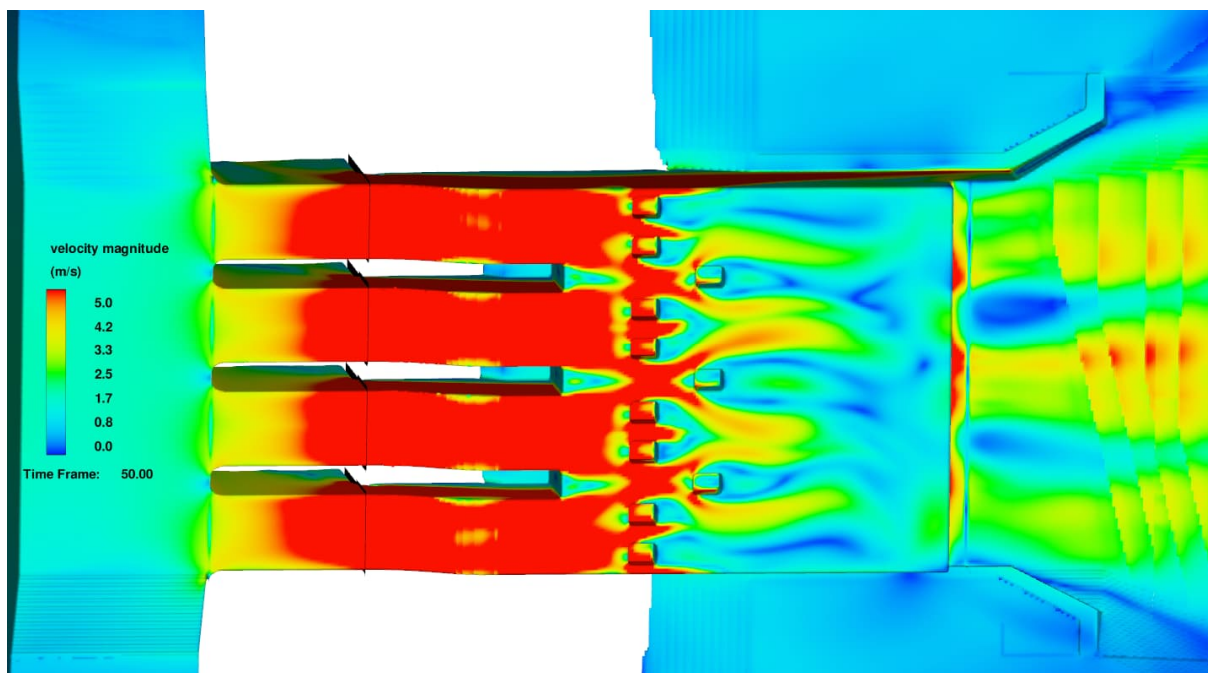


Abbildung 21 – BHQ2 (GM 135a) – Geschwindigkeiten in der Ansicht von unten – Schützöffnung 420 cm

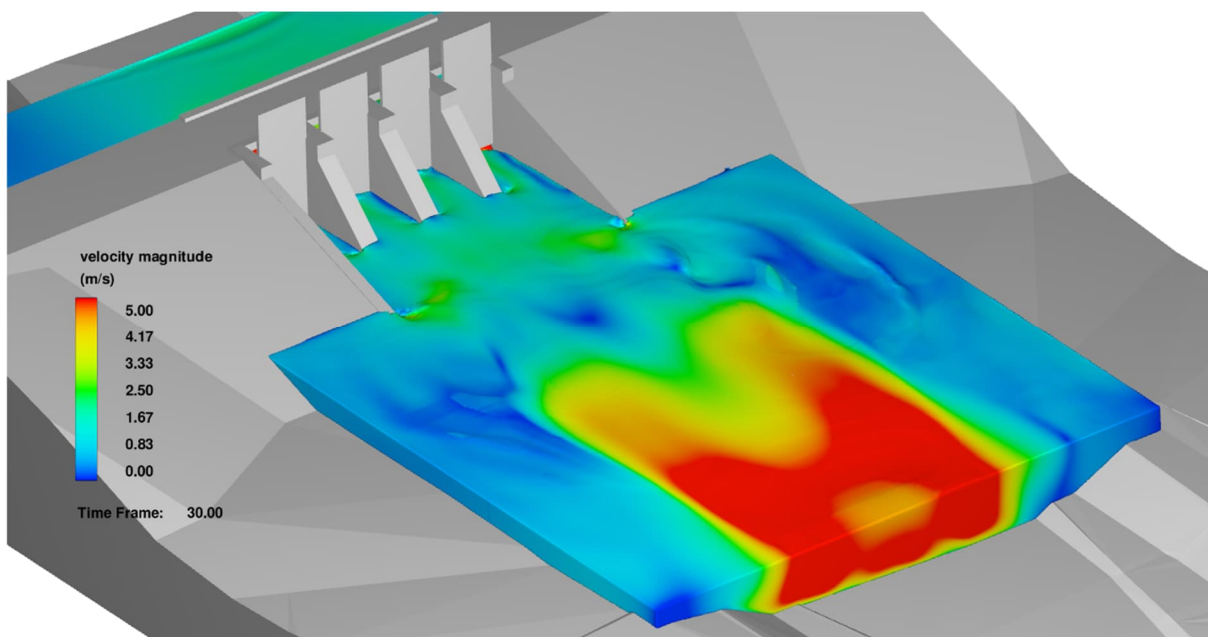


Abbildung 22 – BHQ2 (GM 135aa) – Geschwindigkeiten in der 3d-Ansicht – Schützöffnung 425 cm

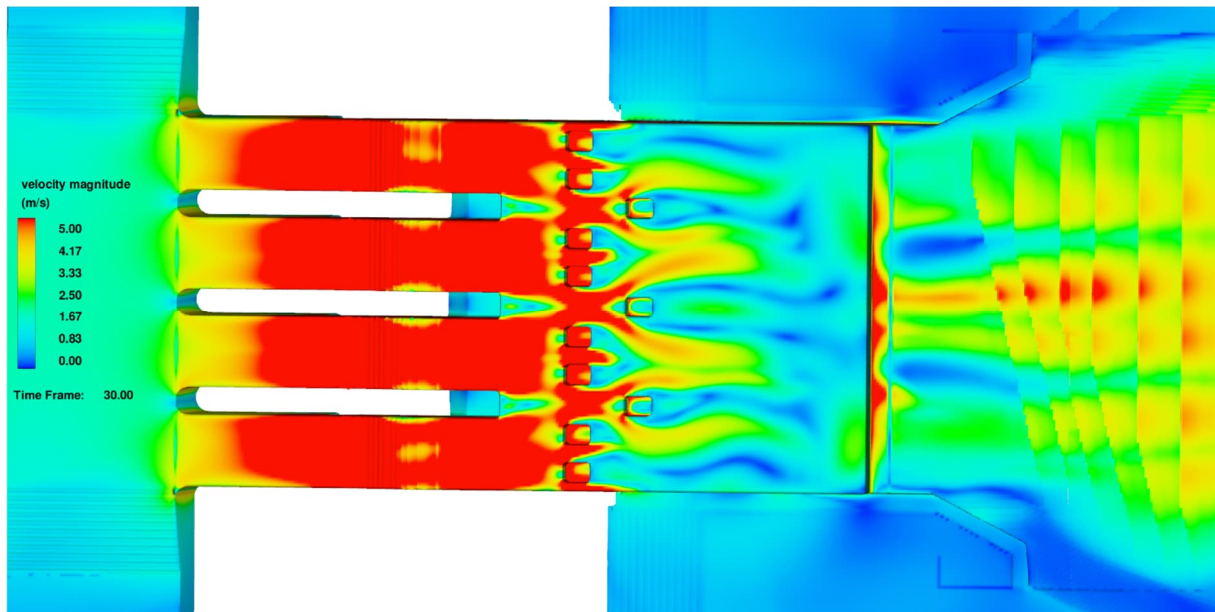


Abbildung 23 – BHQ2 (GM 135aa) – Geschwindigkeiten in der Ansicht von unten – Schützöffnung 425 cm

Die Tosbeckenendschwelle wird mit Geschwindigkeiten zwischen 5 und 6 m/s passiert. Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Flussbettsicherung durch Wasserbausteine sind die hervorgerufenen Geschwindigkeiten für ein BHQ2 vertretbar.

### 9.4.3 Risikobetrachtungen

#### Bauzustand für Baugrube 2 Lastfall BHQ1 (n-2)

Laut Baugrubenkonzept werden erst 2 Wehrfelder hergestellt und nach Inbetriebnahme die weiteren zwei Wehrfelder gebaut. Um den Leistungsnachweis von lediglich 2 Wehrfeldern zu erbringen, wurde folgendes Modell aufgestellt. Dies entspricht einem n-2 Lastfall für BHQ1. Die Baugrube wurde als Solid aus dem Strömungsgeschehen ausgeschlossen.

Die iterative Ermittlung der Öffnungshöhe erfordert eine Öffnungshöhe der 2 ersten in Betrieb gesetzten Verschlüsse von 2,9 m, um rechnerische 187 m<sup>3</sup>/s abführen zu können.

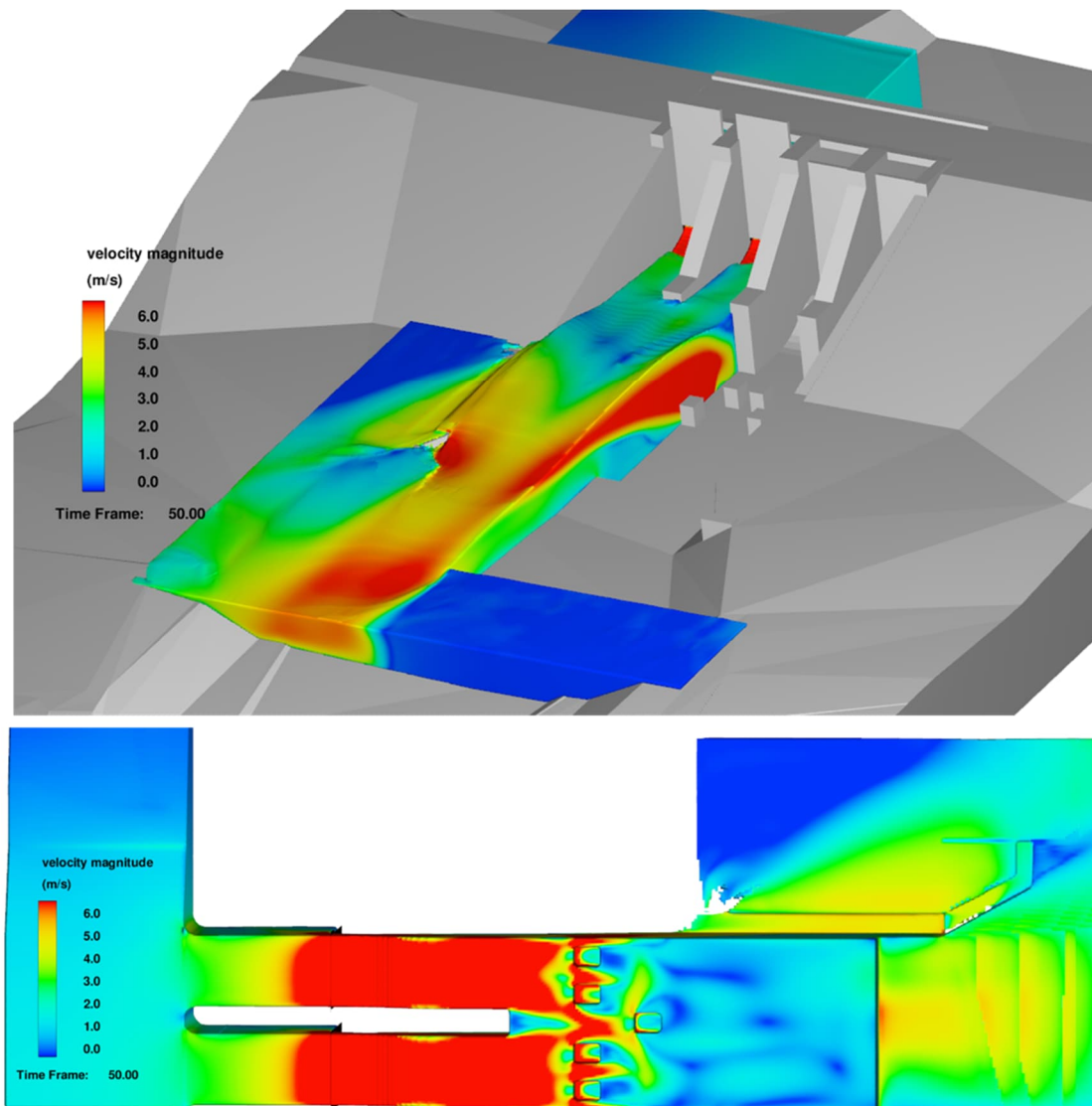


Abbildung 24– Bauzustand (n-2) bei BHQ1 (GM 503) – Geschwindigkeiten als 3d-Ansicht und Ansicht von unten (BEACHTEN: Geschwindigkeitsfeld 0 - 6 m/s!)

Die Geschwindigkeiten an der Tosbeckenendschwelle betragen zwischen 5 und 6 m/s. Es wird empfohlen, für den Bauzustand temporäre Strömungsumlenker (z.B. als Betonfertigteile) ca. 5 m unterhalb vom Baugrubenende im Flussbett zu versenken, damit eine Beaufschlagung der gesamten Flussbettbreite erzielt wird.

### Lastfall BHQ2 (n-1)

Für den Lastfall BHQ2 muss der Durchfluss 478 m<sup>3</sup>/s abgeführt werden (vgl. Tabelle 2). Das Modell wurde als Risikobetrachtung unter Verschließen des 2. Wehrfeldes aufgestellt.

Bei einer maximalen Verschlussöffnungshöhe von 4,89 m für alle Wehrfelder wurde ein Gesamtdurchfluss von ca. 428 m<sup>3</sup>/s berechnet. Dieser ist um 50 m<sup>3</sup>/s zu niedrig und somit nicht ausreichend.

In den folgenden Abbildungen ist das Strömungsbild für den beschriebenen Lastfall dargestellt.

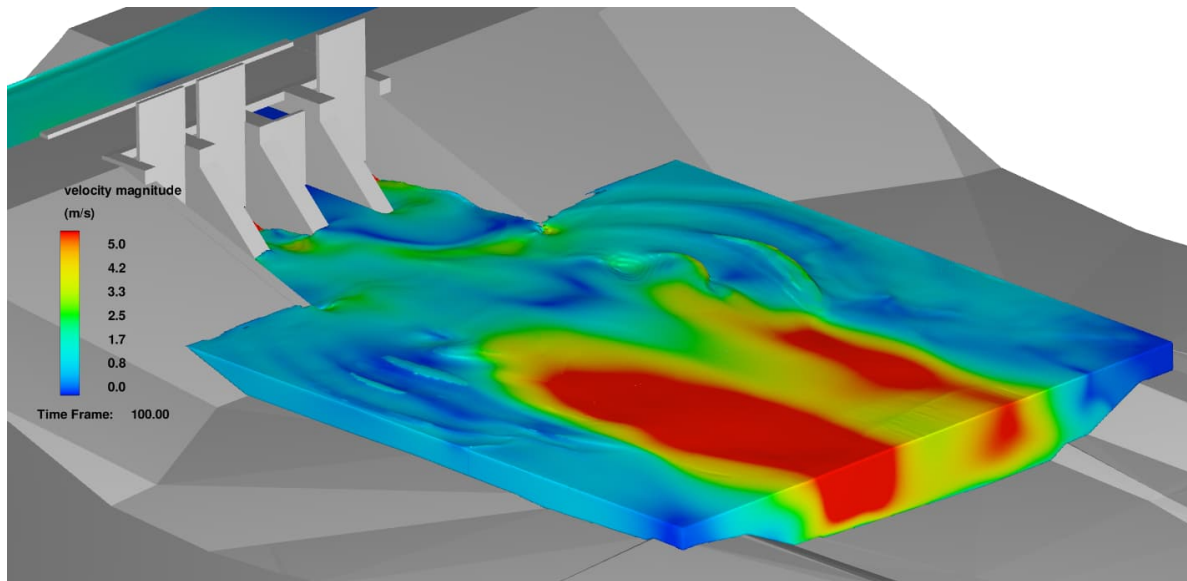


Abbildung 25 – BHQ2 (n-1) (GM 141) – Geschwindigkeiten als 3d-Ansicht

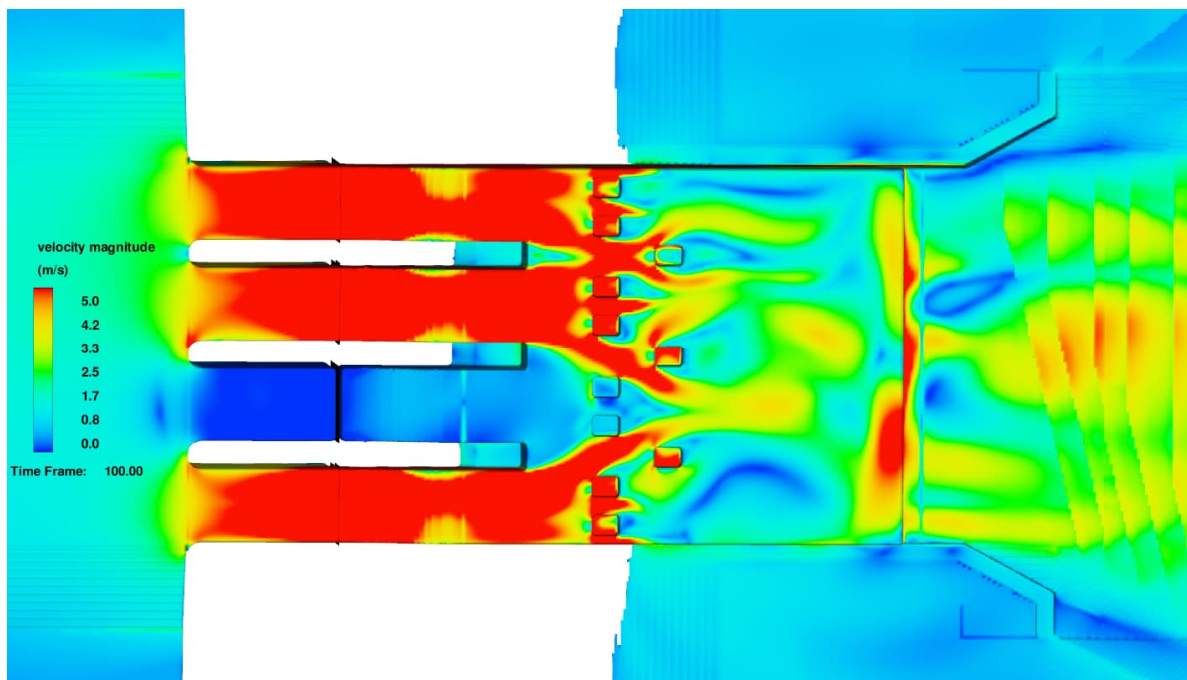


Abbildung 26 – BHQ2 (n-1) (GM 141) – Geschwindigkeiten in der Ansicht von unten

Die Geschwindigkeiten an der Tosbeckenendschwelle belaufen sich wie bei BHQ1 auf 5-6 m/s bei einer asymmetrischen Beanspruchung des Flussbettes.

## 10 Zusammenfassung

Durch Verwendung des kommerziellen Programmes FLOW 3d HYDRO konnte eine Optimierung, vor allem der Länge des Tosbeckens, erzielt werden. Die Erkenntnis der Notwendigkeit von Störkörpern wäre unter Verwendung der in der Literatur vorhandenen Bemessungsansätze nur schwer erarbeitbar gewesen.



Für alle Lastfälle wurden mit der optimierten Geometrie eine ausreichende Energieumwandlung sowie die erforderliche Leistungsfähigkeit der Anlage nachgewiesen. In folgender Tabelle sind die Durchflüsse der wesentlichen Modelle bzw. Lastfälle zusammengefasst. Hierbei sind die wesentlichen Änderungen rot gekennzeichnet.

Tabelle 5 Zusammenstellung der Parameter für die wesentlichen gerechneten Modelle

Gesamtmodell	Lastfall	OW-Stand [m NHN]	UW-Stand [m NHN]	Tosbeckenlänge [m]	Schützöffnung [m]	Beaufschlagte Wehrfelder	Ermittelter Gesamtdurchfluss [m³/s]	Bemerkung
<b>Tosbeckenoptimierung</b>								
GM 110	BHQ1	151,85	146,0	24,0	1,62	(n)	211	1 SK Zeile
GM 111	BHQ1	151,85	146,0	24,0	1,62	(n)	213	2 SK-Zeilen
GM 115	BHQ1	151,85	146,0	22,0	1,62	(n)	203	2 SK-Zeilen
GM 117	BHQ1	151,85	146,0	24,0	1,62	(n)	202	2 SK-Zeilen, Flügelwände 20 cm höher
<b>Nachweise der Leistungsfähigkeit</b>								
GM 123b	BHQ1	151,85	147,45	24,0	2,00	(n-1)	162	2 SK-Zeilen äußeres Segment geschlossen
GM 124b	BHQ1	151,85	147,45	24,0	2,00	(n-1)	165	2 SK-Zeilen inneres Segment geschlossen
<b>Nachweise der Leistungsfähigkeit</b>								
GM 133	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,89	(n)	576	2 SK-Zeilen
GM 135a	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,20	(n)	473	2 SK-Zeilen
GM 135aa	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,25	(n)	493	2 SK-Zeilen
<b>Risikobetrachtungen</b>								
GM 503	BHQ1	151,85	146,0	24,0	2,90	(n-2)	187	2 SK-Zeilen Bauzustand
GM 141	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,89	(n-1)	428	2 SK-Zeilen inneres Segment geschlossen

Als letzter Schritt wurden die auf das Bauwerk einwirkenden Kräfte ermittelt, um diese bei der Tragwerksbemessung zu verwenden.

## 11 Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Auswertung der Lastfälle am Gesamtmodell



---

## 3d-hn-Modellierung

### Anlage 1

---

#### INHALTSVERZEICHNIS

1	Abbildungsverzeichnis	2
2	Übersicht Modellauswertung	7
3	Gesamtmodell 110 - Tosbeckenoptimierung	8
4	Gesamtmodell 111 - Tosbeckenoptimierung	16
5	Gesamtmodell 115 - Tosbeckenoptimierung	27
6	Gesamtmodell 117 - Tosbeckenoptimierung	38
7	Gesamtmodell 123b – Nachweis Leistungsfähigkeit	49
8	Gesamtmodell 124b - Nachweis Leistungsfähigkeit	59
9	Gesamtmodell 133 - Nachweis Leistungsfähigkeit	69
10	Gesamtmodell 135a - Nachweis Leistungsfähigkeit	79
11	Gesamtmodell 503 - Risikobetrachtung	89
12	Gesamtmodell 141 - Risikobetrachtung	99

## 1 Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 110</b>	8
Abbildung 2 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	9
Abbildung 3 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	9
Abbildung 4 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	10
Abbildung 5 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	11
Abbildung 6 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	11
Abbildung 7 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	12
Abbildung 8 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	12
Abbildung 9 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	13
Abbildung 10 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	13
Abbildung 11 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	14
Abbildung 12 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	14
Abbildung 13 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]	15
<b>Abbildung 14 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 111</b>	16
Abbildung 15 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	17
Abbildung 16 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	17
Abbildung 17 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	18
Abbildung 18 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	19
Abbildung 19 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	19
Abbildung 20 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	20
Abbildung 21 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	20
Abbildung 22 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	21
Abbildung 23 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	21
Abbildung 24 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	22
Abbildung 25 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	22
Abbildung 26 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	23
Abbildung 27 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]	23
Abbildung 28 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	24
Abbildung 29 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	24
Abbildung 30 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]	25
Abbildung 31 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,4m [m/s]	25
Abbildung 32 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,6 m [m/s]	26
<b>Abbildung 33 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 115</b>	27
Abbildung 34 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	28
Abbildung 35 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	29

Abbildung 36 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	29
Abbildung 37 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	30
Abbildung 38 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	30
Abbildung 39 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	31
Abbildung 40 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	31
Abbildung 41 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	32
Abbildung 42 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	32
Abbildung 43 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	33
Abbildung 44 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	33
Abbildung 45 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	34
Abbildung 46 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]	34
Abbildung 47 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	35
Abbildung 48 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	35
Abbildung 49 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,8 m [m/s]	36
Abbildung 50 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9m [m/s]	36
Abbildung 51 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,9 m [m/s]	37
<b>Abbildung 52 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 117</b>	38
Abbildung 53 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	39
Abbildung 54 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	39
Abbildung 55 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	40
Abbildung 56 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	41
Abbildung 57 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	41
Abbildung 58 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	42
Abbildung 59 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	42
Abbildung 60 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	43
Abbildung 61 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	43
Abbildung 62 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	44
Abbildung 63 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	44
Abbildung 64 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	45
Abbildung 65 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]	45
Abbildung 66 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	46
Abbildung 67 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	46
Abbildung 68 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,7 m [m/s]	47
Abbildung 69 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]	47
Abbildung 70 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]	48
<b>Abbildung 71 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 123b</b>	49
Abbildung 72 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	50
Abbildung 73 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	50
Abbildung 74 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	51

Abbildung 75 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	52
Abbildung 76 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	52
Abbildung 77 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	53
Abbildung 78 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	53
Abbildung 79 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	54
Abbildung 80 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	54
Abbildung 81 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	55
Abbildung 82 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	55
Abbildung 83 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	56
Abbildung 84 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]	56
Abbildung 85 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	57
Abbildung 86 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	57
Abbildung 87 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]	58
Abbildung 88 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]	58
Abbildung 89 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]	58
<b>Abbildung 90 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 124b</b>	59
Abbildung 91 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	60
Abbildung 92 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	60
Abbildung 93 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	61
Abbildung 94 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	62
Abbildung 95 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	62
Abbildung 96 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	63
Abbildung 97 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	63
Abbildung 98 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	64
Abbildung 99 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	64
Abbildung 100 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	65
Abbildung 101 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	65
Abbildung 102 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	66
Abbildung 103 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]	66
Abbildung 104 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	67
Abbildung 105 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	67
Abbildung 106 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]	68
Abbildung 107 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]	68
Abbildung 108 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]	68
<b>Abbildung 109 Modelgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 133</b>	69
Abbildung 110 Fließgeschwindigkeiten 3d Ansicht [m/s]	70
Abbildung 111 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	70
Abbildung 112 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	71
Abbildung 113 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	72

Abbildung 114 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	72
Abbildung 115 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	73
Abbildung 116 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	73
Abbildung 117 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	74
Abbildung 118 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	74
Abbildung 119 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	75
Abbildung 120 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	75
Abbildung 121 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	76
Abbildung 122 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]	76
Abbildung 123 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=48,8 m [m/s]	77
Abbildung 124 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]	77
Abbildung 125 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]	78
Abbildung 126 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,4 m [m/s]	78
Abbildung 127 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=65,1 m [m/s]	78
<b>Abbildung 128 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 135a</b>	79
Abbildung 129 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	80
Abbildung 130 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	80
Abbildung 131 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	81
Abbildung 132 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	82
Abbildung 133 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	82
Abbildung 134 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	83
Abbildung 135 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	83
Abbildung 136 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	84
Abbildung 137 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	84
Abbildung 138 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	85
Abbildung 139 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	85
Abbildung 140 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	86
Abbildung 141 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]	86
Abbildung 142 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	87
Abbildung 143 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	87
Abbildung 144 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,7 m [m/s]	88
Abbildung 145 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]	88
Abbildung 146 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1m [m/s]	88
<b>Abbildung 147 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 503</b>	89
Abbildung 148 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	90
Abbildung 149 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	90
Abbildung 150 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	91
Abbildung 151 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	92
Abbildung 152 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	92



Abbildung 153 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	93
Abbildung 154 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	93
Abbildung 155 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	94
Abbildung 156 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	94
Abbildung 157 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	95
Abbildung 158 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	95
Abbildung 159 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	96
Abbildung 160 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]	96
Abbildung 161 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	97
Abbildung 162 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	97
Abbildung 163 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,7 m [m/s]	98
Abbildung 164 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]	98
Abbildung 165 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]	98
<b>Abbildung 166 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 141</b>	99
Abbildung 167 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]	100
Abbildung 168 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]	100
Abbildung 169 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]	101
Abbildung 170 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]	102
Abbildung 171 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	102
Abbildung 172 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]	103
Abbildung 173 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]	103
Abbildung 174 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]	104
Abbildung 175 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]	104
Abbildung 176 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]	105
Abbildung 177 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]	105
Abbildung 178 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]	106
Abbildung 179 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]	106
Abbildung 180 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]	107
Abbildung 181 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]	107
Abbildung 182 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,7 m [m/s]	108
Abbildung 183 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]	108
Abbildung 184 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]	108

## 2 Übersicht Modellauswertung

Zur Übersicht der im vorliegenden Dokument ausgewerteten Modelle wird hier die Tabelle 5 des Hauptdokumentes mit den angesetzten Randbedingungen erneut wiedergegeben:

Tabelle 1 Zusammenstellung der Parameter für die wesentlichen gerechneten Modelle

Gesamtmodell	Lastfall	OW-Stand [m NHN]	UW-Stand [m NHN]	Tosbeckenlänge [m]	Schützöffnung [m]	Beaufschlagte Wehrfelder	Ermittelter Gesamtdurchfluss [m³/s]	Bemerkung
<b>Tosbeckenoptimierung</b>								
GM 110	BHQ1	151,85	146,0	24,0	1,62	(n)	211	1 SK Zeile
GM 111	BHQ1	151,85	146,0	24,0	1,62	(n)	213	2 SK-Zeilen
GM 115	BHQ1	151,85	146,0	22,0	1,62	(n)	203	2 SK-Zeilen
GM 117	BHQ1	151,85	146,0	24,0	1,62	(n)	202	2 SK-Zeilen, Flügelwände 20 cm höher
<b>Nachweise der Leistungsfähigkeit</b>								
GM 123b	BHQ1	151,85	147,45	24,0	2,00	(n-1)	162	2 SK-Zeilen äußeres Segment geschlossen
GM 124b	BHQ1	151,85	147,45	24,0	2,00	(n-1)	165	2 SK-Zeilen inneres Segment geschlossen
<b>Nachweise der Leistungsfähigkeit</b>								
GM 133	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,89	(n)	576	2 SK-Zeilen
GM 135a	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,20	(n)	527	2 SK-Zeilen
<b>Risikobetrachtungen</b>								
GM 503	BHQ1	151,85	146,0	24,0	2,90	(n-2)	187	2 SK-Zeilen Bauzustand
GM 141	BHQ2	151,85	147,7	24,0	4,89	(n-1)	428	2 SK-Zeilen inneres Segment geschlossen

### 3 Gesamtmodell 110 - Tosbeckenoptimierung

BHQ1 (n); Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; **8 SK**; Schützöffnung 1,62 m;  $Q_{\text{ges}}=211 \text{ m}^3/\text{s}$

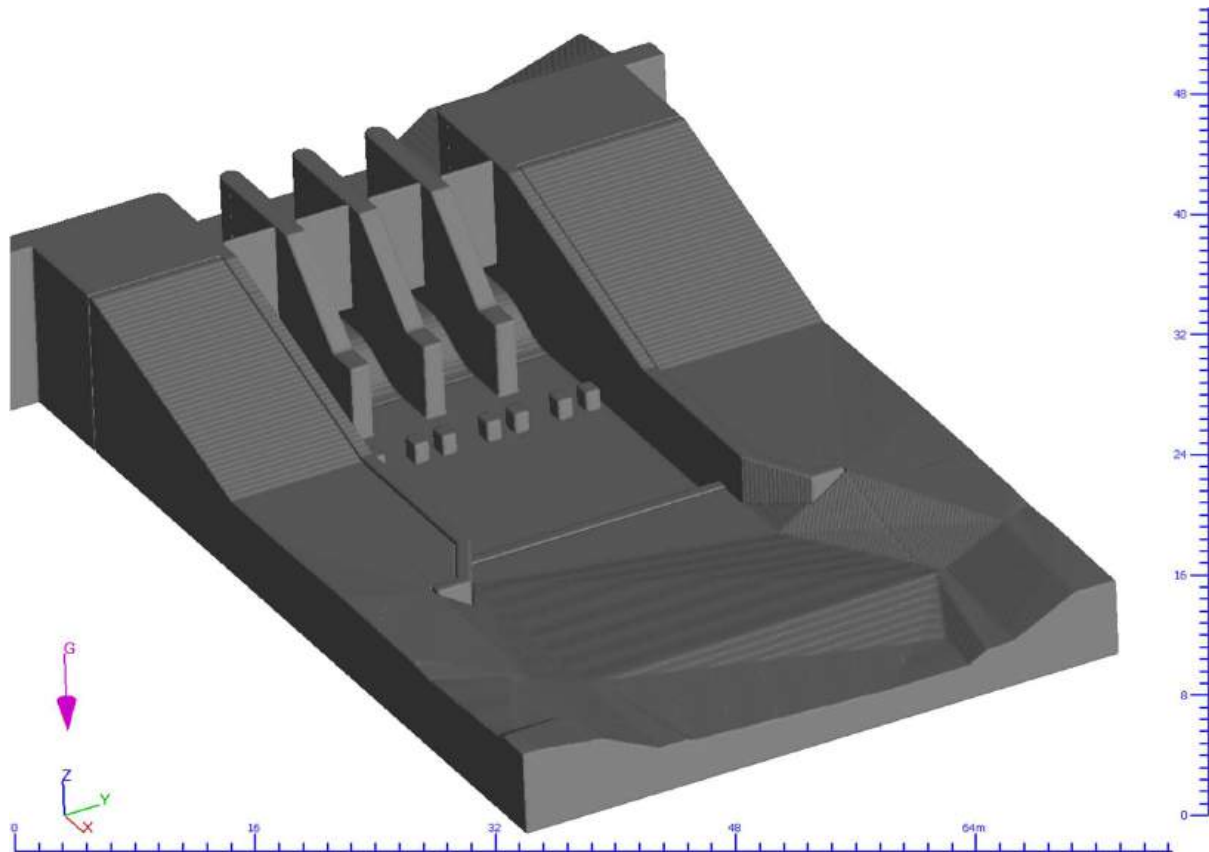


Abbildung 1 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 110

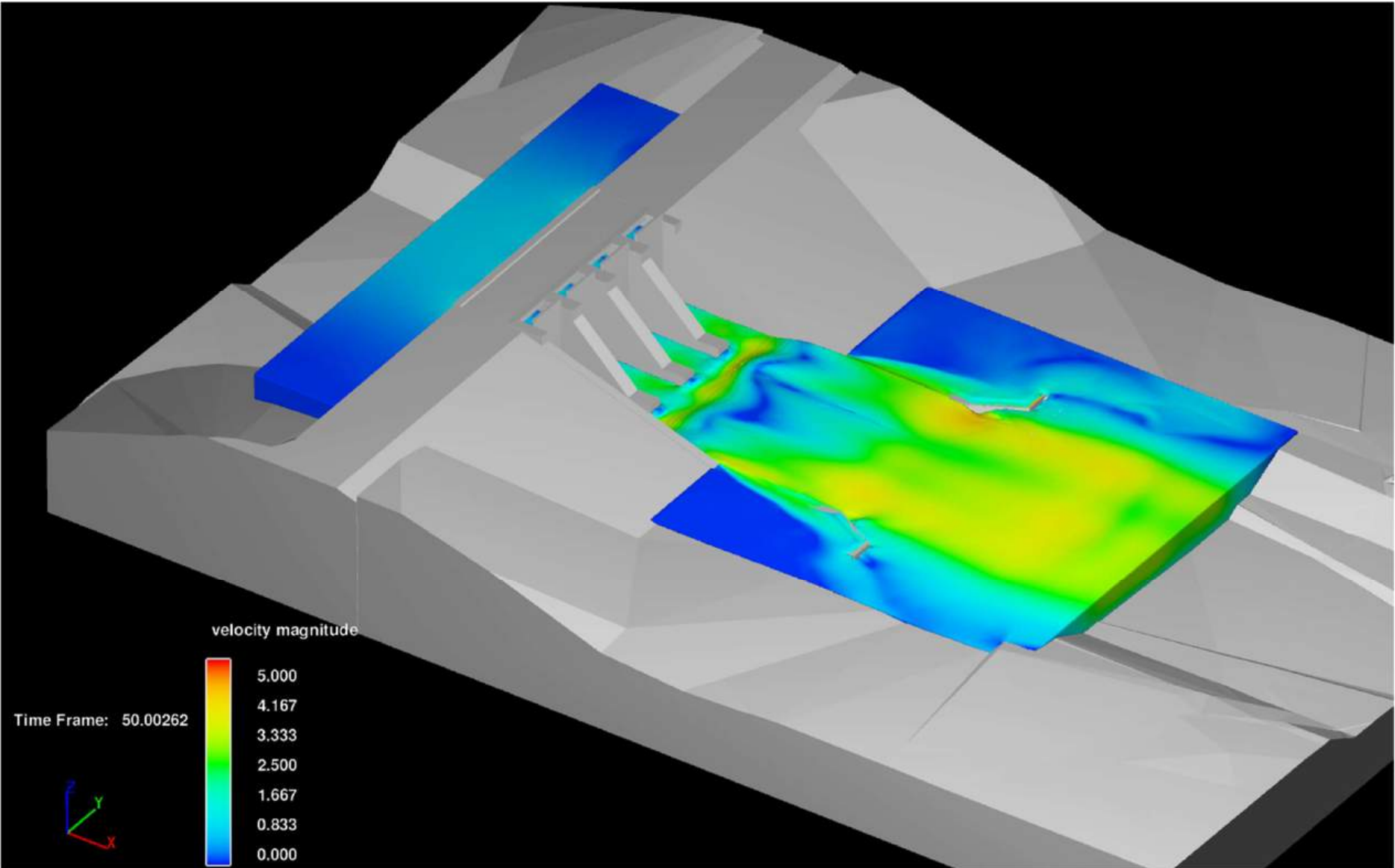


Abbildung 2 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

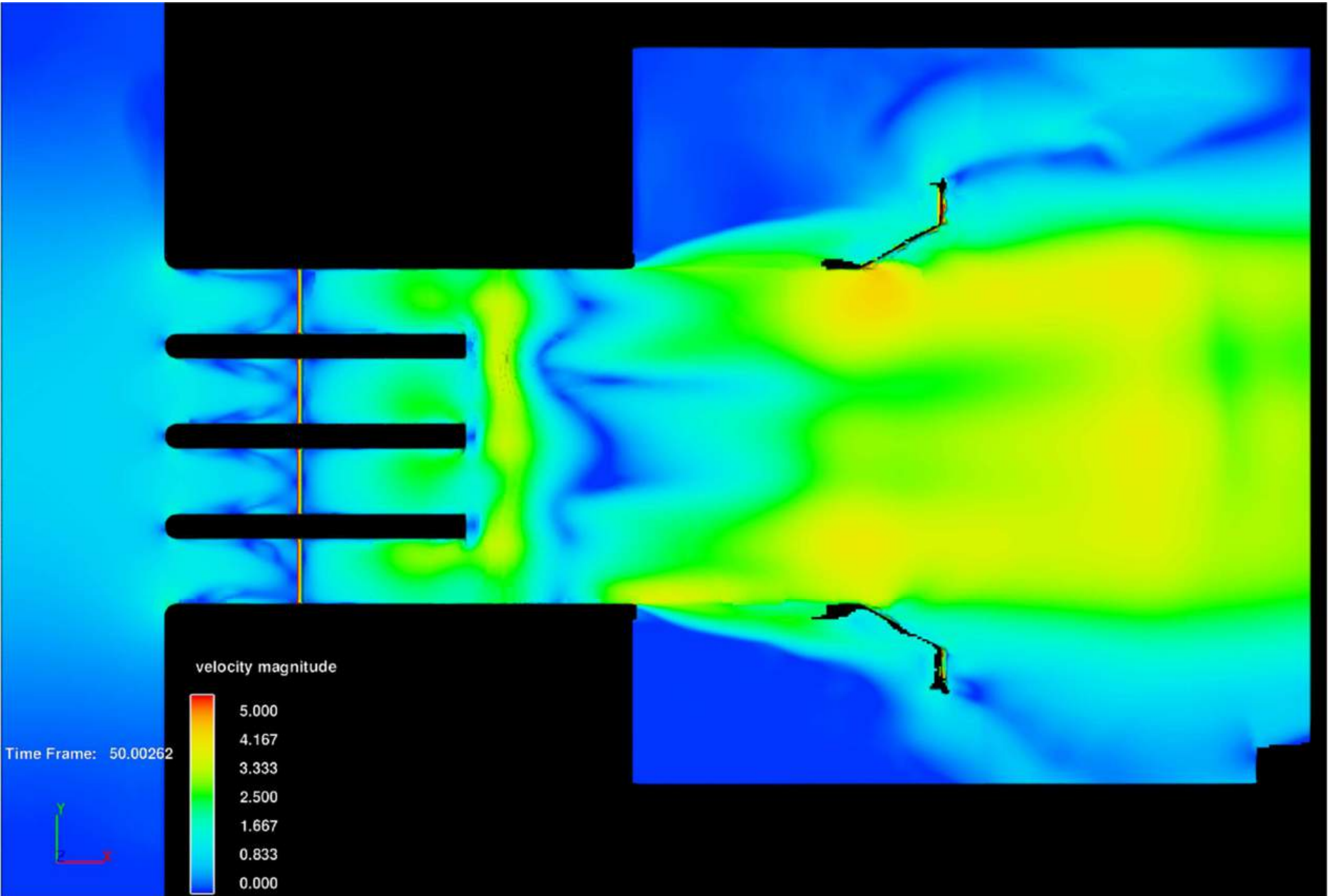


Abbildung 3 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

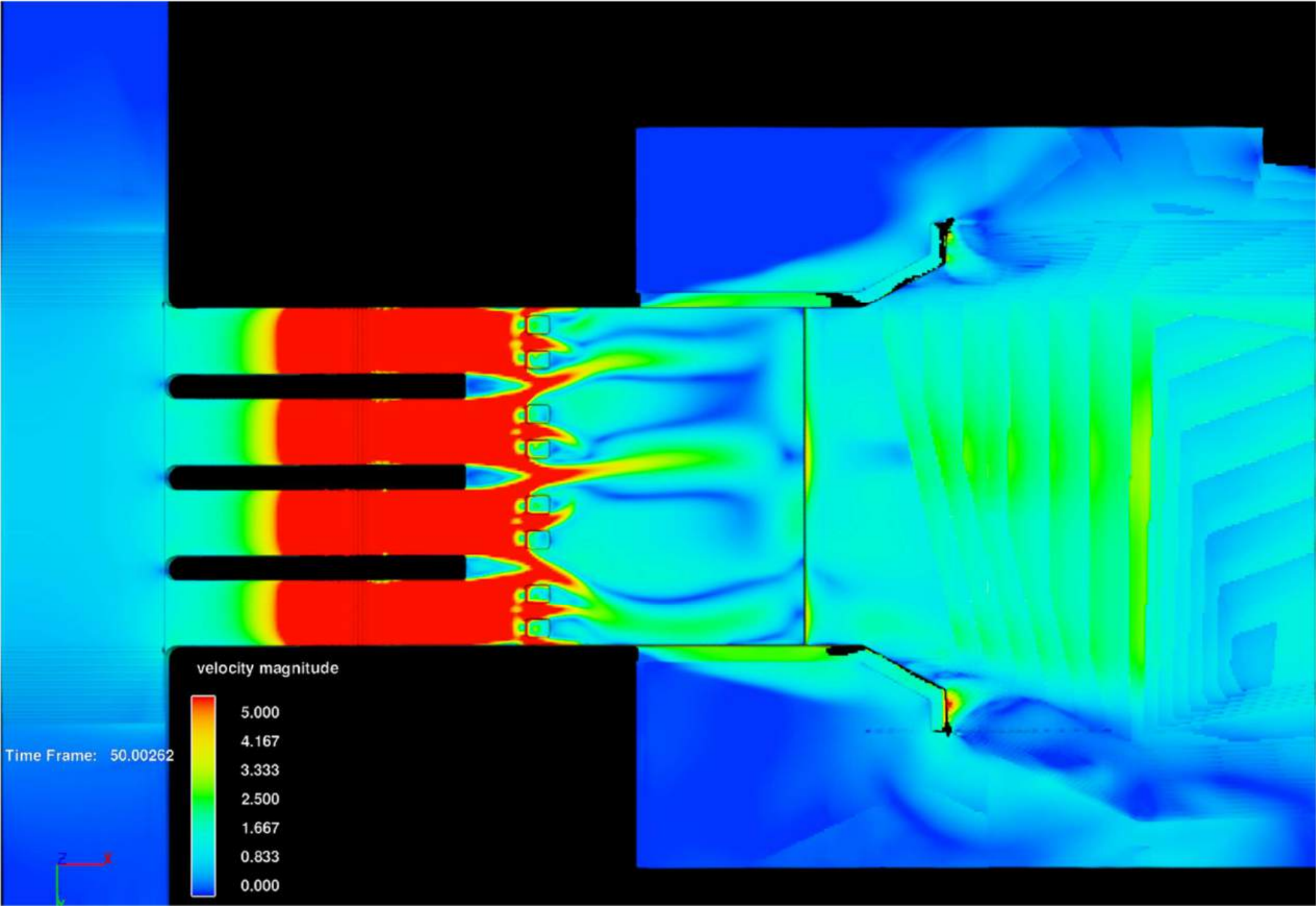


Abbildung 4 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]



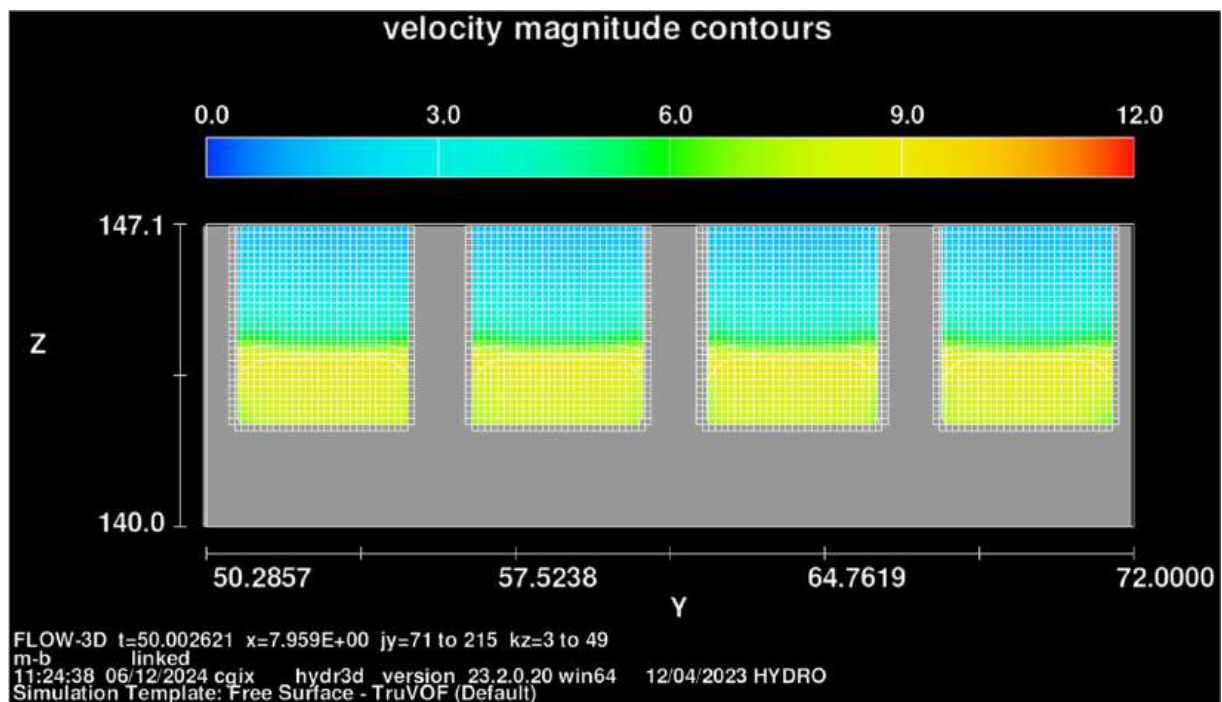


Abbildung 5 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

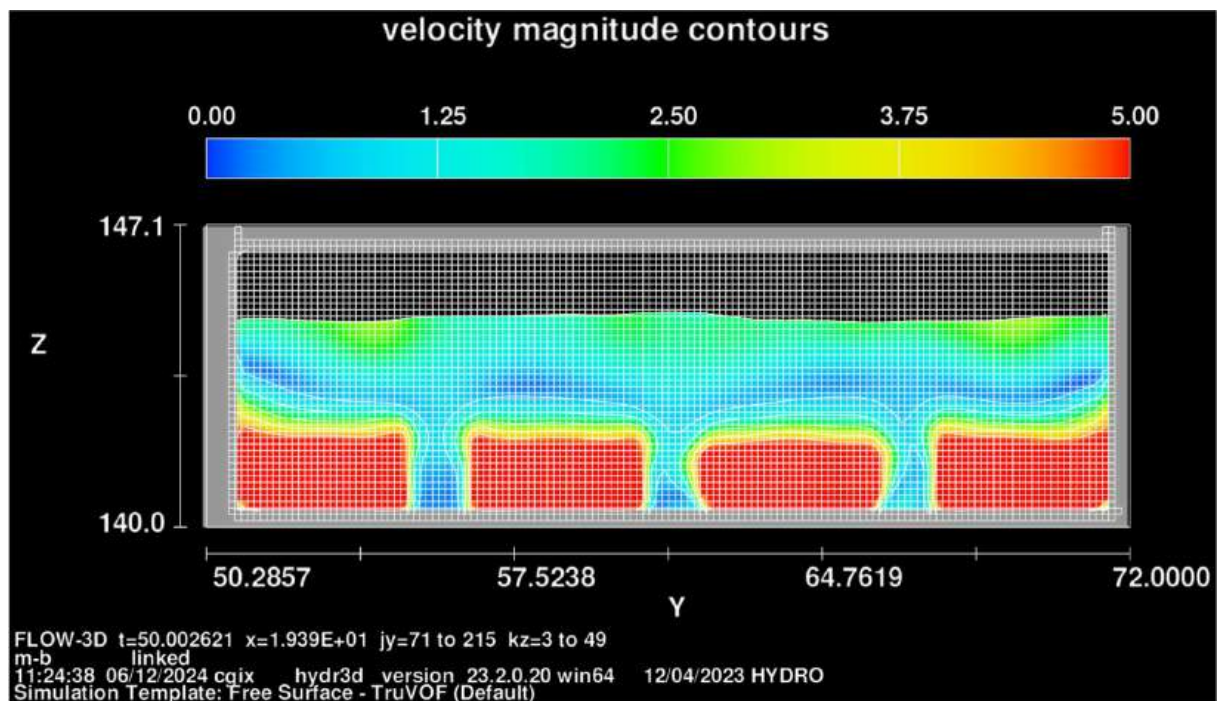


Abbildung 6 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

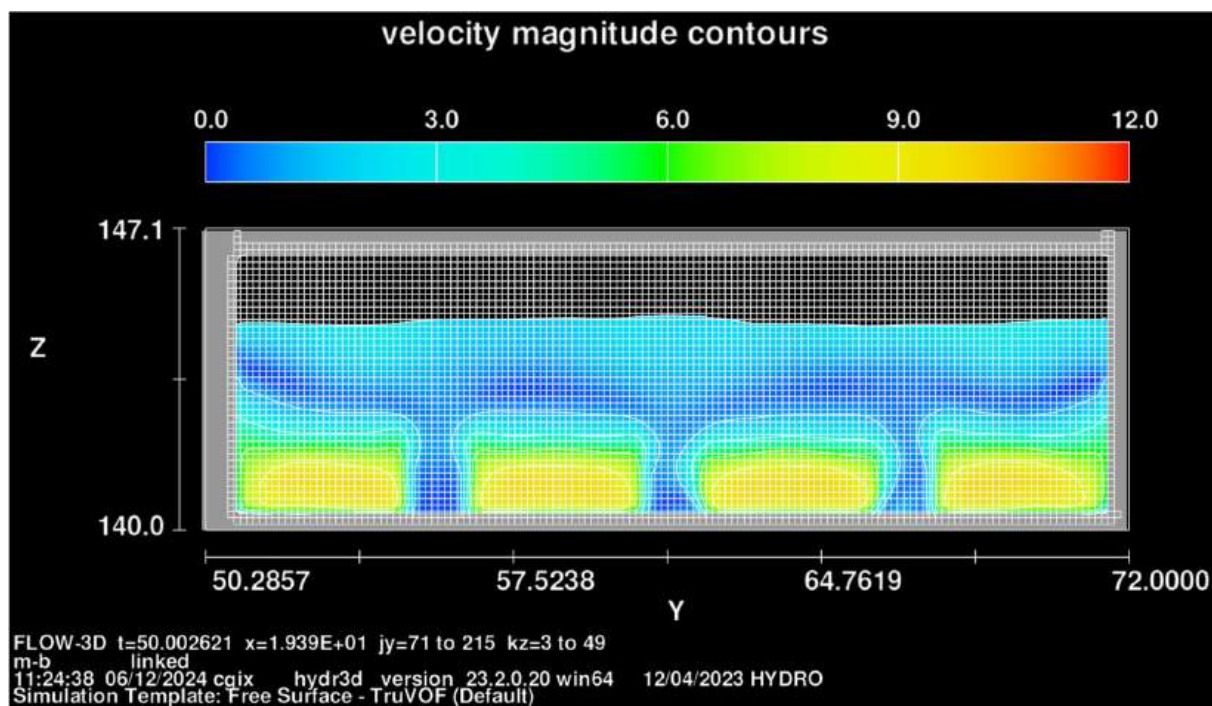


Abbildung 7 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

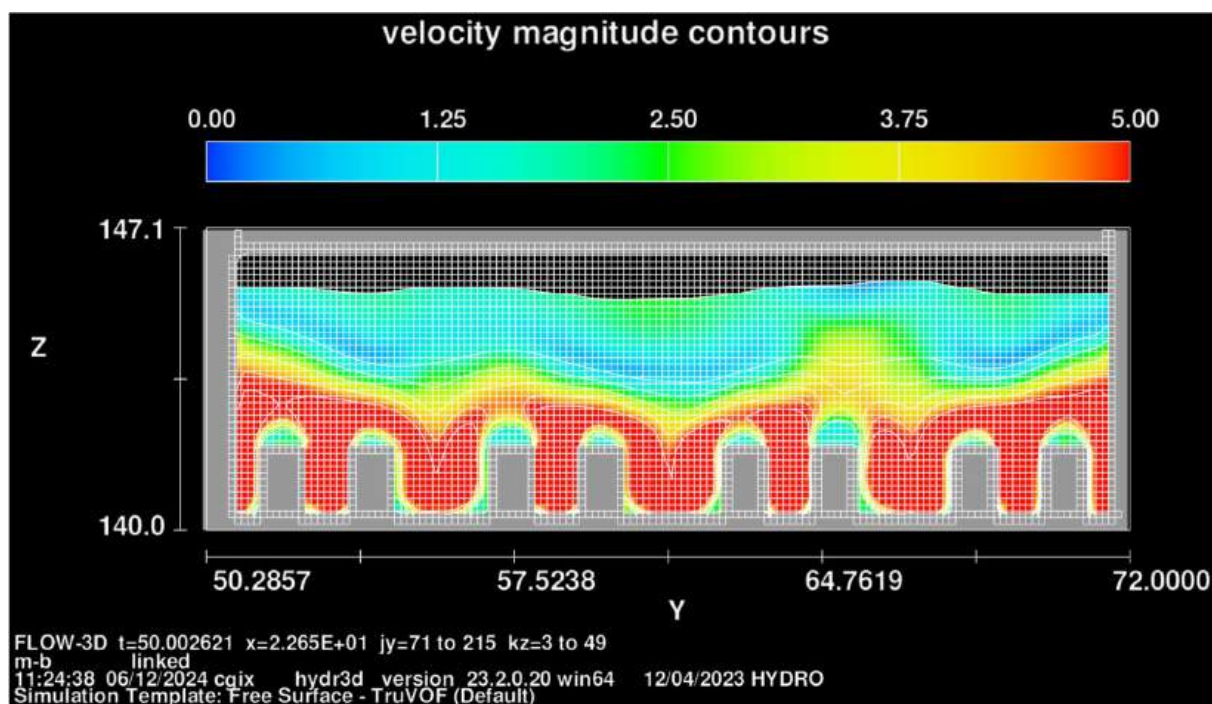


Abbildung 8 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]

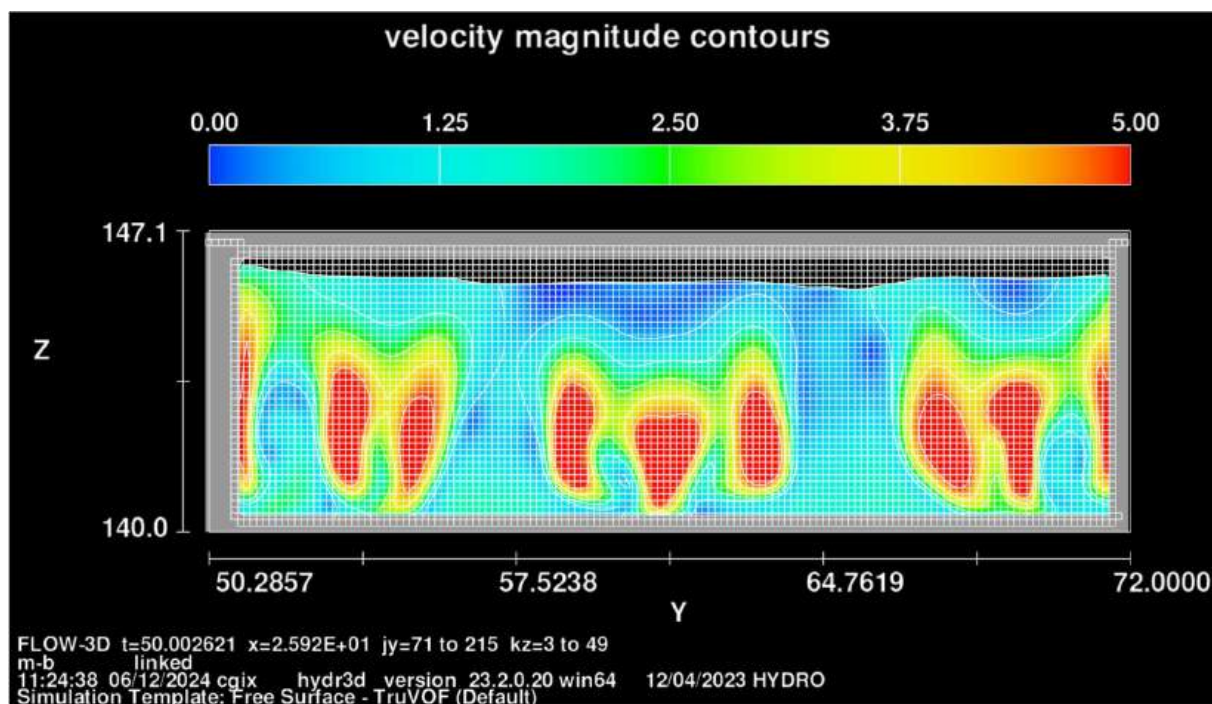


Abbildung 9 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

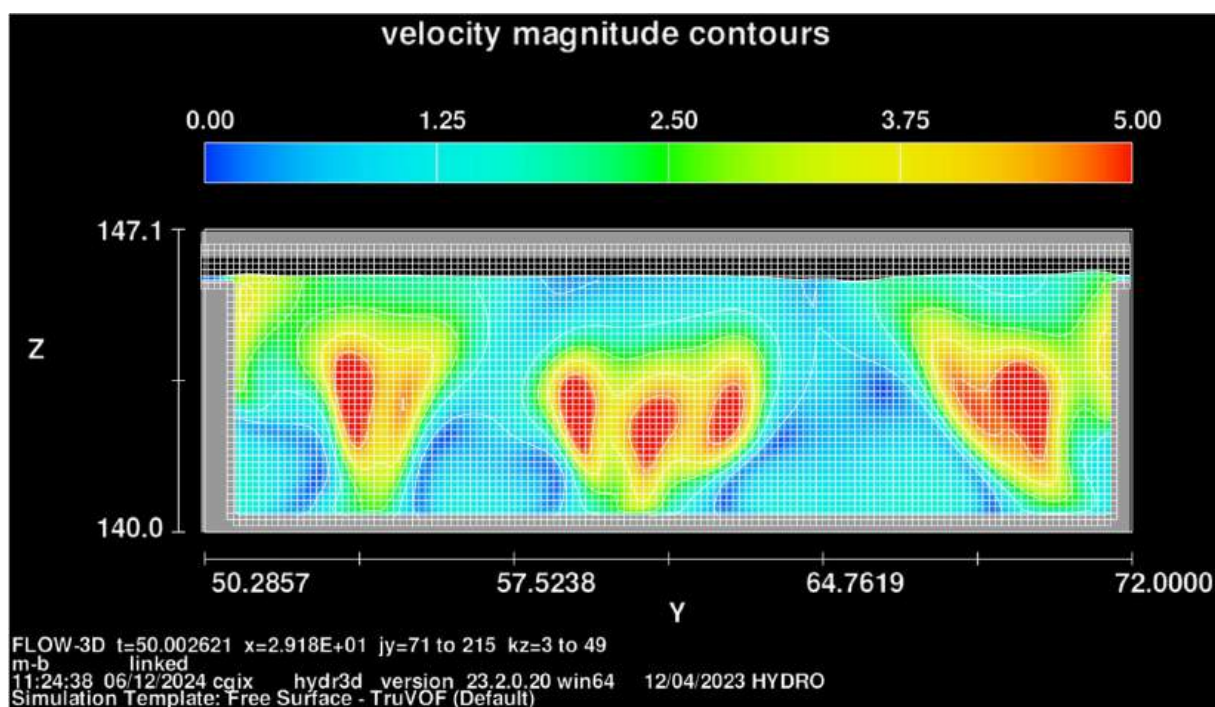


Abbildung 10 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]



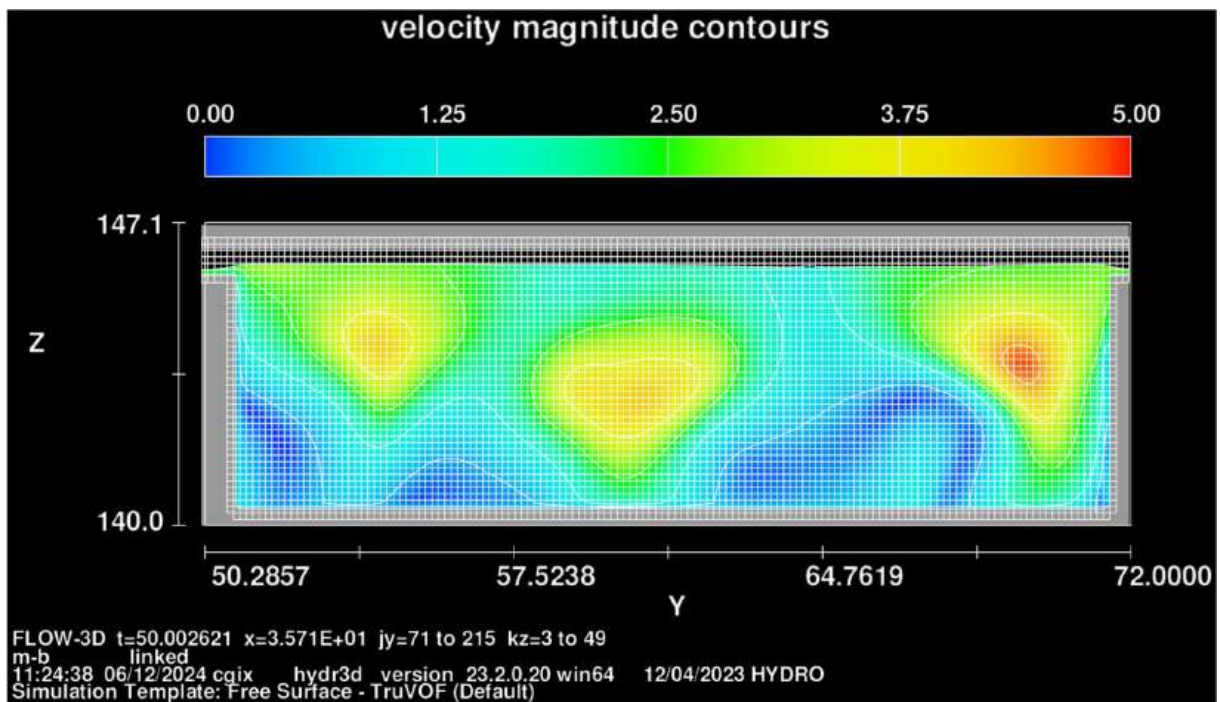


Abbildung 11 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

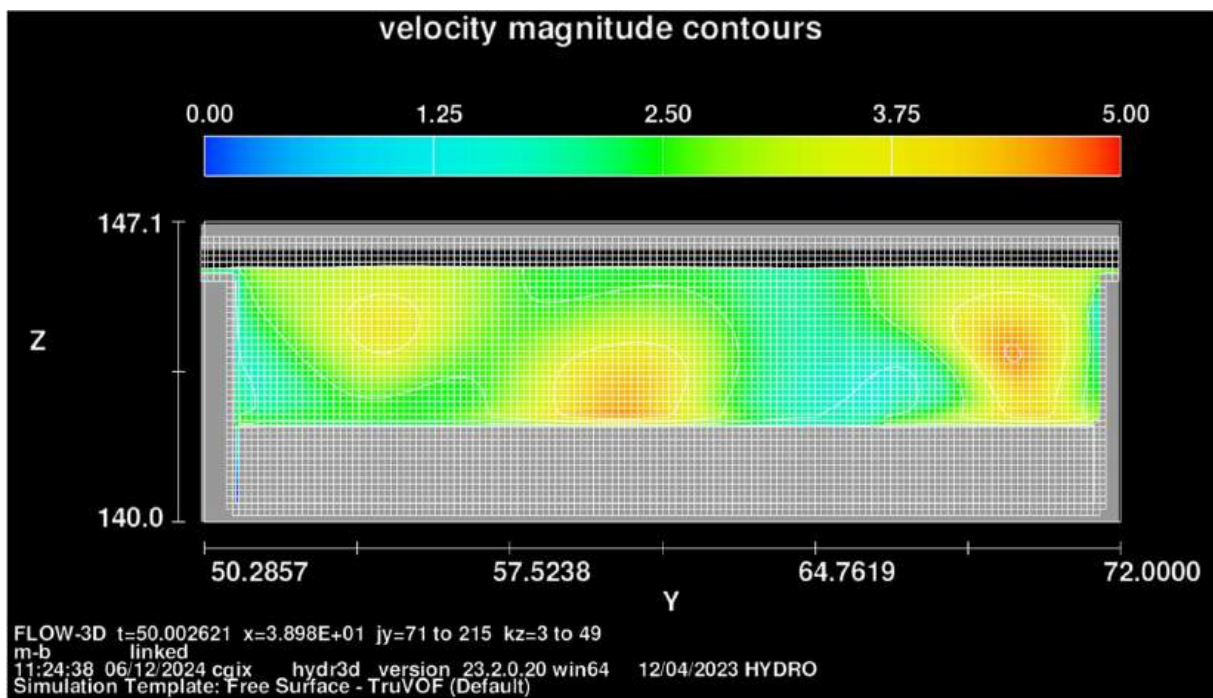


Abbildung 12 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

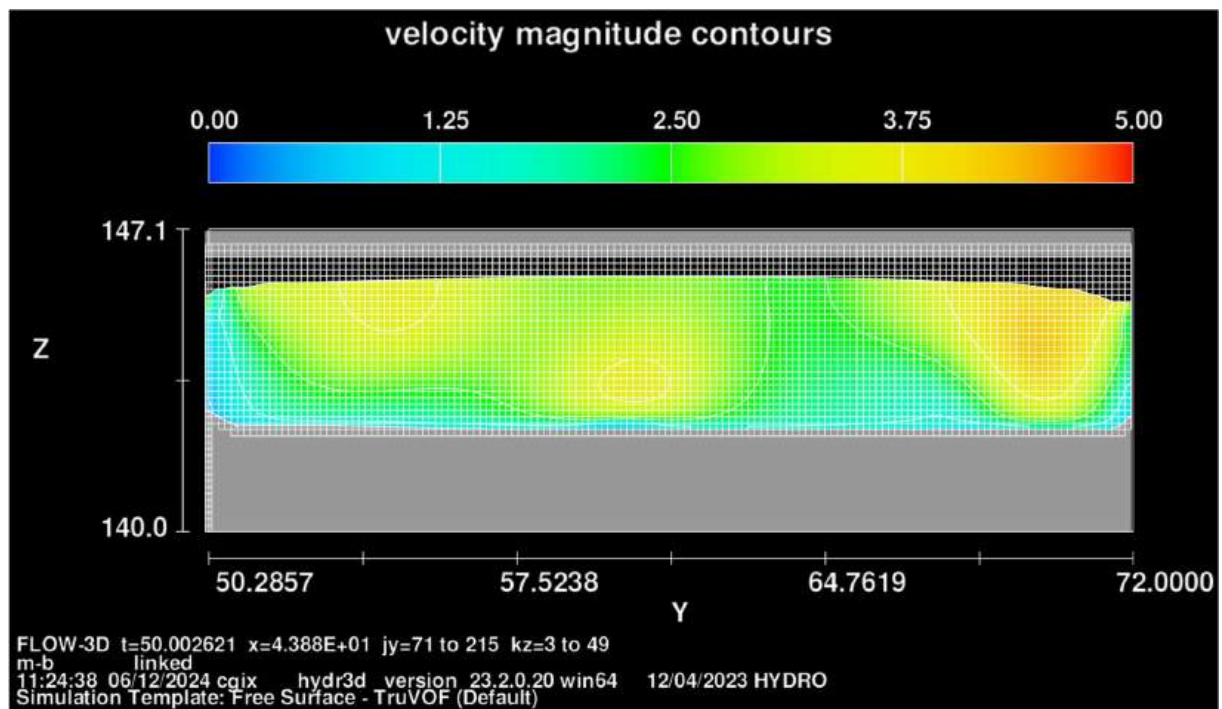


Abbildung 13 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]



## 4 Gesamtmodell 111 - Tosbeckenoptimierung

BHQ1 (n); Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; **11 SK**; Schützöffnung 1,62 m;  $Q_{\text{ges}}=213 \text{ m}^3/\text{s}$

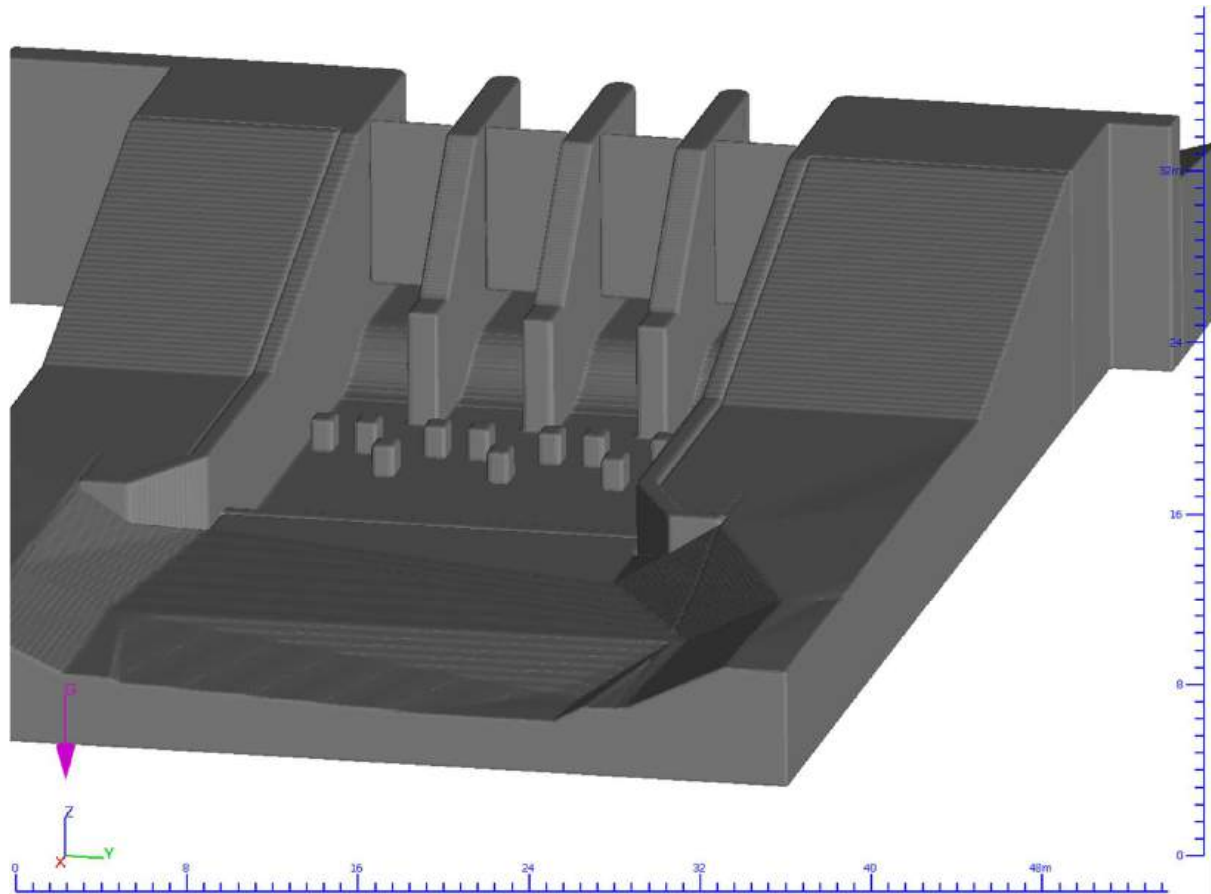


Abbildung 14 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 111

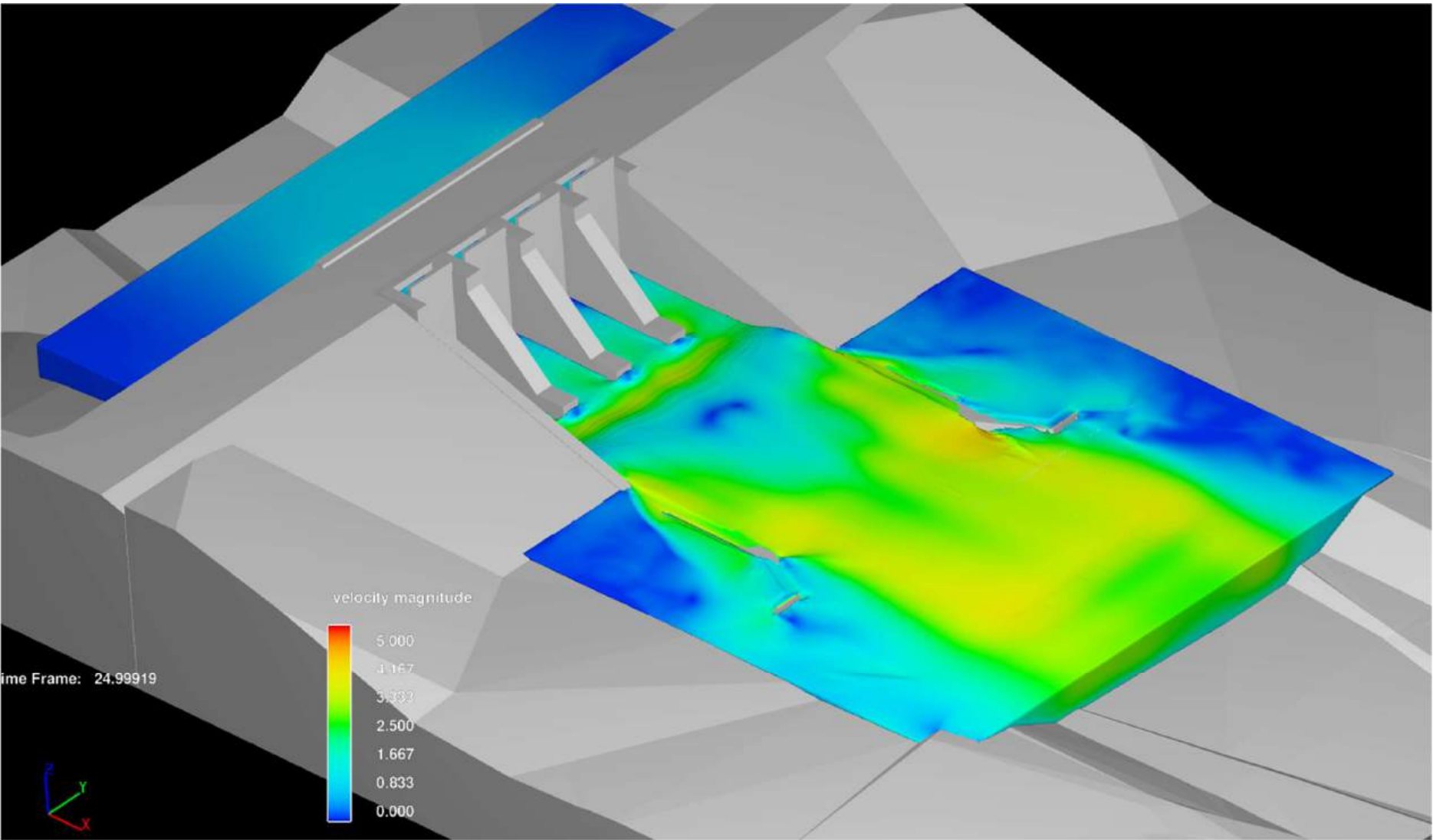


Abbildung 15 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

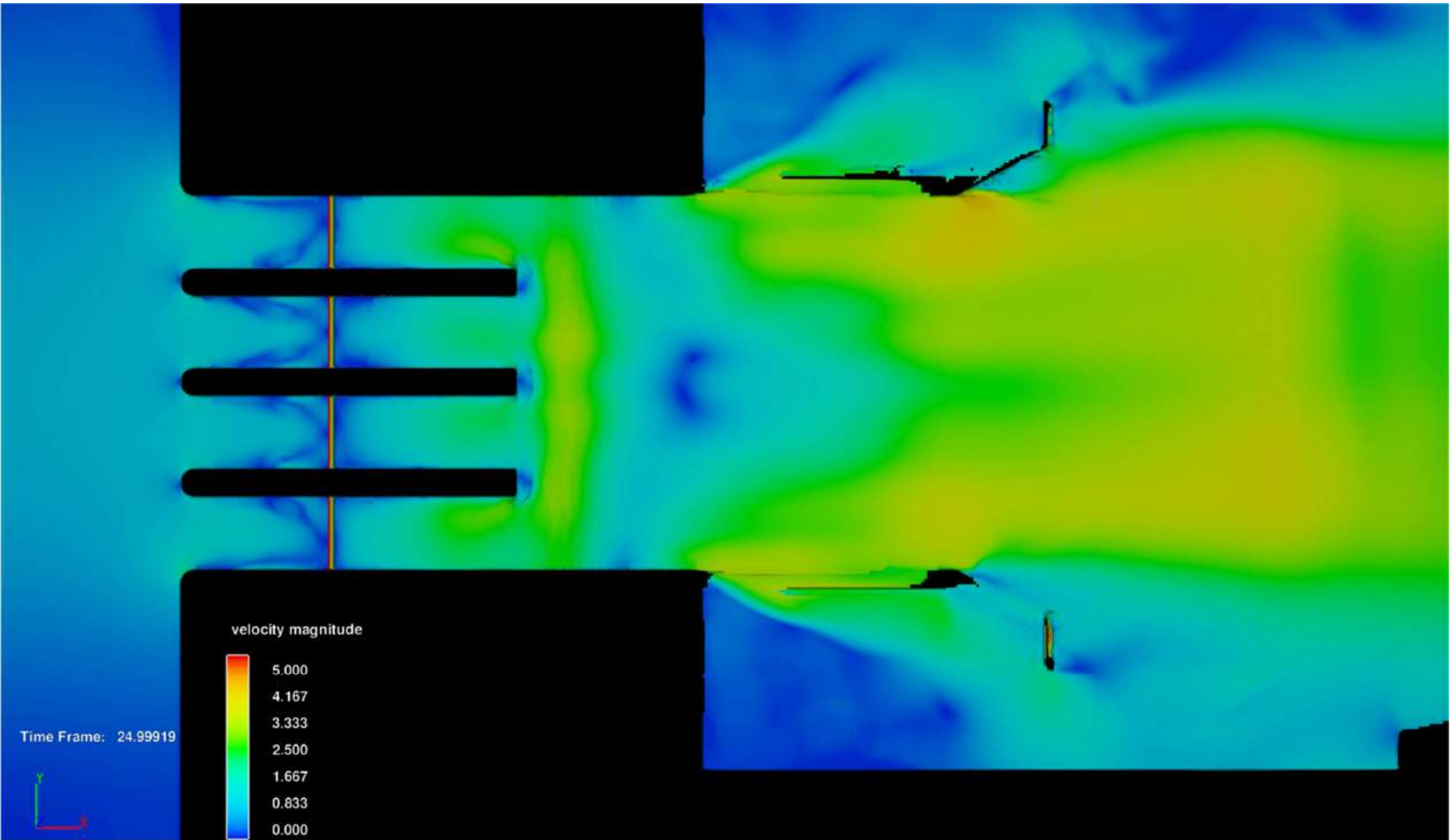


Abbildung 16 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

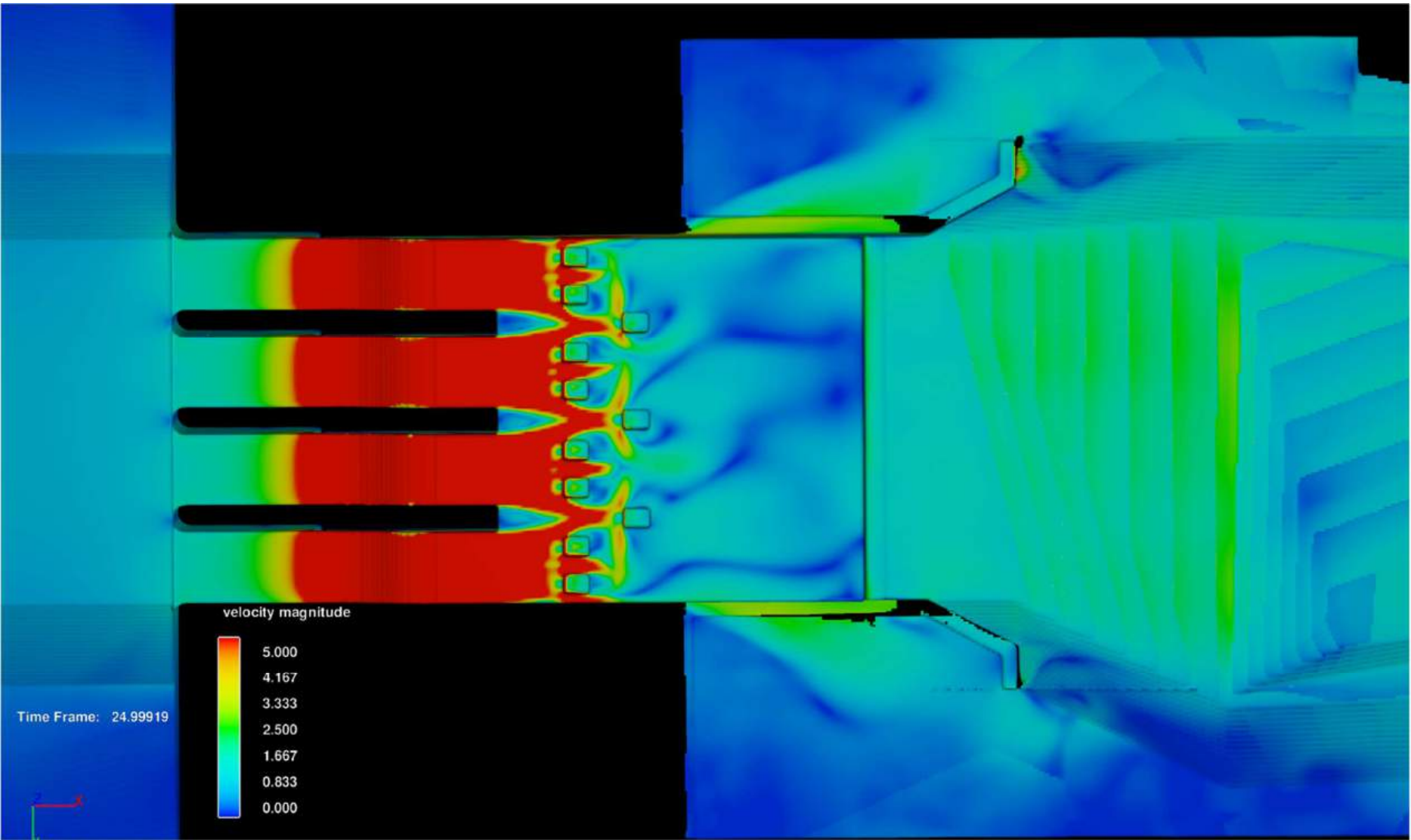


Abbildung 17 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]



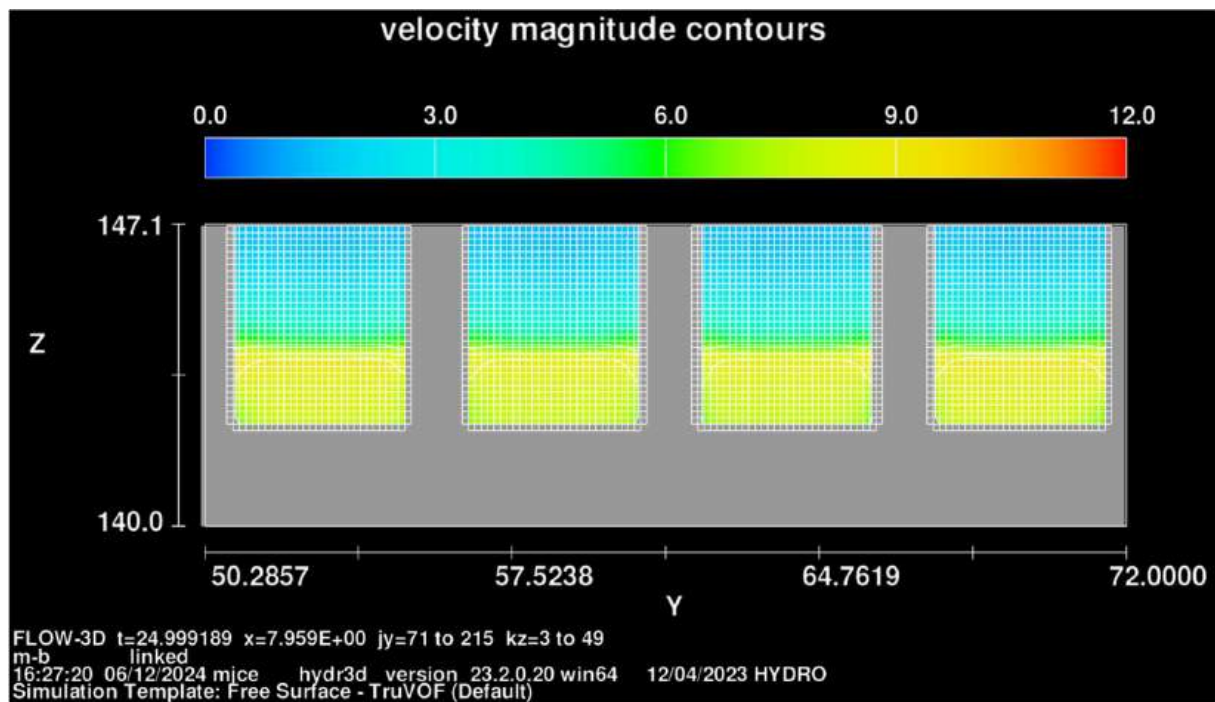


Abbildung 18 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

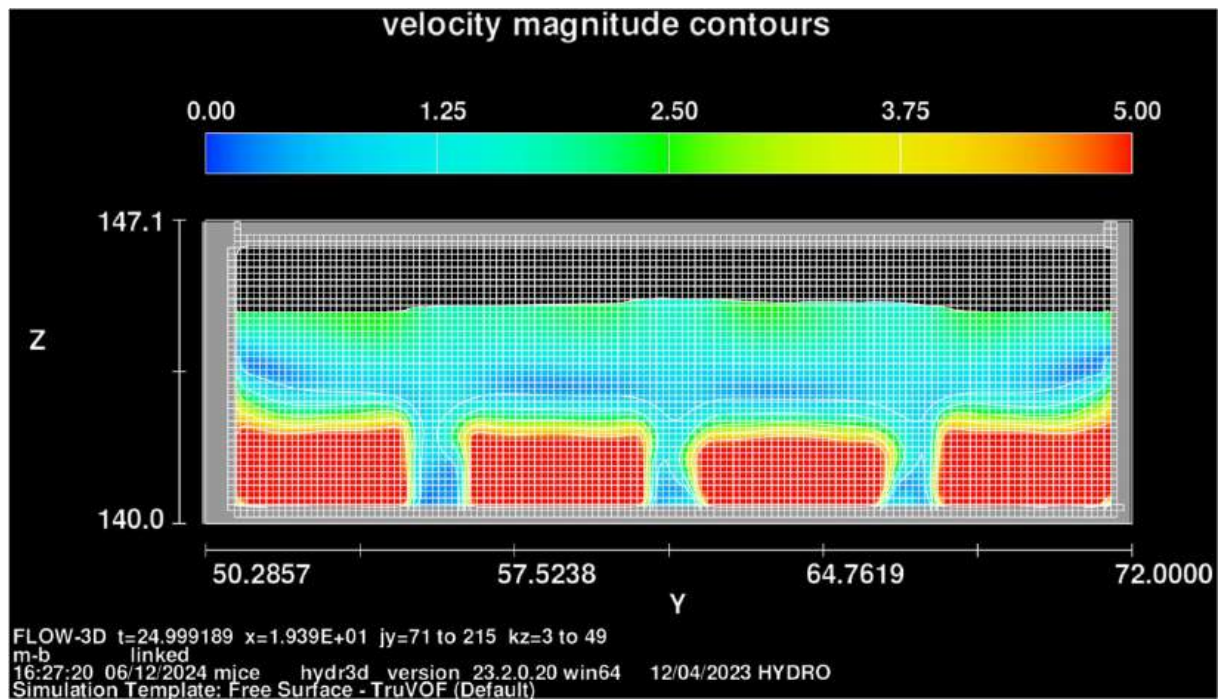


Abbildung 19 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

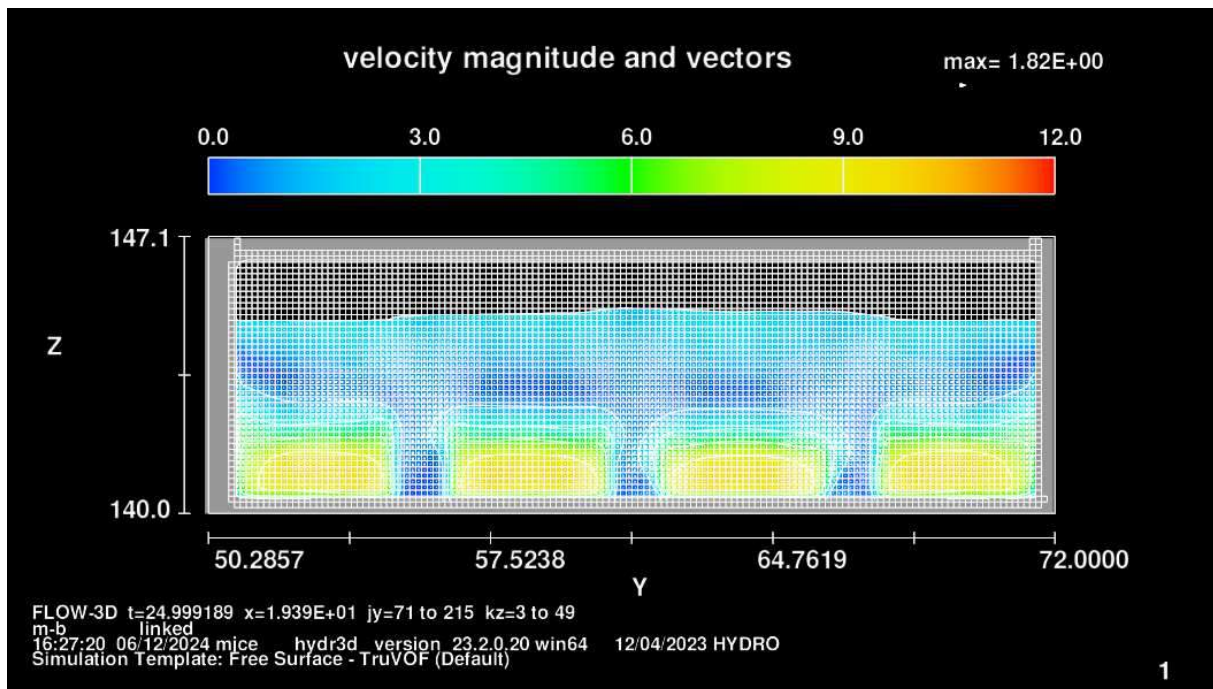


Abbildung 20 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

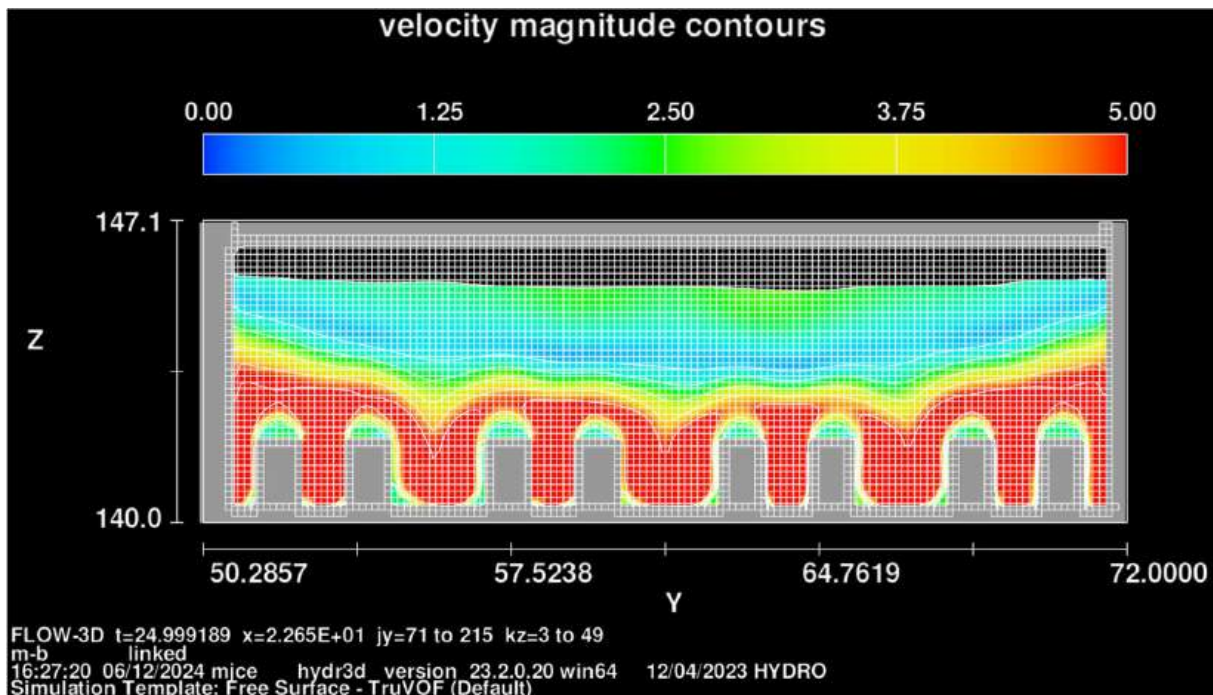


Abbildung 21 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]



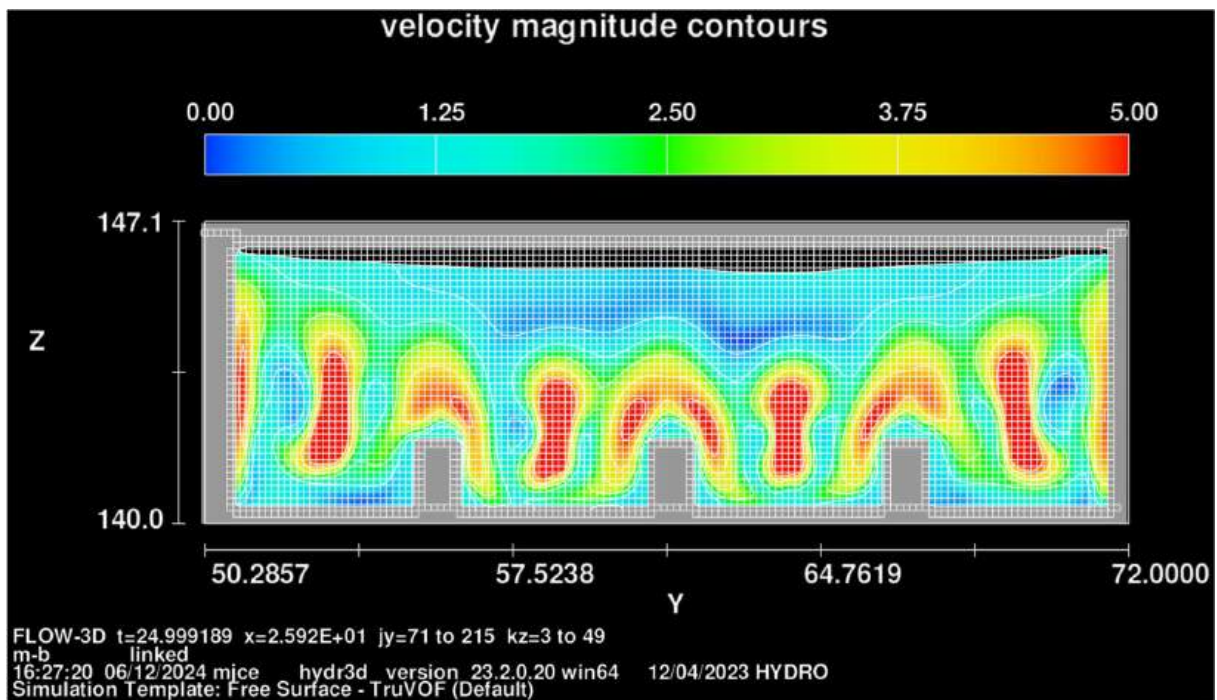


Abbildung 22 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

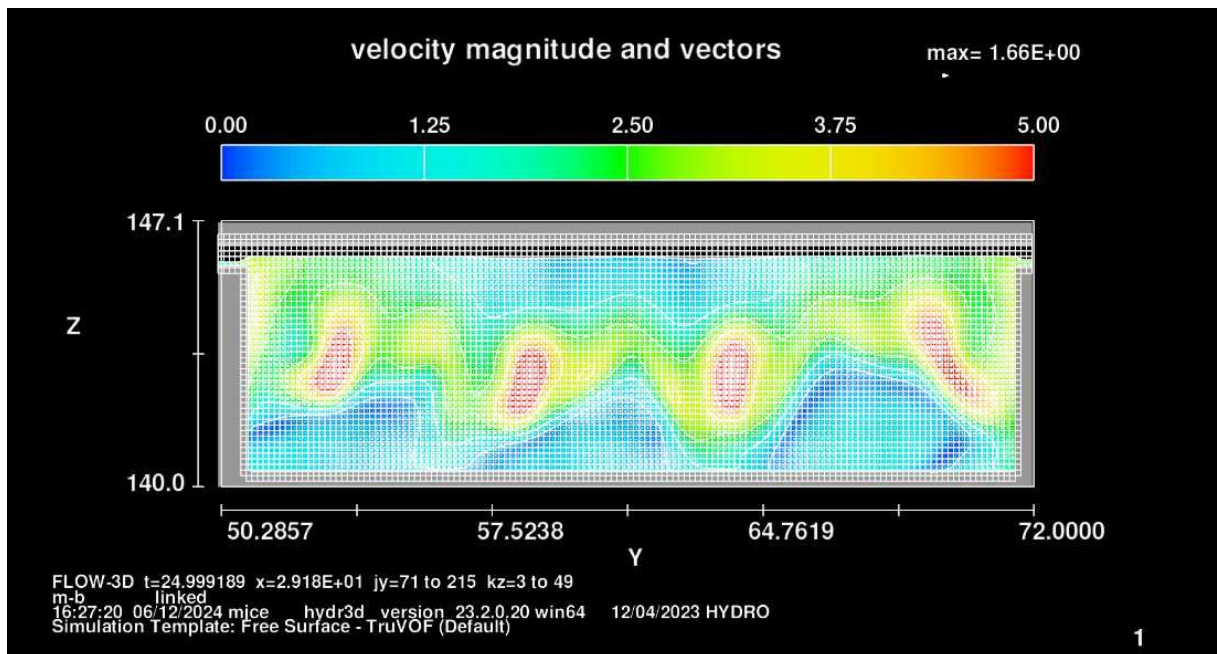


Abbildung 23 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]

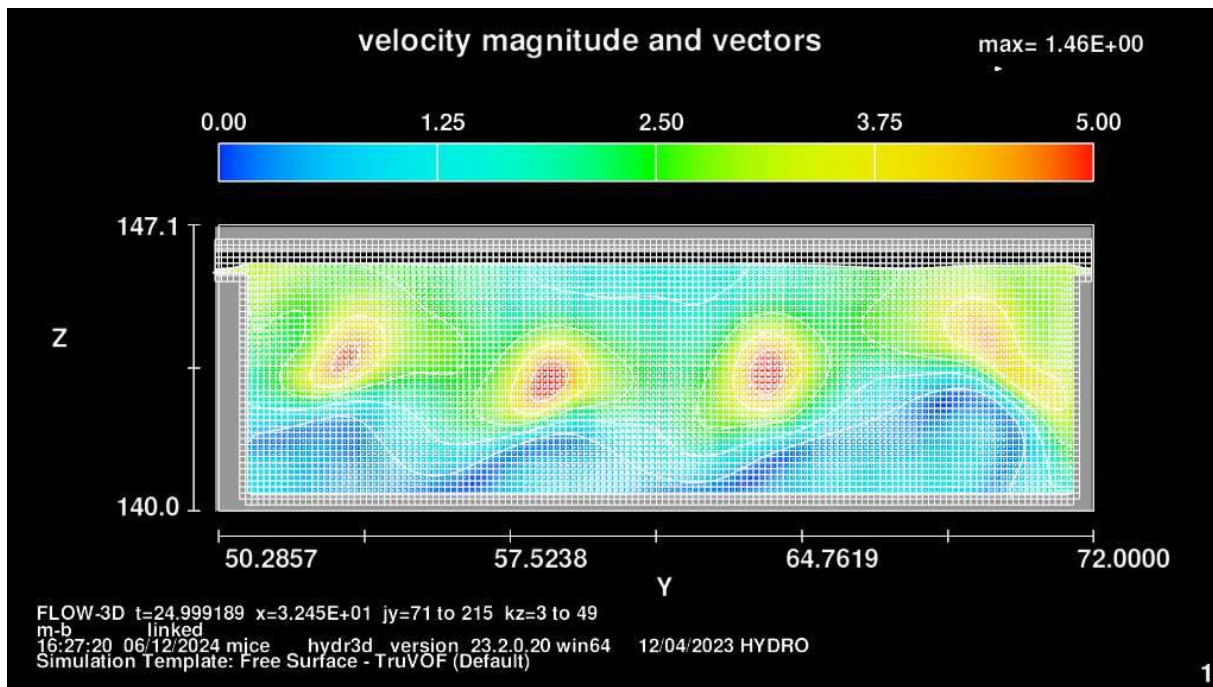


Abbildung 24 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

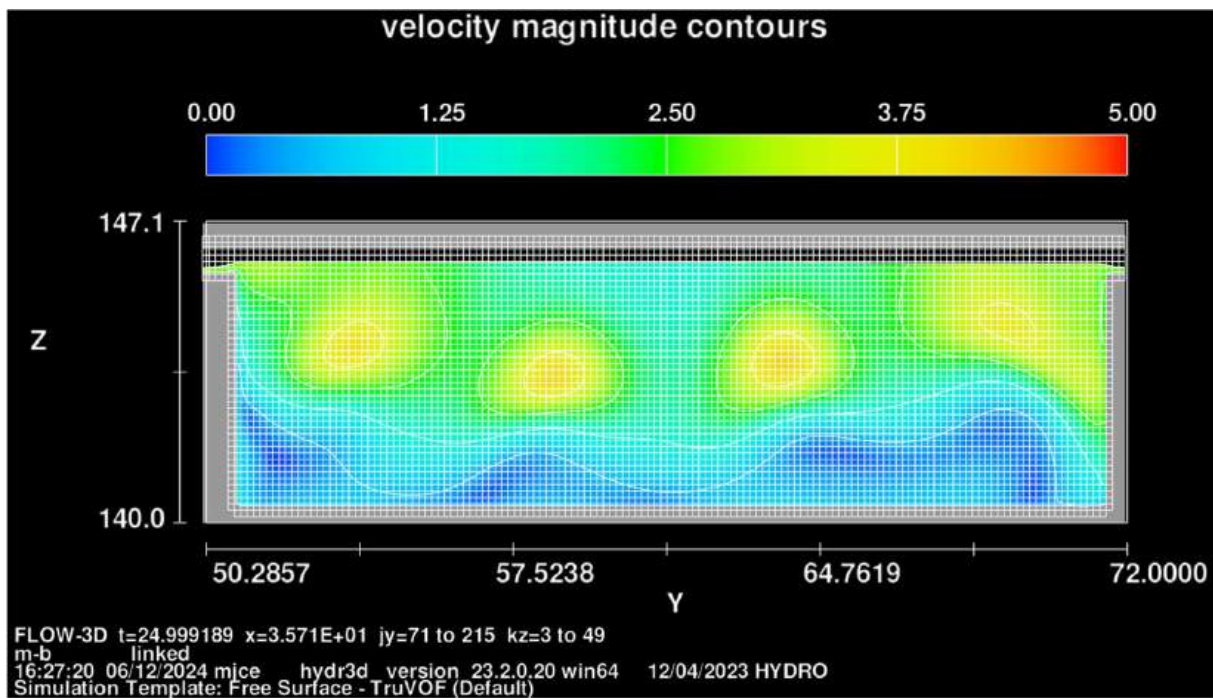


Abbildung 25 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

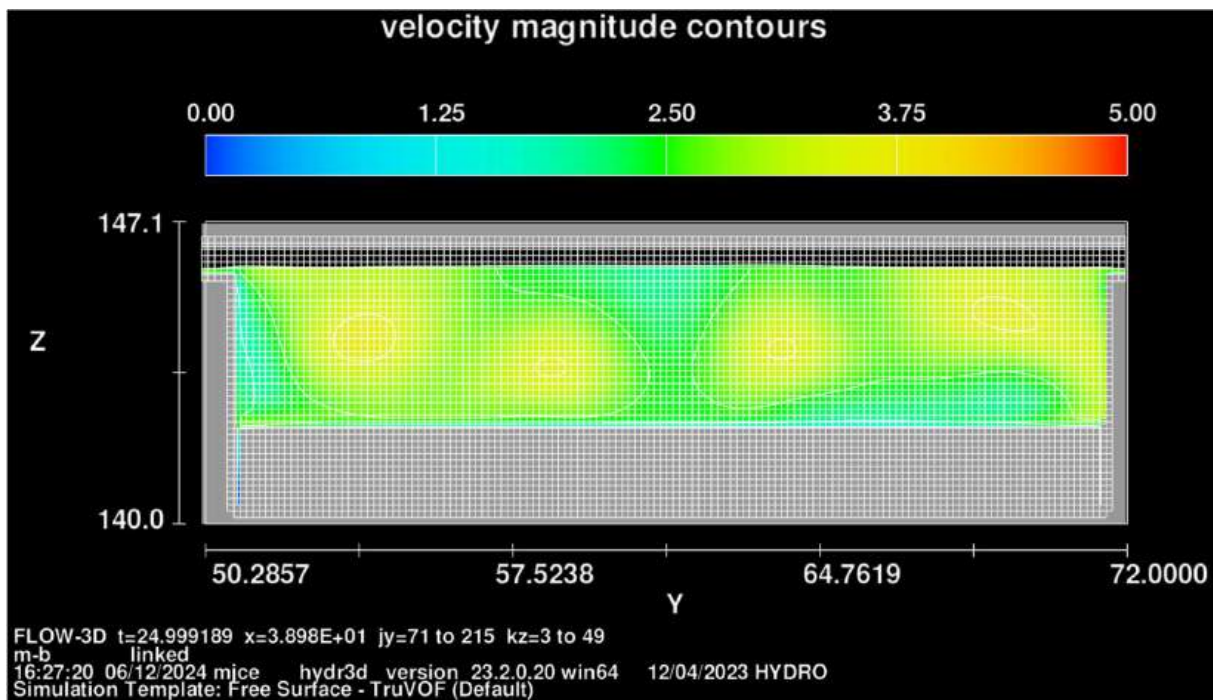


Abbildung 26 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

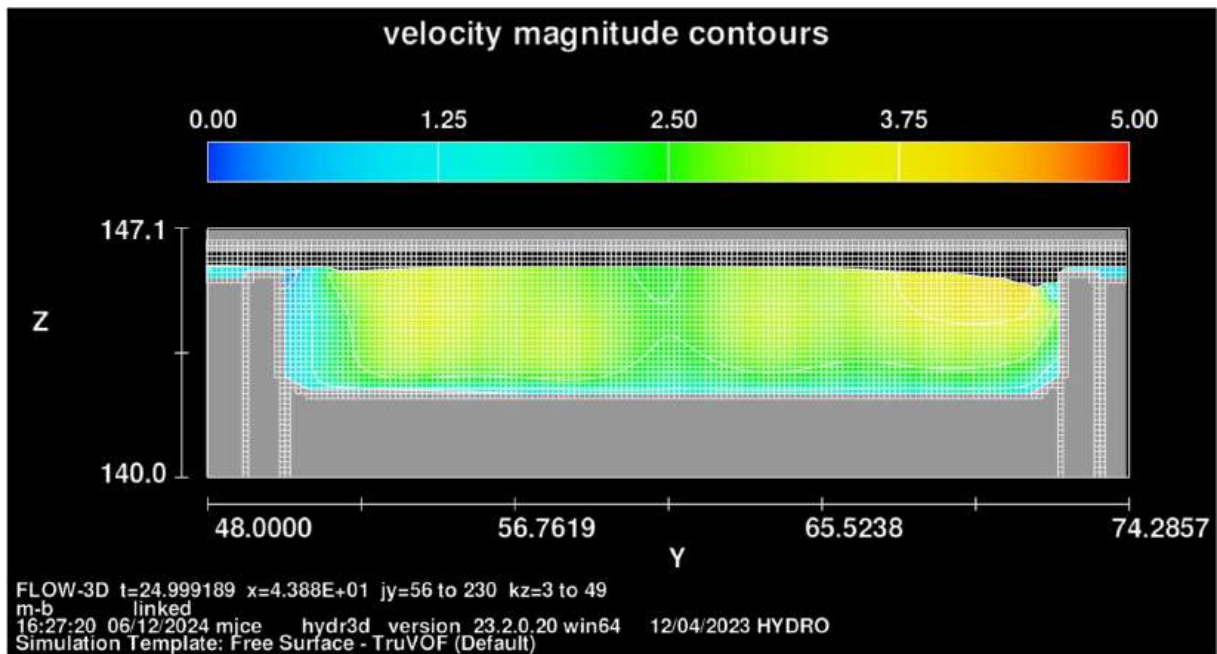


Abbildung 27 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]



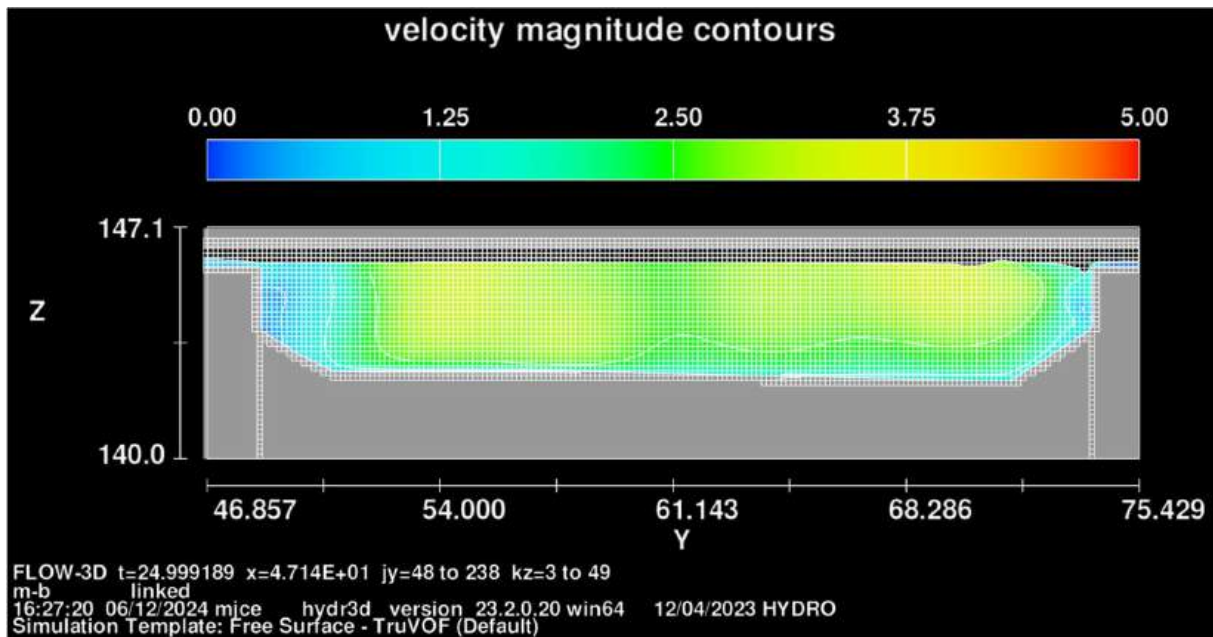


Abbildung 28 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

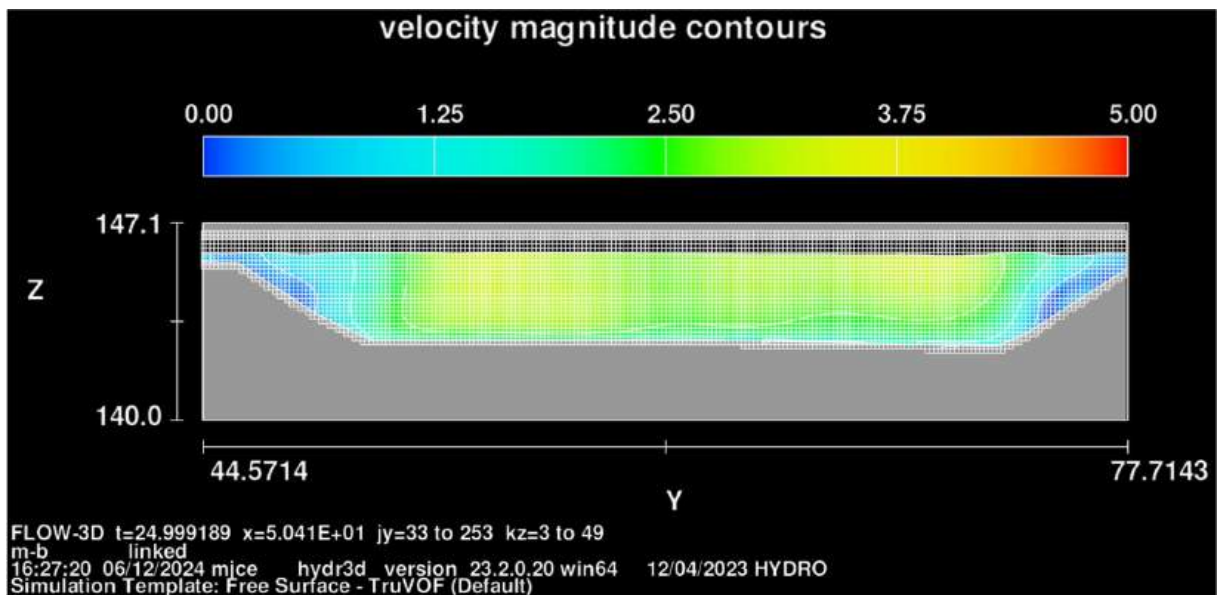


Abbildung 29 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]

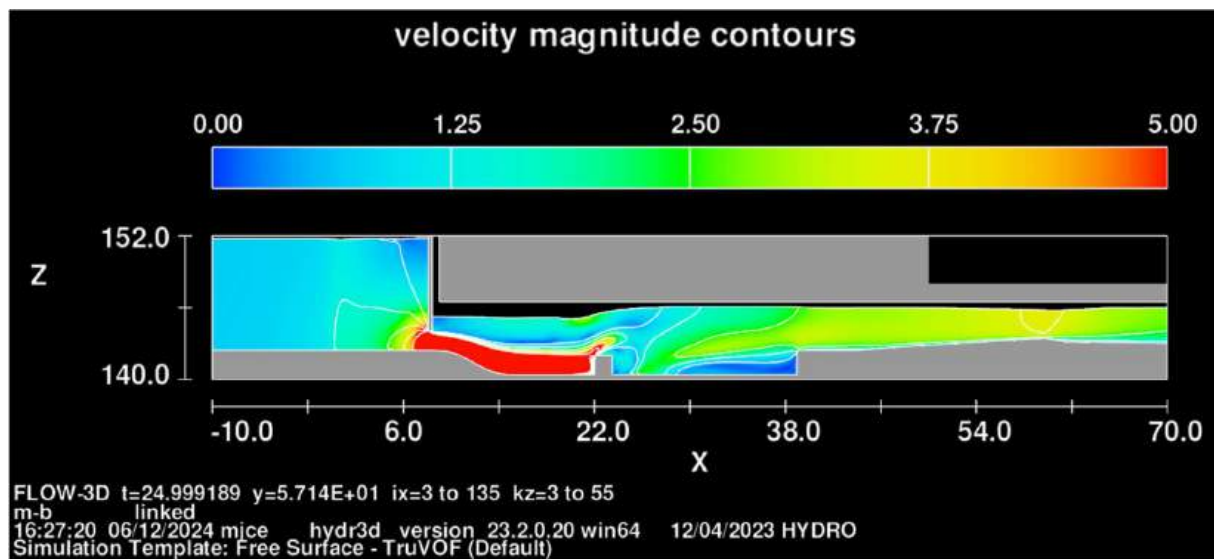


Abbildung 30 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]

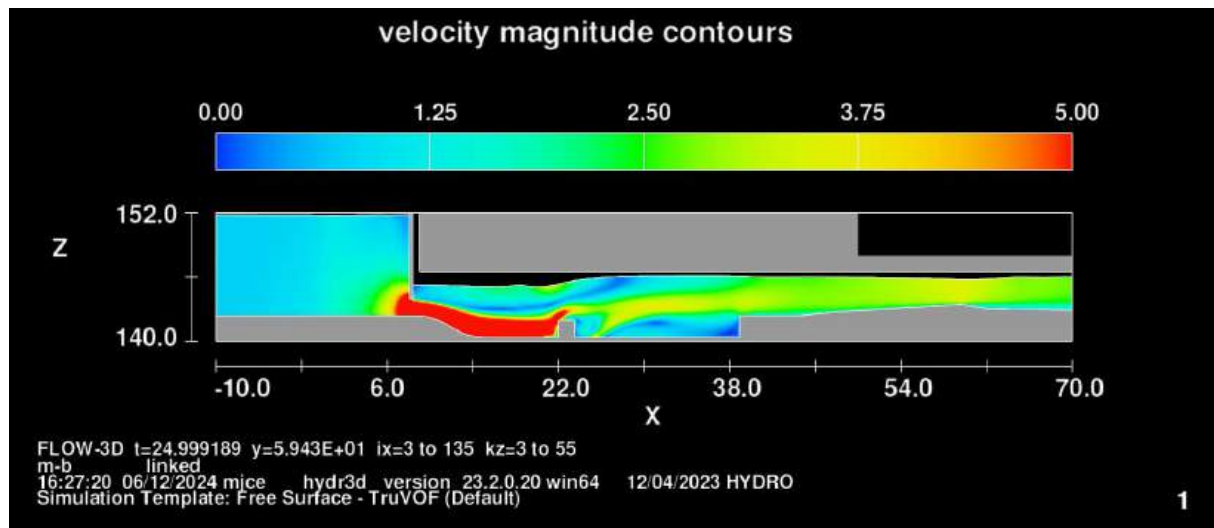


Abbildung 31 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,4m [m/s]



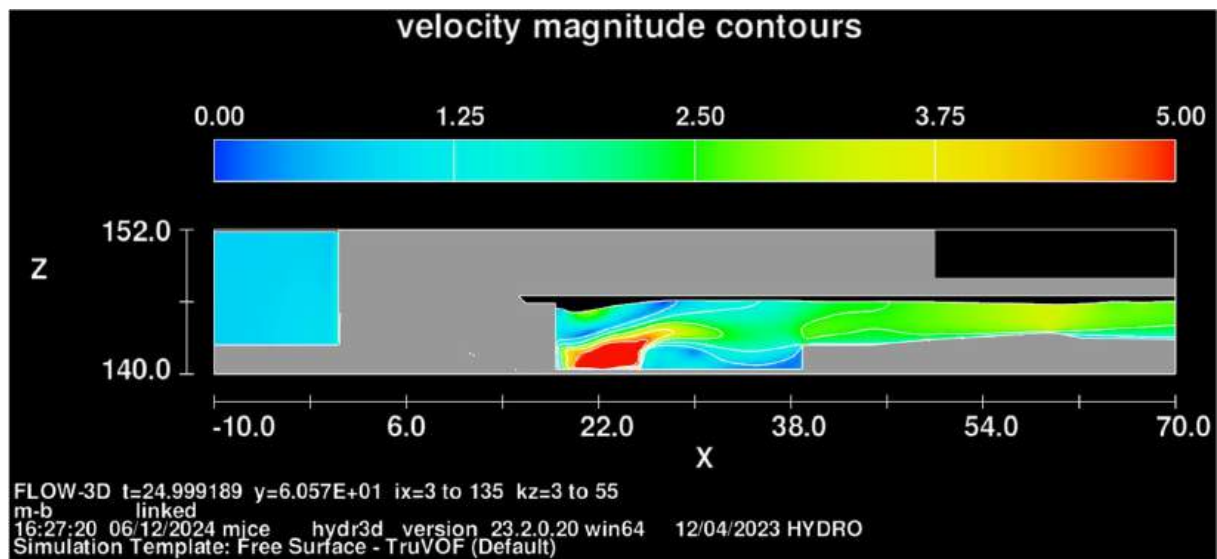


Abbildung 32 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,6 m [m/s]

## 5 Gesamtmodell 115 - Tosbeckenoptimierung

BHQ1 (n); Tosbeckenlänge **22 m**; Eintiefung 2,0 m; 11 SK; Schützöffnung 1,62 m;  $Q_{\text{ges}}=203 \text{ m}^3/\text{s}$

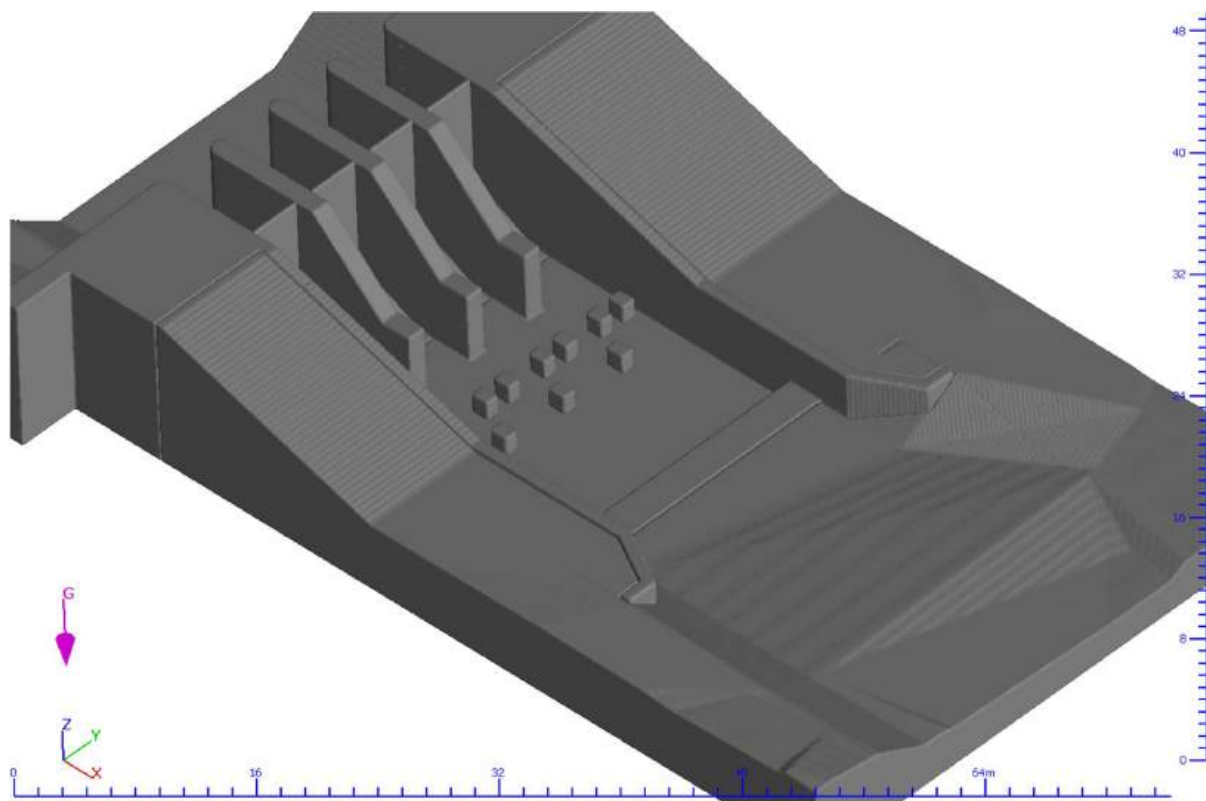


Abbildung 33 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 115

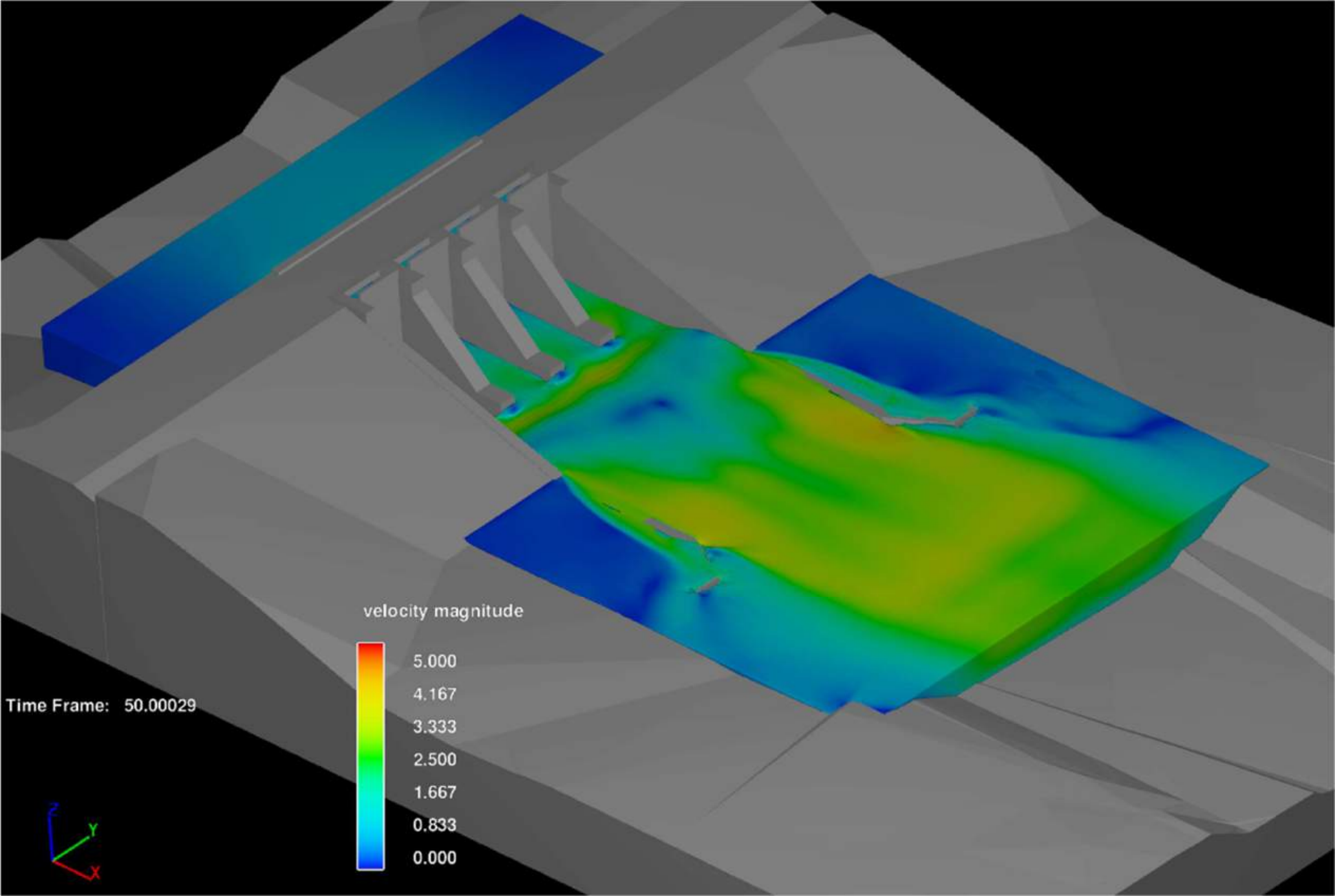


Abbildung 34 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

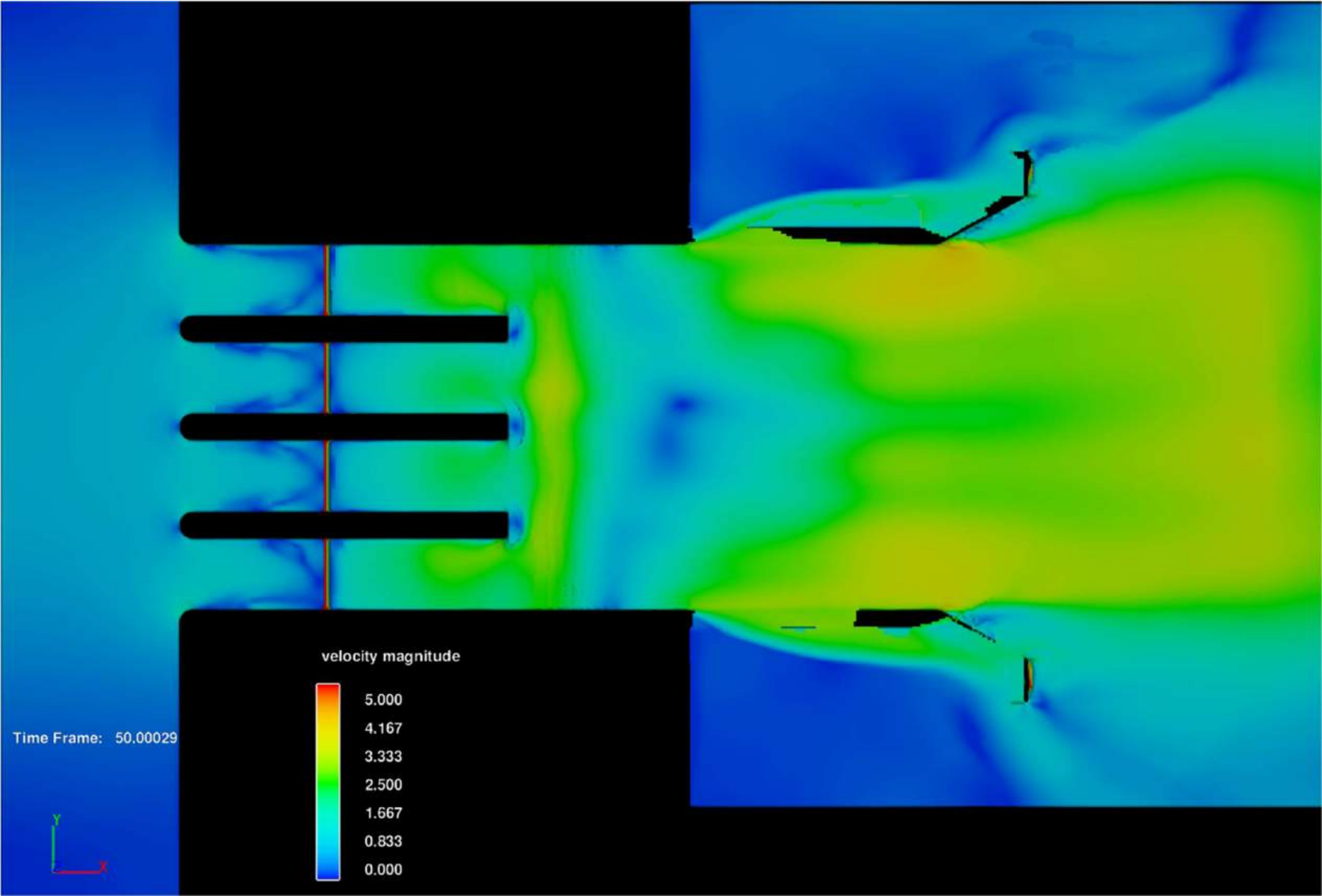


Abbildung 35 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

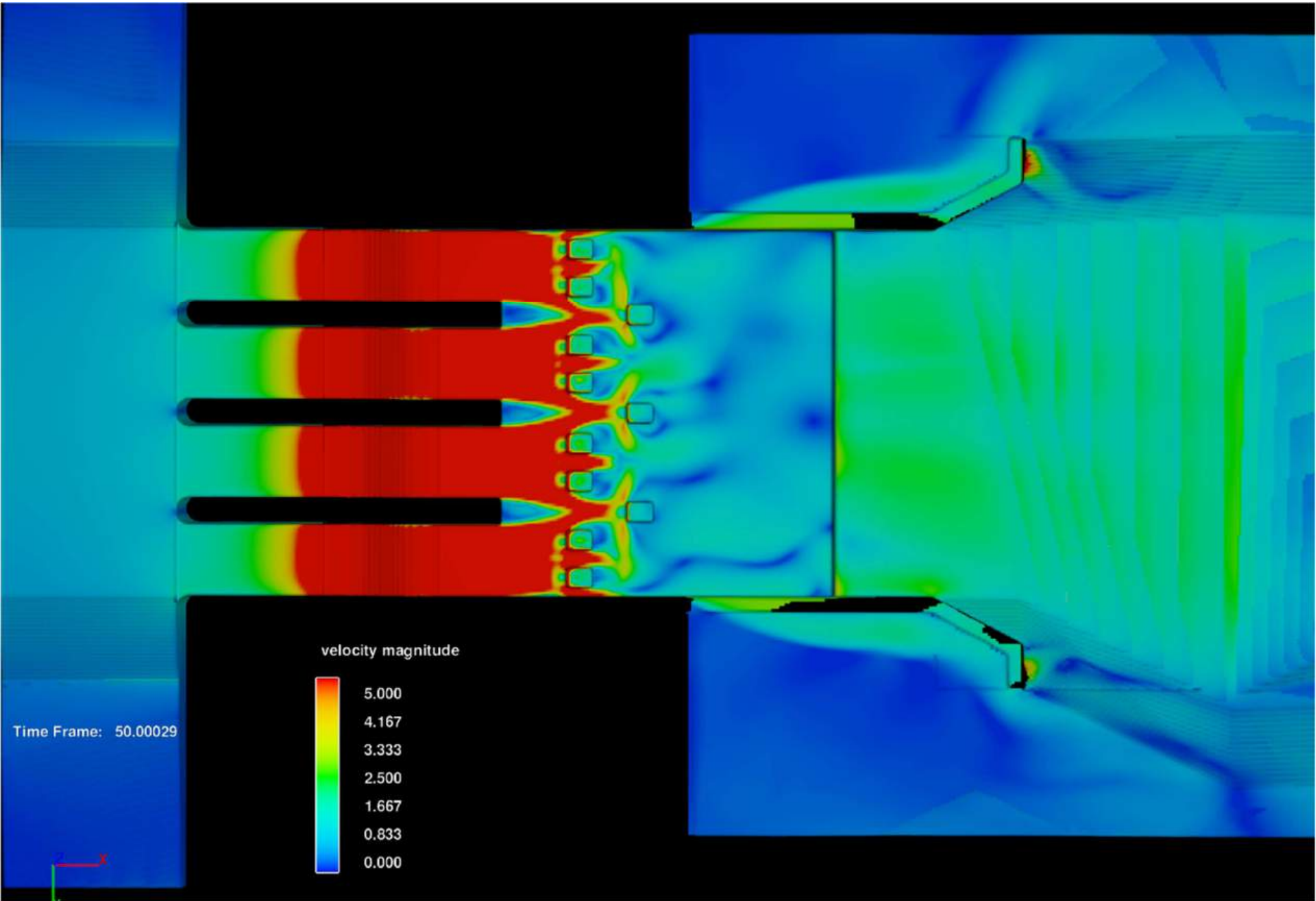


Abbildung 36 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]



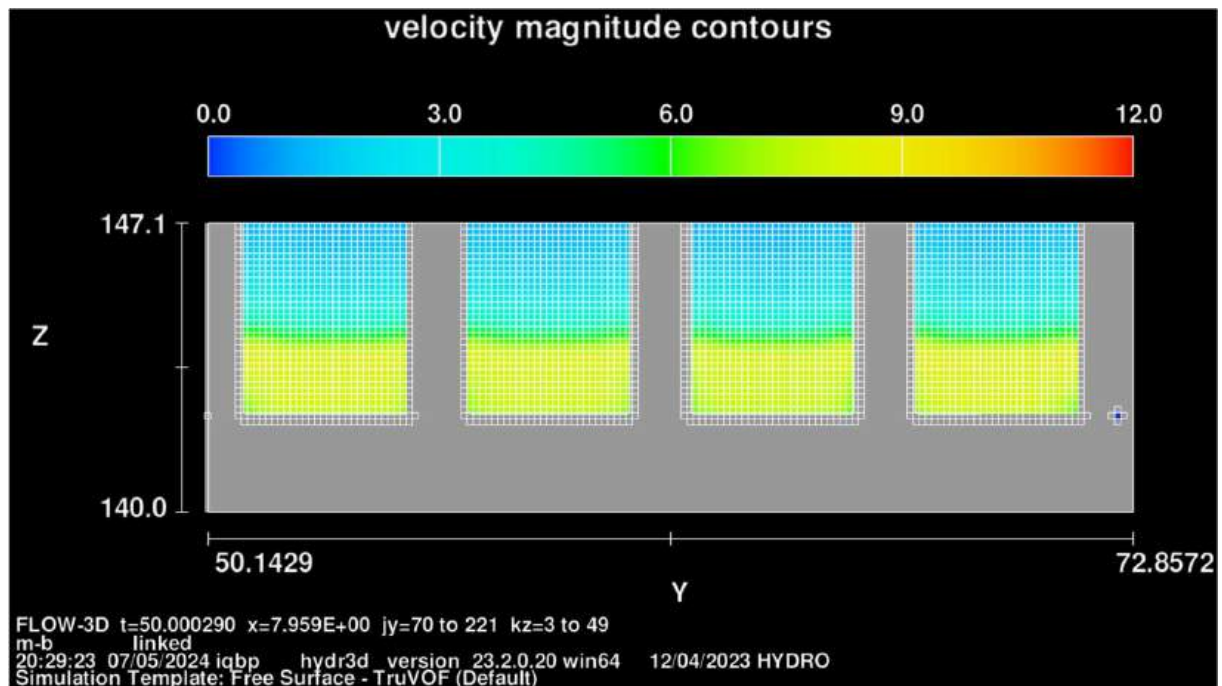


Abbildung 37 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

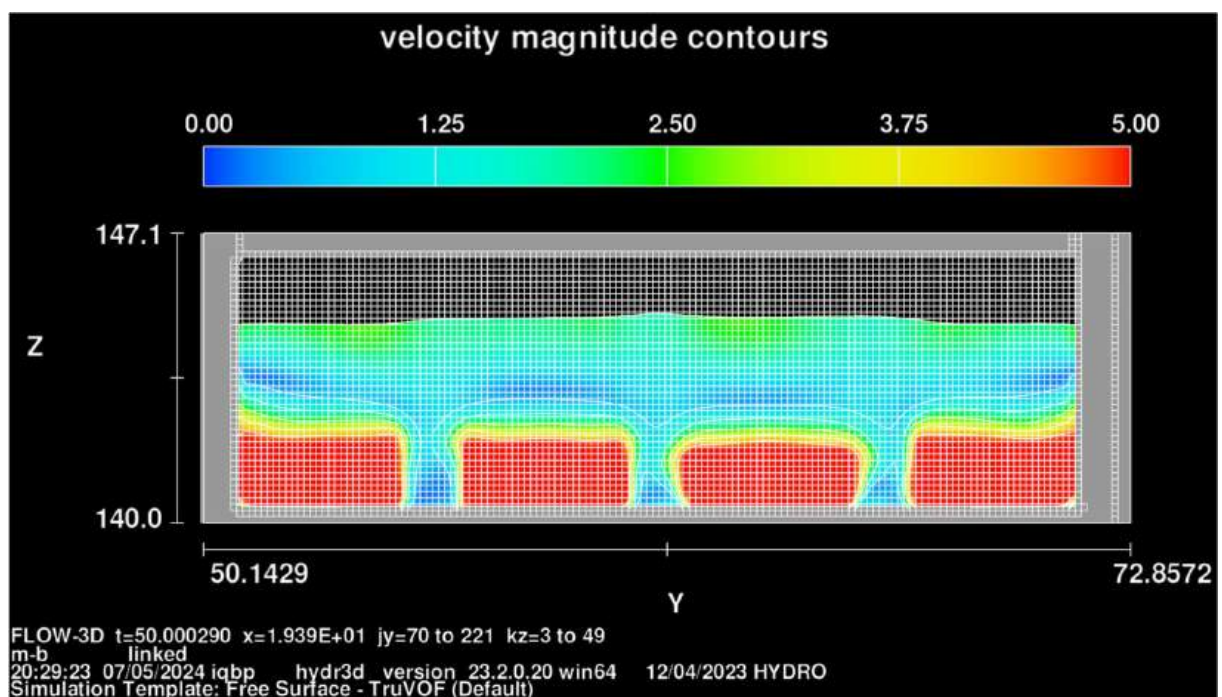


Abbildung 38 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]



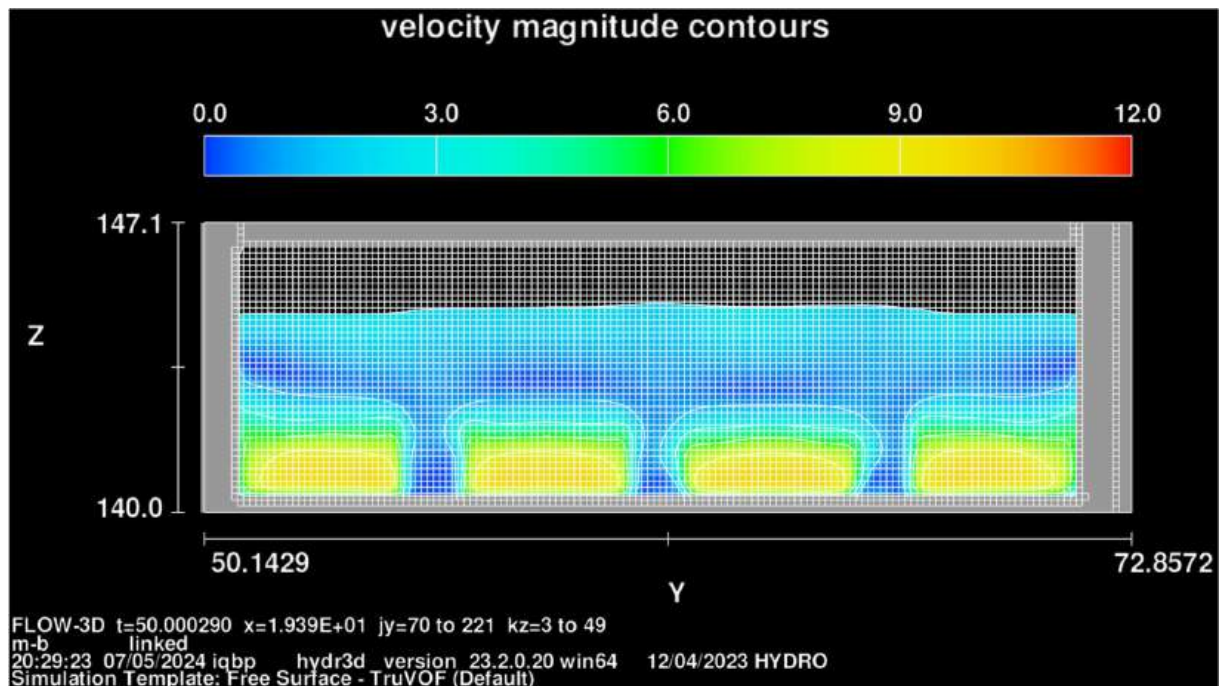


Abbildung 39 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

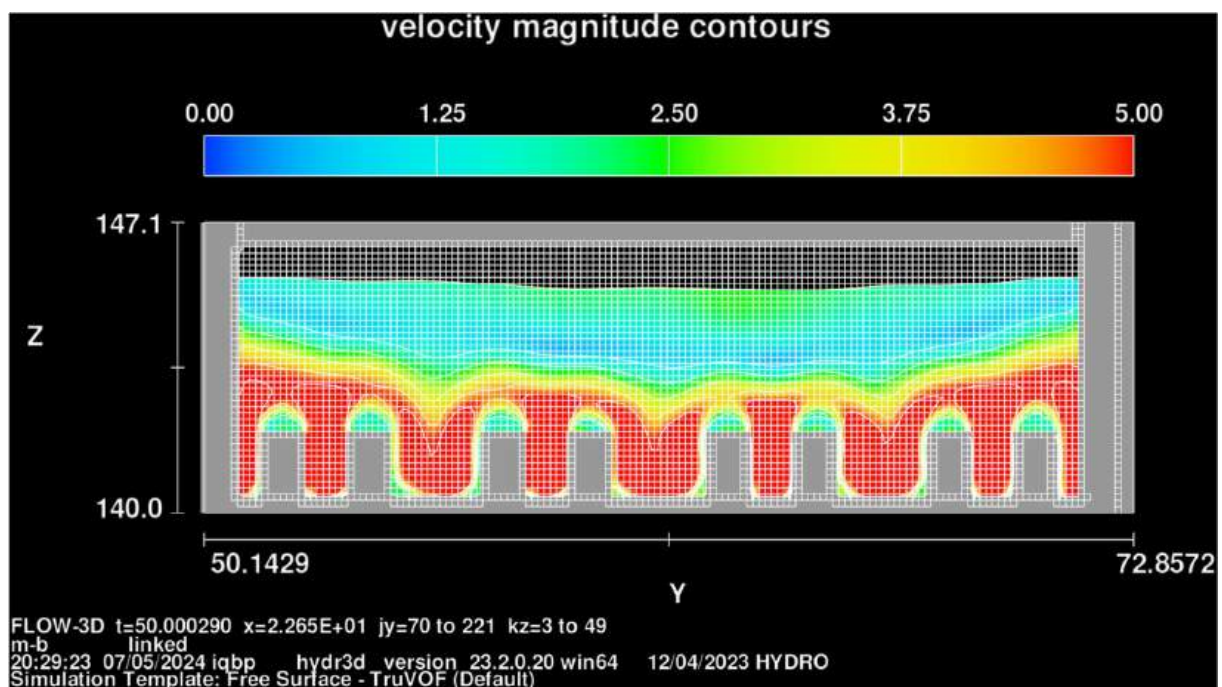


Abbildung 40 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]

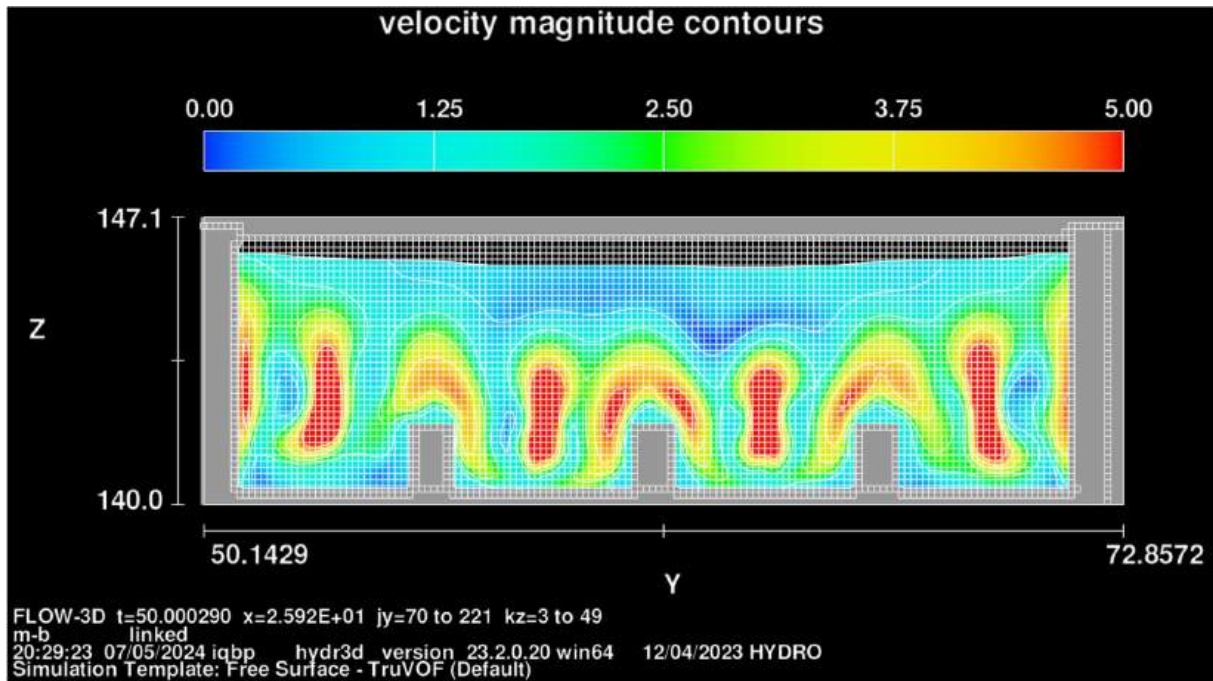


Abbildung 41 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

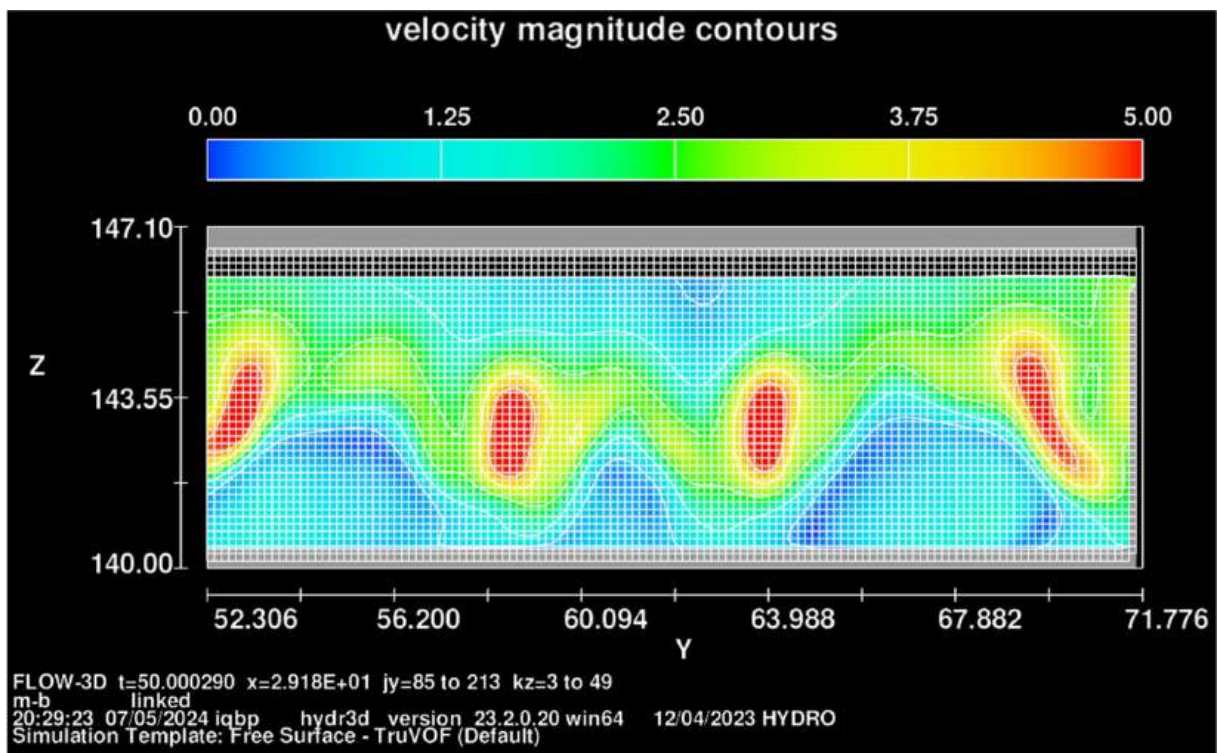


Abbildung 42 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]



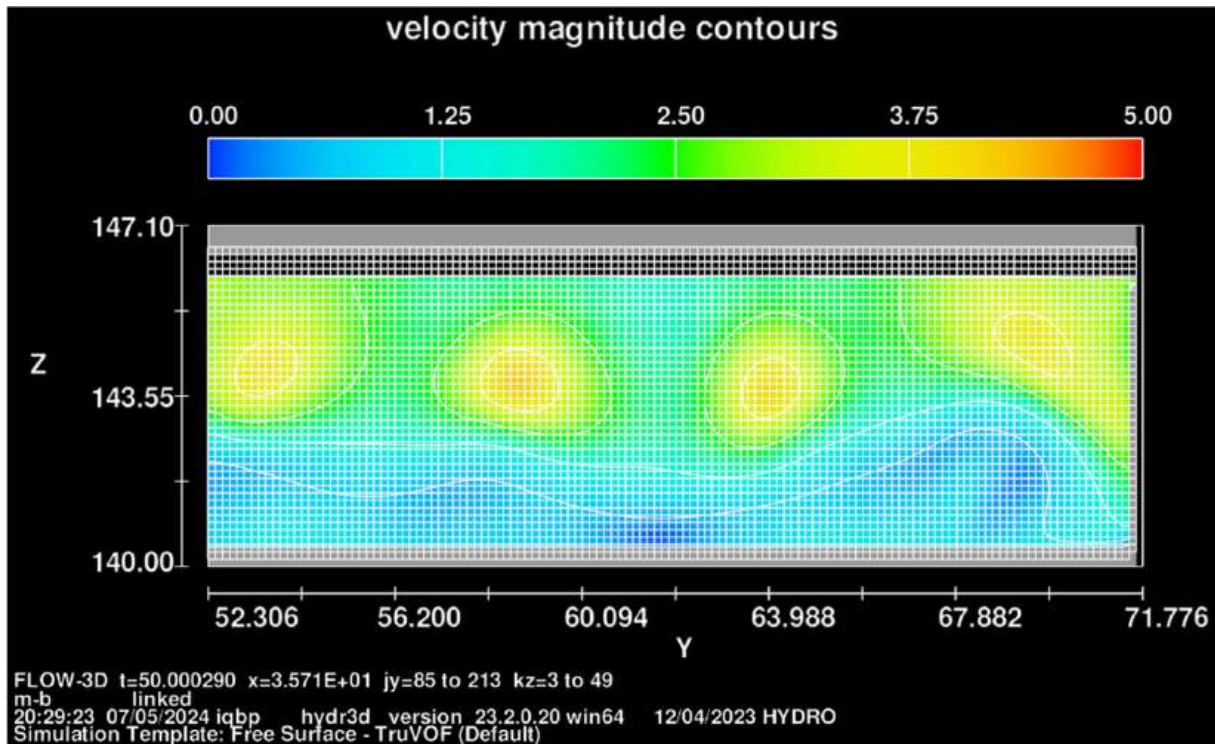


Abbildung 43 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

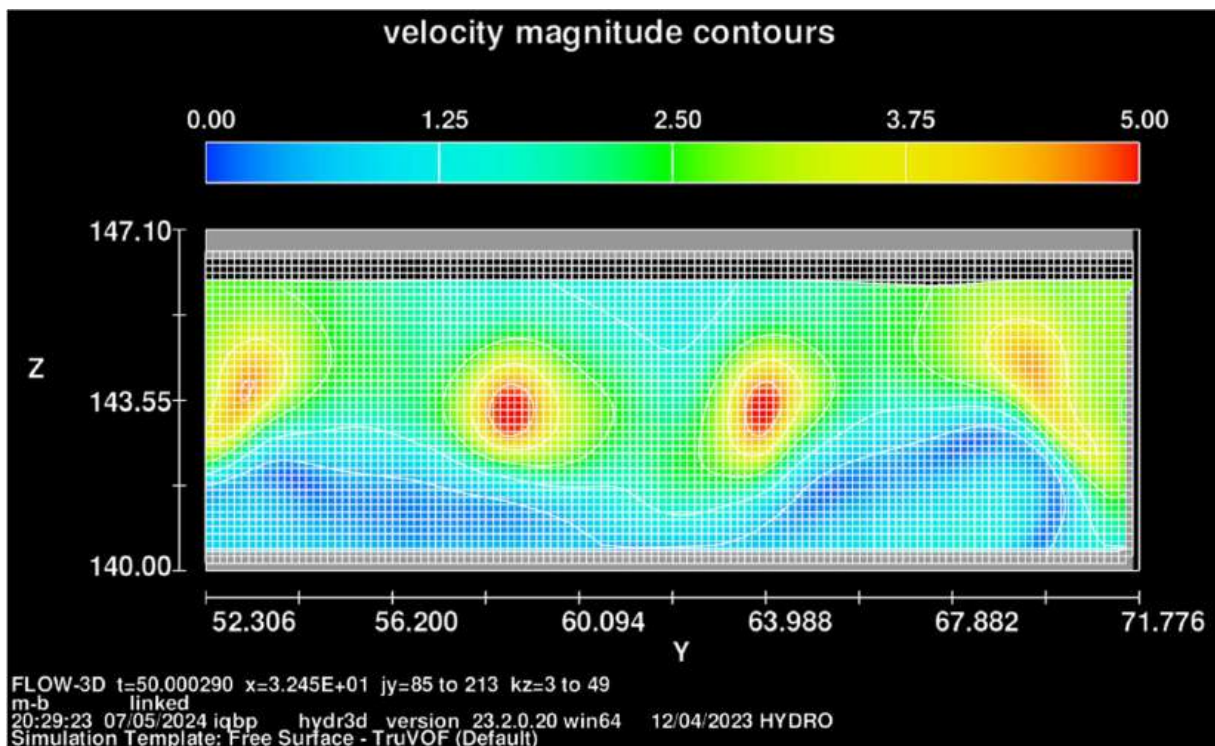


Abbildung 44 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

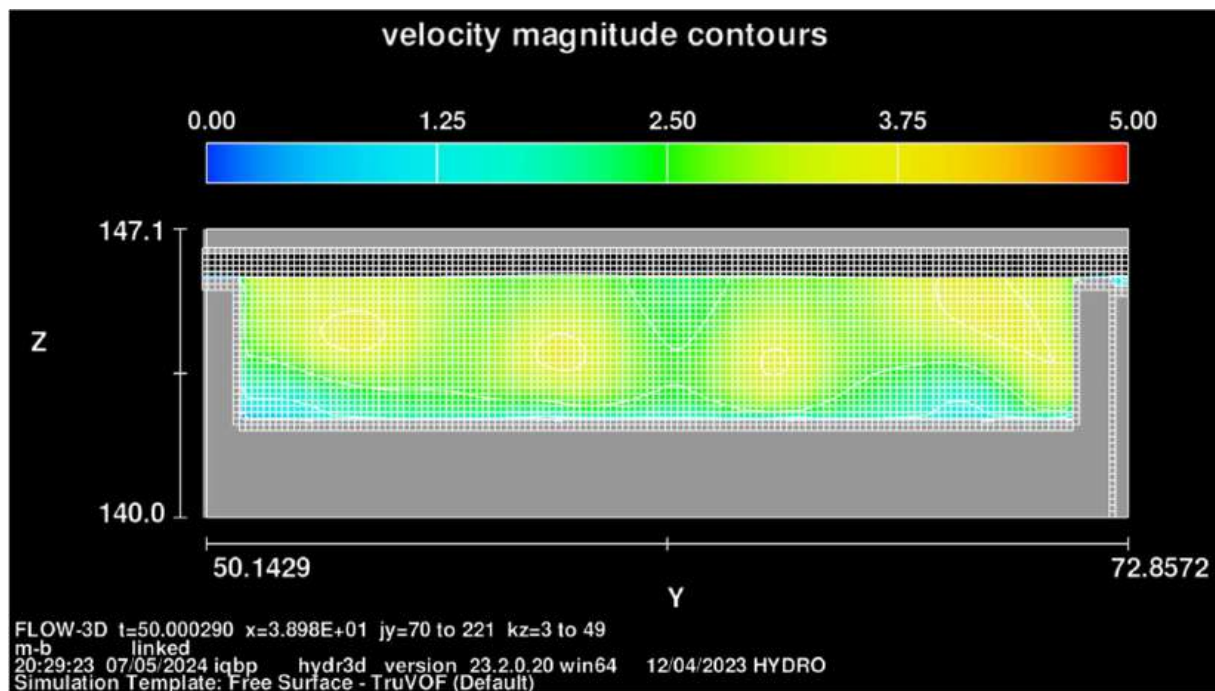


Abbildung 45 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

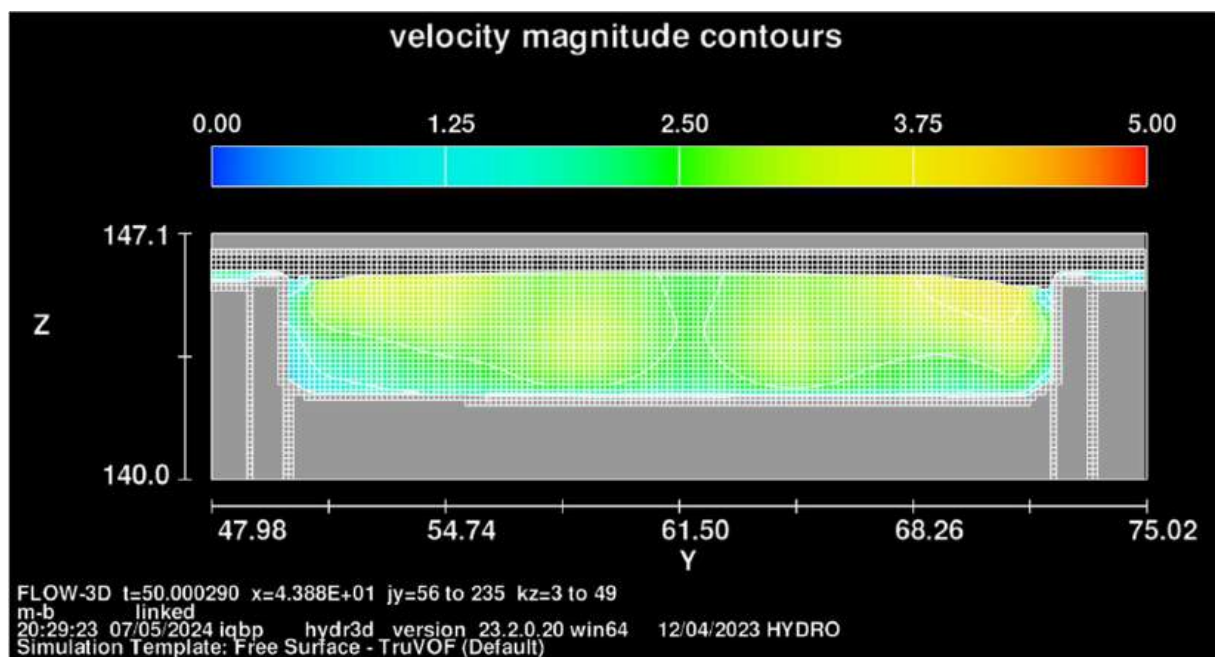


Abbildung 46 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]



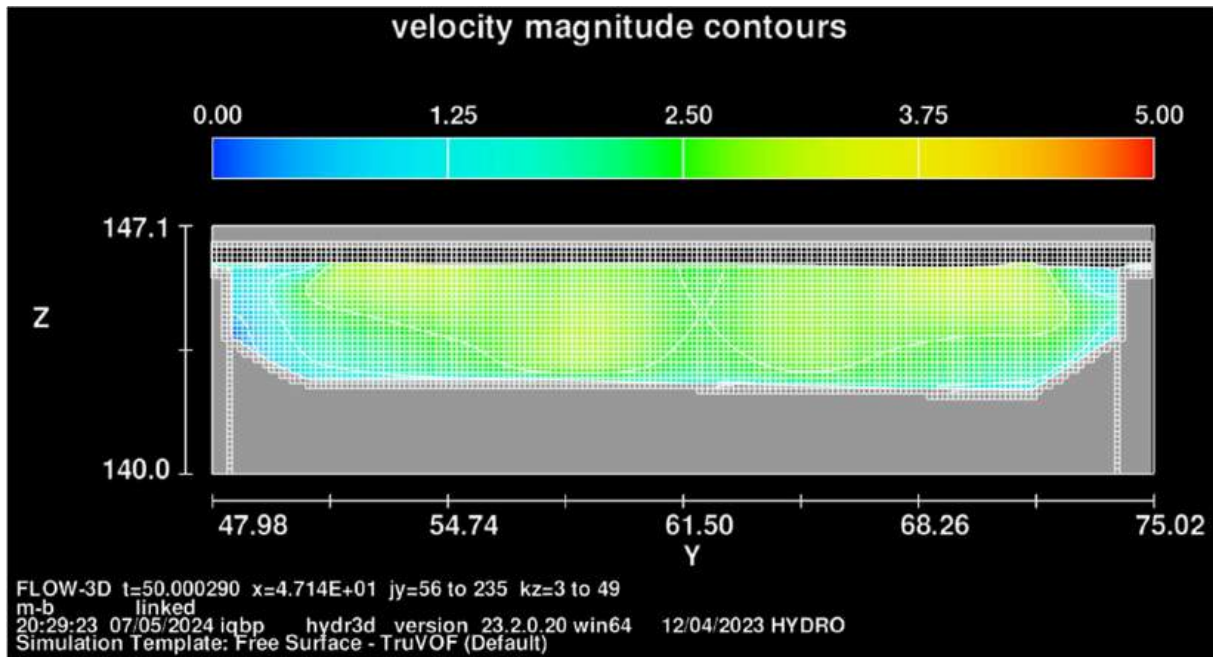


Abbildung 47 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

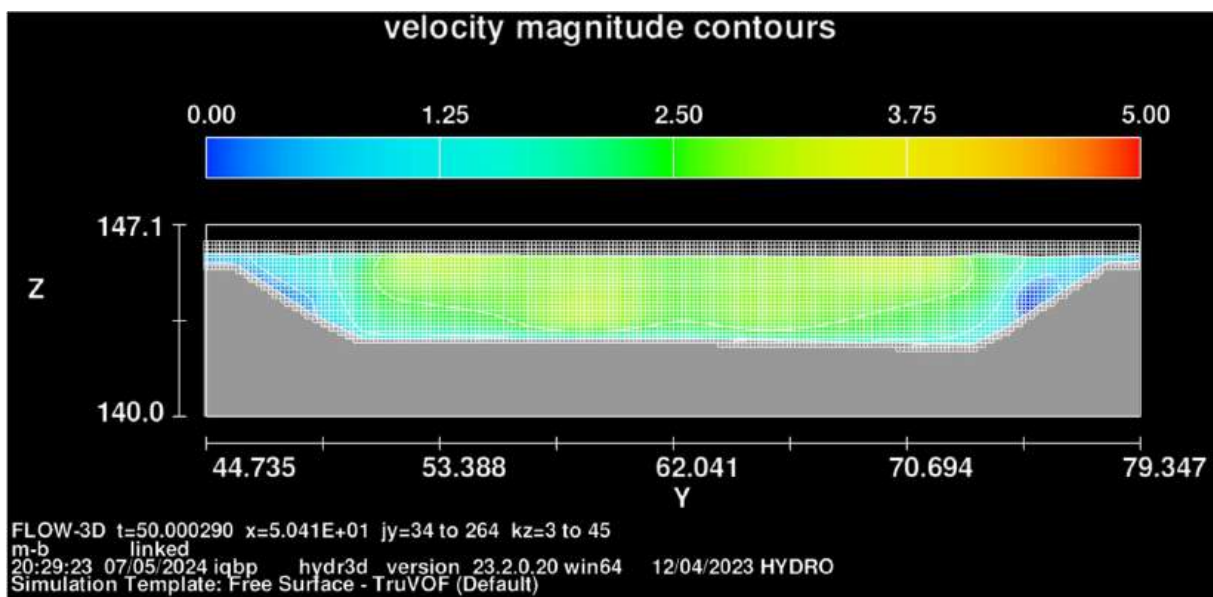


Abbildung 48 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]

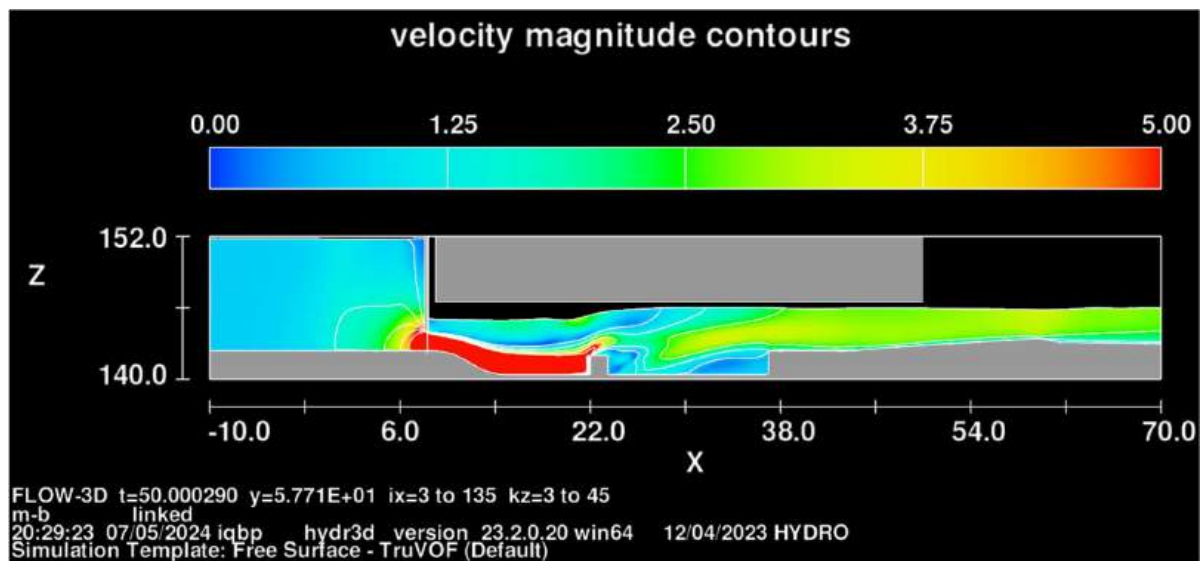


Abbildung 49 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,8 m [m/s]

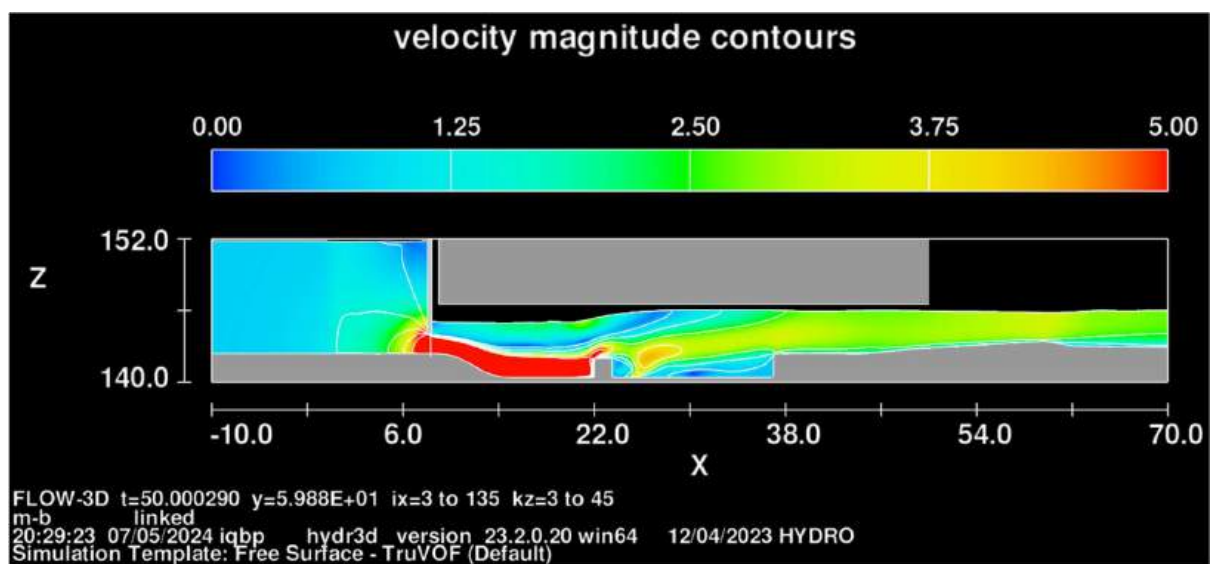


Abbildung 50 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9m [m/s]

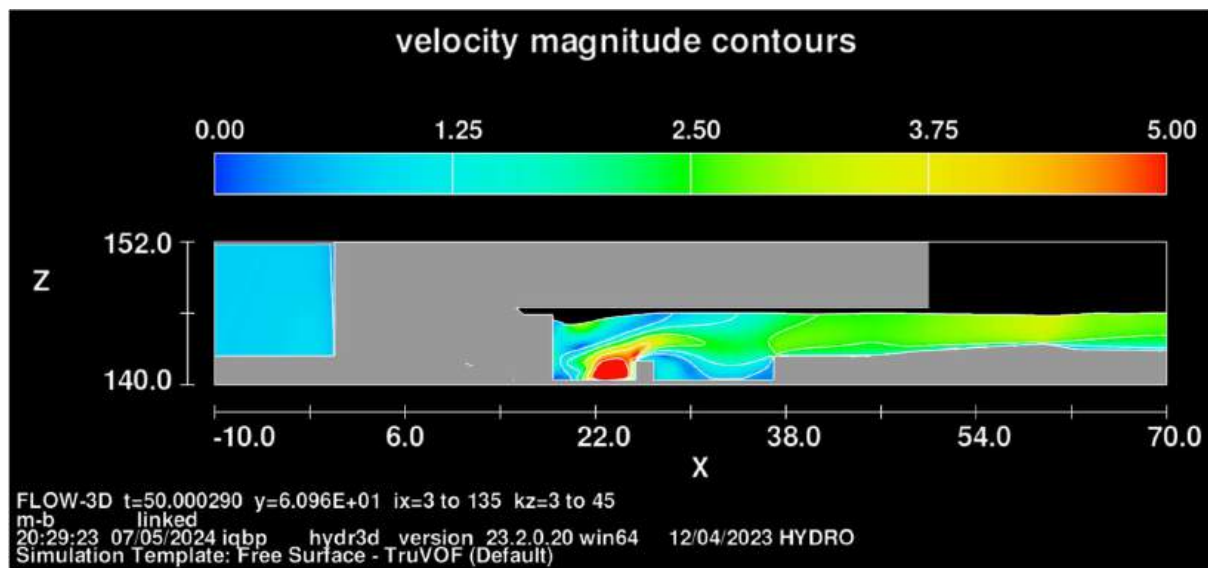


Abbildung 51 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,9 m [m/s]

## 6 Gesamtmodell 117 - Tosbeckenoptimierung

BHQ1 (n); Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK;  $Q_{\text{ges}}=202 \text{ m}^3/\text{s}$ ; **+20 cm Flügelwände**

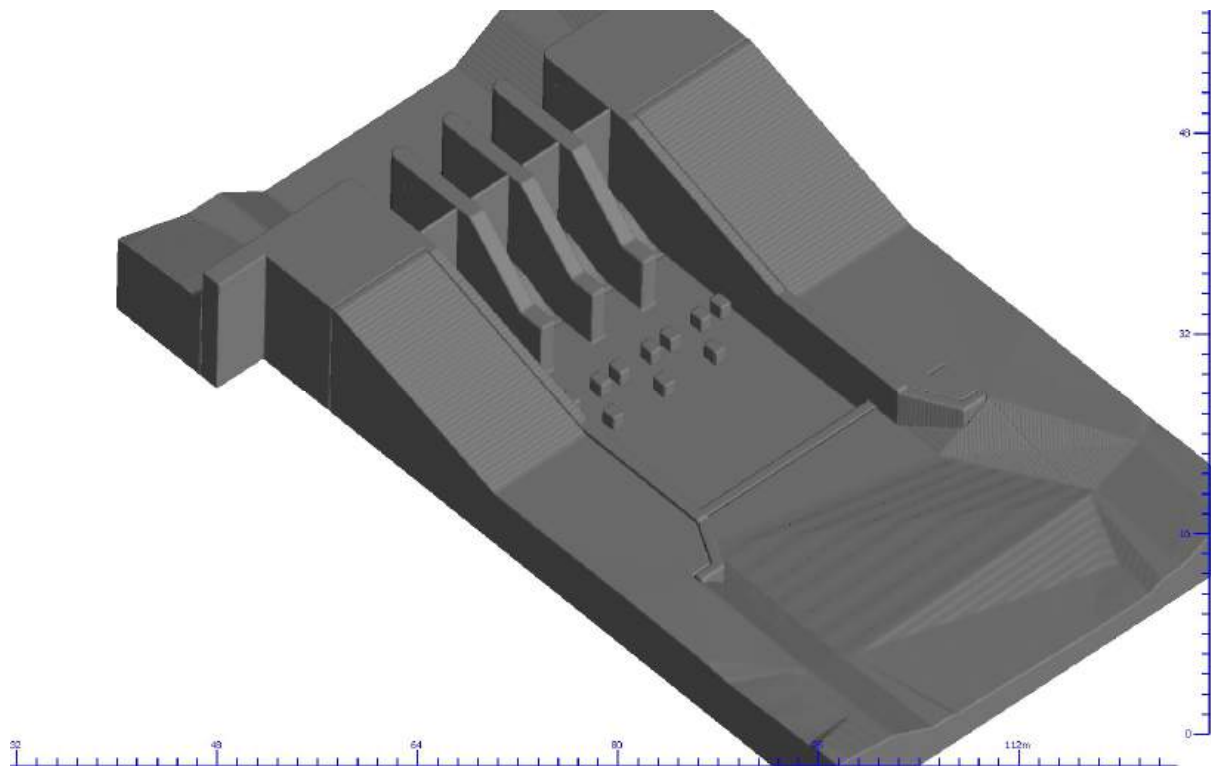


Abbildung 52 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 117



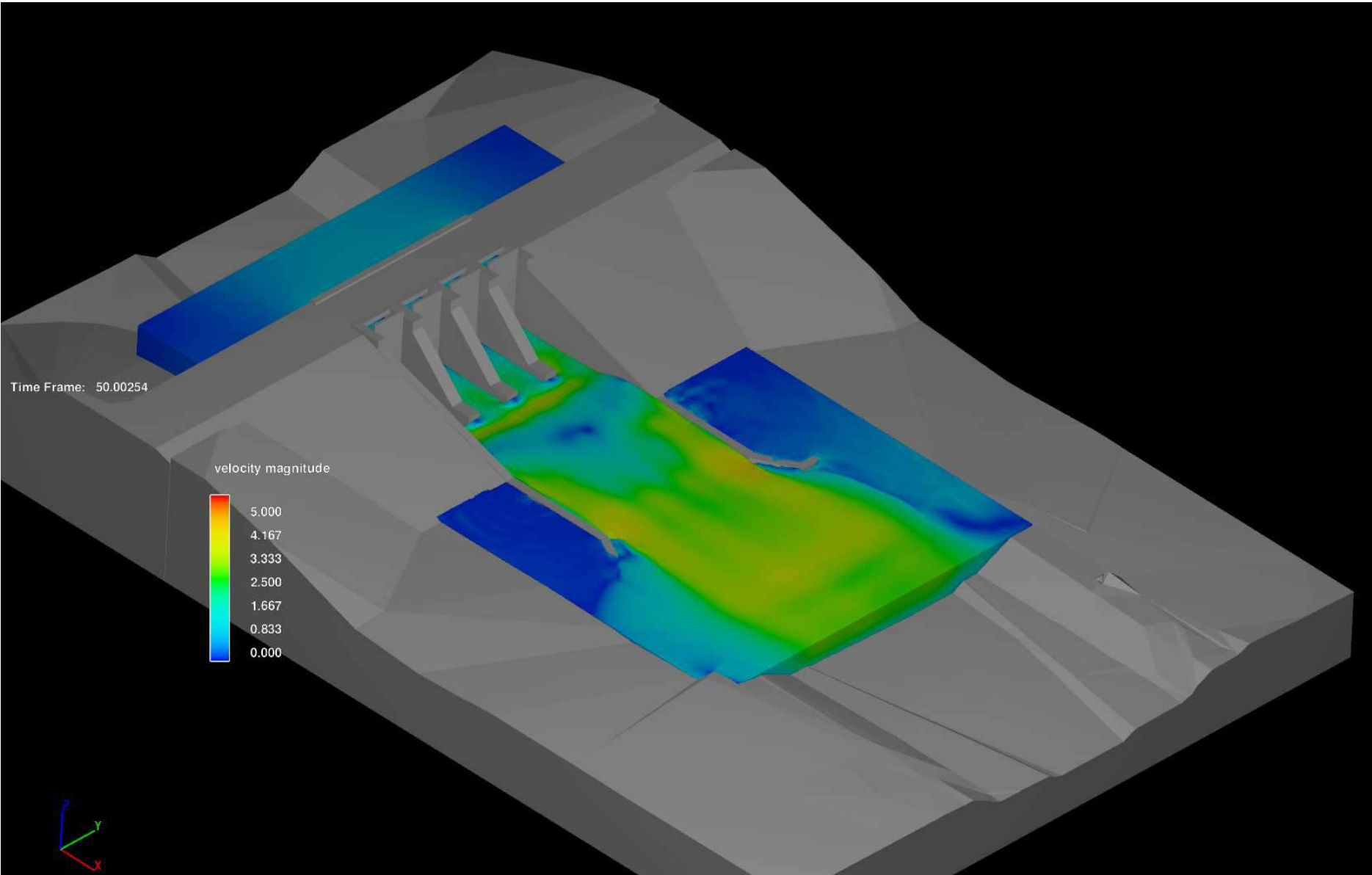


Abbildung 53 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

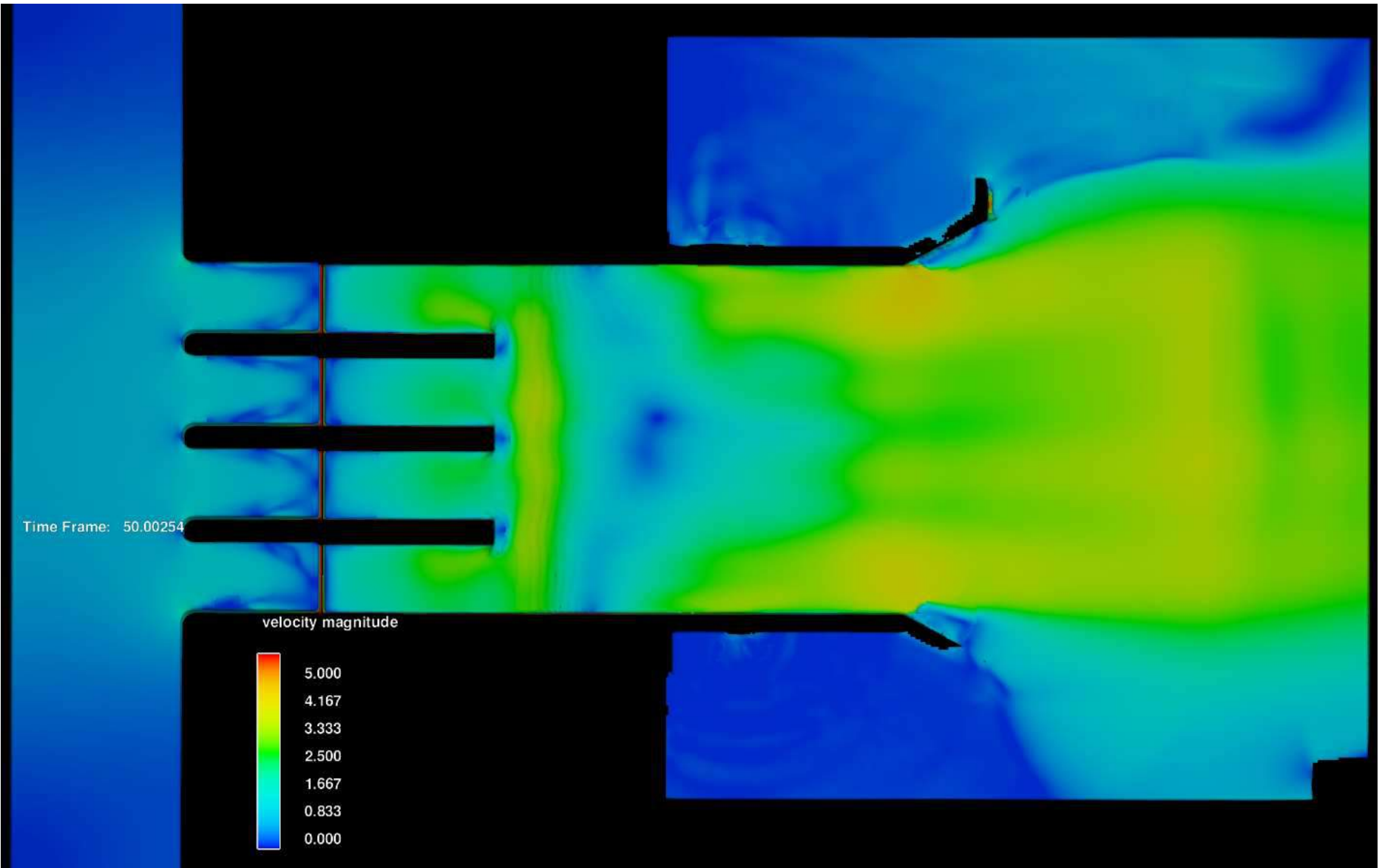


Abbildung 54 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

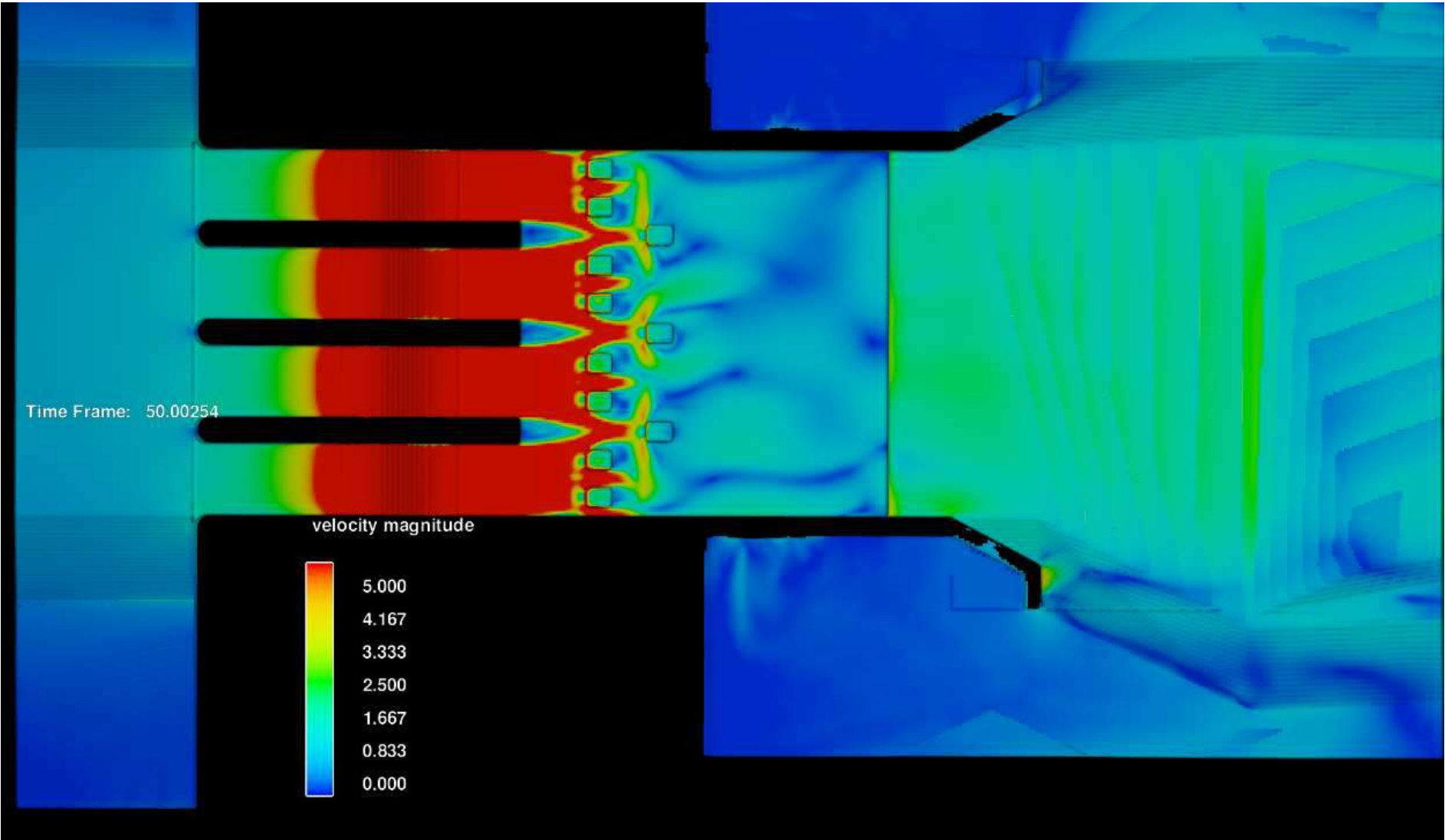


Abbildung 55 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]

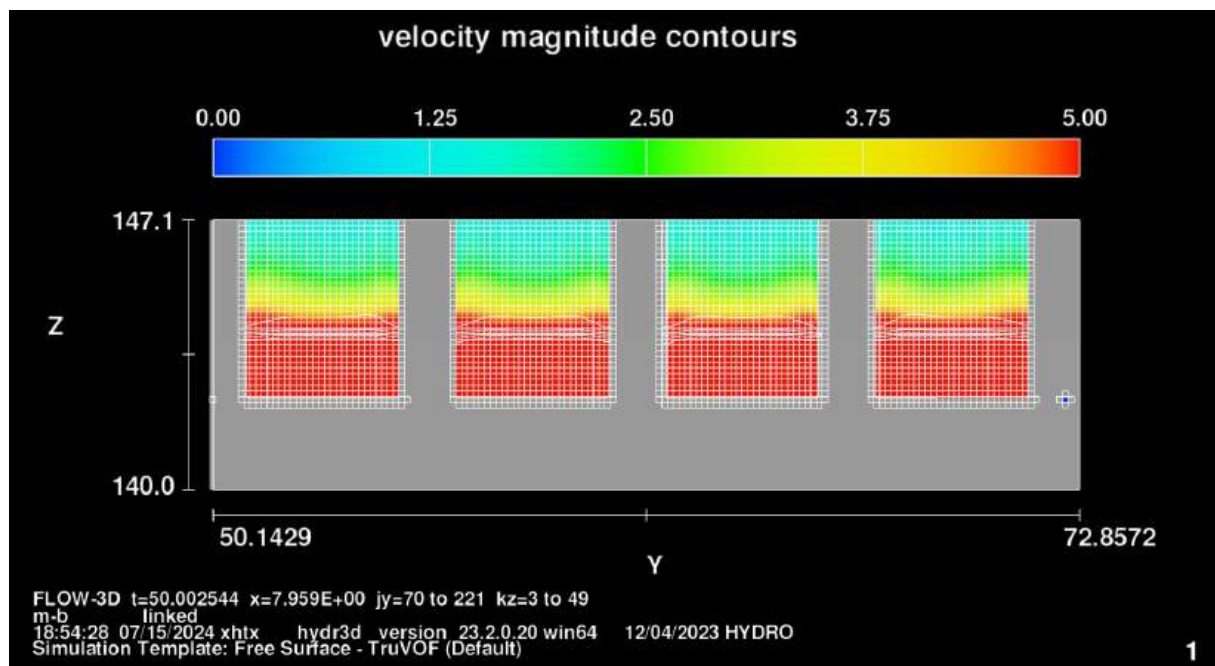


Abbildung 56 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

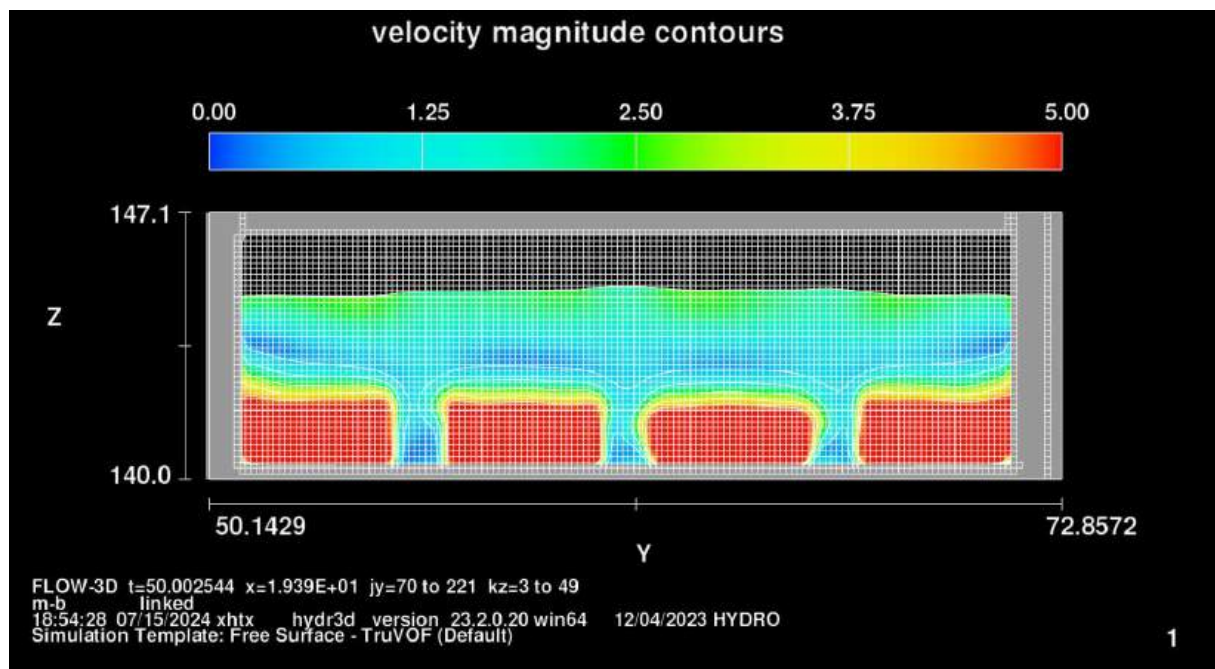


Abbildung 57 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]



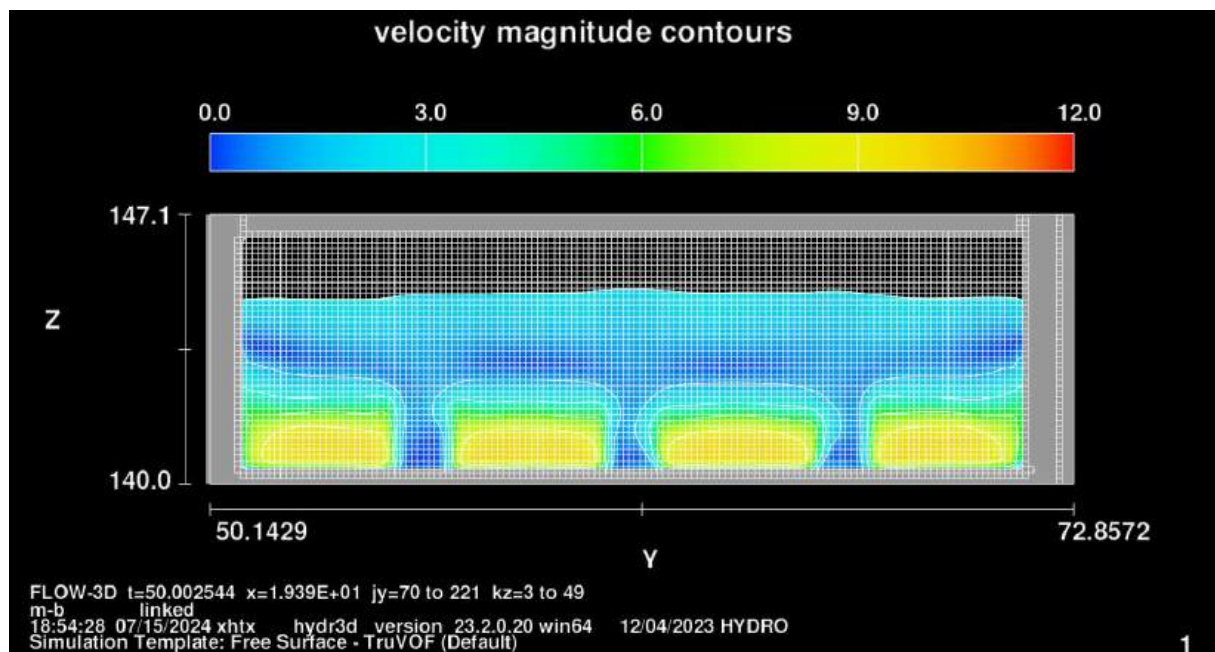


Abbildung 58 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

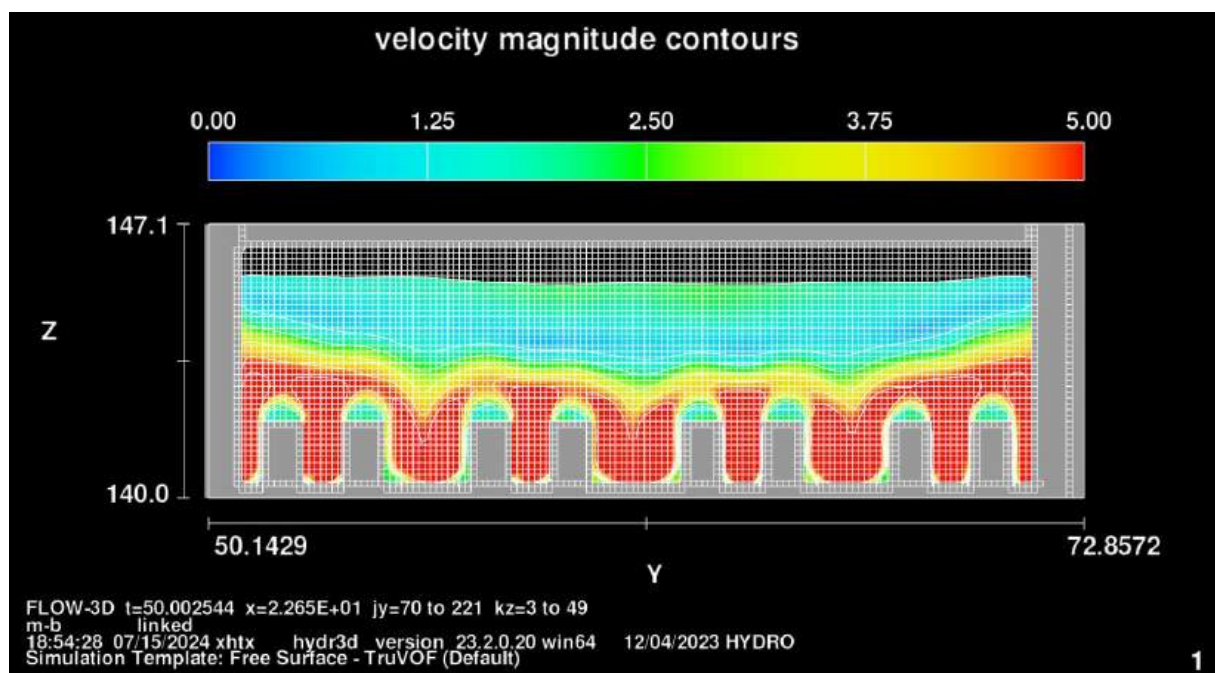


Abbildung 59 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]



# Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

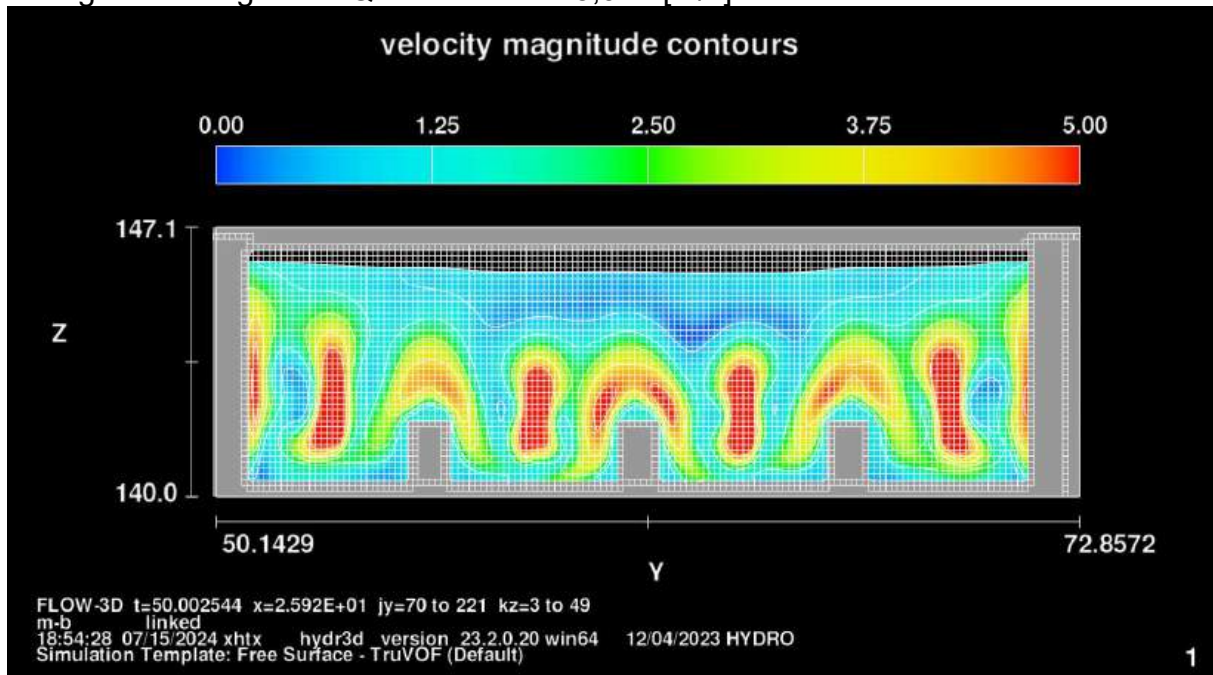


Abbildung 60 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

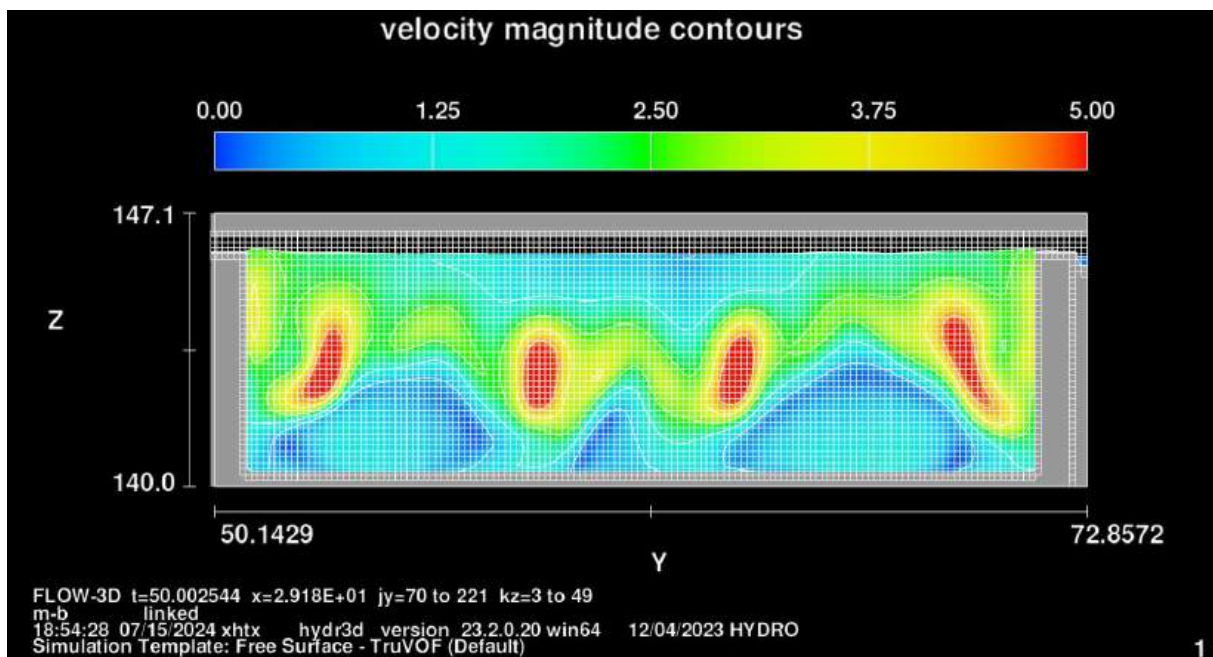


Abbildung 61 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]

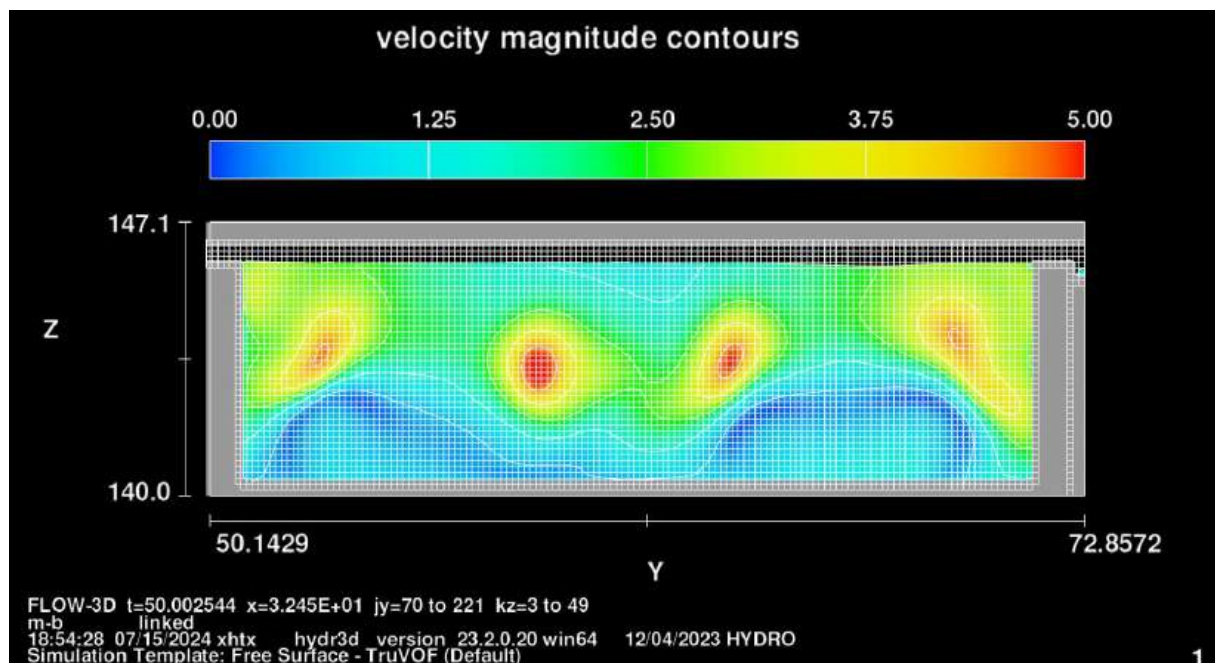


Abbildung 62 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

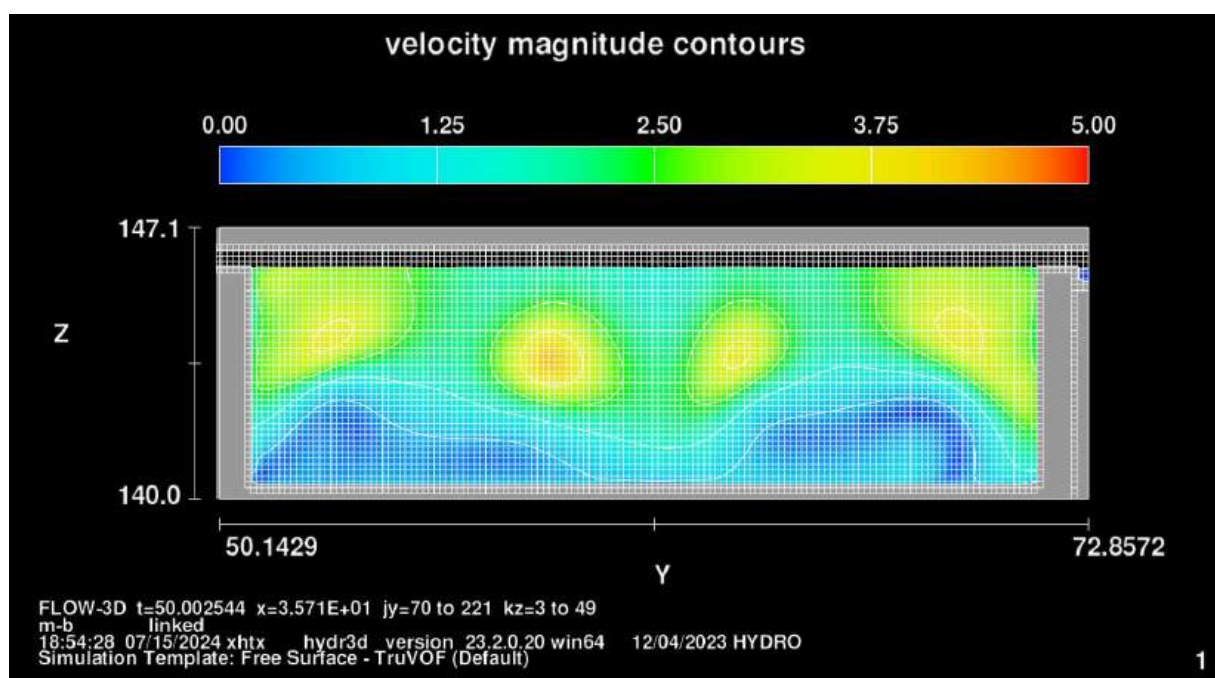


Abbildung 63 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

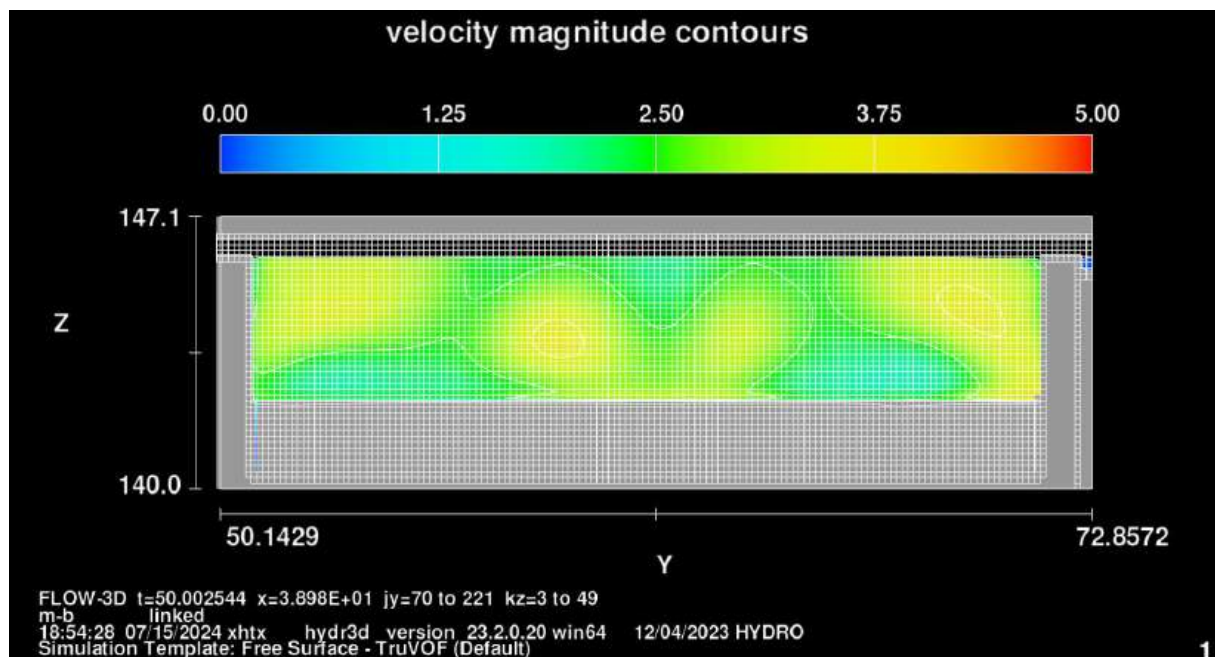


Abbildung 64 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

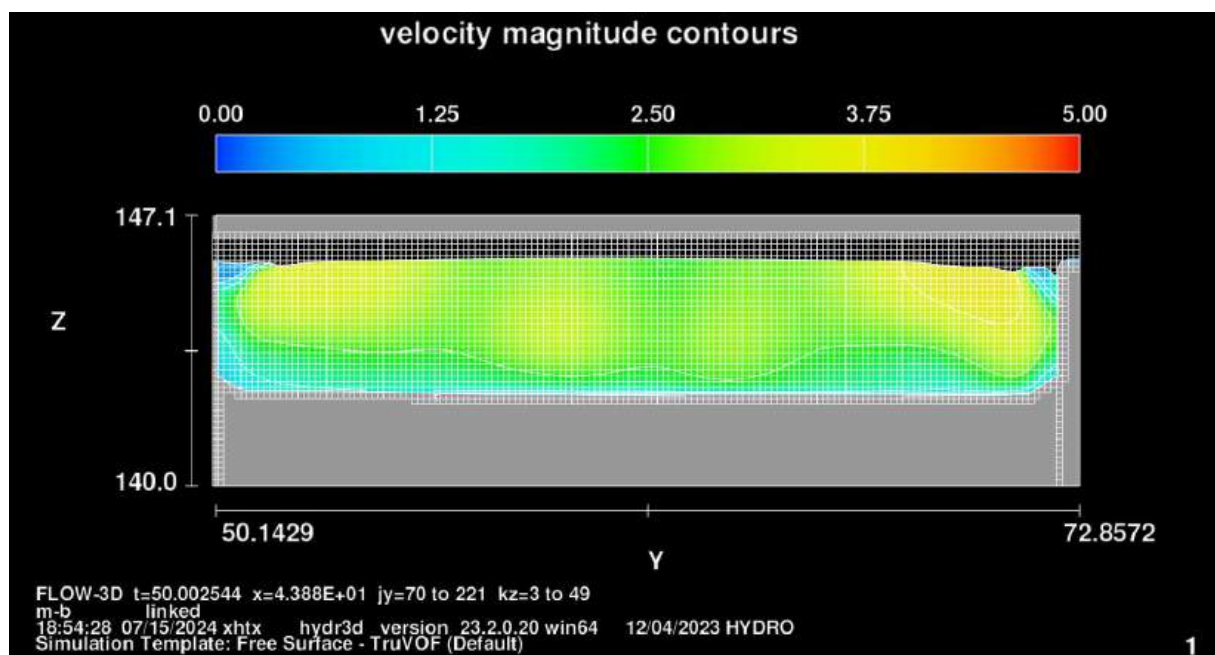


Abbildung 65 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]



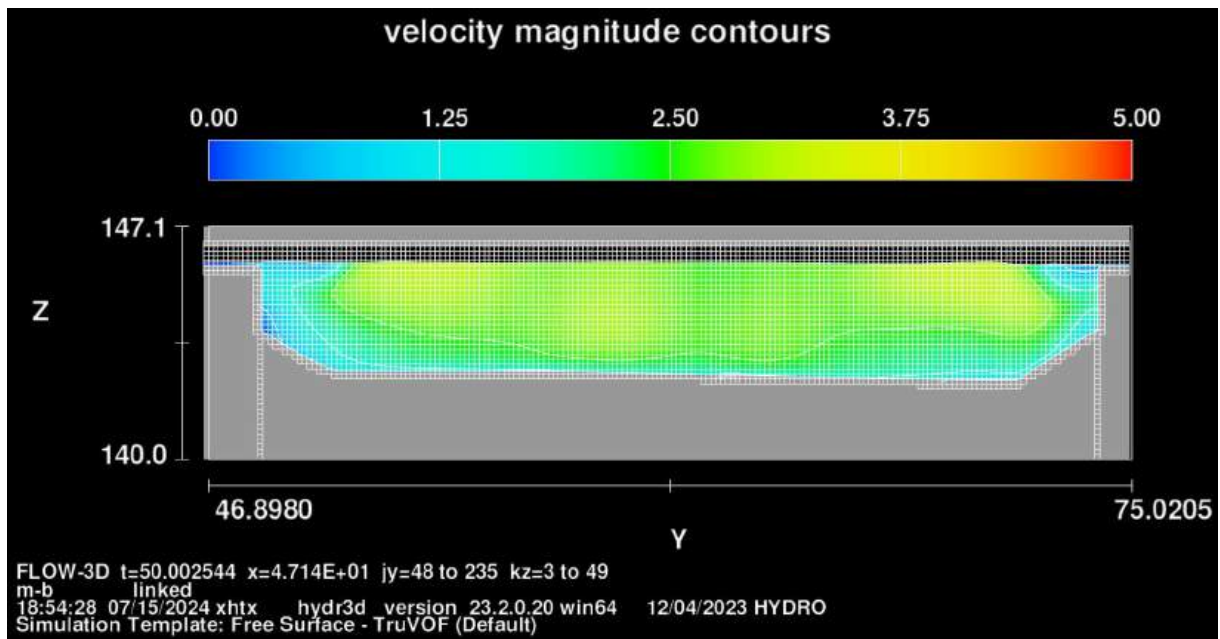


Abbildung 66 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

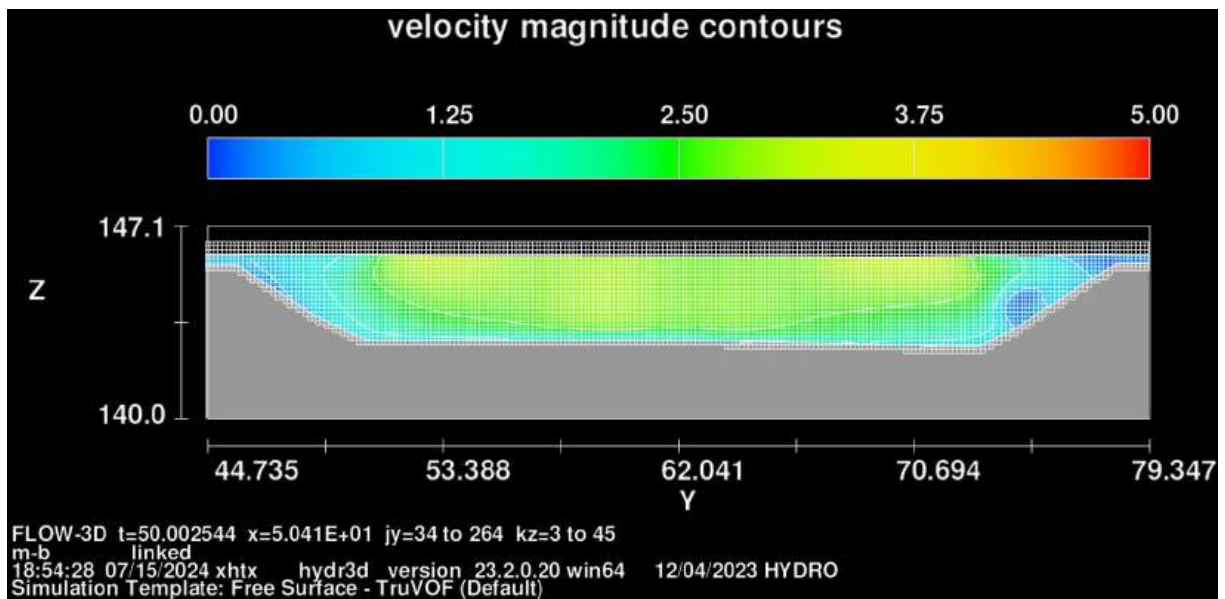


Abbildung 67 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]



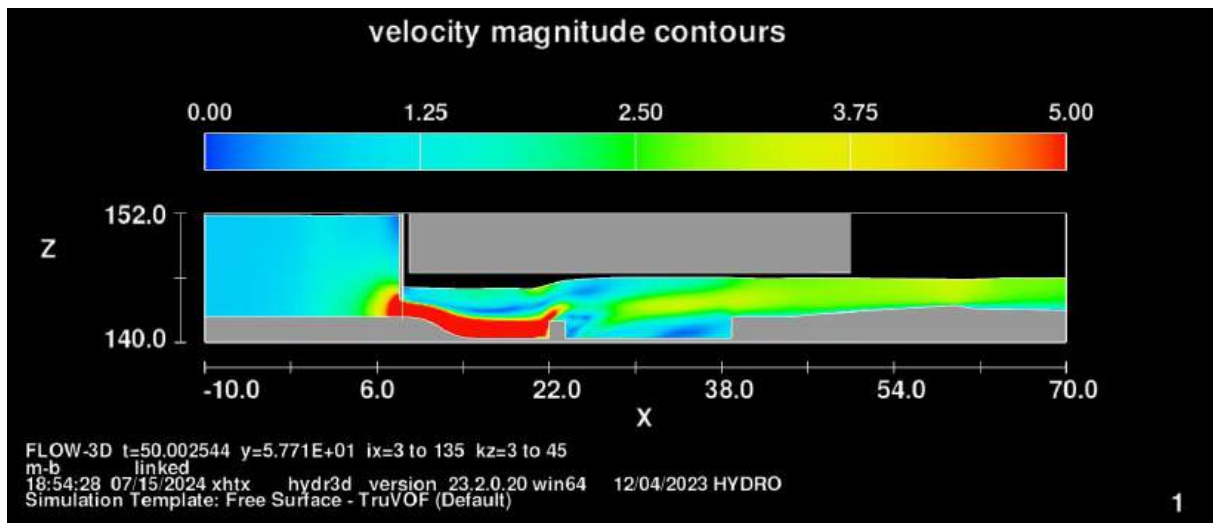


Abbildung 68 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,7 m [m/s]

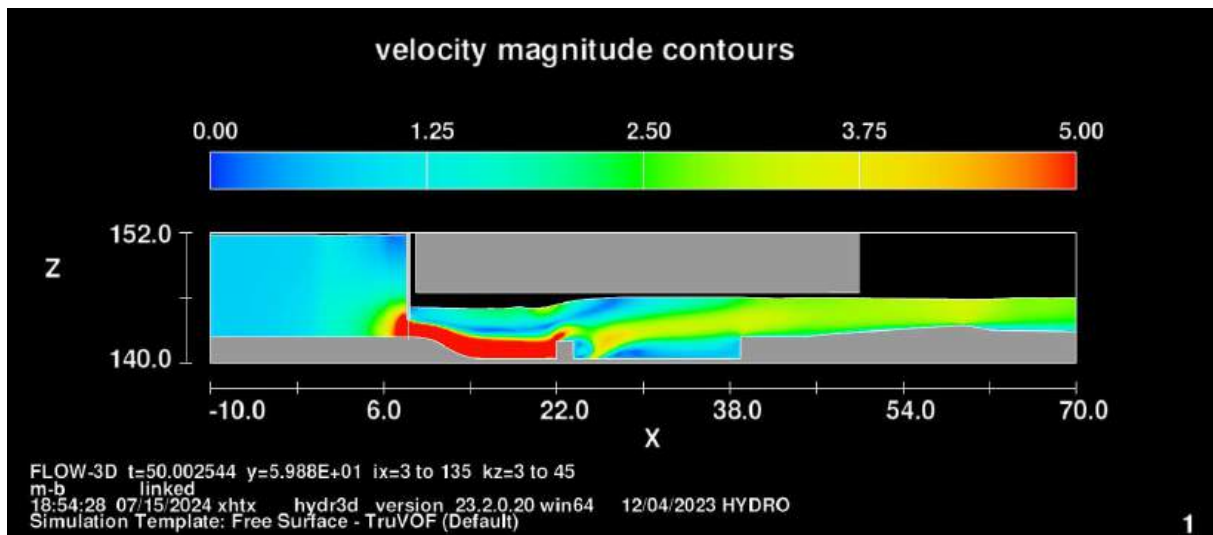


Abbildung 69 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]

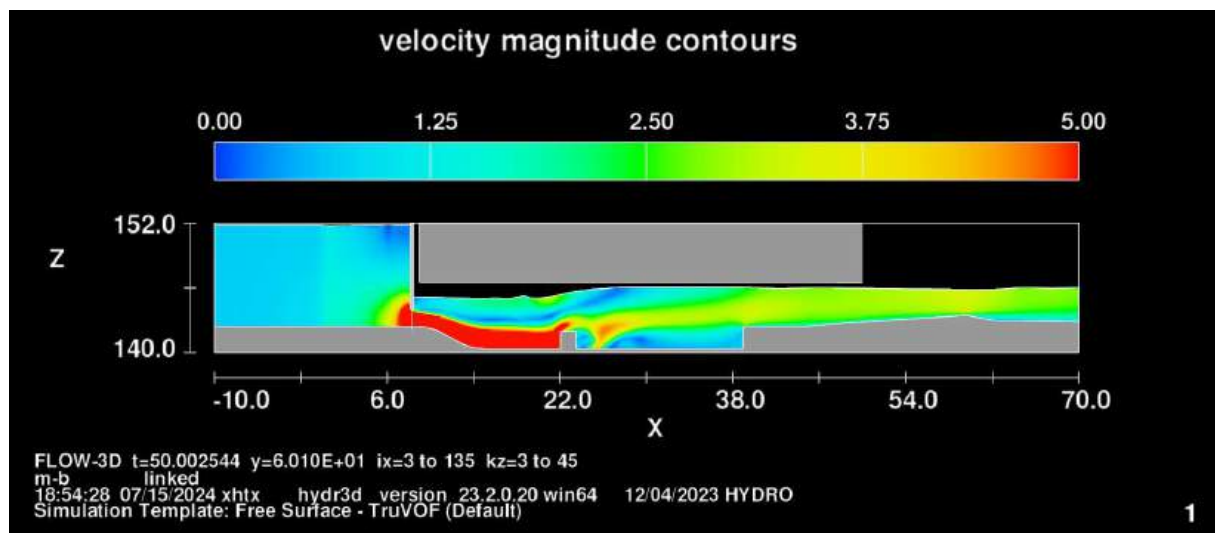


Abbildung 70 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=60,1$  m [m/s]

## 7 Gesamtmodell 123b – Nachweis Leistungsfähigkeit

BHQ1 (n-1) äußeres Segment geschlossen; Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK;

Schützöffnung 0; 2,00 m;  $Q_{\text{ges}}=162 \text{ m}^3/\text{s}$

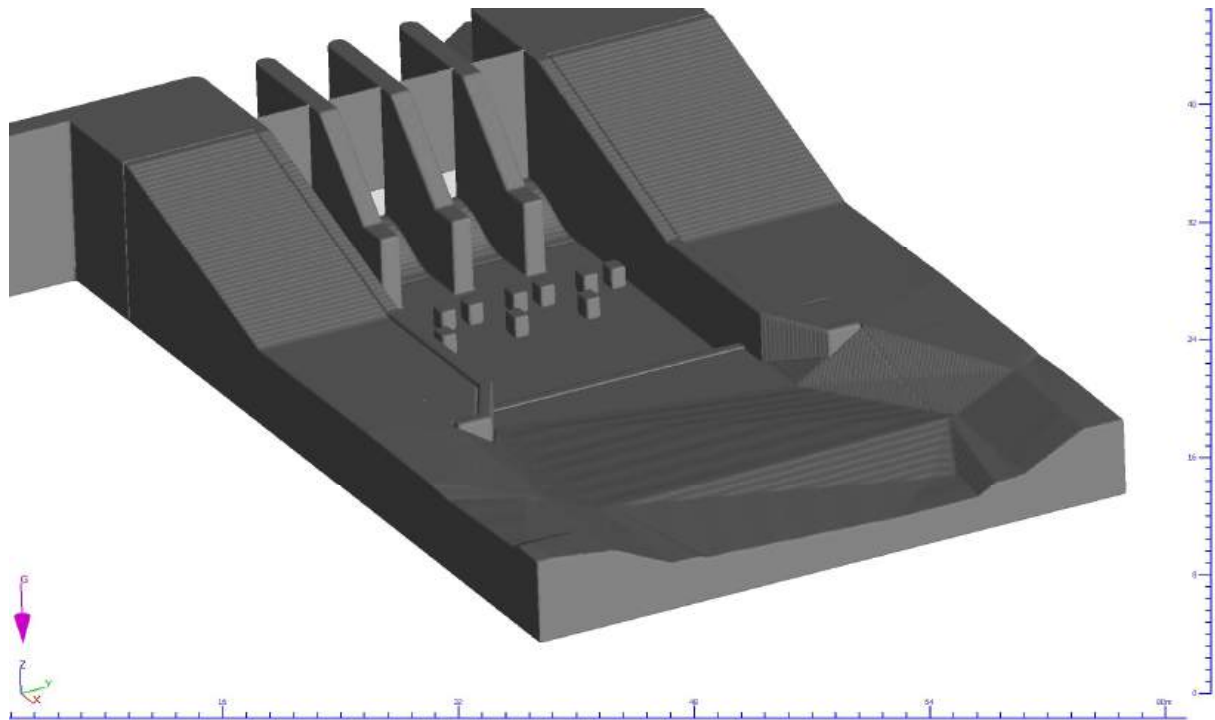


Abbildung 71 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 123b

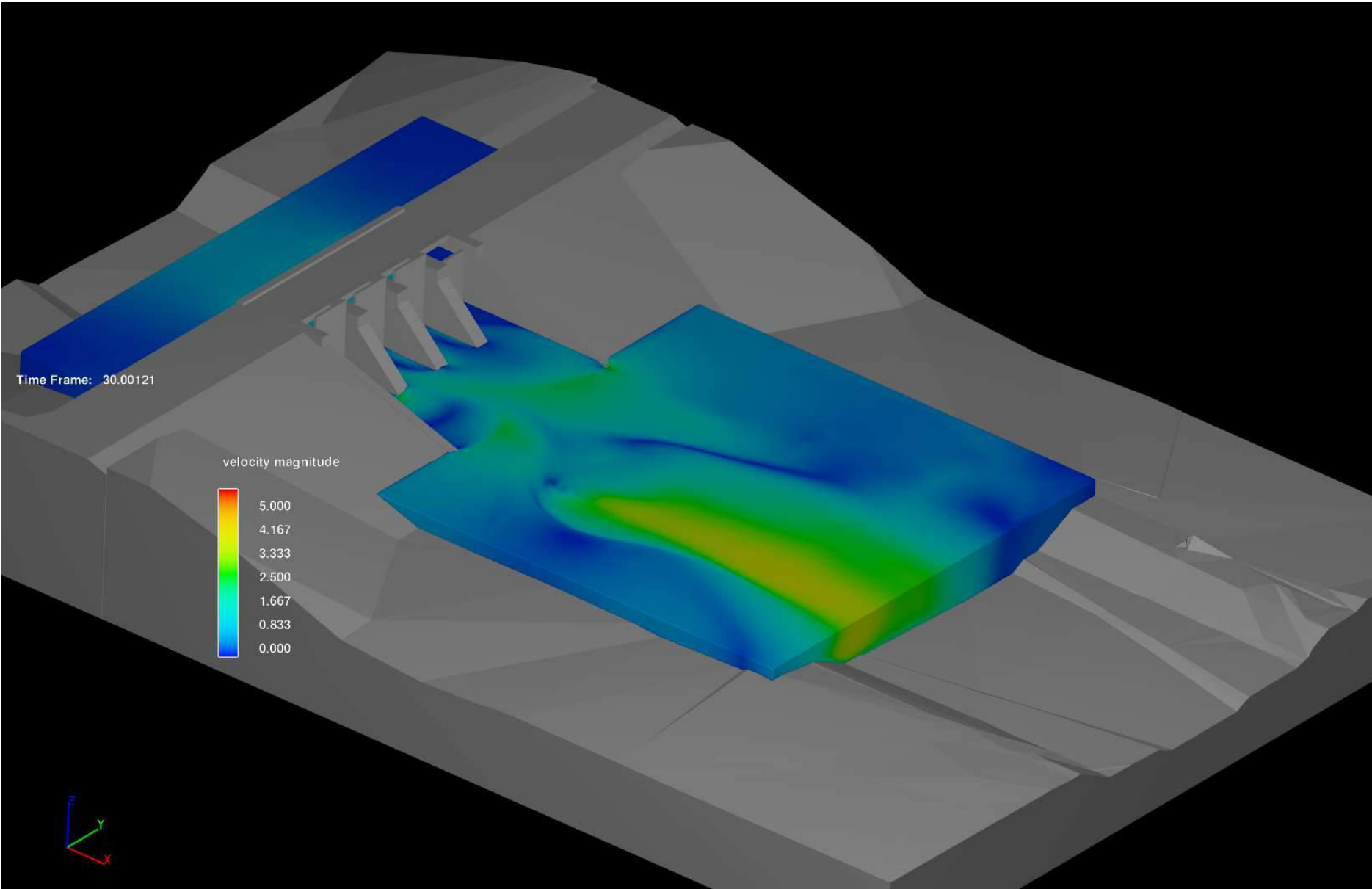


Abbildung 72 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

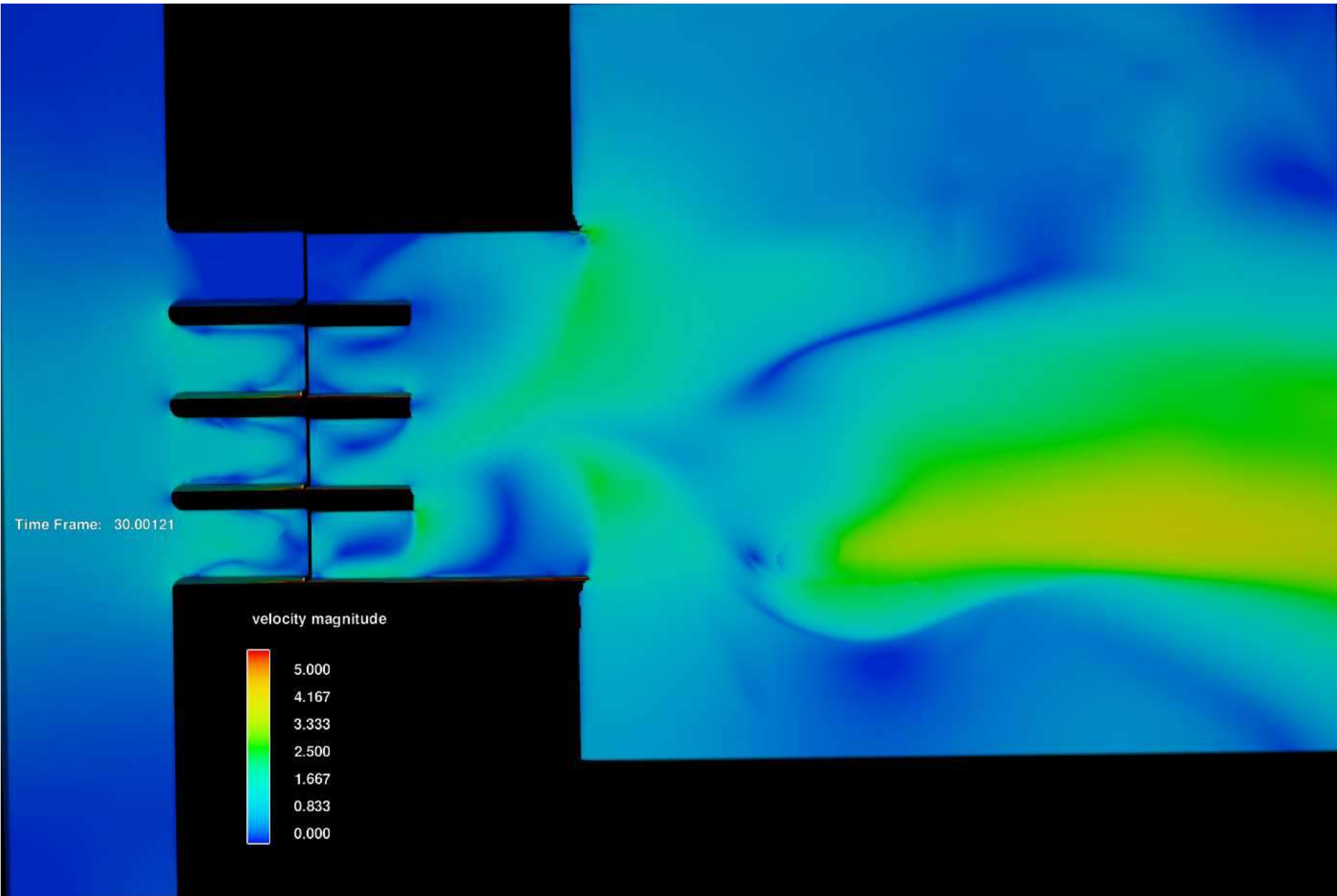


Abbildung 73 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]



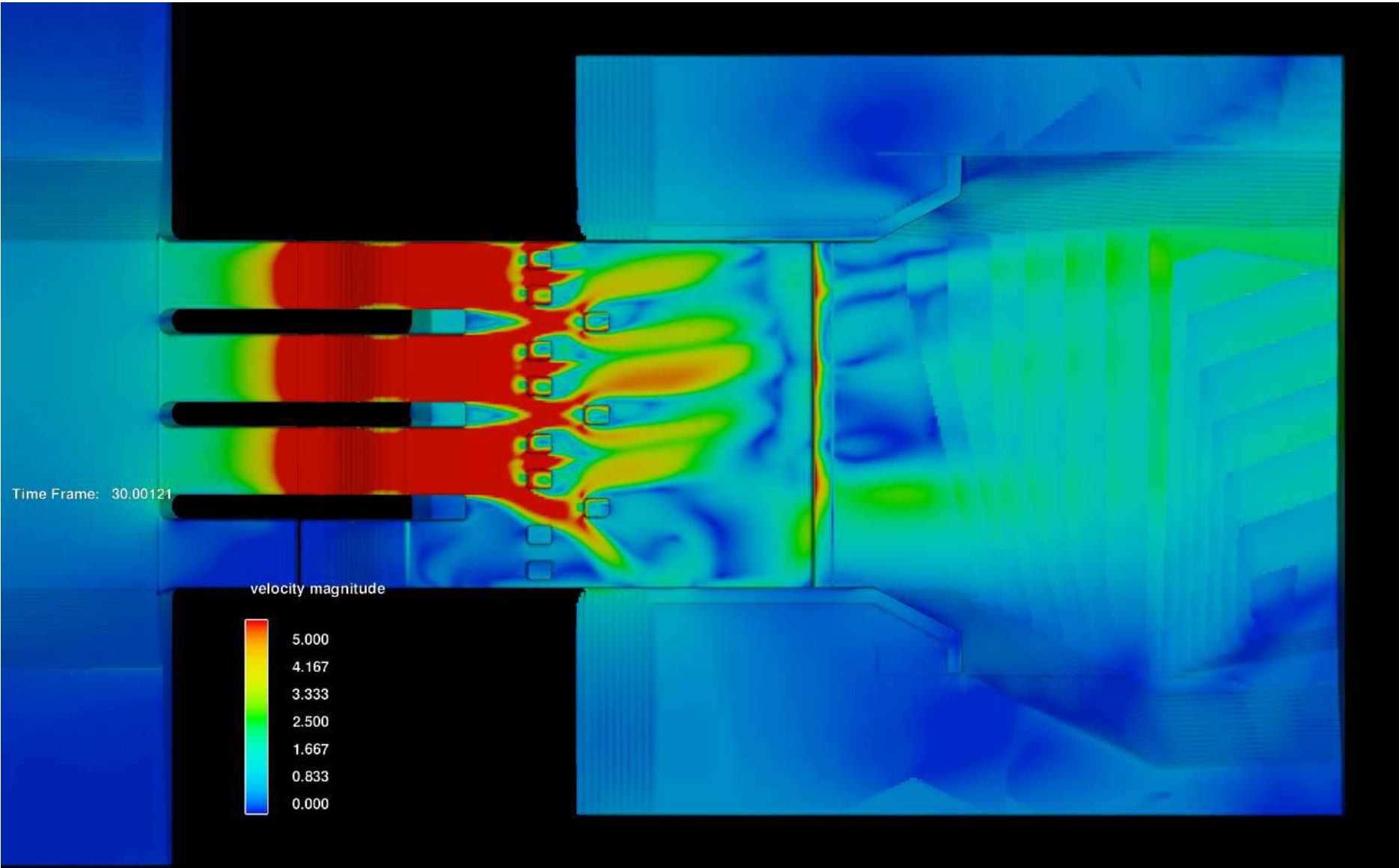


Abbildung 74 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]

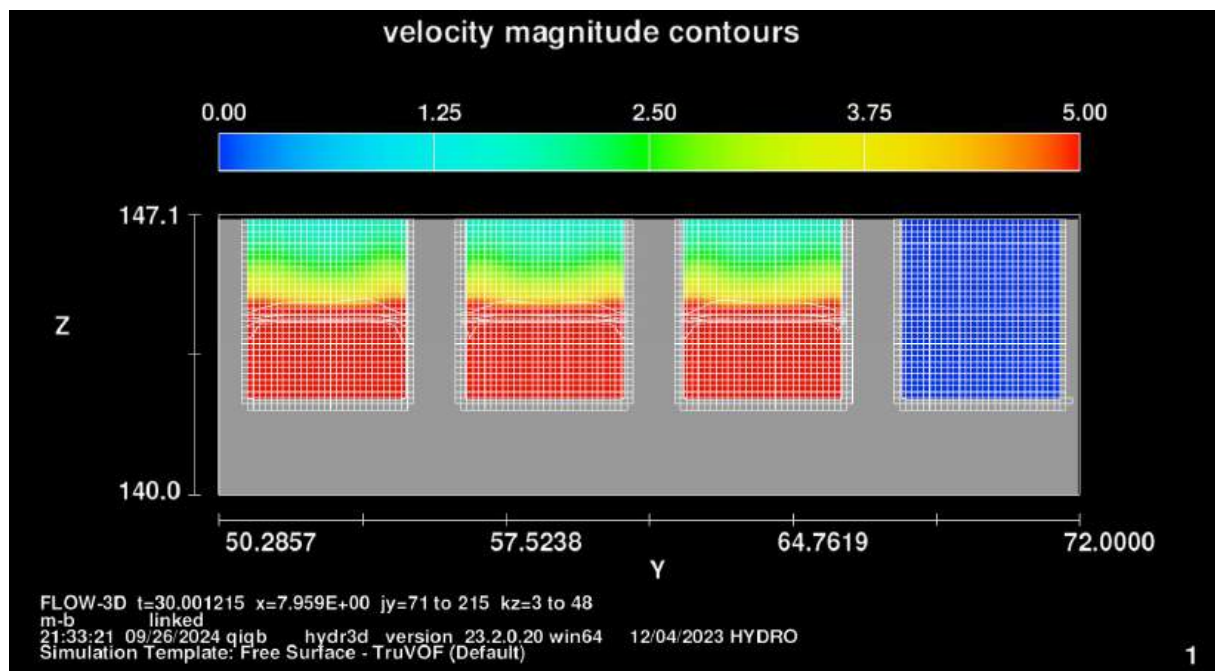


Abbildung 75 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

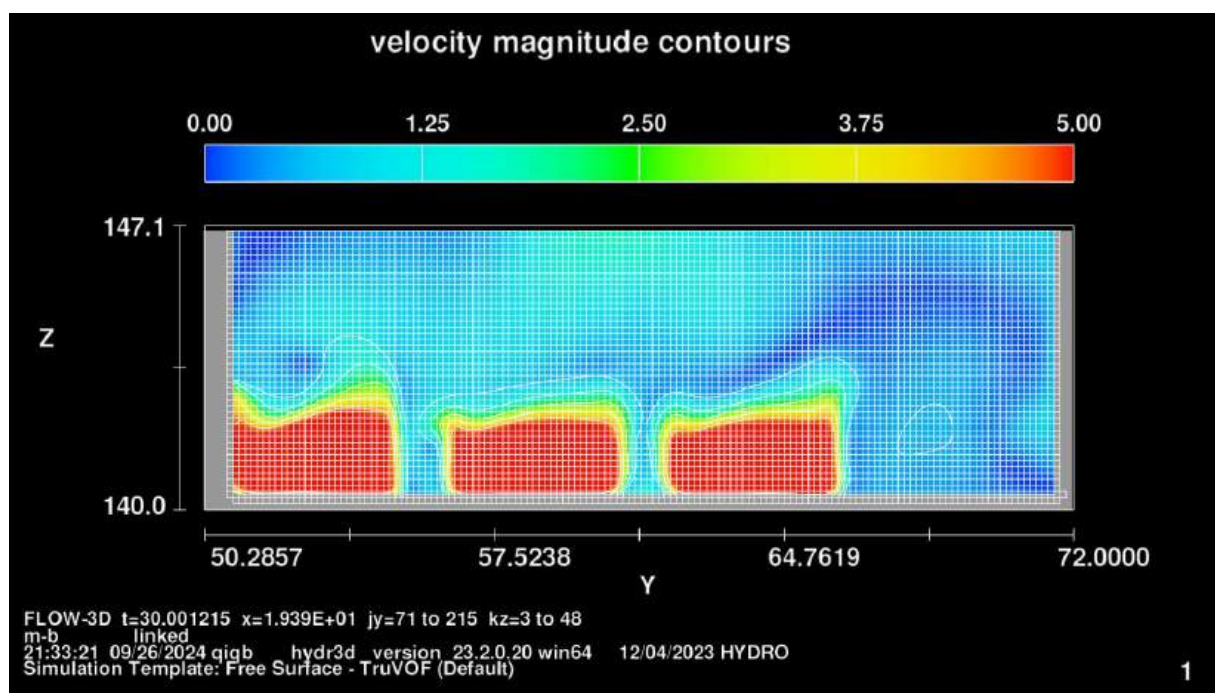


Abbildung 76 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

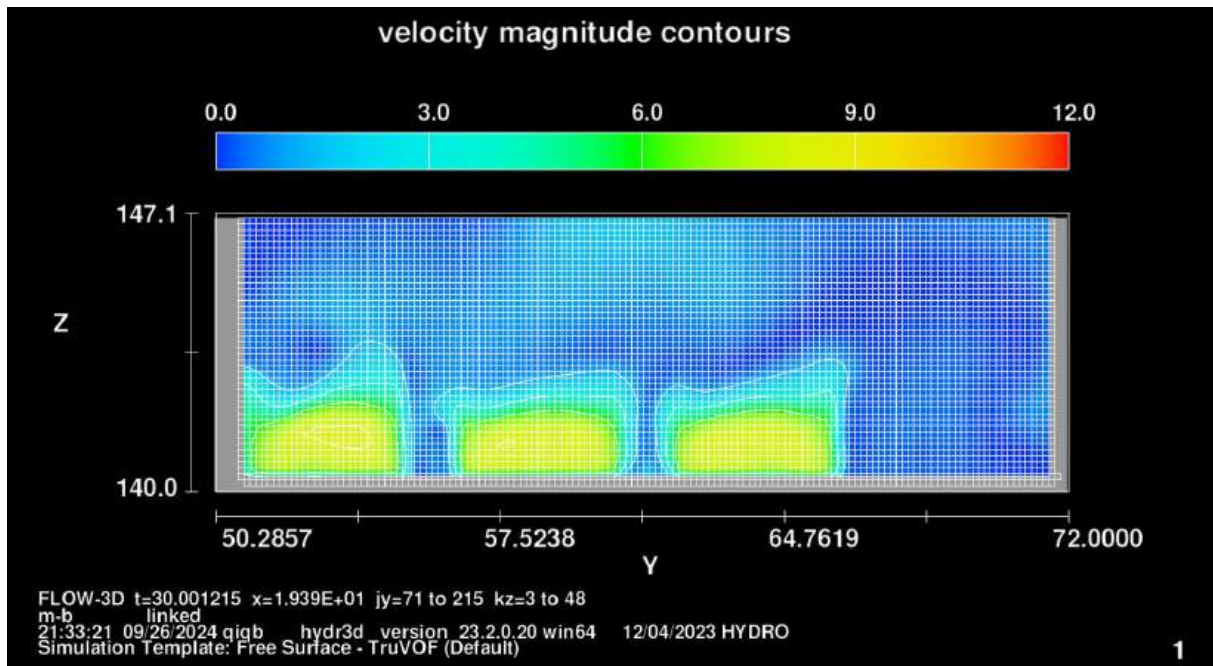


Abbildung 77 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

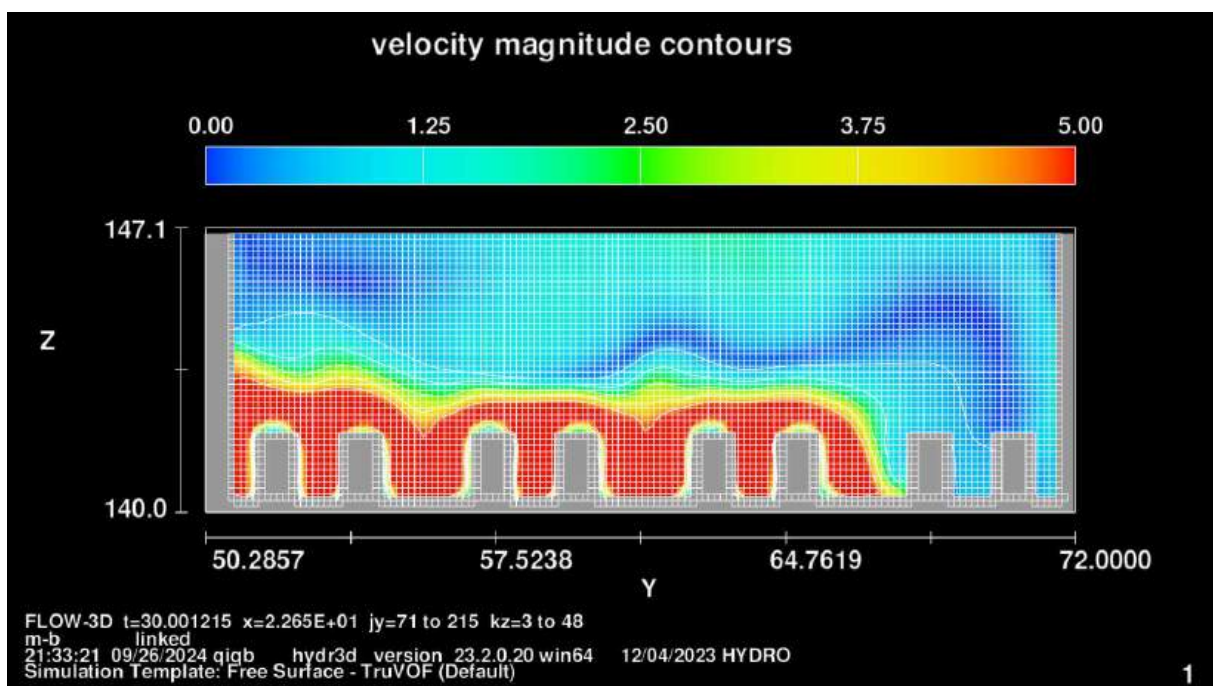


Abbildung 78 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]



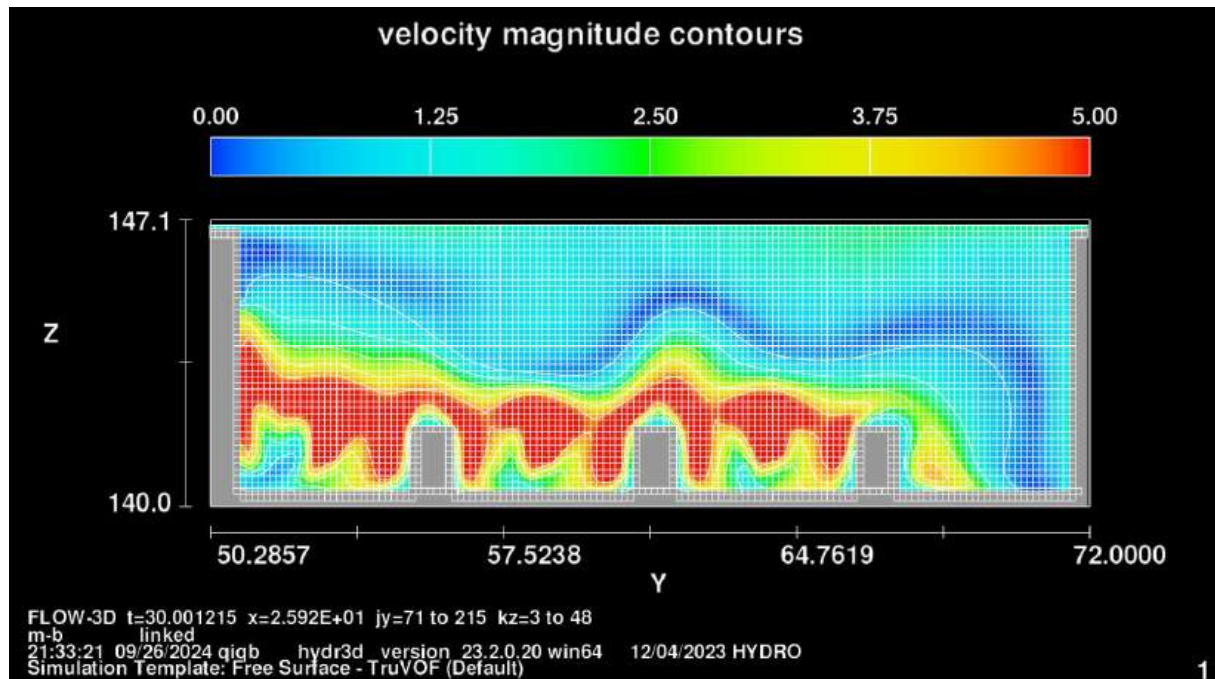


Abbildung 79 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

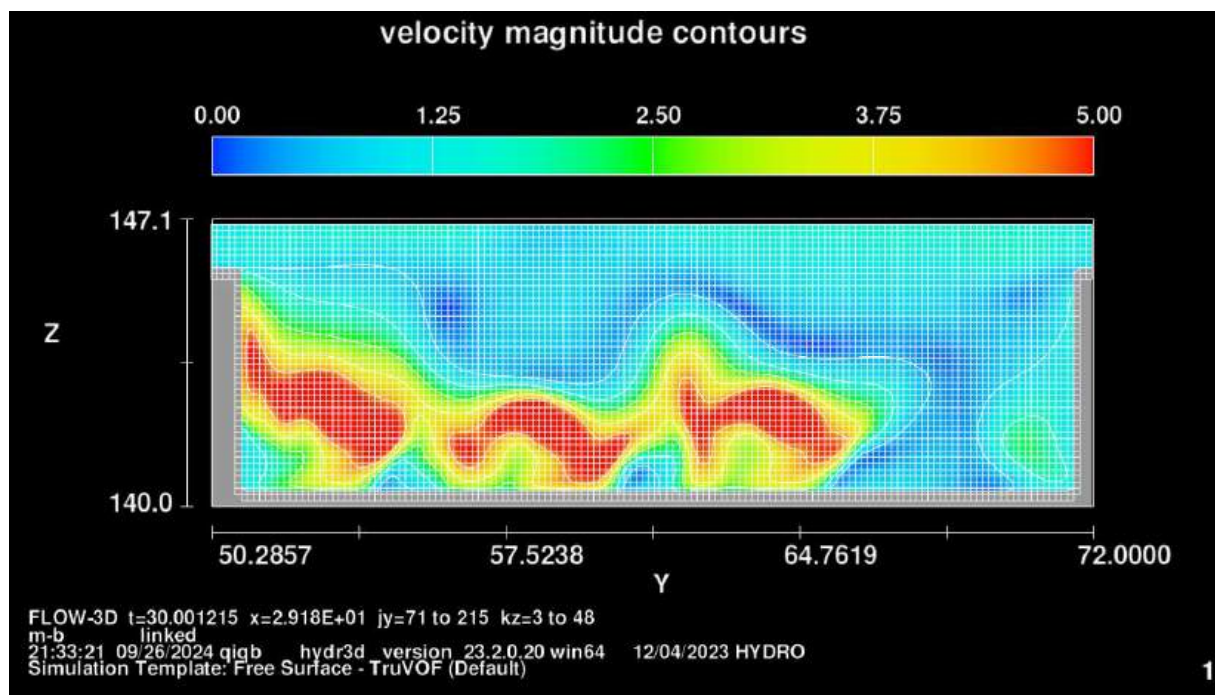


Abbildung 80 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]



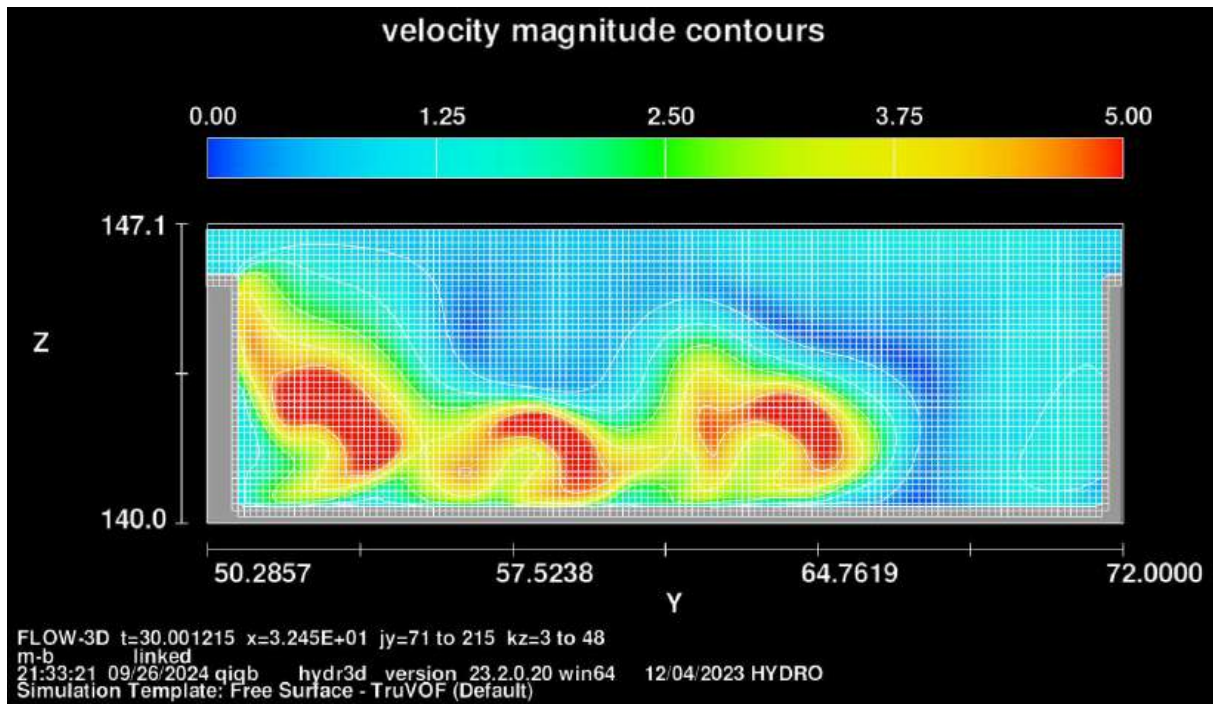


Abbildung 81 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

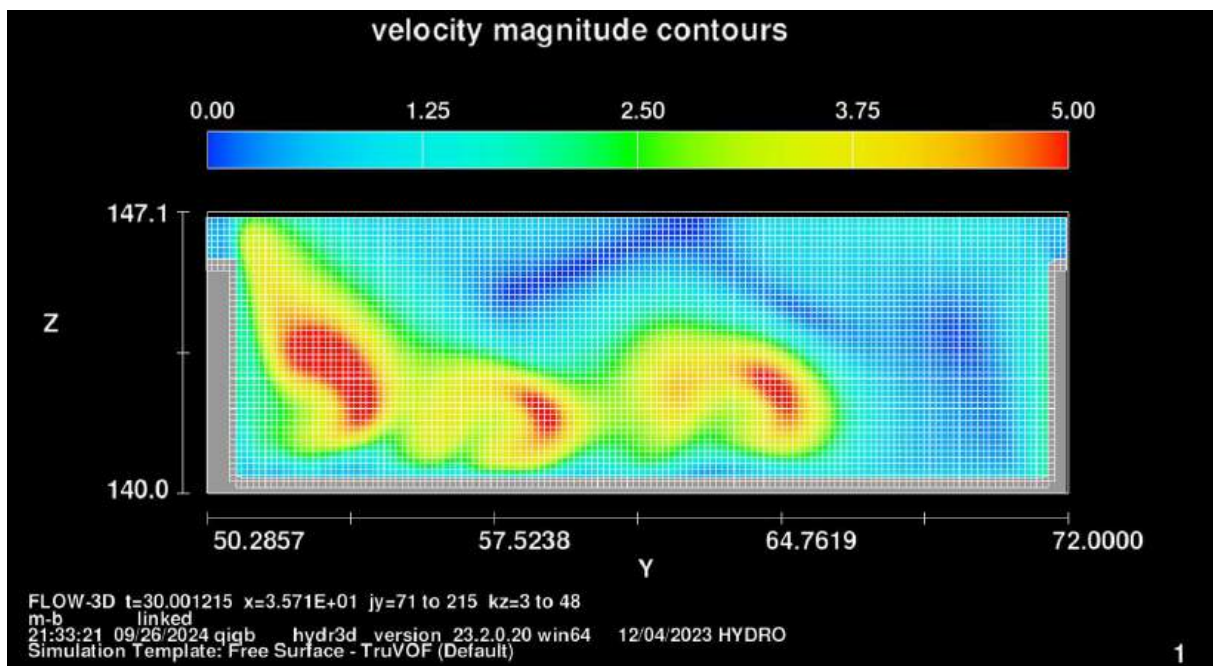


Abbildung 82 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

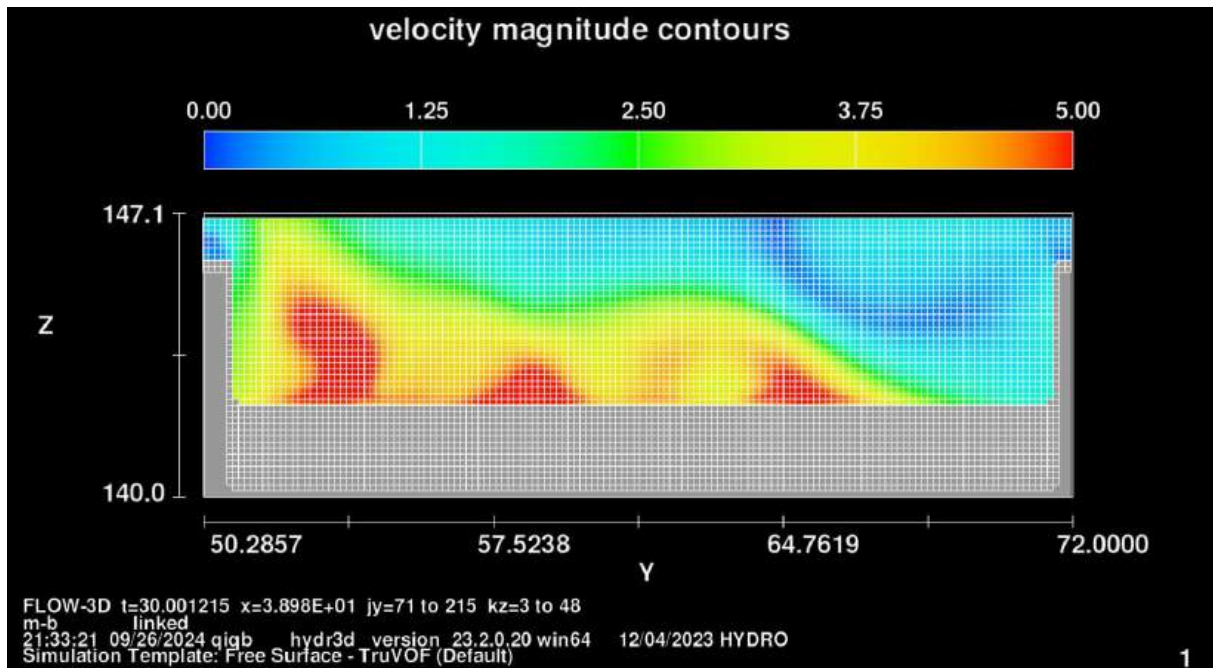


Abbildung 83 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

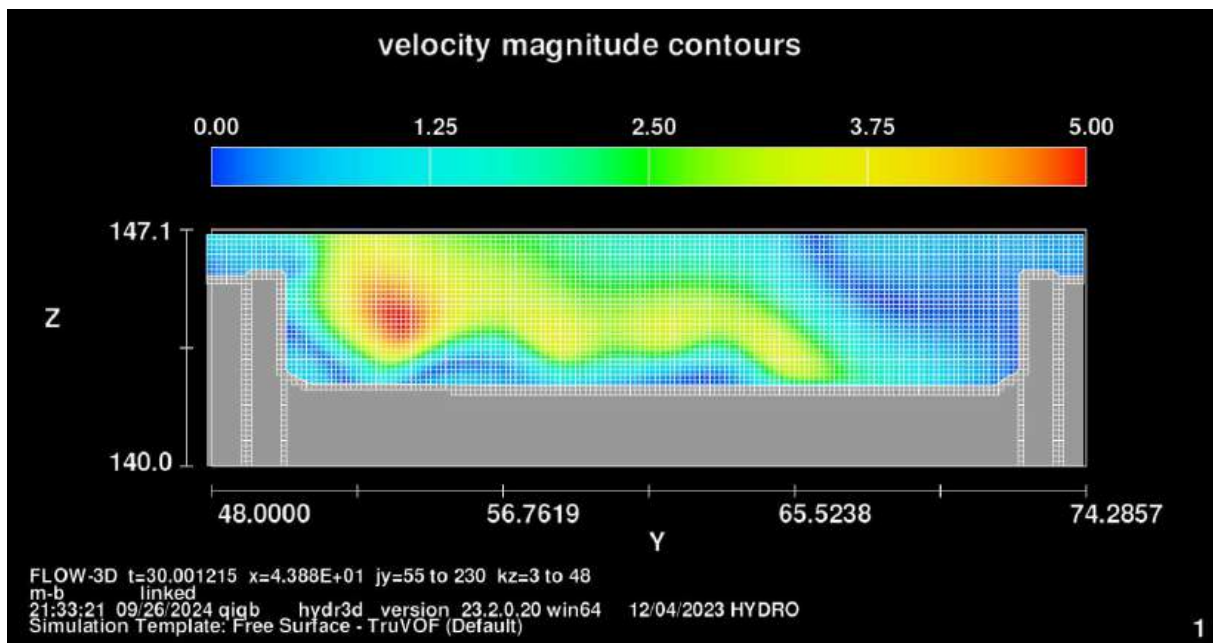


Abbildung 84 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]

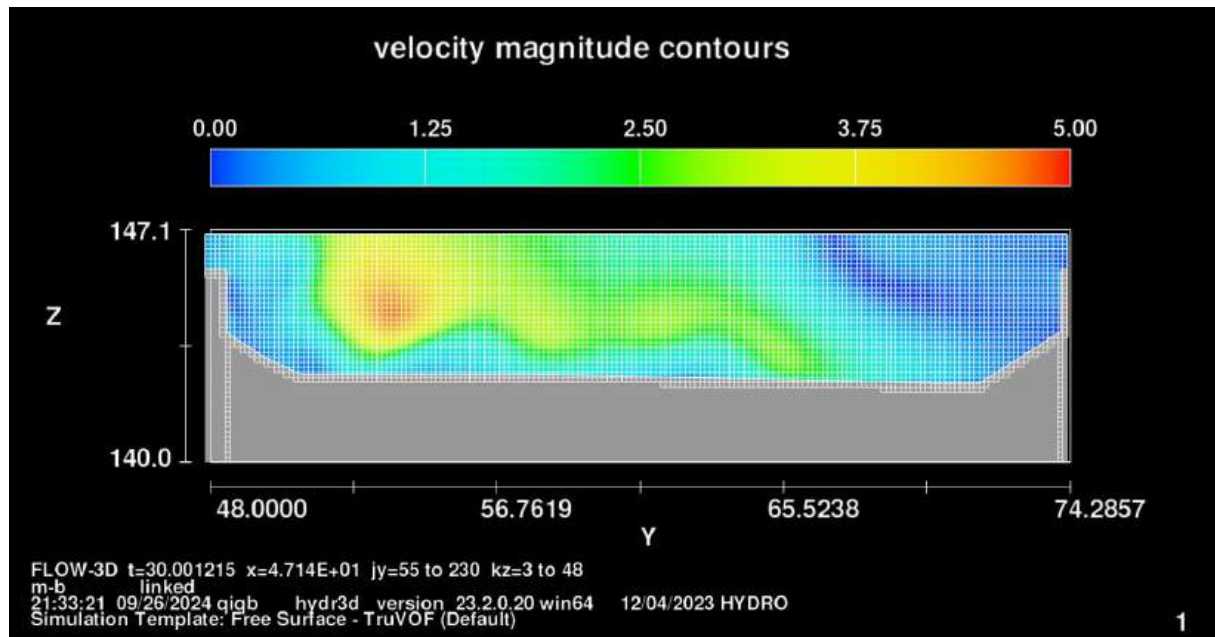


Abbildung 85 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

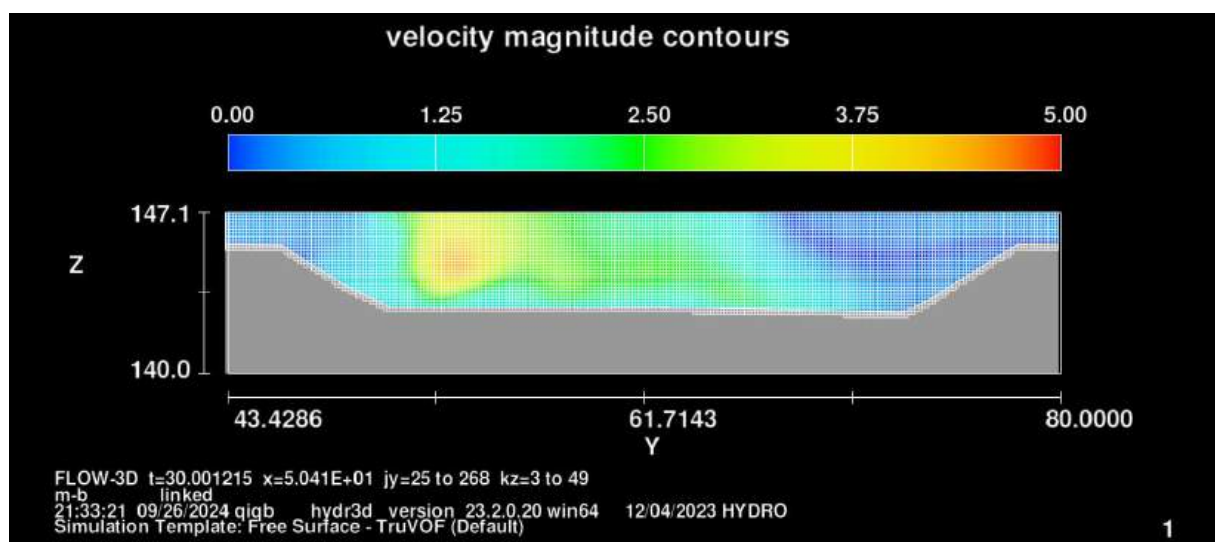


Abbildung 86 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]



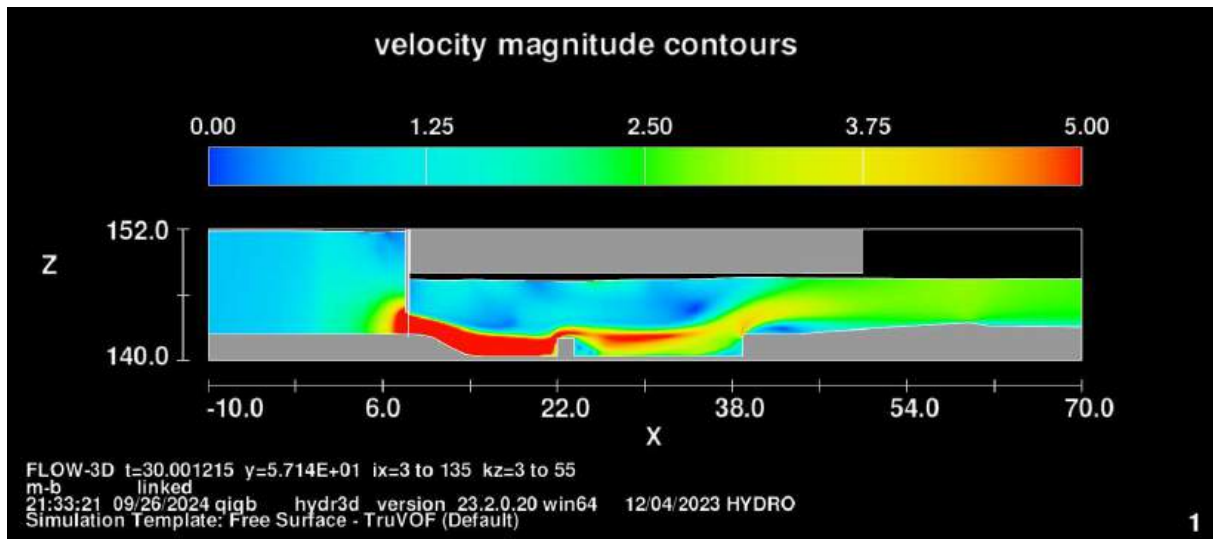


Abbildung 87 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]

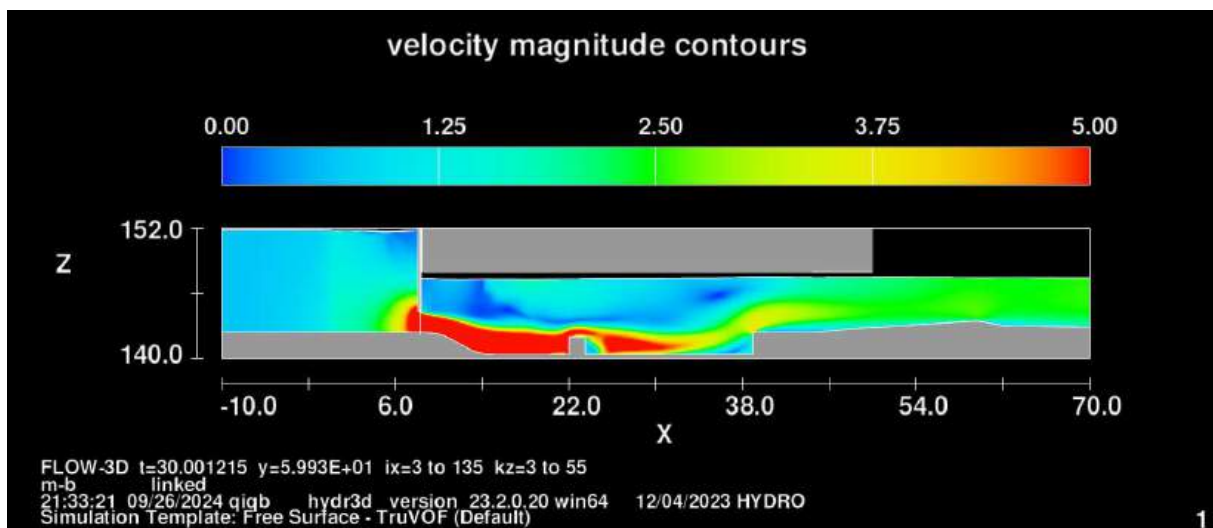


Abbildung 88 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]

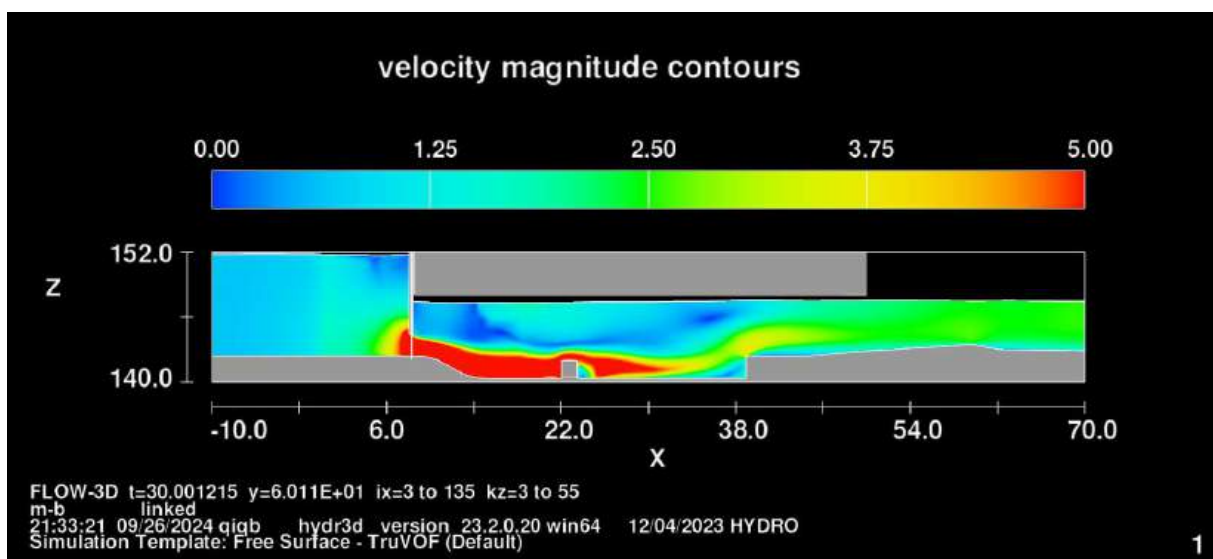


Abbildung 89 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]



## 8 Gesamtmodell 124b - Nachweis Leistungsfähigkeit

BHQ1 (n-1) inneres Segment geschlossen; Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK

Schützöffnung 0; 2,0 m;  $Q_{\text{ges}}=165 \text{ m}^3/\text{s}$

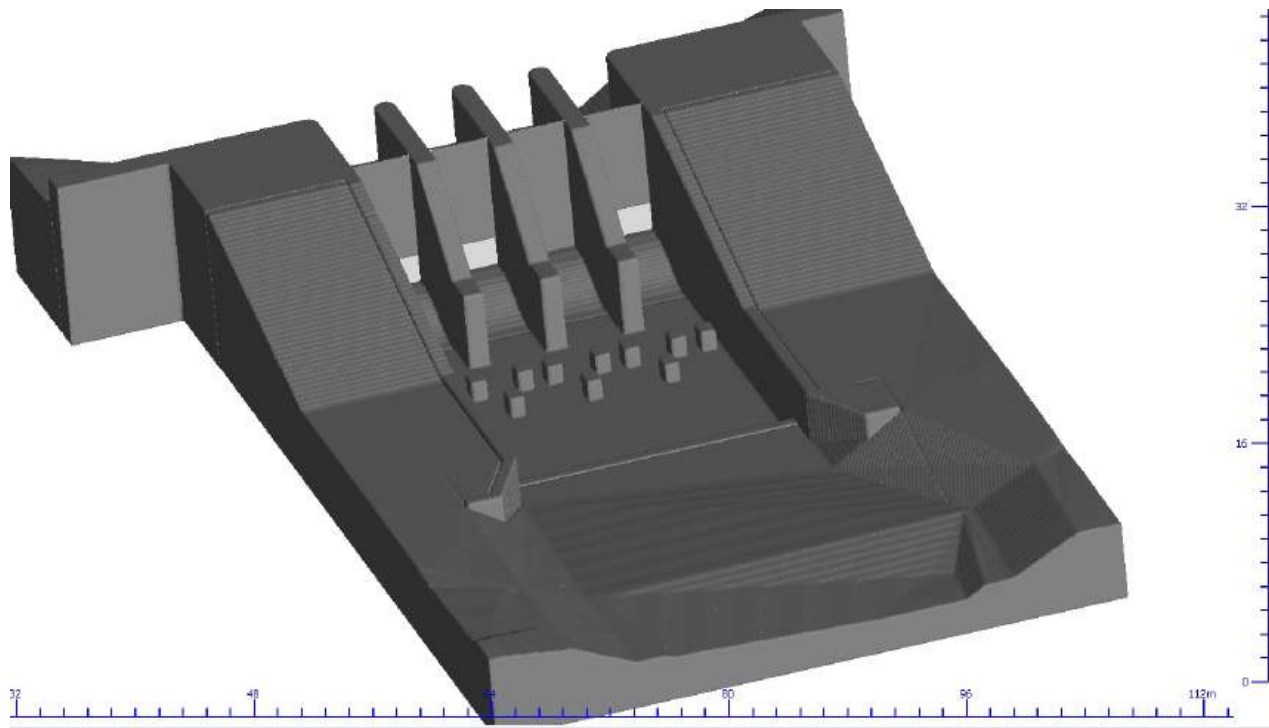


Abbildung 90 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 124b

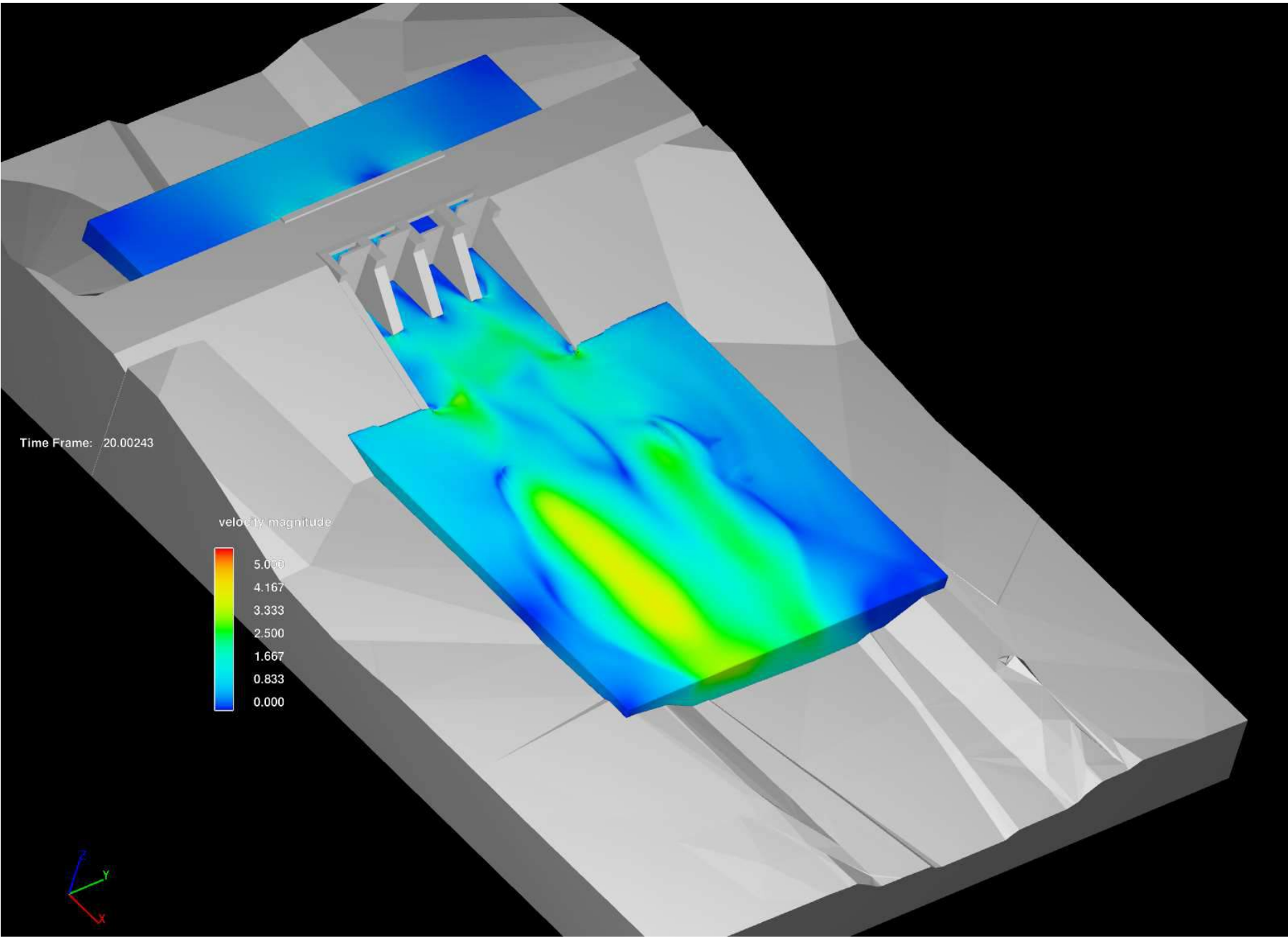


Abbildung 91 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

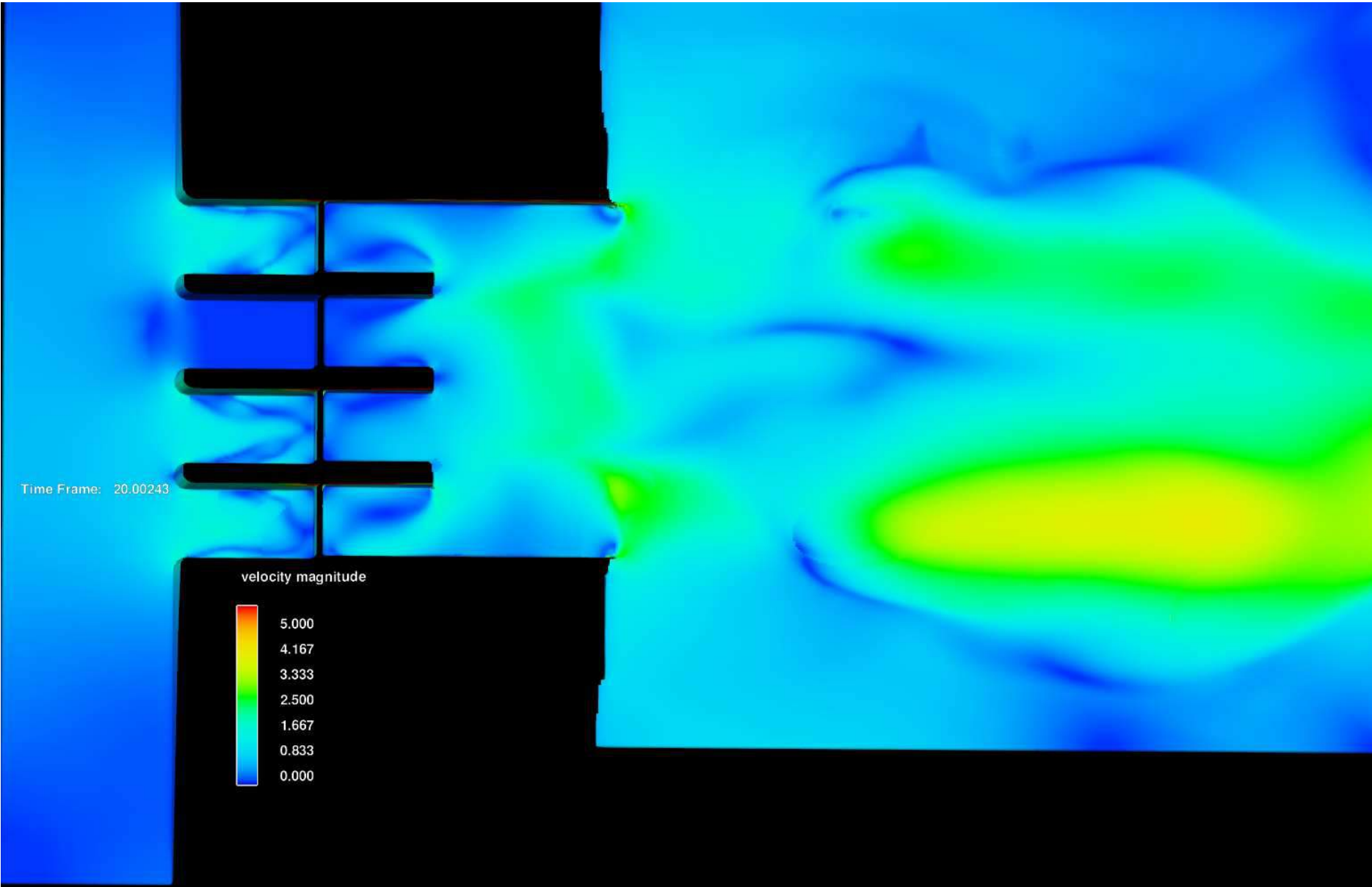


Abbildung 92 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

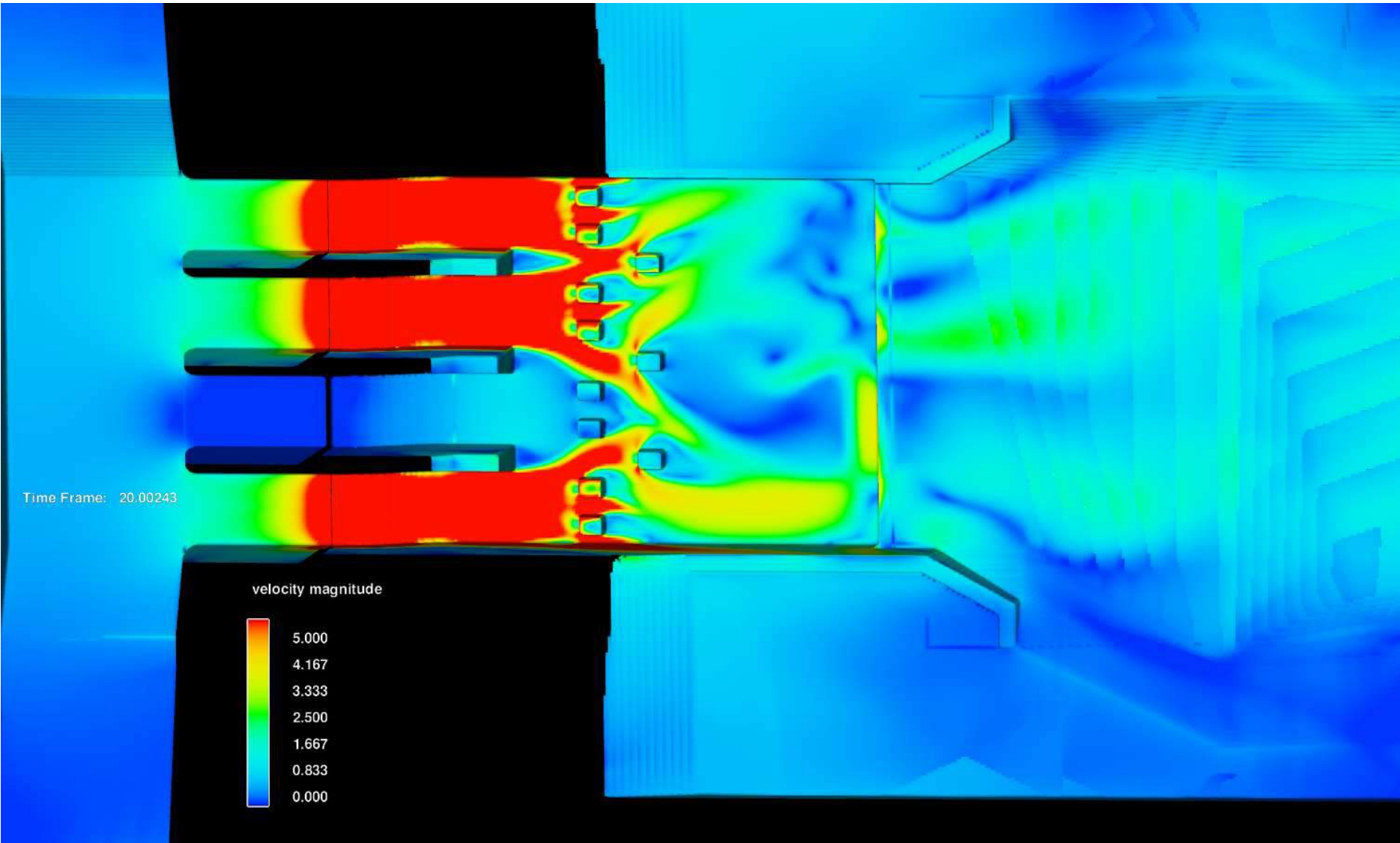


Abbildung 93 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]



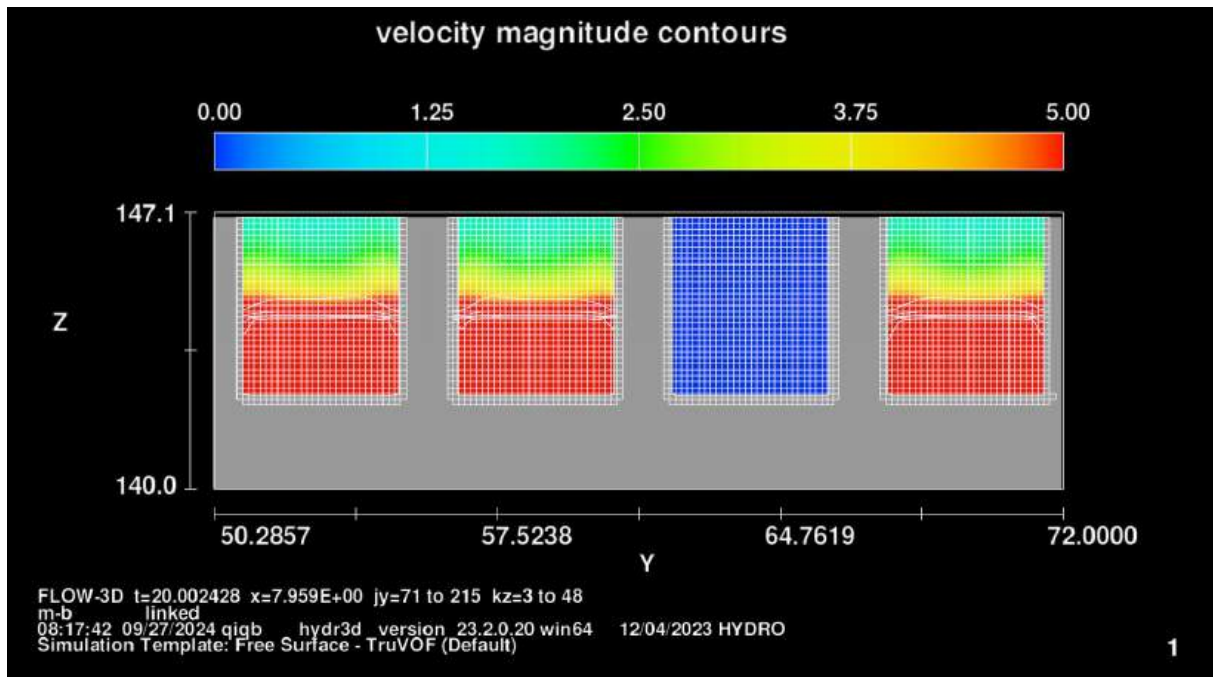


Abbildung 94 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

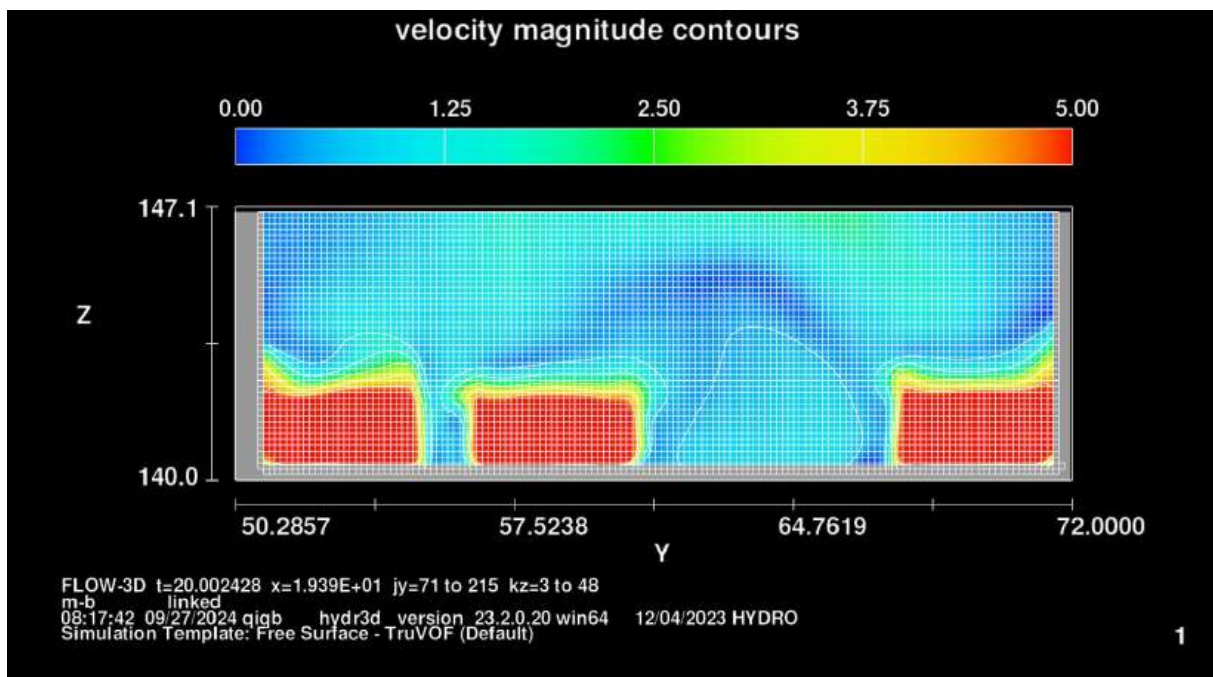


Abbildung 95 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]



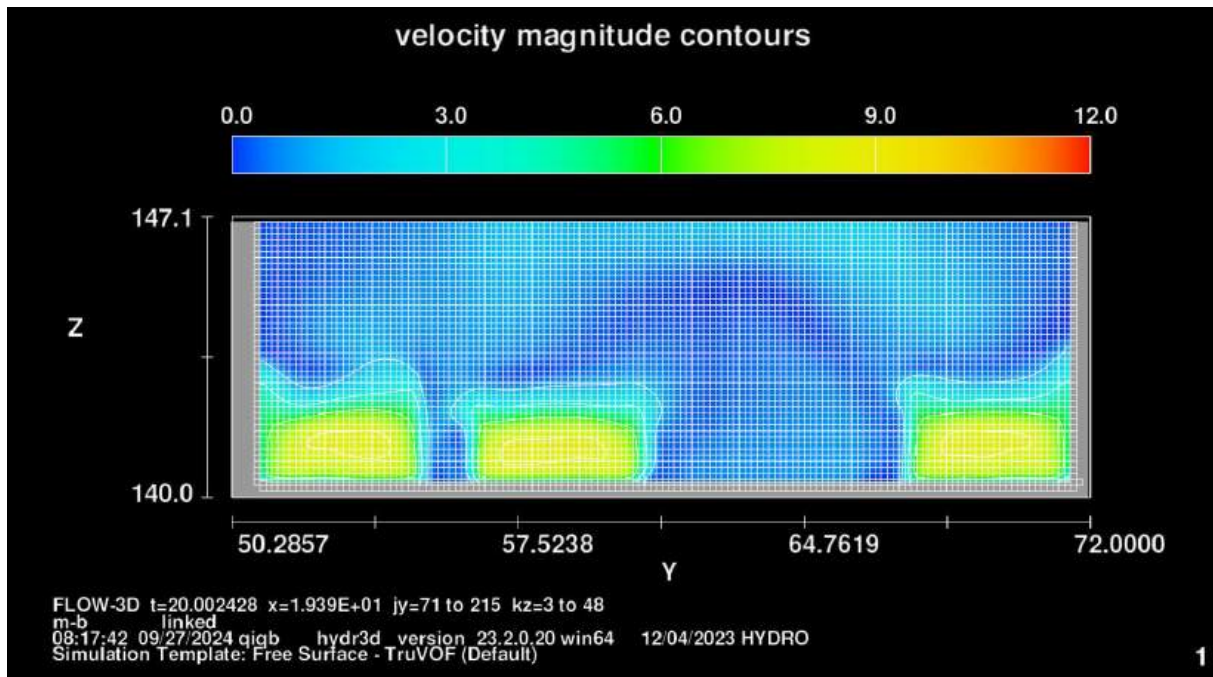


Abbildung 96 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

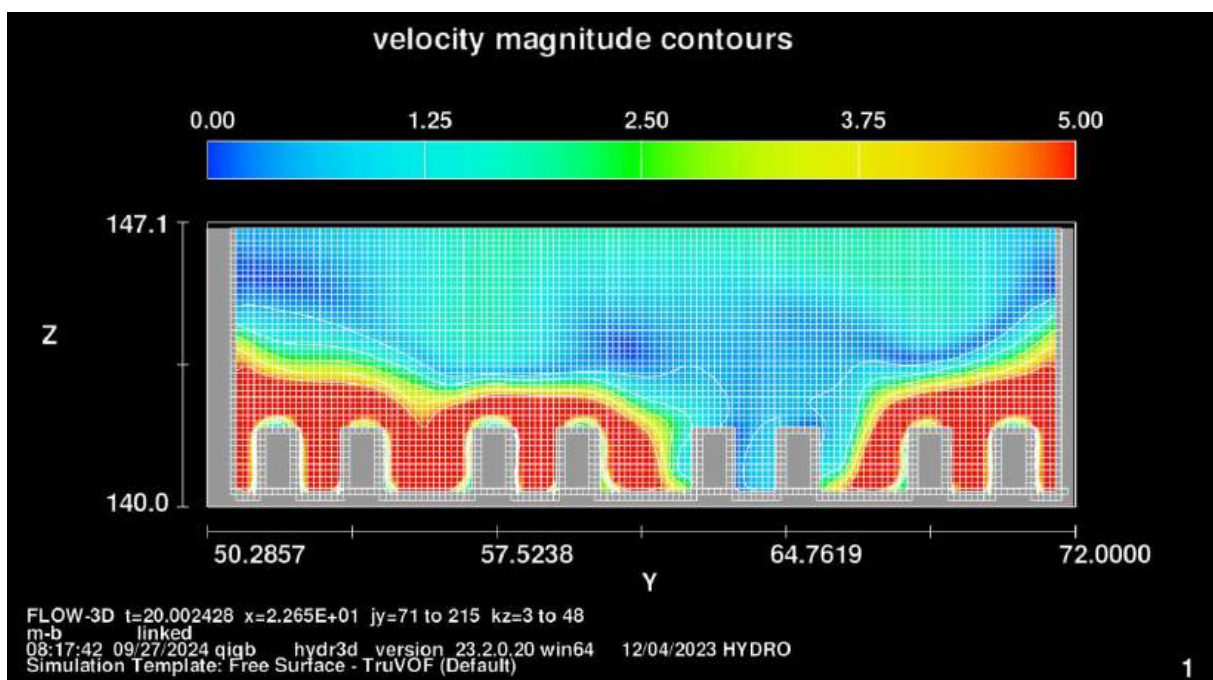


Abbildung 97 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]

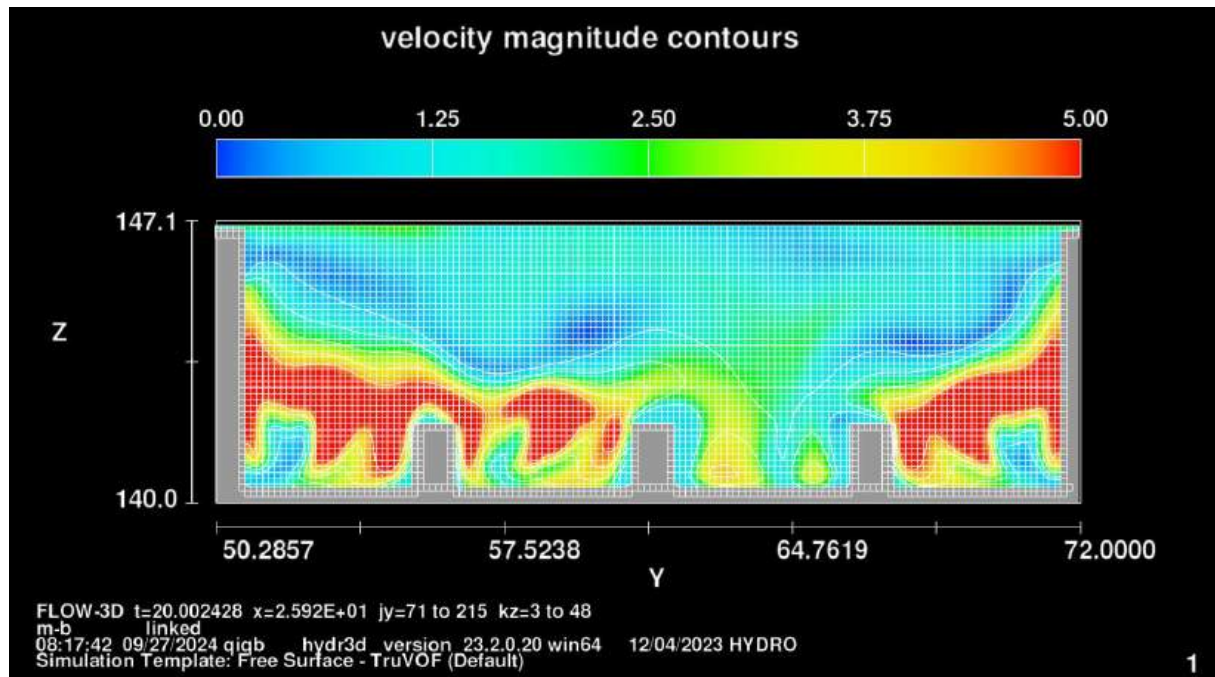


Abbildung 98 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

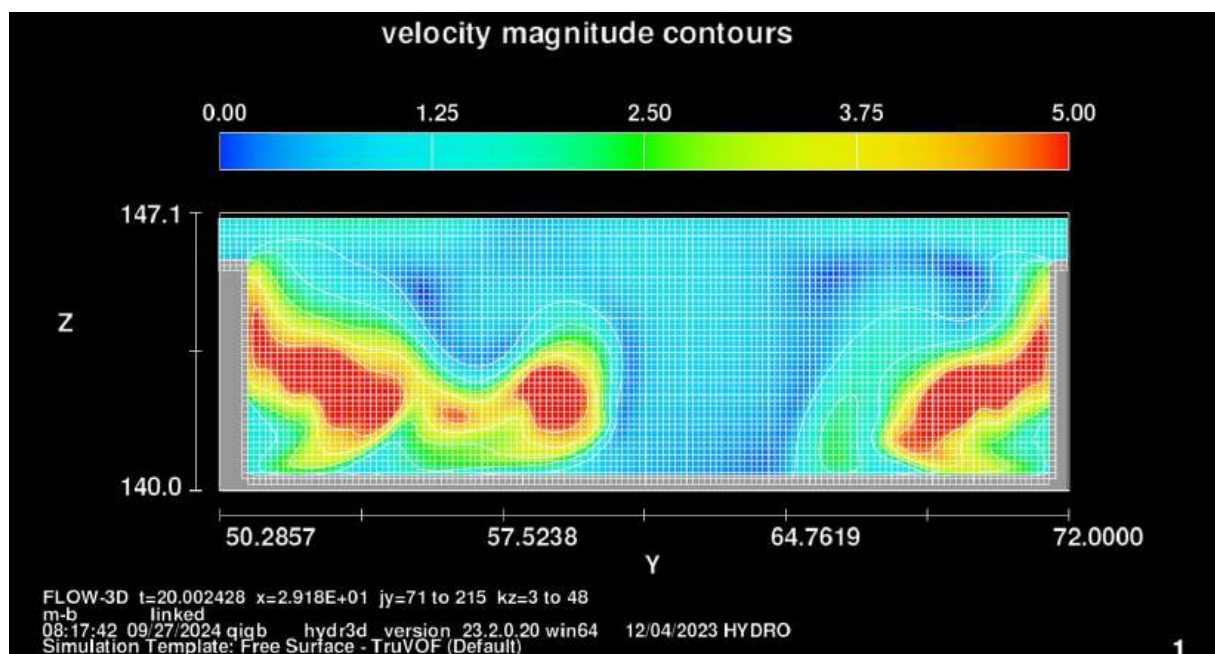


Abbildung 99 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]

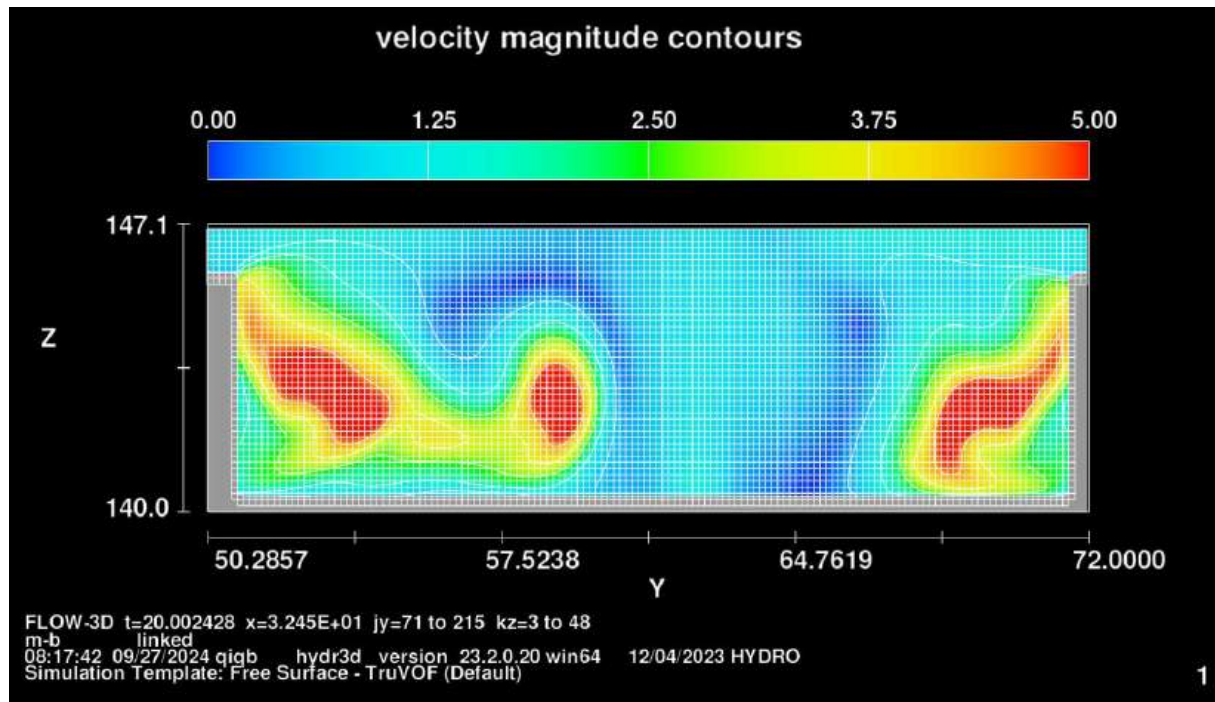


Abbildung 100 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

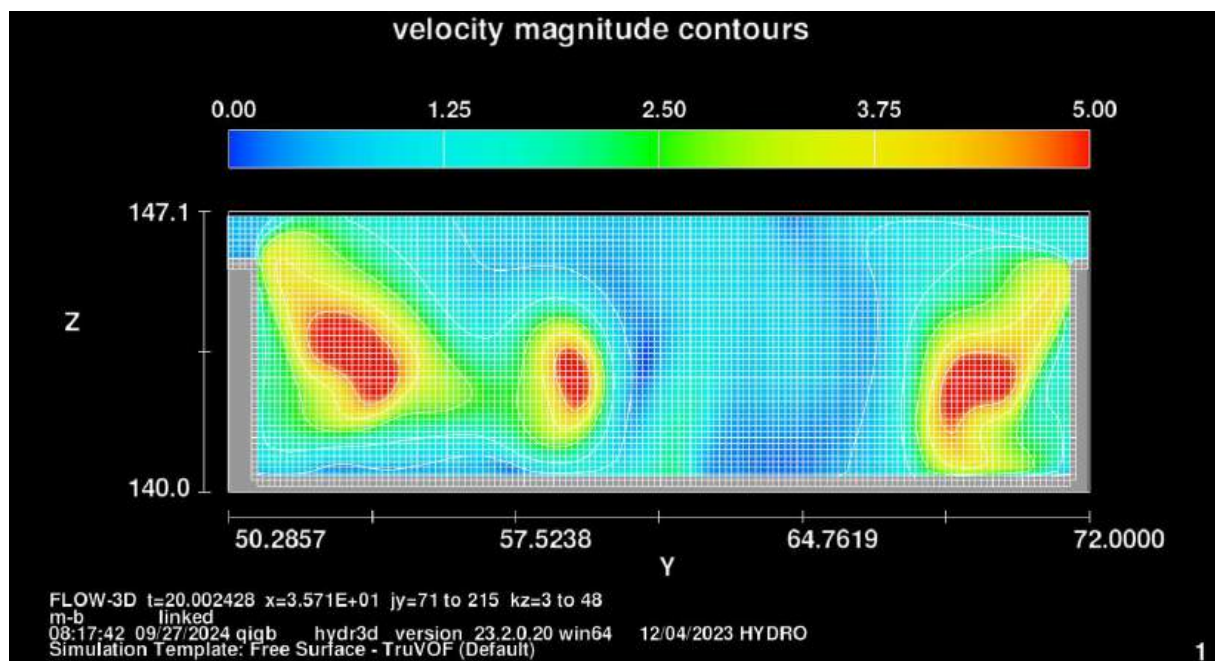


Abbildung 101 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]



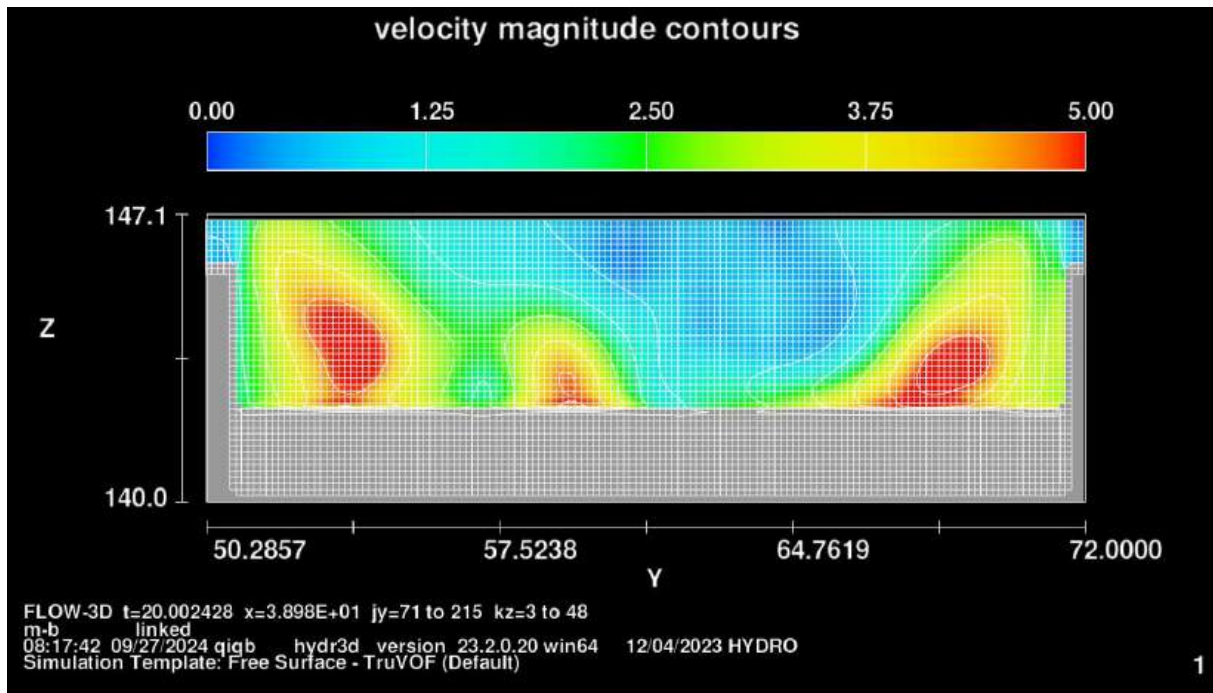


Abbildung 102 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

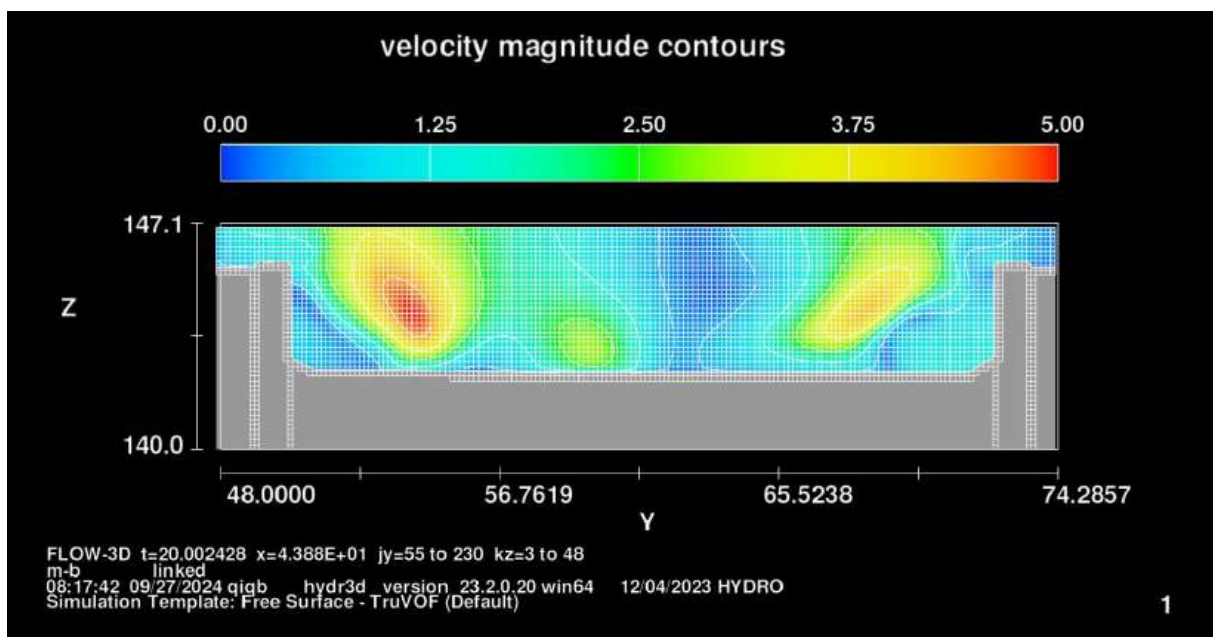


Abbildung 103 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]



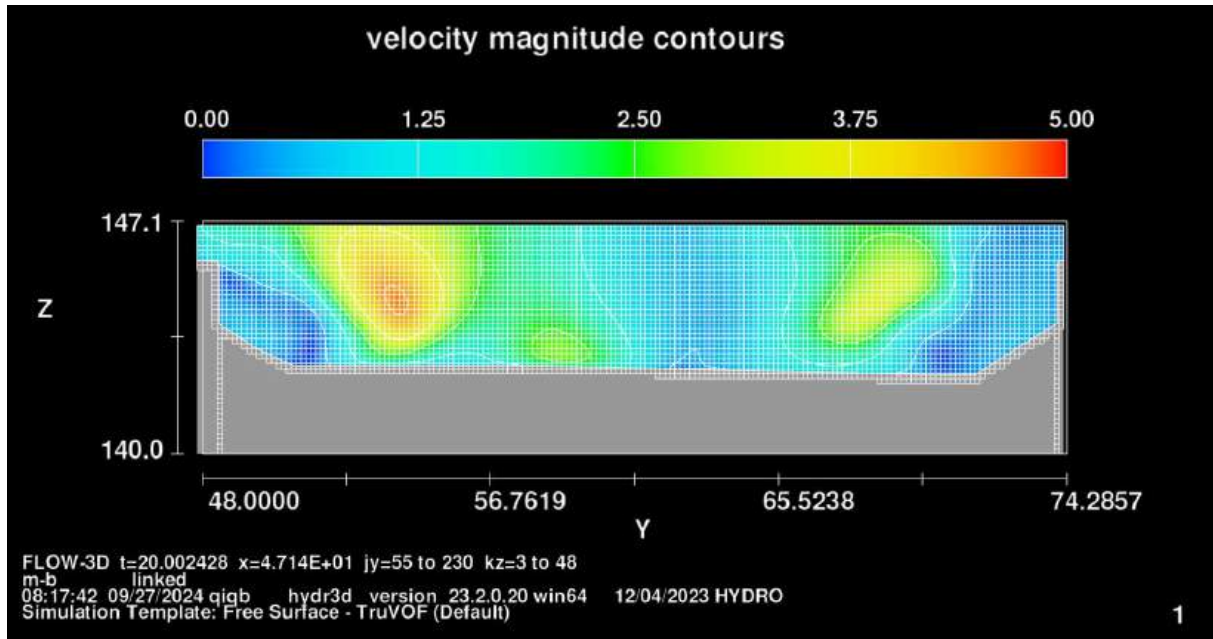


Abbildung 104 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

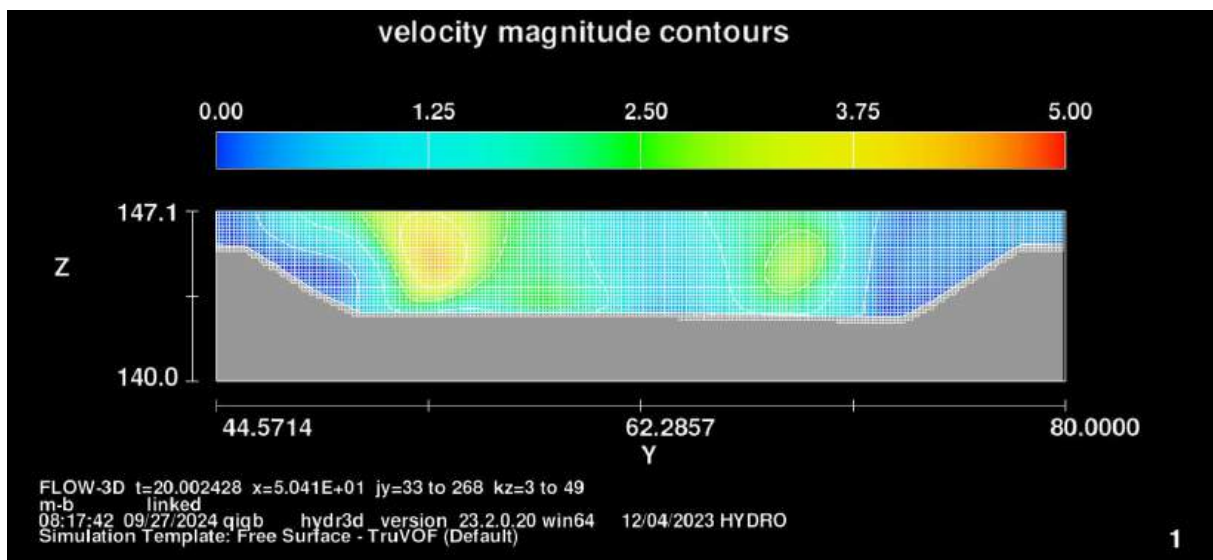


Abbildung 105 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]

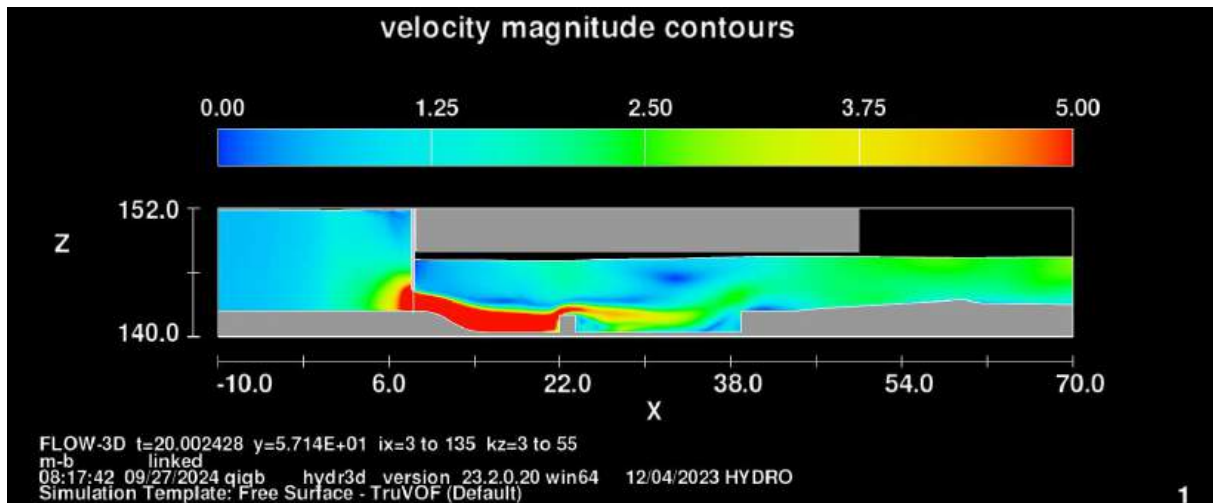


Abbildung 106 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]

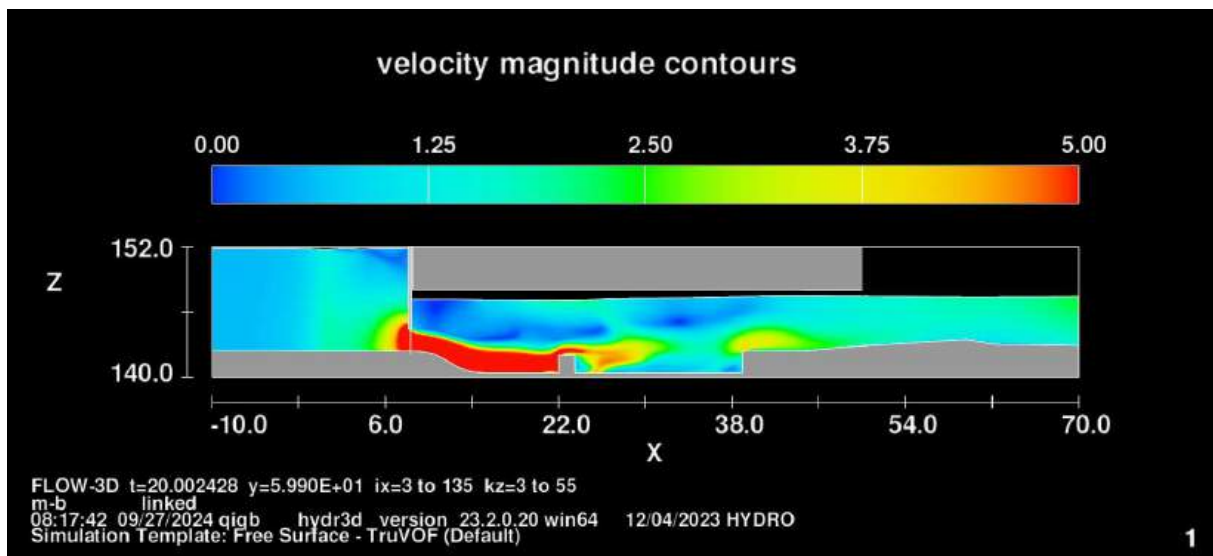


Abbildung 107 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]

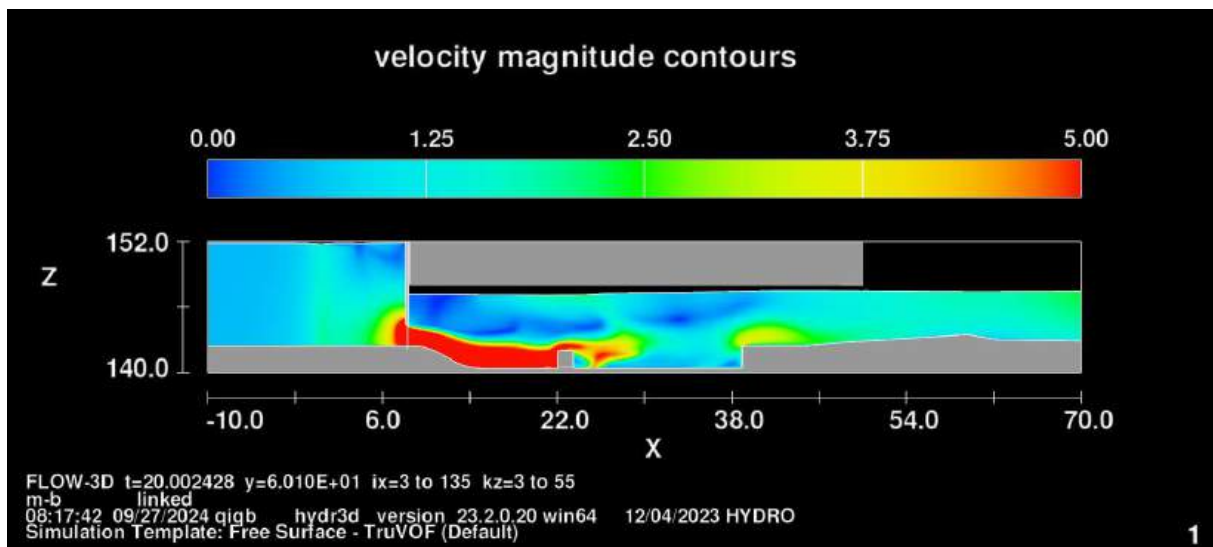


Abbildung 108 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]

## 9 Gesamtmodell 133 - Nachweis Leistungsfähigkeit

**BHQ2 (n);** Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK; Schützöffnung 4,89 m;  $Q_{\text{ges}}=576 \text{ m}^3/\text{s}$

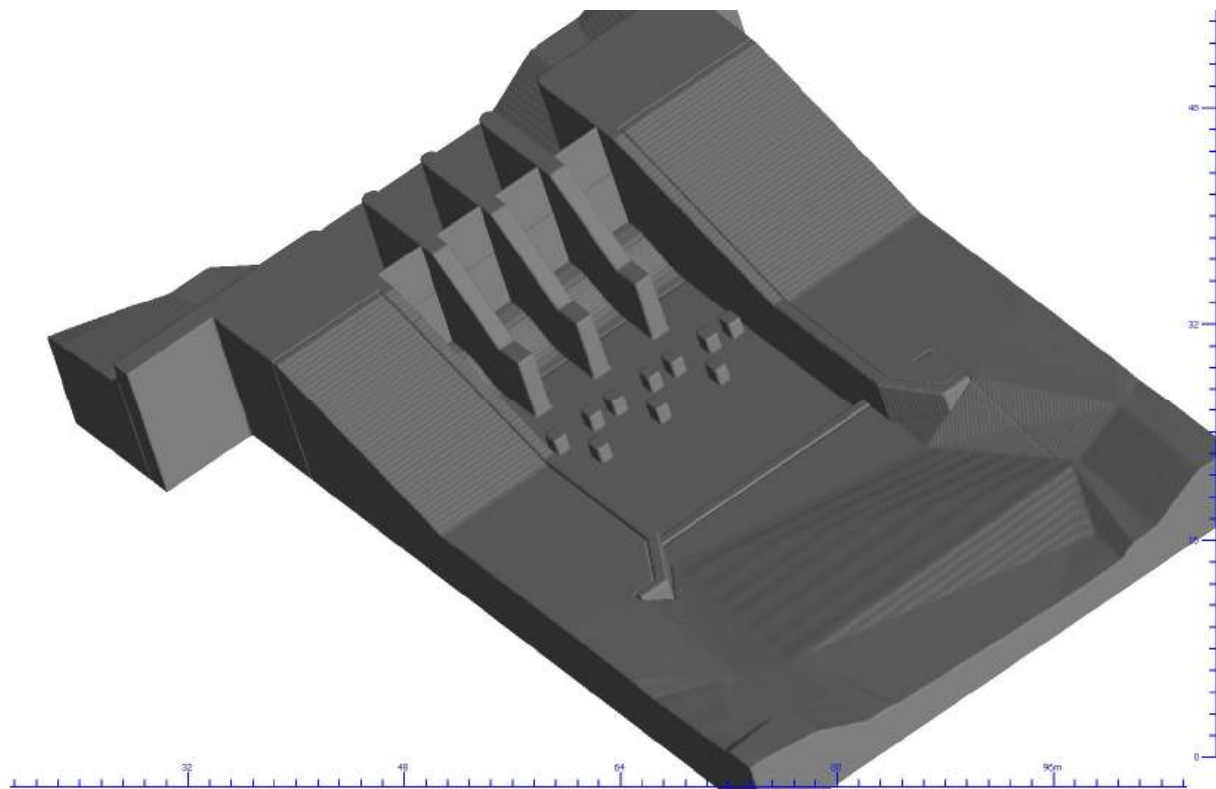


Abbildung 109 Modelgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 133

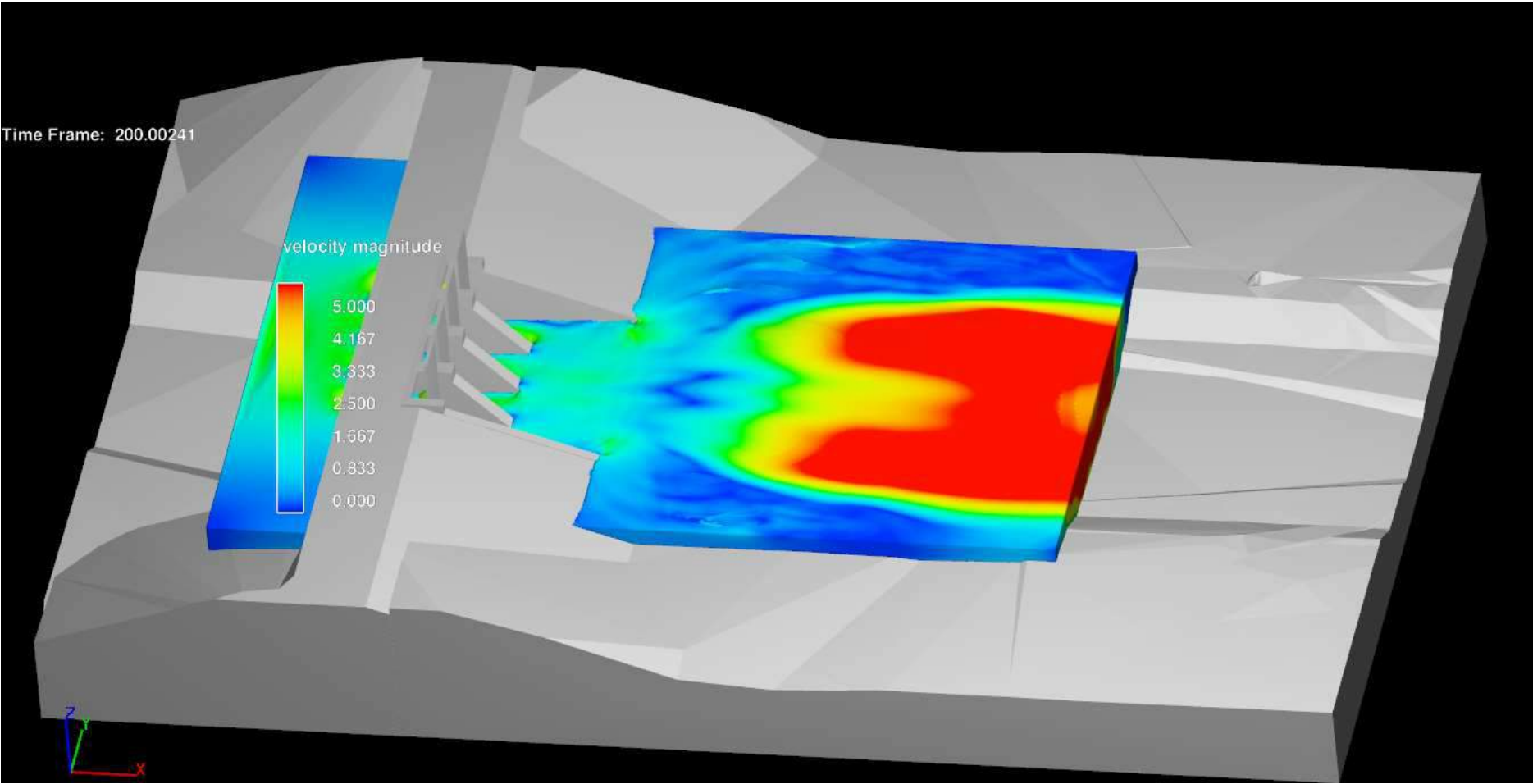


Abbildung 110 Fließgeschwindigkeiten 3d Ansicht [m/s]

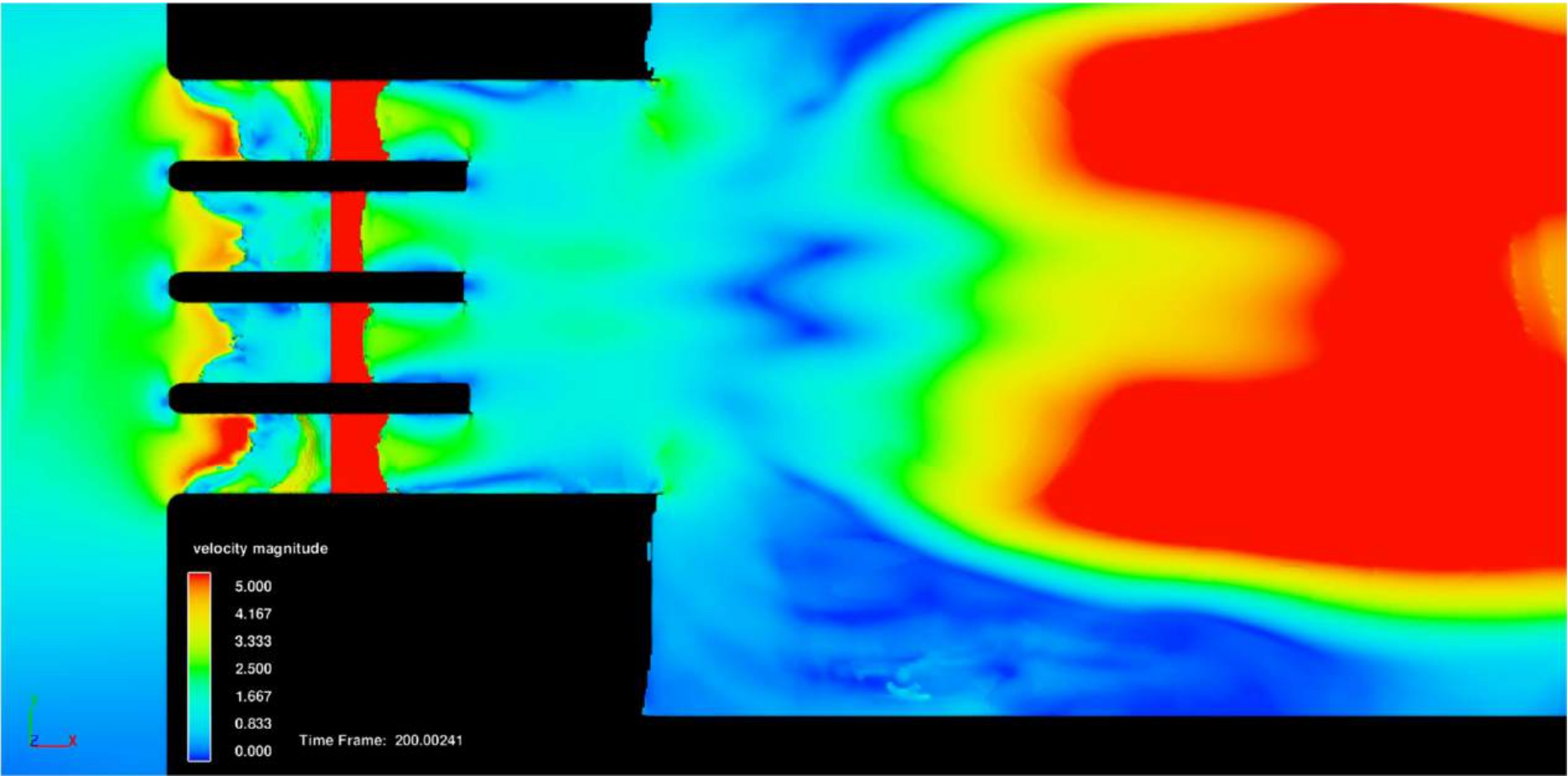


Abbildung 111 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]



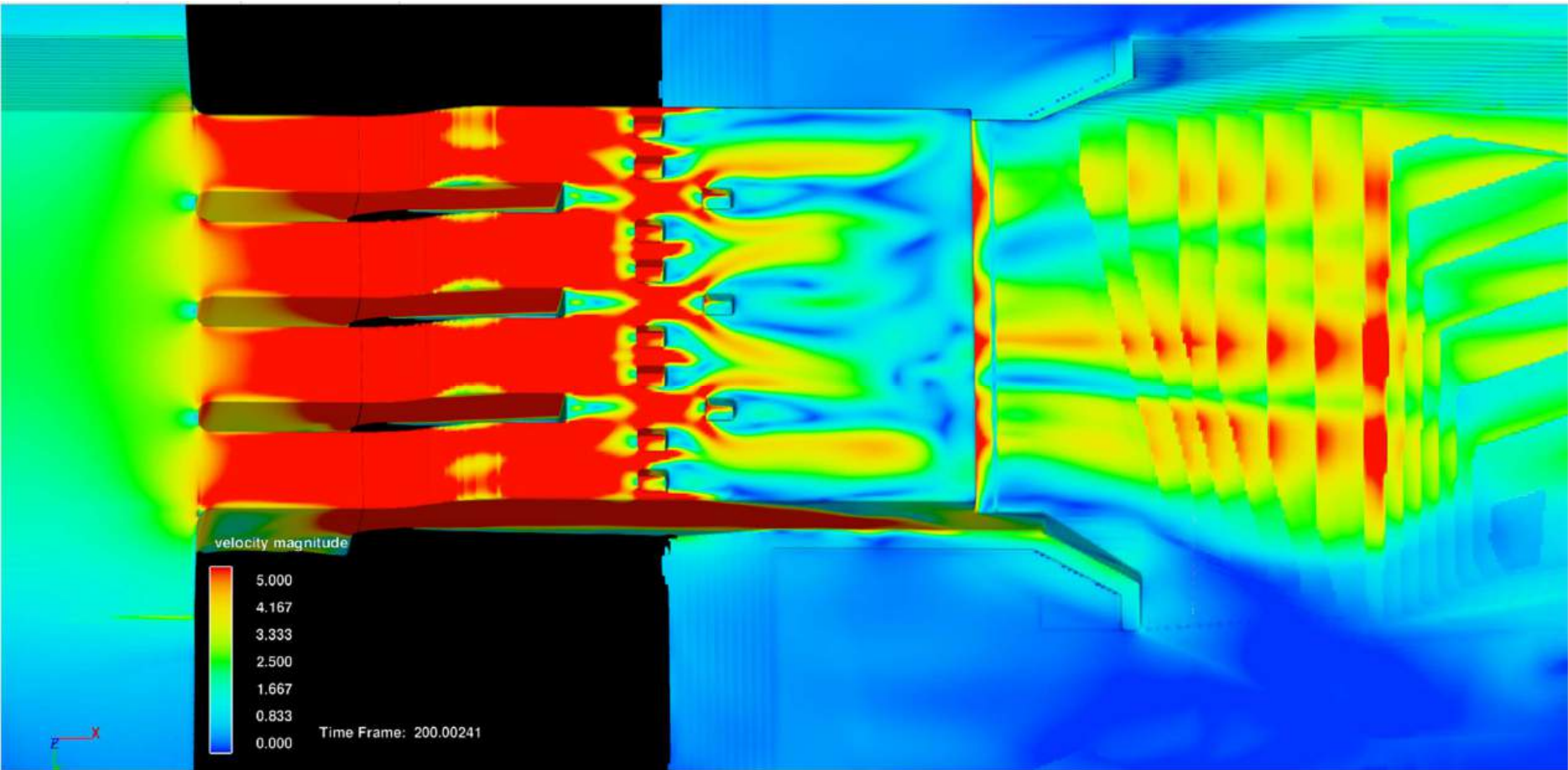


Abbildung 112 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]

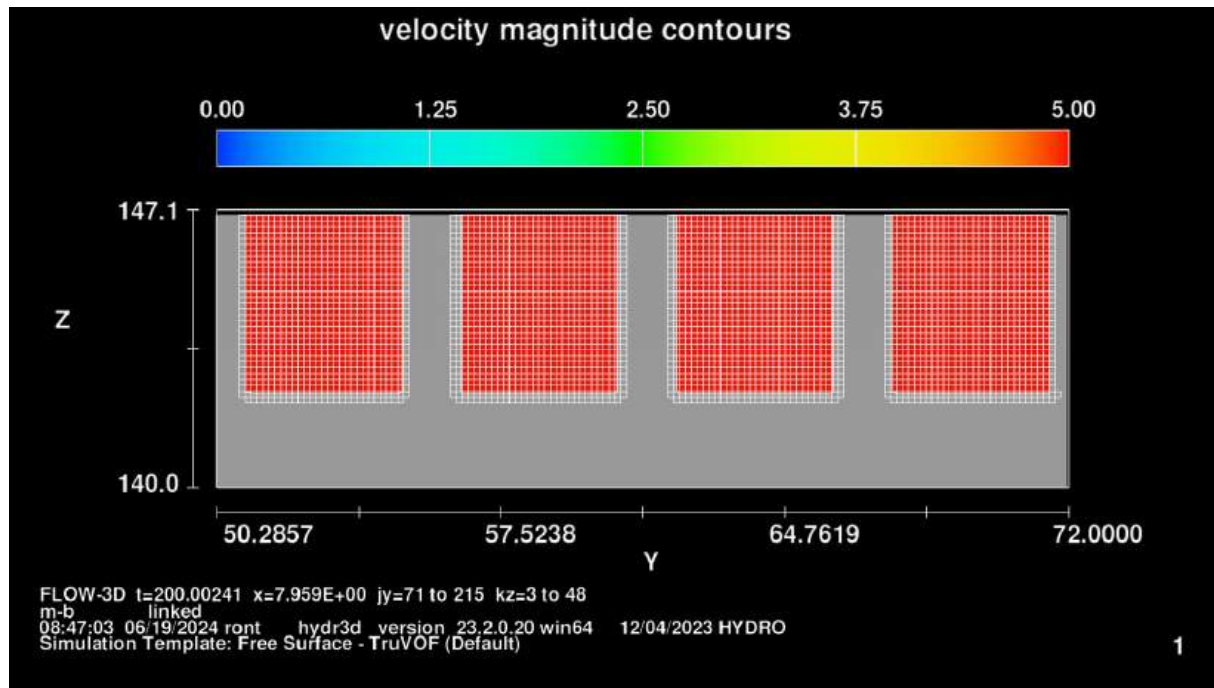


Abbildung 113 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

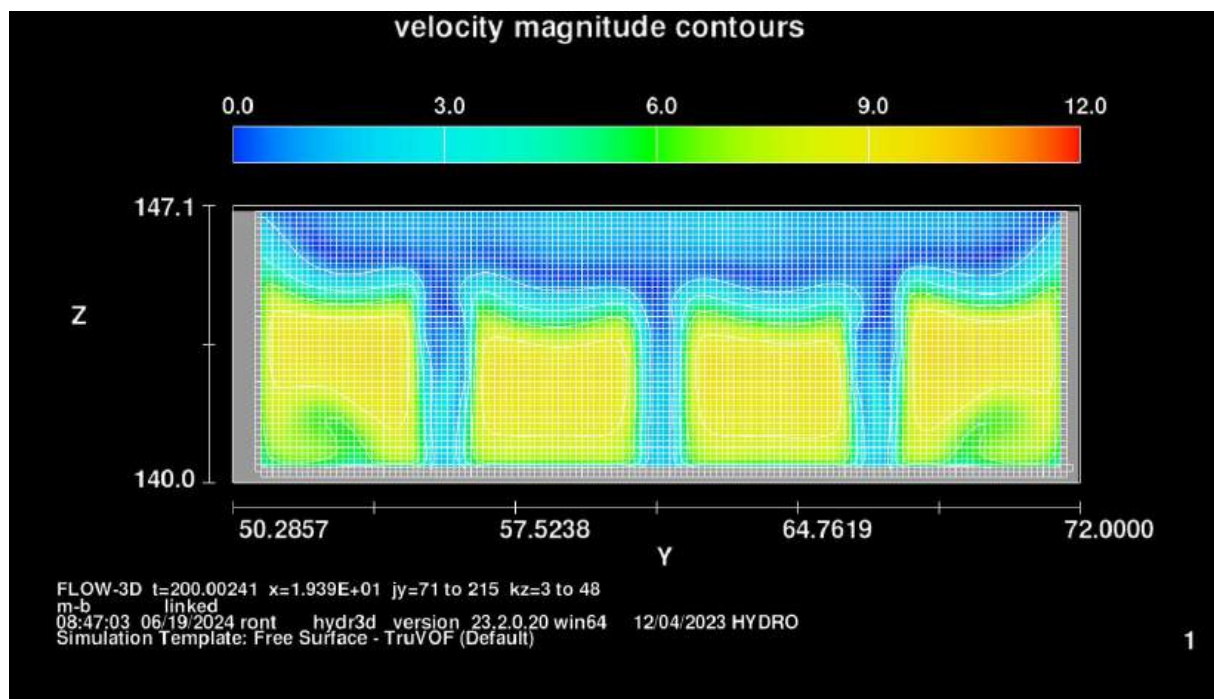


Abbildung 114 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

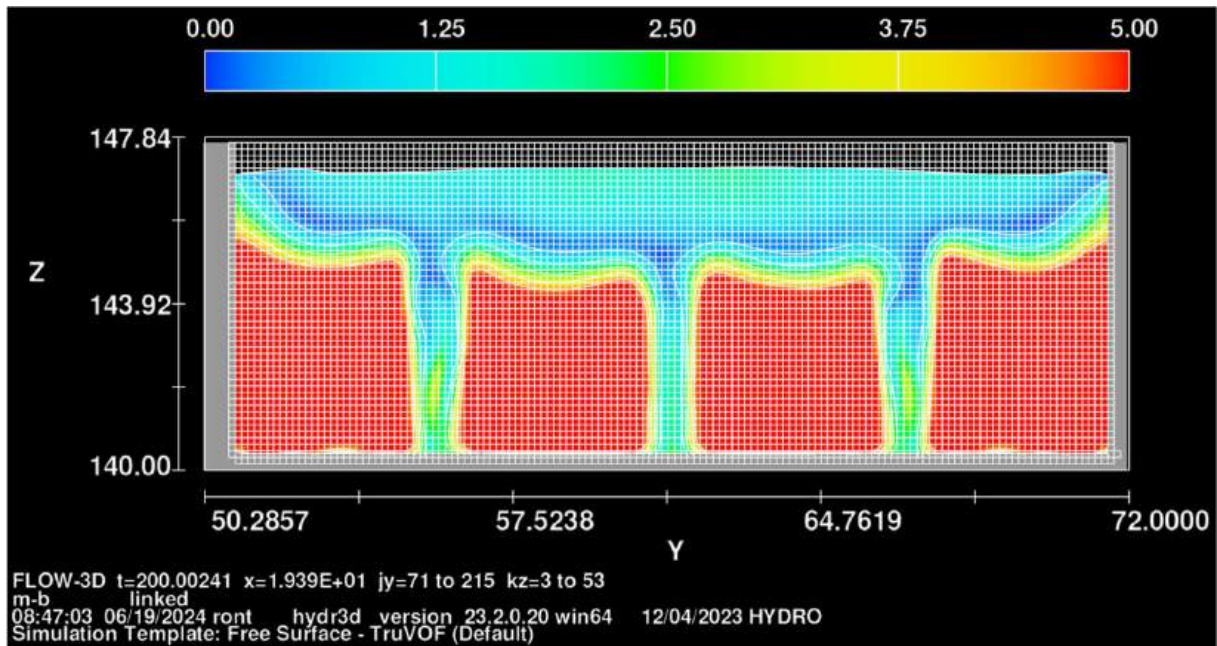


Abbildung 115 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

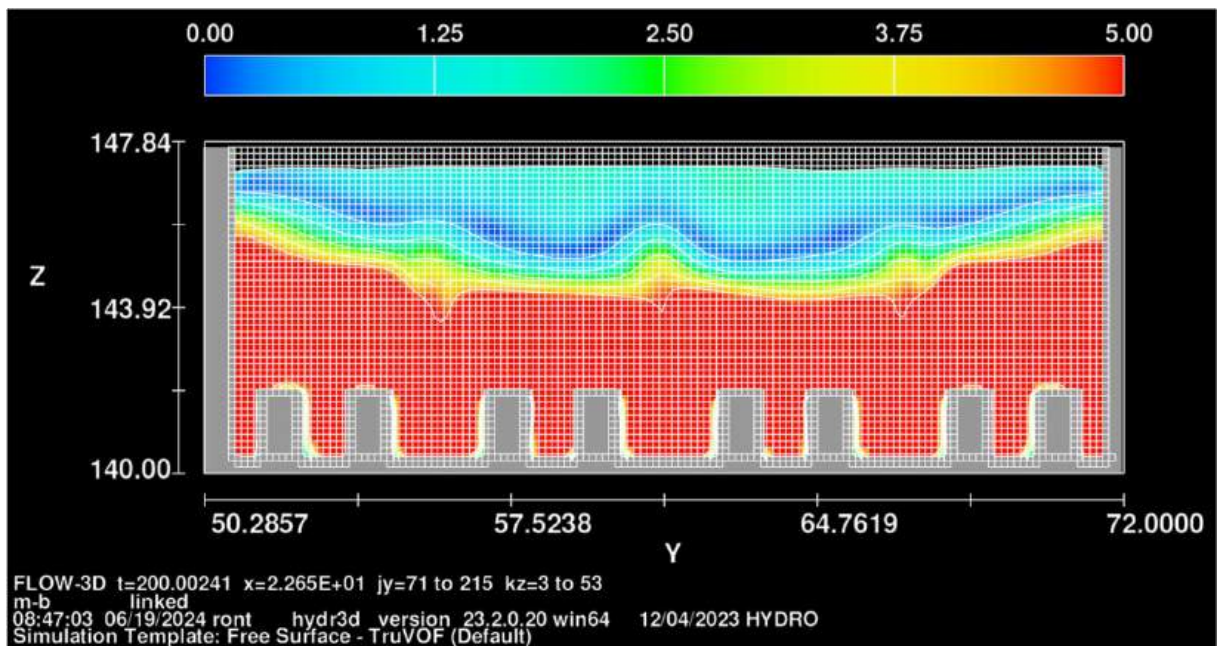


Abbildung 116 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]



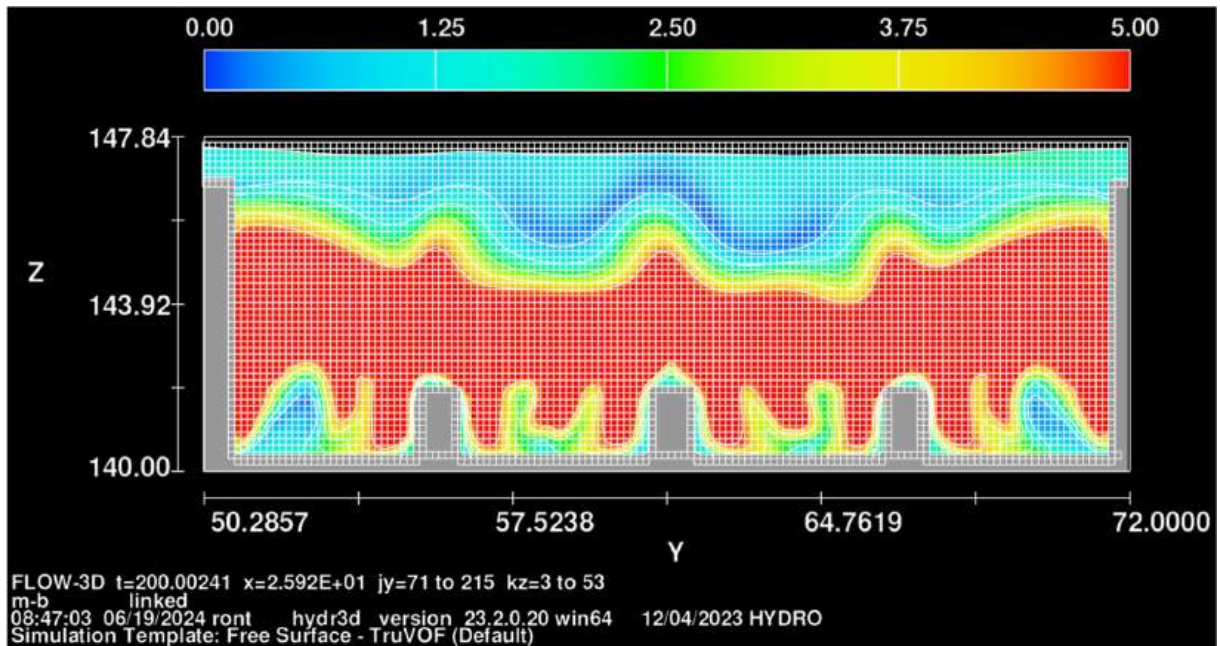


Abbildung 117 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

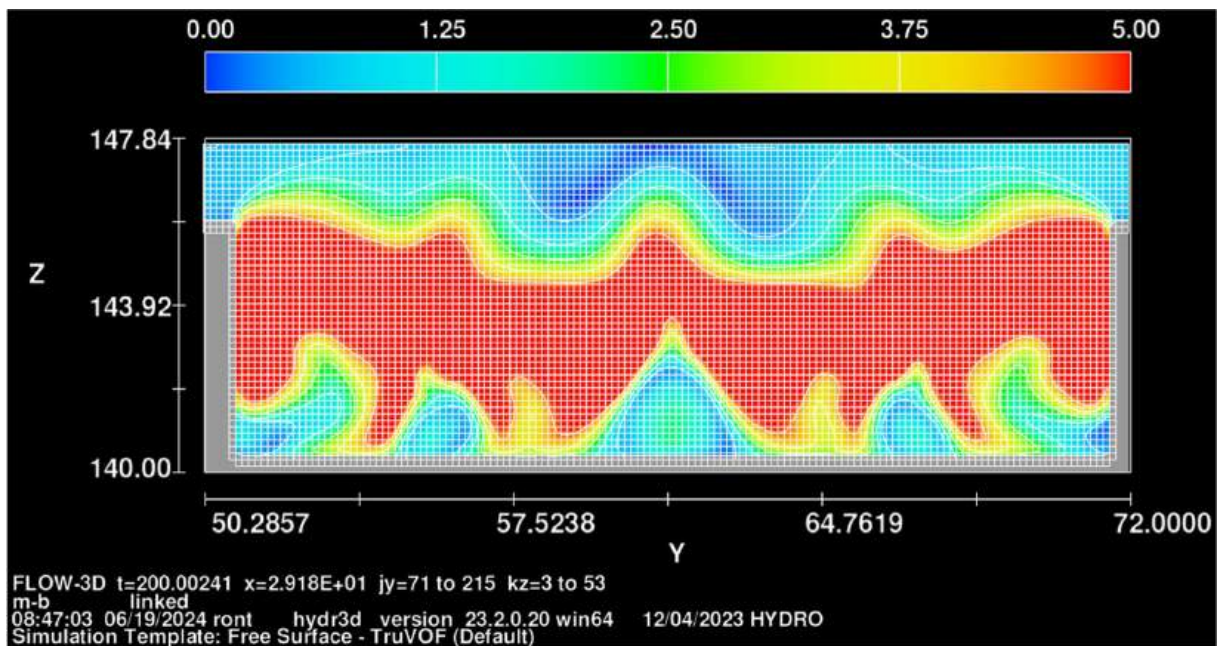


Abbildung 118 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]



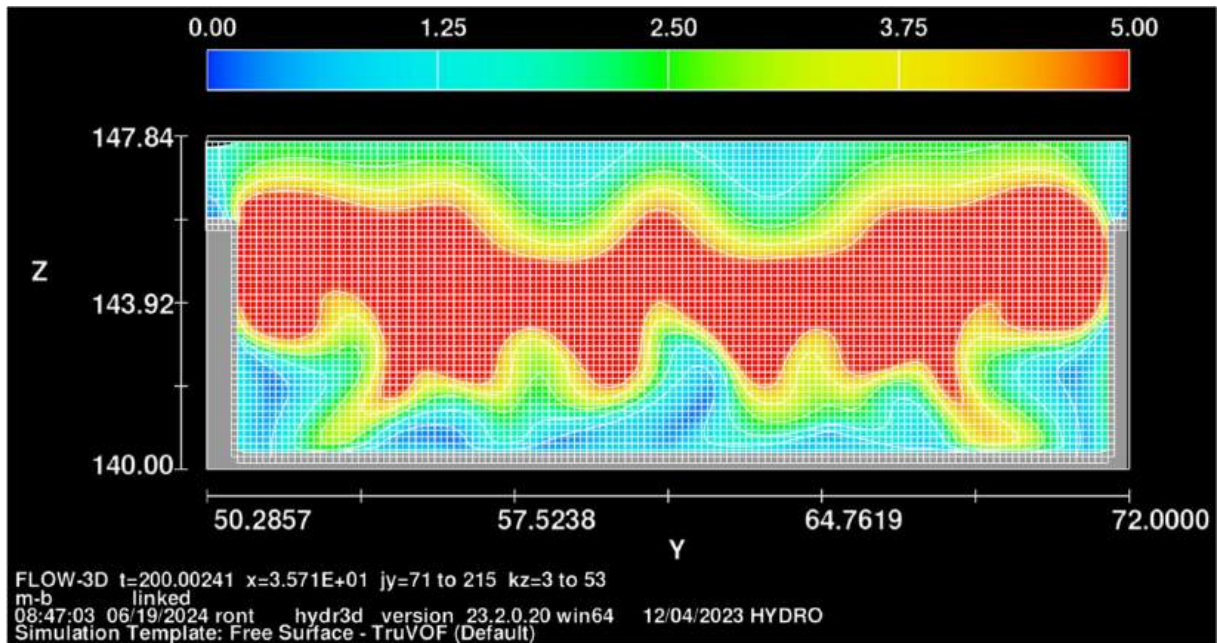


Abbildung 119 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

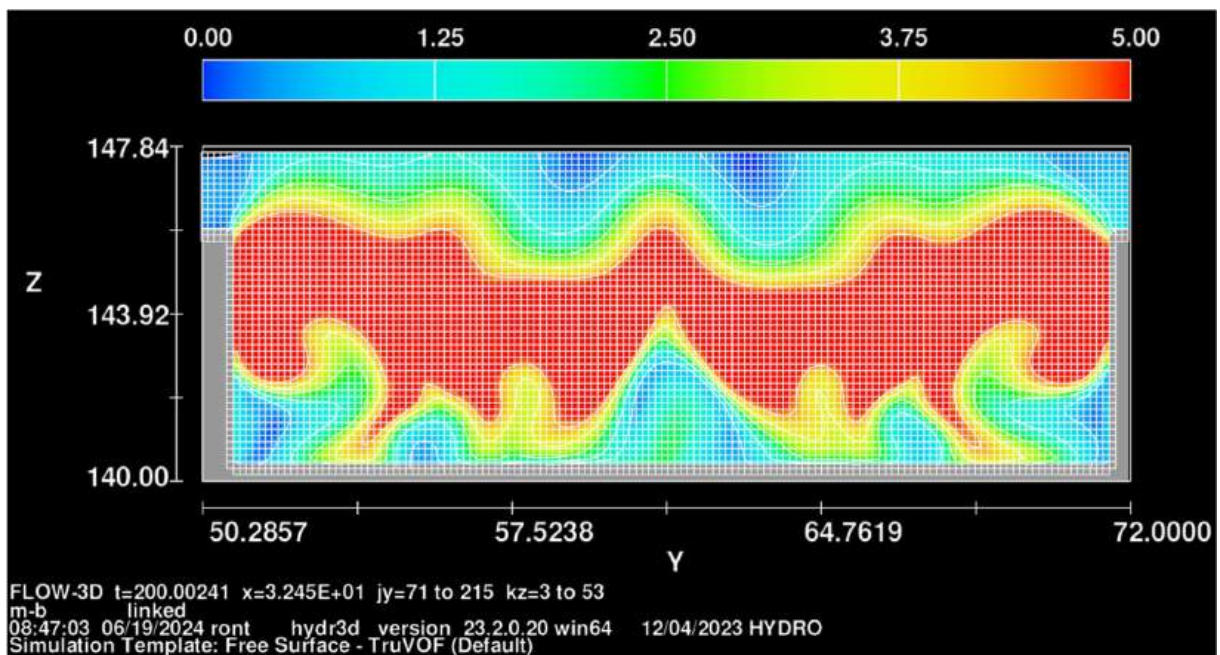


Abbildung 120 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

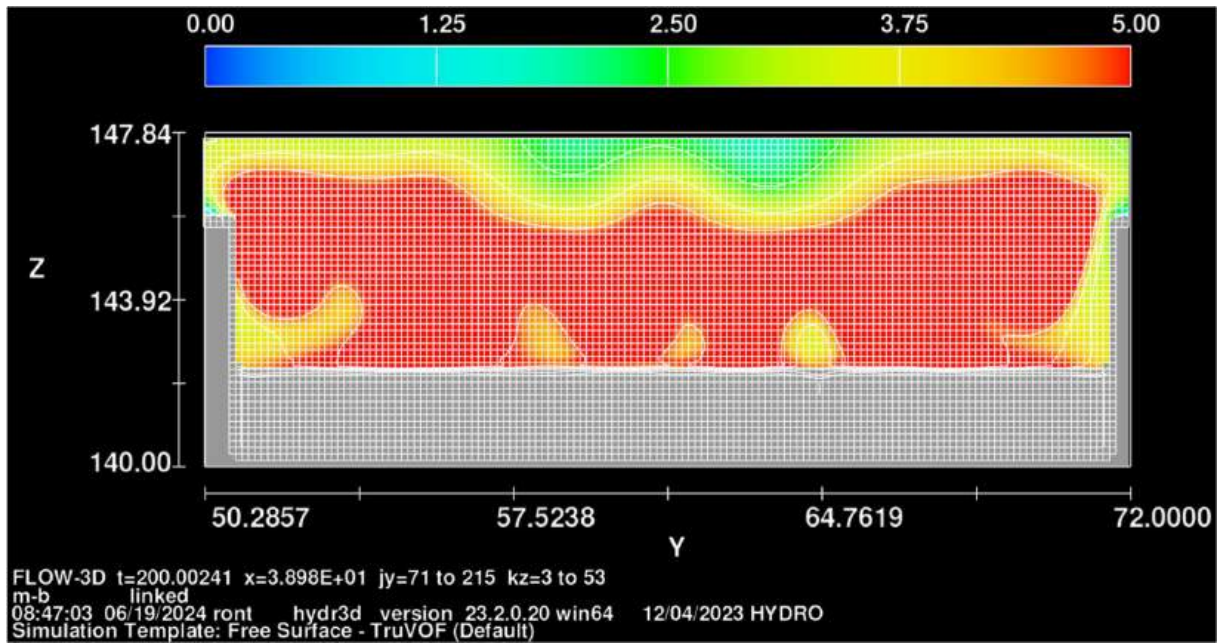


Abbildung 121 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

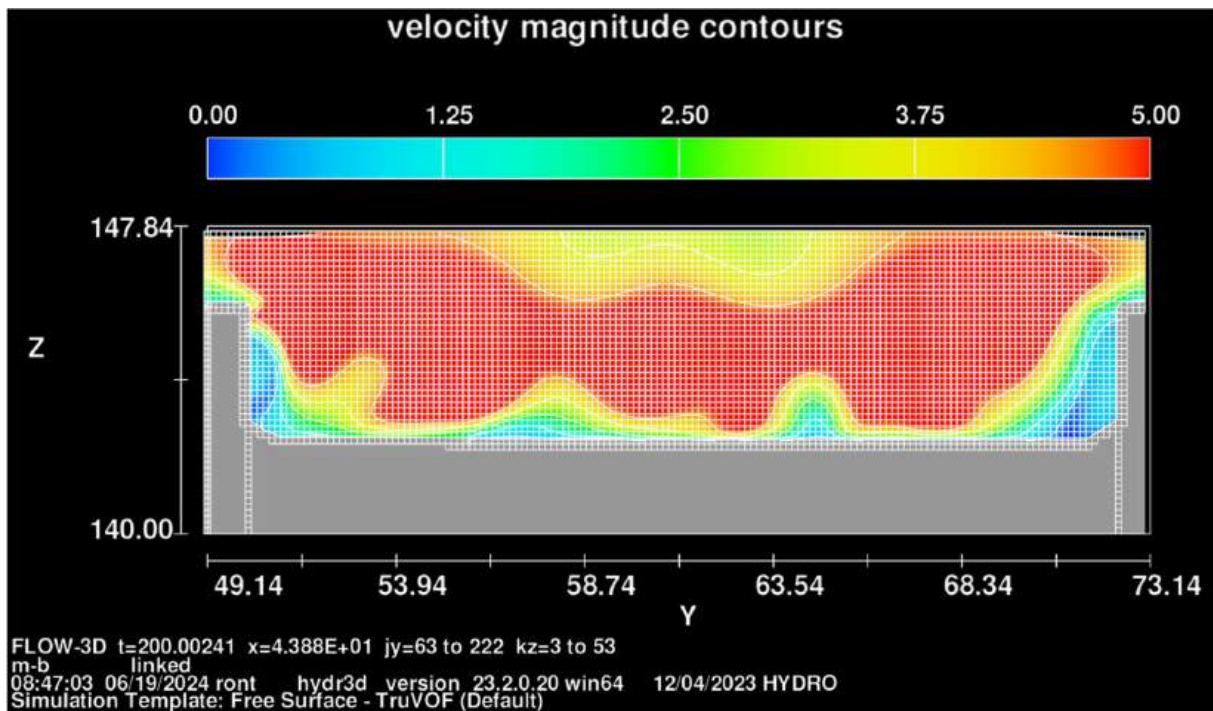


Abbildung 122 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=43,9 m [m/s]

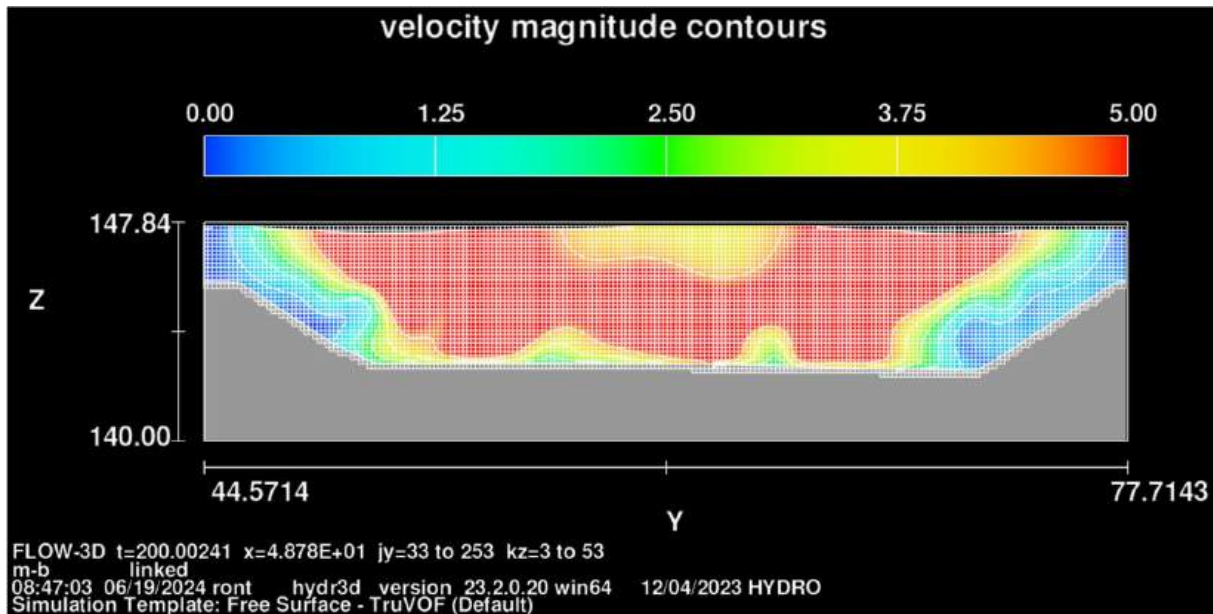


Abbildung 123 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=48,8 m [m/s]

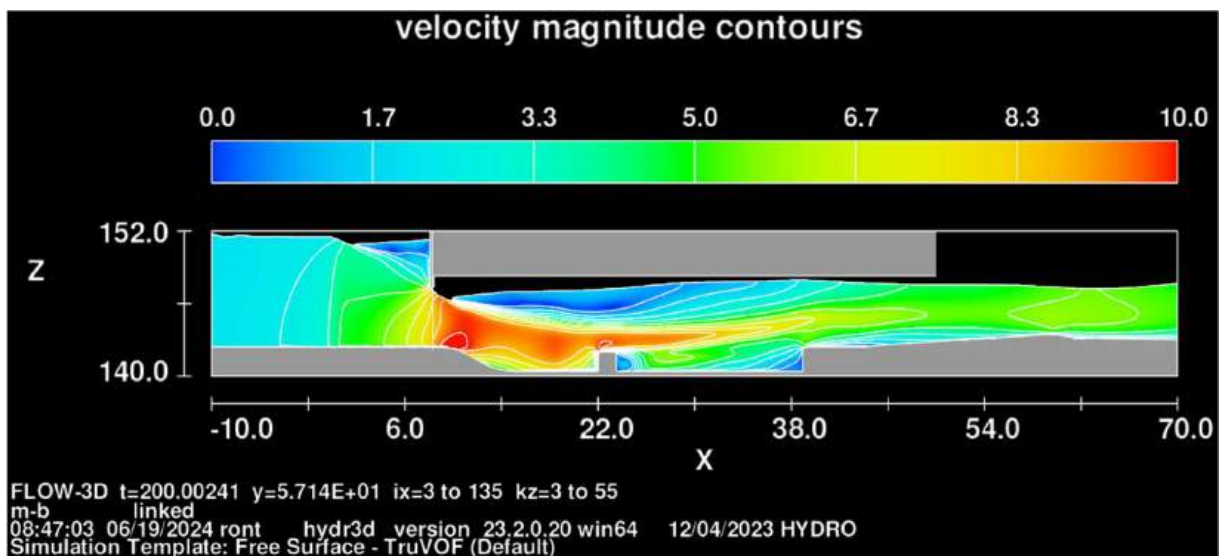


Abbildung 124 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,1 m [m/s]



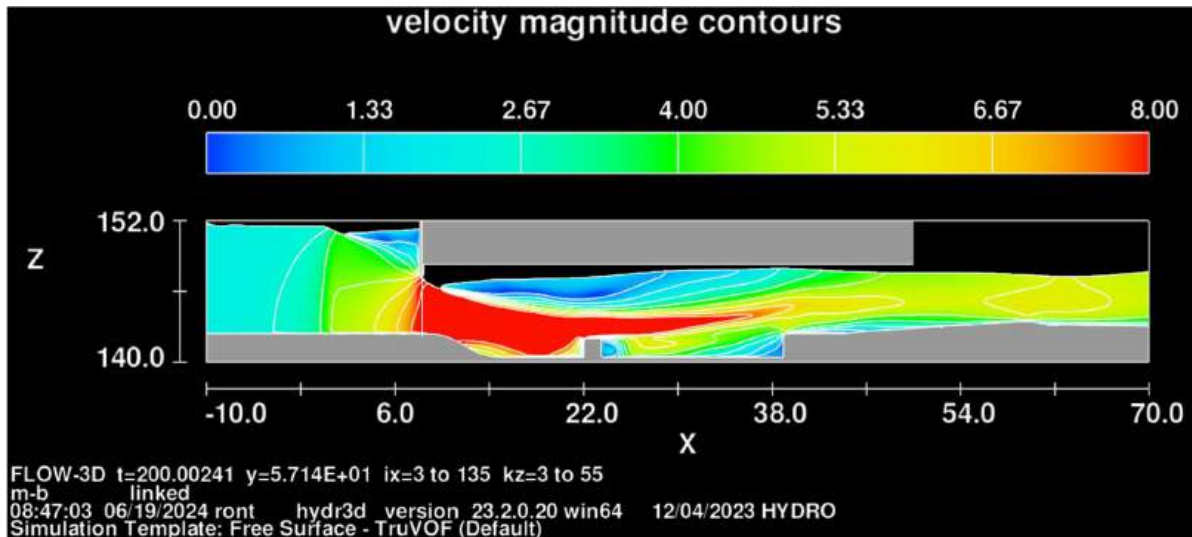


Abbildung 125 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=57,1$  m [m/s]

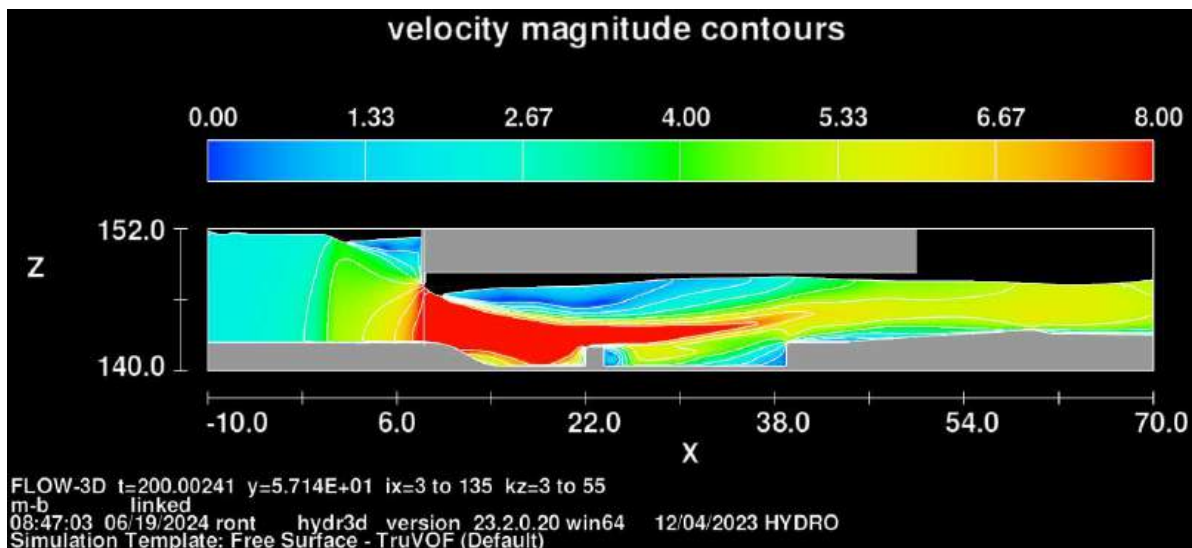


Abbildung 126 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=59,4$  m [m/s]

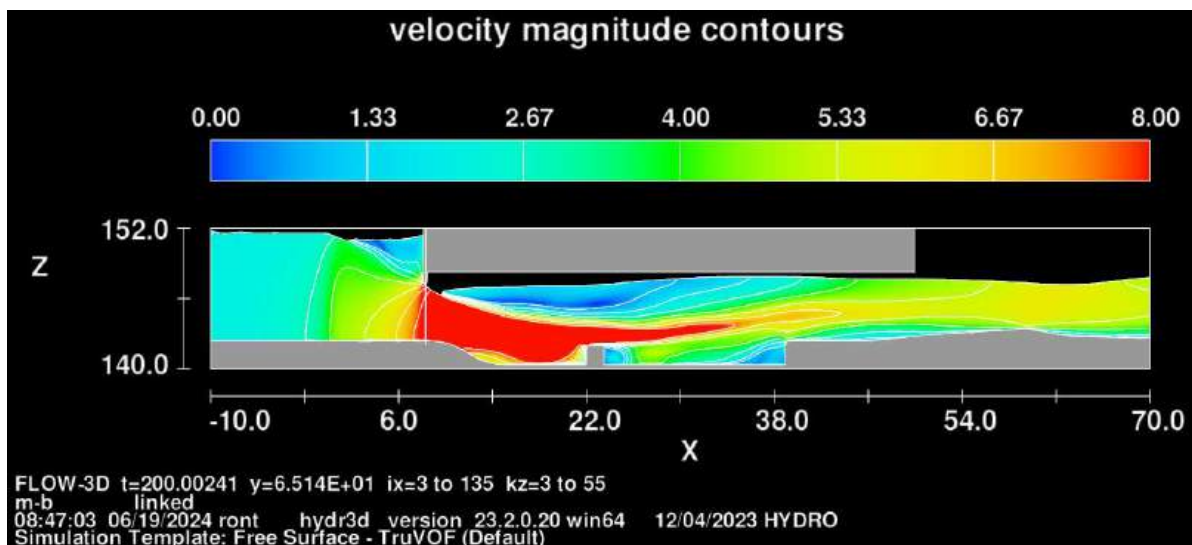


Abbildung 127 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=65,1$  m [m/s]



## 10 Gesamtmodell 135a - Nachweis Leistungsfähigkeit

BHQ2 (n); Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK **Schützöffnung 4,20 m**;  $Q_{\text{ges}}=527 \text{ m}^3/\text{s}$

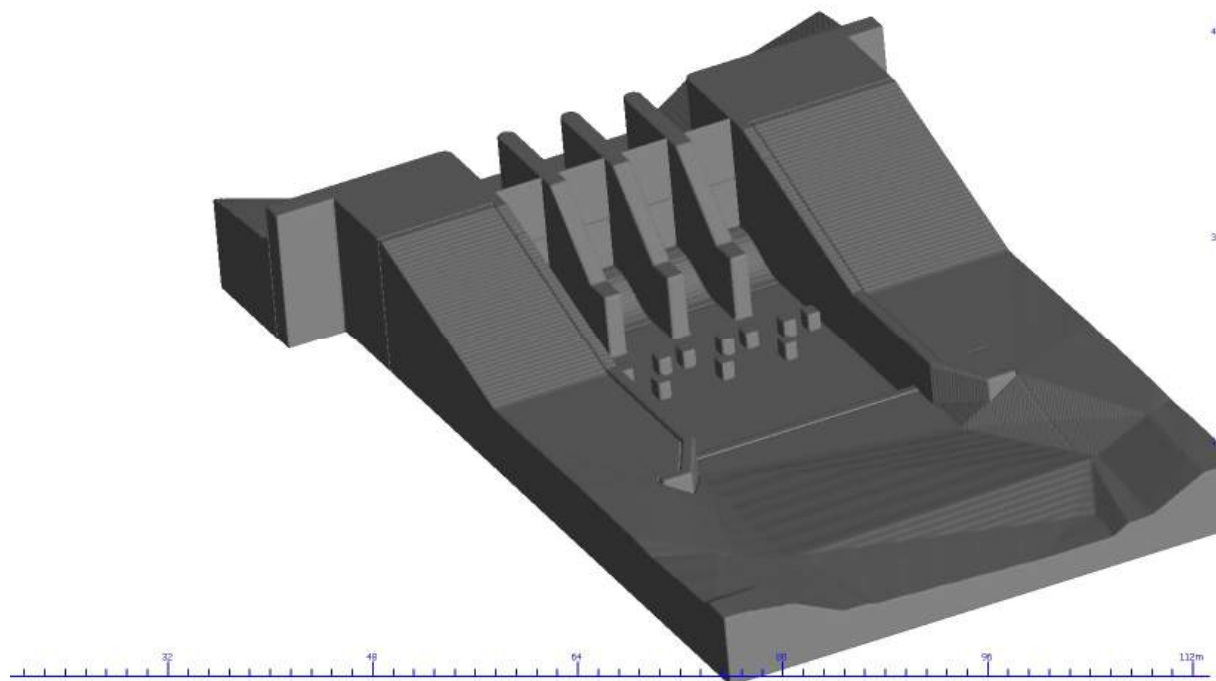


Abbildung 128 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 135a

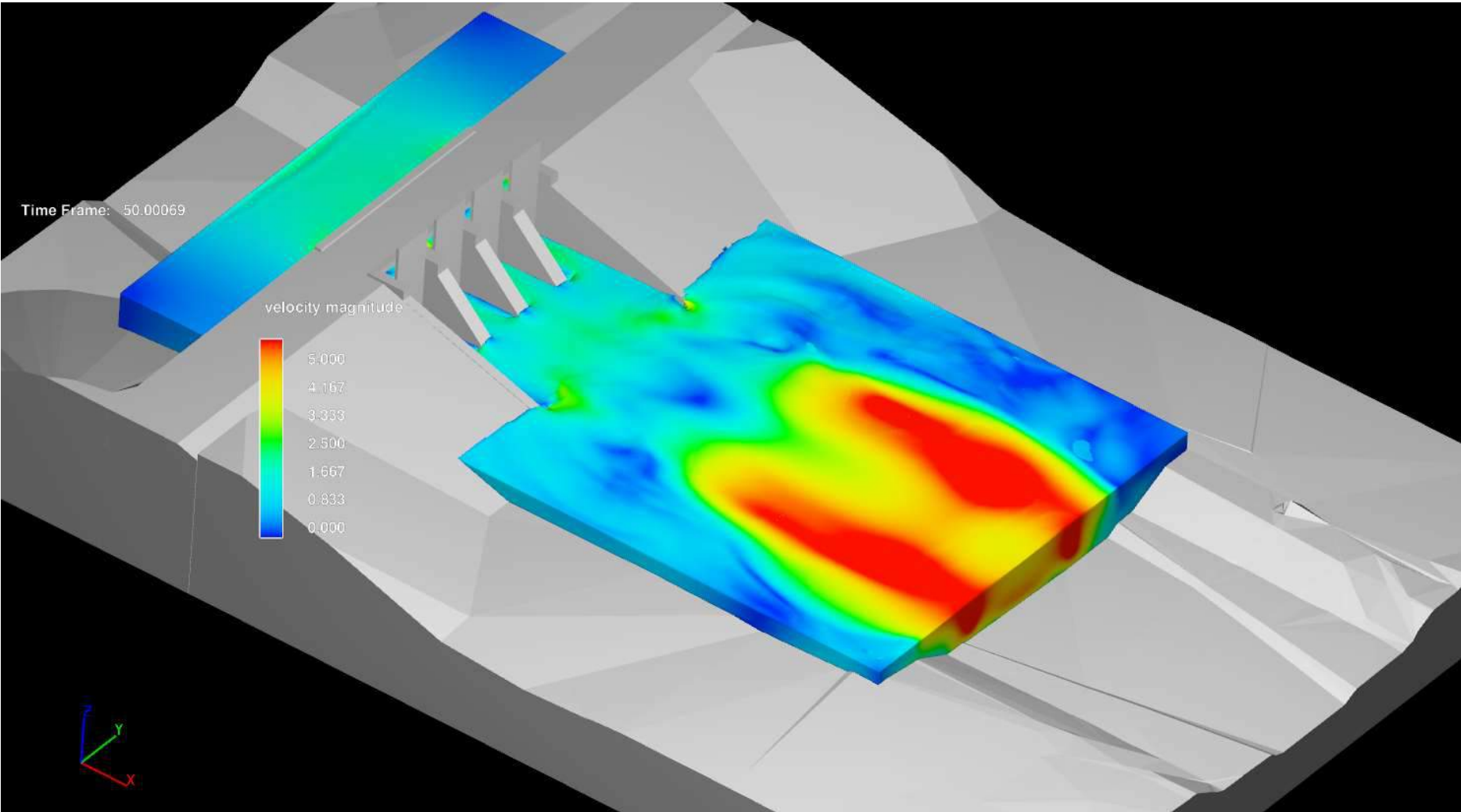


Abbildung 129 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

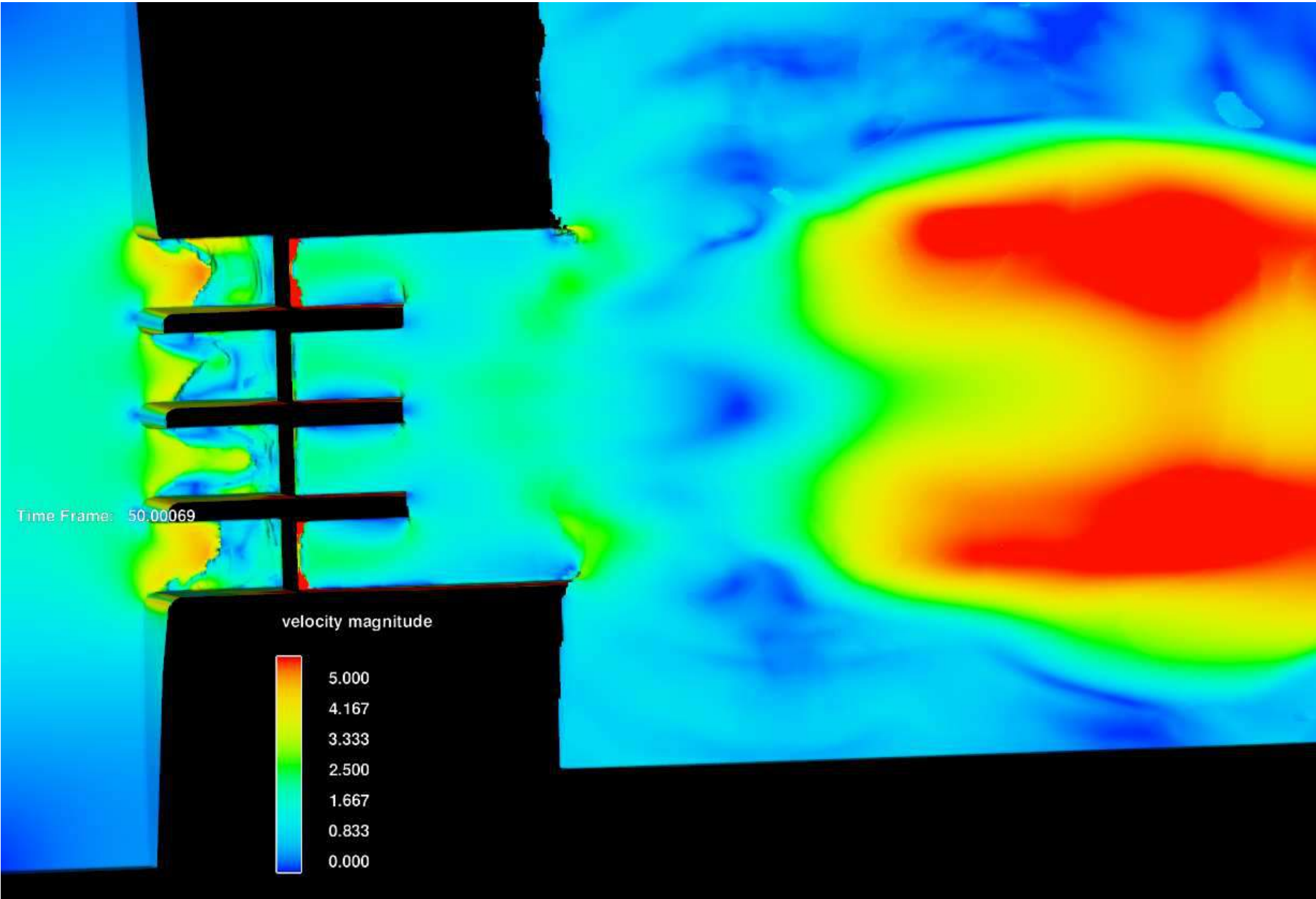


Abbildung 130 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

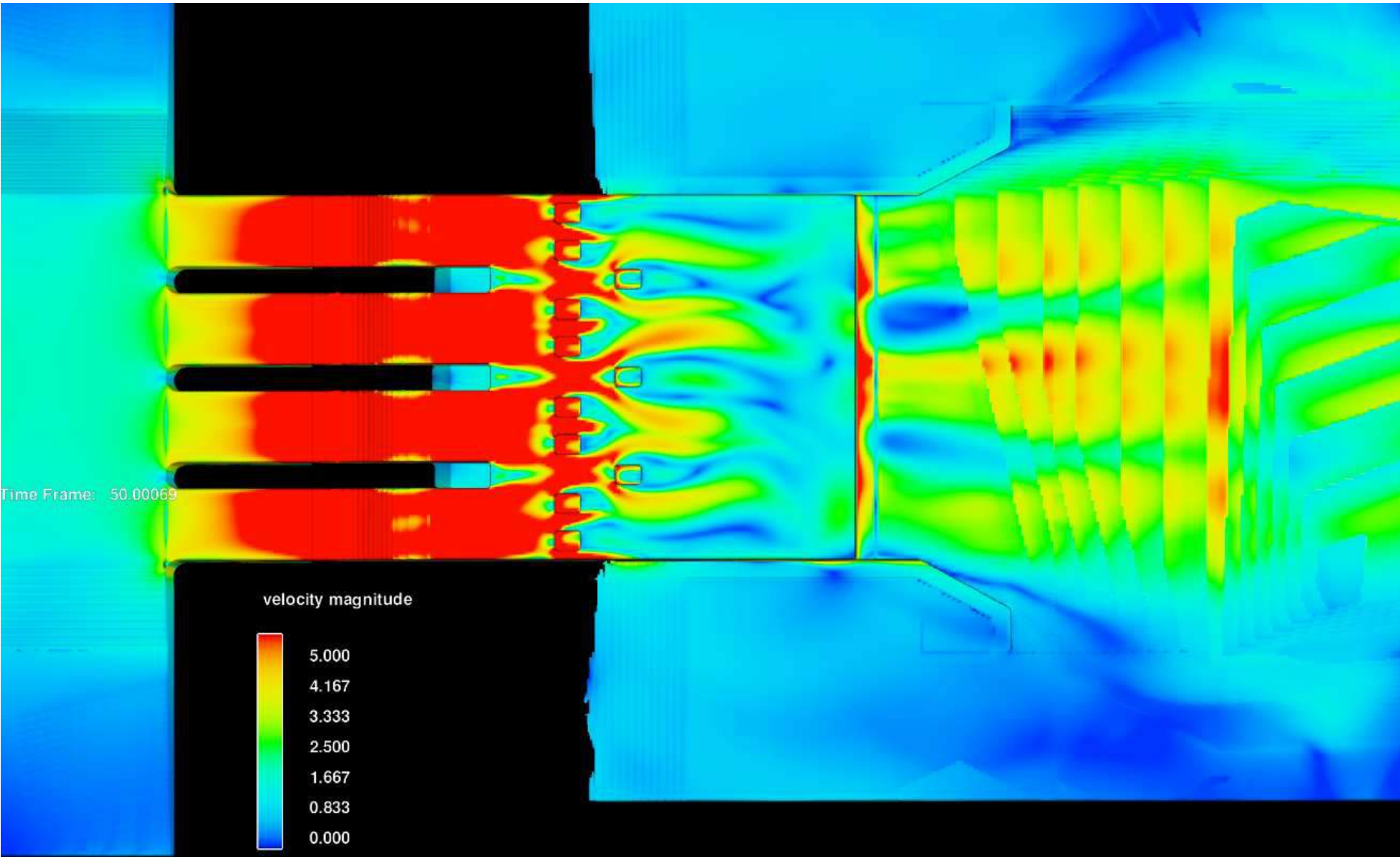


Abbildung 131 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]



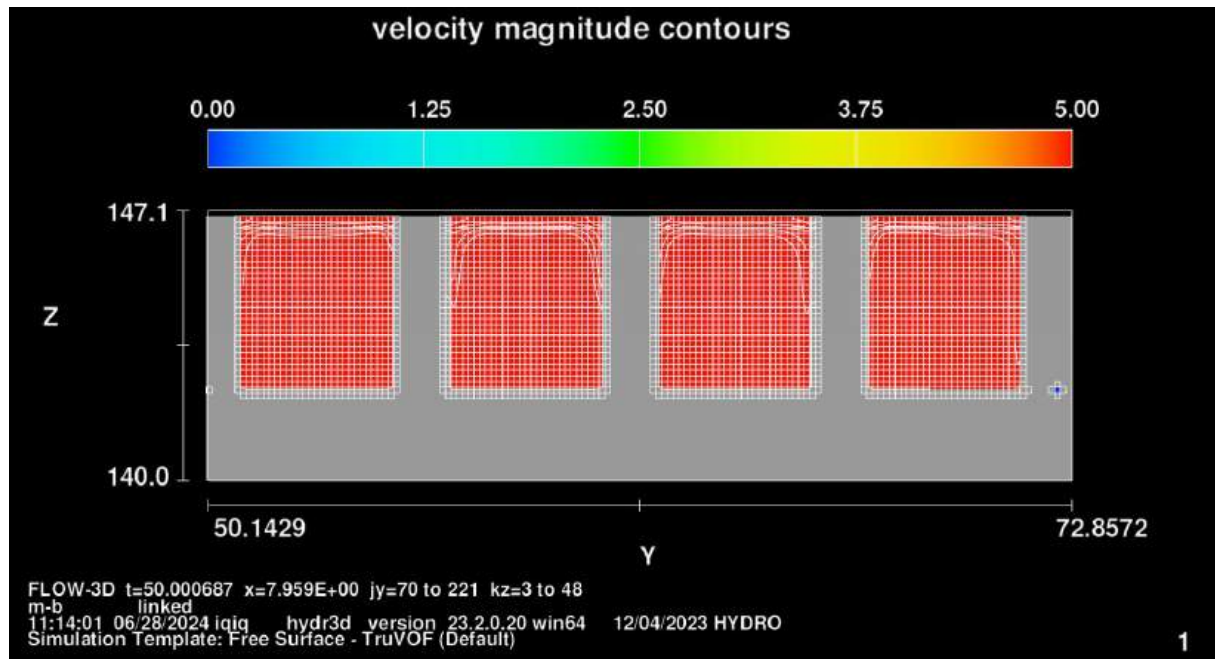


Abbildung 132 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

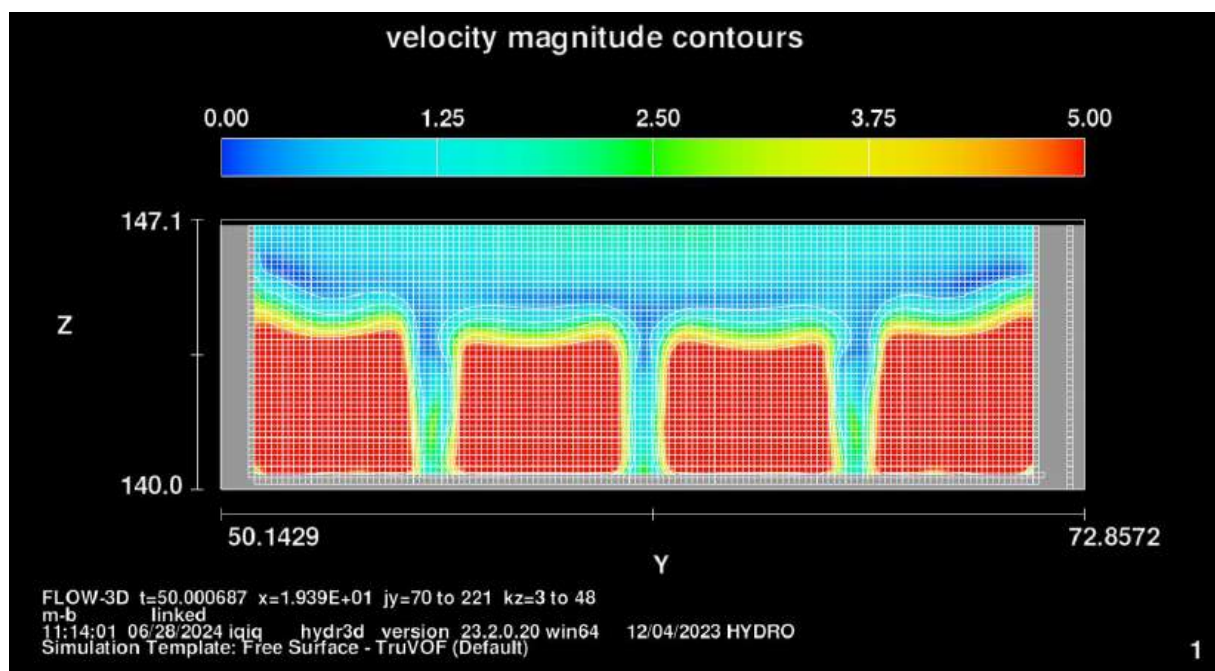


Abbildung 133 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]



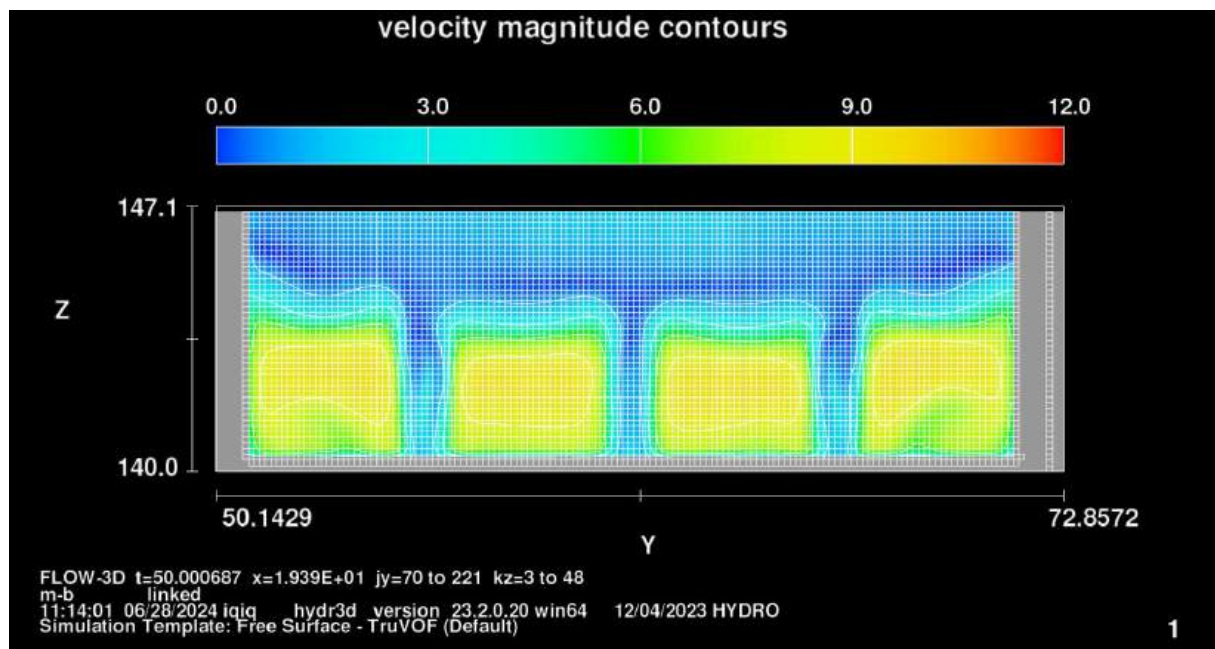


Abbildung 134 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

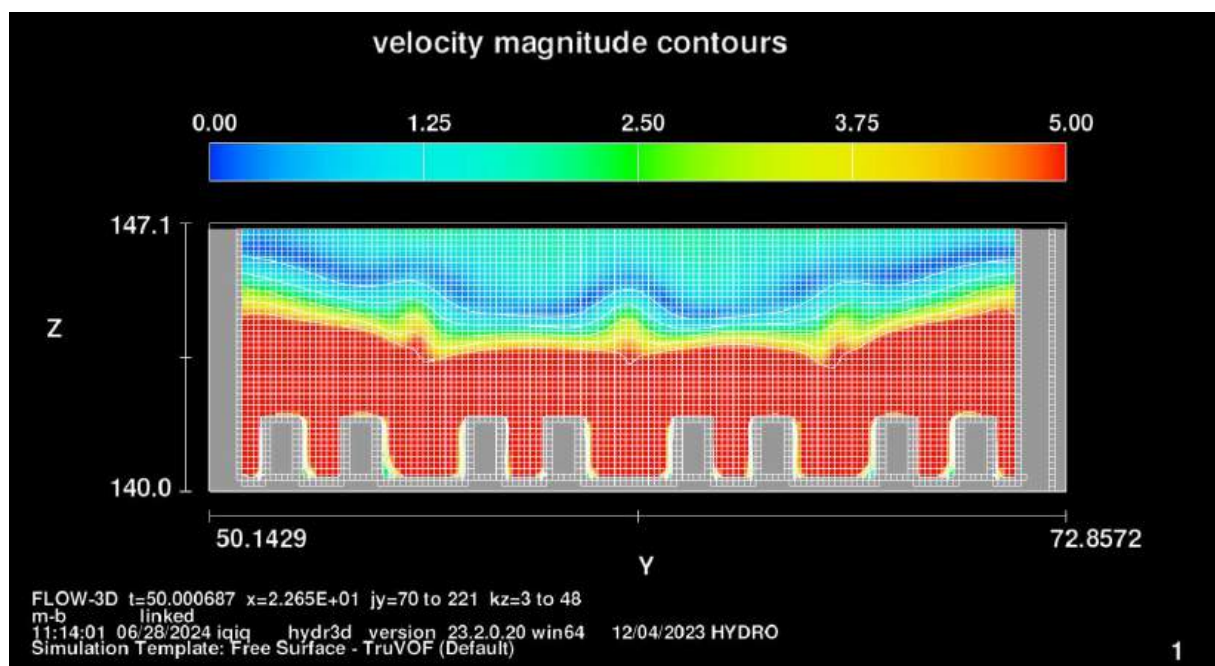


Abbildung 135 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]

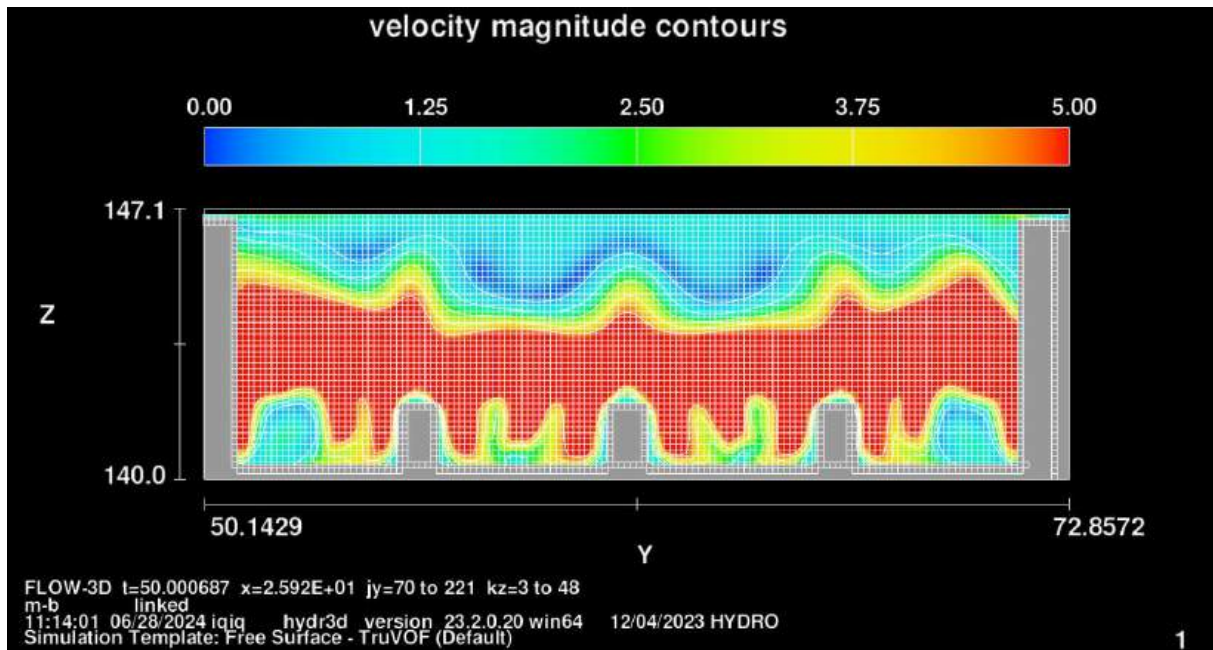


Abbildung 136 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

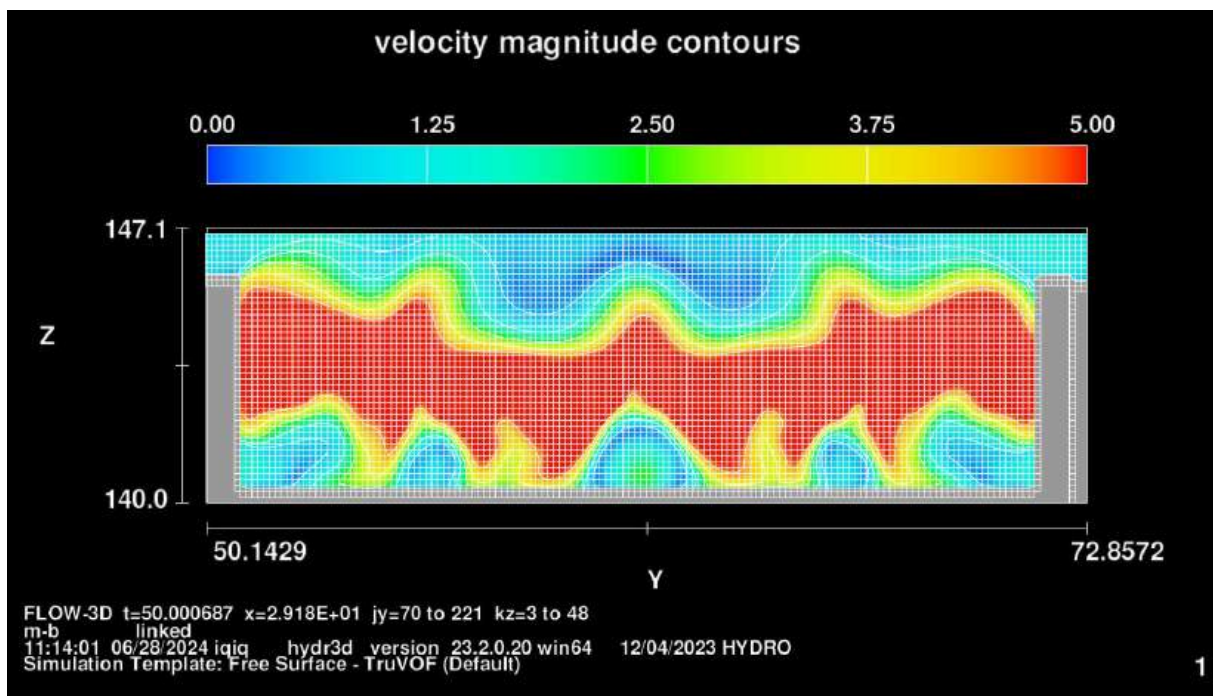


Abbildung 137 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]

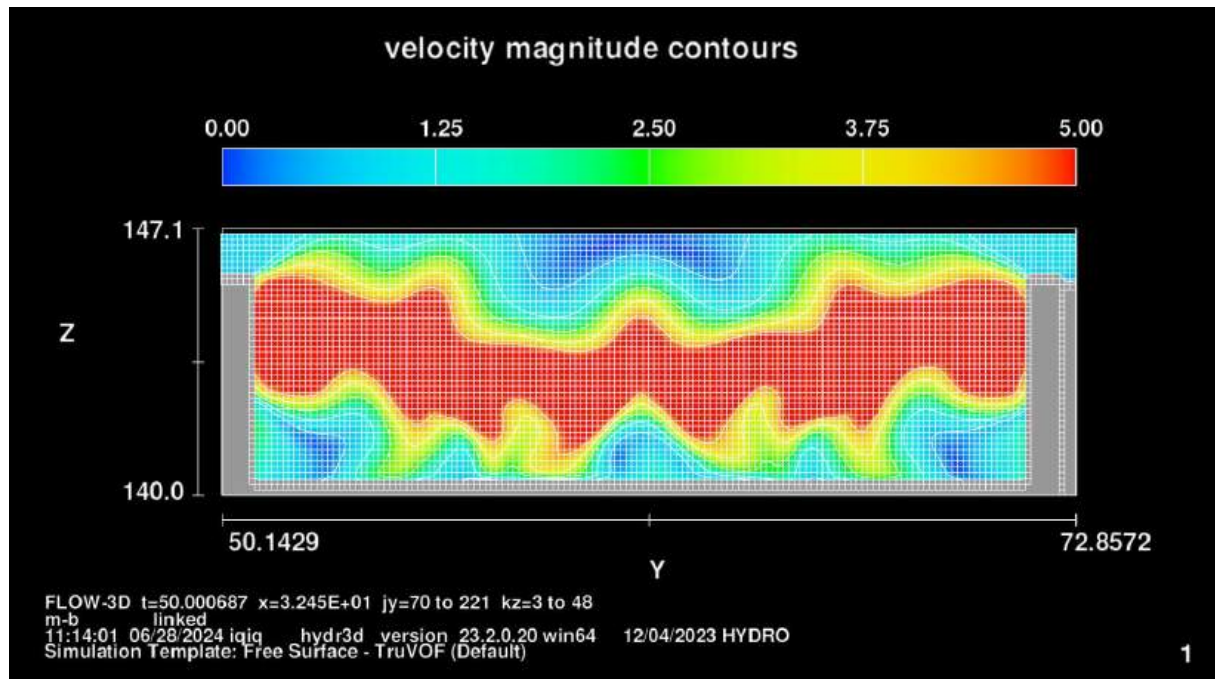


Abbildung 138 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

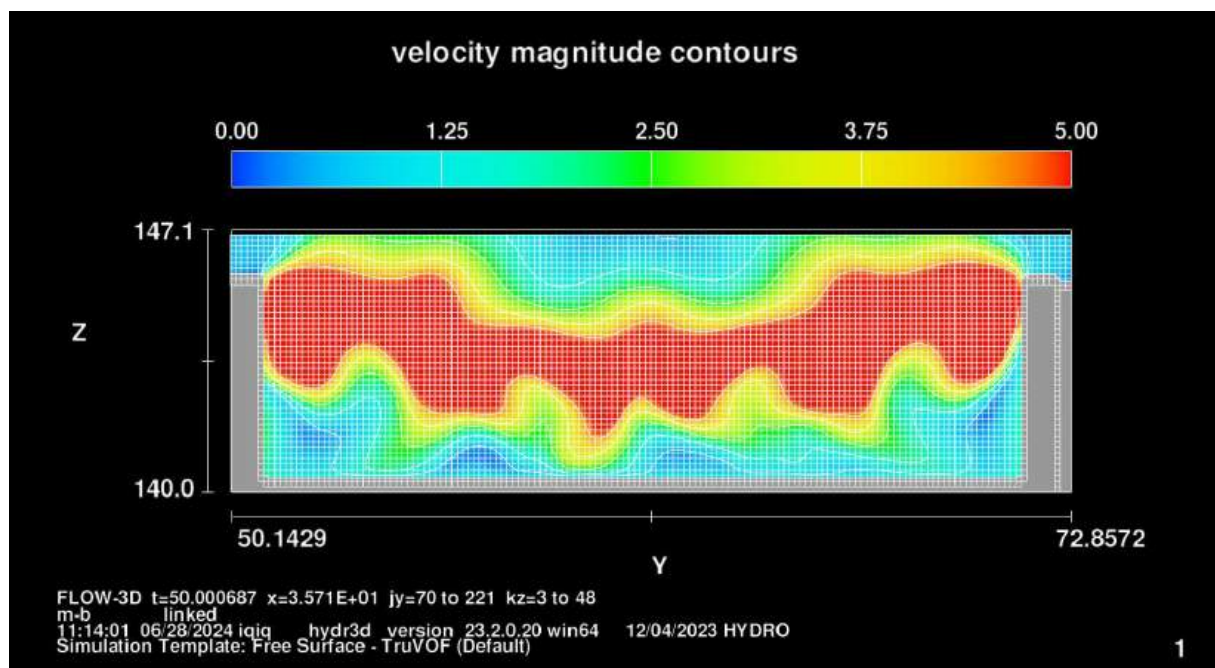


Abbildung 139 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]



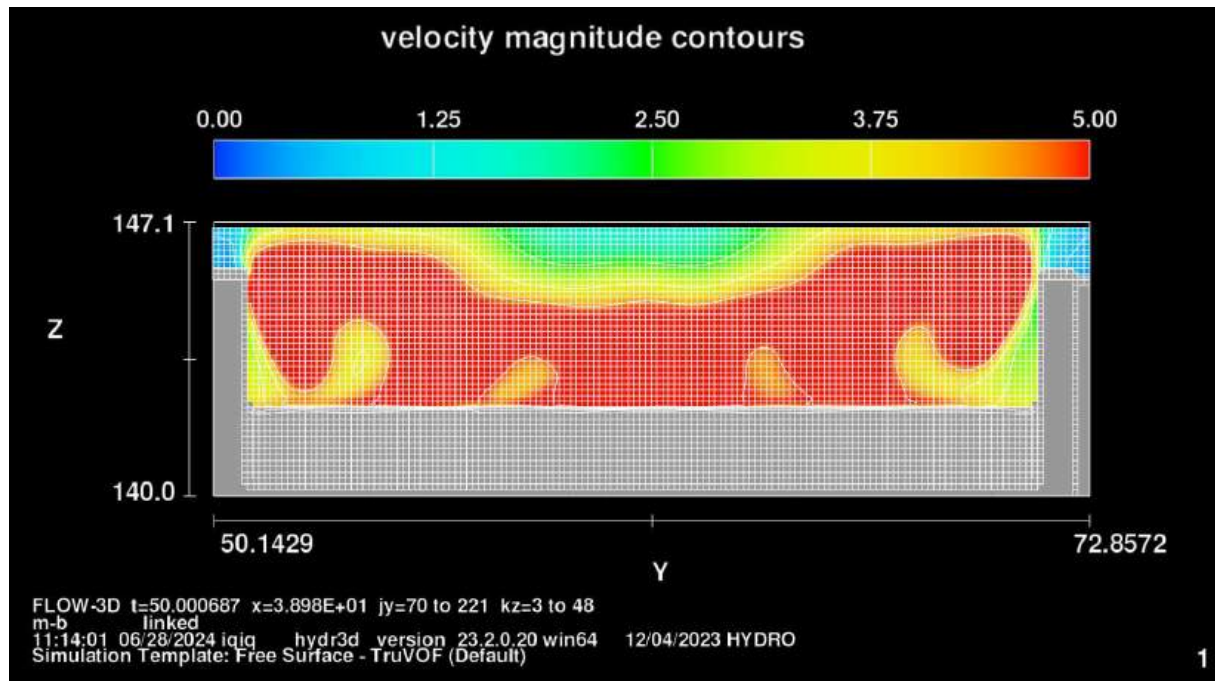


Abbildung 140 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

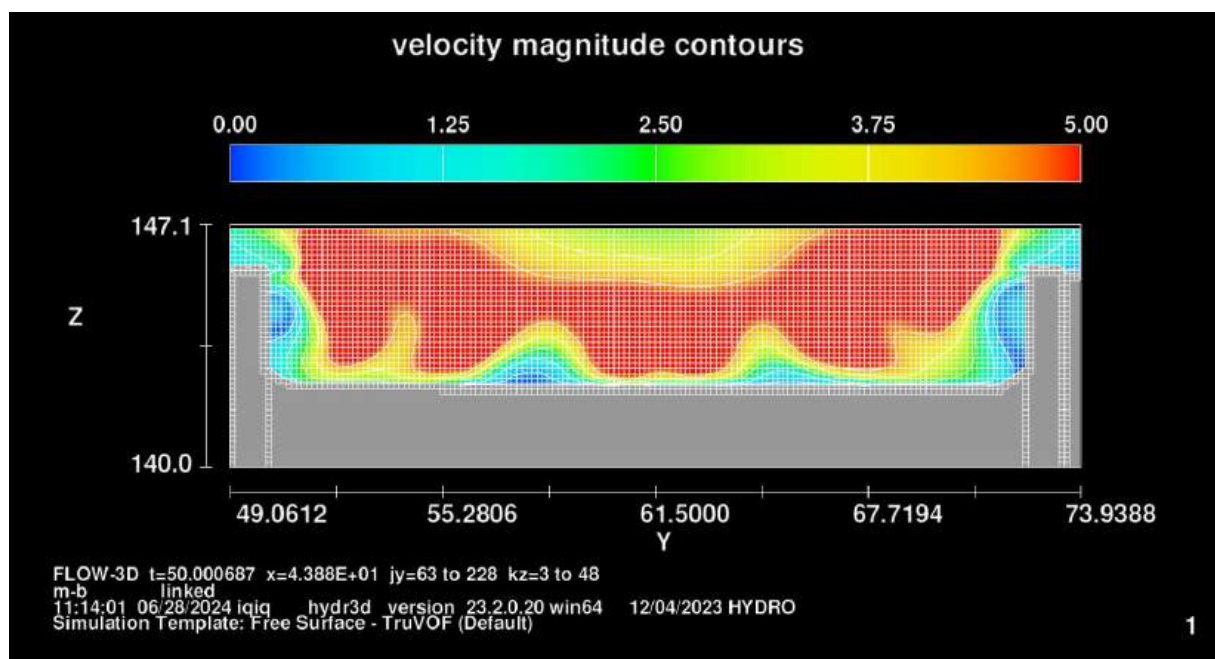


Abbildung 141 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]



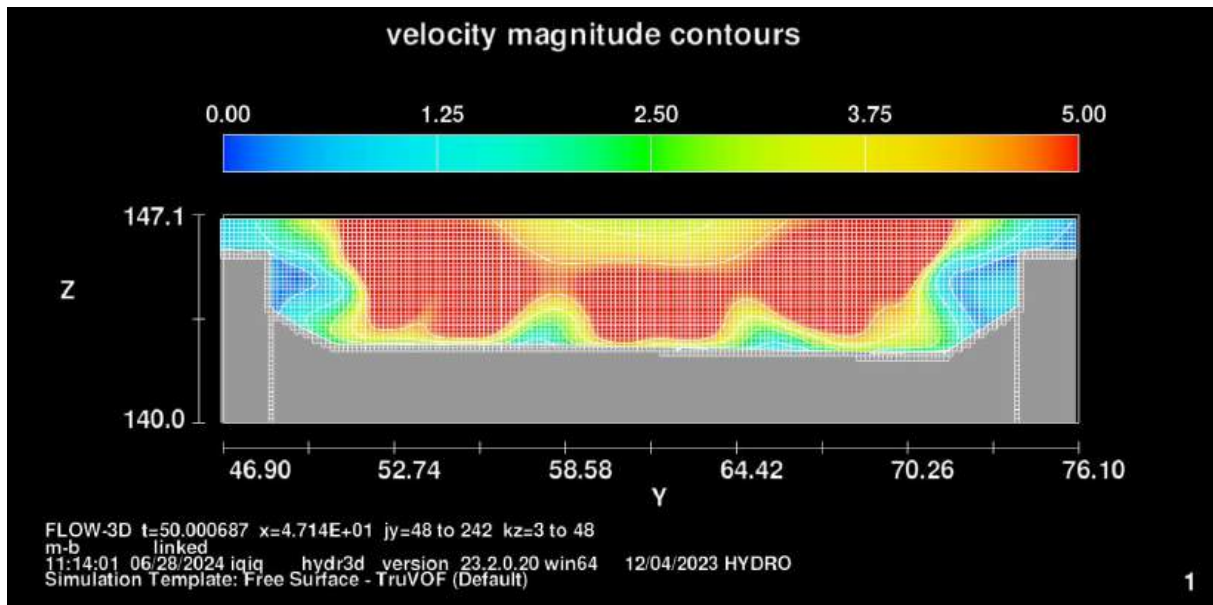


Abbildung 142 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

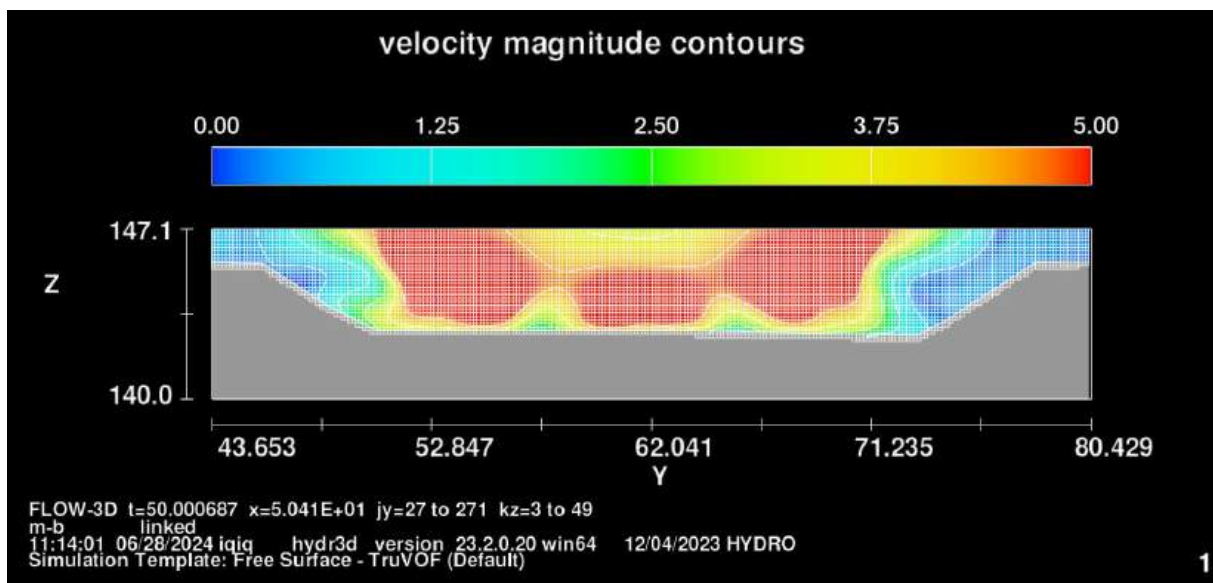


Abbildung 143 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]

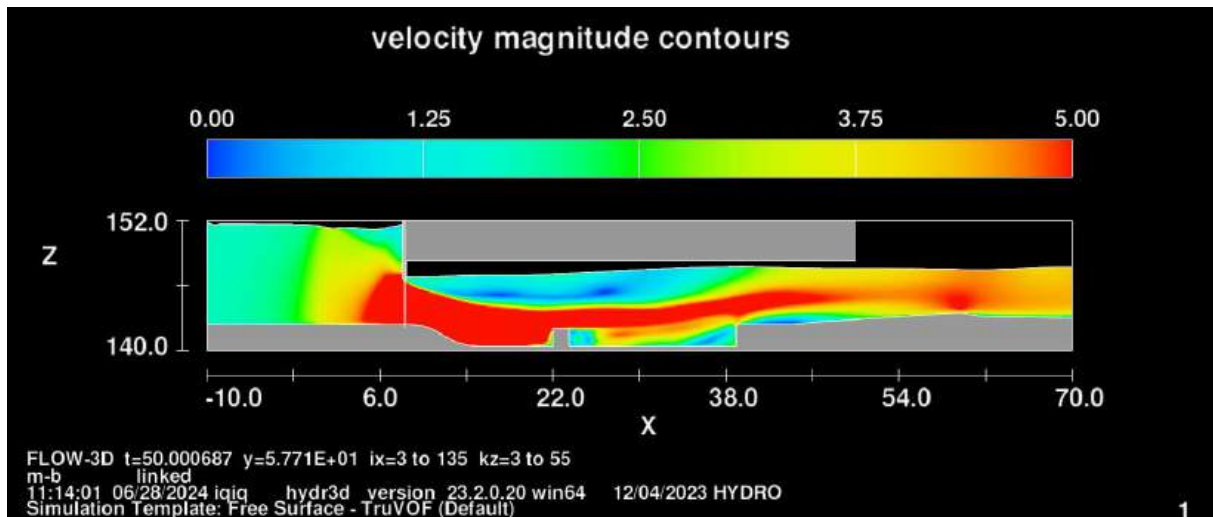


Abbildung 144 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=57,7$  m [m/s]

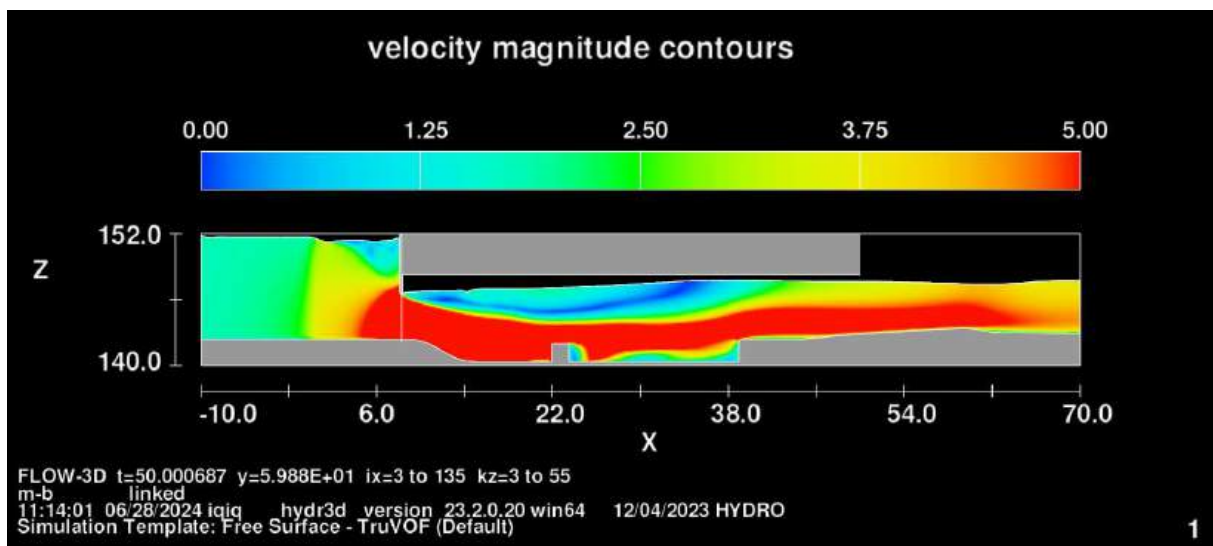


Abbildung 145 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=59,9$  m [m/s]

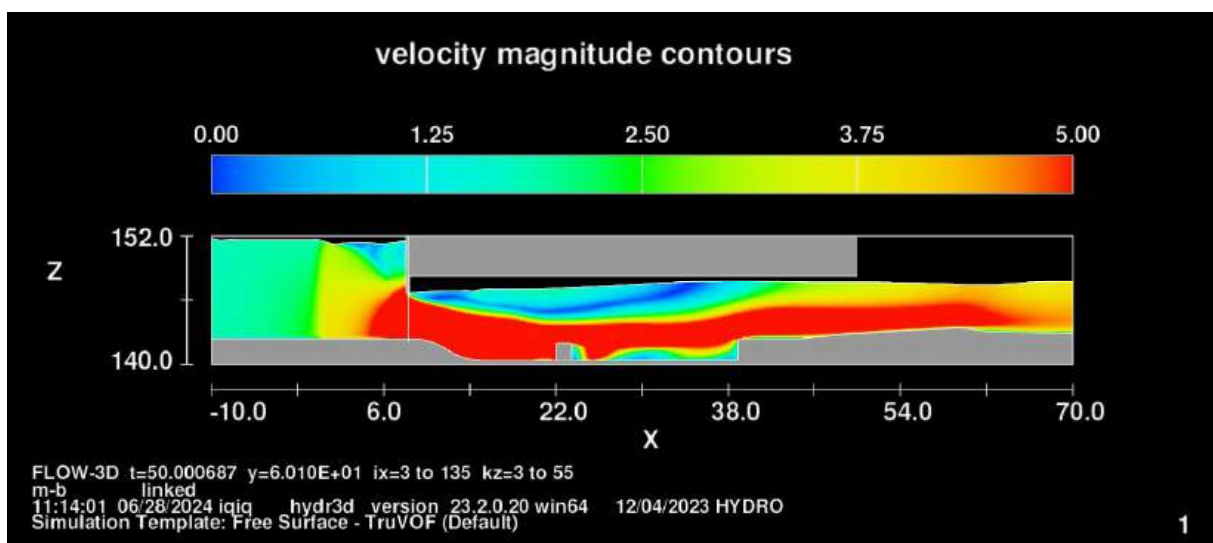


Abbildung 146 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=60,1$  m [m/s]

## 11 Gesamtmodell 503 - Risikobetrachtung

**BHQ2 (n-2);** Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK; Schützöffnung 2,90 m;  $Q_{\text{ges}}=187 \text{ m}^3/\text{s}$

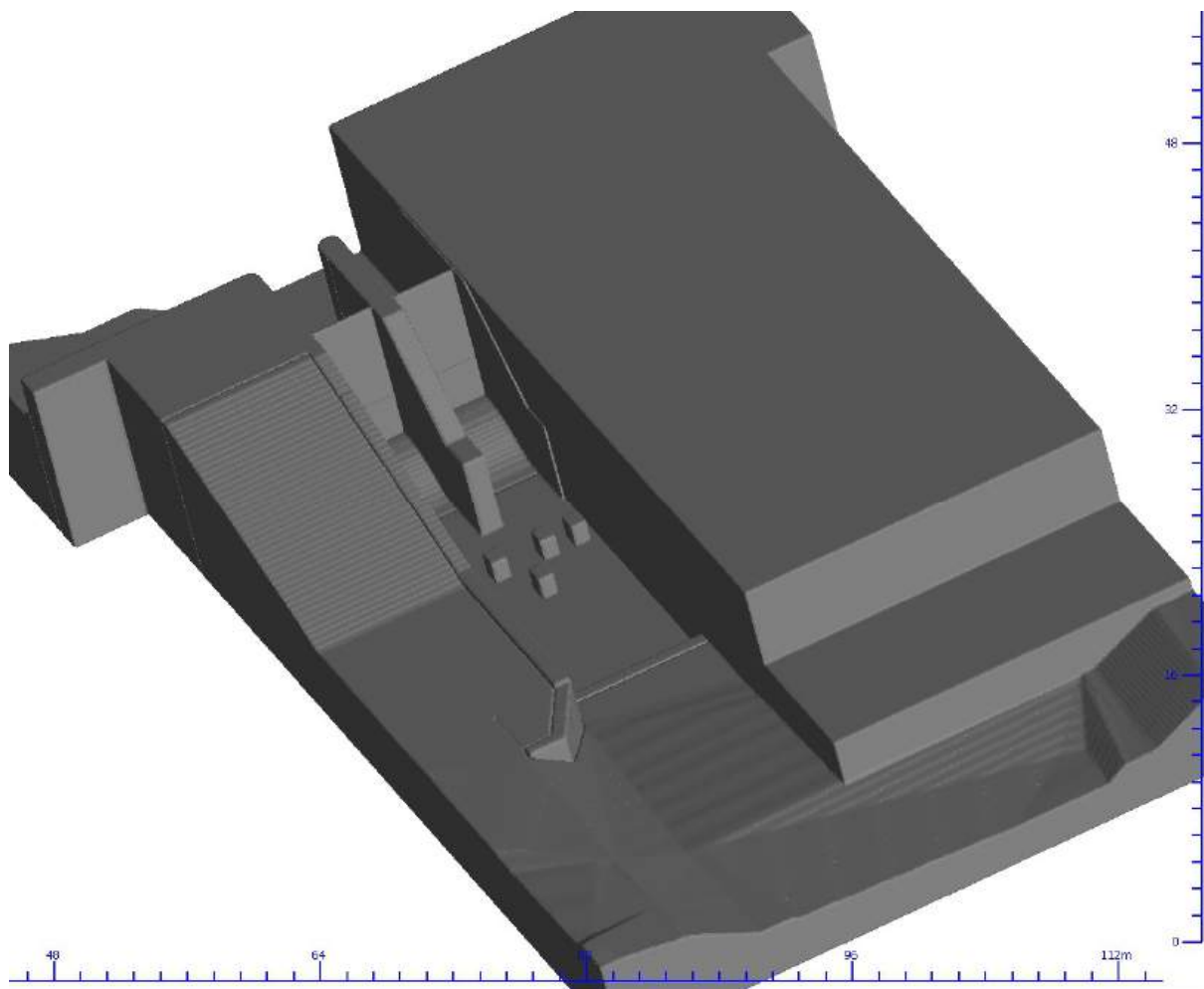


Abbildung 147 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 503

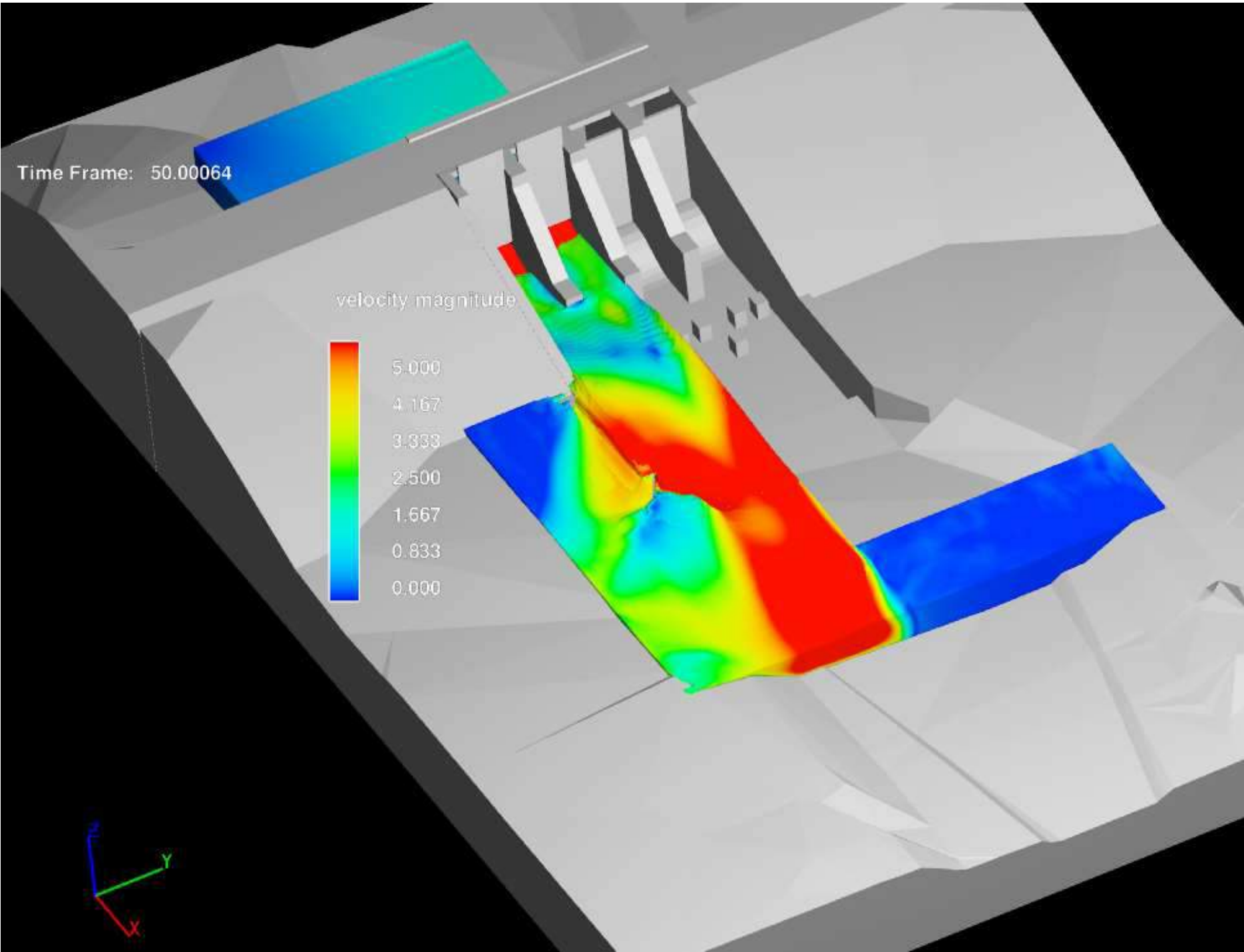


Abbildung 148 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

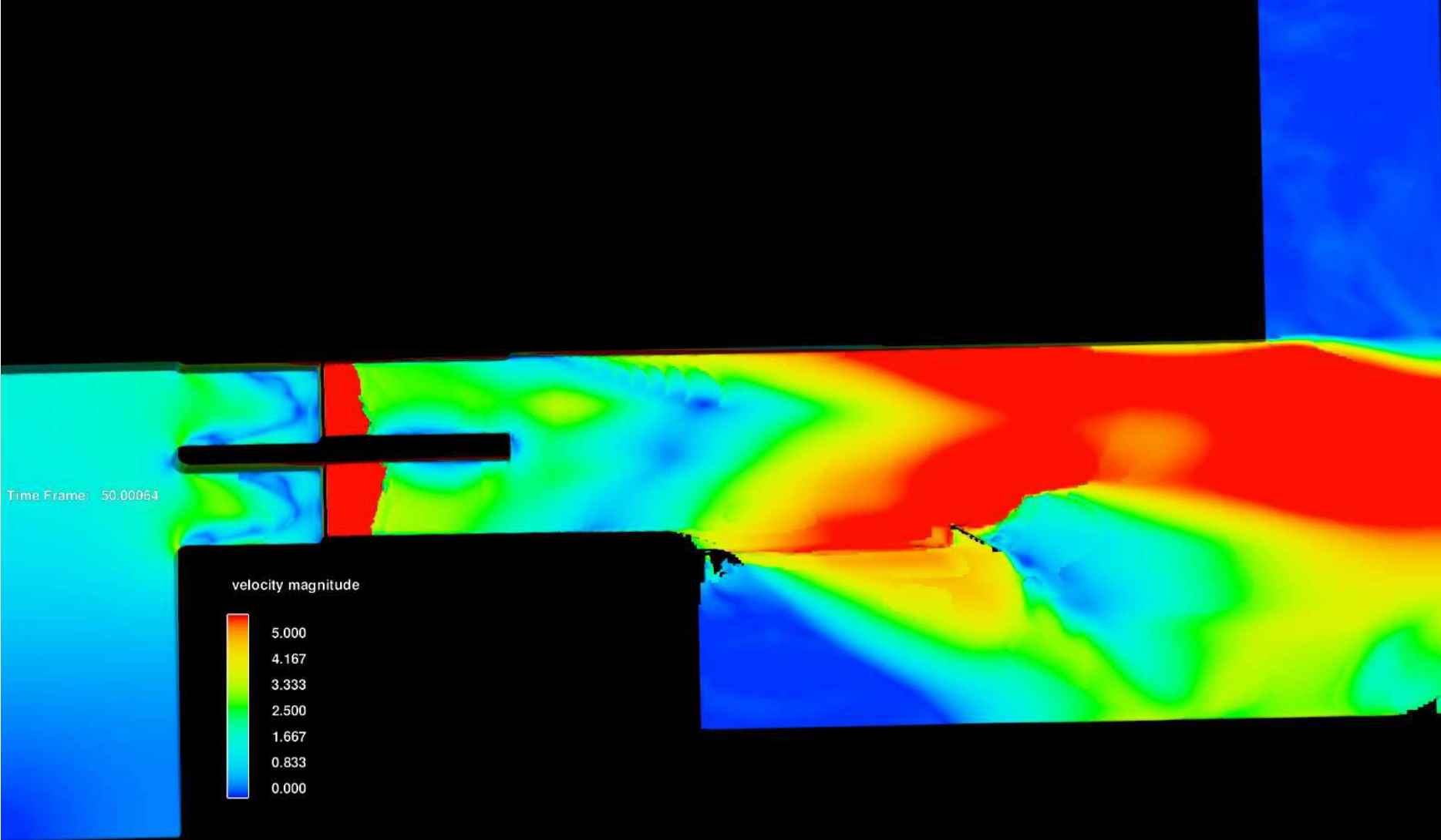


Abbildung 149 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]



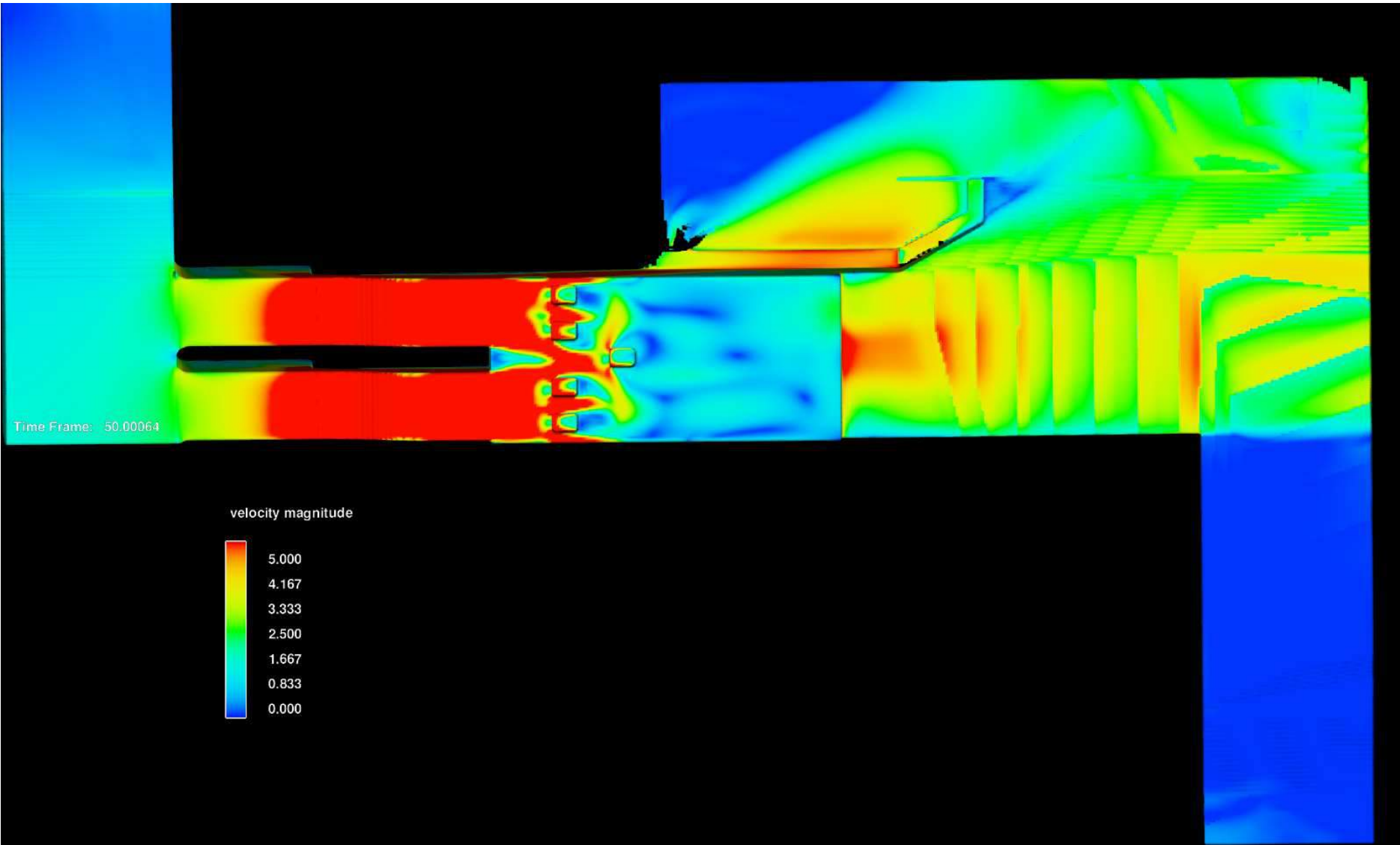


Abbildung 150 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]

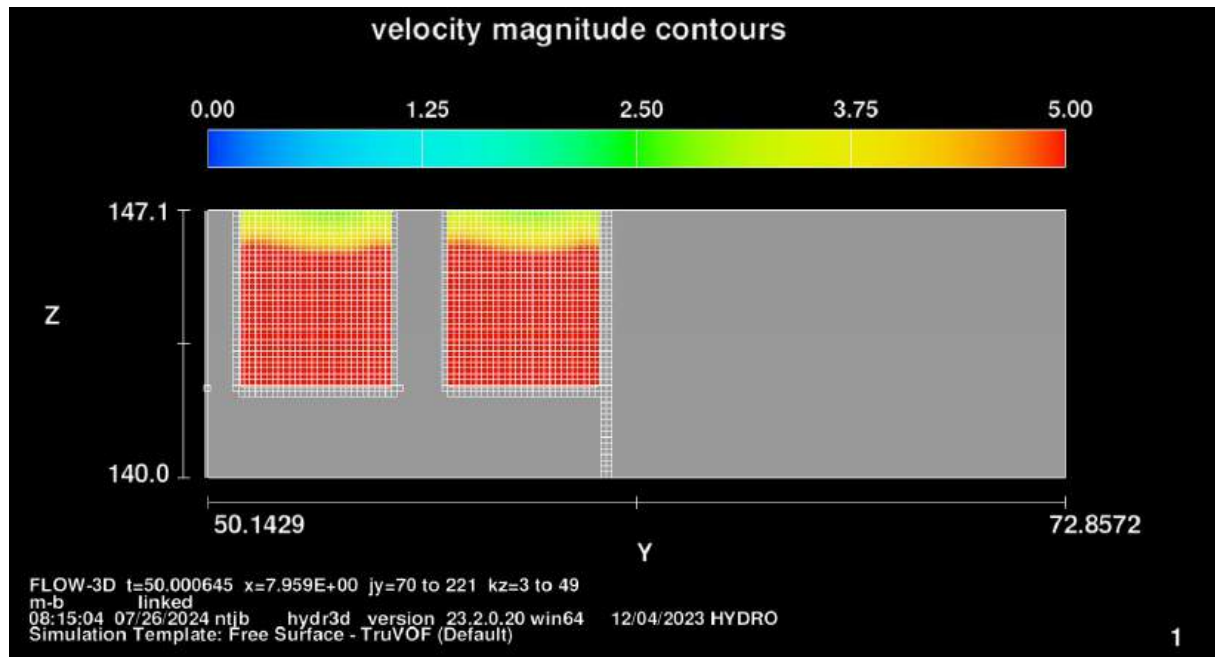


Abbildung 151 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

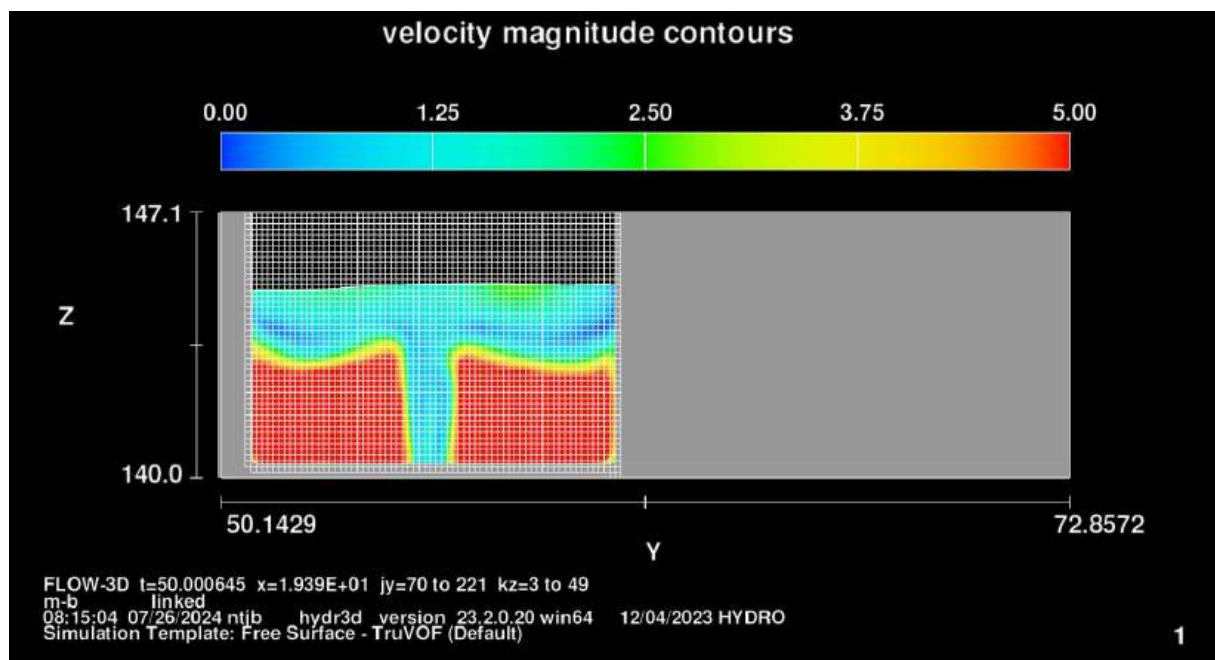


Abbildung 152 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

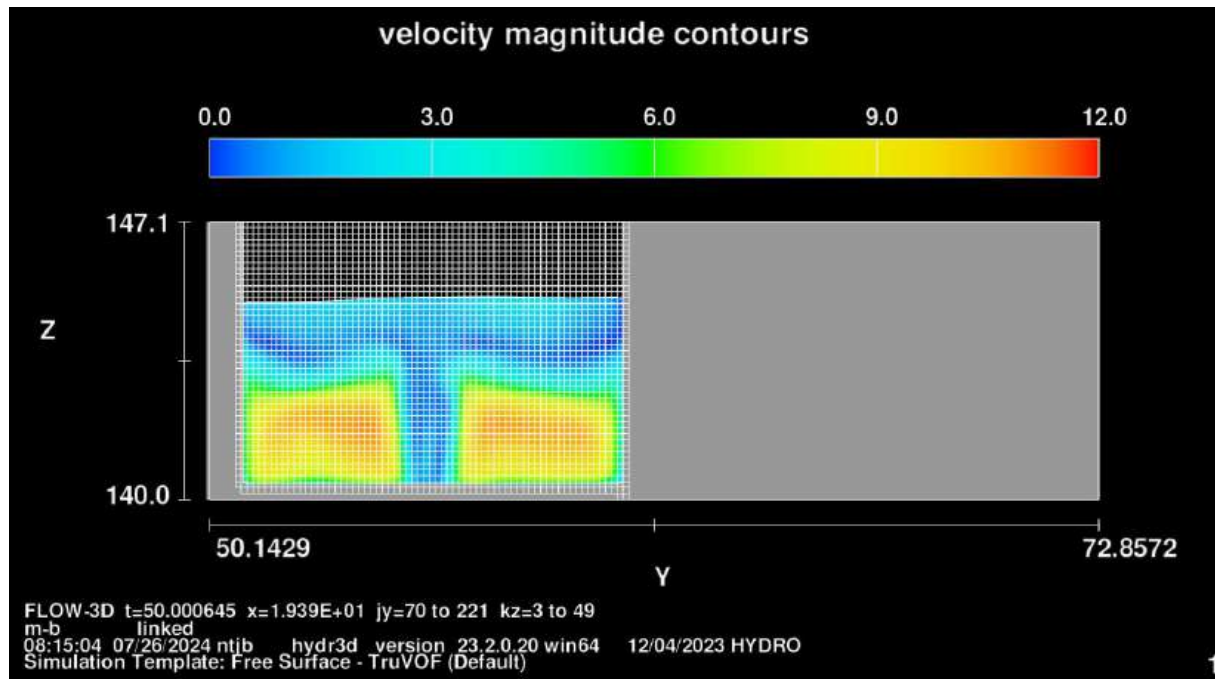


Abbildung 153 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

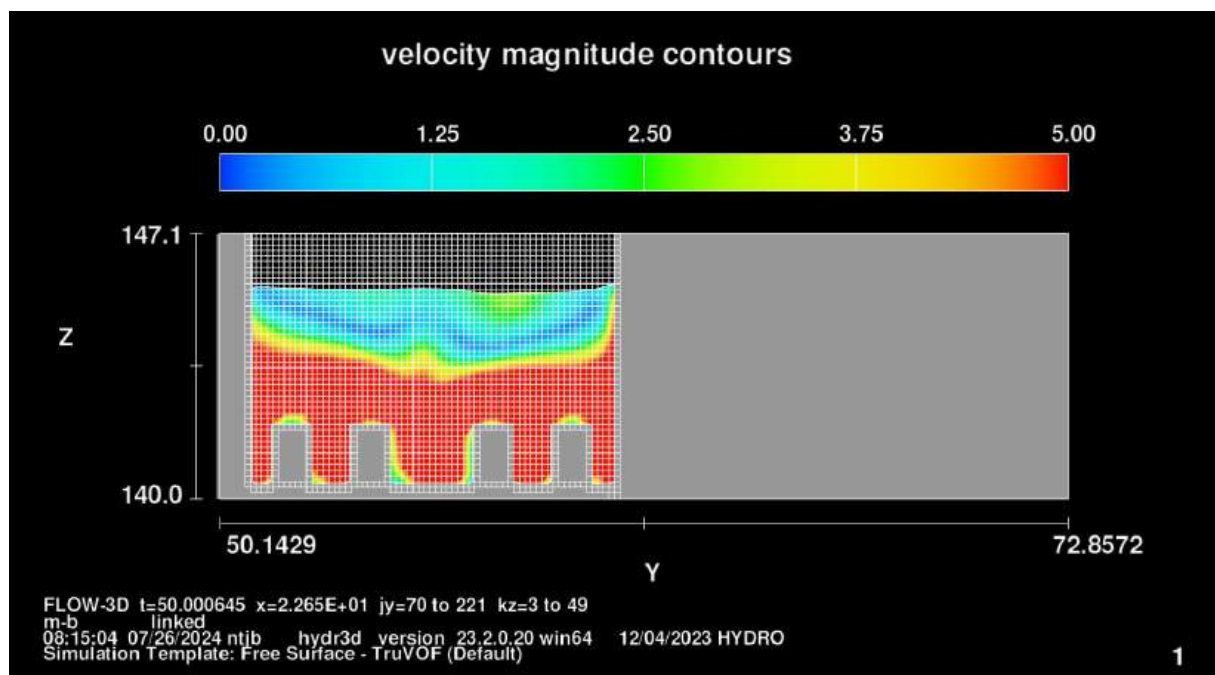


Abbildung 154 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]

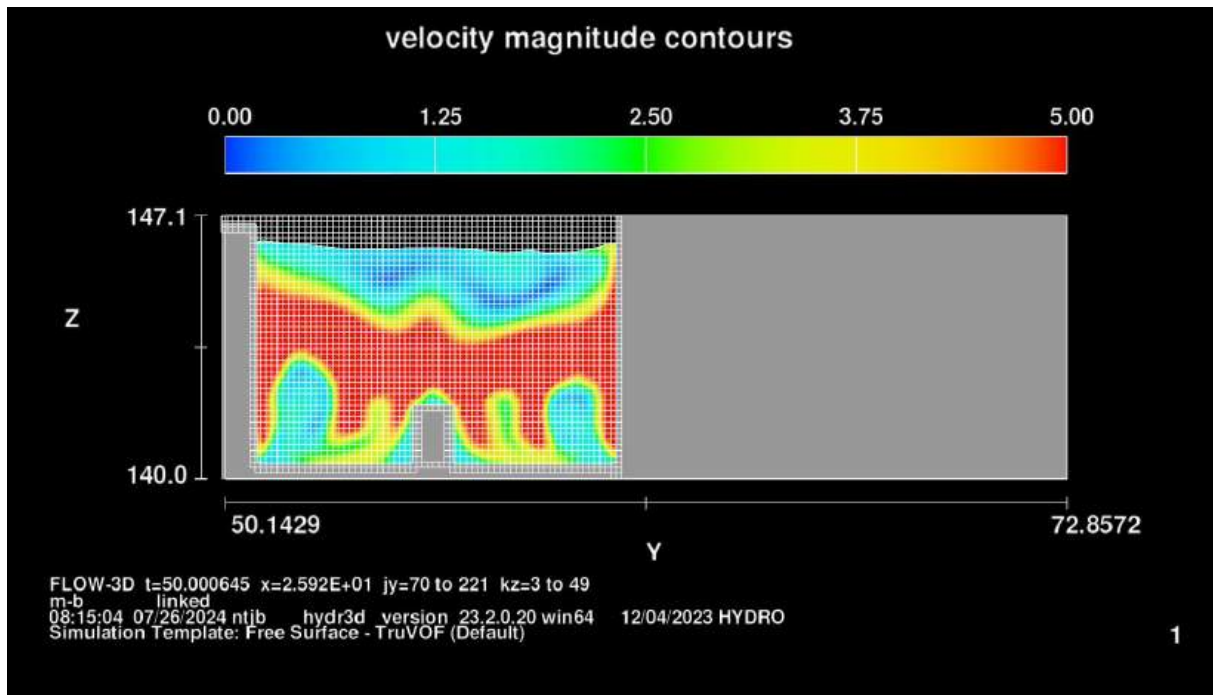


Abbildung 155 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

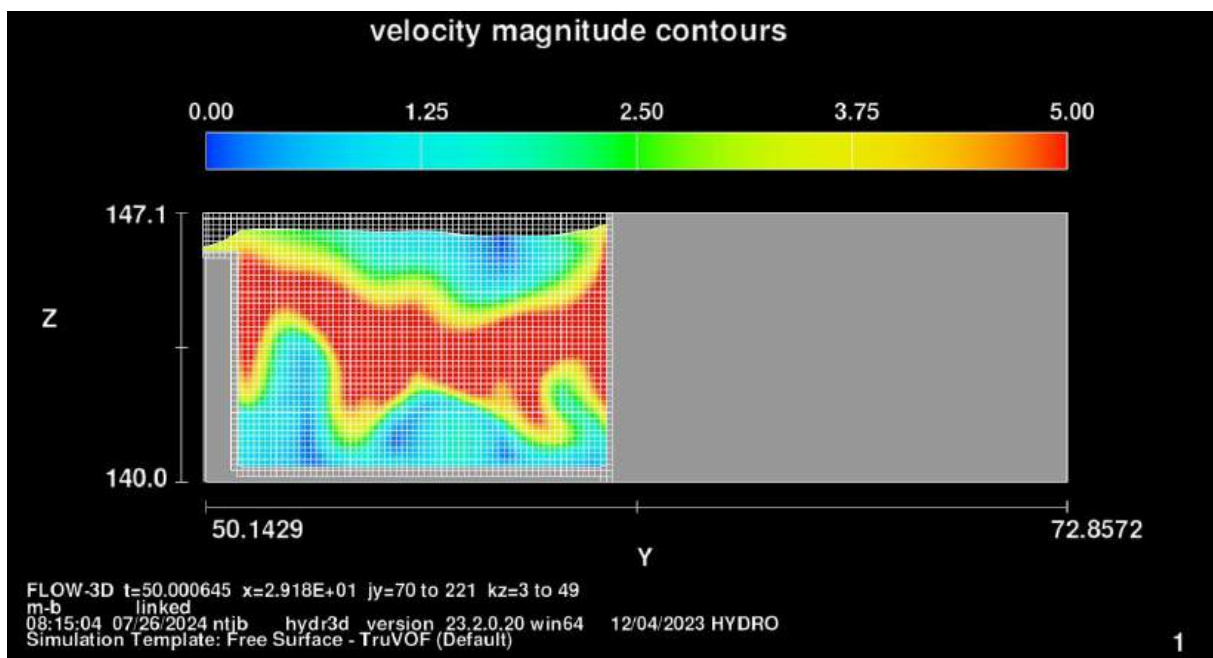


Abbildung 156 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]



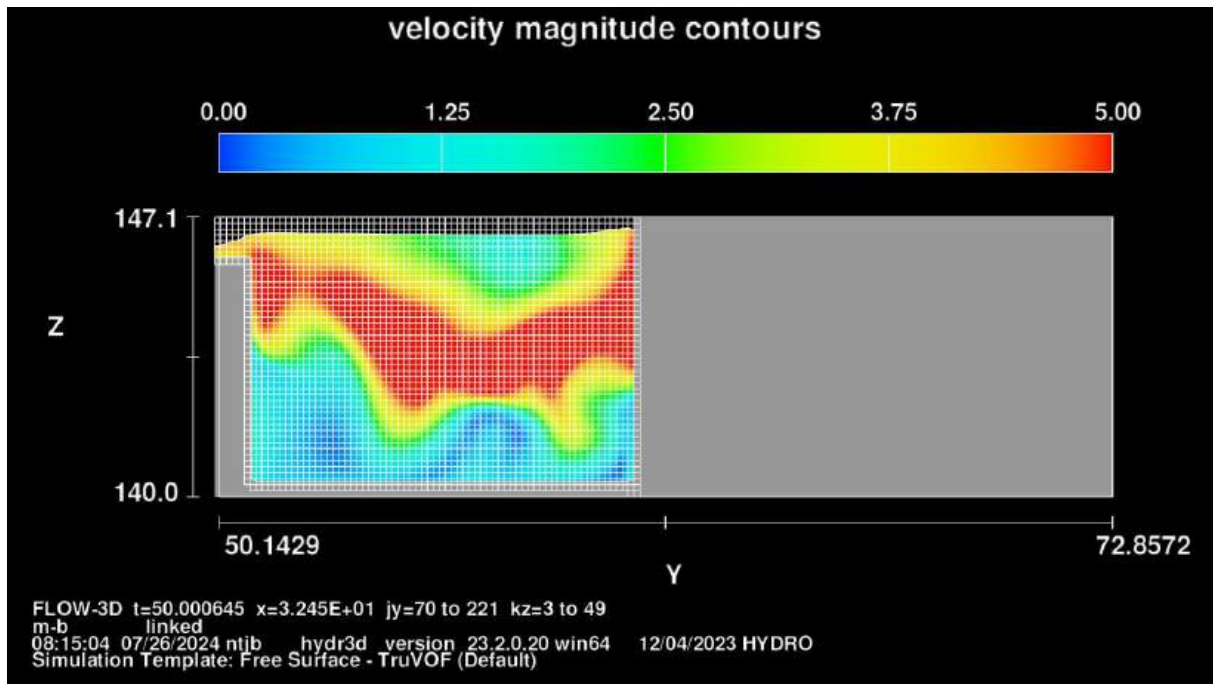


Abbildung 157 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

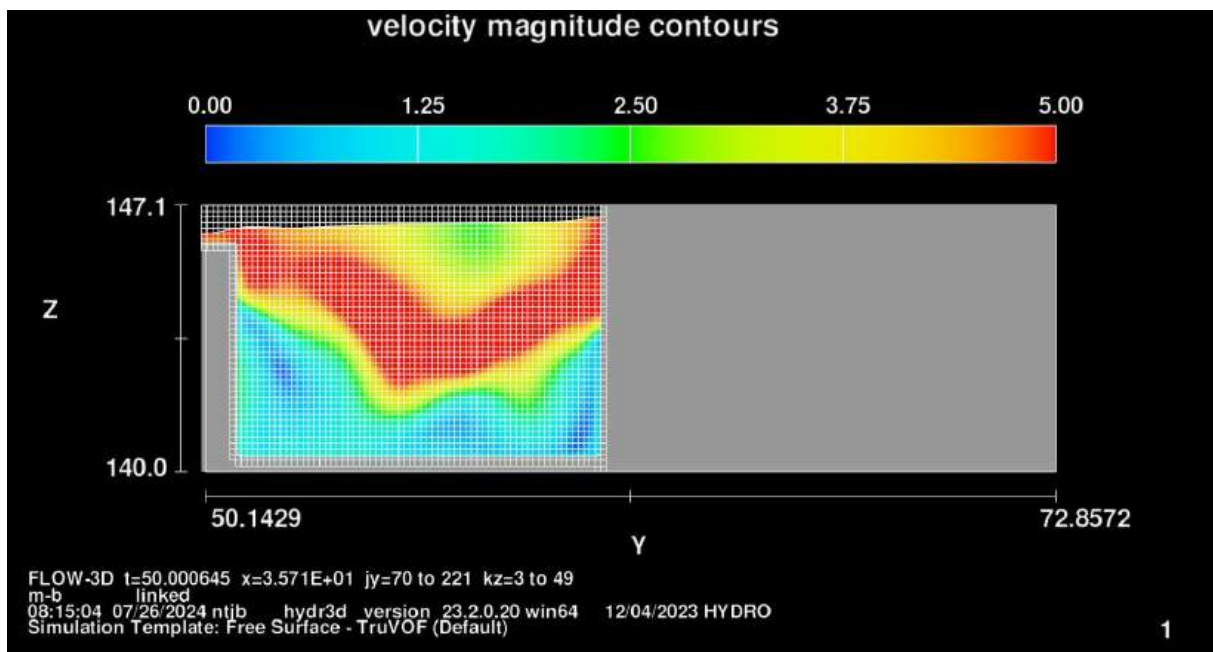


Abbildung 158 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]

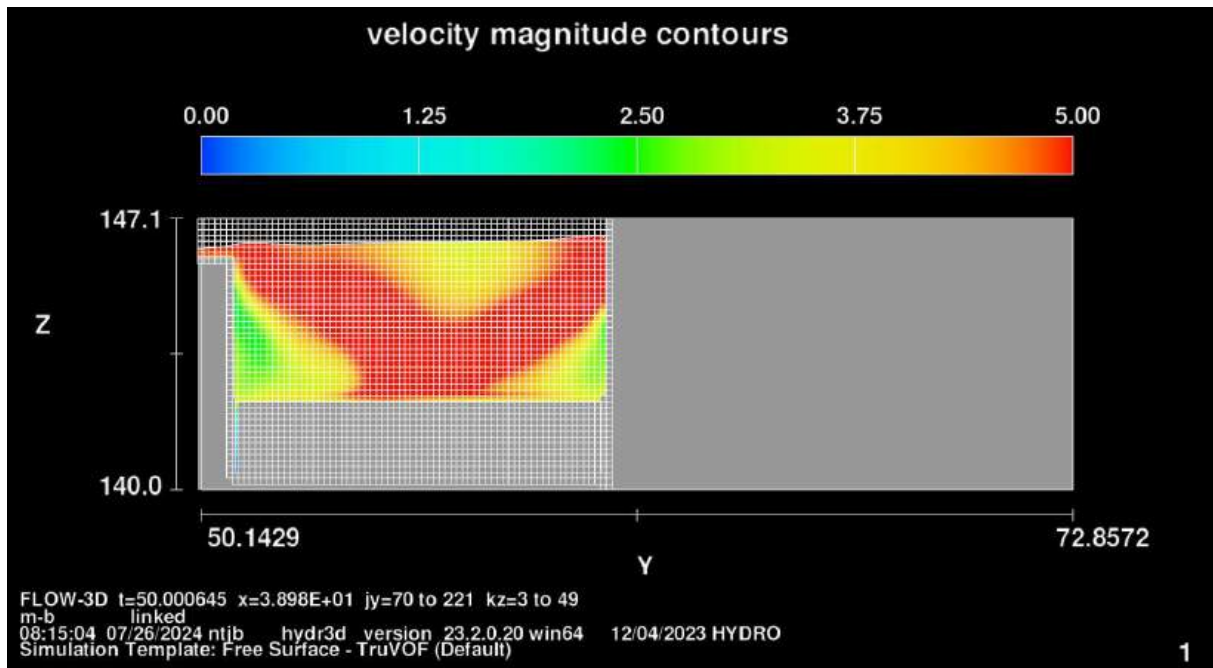


Abbildung 159 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

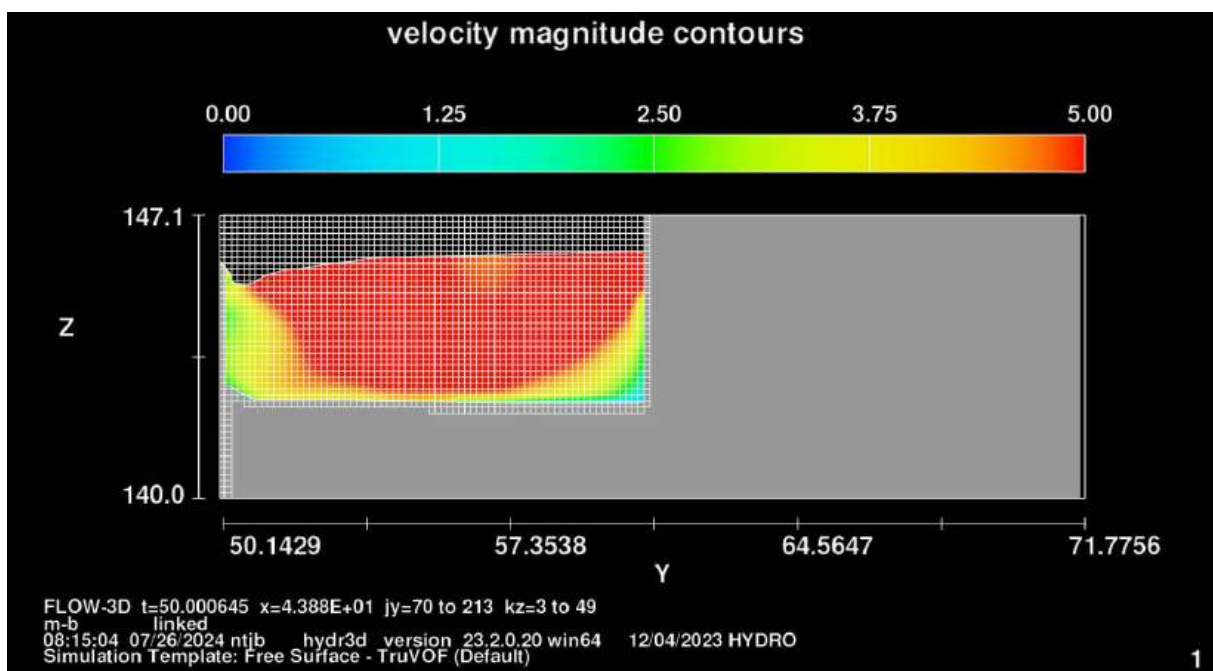


Abbildung 160 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]

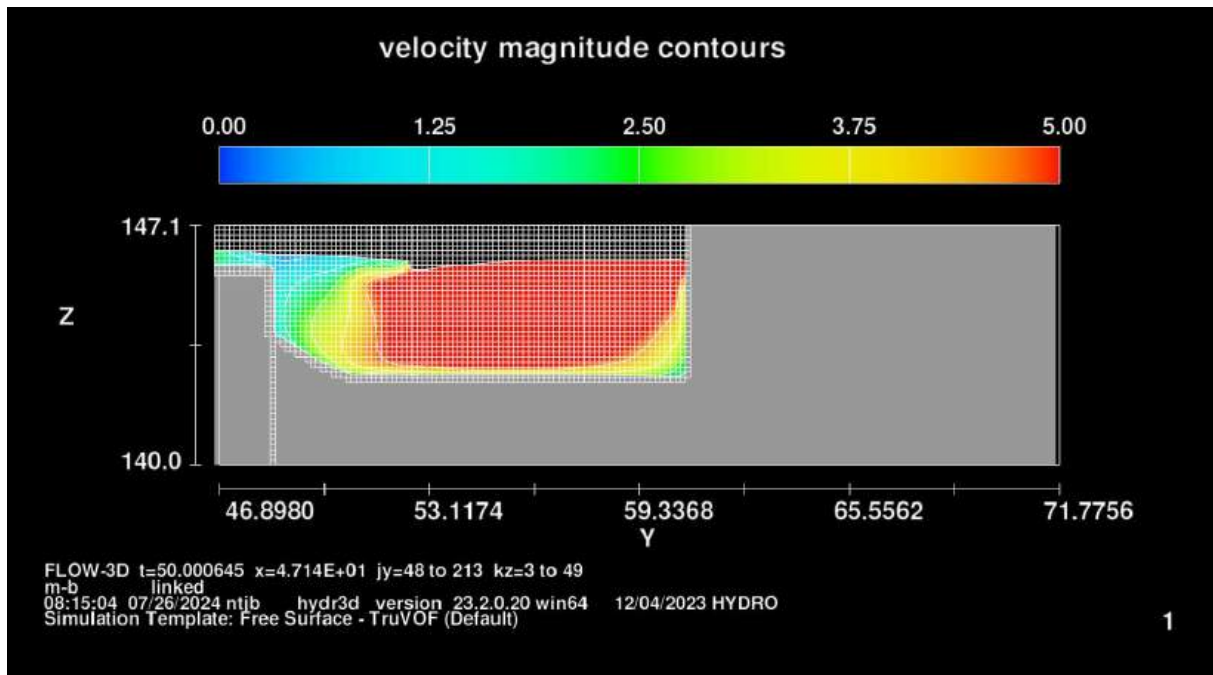


Abbildung 161 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

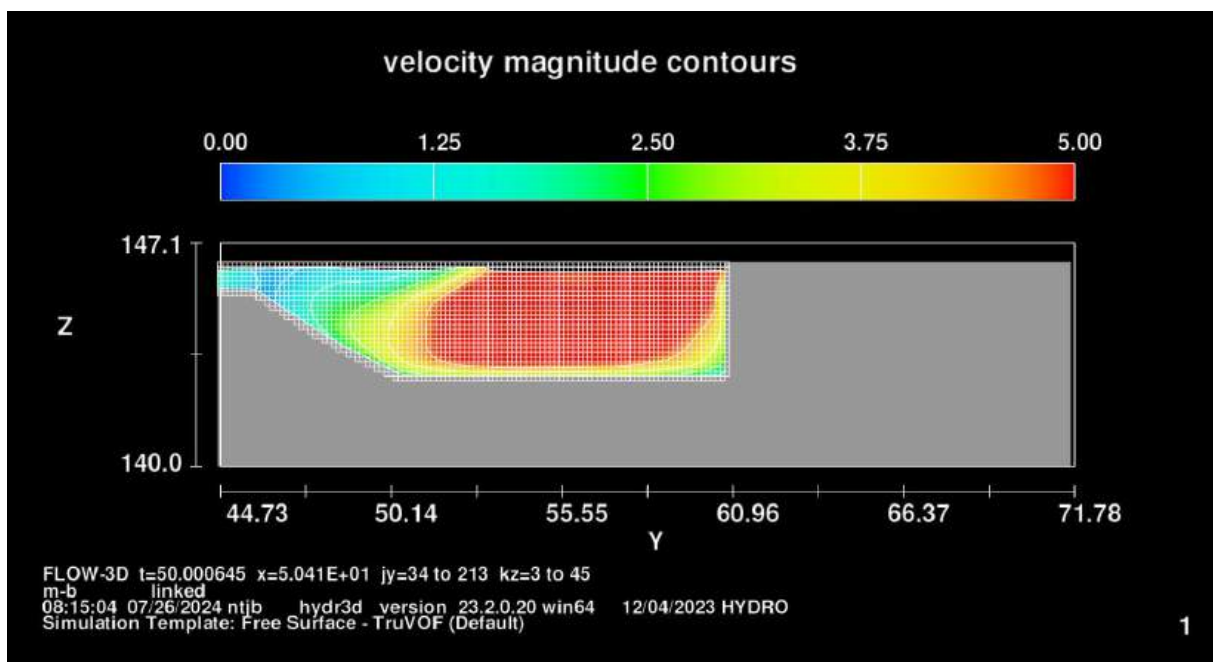


Abbildung 162 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]

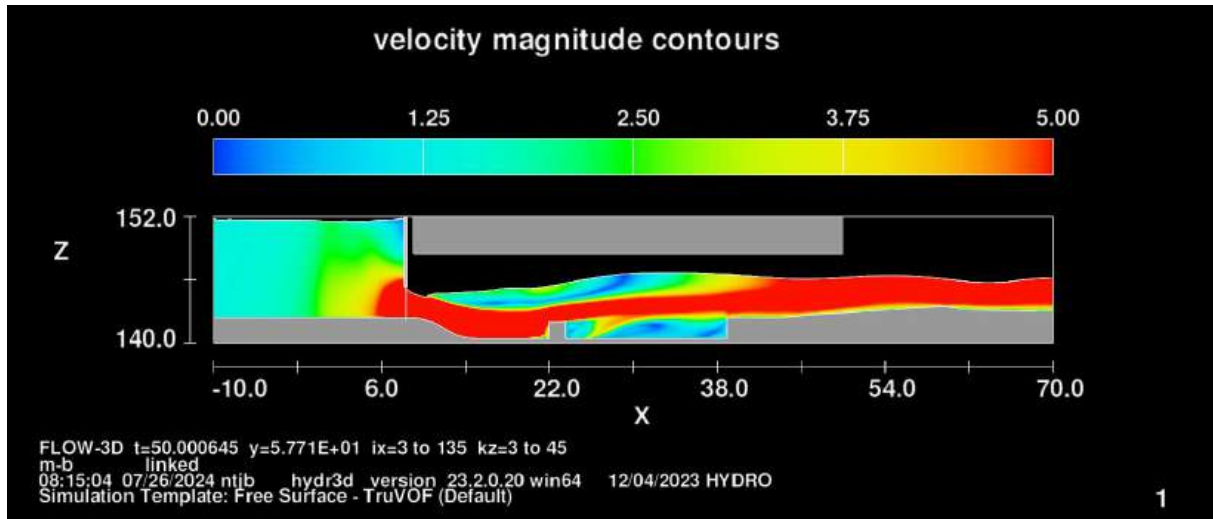


Abbildung 163 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=57,7$  m [m/s]

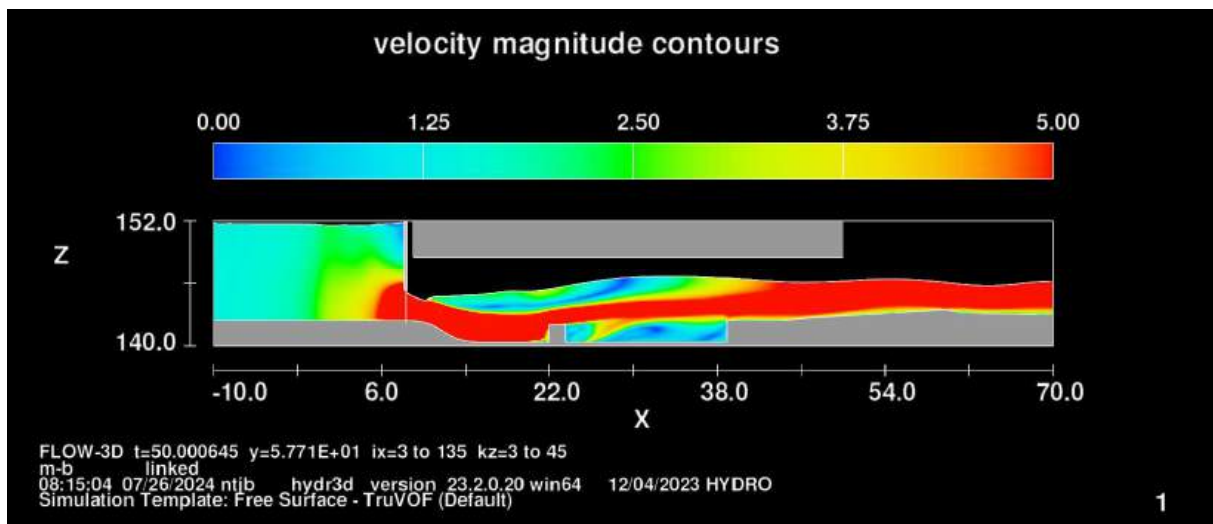


Abbildung 164 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=59,9$  m [m/s]

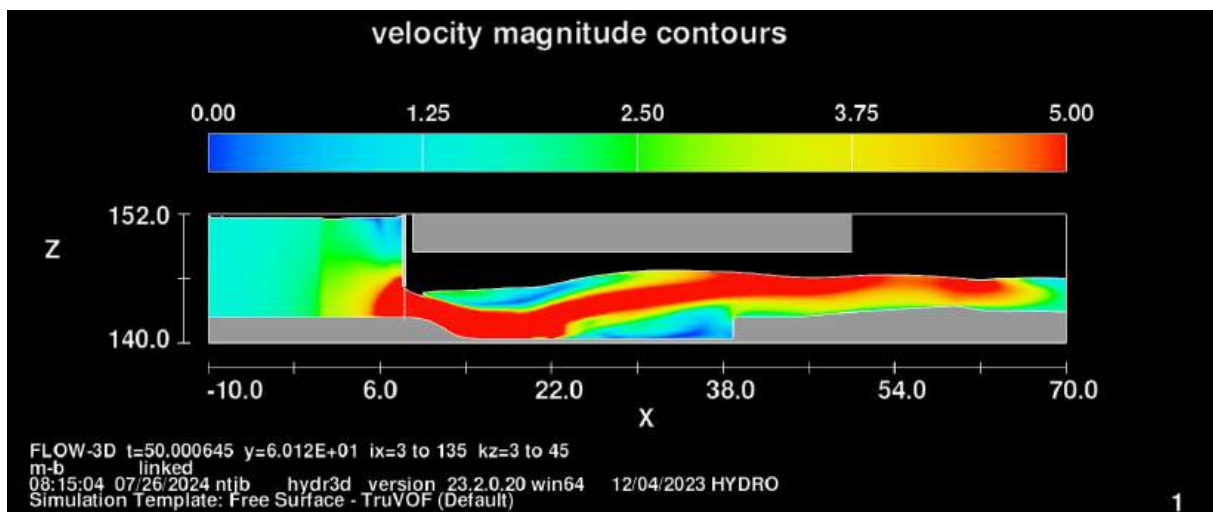


Abbildung 165 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt  $y=60,1$  m [m/s]



## 12 Gesamtmodell 141 - Risikobetrachtung

**BHQ2 (n-1)** inneres Segment geschlossen; Tosbeckenlänge 24 m; Eintiefung 2,0 m; 11 SK  
Schützöffnung 4,89 m;  $Q_{\text{ges}}=428 \text{ m}^3/\text{s}$

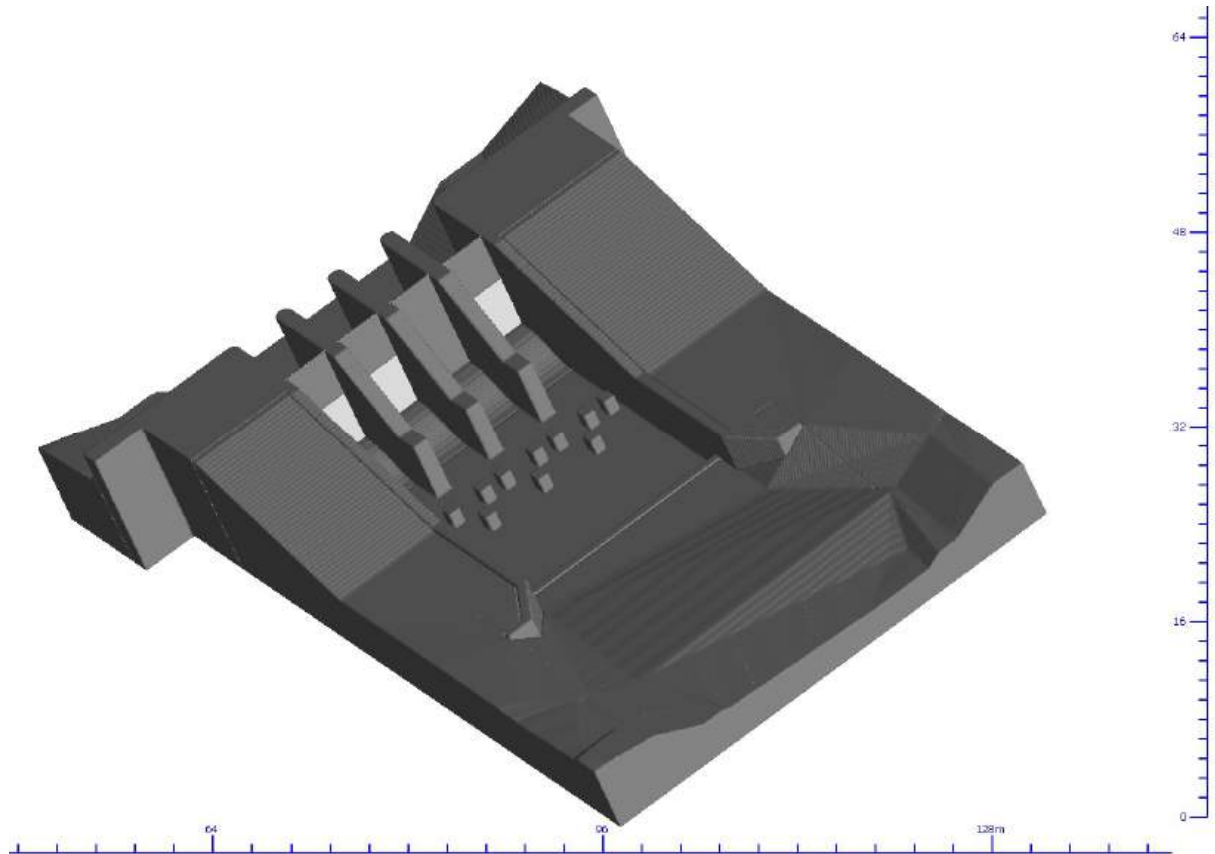


Abbildung 166 Modellgeometrie 3d-Ansicht Gesamtmodell 141

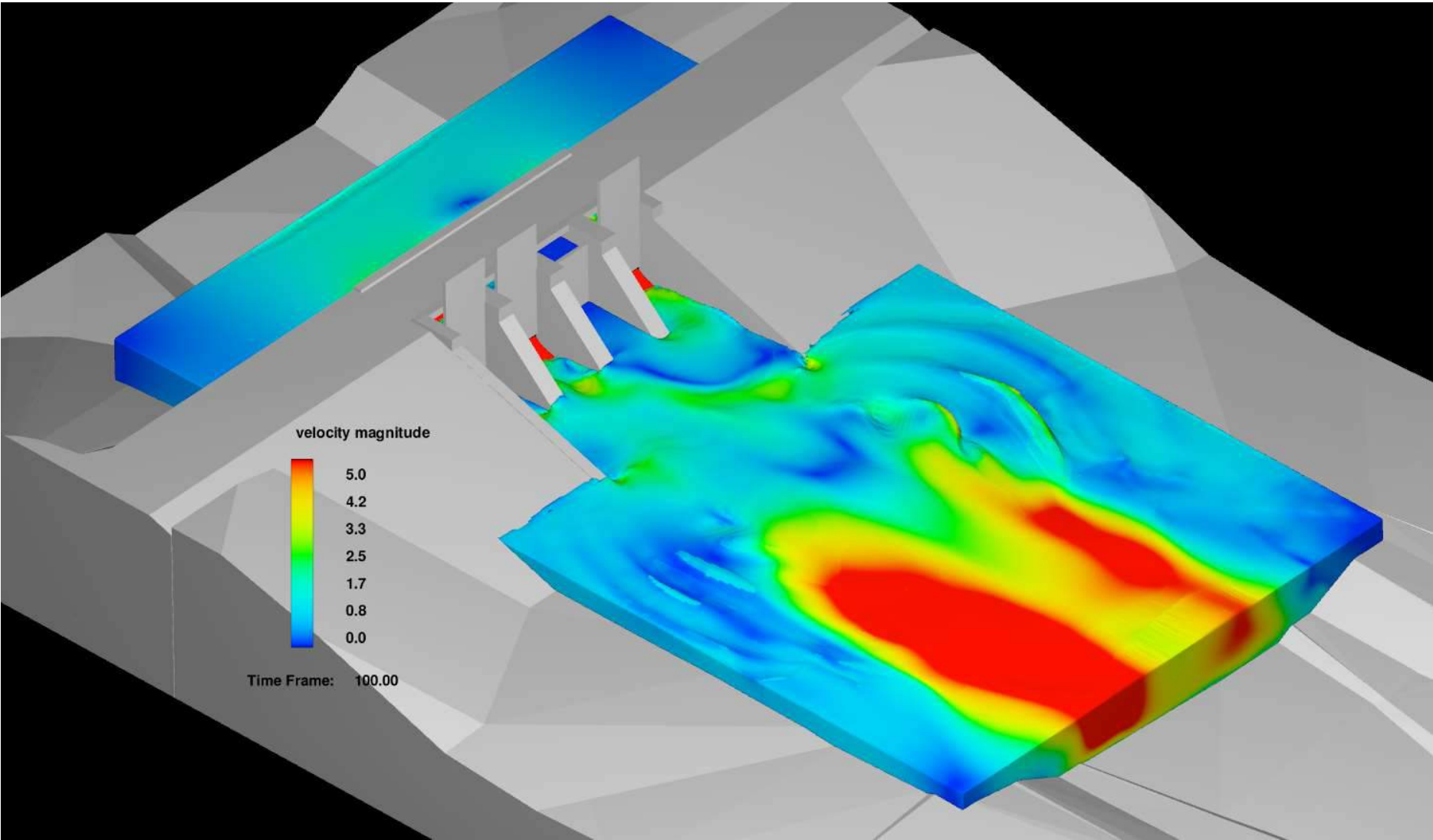


Abbildung 167 Fließgeschwindigkeiten 3d-Ansicht [m/s]

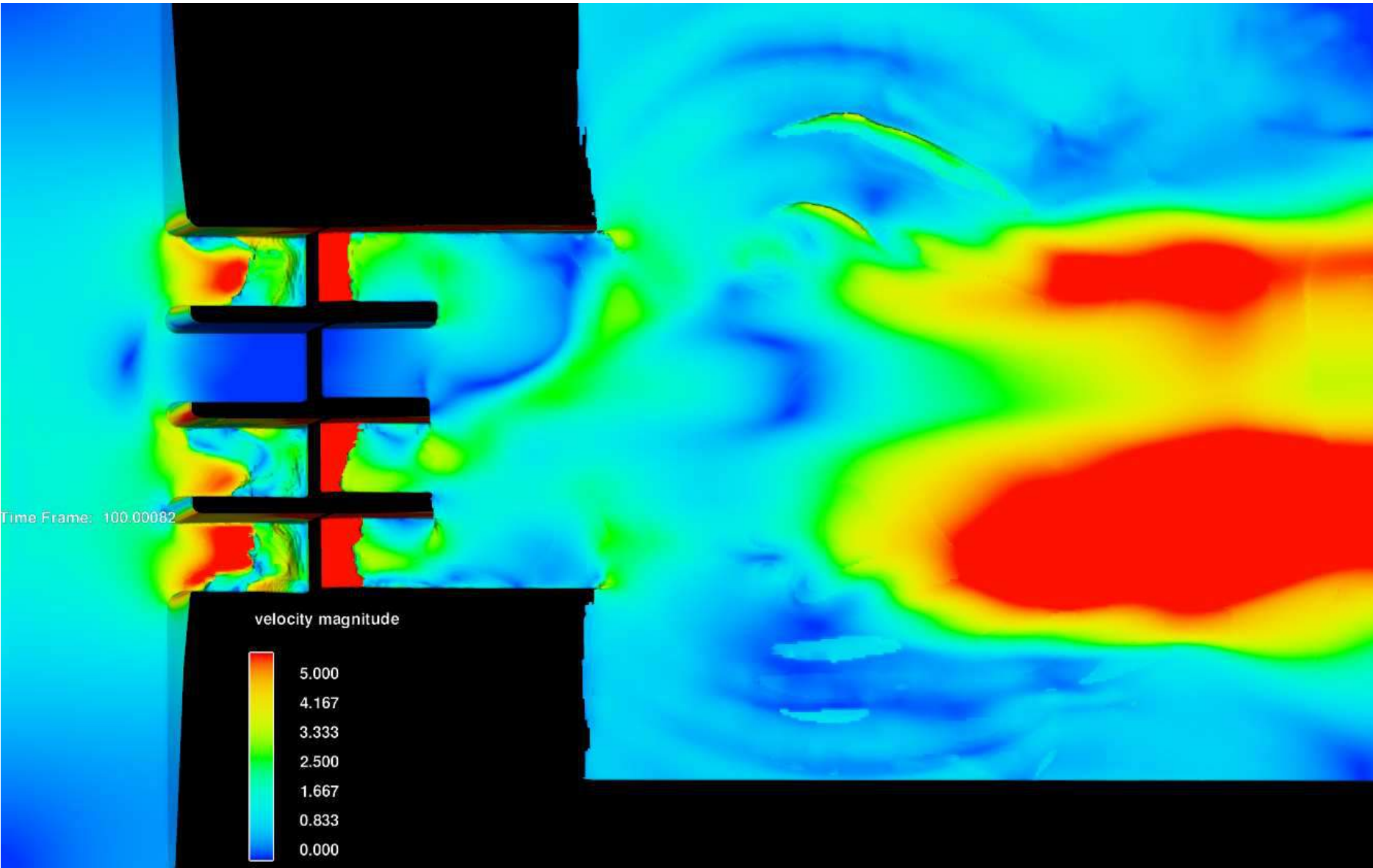


Abbildung 168 Fließgeschwindigkeiten Draufsicht [m/s]

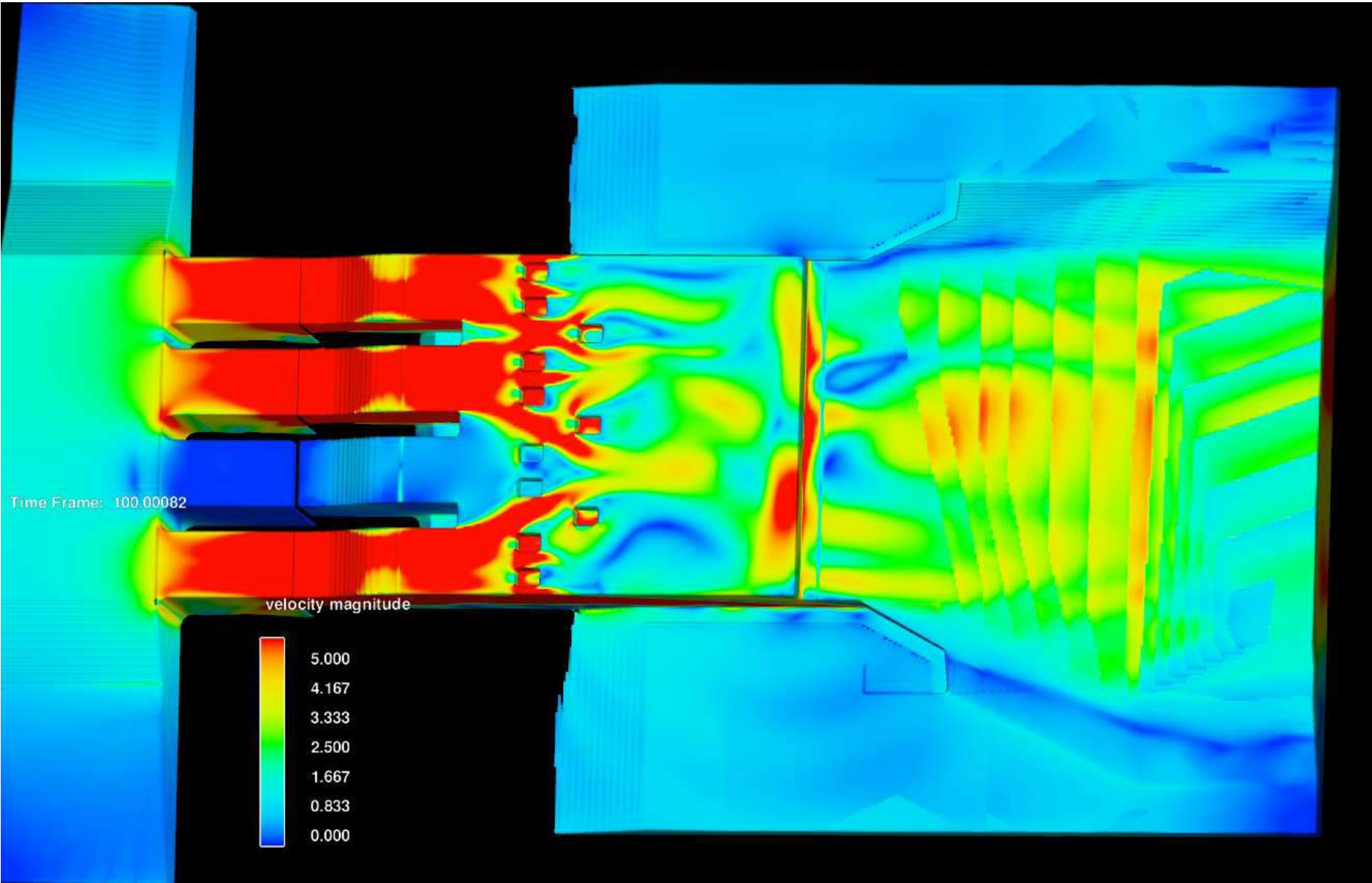


Abbildung 169 Fließgeschwindigkeiten Ansicht von unten [m/s]



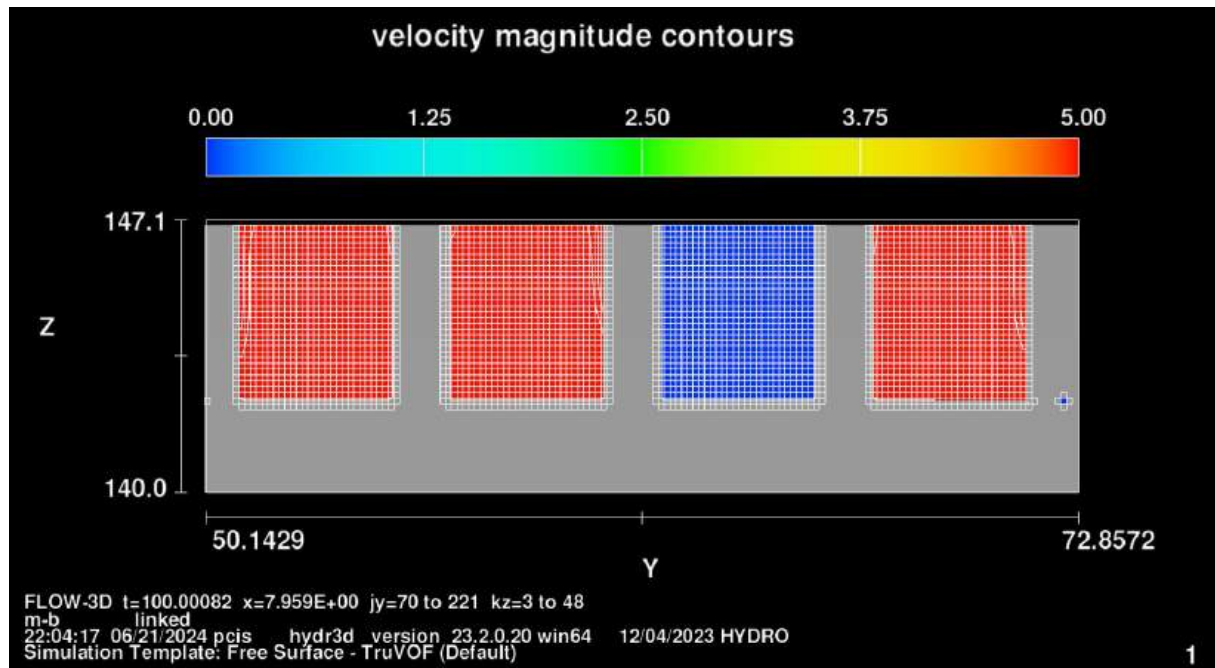


Abbildung 170 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=8,0 m [m/s]

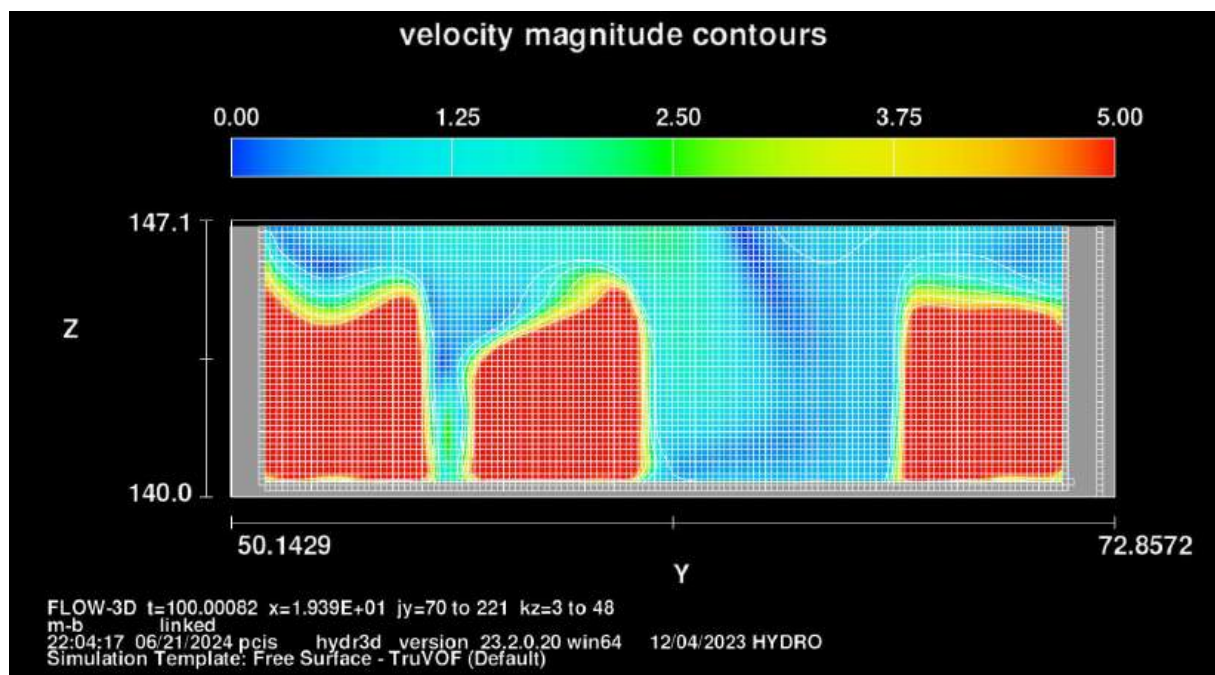


Abbildung 171 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]



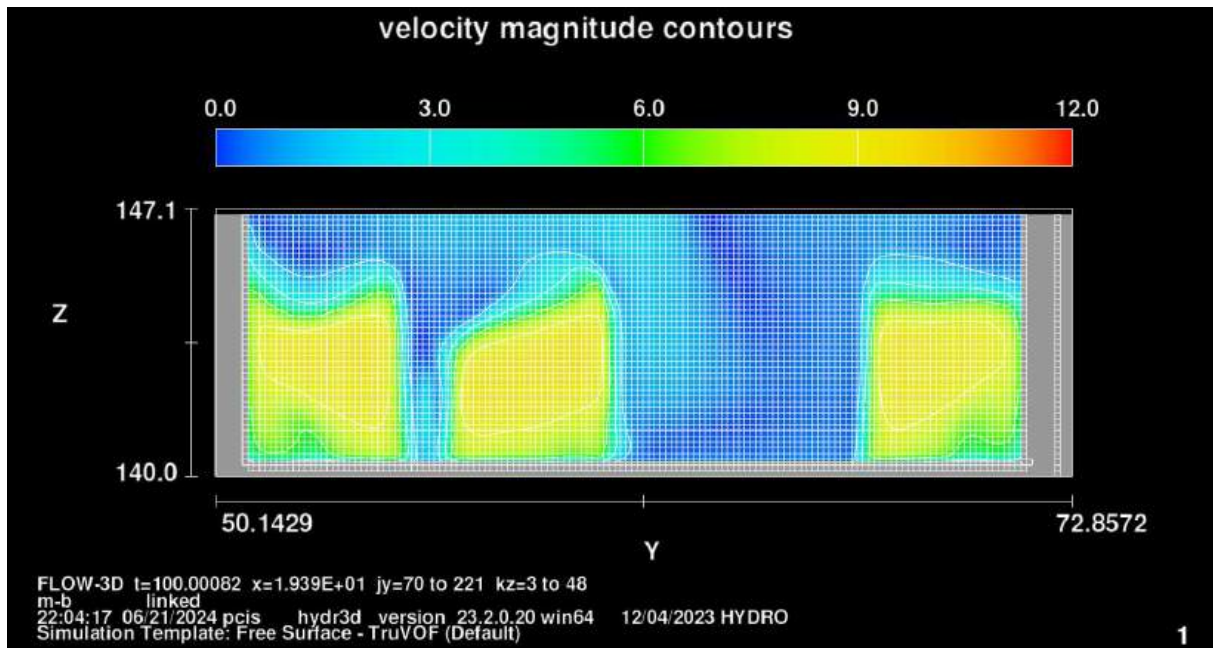


Abbildung 172 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=19,4 m [m/s]

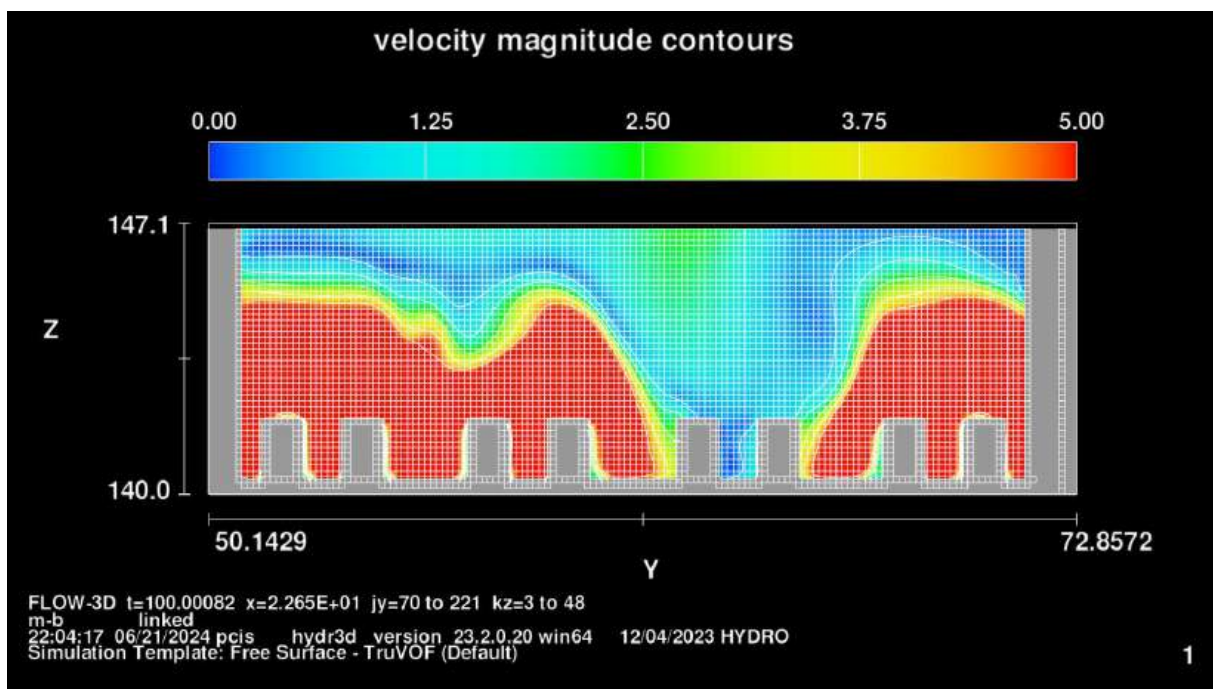


Abbildung 173 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=22,7 m [m/s]

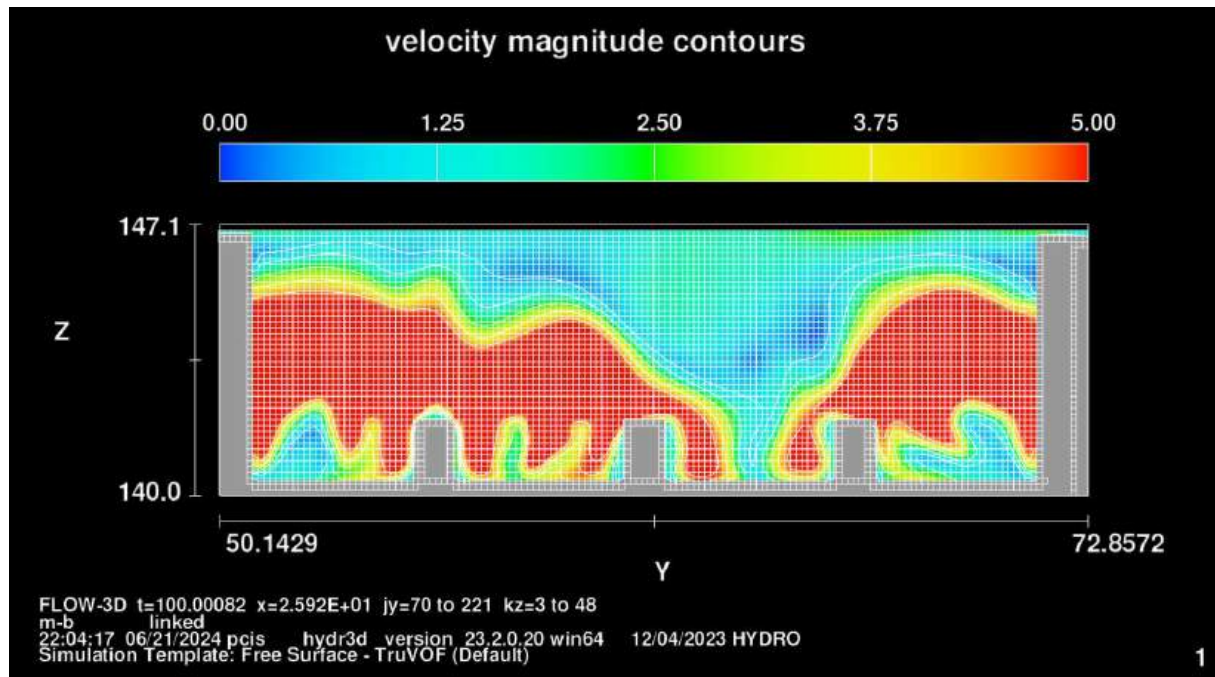


Abbildung 174 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=25,9 m [m/s]

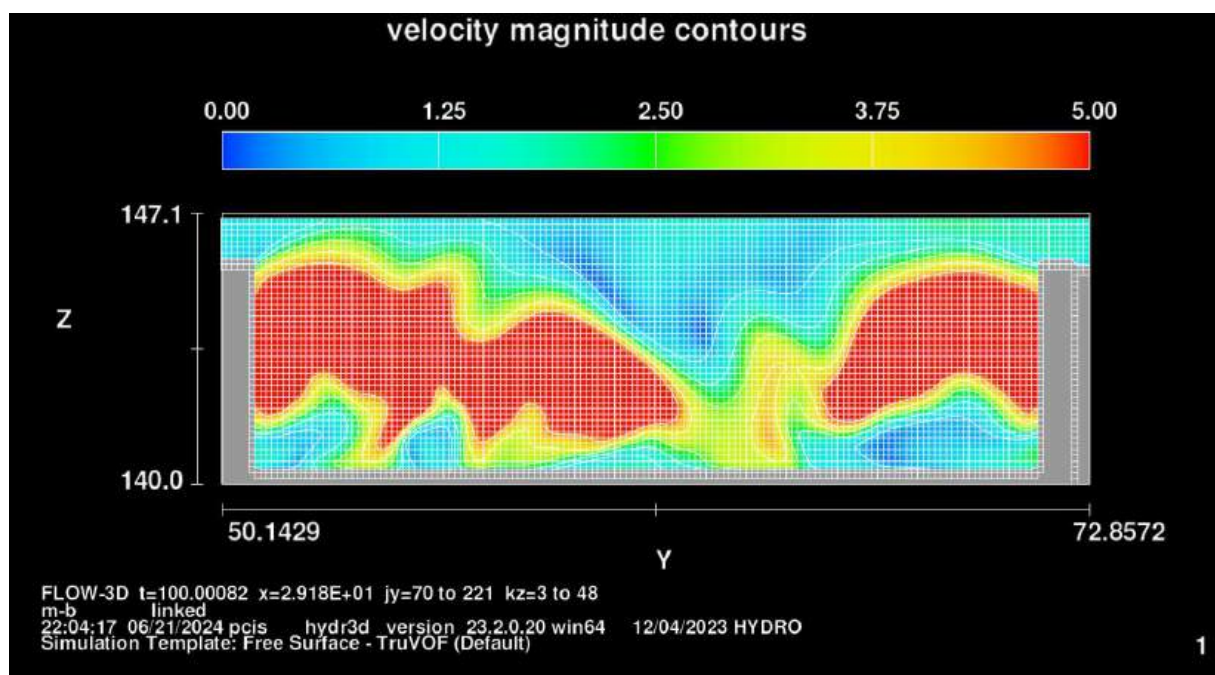


Abbildung 175 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=29,2 m [m/s]

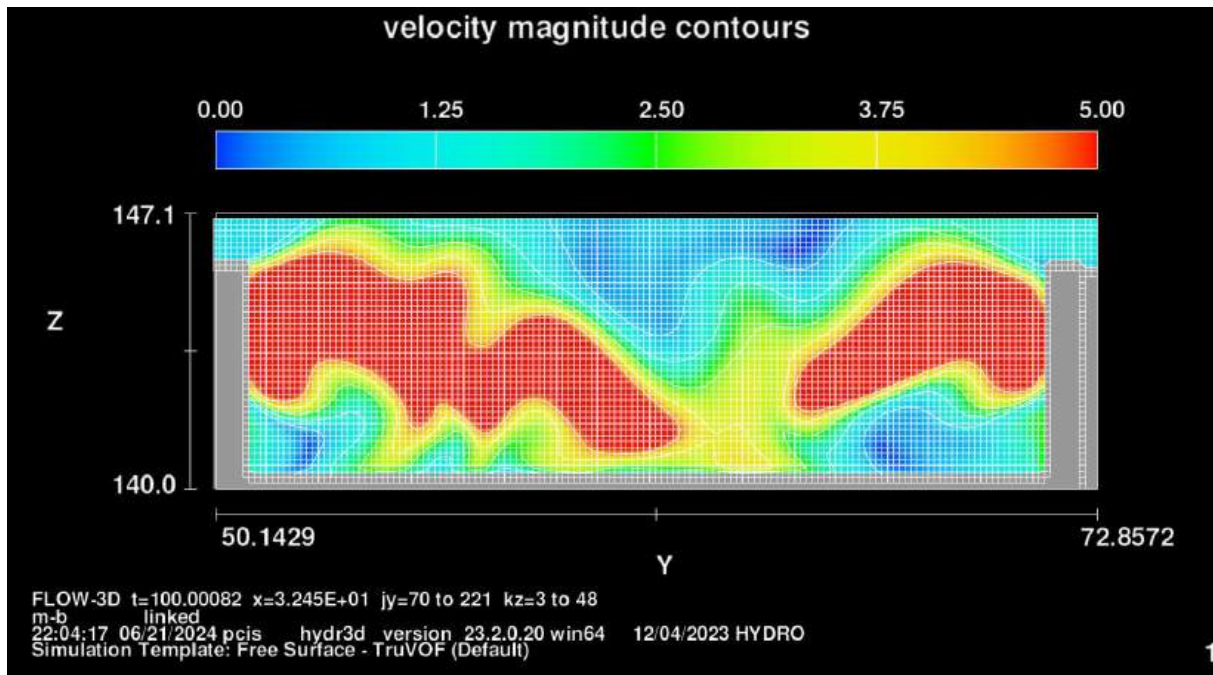


Abbildung 176 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=32,5 m [m/s]

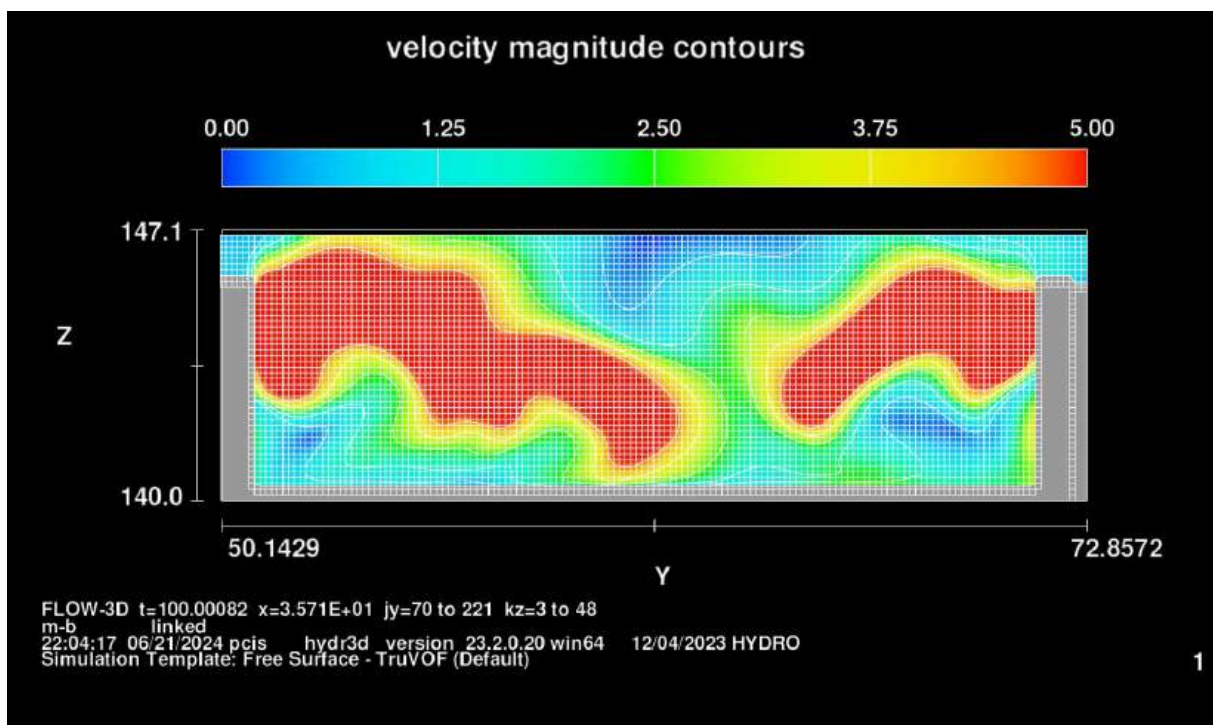


Abbildung 177 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=35,7 m [m/s]



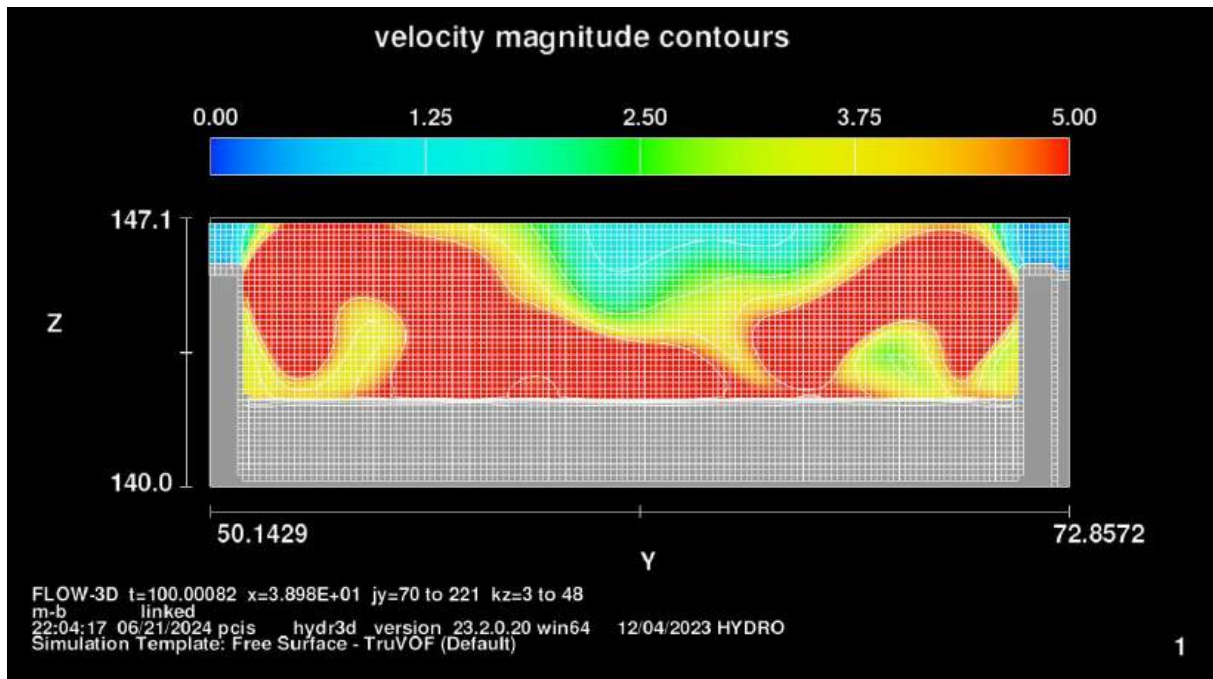


Abbildung 178 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=39,0 m [m/s]

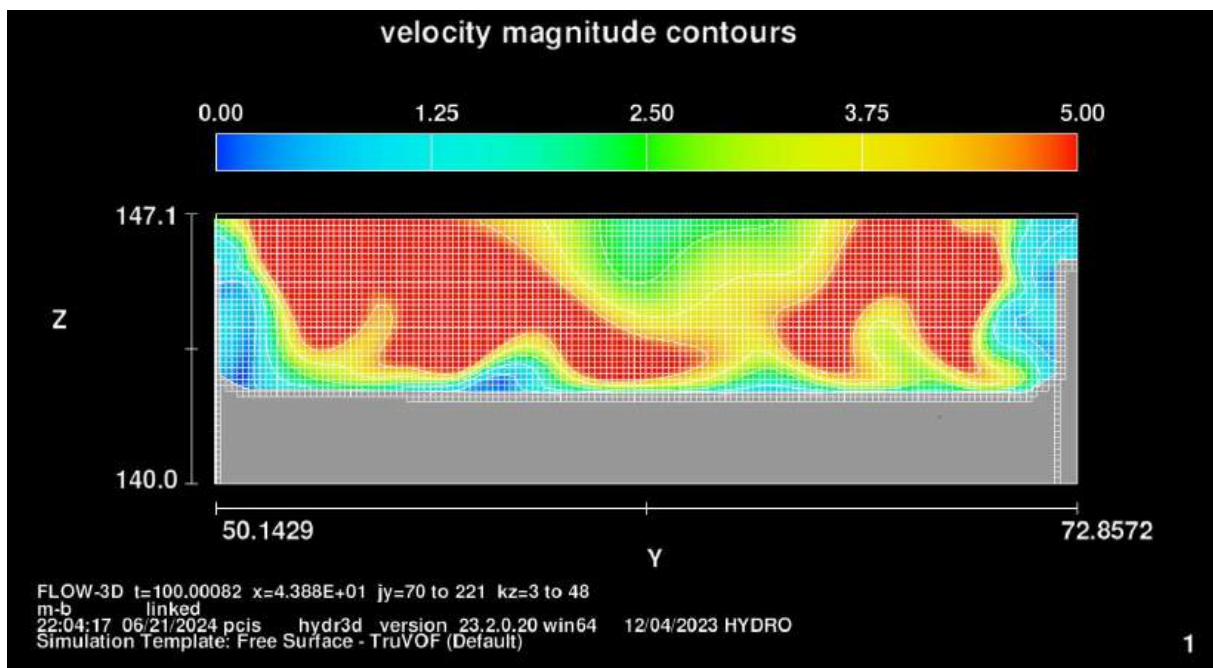


Abbildung 179 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt y=43,9 m [m/s]



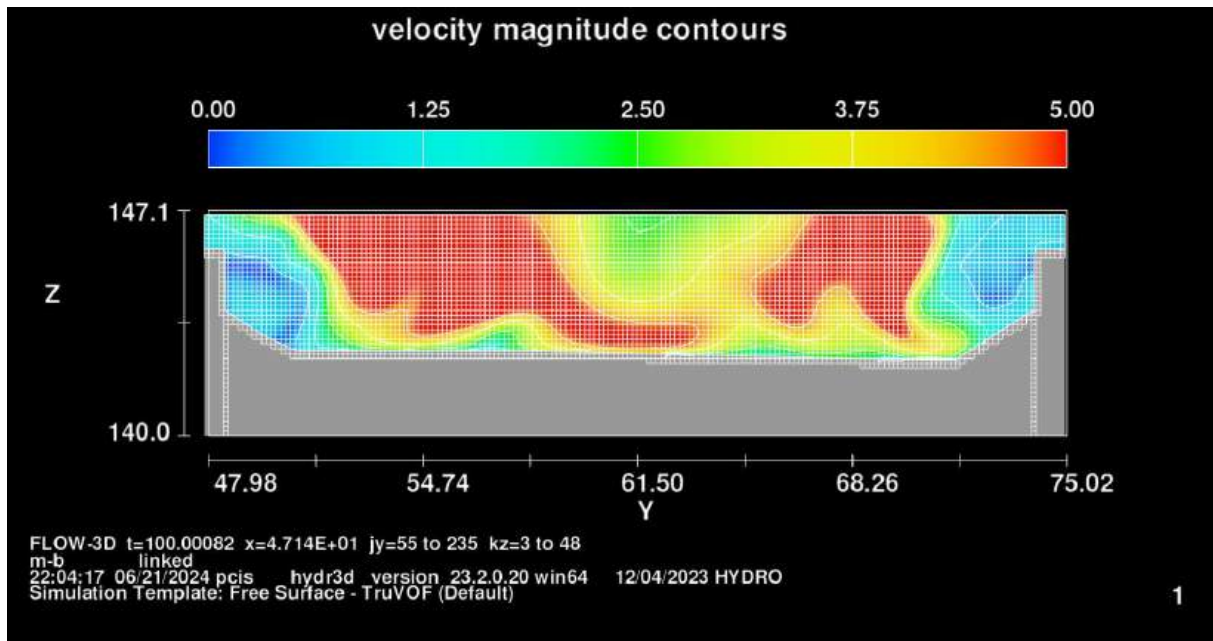


Abbildung 180 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=47,1 m [m/s]

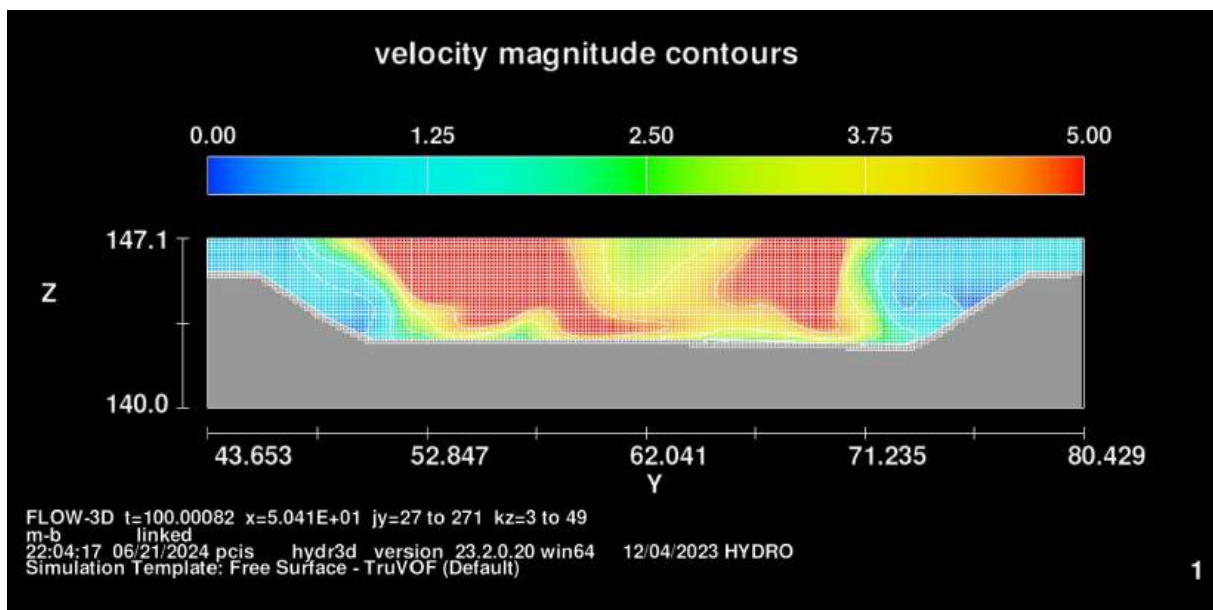


Abbildung 181 Fließgeschwindigkeiten Querschnitt x=50,4 m [m/s]

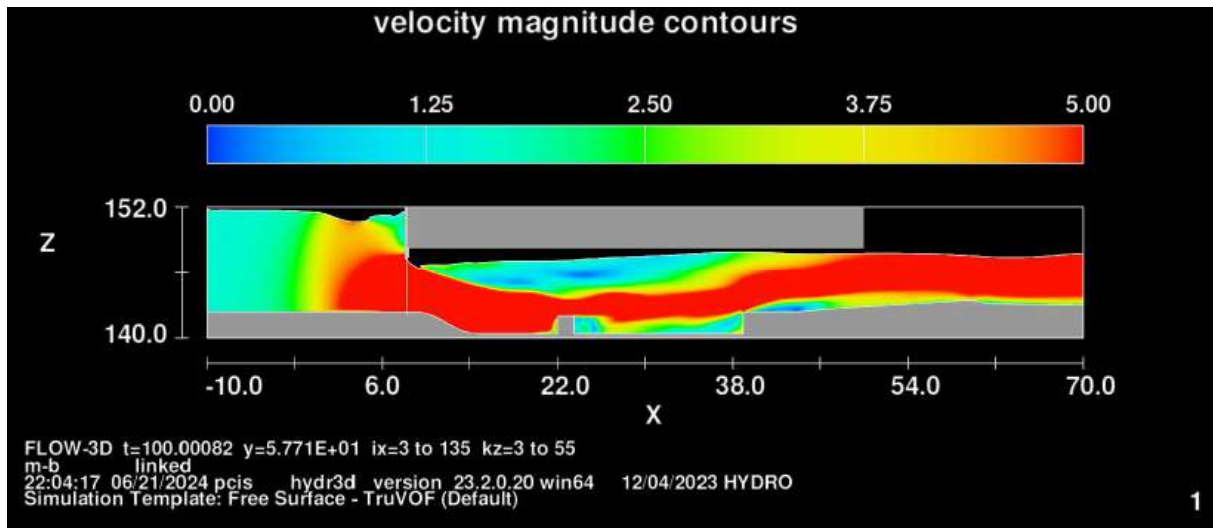


Abbildung 182 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=57,7 m [m/s]

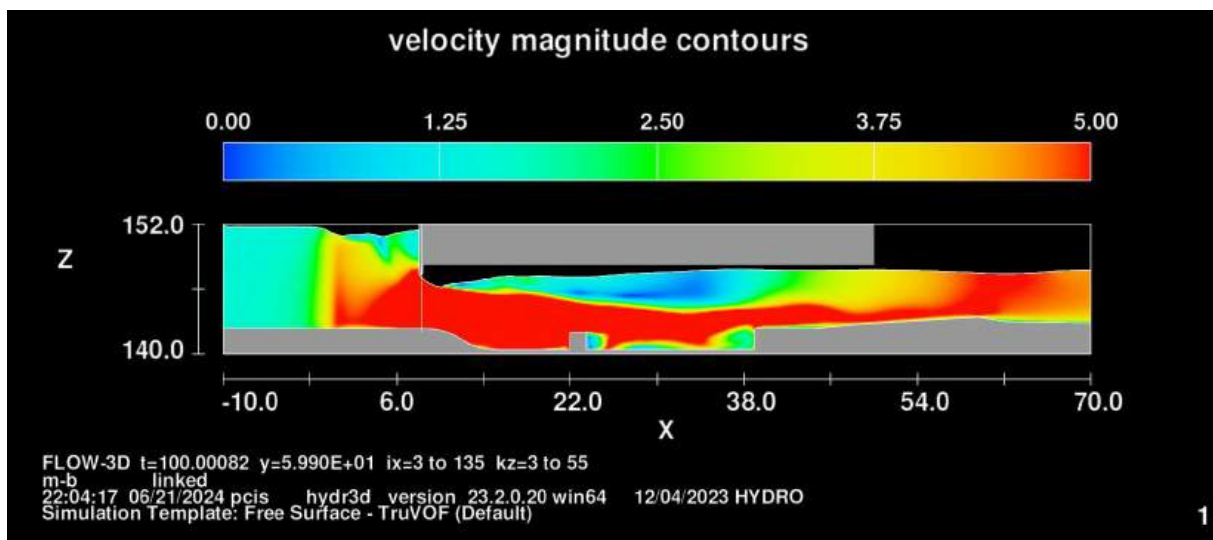


Abbildung 183 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=59,9 m [m/s]

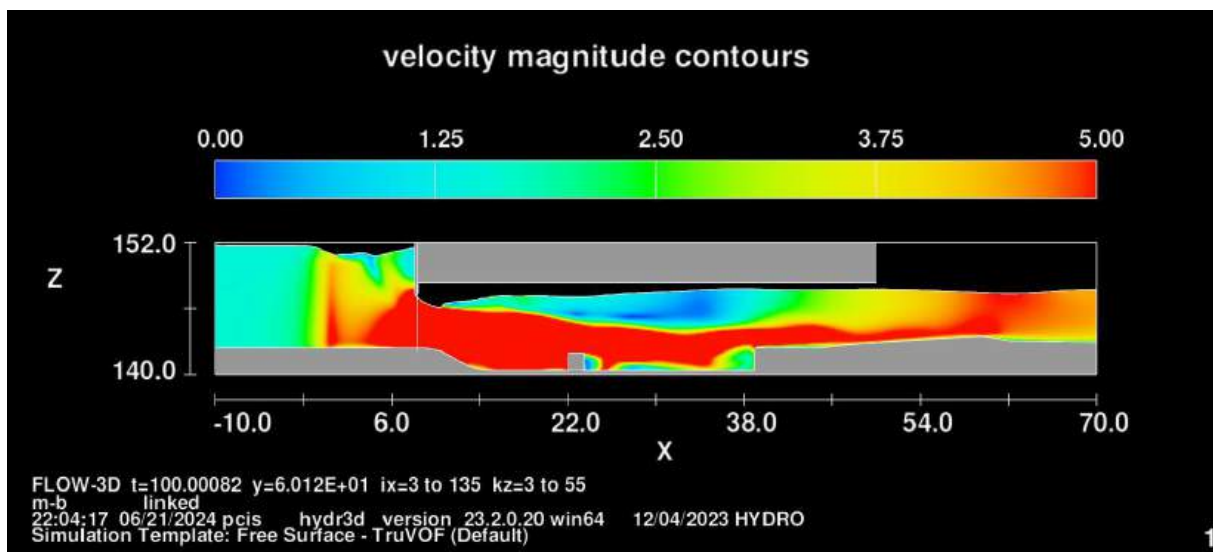


Abbildung 184 Fließgeschwindigkeiten Längsschnitt y=60,1 m [m/s]