



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN**

**VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY**

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

Anwendung und Vergleich von 2D-Hydraulik Software.

Anwendung auf den konstruktiven Flussbau

eingereicht von:

Georgi Opalchenski

Matrikelnummer:0327326

E-Mail: opal4enski@abv.bg

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Peter Tschernutter

Technische Universität Wien

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

Sofia, Februar 2012

Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit *„Anwendung und Vergleich von 2D-Hydrauliksoftware. Anwendung auf den konstruktiven Flussbau“* war, einen Leistungsvergleich zwischen drei 2D-Hydraulik-Softwareprogrammen – FESWMS, Hydro_As-2D und SRH-2D – zu ziehen. Zu diesem Zweck wurden drei Fallbeispiele erarbeitet.

Im ersten Fallbeispiel wurde die Auswirkung des Feinheitsgrades des Elementnetzes und der Änderung des Rauheitsbeiwertes auf die Ergebnisse, die die drei Programme liefern, in einem einfacheren Modell untersucht. Dabei wurde auch eine Übersicht über die unterschiedlichen Visualisierungsmöglichkeiten durch die drei Softwareprodukte gegeben. Im zweiten Fallbeispiel wurden FESWMS-, Hydro_As-2D- und SRH-2D-Ergebnisse mit der Berechnung Bauumleitung KW Gössendorf – Mur verglichen, wobei auch die Auswirkung der unterschiedlichen Durchflussmengen geprüft wurde. Nach einer vergleichenden Gegenüberstellung von den drei Programmen in Fallbeispiel 1 und Fallbeispiel 2 wurden ihre Vor- und Nachteile aufgeführt und das Programm FESWMS wurde zur Berechnung der Strömungssituation in Fallbeispiel 3 (ein vereinfachtes Modell der Bauumleitung aus Fallbeispiel 2) ausgewählt. Die Ergebnisse der FESWMS-Berechnungen wurden mit den Ergebnissen aus Laborversuchen, numerischen Berechnungen und HEC-RAS-Ergebnissen verglichen, wobei FESWMS vielfältige Funktionsmöglichkeiten und überzeugende Resultate zeigte. Durch diesen Vergleich wurde die Anwendung von 2D - Hydrauliksoftware auf den konstruktiven Flussbau validiert.

Die Abhandlung fängt mit der Schilderung der hydraulischen Grundlagen, der numerischen Methoden und Modelle und der Vorgehensweise bei der Anwendung von 2D-Hydrauliksoftware, die die Basis für die Programmbedienung darstellen, an.

Abstract

The aim of the diploma thesis *"Application and comparison of 2d hydraulic software. Application to river engineering design "* is to draw a performance comparison between three 2d - hydraulic software programs: FESWMS, Hydro_AS and SRH-2D. To this end, three case studies were developed.

The first case study examines in a simpler model the effect of the fineness of the network element and the change of the coefficient of roughness to the results which provide the three programs. This includes an overview of the different visualization options offered by the three software products.

In the second case study the results from FESWMS, Hydro_AS and SRH-2D are compared with the calculation of a building detour whereas the effect of different flow rates will also be tested. After a comparative analysis of the three programs in case study 1 and case study 2 their advantages and shortcomings have been summarized and the program FESWMS was selected to calculate the flow situation defined in case study 3 (a simplified model of the building detour from case study 2). The results of the calculations in FESWMS were compared with results from laboratory experiments, numerical calculations and results provided by the 1d-hydraulic program HEC-RAS, which showed the variety of functional options and convincing results that FESWMS provides. This comparison helped to validate the use of 2d - hydraulic design software on the river engineering. The thesis begins with a description of the hydraulic principles, the numerical methods and models and the procedure for the application of 2d - hydraulic software, which is the basis for the programs to operate.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Aufgabenstellung	7
2 Hydraulische Grundlagen	9
2.1 Strömungsmechanik	9
2.1.1 Laminare und turbulente Strömungen	10
2.1.2 Reynolds'sche Kennzahl. Hydraulischer Durchmesser	10
2.1.3 Viskosität. Reibungsgesetz von Newton	11
2.2 Erhaltungsgleichungen	12
2.2.1 Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse).....	12
2.2.2 Bernoulli - Gleichung (Erhaltung der Energie).....	14
2.2.3 Eulersche Gleichung. Navier-Stokes Gleichung	17
2.3 Stationärer Abfluss in offenen Gerinnen. Fließformeln	21
2.3.1 Stationäre und instationäre Strömung	21
2.3.2 Gleichförmige und ungleichförmige Strömung	22
2.3.3 Empirische Fließformeln	22
2.3.4 Betrachtungen zur Energiehöhe. Froude-Zahl	23
3 Numerische Methoden	26
3.1 Grundlagen	26
3.2 Finite-Differenzen-Verfahren.....	26
3.3 Finite-Volumen-Verfahren	27
3.4 Finite-Elemente-Methode.....	28
3.5 Vergleich der numerischen Methoden	29
4 Modellauswahl	32
4.1. Numerische Modelle im Überblick. Vergleich	33
4.2 Modellauswahl. Entscheidungskriterien und Entscheidungsfindung.....	38
4.3 Numerische 2-D-Modelle.....	39
5 Notwendige Grundlagen und Vorgehensweise	41
5.1 Notwendige Datengrundlage	41
5.1.1 Hydrologische Daten.....	41

5.1.2 Vermessungsdaten.....	41
5.1.3 Oberflächenrauheit.....	42
5.1.4 Sonstige Basis-Informationen.....	42
5.2 Kalibrierung.....	43
5.3 Sensitivitätsanalyse.....	44
5.4 Validierung.....	46
5.5 Visualisierung.....	47
6 Softwareprodukte: SMS, FESWMS, Hydro-As-2D und SRH-2D.....	48
6.1 Überblick über die Softwareprodukte.....	48
6.2. Vergleich und Anwendung von FESWMS, Hydro_As-2D und SRH-2D.....	51
7 Fallbeispiel 1.....	58
7.1. Aufgabenstellung und kurze Beschreibung des Modells.....	58
7.2 Ergebnisse: Fallbeispiel 1.....	66
7.3 Analyse der Ergebnisse aus Fallbeispiel 1.....	74
7.3.1 Ergebnisbeobachtungen.....	74
7.3.2 Sensitivitätsanalyse.....	80
8 Fallbeispiel 2.....	86
8.1. Aufgabenstellung und Fallbeispielsbeschreibung.....	86
8.2 Ergebnisse des zweiten Fallbeispiels.....	88
8.3 Analysen der Ergebnisse aus Fallbeispiel 2.....	103
8.3.1 Versuchsbesonderheiten.....	103
8.3.2 Analyse der Wasseroberflächen- und Wassertiefenwerte.....	104
8.3.3 Analyse der Fließgeschwindigkeitswerte.....	106
8.3.4 Schlussfolgerungen Fallbeispiel 1 und 2.....	106
9 Fallbeispiel 3.....	109
9.1 Aufgabenstellung und kurze Beschreibung des Modells.....	109
9.2 Generieren des 3D-Modells in AutoCad. Integrieren des Modells in SMS. Generieren eines Elementnetzes in SMS.....	116
9.3 Ergebnisse des dritten Fallbeispiels.....	119
9.4 Analyse der Ergebnisse aus Fallbeispiel 3. Validierung der Ergebnisse.....	120

10 Zusammenfassung und Schlussbemerkung	123
11 Literaturverzeichnis.....	125
Anhang A	A1
Anhang Ae.....	Ae1
Anhang B.....	B1
Anhang C	C1

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Das Interesse an das Thema „Fließgewässermodellierung“ steigt auf Grund immer wieder erfolgreicher Hochwasserereignisse. Die Anwendung von 1D-hydraulischen Modellen ist jedoch zur Untersuchung komplizierter Strömungssituationen wie z.B. Überströmungen von Flächen nicht völlig geeignet. Die hohen Anforderungen an die Datengrundlage und die Rechenkapazität bei der 2D-Hydrauliksoftware wurden in den letzten Jahren dank der modernsten Vermessungsmethoden wie Laserscan und Fotogrammetrie und der erhöhten Rechnerleistungen erfüllt und die Anwendung von diesem Softwaretyp steigt ständig. Daher stellt sich die Frage nach den Vor- und Nachteilen der unterschiedlichen 2D-Softwareprodukte und nach der Notwendigkeit, eine Gegenüberstellung ihrer Funktionalitäten durchzuführen.

In der vorliegenden Arbeit: *„Anwendung und Vergleich von 2D-Hydraulik Software. Anwendung auf den konstruktiven Flussbau“* wird ein Vergleich zwischen den Funktionalitäten von drei 2D-Hydrauliksoftwareprodukten – FESWMS, Hydro_AS-2D und SRH-2D – durchgeführt. Ihre Anwendung auf den konstruktiven Flussbau wird durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse, die sie liefern, mit Ergebnissen aus Laborversuchen, numerischen Berechnungen und mit Resultaten aus dem eindimensionalen Programm HEC-RAS validiert.

Der erste Teil der Arbeit (Kapitel 2. „Hydraulische Grundlagen“; Kapitel 3. „Numerische Methoden“; Kapitel 4. „Modellauswahl“; Kapitel 5. „Notwendige Grundlagen und Vorgehensweise“ und Kapitel 6. „Softwareprodukte: SMS; FESWMS, Hydro-As-2D, SRH-2D“) stellt die theoretische Grundlage für die erfolgreiche Arbeit mit 2D-Hydrauliksoftwareprogrammen dar und ermöglicht die Analyse der durch solche Software gelieferten Ergebnisse.

Im Kapitel 2 „Hydraulische Grundlagen“ wird auf die Hauptdefinitionen der Strömungslehre, die strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen und die empirischen Fließformeln für stationären Abfluss in offenen Gerinnen eingegangen. Eine Übersicht über die Finite – Differenzen-, Finite-Volumen- und Finite – Elemente - Methoden ist im Kapitel 3 gegeben.

In Kapitel 4 werden die Vor- und Nachteile der 2D-Hydraulikmodelle gegenüber der konzeptiven - 1D- und 3D-Modelle - aufgeführt und die Auswahl des für die nachfolgenden Berechnungen geeigneten Programmes begründet.

Die notwendigen Grundlagen, die wichtigsten Schritte bei der Arbeit mit den Programmen (die Modellkalibrierung, die Sensitivitätsanalyse und die Modellvalidierung) und die Besonderheiten von SMS, FESWMS, Hydro-As-2D und SRH-2D werden in Kapitel 5 und 6 geschildert.

Im zweiten Teil der Diplomarbeit werden die Ergebnisse aus den drei erarbeiteten Fallbeispielen sowohl durch farbige Lagepläne der Fließgeschwindigkeitsverteilung, der Wasseroberflächenniveaus und der Wassertiefen, als auch durch Quer- und Längsprofile in MS-Excel dargestellt. Darüber hinaus werden Analysen über die Programmergebnisse vorgenommen. Das erste Fallbeispiel betrachtet die Vor- und Nachteile der Programme bezüglich der Visualisierungsmöglichkeiten, die sie anbieten und die Auswirkung des Feinheitsgrades des Elementnetzes und der Rauheitsbeiwertsänderung auf die Ergebnisse. Im zweiten Fallbeispiel werden die FESWMS-, Hydro_As-2D- und SRH-2D-Ergebnisse mit der Berechnung der Bauumleitung KW Gössendorf – Mur verglichen. Die Analyse der Programmergebnisse zeigt die Vor- und Nachteile der Softwareprodukte. Den Zielen der Aufgabenstellung nach sind diese Vor- und Nachteile von der Modellkomplexität und den Genauigkeits- und Aufwandsanforderungen abhängig. FESWMS wird als das für die Berechnung von Fallbeispiel 3 geeignete Programm ausgewählt. Im Fallbeispiel 3 werden die Schritte zur Generierung eines 2D-Modells ausführlich beschrieben und die Ergebnisse seiner Berechnung mit den Ergebnissen aus Laborversuchen, numerischen Berechnungen und HEC-RAS-Berechnungen verglichen.

Am Ende dieser Diplomarbeit werden die vielfältigen Aspekte der Strömungssimulation, die 2D-Hydraulikprogramme im Unterschied zu anderen Verfahren anbieten, aufgezeigt und somit die Notwendigkeit von 2D-Hydrauliksoftware und deren Anwendung auf den konstruktiven Flussbau nachgewiesen

2 Hydraulische Grundlagen

Bei der Auseinandersetzung mit der Fragestellung dieser Arbeit, nämlich der vergleichenden Anwendung von 2D – Hydraulik Softwareprogrammen und deren Anwendung auf den konstruktiven Flussbau anhand von Fallbeispielen, wird von hydraulischen Grundlagen ausgegangen. Die Arbeit mit Hydraulik-Software erfordert Grundwissen über die Gesetze der Strömungsmechanik und vertiefte Kenntnisse über das Fluidverhalten und seine Haupteigenschaften.

2.1 Strömungsmechanik

Die **Strömungsmechanik** ist die Lehre, die sich mit ruhenden und beweglichen Fluiden befasst. **Fluide** sind Flüssigkeiten oder Gase, die unbegrenzt unter der Wirkung der Tangentialspannungen deformiert werden. Die Fluidteilchen verschieben sich ununterbrochen gegeneinander. Wenn das Fluid im Ruhezustand ist, verschwinden die Tangentialkräfte. Dagegen spielen die Tangentialkräfte bei Fluiden im Bewegungszustand eine Rolle. [Marinov/Kazakov 2003, S. 21], [Siekmann/Thamsen 2008, S. 1-2]

Die Strömungslehre betrachtet verschiedene Teilaspekte der Fluide. Sie werden in den Fachgebieten Fluidstatik und Fluiddynamik unterteilt, genannt Hydrostatik (ruhende Flüssigkeiten) und Hydrodynamik (bewegliche Flüssigkeiten), wenn es sich nur um Flüssigkeiten handelt.

Gegenstand **der Hydrostatik** sind:

- die Druckverteilung in ruhenden Flüssigkeiten
- die Kräfte auf Behälterwänden
- die Ausbildung freier Oberflächen
- der hydrostatische Auftrieb
- die Schwimmstabilität von Körpern

Die Hydrodynamik befasst sich dagegen mit den beweglichen Flüssigkeiten. Deren Eigenschaften werden nach folgenden Kriterien unterteilt:

- nach der Art der Fließbewegung: laminare und turbulente Strömungen
- nach der Strömungsart: stationäre und instationäre Strömungen
- nach der Art des Fluids: reibungsfreie und viskose Strömungen

2.1.1 Laminare und turbulente Strömungen

Bei **Laminarströmungen** (Schichtenströmungen) führen die Flüssigkeitsteilchen eine Bewegung in parallel zueinander gleitenden Schichten durch, ohne dass sich die Bahnlinien vermischen. (Abb. 2.1 a) Dadurch erfolgt in den Schichten kein Austausch von Masse. Die Geschwindigkeit in allen Schichten ist tangential zur Fließrichtung gerichtet. Der Druckabfall und die mittlere Durchflussgeschwindigkeit v_m haben eine lineare Abhängigkeit. Die Geschwindigkeitsverteilung ist parabolisch. (Abb. 2.1 c) [Schröder 2009, S. 58-59]

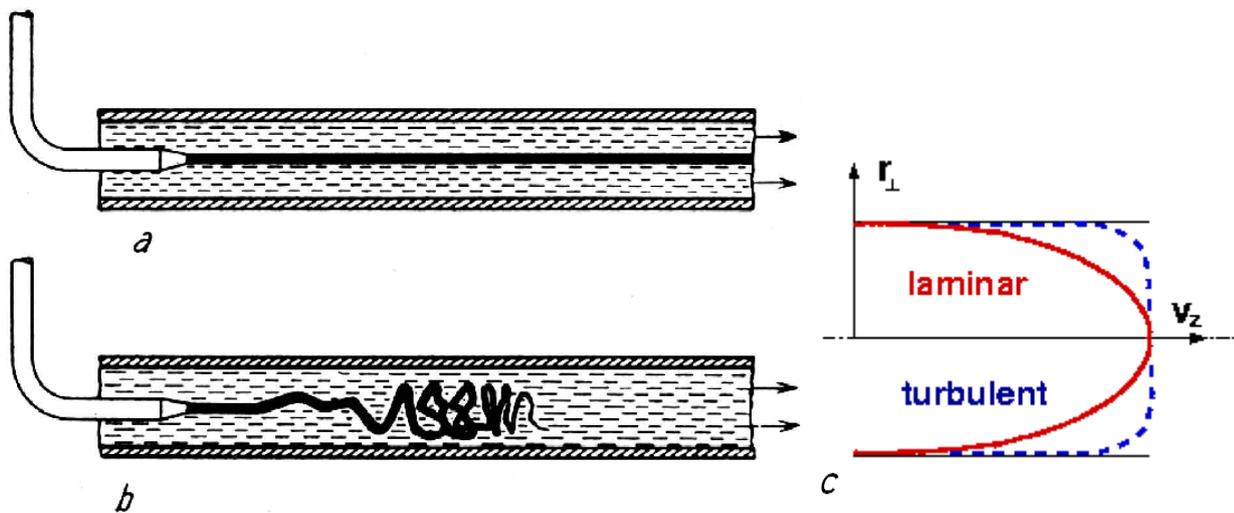


Abb. 2.1: Sichtbarmachung von laminarer (a) und turbulenter (b) Strömung [Krause-Rehberg 2001]; Geschwindigkeitsverteilung (c) [Pelte 2002]

Bei **turbulenten Strömungen** erfolgt die Bewegung des Wassers nicht mehr in geordneten Schichten, sondern die Flüssigkeitsteilchen führen auch Querbewegungen durch. Dadurch entsteht eine Durchmischung der strömenden Flüssigkeiten. (Abb. 2.1 b) Der Druckabfall bei der turbulenten Strömung ist näherungsweise proportional dem Quadrat der mittleren Druckflussgeschwindigkeit v_m . Die Geschwindigkeitsverteilung ist nicht mehr parabolisch, sondern wesentlich gleichmäßiger als bei Laminarströmungen. (Abb. 2.1 c) [Schröder 2009, S. 60 - 61]

2.1.2 Reynolds'sche Kennzahl. Hydraulischer Durchmesser

Eine Strömung kann numerisch als laminar oder turbulent mittels Berechnung **der Reynolds'schen Zahl Re** ermittelt werden. Die Reynolds'sche Zahl beschreibt das Verhältnis der Trägheitskraft zur zähen Reibungskraft.

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (2.1) \quad Re, [-] - \text{Reynoldszahl}$$

$v, [m / s] - \text{Fließgeschwindigkeit}$
 $L, [m] - \text{charakteristische Länge}$
 $\nu, [m^2 / s] - \text{kinematische Zähigkeit}$

Bei Rohrströmungen wird für die charakteristische Länge der Rohrdurchmesser verwendet. Bei Strömungen mit freier Oberfläche, den Gerinneströmungen, muss eine andere charakteristische Länge (Hydraulischen Radius R_{hy}) gewählt werden.

$$R_{hy} = \frac{A}{U} \quad (2.2) \quad R_{hy}, [m] - \text{hydraulischer Radius}$$

$A, [m^2] - \text{Querschnittsfläche}$
 $U, [m] - \text{benetzter Umfang}$

Durch Versuche ist eine kritische Reynoldszahl für Rohrleitungen ermittelt worden: $Re_{kr} = 2320$. Durchschnittlich bei diesem Wert der Reynoldszahl geht die laminare in turbulente Strömung über. [Giesecke/Mosonyi 2009, S.188]

2.1.3 Viskosität. Reibungsgesetz von Newton

Der Art des Fluids nach werden die realen Fluide als viskose Strömungen bezeichnet. **Die Viskosität** (innere Reibung) ist die Eigenschaft von Flüssigkeiten, der gegenseitigen Verschiebung der Flüssigkeitsteilchen bei Bewegung einen (geringen) Widerstand entgegenzusetzen. [Koch 2003, S. 1.3]

Das **Reibungsgesetz von Newton** beschreibt den Zusammenhang zwischen der Schubspannung und der zugehörigen Geschwindigkeitsverteilung. Experimentell wird gezeigt, dass bei vielen Fluiden eine direkte Proportionalität zwischen ihnen besteht:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2.3) \quad \tau, [N / m^2] - \text{Schubspannung}$$

$\eta, [kg / m \cdot s] - \text{dynamische Viskosität}$
 $v, [m / s] - \text{Fließgeschwindigkeit}$

[Gersten/Herwig 1992, S.7]

2.2 Erhaltungsgleichungen

Die **Erhaltungsgleichungen** sind die Grundgleichungen, mit denen die Strömung beschrieben werden kann. Mit der Berechnung der Strömung sollen die drei Geschwindigkeitskomponenten v_x, v_y, v_z des Geschwindigkeitsvektors \vec{v} , die Dichte ρ , und die Temperatur T der Strömung in Abhängigkeit von den Kartesischen Koordinaten x, y, z ermittelt werden. [Oertel 1995, S. 30-31]

2.2.1 Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse)

Die **Kontinuitätsgleichung** oder Massenerhaltungsgleichung kann folgendermaßen abgeleitet werden:

Es wird ein Volumenelement mit Kantenlängen dx, dy, dz dargestellt. Durch die linke Oberfläche des Volumenelements mit der Fläche $dy \cdot dz$ tritt der Massenstrom $\rho \cdot v_x \cdot dy \cdot dz$ ein. Die Größe $\rho \cdot v_x$ ändert ihren Wert von der Stelle x zur Stelle $x + dx$ in x-Richtung um

$\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} \cdot dx$ und der Massenstrom, der durch die rechte Oberfläche $dy \cdot dz$ des Volumenelements austritt, kann mit dem Ausdruck

$$\left(\rho \cdot v_x + \frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot dy \cdot dz \quad (2.4)$$

beschrieben werden.

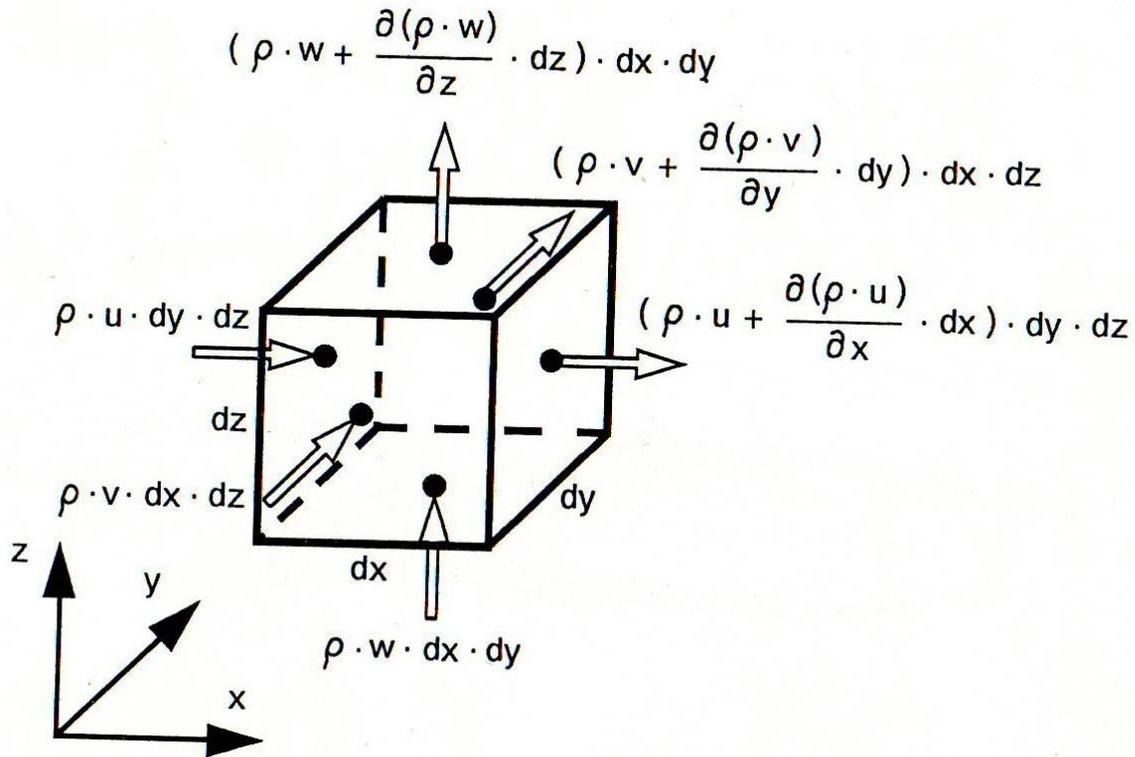


Abb. 2.2: Ein- und ausströmende Massenströme [Oertel 1995, S. 32]

Nach der Kontinuitätsgleichung ist die Differenz aus ein- und austretenden Massenströmen folgendermaßen darzustellen:

$$\frac{\partial(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz)}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (2.5a) \quad \text{oder}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz)}{\partial t} = & \left(\rho \cdot v_x - \left(\rho \cdot v_x + \frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} \right) \right) \cdot dy \cdot dz + \\ & \left(\rho \cdot v_y - \left(\rho \cdot v_y + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} \right) \right) \cdot dx \cdot dz + \quad (2.5b) \\ & \left(\rho \cdot v_z - \left(\rho \cdot v_z + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} \right) \right) \cdot dx \cdot dy \end{aligned}$$

Dadurch erhält man die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z} \quad (2.6a)$$

Für ein inkompressibles Fluid vereinfacht sich die Kontinuitätsgleichung zu:

$$\frac{v_x}{\partial x} + \frac{v_y}{\partial y} + \frac{v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.6b)$$

[Oertel 1995, S. 32-33]

2.2.2 Bernoulli - Gleichung (Erhaltung der Energie)

Im Folgenden wird die **Bernoulli-Gleichung** oder Energieerhaltungsgleichung definiert.

Wenn von außen keine Energie zugeführt wird, gilt für eine allgemeine Strömung grundsätzlich, dass die Gesamtenergie E_{ges} im Fluid konstant ist. Dabei gilt für eine reale Strömung:

$$E_{ges} = E_{mech} + E_{therm}$$

E_{mech} - mechanische Energie

$E_{therm} = E_{reib}$ - thermische Energie, die durch Reibungswärme beim Umsetzen von mechanischer Energie in Wärmeenergie entsteht.

Die mechanische Energie E_{mech} ist die Summe aus:

- 1) der potentiellen (Lage) Energie E_{pot}
- 2) der Druckenergie E_{Dr}
- 3) der kinematischen Energie E_{kin}

$$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} + E_{Dr} + E_{reib} \quad (\text{reale Strömung})$$

Unter einer idealen Strömung versteht man eine reibungsfreie Strömung, bei der die Viskosität keine Rolle spielt. Bei solchen Strömungen entstehen keine Energieverluste durch Umsetzung von mechanischer in Wärmeenergie durch Reibung und der Term E_{reib} kann vernachlässigt werden. Erst bei der Betrachtung von realen Strömungen wird er wieder eingeführt.

$$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} + E_{Dr} \quad (\text{ideale Strömung})$$

Betrachtet man eine Stromröhre (Abb. 2.3), so gelten an 2 beliebigen Stellen in der Strömung für die potentielle Energie ($E_{pot(i)}$), die kinetische Energie ($E_{kin(i)}$) und die Druckenergie ($E_{Druck(i)}$), folgende Zusammenhänge:

$$E_{pot(1)} = m \cdot g \cdot z_1 \text{ und } E_{pot(2)} = m \cdot g \cdot z_2 \quad (2.7a)$$

$$E_{kin(1)} = \frac{1}{2} m \cdot v_1^2 \text{ und } E_{kin(2)} = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 \quad (2.7b)$$

$$E_{Druck(1)} = p_1 \cdot V_1 \text{ und } E_{Druck(2)} = p_2 \cdot V_2 \quad (2.7c)$$

Aus der Summe von (2.7a), (2.7b) und (2.7c) ergibt sich die Gesamtenergie (2.8a) und (2.8b).

$$E_{(1)} = m \cdot g \cdot z_1 + \frac{1}{2} m \cdot v_1^2 + p_1 \cdot v_1 \quad (2.8a)$$

$$E_{(2)} = m \cdot g \cdot z_2 + \frac{1}{2} m \cdot v_2^2 + p_2 \cdot v_2 \quad (2.8b)$$

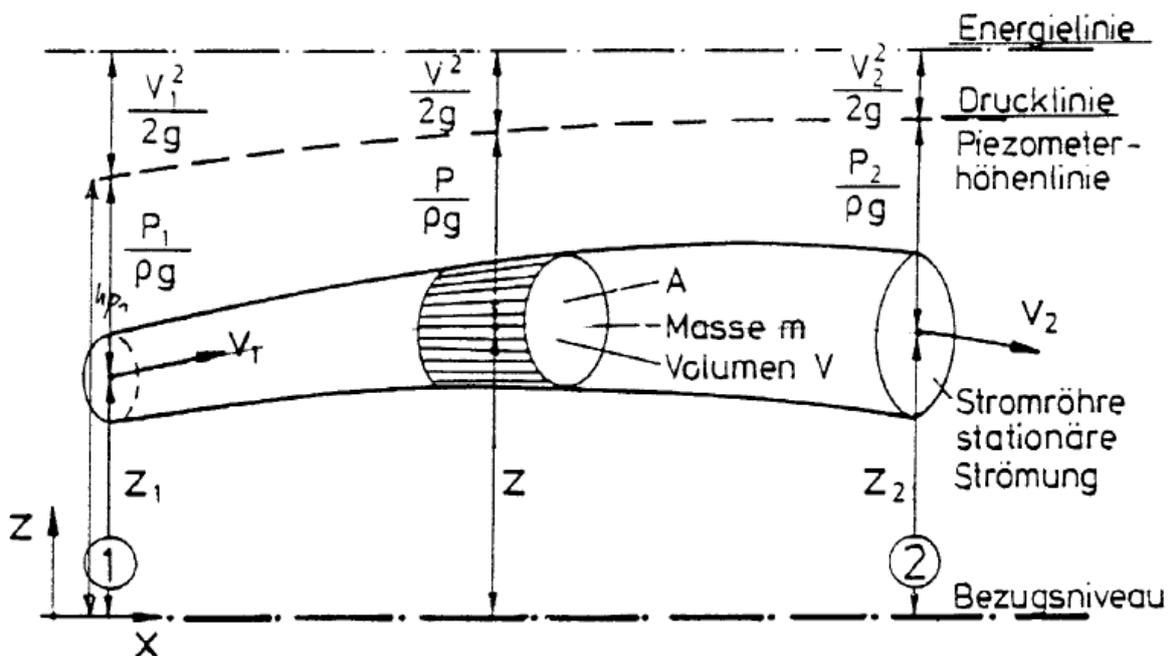


Abb. 2.3: Grafische Darstellung der Bernoulli-Gleichung [Koch 2003, S. 3.14]

Wenn die Gesamtenergie im Punkt (1) (2.8a) durch $m \cdot g$ dividiert wird, bekommt man die Energiehöhe im Punkt (1) :

$$\frac{E_{(1)}}{m \cdot g} = H_E = z_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1^2}{g} + \frac{p_1 \cdot v_1}{m \cdot g} \quad (2.9)$$

Bei einer stationären, reibungsfreien Strömung bleibt die Gesamtenergie als Summe aus Lagenenergie, Druckenergie und kinetischer Energie längs der Stromröhre konstant. Dann folgt die Bernoullische Gleichung aus (2.9).

$$\frac{E}{G} = H_E = z_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1^2}{g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = z_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_2^2}{g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} \quad (2.10)$$

Für eine reale Strömung ist die Bernoullische Gleichung gleich:

$$\frac{E}{G} = H_E = z_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1^2}{g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = z_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_2^2}{g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_{v,R} + h_{v,lok} \quad (2.11)$$

$E, [kJ]$ – Energie

$H_E, [m]$ – Energiehöhe

$z, [m]$ – geodätische Höhe

$g, [m / s^2]$ – Erdbeschleunigung

$\rho, [kg / m^3]$ – Dichte

$p, [Pa]$ – Druck

$v, [m / s]$ – Geschwindigkeit

$\frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{g}, [m]$ – Geschwindigkeitshöhe (dynamische Druckhöhe)

$\frac{p}{\rho \cdot g}, [m]$ – statische Druckhöhe

$h_{v,R}, [m]$ – Reibungsverluste (innere und äußere Reibung)

$h_{v,L}, [m]$ – lokale Verluste

$h_{v,L} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}$, wo ζ – Verlustbeiwert versuchstechnisch für verschiedene

Verluste ermittelt

[Koch 2003, S. 3.13 -3.15]

2.2.3 Eulersche Gleichung. Navier-Stockes Gleichung

Kontinuumsströmungen können am ausführlichsten durch **Navier–Stockes–Gleichungen** beschrieben werden. Sie beschreiben die Strömung mit Reibung und Wärmeleitung und widerspiegeln somit die Dynamik der Flüssigkeiten in deren Vielfalt. Da jedoch deren Lösung eine Vielzahl von Ergebnissen liefert, ist es sinnvoll, dass man sich Näherungen dieser Gleichungen bedient, damit der große Rechenaufwand, der dabei entsteht, minimiert wird.

Eines der wichtigsten Näherungskonzepte ist die Grenzschichttheorie nach Prandl. Diese Theorie ist auf große Reynoldszahlen und anliegende Strömungen anwendbar und besagt, dass „das Strömungsfeld um einen Körper in eine dünne reibungsbehaftete Grenzschicht an der Körperberandung und in eine reibungsfreie Außenströmung zerlegt werden kann. Innerhalb der Grenzschicht ist der Druck normal zur Berandung konstant, er wird somit durch die reibungsfreie Außenströmung bestimmt.“

Ausgehend von der Grenzschichttheorie kann die Aufteilung der Strömung auch auf die Navier-Stockes-Gleichungen angewandt werden, indem sie in mehrere Systeme von Gleichungen aufgeteilt werden. Für die Grenzschichtströmung ergeben sich somit die Grenzschichtgleichungen, während die Hauptströmung als reibungsfrei betrachtet und durch die Eulersche Gleichung beschrieben werden kann.

[Hänel 2009, S. 6]

2.2.3.1 Eulersche Gleichung

Die **Eulersche Bewegungsgleichung** beschreibt die Flüssigkeitsbewegung einer inkompressiblen, reibungsfreien Flüssigkeit:

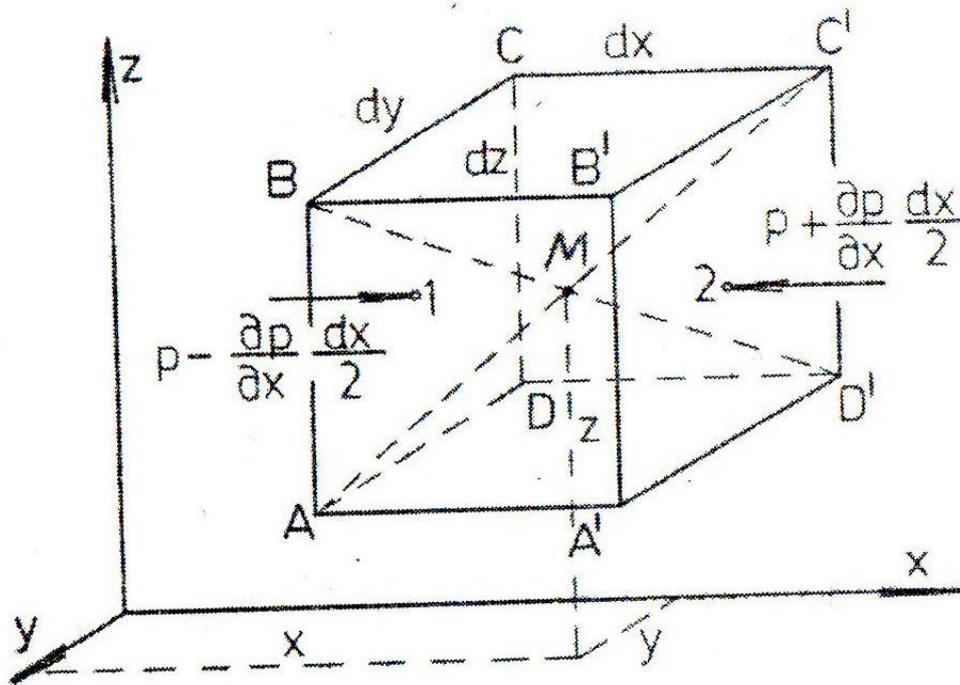


Abb. 2.4: Darstellung der Eulerschen Gleichung [Marinov/Kazakov 2003, S.85]

Es wird ein Volumenelement mit Kantenlängen dx, dy, dz dargestellt. Die Masse der Flüssigkeit in diesem Element ist $\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$. Die x -Projektion der Kräfte, die dem Element wirken, wird als $F_x \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz$ bezeichnet. $p(x, y, z, t)$ ist der Druck im Zentrum des Elements (Punkt „M“).

Der Druck im Punkt „1“ ist $p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}$ und $-\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}\right)$ für

Punkt „2“. Nach dem zweiten Newtonschen Gesetz kommt es zu:

$$F_x \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot dx \cdot dy \cdot dz = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{dv_x}{dt} \quad (2.12)$$

und nach einfachen Umrechnungen bekommt man die Eulersche Bewegungsgleichung:

$$\begin{aligned} F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{dv_x}{dt} \\ F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{dv_y}{dt} \\ F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} &= \frac{dv_z}{dt} \end{aligned} \quad (2.13)$$

$v_x, v_y, v_z, [m/s]$ – Die Komponenten der Geschwindigkeitsvektor

$\rho, [kg/m^3]$ – Dichte

$t, [s]$ – Zeit

$$v_x = v_x(x, y, z, t)$$

$$v_y = v_y(x, y, z, t)$$

$$v_z = v_z(x, y, z, t)$$

[Marinov/Kazakov 2003, S.85-86]

2.2.3.2 Navier-Stockes-Gleichung

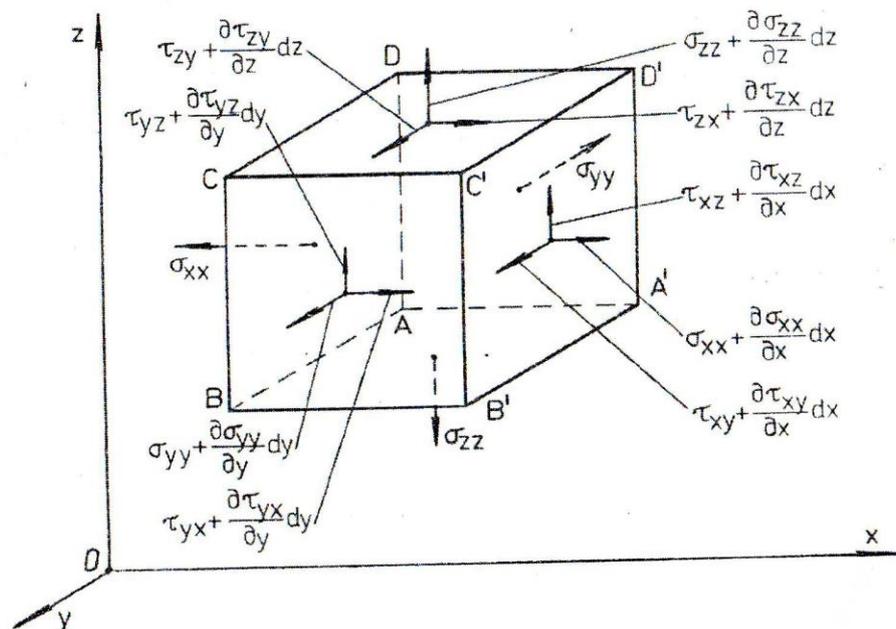


Abb. 2.5: Darstellung der Navier-Stockes-Gleichung [Marinov/Kazakov 2003, S.96]

Die Navier-Stockes-Gleichung für reale Flüssigkeiten ist analog zu der Eulerischen Gleichung. Nun aber sind die Wände des Volumenelements nicht nur unter Normal-, sondern auch unter Tangentialspannungen gestellt. Die Spannung in einem bestimmten Punkt ist abhängig nicht nur von den räumlichen Koordinaten, sondern auch von der Lage der Oberfläche in diesem Punkt. Die Gleichungen für Bewegung der realen Flüssigkeit unter Spannung sind:

$$\begin{aligned}
\rho \cdot F_x + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) &= \rho \cdot \frac{dv_x}{dt} \\
\rho \cdot F_y + \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) &= \rho \cdot \frac{dv_y}{dt} \\
\rho \cdot F_z + \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \right) &= \rho \cdot \frac{dv_z}{dt}
\end{aligned} \quad (2.14)$$

$F_x, F_y, F_z, [N]$ – Die Komponenten der wirkenden Kräfte

$v_x, v_y, v_z, [m/s]$ – Die Komponenten der Geschwindigkeitsvektor

ρ – Dichte, $[kg/m^3]$

t – Zeit, $[s]$

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, [Pa]$ – Normalspannungen

$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{zy} = \tau_{yz}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, [Pa]$ – Tangentialspannungen

Die Unbekannten in (2.14) sind zehn – die drei Geschwindigkeitskomponenten, die Dichte und die sechs unabhängigen Spannungen und die Navier-Stocksche Gleichung kann mittels

des Newtonschen Reibungssatzes $\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$ (2.3) eingeleitet werden:

$$\begin{aligned}
F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) &= \frac{dv_x}{dt} \\
F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) &= \frac{dv_y}{dt} \\
F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) &= \frac{dv_z}{dt}
\end{aligned} \quad (2.15)$$

$F_x, F_y, F_z, [N]$ – die Komponenten der wirkenden Kräfte

$v_x, v_y, v_z, [m/s]$ – die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors

$t, [s]$ – Zeit

Beim Einleiten der Gleichung wird auch die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{v_x}{\partial x} + \frac{v_y}{\partial y} + \frac{v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.6b) \text{ verwendet.}$$

[Marinov/Kazakov 2003, S.96 -101]

2.3 Stationärer Abfluss in offenen Gerinnen. Fließformeln

Die Abflussverhältnisse in einem offenen Gerinne können durch die Fließformeln beschrieben werden. Sie weisen den Zusammenhang zwischen folgenden Größen der Fließbewegung auf:

- Fließgeschwindigkeit
- Wassertiefe
- Fließquerschnitt - Form, Größe, benetzter Umfang
- Sohlgefälle
- Gerinnerauigkeit

2.3.1 Stationäre und instationäre Strömung

Eine Strömung wird als **instationär** bezeichnet, wenn jeder Punkt des beweglichen Wassers seine Geschwindigkeit im Laufe der Zeit verändert.

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} \neq 0, \quad \frac{\partial u_y}{\partial t} \neq 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial t} \neq 0 \quad (2.16)$$

$t, [s]$ – Zeit

$u_x, u_y, u_z, [m/s]$ – Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in x, y, z Richtung

Bei einer **stationären Strömung** dagegen bleiben die Größe und die Richtung der Geschwindigkeit konstant im Laufe der Zeit. Jedes Wasserteilchen hat dieselbe Geschwindigkeit für eine bestimmte Lage:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \quad (2.17)$$

$t, [s]$ – Zeit

$u_x, u_y, u_z, [m/s]$ – Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in x, y, z Richtung

[Marinov/Kazakov 2003, S.199]

2.3.2 Gleichförmige und ungleichförmige Strömung

Bei einer ungleichförmigen Strömung hat die Geschwindigkeit zu einem festen Zeitpunkt $t(t = const)$ in verschiedenen Querschnitten eines Stromrohres unterschiedliche Größen. Andernfalls liegt eine gleichförmige Strömung vor.

$$\frac{\partial v}{\partial s} = 0, \quad (2.18) \quad \text{gleichförmige Strömung}$$

$$\frac{\partial v}{\partial s} \neq 0, \quad (2.19) \quad \text{ungleichförmige Strömung}$$

$s, [m]$ – Richtung der Stromröhre

$v, [m / s]$ – Fließgeschwindigkeit

[Koch 2003, S. 3.16]

2.3.3 Empirische Fließformeln

Eine sehr wichtige Formel in diesem Zusammenhang ist diese von **Darcy-Weisbach**:

$$h_{v,R} = \lambda \cdot \frac{1}{4R_{hy}} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2.20a)$$

$h_{v,R}, [m]$ – Reibungsverluste (innere und äußere Reibung)

$\lambda, [-]$ – Widerstandsbeiwert

$g, [m / s^2]$ – Erdbeschleunigung

$v, [m / s]$ – Fließgeschwindigkeit

Anhand dieser Formel wird die Energieverlusthöhe, die durch Reibung verursacht ist, ermittelt. Sie kann auch so

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot \sqrt{R_{hy} \cdot \frac{h_{v,R}}{l}} \quad (2.20b)$$

dargestellt werden, wobei

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, [m^{0.5} / s] \text{ – Koeffizient von Chezy} \quad (2.20c)$$

und

$$I_E = \frac{h_{v,R}}{l}, [-] - \text{Energiehöhengefälle} \quad (2.20d)$$

ausdrücken. Aus (2.20b), (2.20c) und (2.20d) wird die **Chezy-Formel** abgeleitet:

$$v = C \cdot \sqrt{R_{hy} \cdot I_E} \quad (2.21)$$

Es gibt eine große Menge an empirischen Formeln, die den Koeffizient von Chezy ermitteln. Der einfacheren Verwendung halber wird in der deutschen Hydrotechnik am häufigsten die Manning-Strickler Fließformel verwendet:

$$v = k_{str} \cdot R_{hy}^{\frac{2}{3}} \cdot I_E^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

$k_{str}, [m^{1/3} / s] - \text{Stricklerbeiwert}$

Der Stricklerbeiwert ist versuchstechnisch sehr gut ausgewertet und liegt für verschiedene Gerinnenoberflächenbildungen tabellarisch vor¹.

[Marinov/Kazakov 2003, S. 155-156, 158]

2.3.4 Betrachtungen zur Energiehöhe. Froude-Zahl

Für ein offenes Gerinne kann die Bernoulli-Gleichung von (2.9) wie folgt dargestellt werden:

$$H_E = z_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_1^2}{g} \quad (2.23a)$$

Wenn man die Geschwindigkeit durch die Kontinuitätsgleichung

$$Q = A \cdot v \quad (2.23b)$$

$Q, [m^3 / s] - \text{Durchfluß}$
 $A, [m^2] - \text{Querschnittsfläche}$
 $v, [m / s] - \text{Fließgeschwindigkeit}$

ausdrückt, kommt es zu

¹ z. B. bei Patt, Heinz/Bechteler, Wilhelm: Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz. Heidelberg: Springer-Verlag 2001, S. 97

$$H_E = h + \frac{1}{2g} \cdot \frac{Q^2}{A^2} \quad (2.23c)$$

Nach Q aufgelöst ergibt sich:

$$Q = A \cdot \sqrt{2g \cdot (H_E - h)} \quad (2.23d)$$

Die Querschnittsfläche A ist von der Wassertiefe h abhängig. Abbildung 2.6 zeigt den Zusammenhang $h_t(h)$ für einen konstanten Abfluss Q und $Q(h)$ für eine konstante Energiehöhe H_E .

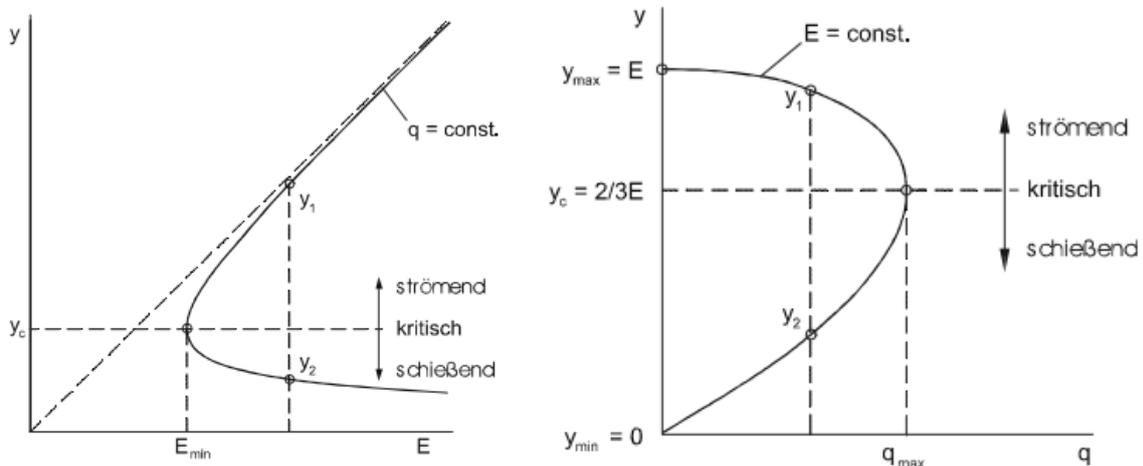


Abb. 2.6 Zusammenhang zwischen der Energiehöhe H_E , dem Abfluss Q und der Wassertiefe h . [Jirka 2007, S. 216 - 217]

Für den Grenzzustand gilt $Q=Q_{max}$ bzw. $H_E=H_{E, min}$

$$Q = \text{const}$$

$$b) H_E = \text{const}$$

Beide Kurven weisen bei Tiefe $h=h_{gr}$ ein Extremum auf, den sog. Grenzzustand. Ist $Q < Q_{max}$ bzw. $H_E > h_{min}$, so kann der Abfluss entweder mit relativ großer Wassertiefe h_2 und kleiner Geschwindigkeit v_2 . (strömender Abfluss) oder mit vergleichsweise geringer Wassertiefe h_1 und dafür höherer Geschwindigkeit v_2 , (schießender Abfluss) stattfinden.

Die **Froude-Zahl** ist eine Kennzahl, die anzeigt, ob der Abfluss „strömend“ oder „schießend“ ist. Sie stellt das Verhältnis zwischen der mittleren Geschwindigkeit v_m und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{h \cdot g}, [m / s] \quad (2.24) \text{ dar.}$$

$c, [m / s]$ – Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

$h, [m]$ – mittlere Wassertiefe

$g, [m / s^2]$ – Erdbeschleunigung

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot h}}, [-] \quad (2.25)$$

Dabei ist zwischen folgenden Bereichen zu unterscheiden:

$Fr < 1$ - strömender Abfluss

$Fr > 1$ - schießender Abfluss

$Fr = 1$ – Grenzzustand

Beim Strömen ist die Fließgeschwindigkeit kleiner als die Wellengeschwindigkeit ($v_m < v_{gr}$).

Das heißt, Druckströmungen, die sich stets als Oberflächenwellen äußern, können sich in Fließrichtung und auch dagegen ausbreiten. Bei schießendem Abfluss ist $v_m > v_{gr}$, so dass sich die Druckströmungen nur in Fließrichtung ausbreiten können.

[Marinov/Kazakov 2003, S. 203],[Patt/Bechteler 2001, S. 101], [Oertel/Böhle 2009, S. 94]

3 Numerische Methoden

3.1 Grundlagen

Die Lösung der strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen in vektorieller Form und krummlinigen Koordinatensystemen ist mit der Hilfe numerischer Verfahren möglich. In Abhängigkeit von den vorgegebenen Randbedingungen für die Differentialgleichungen und von der Art der Teilaufgaben, die aus der Lösung von partiellen Differentialgleichungen allgemein und den speziellen Eigenschaften der Navier-Stockschen Gleichungen erarbeitet werden, werden verschiedene numerische Methoden verwendet. [Schönung 1990, S. 36]

Nach einer Diskretisierung des Integrationsgebietes lösen die numerischen Verfahren direkt die partiellen Differentialgleichungen näherungsweise und dabei ohne vorher auszuwählende Ansatzfunktionen auskommen. Nachdem die Diskretisierung des Strömungsfeldes (in strukturiertes bzw. unstrukturiertes Gitter) erfolgt und Erhaltungssätze für die jeweiligen Volumenelemente erfüllt werden, lässt sich eine Vielzahl numerischer Lösungsverfahren ableiten, mit denen Strömungsprobleme verschiedener Art gelöst werden können.

[Lecheler 2011, S. 8-9], [Kinzelbach 2010, S. 5.4 -5.9]

3.2 Finite-Differenzen-Verfahren

Bei dem **Finite-Differenzen-Verfahren** wird über das Berechnungsgebiet ein numerisches Netz gelegt, dessen Linien den Koordinatenlinien entsprechen. Die Gitter sind zumeist strukturiert, d.h. die Indizes der Knotenpunkte entlang der Koordinatenlinie sind monoton aufsteigend. Bei dem Finite-Differenzen-Verfahren werden die in den Erhaltungsgleichungen auftretenden Differentialquotienten an den Knotenpunkten direkt durch Differenzenquotienten approximiert. Durch die Differenzenquotienten entsteht eine Verknüpfung der an den verschiedenen Knotenpunkten diskret abgespeicherten Variablen, wie in (Abb. 3.1) für einen 5-Punktdifferenzenstern skizziert ist. [Schönung 1990, S. 42]

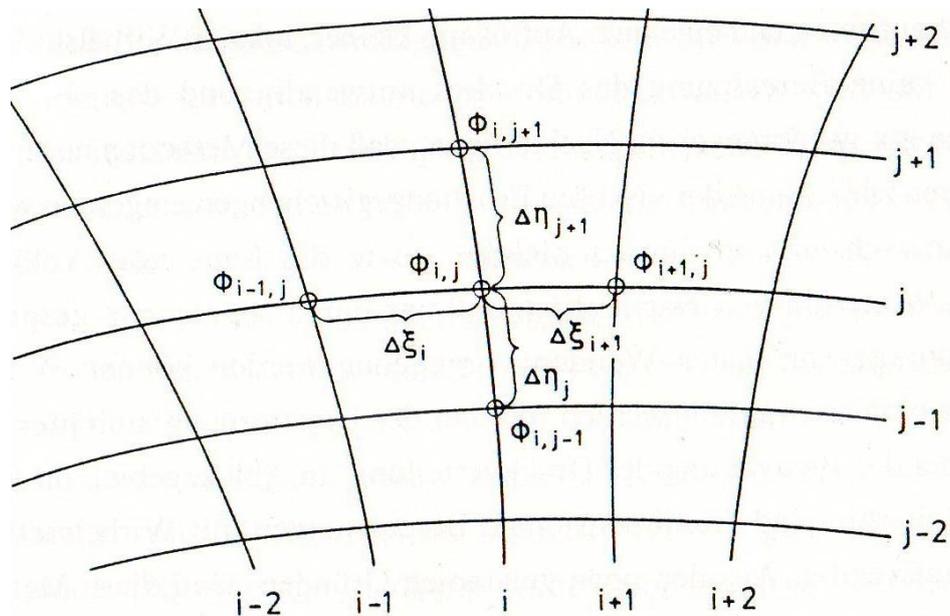


Abb. 3.1: 5-Punkte-Differenzenstern für ein Finite-Differenzen-Verfahren [Schönung 1990, S. 42]

In den Erhaltungsgleichungen treten erste und zweite Ableitungen (bei nicht-orthogonalen Koordinaten auch gemischte Ableitungen) auf, die approximiert werden müssen, wobei die Behandlung der nicht linearen konvektiven Glieder im Allgemeinen am schwierigsten ist. Weiterhin müssen die in den Differentialgleichungen auftretenden Quellterme an den Knotenpunkten berechnet werden. Die entsprechenden Beziehungen werden in die Differentialgleichungen eingesetzt und das führt zu einem System von Differenzgleichungen. Die entsprechenden Matrizen haben häufig Bandstruktur und werden meist iterativ gelöst.

3.3 Finite-Volumen-Verfahren

Bei dem **Finite-Volumen-Verfahren** wird wie bei dem Finite-Differenzen-Verfahren über das Berechnungsgebiet ein numerisches Gitter gelegt. Die Differentialquotienten in den Differentialgleichungen werden jedoch nicht direkt approximiert, sondern die partiellen Differentialgleichungen werden über Kontrollvolumina integriert, die um die Knotenpunkte gelegt werden. Durch diese Integration entstehen Bilanzgleichungen, die eine konservative Diskretisierung gewährleisten, d.h. was aus einem Kontrollvolumen hinausströmt, fließt in das benachbarte Kontrollvolumen hinein. Diese Bilanzgleichungen können anstatt durch die Integration der Differentialgleichungen auch durch eine direkte Bilanzierung der Flüsse an den Kontrollvolumina-Seiten erhalten werden. [Schönung 1990, S. 43]

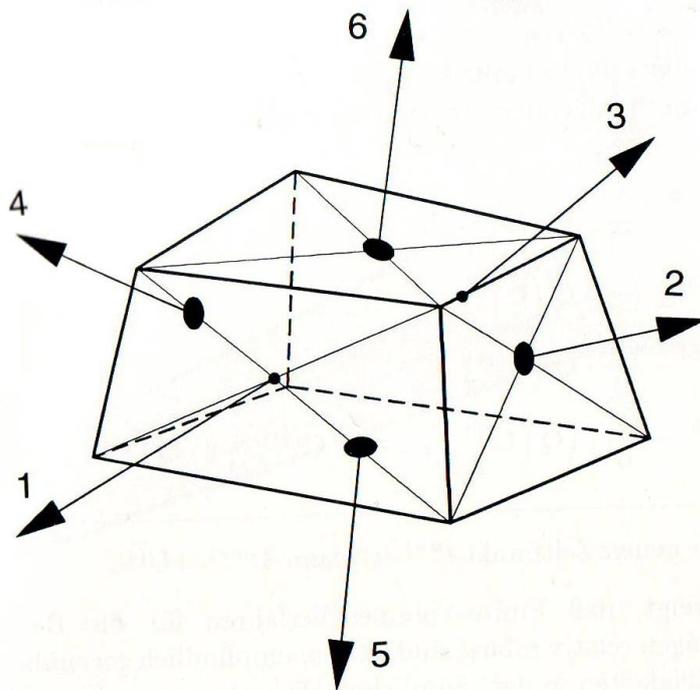


Abb. 3.2: Skizze eines Kontrollvolumens [Oertel 1995, S. 169]

In den integrierten Bilanzgleichungen müssen die Konvektionsflüsse und die Diffusionsflüsse an den Kontrollvolumen-Grenzflächen $x_{i-1/2}$ und $x_{i+1/2}$ approximiert werden. Beziehungen hierfür können analog wie bei den Finite-Differenzen-Verfahren hergeleitet werden, wobei wiederum die Diskretisierung der Konvektionsflüsse am problematischsten ist. Die entsprechenden Beziehungen eingesetzt in die integrierten Differentialgleichungen führen zu Differentialgleichungen, die analog wie bei den Finite-Differenzen-Verfahren gelöst werden. Der Vorteil des Finite-Volumen-Verfahrens gegenüber dem Finite-Differenzen-Verfahren d.h. der Vorteil einer konservativen Diskretisierung, zeigt sich besonders deutlich bei nicht-äquidistanten Gittern und allgemeinen krummlinigen Koordinaten. [Schönung 1990, S. 45]

3.4 Finite-Elemente-Methode

Die Methode, die sich am besten für Anpassung eignet, ist die **Finite - Elemente-Methode**. Sie erfordert jedoch gleichzeitig auch den höchsten Aufwand.

Die Finite-Elemente-Methode wird in Zusammenhang mit der erforderlichen Diskretisierung des Integrationsfeldes mit unstrukturierten Netzen bei komplexeren Strömungsfällen verwendet.

Bei unstrukturierten Netzen kann ohne Rücksicht auf die Netzstruktur, lokalen Erfordernissen entsprechend, eine Netzvereinfachung vorgenommen werden. Im Vergleich zu strukturierten

Netzen in der Ebene, bei der die Knoten und die Elemente durch ein Indexpaar definiert sind, werden die Knoten und Elemente bei unstrukturierten Netzen mehr oder weniger durchnummeriert.

Die zugrunde liegende Differentialgleichung, die die Strömung beschreibt, wird durch sogenannte schwache Integralform ersetzt. Das Gesamtgebiet des untersuchenden Modells wird als Summe von Teilintegrationen über die finiten Elementen dargestellt. [Schönung 1990, S. 46], [Schröder/Zanke 2003, S. 84]

$$\iint_{\Omega} \text{Gewichtsfunktion} * \text{Differentialgleichung} = 0$$

Ω – Berechnungsgebiet

Durch die Multiplikation der Differentialgleichung mit der Gewichtsfunktion wird eine ausreichende Zahl von Gleichungen erstellt, die zur Bestimmung der Unbekannten notwendig sind.

5	10	18	24	29	34	39	44	50	58	63	68	73
4	9	17	23	28	33	38	43	49	57	62	67	72
3	8	16	22	27	32	37	42	48	56	61	66	71
2	7	15	21	26	31	36	41	47	55	60	65	70
1	6	14	20	25	30	35	40	46	54	59	64	69

Abb. 3.3: Finite-Elemente Netz [Schönung 1990, S. 47]

3.5 Vergleich der numerischen Methoden

Es kann nicht ein eindeutiger Vergleich gezogen werden, der eine der Methoden ausschließlich als vor- oder nachteilhaft erscheinen lassen würde, denn die Genauigkeit, die Flexibilität und der Aufwand sollen an die Anforderungen des betrachteten Modells angepasst werden. Die unten stehende Tabelle bietet eine Übersicht über die Vor – und Nachteile der numerischen Methoden unter Berücksichtigung verschiedener Vergleichskriterien.

Vergleichskriterium	FDM*	FVM**	FEM***
Form der Berechnung	Differentialform der PDG	Integralform	schwache Integralform
Abhängigkeit der Ergebnisse von der Berechnungsform	wegen <i>A</i> : + genauer	wegen <i>B</i> : + genauer; wegen <i>C</i> + flexibel;	wegen <i>D</i> + genauer (wenn die Rechenzeiten verglichen werden)
Flexibilität der Anpassung	- gering	+ groß	++ sehr groß
Aufwand: Netz, Rechenzeiten	++ sehr groß	+ groß	- gering
numerische Fehler	- groß (wegen der Anpassungs- Qualität)	+ gering	++ geringfügig
strukturiertes Gitter	möglich	möglich	möglich
unstrukturiertes Gitter	unmöglich	möglich	möglich

A: je höher die Ordnung der Ableitung der unbekanntenen Strömungsgrößen ist, desto genauer ist die Berechnung
B: unbedingte Erhaltung der Masse, Impuls, Energie
C: Bilanzierung der Flüsse unabhängig von der Form des Elementes
D: durch die Methode der gewichteten Residuen wird die Berechnung über das Gesamtgebiet durchgeführt

Tabelle 3.1: Vergleich der numerischen Methoden (eigene Darstellung)
 [ÖWAV 2009, S. 65 - 66], [Oertel 1995, S. 153 - 161]

* Finite-Differenzen-Methode ** Finite-Volumen-Methode *** Finite-Elemente-Methode

Zum Zwecke der vorliegenden Diplomarbeit kann man den in der Tabelle (Abb. 2.1) zusammengefassten Vergleich der Lösungsmethoden bezüglich ihrer Genauigkeit und Flexibilität betrachten.

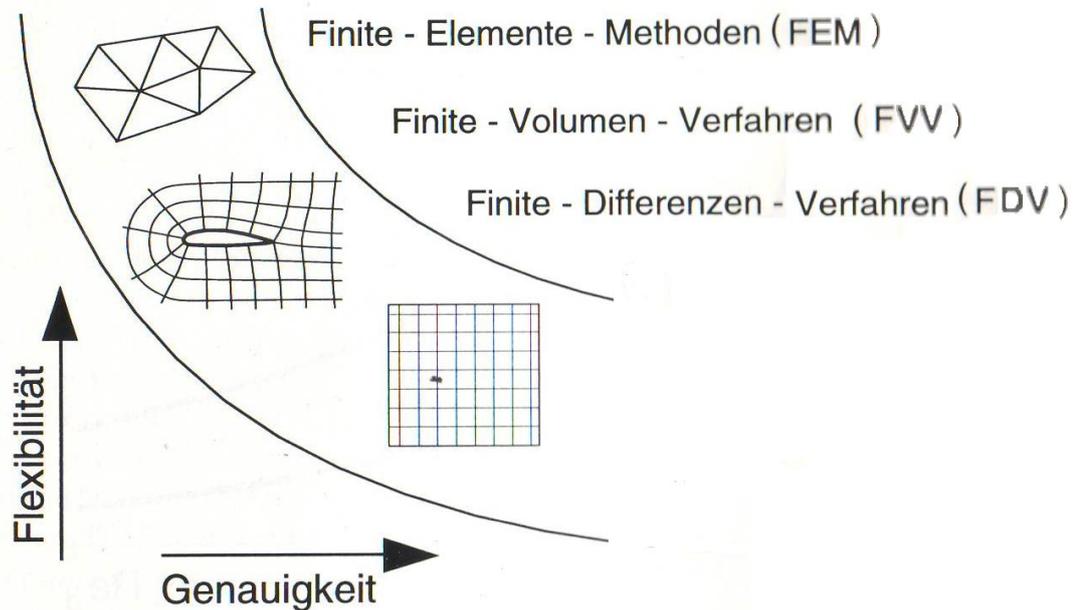


Abb. 3.4: Genauigkeit und Flexibilität numerischer Lösungsmethoden [Oertel 1995, S. 144]

Die Auswahl einer numerischen Methode soll je nach den Anforderungen, die an das Modell gestellt werden, erfolgen. Folgende Schlussfolgerungen bedingen diese Wahl: Das Finite-Differenzen-Verfahren (FDV) diskretisiert das Strömungsfeld in orthogonale Gitter und ersetzt die Differentialquotienten der Grundgleichungen durch die entsprechenden Differentialquotienten. Bei komplizierteren Aufgaben werden Finite-Volumen-Verfahren (FVV) und Finite-Elemente-Methoden (FEM) verwendet. Das Finite-Volumen-Verfahren erfüllt die diskretisierten Erhaltungsgesetze über jedes Volumenelement im Strömungsfeld während bei den Finite-Elemente-Methoden der numerische Fehler mit geeigneten Ansatzfunktionen und der Formulierung eines Variationsproblems in jedem Volumenelement minimiert wird. Das Finite-Elemente-Verfahren besitzt die höchste Flexibilität, da es auf sehr flexiblen unstrukturierten Netzen aufbaut. [Oertel 1995, S. 145]

4 Modellauswahl

Die im vorherigen Kapitel dieser Arbeit behandelten Strömungsgleichungen lassen sich mithilfe numerischer Verfahren veranschaulichen und lösen.

Numerische Modelle zur Strömungssimulation lassen sich grundsätzlich nach zwei Unterscheidungskriterien systematisieren. Je nach der Art und Weise wie sie die räumlichen Dimensionen erfassen, teilen sie sich in eindimensionale (1D), zweidimensionale (2D) und dreidimensionale (3D) Strömungsmodelle auf. Der Strömungsart nach sind sie stationär und instationär.

Die nachfolgende Tabelle gibt Überblick über die konzeptiven, die 1D-, 2D- und 3D- Modelle und führt deren Hauptvor- und Nachteile auf.

4.1. Numerische Modelle im Überblick. Vergleich

Modellbezeichnung	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Abbildung
konzeptive Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • vereinfachte Beschreibung der Strömungsprozesse durch • Teilprozess, der dem Phänomen entspricht • für Hochwassermodellierung und Prognose geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • schnelle und stabile Rechenmethode 	<ul style="list-style-type: none"> • Aussagen über die Wasserstände nicht möglich • Auswirkung von Änderungen im System - schwierig 	Abb. 4.1
1 - D – Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • betrachten Wasserspiegellinie und Durchfluss nur in Hauptfließrichtung • verzweigte Strukturen möglich • basiert auf ST. Venant'schen Gleichungen • Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt konstant • Wasserspiegel: horizontal • Druck stellt sich hydrostatisch ein 	<ul style="list-style-type: none"> • einfach, automatisierbar, kostengünstig • bessere und direktere Abbildung der physikalischen Vorgänge (im Vergleich zu den konzeptiven Modellen) • gute Eignung für eindimensionale Flusstopografien geeignet • Anwendung auf Systeme von Flüssen • schnelle Rechenzeiten (1D:2D ca. 1:100 bis 1:500) • für längere Flusstrecken geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung nur auf im Voraus bekannten Fließwegen • nicht abbildbare Fließphänomene: horizontale und vertikale Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt bzw. Sekundärströmungen in Krümmungen; Neigung der Gewässeroberfläche u.a. • plötzliche Querschnitts – und Rauheitsänderungen 	Abb. 4.2

Modellbezeichnung	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Abbildung
<p>2 - D - Modelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung von natürlichen Gewässerlandschaften durch Transformation der Geometrie – bzw. Geländedaten in punktuelle bzw. diskrete Gitterstruktur • auf stark verzweigte und unbekannte Fließwegen anwendbar • automatische Berechnung der Fließwege (bzw. automatische „Erkennung“ der Geländestruktur) • geeignet für Untersuchung von kurzen Strecken (im Gegensatz zu 1 – D-Modellen) • basiert auf Flachwassergleichungen, d.h tiefengemittelten Reynolds-Gl. (Navier – Stockes – Gl.) • tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienz beim Vorliegen detaillierter Daten • Geschwindigkeitskomponenten in x- und y- Richtung, genaue Wasserspiegellage und Wassertiefe in jedem Punkt des Netzes • Nachbildung der Variation der Strömung über die Flussbreite • gut geeignet für nicht gleichmäßig durchflossene Fließquerschnitte • jede Art von 2D-Netz ist möglich (strukturiert, unstrukturiert, regelmäßig, orthogonal) • berechnet komplexe Aufgaben • umfangreiche Darstellungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • große Rechenzeit (1D:2D ca. 1:100 bis 1:500) • digitales Geländemodell mit hoher Genauigkeit erforderlich • detaillierte Kenntnis über Bewuchs und räumliche Rauheitsverteilung erforderlich • nicht abbildbare Fließphänomene: vertikale Geschwindigkeitsverteilungen • teuer; erfordert hochqualifiziertes Personal 	<p>Abb. 4.3</p>

Modellbezeichnung	Beschreibung	Vorteile	Nachteile	Abbildung
3 - D - Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • derzeit vorrangige Anwendung für die Untersuchung von Detailfragen 	<ul style="list-style-type: none"> • bei Berechnung von dreidimensionalen Prozessen alternativlos 	<ul style="list-style-type: none"> • kein Mehrwert bei Ermittlung von 2-D-Vorgänge trotz längerer Rechenzeiten und größerer Aufwand 	Abb. 4.4

Tabelle 4.1: Numerische Modelle im Überblick (eigene Darstellung) [LUBW 2003, S. 27 - 28], [ÖWAV 2003, S. 23 - 28], [BLU 2011]

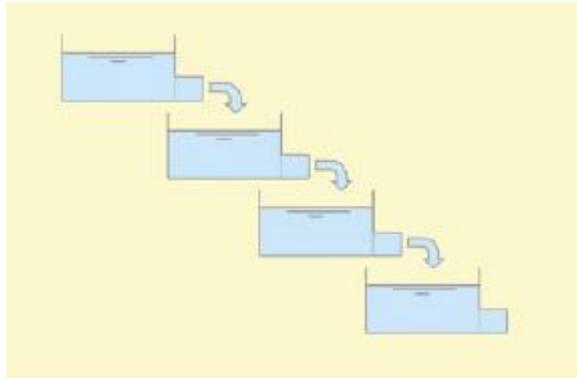


Abb.4.1: Kaskade von Teilabschnitten mit bestimmten Eigenschaften; Darstellung anhand eines konzeptiven Modells

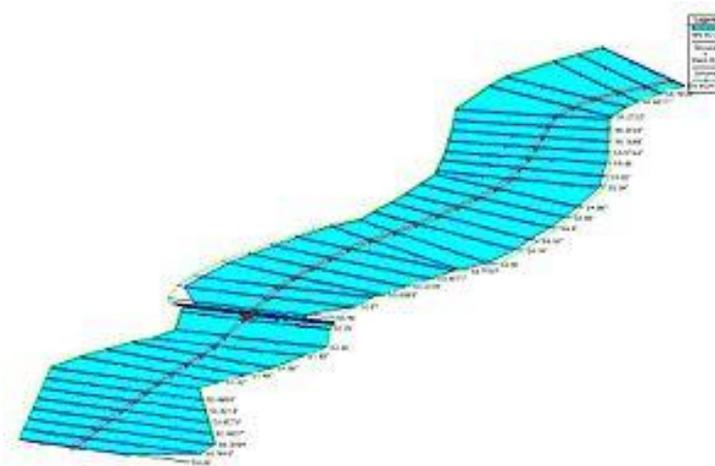


Abb. 4.2: Darstellung eines 1 – D – Modelles (HEC -RAS)

Mesh Module VELOC_mag 0 05:33:20

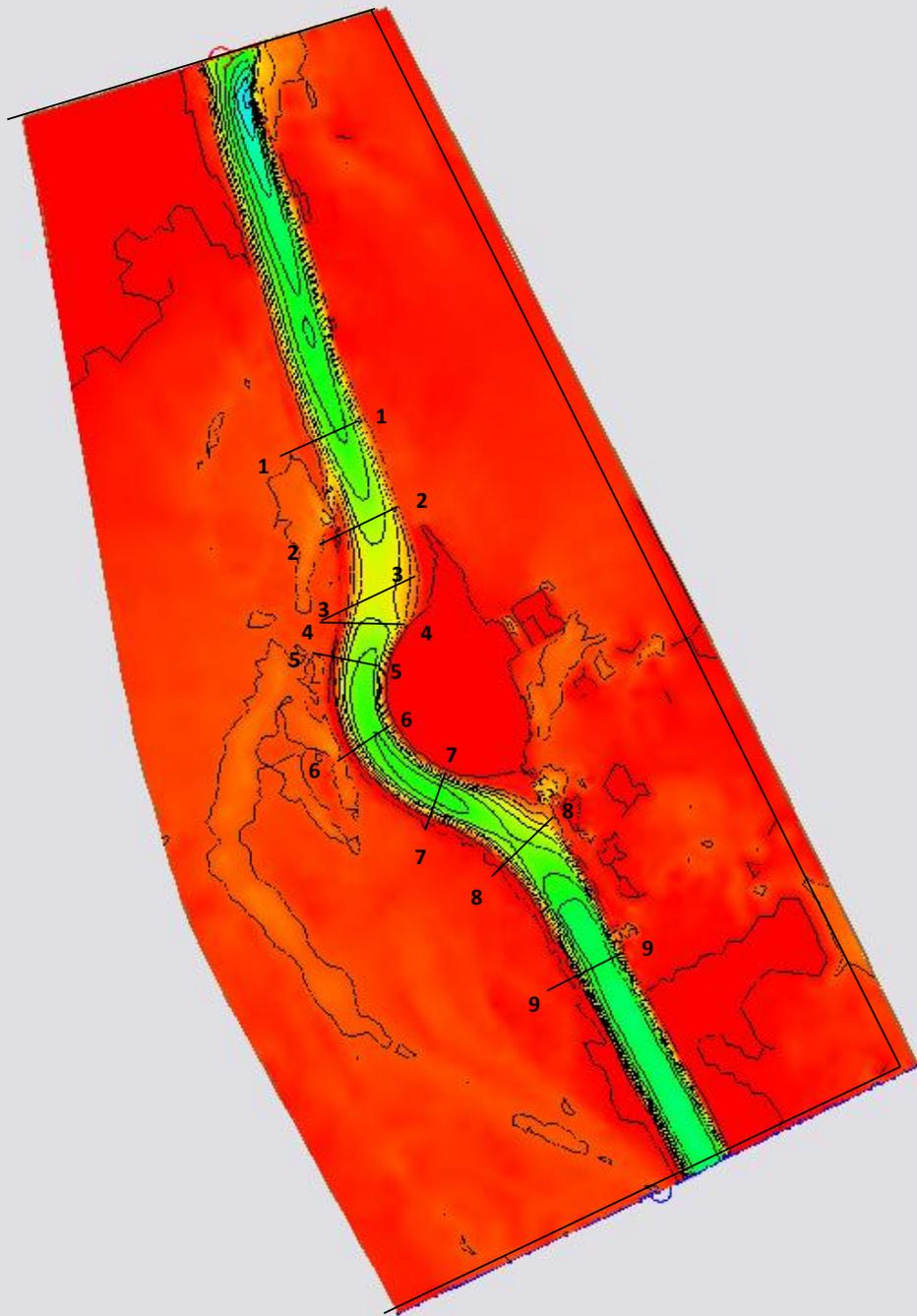
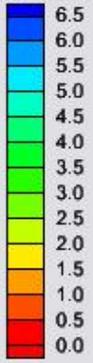


Abbildung B1.2.1

Abb. 4.3: Darstellung eines 2 – D-Modelles (eigene Darstellung in SMS 10.1)

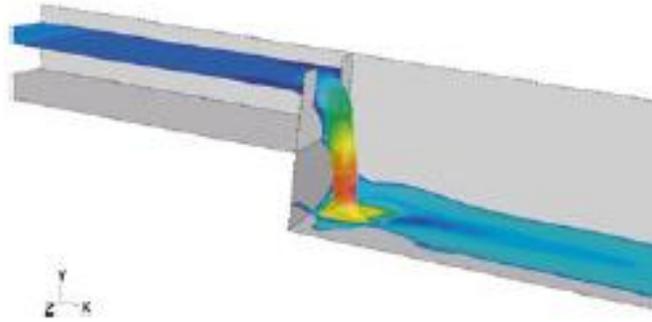


Abb. 4.4: Darstellung eines 3- D-Modells

4.2 Modellauswahl. Entscheidungskriterien und Entscheidungsfindung

Die Entscheidung für einen konkreten Modelltyp bzw. für ein bestimmtes Softwareprogramm wird unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien getroffen.

Die Auswahl eines geeigneten Modells ist durch folgende Kriterien bedingt:

- die Aufgabenstellung
- ob ein stationäres oder instationäres Problem betrachtet wird
- die Größe des Untersuchungsgebietes; sie wirkt sich auf die Rechenzeit, den Datenumfang und die Anforderungen auf
- das Know-how des Bearbeiters
- Rechenzeiten: (konzeptive Modelle: 3 Sekunden; 1-D-Modell: 3 Minuten; 2-D-Modell: 3 Stunden bis 3 Tagen)
- Hardware-Anforderungen (im Zusammenhang mit der Rechenzeit)

Jeder Modelltyp hat seine Vor – und Nachteile je nach den Anforderungen, die an das Modell gestellt werden und je nach seiner Anwendung.

Die Entscheidung darüber, ob ein einfacheres oder komplexeres Modell verwendet werden soll, hängt von den vorliegenden Daten zur Modellerstellung und den Anforderungen an die Ergebnisse ab. Dabei führen die einfacheren Modelle nicht unbedingt zu schlechteren Ergebnissen und die komplexeren Modelle verursachen nicht immer einen größeren Aufwand. Vielmehr gilt es, dass sich die einfacheren Modelle für die Berechnung einfacherer Aufgaben besser eignen. Die komplexeren Modelle dagegen finden Einsatz, wenn komplexere Aufgaben mit mehreren Komponenten (Ausgangsdaten und Ergebnisse) berechnet werden sollen.

Handelt es sich jedoch um die Modellierung des gleichen Strömungsprozesses mit den Methoden entweder eines einfacheren oder eines komplexeren Modells, sind dann die Rechenzeiten, die Effizienz, die Datennachführung und die verfügbaren Ressourcen für die Entscheidungsfindung von wesentlicher Bedeutung.

Insgesamt ist wichtig, dass sich die Auswahl eines bestimmten Modelltyps nicht so nach den räumlichen Dimensionen des Modells richtet, sondern vielmehr davon abhängig ist, ob im konkreten Fall Mehrdimensionalität der Ergebnisse erforderlich ist. [ÖWAV 2003, S. 30-32]

4.3 Numerische 2-D-Modelle

Der wesentliche Vorteil der 2-D-Modelle ist, dass sie die Fließwege automatisch aufgrund der Geländestruktur berechnen.

Bei den 2-D-Modellen wird durch die Flachwassergleichungen berechnet, d. h. mit tiefengemittelten Reynoldsgleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen mit Turbulenzansatz).

Nach ÖWAV-Arbeitsausschuss (s. ÖWAV 2003) gründen sie auf folgenden Annahmen:

- Vertikale Skalen (etwa Fließtiefe) sind viel kleiner als horizontale Skalen (z. B. Ausdehnung des betrachteten Diskretisierungsgebiets)
- Mittelung der Strömungsgeschwindigkeiten über die Fließtiefe ist zulässig
- Druck stellt sich hydrostatisch ein

Die notwendigen Daten für die Erstellung eines 2D-Modells werden im Nachfolgenden aufgeführt. Die Auflistung richtet sich nach den Angaben aus dem Bericht des Arbeitsausschusses „Fließgewässermodellierung“ am Österreichischen Wasser – und Abfallwirtschaftsverband. [ÖWAV 2003, S. 27 - 28]

- Digitales Geländemodell in hoher Genauigkeit inklusive Abbildung der Gewässersohle (mit geeigneter Software lassen sich im Bedarfsfall Querprofilaten mit DGM-Punktdaten zusammenführen)
- Strukturkanten als Polygonzüge (z. B. Dammkronen, Verkehrswege)
- Abmessungen und hydraulische Parameter von Flussbauwerken
- Detaillierte Kenntnis über Bewuchs und räumliche Rauheitsverteilungen (z. B. Strickler-Beiwert) im Strömungsquerschnitt (Sohle und Böschung) sowie in den Vorländern
- örtliche Lage der Zuflussränder sowie die dort vorliegende Zuflussganglinie

- örtliche Lage des Abflussrands und dortige Wasserstandsganglinie oder Energieliniengefälle
- Bei Anwendung eines Turbulenzmodells höherer Ordnung sind außerdem Messwerte (oder allenfalls begründete Annahmen) für die turbulente kinetische Energie E_k an den Modellrändern zum Ansatz zu bringen.

Mit 2D-Modellen lassen sich jedoch mehrere Prozesse nicht abbilden. Im Nachfolgenden seien die wichtigsten davon aufgezählt:

- vertikale Geschwindigkeitsverteilung
- Neigung der Wasseroberfläche aufgrund der durch Zentrifugalkräfte in Krümmungen des Gerinneverlaufs hervorgerufenen Sekundärströmung
- stehende Wellen
- vertikale Turbulenzwirbelstrukturen [ÖWAV 2003, S. 27 - 28]

5 Notwendige Grundlagen und Vorgehensweise

5.1 Notwendige Datengrundlage

5.1.1 Hydrologische Daten

Erwiesenermaßen spielt die Exaktheit der Eingangsdaten bei Fließgewässermodellierung eine wichtige Rolle. Damit man eine erfolgreiche Untersuchung durchführen kann, wird bei der Abflussmodellierung eine Vielzahl an Eingangsdaten benötigt. Die wichtigsten darunter sind die hydrologischen Eingangsdaten. Generell sollen alle Zuflüsse eines Modells bekannt sein. In der Regel wird der Wert der stationären Zuflüsse als konstant eingegeben. Jedoch sollen in einigen Softwareprogrammen z.B. in Hydro-As-2D neben den instationären auch die stationären Zuflüsse als Ganglinien eingegeben werden, die die Abhängigkeit zwischen Durchfluss und Zeit darstellen. Eine erste Kalibrierung bzw. Verifizierung des Modells kann durch die hydrologischen Daten erfolgen. Eine Kalibrierung mit den Daten eines Hochwasserereignisses liefert ein klares Bild über Modellabweichungen, falls solche vorkommen und ermöglicht es, Schlussfolgerungen für die Parameterauswahl bei weiteren Ereignissen zu treffen.

5.1.2 Vermessungsdaten

Für die Modellerstellung sind auch die Vermessungsdaten von wesentlicher Bedeutung. Je genauer und vollständiger die verfügbaren Vermessungsdaten sind, desto genauer und richtiger den Genauigkeitsanforderungen nach sind die Ergebnisse des Modellversuchs.

Solche Daten kann man durch terrestrische, fotogrammetrische und Laserscan-Vermessungen erheben. Im Vergleich zu den Laserscan und fotogrammetrischen, liefern die terrestrischen Vermessungen exaktere Ergebnisse bezüglich Höhen- und Lagegenauigkeit. Bei den 2-D-Modellen ist die Flussschlauchvermessung erforderlich, weil die Querprofile, die Böschungunterkante und die Uferborde einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Die Daten über Vorländer und Bereiche mit Bewuchs haben auch eine Beziehung zu der Modellerstellung und sie können durch Laserscan und Fotogrammetrie erhoben werden.

[ÖWAV 2003, S. 37 - 39]

5.1.3 Oberflächenrauheit

Ein wichtiger Parameter für die Berechnungen mit 2D-Hydrauliksoftware ist der Rauheitsbeiwert n nach Manning bzw. k , [$m^{1/3}/s$] nach Strickler ($k_s = 1/n$). Die Veränderungen des Rauheitsbeiwerts im Modell stehen mit der Veränderung des Wasserniveaus in Zusammenhang. Der Rauheitsbeiwert variiert je nach der Wassertiefe: in Richtung geringere Rauigkeit bei Abnahme des Einflusses der Sohlrauigkeit als auch in Richtung höhere Rauigkeit, z. B. beim Erreichen der dichteren Kronen eines Bewuchses. Das ist vorwiegend in Bezug auf steile Böschungen wichtig. Bei der Modellerstellung sollen diese Besonderheit und die saisonalen Schwankungen durch die Vegetation beachtet werden. Derart kann der Modellbetreiber einschätzen, ob er das Modell durch Bereiche mit unterschiedlichen Rauheitsbeiwerten erstellen oder einen für das ganze Modell einheitlich gemittelten Wert wählen soll.

5.1.4 Sonstige Basis-Informationen

Neben den hydrologischen Daten, Vermessungs - und der Oberflächenrauheitsdaten sollen auch sonstige Basis-Informationen berücksichtigt werden.

Wenn das Ziel der Untersuchung es erfordert, muss man die Sedimenttransportdaten einbringen. Falls im Modell auch Bauwerke wie Durchlässe, Brücken oder Wehre vorhanden sind, sollen auch diese Objekte in Betracht gezogen werden.

Bei der Abflussberechnung kann man auch Dokumentationen wie z.B. die Begehungen, Fotodokumentationen (digital, georeferenziert), die Luftbilder, Orthofotos (auch Schrägaufnahmen, möglichst farbig), Befragungen, Hochwasserdokumentation (Archive, Fotos, Videos) als Basis-Information verwenden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Qualität der Ergebnisse einer Abflussmodellierung umso höher ist, wie besser die Datenqualität ist. Und umgekehrt: bei Daten minderer Qualität wird die Berechnung keine guten Ergebnisse liefern. Man kann sogar sagen, dass die Rechenungenauigkeit der Modelle im Vergleich zu Fehlern in den Eingangsdaten vernachlässigbar ist.

5.2 Kalibrierung

Nummerische Modelle sind keine “Black-Box Systeme”. Es reicht nicht aus, dass man die Eingangsdaten eingibt und dann die Ergebnisse betrachtet. Vielmehr muss der Modellbetreiber stetige Kontrolle auf das Modell üben. Die Kalibrierung, die Sensitivitätsanalyse und die Validierung stellen Untersuchungen dar, genauso wichtige Rolle wie die Modellbildung spielen. Mit deren Hilfe lässt sich überprüfen und nachweisen, dass das Modell die Strömungsprozesse, für die es erstellt wurde, richtig wiedergibt und dem Naturmodell passt.

Die Kalibrierung des Rechenmodells untersucht die Abstimmung seiner Ergebnisse mit den vorhandenen Daten. Durch die Modellkalibrierung kann man Fehler in den Eingangsdaten finden und die Modellparameter, die beim Modellaufbau nur schätzungsweise angenommen wurden - wie z. B. Rauigkeit - überprüfen.

Grundsätzlich gibt es zwei Wege, eine Kalibrierung durchzuführen:

- durch Anpassung des Modells auf der Basis von Versuch und Irrtum: die Modell- und fallspezifische Parameter werden solange verändert, bis eine genügend kleine Differenz zwischen Messdaten und Modellergebnis erreicht wird. Hierfür kann die Sensitivitätsanalyse angewendet werden, denn sie zeigt den Schritt und die Richtung der verschiedenen Versuche
- durch inverse Modellierung: das ist eine automatische Kalibrierung d.h. das Modell passt die Parameter automatisch an

Die möglichen Ergebnisse einer Modellkalibrierung können wie in dem nachstehenden Schema (Abb. 5.1) systematisiert werden:

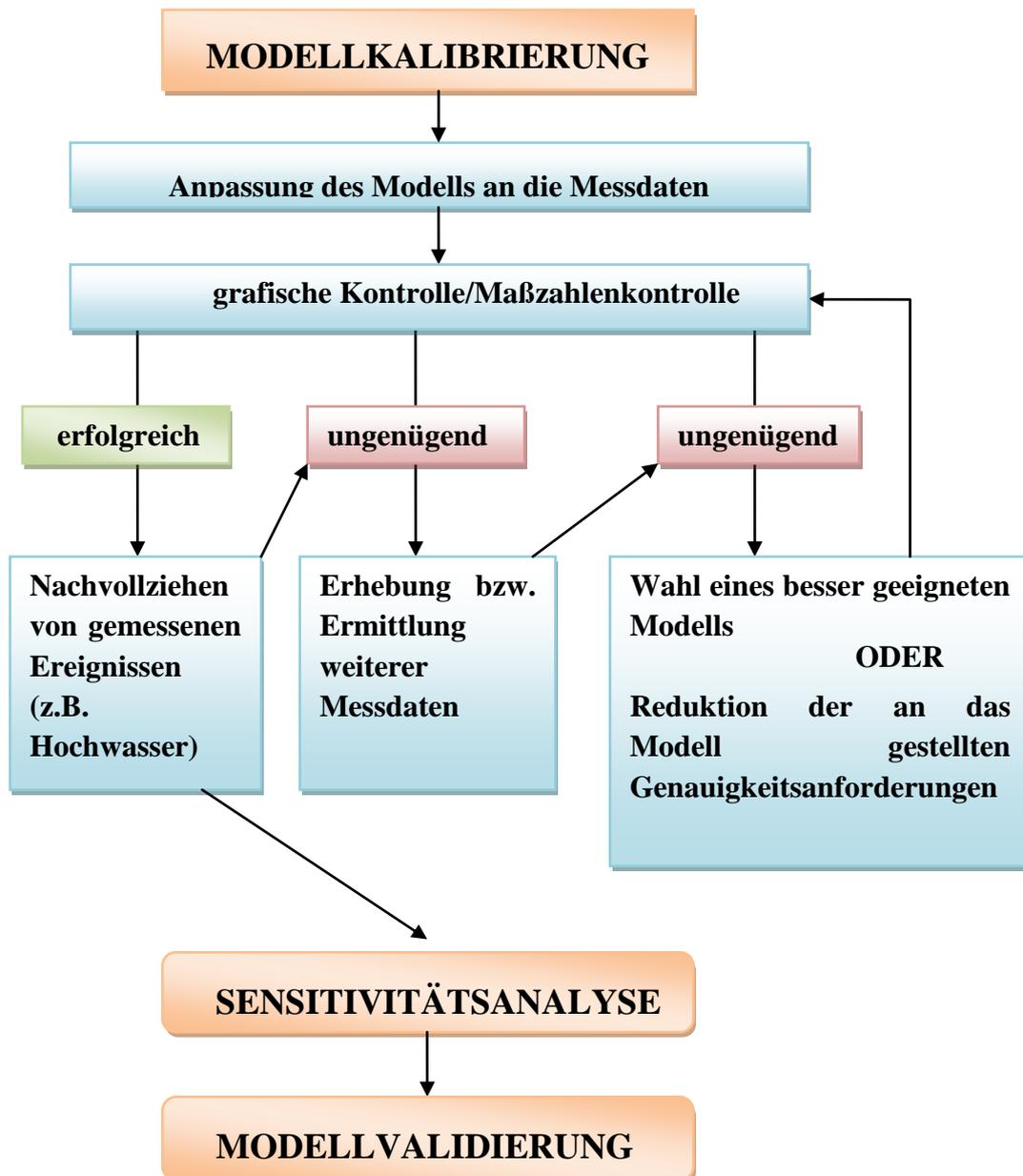


Abb. 5.1: Modellkalibrierung (eigene Darstellung nach Daten aus [ÖWAV 2003, S. 47])

5.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse gibt Auskunft darüber, wie sich die Ergebnisse des Modells bei Veränderung der Eingabegrößen verändern und worauf das Modell empfindlich (mit großen Veränderungen) reagiert.

Im nachfolgenden Schema (Abb. 5.2, eigene Darstellung) werden zusammenfassend die Charakteristika der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Des Weiteren gibt die Tabelle auch Aufschluss darüber, wozu die Sensitivitätsanalyse dient und was für Schlussfolgerungen über das Verhalten des Modells durch sie gezogen werden können.

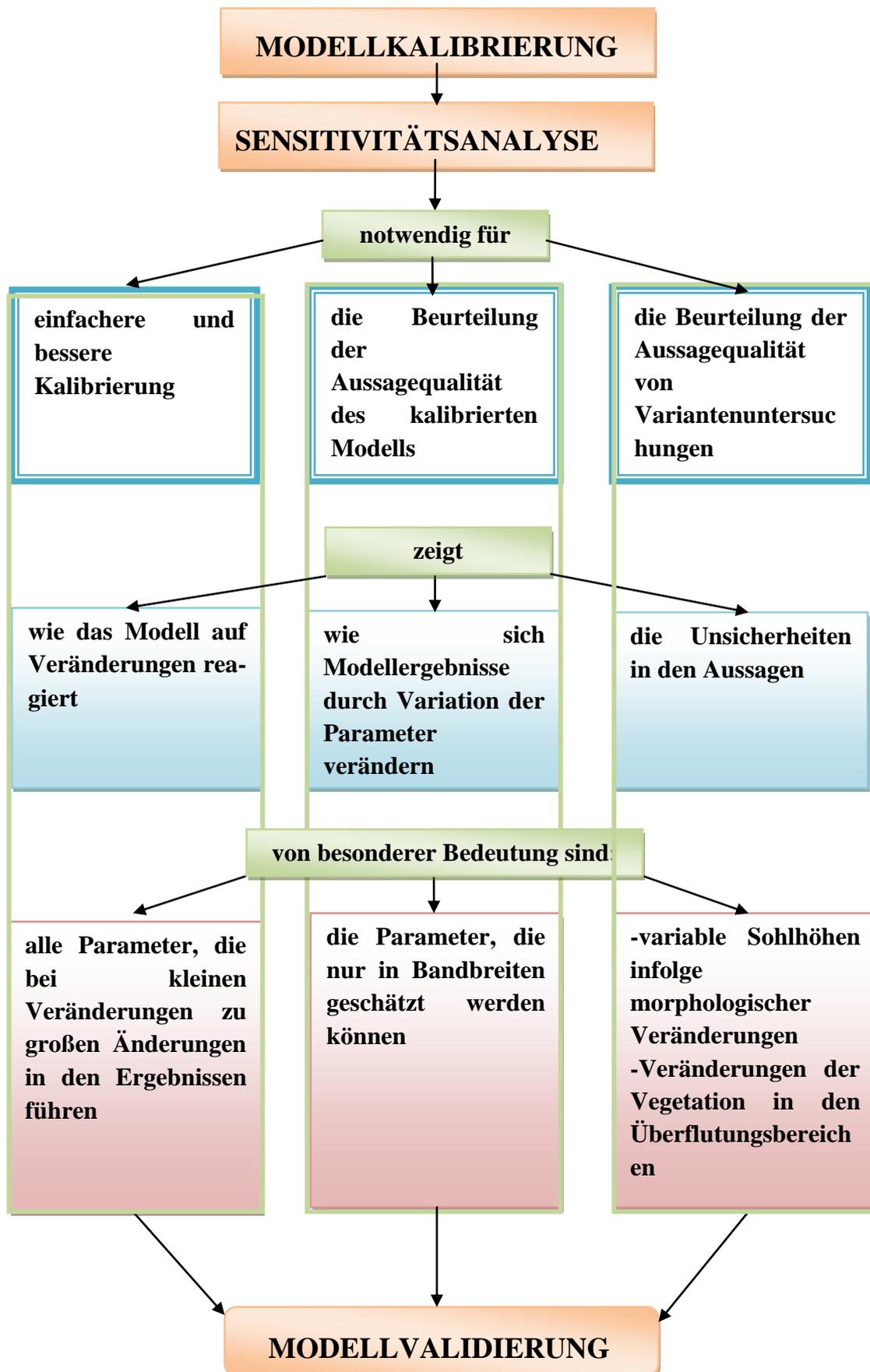


Abb. 5.2 Sensitivitätsanalyse (eigene Darstellung nach Daten aus [ÖWAV 2003, S. 56])

5.4 Validierung

Durch Validierung wird das Modell für gültig erklärt und somit wird es klar, dass das Modell nicht nur auf die kalibrierten Fälle anwendbar ist. Der Prozess der Validierung wird in Abb. 5.3, eigene Darstellung schematisch dargestellt.

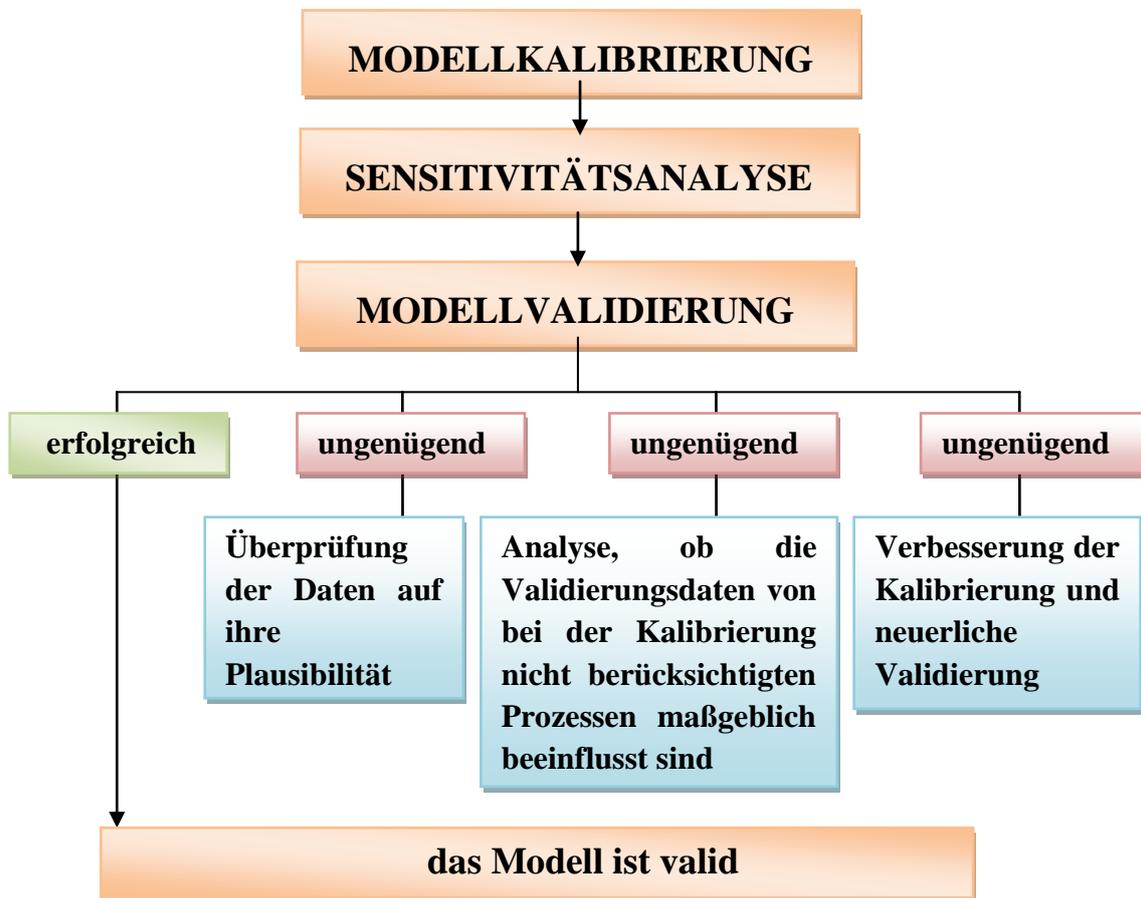


Abb. 5.3: Modellvalidierung (eigene Darstellung nach Daten aus [ÖWAV 2003, S. 57-58])

Im Fallbeispiel 3 dieser Masterarbeit werden die Ergebnisse, die durch das ausgewählte Softwareprogramm geliefert werden, durch Vergleich mit externen Daten validiert.

5.5 Visualisierung

Die Visualisierung soll die Verbindung zwischen den Daten und dem Benutzer ermöglichen. Sie unterstützt den Benutzer in der Analyse, Erforschung und Präsentation seiner Daten. Es gibt eine Vielzahl von Darstellungsmöglichkeiten:

- Tabellen
- Diagramme
- Darstellung in axometrischer Sicht
- Gitternetze
- Lagepläne

Für die Visualisierung der Ergebnisse aus den erarbeiteten Fallbeispielen (s. Anhang) werden Diagramme, Gitternetze und Lagepläne als Visualisierungsmöglichkeiten verwendet.

6 Softwareprodukte: SMS, FESWMS, Hydro-As-2D und SRH-2D

6.1 Überblick über die Softwareprodukte

SMS - Surface Modeling System

Die Softwareprodukte **Hydro-As-2D**, **FESWMS** und **SRH-2D** funktionieren auf dem Interface des Programmes Surface Modeling System (SMS). **SMS** stellt die Benutzeroberfläche dar und ist das Hauptprogramm, mit dem die Eingabedaten für die Programme, die sich mit numerischer Berechnung hydraulischer Strömungen beschäftigen, vorbereitet und auch die Ergebnisse dieser Berechnungen visualisiert werden. Folgende Funktionen können in SMS ausgeführt werden:

- Netzgenerierung
 - In SMS können aus vorgegebenen Geländepunkten Berechnungsnetze generiert werden.
 - In SMS können Landkarten, Geländefotos, dxf-Dateien etc. importiert werden. Sie sind eine der Voraussetzungen für Netzgenerierung.
- Umgang mit unterschiedlichen Datenarten
 - Es besteht in SMS die Möglichkeit, dass die Ergebnisdaten weiterverarbeitet werden. Die Skalargrößen sind miteinander durch mathematische Funktionen kombinierbar und können zu einem späteren Zeitpunkt als eigenständige Ergebnisse abgespeichert werden.
 - Die in den *.dxf - Dateien enthaltenen räumlichen Informationen ermöglichen es, die Ergebnisse dreidimensional weiterzuverarbeiten.
- Vielfalt an Datenvisualisierungsmöglichkeiten
 - SMS bietet viele Möglichkeiten zur Datenvisualisierung an. Hier seien einige davon aufgeführt.
 - Das sind zum einen die Isolinien, über die sich alle skalaren Daten veranschaulichen lassen. Dabei kann man das Intervall, den Wertebereich und das Linienformat frei bestimmen. Da die Isolinien u.a. auch als *.dxf – Datei speicherbar sind, können an ihnen auch durch andere Programme weitere Verarbeitungen vorgenommen werden.

Da jedoch nur ein Datensatz aktiv angezeigt werden kann, sollen auch zusätzliche Datensätze als *.dxf - Datei im Hintergrund eingeblendet werden, wenn man mehrere Daten gleichzeitig visualisieren möchte.

- Zum anderen gibt es in SMS auch die farblichen Bereichsdefinitionen als Datenvisualisierungsmöglichkeit. An sich sind sie eine Erweiterung der Isoliniendarstellung. Hier kann man die Farben und den anzuzeigenden Wertebereich frei wählen.
- Weiterhin können die Daten in SMS auch durch Vektorpfeile dargestellt werden: Vektordarstellung. Grundsätzlich heißt das, dass die Daten, wenn sie als Vektordatensatz zur Verfügung stehen, mit Vektorpfeilen in jedem Knotenpunkt oder auf einem fixen Raster angezeigt werden können.

[Haberl 2006]

- Das Programm unterstützt zwei verschiedene Netztypen: quadratische und lineare Netze. Abbildung 6.1 liefert jeweils ein Beispiel für ein dreieckiges lineares Element (a), ein lineares 4-Knoten-Element (b) und ein quadratisches 9-Knoten-Element (c).

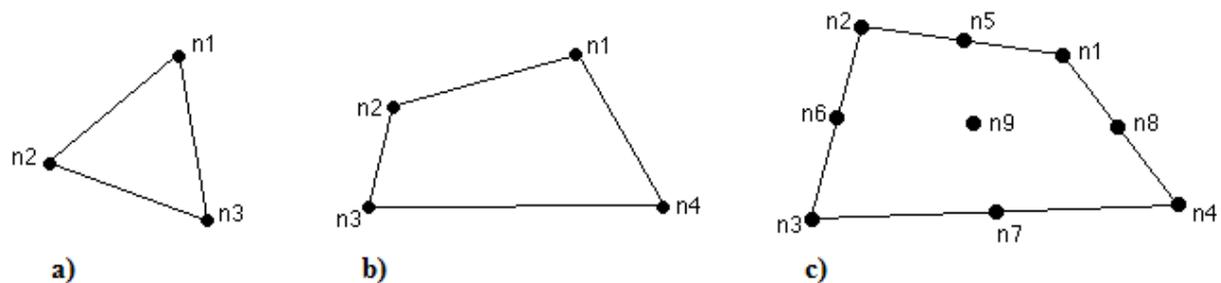


Abb. 6.1: Beispiel für ein dreieckiges lineares Element (a); ein lineares 4-Knoten-Element (b) und ein quadratisches 9-Knoten-Element (c) [Kaliakin 2005]

Hydro_As-2D

Neben SMS wird in der vorliegenden Masterarbeit auch das Softwareprodukt **Hydro_As-2D** angewendet. In Hydro_As-2D können ausschließlich 2D – Gewässermodelle erarbeitet werden, daher kommt das Programm zum Einsatz, wenn 1D-Modelle dem Untersuchungszweck nicht mehr entsprechen können.

Hydro_As-2D funktioniert auf der Benutzeroberfläche von SMS und basiert auf der numerischen Lösung der zweidimensionalen tiefengemittelten Strömungsgleichungen mit der Finite-Volumen-Diskretisierung. [Hydrotec, 2012]

Das Programm zeichnet sich durch Robustheit, hohe Stabilität und Genauigkeit für ein breites Spektrum von Fließverhältnissen auf stark variierender Geländeform aus. Desweiteren können in HYDRO_AS-2D der Prozess der Flutwellenausbreitung auf komplexem Gelände realitätsgetreu simuliert sowie Durchflussaufteilung, Geschwindigkeits- und Schubspannungsverteilung ermittelt werden. [Hydrotec 2012]

FESWMS

FESWMS (Abkürzung von „Finite-element surface-water modeling system for two-dimensional flow in the horizontal plane“) ist ein modulares System von Computerprogrammen, das zweidimensionale tiefenintegrierte Oberflächengewässer simuliert. FESWMS besteht aus einem Eingangsdatenvorbereitungsprogramm (DINMOD (1)), einem Durchflussmodell (FLOMOD (1)), einem Output-Analyse-Programm (ANOMOD (1)) und einem Programm zur Konvertierung von Graphiken (HPLOT (1)). Das Programm wurde ursprünglich entwickelt, um Wasserströme unter komplizierten hydraulischen Bedingungen zu analysieren. Es kann jedoch auch bei der Analyse vieler Arten von stationären und instationären Strömungen angewendet werden. Beispiel für Oberflächengewässer, in denen das Wasser zweidimensional in der horizontalen Ebene fließt, sind seichte Flüsse, Flussmündungen und Küstengewässer. [USGS 2012]

SRH-2D

SRH-2D (Abkürzung von „Sedimentation and River Hydraulics – Watershed“) ist ein zweidimensionales (2D) hydraulisches Modell für Flüsse und Wasserscheiden.

Durch SRH-2D können Simulationen von Wasserfluss und Abfluss durchgeführt werden, deswegen stellen Flusssimulation und Wasserscheideabflusssimulation auch die wichtigsten Einsatzgebiete des Programms dar. [Young 2008, S. 3 - 4]

6.2. Vergleich und Anwendung von FESWMS, Hydro_As-2D und SRH-2D

Programm Charakteristik	FESWMS Finite Element Surface Water Modeling System	Hydro_As-2D	SRH-2D Sedimentation and river hydraulics - 2 dimension
geeignet für Simulation von:	<ul style="list-style-type: none"> • Druckströmung unter Brückendecken • Strömungswiderstand von Brücken-Pfeilern • Durchfluss über Fahrbahnböschungen • Strömung durch Durchlässe mit oder ohne Klappe • Sedimenttransport • Erosion und Ablagerung von transportierten Sedimenten • Strömung in einem oder mehreren Gewässerabschnitten einschließlich Hauptkanal und Seitenkanäle 	<ul style="list-style-type: none"> • Flut- und Dambruchwellenausbreitung • Strömungs- und Abflusssimulationen bei Hoch- und Niedrigwasser • Berechnung des Sediment - und des Schadstofftransportes • Simulation von „normalen“ Abflussverhältnissen in natürlichen Fließgewässern • Wirbelbildungen • Impulsaustausch zwischen dem Flussschlauch und dem Vorland • Wechselsprünge, Sohlsprünge, 	<ul style="list-style-type: none"> • Strömung in einem oder mehreren Gewässerabschnitten einschließlich Hauptkanal und Seitenkanäle • Strömung in Stauseen • Flussüberschwemmung • Strömung bei umgeströmten Strukturen: z. B Wehre, Ablenkdamme, Kofferdämme etc. • Strömungen am Überfall von Ufer und Deichen • Strömung über Flächen mit Vegetation und Interaktion mit dem Hauptkanal

Programm Charakteristik	FESWMS Finite Element Surface Water Modeling System	Hydro_As-2D	SRH-2D Sedimentation and river hydraulics - 2 dimension
geeignet für Simulation von:	<ul style="list-style-type: none"> • Strömung bei umgeströmten Strukturen: z. B Wehre, Ablenkdamme, Kofferdämme etc. • Simulation von Abflussverhältnissen in natürlichen Fließgewässern 	<ul style="list-style-type: none"> örtliche Verluste • Querschnittseinengungen und – Ausweitungen • Strömung unter Druckabfluss und Gerinnen mit hohem Sohlgefälle 	
Berechnung von:	<ul style="list-style-type: none"> • Wasseroberflächenhöhen • Überschwemmungsgrenzen • Wassertiefe • tiefengemittelte Geschwindigkeit • Stromüberschwemmung • Froude-Zahl • Sohlenschubspannung 	<ul style="list-style-type: none"> • Überschwemmungsgrenzen • Überflutungsdauer • tiefengemittelte Geschwindigkeit • Wassertiefen • Abflussaufteilung im Flussschlauch und in den Vorländern • Retentionswirkung • Sohlenschubspannungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasseroberflächenhöhen • Wassertiefe • tiefengemittelte Geschwindigkeit • Stromüberschwemmung • Froude-Zahl • Sohlenschubspannung

Programm	FESWMS Finite Element Surface Water Modeling System	Hydro_As-2D	SRH-2D Sedimentation and river hydraulics - 2 dimension
Charakteristik			
Berechnung von:	<ul style="list-style-type: none"> • Retentionswirkung • Geschiebetransport 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwebstoffablagerung • Geschiebetransport 	
Hydraulische Formeln <ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenrauheit über: • Bewegungsbeschreibung durch: • Reibungsansätze durch: 	<ul style="list-style-type: none"> • Manning Koeffizient /Chesy Koeffizient • Naviersche und 2D-tiefengemittelten Gleichungen • Manning Reibungsgleichung/Chesy - Formel 	<ul style="list-style-type: none"> • Strickler-Beiwert • Naviersche und 2D-tiefengemittelten Gleichungen • Darcy-Weisbach-Formel 	<ul style="list-style-type: none"> • Manning Koeffizient • Naviersche und 2D-tiefengemittelten Gleichungen • Manning-Reibungsgleichung
numerische Methode	FEM	FVM	FVM
Netzsystem	unstrukturiertes Hybridnetz ^A	unstrukturiertes Hybridnetz ^A	Unstrukturiertes Hybridnetz ^A
Elementtyp	quadratisch	linear	linear

Programm Charakteristik	FESWMS Finite Element Surface Water Modeling System	Hydro_As-2D	SRH-2D Sedimentation and river hydraulics - 2 dimension
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Steering mode (Iterationsmethode zur Ergebniserzielung durch Annäherung der Eingabeparametern) • benutzerfreundliches Interface • Warnmeldungen über falsche oder fehlende Eingabedaten/Funktionen vor dem Start der Berechnung • vielfältige Visualisierungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung der Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Wasseroberfläche für jeden Knoten im Berechnungsnetz, zu jedem über das Zeitintervall bestimmten Zeitpunkt • unkomplizierte Anwendung, da nur wenig Eingabedaten erforderlich • Warnmeldungen über falsche oder fehlende Eingabedaten/Funktionen vor dem Start der Berechnung 	<ul style="list-style-type: none"> • das Programmsoftware läuft auch auf leistungsschwachen Rechnern • leichte Anwendung, da das Software den Anwender bei Eingabe der Daten navigiert • bester Kompromiss zwischen Berechnungsgenauigkeit und Rechenaufwand • benutzerfreundlich^B • Möglichkeit zur Iteration • gute Kontrolle über den Berechnungsprozess in den *.dat-Dateien

Programm Charakteristik	FESWMS Finite Element Surface Water Modeling System	Hydro_As-2D	SRH-2D Sedimentation and river hydraulics - 2 dimension
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • großer Rechenaufwand • Fehlermeldungen bzw. keine Ergebnislieferung ohne sichtbaren Grund • Probleme in den Fällen, wo das Element am Anfang trocken ist und später beflutet wird • Möglichkeit zur Eingabe vieler Parametern, was den Anwender verwirrt • kein Überblick über den Berechnungsprozess in den *.dat-Dateien 	<ul style="list-style-type: none"> • das Programmsoftware läuft nur auf leistungsstarken Rechnern • erfordert Eingabedaten, die sich von denen der anderen Programme unterscheiden (z. B Energieneigung statt Wasserspiegel) folglich schwer vergleichbar mit den anderen Softwareprodukten • benutzerunfreundlich, da die Übertragung der Ergebnisse von Pre-zum Postprozessor sehr aufwendig ist • begrenzte Möglichkeit zur Eingabe von Parametern • kein Überblick über den Berechnungsprozess in den *.dat-Dateien 	<ul style="list-style-type: none"> • keine eigene Pre- (mesh generation) und Postprozessor (Visualisierung) • keine Visualisierung durch SMS, nur durch Tabellen möglich • alle berechneten Werte werden nicht interpoliert für die Punkte, die von dem Anwender gesucht werden, sondern sie stehen in dem Gewichtszentrum des Elements • Fehlermeldung ohne Angabe darüber, worin der Fehler besteht

Programm Charakteristik	FESWMS Finite Element Surface Water Modeling System	Hydro_As-2D	SRH-2D Sedimentation and river hydraulics - 2 dimension
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • unterschiedliche Untermodule für Berechnung unterschiedlicher Probleme z.B. Steering mode, FST2DH • Steering mode- (Iterationsmethode zur Ergebniserzielung durch Annäherung der Eingabeparametern) • Möglichkeit für Eingabe einer großen Menge Modellparameter, z. B: Sohlenschubspannung und –reibung, Windschubspannung, Corioliskraft, turbulenzinduzierte Schubspannungen, Windfelder und Luftdruck Felder 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeit, die Berechnung von einem bekannten Zustand des Untersuchungsgebietes zu starten 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 Untermodule für Arbeit mit SRH-2D: partial-Interface^C und full-Interface^D

Tabelle 6.1: Vergleich und Anwendung von FESWMS, Hydro_As-2D und SRH-2D. Eigene Darstellung nach [Haberl 2006], [Young 2008], [USGS 2012], [Hydrotec 2012]

^A–**Unstrukturierte Hybridnetze** sind unstrukturierte Quadratnetze, reine Dreiecksnetze oder eine Kombination der beiden Netztypen. In den meisten Anwendungen stellt eine Kombination von Viereck- und Dreiecksnetzen die beste Lösung in Bezug auf Effizienz und Genauigkeit dar. Diese unstrukturierte hybride Netz-Strategie ist flexibel und das erleichtert die Umsetzung des zonalen Modellierungskonzepts.

^B–**SRH-2D** wurde entwickelt, um zuverlässige Lösungen mit angemessenen Rechenzeiten auf einem Personalrechner zu bieten. Erweiterte Lösungsalgorithmen wurden so entwickelt, dass SRH-2D Lösungen mit nur wenig Parameterwechsel erreichen kann. SRH-2D wurde auch mit dem Ziel entwickelt, dass ein 2D-Modell nicht zu komplex bedient werden soll. Mit SRH-2D muss der Benutzer nicht viele Befehle auswendig kennen, er wird von einem Präprozessor durch eine interaktive Benutzeroberfläche geführt. Die meisten Benutzereingabefehler können automatisch während des Preprocessing erkannt werden, dadurch kann man Fehler vor der Durchführung einer endgültigen Analyse vermeiden.

^C–Unter „**partial - Interface**“ sind anfangs nur das Netz und die „Nodestrings“ angegeben. Danach navigiert der Präprozessor den Anwender, welche Befehle er auszuführen soll. Dieses Interface eignet sich gut für Kontrolle über den Berechnungsprozess. Die Anwendung dieses Interface ist für Fachleute mit größerer Erfahrung empfohlen. Das „partial – Interface“ wird in der vorliegenden Masterarbeit verwendet.

^D–Unter „**full - Interface**“ sind alle Modellparameter in SMS vorbereitet, nur die Berechnung wird durch SRH-2D durchgeführt. Die Anwendung dieses Interface empfiehlt sich für Anfänger. Hier hat man jedoch nicht so gute Kontrolle über den Berechnungsprozess.

Zusammenfassend für alle drei Softwareprodukte - **FESWMS, Hydro_As –2D** und **SRH – 2D** - lässt sich sagen, dass sie viel Freiraum für Fehler lassen. Deshalb setzt die Anwendung dieser Produkte Engineering-Expertise und hohe Aufmerksamkeit voraus. Alle Ergebnisse sollen sorgfältig von einem erfahrenen Ingenieur untersucht werden, um sicherzustellen, dass sie dem jeweiligen Programm entsprechend angemessen und korrekt sind.

7 Fallbeispiel 1

7.1. Aufgabenstellung und kurze Beschreibung des Modells

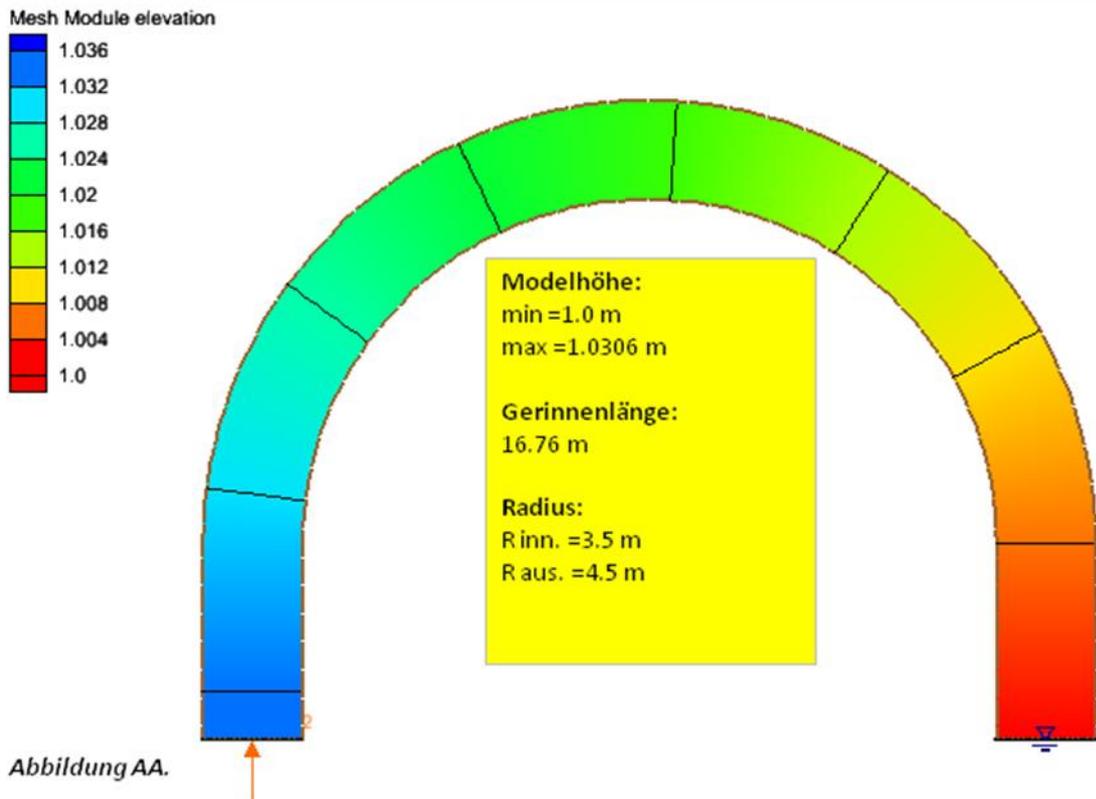
Die Aufgabe besteht darin, eine Modelrinne durch 3 verschiedene Hydraulik - Softwareprogramme (FESWMS, Hydro-As-2D, SRH-2D) zu berechnen. Durch Eingabe von Eingangsdaten (Durchfluss am Anfang der Rinne und Wasserspiegel am Ende der Rinne oder Energieliniengefälle) werden Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegelniveaus und Wassertiefe für jeden einzelnen Punkt der Modelrinne ermittelt. Als Grundlage für die Versuchsdurchführung wird der „180°-Krümmer von Yen und Lee“ aus den Hydro_As-2D-tutorials verwendet. (s. Abbildung AA)

Das Modell hat folgende **Parameter**:

- rechteckiges Querprofil mit 1m Breite
- Höhenlage des Modelanfangs (links, blau gefärbt): max=1.0306 m
- Höhenlage des Modellendes (rechts, rot gefärbt): min=1.0 m
- Innenradius (R inn.) = 3.5 m
- Außenradius (R aus.) = 4.5 m
- Gesamtlänge der Modelrinne = 16.76 m

Folgende **Eingabedaten** wurden eingegeben:

- Durchfluss $Q=0.02 \text{ m}^3/\text{s}$
- Wasserspiegelniveau (Ausgang)= 1.05 m



Ziel der Untersuchung ist es, die Auswirkung der

- Feinheit des Elementnetzes und
- Der Veränderung der Rauheit an der Sohle der Modelrinne

auf die Endergebnisse, die von den Softwareprogrammen geliefert werden, zu untersuchen.

Zu diesem Zweck werden folgende **Versuchsvariablen** definiert:

- **feines** und **grobes Netz aus Elementen** (s. Abbildungen AB, AB', AC und AC' für das Programm FESWMS; Abbildungen A'B, A'B', A'C und A'C' für das Programm Hydro-As-2d und Abbildungen A''B, A''B', A''C für SRH-2D)

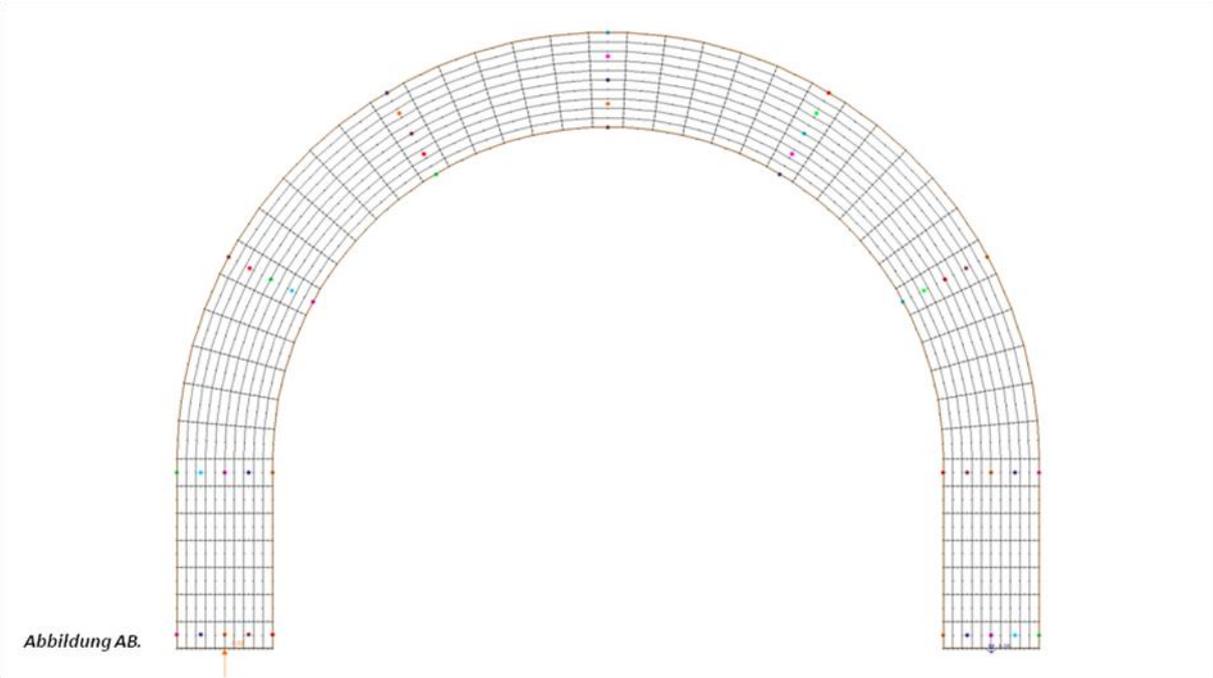
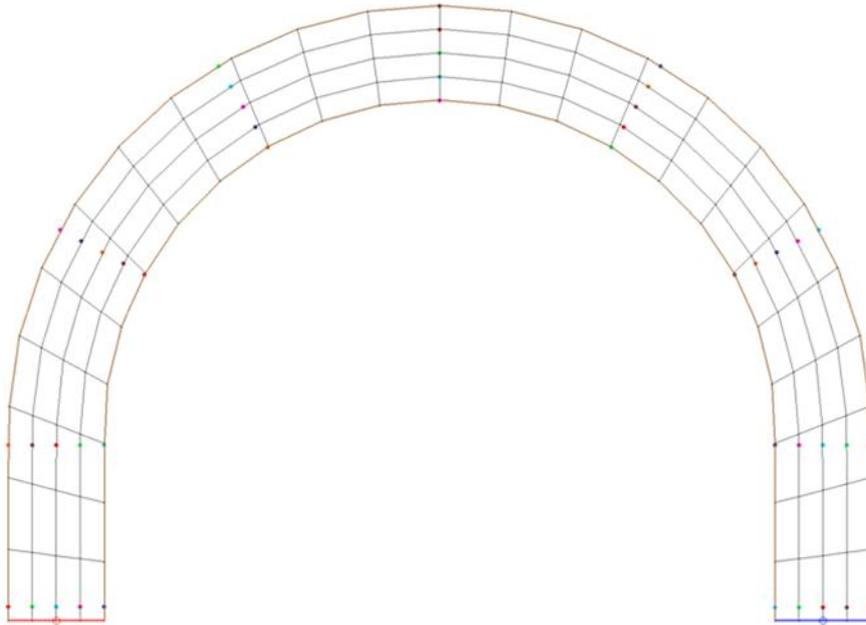


Abbildung AB.

<p>Max. element front width: 63</p> <p>Max. node half band width: 1052</p>	<p>Element type: quadratic</p> <p>Num. of triangular elems: 0</p> <p>Num. of quadrilateral elems: 490</p>
<p>Number of elements: 490</p> <p>Maximum element ID: 490</p> <p>Number of nodes: 1589</p> <p>Maximum node ID: 1589</p>	<p>FESWMS info</p> <p>Number of Culverts: 0</p> <p>Number of piers: 0</p> <p>Number of weirs: 0</p> <p>Number of drop inlets: 0</p> <p>Max ceiling value: 0.0</p> <p>Min ceiling value: 0.0</p>
<p>Minimum Z value: 1.00</p> <p>Maximum Z value: 1.03</p>	<p><i>Abbildung AB!</i></p>

Abbildung AC.



Max. element front width: 133
Max. node half band width: 81

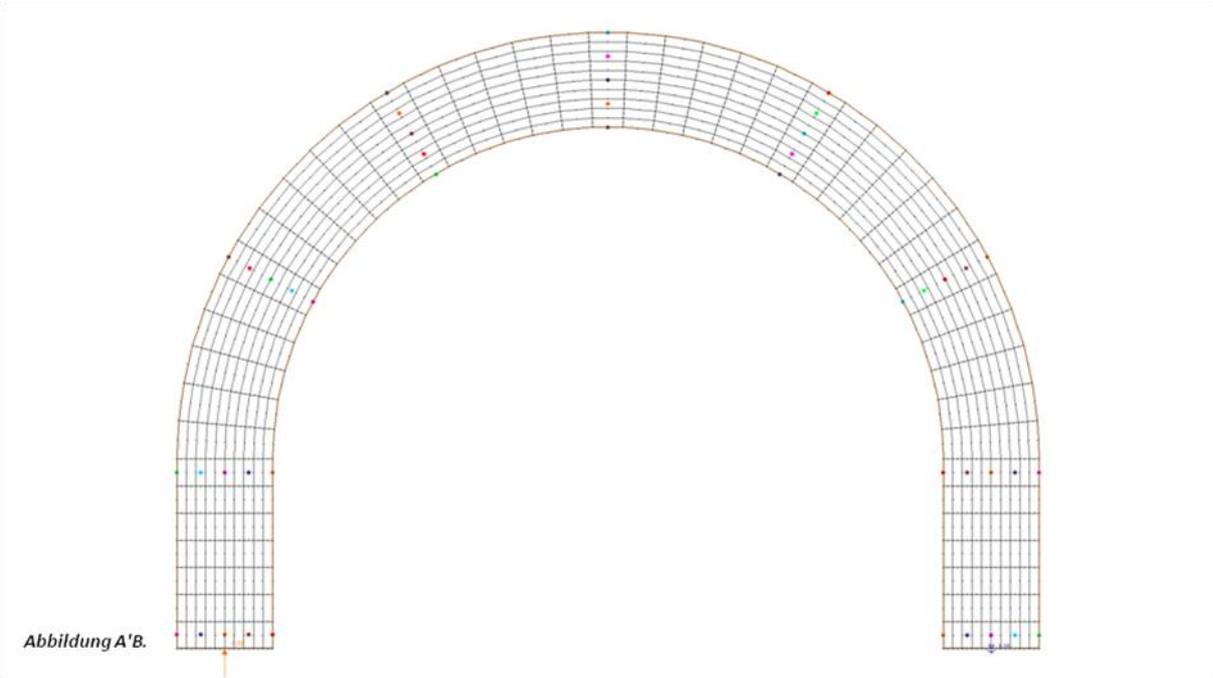
Number of elements: 96
Maximum element ID: 96
Number of nodes: 345
Maximum node ID: 345

Minimum Z value: 1.00
Maximum Z value: 1.03

Element type: quadratic
Num. of triangular elems: 0
Num. of quadrilateral elems: 96

FESWMS info
Number of Culverts: 0
Number of piers: 0
Number of weirs: 0
Number of drop inlets: 0
Max ceiling value: 0.0
Min ceiling value: 0.0

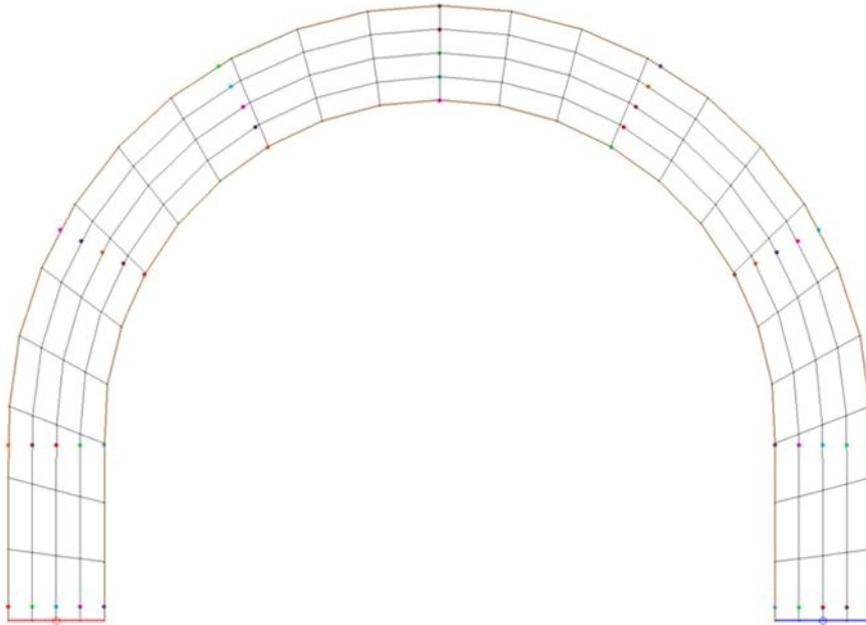
Abbildung AC'.



<p>Max. element front width: 13 Max. node half band width: 14</p>	<p>Element type: linear Num. of triangular elems: 0 Num. of quadrilateral elems: 490</p>
<p>Number of elements: 490 Maximum element ID: 490 Number of nodes: 550 Maximum node ID: 550</p>	<p>GEN2DM info Model name: HYDRO_AS-2D</p>
<p>Minimum Z value: 1.00 Maximum Z value: 1.03</p>	

Abbildung A'B'.

Abbildung A'C.



Max. element front width: 7
Max. node half band width: 8

Number of elements: 96
Maximum element ID: 96
Number of nodes: 125
Maximum node ID: 125

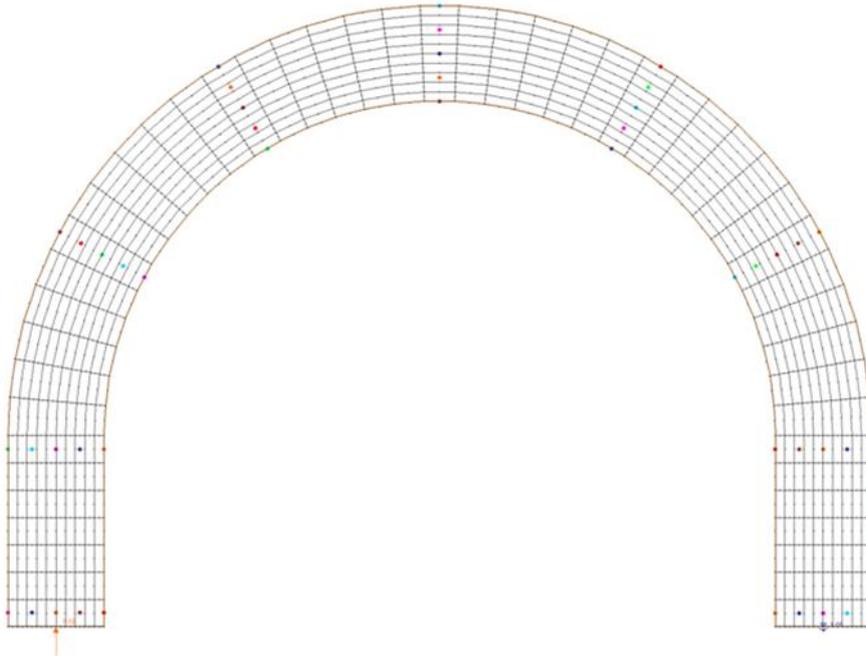
Minimum Z value: 1.00
Maximum Z value: 1.03

Element type: linear
Num. of triangular elems: 0
Num. of quadrilateral elems: 96

GEN2DM info
Model name: HYDRO_AS-2D

Abbildung A'C'.

Abbildung A''B.



Max. element front width: 7
Max. node half band width: 8

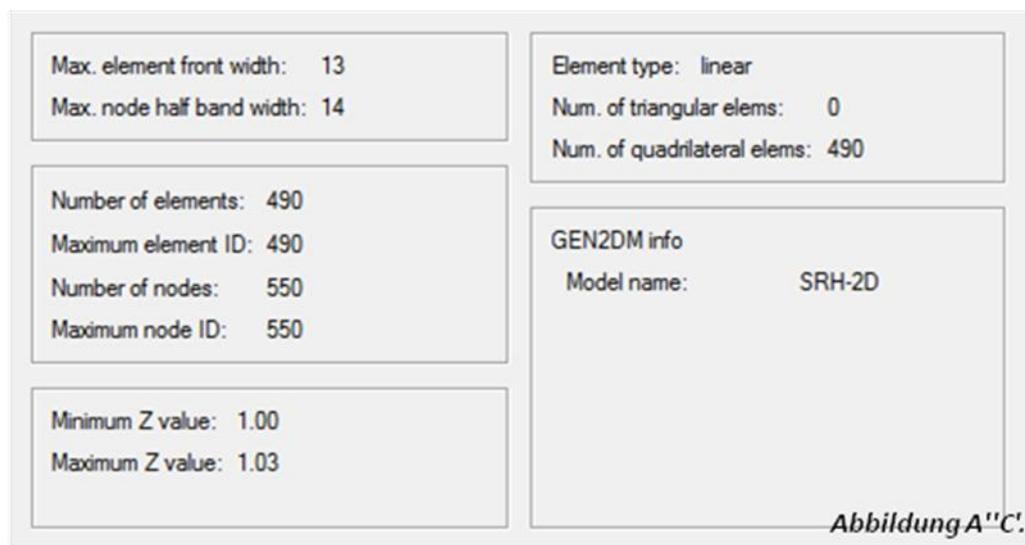
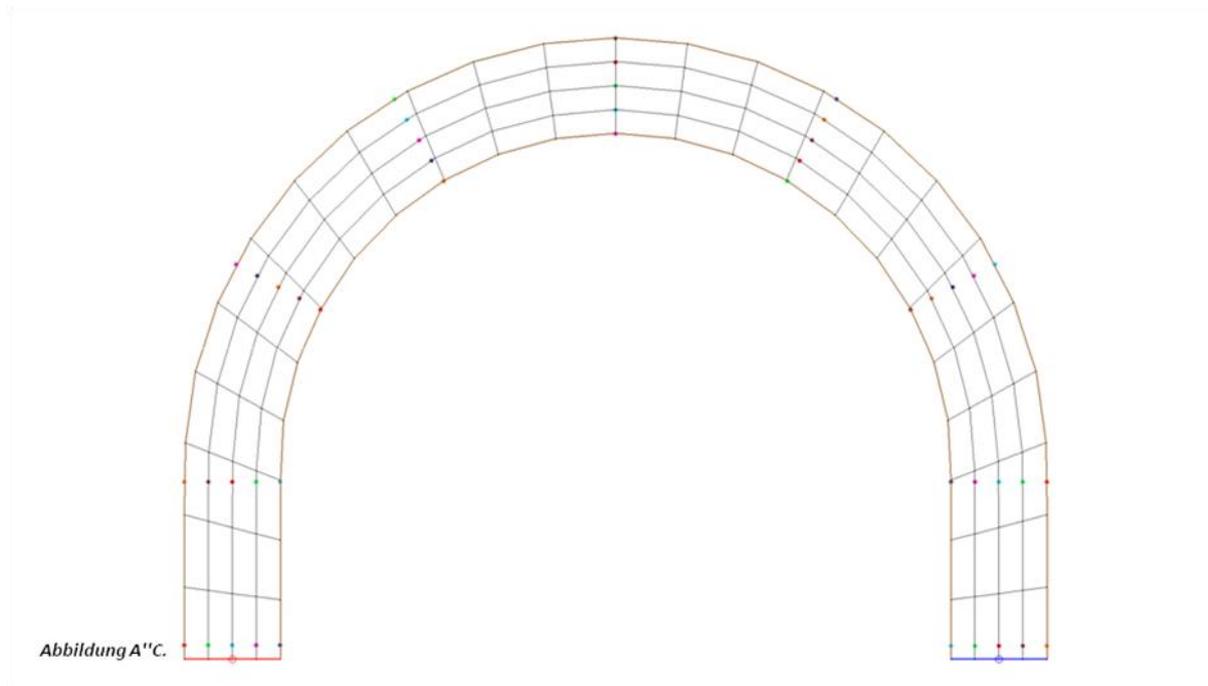
Number of elements: 96
Maximum element ID: 96
Number of nodes: 125
Maximum node ID: 125

Minimum Z value: 1.00
Maximum Z value: 1.03

Element type: linear
Num. of triangular elems: 0
Num. of quadrilateral elems: 96

GEN2DM info
Model name: SRH-2D

Abbildung A''B'.



- **verschiedene Rauheitsbeiwerte:**

- Die Sohle ist mit grobem Boden (**Material 1**) bedeckt: Rauheitsbeiwert (nach Strickler $K_{st}=40.00 [m^{1/3}/s]$ / nach Manning $n=0.025$ ($n=1/K_{st}$))
- Die Sohle ist mit glattem Beton (**Material 2**) bedeckt: Rauheitsbeiwert (nach Strickler $K_{st}=83.33 [m^{1/3}/s]$ /nach Manning $n=0.012$) ($n=1/K_{st}$)

Die Kombinationen der verschiedenen Versuchsvariablen ergeben **vier Versuchsvarianten:**

1) feines Netz + Material 1 mit Abkürzung: **Mat1fein**

2) grobes Netz + Material 1 mit Abkürzung: **Mat1grob**

3) feines Netz + Material 2 mit Abkürzung: **Mat2fein**

4) grobes Netz + Material 2 mit Abkürzung: **Mat2grob**

7.2 Ergebnisse: Fallbeispiel 1

Die Ergebnisse bzgl. Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegelniveau und Wassertiefe sind durch farbige Lagepläne, erstellt in SMS, in **Anhang A** dargestellt.

Die Ergebnisse sind in zwei Varianten dargestellt:

- mit Färbungsintervall = 0.01 (Geschwindigkeit [m/s], Wasserspiegelniveau [m], Wassertiefe [m])
- mit Färbungsintervall = 0.002 (Geschwindigkeit [m/s], Wasserspiegelniveau [m], Wassertiefe [m])

Wegen der Vielzahl an Abbildungen und Vergleichskombinationen zwischen ihnen sowie zum Zwecke einer besseren Übersicht und im Sinne der einfacheren Zuordnung der Abbildungen wird folgendes System zur Nummerierung der Abbildungen verwendet:

Systematik der Abbildungsbezeichnung:

Abbildung ijklm

i- Fallbeispiel: zeigt, zu welchem Fallbeispiel die Abbildung gehört (**Fallbeispiel 1, 2, 3**)

Fallbeispielnummer	1	2	3
Bezeichnung	A	B	C

Tabelle 7.1

j- Programmnummer: zeigt, zu welchem Programm die Abbildung gehört (**Programm FESWMS, Hydro-As-2D, SRH-2D**)

Programm	FESWMS	Hydro-As-2d	SRH-2D
Nummer	1	2	3

Tabelle 7.2

k- Versuchsvariantennummer: zeigt, zu welcher Versuchsvariante die Abbildung gehört (**Mat1fein, Mat1grob, Mat2fein, Mat2grob**)

Versuchsvariante	mat1fein	mat1grob	mat2fein	mat2grob
Nummer	1	2	3	4

Tabelle 7.3

l- gesuchte Variable: zeigt, welche gesuchte Variable berücksichtigt wird
(Fließgeschwindigkeit „v“, Wasseroberflächennivea „w“, Wassertiefe „d“)

Gesuchte Variable	v	w	d
Nummer	1	2	3

Tabelle 7.4

m- Färbungsfaktor: zeigt, in welchem Färbungsintervall die Abbildung dargestellt ist
(Färbungsintervall 0.01 oder 0.002)

Wert des Färbungsintervalls	0.01	0.002
Nummer	1	2

Tabelle 7.5

z. B. Eine Abbildung aus dem ersten Fallbeispiel- **(A)**, die Ergebnisse aus dem Programm **FESWMS-(1)** darstellt für Versuchsvariante **Mat2grob-(4)** und Darstellung der **Wassertiefe-(3)** in **Färbungsintervall 0.002-(2)** ist die Abbildung mit Nummer **A1.4.3.2 (S.A12)**.

Das Abbildungsverzeichnis ist in **Tabelle 7.6** dargestellt. Alle Abbildungen, die die Ergebnisse aus der Erarbeitung von Fallbeispiel 1 visualisieren, sind in **Anhang A** zu finden.

Programm	Versuchsvariante	gesuchte Variable	Abbildungsnummer	
			Färbungsintervall 0.01	Färbungsintervall 0.002
FESWMS	Mat1fein	v	A1.1.1.1 (S. A1)	A1.1.1.2 (S. A1)
		w	A1.1.2.1 (S. A2)	A1.1.2.2 (S. A2)
		d	A1.1.3.1 (S. A3)	A1.1.3.2 (S. A3)
	Mat1grob	v	A1.2.1.1 (S. A4)	A1.2.1.2 (S. A4)
		w	A1.2.1.1 (S. A5)	A1.2.2.2 (S. A5)
		d	A1.2.1.1 (S. A6)	A1.2.3.2 (S. A6)
	Mat2fein	v	A1.2.1.1 (S. A7)	A1.3.1.2 (S. A7)
		w	A1.3.2.1 (S. A8)	A1.3.2.2 (S. A8)
		d	A1.3.3.1 (S. A9)	A1.3.3.2 (S. A9)
	Mat2grob	v	A1.4.1.1 (S. A10)	A1.4.1.2 (S. A10)
		w	A1.4.2.1 (S. A11)	A1.4.2.2 (S. A11)
		d	A1.4.3.1 (S. A12)	A1.4.3.2 (S. A12)
Hydro_As-2D	Mat1fein	v	A2.1.1.1 (S. A13)	A2.1.1.2 (S. A13)
		w	A2.1.2.1 (S. A14)	A2.1.2.2 (S. A14)
		d	A2.1.3.1 (S. A15)	A2.1.3.2 (S. A15)
	Mat1grob	v	A2.2.1.1 (S. A16)	A2.2.1.2 (S. A16)
		w	A2.2.2.1 (S. A17)	A2.2.2.2 (S. A17)
		d	A2.2.3.1 (S. A18)	A2.2.3.2 (S. A18)
	Mat2fein	v	A2.3.1.1 (S. A19)	A2.3.1.2 (S. A19)
		w	A2.3.2.1 (S. A20)	A2.3.2.2 (S. A20)
		d	A2.3.3.1 (S. A21)	A2.3.3.2 (S. A21)
	Mat2grob	v	A2.4.1.1 (S. A22)	A2.4.1.2 (S. A22)
		w	A2.4.2.1 (S. A23)	A2.4.2.2 (S. A23)
		d	A2.4.3.1 (S. A24)	A2.4.3.2 (S. A24)

Tabelle 7.6: Abbildungsverzeichnis der durch das Programm SMS erarbeiteten Lagepläne über Fließgeschwindigkeit, Wasseroberflächenniveau und Wassertiefe für die unterschiedlichen Versuchsvarianten und Programme. Alle Abbildungen sind im **Anhang A** zu finden. In den Klammern hinter jeder Abbildungsnummer ist die Seitennummer angegeben. (z.B. A2.4.3.1 (S. A24))

v – Fließgeschwindigkeit, *w* – Wasseroberflächennivea, *d* – Wassertiefe

Bei der Analyse der Ergebnisse werden verschiedene Kombinationen aus Abbildungen verglichen. Die Ergebnisanalyse umfasst **Ergebnisbeobachtungen** und **Sensitivitätsanalyse**: In Ergebnisbeobachtungen werden die Visualisierungsmöglichkeiten untersucht und es wird ein allgemeiner Überblick über die Ergebnisse aus der Arbeit mit den Programmen gegeben. Die Auswirkung des Färbungsintervalls auf die Ergebnisanalyse wird anhand der Vergleiche, aufgeführt in Tabelle 7.7, Spalte 5 (Auswirkung des Färbungsfaktors auf die Darstellung) untersucht. Eine Gegenüberstellung der Abbildungen der Fließgeschwindigkeit „v“, Wasseroberflächennivea „w“, Wassertiefe „d“ wird durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen denen zu untersuchen (aufgeführt in Tabelle 7.7, Spalte 4).

Bei der Sensitivitätsanalyse wird die Auswirkung der Feinheitsänderung im Modellelementnetz auf die Genauigkeit der Ergebnisse (aufgeführt in Tabelle 7.8, Spalte 4), sowie die Auswirkung der Sohlrauheitsänderung auf die Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe untersucht(aufgeführt in Tabelle 7.8, Spalte 5)

Das Programm SRH-2D bietet Möglichkeit zur graphischen Darstellung der Ergebnisse erstellen.

Analyse			Auswirkung des Färbungsfaktor und Zusammenhang zw. V,W und D	
1. Programm	2. Versuchsvariante	3. Gesuchte Variable	4. Zusammenhang zw. V,W und D	5. Auswirkung des Färbungsfaktors auf die Darstellung
FESWMS	Mat1fein	v	A1.1.1.1 (S. A1)/A1.1.2.1 (S. A2)/ A1.1.3.1 (S. A3)	A1.1.1.1 (S. A1)/A1.1.1.2 (S. A1)
		w	und A1.1.1.2 (S. A1)/A1.1.2.2(S. A2)/A1.1.3.1(S. A3)	A1.1.2.1 (S. A2)/A1.1.2.2 (S. A2)
		d		A1.1.3.1 (S. A3)/A1.1.3.2 (S. A3)
	Mat1grob	v	A1.2.1.1 (S. A4)/A1.2.1.1 (S. A5)/A1.2.1.1 (S. A6)	A1.2.1.1 (S. A4)/A1.2.1.2 (S. A4)
		w	und A1.2.1.2 (S. A4)/A1.2.2.2 (S. A5)/A1.2.1.1 (S. A6)	A1.2.1.1 (S. A5)/A1.2.2.2 (S. A5)
		d		A1.2.1.1 (S. A6)/A1.2.3.2 (S. A6)
	Mat2fein	v	A1.2.1.1 (S. A7)/A1.3.2.1 (S. A8)/A1.3.3.1 (S. A9)	A1.2.1.1 (S. A7)/A1.3.1.2 (S. A7)
		w	und A1.3.1.2 (S. A7)/A1.3.2.2 (S. A8)/A1.3.3.1 (S. A9)	A1.3.2.1 (S. A8)/A1.3.2.2 (S. A8)
		d		A1.3.3.1 (S. A9)/A1.3.3.2 (S. A9)
	Mat2grob	v	A1.4.1.1 (S. A10)/A1.4.2.1 (S. A11)/A1.4.3.1 (S. A12)	A1.4.1.1 (S. A10)/A1.4.1.2 (S. A10)
		w	und A1.4.1.2 (S. A10)/A1.4.2.2 (S. A11)/A1.4.3.1 (S. A12)	A1.4.2.1 (S. A11)/A1.4.2.2 (S. A11)
		d		A1.4.3.1 (S. A12)/A1.4.3.2 (S. A12)

Analyse			Auswirkung der Färbungsfaktor und Zusammenhang zw. V,W und D	
1. Programm	2. Versuchsvariante	3. Gesuchte Variable	4. Zusammenhang zw. V,W und D	5. Auswirkung des Färbungsfaktors auf die Darstellung
Hydro-As-2d	mat1fein	v	A2.1.1.1 (S. A13)/A2.1.2.1 (S. A14)/A2.1.3.1 (S. A15)	A2.1.1.1 (S. A13)/A2.1.1.2 (S. A13)
		w	und A2.1.1.2 (S. A13)/A2.1.2.2 (S. A14)/A2.1.3.1 (S. A15)	A2.1.2.1 (S. A14)/A2.1.2.2 (S. A14)
		d		A2.1.3.1 (S. A15)/A2.1.3.2 (S. A15)
	mat1grob	v	A2.2.1.1 (S. A16)/A2.2.2.1 (S. A17)/A2.2.3.1 (S. A18)	A2.2.1.1 (S. A16)/A2.2.1.2 (S. A16)
		w	und A2.2.1.2 (S. A16)/A2.2.2.2 (S. A17)/A2.2.3.1 (S. A18)	A2.2.2.1 (S. A17)/A2.2.2.2 (S. A17)
		d		A2.2.3.1 (S. A18)/A2.2.3.2 (S. A18)
	mat2fein	v	A2.3.1.1 (S. A19)/A2.3.2.1 (S. A20)/A2.3.3.1 (S. A21)	A2.3.1.1 (S. A19)/A2.3.1.2 (S. A19)
		w	und A2.3.1.2 (S. A19)/A2.3.2.2 (S. A20)/A2.3.3.1 (S. A21)	A2.3.2.1 (S. A20)/A2.3.2.2 (S. A20)
		d		A2.3.3.1 (S. A21)/A2.3.3.2 (S. A21)
	mat2grob	v	A2.4.1.1 (S. A22)/A2.4.2.1 (S. A23)/A2.4.3.1 (S. A24)	A2.4.1.1 (S. A22)/A2.4.1.2 (S. A22)
		w	und A2.4.1.2 (S. A22)/A2.4.2.2 (S. A23)/A2.4.3.1 (S. A24)	A2.4.2.1 (S. A23)/A2.4.2.2 (S. A23)
		d		A2.4.3.1 (S. A24)/A2.4.3.2 (S. A24)

Tabelle 7.7

Analyse			Auswirkung der Feinheit des Netzes und des Rauheitsbeiwert		Analyse
1.Programm	2.Gesuchte Variable	3.Versuchsvariante	4.Auswirkung der Feinheit des Netzes	5.Auswirkung des Rauheitsbeiwerts	6.Versuchsvariante
FESWMS	v	Mat1fein	A1.1.1.1 (S. A1)/A1.2.1.1 (S. A4) und A1.1.1.2 (S. A1)/A1.2.1.2 (S. A4)	A1.1.1.1 (S. A1)/A1.2.1.1 (S. A7) und A1.1.1.2 (S. A1)/A1.3.1.2 (S. A7)	Mat1fein
		Mat1grob			Mat2fein
		Mat2fein	A1.2.1.1 (S. A7)/A1.4.1.1 (S. A10) und A1.3.1.2 (S. A7)/A1.4.1.2 (S. A10)	A1.2.1.1 (S. A4)/A1.4.1.1 (S. A10) und A1.2.1.2 (S. A4)/A1.4.1.2 (S. A10)	Mat1grob
		Mat2grob			Mat2grob
	w	Mat1fein	A1.1.2.1 (S. A2)/A1.2.1.1 (S. A5) und A1.1.2.2 (S. A2)/A1.2.2.2 (S. A5)	A1.1.2.1 (S. A2)/A1.3.2.1 (S. A8) und A1.1.2.2 (S. A2)/A1.3.2.2 (S. A8)	Mat1fein
		Mat1grob			Mat2fein
		Mat2fein	A1.3.2.1 (S. A8)/A1.4.2.1 (S. A11) und A1.3.2.2 (S. A8)/A1.4.2.2 (S. A11)	A1.2.1.1 (S. A5)/A1.4.2.1 (S. A11) und A1.2.2.2 (S. A5)/A1.4.2.2 (S. A11)	Mat1grob
		Mat2grob			Mat2grob
	d	Mat1fein	A1.1.3.1 (S. A3)/A1.2.1.1 (S. A6) und A1.1.3.2 (S. A3)/A1.2.3.2 (S. A6)	A1.1.3.1 (S. A3)/A1.3.3.1 (S. A9) und A1.1.3.2 (S. A3)/A1.3.3.2 (S. A9)	Mat1fein
		Mat1grob			Mat2fein
		Mat2fein	A1.3.3.1 (S. A9)/A1.4.3.1 (S. A12) und A1.3.3.2 (S. A9)/A1.4.3.2 (S. A12)	A1.2.1.1 (S. A6)/A1.4.3.1 (S. A12) und A1.2.3.2 (S. A6)/A1.4.3.2 (S. A12)	Mat1grob
		Mat2grob			Mat2grob
Hydro-As-2D	v	Mat1fein	A2.1.1.1 (S. A13)/A2.2.1.1 (S. A16) und A2.1.1.2 (S. A13)/A2.2.1.2 (S. A16)	A2.1.1.1 (S. A13)/A2.3.1.1 (S. A19) und A2.1.1.2 (S. A13)/A2.3.1.2 (S. A19)	Mat1fein
		Mat1grob			Mat2fein
		Mat2fein	A2.3.1.1 (S. A19)/A2.4.1.1 (S. A22) und A2.3.1.2 (S. A19)/A2.4.1.2 (S. A22)	A2.2.1.1 (S. A16)/A2.4.1.1 (S. A22) und A2.2.1.2 (S. A16)/A2.4.1.2 (S. A22)	Mat1grob
		Mat2grob			Mat2grob
	w	Mat1fein	A2.1.2.1 (S. A14)/A2.2.2.1 (S. A17) und A2.1.2.2 (S. A14)/A2.2.2.2 (S. A17)	A2.1.2.1 (S. A14)/A2.3.2.1 (S. A20) und A2.1.2.2 (S. A14)/A2.3.2.2 (S. A20)	Mat1fein
		Mat1grob			Mat2fein
		Mat2fein	A2.3.2.1 (S. A20)/A2.4.2.1 (S. A23) und A2.3.2.2 (S. A20)/A2.4.2.2 (S. A23)	A2.2.2.1 (S. A17)/A2.4.2.1 (S. A23) und A2.2.2.2 (S. A17)/A2.4.2.2 (S. A23)	Mat1grob
		Mat2grob			Mat2grob
	d	Mat1fein	A2.1.3.1 (S. A15)/A2.2.3.1 (S. A18) und A2.1.3.2 (S. A15)/A2.2.3.2 (S. A18)	A2.1.3.1 (S. A15)/A2.3.3.1 (S. A21) und A2.1.3.2 (S. A15)/A2.3.3.2 (S. A21)	Mat1fein
		Mat1grob			Mat2fein
		Mat2fein	A2.3.3.1 (S. A21)/A2.4.3.1 (S. A24) und A2.3.3.2 (S. A21)/A2.4.3.2 (S. A24)	A2.2.3.1 (S. A18)/A2.4.3.1 (S. A24) und A2.2.3.2 (S. A18)/A2.4.3.2 (S. A24)	Mat1grob
		Mat2grob			Mat2grob

Tabelle 7.8

Die farbigen Lagepläne liefern eine eindeutige Vergleichsgrundlage nicht, deshalb werden die die Werte in bestimmten Versuchspunkten (bunte Punkte in Abbildung AB. und Abbildung AC.) untersucht, organisiert in 3 Längs - und 9 Querprofilen.

Für die MS-Excel-Diagramme gilt folgende Bezeichnungssystem:

Abbildung ijklm

i- Fallbeispiel: zeigt zu welchem Fallbeispiel die entsprechende Abbildung gehört (**Fallbeispiel 1, 2, 3**) wieder in **Tabelle 1**

j- MS Excel-Diagramm: dient zur Differenzierung die Excel-Diagramme von den anderen Abbildungen (durch "e" gekennzeichnet)

k- Programmnummer: zeigt zu welchem Programm die Abbildung gehört (**Programm FESWMS, Hydro-As-2D, SRH – 2D**) wieder in **Tabelle 2**

l- Gesuchte Variable: zeigt welche gesuchte Variable berücksichtigt wird (**Fließgeschwindigkeit „v“, Wasseroberflächennivea „w“, Wassertiefe „d“**) wieder in **Tabelle 4**

m- Nummer der Abbildung

z. B. Eine Abbildung aus Fallbeispiel 1 (**A**) in Excel (**e**) mit Ergebnisse aus Programm: **FESWMS-(1)**, für Darstellung der **Wassertiefevergleich-(3)** und Nummer der Abbildung (**2**) haben wir Abbildung mit Nummer **Ae1.3.2**.

Das Abbildungsverzeichnis ist in **Tabelle 7.9** dargestellt:

Programm	Gesuchte Variable	Abbildung
FESWMS	v	Ae1.1.1-Ae1.1.12(S. Ae1- S. Ae4)
	w	Ae1.2.1-Ae1.2.12(S. Ae5- S. Ae8)
	d	Ae1.3.1-Ae1.3.12(S. Ae9- S. Ae12)
Hydro-As-2d	v	Ae2.1.1-Ae2.1.12(S. Ae13- S. Ae16)
	w	Ae2.2.1-Ae2.2.12(S. Ae17- S. Ae20)
	d	Ae2.3.1-Ae2.3.12(S. Ae21- S. Ae24)
SRH-2D	v	Ae3.1.1-Ae3.1.12(S. Ae25- S. Ae28)
	w	Ae3.2.1-Ae3.2.12(S. Ae29- S. Ae32)
	d	Ae3.3.1-Ae3.3.12(S. Ae33- S. Ae36)

Tabelle 7.9

7.3 Analyse der Ergebnisse aus Fallbeispiel 1

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Erarbeitung von Fallbeispiel 1 analysiert. Dabei sind die Analysen in zwei Gruppen organisiert: Ergebnisbeobachtungen und Sensitivitätsanalyse.

7.3.1 Ergebnisbeobachtungen

Auswirkung des Färbungsintervalls

In der ersten Gruppe - Ergebnisbeobachtungen – werden die Visualisierungsmöglichkeiten untersucht und es wird ein allgemeiner Überblick über die Ergebnisse aus der Arbeit mit den Programmen gegeben. Die Auswirkung des Färbungsintervalls auf die Ergebnisanalyse wird anhand der Vergleiche, aufgeführt in Tabelle 7.7, Spalte 5 (Auswirkung des Färbungsfaktors auf die Darstellung) untersucht.

7.3.1.1 Das Softwareprodukt FESWMS. Auswirkung des Färbungsintervalls

Vergleich A1.1.2.1 (S. A2)/A1.1.2.2 (S. A2) und Vergleich A1.3.2.1 (S. A8)/A1.3.2.2 (S. A8):

Auf den Abbildungen mit Färbungsintervall 0.01 sind Differenzen zwischen den Wasserniveaus des linken und rechten Ufers zu beobachten, die am Krümmungsanfang sowie unmittelbar nach deren Ende entstehen. Betrachtet man das Färbungsintervall, kann man den Ursachen für diese Ergebnisse auf den Grund gehen. Auf den Abbildungen mit Färbungsintervall 0.002 ist es deutlich erkennbar, dass die Wasserniveaudifferenzen am Kanalende durch Wirbelbildung infolge Ablösen von Wirbeln vom Kanalinnenrand, verursacht worden sind. Das führt zu Wellenbildung und die Wellen ihrerseits bedingen Wasserniveaudifferenzen von ca. 2 Zentimetern zwischen dem linken und dem rechten Ufer.

Diese Beobachtung bestätigt sich erneut auch bei Vergleich A1.2.1.1 (S. A5)/A1.2.2.2 (S. A5) und Vergleich A1.4.2.1 (S. A11)/A1.4.2.2 (S. A11). In diesen Vergleichen beobachtet man nicht nur die Ursache für die Wasserniveaudifferenzen am Kanalende, sondern auch die Ursache für Wasserniveaudifferenzen am Kanalanschluss, wo die Wirbelbildung am Modellkrümmungsanfang ansetzt. Das wird durch die Wahl eines Färbungsintervalls 0.002 ermöglicht.

Identisch sehen die Ergebnisse der Beobachtung von den Vergleichen der Wassertiefendarstellungen im Modellkanal aus: Vergleich A1.1.3.1 (S. A3)/A1.1.3.2 (S. A3), Vergleich A1.2.1.1 (S. A6)/A1.2.3.2 (S. A6), Vergleich A1.3.3.1 (S. A9)/A1.3.3.2 (S. A9), Vergleich A1.4.3.1 (S. A12)/A1.4.3.2 (S. A12).

Die Vergleiche der Varianten mit unterschiedlichen Färbungsintervallen bei den Abbildungen der Fließgeschwindigkeitsfelder liefern keine eindeutigen Ergebnisse, die die Bedeutung des Färbungsintervalls unterstreichen würden. Vielmehr ist es zu beobachten, dass die Erhöhung der Detailliertheit der Abbildung nicht unbedingt leichter zu differenzierende Ergebnisse mit sich bringt.

7.3.1.2 Das Softwareprodukt Hydro_As-2D. Auswirkung des Färbungsintervalls

Vergleich A2.1.2.1 (S. A14)/A2.1.2.2 (S. A14), Vergleich A2.2.2.1 (S. A17)/A2.2.2.2 (S. A17), Vergleich A2.3.2.1 (S. A20)/A2.3.2.2 (S. A20), Vergleich A2.4.2.1 (S. A23)/A2.4.2.2 (S. A23)

Auf den Abbildungen mit Färbungsintervall 0.002 kann man die genauen Stellen, an denen die Änderungen des Wasserniveaus von höherem Wasserniveau am inneren Rand und niedrigerem Wasserniveau am äußeren Rand hin zu niedrigerem Wasserniveau am inneren Rand und höherem Wasserniveau am äußeren Rand erfolgen, klar erkennen. Die Identifizierung der genauen Stelle, an der sich das Wasserniveau ändert, kann zur Optimierung der Berechnung von hydraulischen Aufgaben beitragen.

Ähnliches beobachtet man auf den Diagrammen, auf denen die Wassertiefen in Vergleich A2.1.3.1 (S. A15)/A2.1.3.2 (S. A15), Vergleich A2.2.3.1 (S. A18)/A2.2.3.2 (S. A18), Vergleich A2.3.3.1 (S. A21)/A2.3.3.2 (S. A21), Vergleich A2.4.2.1 (S. A23)/A2.4.2.2 (S. A23) dargestellt sind. Bei einer näheren Betrachtung von Vergleich A2.2.3.1 (S. A18)/A2.2.3.2 (S. A18) lässt sich erkennen, dass ohne Änderung des Färbungsintervalls in Richtung detaillierterer Abbildung (von 0.01 auf 0.002) die Linien, die die Wasserniveaus zeigen, gar nicht abgebildet gewesen wären.

Zwischenfazit:

Abschließend lässt sich für die Auswirkung des Färbungsintervalls zusammenfassen:

Je detaillierter man sich mit den Visualisierungsmöglichkeiten des entsprechenden Programms auskennt, desto einfacher ist es, einen bestimmten Prozess zu untersuchen und zu analysieren. Das seinerseits führt zu Fehlerminimierung bei der Interpretation der zu betrachtenden Ergebnisse und trägt zur Optimierung der Berechnung von hydraulischen Prozessen bei. SMS bietet weitere Visualisierungsmöglichkeiten an, wie z.B.: Darstellung der Bewegung von Wasserteilchen in Video, Fließgeschwindigkeiten in vektorieller Form etc. Deren Anwendung empfiehlt sich, da dadurch gründlichere Analysen ermöglicht werden.

Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe

Teil der Ergebnisbeobachtungen sind auch die Gegenüberstellungen zwischen den Diagrammen, auf denen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe für die einzelnen Versuchsvarianten dargestellt sind. Sie sind in Tabelle 7.7, Spalte 4 (Zusammenhang zwischen V, W und D) aufgeführt. Ziel dieser Gegenüberstellung ist es, die Visualisierungsmöglichkeit des Zusammenhangs zwischen den Ergebnissen zu Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe zu prüfen. In Längsrichtung wird der Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Wasserspiegellage durch die Bernoulli-Gleichung ausgedrückt. Der Wassertiefewert stellt die Differenz zwischen der Wasserspiegellage und der Modellsohle. Im Nachfolgenden werden nicht nur diese Zusammenhänge an sich untersucht, sondern auch die Art und Weise, diese zu visualisieren, damit sie deutlicher zu erkennen sind.

7.3.1.3 Das Softwareprodukt FESWMS. Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe

Den Wassertiefenabbildungen kann man entnehmen, dass die Änderung der Wassertiefe von der Kombination aus zwei Variablen abhängt: der Wasserspiegellage (als Funktion der Sohlneigung und Sohlrauheit), die eine Veränderung der Wassertiefe in Längsrichtung verursacht und der Auswirkung der Modellkrümmung in Querrichtung. Deshalb reflektieren die Schwankungen des Wasserspiegels logischerweise auf die Schwankungen der Wassertiefe.

Der Zusammenhang zwischen der Wasserspiegellage und der Wassertiefe ist in allen Gegenüberstellungskombinationen festzustellen, wobei er sich in den Versuchsvarianten mit

Färbungsintervall 0.002 (A1.1.1.2 (S. A1)/A1.1.2.2 (S. A2)/A1.1.3.2 (S. A3); A1.2.1.2 (S. A4)/A1.2.2.2 (S. A5)/A1.2.3.2 (S. A6); A1.3.1.2 (S. A7)/A1.3.2.2 (S. A8)/A1.3.3.2 (S. A9);A1.4.1.2 (S. A10)/A1.4.2.2 (S. A11)/A1.4.3.2 (S. A12)) besser als in den Fällen mit Färbungsintervall 0.01 (A1.1.1.1 (S. A1)/A1.1.2.1 (S. A2)/A1.1.3.1 (S. A3); A1.2.1.1 (S. A4)/A1.2.1.1 (S. A5)/A1.2.1.1 (S. A6); A1.2.1.1 (S. A7)/A1.3.2.1 (S. A8)/A1.3.3.1 (S. A9); A1.4.1.1 (S. A10)/A1.4.2.2 (S. A11)/A1.4.3.1 (S. A12)) erkennbar macht.

Der Zusammenhang zwischen Wasserspiegellage und Fließgeschwindigkeit betrifft die Größenänderung in Längsrichtung. Da sich diese Größen in Längsrichtung im Vergleich zur Querrichtung verhältnismäßig weniger verändern, ist dieser Zusammenhang in den oben aufgeführten Gegenüberstellungen nicht so leicht erkennbar, wie das bei dem Zusammenhang zwischen Wasserspiegellage und Wassertiefe der Fall ist. Daraus lässt sich schließen, dass Farbdarstellungen in SMS nicht immer die beste Visualisierungsmöglichkeit darstellen. Vielmehr erweist sich die Darstellung durch Auswahl bestimmter Punkte, die einen genauen Wert angeben, als zweckmäßiger. Ein Beispiel hierfür sind die Gegenüberstellungen zwischen den Fließgeschwindigkeit – und Wasserspiegellängsprofilen, abgebildet durch MS Excel. (Ae1.1.10(S. Ae4)/ Ae1.2.10(S. Ae8)/ Ae1.3.10(S. Ae12) für die linken Längsprofile, Ae1.1.11(S. Ae4)/ Ae1.2.11(S. Ae8)/ Ae1.3.11(S. Ae12 für die mittleren Längsprofile und Ae1.1.12(S. Ae4)/ Ae1.2.12(S. Ae8)/ Ae1.3.12(S. Ae12 für die rechten Längsprofile.)

Aus den Excel-Graphiken wird es ersichtlich, dass die Änderung der Fließgeschwindigkeit zwischen zwei benachbarten Punkten aus den Längsprofilen und die Änderung der Wasserspiegellage zwischen denselben benachbarten Punkten in Wechselwirkung stehen. Des Weiteren bringen die erwähnten Excel-Graphiken auch den Zusammenhang zwischen Wasserspiegellage und Wassertiefe zum Ausdruck.

7.3.1.4 Das Softwareprodukt Hydro_AS-2D. Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe

Die oben aufgeführten Schlussfolgerungen zum Programm FESWMS gelten analog auch für die Gegenüberstellung zwischen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe in Hydro_AS-2D. In den Versuchsvarianten mit Färbungsintervall 0.01 (A2.2.1.1 (S. A16)/A2.2.2.1 (S. A17)/A2.2.3.1 (S. A18); A2.4.1.1 (S. A22)/A2.4.2.1 (S. A23)/A2.4.3.1 (S. A24)) und mit Färbungsintervall 0.002 (A2.2.1.2 (S. A16)/A2.2.2.2 (S. A17)/A2.2.3.2 (S. A18); A2.4.1.2 (S. A22)/A2.4.2.2 (S. A23)/A2.4.3.2 (S. A24)) ist das Verhältnis zwischen

Fließgeschwindigkeit und Wasserspiegellage nicht so eindeutig erkennbar wie beim Verhältnis zwischen Wasserspiegellage und Wassertiefe. Es gilt wieder, dass sich die Zusammenhänge in den MS – Excel - Graphiken (Ae2.1.10(S. Ae16)/ Ae2.2.10(S. Ae20)/ Ae2.3.10(S. Ae24) für die linken Längsprofile, Ae2.1.11(S. Ae16)/ Ae2.2.11(S. Ae20)/ Ae2.3.11(S. Ae24) –für die mittleren Längsprofile, Ae2.1.12(S. Ae16)/ Ae2.2.12(S. Ae20)/ Ae2.3.12(S. Ae24) –für die rechten Längsprofile, deutlicher erkennbar machen. Die Ursache dafür ist, dass man die Excel-Graphiken für alle Versuchsvarianten parallel betrachten und vergleichen kann.

In den nächsten Zeilen wird auf einen Nachteil der Bedienung von Hydro_AS-2D eingegangen.

Die Berechnungen in FESWMS und die Berechnungen der Modelle mit einem groben Netz in Hydro_AS-2D wurden durchgeführt, ohne dass Reibung in den Modellkanalwänden vordefiniert wurde (sog. „slip-Bedingung“). Das ist auf den Abbildungen der Fließgeschwindigkeitsquerprofile Ae1.1.1-Ae1.1.9 (S. Ae1- S. Ae3) für FESWMS und Ae2.1.1-Ae2.1.9 (S. Ae13- S. Ae15) für Hydro_AS-2D, wo die Fließgeschwindigkeitsänderung nur durch die Modellkrümmung beeinflusst wird, zu beobachten. In Hydro_AS-2D lässt sich eine „no-slip-Bedingung (es ist eine große Reibung auf den Modellseitenrändern vordefiniert und die Fließgeschwindigkeit die Modellwand entlang ist gleich 0) nicht anwenden und darin besteht sein Nachteil. Er kann jedoch durch manuelle Anpassungen am Programm überwunden werden: man kann die „slip-Bedingung“ simulieren, indem man große Sohlreibung in den an die Modellseitenränder grenzenden Elementen vordefiniert, was wiederum nur bei Vorhandensein eines ausreichend feinen Netzes möglich ist. Die Methode wurde in der vorliegenden Arbeit angewendet und die Ergebnisse sind in den Abbildungen A2.1.1.1 (S. A13), A2.3.1.1 (S. A19) (Färbungsintervall 0.01) und A2.1.1.2 (S. A13), A2.3.1.2 (S. A 19) (Färbungsintervall 0.002) veranschaulicht.

In den Excel-Graphiken (Ae2.1.1-Ae2.1.9, S(S. Ae13- S. Ae15)), wo die Fließgeschwindigkeitsquerprofile in Hydro_AS-2D dargestellt sind, unterscheiden sich die Feinnetz-Versuchsvarianten von den Grobnetz-Versuchsvarianten dadurch, dass die Fließgeschwindigkeit nicht nur von der Modellkrümmung sondern auch von der Reibung in den Modellseitenrändern beeinflusst wird. Diese Lösungsmethode unterstreicht noch einmal die Wichtigkeit vertiefter Kenntnisse des Anwenders über das Programm.

7.3.1.5 Das Softwareprogramm SRH-2D. Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe

SRH-2D weist den Nachteil der Unmöglichkeit zur Visualisierung durch SMS auf, was die Reflektion über die Gesamtergebnisse erschwert und sogar verunmöglicht. Die Ergebnisse von SRH-2D-Berechnungen werden in Tabellen in einer *.dat-Datei gegeben. Die Werte der gesuchten Größen beziehen sich auf die Netzelementzentren. Dieser Nachteil verhindert es, dass der Anwender nach den Ergebnissen in einem beliebigen Punkt suchen kann, weil sich diese Punkte selten mit den Elementzentren überschneiden und die Suche nach dem Wert daher nur durch Interpolation der Werte in den benachbarten Elementzentren erfolgen kann. Die Punkte im Fallbeispiel 1, (in gleicher Lage in den 3 Programmen positioniert und auf denen die Quer – und Längsprofile aufgebaut sind) wurden so ausgewählt, dass sie gleichzeitig auch Elementzentren in SRH-2D darstellen. Dieser Nachteil ist auch in den Querprofilen der Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe bei den Versuchsvarianten mit grobem Netz zu beobachten: das Profil gründet auf 4 statt wie bei den anderen Programmen auf 5 Punkten, da nur 4 Elemente in Querrichtung vorhanden sind bzw. 4 Elementzentren, in denen SRH-2D die Werte der gesuchten Größen zeigt.

Bei der Beobachtung der Wechselbeziehung zwischen Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe in SRH-2D lassen sich vergleichbare Schlüsse wie für die oben behandelten Programme FESWMS und Hydro_AS-2D ziehen. Es wurde auch hier die „slip-Bedingung“ eingesetzt und es ist in den Querprofilen erneut zu beobachten, dass die Fließgeschwindigkeit nicht nur von der Modellkrümmung sondern auch von der Reibung in den Modellseitenrändern beeinflusst wird.

Die Ergebnisse der SRH-2D-Berechnungen sind in Quer- und Längsprofilen für Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe und für alle Versuchsvarianten in MS Excel-Graphiken dargestellt. (Ae3.1.1-Ae3.1.12(S. Ae25- S. Ae28) , Ae3.2.1-Ae3.2.12(S. Ae29- S. Ae32), Ae3.3.1-Ae3.3.12 (S. Ae33- S. Ae36))

Zwischenfazit:

Es lassen sich für die **Ergebnisbeobachtungen** folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Auswahl einer adäquaten Visualisierungsvariante ist von besonderer Wichtigkeit für die richtige Auslegung der Ergebnisse. Sie verringert gleichzeitig die Fehlerwahrscheinlichkeit beim Ergebnisanalysieren. Beispiel für

Visualisierungsmöglichkeiten sind die Änderung des Färbungsintervalls, die Quer – und Längsprofilbildung in MS Excel, die Darstellung der Bewegung von Wasserteilchen in Video, Fließgeschwindigkeiten in vektorieller Form etc.

- Detaillierte Kenntnisse über die Vor – und Nachteile der Programme sowie über die Vielfalt von Visualisierungsmöglichkeiten verleihen dem Programmanwender Flexibilität bei der Lösung von Problemen unterschiedlicher Art. (z.B. „no-slip-Bedingung“ in Hydro_AS-2D)

7.3.2 Sensitivitätsanalyse

Eine andere Herangehensweise zur Auseinandersetzung mit den Ergebnissen von Fallbeispiel 1 ist die Sensitivitätsanalyse.

Bei der **Sensitivitätsanalyse** wird die Auswirkung der Feinheitsänderung im Modellelementnetz auf die Genauigkeit der Ergebnisse sowie die Auswirkung der Sohlrauheitsänderung auf die Fließgeschwindigkeit, Wasserspiegellage und Wassertiefe untersucht. Dabei werden die Ergebnisse aus folgenden Kombinationen einem Vergleich unterzogen.

a) feines Netz + Material 1 mit Abkürzung: **Mat1fein**

b) grobes Netz + Material 1 mit Abkürzung: **Mat1grob**

c) feines Netz + Material 2 mit Abkürzung: **Mat2fein**

d) grobes Netz + Material 2 mit Abkürzung: **Mat2grob**

Bei der Untersuchung der Gegenüberstellungen zwischen den o.g. Kombinationen sollen folgende Bedingungen erfüllt werden:

- In den Fällen, in denen Material 2 (glatte Betondecke der Sohle) eingesetzt wird, soll die Fließgeschwindigkeit höher als in den Fällen mit Material 1 (Sohlbedeckung aus grobem Boden) sein.
- In den Fällen, in denen Material 1 (Sohlbedeckung aus grobem Boden) eingesetzt wird, sollen die Wasserspiegelwerte höher als die für Material 2 (glatte Betondecke der Sohle) sein.

Es wird keine direkte Validierung der Ergebnisse aus den Berechnungen in Fallbeispiel 1 und Fallbeispiel 2 durchgeführt. Sie wird durch die Berechnung eines Modells aus der Masterarbeit von Matthias Trauntschnig in Fallbeispiel 3 indirekt erfolgen, wo die Ergebnisse der ausgewählten 2D-Hydraulik-Softwareprodukte mit den Ergebnissen aus Laborversuchen,

Numerik und 1D- Hydraulik-Softwares verglichen werden. Die Aufgabe ist so gestellt, damit vorrangig die Auswirkung der Änderung beider Versuchsvariablen (Feinheit des Elementnetzes und Rauheit) untersucht wird, ohne Bezug auf die genauen Ergebnisse. Untersucht wird, ob folgende auf hydraulischen Formeln basierten Bedingungen, erfüllt werden:

- Die Fließgeschwindigkeit in den Fällen mit Material 2 (glatte Betondecke der Modellsohle) soll höher als Fließgeschwindigkeit bei Material 1 (grobe Bodendecke der Modellsohle) sein.
- Die Werte des Wasserspiegelniveaus bzw. der Wassertiefe in den Fällen mit Material 1 (grobe Bodendecke der Modellsohle) sollen höher als die Wassertiefe bei Material 2 (glatte Betondecke der Modellsohle) sein.

7.3.2.1 Softwareprodukt FESWMS. Auswirkung des Rauheitsbeiwertes und der Feinheit des Netzes

Eine Besonderheit der Modellierung von Strömungsprozessen mit 2D-Hydrauliksoftware besteht darin, dass nur diese Ergebnisse aus der Programmberechnung für richtig gelten dürfen, die in dem Modellbereich liegen, der von den vom Anwender im Voraus definierten Randbedingungen ein Drittel von der Länge des Modells (weit definiert) entfernt ist. Der Grund dafür ist eine sog. Notwendigkeit von „Entwicklung“ des Strömungsprozesses.

Das Beispiel, das diese Besonderheit veranschaulicht, ist bei den Modellen mit groben Elementnetzen zu beobachten: Bei Gegenüberstellung von A1.2.1.1 (S. A4)/A1.4.1.1 (S. A10) mit A1.2.1.2 (S. A4)/A1.4.1.2 (S. A10) für die Geschwindigkeit, A1.2.1.1 (S. A5)/A1.4.2.1 (S. A11) und A1.2.2.2 (S. A5)/A1.4.2.2 (S. A11) für die Wasseroberflächenniveaus und A1.2.1.1 (S. A6)/A1.4.3.1 (S. A12) ebenso A1.2.3.2 (S. A6)/A1.4.3.2 (S. A12) für die Wassertiefe. In diesen sind am Modellanfang unbegründete Unterschiede in der Tendenz der Wertänderung aller Größen zwischen Mat1grob und Mat2grob zu beobachten. In den MS-Excel-Längsprofilen: Ae1.1.10-Ae1.1.12 (S. Ae4), Ae1.2.10-Ae1.2.12(S. Ae8), Ae1.3.10-Ae1.3.12(S. Ae12) gelten alle Größen als falsch bis zu dem Punkt, der 6.15 Meter vom Modellanfang entfernt ist. Ab diesem Punkt sind die Wertänderungsverhalten vergleichbar und die Bedingungen für niedrigere (im Vergleich zu Material 2-Fälle) Geschwindigkeit und höhere Wasserspiegelniveaus und Wassertiefen bei Material 1 sind erfüllt. Diese Bedingungen sind nicht erfüllt für die Ergebnisse zu Feinnetzvarianten, was Fehler in den Berechnungen

des FESWMS-Programmes zeigt: Gegenüberstellungen A1.1.1.1 (S. A1)/A1.2.1.1 (S. A7) und A1.1.1.2 (S. A1)/A1.3.1.2 (S. A7) für die Geschwindigkeit, A1.1.2.1 (S. A2)/A1.3.2.1 (S. A8) und A1.1.2.2 (S. A2)/A1.3.2.2 (S. A8) für die Wasseroberflächenniveaus und A1.1.3.1 (S. A3)/A1.3.3.1 (S. A9) ebenso A1.1.3.2 (S. A3)/A1.3.3.2 (S. A9) oder Ae1.1.10-Ae1.1.12 (S. Ae4), Ae1.2.10-Ae1.2.12(S. Ae8), Ae1.3.10-Ae1.3.12(S. Ae12).

Bei einer Gegenüberstellung derselben Versuchsvarianten in Bezug auf die Feinheit des Elementnetzes beobachtet man eine zu große Differenz zwischen den Fein- und Grobnetzwerten: Für die Fließgeschwindigkeiten- A1.1.1.1 (S. A1)/A1.2.1.1 (S. A4) ebenso A1.1.1.2 (S. A1)/A1.2.1.2 (S. A4) (Material 1) und A1.2.1.1 (S. A7)/A1.4.1.1 (S.A 10) ebenso A1.3.1.2 (S. A7)/A1.4.1.2 (S. A10) (Material 2), für die Wasseroberflächenniveaus- A1.1.2.1 (S. A2)/A1.2.1.1 (S. A5) ebenso A1.1.2.2 (S. A2)/A1.2.2.2 (S. A5) (Material 1) und A1.3.2.1 (S. A8)/A1.4.2.1 (S. A11) ebenso A1.3.2.2 (S. A8)/A1.4.2.2 (S. A11) (Material 2) bzw. A1.1.3.1 (S. A3)/A1.2.1.1 (S. A6) ebenso A1.1.3.2 (S. A3)/A1.2.3.2 (S. A6) und A1.3.3.1 (S. A9)/A1.4.3.1 (S. A12) ebenso A1.3.3.2 (S. A9)/A1.4.3.2 (S. A12) für die Wassertiefe; und die MS-Excel-Darstellungen: Ae1.1.1-Ae1.1.12 (S. Ae1- S. Ae4), Ae1.2.1-Ae1.2.12 (S. Ae5- S. Ae8), Ae1.3.11-Ae1.3.12 (S. Ae9- S. Ae12). Diese Beobachtungen liefern einen Nachweis dafür, dass die allgemein bekannte Aussage „je feiner das Netz ist, desto genauer die Ergebnisse sind“ nur in der Theorie zutrifft. Empirisch wurde in dieser Masterarbeit jedoch nachgewiesen, dass Strömungssimulationen durch Softwareprogramme, die auf der Finite – Elemente - Methode und dem quadratischen Elemententyp gründen, bei einer zu großen Verfeinerung des Netzes realitätsferne Ergebnisse liefern.

Schlussfolgernd kann man sagen, dass sich der Einsatz gröberer Netze für das Programm FESWMS empfiehlt. Dabei gleicht sich das Risiko vor Genauigkeitsmangel bei grobem Netz durch die Fehler, die gegeben falls beim Einsatz von feinen Netzen auftreten würden, aus. Basierend auf der Erfahrung bei der Fertigstellung dieser Masterarbeit lässt sich zum Zweck der Optimierung der Arbeit mit FESWMS empfehlen, dass man eine Gruppe von Versuchsmodellen, deren Netze in kleinen Schritten verfeinert werden, untersucht, bis eine optimale Elementgröße erreicht wird.

Je nach der Aufgabe der einzelnen Untersuchung sollen die Ergebnisse aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet und analysiert werden. Bei der Untersuchung der Wertänderungen der Größen, die durch die Modellsohlenneigung und die Rauheit bedingt sind, soll der Akzent auf die mittleren Längsprofile fallen; bei einer Untersuchung der Auswirkung auf die Ergebnisse, die durch Modellkrümmung bedingt ist, soll das Augenmerk auf die Querprofile

und auf die linken und rechten Längsprofile gerichtet sein. Es fällt auf, dass die Fließgeschwindigkeitsänderung in den Fällen mit einem Feinnetz für das rechte Längsprofil konkav und für das linke Längsprofil konvex nach oben ist.

Die Schlussfolgerungen über die Auswirkung einer Änderung des Rauheitsbeiwerts und der Feinheit des Netzes bei dem Softwareprodukt FESWMS sind im Folgenden zusammengefasst:

- Bei einem gröberen Elementnetz ist die Modelllänge, die für die „Entwicklung“ der Strömung notwendig ist, grösser als die Modelllänge bei einem feineren Elementnetz.
- Die Auswirkung der Änderung des Sohlenrauheitsbeiwerts ist nur in den Varianten mit grobem Elementnetz richtig berechnet.
- Bei einem zu feinen Elementnetz weichen die Modellergebnisse von den erwarteten Ergebnissen ab.
- Je nach dem Zweck der Untersuchung sollen die Modellergebnisse unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gesichtspunkte betrachtet werden.

7.3.2.2 Softwareprodukt Hydro_As-2D. Auswirkung des Rauheitsbeiwerts und der Feinheit des Netzes

Bei der vergleichenden Nebeneinanderstellung der Ergebnisse, die durch das Programm Hydro_As-2D berechnet wurden, kann man den Ergebnissen aus der Arbeit mit FESWMS sehr ähnliche Schlussfolgerungen ziehen: bei der Gegenüberstellung von Grobnetzfällen mit Material 1 (grobe Bodendecke der Modellsohle) und Fällen mit Material 2 (glatte Betondecke der Modellsohle): A2.2.1.1 (S. A16)/A2.4.1.1 (S. A22) und A2.2.1.2 (S. A16)/A2.4.1.2 (S. A22) für die Fließgeschwindigkeit, A2.2.2.1 (S. A17)/A2.4.2.1 (S. A23) und A2.2.2.2 (S. A17)/A2.4.2.2 (S. A23) für das Wasseroberflächenniveau, A2.2.3.1 (S. A18)/A2.4.3.1 (S. A24) sowie A2.2.3.2 (S. A18)/A2.4.3.2 (S. A24) für die Wassertiefe kann man beobachten, dass die Fließgeschwindigkeitswerte bei Mat2grobfall höher als diese beim Mat1grobfall sind und die Wasseroberfläche- und Wassertiefewerte niedriger für den Mat1grobfall sind. Daraus lässt sich folgern, dass Hydro_As-2D mit groben Netzen richtig funktioniert.

Bei den Versuchsvarianten Mat1fein und Mat2fein hat Hydro_As-2D ohne offensichtlichen Grund dafür und ohne Anzeige von Fehlermeldungen keine Ergebnisse geliefert, was man als einen Nachteil von Hydro_As-2D bei der Berechnung von Feinnetzfällen ansehen kann. Die

Arbeit mit diesem Programm wird trotzdem fortgeführt, um zu welchen Berechnungsergebnissen zu kommen: Das erfolgt durch eine Abweichung von der üblichen Programmbedienung: Es wird eine Vielzahl von Probestarten durchgeführt, wobei unterschiedliche Werte der Modellparameter als Eingangsdaten manuell in die *.dat-Datei eingegeben werden, bis Hydro_As-2D Ergebnisse ausgibt. Dieses Programmstartverfahren ist jedoch nicht empfehlenswert, weil die in *.dat-Dateien stehenden Daten nicht anwenderfreundlich organisiert sind. Bei der Gegenüberstellung von A2.1.1.1 (S. A13)/A2.3.1.1 (S. A19) sowie A2.1.1.2 (S. A13)/A2.3.1.2 (S. A19) ist es zu beobachten, dass die Fließgeschwindigkeitswerte bei Material 1 (grobe Bodendecke der Modellsohle) niedriger als bei Material 2 (glatte Betondecke der Modellsohle) sind, die Differenz zwischen ihnen dennoch viel kleiner als in den Grobnetzfällen ist. In A2.1.1.1 (S. A13)/A2.2.1.1 (S. A16) sowie A2.1.1.2 (S. A13)/A2.2.1.2 (S. A16) und A2.3.1.1 (S. A19)/A2.4.1.1 (S. A22) sowie A2.3.1.2 (S. A19)/A2.4.1.2 (S. A22) sind die Differenzen zwischen den Grobnetz- und Feinnetzgeschwindigkeitswerten zu groß. Im Endeffekt erweist sich das manuelle Eingeben von Werten der Modellparameter in die *.dat-Dateien als keine gute Alternative für die Arbeit mit Hydro_As-2D. Alle diskutierten Ergebnisse sind noch einmal anhand der MS-Excel-Graphiken, die Quer- und Längsprofile der Fließgeschwindigkeiten- Ae2.1.1-Ae2.1.12 (S. Ae13- S. Ae16); der Wasseroberflächenniveaus- Ae2.2.1-Ae2.2.12 (S. Ae17- S. Ae20) und der Wassertiefe- Ae2.2.1-Ae2.2.12 (S. Ae21- S. Ae24) darstellen, nachweisbar.

Schlussfolgernd kann man für die Arbeit mit Hydro_As-2d in Bezug **Auswirkung des Rauheitsbeiwerts und der Feinheit des Netzes** folgendes zusammenfassen:

- Die Auswirkung der Änderung des Sohlenrauheitsbeiwerts wird von Hydro_As-2D realitätsgetreu wiedergeben.
- Bei einer zu großen Verfeinerung könnte es sein, dass Hydro_As-2D die Berechnungen überhaupt nicht startet.
- Es empfiehlt sich nicht, dass man Eingangsdaten in *.dat-Format manuell eingibt.

7.3.2.3 Softwareprodukt SRH-2D. Auswirkung des Rauheitsbeiwerts und der Feinheit des Netzes

SRH-2D stellt die Möglichkeit für Visualisierung der Ergebnisse durch SMS nicht, deshalb erfolgen die Gegenüberstellungen der Versuchsvarianten durch die Quer- und Längsprofile in MS-Excel-Graphiken: Fließgeschwindigkeiten- Ae3.1.1-Ae3.1.12 (S. Ae25- S. Ae28),

Wasseroberflächenniveaus- Ae3.2.1-Ae3.2.12 (S. Ae29- S. Ae32) und Wassertiefe Ae3.3.1-Ae3.3.12(S. Ae33- S. Ae36).

Die Größen in allen Versuchsvarianten reagieren adäquat auf Änderungen des Rauheitsbeiwerts. Auch Änderungen an der Netzfeinheit des Elementnetzes werden in den Ergebnissen entsprechend widerspiegelt, was einen Beweis dafür liefert, dass sich durch das Programm SRH-2D Modelle sowohl mit gröberen als auch mit feineren Elementnetzen simulieren lassen. Es lässt sich für diese Hydrauliksoftware folglich die Aussage treffen, dass je feiner das Elementnetz ist, desto genauer die Ergebnisse sind.

Schlussfolgernd kann man für SRH-2D sagen:

- SRH-2D berechnet Strömungsmodelle sowohl mit gröberen als auch mit feineren Elementnetzen.
- Im Unterschied zu den anderen Programmen bietet SRH-2D weniger Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse.

8 Fallbeispiel 2

8.1. Aufgabenstellung und Fallbeispielsbeschreibung

Die Aufgabe besteht darin, das Vollmodell (1:1) der Bauumleitung KW Gössendorf-Mur, das in der Diplomarbeit von Matthias Trauntschnig ausführlich als Labormodell am Wasserinstitut der TU Wien erarbeitet wurde, zu untersuchen.

Ziel der Untersuchung ist es, die Geschwindigkeiten, Wasserspiegelniveaus und Wassertiefen für die gewählten Messpunkte mit den 3 Softwareprogrammen (FESWMS, Hydro-As-2D, SRH-2D) zu berechnen. Die Ergebnisse der 3 Softwareprogramme müssen dann miteinander verglichen werden, ohne die Ergebnisse aus der Diplomarbeit von Matthias Trauntschnig zu beachten.

Die Schlussfolgerungen, die nach der Erarbeitung und Analyse von Fallbeispiel 1 gezogen wurden, dienen als Grundlage für die Erarbeitung der Modelle im Fallbeispiel 2. Dabei wird es gezielt darauf geachtet, die Nachteile der Softwareprogramme zu umgehen, die bei der Analyse der Ergebnisse aus Fallbeispiel 1 identifiziert wurden.

Die Modelle im Fallbeispiel 2 haben folgende Parameter:

- Die Punkte, die für den Vergleich der drei Programme in den Excel-Diagrammen angewendet werden, sind so ausgewählt, dass sie nicht unbedingt gleichzeitig auch Elementzentren sind. Das ist ein Nachteil bei der Berechnung von Modellen in SRH-2D und man soll seine Auswirkung auf die Ergebnisse bei der Analyse der Resultate in Fallbeispiel 2 in Betracht ziehen.
- Es soll ein nicht zu feines Elementnetz gewählt werden, damit man nicht auf dieselben Probleme wie bei der Berechnung von Fallbeispiel 1 (FESWMS und Hydro_As-2D) stößt.
- Die Vergleichspunkte – die ersten zwei (1l – 1r) und die letzten zwei in Strömungsrichtung entlang Modell (Abb. BD, S. 96) – sollen von den Randbedingungen ausreichend entfernt sein, damit eine „Entwicklung des Strömungsprozesses“ ermöglicht wird.

Ähnlich wie im Fallbeispiel 1 sind auch die Ergebnisse von Fallbeispiel 2 keiner direkten Validierung unterzogen. Eine Ergebnisvalidierung erfolgt in Fallbeispiel 3. Die Fragestellung von Fallbeispiel 3 ist gezielt so gestellt, so dass ausschließlich die Auswirkung der zwei

Versuchsvariablen (Änderung des Durchflusswertes und der Rauigkeit) auf die Modelle untersucht wird.

Abbildung BA. gibt einen Überblick über die Baumleitung und Baugrube des KW Gössendorf. [Trauntschnig 2008, S. 2, Abb. 1.1]

Abbildung BB stellt einen Grundriss der Baumleitung und Baugrube mit Messpunkten dar, die zu den Zwecken der Untersuchung ausgewählt werden. (9 Messpunkte fürs linke Ufer und 9 Messpunkte fürs rechte Ufer Baumleitung Gössendorf [Trauntschnig 2008, S. 96, Abb. 6.29]

Abbildung BC stellt ein Netz (*Hybrid mesh*, besteht aus drei - und viereckigen Elementen) aus finiten Elementen für das Modell dar.

Die Abbildungen BC', BC'', BC''' geben Modellinformation für FESWMS (Abbildung BC', Hydro-As-2D (Abbildung BC'') bzw. SRH2D-v2 (Abbildung BC''').

In Abbildung BD sind die zu untersuchenden Messpunkte abgebildet.

Folgende **Versuchsvariablen** werden verwendet:

- HQ30 - Durchfluss von $975 \text{ m}^3/\text{s}$ und HQ100-Durchfluss von $1325 \text{ m}^3/\text{s}$
- verschiedene Rauheitsbeiwerte für die Böschung ($K_{st}=5/n=0.2$; $K_{st}=10/n=0.1$; $K_{st}=5/n=0.2$)
- verschiedene Rauheitsbeiwerte für die Sohle der Baumleitung ($K_{st}=15/n=0.0667$; $K_{st}=25/n=0.04$; $K_{st}=22,5/n=0.0444$)

(nach Strickler: $K_{st}[m^{1/3}/s]$ / nach Manning: ($n=1/K_{st}$)

Die Berechnungen werden in folgenden **drei Varianten** durchgeführt:

1) HQ30_5_15

HQ30 - Ausbaudurchfluss $975 \text{ m}^3/\text{s}$;

Böschung – Baumleitung ($K_{st}=5/n=0.2$)

Sohle – Baumleitung ($K_{st}=15/n=0.0667$)

2) HQ30_10_25

HQ30 - Ausbaudurchfluss $975 \text{ m}^3/\text{s}$;

Böschung – Baumleitung ($K_{st}=10/n=0.1$)

Sohle – Baumleitung ($K_{st}=25/n=0.04$)

3) HQ100_5_22,5

HQ100 - Ausbaudurchfluss $1325 \text{ m}^3/\text{s}$;

Böschung – Baumleitung ($K_{st}=5/n=0.2$)

Sohle – Baumleitung ($K_{st}=22.5/n=0.0444$)

Abbildungsbeschreibung:

- Abbildung B1': farbige Darstellung mit Legende der Materialien in den jeweiligen Modellbereichen; im gelben Viereck sind die Rauheitsbeiwerte der jeweiligen Materialien nach Strickler und Manning angegeben.
- Abbildung B1'': farbige Darstellung der Modellhöhe
- Abbildung B1.1.1 und Abbildung B1.2.1 : farbige Darstellungen der Geschwindigkeitsfelder für FESWMS und Hydro - As - 2D
- Abbildung B1.1.2 und Abbildung B1.2.2 : farbige Darstellungen der Wasserspiegelniveaus für FESWMS und Hydro - As - 2D
- Abbildung B1.1.3 und Abbildung B1.2.3 : farbige Darstellungen der Wassertiefen für FESWMS und Hydro_As - 2D

Durch das Programm SRH-2D kann man keine graphische Darstellung der Ergebnisse erstellen.

Die Weißflecken in den Darstellungen durch FESWMS ergeben sich durch die Verwendung des Iterationsmodule von FESWMS (steering), wirken sich jedoch nicht auf die untersuchten Messpunkte aus. Obwohl die Berechnungen im Spindown-Modus für jede der 3 Versuchsvarianten jeweils ca. 6-9 Stunden in Anspruch genommen haben, konnte durch das Programm die erzielte 100%-Konvergenz nicht erreicht werden.

- Färbungsintervall für alle Lagepläne= 0, 5

8.2 Ergebnisse des zweiten Fallbeispiels

Die farbigen Lagepläne zu Fließgeschwindigkeit, Wasseroberflächenniveaus und Wassertiefen liefern nicht eine eindeutige Vergleichsgrundlage, deshalb werden die Werte der Messpunkte in MS-Excel - Diagrammen dargestellt, organisiert in 2 Längsprofilen (für das linke und das rechte Ufer der Baumleitung):

- Abbildung Be1.1 : Excel - Diagramm (linkes und rechtes Ufer) für die Punkthöhenlage

- Abbildung Be1.2 : Excel - Diagramme (linkes und rechtes Ufer) für den Vergleich der Geschwindigkeiten in den 3 Programmen
- Abbildung Be1.3 : Excel - Diagramm (linkes und rechtes Ufer) für den Vergleich der Wasserspiegelniveaus in den 3 Programmen
- Abbildung Be1.4: Excel - Diagramm (linkes und rechtes) für den Vergleich der Wassertiefen in den 3 Programmen

Alle weiteren Abbildungsbezeichnungen formieren sich analog auch für Versuchsvariante HQ30_10_25 und Versuchsvariante HQ100_5_22,5 nach der unten aufgeführten Formel zur Abbildungsbezeichnung:

Formel der Abbildungsbezeichnung:

Abbildung $ijkl$

i- Fallbeispiel: zeigt, zu welchem Fallbeispiel die Abbildung gehört (**Aufgabe 1, 2, 3**)

Fallbeispielnummer	1	2	3
Bezeichnung	A	B	C

Tabelle 8.1

j- Versuchsvariantennummer: zeigt, zu welcher Versuchsvariante die Abbildung gehört (**HQ30_5_15, HQ30_10_25, HQ100_5_22,5**)

Versuchsvariante	HQ30_5_15	HQ30_10_25	HQ100_10_22,5
Nummer	1	2	3

Tabelle 8.2

k- Programmnummer: zeigt, zu welchem Programm die Abbildung gehört (**Programm FESWMS, Hydro-As-2D, SRH-2D**)

Programm	FESWMS	Hydro-As-2d	SRH-2D
Nummer	1	2	3

Tabelle 8.3

l- Gesuchte Variable: zeigt, welche gesuchte Variable berücksichtigt wird (**Fließgeschwindigkeit „v“, Wasseroberflächennivea „w“, Wassertiefe „d“**)

Gesuchte Variable	v	w	d
Nummer	1	2	3

Tabelle 8.4

z. B. Eine Abbildung aus dem zweiten Fallbeispiel- (**B**), die Ergebnisse für Versuchsvariante: **HQ30_5_15-(1)** aus dem Programm: **FESWMS-(1)** und Darstellung der **Wassertiefe-(3)** ist die Abbildung mit Nummer **B1.1.3**.

Das Abbildungsverzeichnis ist in **Tabelle 8.5** aufgeführt:

Versuchsvariante	Programm	Gesuchte Variable	Abbildung
HQ30_5_15	FESWMS	v	B1.1.1 (S. B1)
		w	B1.1.2 (S. B3)
		d	B1.1.3 (S. B5)
	Hydro-As-2d	v	B1.2.1 (S. B2)
		w	B1.2.2 (S. B4)
		d	B1.2.3 (S. B6)
HQ30_10_25	FESWMS	v	B2.1.1 (S. B9)
		w	B2.1.2 (S. B11)
		d	B2.1.3 (S. B13)
	Hydro-As-2d	v	B2.2.1 (S. B10)
		w	B2.2.2 (S. B12)
		d	B2.2.3 (S. B14)
HQ100_5_22.5	FESWMS	v	B3.1.1 (S. B17)
		w	B3.1.2 (S. B19)
		d	B3.1.3 (S. B21)
	Hydro-As-2d	v	B3.2.1 (S. B18)
		w	B3.2.2 (S. B20)
		d	B3.2.3 (S. B22)

Tabelle 8.5 Abbildungsverzeichnis über die Ergebnisse aus Fallbeispiel 2

Für die unten aufgeführten Excel - Diagramme gilt folgendes Bezeichnungssystem:

Abbildung ijklm

i – Aufgabenbezeichnung: zeigt, zu welcher Aufgabe die Abbildung gehört (**Aufgabe 1, 2, 3**),

Tabelle 1

j - Excel-Diagramm: unterscheidet die Excel-Diagramme von den anderen Abbildungen (bezeichnet durch ein "e")

k – Versuchsvariantennummer: zeigt, zu welcher Versuchsvariante die Abbildung gehört (**HQ30_5_15, HQ30_10_25, HQ100_5_22,5**), **Tabelle 2**

l - Gesuchte Variable: zeigt, welche gesuchte Variable berücksichtigt wird (**Fließgeschwindigkeit „v“, Wasseroberflächennivea „w“, Wassertiefe „d“**), **Tabelle 4**

m - Abbildungsnummer

z. B. Für ine Abbildung aus Fallbeispiel 2- (**B**) in Excel (**e**) mit Ergebnisse für Versuchsvariante : **HQ30_10_25-(2)** und Nummer der Abbildung (**4**) haben wir Abbildung mit Nummer **Be2.4**.

Das Abbildungsverzeichnis ist in **Tabelle 8.6** dargestellt:

Versuchsvariante	Abbildung
HQ30_5_15	Be1.1-Be1.4 (S. B7, S. B8)
HQ30_10_25	Be2.1-Be2.4 (S. B15, S. B16)
HQ100_5_22.5	Be3.1-Be3.4 (S. B23, S. B24)

Tabelle 8.6

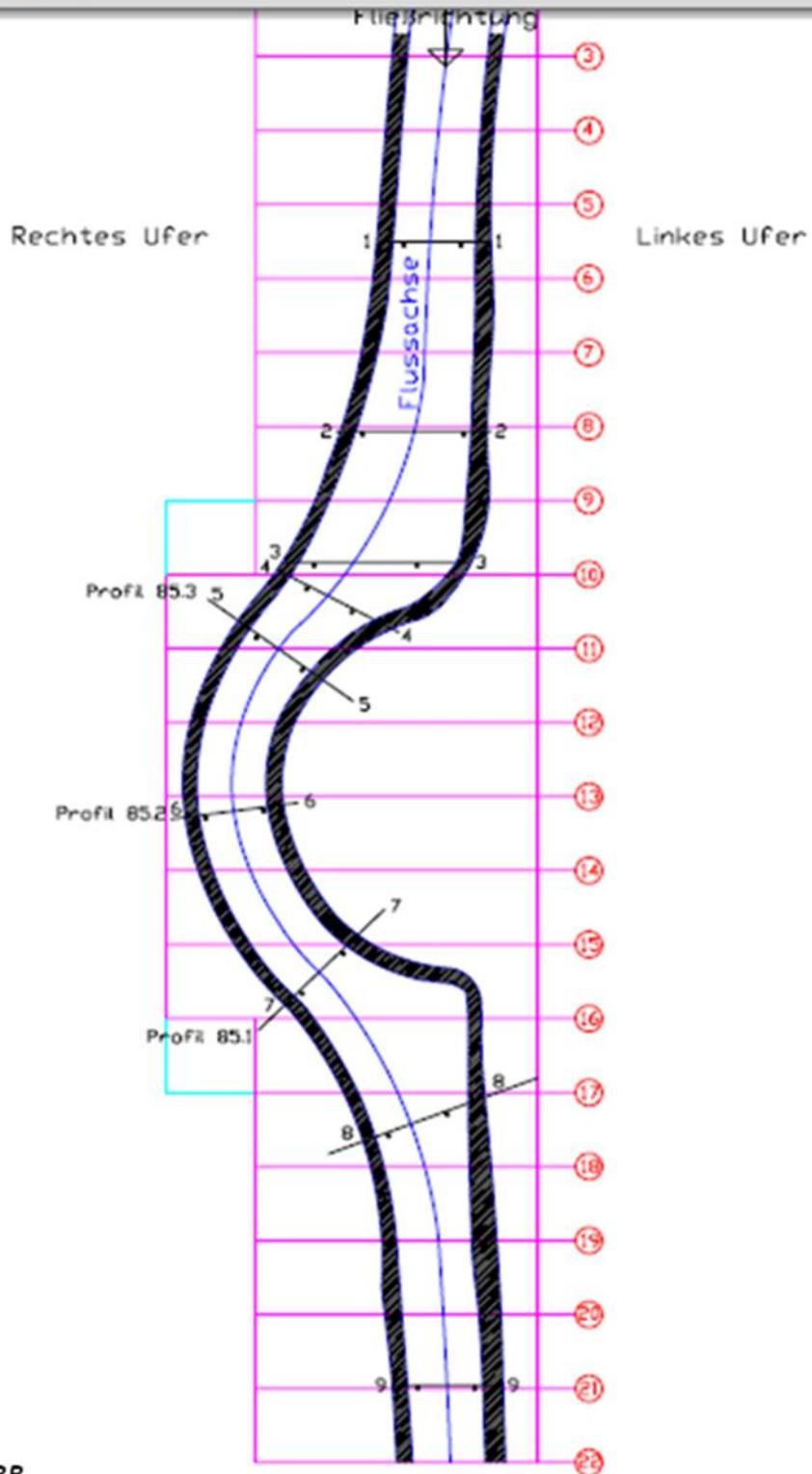


Abbildung BB

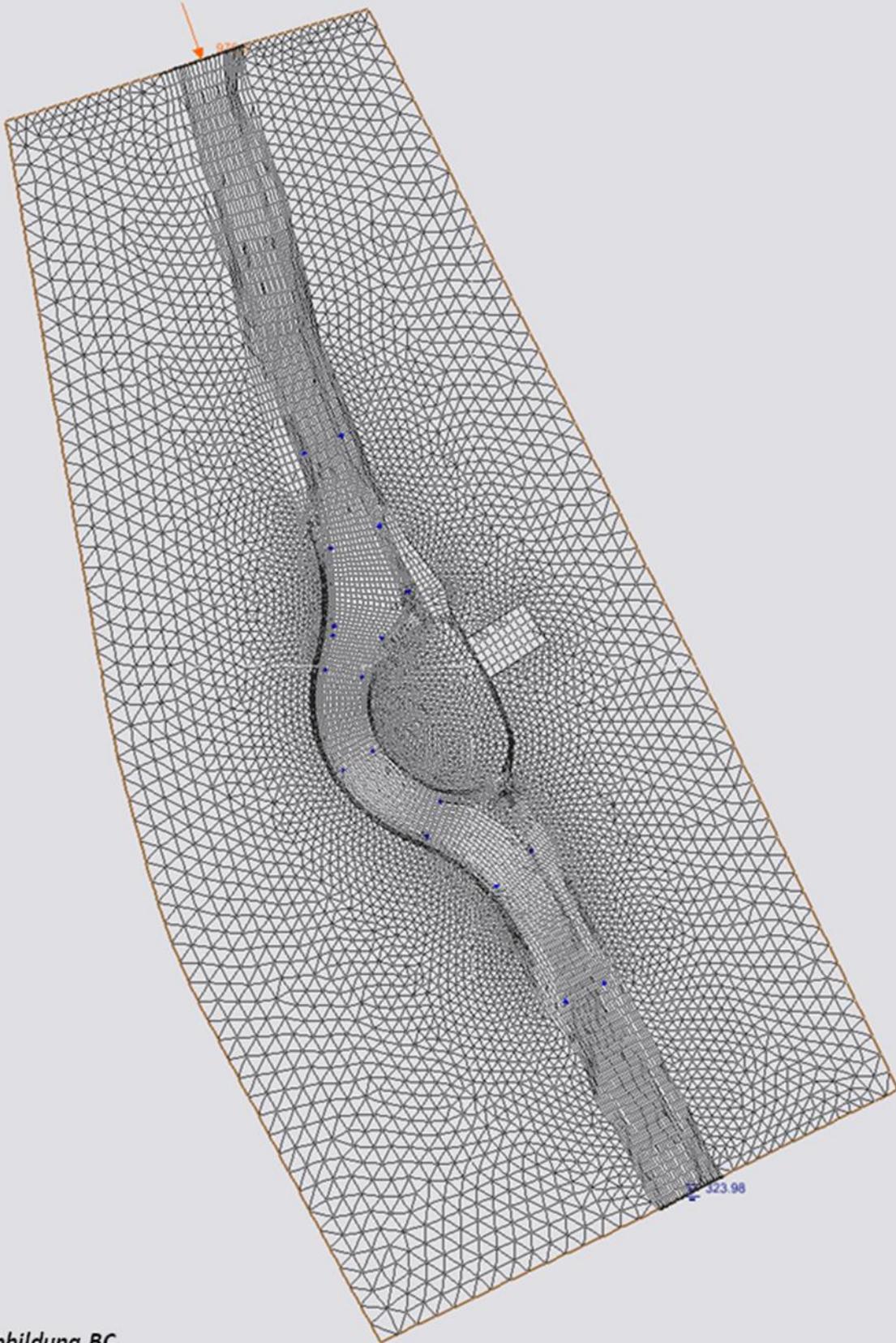


Abbildung BC

<p>Max. element front width: 1198 Max. node half band width: 23980</p>	<p>Element type: quadratic Num. of triangular elems: 9340 Num. of quadrilateral elems: 4915</p>
<p>Number of elements: 14255 Maximum element ID: 14255 Number of nodes: 33658 Maximum node ID: 33658</p>	<p>FESWMS info Number of Culverts: 0 Number of piers: 0 Number of weirs: 0 Number of drop inlets: 0 Max ceiling value: 0.0 Min ceiling value: 0.0</p>
<p>Minimum Z value: 316.00 Maximum Z value: 331.18</p>	

Abbildung BC'

<p>Max. element front width: 240 Max. node half band width: 241</p>	<p>Element type: linear Num. of triangular elems: 9340 Num. of quadrilateral elems: 4915</p>
<p>Number of elements: 14255 Maximum element ID: 14255 Number of nodes: 9702 Maximum node ID: 9702</p>	<p>GEN2DM info Model name: HYDRO_AS-2D</p>
<p>Minimum Z value: 316.00 Maximum Z value: 331.18</p>	

Abbildung BC''

<p>Max. element front width: 222 Max. node half band width: 222</p>	<p>Element type: linear Num. of triangular elems: 9340 Num. of quadrilateral elems: 4915</p>
<p>Number of elements: 14255 Maximum element ID: 14255 Number of nodes: 9702 Maximum node ID: 9702</p>	<p>GEN2DM info Model name: SRH-2D</p>
<p>Minimum Z value: 316.00 Maximum Z value: 331.18</p>	

Abbildung BC'''

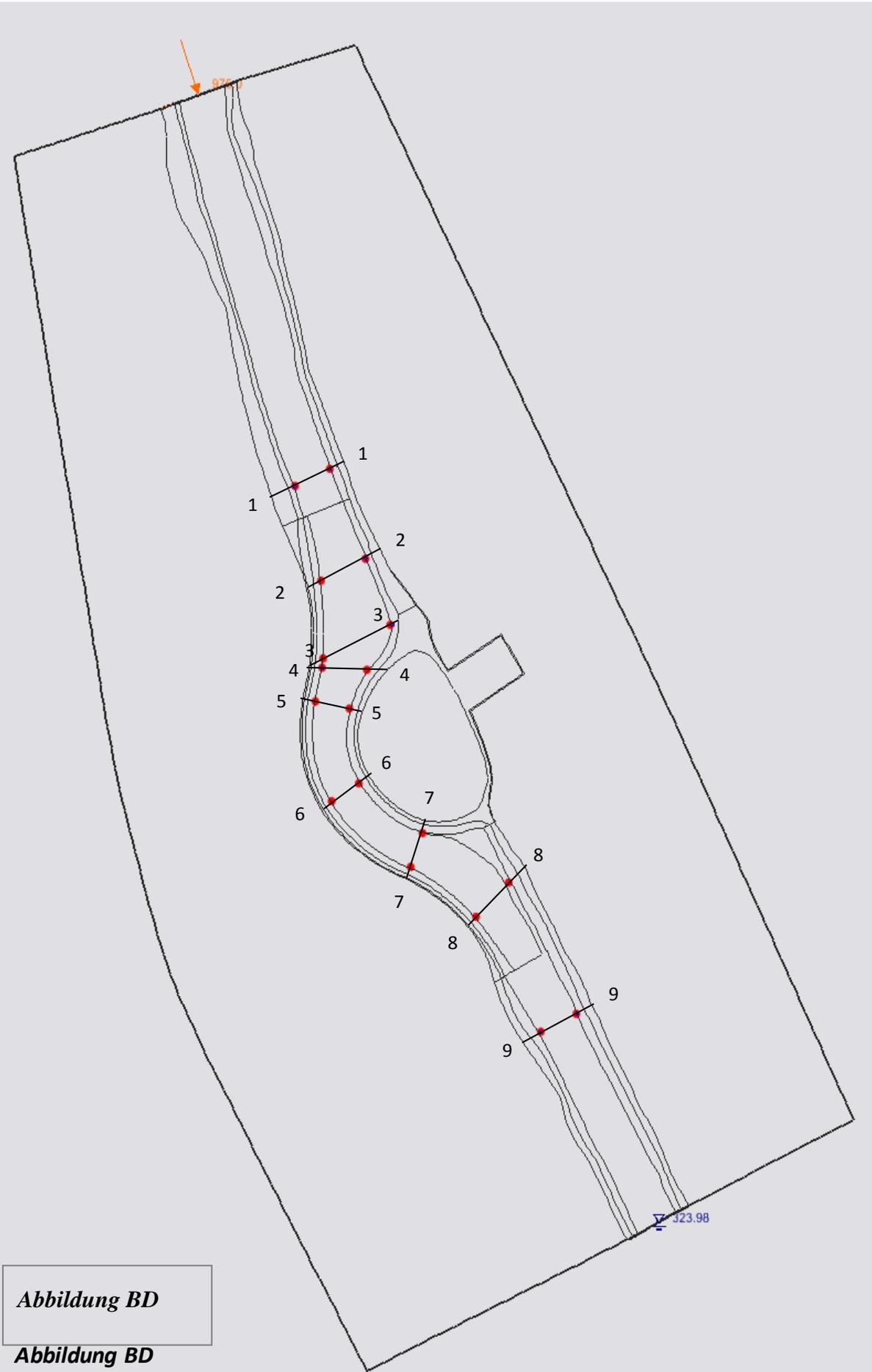


Abbildung BD

Abbildung BD

Materials Legend

-  Sohle_Mur
-  Böschung_Mur_schwach_bew
-  Oberkante_Begleitdamm_Mur
-  Sohle_Baumleitung
-  Böschung_Baumleitung
-  Oberkante_Damm_Baumleitung
-  Vorland_Gemischt
-  Baugrube

Sohle_Mur($k_{st}=33/n=0.0303$)
Böschung_Mur_schwach_bew.($k_{st}=10/n=0.1$)
Oberkante_Begleitdamm_Mur($k_{st}=6/n=0.1667$)
→Sohle_Baumleitung($k_{st}=15/n=0.0667$)
→Böschung_Baumleitung($k_{st}=5/n=0.2$)
Oberkante_Damm_Baumleitung($k_{st}=33/n=0.0303$)
Vorland_Gemischt($k_{st}=8/n=0.125$)
Baugrube($k_{st}=8/n=0.125$)

Anmerkung: Mit → sind die wechselnden Variablen angegeben.

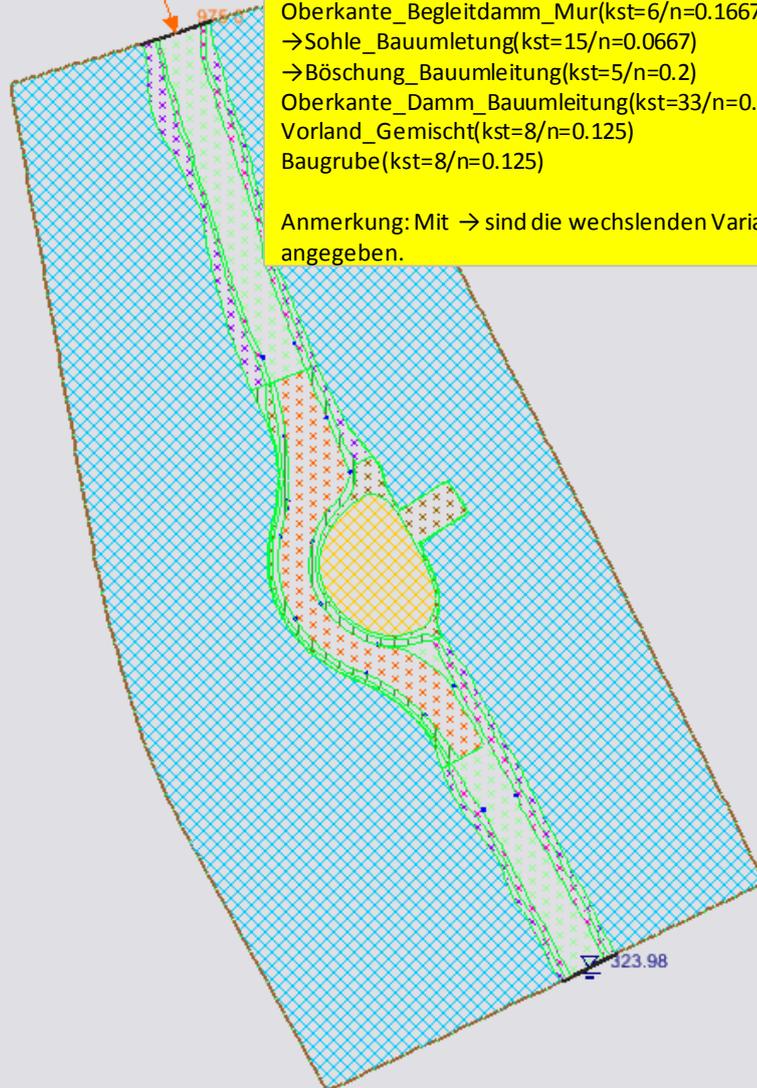
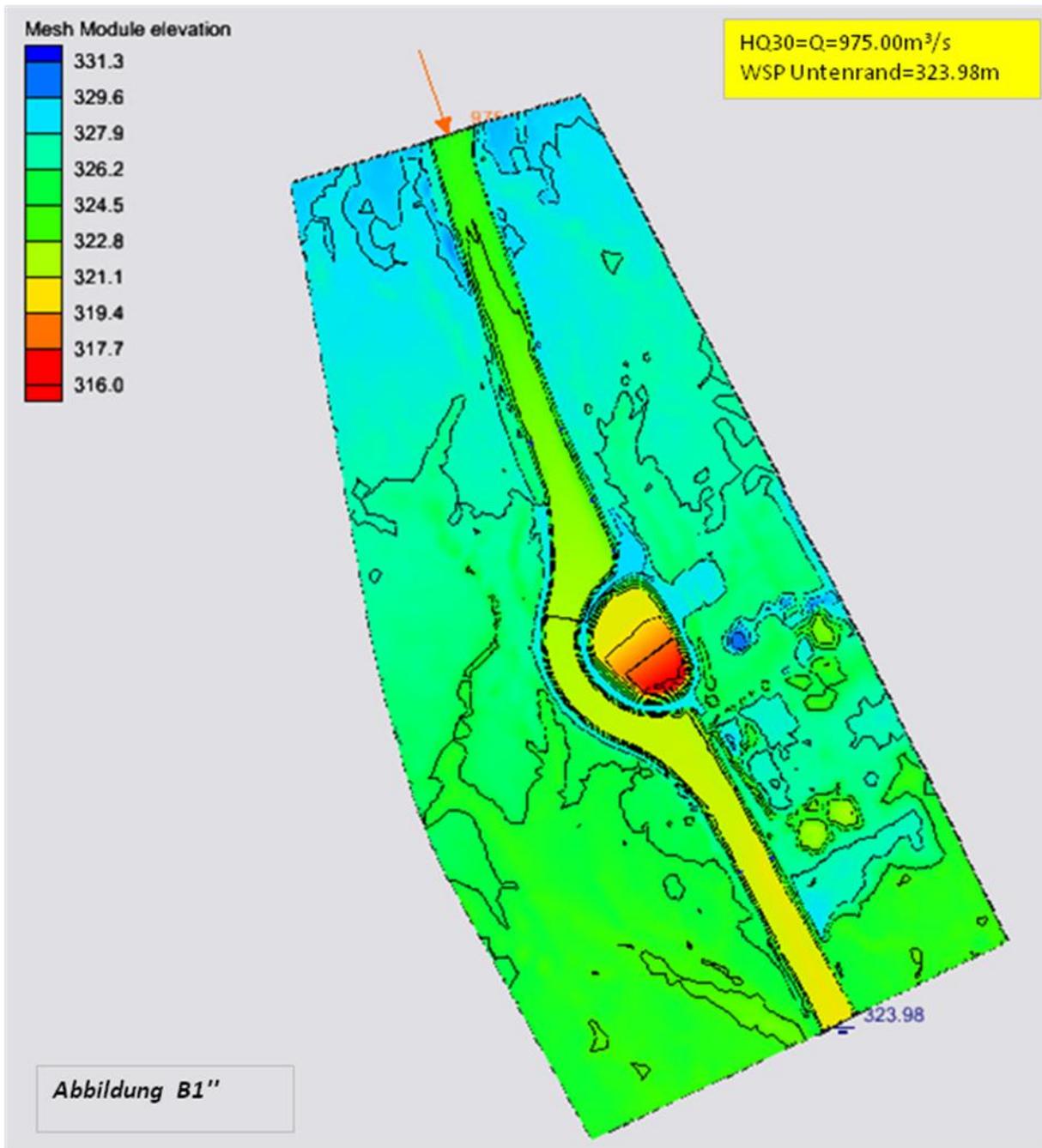


Abbildung B1'



Materials Legend

-  Sohle_Mur
-  Böschung_Mur_schwach_bew
-  Oberkante_Begleitdamm_Mur
-  Sohle_Baumleitung
-  Böschung_Baumleitung
-  Oberkante_Damm_Baumleitung
-  Vorland_Gemischt
-  Baugrube

- Sohle_Mur($k_{\sigma}=33/n=0.0303$)
- Böschung_Mur_schwach_bew.($k_{\sigma}=10/n=0.1$)
- Oberkante_Begleitdamm_Mur($k_{\sigma}=6/n=0.1667$)
- Sohle_Baumleitung($k_{\sigma}=25/n=0.04$)
- Böschung_Baumleitung($k_{\sigma}=10/n=0.1$)
- Oberkante_Damm_Baumleitung($k_{\sigma}=33/n=0.0303$)
-)
- Vorland_Gemischt($k_{\sigma}=8/n=0.125$)
- Baugrube($k_{\sigma}=8/n=0.125$)

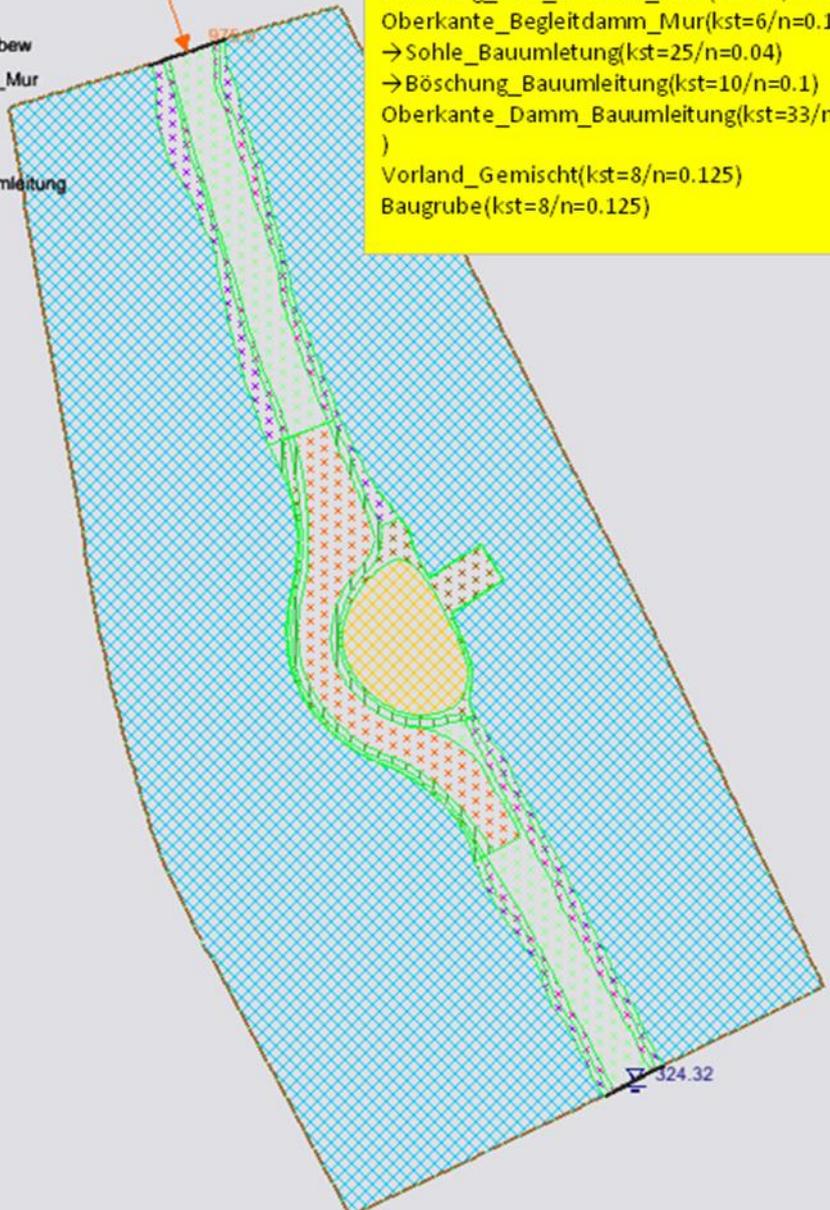
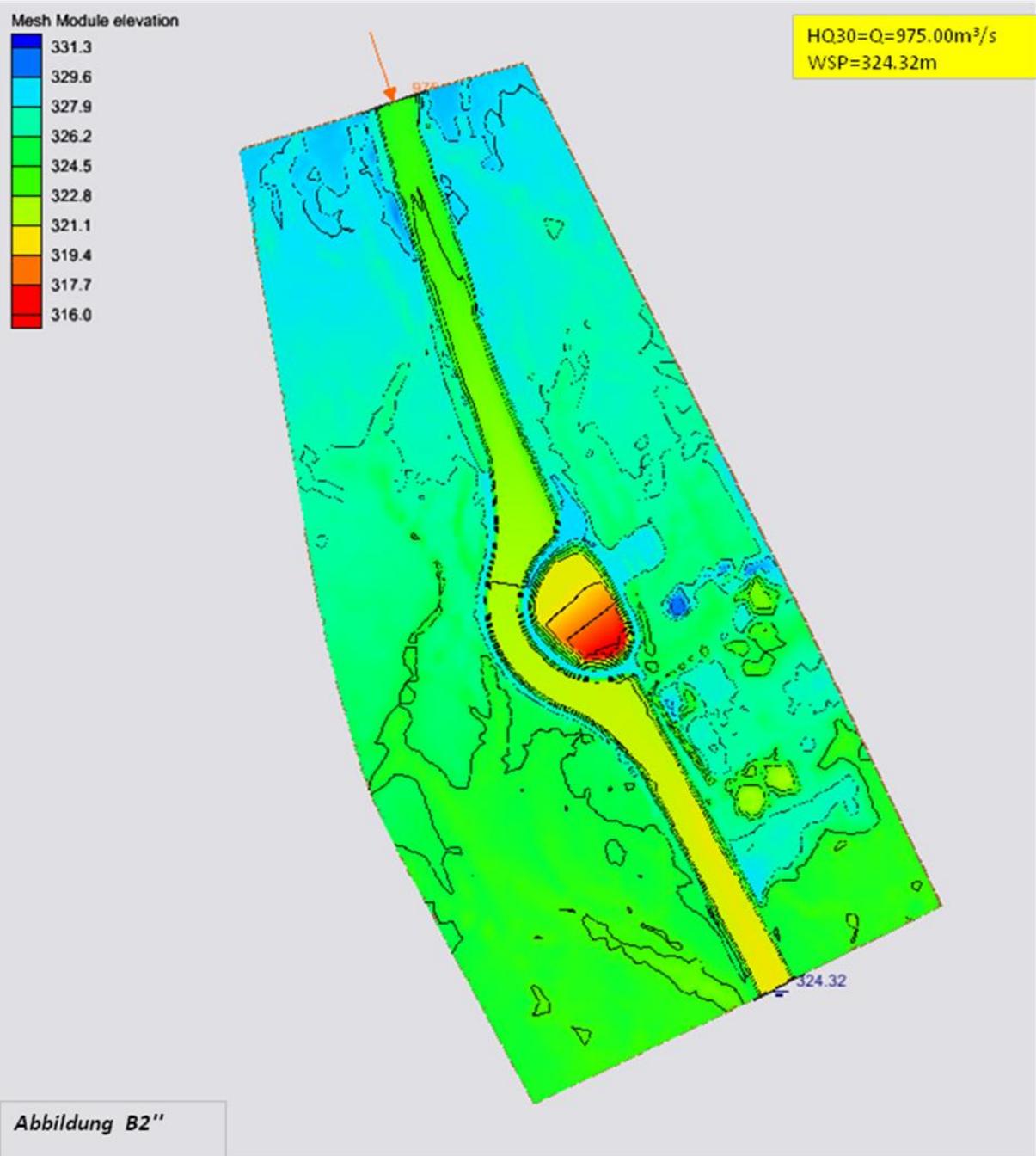


Abbildung B2'



Materials Legend

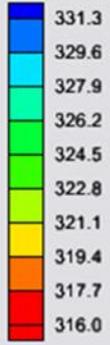
-  Sohle_Mur
-  Böschung_Mur_schwach_bew
-  Oberkante_Begleitdamm_Mur
-  Sohle_Baumleitung
-  Böschung_Baumleitung
-  Oberkante_Damm_Baumleitung
-  Vorland_Gemischt
-  Baugrube

- Sohle_Mur($k_{\alpha}=33/n=0.0303$)
- Böschung_Mur_schwach_bew.($k_{\alpha}=10/n=0.1$)
- Oberkante_Begleitdamm_Mur($k_{\alpha}=6/n=0.1667$)
- Sohle_Baumleitung($k_{\alpha}=22.5/n=0.0444$)
- Böschung_Baumleitung($k_{\alpha}=5/n=0.2$)
- Oberkante_Damm_Baumleitung($k_{\alpha}=33/n=0.0303$)
- Vorland_Gemischt($k_{\alpha}=8/n=0.125$)
- Baugrube($k_{\alpha}=8/n=0.125$)



Abbildung B3'

Mesh Module elevation



HQ100=Q=1325.00m³/s
WSP=324.66m

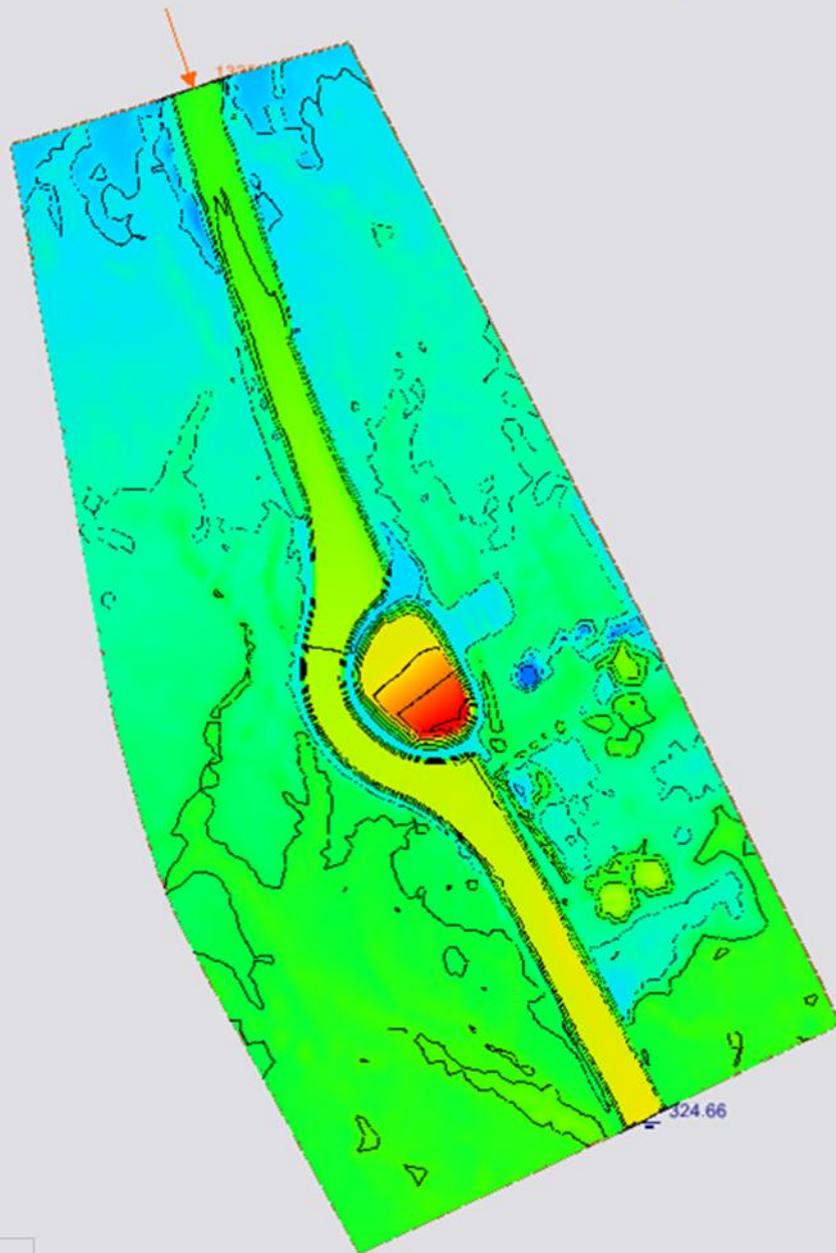


Abbildung B3''

8.3 Analysen der Ergebnisse aus Fallbeispiel 2

8.3.1 Versuchsbesonderheiten

Abbildungen B1.1.1-B3.2.3 (Alle Lagepläne aus Anhang B)

Die Gegenüberstellung der FESWMS und Hydro_As-2D-Ergebnisse bzgl. Fließgeschwindigkeit, Wasseroberfläche und Wassertiefe, abgebildet durch Lagepläne in SMS gibt wegen der Kompliziertheit des betrachteten Objekts (Bauumleitung KW Gössendorf-Mur) nicht genügend Information. Deshalb können nur wenige Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Ein Nachteil von FESWMS sind die Probleme, die bei der Berechnung von Modellen mit Trockenbereichen, entstehen. In solchen Fällen ergibt das Programmmodul FST2DH (Flow and sediment transport two dimensional hydraulics) Fehlermeldung. Dieses Problem lässt sich lösen, indem man das Iterationsmodul von FESWMS, das sog. „Steering mode“, anwendet. Auch wenn die Iterationen nicht zu 100% konvergieren, ergibt das „Steering mode“ jedoch Resultate. Die Bereiche des Modells, in denen die Berechnungen nicht zu Ende gebracht worden sind, werden durch „weiße Flecken“ markiert. Zieht man einen Vergleich zwischen diesen Bereichen in FESWMS und den entsprechenden Bereichen in Hydro_AS-2D (das Programm weist keine Probleme bei der Berechnung von Trockenbereichen auf), stellt man fest, dass es sich eben um die Trockenbereiche handelt. Die „weißen Flecken“ beeinflussen das Endergebnis nicht negativ, da sich die gesuchten Größen mit den nicht berechneten Bereichen nicht überschneiden. Dennoch ist das „Steering mode“ sehr zeitaufwendig. Es kann erfahrungsgemäß von 5 bis 9 Stunden dauern. Im Vergleich dazu nehmen SRH – 2 D- und Hydro_AS-2D- Simulationen ca. 1 bis 3 Stunden in Anspruch.
- Da das untersuchte Model sehr komplex ist, lassen sich aus den SMS-Farbdarstellungen nur schwierig eindeutige Schlüsse ziehen. Mit Sicherheit lässt sich nur behaupten, dass die Abbildungen für Fließgeschwindigkeitsfelder, Wasserniveaus und Wassertiefe in FESWMS und Hydro_AS-2D vergleichbar sind, während die Fließgeschwindigkeitswerte in FESWMS niedriger und die Wasseroberfläche – und Wassertiefenwerte größer als diejenigen in Hydro_AS-2D sind.

Die Analyse setzt mit der Betrachtung der MS Excel-Diagramme fort.

Die drei Versuchsvarianten sind gezielt so aufgebaut, so dass die Auswirkung der Änderung an den Rauheitsbeiwerten und am Wasserdurchfluss auf die Ergebnisse untersucht werden kann.

Die Versuchsvariante **HQ30_5_15** weist die höchsten K_{St} - Werte/die niedrigsten n (Manning - Koeffiziente) d.h größte Baumleitungssohl – und Böschungsrauheit auf.

Die Versuchsvariante **HQ30_10_25** hingegen weist die niedrigsten K_{St} - Werte/die höchsten n (Manning - Koeffiziente) d.h kleinste Baumleitungssohl – und Böschungsrauheit auf.

Die dritte Versuchsvariante **HQ100_5_22,5** liegt in Bezug auf die Rauheitswerte zwischen **HQ30_5_15** und **HQ30_10_25**. In diesem Fall ist der größte Durchfluss definiert. Diese Versuchsvariante wird für die Untersuchung der Durchflussauswirkung auf die Programmergebnisse verwendet.

8.3.2 Analyse der Wasseroberflächen- und Wassertiefenwerte

Abbildungen Be1.3, Be2.3, Be3.3. Abbildungen Be1.4, Be2.4, Be3.4.

Die Abbildungen Be1.3 (S. B8), Be2.3 (S. B16), Be3.3 (S. B24) und Be1.4 (S. B8), Be2.4 (S. B16), Be3.4 (S. B24) sind MS Excel–Graphiken, die das Wasserspiegelniveau bzw. die Wassertiefe beim rechten und linken Flussufer darstellen.

Beim Vergleich der Wasserspiegelhöhen und der Wassertiefen für die unterschiedlichen Versuchsvarianten fällt auf, dass sich die SRH – 2D – und Hydro_As-2D – Ergebnisse fast überlappen, während die FESWMS – Ergebnisse viel höher liegen, obwohl auch hier ähnliche Tendenz beobachtet wird. Bei der Versuchsvariante HQ30_5_15 weisen diese SRH-2D - und Hydro_As-2D – Werte die kleinste Differenz zu den FESWMS – Werten auf, die größte Differenz dagegen betrachtet sich bei Versuchsvariante HQ30_10_25. Die Ergebnisse von Versuchsvariante HQ100_5_22,5 liegen zwischen denjenigen von HQ30_5_15 und HQ30_10_25 in Bezug auf die Ergebnisdifferenz zwischen FESWMS einerseits und Hydro_As-2D und SRH-2D andererseits.

Die obigen Ausführungen über die 3 Versuchsvarianten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die SRH-2D und Hydro_As-2D - Wasserspiegel – und Wassetiefewerte sind fast die gleichen für alle drei Versuchsvarianten.
- Die FESWMS – Wasserspiegel – und Wassertiefewerte sind höher als die SRH-2D und Hydro_As-2D – Werte für jede der drei Versuchsvarianten. Man kann daraus

schließen, dass diese Differenz durch die Rauheitswerte und nicht durch den Durchfluss bedingt ist.

In der vorliegenden Masterarbeit wurde empirisch nachgewiesen, dass sich die Ergebnisse, die das Programm FESWMS bringt, von den Ergebnissen anderer 2D-Hydrauliksoftwareprogramme im sich wiederholenden Trend unterscheiden: die Wasserspiegellagen und die Wassertiefenwerte sind höher bzw. die Fließgeschwindigkeitswerte niedriger. Diese Nachweise finden sich auch in anderen Abhandlungen zum Thema Vergleich zwischen 2D-Hydrauliksoftware, z.B bei Johnes 2011. Einer der möglichen Gründe dafür könnten die in dieser Masterarbeit beobachteten größeren Abweichungen in den Wasserspiegellagen, Wassertiefen – und Fließgeschwindigkeitswerten bei einer niedrigeren Rauheit des Materials, das als Modellbedeckung dient, sein. Das könnte durch Fehler in der Berechnung der Ergebnisse, die Funktion der Rauheit sind, bedingt sein. Ein weiterer Grund dafür könnte drin bestehen, dass FESWMS auf dem Finite - Elemente - Verfahren gründet und sein Elementnetz quadratischen Typ ist, während SRH-2D und Hydro_As-2D auf Finite-Volumen-Methode basieren und durch lineare Elementnetze berechnen.

Die Analyse der FESWMS-Ergebnisse im Fallbeispiel 1 hat ergeben, dass bei Modellsimulation mit einem groben Netz die Fließgeschwindigkeitswerte höher sind und das Wasseroberflächeniveau niedrigere Werte hat, als das bei einem feinen Netz der Fall ist. Dieses Verhältnis ist dem Verhältnis zwischen den Ergebnissen, die FESWMS zum einen und die Hydro_As-2D und SRH-2D zum anderen ergeben, sehr ähnlich. Das kann man auf das Elementnetz in FESWMS, das aus quadratischen 9-Knoten-Elementen besteht, zurückführen: Das quadratische 9-Knoten-Element ist im Vergleich zum linearen 4-Knoten-Element (wird in die Hydro_As-2D und SRH-2D eingesetzt) viel „informativer“, weil hinter jedem Knoten Berechnungsinformation steht. Daraus folgt, dass bei gleicher Elementgröße das quadratische 9-Knoten-Element feiner als das lineare 4-Knoten-Element ist. Folglich kann man daraus schließen, dass die Ergebnisse aus einer Modellsimulation mit einem groben Netz in FESWMS und die Hydro_As-2D - und SRH-2D-Ergebnisse sehr nahe aneinander liegen. Allerdings wird in dieser Arbeit nicht ausführlich auf diesen Punkt eingegangen, da sie ausschließlich einen Vergleich der Programme unter vergleichbaren Bedingungen (d.h unter anderem auch bei gleichem Elementnetz) zum Gegenstand hat.

Bei der Berechnung der Bauumleitung in SRH-2D wurde eine Fehlermeldung eingeblendet. Das Programm hat aber keine Erklärung geliefert, worin der Fehler besteht und wie er

behooben werden kann, was als ein Nachteil des Programmaufbaus hier ausdrücklich herausgehoben werden kann. Deshalb wurde das Programm mit einer Abweichung vom üblichen Verfahren neu gestartet: manuelle Eingabe der Eingangsdaten in der *.dat-Datei. Dieser Start wurde erfolgreich zu Ende gebracht und hat verlässliche Resultate ergeben. Daraus lässt sich folgern, dass diese Methode effektiver in SRH-2D als in Hydro_As-2D eingesetzt werden kann. Die Ursache dafür ist die benutzerfreundlichere Organisation der Daten in der SRH-2D *.dat-Datei.

8.3.3 Analyse der Fließgeschwindigkeitswerte

Abbildungen Be1.2, Be2.2, Be3.2

Die Abbildungen Be1.2 (S. 7), Be2.2 (S. 15), Be3.2 (S. 23) sind MS Excel-Graphiken, die die Fließgeschwindigkeiten beim rechten und linken Flussufer des Modells darstellen.

Die Fließgeschwindigkeitswerte, berechnet durch FESWMS, sind niedriger im Vergleich zu diesen berechnet durch SRH-2D und Hydro_As-2D. Darüber hinaus unterscheiden sich auch die Fließgeschwindigkeitswerte, berechnet durch SRH-2D einerseits und Hydro_As-2D andererseits und das ist die einzige Größe, für die beide Programme im Fallbeispiel 2 unterschiedliche Ergebnisse liefern. In Bezug auf Wasserspiegelniveau und Wassertiefe liefern SRH-2D und Hydro_As-2D gleiche Ergebnisse.

Die Fließgeschwindigkeit erbringt erwartete Werte, da sie sich in Uferbereichen viel schneller als das Wasserspiegelniveau und die Wassertiefe verändert. Selbst eine kleine Positionsverschiebung des Punktes, der für die Untersuchung der Fließgeschwindigkeit gewählt wurde, führt zu einer deutlichen Änderung in den Ergebnissen. Im Fallbeispiel 2 überlappen sich die untersuchten Punkte mit den Elementzentren nicht. Die Werte, für die diese Punkte stehen, sind durch Interpolation der benachbarten Elementzentrenwerte ermittelt. Die Tatsache, dass man keine beliebigen Punkte direkt untersuchen kann, ist für die Bedienung des Programms SRH-2D von Nachteil.

8.3.4 Schlussfolgerungen Fallbeispiel 1 und 2

Abschließend seien die Vor- und Nachteile der drei Softwareprogramme noch einmal rekapituliert, damit auf dieser Grundlage das Programm ausgewählt werden kann, das sich für die Erarbeitung von Fallbeispiel 3, in dem auch die Validierung der Ergebnisse erfolgen wird, am besten eignet.

FESWMS

- Das Programm eignet sich für die Berechnung von einfachen Modellen mit einem groben Netz.
- Die Ergebnisse aus Berechnungen, bei denen ein feines Netz eingesetzt wurde, sind nicht verlässlich.
- Der Nachteil der deutlich niedrigeren Fließgeschwindigkeitswerte und der höheren Wasseroberfläche- und Wassertiefenwerte, die FESWMS bei Verwendung von feinem Netz im Vergleich zu SRH-2D und Hydro_As-2D liefert, konnte unter Anwendung von einem groben Netz ausgeglichen werden.
- Bei Unmöglichkeit zur Berechnungsdurchführung in FST2DH (Flow and sediment transport two dimensional hydraulics) kann das Programm in „Steering mode“ gestartet werden, auch wenn in diesem Programmmodus die Iterationen nicht zu 100% konvergieren.
- Das „Steering mode“ ist bei komplizierten Modellen sehr zeitaufwendig. Bei der Berechnung von einfacheren Modellen stellt jedoch das „Steering mode“ keinen Nachteil dar.

Hydro_AS-2D

- Das Programm eignet sich für die Berechnung von Modellen mit einem groben Netz.
- Die Ergebnisse aus Berechnungen, bei denen ein feines Netz eingesetzt wurde, sind nicht verlässlich.
- Beim Starten des Programms mittels manueller Eingabe der Eingangsdaten funktioniert das Programm im Gegensatz zu SRH-2D nicht verlässlich.
- Das Programm läuft nur auf leistungsstarken Rechnern.

SRH – 2D

- In SRH-2D kann man keine beliebigen Punkte direkt untersuchen.
- Man kann das Programm mittels manueller Eingabe der Eingangsdaten einfach neu starten und die dadurch gelieferten Ergebnisse sind im Gegensatz zu den Hydro_As-2D-Ergebnissen verlässlich.

- Das Programm funktioniert gut sowohl mit einem feinen als auch mit einem groben Netz.
- Die komplizierten Modelle wurden im normalen Laufmodus nicht berechnet. Dieser Nachteil kann durch Starten des Programs mittels manueller Eingabe der Eingangsdaten erfolgreich vermieden werden.

9 Fallbeispiel 3

9.1 Aufgabenstellung und kurze Beschreibung des Modells

Das Fallbeispiel 3 basiert auf dem Labormodell aus der Diplomarbeit von Matthias Trauntschnig, erarbeitet am Wasserlabor des Institutes für Wasserbau und Ingenieurhydrologie an der Technischen Universität Wien. Es stellt ein vereinfachtes Modell der Baumleitung KW Gössendorf – Mur dar. Trauntschnig untersucht eine Gruppe von Modellen der Baumleitung unter Berücksichtigung folgender Versuchsvariablen: Sohlneigung (0 bis 2‰) und Durchfluss (von 19,8 [l/s] (QA) bis 183,2 [l/s] (HQ5000)). Die Umrechnung zwischen Natur und Modell (Maßstab 1:40) kann man der nachfolgenden Tabelle entnehmen:

Durchfluss	Natur, ganzer Fluss [m³/s]	Modell, halber Fluss [l/s]	Modell, ganzer Fluss [l/s]
QA	200	19.8	9.9
HQ30	975	96.4	48.2
HQ100	1325	130.9	65.5
HQ1000	1629	161	80.5
HQ5000	1854	183.2	91.6

Tabelle 9.1: Umrechnung zwischen Natur und Modell (M 1:40). [Trauntschnig 2008, S. 63]

Untersucht werden die Stabilität bzw. die Erosion der Sohl – und Böschungssicherung und der Geschiebetransport des Modelles in Maßstab 1:40. [Trauntschnig 2008, S. 63 – 90]

Aufbauend auf dem von Trauntschnig erarbeiteten Labormodell werden in der vorliegenden Masterarbeit die mittels einer ausgewählten 2D - Hydrauliksoftware ermittelten Ergebnisse mit den Ergebnissen aus seinen Laborversuchen einerseits (Ultraschall- und Messlattemessungen für das Wasseroberflächenniveau und Messflügelmessungen für die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit) und mit den von ihm zum Vergleich verwendeten Ergebnissen andererseits (HEC-RAS- Berechnung und Numerik) validiert. Trauntschnig befasst sich mit vier Querprofilen und sie sollen als Vergleichsbasis im Fallbeispiel 3 dienen.

Hier sei noch einmal erwähnt, dass Fallbeispiel 1 und Fallbeispiel 2 unter anderem auch dazu erarbeitet wurden, damit man die Besonderheiten, die Vor- und Nachteile der 3 Programme (FESWMS, Hydro_As-2D und SRH-2D) berücksichtigend das Programm auswählen kann, das sich am besten für die Erarbeitung von Fallbeispiel 3 eignet.

Im Nachfolgenden soll die Wahl für das Programm, das in Fallbeispiel 3 eingesetzt wird, unter Berücksichtigung der Modellcharakteristika getroffen und begründet werden:

- Trotz der überzeugenden Ergebnisse, die **SRH-2D** im Fallbeispiel 1 und Fallbeispiel 2 geliefert hat, kann es im Fallbeispiel 3 nicht eingesetzt werden. Die Ursache dafür: In SRH-2D kann man beliebige Punkte nicht auswählen, was für die Erarbeitung von Fallbeispiel 3 benötigt wird. Man soll die Fließgeschwindigkeit und die Wasseroberfläche entlang das ganze Profil untersuchen. Die Punkte, die in SRH- 2D ausgewählt werden können, entsprechen den vier von Trauntschnig gewählten Profilen nicht.
- In Fallbeispiel 1 und Fallbeispiel hat 2 **Hydro_As-2D** bis auf die Feinnetzberechnungsfälle zufriedenstellende Resultate ergeben. Es hat folglich die technischen Voraussetzungen im Fallbeispiel 3 verwendet zu werden. Zum Zeitpunkt der Erarbeitung des Fallbeispiels 3 steht das Programm jedoch nicht zur Verfügung.
- Auch wenn **FESWMS** bei komplizierten Modellen und feinen Netzen Probleme ergibt, wird es trotzdem im Fallbeispiel 3 eingesetzt, da es sich hier um ein relativ einfaches Modell handelt. (abgesehen von den Böschungen ist die Modellsohle überall gleich hoch oder hat nur Längsneigung; der Rauheitsbeiwert ist gleich für das ganze Modell). Die Auswahl von FESWMS ist auch dadurch bedingt, dass SRH – 2D und Hydro_As-2D aus den oben erläuterten Gründen ausgeschlossen wurden.

Trauntschnig's Ergebnisse für die vier von ihm gewählten Profile sind in Excel-Graphiken wie folgt vorgestellt:

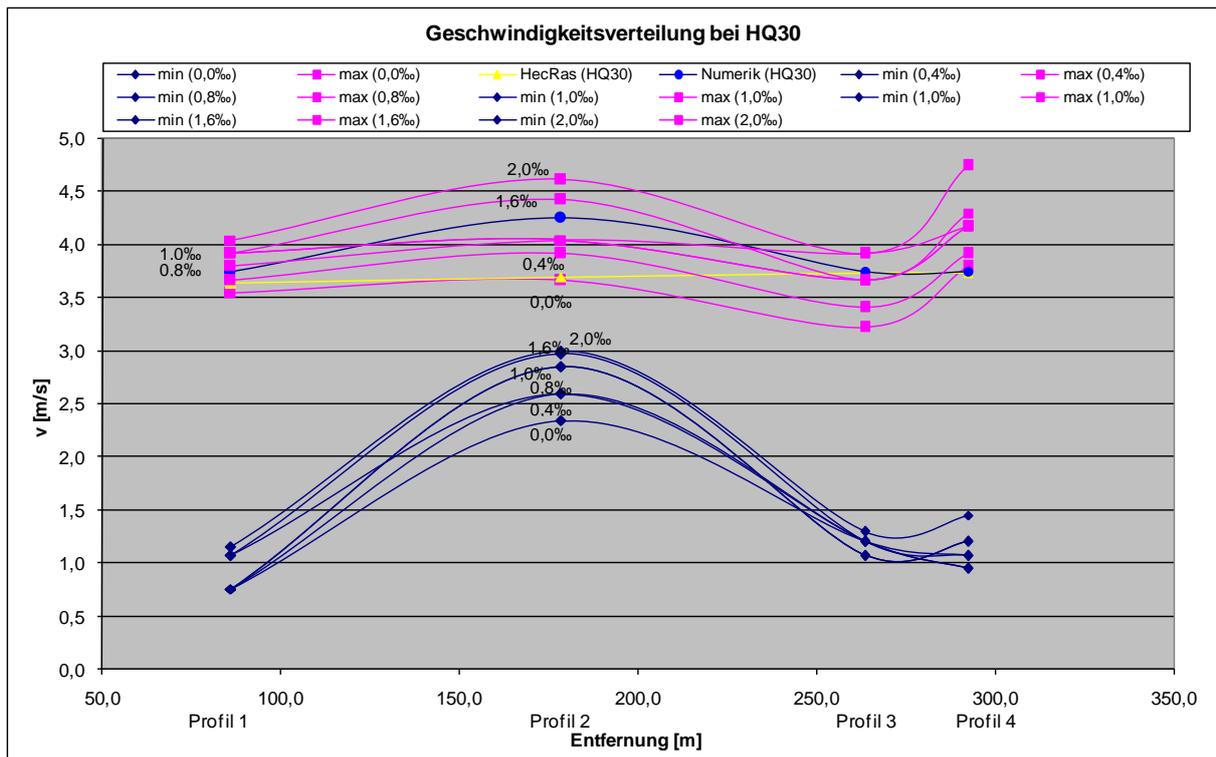


Abb. 9.1: Minimale und maximale Werte der Geschwindigkeitsverteilung bei HQ30 und Neigungen von 0‰ bis 2,0‰ [Trauntschnig 2008, S. 78]

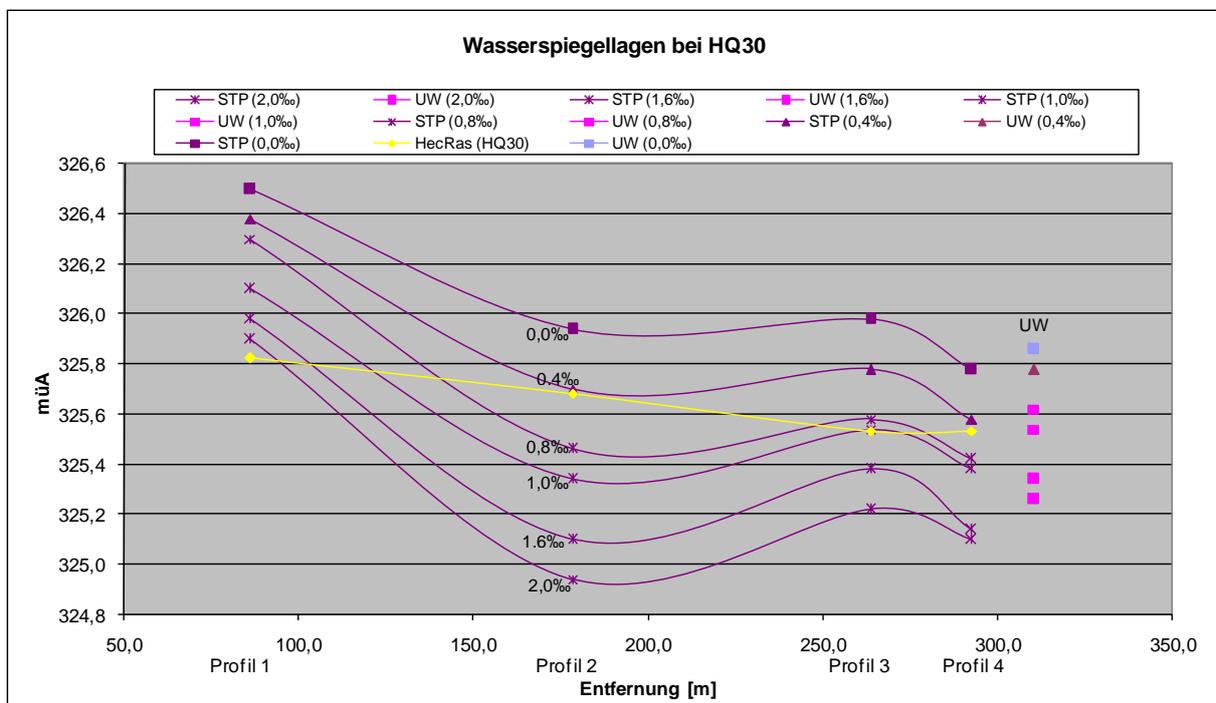


Abb. 9.2: Wasserspiegellage bei HQ30 und Neigungen von 0‰ bis 2,0‰ [Trauntschnig 2008, S. 79]

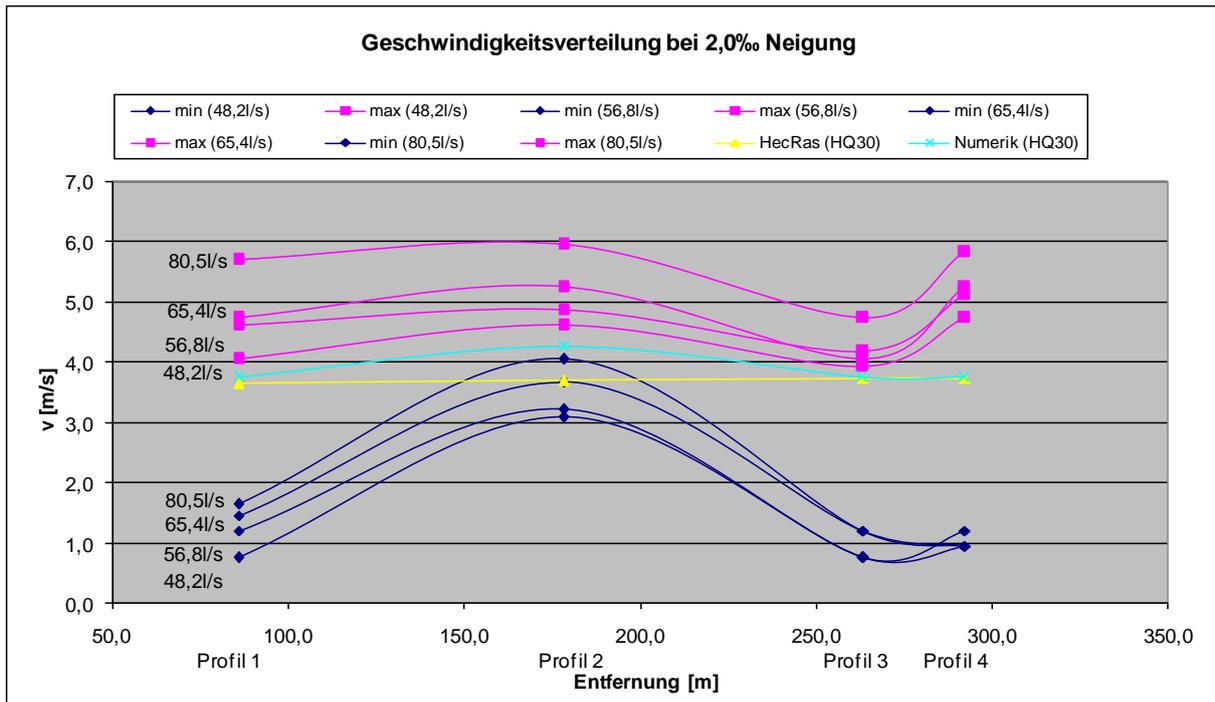


Abb. 9.3: Minimale und maximale Werte der Geschwindigkeitsverteilung bei HQ30 bis HQ1000 und bei Neigung 2.0‰ [Trauntschnig 2008, S. 87]

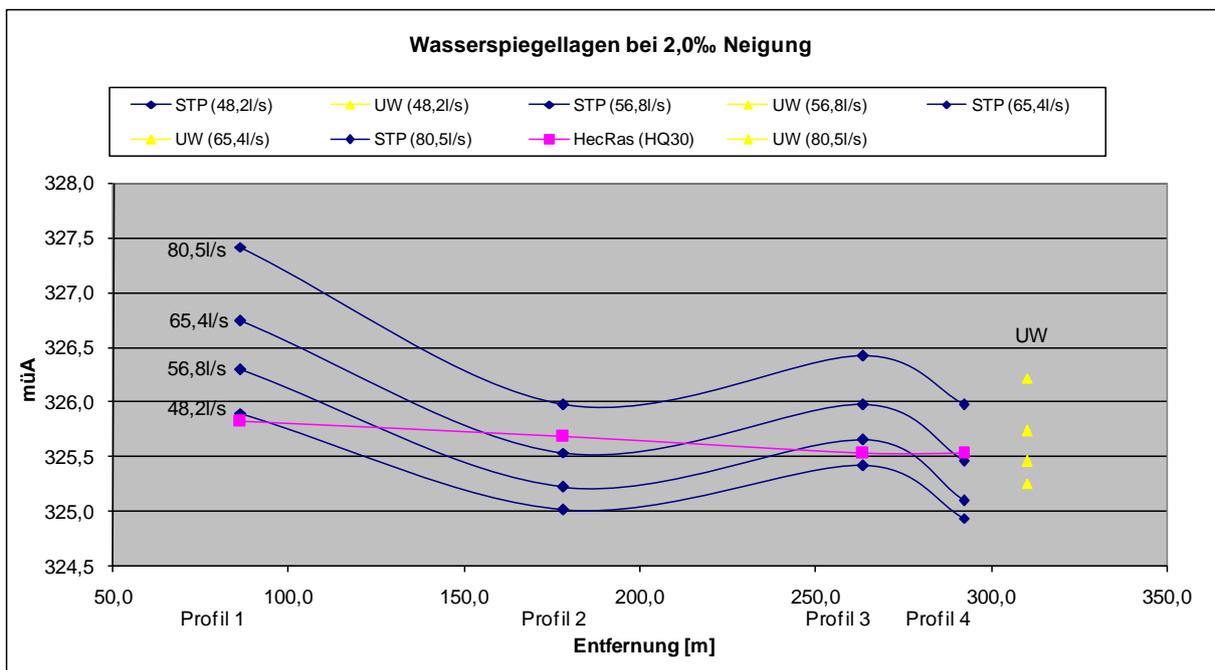


Abb. 9.4: Minimale und maximale Werte der Geschwindigkeitsverteilung bei HQ30 bis HQ1000 und bei Neigung 2.0‰ [Trauntschnig 2008, S. 88]

In den Graphiken sind die Werte der maximalen und minimalen Fließgeschwindigkeit und das Wasseroberflächeniveau (in m. ü. A.) für die vier Profile angegeben.

Bei der Modelluntersuchung durch Hydrauliksoftware kann man jedes Modell in Maßstab 1:1 aufbauen. Deshalb sind die Eingangsdaten und die Ergebnisse der Softwareberechnungen in Maßstab 1:1 angegeben.

In FESWMS wurden 9 Versuchsmodelle erstellt, die auf Kombinationen von den 2 Versuchsvariablen – Modelllängsneigung [%] und Durchflussmenge [m^3/s]– gründen. Die Durchflussgrößen sind in Maßstab 1:1 eingegeben. (s. Tabelle 9.1) Bei der Modellerstellung wurden folgende Versuchskombinationen verwendet:

HQ30=975 m^3/s , $i=0\text{‰}$

HQ30=975 m^3/s , $i=0.4\text{‰}$

HQ30=975 m^3/s , $i=0.8\text{‰}$

HQ30=975 m^3/s , $i=1.0\text{‰}$

HQ30=975 m^3/s , $i=1.6\text{‰}$

HQ30=975 m^3/s , $i=2.0\text{‰}$

HQ30=1150 m^3/s , $i=2.0\text{‰}$

HQ100=1325 m^3/s , $i=2.0\text{‰}$

HQ1000=1629 m^3/s , $i=2.0\text{‰}$

Auf den nachfolgenden zwei Abbildungen ist das Modell bei Neigung 0‰ und 2 ‰ dargestellt. Die Böschungen sind mit Neigung 2:3 erarbeitet.



Abb. 9.5: Modellsohlenhöhe in [müA] bei Neigung 0‰

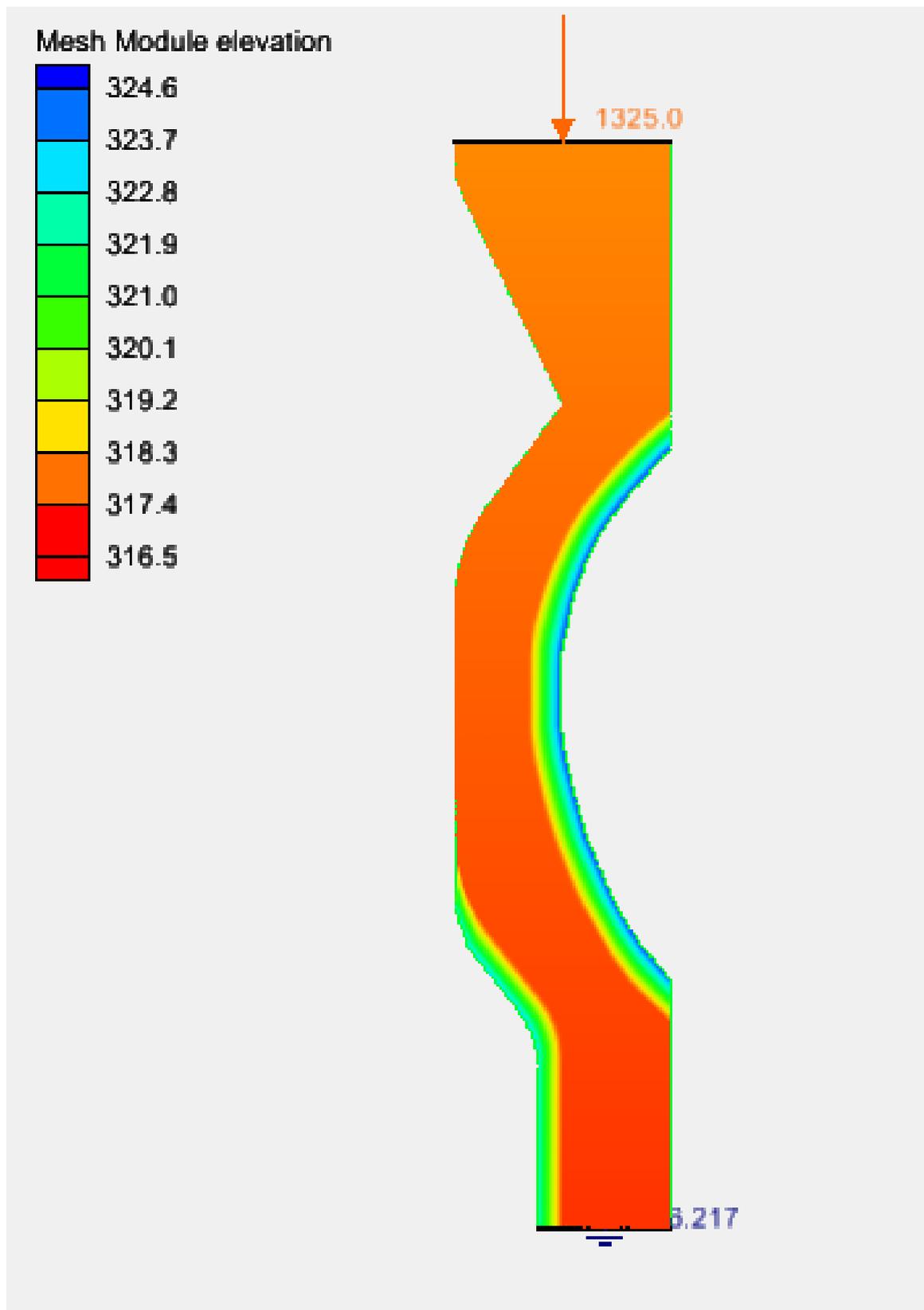
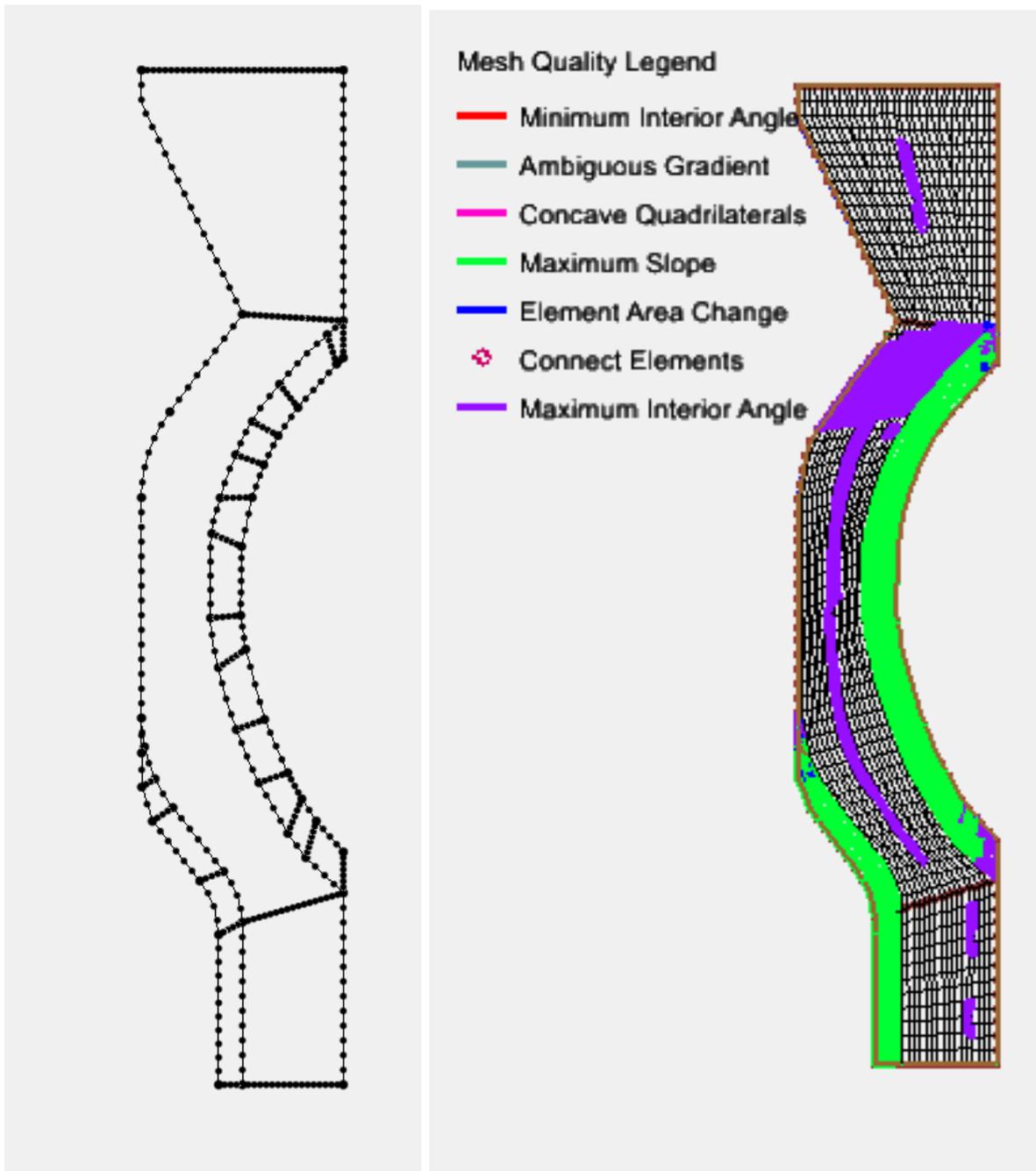


Abb. 9.6: Modellsohlenhöhe in [müA] bei Neigung 2.0 ‰

9.2 Generieren des 3D-Modells in AutoCad. Integrieren des Modells in SMS. Generieren eines Elementnetzes in SMS

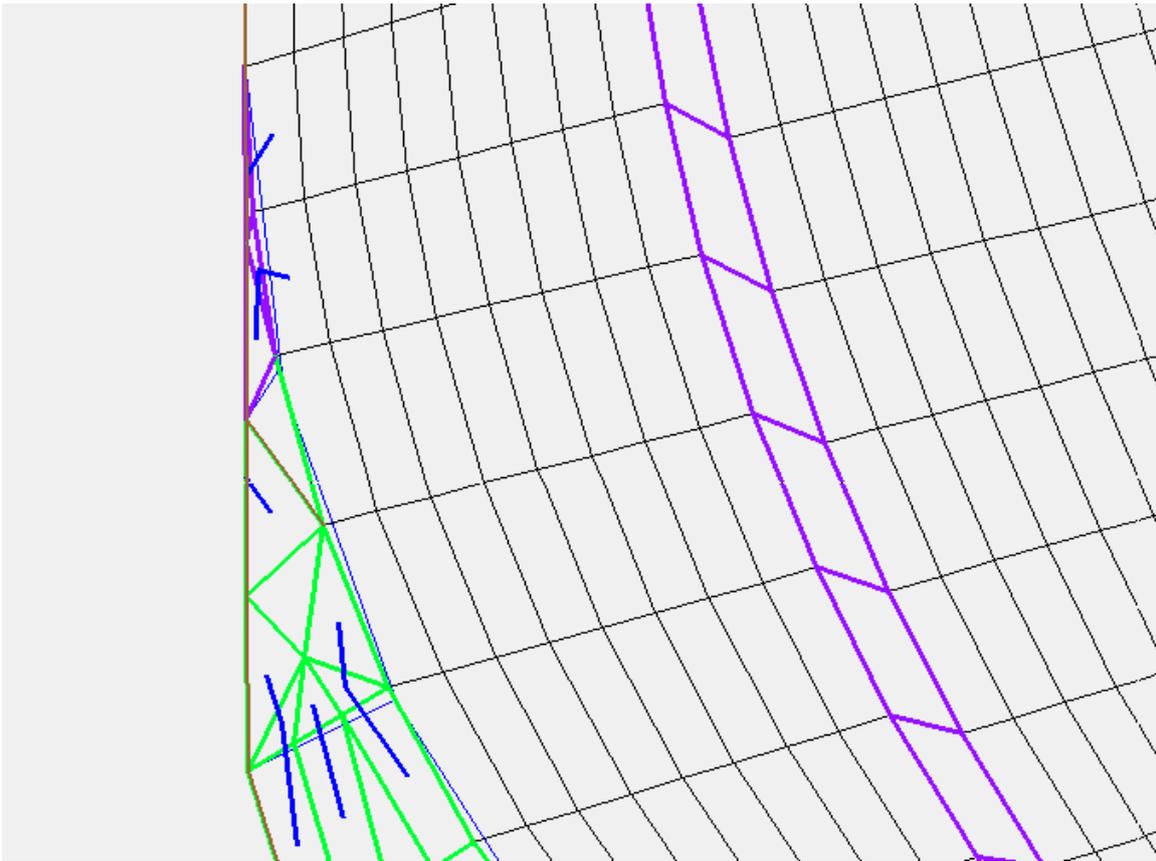
Die Modelle - 5 Varianten mit unterschiedlicher Längsneigung - werden wie folgt in AutoCad durch 3D- Polylinien generiert. Die *.dxf - Dateien wurden in SMS/FESWMS integriert. Die Erstellung des Elementnetzes erfolgt durch die Aufteilung der Modellfläche in Polygonen. Die die einzelnen Polygone umgebenden Linien wurden durch Knoten in gleiche Teile (Segmente) aufgeteilt. Basierend auf den Knoten wurde das Elementnetz, bestehend aus viereckigen Elementen, erstellt. (s Abb. 9.7) Dabei wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Elemente relativ gleiche Größe und soweit wie möglich rechteckige Form haben und dass die Elementenseiten im Verhältnis 1:2 - 1:3 in Strömungsrichtung stehen. Eine Ausnahme davon machen die dreieckigen Elemente in den spitzeckigen Böschungszonen, in denen rechteckige Form schwer zu erreichen war (s. Abb. 9.8 a)). Danach wurde die Elementqualität geprüft und wenn nötig wurden die viereckigen Elemente mit spitzen Winkeln manuell reorganisiert (s. Abb. 9.8 a) und b)). Es wurde eine Interpolation der Höhenlagen aus der *.dxf – Datei für das Elementnetz durchgeführt. Soweit hier Korrekturen notwendig waren, wurden sie manuell vorgenommen. Der Rauheitsbeiwert ist für das ganze Modell Manningkoeffizient $n = 0.02631$ bzw. Strickler - Beiwert $K_{St} = 38$. Das Modell wurde erfolgreich aufgebaut.



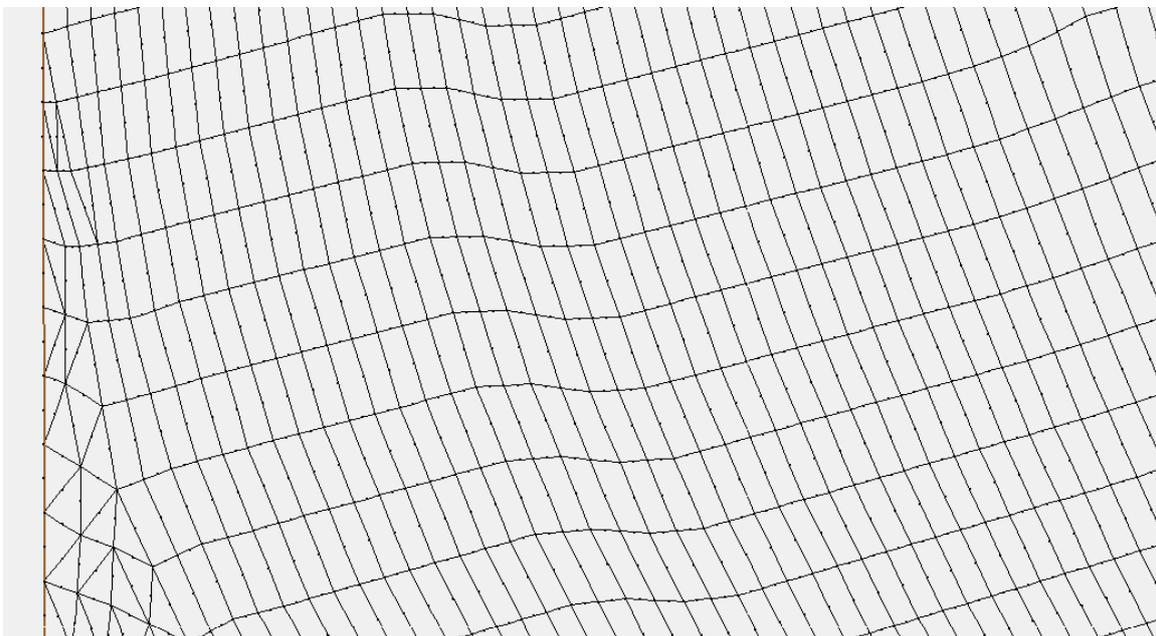
a)

b)

Abb. 9.7: a) Erstellung des Elementnetzes in SMS: 1. Schritt b) Erstellung des Elementnetzes in SMS: 2. Schritt



a)



b)

Abb. 9.8: a) Kontrolle der Qualität des Elementnetzes b) Elementnetz nach manueller Anpassung

Durch das Programm FESWMS ist es möglich, das Modell direkt in Maßstab 1:1 zu erstellen, daher sollen die Ausgangsergebnisse durch die Modellgesetze (Newton'sche Modellgesetz, Euler'sche Modellgesetz, Reynold'sche Modellgesetz, Froud'sche Modellgesetz etc.) nicht umgerechnet werden. Bei Labormodellen soll dagegen eine Umrechnung unbedingt durchgeführt werden. Die Berechnungen zu den neun Versuchsvarianten wurden erfolgreich zu Ende gebracht. Die minimalen und die maximalen Fließgeschwindigkeits – und Wasseroberflächenwerte für die untersuchten Profile wurden manuell herausgesucht. Diese Werte wurden dann zur Erstellung der Vergleichsgraphiken verwendet.

Im Nachfolgenden werden alle für Erstellung von Fallbeispiel 3 relevanten Abbildungen (Wasseroberflächeverteilung, Fließgeschwindigkeitsfelder und Vergleichsdiagramme) präsentiert.

9.3 Ergebnisse des dritten Fallbeispiels

Alle Ergebnisse aus der Erarbeitung von Fallbeispiel 3 sind durch farbige Lagepläne in **Anhang C** dargestellt. Ebenda findet man auch die Vergleiche durch MS-Excel-Grafiken. In der nachfolgenden Tabelle 9.2 sind die Abbildungsbezeichnungen und in Klammer die Seitennummern in Anhang C angegeben.

Versuchsvariante	Lagepläne		MS-Excel-Grafiken	
	Wasserspiegel-Niveau	Fließ-Geschwindigkeit	Wasserspiegel-Niveau	Fließ-Geschwindigkeit
HQ30=975 m ³ /s, i=0‰	C1.w (S. C1)	C1.v (S. C2)	Ce1.w (S. C3)	Ce1.v (S. C3)
HQ30=975 m ³ /s, i=0.4‰	C2.w (S. C4)	C2.v (S. C5)	Ce2.w (S. C6)	Ce2.v (S. C6)
HQ30=975 m ³ /s, i=0.8‰	C3.w (S. C7)	C3.v (S. C8)	Ce3.w (S. C9)	Ce3.v (S. C9)
HQ30=975 m ³ /s, i=1.0‰	C4.w (S. C10)	C4.v (S. C11)	Ce4.w (S. C12)	Ce4.v (S. C12)
HQ30=975 m ³ /s, i=1.6‰	C5.w (S. C13)	C5.v (S. C14)	Ce5.w (S. C15)	Ce5.v (S. C15)
HQ30=975 m ³ /s, i=2.0‰	C6.w (S. C16)	C6.v (S. C17)	Ce6.w (S. C18)	Ce6.v (S. C18)
HQ30=1150 m ³ /s, i=2.0‰	C7.w (S. C19)	C7.v (S. C20)	Ce7.w (S. C21)	Ce7.v (S. C21)
HQ100=1325 m ³ /s, i=2.0‰	C8.w (S. C22)	C8.v (S. C23)	Ce8.w (S. C24)	Ce8.v (S. C24)
HQ1000=1629 m ³ /s, i=2.0‰	C9.w (S. C25)	C9.v (S. C26)	Ce9.w (S. C27)	Ce9.v (S. C27)

Tabelle 9.2

9.4 Analyse der Ergebnisse aus Fallbeispiel 3. Validierung der Ergebnisse.

Grundsätzlich kann man sagen, dass die Mehrheit der Ergebnisse von Trauntschnig betreffend die Fließgeschwindigkeit und die Wasseroberflächenniveaus in den Grenzen der durch FESWMS als minimale bzw. maximale Werte festgelegten Kurven geraten. Eine Ausnahme davon machen die Punkte, die an der Grenze liegen. Eine weitere Ausnahme ist die Fließgeschwindigkeit im Profil 3, in dem die Ergebnisse aus der Berechnung mit HEC-RAS, Numerik und Messflügel höhere Werte als die maximalen FESWMS-Werte erreichen. (die Differenz überschreitet jedoch 1 m/s nicht). Die hohen Werte sind nicht begründet, da dieser Kanalteil verhältnismäßig gerade Form hat und keine maßgebenden Änderungen in der Breite des Querprofils aufweist. Bei Zunahme des Wasseroberflächenniveaus nehmen diese Differenzen ab. Die HEC-RAS - und Numerik-Ergebnisse sind bei der Versuchsvariante mit Durchfluss 1150 m³/s und die Laborergebnisse für HQ1000 den FESWMS-Ergebnissen gleich und bei den Versuchsvarianten HQ100 (1325 m³/s) und HQ1000 (1629 m³/s) sind HEC-RAS – und Numerik-Ergebnisse und Laborergebnisse für HQ100 als die maximalen FESWMS-Ergebnisse niedriger. Da die Validität eines jeden Modelles am besten bei Hochwasserereignissen geprüft wird, kann man sagen, dass die bei kleineren Durchflüssen beobachteten Differenzen Folge von vernachlässigbar kleinen Fehlern sind.

Im Profil 1 beobachtet man die größte Differenz zwischen den minimalen und maximalen Fließgeschwindigkeitswerten und Wasseroberflächenniveaus. Als Grund dafür kann herausgehoben werden, dass ausgerechnet im Profil 1 sich die Strömungsrichtung wegen der Form des Modellkanals abrupt ändert. Im Profil 1 erfolgt die Änderung von einer Verengung hin zu einer großen Krümmung in Modelllängsrichtung und es stellt gleichzeitig das engste Querprofil dar. Der erste Kontakt der Strömung mit der rechten Böschung erfolgt unmittelbar nach Profil 1 und das wirkt sich auf die erwähnten Wertdifferenzen aus. Die höchsten Fließgeschwindigkeitswerte und die niedrigsten Wasseroberflächenwerte findet man im rechten Teil (in Strömungsrichtung) von Profil 1. Das Umgekehrte beobachtet man im linken Teil des Profils.

Im Profil 2 hingegen sind die Differenzen zwischen den minimalen und maximalen Fließgeschwindigkeitswerten und Wasseroberflächenniveaus am kleinsten. Das liegt daran, das Profil 2 in einem verhältnismäßig geraden Kanalbereich positioniert ist und sich die Breite des Modellkanals in Längsrichtung fast nicht ändert.

Die Differenzen zwischen dem Minimum und Maximum der Fließgeschwindigkeit und des Wasseroberflächenniveaus im Profil 3 und im Profil 4 sind vergleichbar groß, da beide Profile relativ nahe aneinander positioniert sind. Die gekrümmte Böschung unmittelbar vor Profil 4 reflektiert zunächst (in Bezug auf die Lage) auf das Geschwindigkeitsdiagramm und erst danach auf das Wasserspiegelniveaudiagramm. Aus diesem Grund erreicht das Wasserspiegelniveau im rechten Teil (in Strömungsrichtung) von Profil 4 sein Extremum. Deshalb ist die Wasserspiegeldifferenz im Profil 4 größer als diese im Profil 3, während die Geschwindigkeitsdifferenzen vergleichbar groß bleiben.

Die oben aufgeführten Ergebnisbeobachtungen über die Profile 1, 2, 3 und 4 treffen nur auf Simulationen durch 2D-Hydrauliksoftware zu. Im Nachfolgenden wird auf die Gründe dafür eingegangen.

In Querrichtung werden die Fließgeschwindigkeitsänderungen in HEC-RAS- und Numerik-Ergebnissen und die Wasseroberflächenänderungen in HEC-RAS- und Laborversuchsergebnissen nicht berücksichtigt. Das liegt daran, dass das Durchschnittsergebnisse für das ganze Profil sind. Zum einen können unter Laborbedingungen mittels Messflügel die minimale und maximale Fließgeschwindigkeiten nicht zuverlässig korrekt gemessen werden, zum anderen können auch die kleinen Ungenauigkeiten zu Fehlern in den Endergebnissen führen, da das Modellmaßstab 1:40 ist.

Die Änderung der Fließgeschwindigkeit und des Wasseroberflächenniveaus in Längsrichtung ist vergleichbar beim Laborversuch und bei der Modellsimulation in FESWMS. Die Änderung ist jedoch unbedeutender bei HEC-RAS und Numerik, da das Durchschnittsergebnisse für das ganze Profil sind, woraus folgt, dass es weniger Schwankungen in Längsrichtung gibt.

Für die meisten der neun Versuchsvarianten gilt es, dass die Kurve, die die maximalen Wasseroberflächenwerte in FESWMS angibt, sich mit Trauntschnig's Wasserspiegelkurve für Profil 1 und Profil 2 überlappt oder etwas höher als seine liegt. Die Kurve, die die minimalen Wasseroberflächenwerte in FESWMS angibt, überlappt sich mit Trauntschnig's Wasserspiegelkurve für Profil 3 und Profil 4 oder liegt etwas niedriger als sein. Deshalb wird hiermit folgende Vermutung angestellt: Trauntschnig misst nur das maximale Wasseroberflächenniveau fürs Profil 1 und Profil 2 bzw. das minimale Wasseroberflächenniveau im Falle von Profil 3 und Profil 4. Es kommt letztendlich dazu, dass

die Wasseroberflächenniveaueurven, die für die minimalen und maximalen FESWMS-Werte stehen, die Kurve, die die Wasseroberflächenwerte aus dem Laborversuch widerspiegelt, umhüllen.

Die minimalen Laborfließgeschwindigkeitswerte sind für jede Versuchsvariante niedriger als die minimalen FESWMS-Werte. Einerseits könnte das daran liegen, dass die FESWMS-Werte tiefengemittelt und die minimalen Laborwerte vermutlich in der größten Tiefe gemessen sind. Andererseits beobachtet man, dass die minimalen Laborwerte in fast allen Fällen niedriger als die HEC-RAS- und Numerik-Ergebnisse sind. Das lässt vermuten, dass die minimalen Laborfließgeschwindigkeitswerte falsch ermittelt worden sind.

Selbst die minimalen FESWMS-Fließgeschwindigkeitswerte für Profil 2 in den Versuchsvarianten HQ100 und HQ1000 sind höher als diejenigen, ermittelt durch die anderen Methoden. Gleichzeitig ist die Differenz zwischen den minimalen und maximalen FESWMS-Fließgeschwindigkeitswerten viel kleiner als die Differenz zwischen den Laborergebnissen. Bei der Modellform () im Querprofil 2 ist eine kleine Differenz zwischen minimalen und maximalen Fließgeschwindigkeitswerten erwartet. Das lässt erneut vermuten, dass die Laborfließgeschwindigkeitswerte falsch ermittelt worden sind.

Bis auf die Profil 2-Ergebnisse für einige Versuchsvarianten, wo das HEC-RAS-Wasserspiegelniveau einen zu hohen Wert hat, ergeben HEC-RAS und Numerik den FESWMS vergleichbare Werte. Bei Vergleich zwischen dem eindimensionalen HEC-RAS und dem zweidimensionalen FESWMS lassen sich die Vorteile des 2D-Programms klar heraus differenzieren:

HEC-RAS berücksichtigt die Änderungen in der Modellform nicht, die sich auf die Fließgeschwindigkeit und das Wasseroberflächenniveau auswirken und stellt diese Größen als konstant oder das Modell entlang leicht veränderlich dar. In dieser Hinsicht liegen die Numerik-Werte den Laborversuchs- und den FESWMS-Werten näher.

Zusammenfassend kann man sagen, dass im Fallbeispiel 3 die Validität der durch 2D-Hydrauliksoftware (FESWMS) ermittelten Ergebnisse nachgewiesen wurde. Durch 2D-Softwaremodellierungen und Berechnungen lassen sich mehrere Aspekte der Strömungssimulation umfassen. Somit können 2D-Hydraulikprogramme zur Korrektur der Resultate, ermittelt durch andere Methoden (z.B. Laborversuch, Numerik und 1D-Programmergebnisse) eingesetzt werden.

10 Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Das Ziel dieser Arbeit war es, einen Leistungsvergleich zwischen drei 2D-Hydrauliksoftwareprogrammen zu ziehen und deren Anwendung auf den konstruktiven Flussbau nachzuweisen. Nachdem im ersten Teil der Arbeit die theoretischen Grundlagen gelegt wurden, wurden dann die wichtigsten Erkenntnisse über 2D-Hydrauliksoftwareprodukte zusammengefasst. Durch die Erarbeitung von drei Fallbeispielen und die Analyse der Ergebnisse, die die Programmberechnungen geliefert haben, wurden die Vor- und Nachteile von FESWMS, Hydro_AS-2D und SRH-2D aufgeführt.

Schlussfolgernd lässt sich festhalten, dass das geeignete Softwareprodukt je nach dem Ziel für dessen Anwendung bzw. der Aufgabenstellung und dem Untersuchungszweck ausgewählt werden soll:

- FESWMS ist für die Erstellung einfacherer Modelle mit groben Elementnetzen gut geeignet. Komplizierte Modelle werden vom Programm ziemlich zeitaufwendig berechnet und Modelle mit feineren Elementnetzen liefern unverlässliche Ergebnisse.
- Durch Hydro_As-2D kann man kompliziertere Modelle berechnen. Seine Vorteile sind die kurzen Rechenzeiten und die anwenderfreundliche Oberfläche. Als Hauptnachteile dieses Softwareprodukts lassen sich die höheren Leistungsanforderungen an dem zu benutzenden Rechner und die Unmöglichkeit für Wahl eines Umleitungswegs zur Berechnung der bearbeiteten Strömungssituation in den Fällen herausheben, wo Hydro_As-2D überhaupt keine Ergebnisse generiert.
- SRH-2D hat zwei Präprozessor-Module und ist somit anwenderfreundlich sowohl für Anfänger als auch für Fachleute. Die Ergebnisse aus SRH-2D - Berechnung sind überzeugend. Ein großer Nachteil dieses Programms ist jedoch die Unmöglichkeit zur Visualisierung der Ergebnisse in SMS und dadurch die Unmöglichkeit beliebig ausgewählte Punkte zu untersuchen.

Die Erstellung von 2D-Modellen bei Vorhandensein einer geeigneten Datengrundlage ist viel einfacher, als das bei Labormodellen und 1D-Modellen der Fall ist. Die Anwendung von 2D-

Hydrauliksoftware auf eindimensionale Strömungsprozesse bringt trotz längerer Rechenzeiten und größerer Datengrundlageanforderungen keinen Mehrwert. Die 2D-Hydraulikprogramme sind für Untersuchung von kurzen Strecken (im Gegensatz zu 1D-Modellen) geeignet. In Fällen von Flächenüberflutungen infolge Hochwasserereignisse erzeugen sie überzeugende Ergebnisse. Mit der Nachbildung der Variation der Strömung über die Flussbreite weisen 2D-Hydraulikprogramme die Notwendigkeit ihrer Anwendung auf den konstruktiven Flussbau nach, weil sich durch deren Einsatz viel mehr Aspekte der Strömungssimulation als durch andere Verfahren erfassen lassen.

11 Literaturverzeichnis

- [1] **Aberle, Jochen:** Untersuchung der Rauheitsstruktur zur Bestimmung des Fließwiderstandes in Gebirgsbächen unter Klarwasserabfluß, Karlsruhe 2000
unter: http://www.duerreych.de/Literatur/Dr_Aberle.pdf
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]
- [2] **BLW:** Hydro-AS-2D. Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis. Tutorial zum HYDRO-AS-2D – Grundkurs. 2006
- [3] **BLU:** Strömungsmodelle. unter:
http://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaessermorphologie_hydraulik/stroemung_feststofftransport/stroemungsmodelle/index.htm
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]
- [4] **Eisenhauer, Norbert:** Rauheitsbeiwert nach Strickler, unter: http://www.ab.hs-karlsruhe.de/VAW/01_wissen/01_2_hydromechanik/01_2_stroemung_b/file.2007-10-04.8353121257
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]
- [5] **Ferzinger, Joel/Peric, Milovan:** Numerische Strömungsmechanik. Heidelberg: Springer – Verlag 2008
- [6] **Gersten, Klas/ Herwig, Heinz:** Strömungsmechanik. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft 1992
- [7] **Giesecke, Jürgen/ Mosonyi, Emil/ Heimerl, Stephan:** Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb. Heidelberg: Springer -Verlag 2009, 5. Auflage
- [8] **Haberl, Ulrich:** Stationäre 2D-Strömungssimulation im Bereich des Kraftwerks Dummugdem, Indien, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt der Universität für Bodenkultur, Wien, 2006
- [9] **Hänel, D:** Mathematische Strömungslehre. RWTH Aachen 2009
unter: http://www.aia.rwth-aachen.de/vlueb/vl/numerische_stroemungsmechanik_ii/material/msl.pdf
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]
- [10] **Hydrotec:** HYDRO_AS-2D – Software für detaillierte Strömungsmodellierung.
unter: http://www2.hydrotec.de/vertrieb/hydro_as_2d
[letztes Abrufdatum: 05.02.2012]

[11] **Jirka, Gerhard:** Einführung in die Hydromechanik. Karlsruhe: Universitätsverlag 2007, 3. Auflage

[12] **Johnes, Douglas:** The Transition from Earlier Hydrodynamic Models to Current Generation Models. Brigham Young University 2011

[13] **Kaliakin, Victor:** Element data. University of Delaware, 2005
http://www.ce.udel.edu/faculty/kaliakin/twod_elements.html
[letztes Abrufdatum: 01.02.2012]

[14] **Kinzelbach, Wolfgang:** Numerische Hydraulik. Zürich: ETH 2010
http://www.ifu.ethz.ch/GWH/education/graduate/Hydraulik_II/Vorlesungen/index
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]

[15] **Koch, Manfred:** Technische Hydraulik, Universität Kassel 2003
unter: <http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydraulik/Lehre/Hydraulik/skript/>
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]

[16] **Krause-Rehberg, Prof. Dr. Reinhard:** Vorlesungsvorbereitung, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Fachbereich Physik 2001
unter: http://positron.physik.uni-halle.de/VVB/Dias/Mechanik/Dia_M87.jpg
[letztes Abrufdatum: 18.12.2011]

[17] **Lecheler, Stefan:** Numerische Strömungsberechnung. Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2011, 2. Auflage

[18] **LUBW:** Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser. Karlsruhe 2006
unter: http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/13995/arbeitshilfen_regenwasser_regenrueckhaltung_2006.pdf?command=downloadContent&filename=arbeitshilfen_regenwasser_regenrueckhaltung_2006.pdf
f [letztes Abrufdatum: 05.12.2011]

[19] **LUBW:** Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Numerische Modelle zur Strömungssimulation. Karlsruhe 2003, unter: http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/14422/hydraulik_teil_4.pdf?command=downloadContent&filename=hydraulik_teil_4.pdf
[letztes Abrufdatum: 18.12.2011]

[20] **Nachtnebel, Hand-Peter:** Hydrologie und Flussgebietsmanagement. Universität für Bodenkultur Wien, unter:
http://iwhw.boku.ac.at/LVA816101/Power_Point_Pr%84sentationen/VO101_09_N-

A%20Komb%20Transl%20Retention.pdf,
[letztes Abrufdatum: 18.12.2011]

[21] **Nuji`c, Marinko:** Hydro-AS-2D. Ein zweidimensionales Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis, Benutzerhandbuch. 2003

[22] **Oertel, Herbert:** Strömungsmechanik. Methoden und Phänomene. Heidelberg: Springer – Verlag 1995

[23] **Oertel, Herbert/ Böhle, Martin/ Dohrmann, Ulrich:** Strömungsmechanik: Grundlagen – Grundgleichungen – Lösungsmethoden – Softwarebeispiel. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2009

[24] **Olsen, Nils:** Numerical Modelling and Hydraulics, unter:
<http://folk.ntnu.no/nilsol/tvm4155/flures8.pdf>
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]

[25] **ÖWAV:** Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik. Grundlagen, Anwendung und Modelle für die Praxis. Wien 2003

[26] **ÖWAV:** Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Feststofftransport und Gewässermorphologie. Wien 2009

[27] **Patt, Heinz/Bechteler, Wilhelm:** Hochwasser-Handbuch: Auswirkungen und Schutz. Heidelberg: Springer-Verlag 2001

[28] **Pelte, Dietrich:** Die Zukunft unserer Energieversorgung Physikalische Grundlagen und Folgerungen 2002,unter: http://www.physi.uni-heidelberg.de/~pelte/energie1/data/kap7/chem_t.htm
[letztes Abrufdatum: 05.12.2011]

[29] **Schönung, Bernhard E.:** Numerische Strömungsmechanik: inkompressible Strömungen mit komplexen Berandungen. Berlin: Springer 1990

[30] **Schröder, Ralph/Zanke, Ulrich:** Technische Hydraulik. Kompendium für den Wasserbau. Springer: Springer-Verlag 2003, 2. Auflage

[31] **Schröder, Valentin:** Strömungsmechanik, Hochschule Augsburg 2009
unter: <http://www.hs-augsburg.de/~legoor/3.%20Semester/Stroemungsmechanik/Skript/>
[letztes Abrufdatum: 18.12.2011]

[32] **Siekmann, Helmut/ Thamsen, Paul:** Strömungslehre. Grundlagen. Heidelberg: Springer Verlag 2008, 2. Auflage

[33] **Steinrück, Herbert:** Grundlagen der numerischen Strömungslehre TU Wien, unter:
<http://cdlab2.fluid.tuwien.ac.at/LEHRE/322012/index.html>, [letztes Abrufdatum: 05.12.2011]

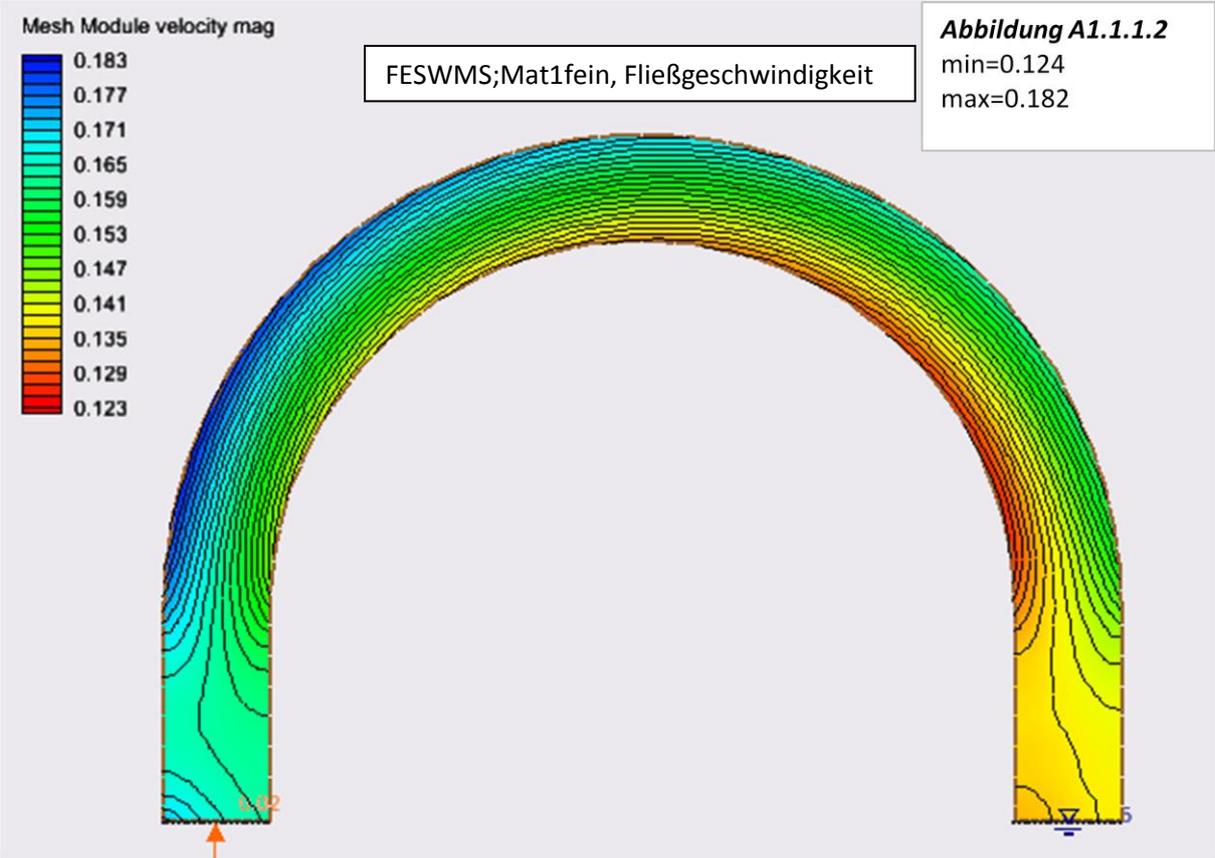
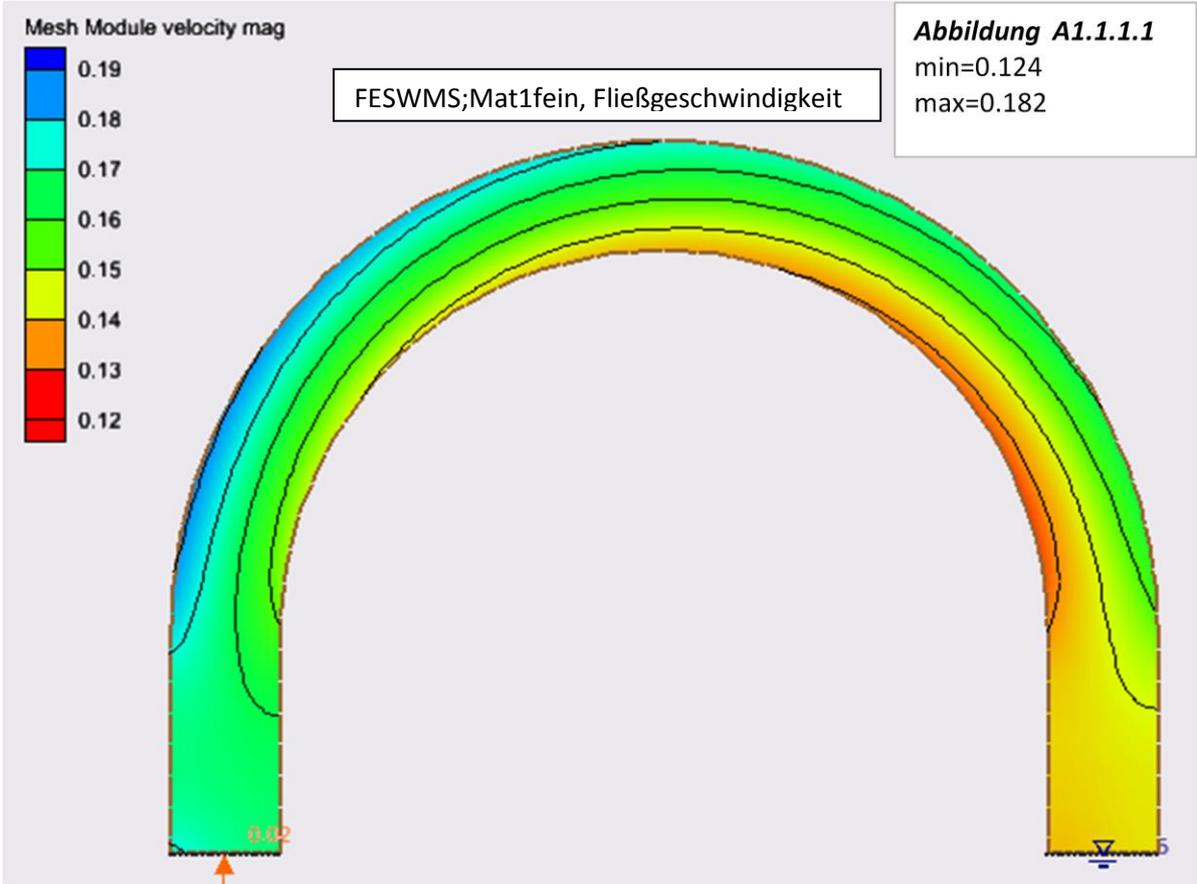
[34] **Trauntschnig, Matthias:** Modelluntersuchung zur Stabilität von Deckwerken an Sohle und Böschung für die Baumleitung KW Gössendorf – Mur in einer Modellfamilie. Institut für Wasserbau und Ingenieurtechnologie an der TU Wien, 2008

[35] **USGS:** U.S. Geological Survey. Water Resources Surface Water Surface. unter:
http://water.usgs.gov/cgi-bin/man_wrdapp?feswms-2dh
[letztes Abrufdatum: 07.02.2012]

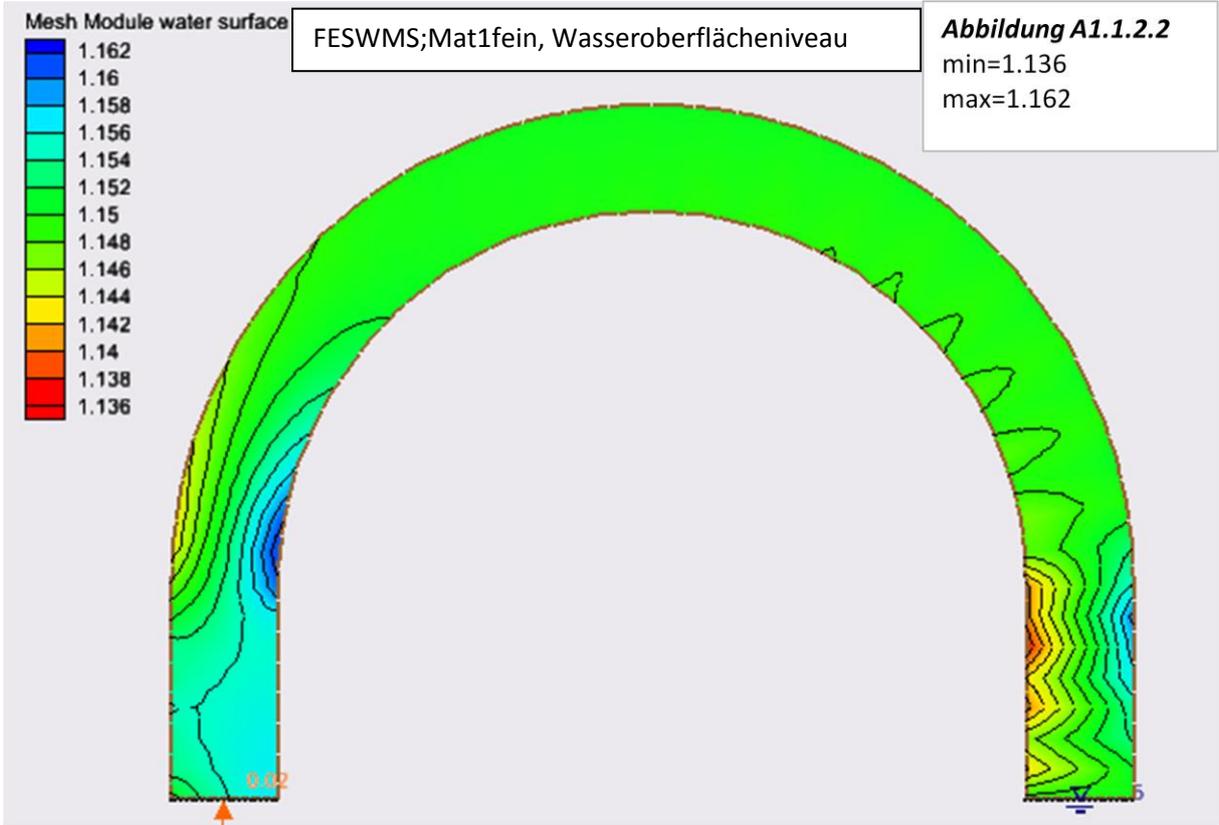
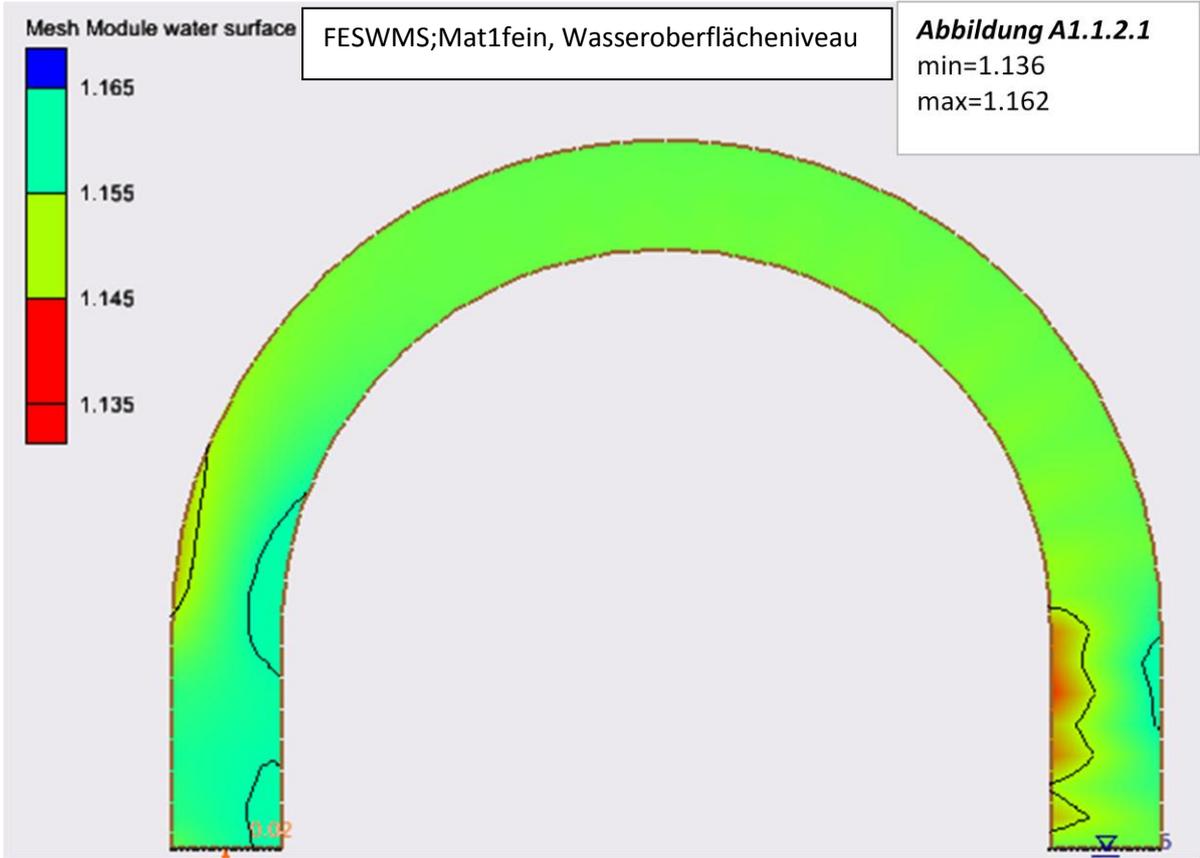
[36] **Young, Lai:** SRH-2D Theory and User'Manual. Sedimentation and River Hydraulics / Two/Dimensional model. Colorado: U.S. Department of Interior 2008

[37] **Маринов/Казакон:** Хидравлика. София: УАСГ 2003
[Marinov/Kazakov: Hydraulik. Sofia: UASG 2003]

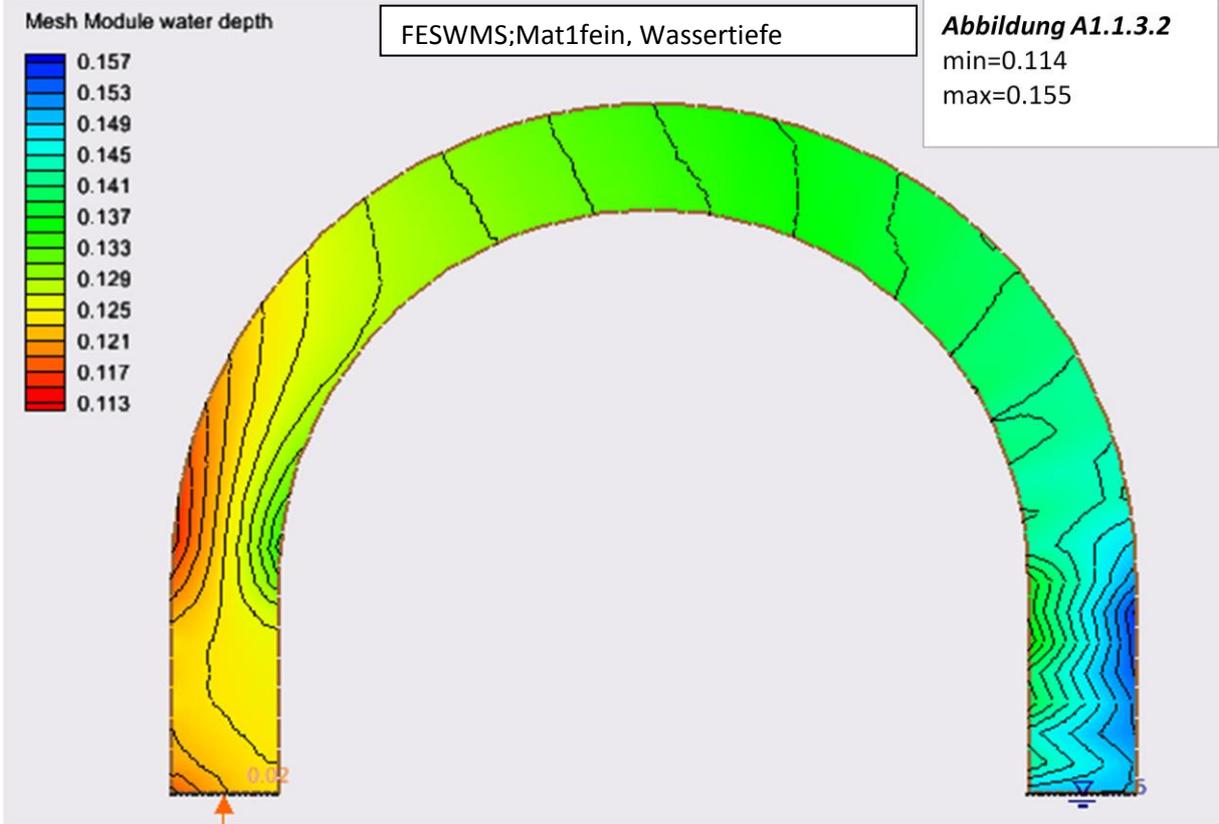
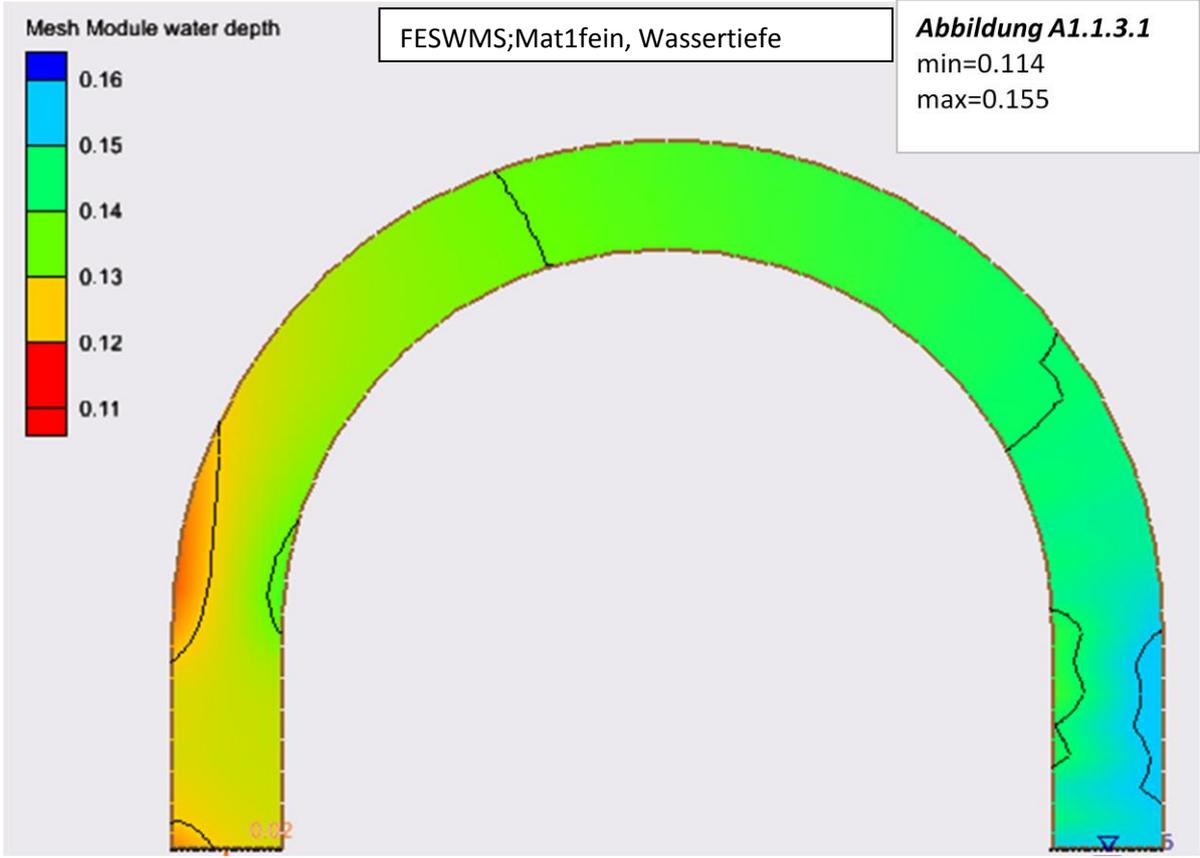
Anhang A



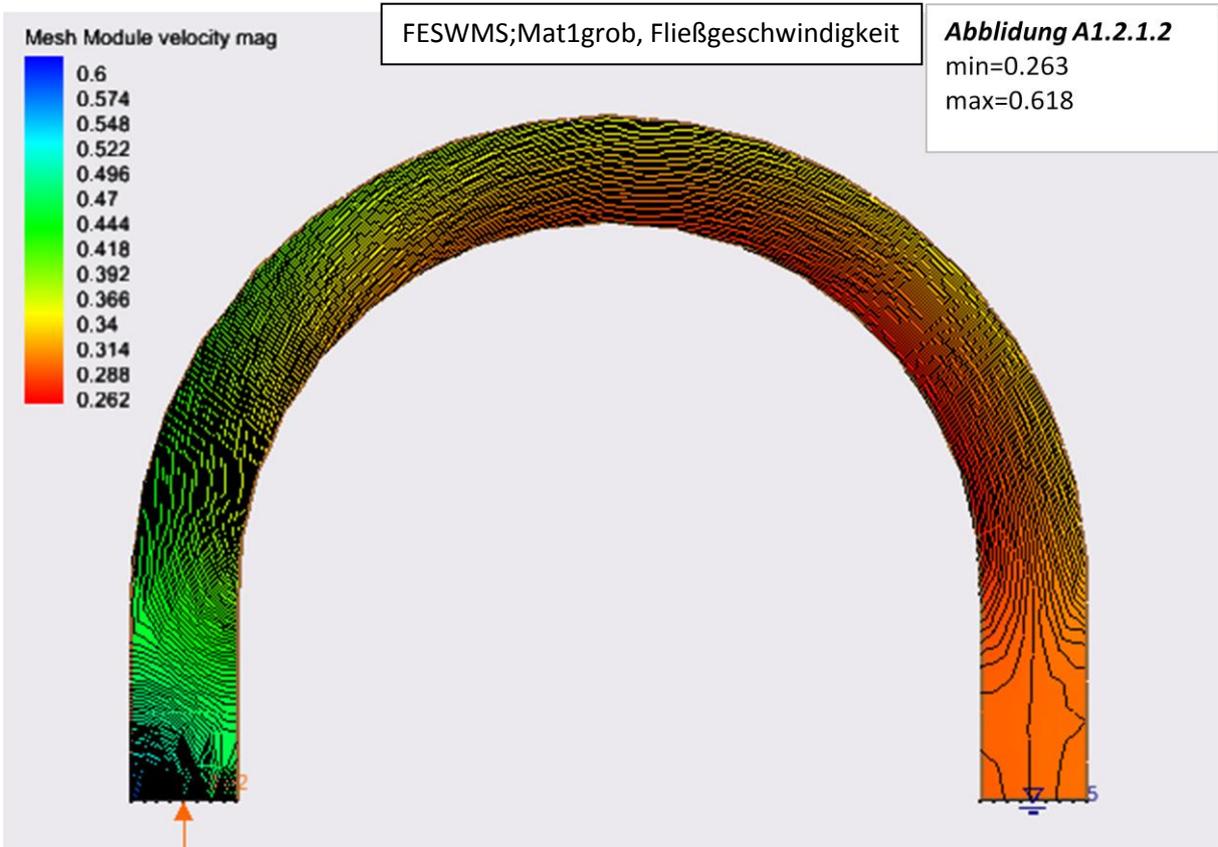
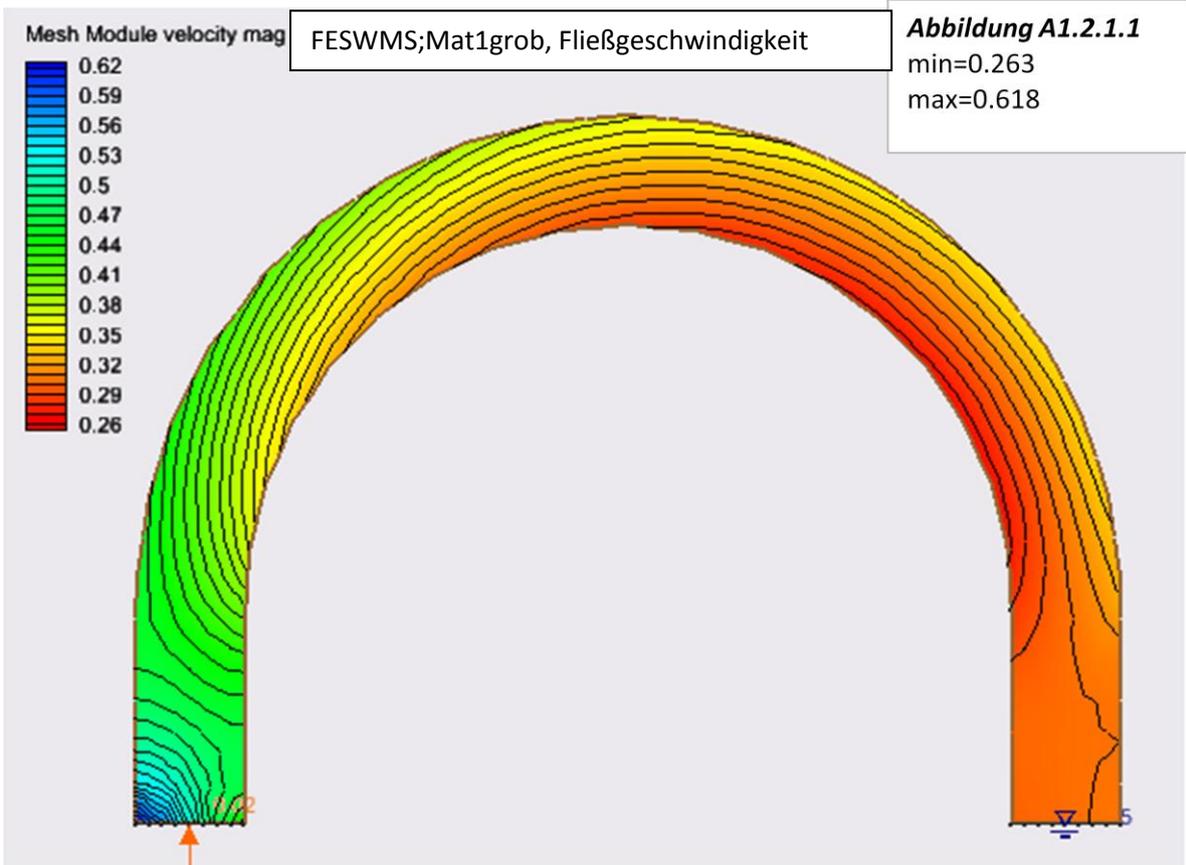
Anhang A



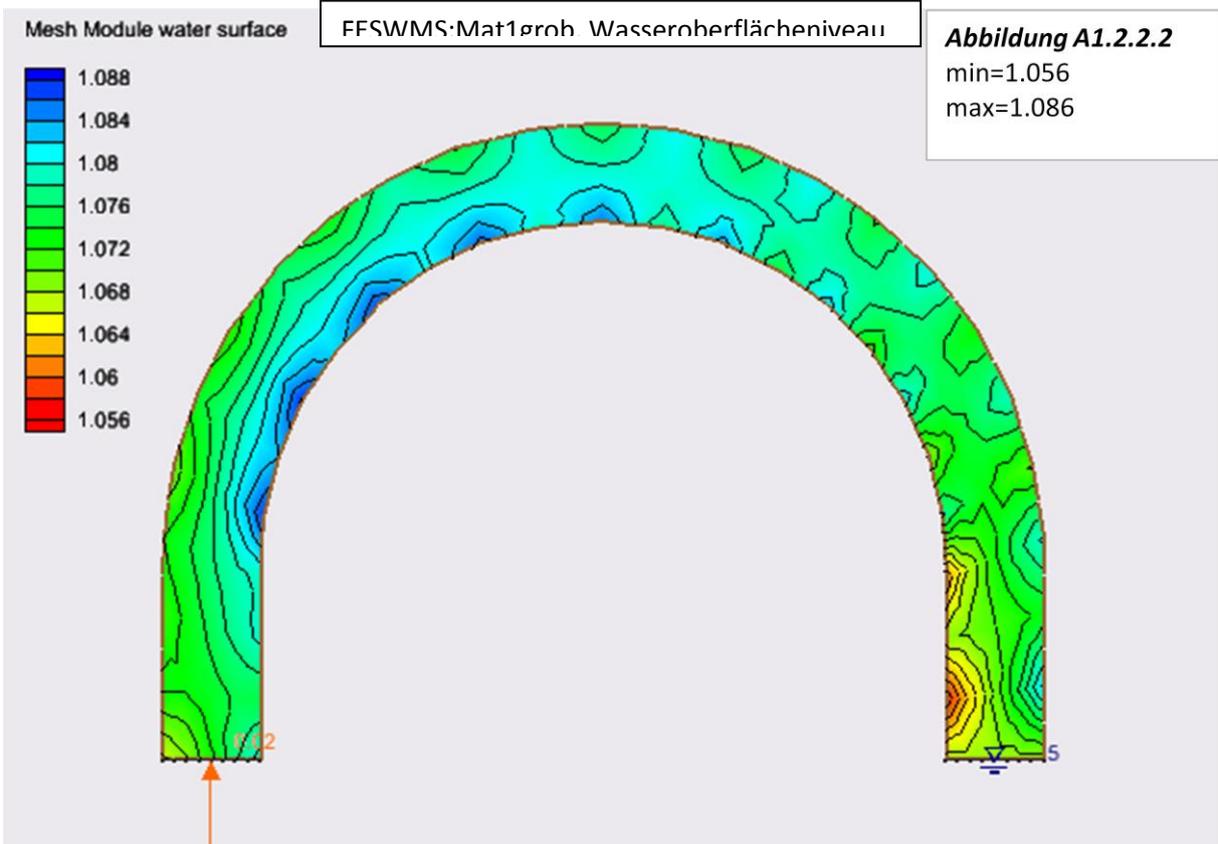
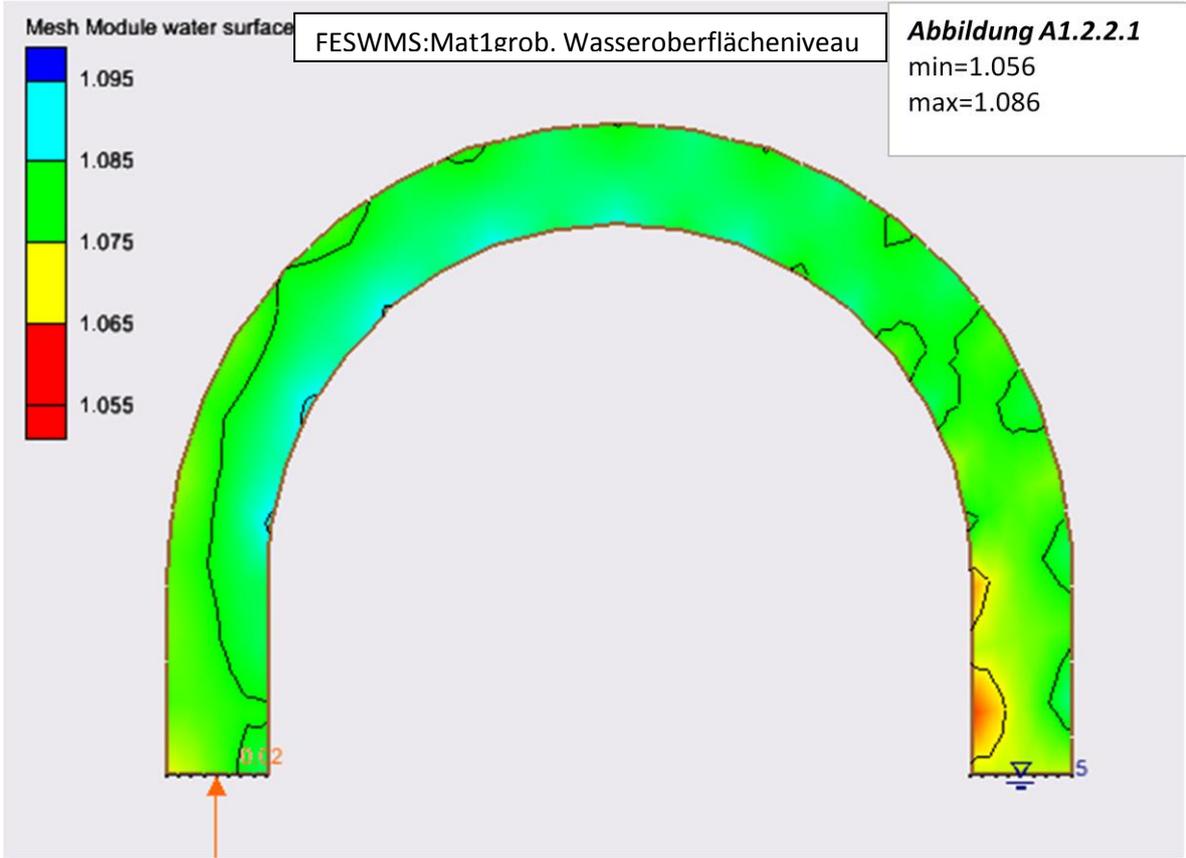
Anhang A



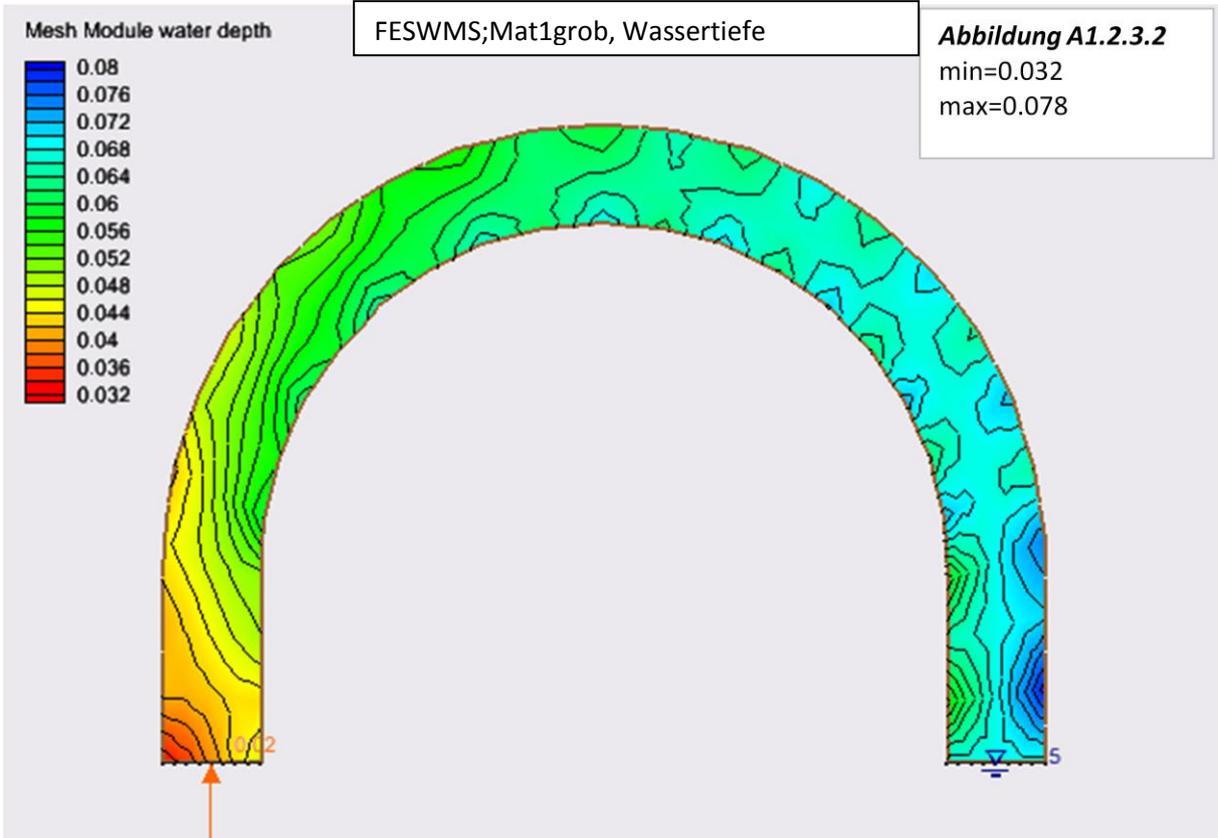
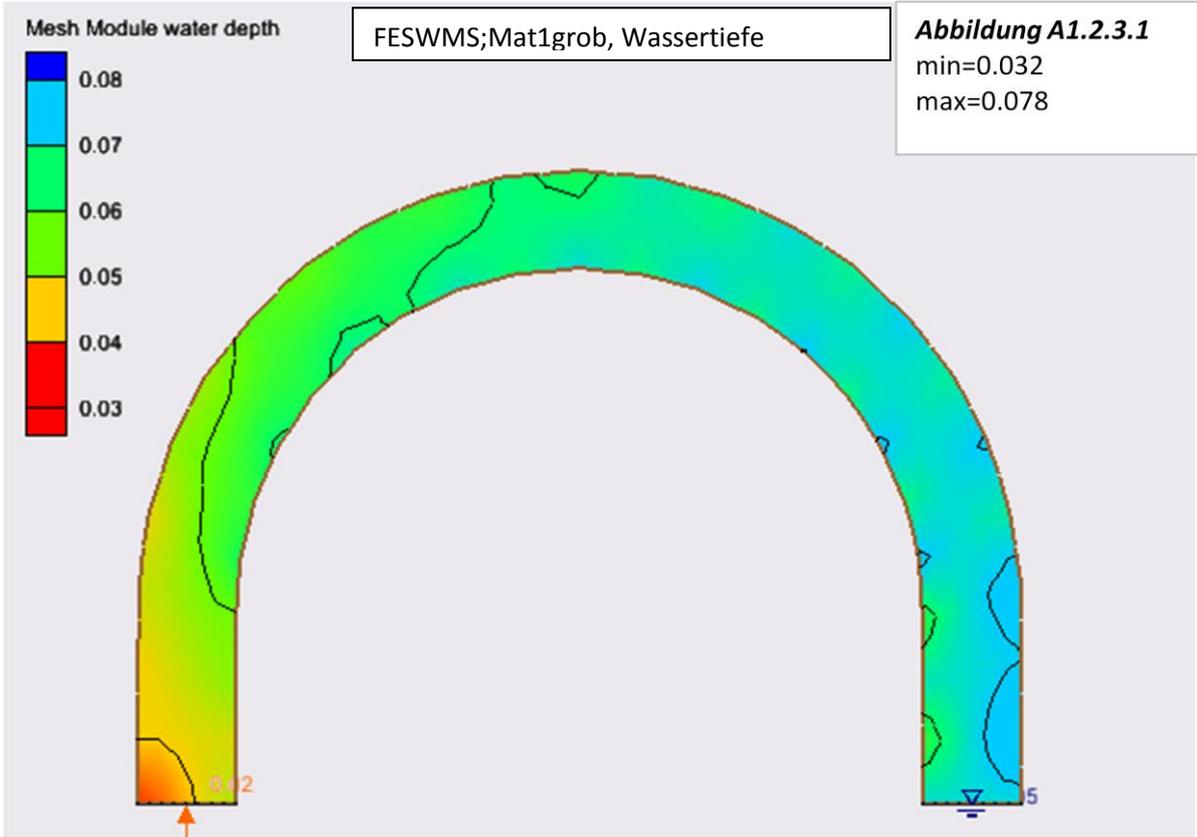
Anhang A



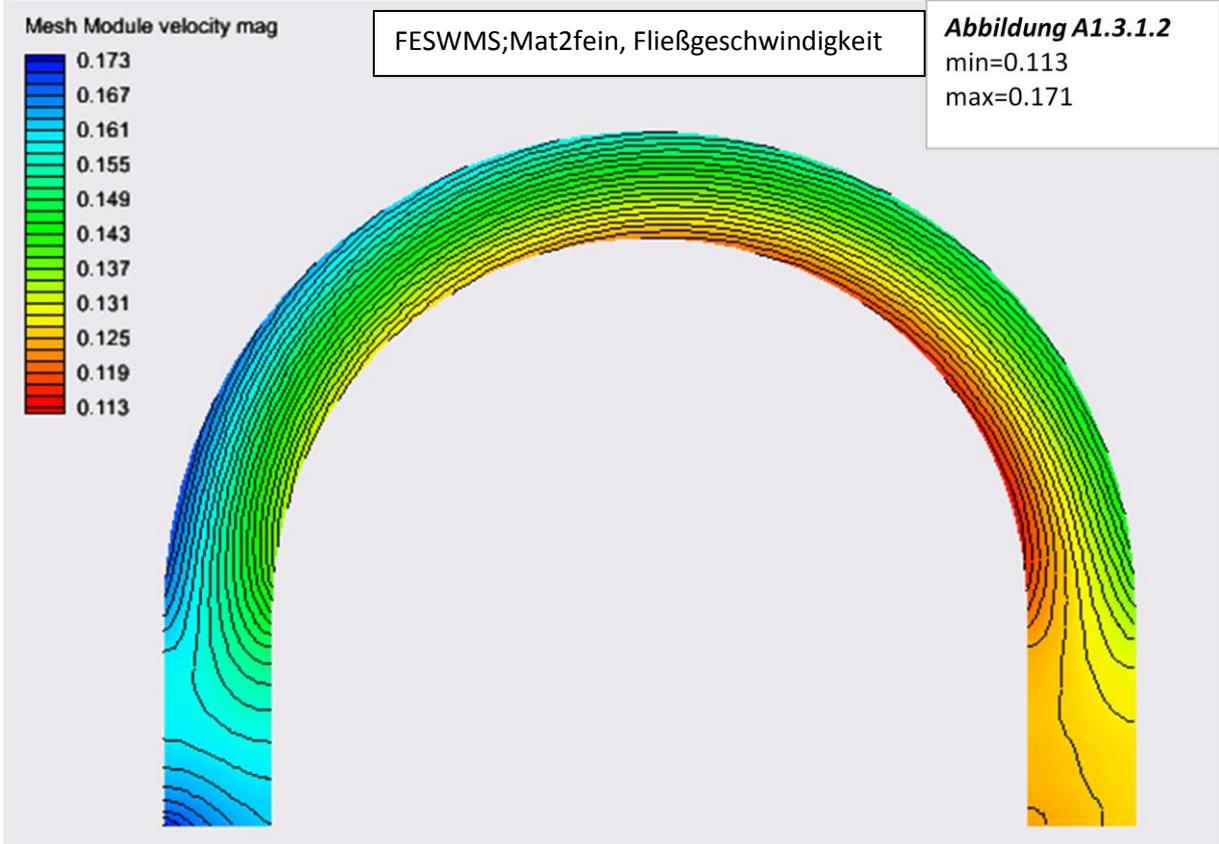
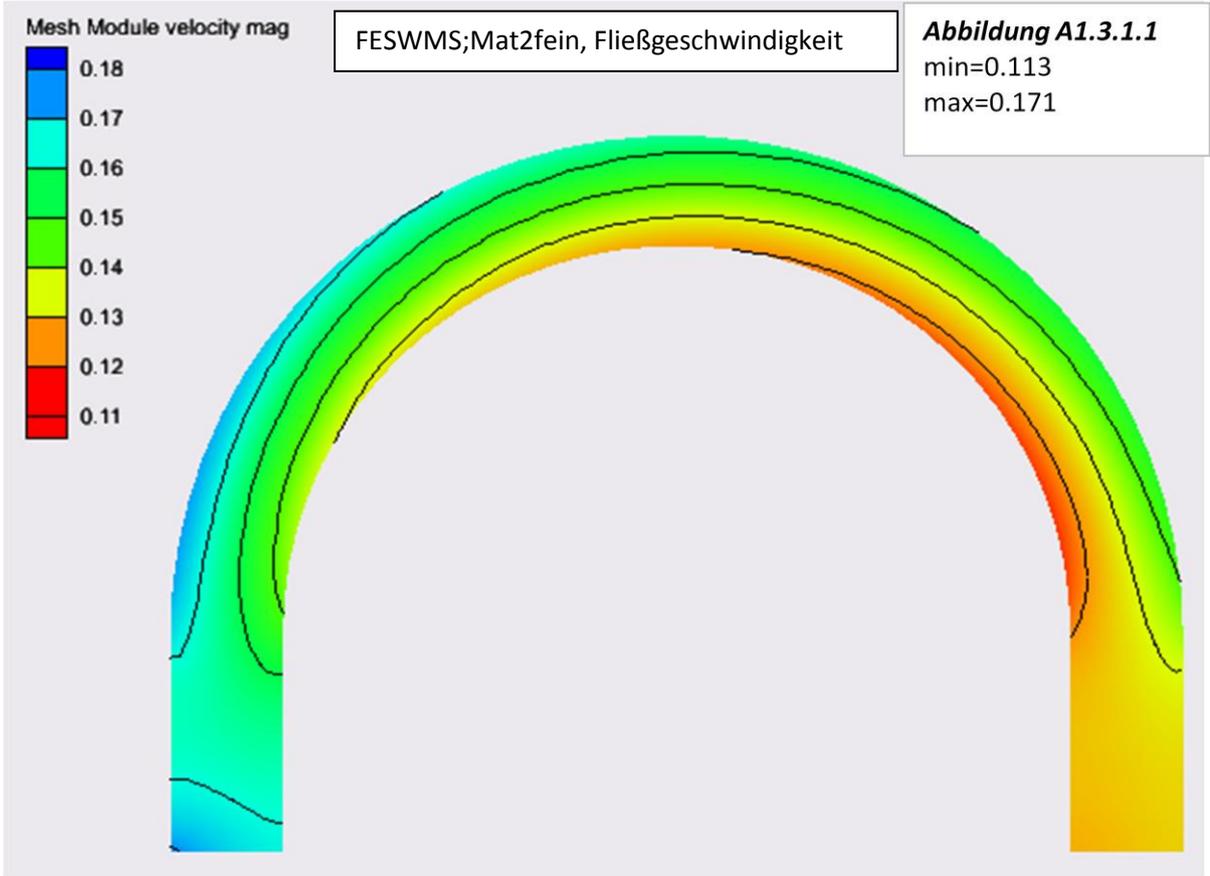
Anhang A



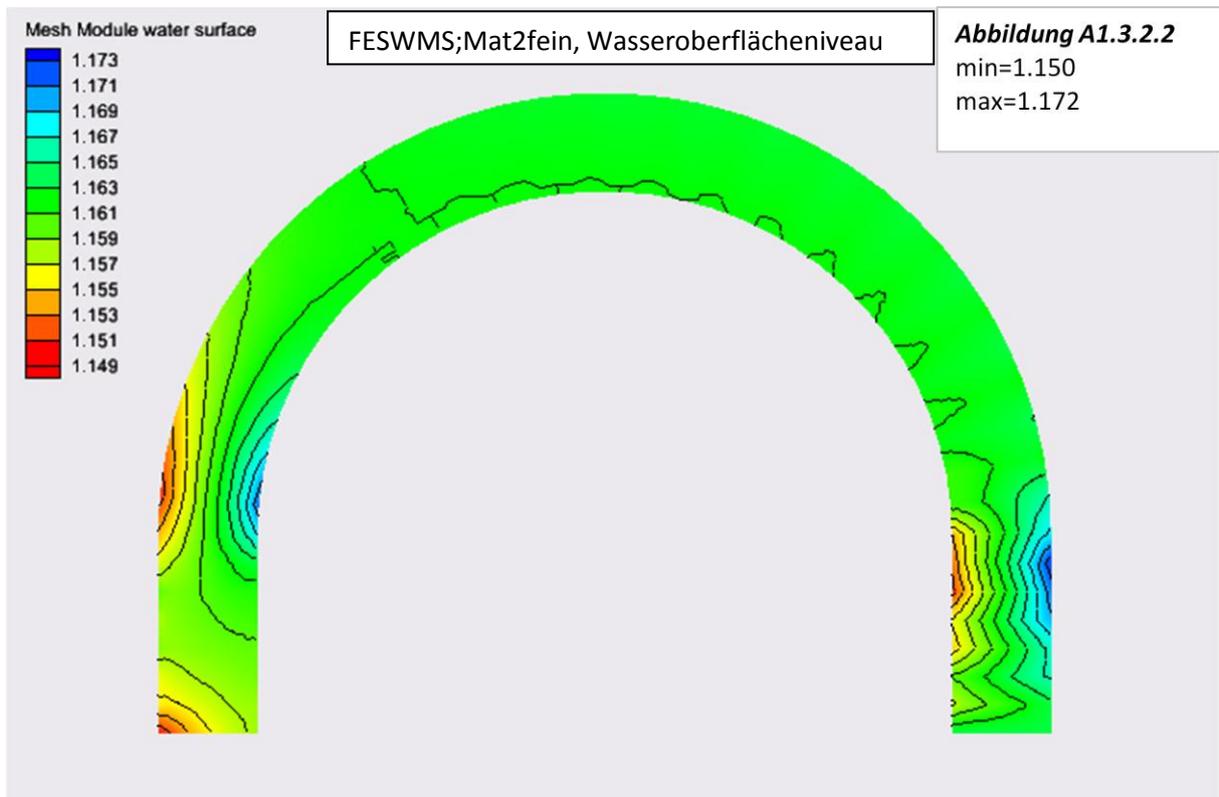
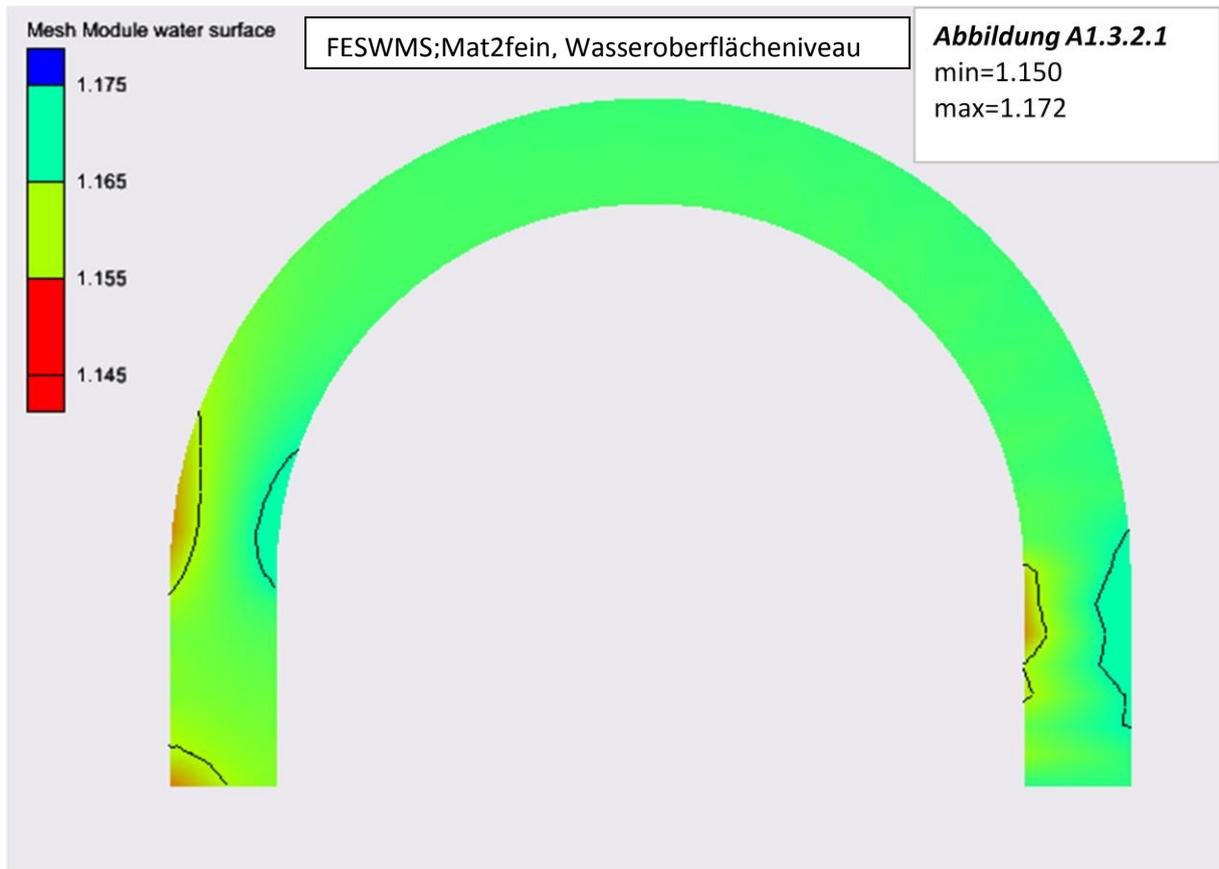
Anhang A



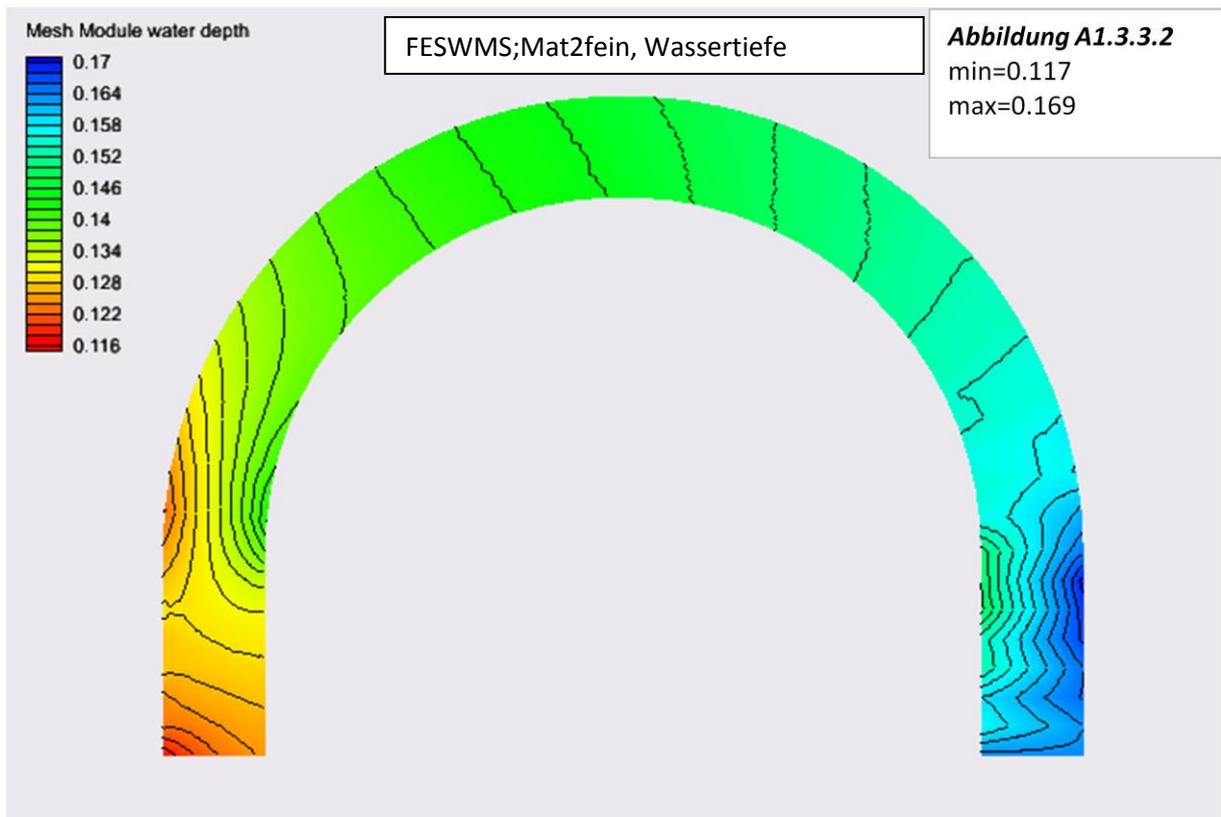
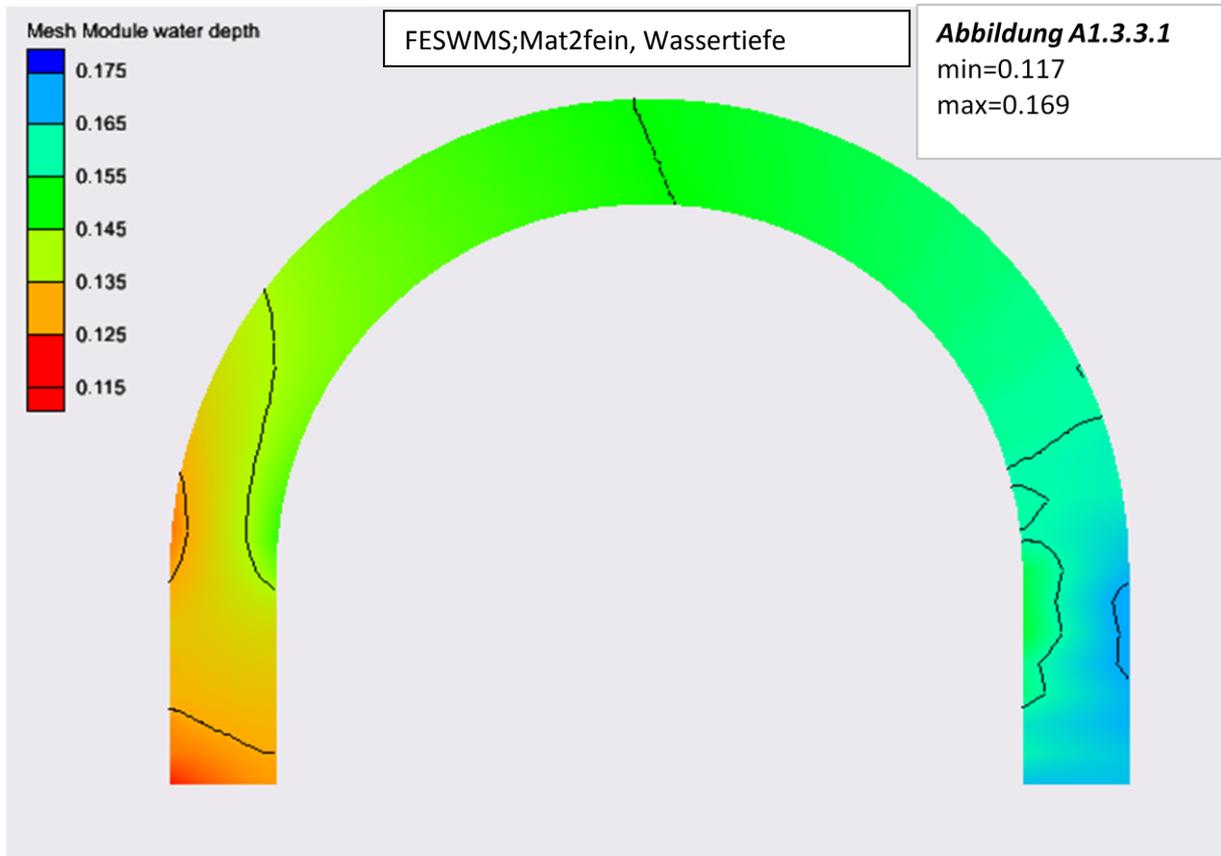
Anhang A



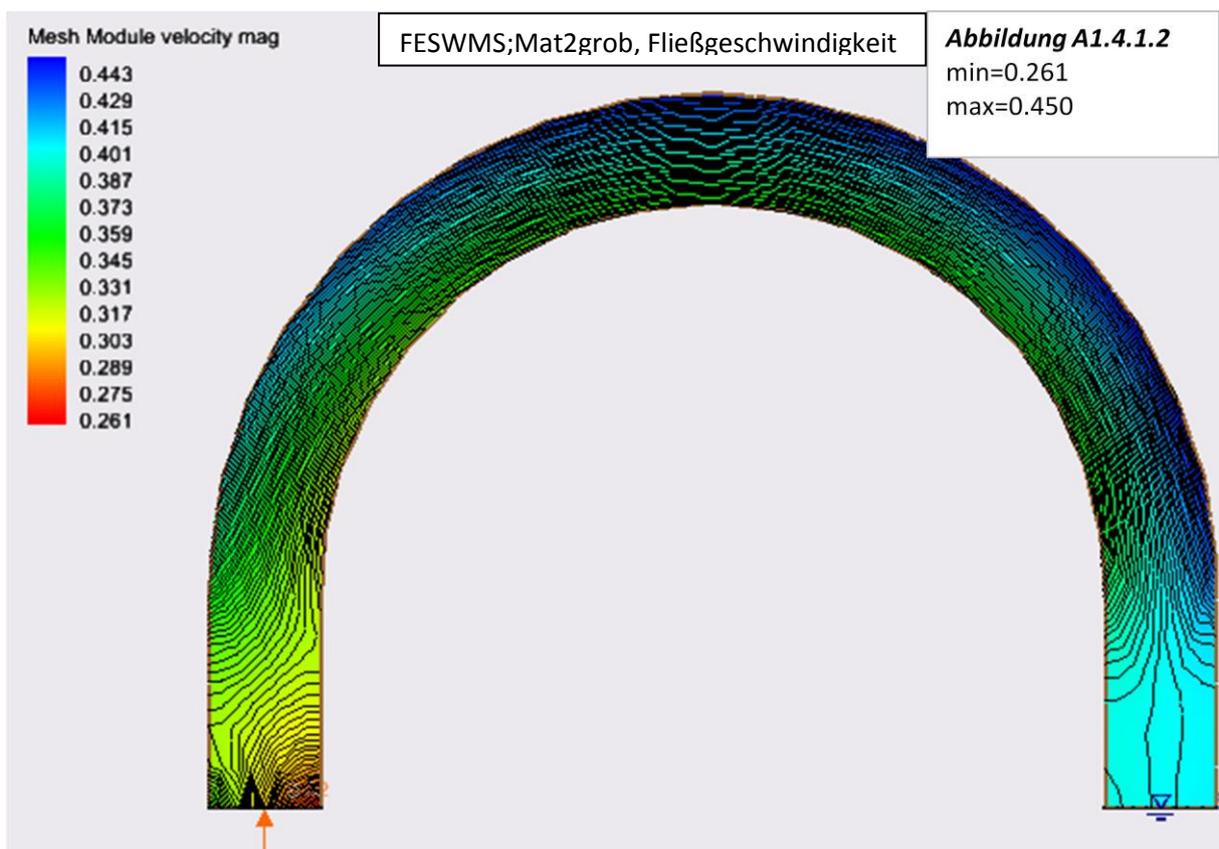
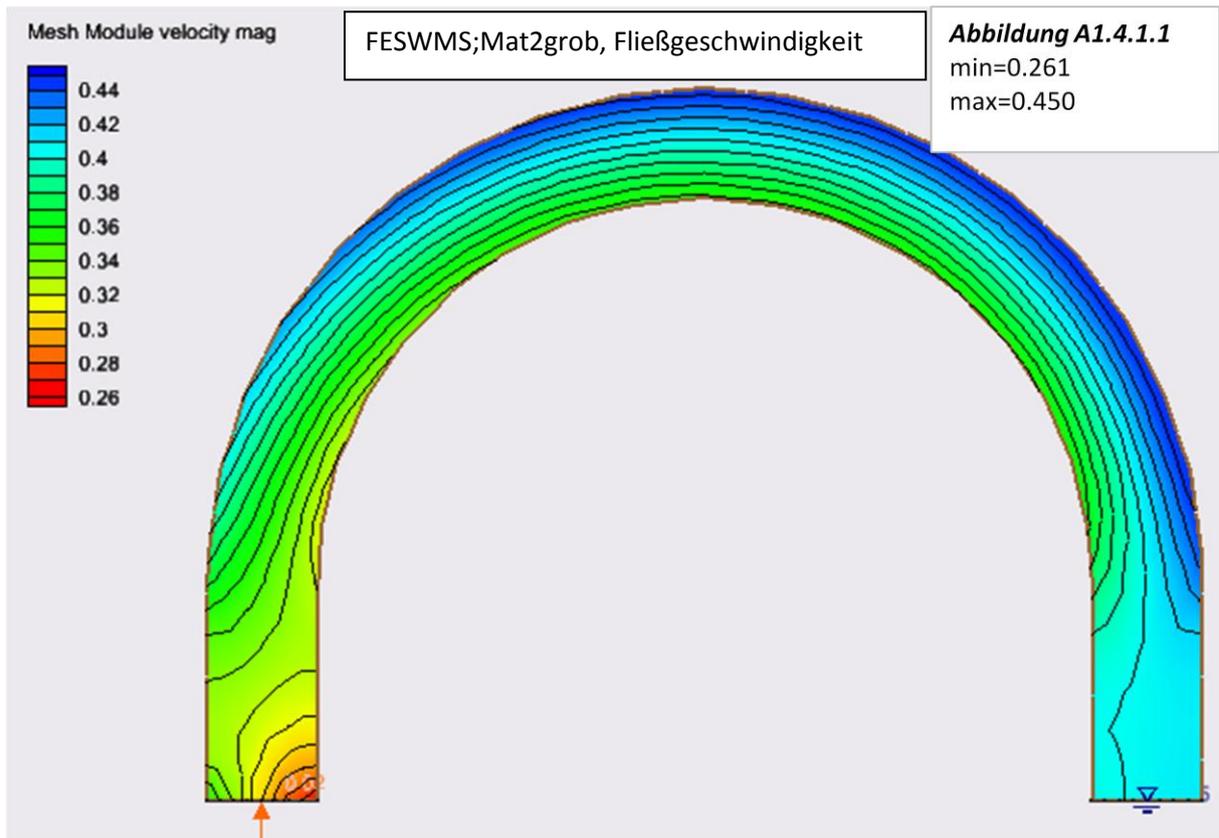
Anhang A



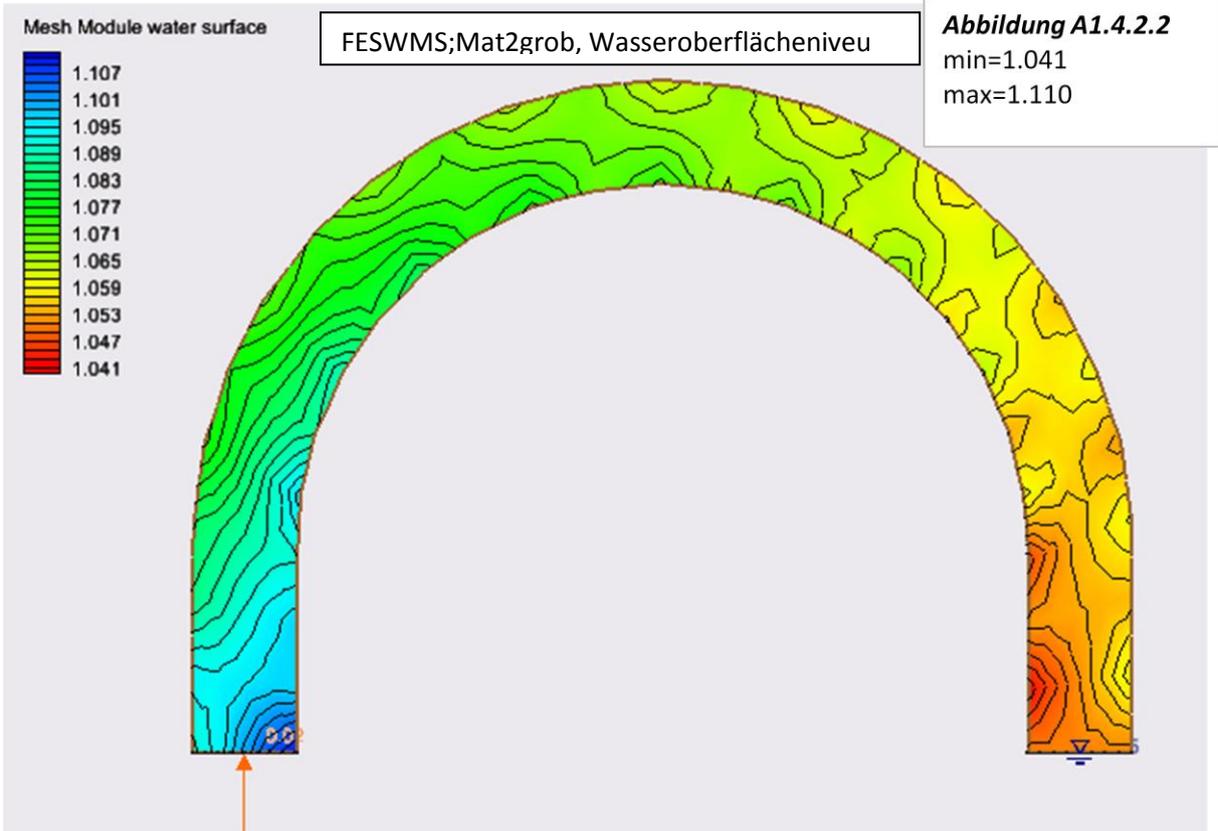
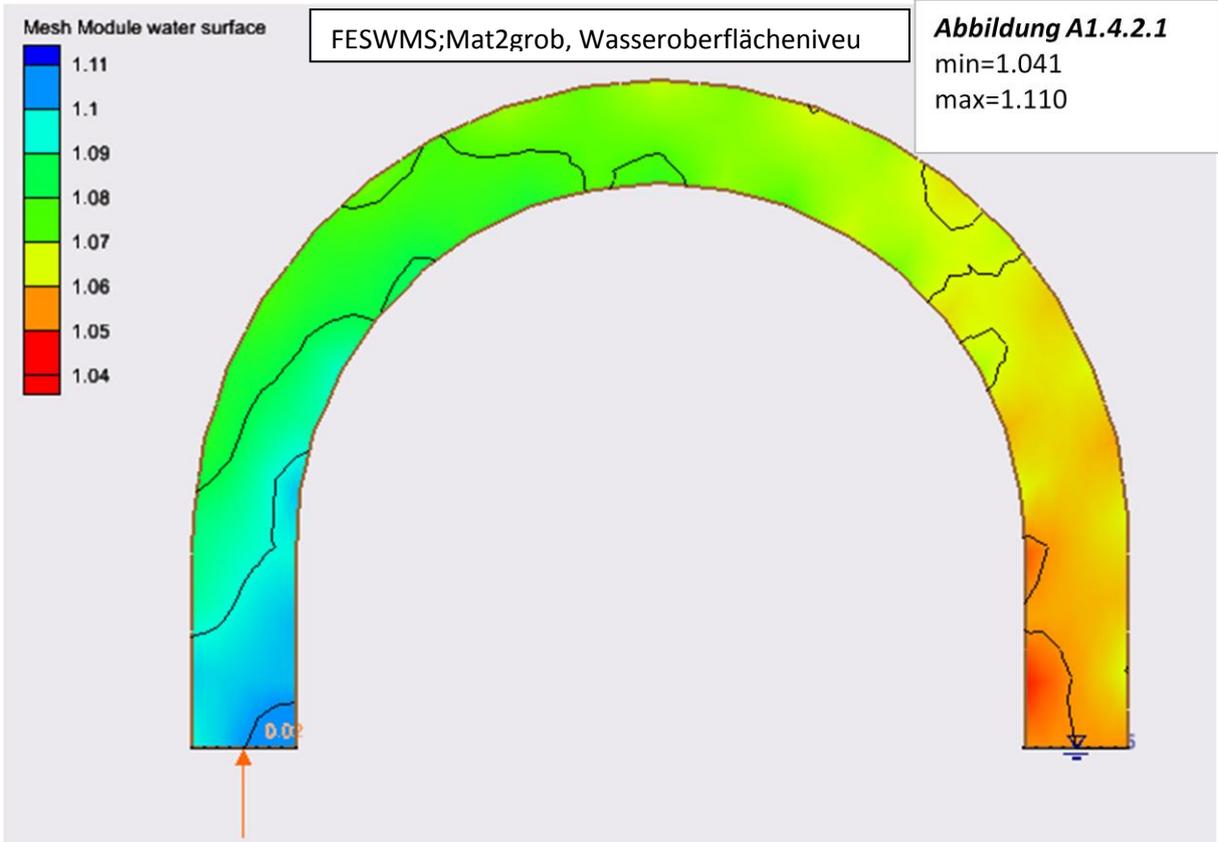
Anhang A



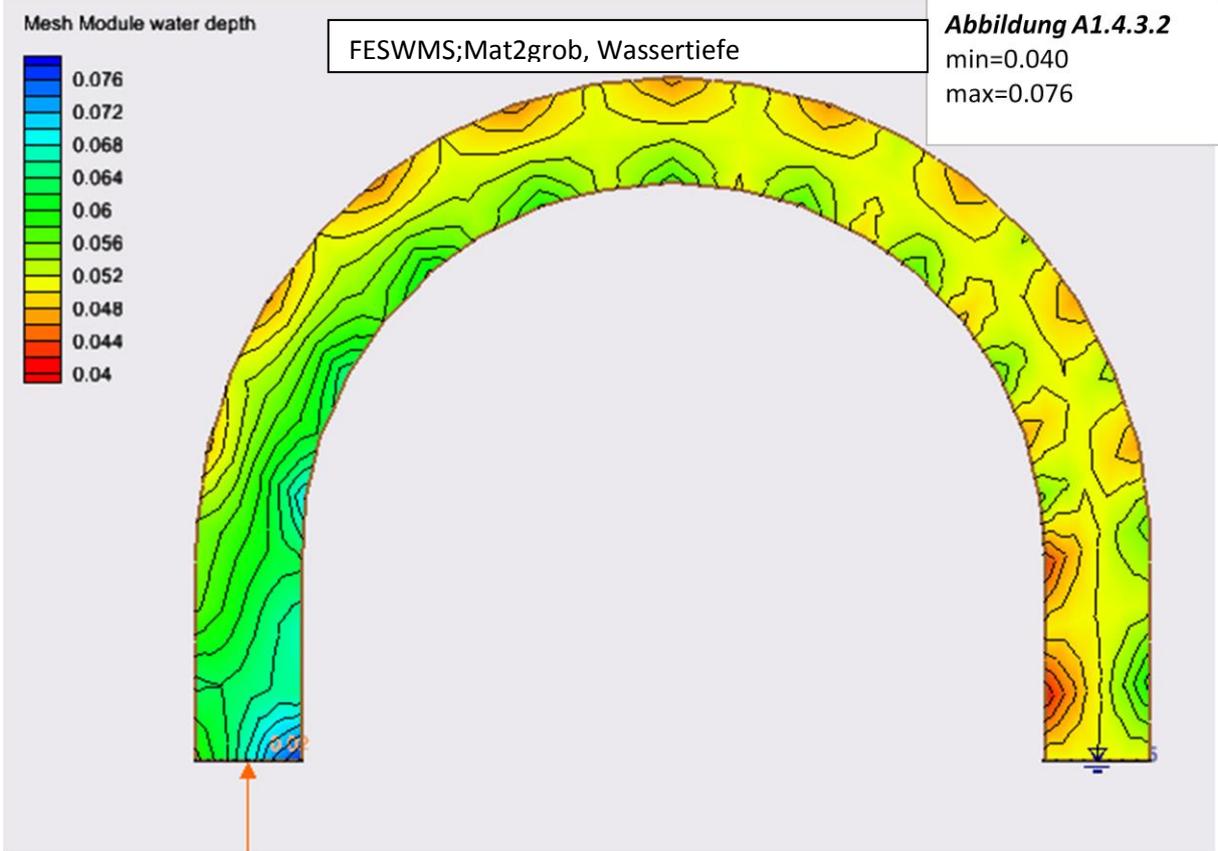
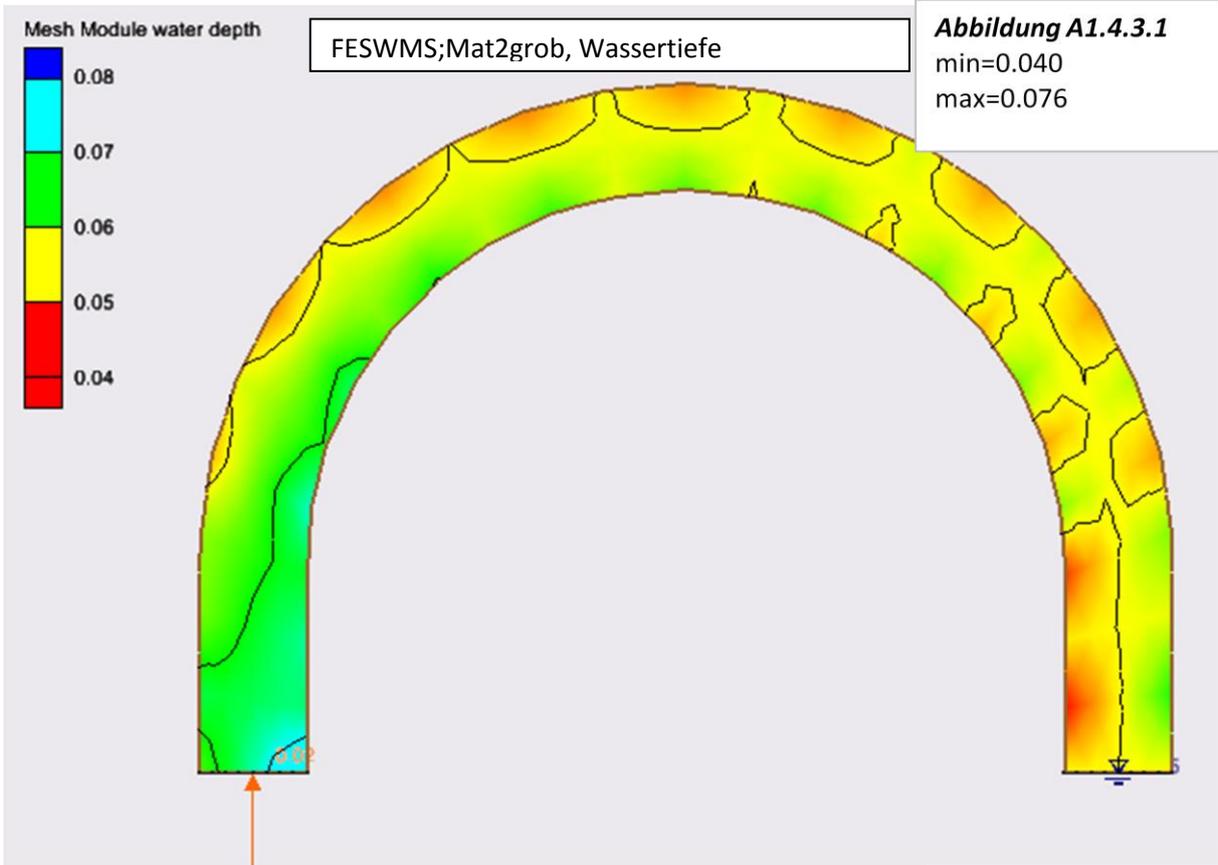
Anhang A



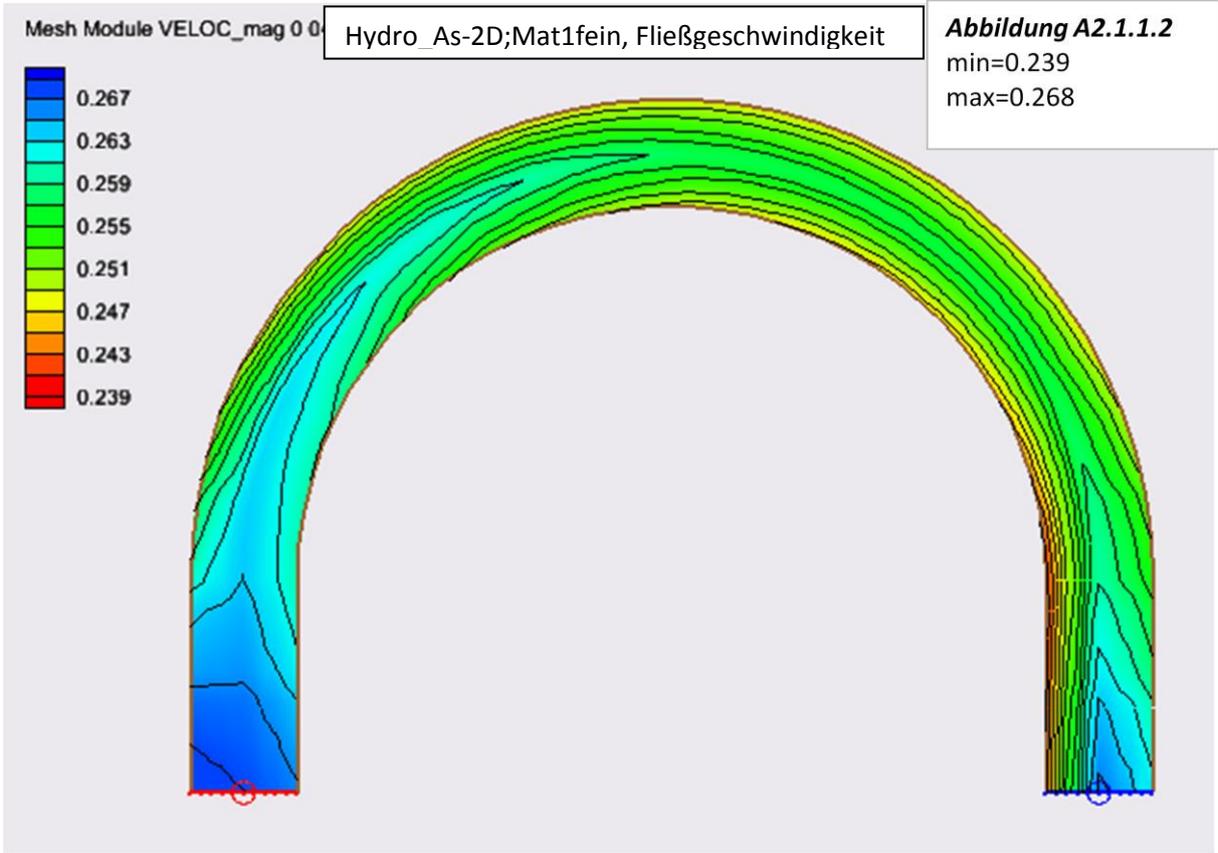
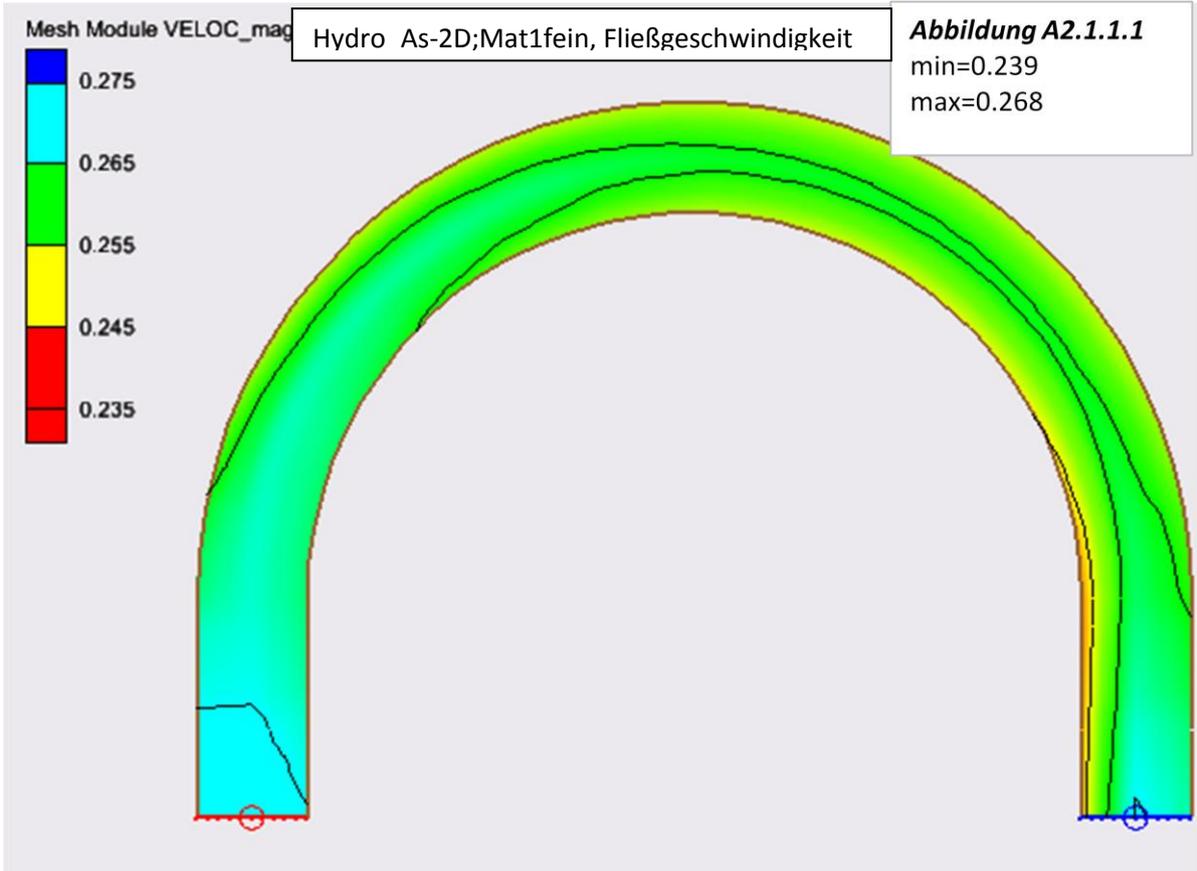
Anhang A



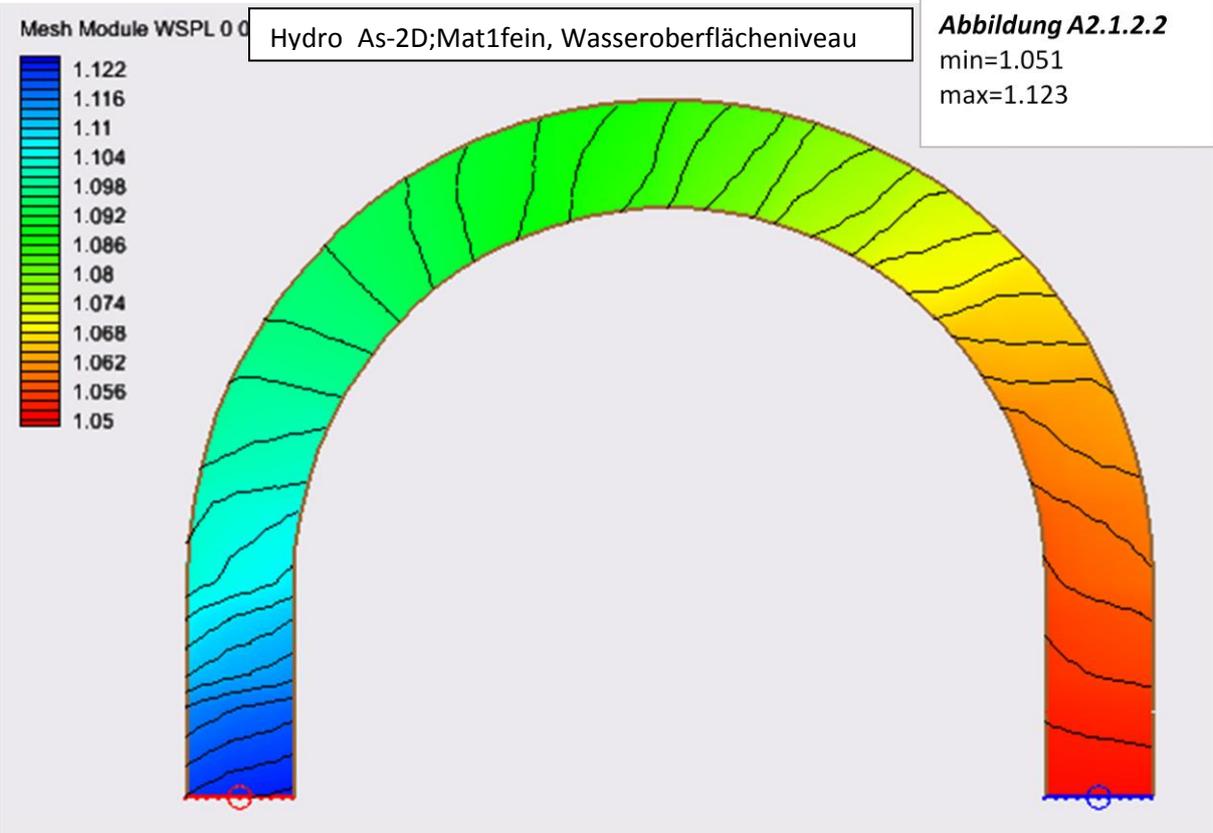
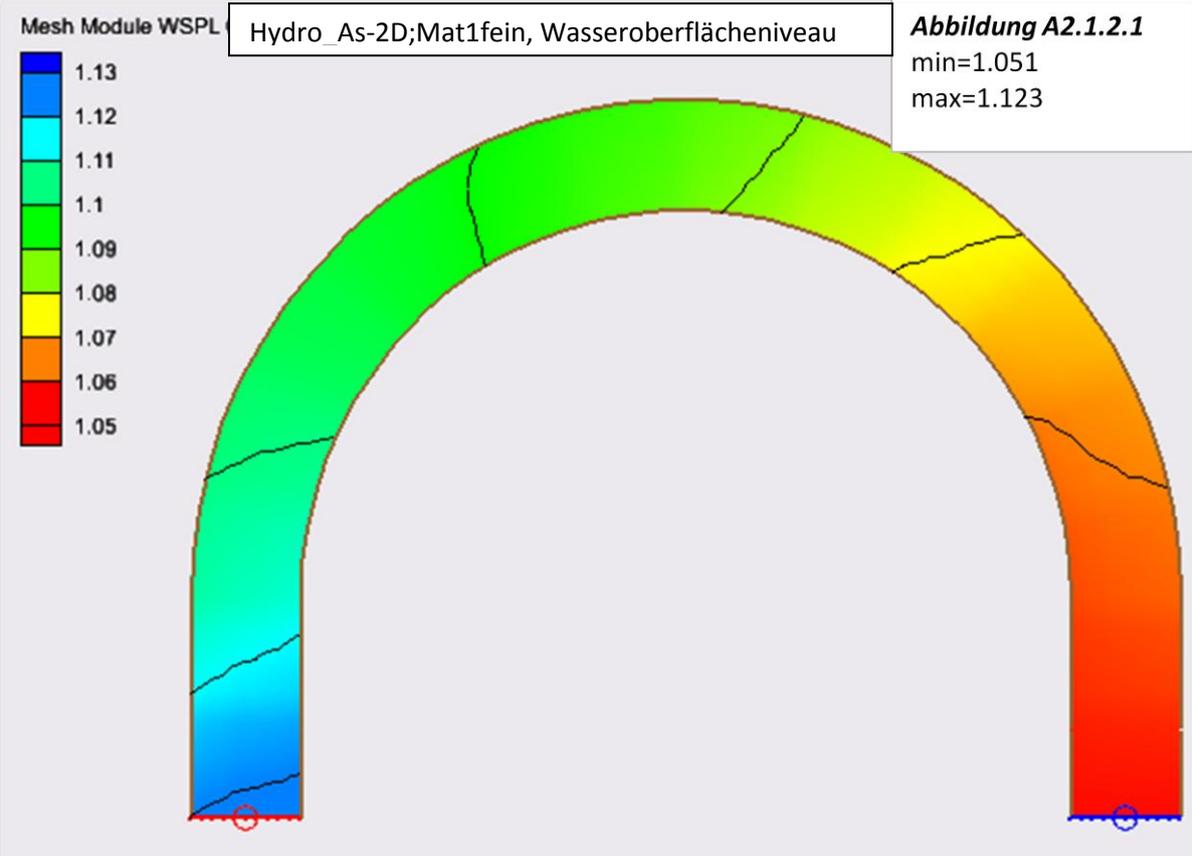
Anhang A



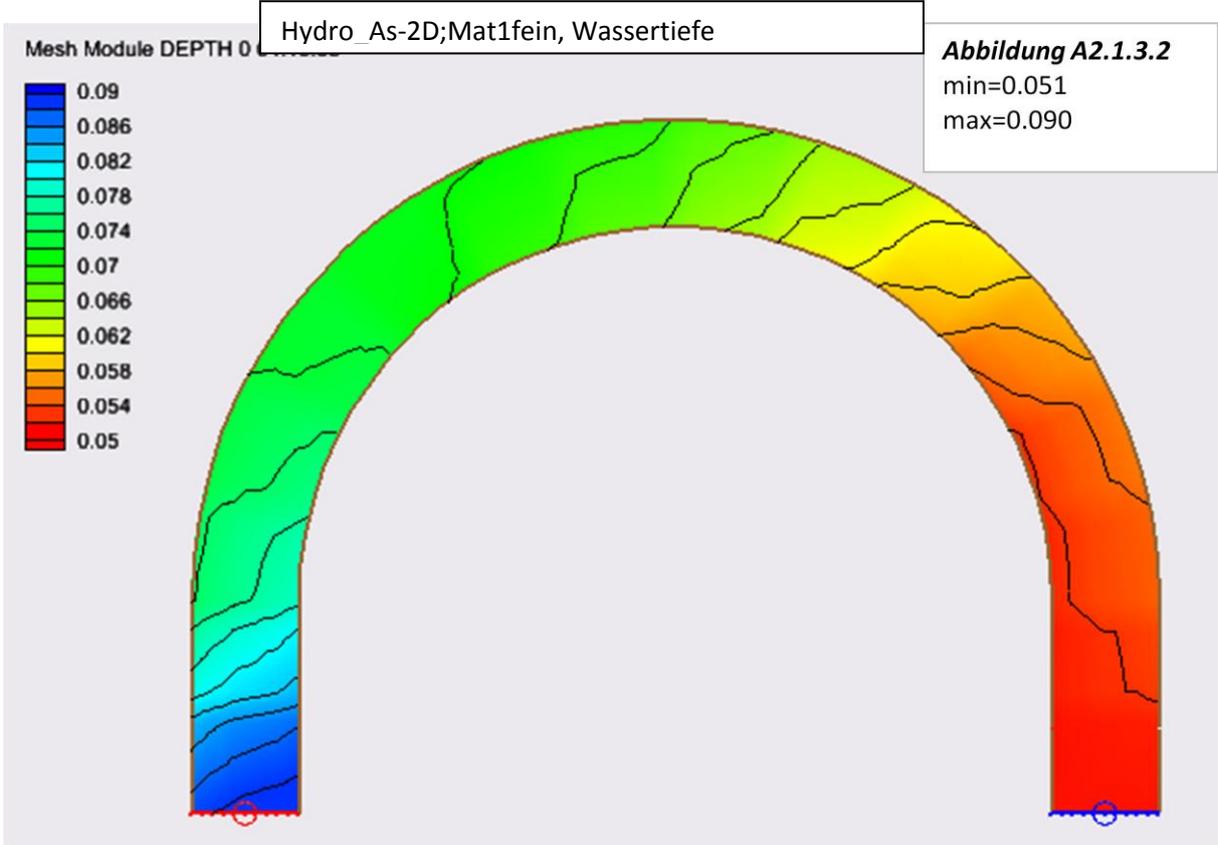
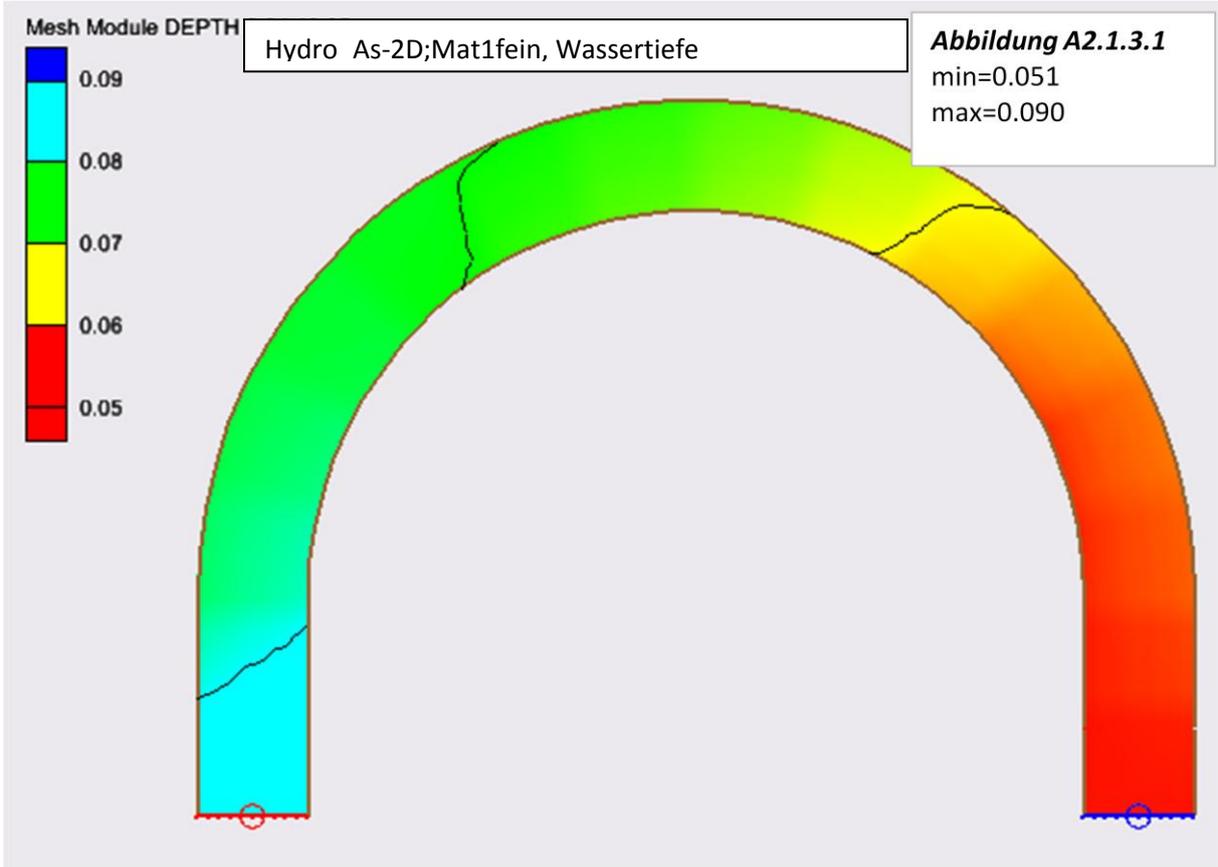
Anhang A



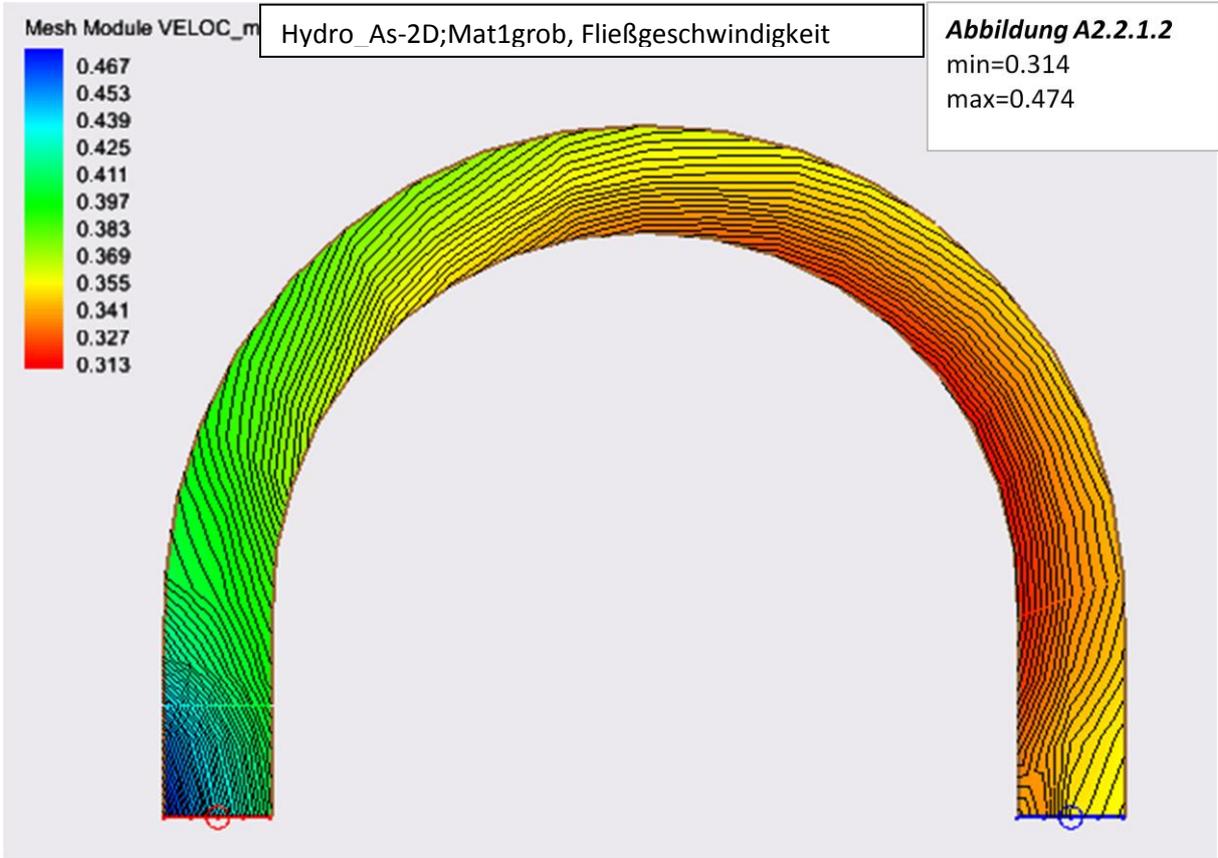
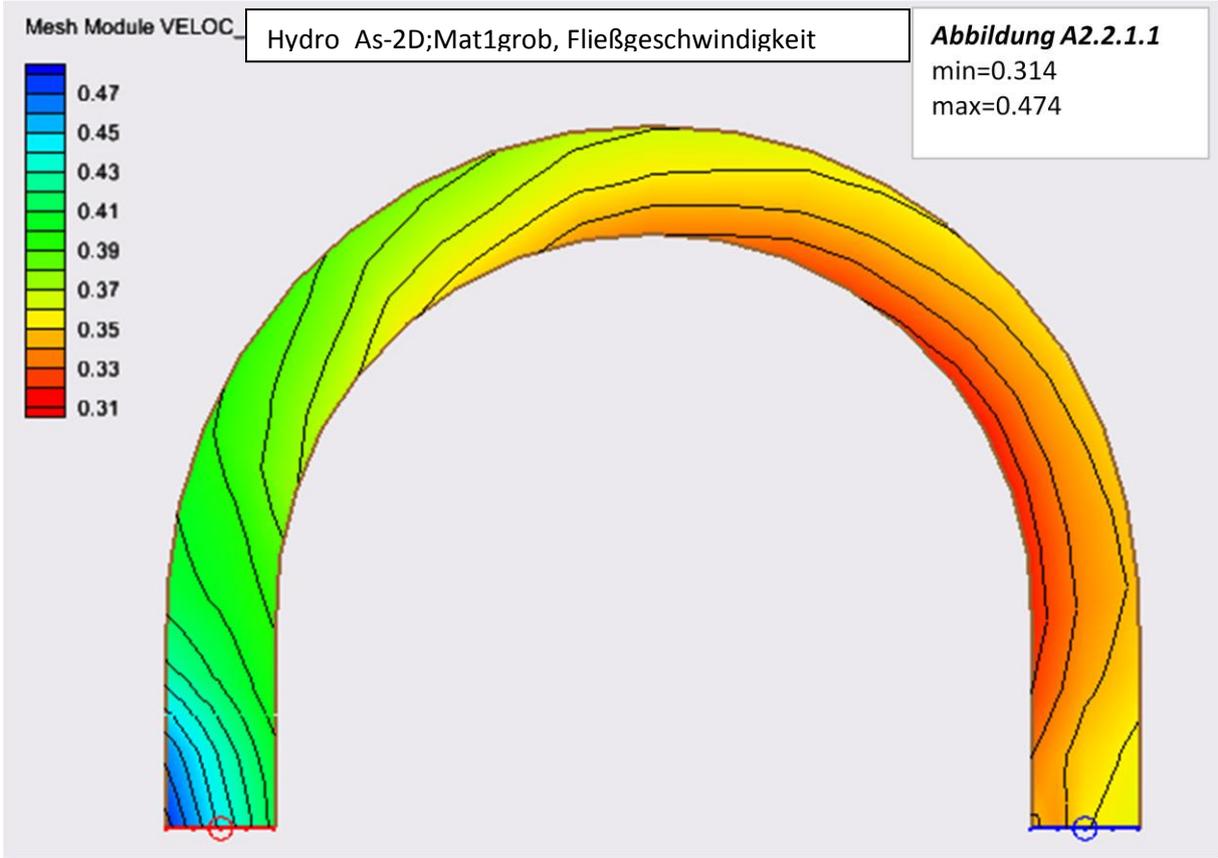
Anhang A



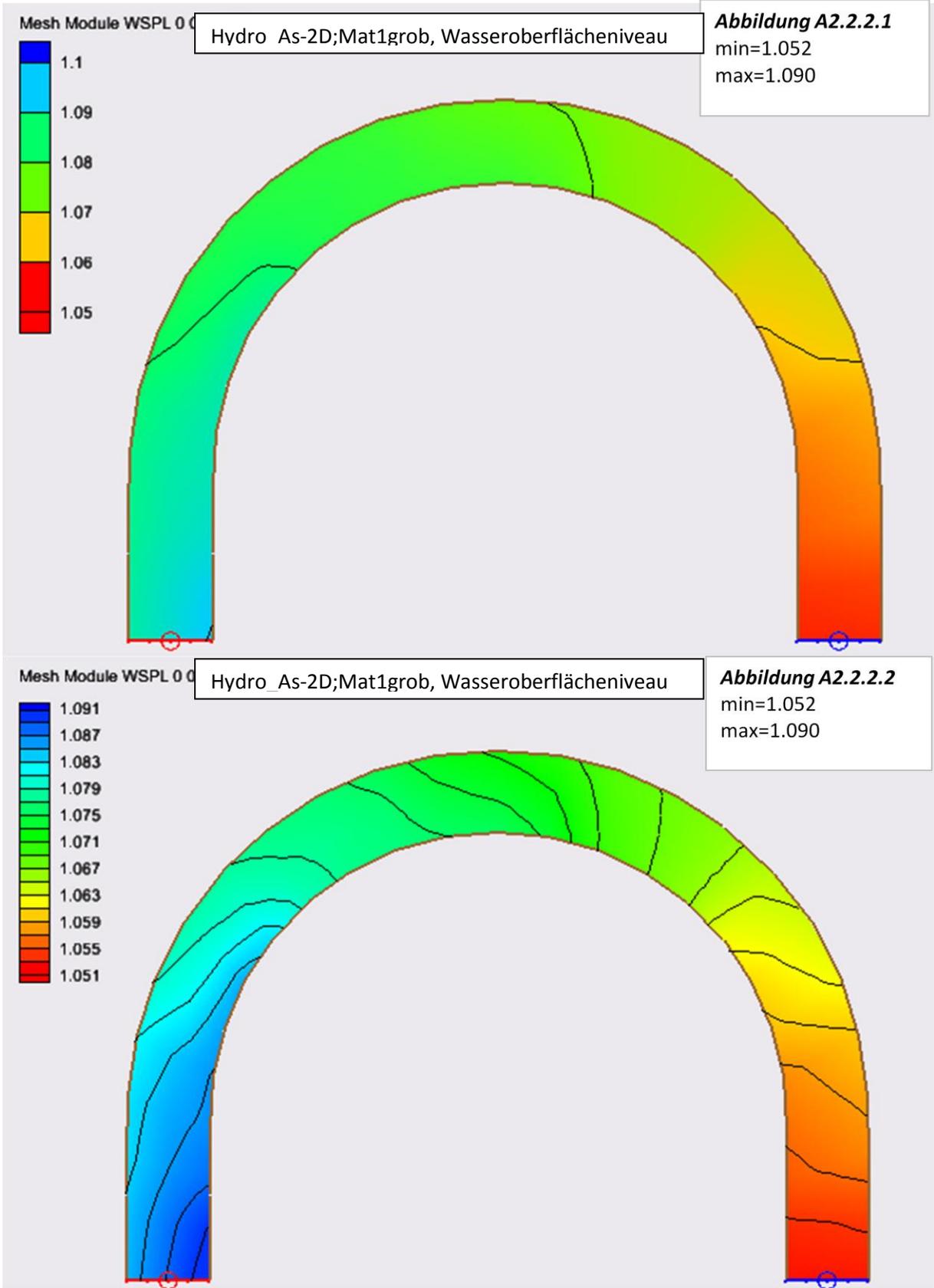
Anhang A



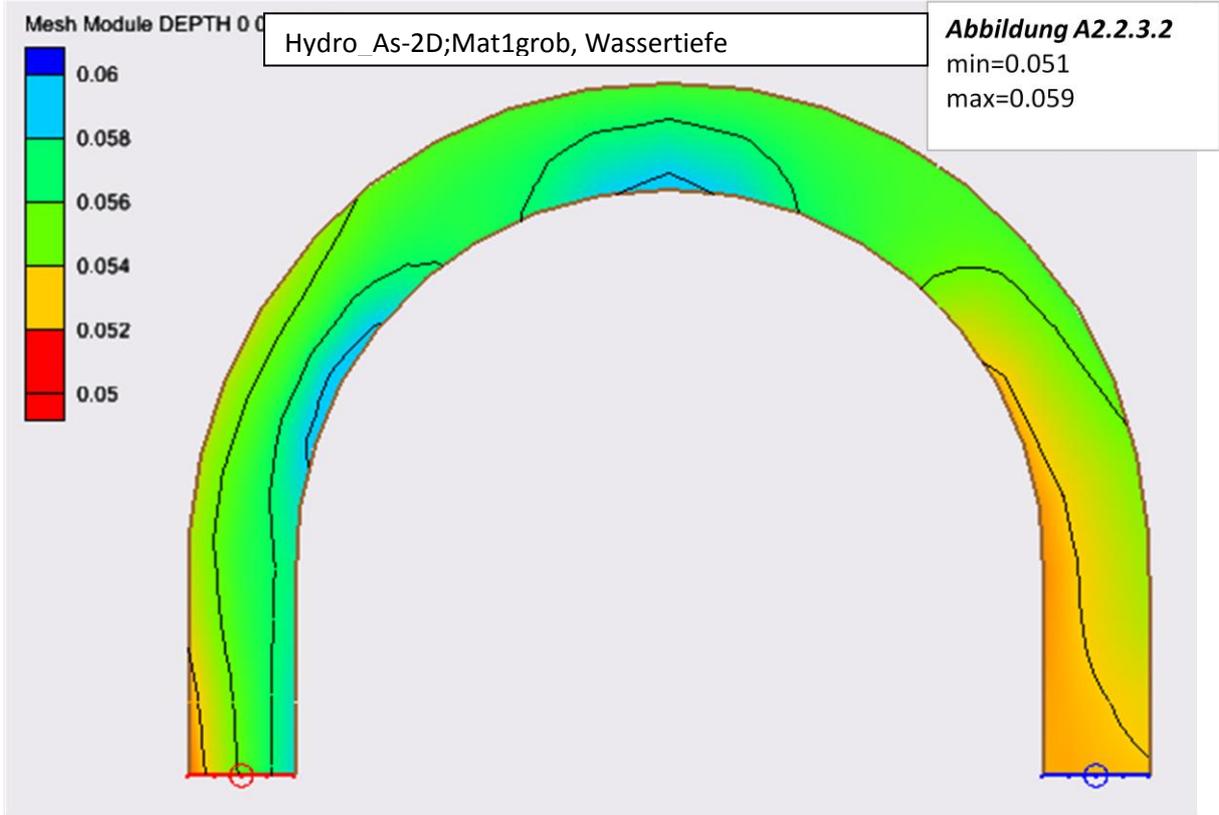
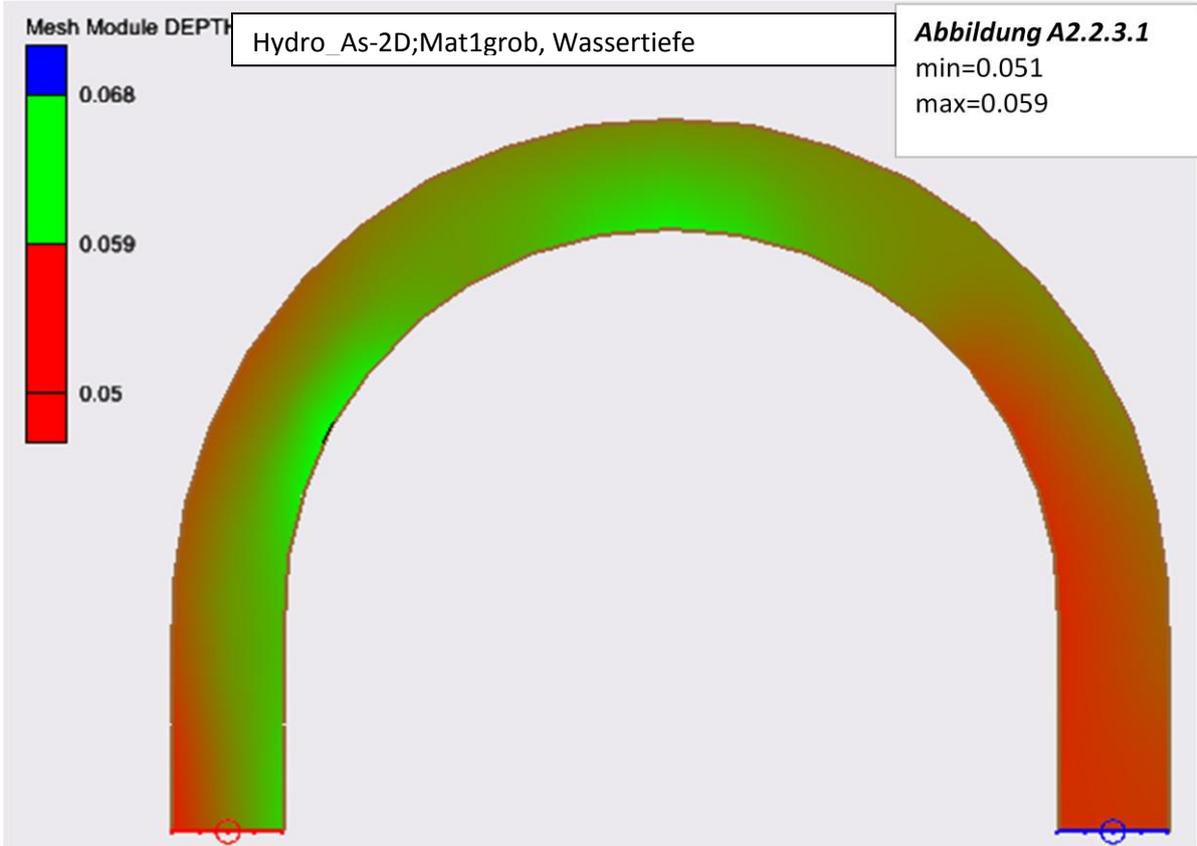
Anhang A



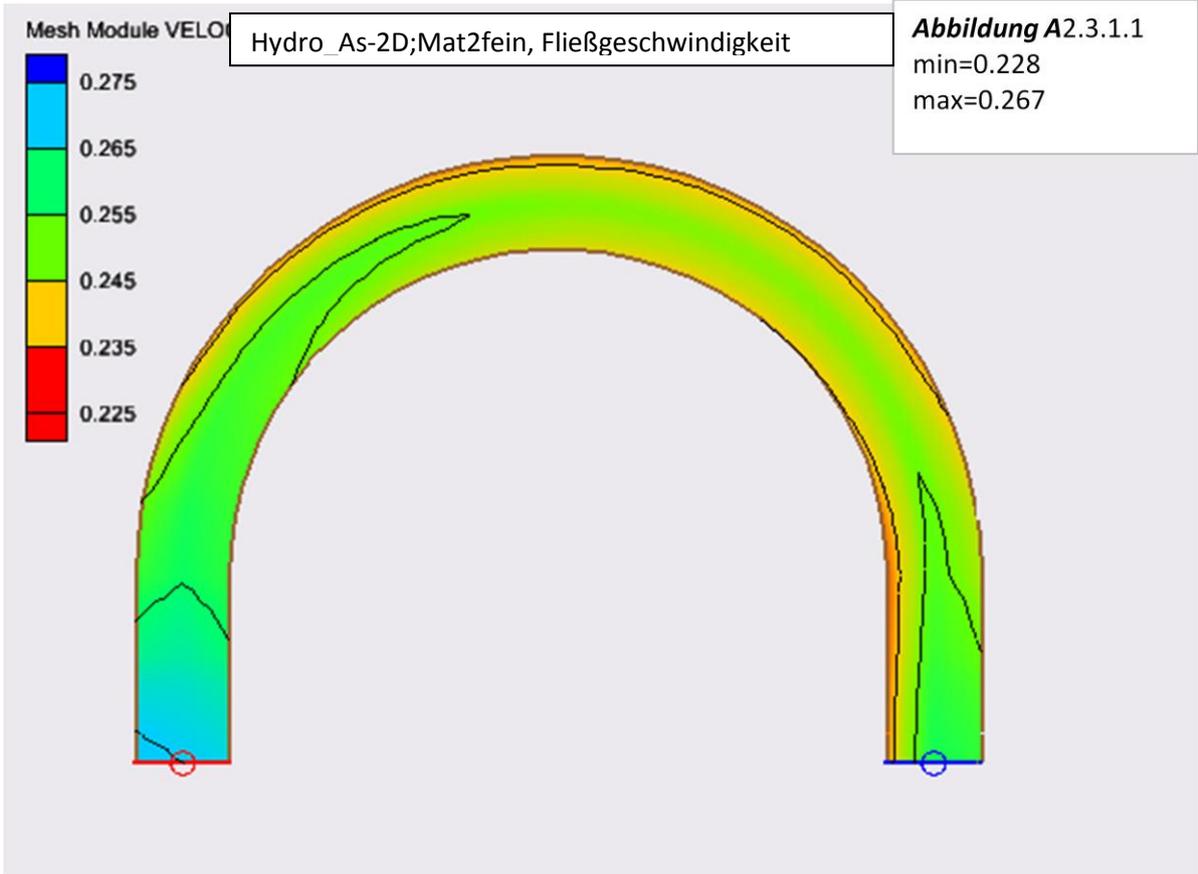
Anhang A



Anhang A



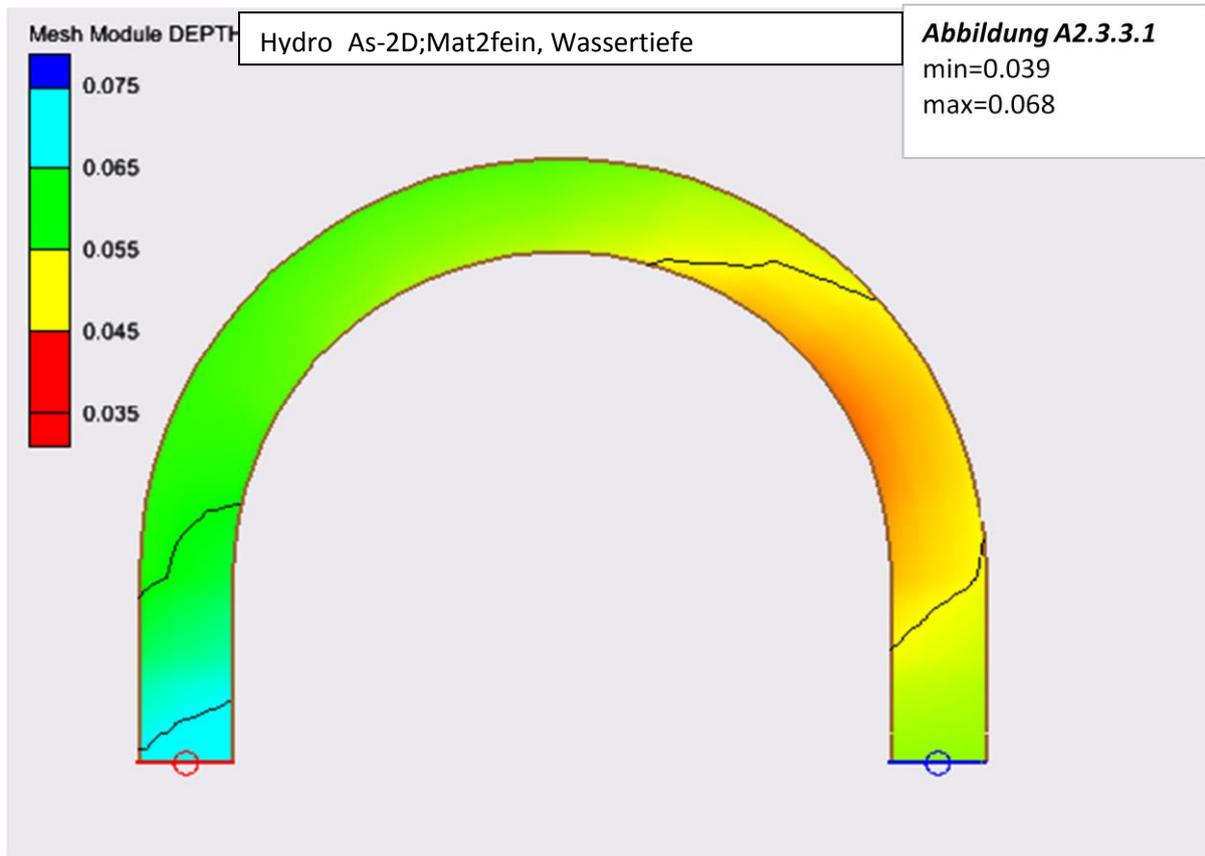
Anhang A



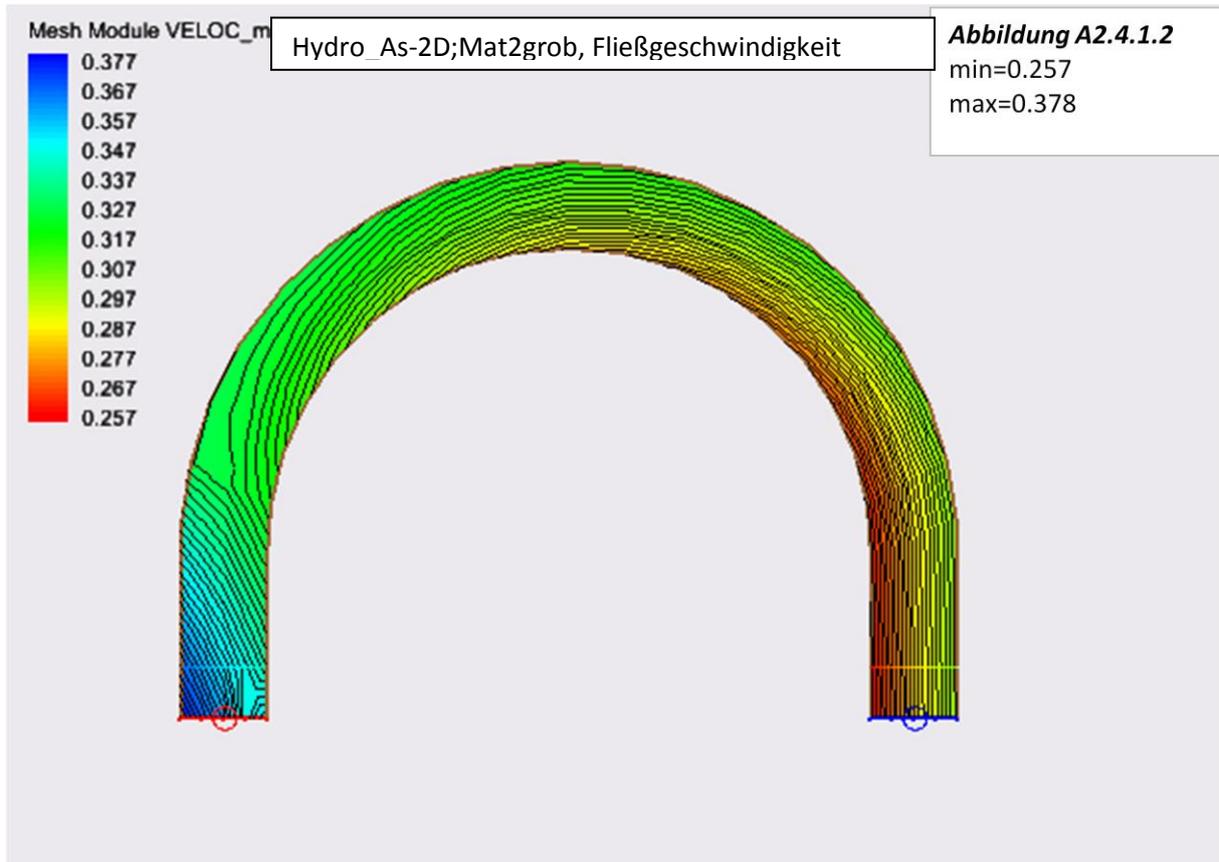
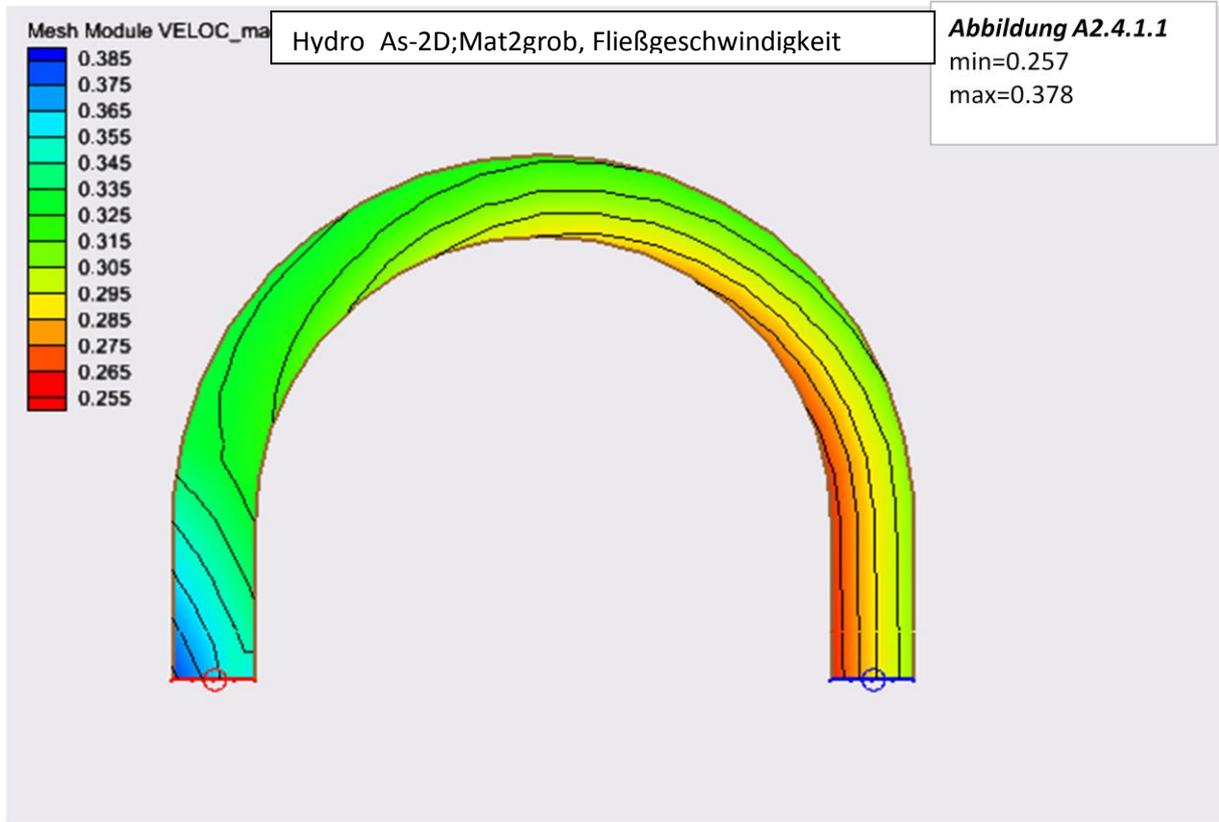
Anhang A



Anhang A



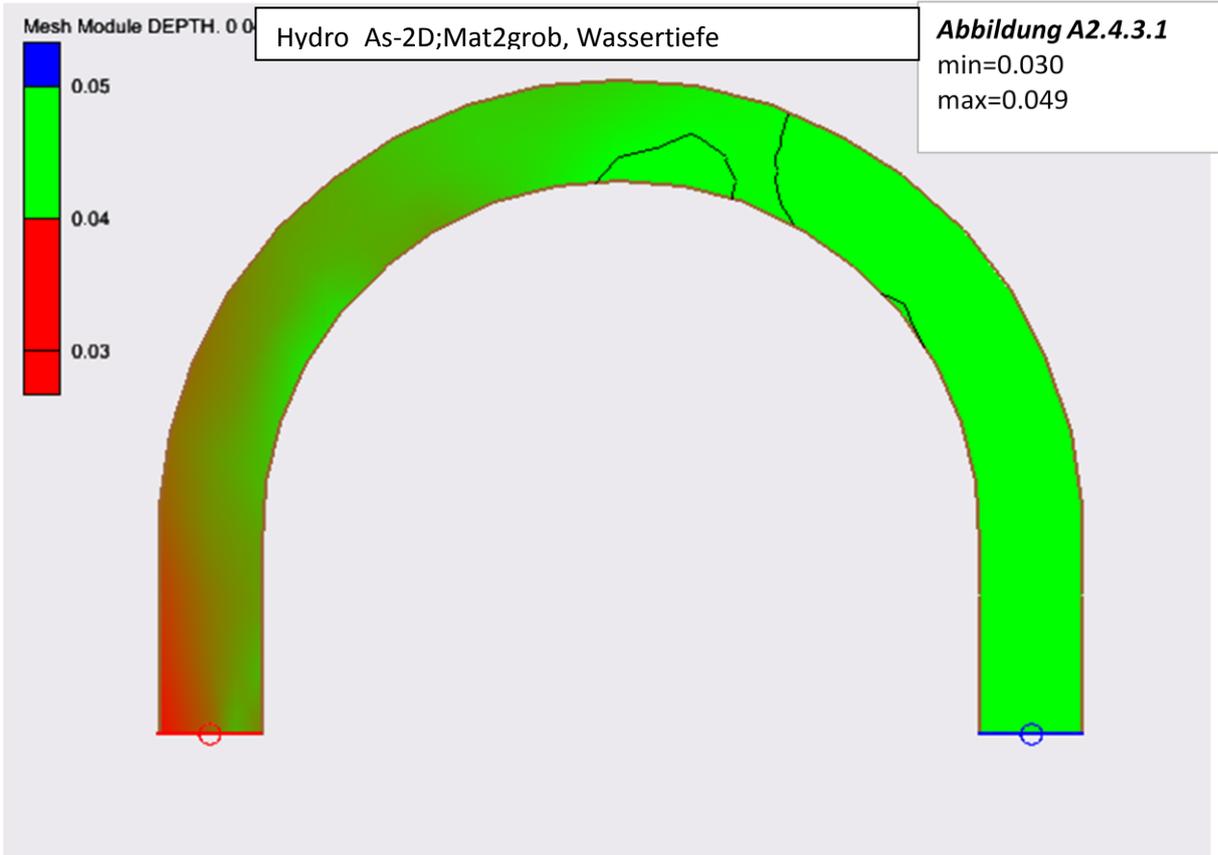
Anhang A



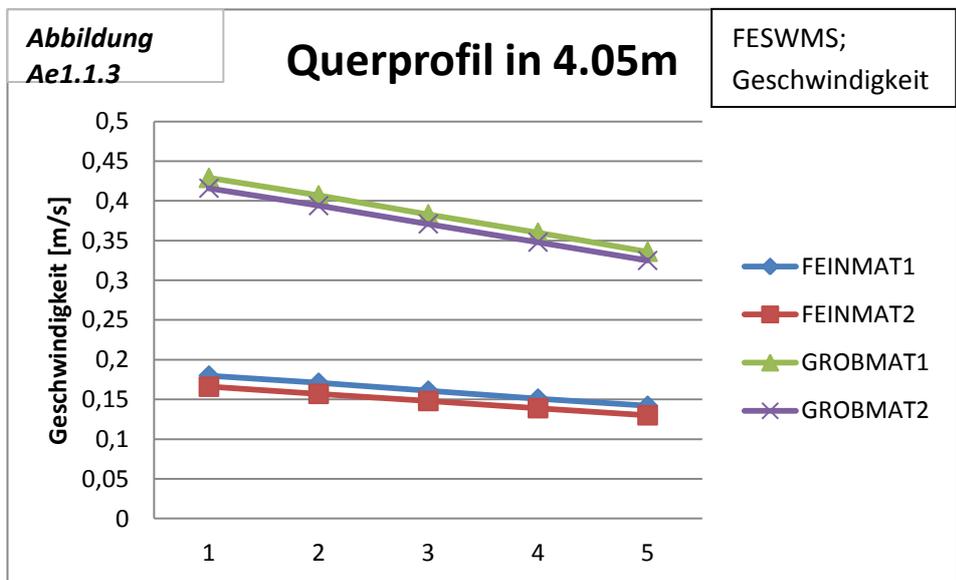
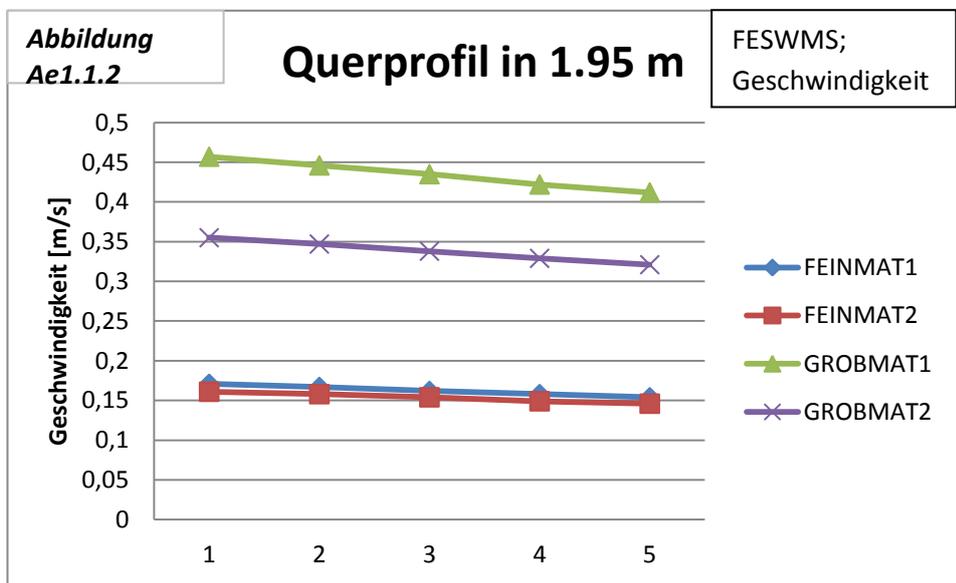
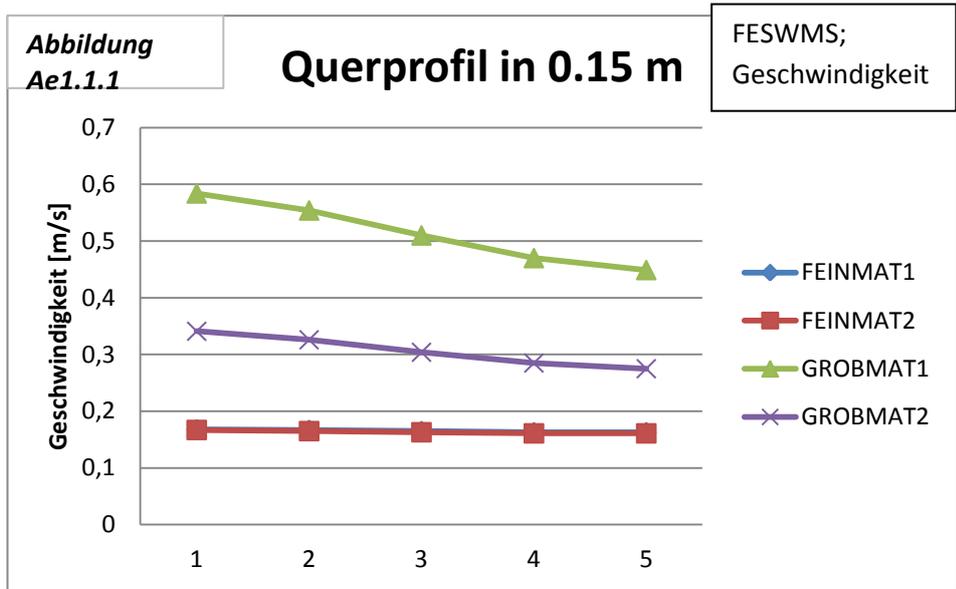
Anhang A



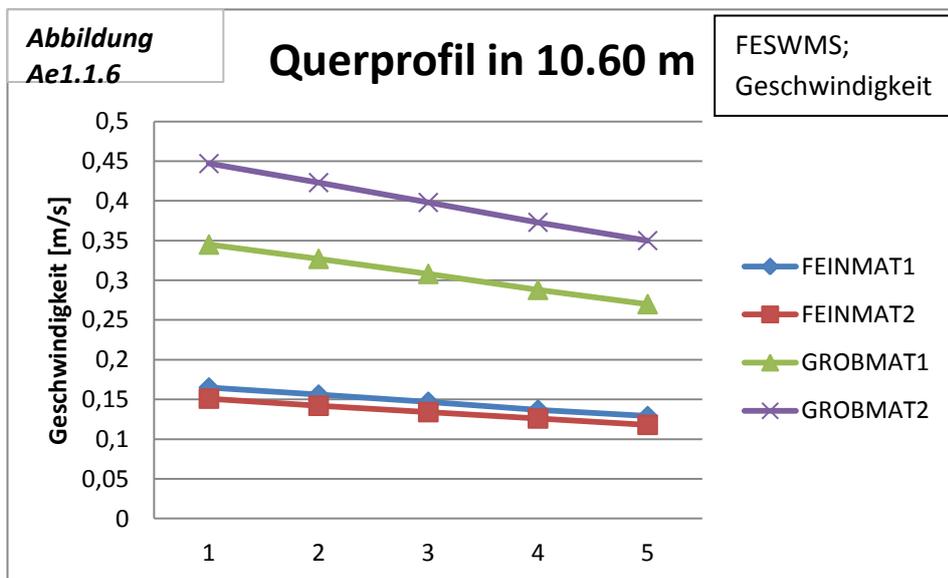
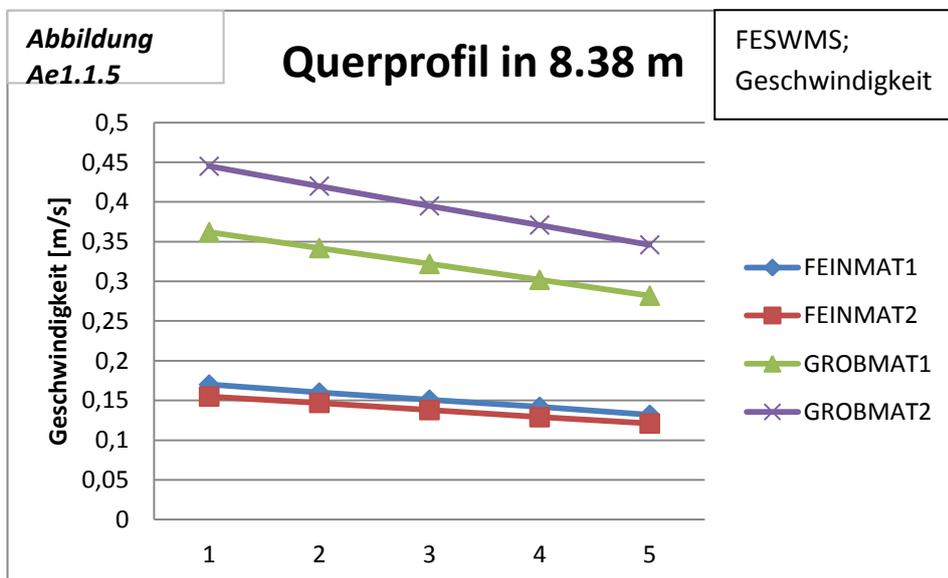
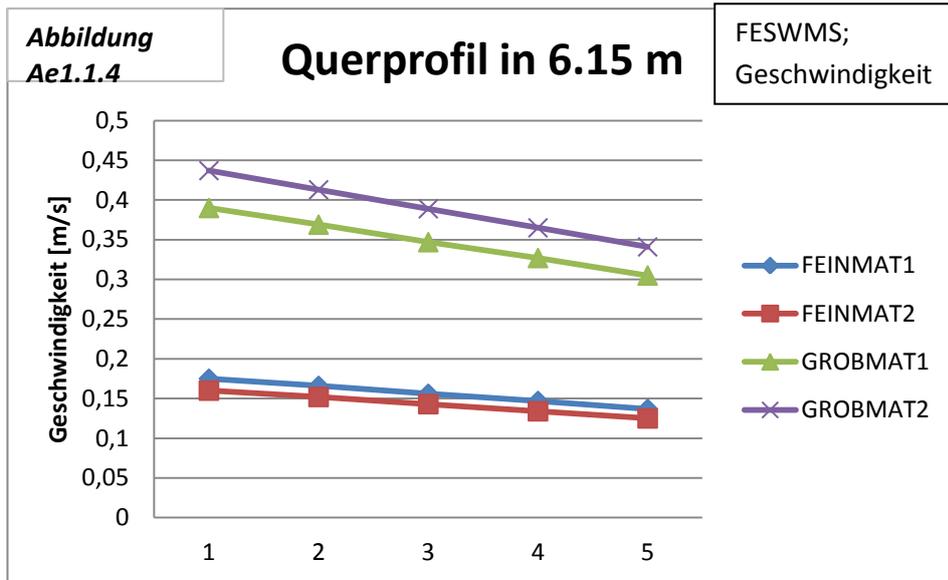
Anhang A



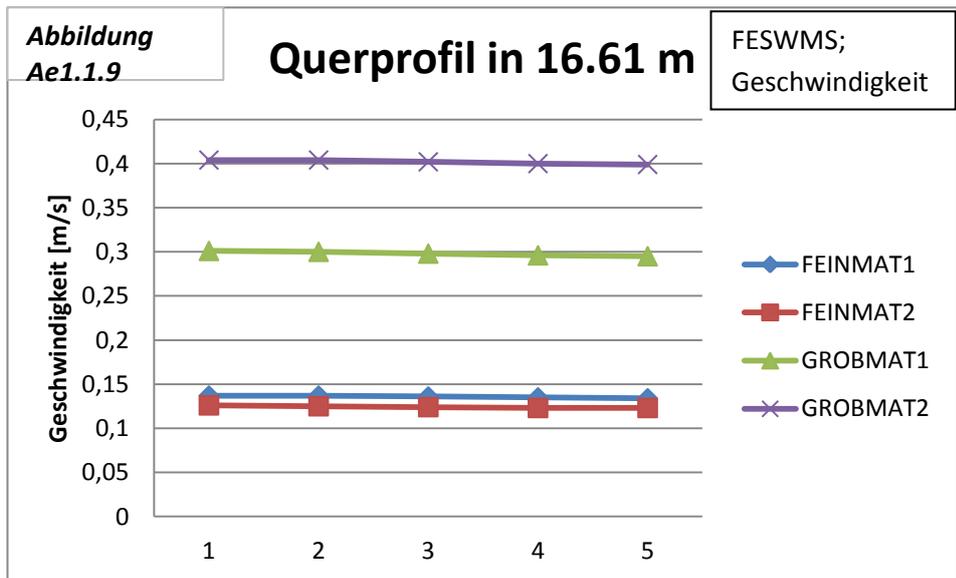
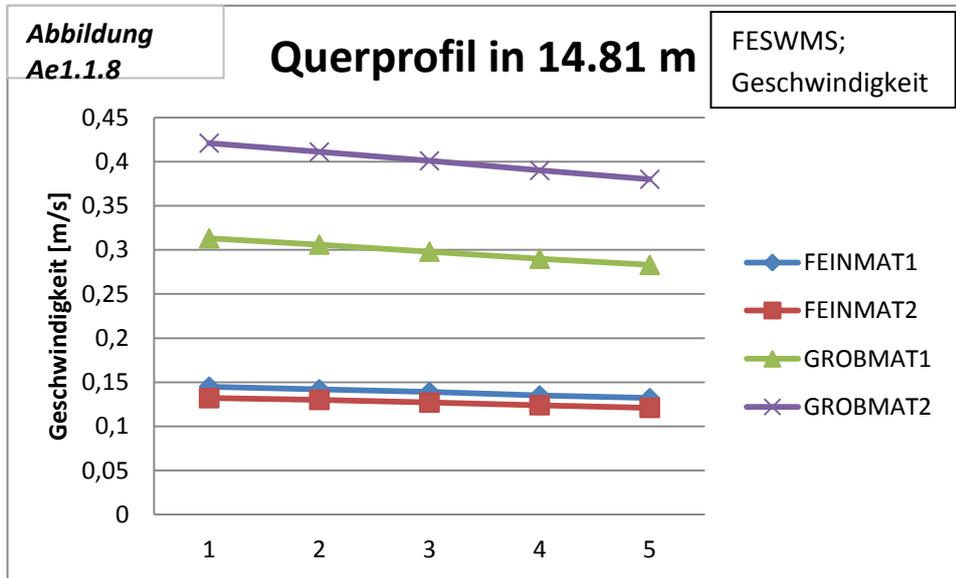
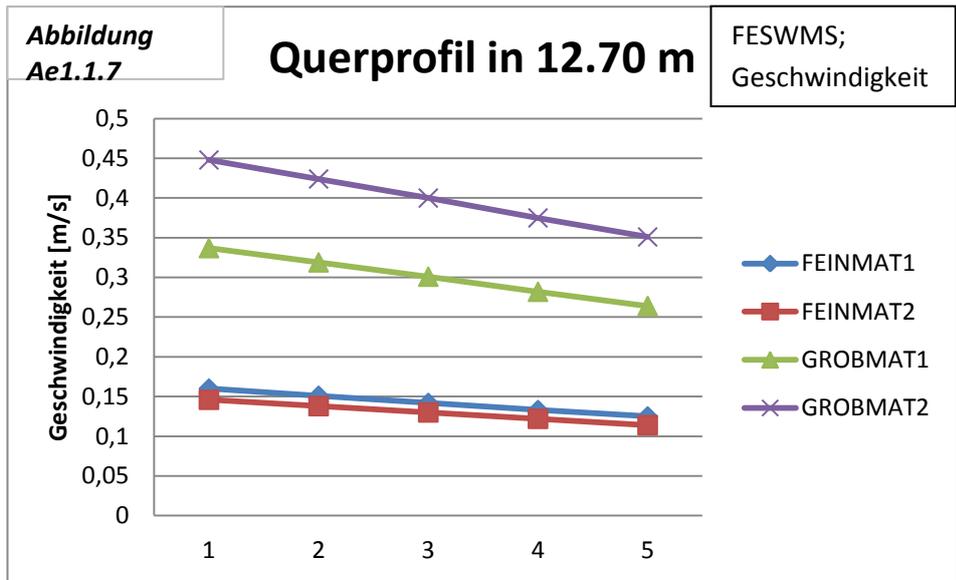
Anhang Ae



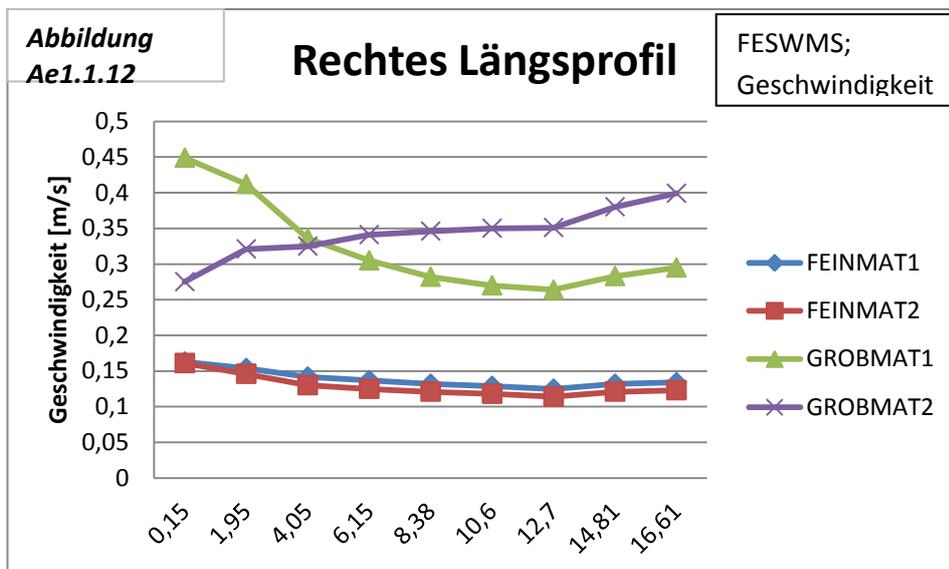
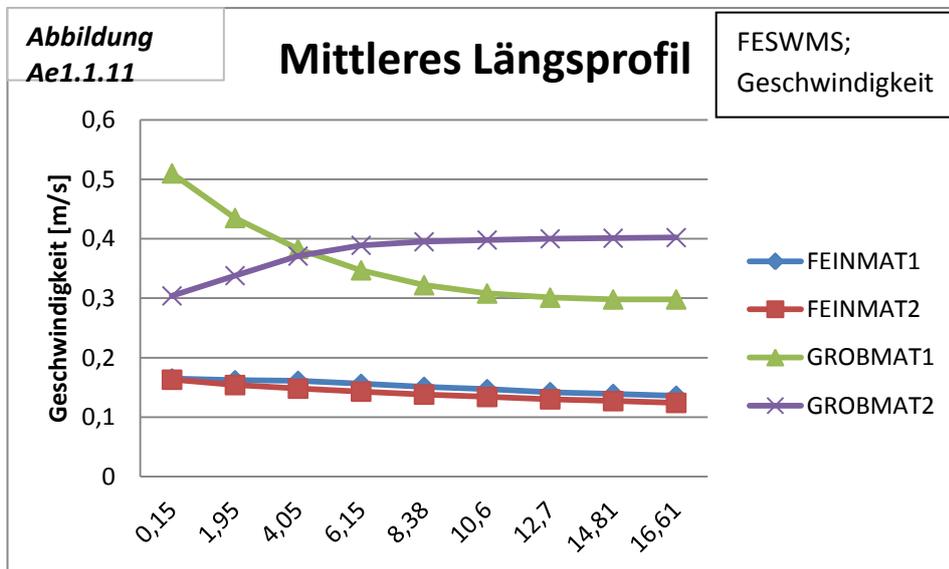
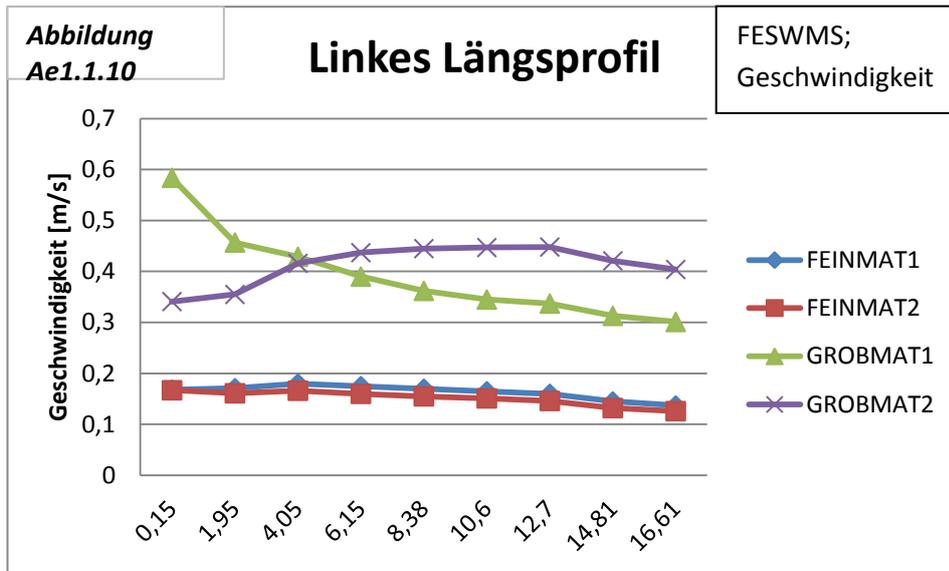
Anhang Ae



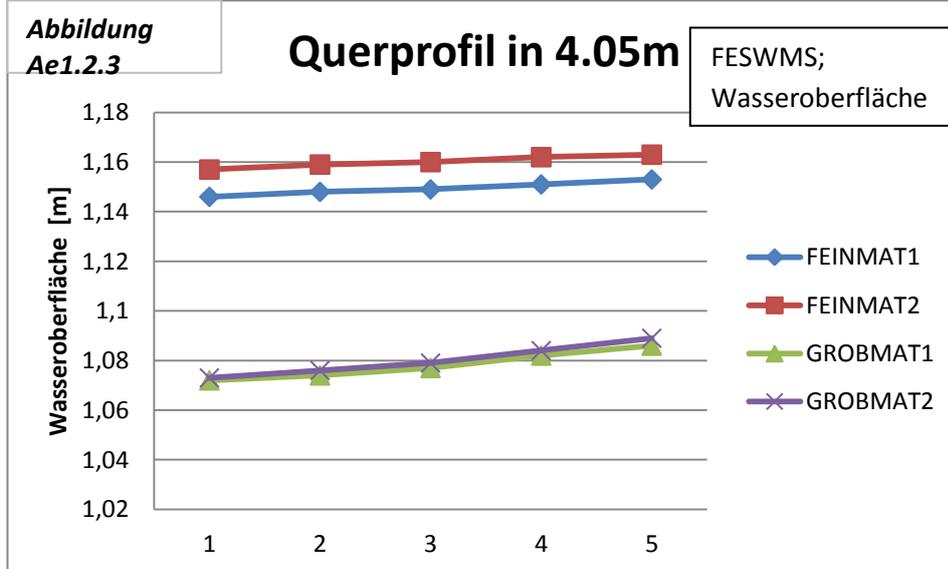
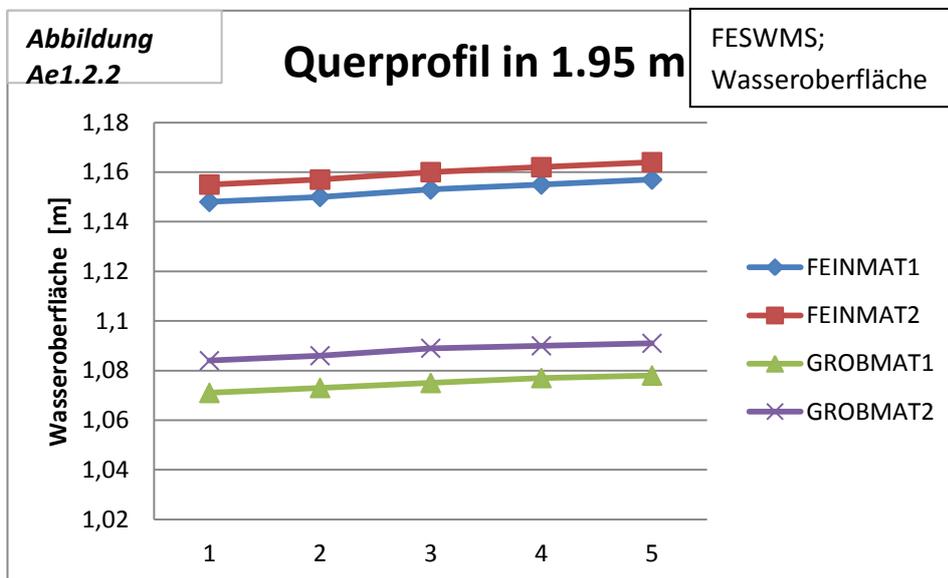
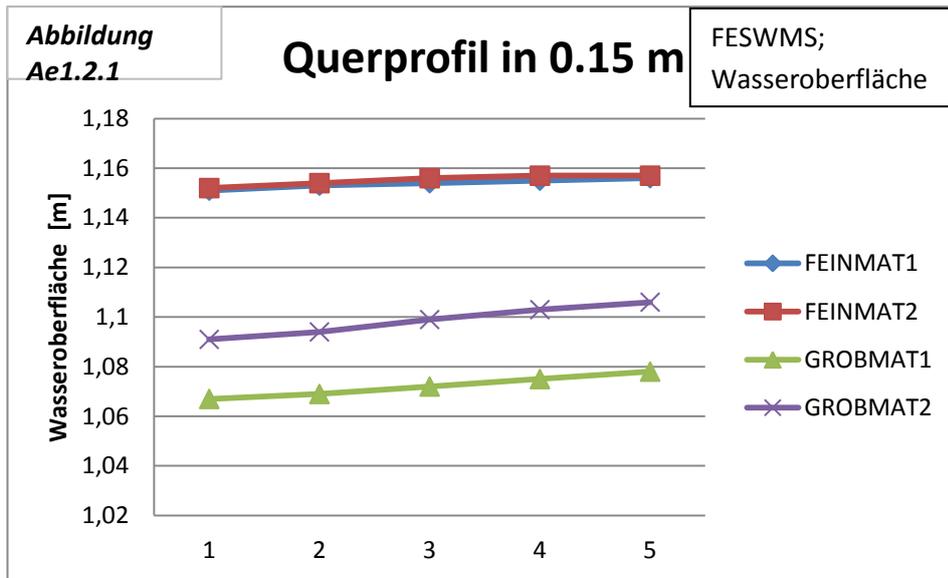
Anhang Ae



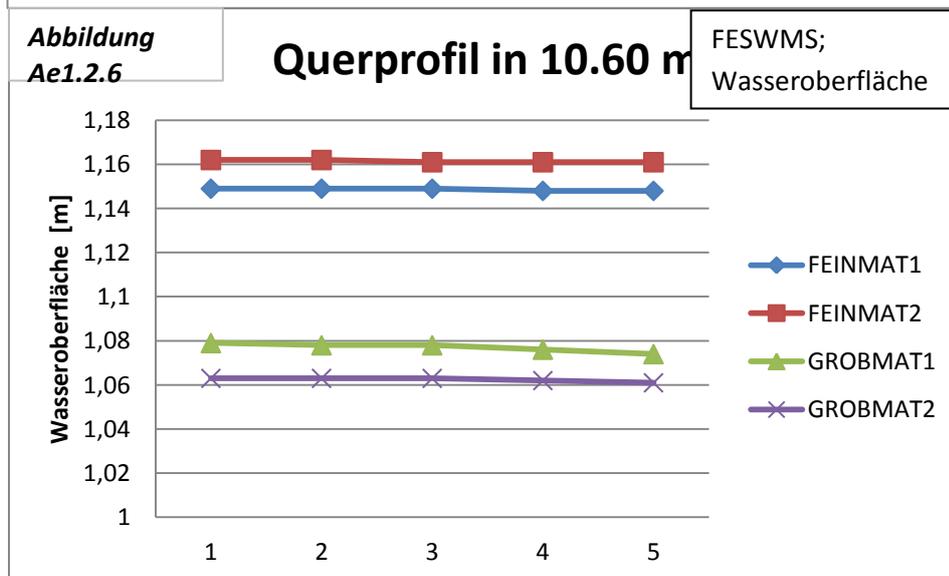
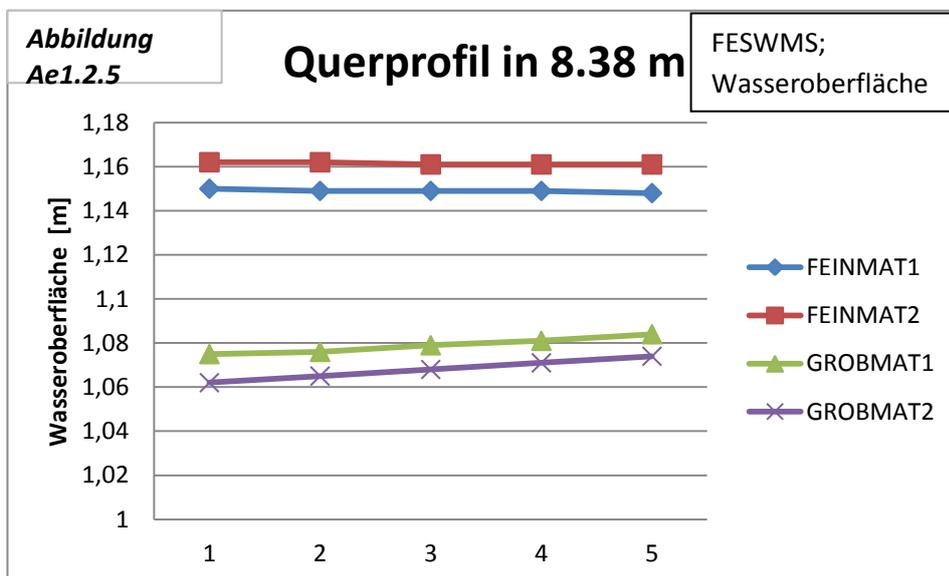
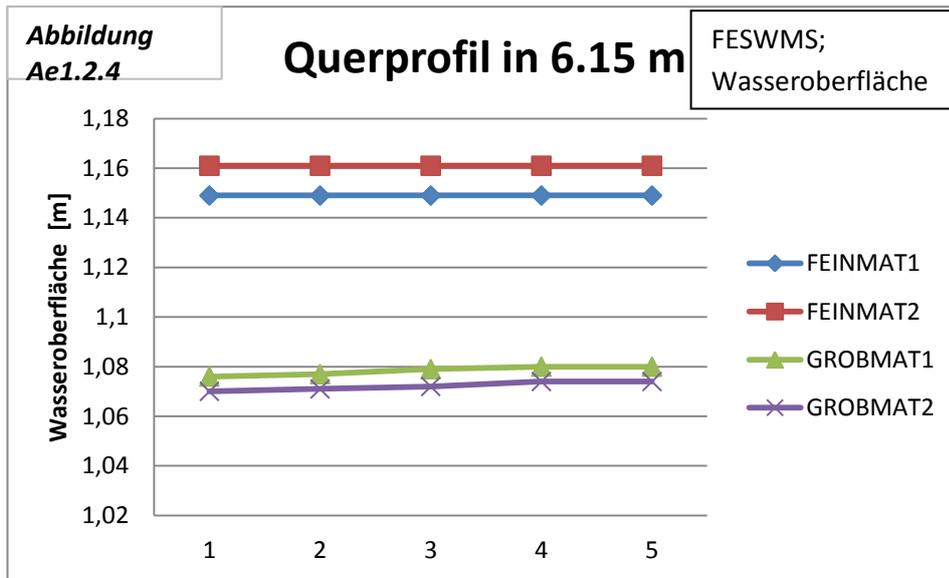
Anhang Ae



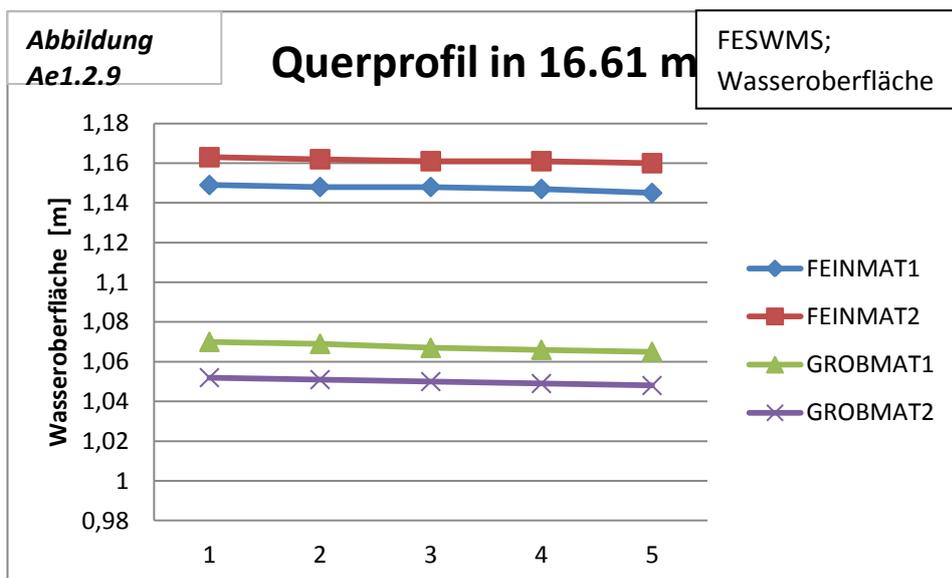
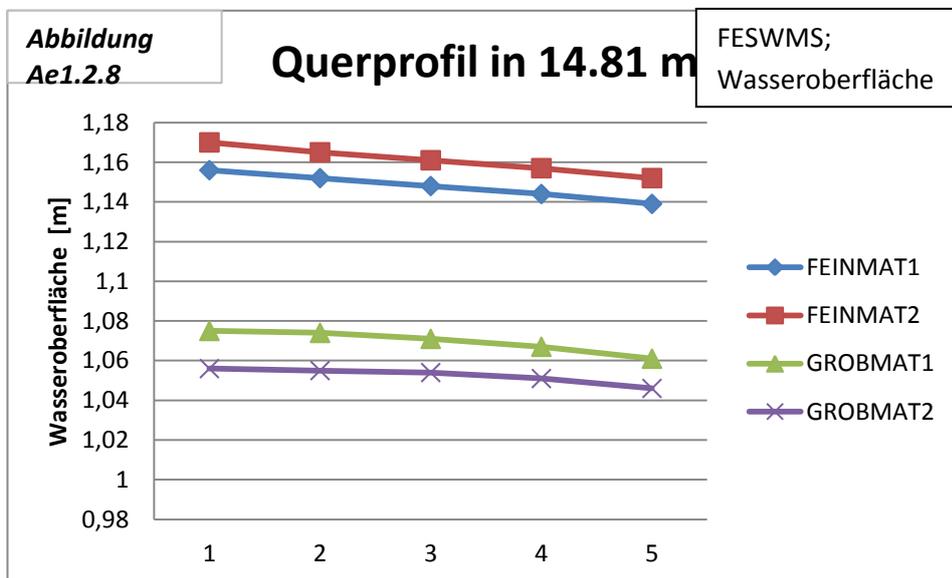
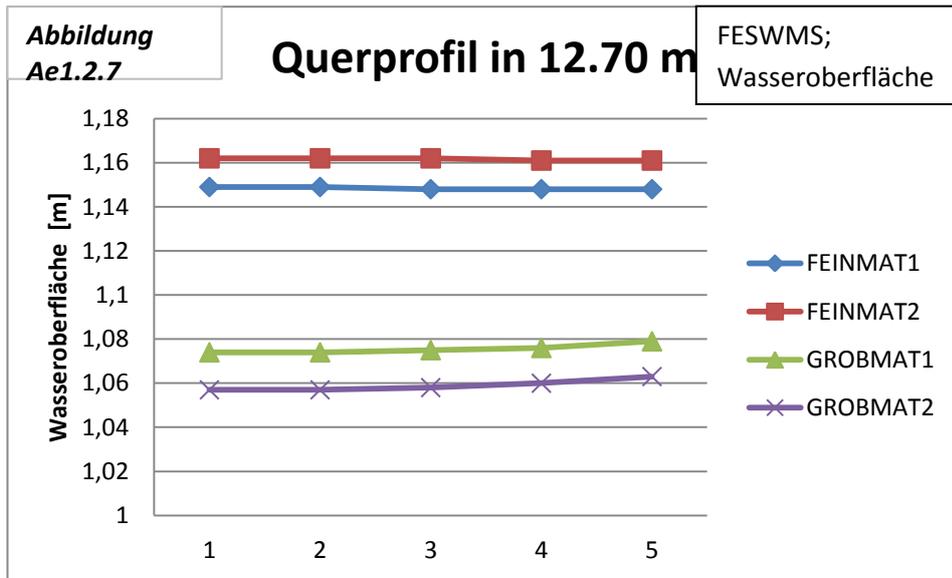
Anhang Ae



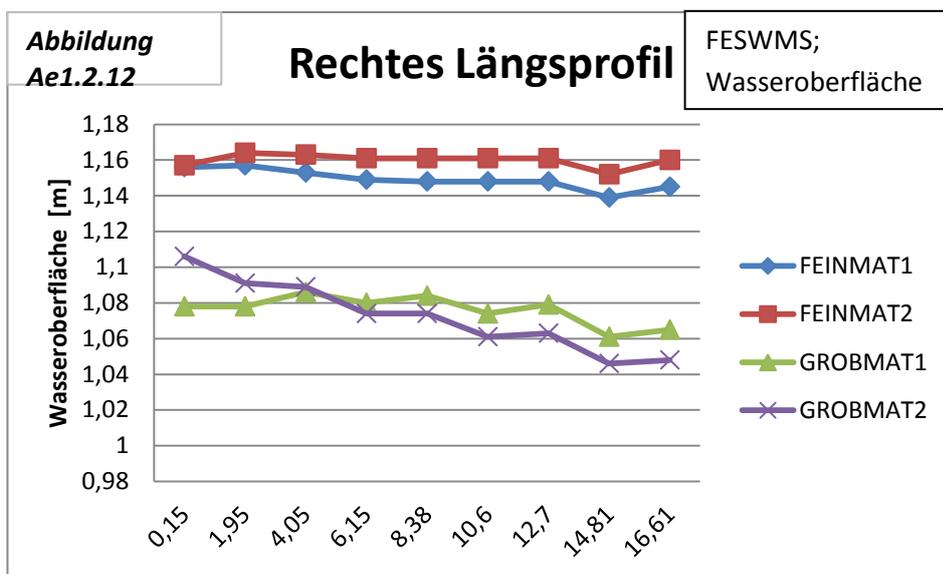
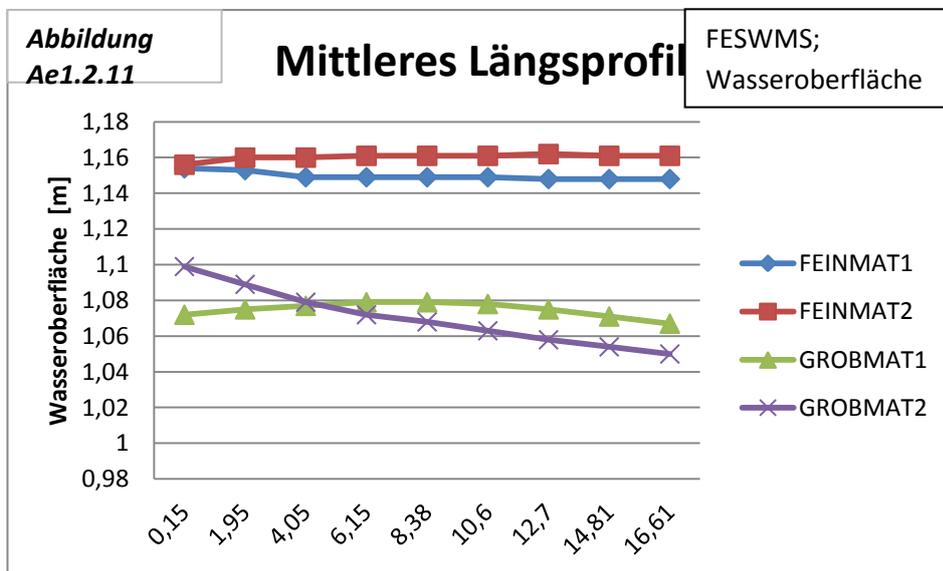
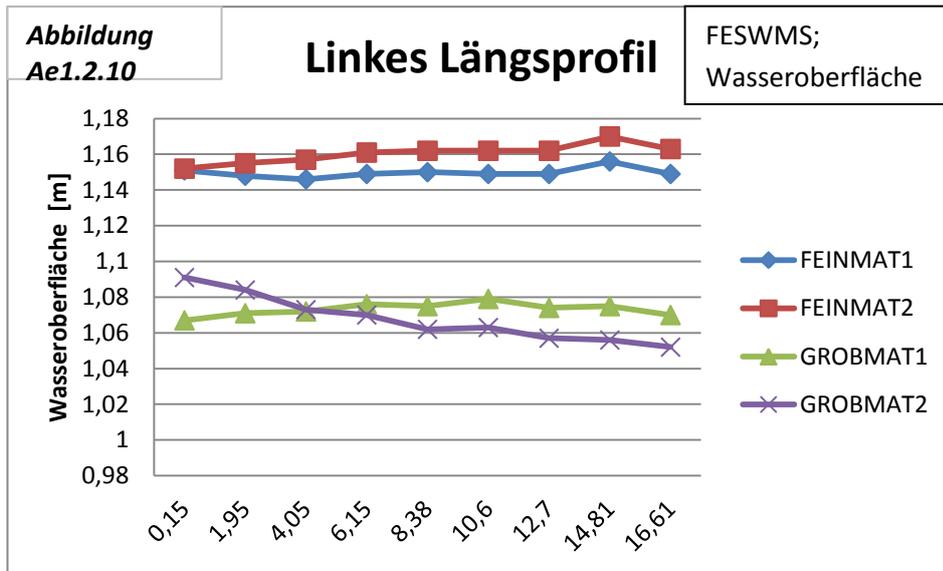
Anhang Ae



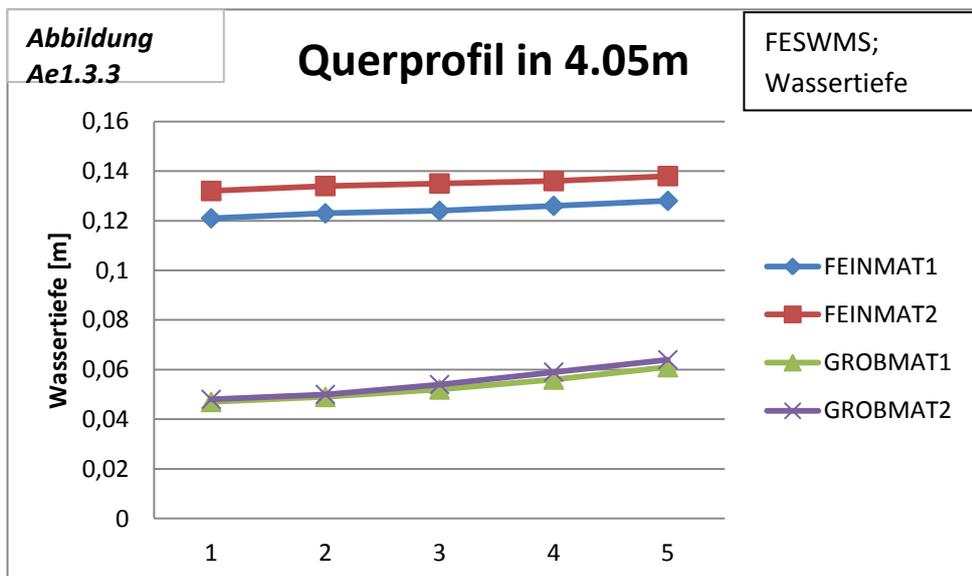
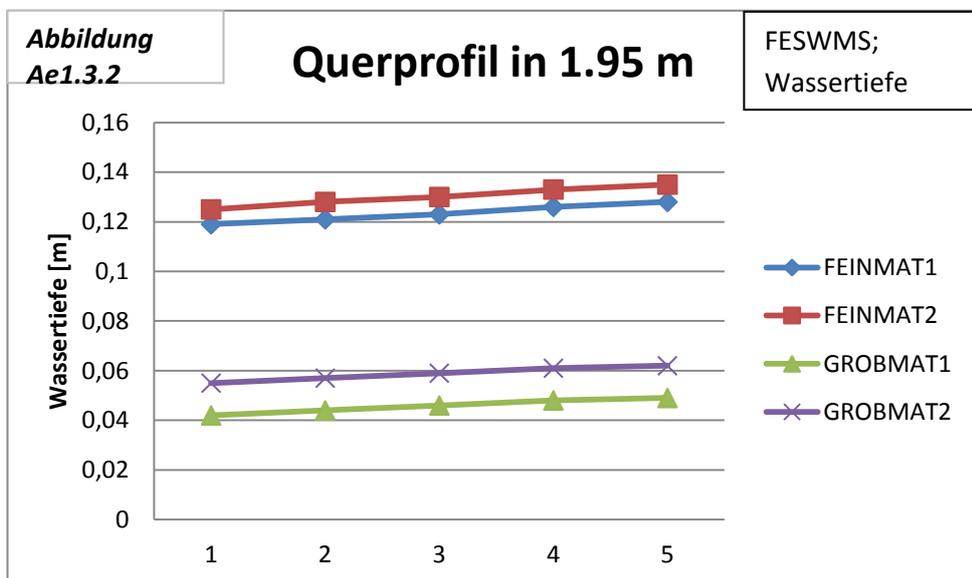
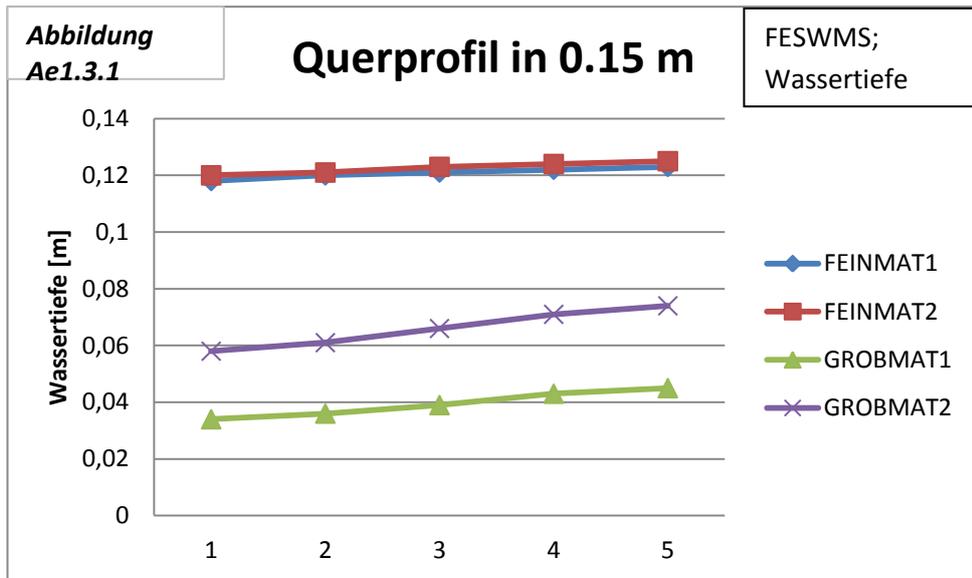
Anhang Ae



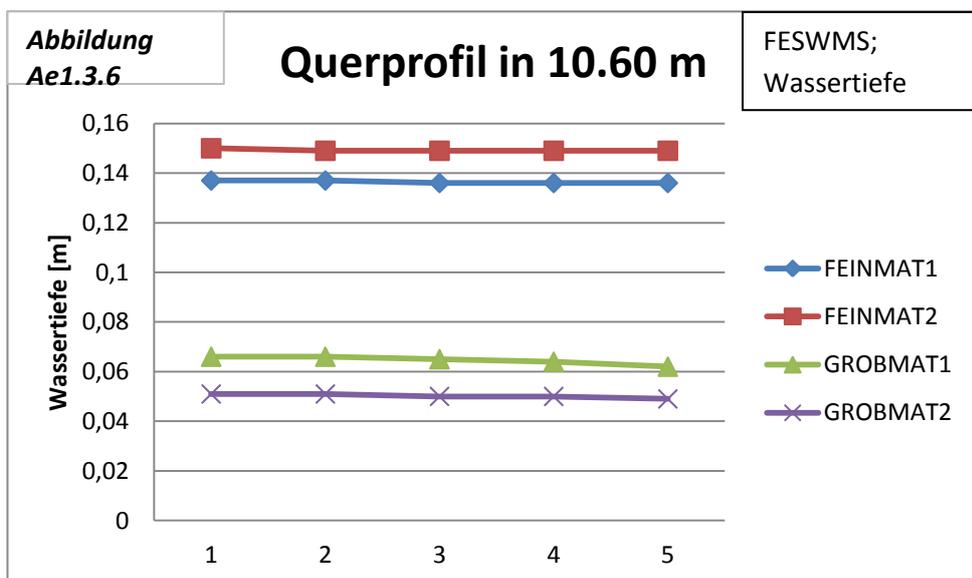
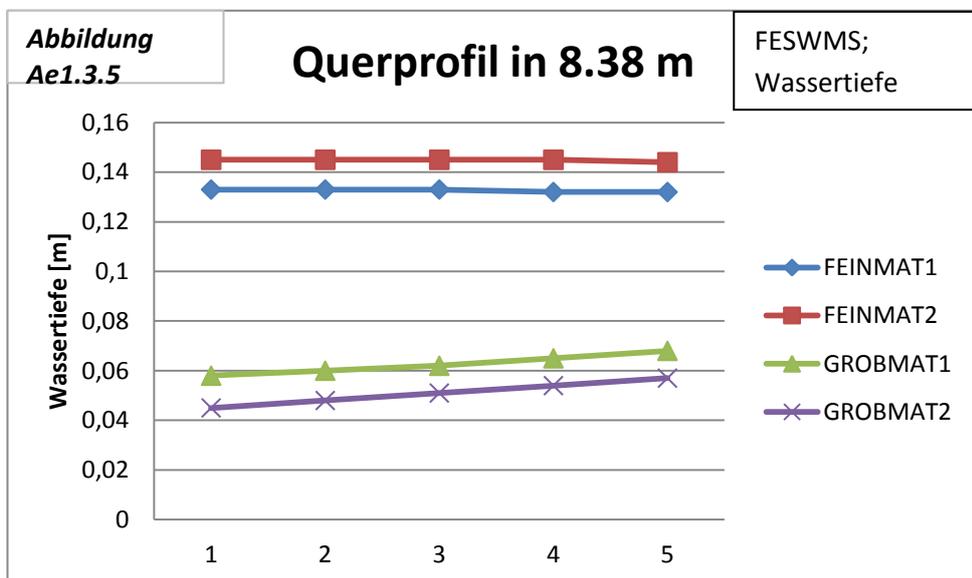
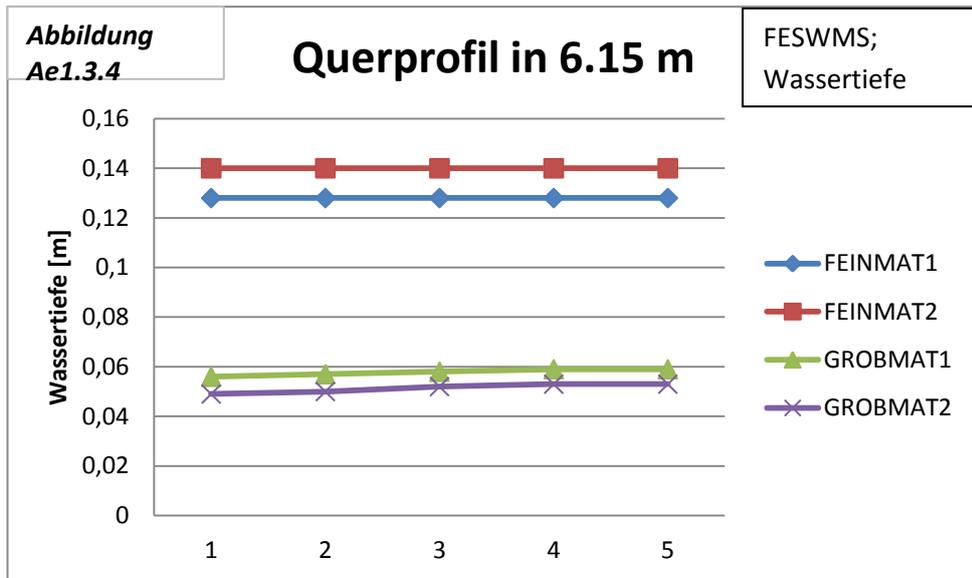
Anhang Ae



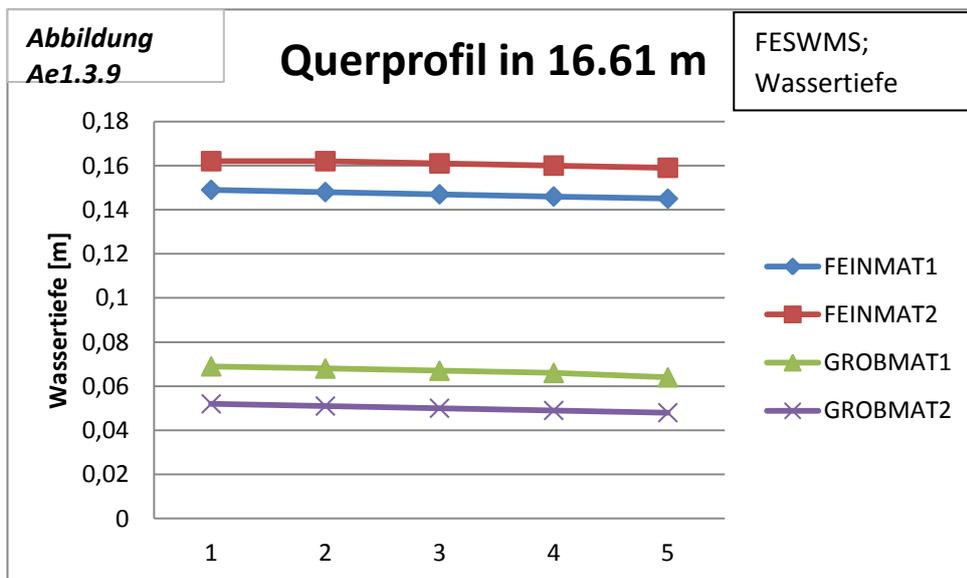
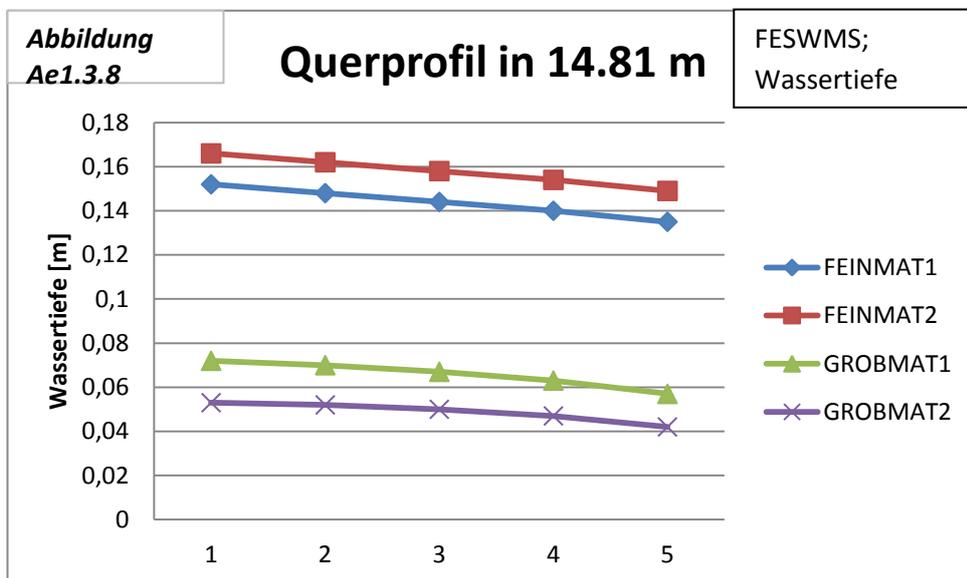
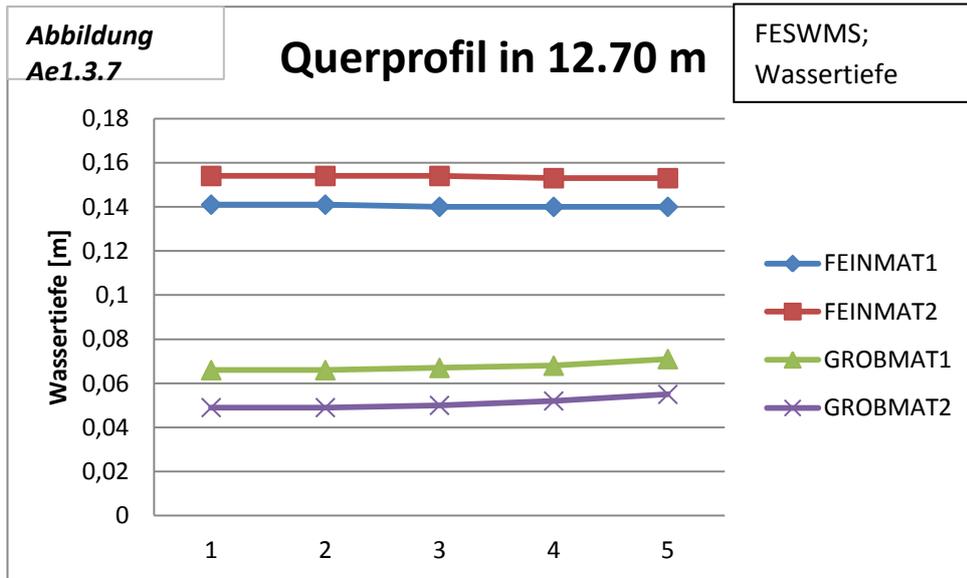
Anhang Ae



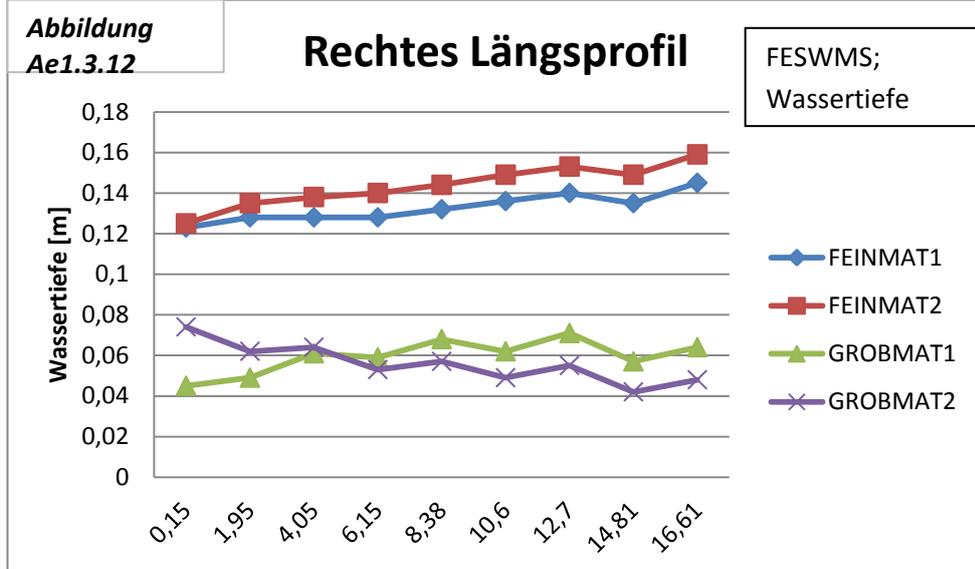
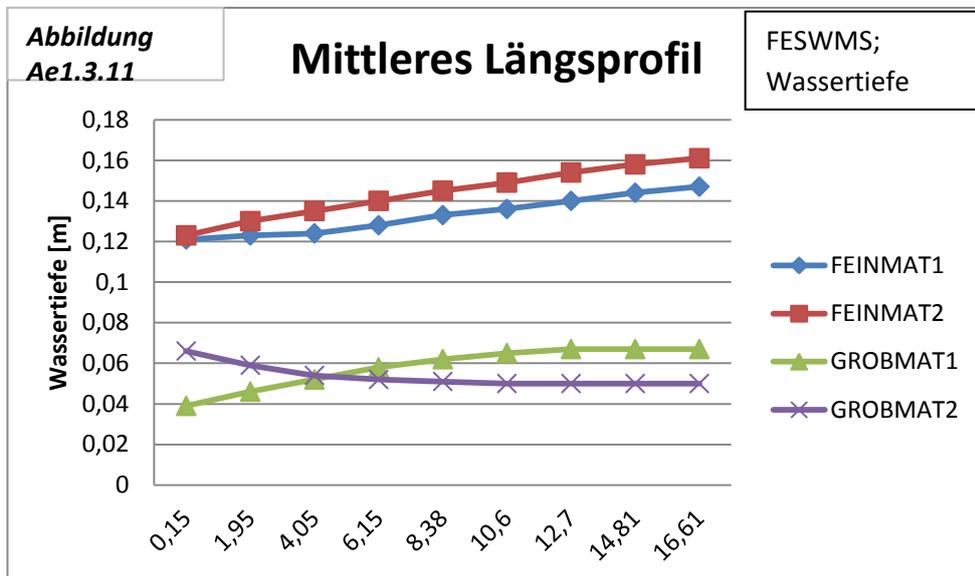
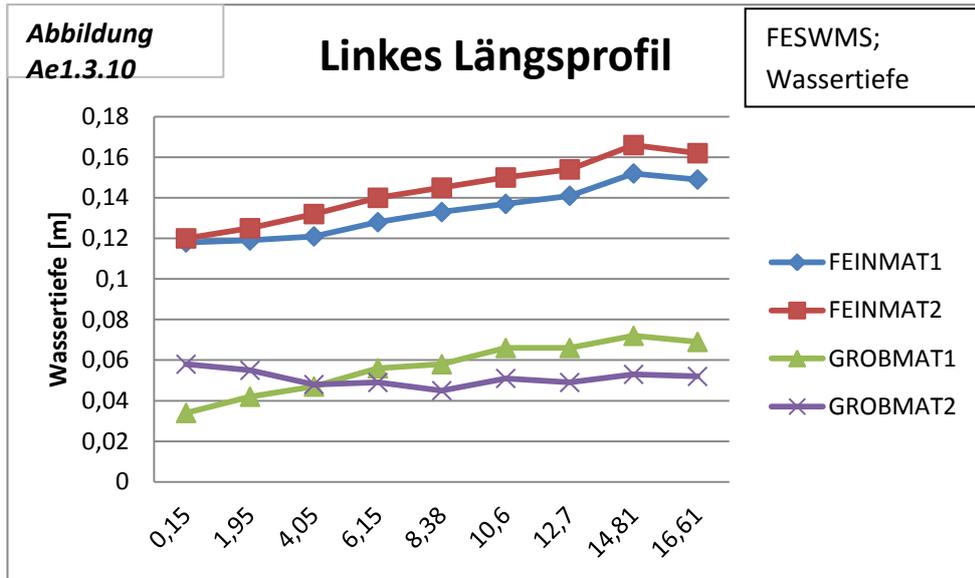
Anhang Ae



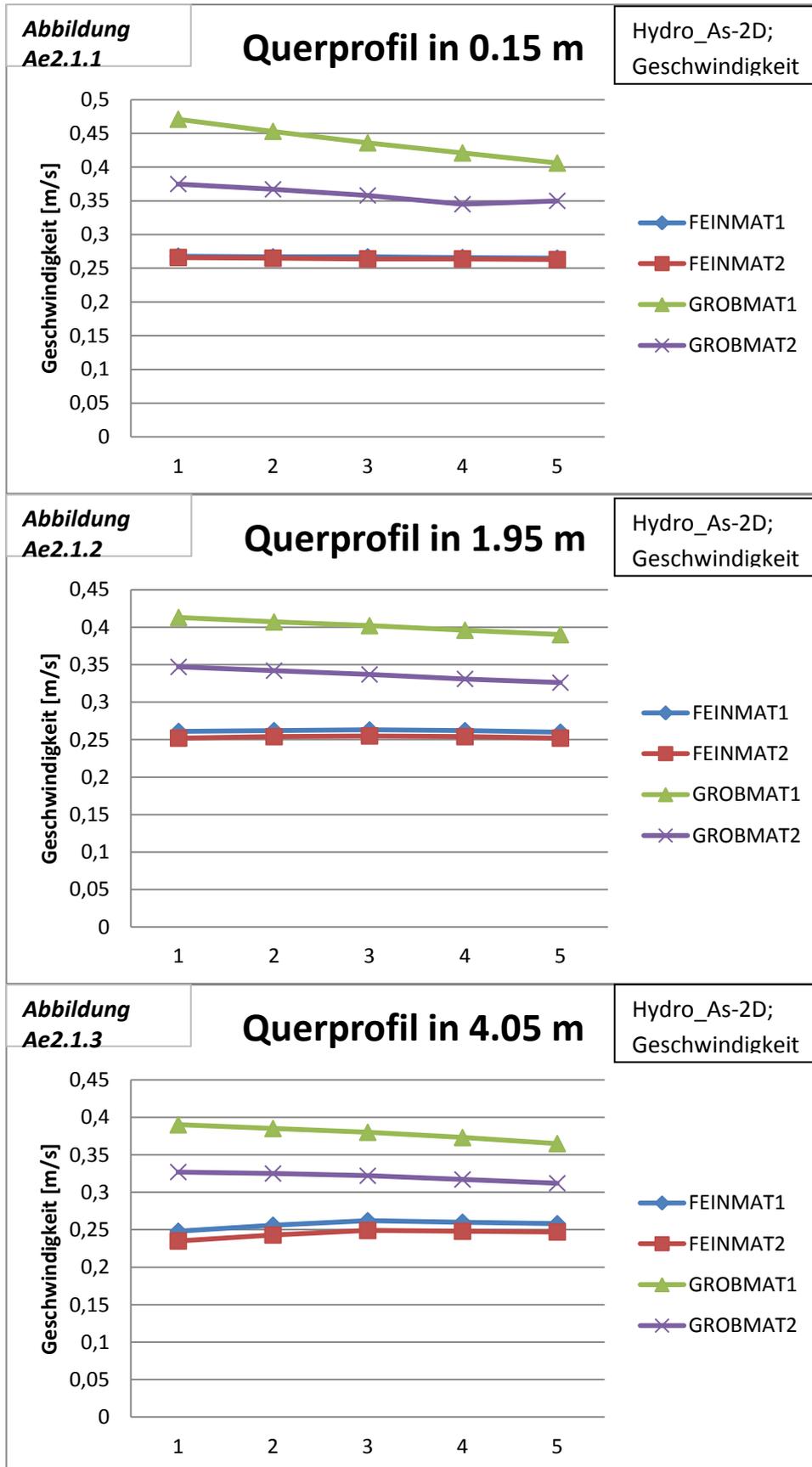
Anhang Ae



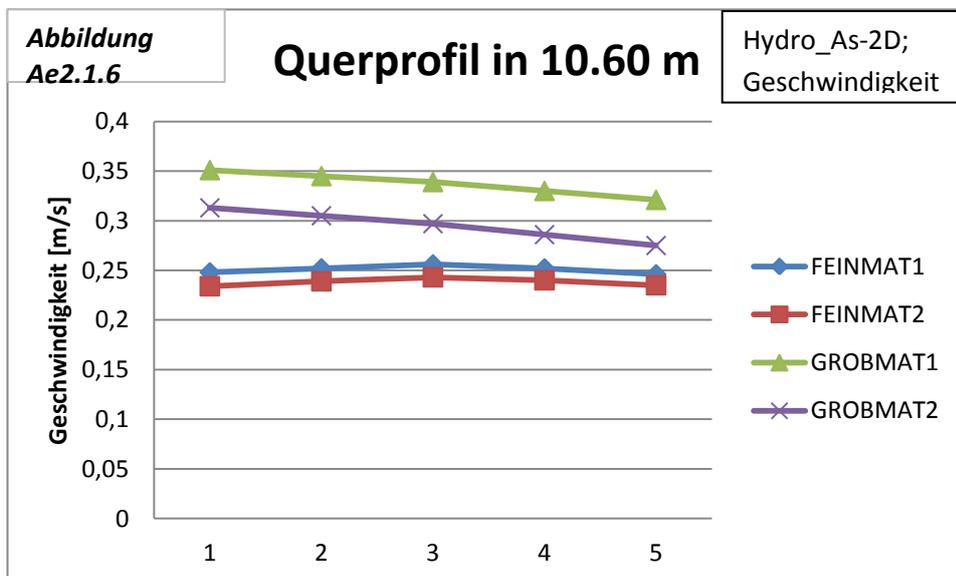
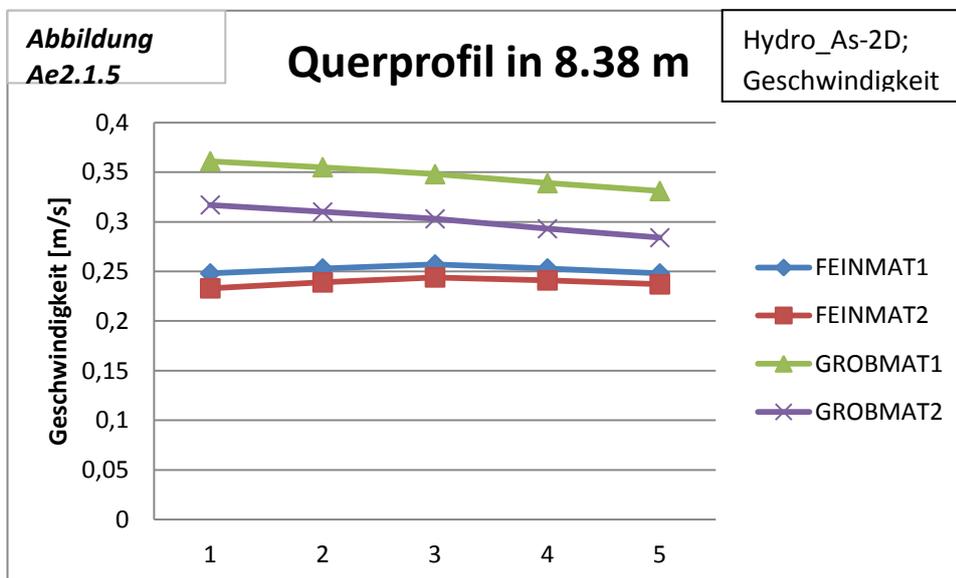
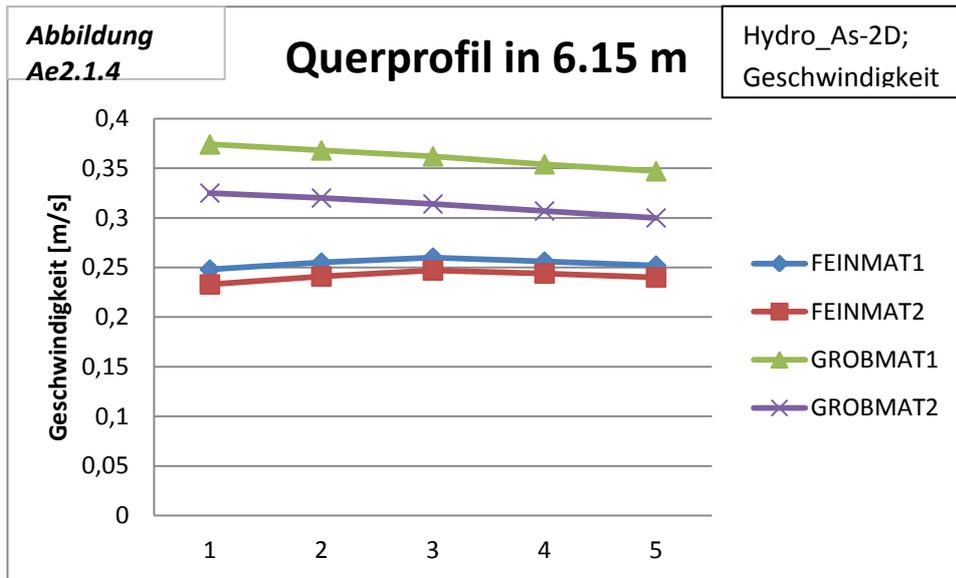
Anhang Ae



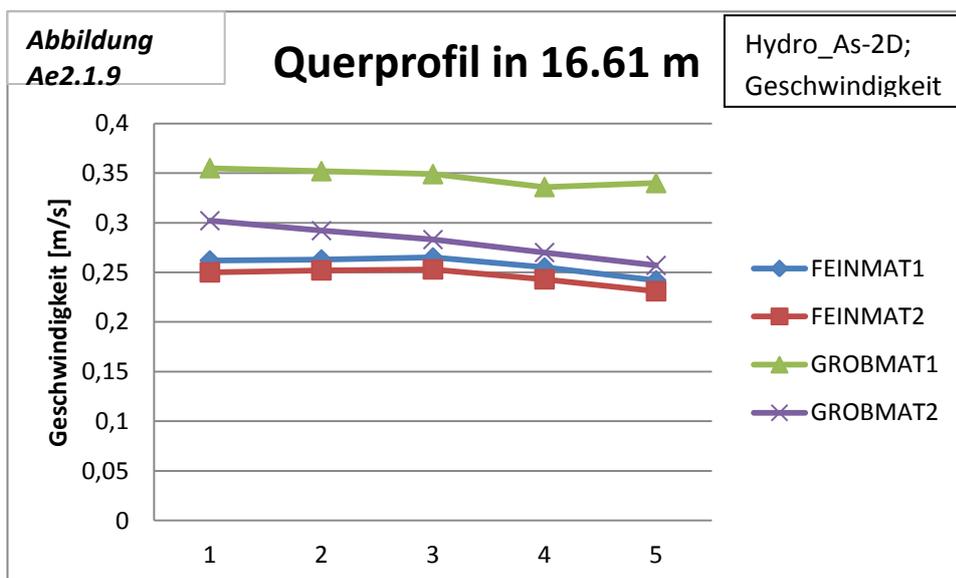
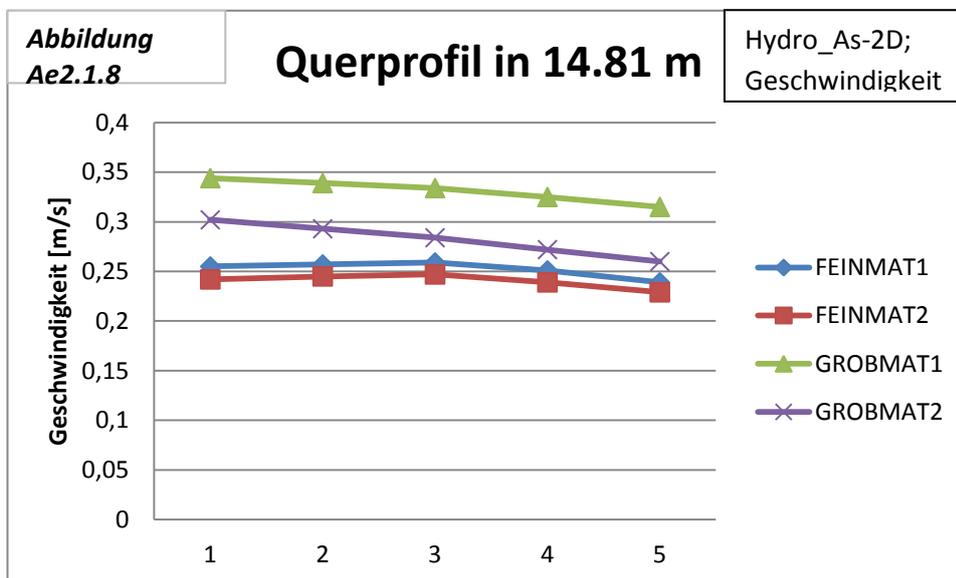
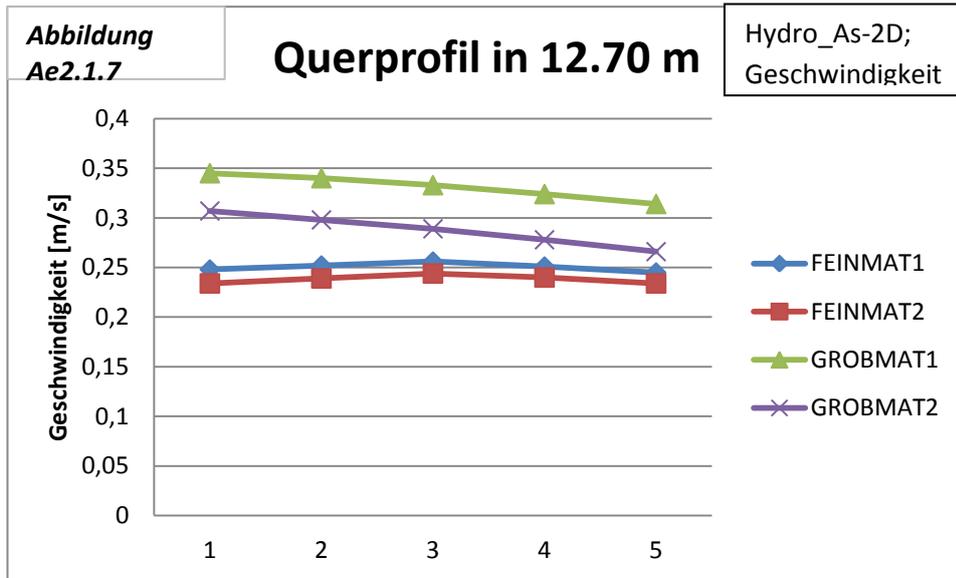
Anhang Ae



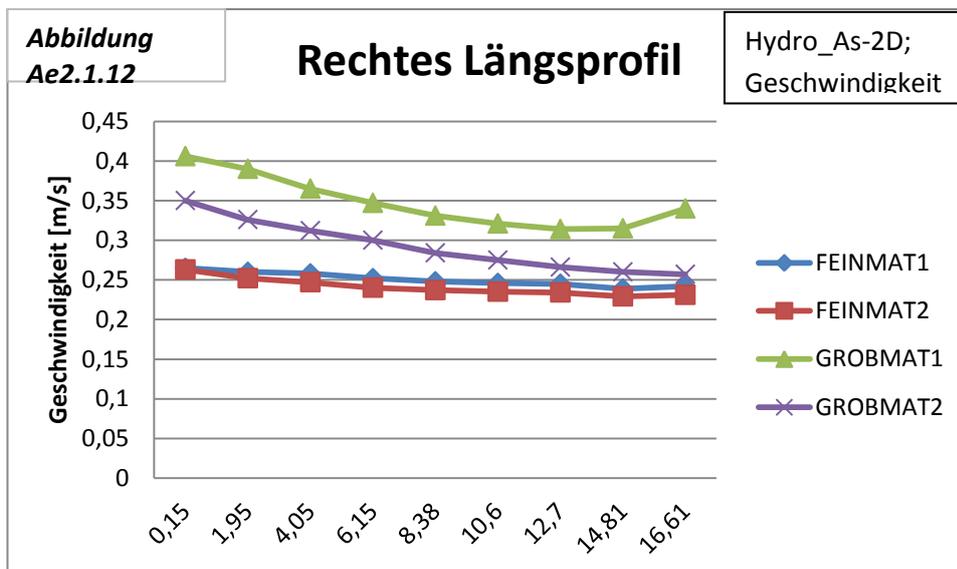
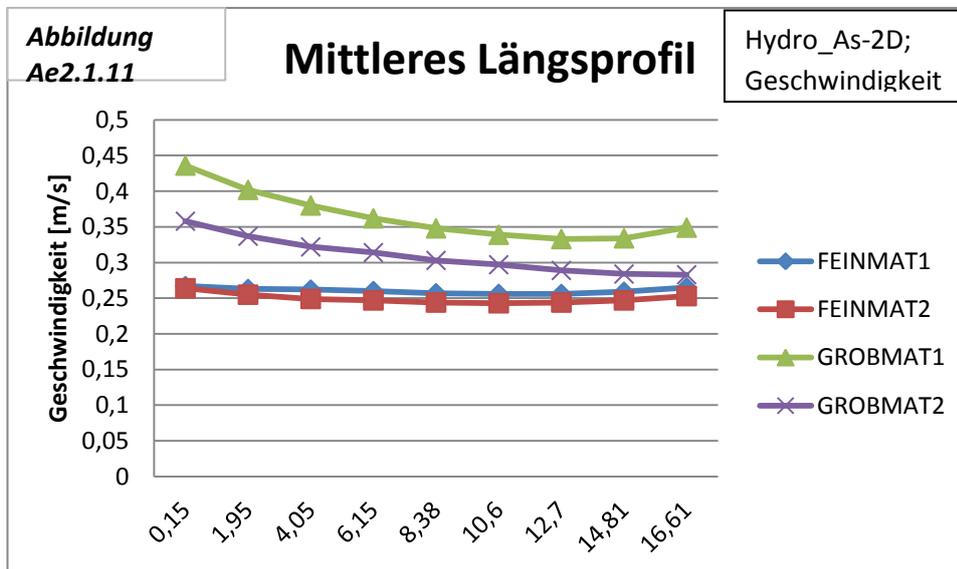
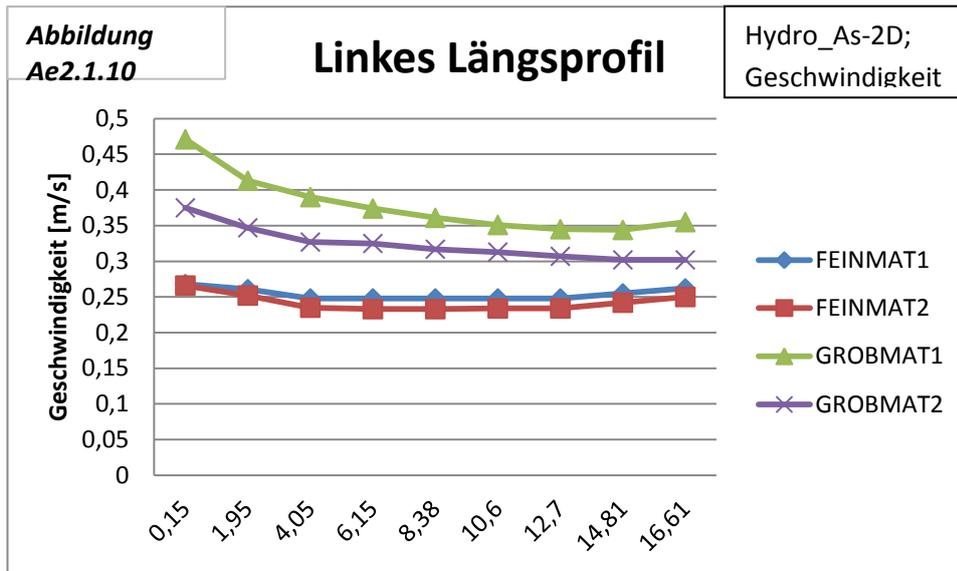
Anhang Ae



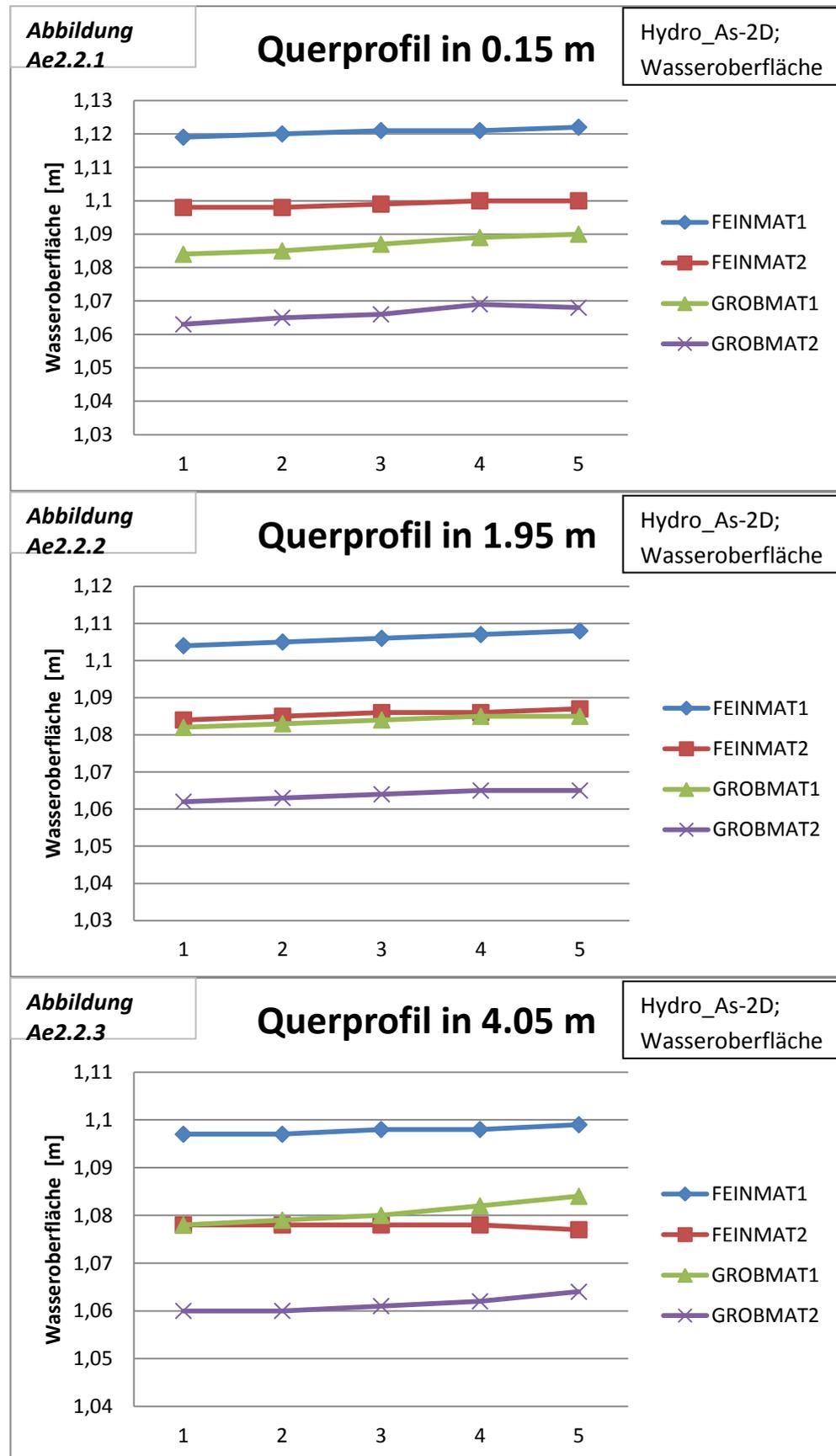
Anhang Ae



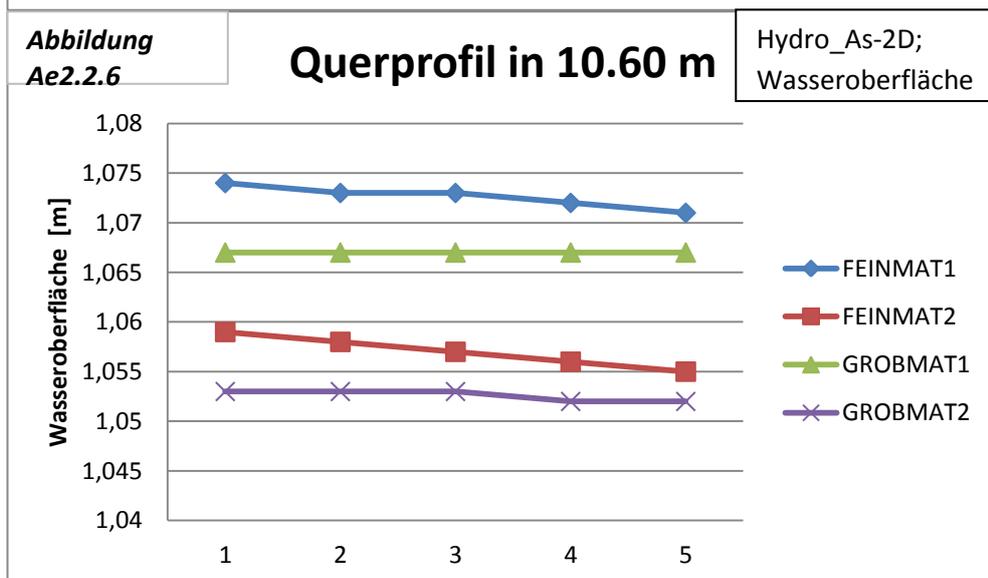
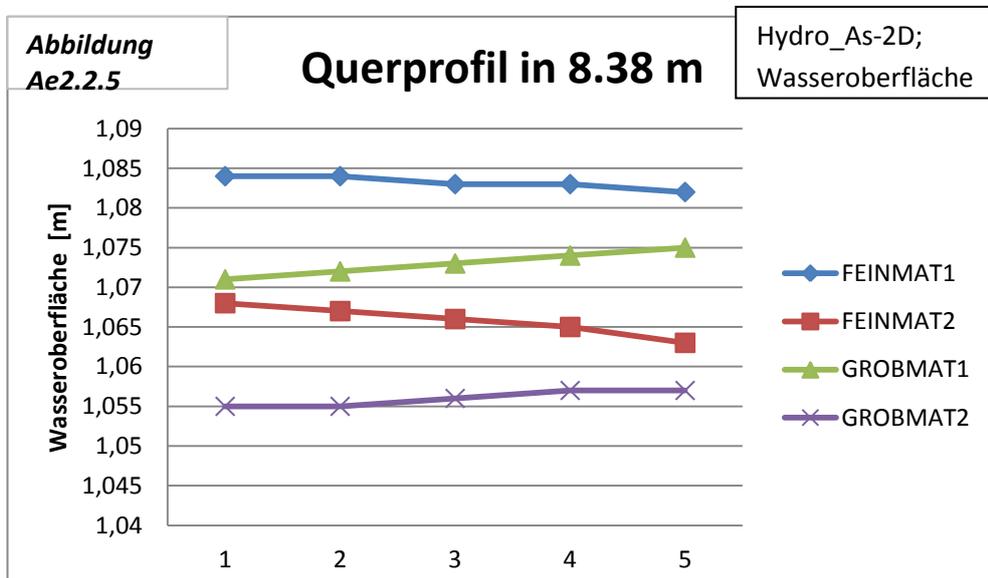
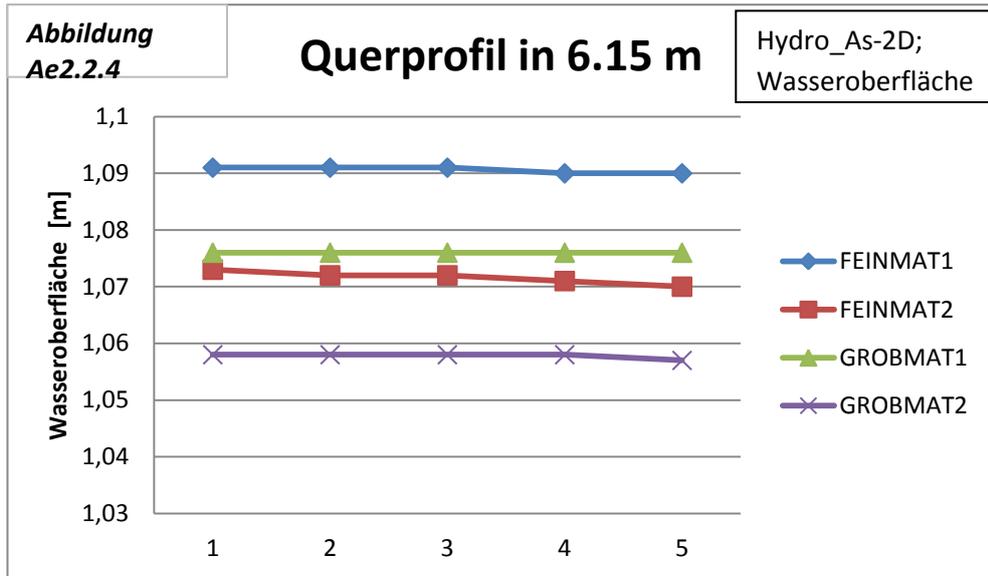
Anhang Ae



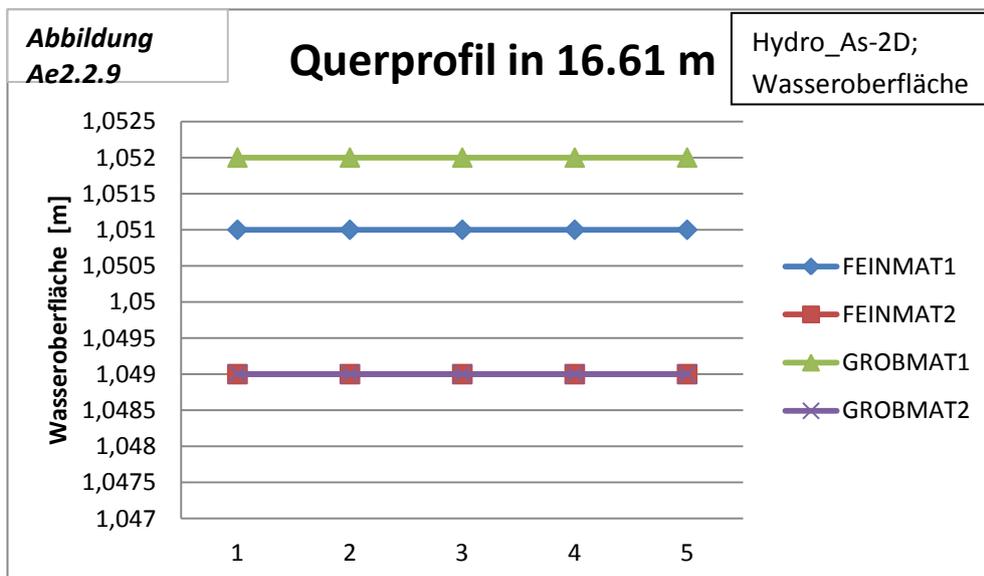
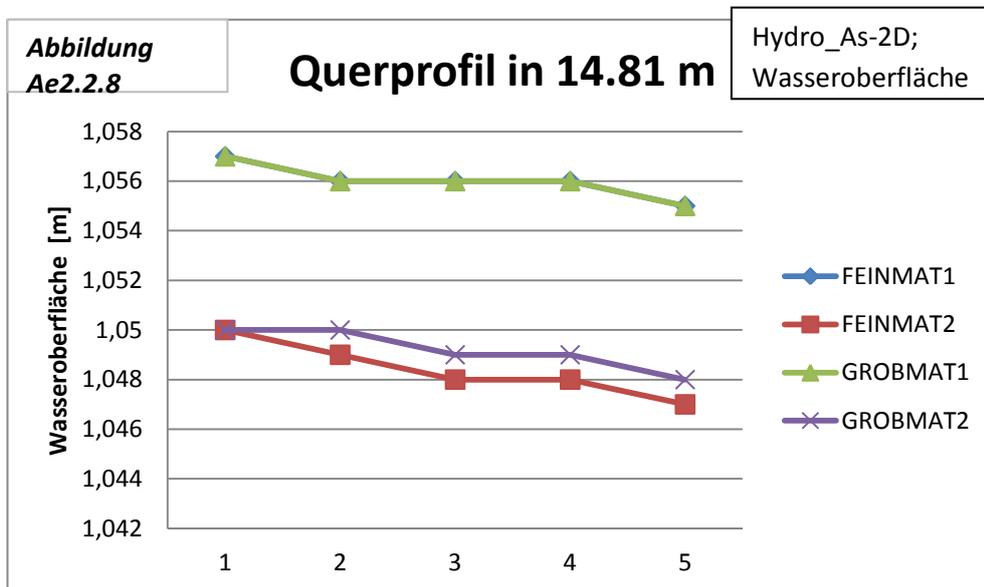
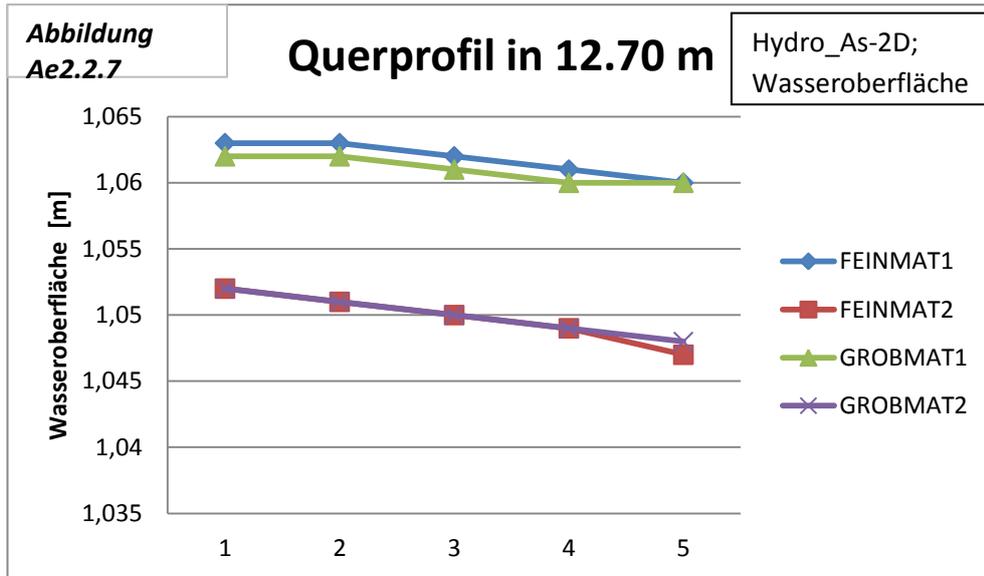
Anhang Ae



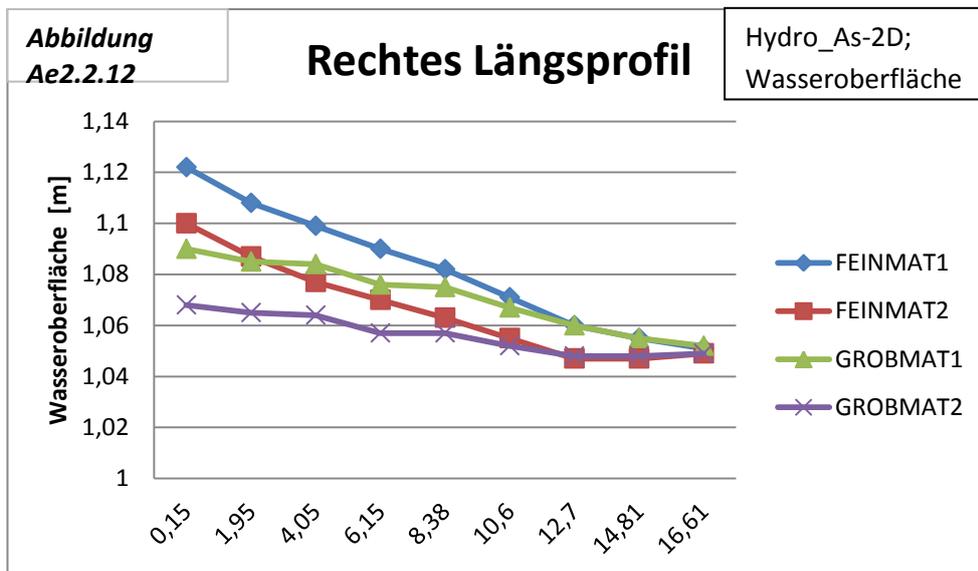
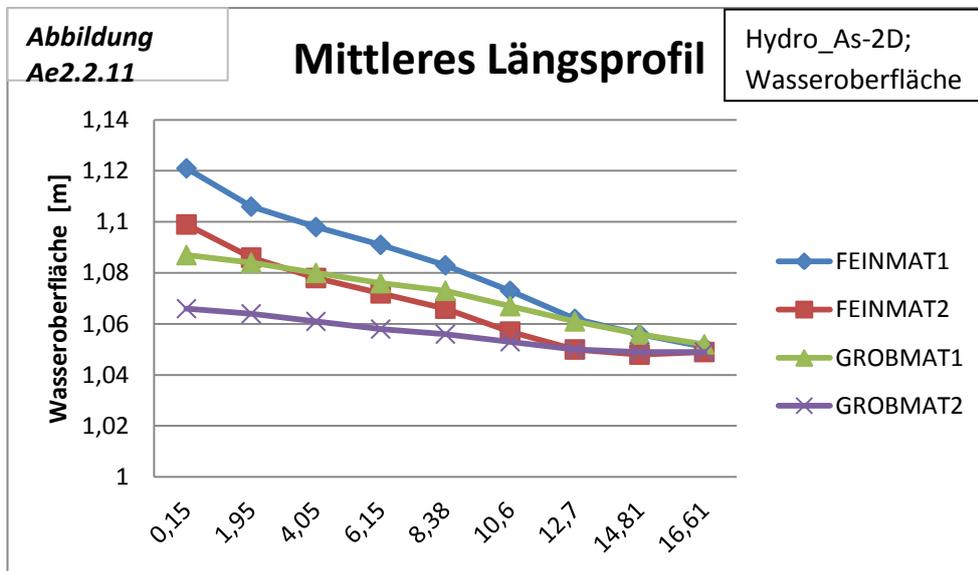
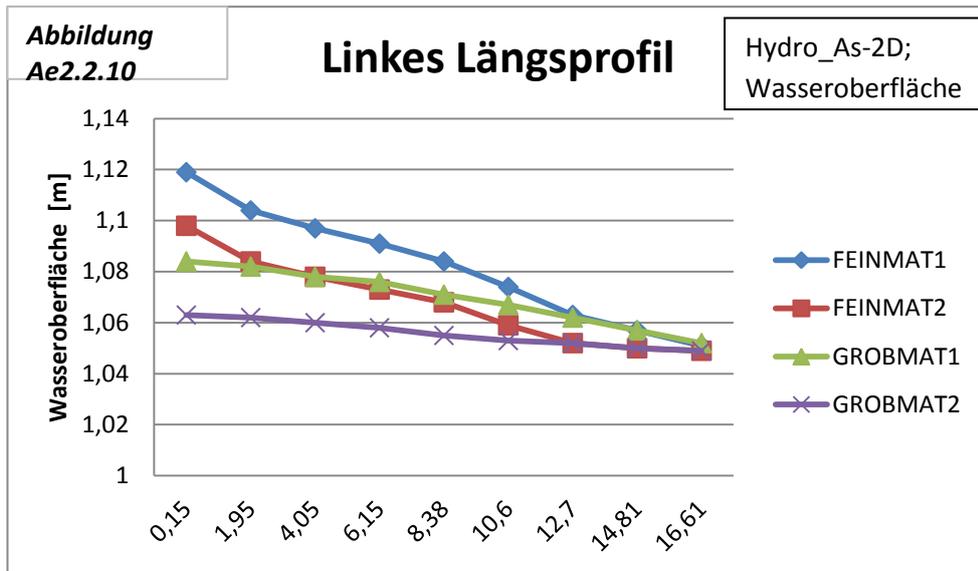
Anhang Ae



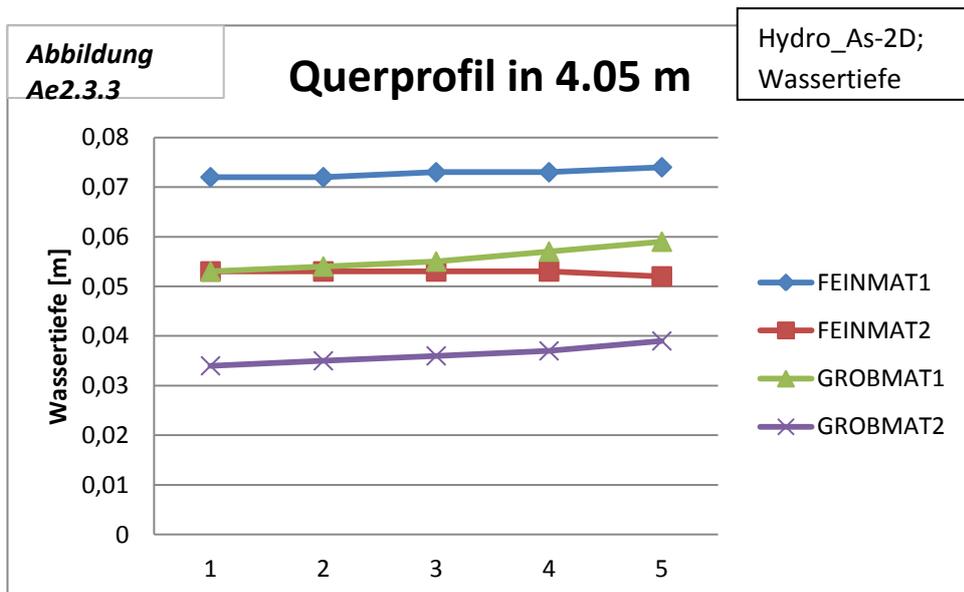
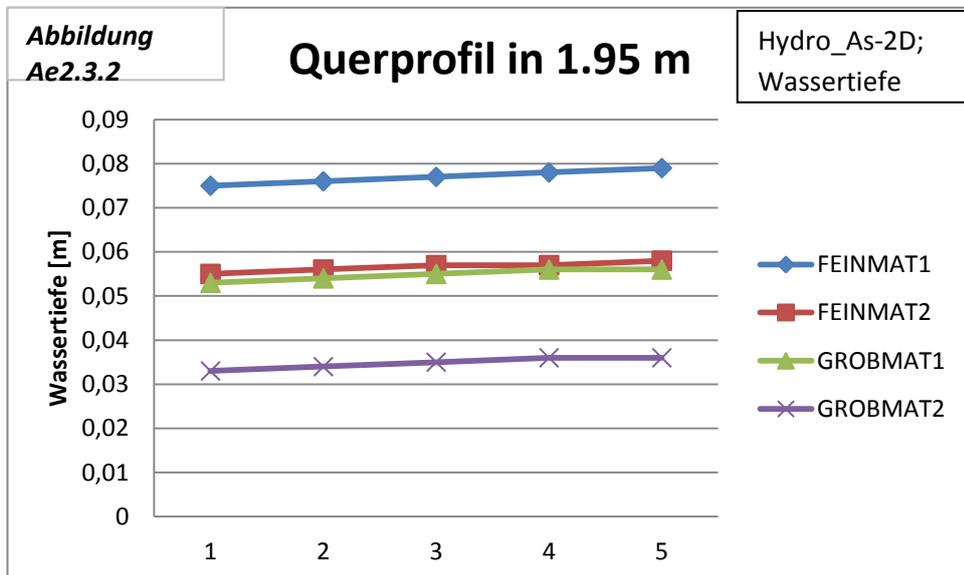
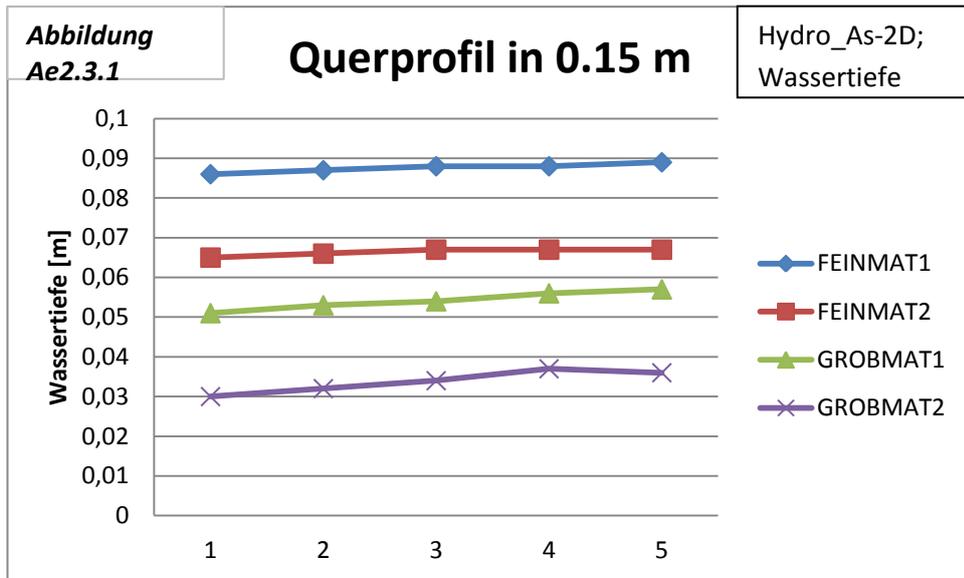
Anhang Ae



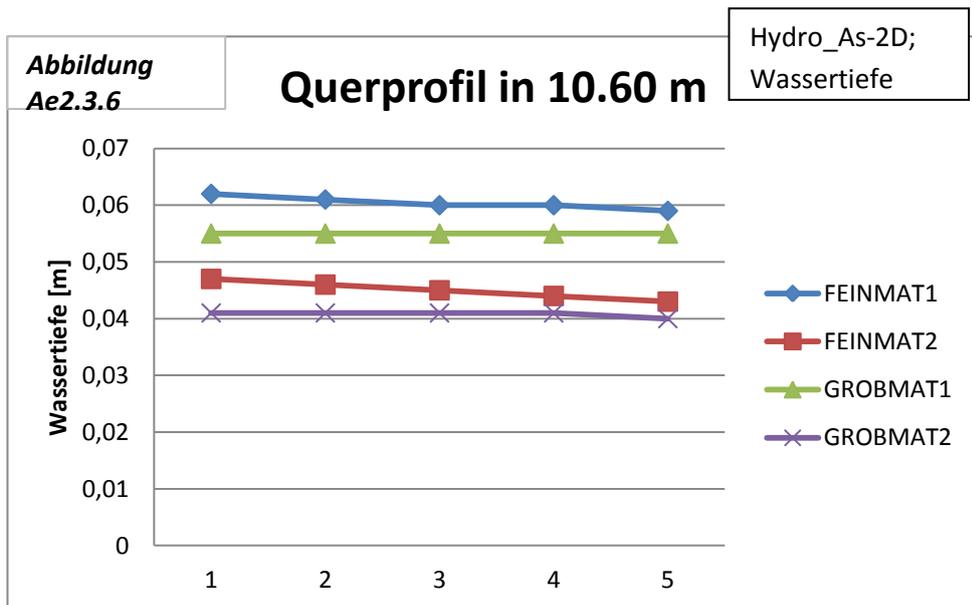
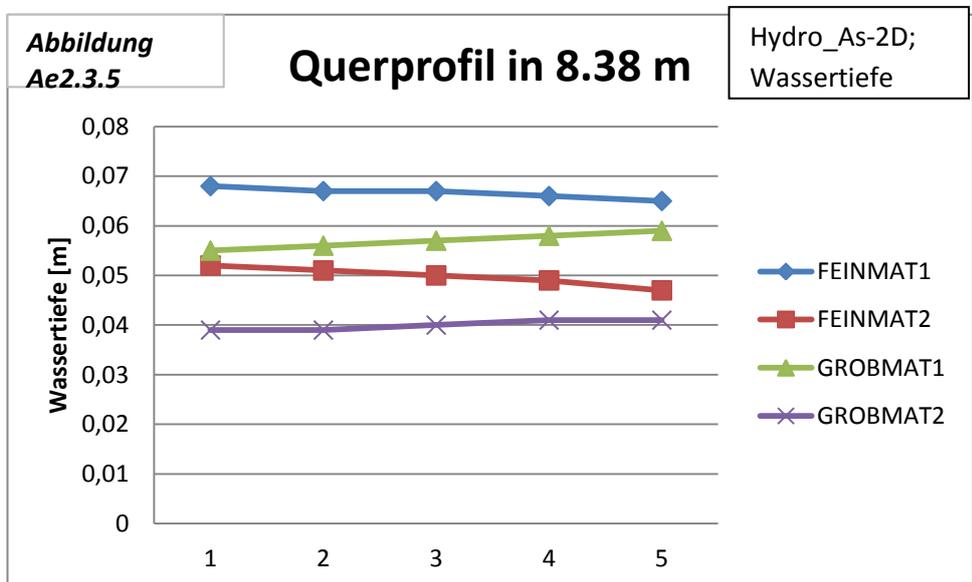
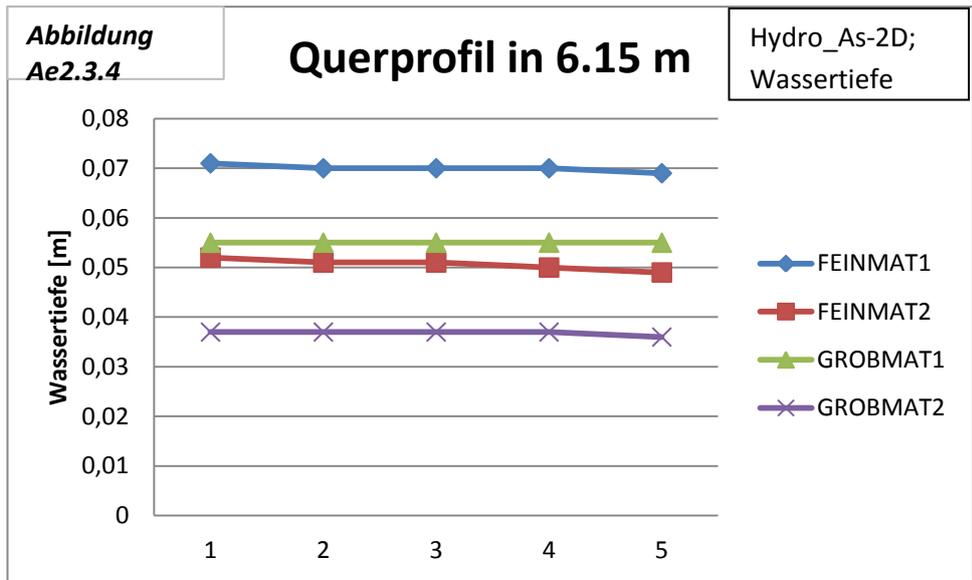
Anhang Ae



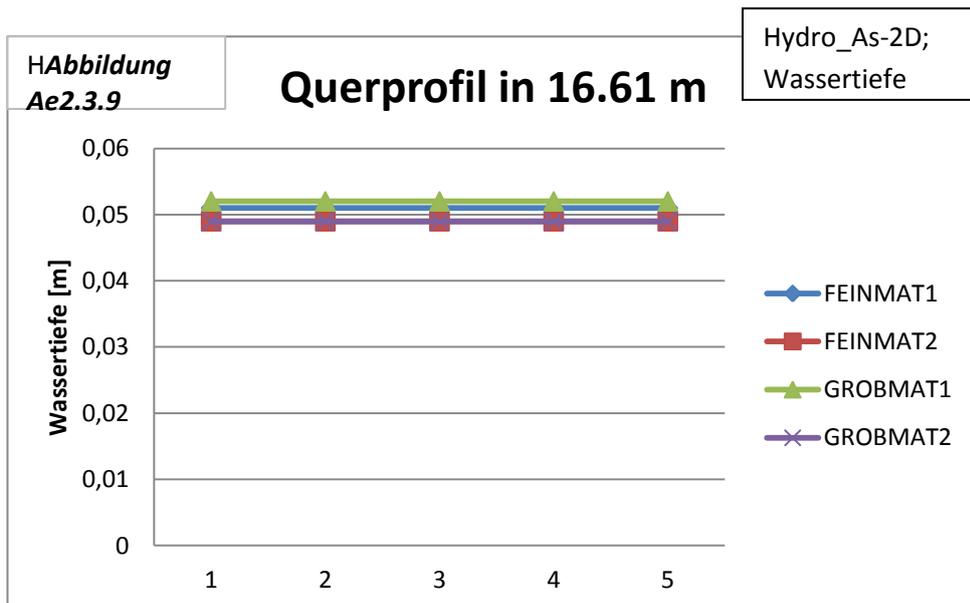
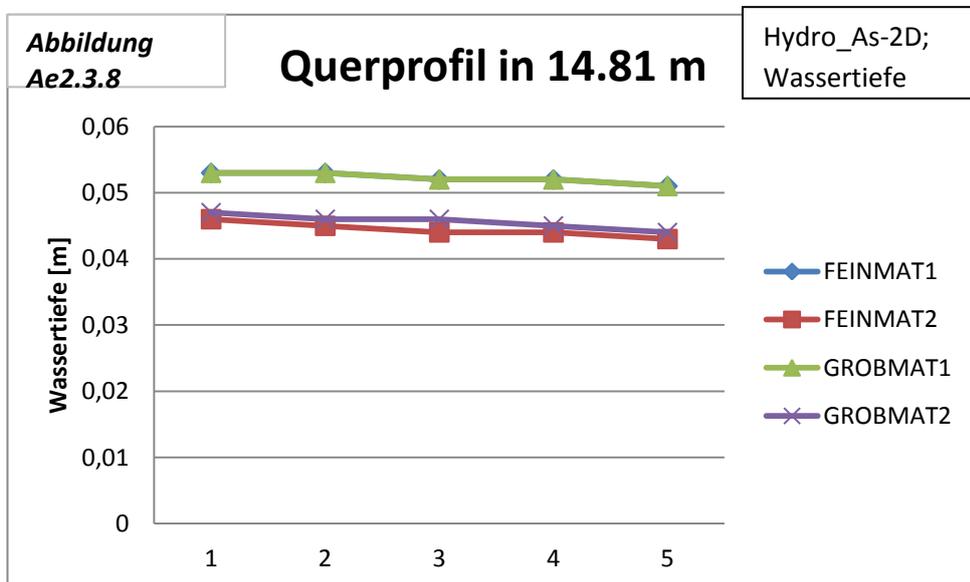
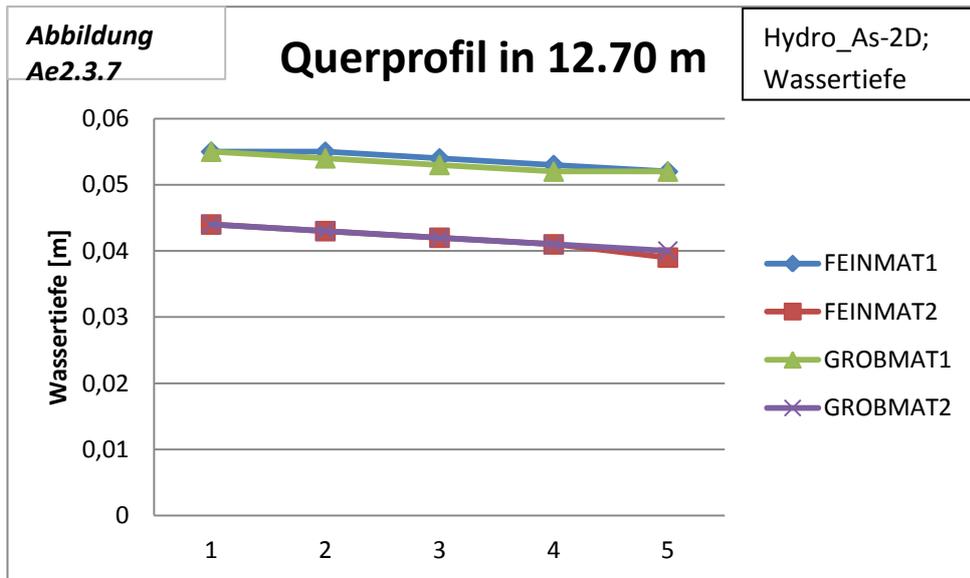
Anhang Ae



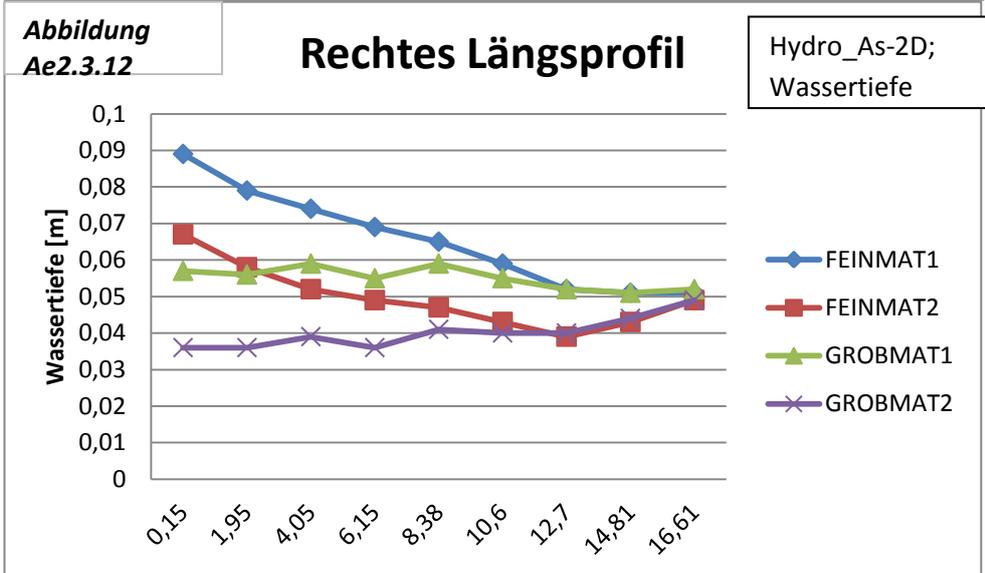
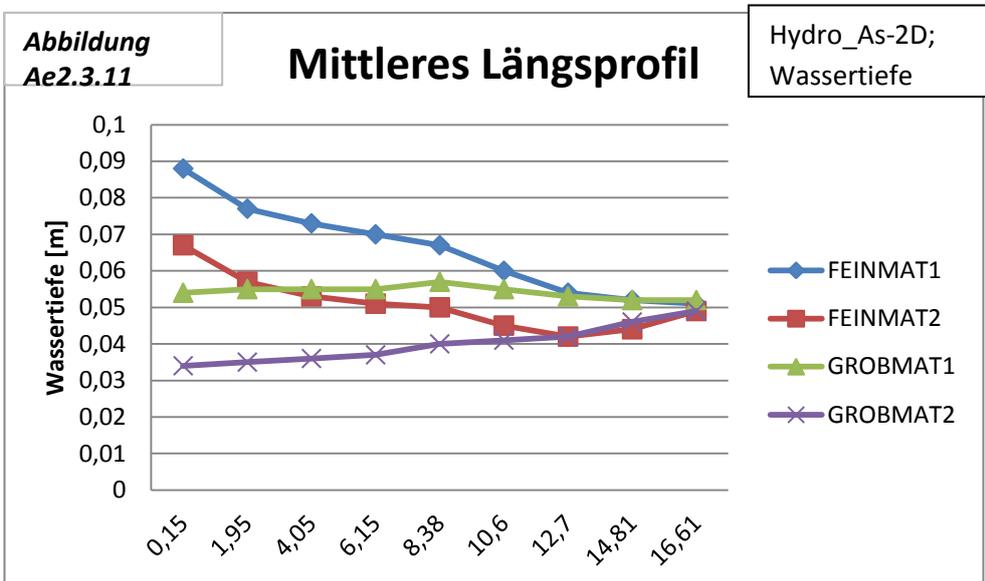
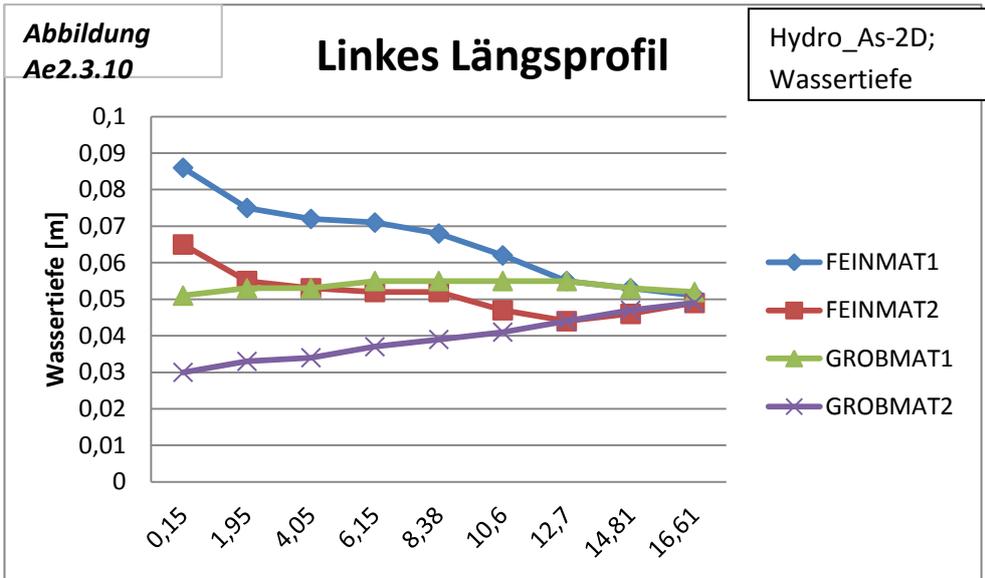
Anhang Ae



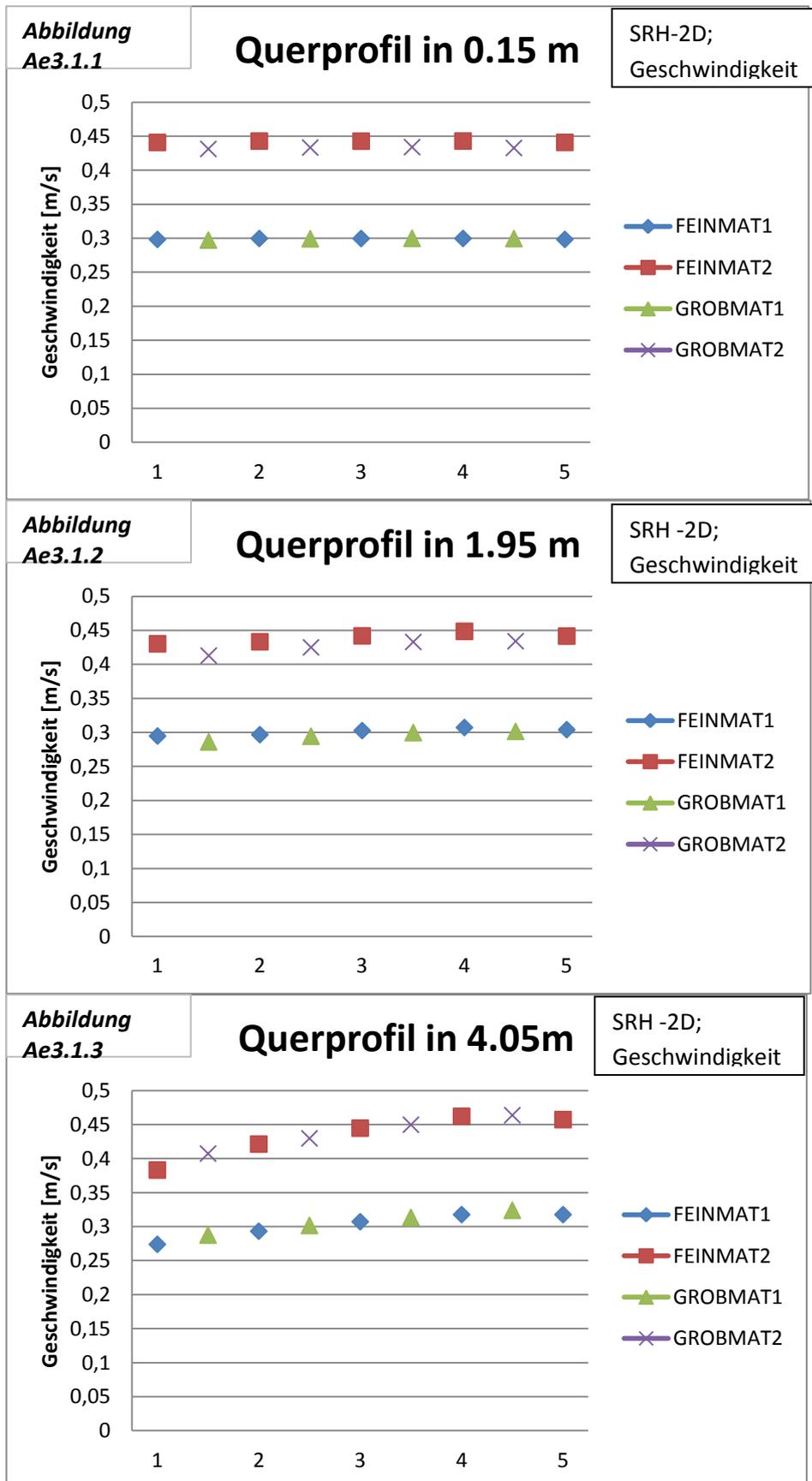
Anhang Ae



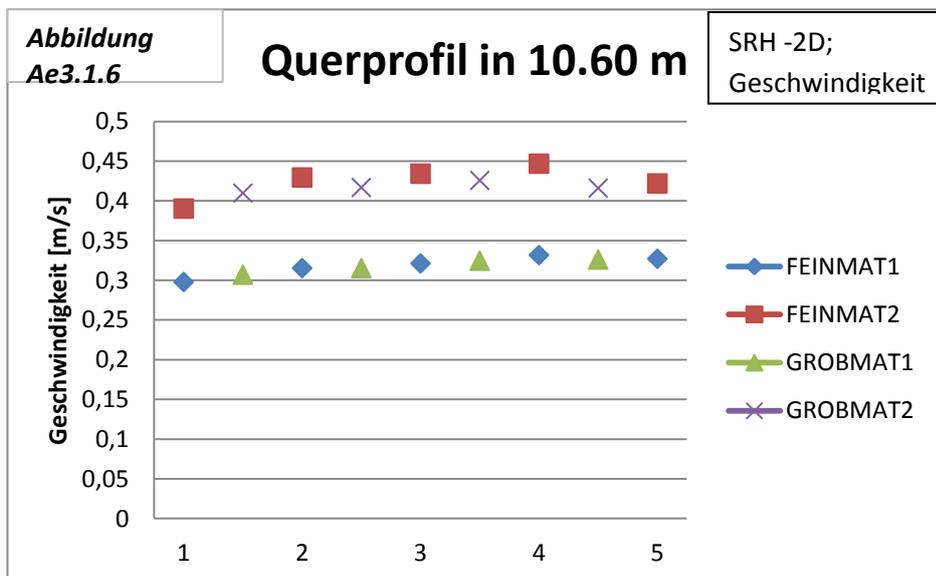
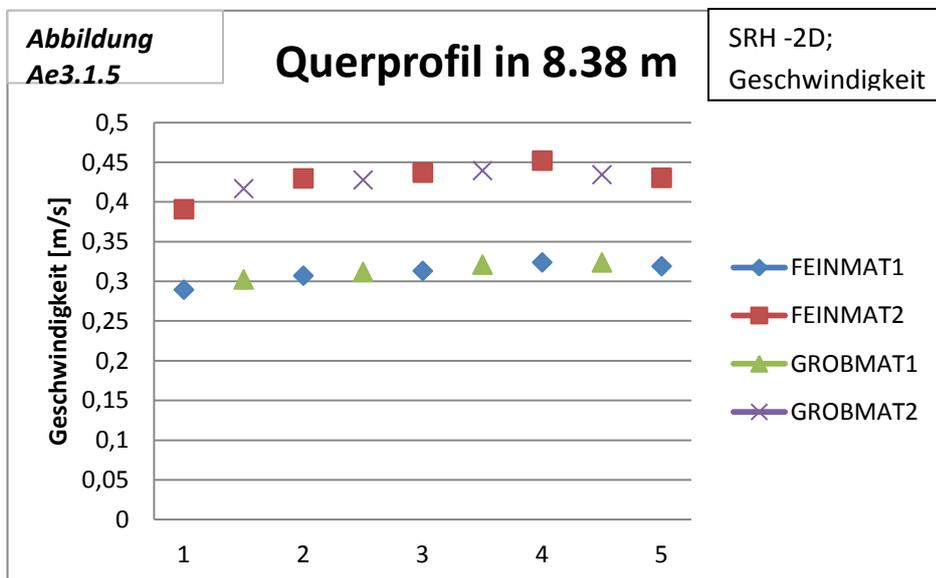
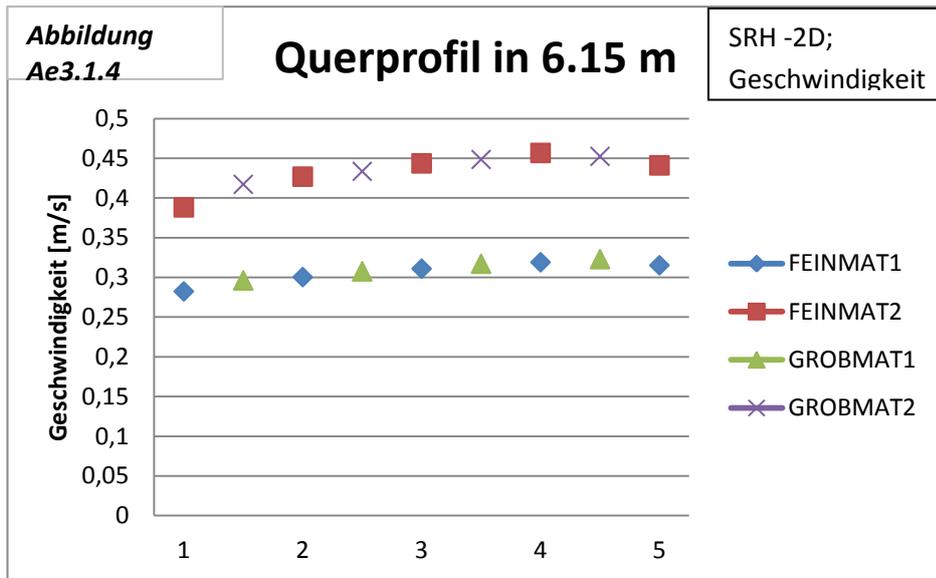
Anhang Ae



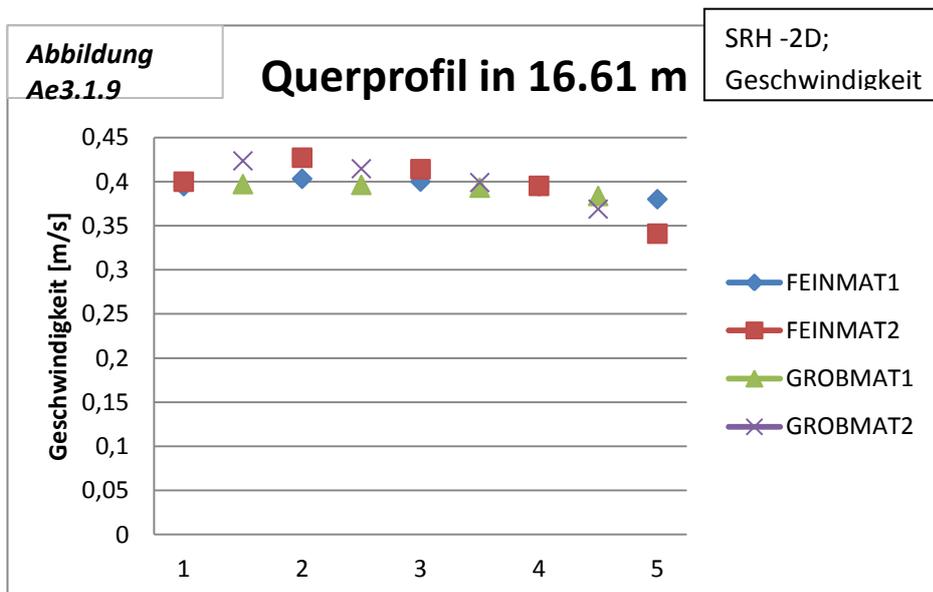
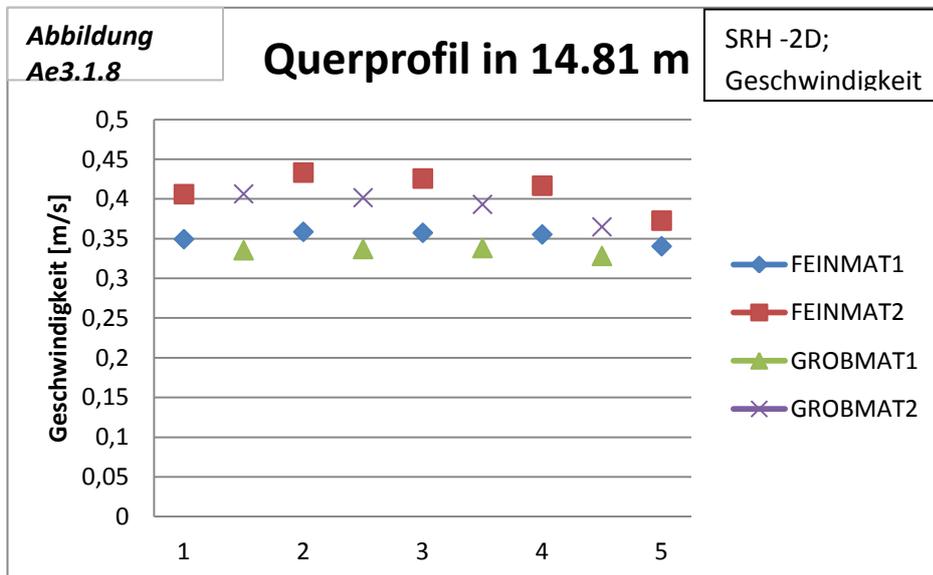
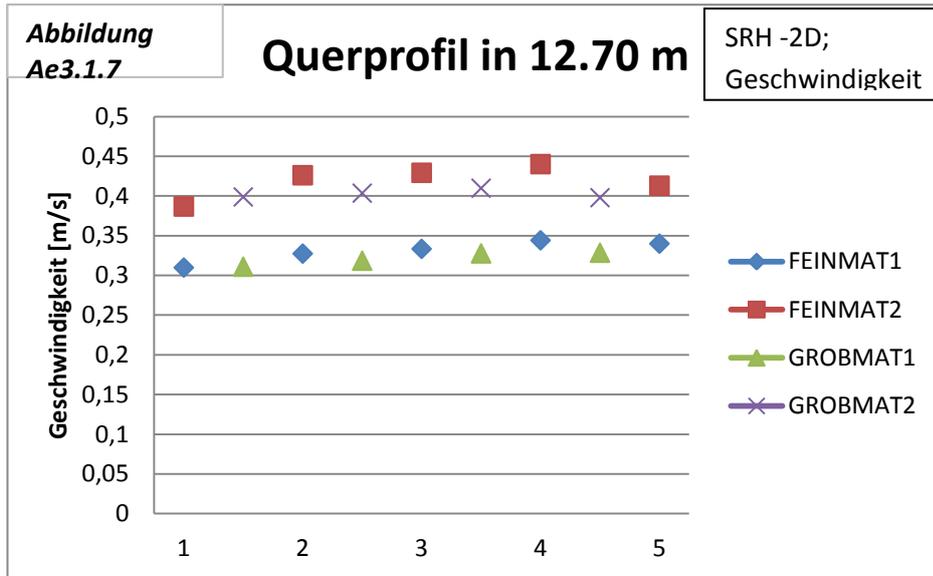
Anhang Ae



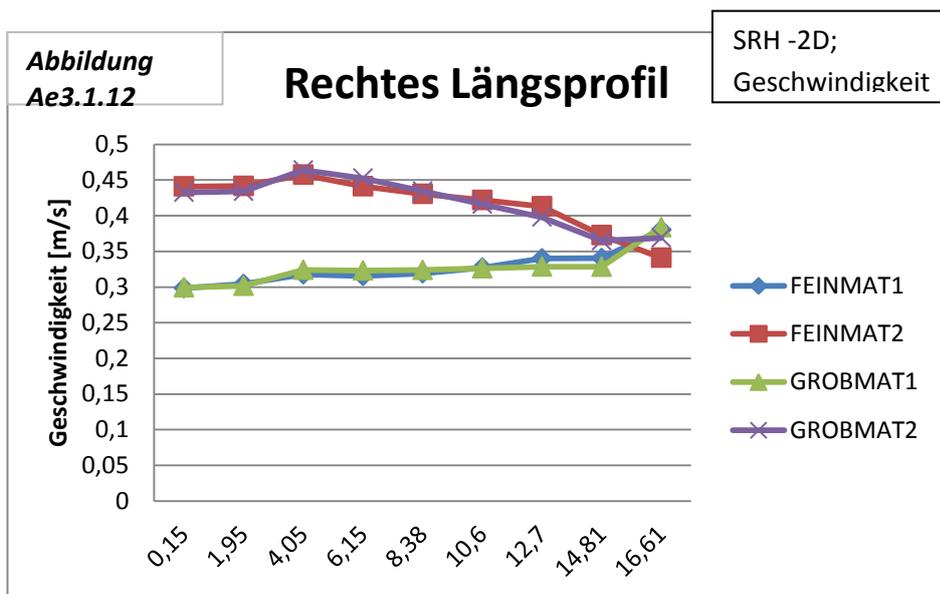
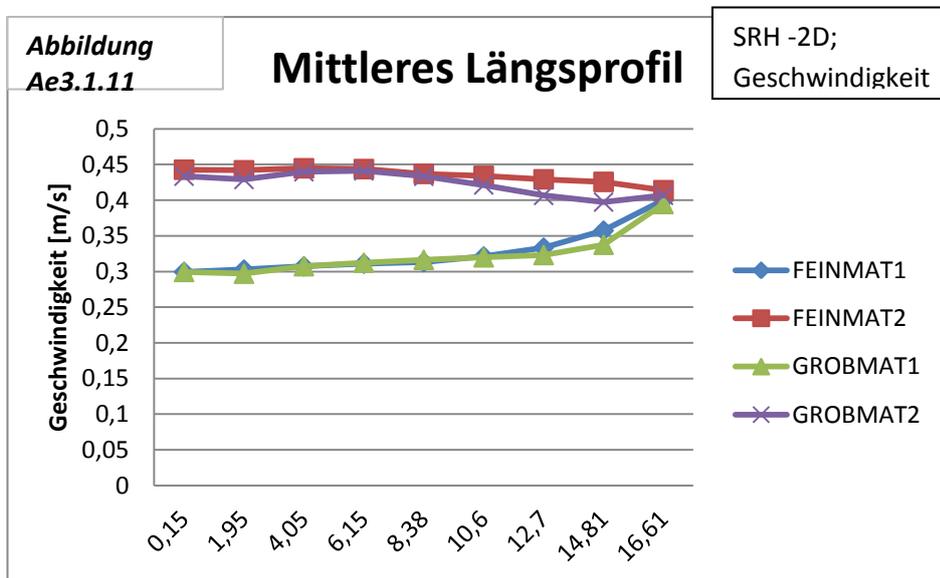
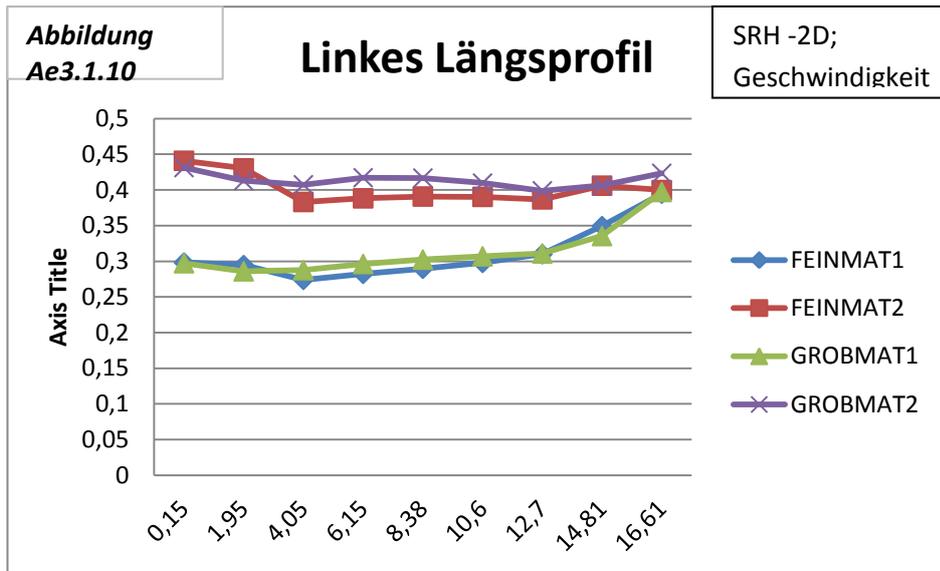
Anhang Ae



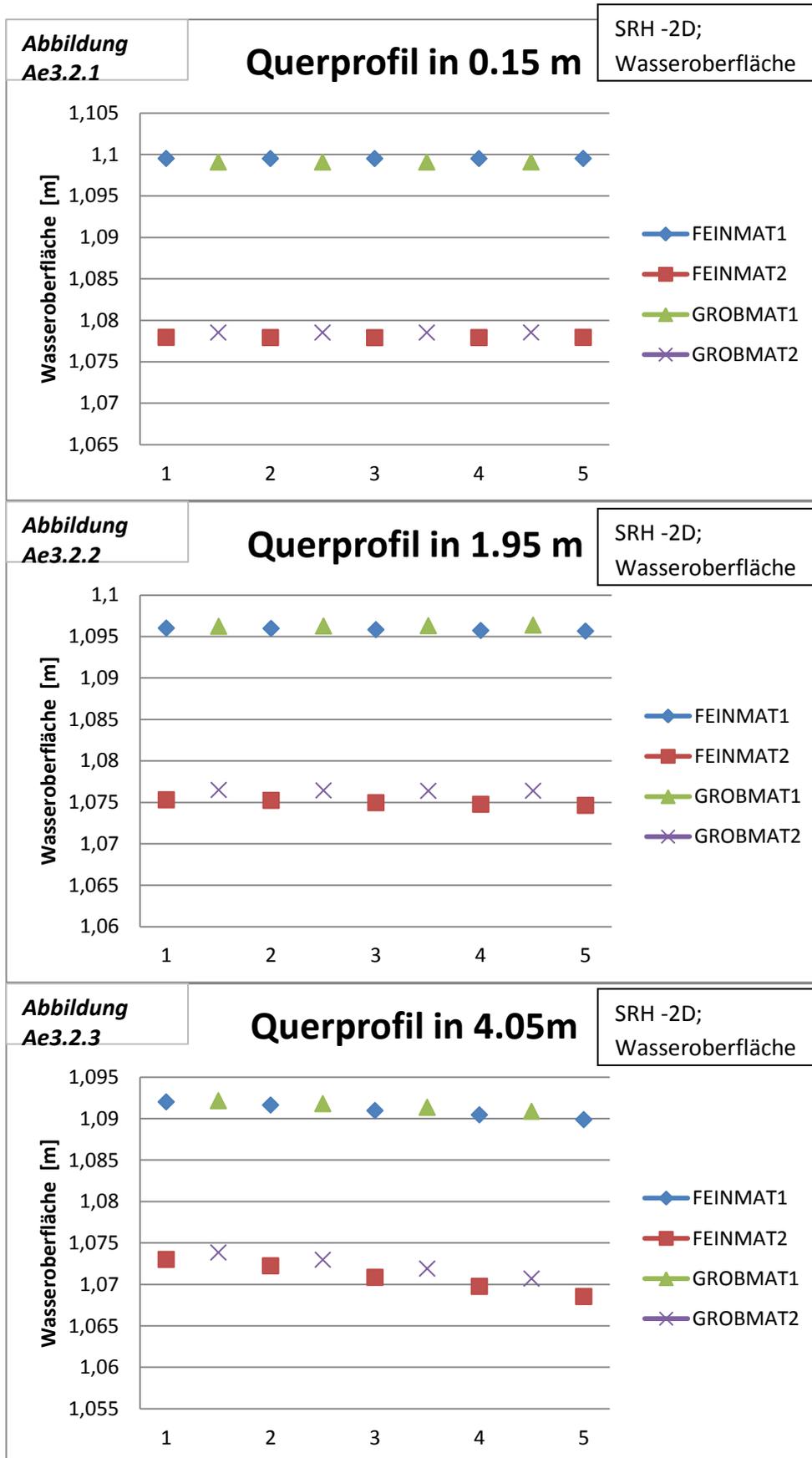
Anhang Ae



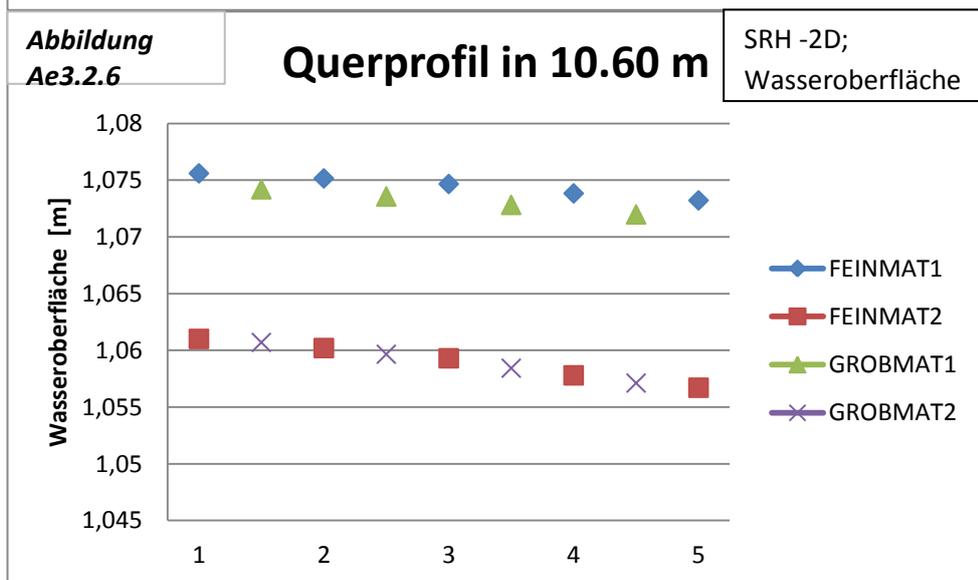
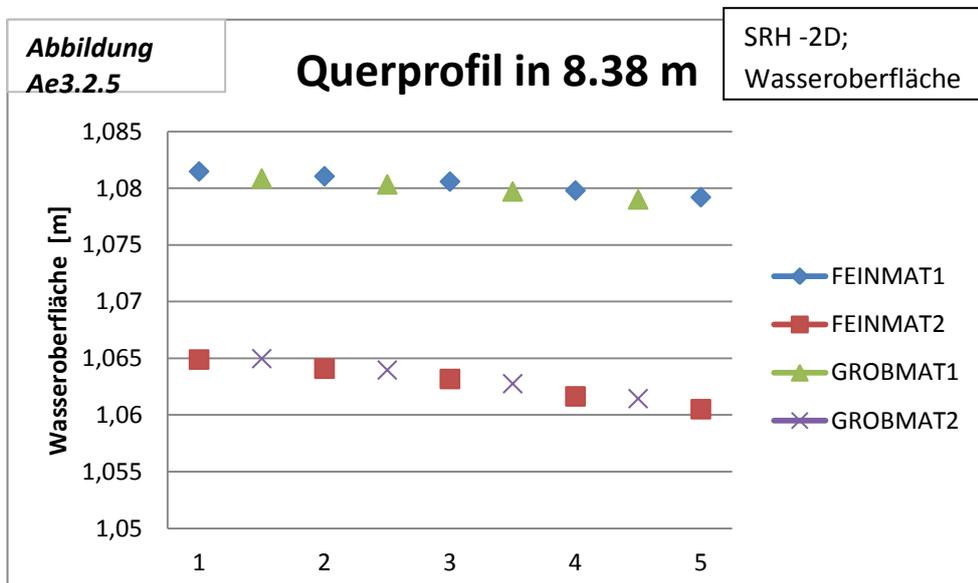
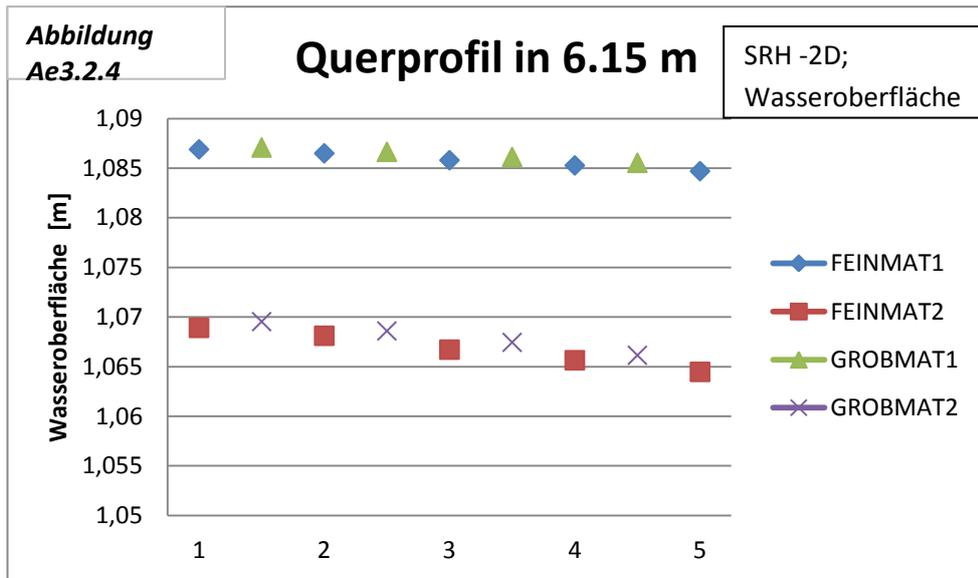
Anhang Ae



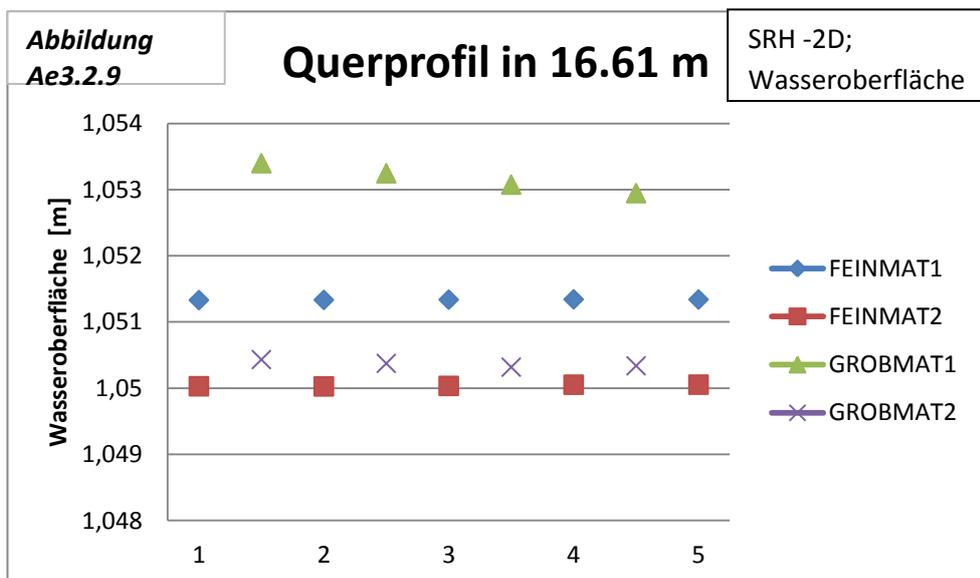
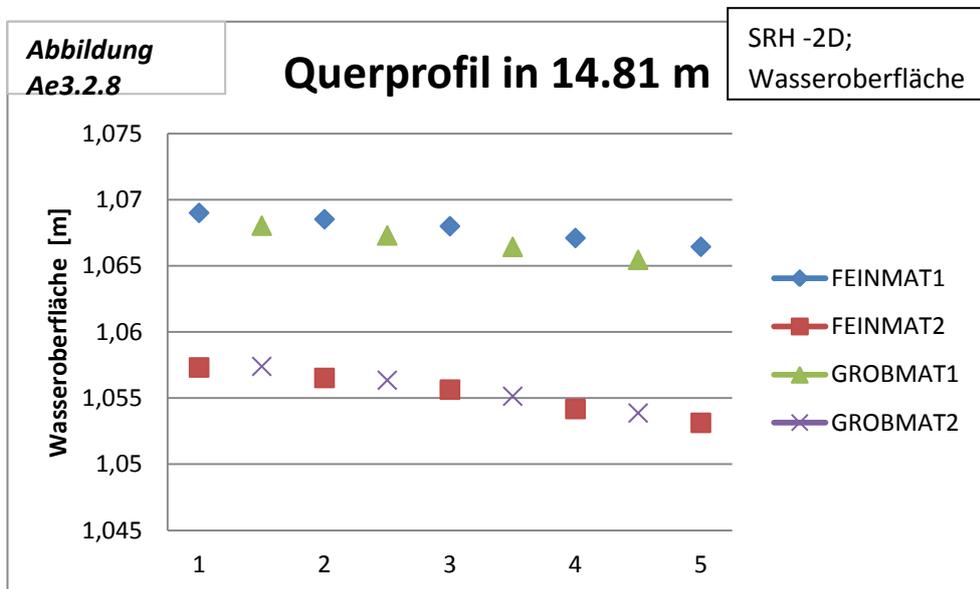
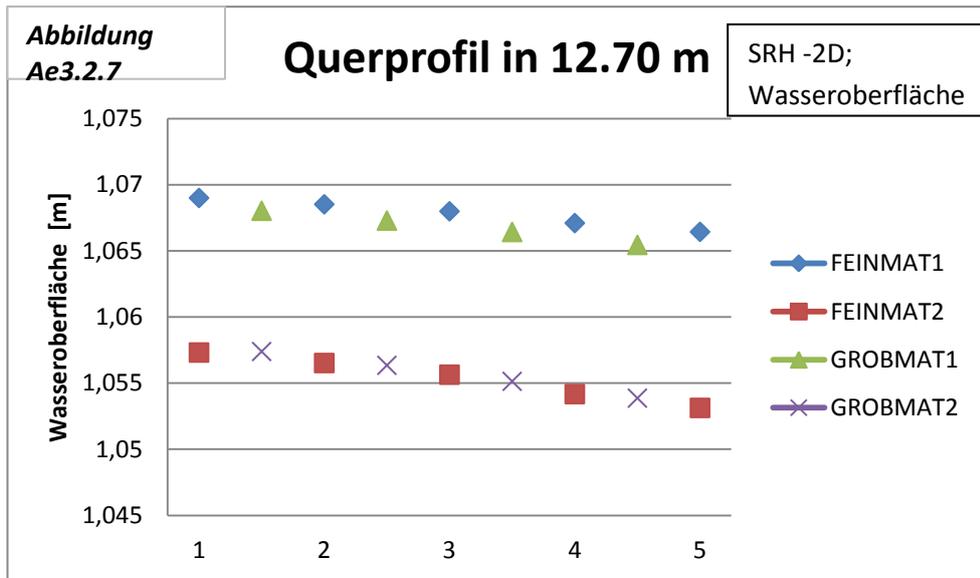
Anhang Ae



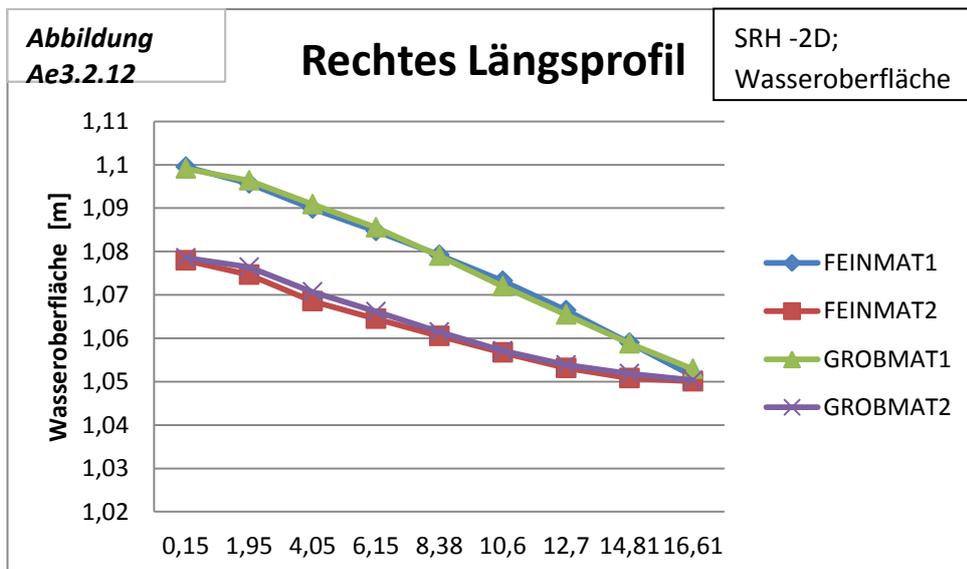
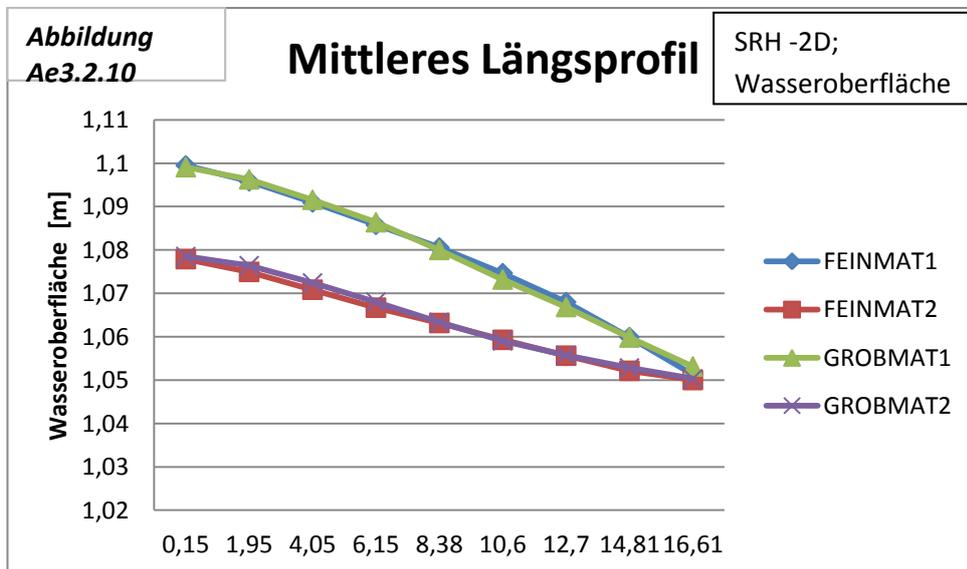
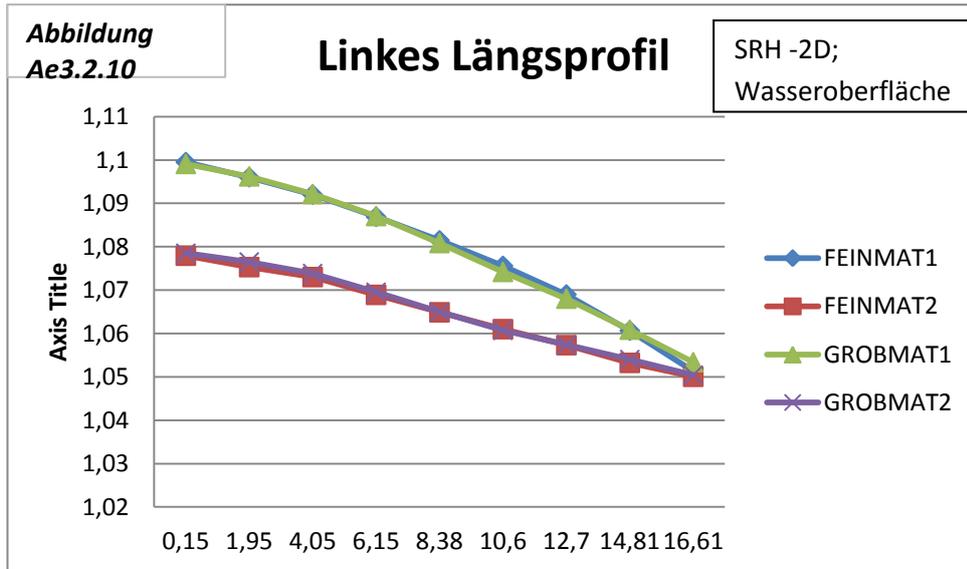
Anhang Ae



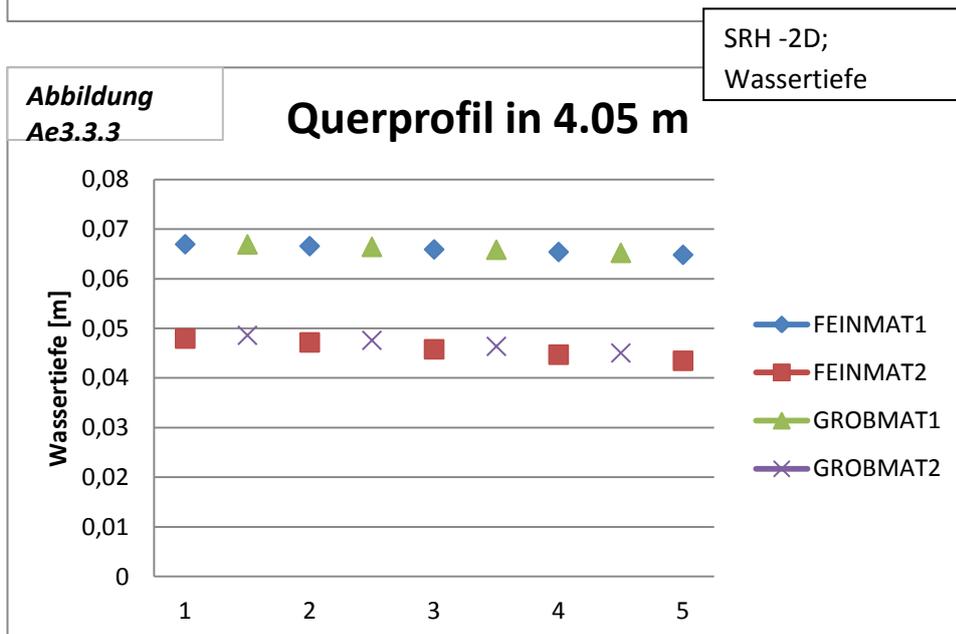
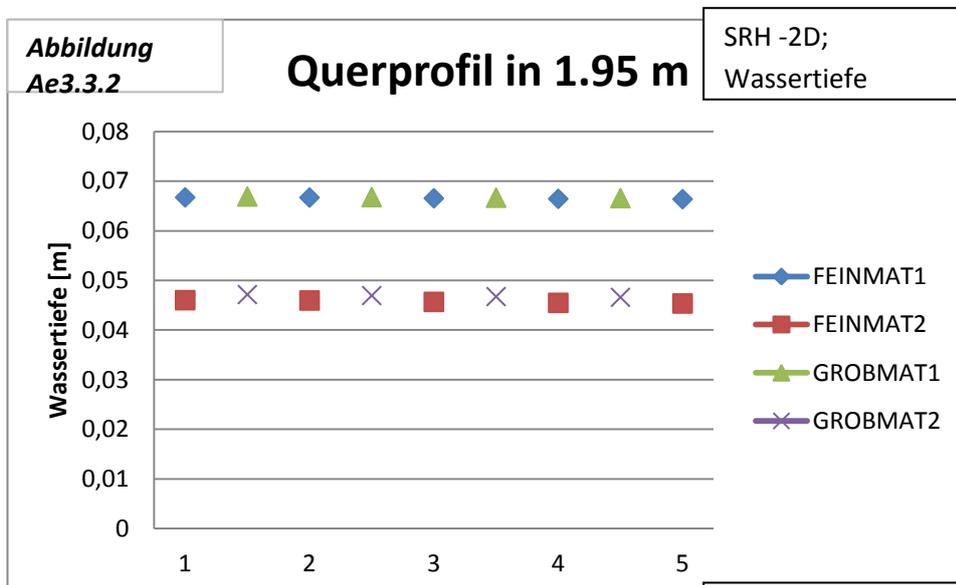
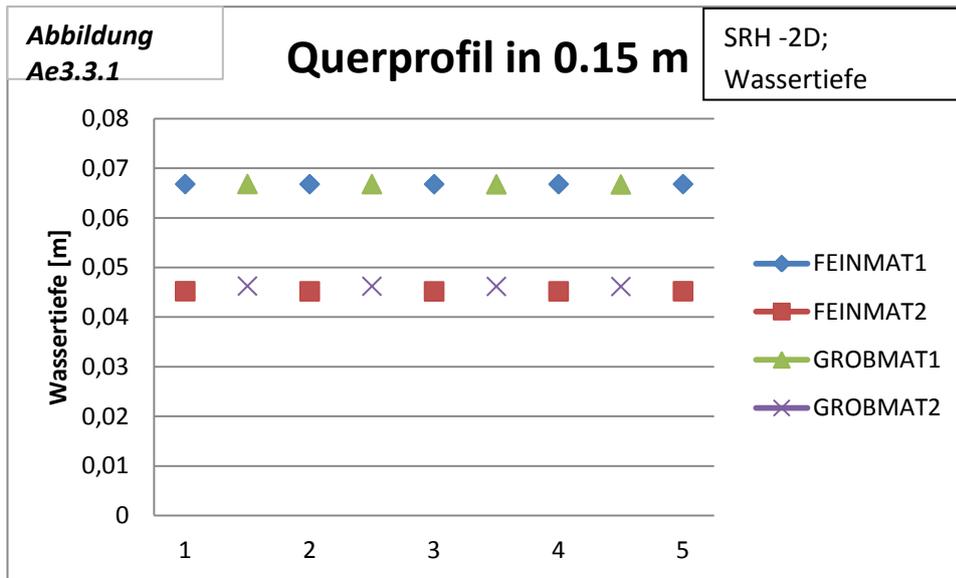
Anhang Ae



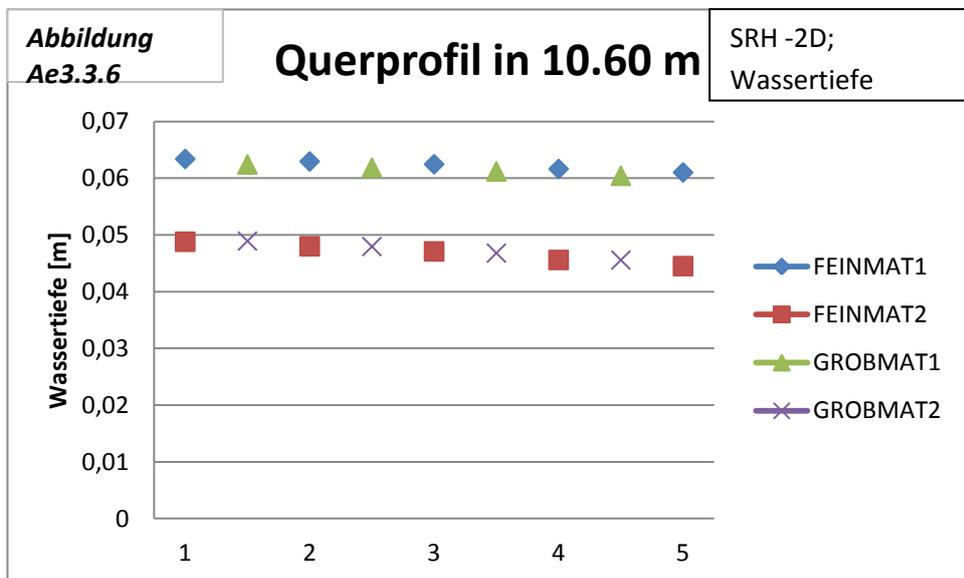
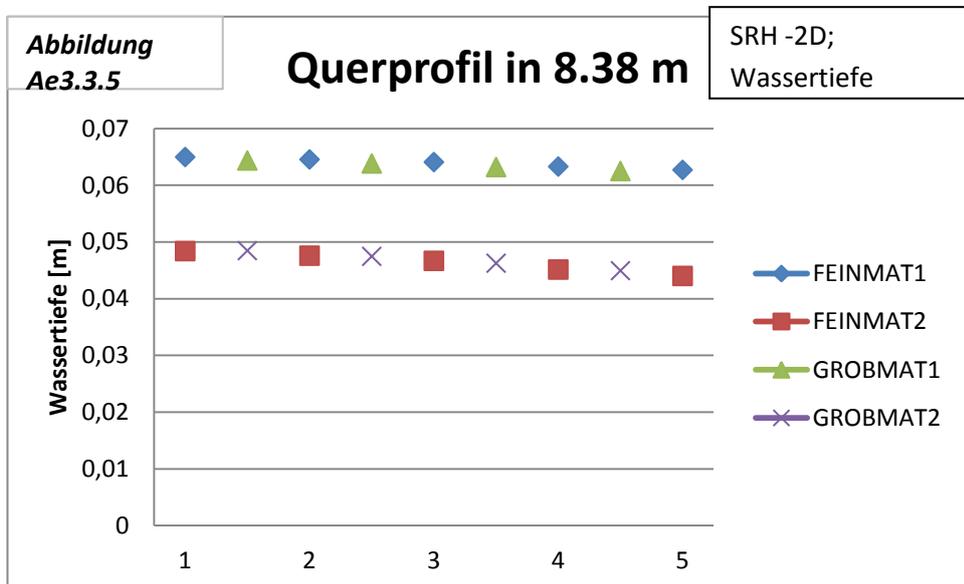
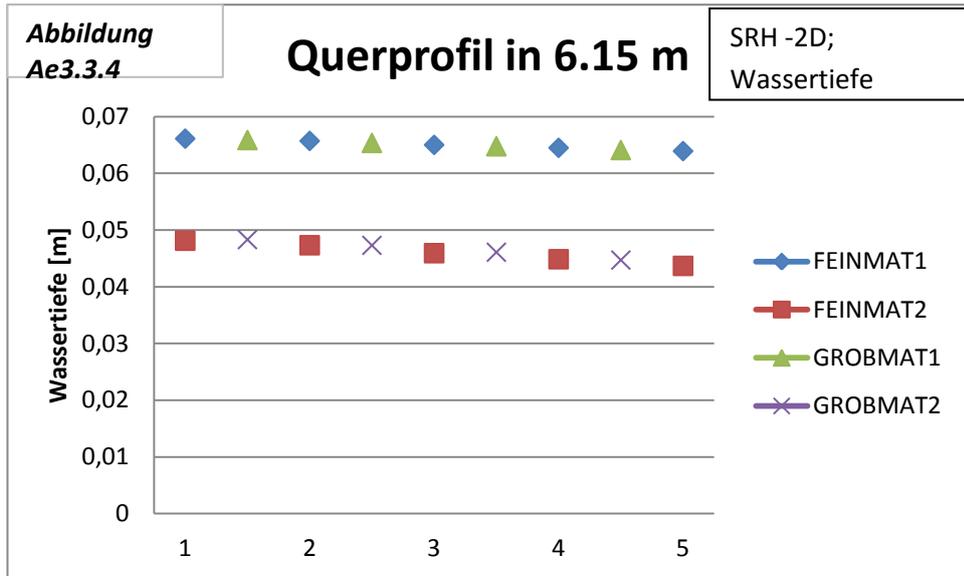
Anhang Ae



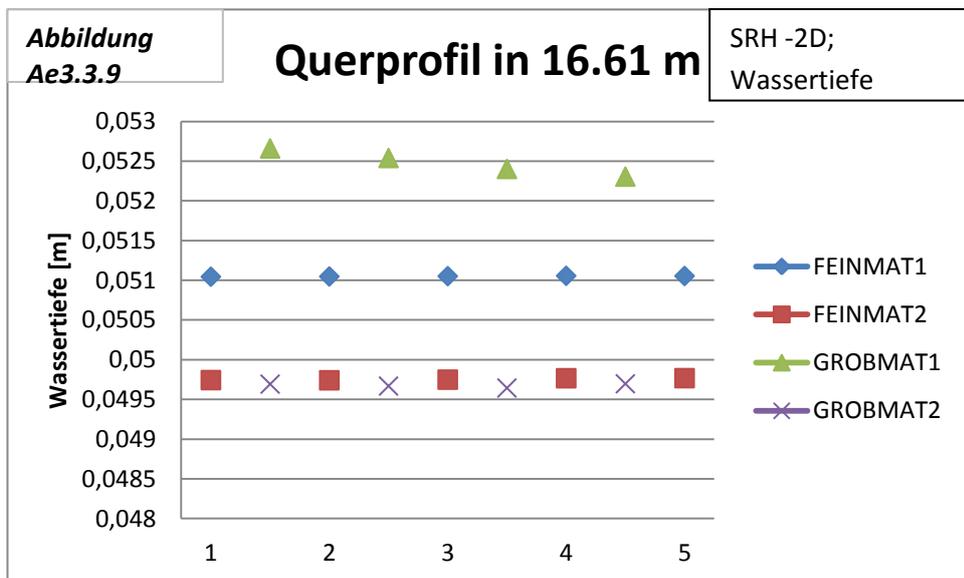
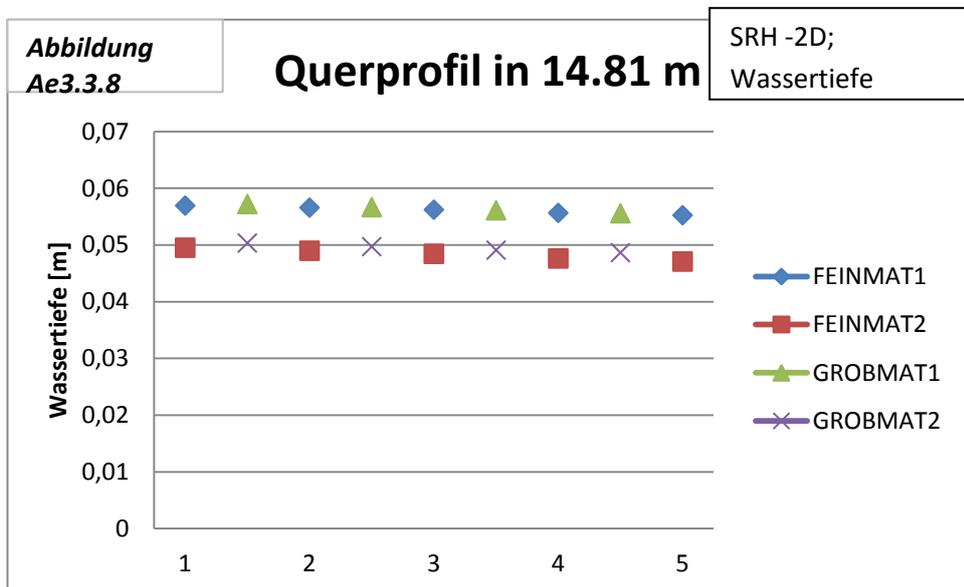
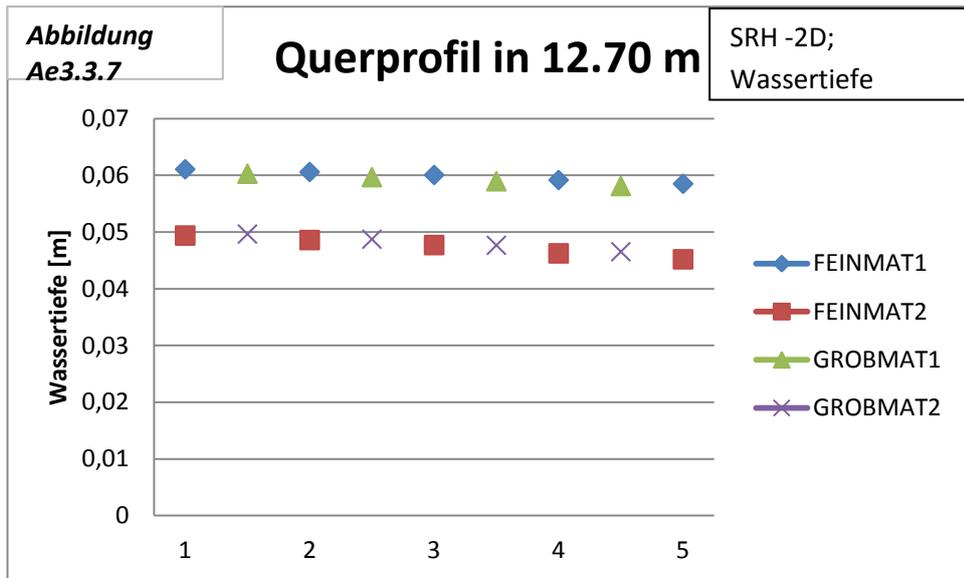
Anhang Ae



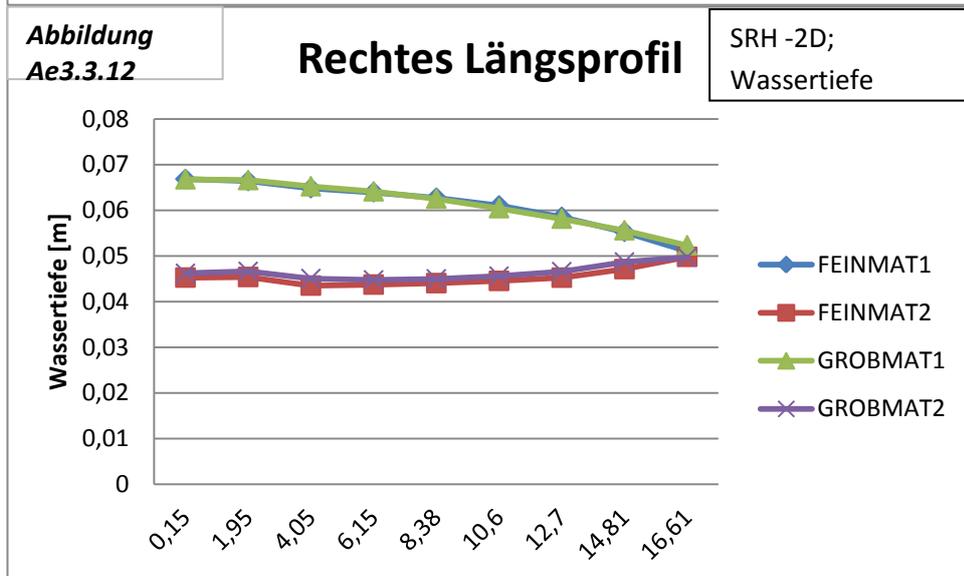
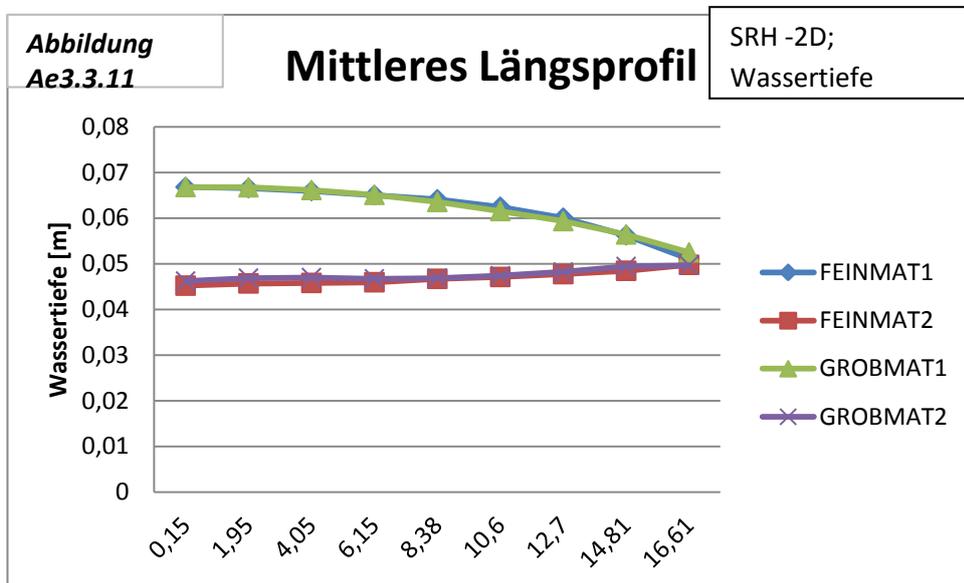
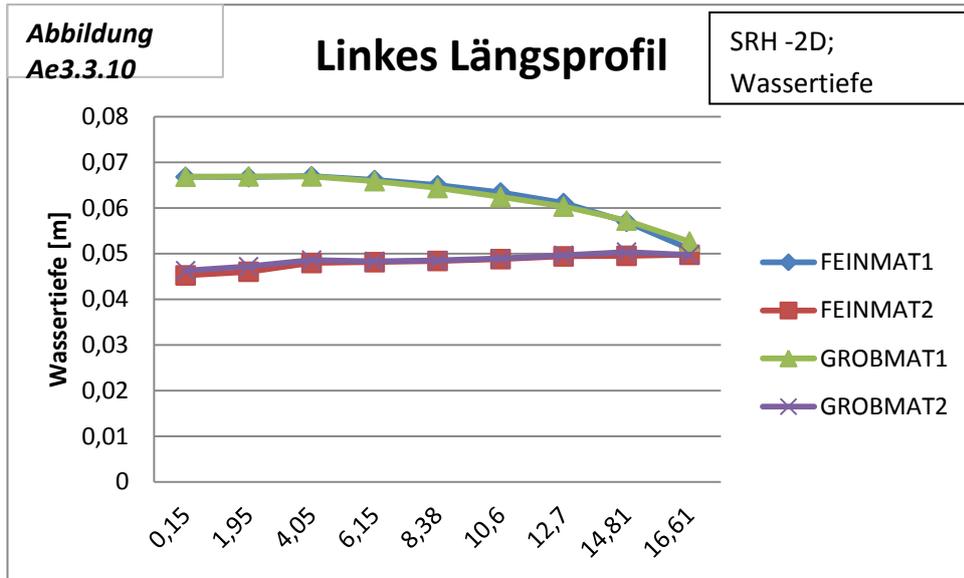
Anhang Ae



Anhang Ae



Anhang Ae



Anhang B

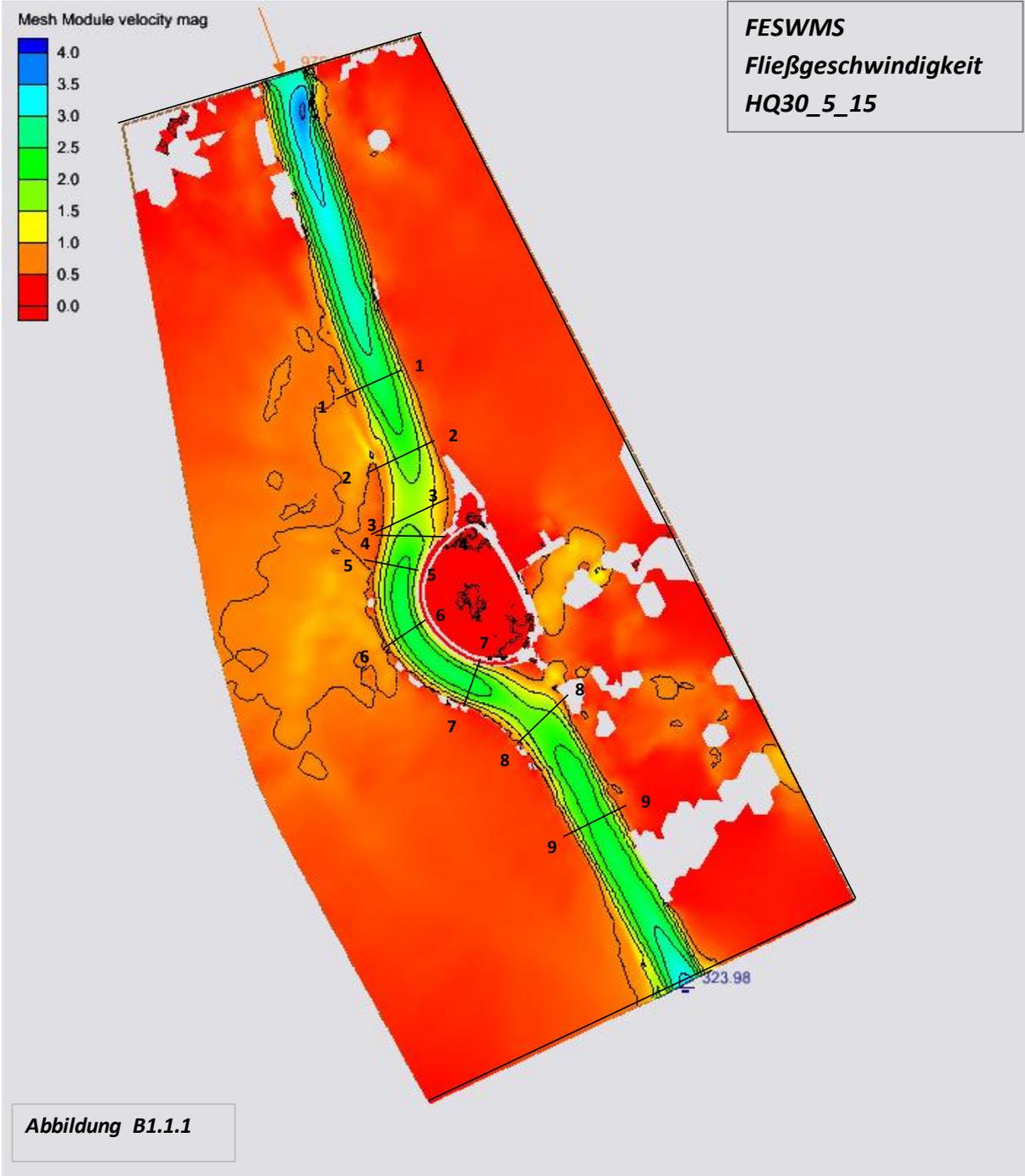
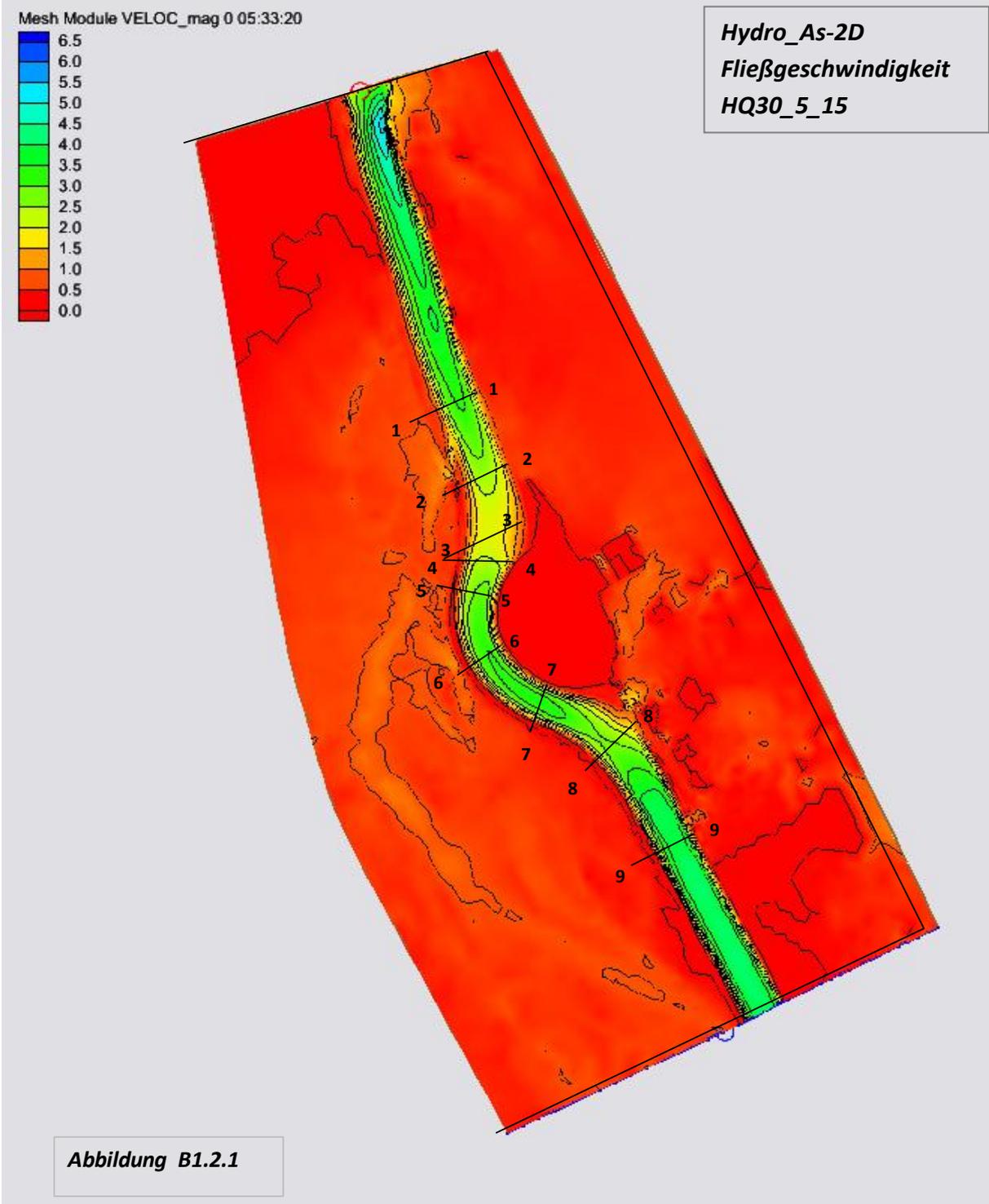
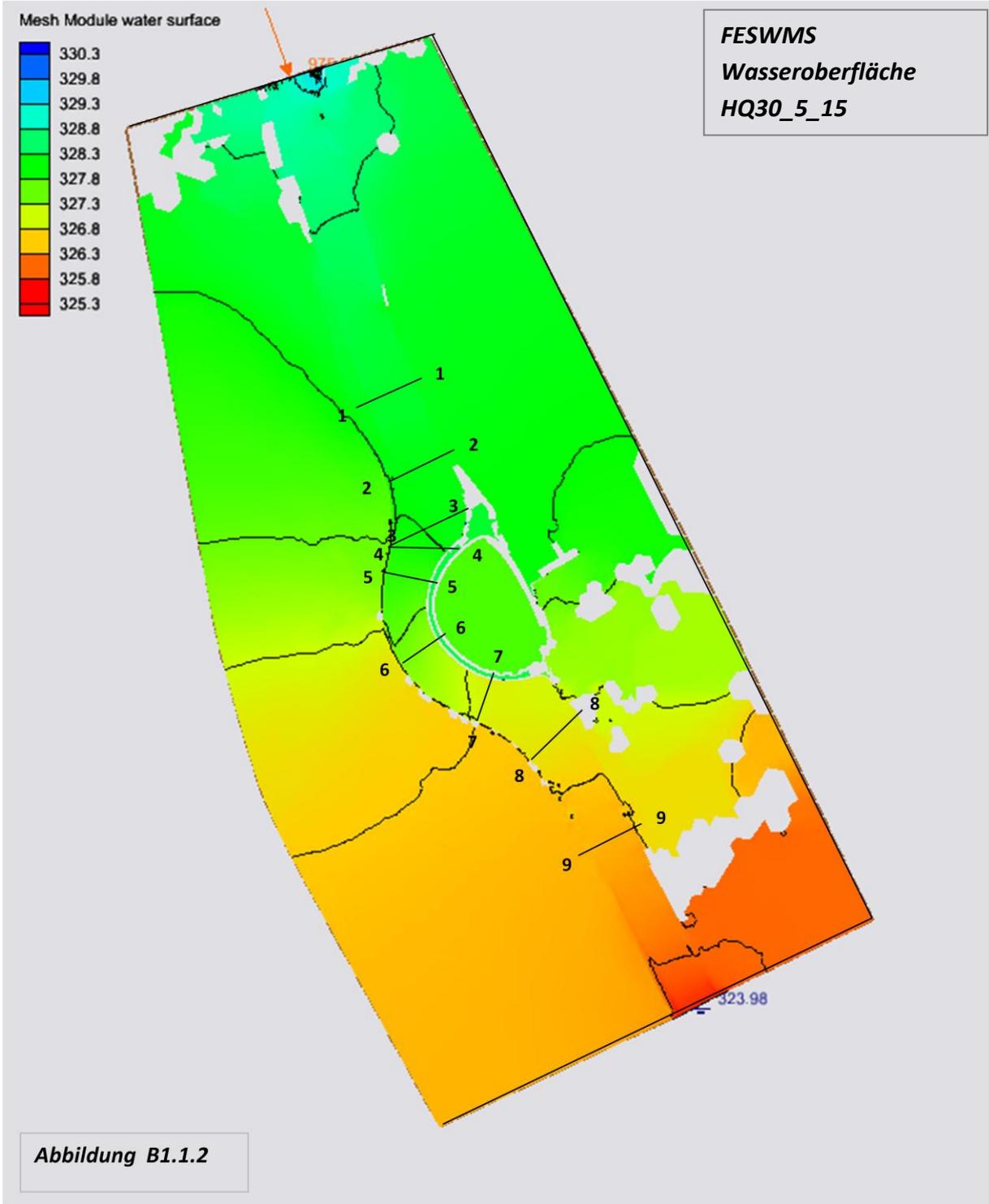


Abbildung B1.1.1

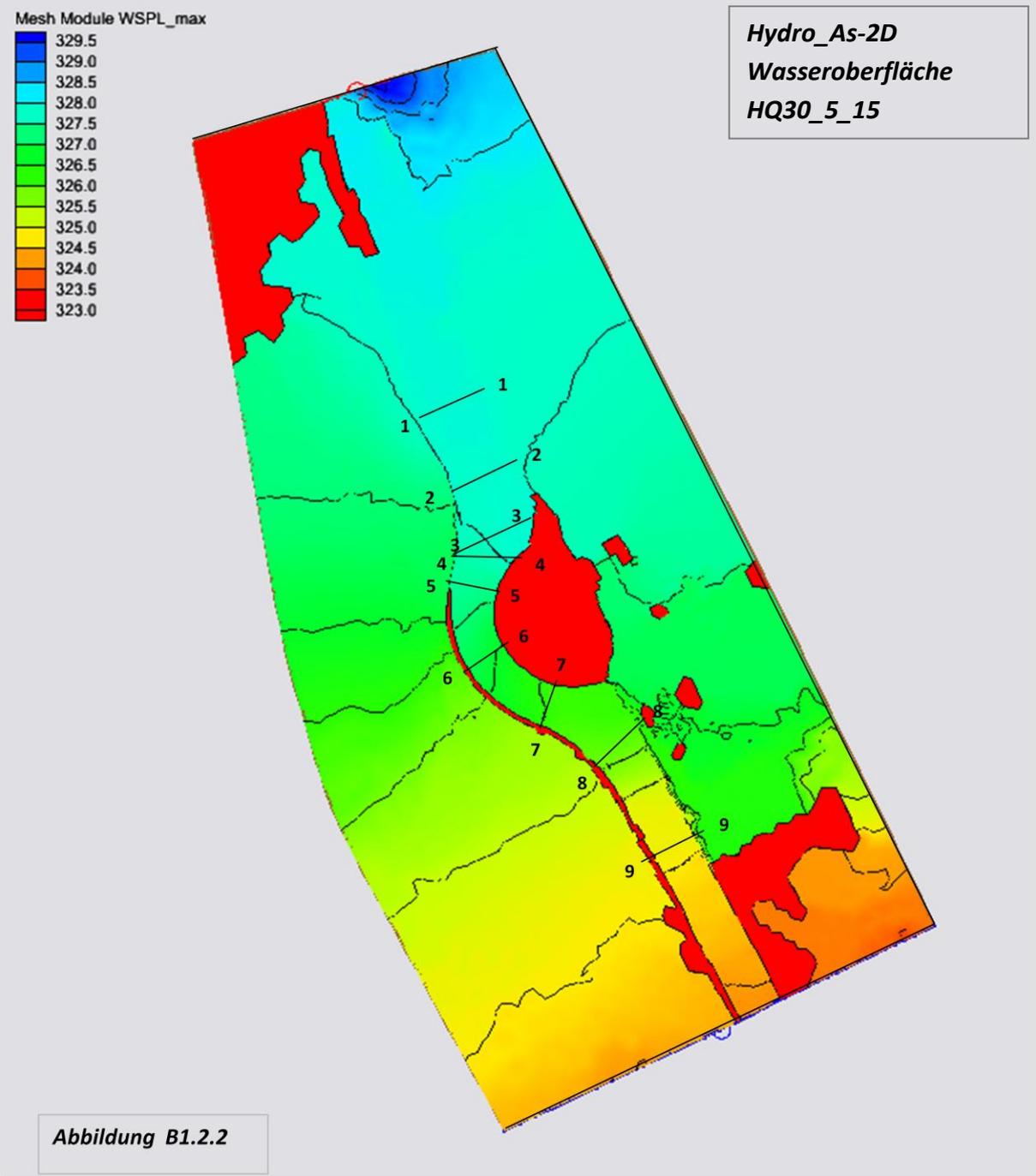
Anhang B



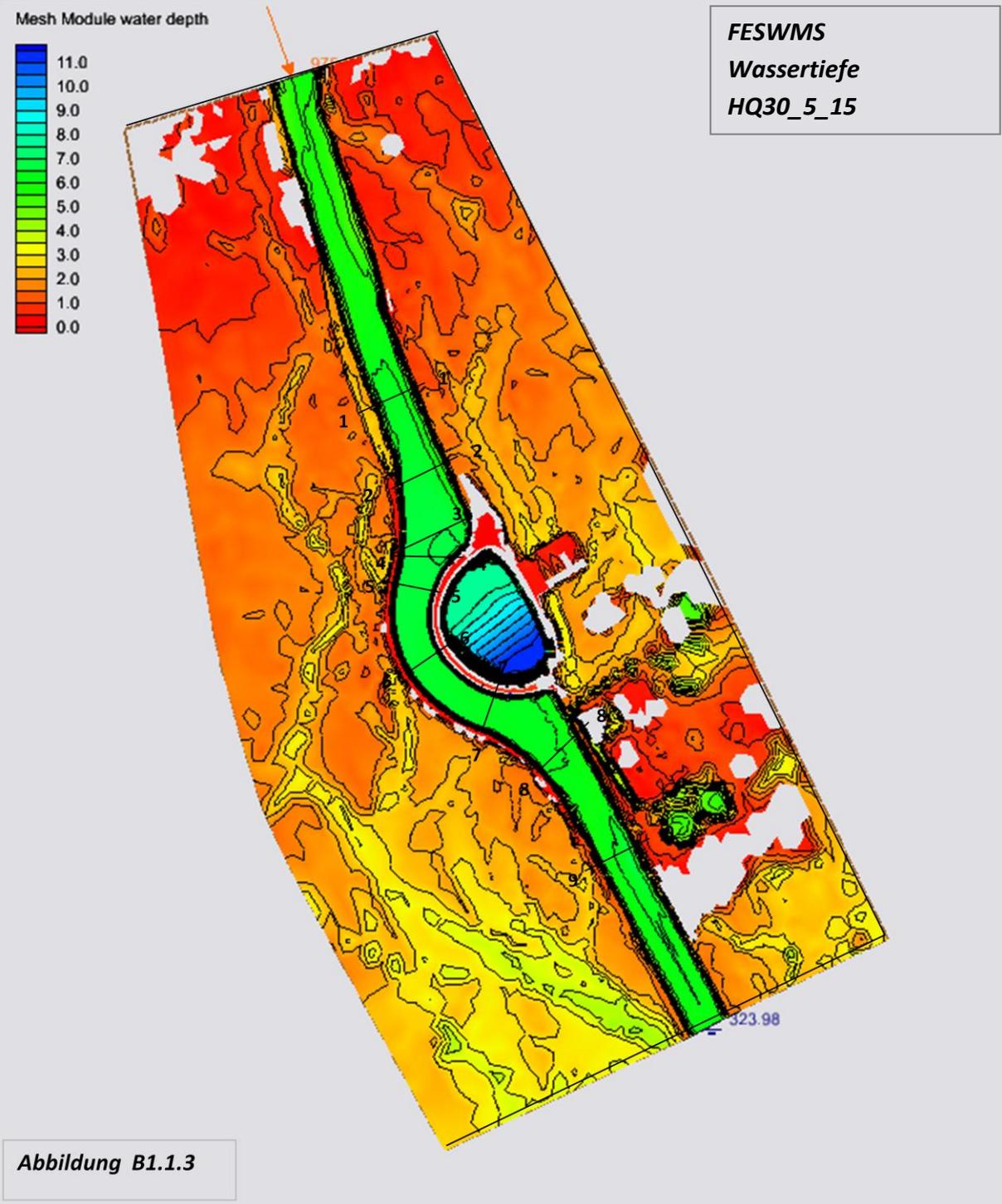
Anhang B



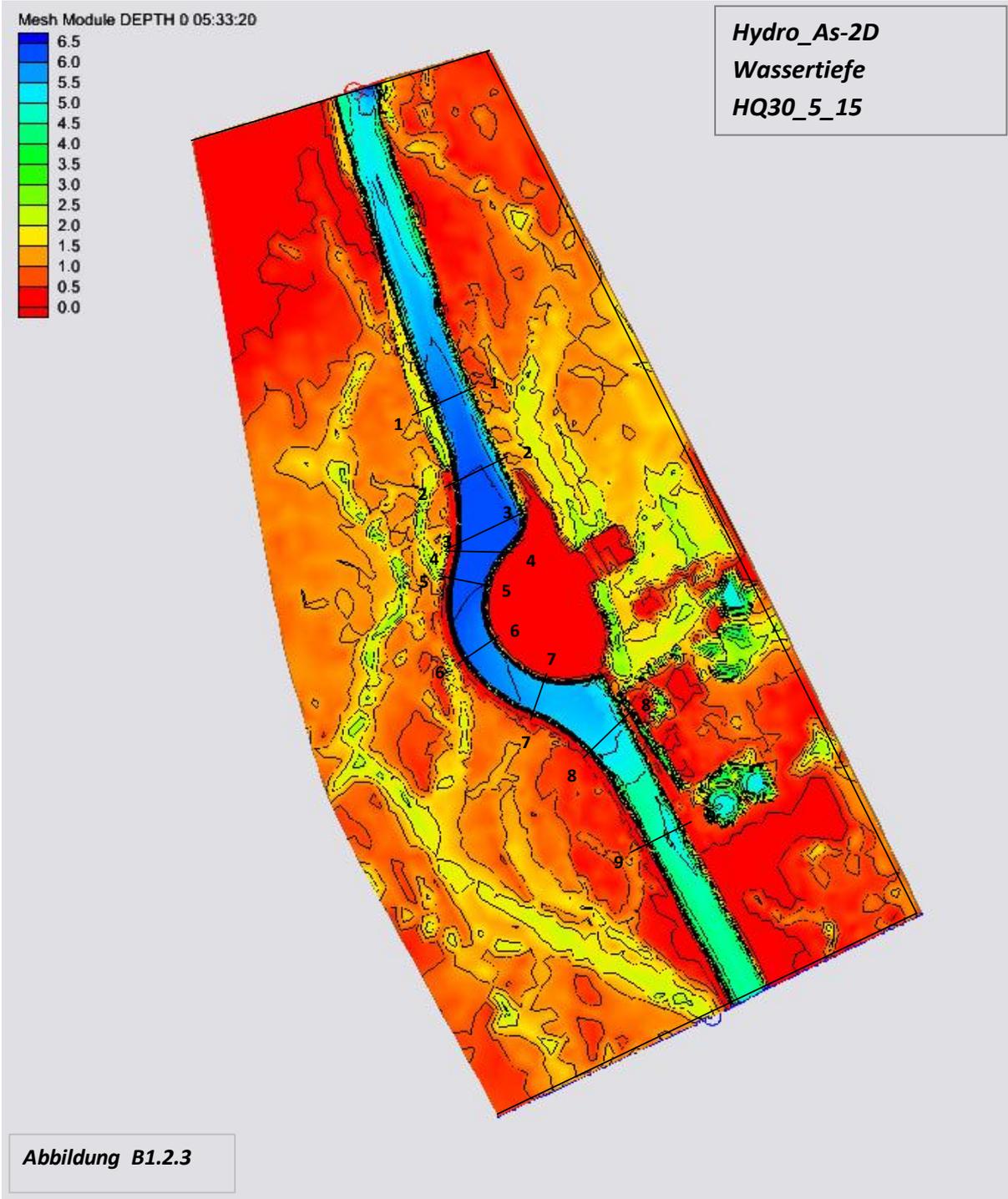
Anhang B



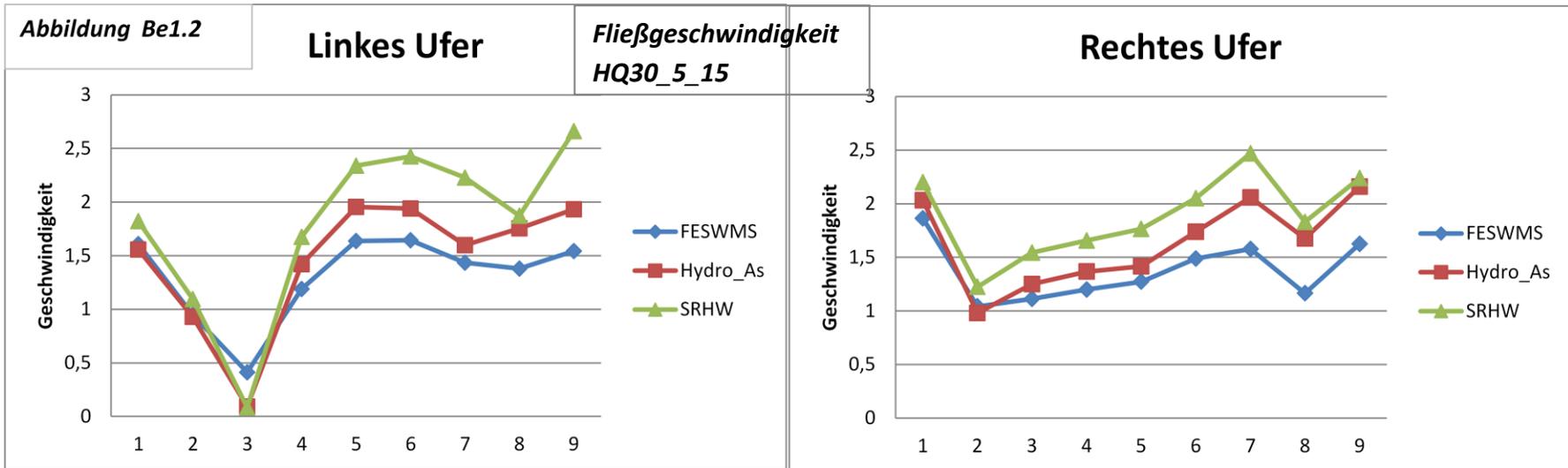
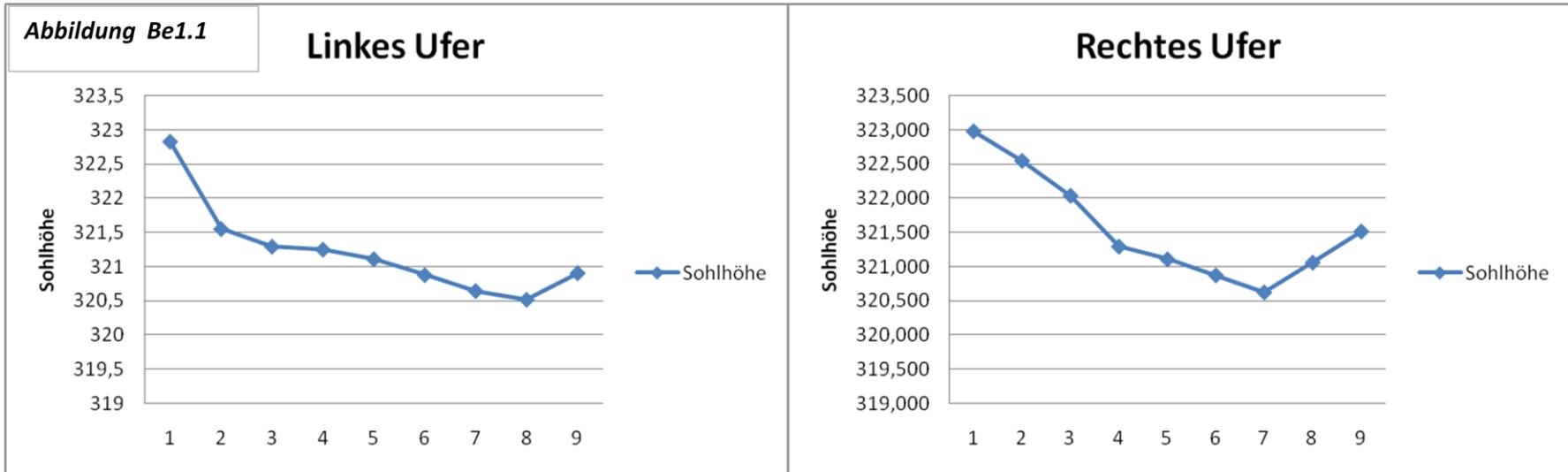
Anhang B



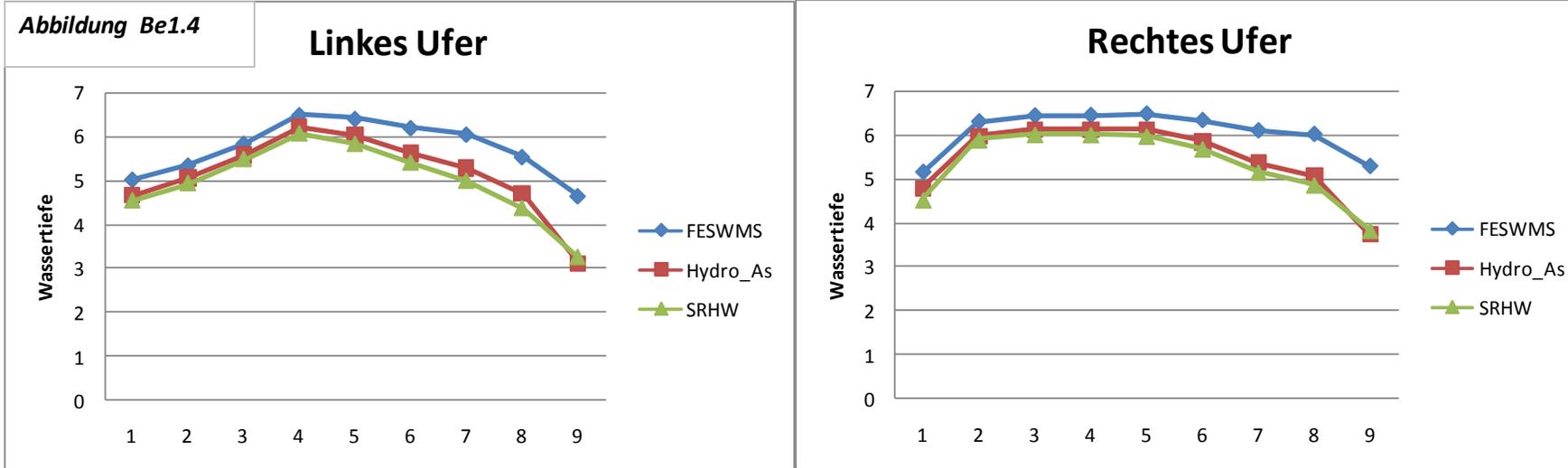
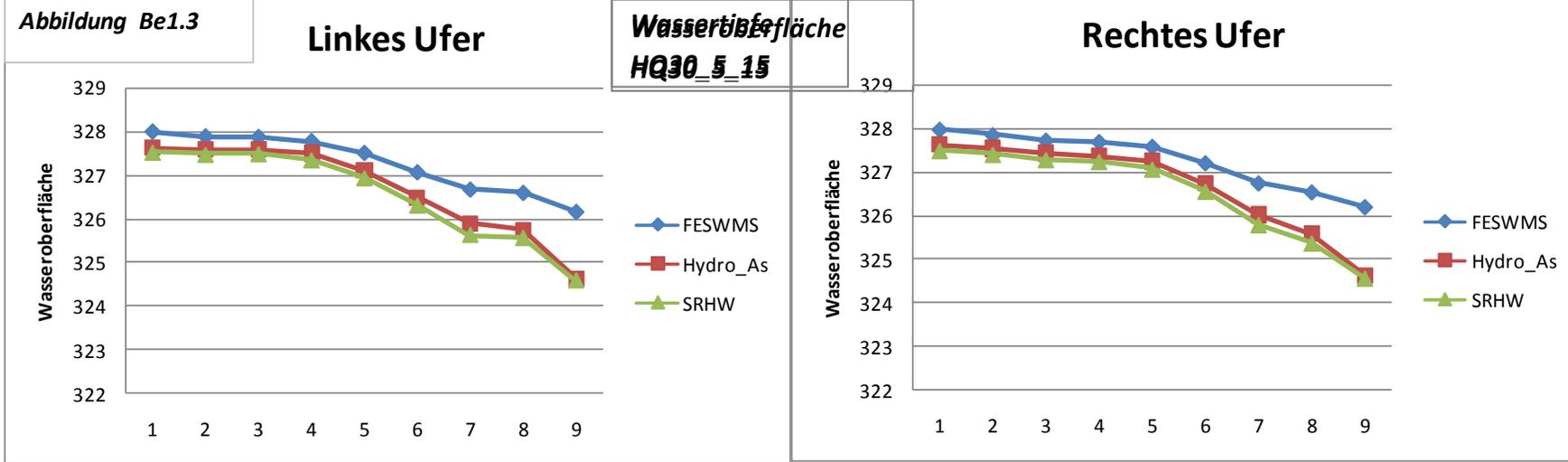
Anhang B



Anhang B



Anhang B



Anhang B

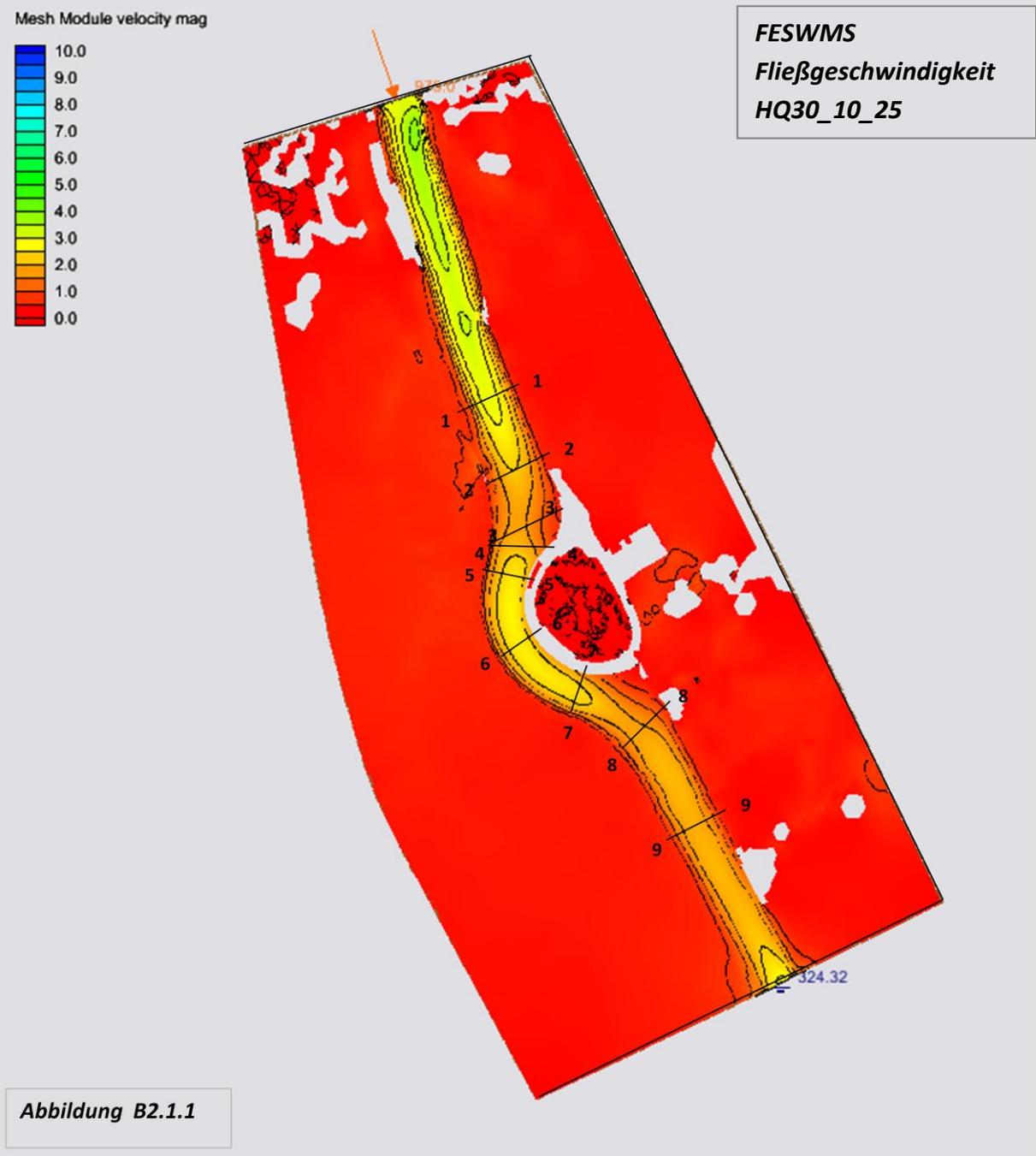
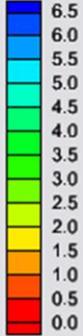


Abbildung B2.1.1

Anhang B

Mesh Module VELOC_mag 0 05:33:20



Hydro_As-2D
Fließgeschwindigkeit
HQ30_10_25

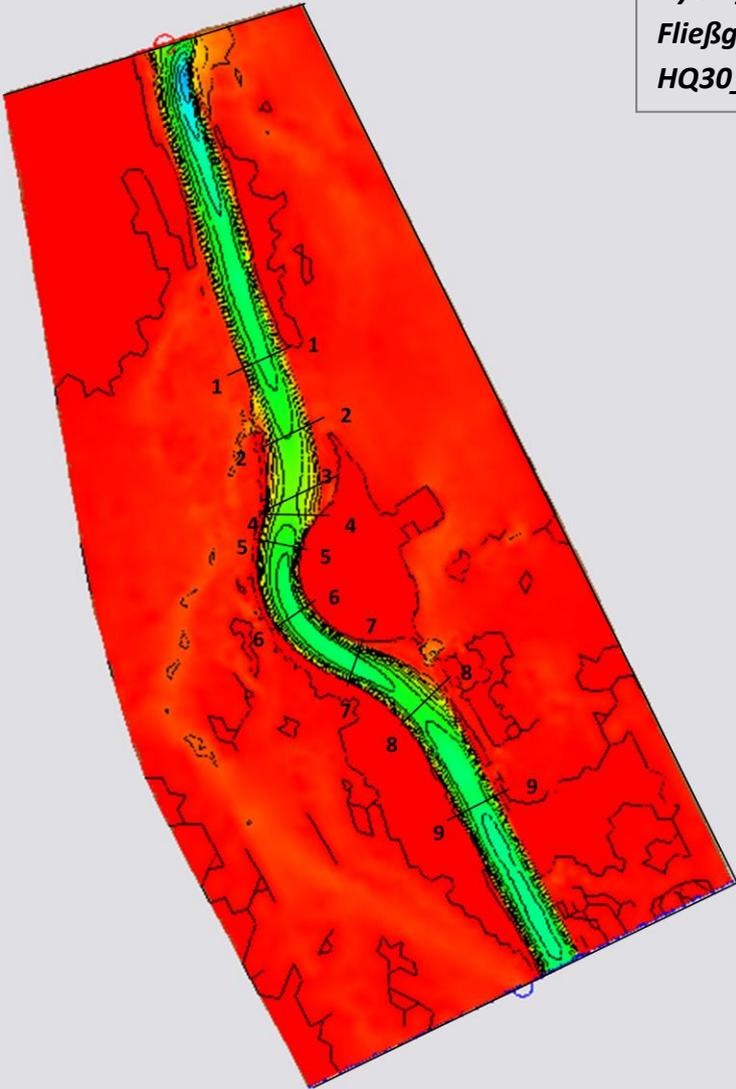
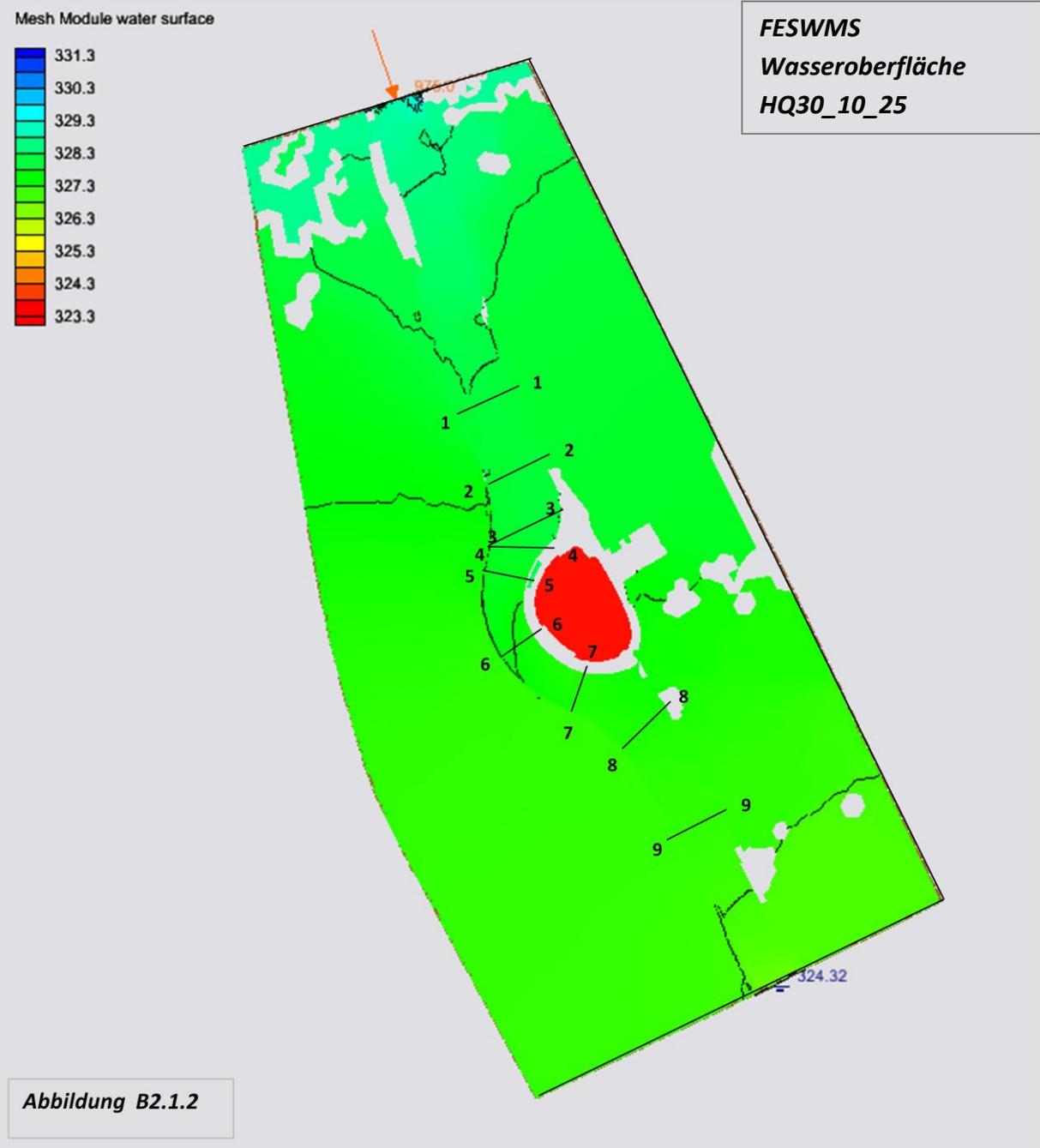
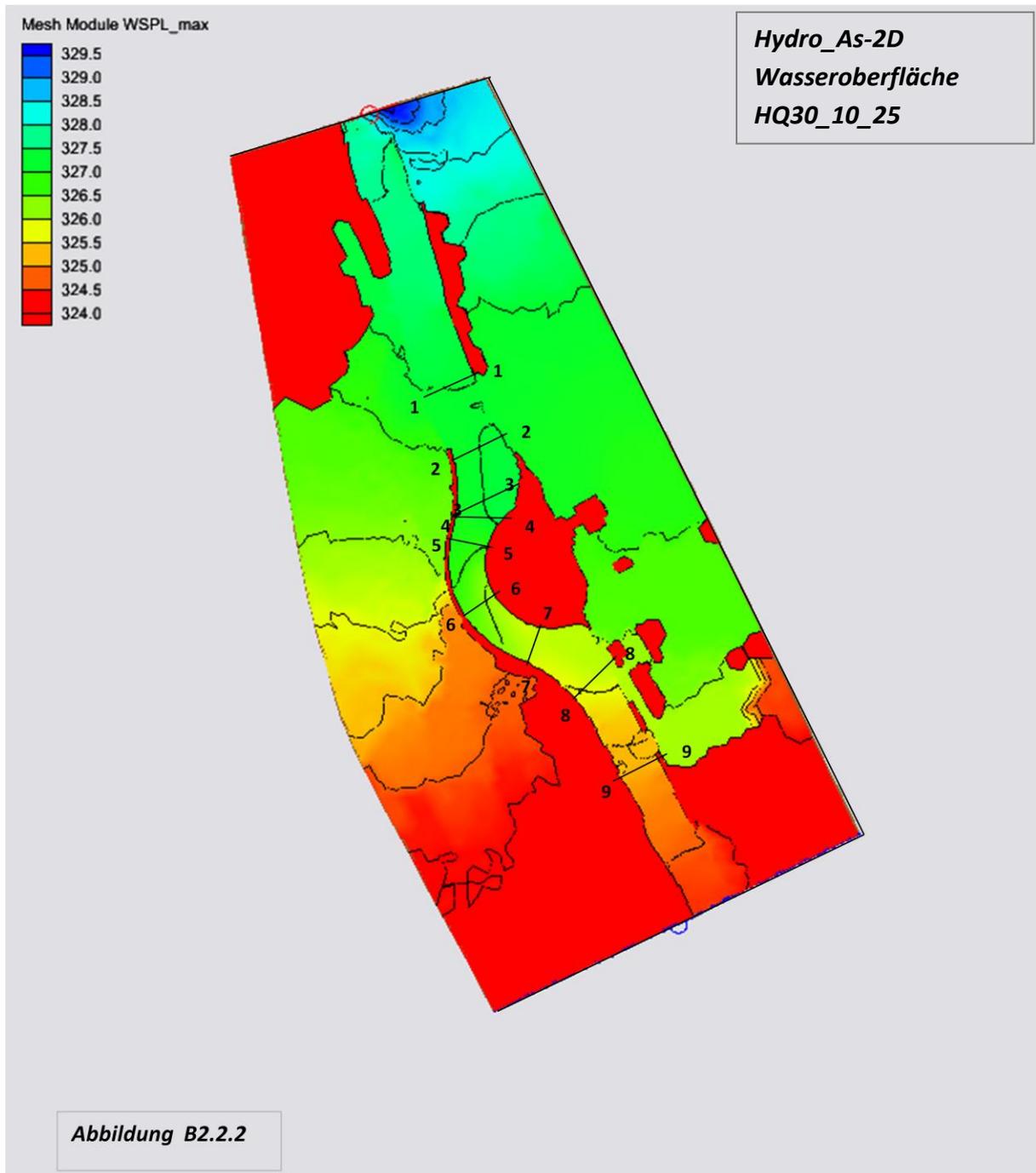


Abbildung B2.2.1

Anhang B



Anhang B



Anhang B

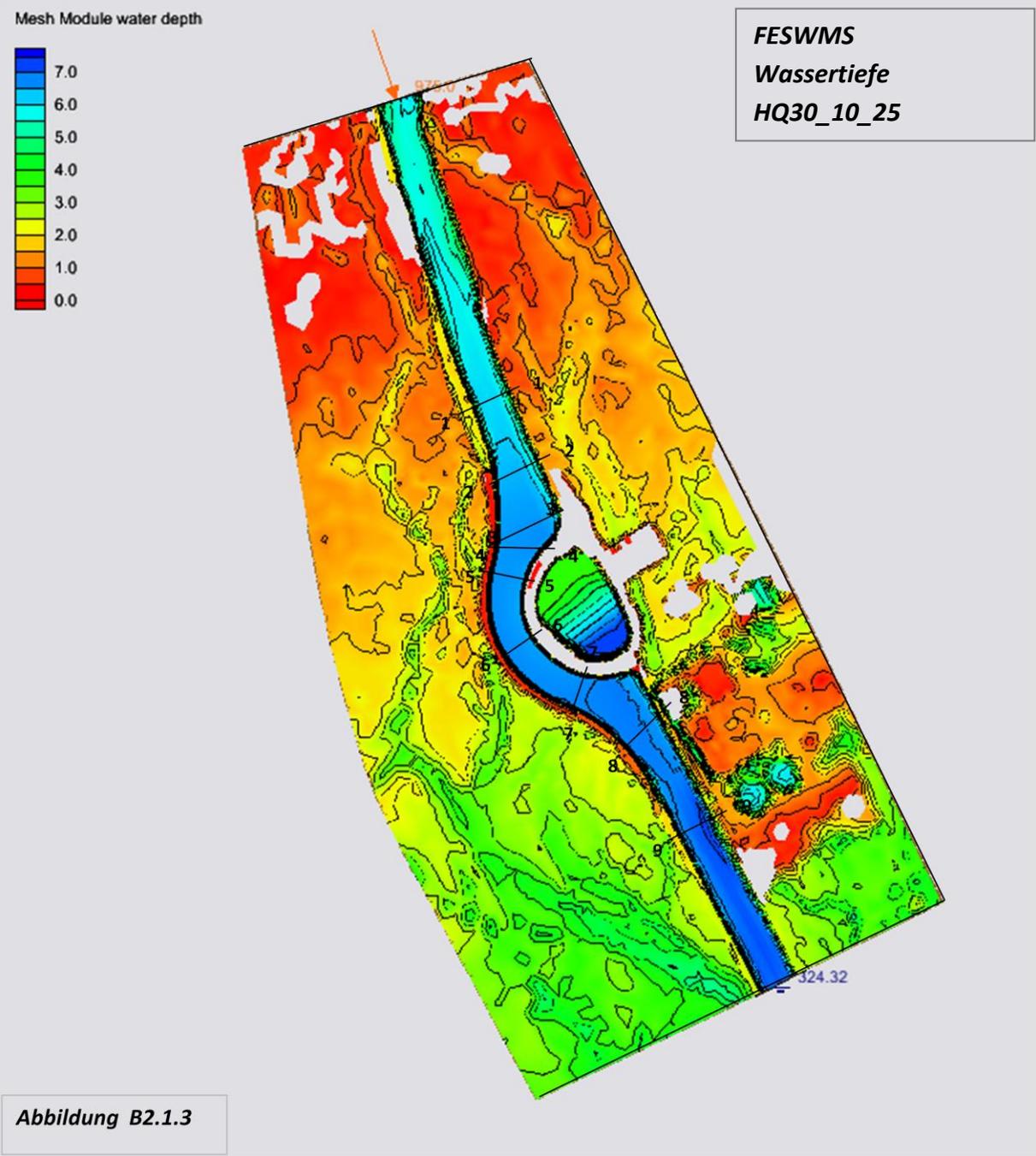


Abbildung B2.1.3

Anhang B

Mesh Module DEPTH 0 05:33:20



Hydro_As-2D
Wassertiefe
HQ30_10_25

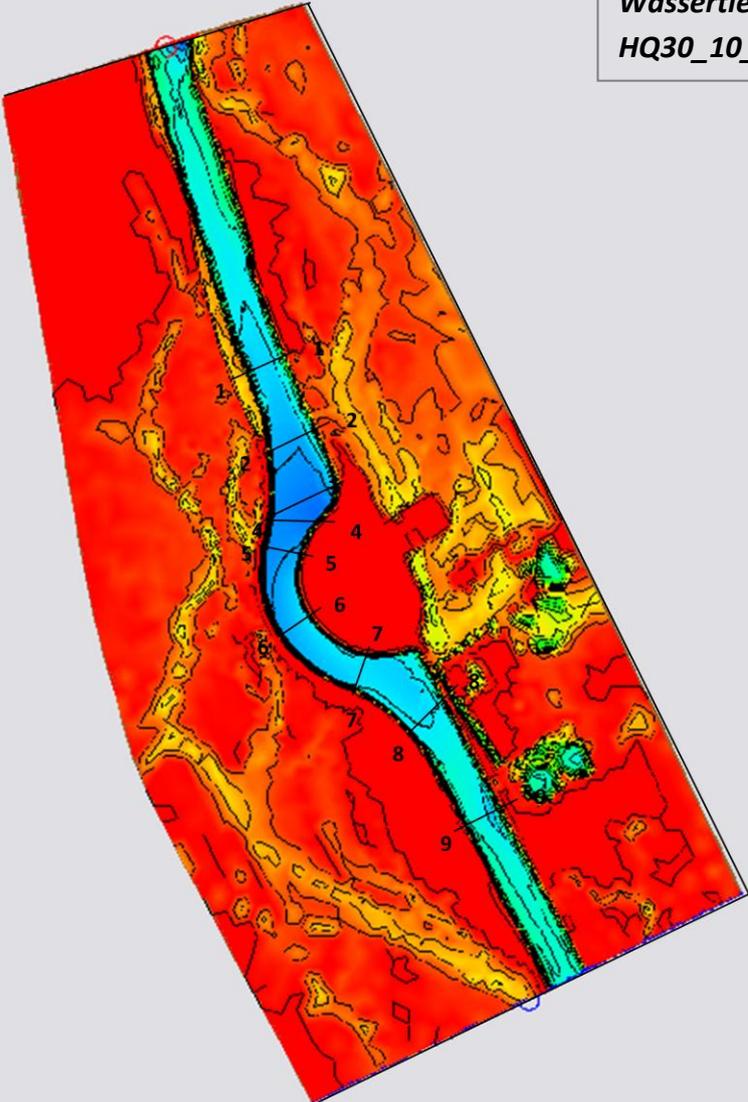
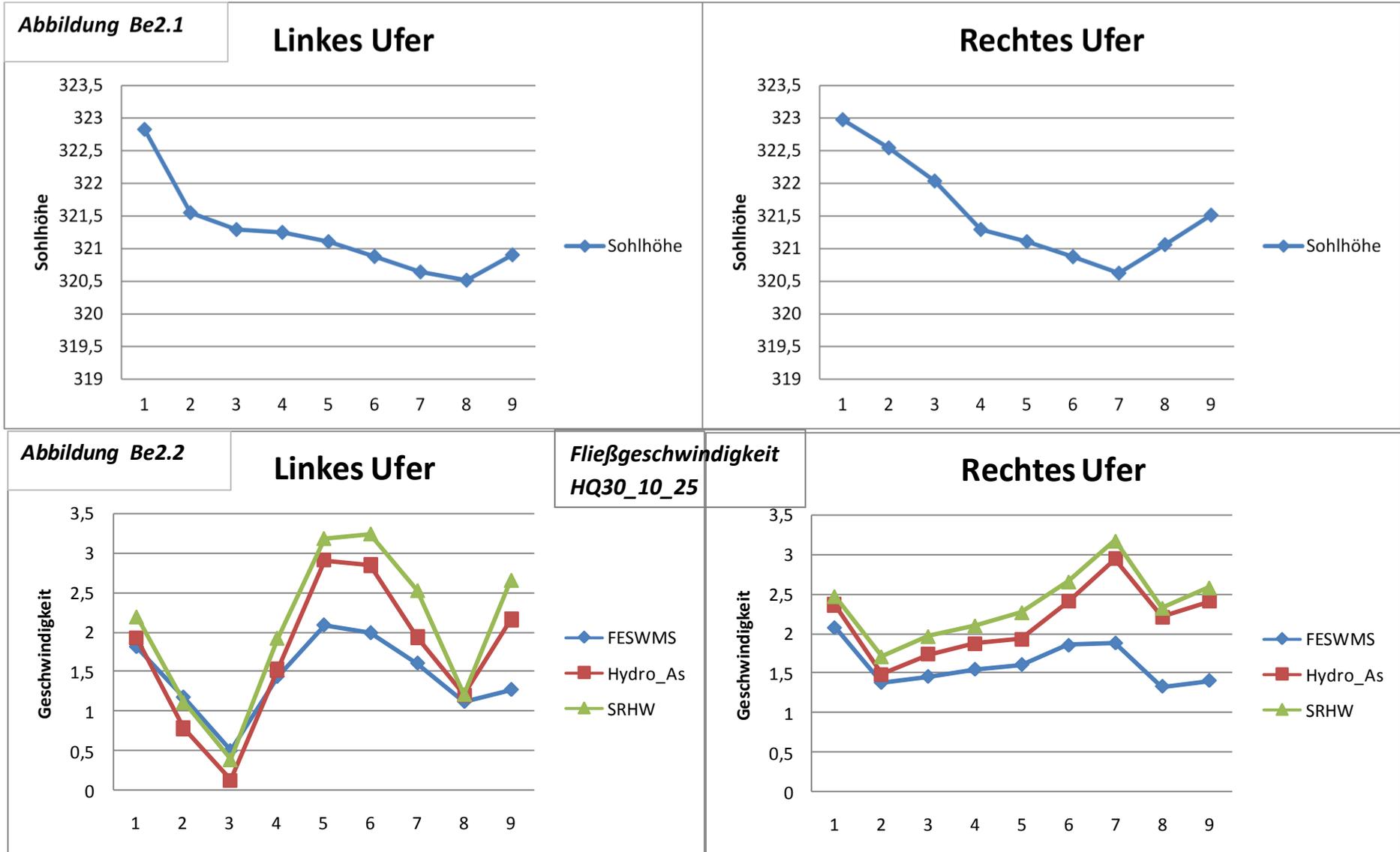
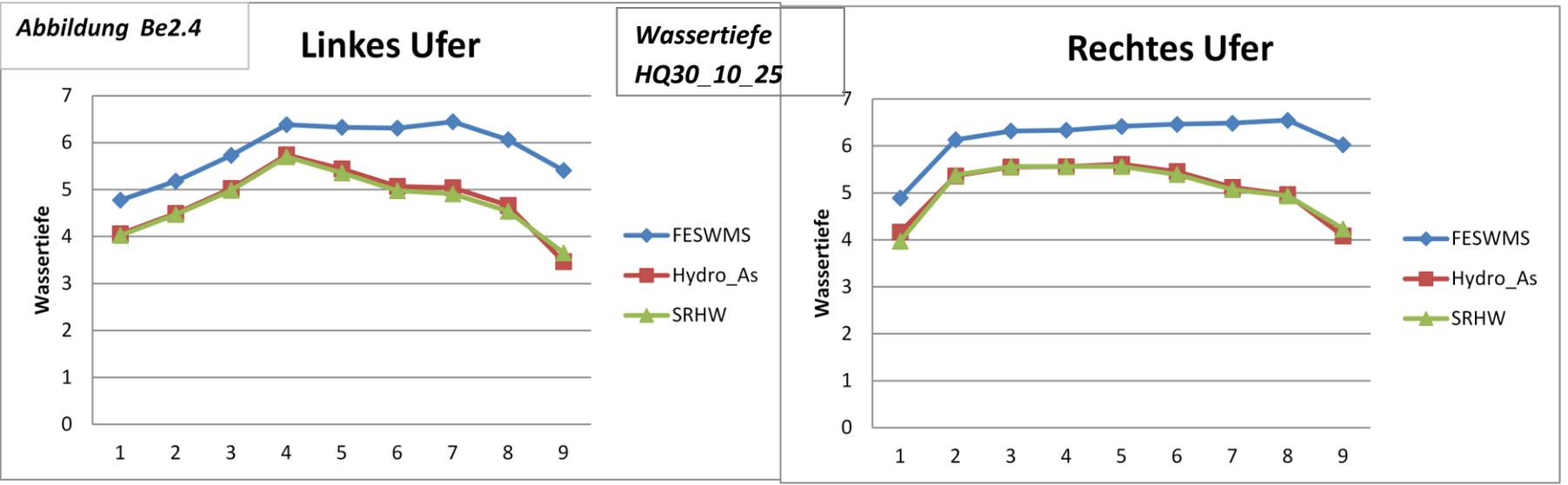
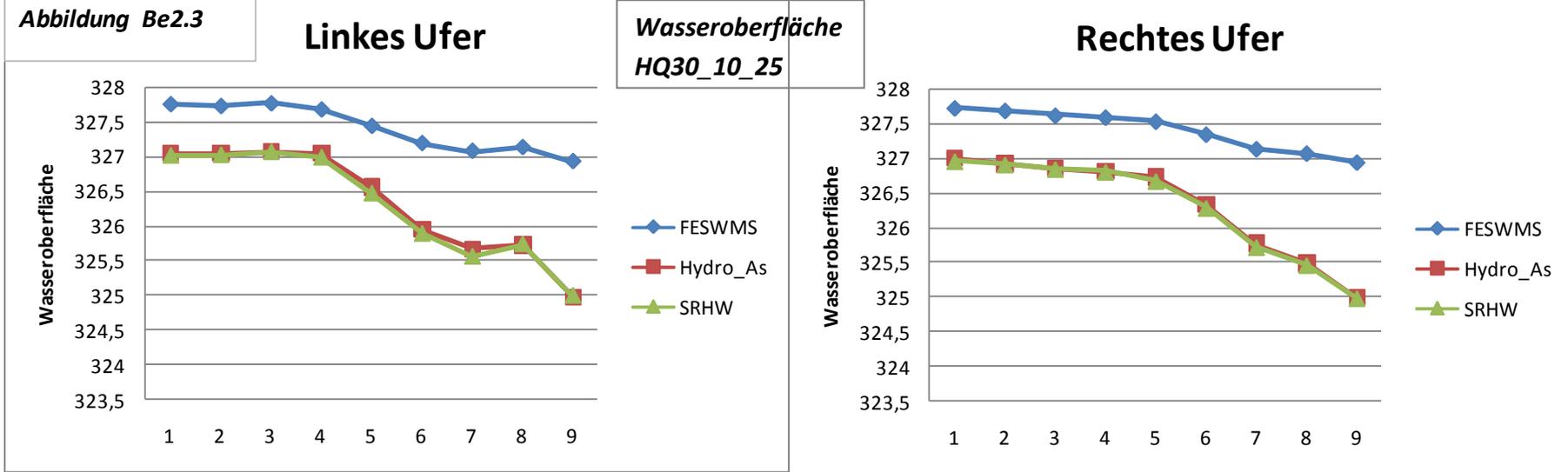


Abbildung B2.2.3

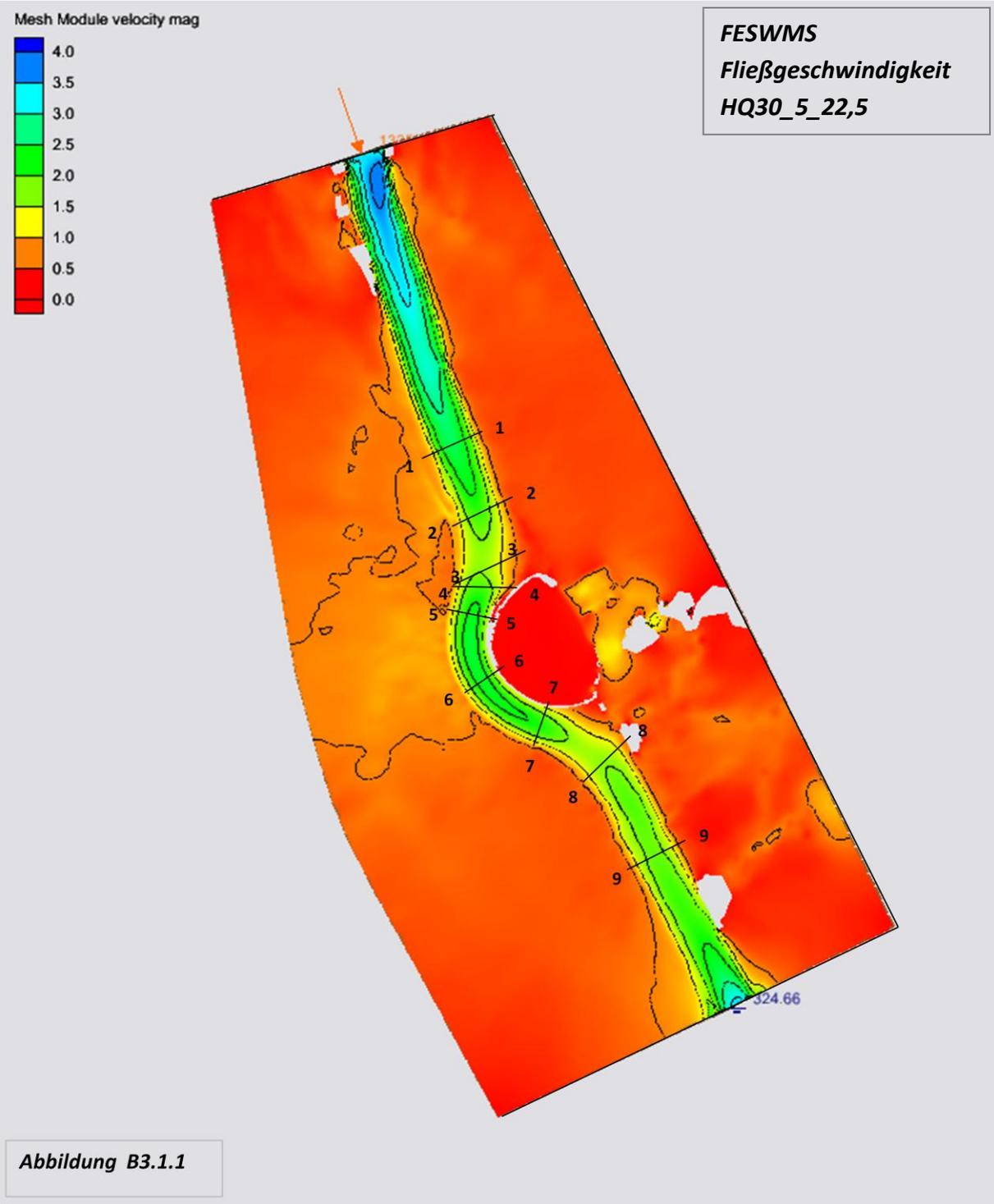
Anhang B



Anhang B

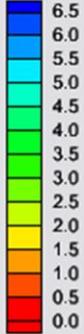


Anhang B



Anhang B

Mesh Module VELOC_mag 0 05:33:20



Hydro_As-2D
Fließgeschwindigkeit
HQ30_5_22,5

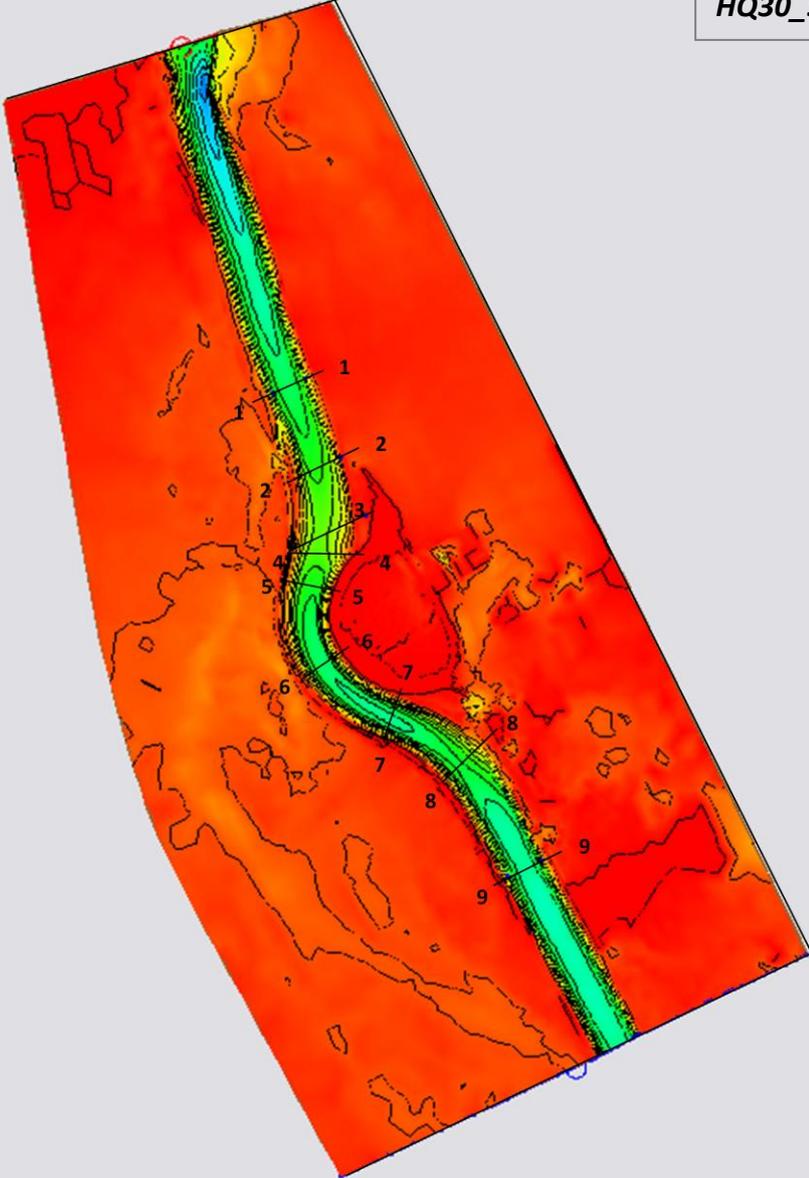
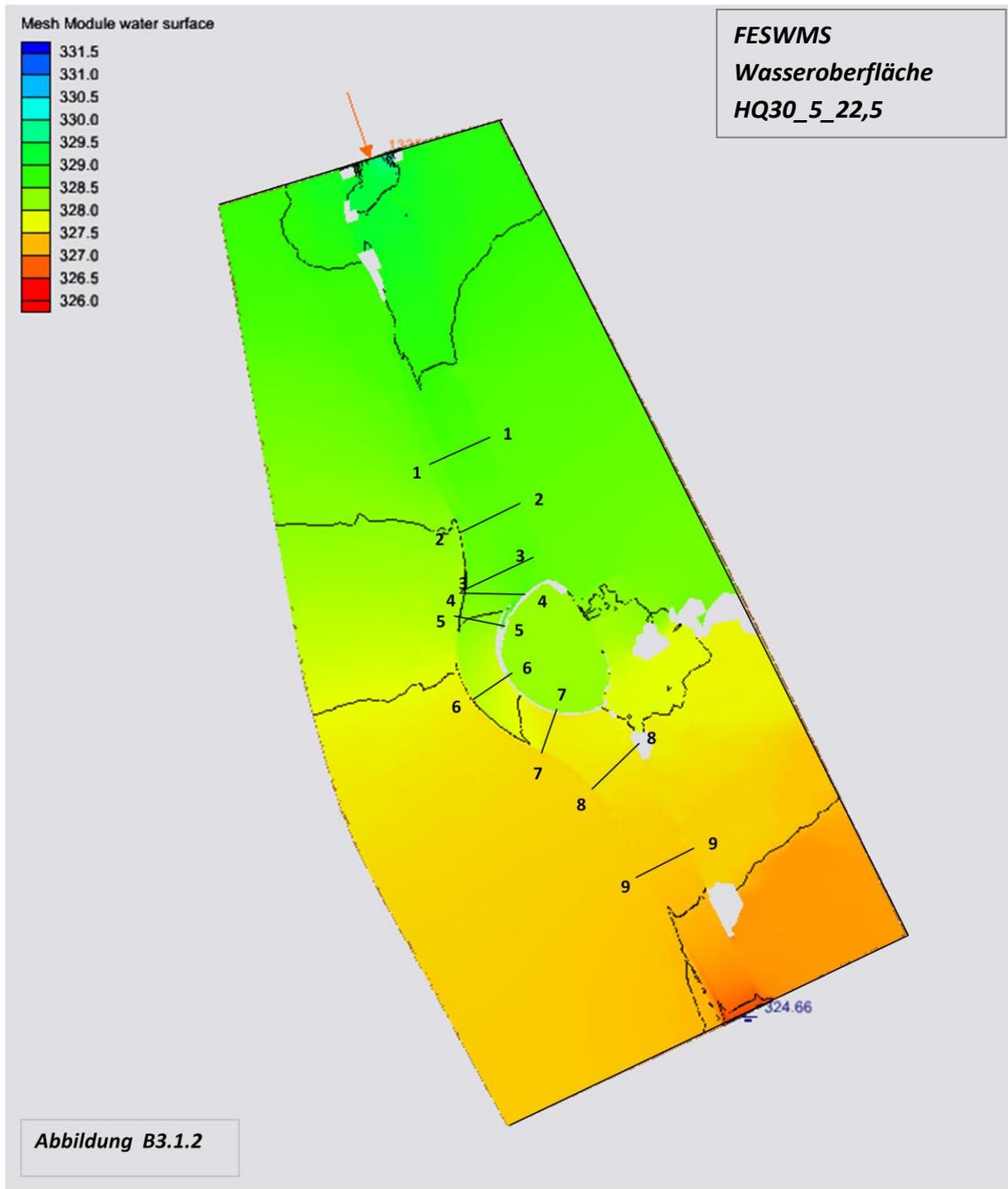


Abbildung B3.2.1

Anhang B



Anhang B

Mesh Module WSPL 0 05:33:20



Hydro_As-2D
Wasseroberfläche
HQ30_5_22,5

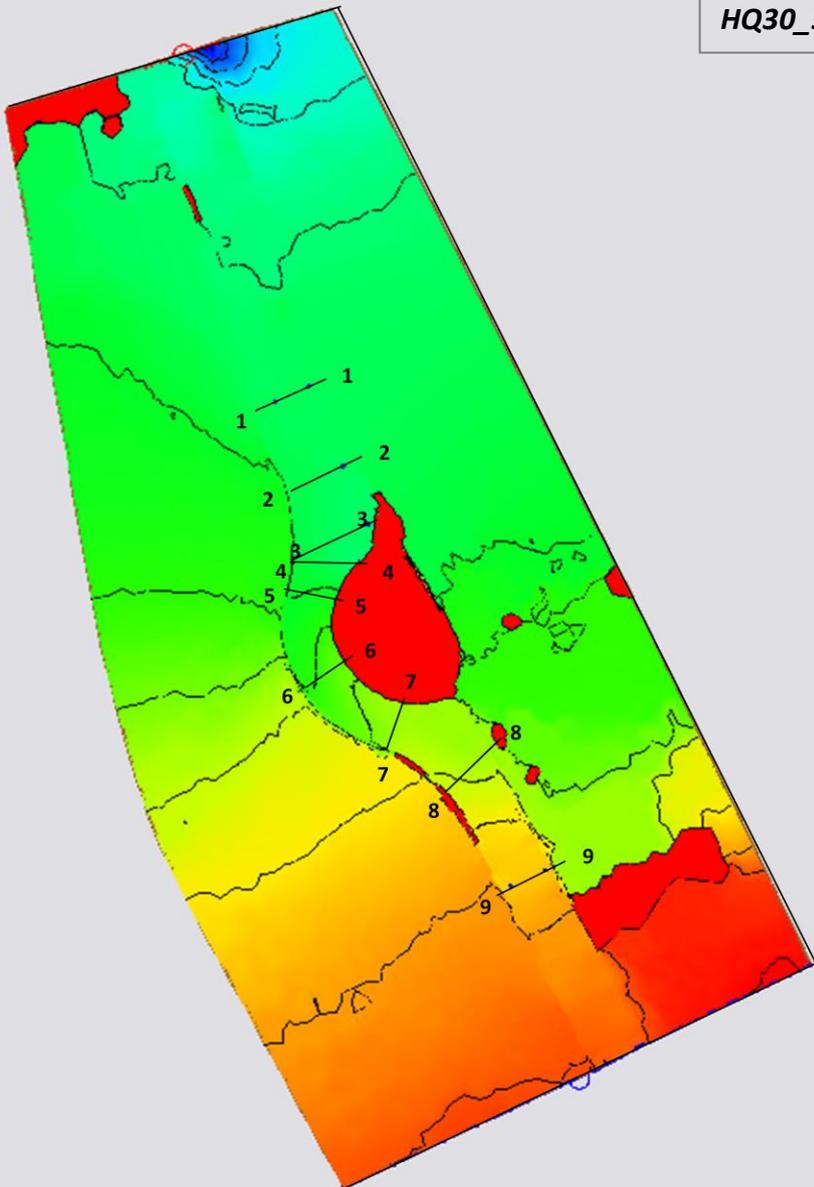
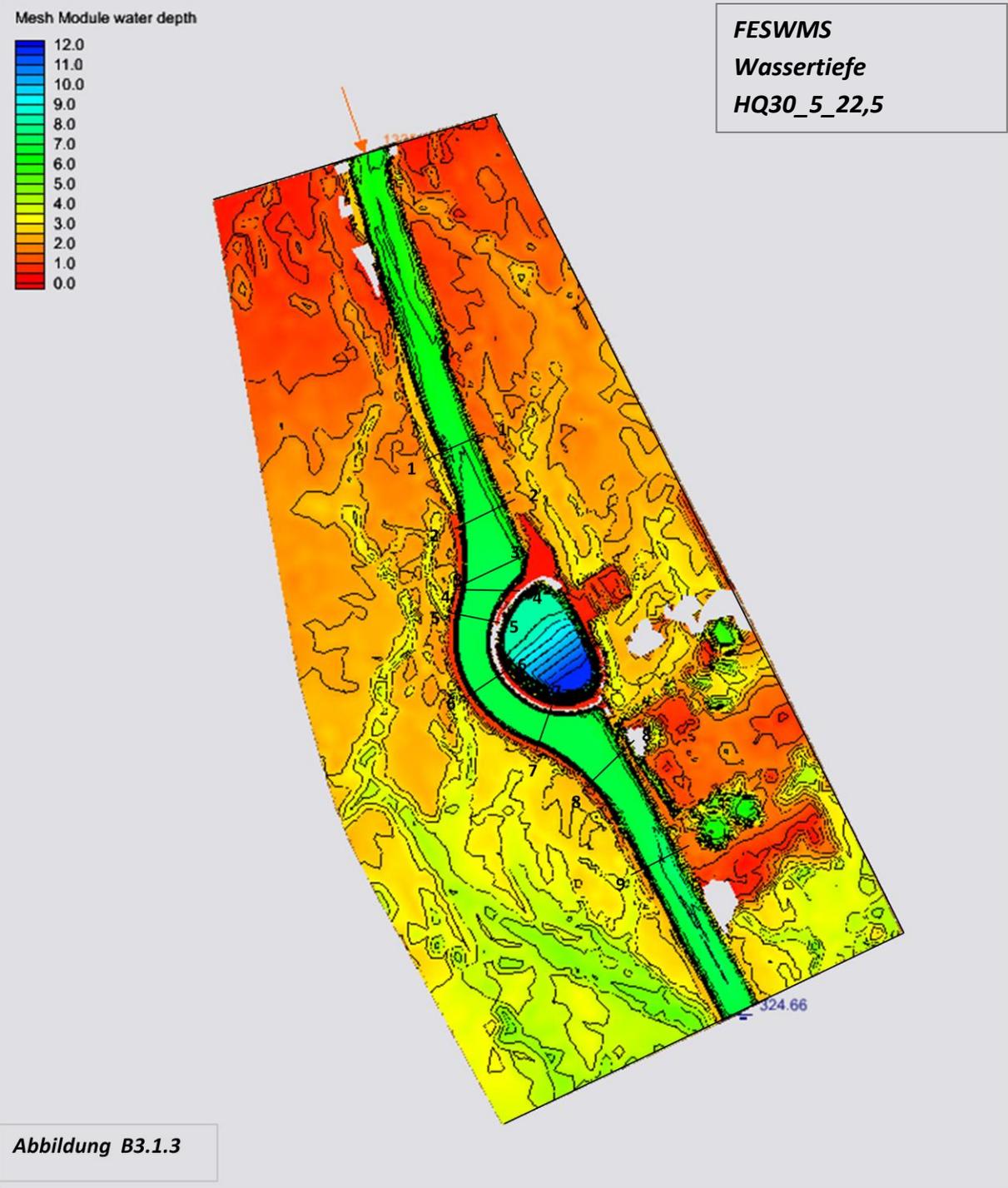


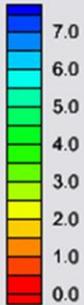
Abbildung B3.2.2

Anhang B



Anhang B

Mesh Module DEPTH 0 05:33:20



Hydro_As-2D
Wassertiefe
HQ30_5_22,5

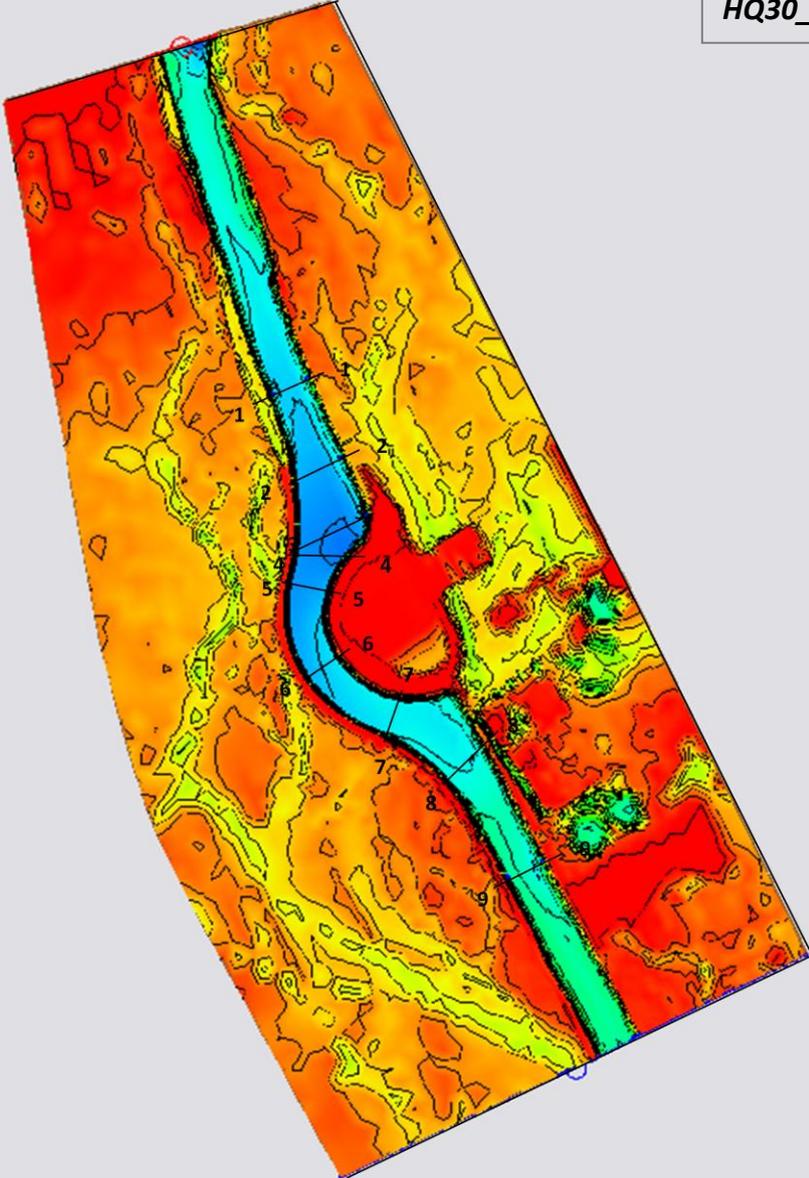
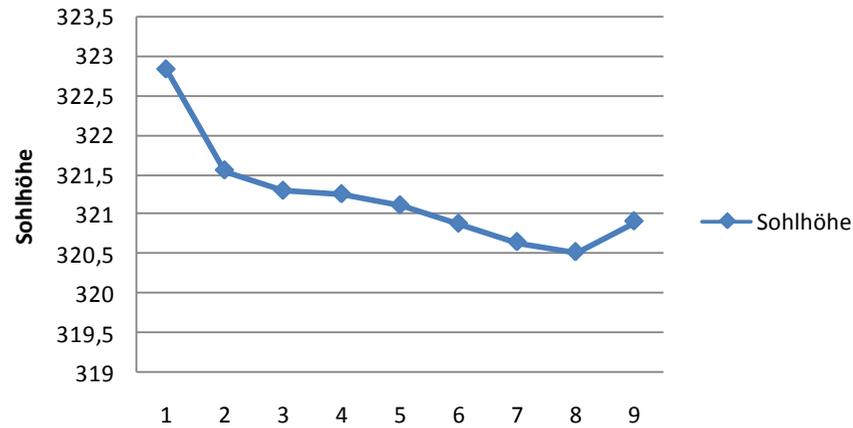


Abbildung B3.2.3

Anhang B

Abbildung Be3.1

Linkes Ufer



Rechtes Ufer

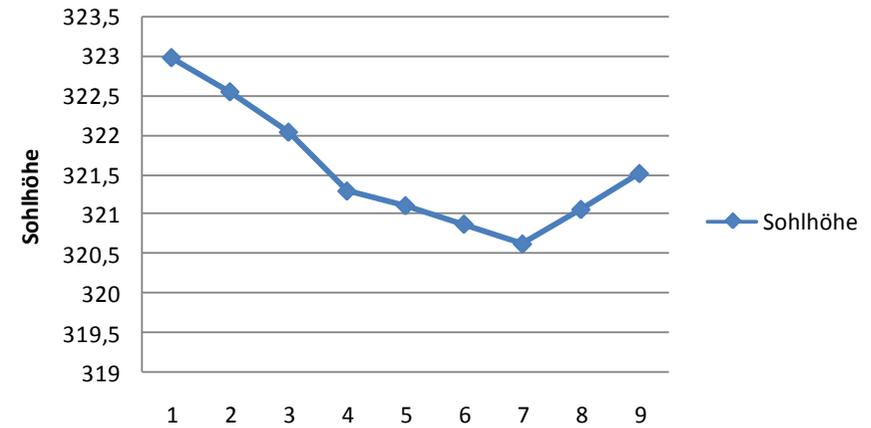
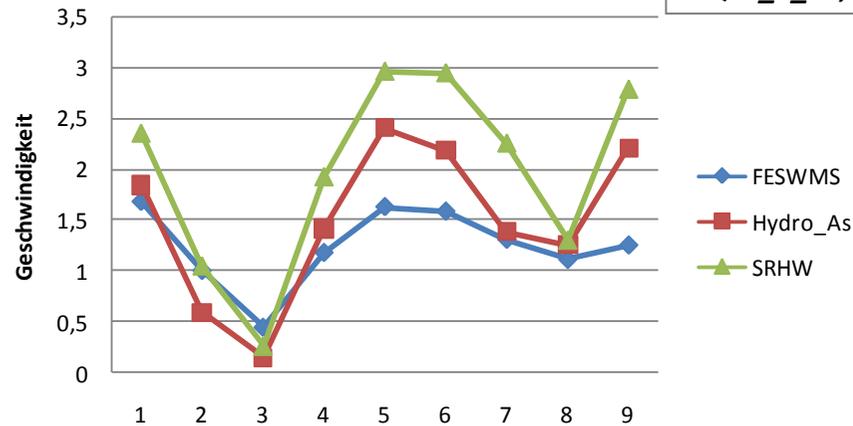


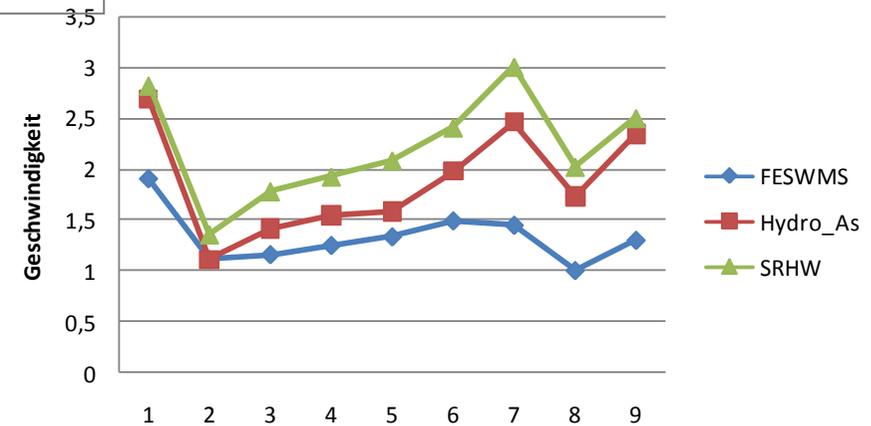
Abbildung Be3.2

Linkes Ufer

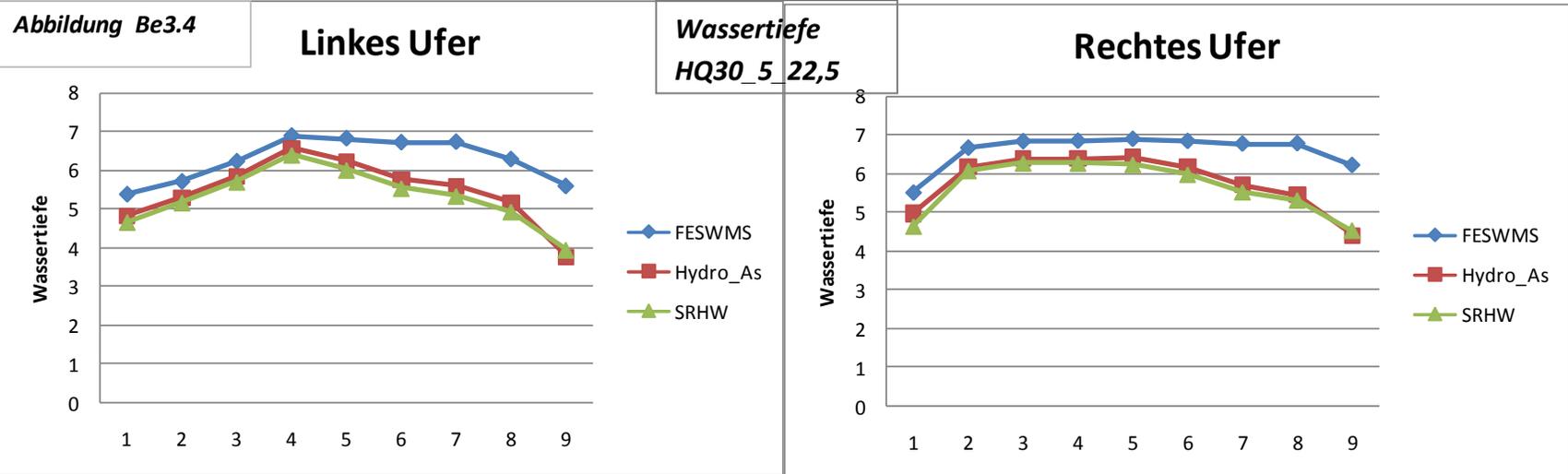
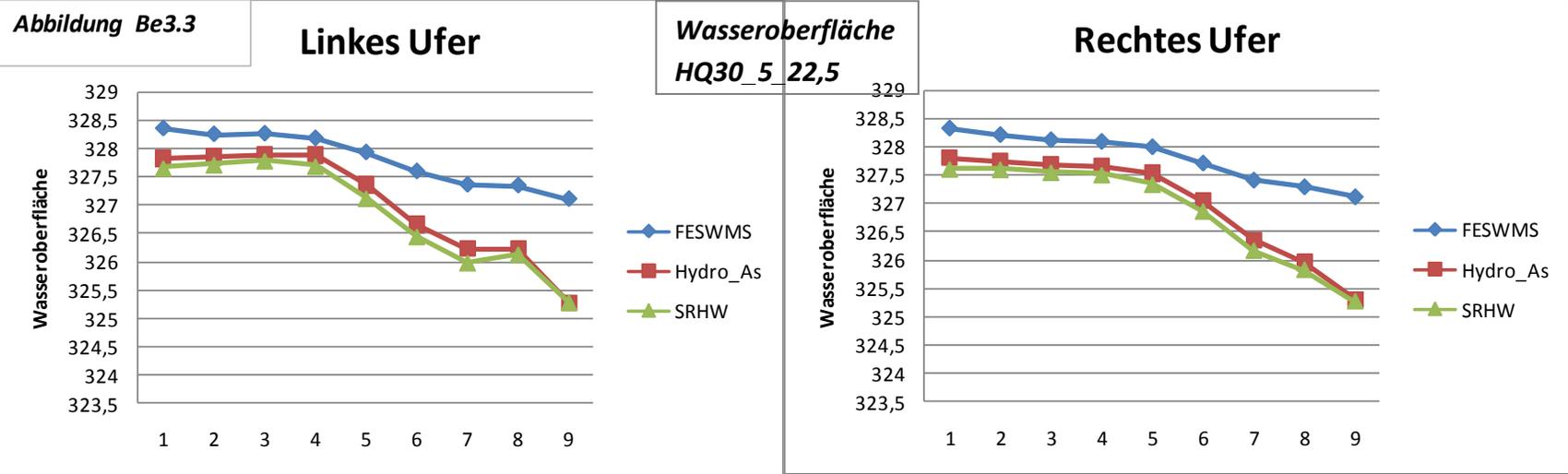
Fließgeschwindigkeit
HQ30_5_22,5



Rechtes Ufer

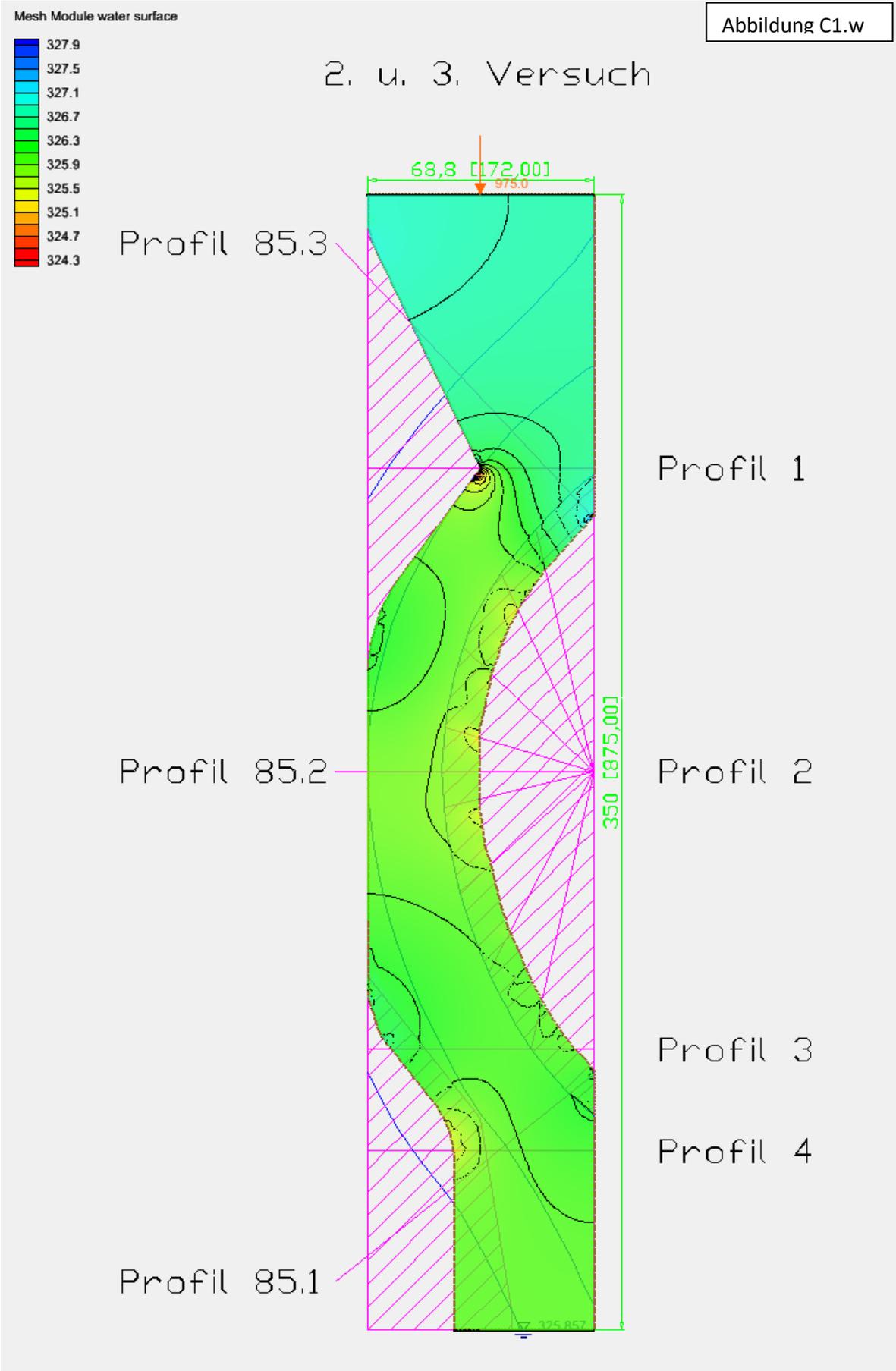


Anhang B

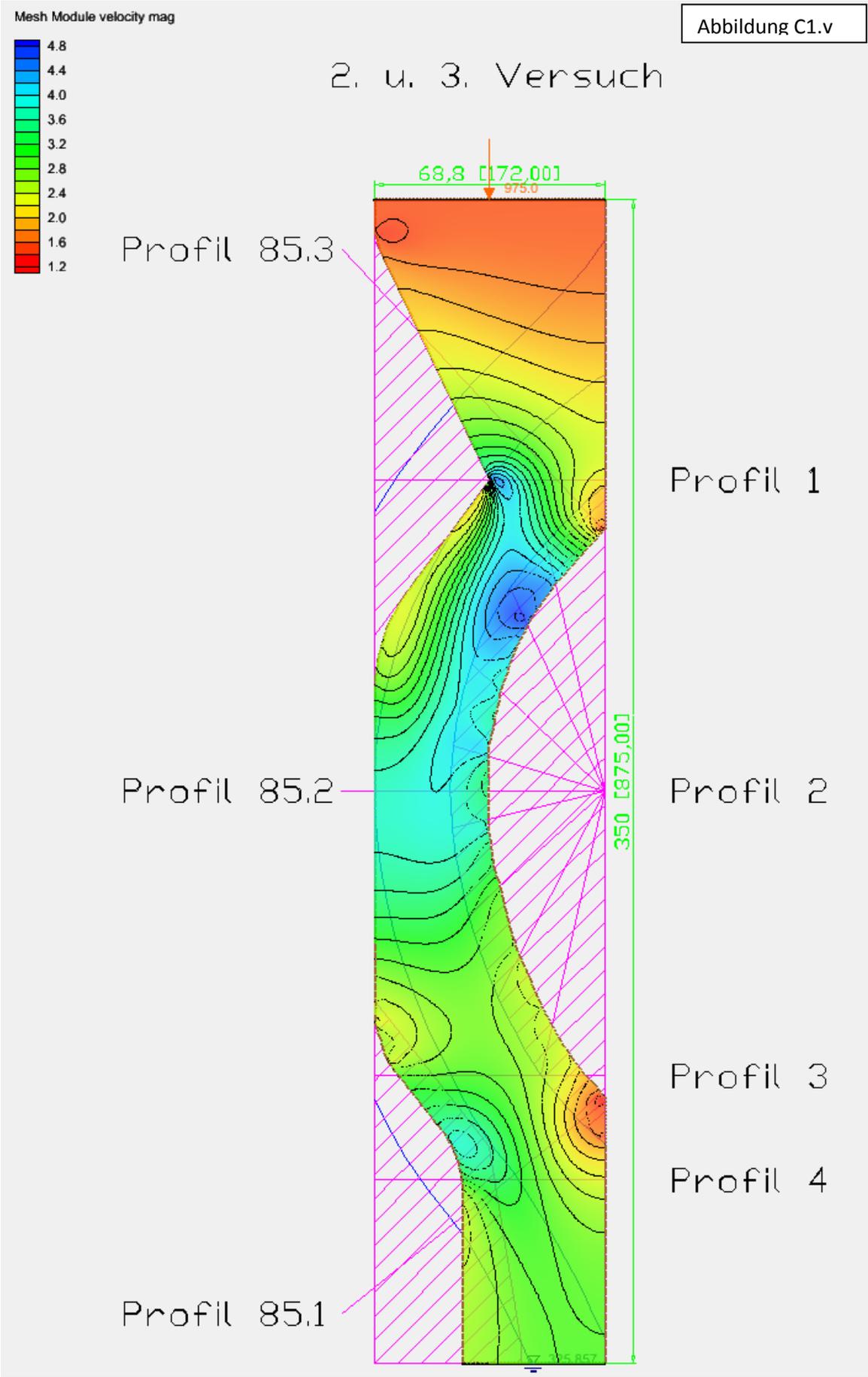


Anhang B

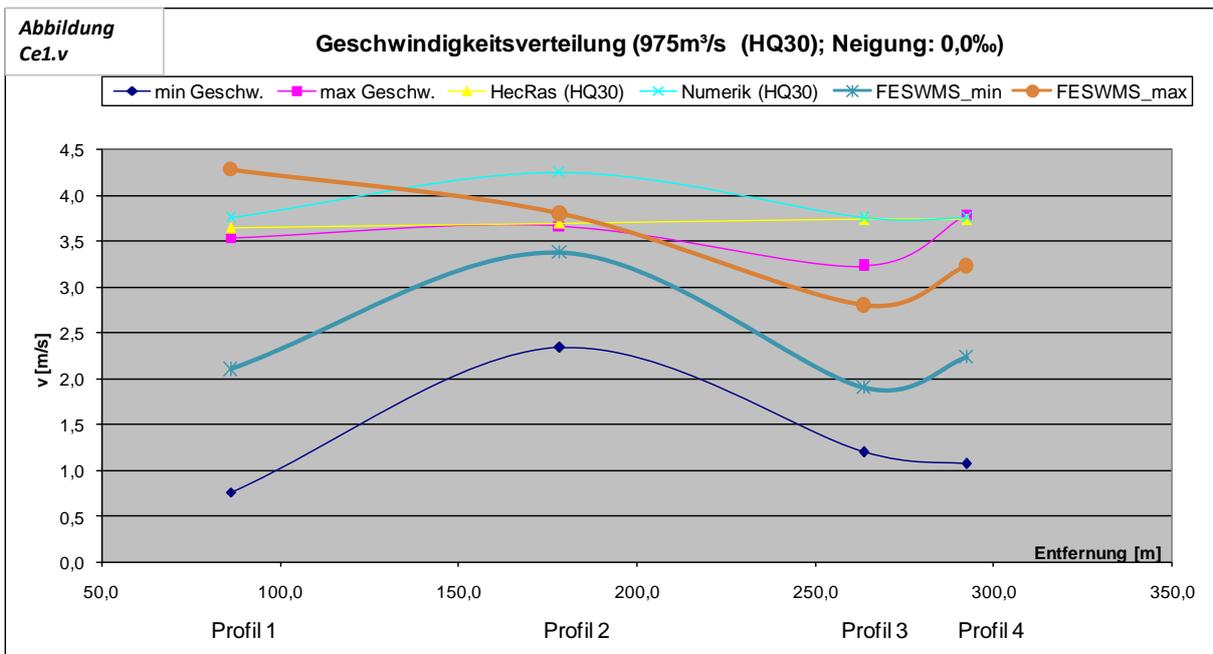
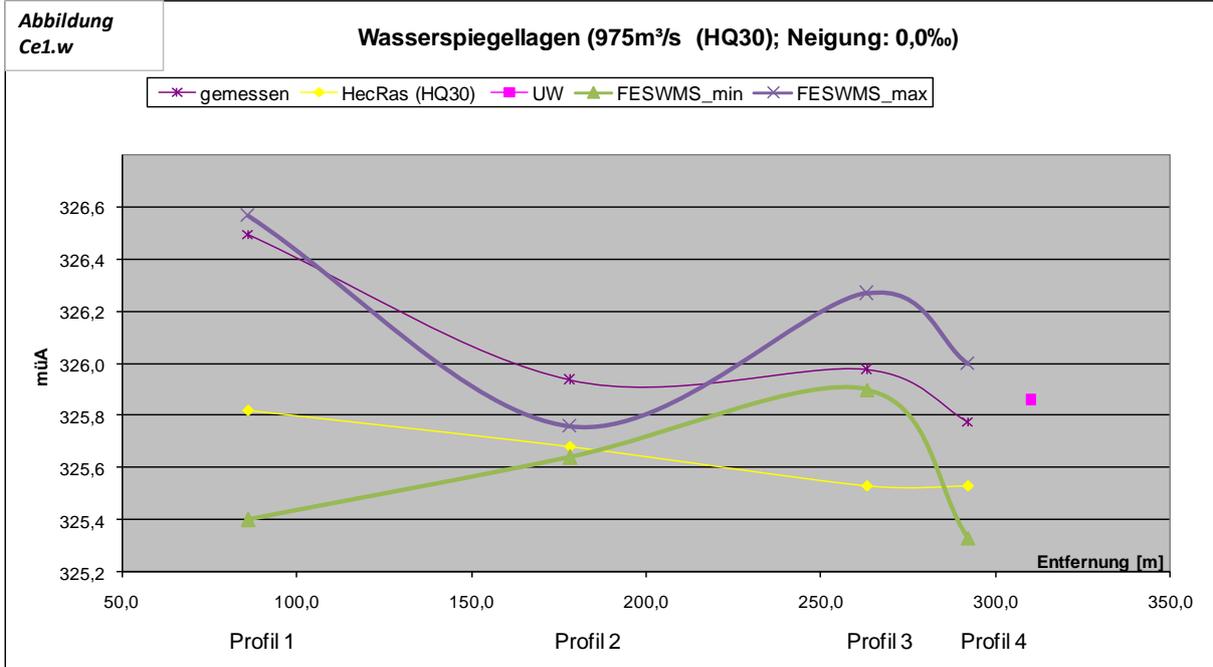
Abbildung C1.w



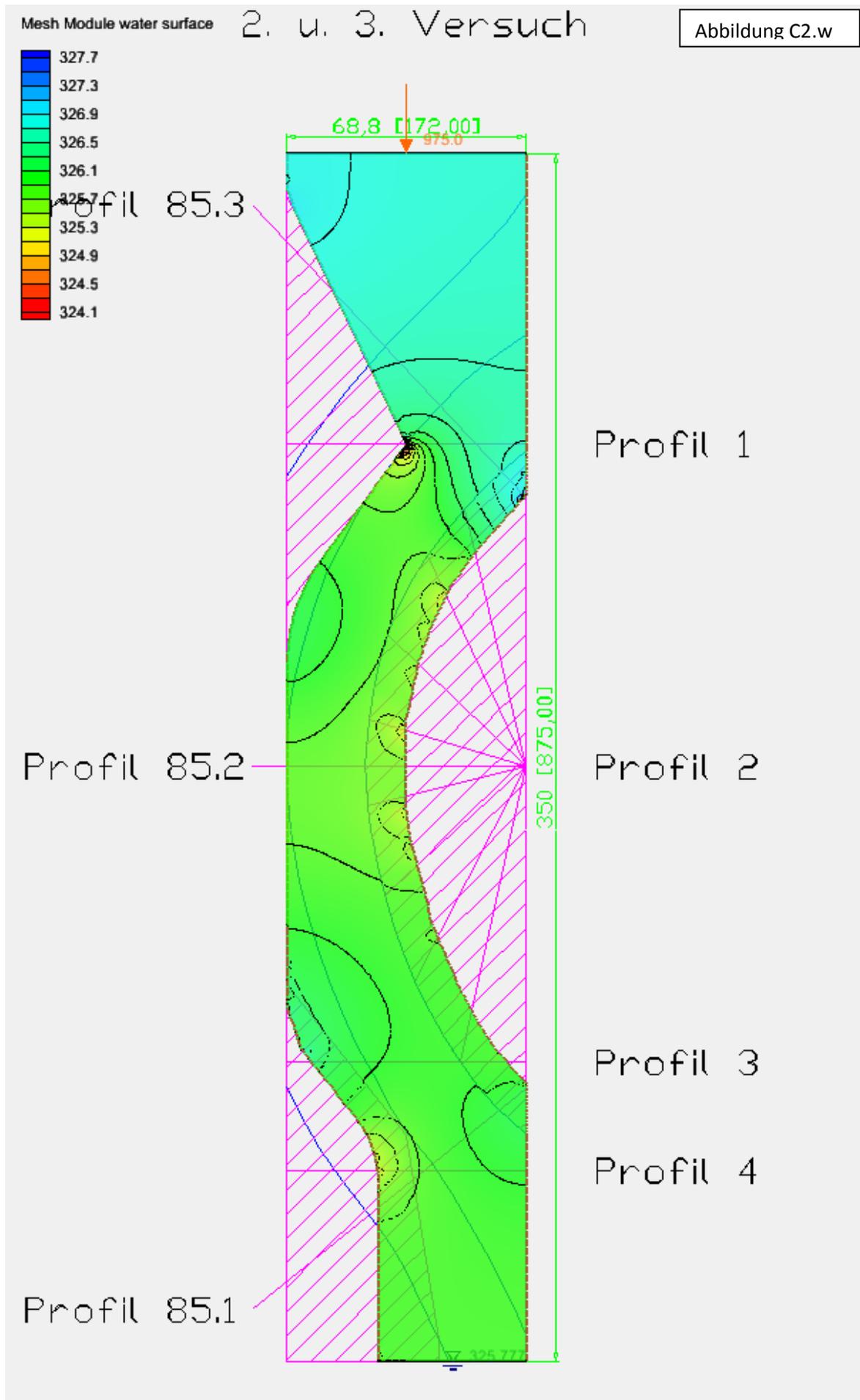
Anhang C



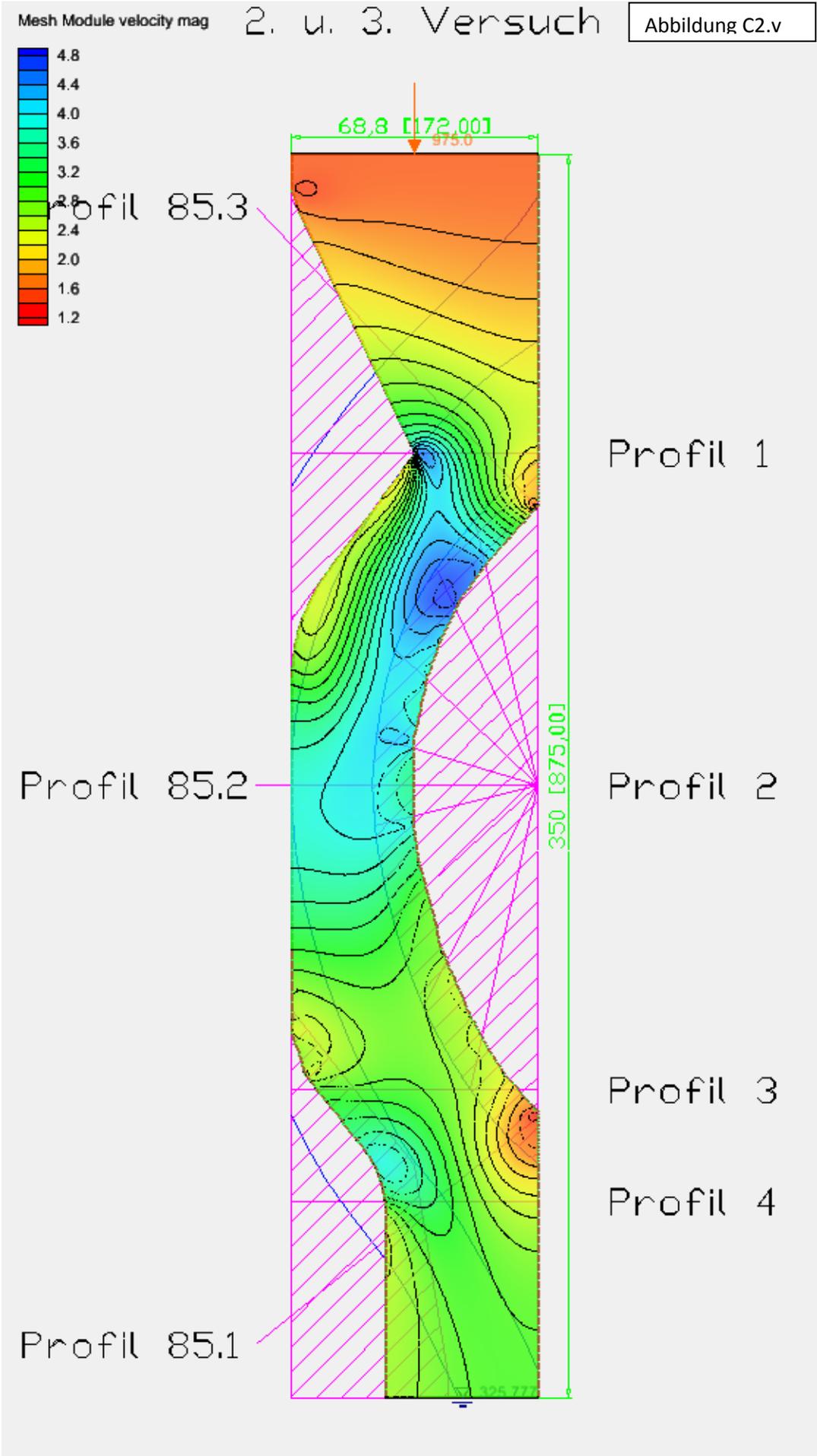
Anhang C



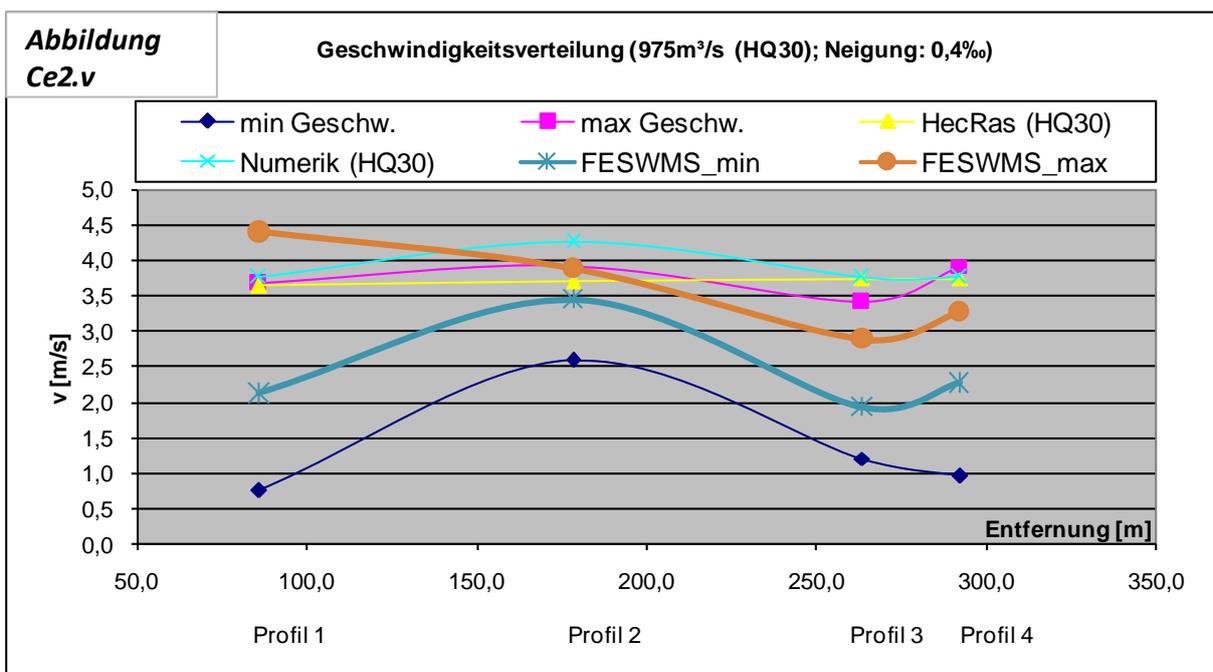
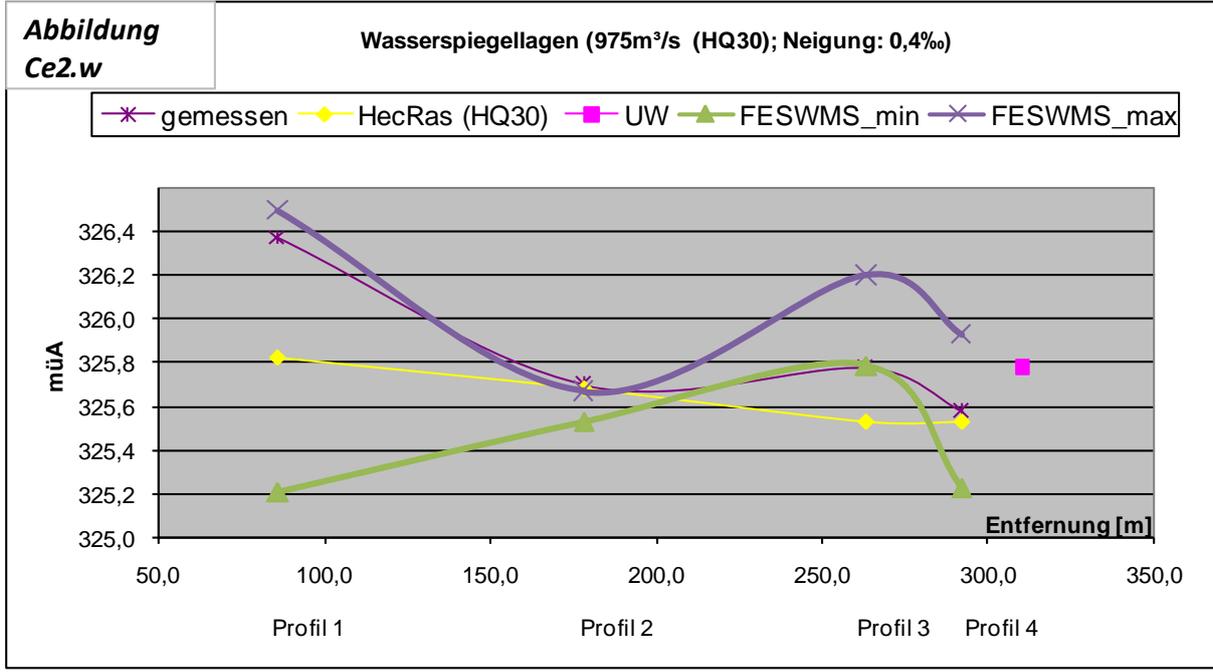
Anhang C



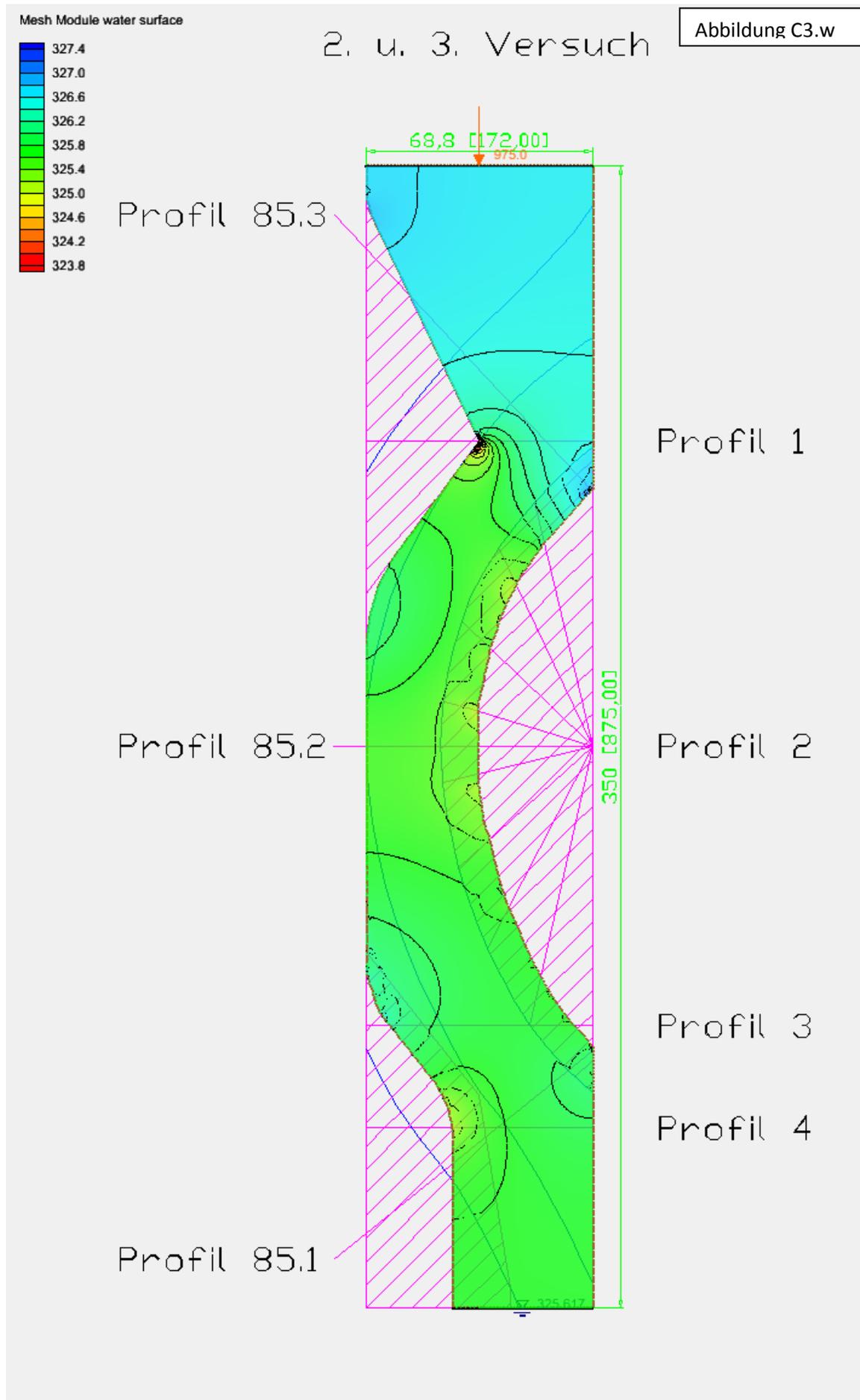
Anhang C



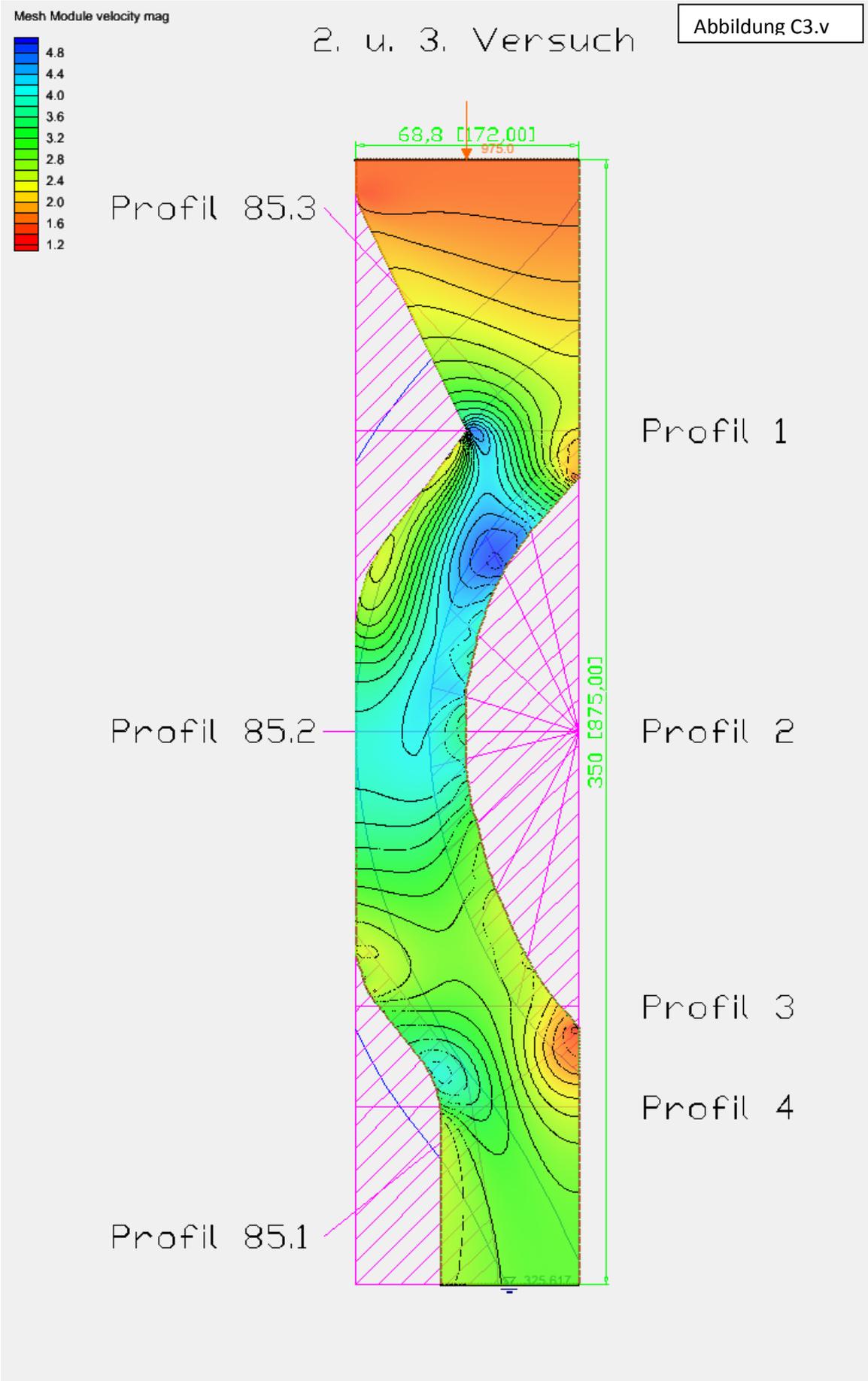
Anhang C



Anhang C



Anhang C



Anhang C

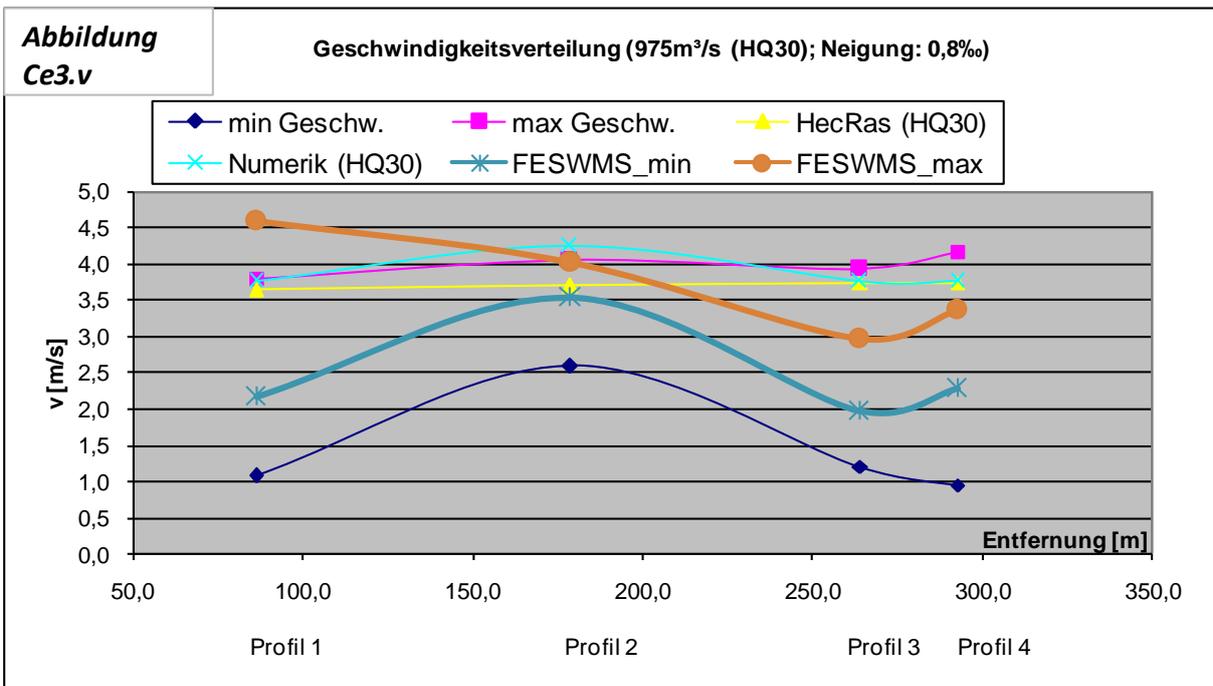
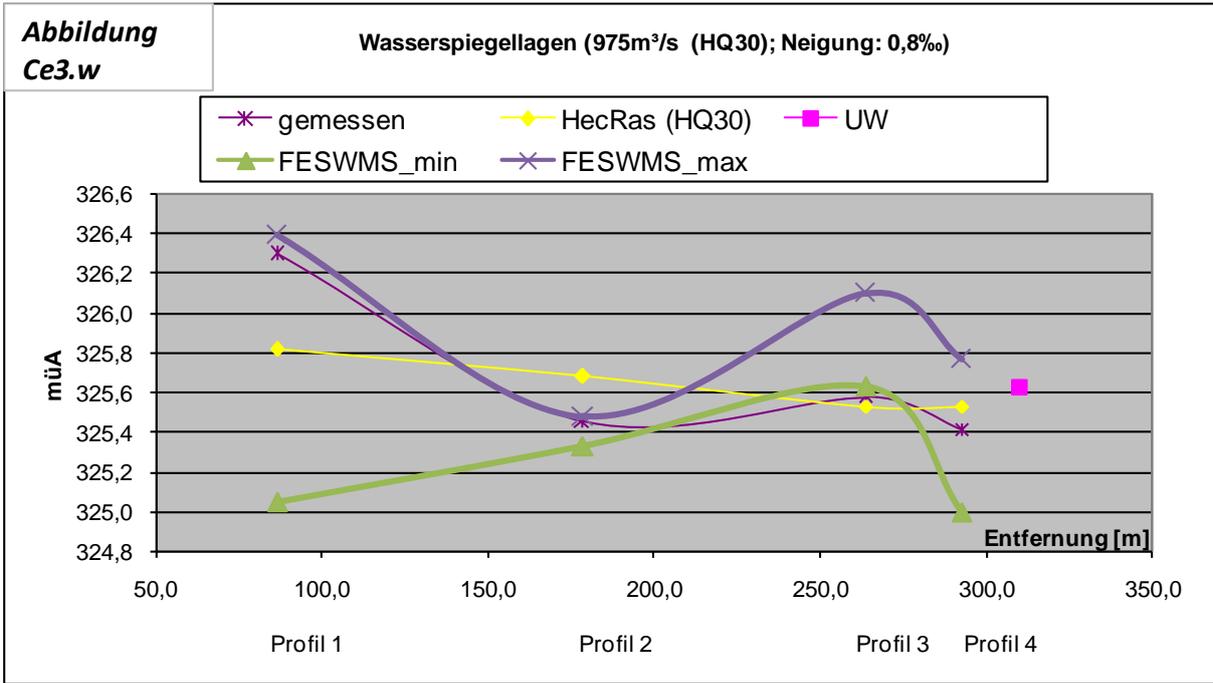


Abbildung C4.w

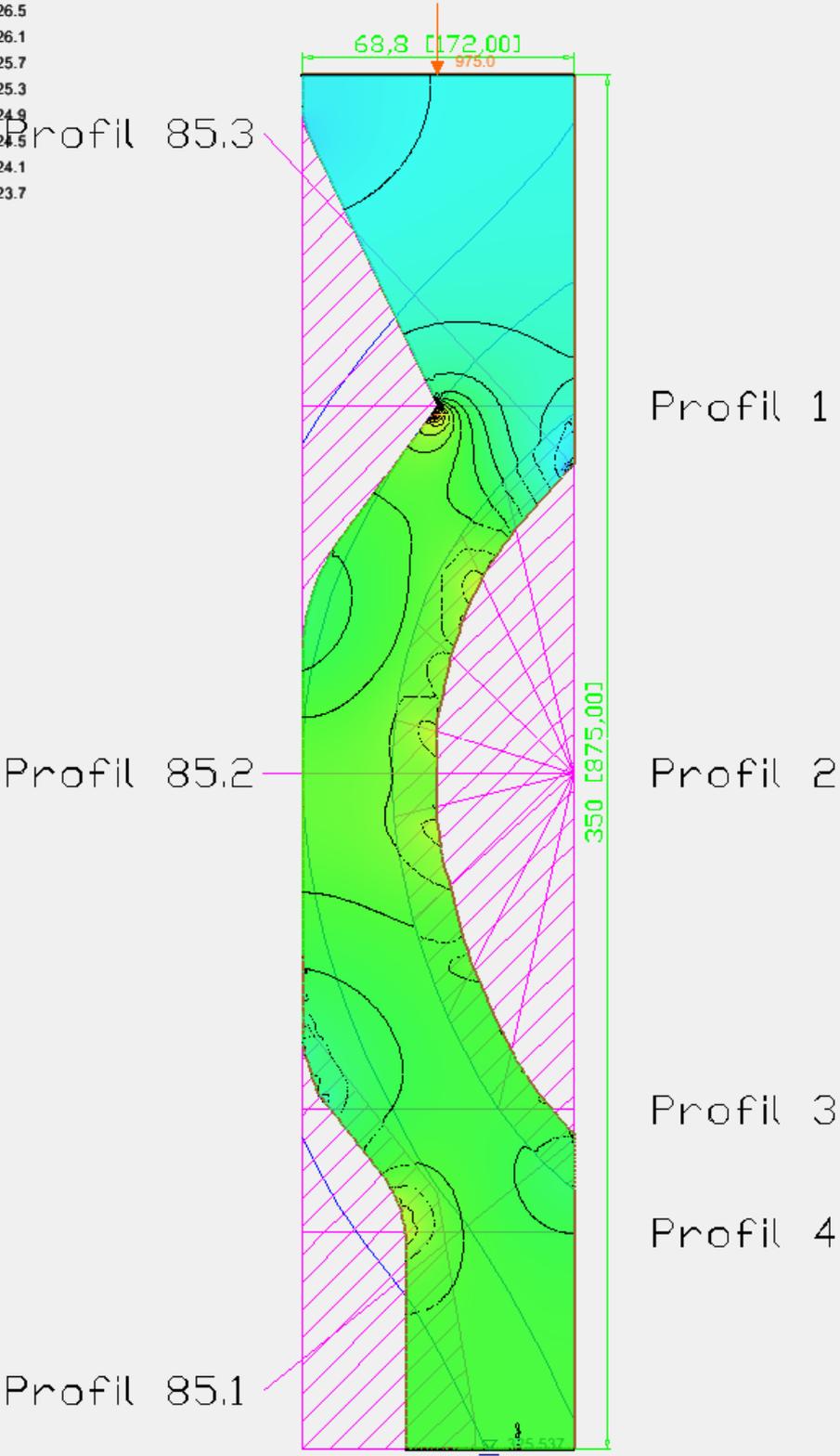
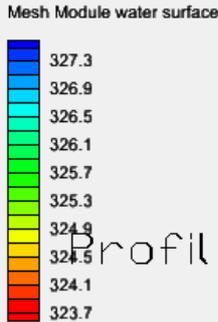


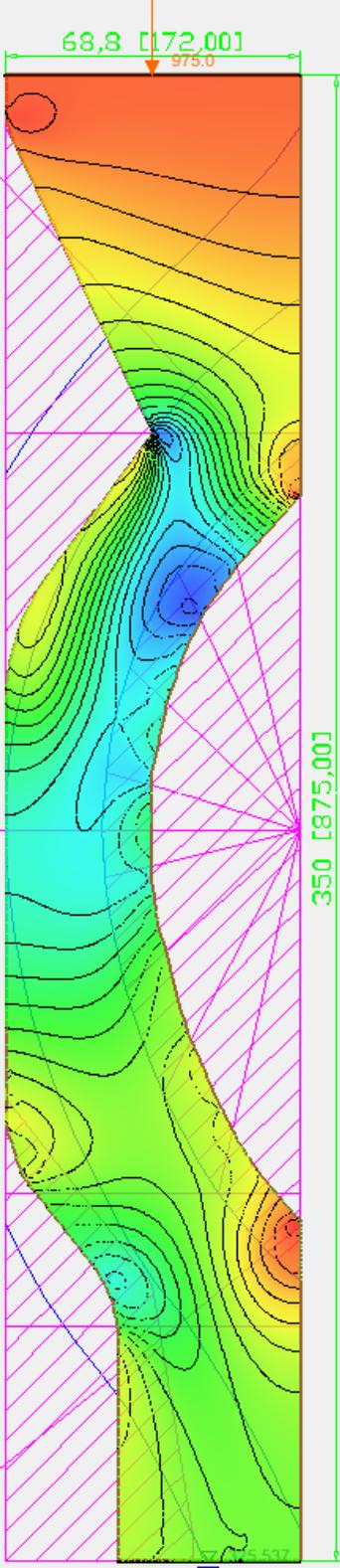
Abbildung C4.v



Profil 85.3

Profil 85.2

Profil 85.1



Profil 1

Profil 2

Profil 3

Profil 4

Anhang C

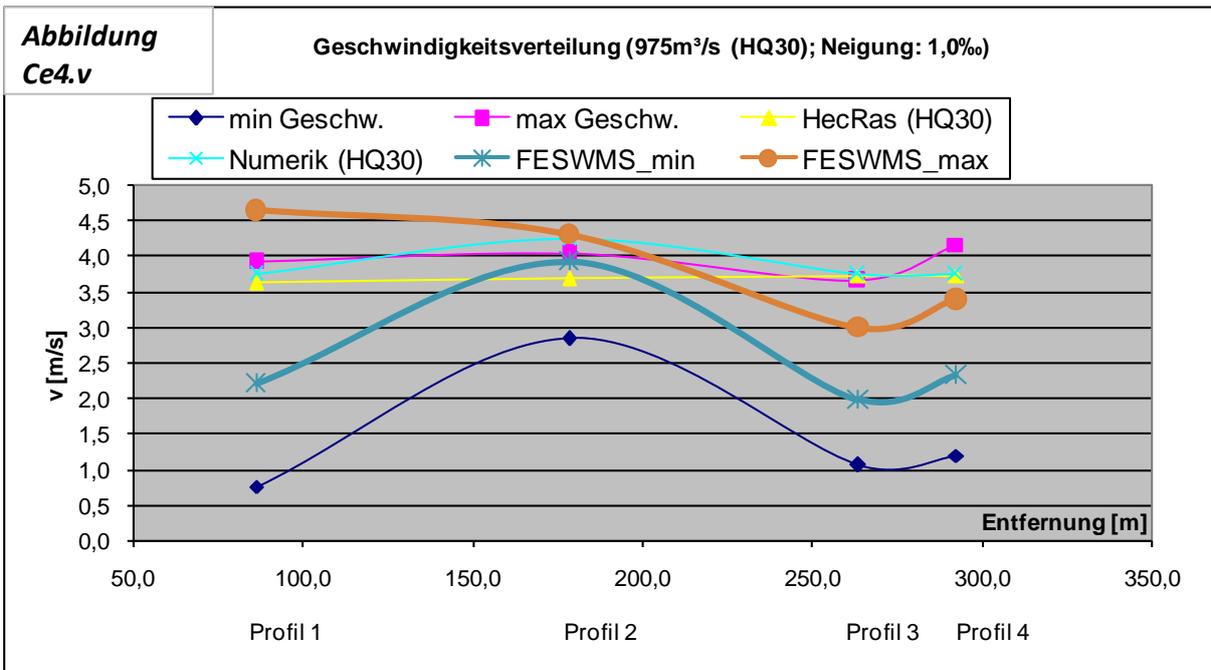
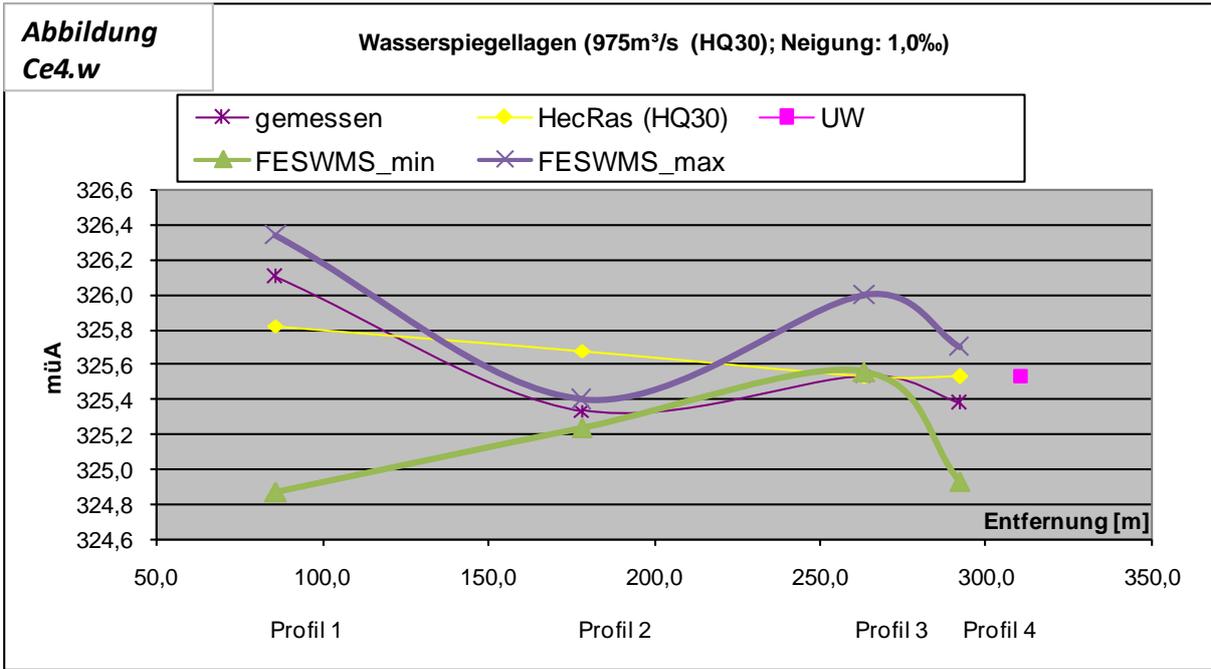
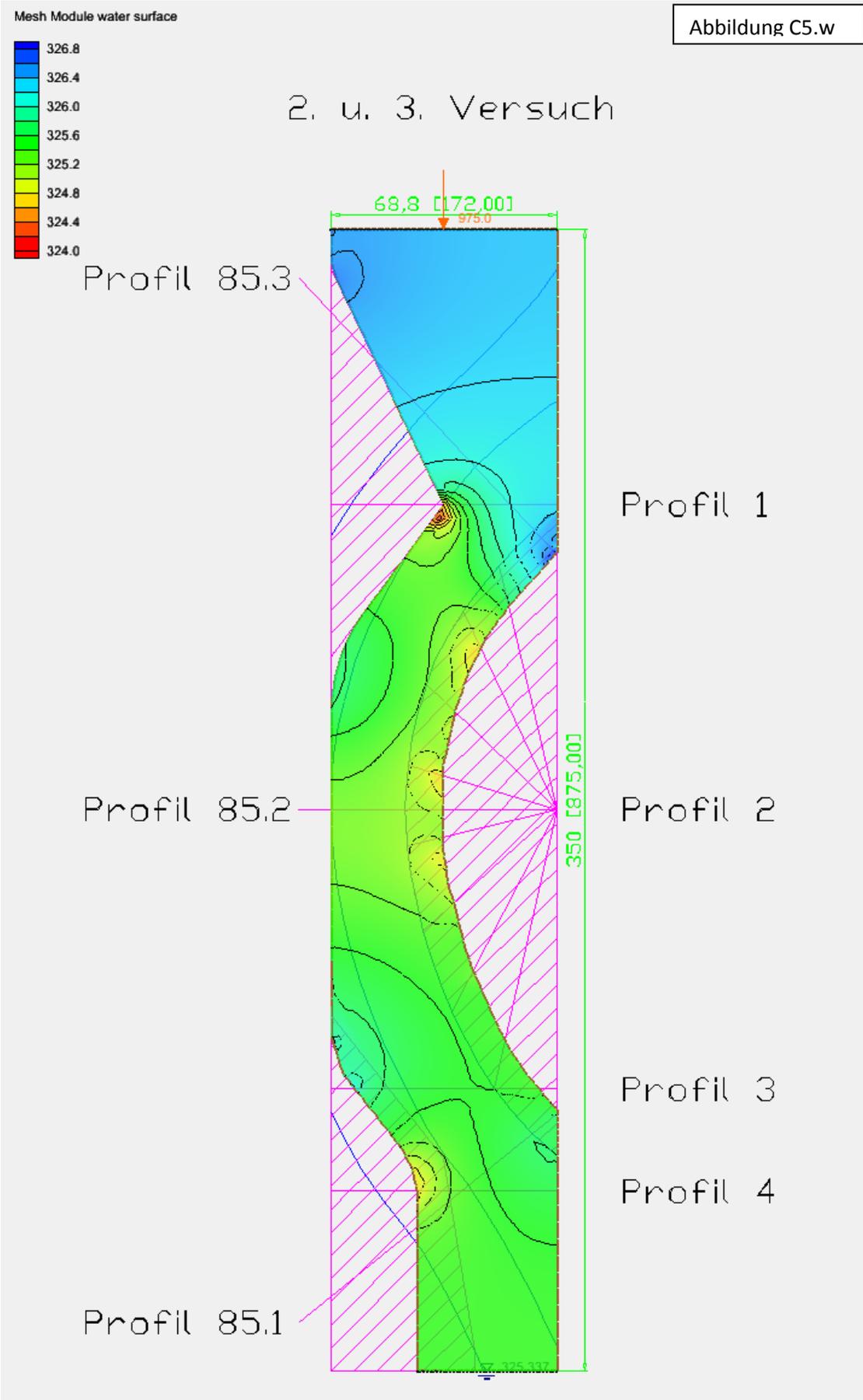
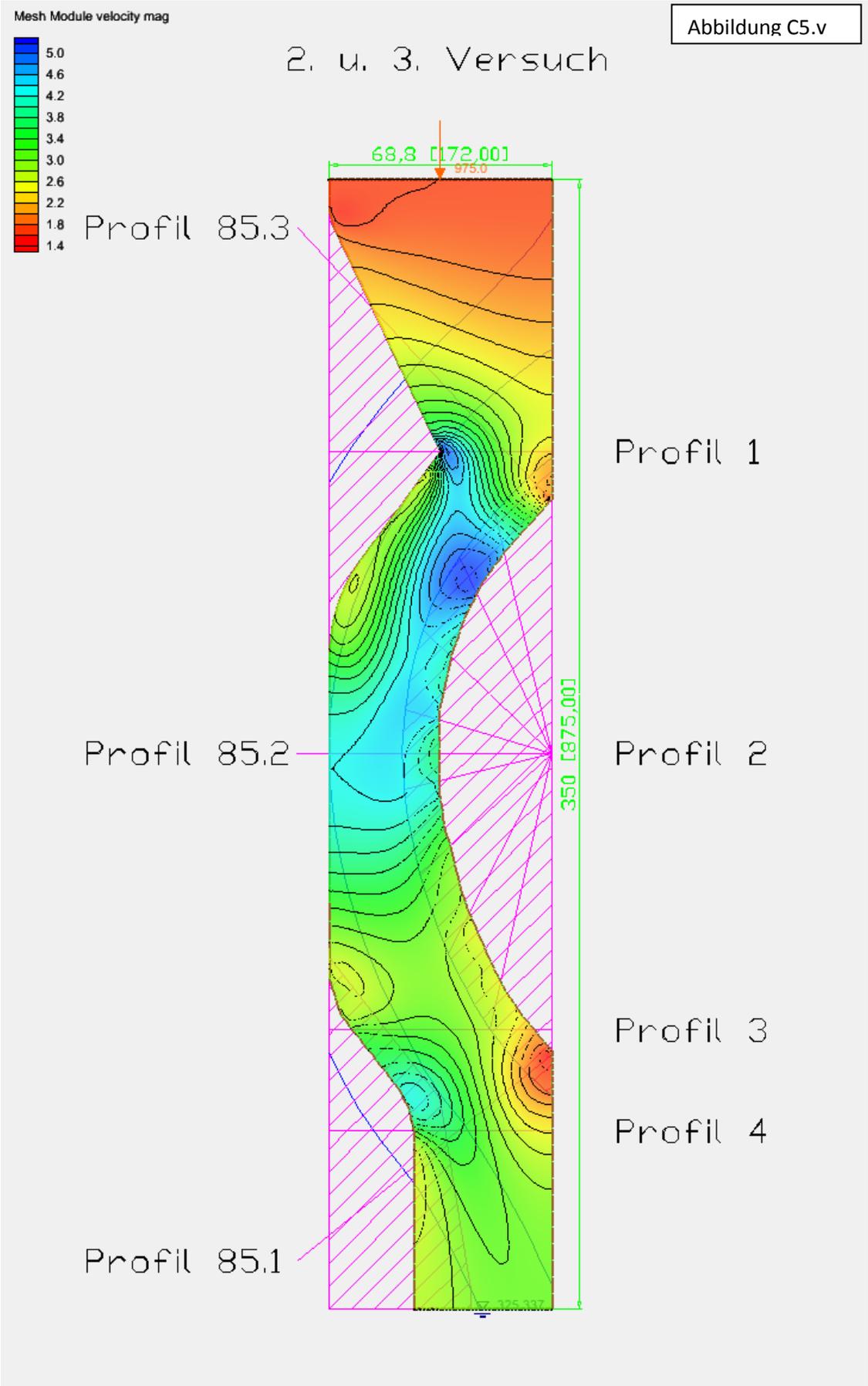


Abbildung C5.w





Anhang C

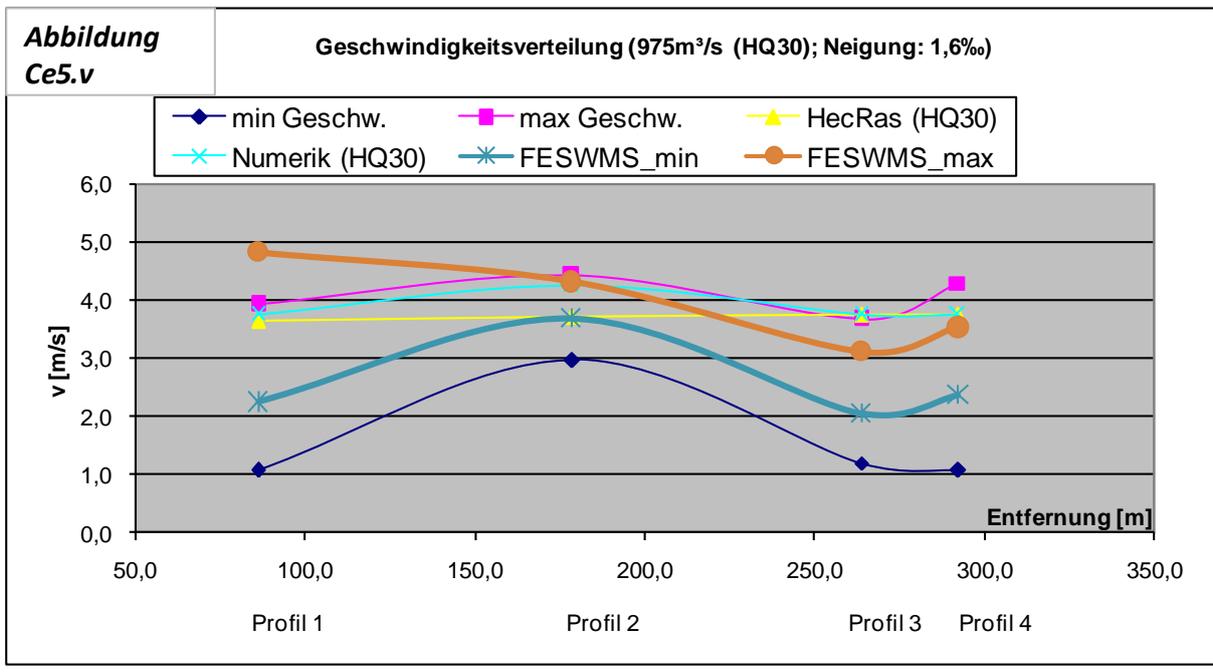
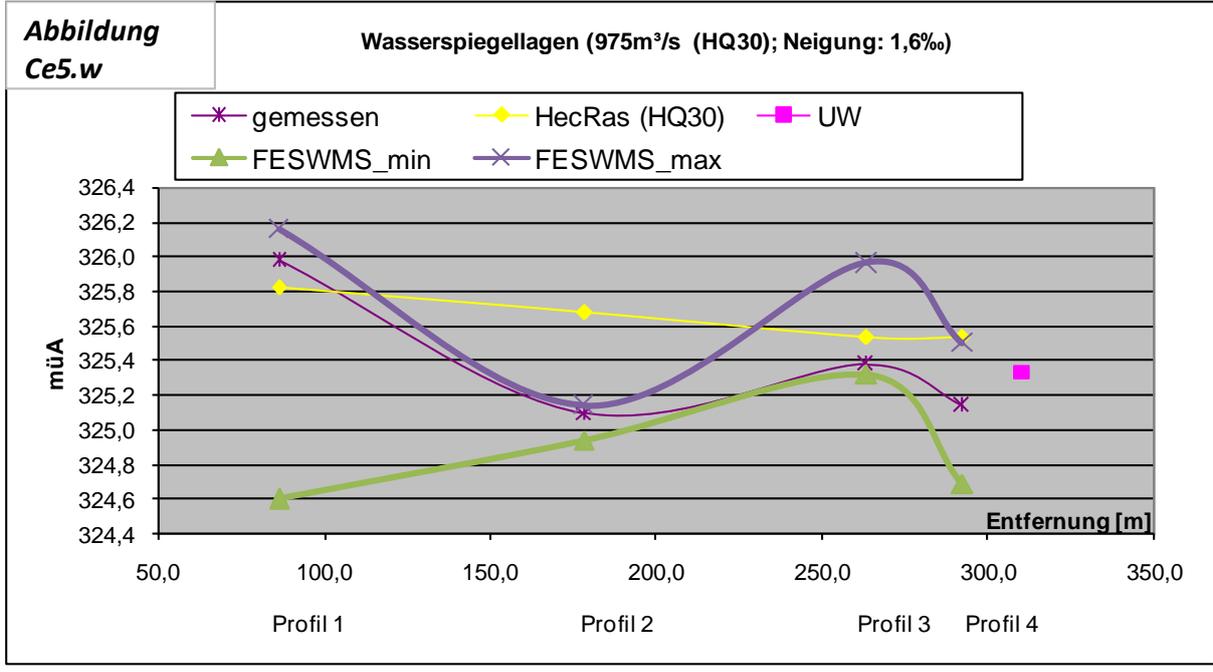
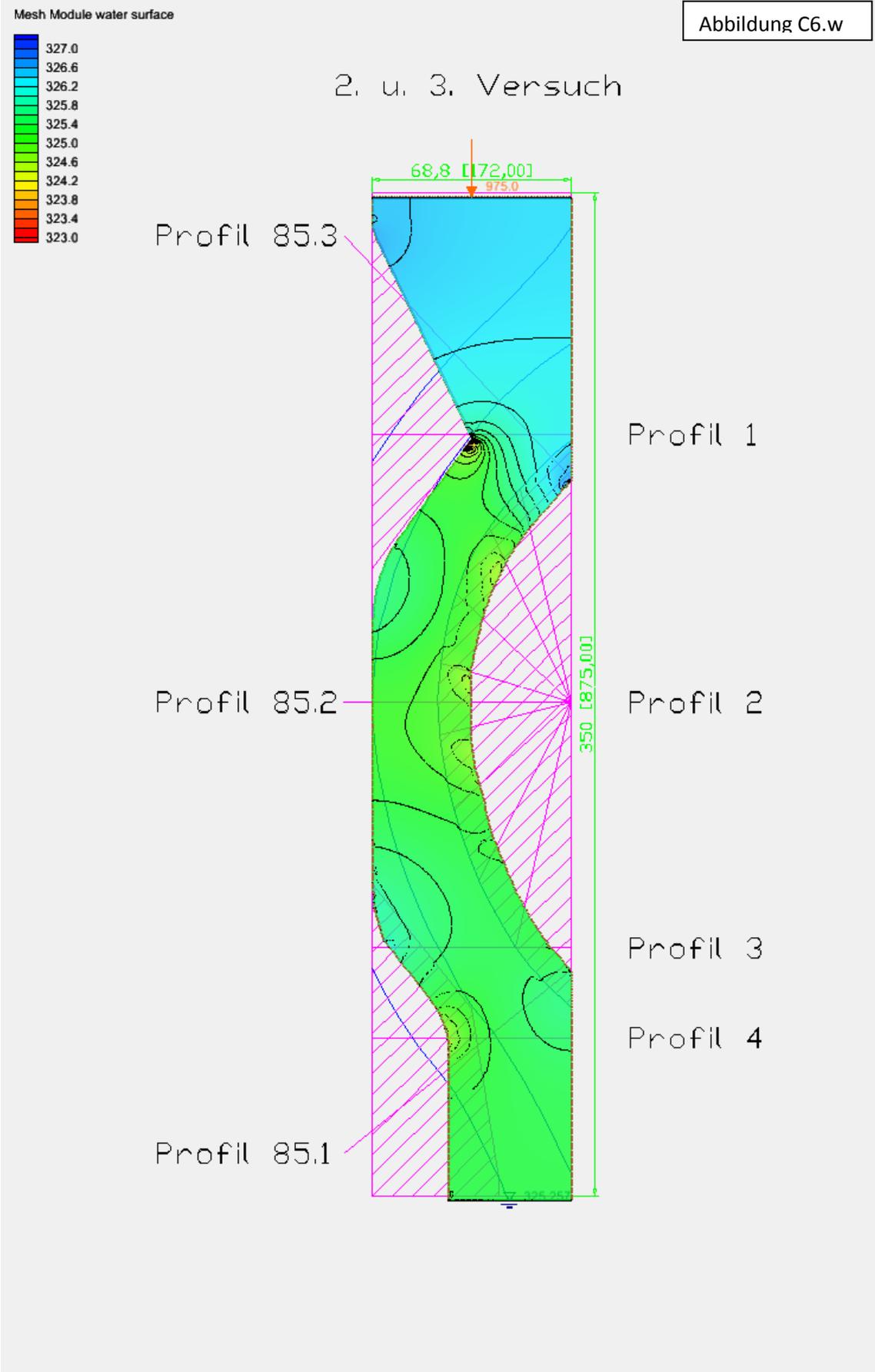
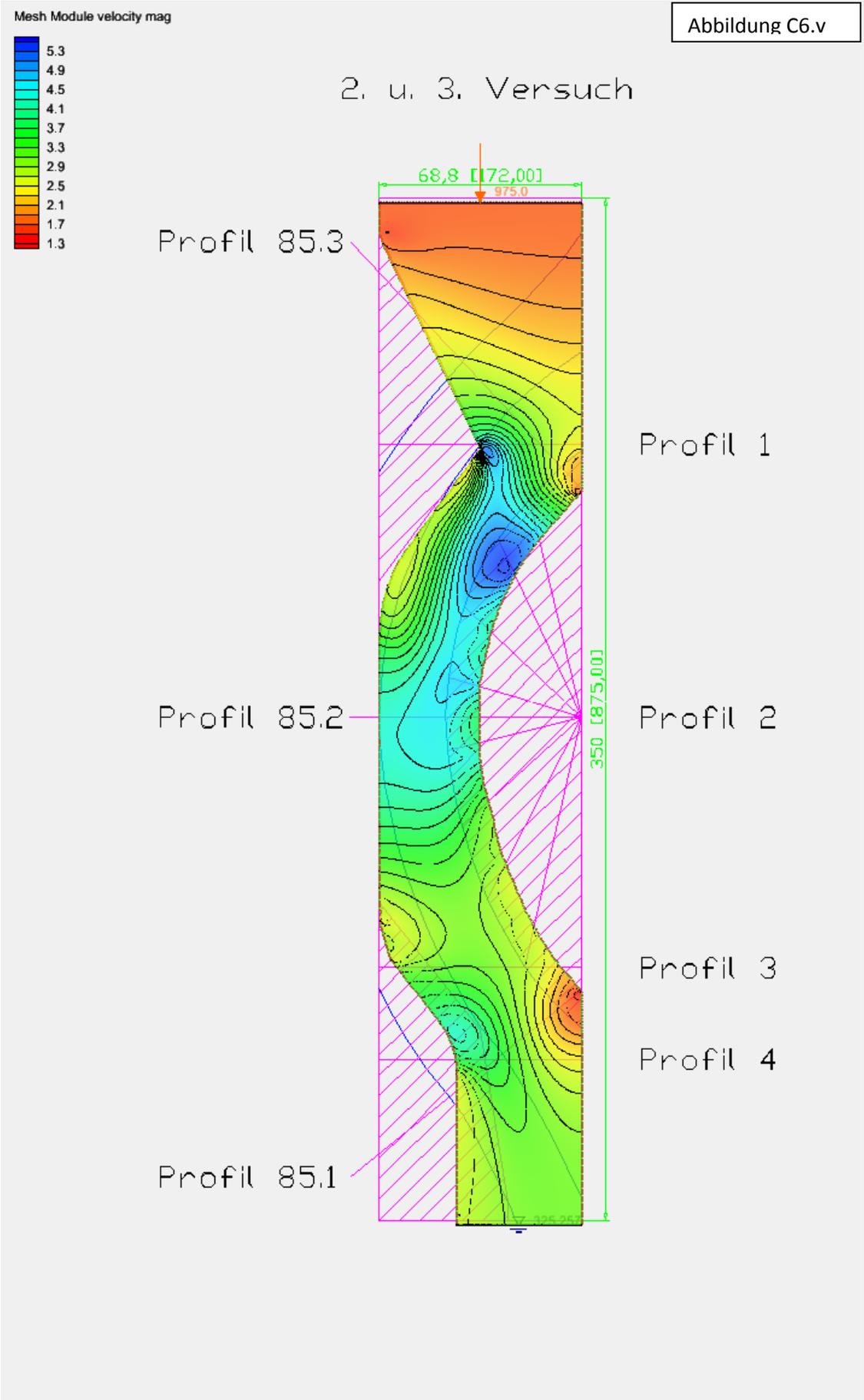


Abbildung C6.w



Anhang C



Anhang C

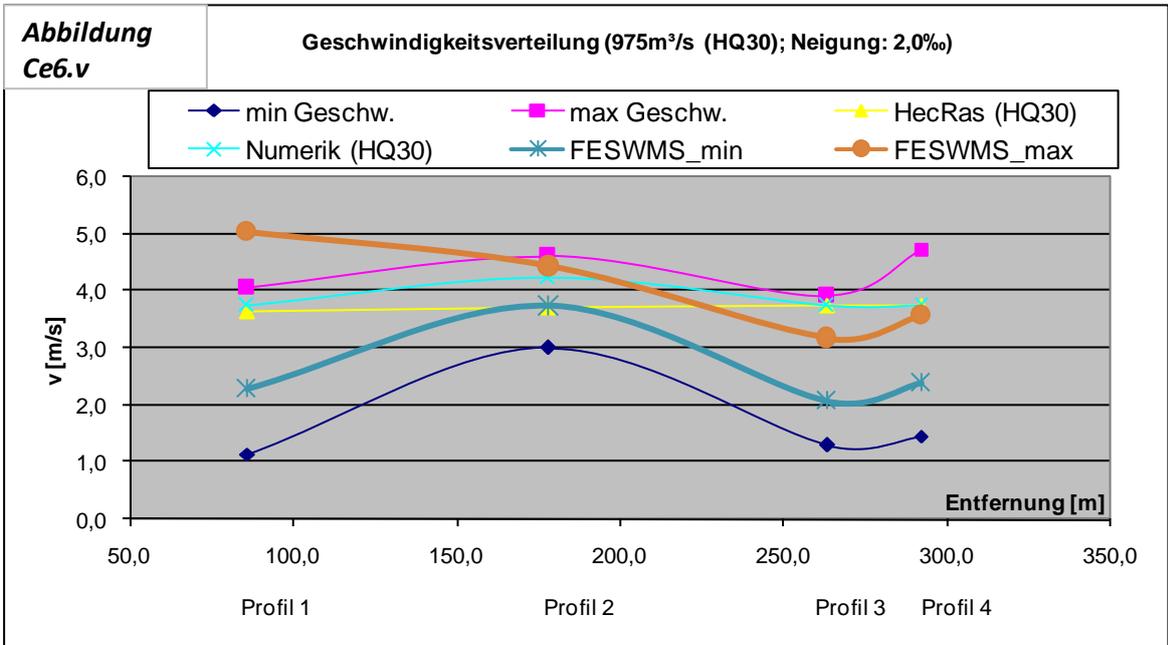
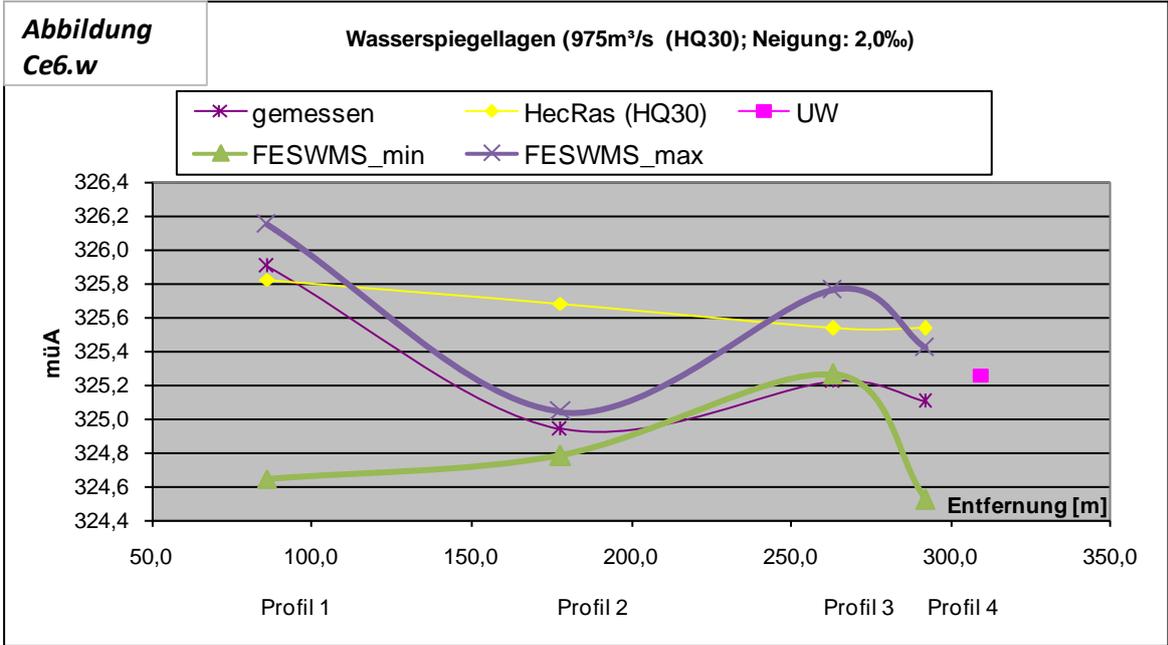
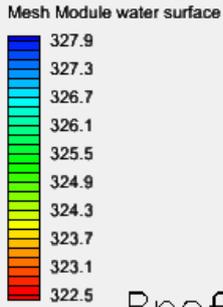
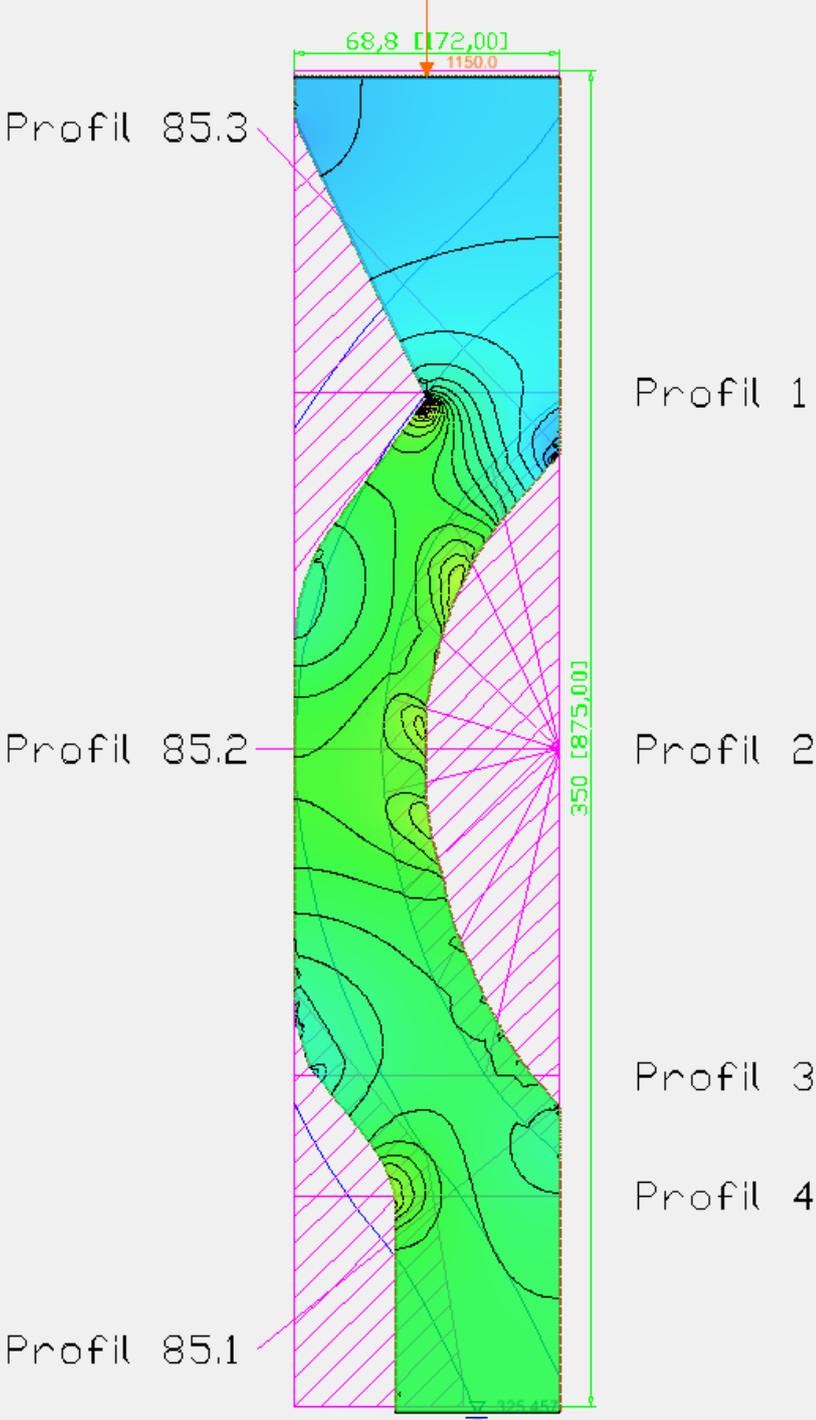


Abbildung C7.w

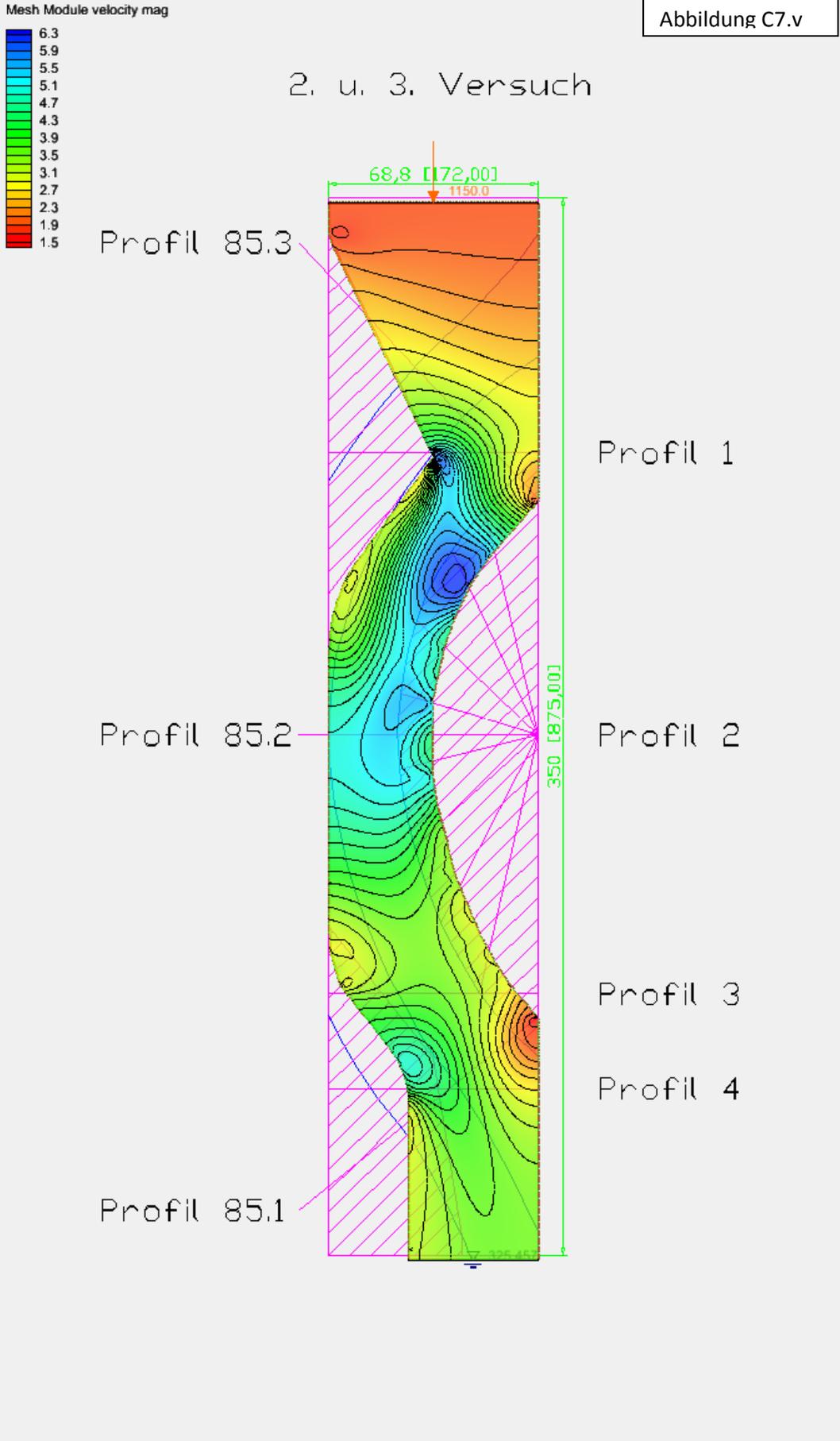


2. u. 3. Versuch



Anhang C

Abbildung C7.v



Anhang C

Abbildung Ce7.w

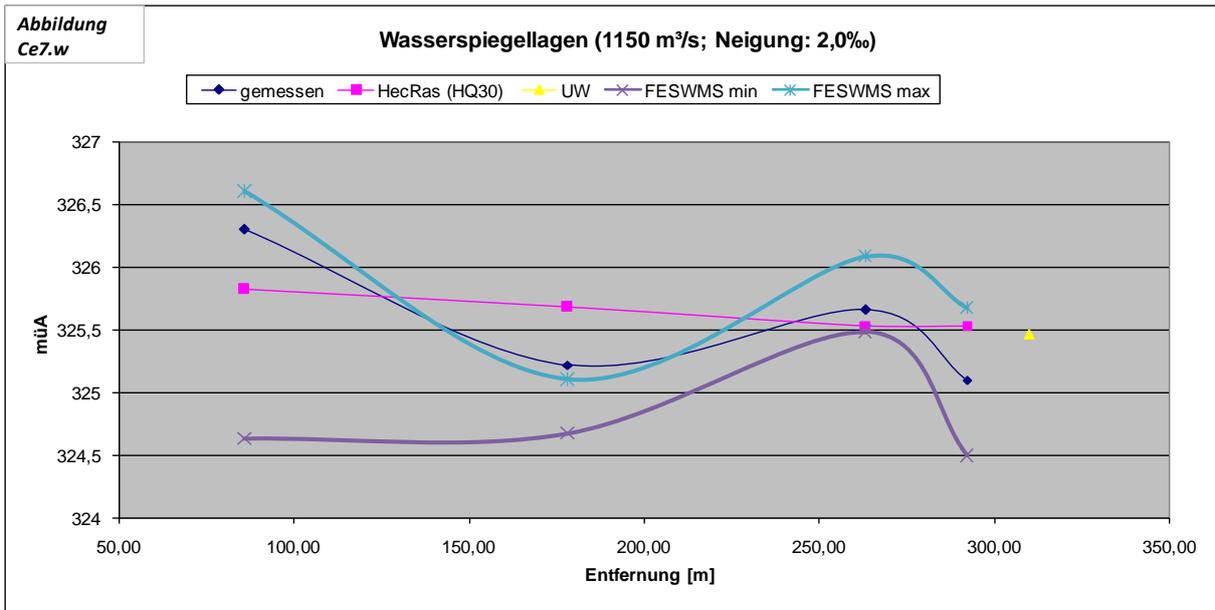


Abbildung Ce7.v

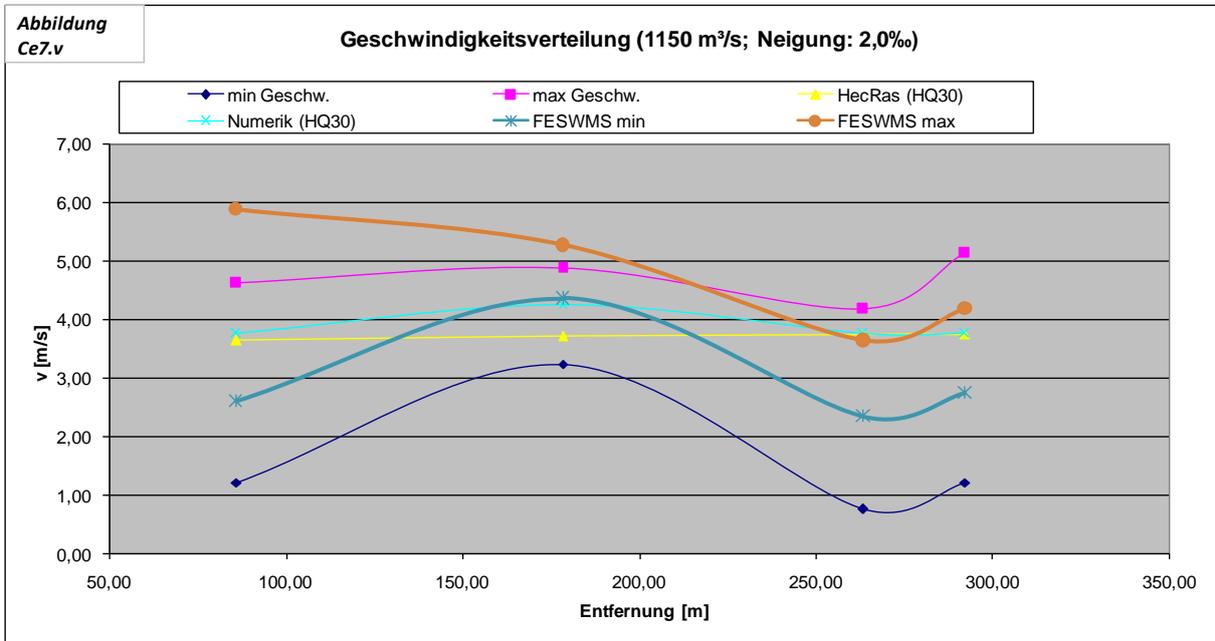
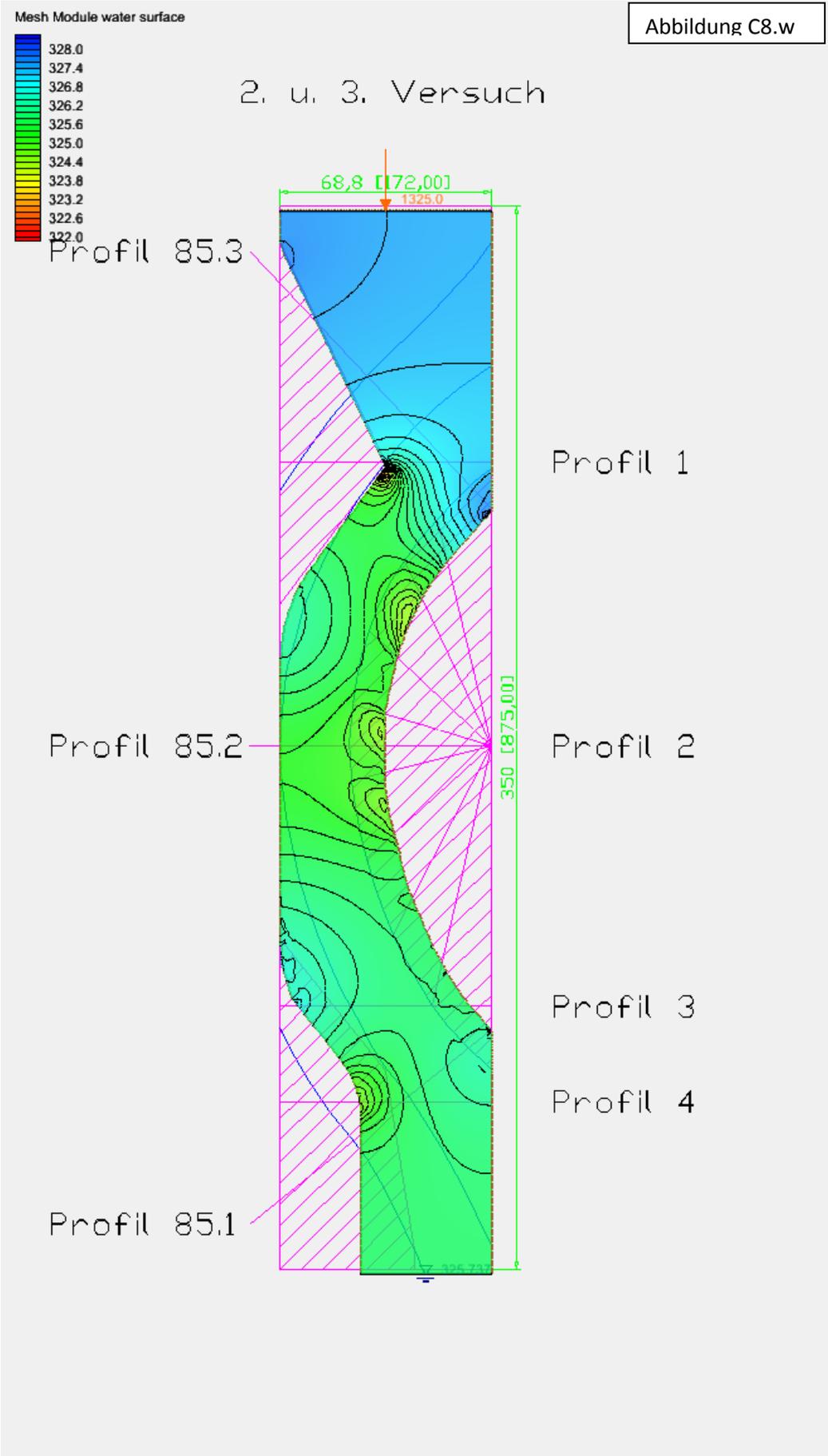
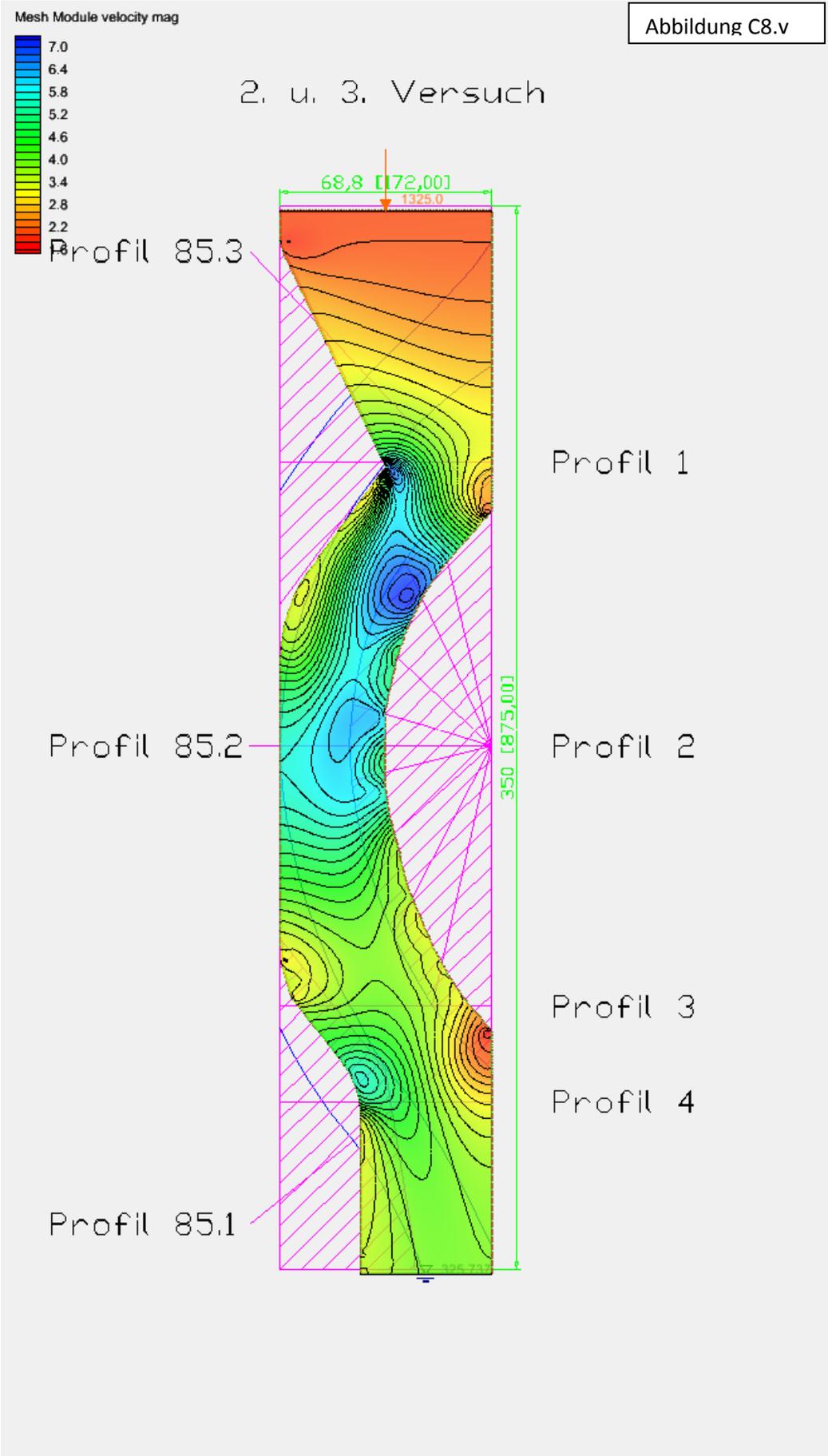


Abbildung C8.w



Anhang C

Abbildung C8.v



Anhang C

Abbildung Ce8.w

Wasserspiegellagen (1325 m³/s (HQ100); Neigung: 2,0‰)

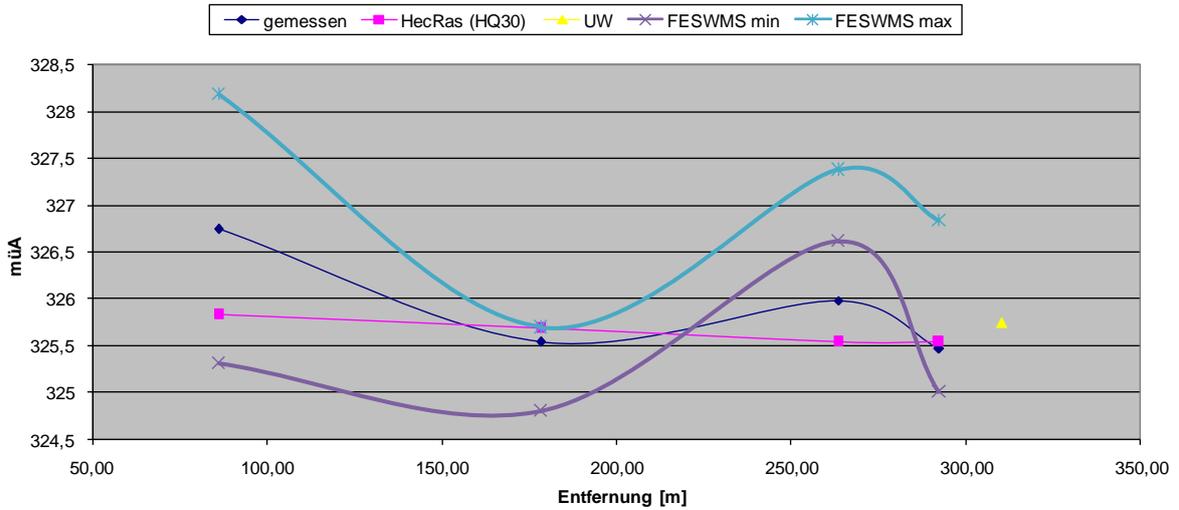


Abbildung Ce8.v

Geschwindigkeitsverteilung (1325 m³/s (HQ100); Neigung: 2,0‰)

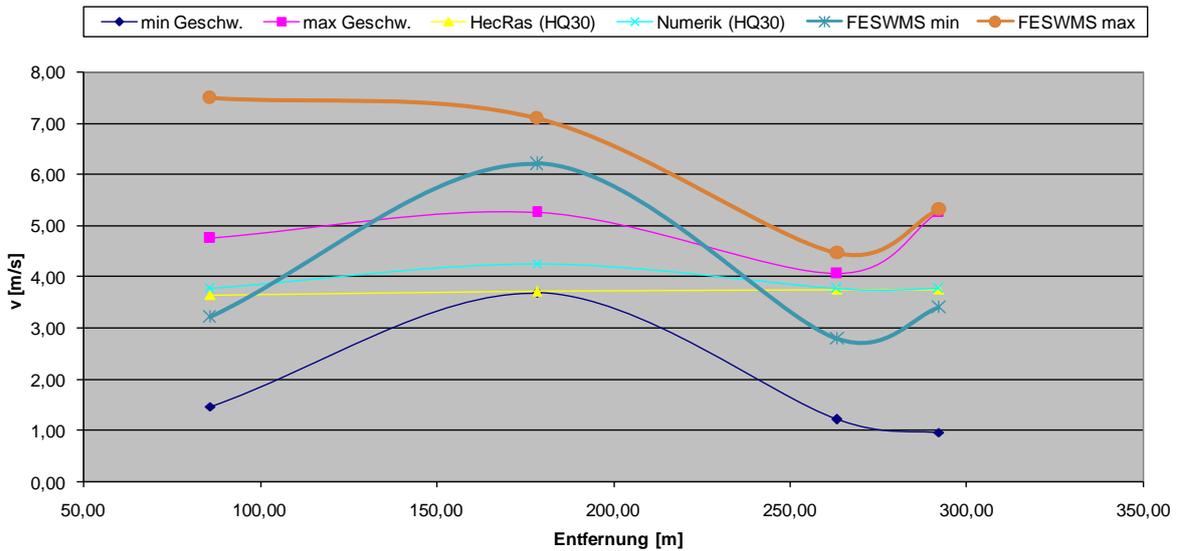
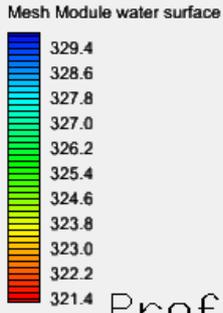


Abbildung C9.w

2. u. 3. Versuch



Profil 85.3

68,8 [172,00]
1023.0

Profil 1

Profil 85.2

350 [875,00]

Profil 2

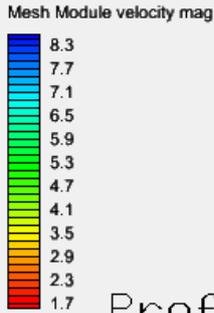
Profil 3

Profil 85.1

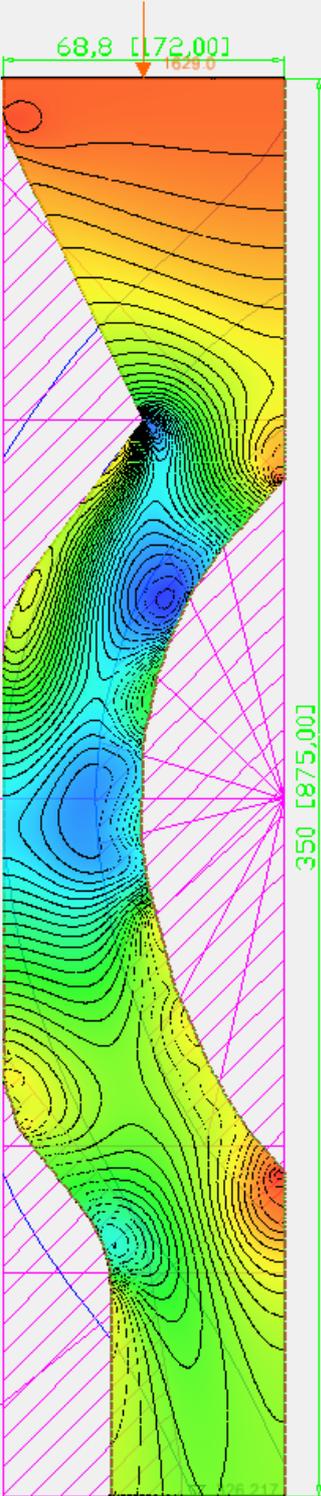
Profil 4

Abbildung C9.v

2. u. 3. Versuch



Profil 85.3



Profil 1

Profil 85.2

Profil 2

Profil 3

Profil 85.1

Profil 4

Anhang C

Abbildung Ce9.w

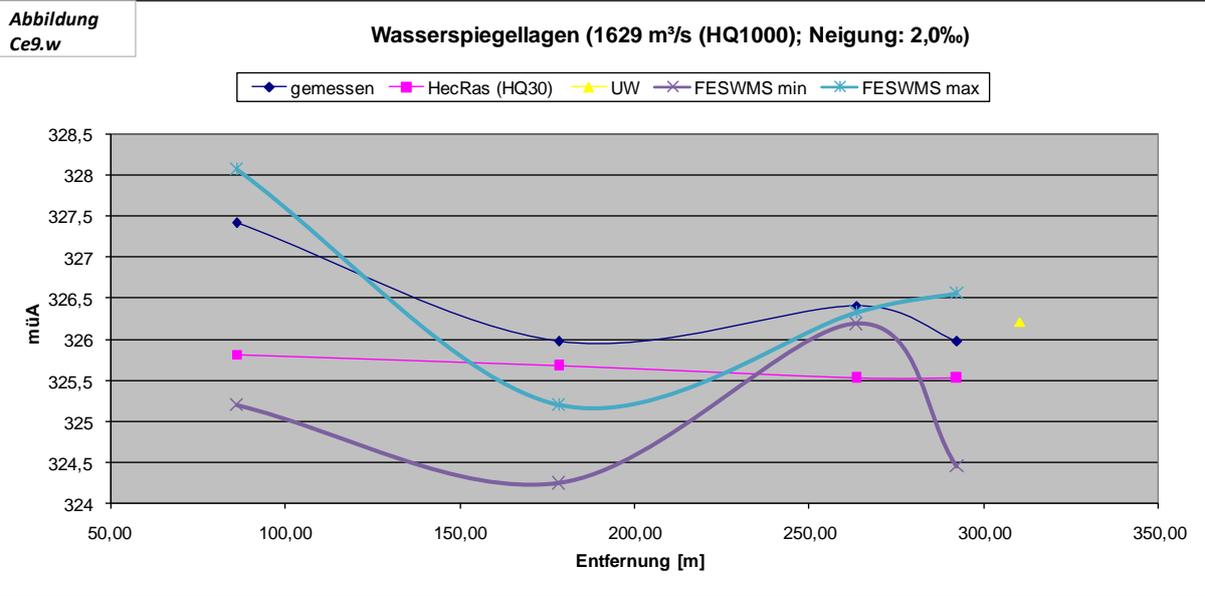
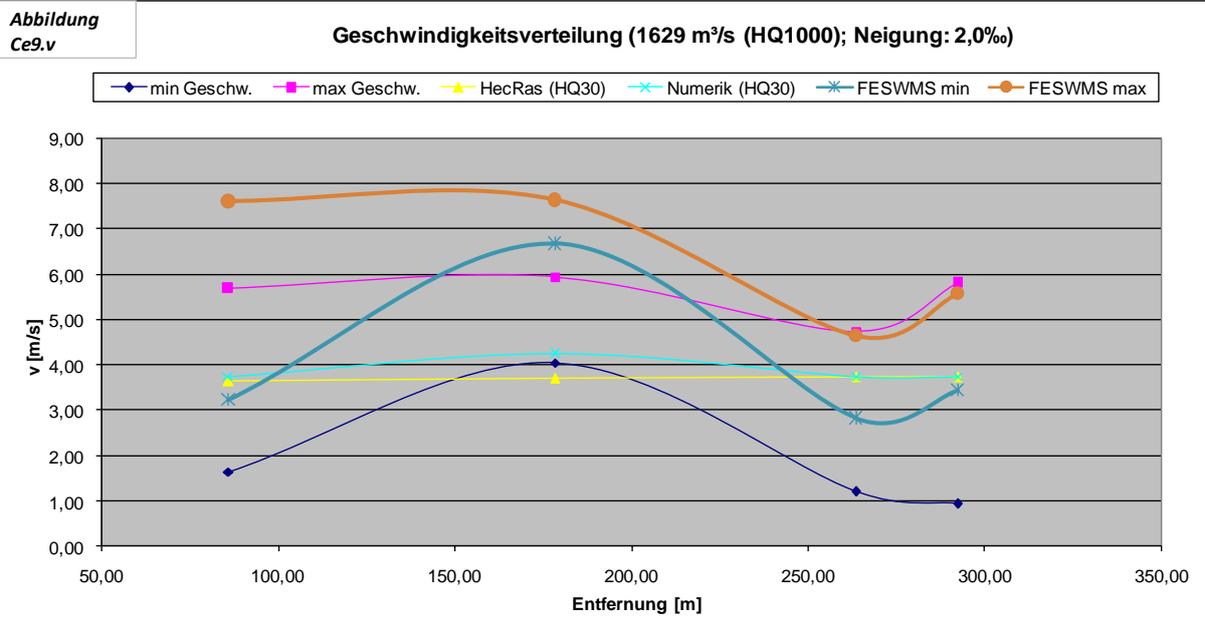


Abbildung Ce9.v



Anhang C